

第187研究部会

海洋構造物の深海係留に関する調査研究

報告書

昭和57年3月

社団法人
日本造船研究協会

深海域における浮遊式海洋構造物の係留については、浮体の挙動及び係留力の推定法並びに係留用機器等実用的な設計法が確立されていないのが現状である。

そこで、それらについて総合的な調査研究を行い、より理想的な深海係留技術を確立に必要な要素技術及び関連技術の段階的確立を図ることを目的とした。

本調査研究は4ヶ年計画であり、本年度は、その第1年度で既存の浮遊式海洋構造物の係留に関する基礎調査を行うと共に浮体の挙動及び係留力の推定法並びに係留用機器等の技術の現状調査及び深海係留への適用性とその問題点を摘出した。また、昭和57年に実施する実験的研究の試験方案を作成した。

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会昭和 56 年度補助事業「海洋構造物の基礎的研究」の一部として、日本造船研究協会第 187 研究部会において実施した「海洋構造物の深海係留に関する調査研究」の成果をとりまとめたものである。

第 187 研究部会委員名簿（敬称略・五十音順）

部 会 長	安 藤 定 雄（船舶技術研究所）	
委 員	朝 田 宏（石川島播磨重工業）	浅 野 眞 三（日 本 鋼 管）
	新 井 信 一（日 立 造 船）	伊 藤 剛 平（日本造船工業会）
	井 上 義 行（横 浜 国 立 大 学）	岩 佐 成 明（住 友 重 機 械 工 業）
	宇 ノ 木 賢 一（三 菱 重 工 業）	太 田 垣 由 夫（石 川 島 播 磨 重 工 業）
	岡 武 秀 雄（三 井 造 船）	小 寺 山 亘（九 州 大 学）
	小 保 方 準（住 友 重 機 械 工 業）	鐘 ケ 江 官 朗（日 立 造 船）
	小 段 範 久（日 本 鋼 管）	小 林 正 典（三 井 造 船）
	酒 井 義 雄（日 本 鋼 管）	堺 由 輝（川 崎 重 工 業）
	坂 尾 稔（川 崎 重 工 業）	庄 司 邦 昭（東 京 商 船 大 学）
	鈴 木 信 一（新 日 本 製 鐵）	関 田 欣 治（新 日 本 製 鐵）
	高 木 幹 雄（広 島 大 学）	田 中 陽（川 崎 重 工 業）
	中 西 宏（神 戸 製 鋼 所）	仲 渡 道 夫（広 島 大 学）
	日 笠 則 明（日本海事協会）	藤 野 正 隆（東 京 大 学）
	村 山 敬 一（石 川 島 播 磨 重 工 業）	森 庸 寛（日 本 鋼 管）
	吉 田 宏 一 郎（東 京 大 学）	米 家 卓 也（日本海事協会）
討 議 参 加 者	小 川 和 夫（日 本 鋼 管）	坂 田 隆 司（川 崎 重 工 業）
	島 田 潔（三 井 造 船）	田 嶋 栄 吉（川 崎 重 工 業）
	馬 場 哲 治（日 立 造 船）	早 崎 清 志（神 鋼 鋼 線）
	藤 永 隆 志（川 崎 重 工 業）	松 本 光 一 郎（日 本 鋼 管）
	山 岸 直 人（石 川 島 播 磨 重 工 業）	山 本 崇 也（三 菱 重 工 業）

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 本調査研究の目的	3
第3章 基本的な考え方	4
第4章 基礎調査	5
4.1 海洋構造物とその係留諸元	5
4.1.1 稼動水深と構造物のタイプ、大きさとの関係	5
4.1.2 稼動水深と係留方式との関係	5
4.1.3 稼動水深とアンカー重量との関係	6
4.1.4 稼動水深と設計波高との関係	7
4.1.5 稼動海域と設計波高との関係	7
4.1.6 係留水深の動向	7
4.2 係留方式、係留装置	16
4.2.1 各種係留方式の特徴	16
4.2.2 深海係留に適した係留方式と係留装置	16
4.3 自然環境の設計条件	19
4.3.1 各海域における設計条件	19
4.3.2 船級協会基準による設計条件	19
4.3.3 浮体形式、係留方式と自然環境	23
4.4 荷重許容量	25
4.4.1 構造物に働く外力の計算方法	25
4.4.2 係留装置の設計条件	29
第5章 浮体の挙動及び係留力の推定法	32
5.1 調査対象範囲	32
5.2 潮流による索鎖の大変形及び索鎖の静的・動的特性	32
5.2.1 潮流による索鎖の大変形	33
5.2.2 索鎖の静的・動的特性	34
5.3 緩係留における長周期運動	41
5.3.1 深海係留と長周期運動	41
5.3.2 風の構造と風外力に関する研究の現状	41
5.3.3 波漂流力に関する研究の現状	49
5.3.4 係留浮体の応答計算法	52
5.4 複合索・鎖	70
5.4.1 複合索・鎖の特徴	70
5.4.2 複合索・鎖の係留特性計算法	71
5.4.3 複合索・鎖の実施・検討例	75
5.4.4 複合索・鎖の問題点	82

第6章 係留用要素機器	84
6.1 調査対象範囲	84
6.1.1 一般	84
6.1.2 調査項目	84
6.2 浅海係留と深海係留との相違	84
6.2.1 浅海係留と深海係留との相違	84
6.2.2 海洋環境	86
6.2.3 係留方式	93
6.3 索の構造とコーティング	98
6.3.1 索の構造	98
6.3.2 索のコーティング	123
6.3.3 索端加工	124
6.4 ロープの耐久性	129
6.4.1 ワイヤーロープの疲労特性	129
6.4.2 海水中におけるワイヤーロープの劣化	137
6.4.3 合成繊維ロープ	144
6.5 チェーンの強度	149
6.5.1 チェーンの種類	149
6.5.2 チェーンに関する規格	149
6.5.3 チェーンの静的強度	152
6.5.4 チェーンの疲労強度	155
6.5.5 チェーンの強度についての問題点	159
6.6 基礎調査	161
6.6.1 新係留ラインの可能性	161
6.6.2 深海施工法	169
6.6.3 維持補修方法	195
6.6.4 海底土質	196
6.6.5 海底土質と把駐力	206
6.6.6 高把駐力アンカー・シンカー	229
第7章 昭和57年度において実施する実験方案	231
7.1 索鎖の要素に働く流体力に関する実験	231
7.2 索の強度に関する実験	233
7.3 鎖の強度に関する実験	234
第8章 結　　言	237

第 1 章 緒 言

わが国は、国土が狭隘で、かつ地勢的にも山地が多く、四方を海で囲まれているため、古くから海洋を通して人類は海洋から多大の恩恵をこうむって来ていると共に、文化形成にも海洋の影響が色濃く残っていて海洋との関係が広く、かつ、深くなっている。また、わが国における沿岸利用としては、江戸時代から海岸低地の干拓が行なわれ、それ以後も自然環境条件に恵まれている内海や内湾の臨海都市部の埋立が進められて来ている。

一方、わが国は、高度に発達した基幹産業を保有し、資源のほとんどを海外からの輸入に依存しているにも拘わらず、豊かな国民生活を保有しているため、わが国は、今後も社会経済の発展と共に大都市や大規模工業地帯周辺の空間需要が益々増加の一途を辿るであろうと予測される。

それに対処するためには、陸地や臨海部の埋立といったこれまでの国土利用パターンにとらわれることなく、海洋空間の高度利用パターンを可能にする技術を早急に開発する必要性が叫ばれている。

そこで、深海域における浮遊式海洋構造物の係留技術に関して段階的な技術開発を本研究部会として取り組むこととした。

なお、本研究部会の調査研究は、昭和 56 年度から 4 ケ年計画で行なうものであり、本報告書は、その初年度として下記の調査研究を実施し、その成果をとりまとめたものである。

次に本研究部会が昭和 56 年度において実施した研究の概要を記述する。

(1) 基礎調査

深海域における係留技術の調査研究を実施するに当って、まず基礎調査を行なった。その目的は、既存及び計画中の浮遊式海洋構造物に関して主要寸法、型式、稼動水深、稼動海域、係留方式及び設計条件等を文献による調査を行ない、稼動水深に対する浮遊式海洋構造物の型式と主要寸法、係留方式、アンカーの重量及び設計波高等と関係を調べると共に稼動海域と設計波高との関係を調べた。

つぎに、各船級協会等の設計基準に基づいて自然環境条件の設定及びそれに対する外力の推定法を調べると共に係留装置の設計条件を調べた。

(2) 浮体の挙動及び係留力の推定法

まず、浮体の挙動及び係留力に関して文献調査する範囲を検討し、その結果に基づいて係留ラインが潮流による大変形、索・鎖の係留ラインの静的張力特性と動的変動張力、緩係留状態の係留浮体の長周期運動等の技術や推定法の現状を調べると共にその問題点を摘出した。また、深海域における浮遊式海洋構造物の係留システムとしては索・鎖の複合係留システムが有望視されるため、複合索・鎖の特徴と係留特性の計算法、複合索・鎖用の係留機器及び深海係留の実施例や検討例等について調査すると共にその問題点を摘出した。

(3) 係留用要素機器

まず、係留用要素機器に関する文献調査する範囲を検討し、その結果に基づいて浅海係留と深海係留との相違点、係留用索・鎖及び係留機器と施工等について文献調査を行った。

(イ) 浅海係留と深海係留との相違

ここでは、海洋環境による浅海と深海との区分の目安の検討を行うと同時に各種係留方式の深海係留への適用性等について検討した。

(ロ) 係留用索・鎖

係留用索に関しては、鋼索と繊維索の構造、索のコーティング及び索端加工の現状を調査すると共に、

索の疲労及び腐食等に関する文献調査を行った。

係留用鎖に関しては、チェーンの種類、チェーンに関する規格、チェーンの応力分布及び鎖の曲げ強度や比強度等の静的強度及びチェーンの疲労強度について現状調査を行ない、特にチェーンの強度についての問題を摘出した。

(iv) 係留用機器及び施工等の基礎調査

i) 新係留ラインの可能性

カテナリー理論に基づいて深海係留方式の可能性を検討し、係留ライン用の材料の改良及び水中重量の低減等について方向づけを示した。

ii) 深海における施工法

深海における係留システムの施工法として引摺型と重量型アンカーの施工、特殊アンカーの沈設、パイル・アンカーの施工及びペス・ストラクチャーと浮体との接続法について文献にて現状調査を行なった。

iii) 維持補修方法

係留設備に関して法令に基づく検査及び自主的保守・点検等を概説すると共に、係留設備の監視法及び検査法についての現状と技術開発すべき項目を検討した。

IV) 海底土質

海底土質の日本統一土質分類法を示し、既存の海底土質に関する資料及び海底土質の試験法について調査した結果を示した。

V) 海底土質と把駐力

海底土質の状態定数の推定法、海底土質の種類と特性、把駐力係数の求め方、各種アンカーの把駐力等について調査した結果を示すと共に、今後調査を要する諸点を摘出した。

VI) 高把駐力アンカー・シンカー

アンカー・シンカーの分類を行ない、その概略説明と現状に関する調査結果を示した。

(4) 実験方案の作成

本研究部会が昭和56年に実施した前述の調査研究に基づいて、まず、早急に究明すべき課題を抽出しその中から共通的・基礎的技術課題で特に重要な項目を選定して昭和57年度において実施する内容を決定した。

(i) 係留用索・鎖の流体力

係留ラインの潮流による大変形の推定精度を向上させるために必要となる索・鎖に働く潮流力を部分模型を用いて実験的に求める内容を設定した。

また、係留ラインが拳動している場合に、係留ラインに働く変動張力の推定精度を向上させるために必要となる索・鎖の強制動搖時の流体力特性を部分模型を用いて実験的に求める内容を設定した。

(ii) 係留用索の疲労強度

索の疲労強度は、既存資料では非常にバラツキが大きいため、索の疲労強度のバラツキの究明及び索の径の変化に対する疲労強度との関係を繰り返し疲労試験にて実験的に求める内容を設定した。

(iv) 係留用鎖の疲労強度

鎖の疲労強度の高精度予測法を確立するため、荷重条件及び応力比を系統的に変させ、繰り返し疲労試験にて鎖の強度に関して実験的に求める内容を設定した。

第2章 本調査研究の目的

わが国は、全陸地面積が約37万平方キロと狭隘であるにも拘わらず、地勢的に山地が多く、可住地に使用できる国土が全面積の約20%程度である。その上、四方を海洋で囲まれている。したがって、わが国の人口増加及び高度の社会経済の維持等に対処するためには、海洋空間等の有効的な利用の必要性が痛感させられる。

現時点では、国際海洋法によって經濟水域を200海里であるとしているが、その水域の内、漁業、港湾、埋立及び海洋性レクリエーション等の場として既に利用が進められている範囲は、水深が0~20m程度の水域であり、もしも、水深が20m以下の水域を全て利用しても約3.1万平方キロ程度でわが国の經濟水域である約451万平方キロの0.7%以下に過ぎないといえる。

したがって、未だ未開発で空間利用に対して拡大な場を提供し得るという大きなポテンシャルを有している深海域の海面の有効利用は、わが国の発展にとって重要な意味を持っているといえる。

近年、深海域における海洋資源の開発及び海洋空間の有効利用等が具体的に検討されるようになって来ているが、その場合の基盤となる浮遊式海洋構造物を実現させるために共通的・基盤的な要素技術の一つとして浮遊式海洋構造物を深海域に位置保持させる係留技術が最も重要な課題として挙げられる。

そこで、本研究部会は、海洋構造物の深海域における係留技術に関する調査研究に取り組むこととした。

係留技術に関しては、これまで種々の調査研究がなされて来ているが、具体的な係留技術となると未だ調査研究が不足しているといえる。なお、浅海域における係留技術に関しては、既に各種の調査研究が組織的に実施されていると共に浮遊式海洋構造物を係留した事例も数多くなって来ている。しかしながら、深海域における浮遊式海洋構造物の係留技術に関しては、潮流による係留ラインの変形、長周期運動、組み合せ索・鎖の強度及び施工法等浅海域における浮遊式海洋構造物の係留技術とは別の困難な問題が付随して来て計画及び設計段階での実用な係留技術が確立されていないのが現状である。

したがって、本研究部会としては、現時点における係留技術の深海域への適用性等の総合的検討を実施すると共により実現性のある深海域における係留技術を確立するために必要な要素技術や関連技術等の組織的な研究を行ない、深海域における浮遊式海洋構造物の係留技術に関して段階的な係留技術の確立を図ることを目的とする。

第3章 基本的考え方

深海域の海洋空間等の利用法としては、生産の場、貯蔵の場、輸送の場、余暇の場、生活の場及びそれらの複合の場等が考えられるが、現在実際に深海域の海洋を利用しているものは、船舶による海上輸送、海底鉱物資源開発、ブイや船舶による海洋観測、調査及び探査並びに漁業等に過ぎず、真の海洋空間利用とはいえないが、深海域における浮遊式海洋構造物となると事例が少なく、ほとんどが計画及び構想例である。

したがって、本研究部会としては、調査研究の基本はあくまでも深海域における浮遊式海洋構造物の係留技術に関する要素であるとしても、基礎調査の段階においては水深にとらわれずに可能な限り広範囲の海洋構造物を対象にして調査することとした。

その調査研究を実施するに当っての基本的考え方は次の通りである。

- (1) 海洋構造物の種類は多岐に亘るが、水面浮遊式の海洋構造物を調査対象物とする。その型式は半潜水型、柱状型及びブイ型を主体にし、箱型及び船型も一応加えるが、潜水型は対象から除外する。
- (2) 浮遊式海洋構造物の用途であるが、海底資源開発関連、海洋エネルギー利用関連、海洋観測・調査及び探査並びに海洋空間の有効利用等に使用する浮遊式海洋構造物を調査対象とする。
- (3) 深海域の水深を定義づけすることは、困難であるが、一応大水深海域を大陸棚以深として水深が 200 ~ 1,000 m 程度を今回の調査研究における深海域であるとする。
- (4) 浮遊式海洋構造物の設置または稼動海域は、氷海域を除外する全ての海洋を調査対象海域とする。
- (5) 位置保持方式としては、索・鎖による 1 条係留、多条係留及びテンションレグ係留を調査研究の主体とし、ドルフィン・ダンパー及び推進器やスラスターによる自動位置保持と前述の索・鎖係留との併用型も含ませるが、ドルフィン・ダンパー及び自動位置保持は調査研究の対象から除外する。

以上の基本的な考え方を基にして係留技術に関して基礎調査を行ない、その結果に基づいて本調査研究の目的である深海域における浮遊式海洋構造物の係留技術に関して段階的な係留技術の確立を図ることとする。

第4章 基礎調査

4.1 海洋構造物とその係留諸元

浮遊式海洋構造物（計画も含む）について、その大きさ、タイプ、稼働水深、稼働海域、係留方式、設計条件等を文献¹⁾により調査した結果を付録表4.1.1に示す。表中の構造物の長さ（L）は公表値にその定義のないものが多く、ヘリコプターデッキやアンカーラック等を含めた全長、垂線間長或いは水線長であるかは不明であるが、構造物の大きさを示すひとつの目安として公表値をそのまま記入している。吃水(d)と排水量(△)は作業時のものである。また、セミサブについてはタイプを付録図4.1.1に示したように、便宜的にロワーハル型とフーチング型に大別して表4.1.1のタイプの欄にそれぞれ(L)、(F)と記入している。尚、ブイについては、付録図4.1.2から図4.1.9にその概略図を示す。

ここでは、付録表4.1.1をもとに次の項目について調査した。

- (1) 稼働水深と構造物のタイプ、大きさとの関係
- (2) 稼働水深と係留方式との関係
- (3) 稼働水深とアンカー重量との関係
- (4) 稼働水深と設計波高との関係
- (5) 稼働海域と設計波高との関係

以下にその結果を述べる。

4.1.1 稼働水深と構造物のタイプ、大きさとの関係

稼働水深と構造物のタイプ、大きさ（ここでは長さで代表させている）との関係を図4.1.10に示す。同図より稼働水深と構造物の長さとの間には相関はなく、稼働水深と構造物のタイプ、タイプと長さとの間にそれぞれ次のような関係があることがわかる。

- (1) ベッセルタイプ 最も広範囲の水深で使われており、長さも110～190mと大型である。
(船型)
- (2) ベッセルタイプ 稼働水深は、一部の例を除き40m以下の極めて浅い水深に限られており、長さも60m以下で小型である。
(バージ型)
- (3) セミサブタイプ 船型に次いで広い範囲の水深で使われており、稼働水深200～600mのものが多く
(ロワーハル型) いが、DYNACATのように1000m以深のものもある。長さは60～130mである。
- (4) セミサブタイプ 稼働水深は200～400mが多く、ロワーハル型よりも浅い水深で使われているようである。
(フーチング型) 長さは60～130mでロワーハル型と同じである。

4.1.2 稼働水深と係留方式との関係

稼働水深と係留方式との関係を図4.1.11に示す。係留方式は

- (1) 多点係留方式
- (2) 自動位置保持装置方式（Dynamic Positioning System - DPS）
- (3) テンション レグ プラットホーム（TLP）、ガイド タワー 等の揺動型構造物（Compliant

Platform) 方式

に大別できるが、図 4.1.11 より最も多く使われているのは多点係留方式で、次いで多点係留方式に補助装置としてスラスターを有するものが多く、DPS(スラスターのみ)を装備しているものは、船型とセミサブの一部であることがわかる。TLPは、付録表 4.1.1 にも示したように計画、試作がほとんどで、実機は 1984 年に北海の Hutton Field にて設置予定で、現在建造中の CONOCO 社の TLP だけであり、Guyed Tower の実機はない。²⁾

図 4.1.11 より多点係留方式では、ワイヤ或いはチェーン方式は OCEAN ENDEAVOUR のように水深が 900m を越すものもあるが、概して 450m 前後までで、それ以深ではワイヤとチェーンの複合索鎖方式が用いられていることがわかる。これは後述するように水深が増すとともにワイヤ、チェーンが大容量になり、とくにチェーンでは自重による係留効率のロスが大きくなり、不経済な係留になるためと思われる。

ワイヤ、チェーン方式に補助装置としてスラスターを有するものは、水深が 1200m までであり、それ以深は DPS(スラスターのみ)となる。また DPS を装備しているものの大部分は船型でありセミサブは少ない。

4.1.3 稼働水深とアンカー重量との関係

稼働水深とアンカー重量との関係を図 4.1.12 にて示す。同図より、ベッセル タイプ のバージ型を除きいずれのタイプの構造物でも 12 ~ 20t のアンカーが多用されていることがわかる。稼働水深とアンカー重量との相関は見受けられない。

船型よりもセミサブの方が大容量のアンカーを装備する傾向が見られ、セミサブでは 14t (30,000 lbs)、18t (40,000 lbs) のものが多く使われている。

また、アンカーの装備数を構造物のタイプ別に調べると、表 4.1.2 のようになり、船型とセミサブのローワーハル型では 8 個、セミサブのフーチング型では 9、10 個のものが多いことがわかる。ローワーハル型では各コーナーのカラムにそれぞれ 2 個づつ、フーチング型の 3 カラムのものでは各カラムに 3 個づつ、5 カラムのものは 2 個づつ装備しているのが一般的のようである。

表 4.1.2 構造物のタイプとアンカーの装備数

構造物のタイプ	4	6	7	8	9	10	12	16	17	18
Vessel Type (Ship Shape)	4			24		6	3	1	1	
Vessel Type (Barge Shape)			3	2						1
Semi-sub Type (Lower Hull)	1			68		3	2	1		
Semi-sub Type (Footing)			1		14	7				

4.1.4 稼働水深と設計波高との関係

設計波高は一般に異常時、作業時と移動時についてそれぞれ設定されるが、ここでは異常時、作業時について調査した。稼働水深と設計波高との関係を図4.1.13と図4.1.14に示す。

図4.1.13より異常時の波高は、船型では水深の増加と共に波高も高く設定されているようであるが、セミサブでは水深との相関は見受けられず、船型よりも高く、ほぼ30mになっている。またセミサブでもロワー・ハル型ではHAKURYU 111、V、OCEAN RANGERのように37mのものもある。

図4.1.14より作業時の波高は、船型では11mの例もあるが、大部分は5m以下であるのに対して、セミサブでは12m前後が多く(20m以上のものもある)、船型の2~3倍の波高となっている。このことから、セミサブの優れた動搖特性がうかがわれる。また、セミサブでもロワー・ハル型の方がフーチング型に比べて高い波高を設定しているようである。

4.1.5 稼働海域と設計波高との関係

4.1.4と同様に、稼働海域による異常時と作業時の設計波高の相違を調査した。その結果を図4.1.15に示す。

図4.1.15より異常時の波高は北海、欧州、北米(メキシコ湾を含む)、南米では30mがひとつ目安となっているようである。日本近海、北太平洋では北海などより高い37mになっているのが注目される。

図4.1.16より作業時の波高は異常時の約半分になっているようであるが、異常時と比べて同一海域内でのばらつきが大きくなっている。

4.1.6 係留水深の動向

構造物の建造時期と稼働水深との関係を図4.1.17に示す。同図に示されているものは大部分は海底石油掘削グリなので、この図から直ちに浮遊式海洋構造物全般の係留水深の動向をつかむことはできないが、最近10年間で稼働水深の中心が300m以深へ移行しているように思われる。また付録表4.1.1にも示したように、TLP、海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion - OTEC)の計画が数多くなされており、このことも係留水深の増加を促す要因となろう。

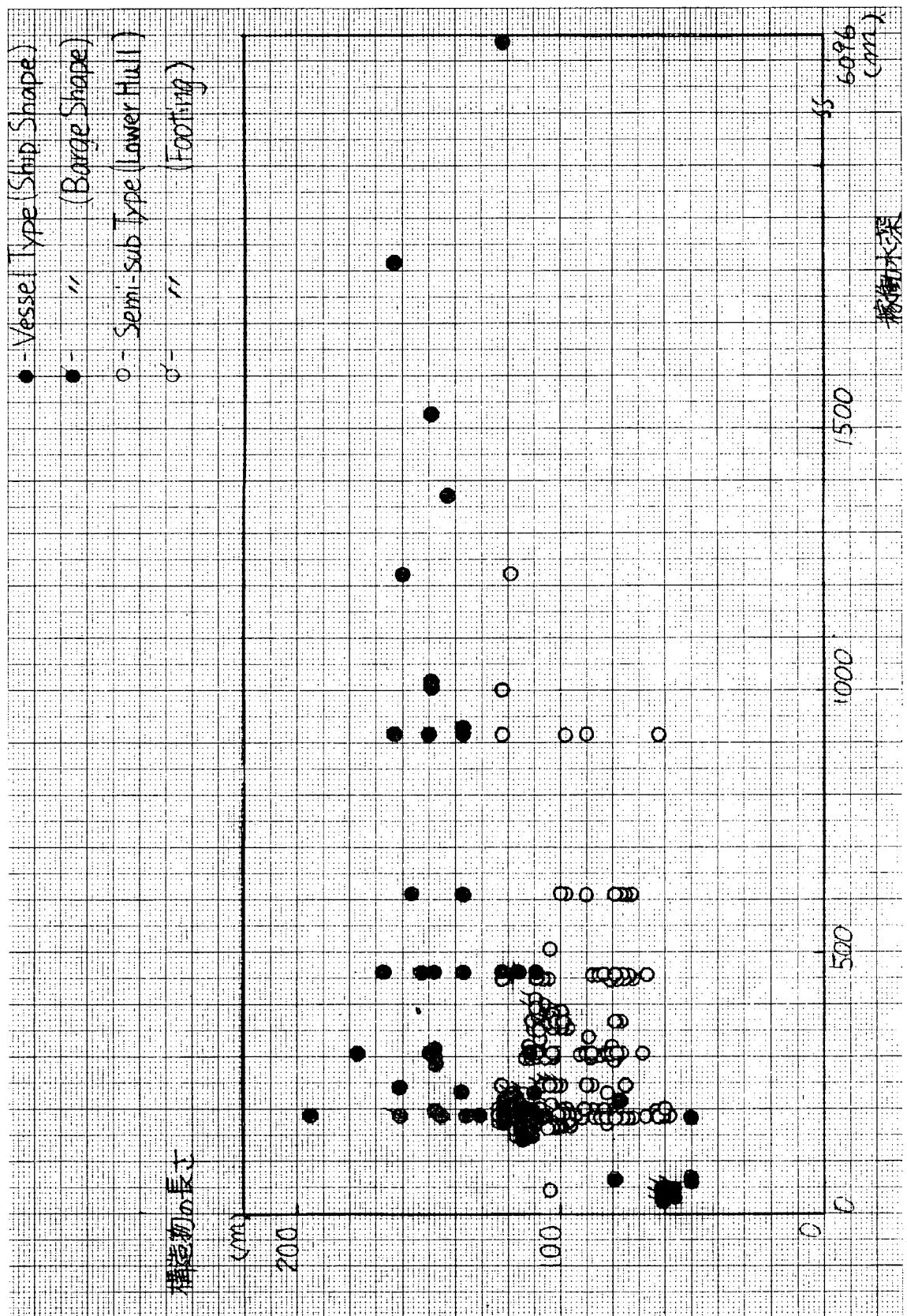
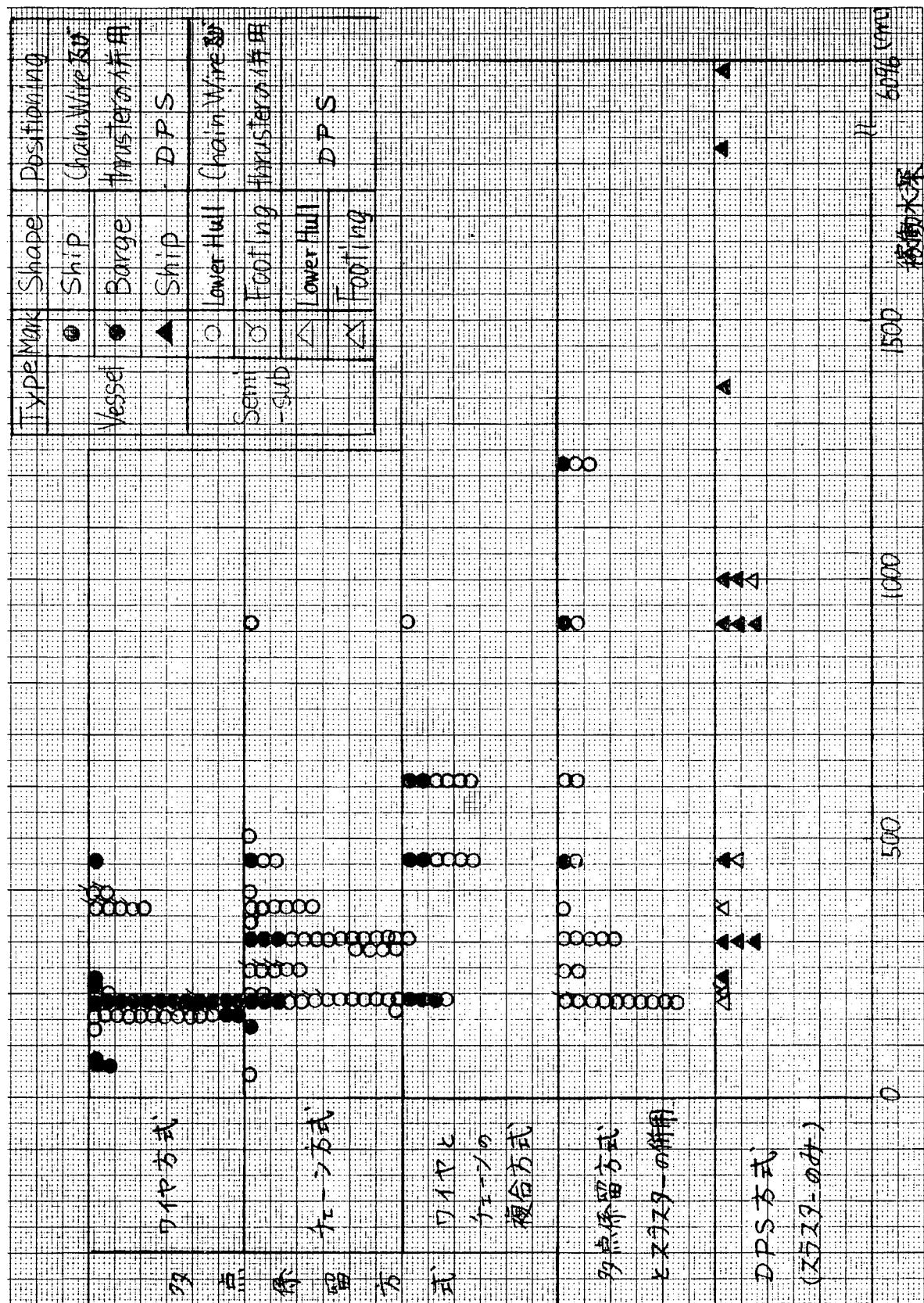


図 4.1.10 稼働水深と構造物の長さ



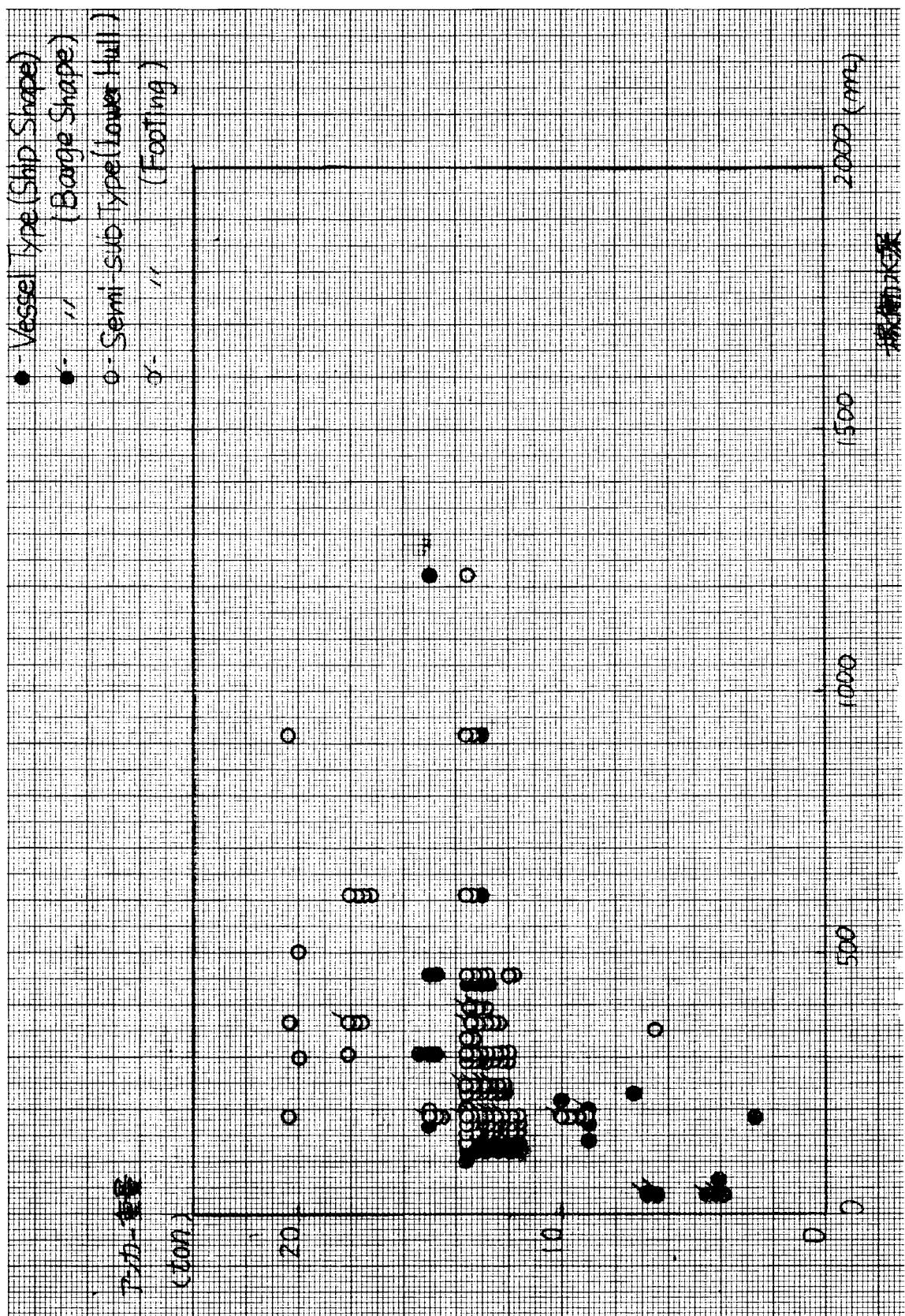


図 4.1.12 継続水深とアンカー重量

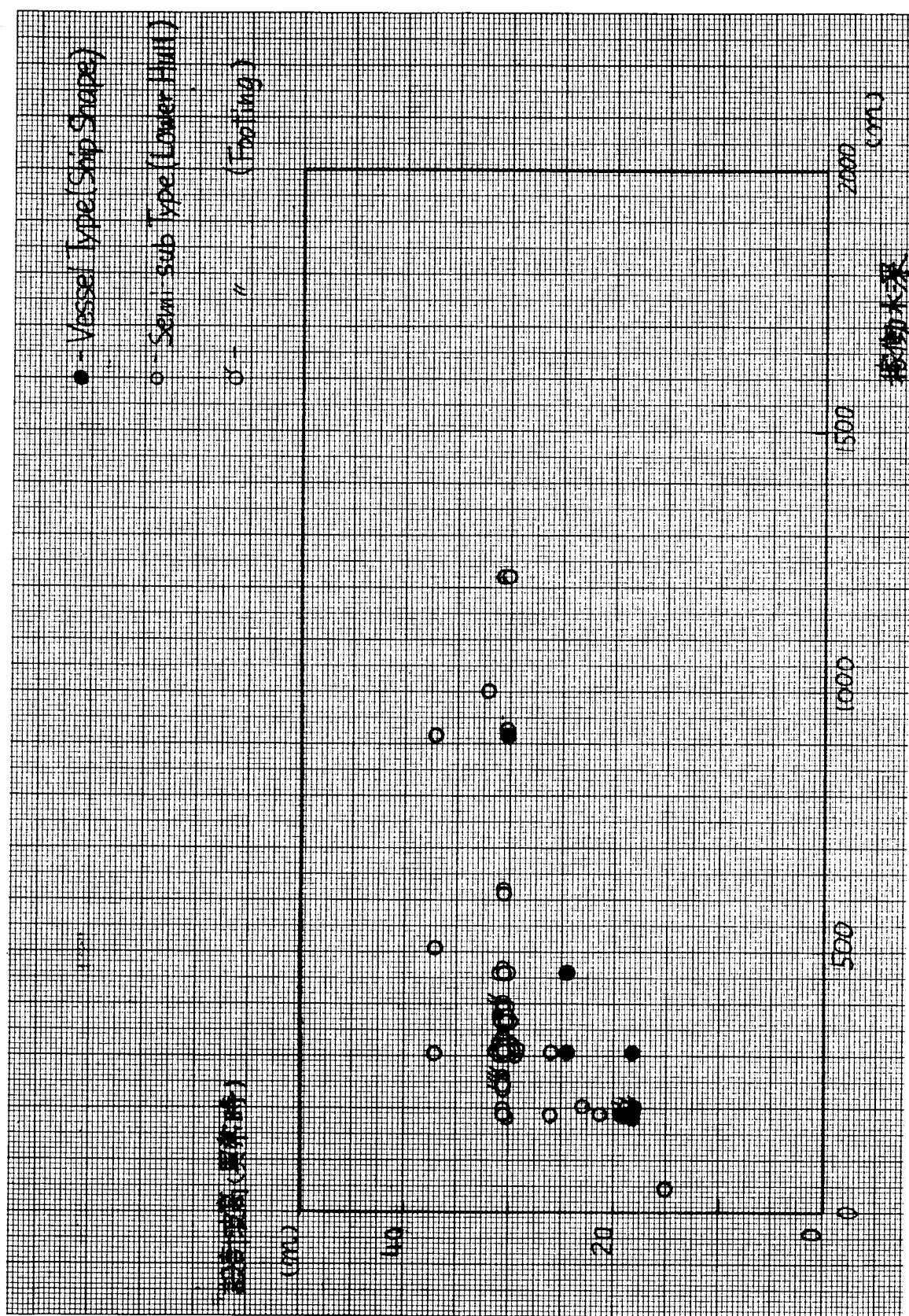


図 4.1.1.3 稼動水深と設計波高（異常時）

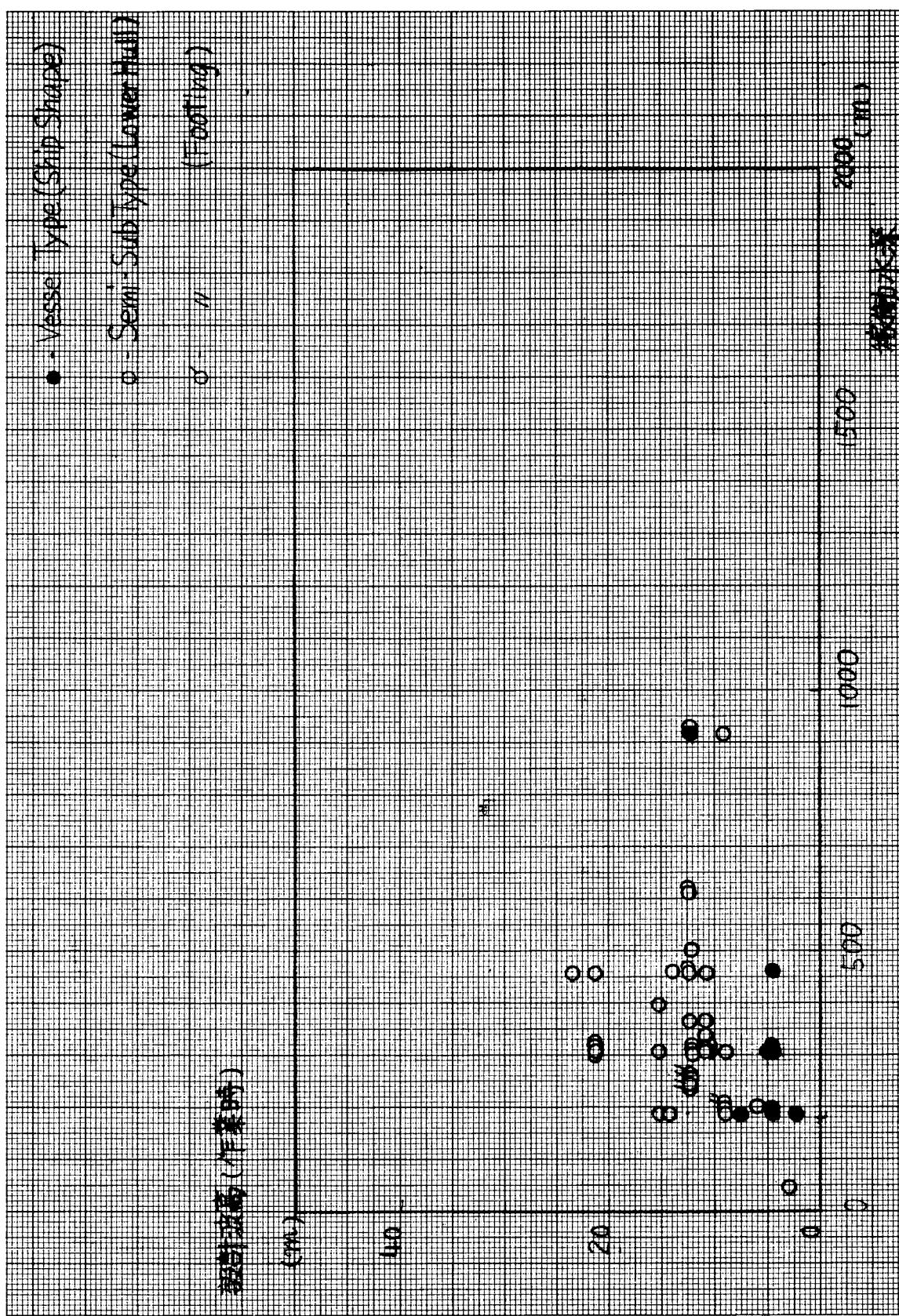


図 4.1.14 積動水深と設計波高（作業時）

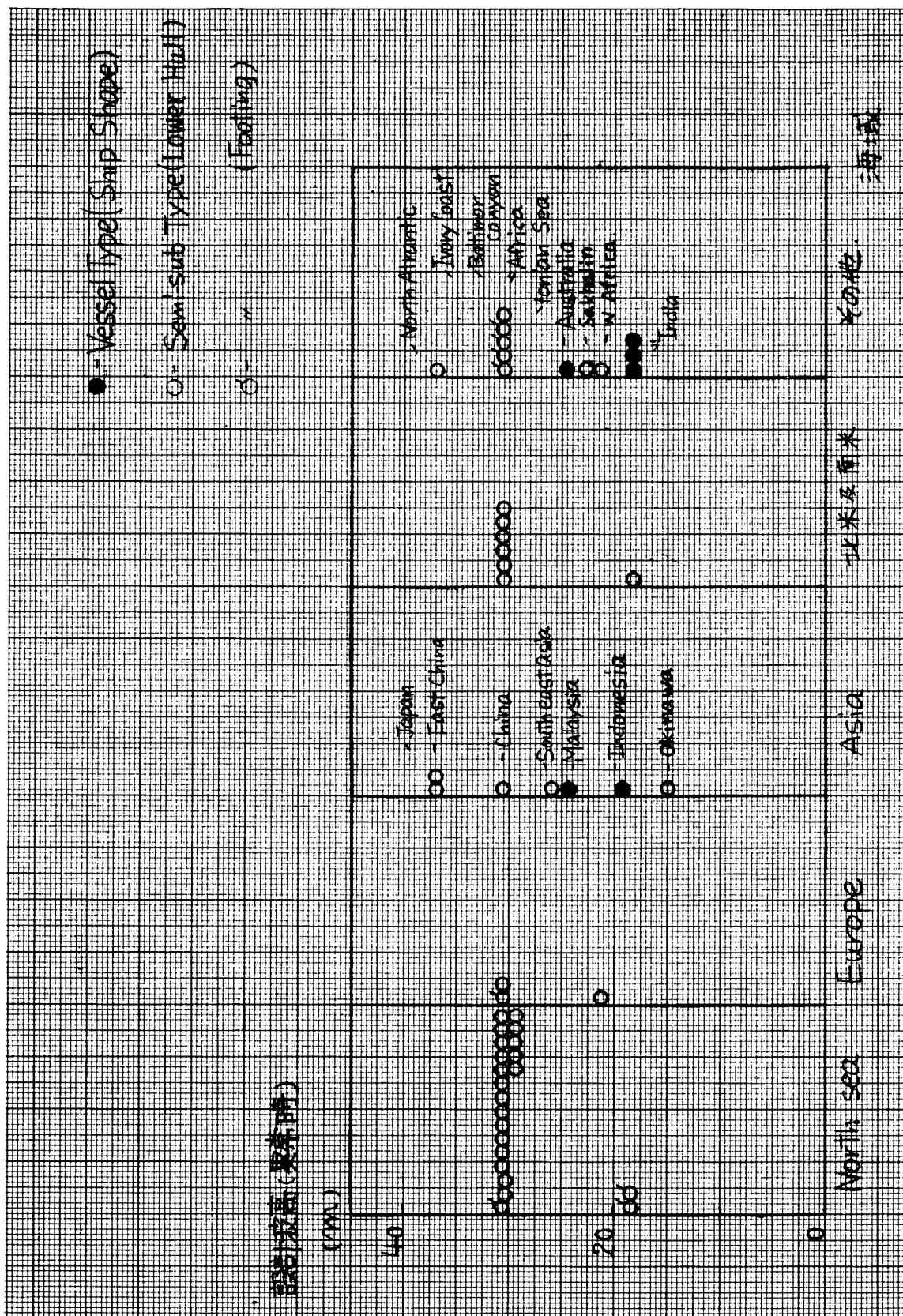


図 4.1.15 緯度別海域と設計波高(異常時)

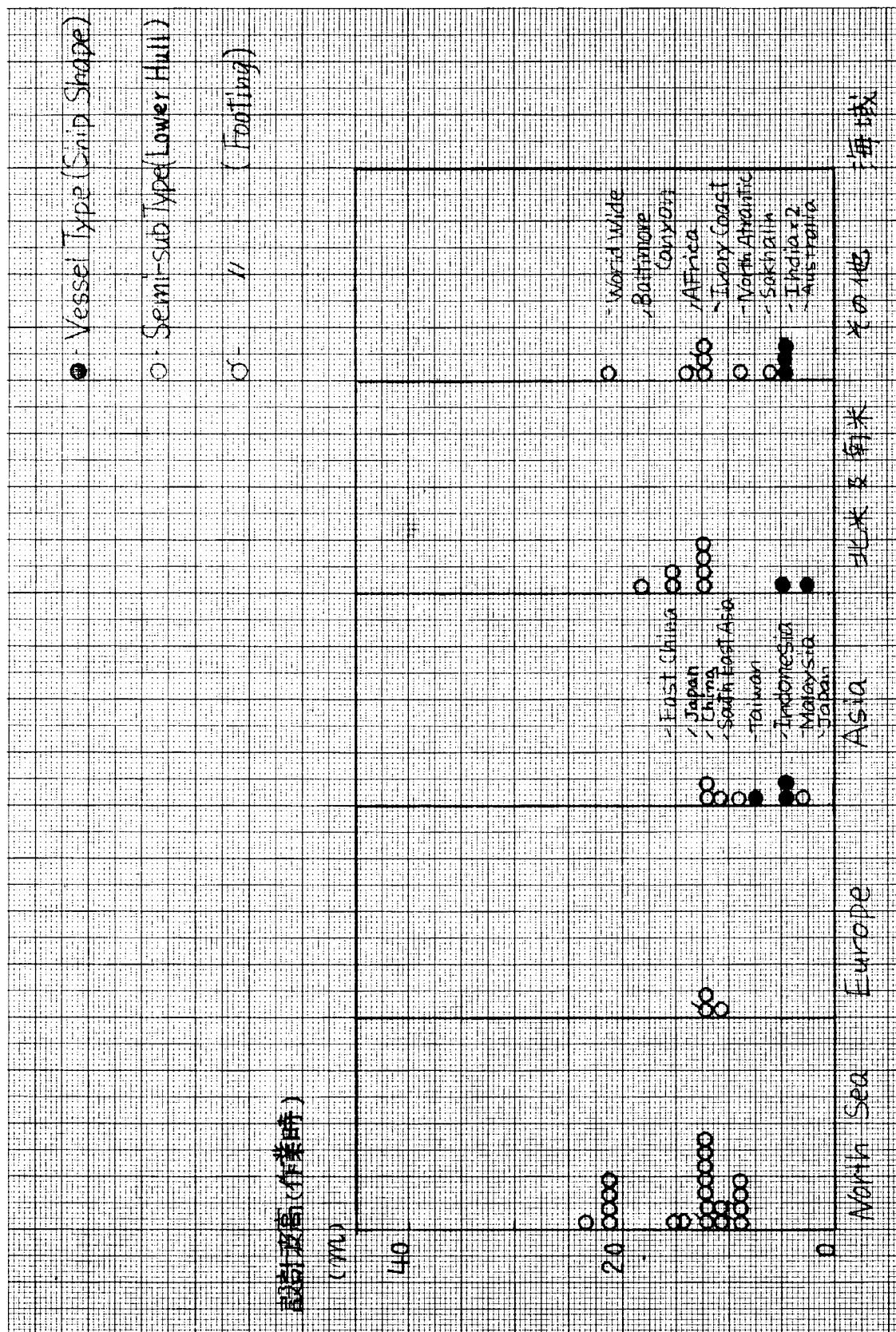
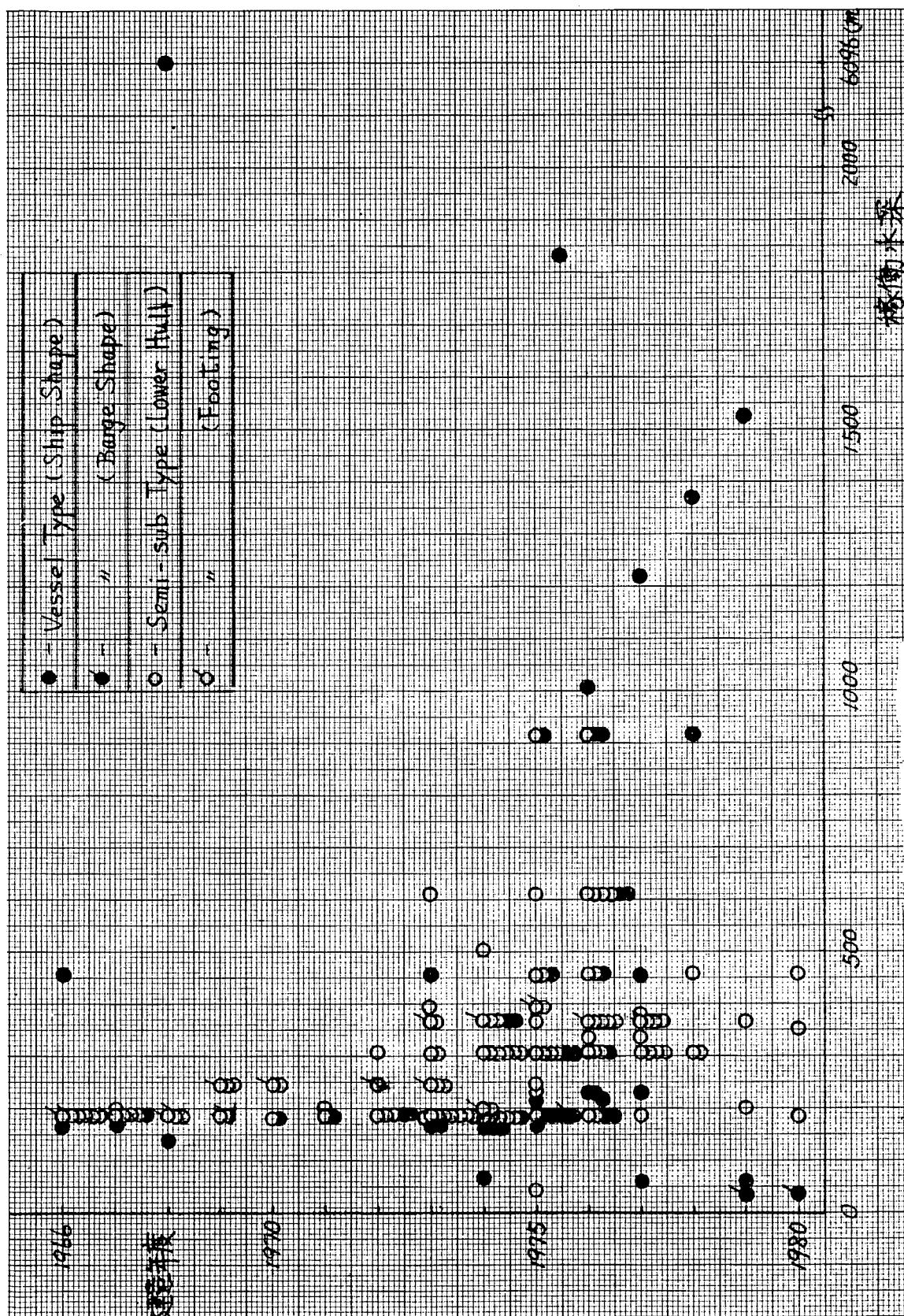


図 4.1.1.6 移動海域と設計波高（作業時）

図 4.1.17 稼働水深と建造年度



4.2 係留方式、係留装置

4.2.1 各種係留方式の特徴

各種係留方式と、これらの適正水深、係留の性能などの特徴を文献から抜粋して表 4.2.1 に示す。^{3), 4)}

4.2.2 深海係留に適した係留方式と係留装置

表 4.2.1 から、深海係留に適した係留方式として、次のような方式が有望と思われる。

- (1) ワイヤとチェーンの複合索鎖方式
- (2) (1)に補助装置としてスラスターを装備する方式
- (3) 自動位置保持装置方式 (DPS)
- (4) テンション レグ プラットホーム (TLP)、ガイド タワー 等の揺動型構造物 (Compliant Platform) 方式

参考文献

- 1) 例えば 1980-81 Directory of Marine Drilling Rigs : Ocean Industry Sep, 1980
- 2) 米家 卓也：大水深用石油掘削・生産プラント フォーム としての Tension Leg Platform (TLP)について（その 1 開発研究の概要と展望）、日本海事協会誌 №174, 1981
- 3) 三和 英一：係留システム (D.P.S. を含む) の考え方について、日本造船学会第 2 回海洋工学シンポジウム（浮遊式海洋構造物の係留問題を中心にして） 1976 年 6 月
- 4) 海洋開発技術ハンドブック、朝倉書店、1975 年 3 月

表4.2.1 各種係留方式の特徴

係留方式 特性	ワイヤ方式	チェーン方式	多点係留方式	ワイヤ/チェーン複合索方式	中間シンカ方式	中間ブイ方式
	適正水深	50~200m	20~500m	400~1000m	20~1000m	20~1000m
コス	ト	普通	普通	高価	やや高価	高価
主機器	大型ウインチ	大型ウインドラス	大型ウインチ及び大型ウインドラス	大型ウインチ、または大型ウインドラス 中間シンカ	大型ウインチ、または大型ウインドラス 中間ブイ	大型ウインチ、または大型ウインドラス 中間ブイ
操業	中型	大型	大型	大型	大型	大型
保守・修理	ワイヤロープの破損に注意のこと	普通	ウインチ・ウインドラスの保守、管理を頻繁に行う必要あり	中間シンカの収納、保管方法要検討	中間ブイの保守・管理を頻繁に行う必要あり	
係留地點への移動性	良	良	良	やや不良	不	良
信頼性	実績多	実績多	新方式	新方式	新方式	新方式
船体への影響	格納時に重心高	格納時に重量大	重心高、重量増	重心高または重量大	係留時の負担重量小	
通常(作業)時	水平移動小	水平移動比較的大	水平移動比較的小	水平移動比較的小	水平移動大	
暴風	エネルギー吸収効果小 走錨し易い	エネルギー吸収効果比較的大	エネルギー吸収効果比較的大	エネルギー吸収効果大 走錨し難い	エネルギー吸収効果大 走錨し難い	エネルギー吸収効果大 走錨し難い
浅水	走錨し易い	走錨比較的し難い	ワイヤ切斷の危険性	走錨し難い	走錨し難い	
大水	深	深	重量増加大	比較的安定	比較的安定	中間ブイ容量大
大外力	力	ワイヤ長さ大、走錨し易い	比較的安定	比較的安定	比較的安定	安定

特性	係留方式 多点係留方式＋スラスター	DPS 中間シンカー付も含む	TLP	Guyed Tower方式
適正水深	200～1000m	200m～	300～700m	～500m
コスト	高価	高価	高価	高価
主要機器	大型ウインチ及びウインドラス位 置検出、制御装置 スラスター	位置検出、制御装置 スラスター	高品質の係留脚	大型ウインチ
作業船	大型	不必要	大型	大型
保守・管理	ウインチ、ワインドラスの保守、 スラスターの故障対策	故障対策	係留脚の保守、管理を煩雑に行う 必要あり	係留脚の保守、管理は普通
操縦地點への移動性	良好	良好	比較的良	不良
信頼性	実績や少	実績や少	新方式	新方式
船体への影響	重心高、重量増	小	大(余剰浮力)	比較的小
通常(作業時)	水平移動比較的小	水平移動や小	上下動ほとんどなし、水平移動比較的小	上下動なし、水平移動小
暴風	エネルギー吸收効果大 大容量スラスター	大量スラスター 退避	エネルギー吸收効果大	エネルギー吸收効果大
浅水	ワイヤ切断の危険性と制御限界に 問題	制御限界に問題	不経済	不経済
問題点	水深 安定	問題なし	水深に制限あり	水深に制限あり
大外力	比較的安定	不経済	安定	安定

4.3 自然環境の設計条件

4.3.1 各海域における設計条件

海洋構造物に対する海象条件の設定方法は各船級協会の基準でも与えられているが、通常はその構造物の所有者（船主）指定による場合が多い。設計条件は構造物が稼働する海域の海象データから決められ、一般的には異常時と稼働時の2通りの条件を考える。図4.1.15と図4.1.16には石油掘削リグについて各稼働海域での設計波高をまとめてあるが、セミサブ型についてみると、異常時の設計波高は海域にかかわらず100 ft (30m)とする場合が最も多い。また、稼働時の設計波高についても海域による差はほとんどなく、ほぼ9m (30ft) ~ 21m (70ft) の範囲に設定されている。セミサブ型のリグは荒天時の稼働率が他船型に比べて優れているために使用されることが多いので、海域によって波高条件が小さい場合にはセミサブ型よりも他船型が使われ、結局、セミサブ型が使用される海域では設計条件に海域としての差が表われないものと思われる。また、風速についても付録表4.1.1からわかるように海域の差はほとんどなく、異常時では100 kts (51m/s) ~ 120 kts (62m/s)、稼働時では30 kts (15m/s) ~ 70 kts (36m/s) の範囲で設定している。潮流は最大2~3 ktsまで考慮している例が多い。

しかし、瀬戸内海で使用される創成2号などでは、波高条件が高々2.1mであるにもかかわらず、潮流条件は8 ktsになっており、潮流については海域の特殊性が大きい。

4.3.2 船級協会基準による設計条件

船級協会の海洋構造物に対する設計基準には一般船舶と異なり、海象条件、外力等の項目があるが、この基準は目安あるいは考え方として与えているものがほとんどで、係留系設計においては、実際に構造物が使用される海域での海象データ、その海象中の構造物の挙動を所有者の要求として、あるいは水槽試験、シミュレーション計算結果として盛り込んだ条件を設定する必要がある。

以下、主な船級協会の設計基準を紹介するが、他の船級協会の基準、あるいはルールの考え方等については文献(5)に詳しく解説されている。

参照した各船級協会の基準と本報告書での略号は次の通りである。

NV①	Mobile Offshore Unit Rule 1981
NV②	Tentative Rules for the Construction and Classification of Offshore Loading Systems 1977
NK	Rules for Mobile Offshore Units 1978
ABS	Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units 1980
BV	Rules and Regulations for the Construction and Classification of Offshore Platforms 1975

(1) 海象条件の算定方法

(1) 風の場合

NV①では、海面からZ(m)の高さにおける風速V_z(m/s)を定常風と突風とに分けて、次式で算定する。

$$\begin{array}{ll} \text{定常風 (Sustained)} & V_z = V_{10} \sqrt{0.93 + 0.007Z} \\ \text{突風 (Gust)} & V_z = V_{10} \sqrt{1.53 + 0.003Z} \end{array}$$

定常風は1分間平均、突風は3秒間平均である。

V_{10} は海面上10mの高さにおける定常風速であり、 V_{10} の標準値としては、表4.3.1が与えられている。

表4.3.1 海面上10m高さ風速(V_{10})の標準値

海域の種類	V_{10} (m/sec)	
	通年	夏期
湾内のように囲われた海域	40	
通常の外海	45	
厳しい条件の外海 (北海、ノルウェー沿岸)	50	45
非限定期全海域	55	

夏期 5月15日～9月15日

NKでは所有者の指定値としているが、

最小値は	25 m/s
稼働状態では	36 m/s以上
異常荷重状態では	50 m/s以上

ABSではNKとほとんど同じであるが、上から順に50kts、70kts及び100ktsとなっている。

BVでは海面から h (m)の高さの風速 $V(h)$ (m/s)として次式を与えている。

$$V(h) = V(10) \sqrt{2.5 \frac{h + 66}{h + 180}}$$

この場合、 h が10m以下のときは、 $h = 10m$ とする。

(a) 波の場合

波は係留系のみでなく、構造物の強度についても重要な影響を与えるが、波高そのものを基準で与えている例はなく、所有者の指定値を使用するようになっているか、考え方のみを与えている。

NV①では、長期における最大波高を次のように求める。

有義波高($H_{1/3}$)及び平均周期(\bar{T})は

$$H_{1/3} = 1.68 H_v^{0.75}$$
$$\bar{T} = 0.82 T_v^{0.96}$$

ただし、 H_v 及び T_v はそれぞれ目視波高、目視周期である。

稼働海域での $H_{1/3}$ 、 \bar{T} がわかったならば n 回の入射波に対する波高の最大期待値(H_n)は次式で与えられる。

$$H_n = a \cdot b_1 (0.434 n)^{K_1}$$

H_n については、次式に示すNVのPipe line ルールに従う場合もある。⁶⁾

$$H_n = \frac{a + b_1}{\sqrt{2}} (2.3 n)^{K_1}$$

N年間の最大波高期待値の場合は、

$$n = 6.7 + \log_{10} N$$

とする。

ここで、係数 a 、 b_1 、 K_1 は表 4.3.2 及び図 4.3.1 から求める。

なお、長期予測の基準は 100 年であり、100 年間の最大期待値の例を表 4.3.3 のように示されている。

波周期については、次の範囲で検討する。

$$\sqrt{6.5 H} < T < 20$$

トータルシステムとして波スペクトルを使用する場合には

深水域では Pierson-Moskowitz 型スペクトル

浅水域では Jonswap 型スペクトル等

を使用する。

NK、ABS では波高は所有者の指定する値を使うとしている。

(イ) 潮流の場合

潮流による荷重については、後述のようにどの協会基準でも算入することになっているが、流速の算出方法を示しているのは今回参照したものの中では NV のみである。文献(5)によれば GL でも算出式が与えられている。

NV ①では、潮流を潮汐流 (Tidal Current) と吹送流 (Wind generated current) に分け、その合成流として次式を与えている。

$$V_z = (V_h)_1 (z/h)^{1/4} + (V_h)_2 (z/h) \quad (\text{m/s})$$

ただし、 V_z : 海底から Z (m) の高さにおける Total current

h : 海面からの深さ (m)

$(V_h)_1$: Tidal current (m/s)

$(V_h)_2$: Wind generated current (m/s)

$(V_h)_1$ 、 $(V_h)_2$ の統計データがない場合は次の値を使用する。

$(V_h)_1 \geq 0.5 \text{ m/s}$ かつ 100 年間の最大波高 30 m の波の水粒子速度に相当する流速

$(V_h)_2 = 0.01 V_{10}$ ここで V_{10} は風速

$(V_h)_1$ の例として、表 4.3.4 が与えられている。

表 4.3.2 波高長期予測の係数

$2/m$	k_1	b_1
0.0	0.500	1,000
0.5	0.698	0.785
0.6	0.739	0.758
0.7	0.784	0.737
0.8	0.828	0.719
0.9	0.874	0.704
1.0	0.921	0.690
1.1	0.967	0.678
1.2	1.012	0.668
1.3	1.059	0.658
1.4	1.106	0.649
1.5	1.152	0.641
1.6	1.199	0.634
1.7	1.247	0.628
1.8	1.292	0.621
1.9	1.340	0.616
2.0	1.385	0.611
3.0	1.859	0.580
4.0	2.336	0.560
5.0	2.809	0.551

表 4.3.3 100 年間の最大波高

海 域	緯 度 (北緯)	100 年間最大波高	
		通 年	夏 期
北 海	52	16m	12m
	53	18m	14m
	54	20m	16m
	55	22m	18m
	57	25m	21m
	59	28m	24m
ノルウェー沿岸	61	30m	26m

夏期 5月 15 日～9月 15 日

LONG TERM DISTRIBUTIONS OF VISUALLY OBSERVED AND OF
SIGNIFICANT WAVE HEIGHTS IN THE NORTH SEA

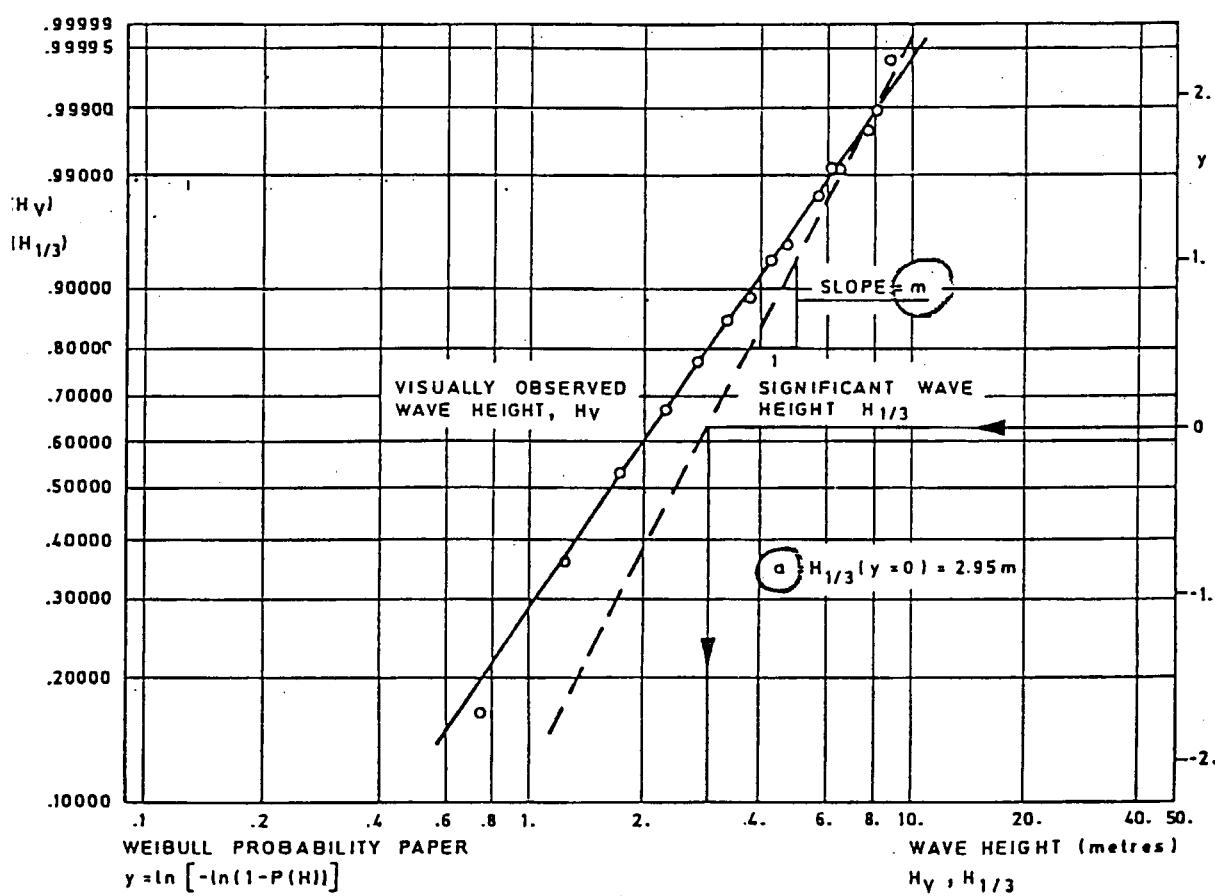


図 4.3.1 波高の長期予測法

表 4.3.4 100 年間の最大潮流

緯度(北緯)	経 度	流速 V_h (m/sec)
60° 以北	ノルウェー沿岸	0.5
55° - 60°	0° の東側	0.5
	0° の西側	1.0
54° - 55°	東経 2° の東側	1.0
	東経 2° の西側	1.5
52° - 54°	両 岸 間	1.5

4.3.3 浮体形式、係留方式と自然環境

浮体形式、係留方式を決定する要因としては、所有者あるいは設計者の思想、使用目的、建造費その他種々考えられるが、最も大きな要因は構造物が使用される海域での自然環境である。その中でも特に係留方式と関係するのは 4.1 でまとめた水深であるが、本節では他の自然環境要因として波高と浮体形式の関係について説明する。

海洋構造物の浮体形式及び係留方式は性能上それぞれ特徴を持つために稼働する海域の自然環境に適合した方式を選択することが設計上重要となる。表 4.3.5 は、各種の海底石油開発用プラットフォームの特性を比較したものである。

表 4.3.5 石油開発用プラットフォームの性能比較

特性	浮遊式		固定・着底式			可 摆 式	
	バージ・船型	半潜水式	甲板昇降型	有脚式	重力式	Gayed Tower	TLP
波 力	大	比較的小	小	小	比較的小	小	比較的小
上 下 動	大	比較的小	な し	な し	な し	な し	ほとんどなし
水 平 動	比較的大	比較的小	ほとんどなし	ほとんどなし	ほとんどなし	小	比較的小
設 置	容 易	容 易	容 易	や や 難	難	や や 難	比較的容易
稼 働 率	小	中	大	大	大	比較的大	比較的大
撤 去	容 易	容 易	容 易	不 可 能	不 可 能	可 能	比較的容易
水深増加に伴う問題	位置保持	位置保持	脚重量の増加 移動時安定性	重 量 増 加 えい航設置 技術・工費	重 量 莫 大 設置技術・ 工費	重 量 増 加 えい航設置 技術	設 置 技 術 上下動增加
適用可能水深	中 水 深 (DP付大水深)	大 水 深 (~1,000m)	浅 海 域 (~100m)	中 水 深 (200~400m)	中 水 深 (~200m)	大 水 深 (~500m)	大 水 深 (300~700m)
用 途	掘 削	掘 削	掘 削	掘削・生産	掘削・生産	掘削・生産	掘削・生産
利 点	貯蔵能力大	動 摆 小	安 価・稼 働 率 大	固 定 性	冰 海・荒 天 海 域 に 適	動 摆・応 力 小	安 価・移 動 性 有

比較的大水深で使用される石油掘削用リグの浮体形状は、船型とセミサブ型が一般的であり、係留方式としては浮遊式が多い。使用される水深の範囲については両者の差はほとんどないが、設計波高についてみると両者の動搖特性による差が表われる。図 4.3.2 付録表 4.1.1 から船型とセミサブ型の設計波高について記述があるものののみの比較をしたもので、異常時、設計波高が 100 ft 以上になるとほとんどセミサブ型に限られることを示している。

船型 7 隻，セミサブ型 50 隻

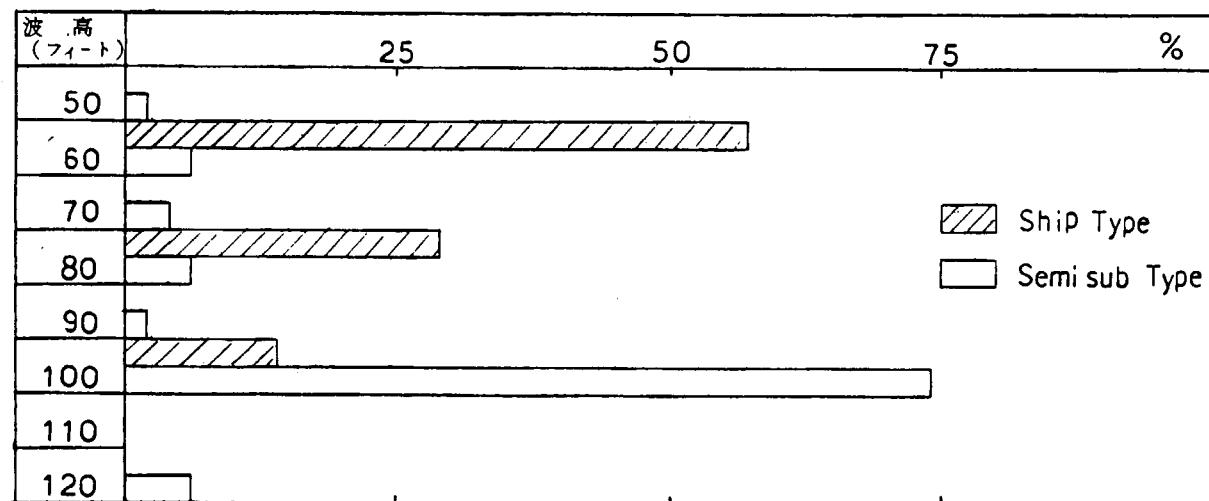


図 4.3.2 浮体形式と設計波高の関係

4.4 荷重許容量

4.4.1 構造物に働く外力の計算方法

4.3.2で述べた方法等で構造物が稼働する海域の自然環境条件が定まったならば、それに対応する外力を算定する必要がある。各船級協会は以下に述べるよう外力の算定方法を示しているが、これらの基準値は水槽試験、その他の適当な方法で軽減できる。

(1) 風荷重の算定方法

NV①では、各部材に働く風圧力を次式で与えている。

$$F_w = C \frac{V_z^2}{16} \sin \alpha \cdot A$$

ここで、

F_w : 風荷重 (kp)

C : 形状係数

V_z : 風速 (m/s)

α : 部材の風向に対する相対角

A : 部材の投影面積 (m^2)

形状係数は次のように決める。部材が十分に長いものとしたときの2次元抵抗係数を C_∞ とすると、

プレートガーダー、ボックスガーダー、その他鋭角を持つ部材 $C_\infty = 2.0$

風の方向に対し、長辺が短辺よりも2倍以上の長方形断面部材 $C_\infty = 1.5$

滑らかな円柱部材 $D < 0.3m$ $C_\infty = 1.2$

$D \geq 0.3m$ $C_\infty = 0.7$

以上の抵抗係数 C_∞ は部材の長さ (ℓ) と断面の幅 (d) の比が $\ell/d \geq 5$ のときは C としてそのまま使用できるが、短かい部材については次式で修正する。

$$C = C_\infty \left(0.5 + 0.1 \frac{\ell}{d} \right)$$

球状部材については、その支持基盤からの距離と支持材との関係から $C = 0.3 \sim 0.7$ の範囲で設定する。

デッキハウス等、上部構造物は高さを ℓ 、幅を d として部材と同じ計算式を使う。

ガーダー等の部材が風と平行な平板に取付けられている場合、円柱を除いて上で求めた部材の抵抗係数に 0.6 を乗じる。

トラス等の部材が複数本、風に垂直な面内にある場合、その面の閉塞率（隙間を除いた部材のみの面積を部材が置かれている全体面積で割った値）S によって抵抗係数が異なる。 $0.2 < S < 0.8$ のときは、部材の抵抗係数は単独に置かれた値に 0.8 を乗じる。 $S < 0.2$ のときは修正しない。 $0.8 < S$ のときには面全体を隙間のない面として扱う。

以上述べた抵抗係数は、全て風下側の吸引力を含んでいる。

2本の部材の片方が、もう一方の風下の陰に入る場合、投影面積に対する修正を行なう。

$$(A_2)_{\text{exposed}} = u A_2$$

$$u = 1 - \frac{d_1}{d_2} \left(1 - \frac{\ell}{7d_1} \right) \quad d_1 < d_2$$

$$u = \frac{\ell}{7d_1} \quad d_1 \geq d_2$$

$$u = 1 \quad \ell \geq 7d_1$$

ここで、添字 1 は前面部材、2 は後側の部材を表わす。 ℓ は部材間の距離である。

2 本以上の部材が並んでいる場合には、対象部材の風上側から u が最も小さくなる部材を選ぶ。デッキ下面についているトラス等についても同様の修正を行なう。

オープンデッキ等に働くデッキ面の垂直力は、C を 1.2 ~ 2.0 の範囲とし、 $\sin \alpha$ の値を 0.5 以上として計算する。

風がトラス等の部材に平行な場合、垂直な場合の 40 % とする。

ABS では、風圧及び風圧力を次式で計算する。

$$P = 0.623 V_k^2 C_h C_s$$

$$F = PA$$

ここで、
P : 風圧 (kg/m^2)

F : 風圧力 (kg)

V_k : 風速 (m/s)

C_h : 高度係数

C_s : 形状係数

A : 構造部材の投影面積 (m^2)

形状係数の代表例を表 4.4.1 に、高度係数を表 4.4.2 に示す。

表 4.4.1 形状係数

部材形状	C_s
円筒形	0.5
外殻	1.0
甲板室	1.0
独立構造物 (クレーン、形鋼、梁等)	1.5
平滑な甲板下面	1.0
甲板下面の梁、桁	1.3
作業やぐら各面	1.25

表 4.4.2 高度係数

高度 (m)	C_h
0 以上 - 15.3 未満	1.00
15.3 - 30.5	1.10
30.5 - 46.0	1.20
46.0 - 61.0	1.30
61.0 - 76.0	1.37
76.0 - 91.5	1.43
91.5 - 106.5	1.48
106.5 - 122.0	1.52
122.0 - 137.0	1.56
137.0 - 152.5	1.60
152.5 - 167.5	1.63
167.5 - 183.0	1.67
183.0 - 198.0	1.70
198.0 - 213.5	1.72
213.5 - 228.5	1.75
228.5 - 244.0	1.77
244.0 - 256.0	1.79
256.0	1.80

その他、構造物のヒール影響、複数の上部構造物が接近している場合の取扱い方法等が示されているが、NV程細密になっていない。

NKの基準はABSとほとんど同じである。

BVでは次式で算出する。

$$F_v = \frac{1}{2} C_w \rho S V^2$$

ここで、 F_v : 風圧力

ρ : 空気の密度

C_w : 抵抗係数

S : 部材の風向に垂直な投影面積

V : 部材中心の高さにおける風速

抵抗係数は、表4.4.3によって与えられる。

表4.4.3 抗力係数

部材	C_w
外殻、平面構造物	1
独立構造面	1.75
円筒形	0.6
格子面	
形鋼構造	$2 - 0.8\varphi$
パイプ構造	$0.6 (2 - 0.8\varphi)$
4本足やぐら	
形鋼構造	$\begin{cases} (I) & 3.2 - 2\varphi^* \\ (II) & 1.3 (3.2 - 2\varphi)^* \end{cases}$
パイプ構造	$\begin{cases} (I) & 0.7 (3.2 - 2\varphi)^* \\ (II) & 0.85 (3.2 - 2\varphi)^* \end{cases}$
3本足やぐら	
形鋼構造	$3.2 - 4\varphi \geq 2$
パイプ構造	$0.7 (3.2 - 4\varphi) \geq 1.4$

(I) 風向に対し面が直角にある場合

(II) 対角線が風向と平行で面が斜めの場合

$$\varphi = \frac{\text{開口部を除いた実質面積}}{\text{開口部を含めた面全体面積}} = \frac{S}{S_t}$$

*印の式は、 $0.08 \leq \varphi \leq 0.4$ の範囲で使用し、 $\varphi < 0.08$ のときには格子構造とはみなさない。

また、 $\varphi > 0.4$ のときには全面を開口のないものとして $C_w = 1$ を使用する。

(2) 波力、潮流力の算定方法

波力と潮流力はABSを除き、同じ流体力として扱う場合が多いが、計算結果はABS、NV、BV共ほとんど変わらない。NKでは考え方のみを示し、特に計算式は与えていない。

波力はモリソン式に従って、質量力と抗力に分けられ、抗力は波による水粒子運動と潮流を合成した水粒子速度を用いて計算される。NVの計算方式を代表として説明すると、質量力 F_m と抗力 F_D は以下

の式で与えられる。

NV①では、

$$F_m = \rho C_m a V$$
$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| A \sin \alpha$$

ここで、

a : 水粒子の部材と垂直方向の相対加速度

V : 部材容積

u : 水粒子の部材に対する相対速度

A : 力の方向に垂直な面への部材の投影面積

α : 速度 u の方向と部材面または部材中心線との相対角

C_m 、 C_D は各々質量力係数、抗力係数を表わし、各部材形状に対する値を表4.4.4、表4.4.5に示す。

質量力の計算では、部材の断面寸法は波長の20%以下で波による水粒子の運動が部材に対して直線的に作用することを前提としている。寸法がこの値より大きいときNVでは特に記述はみられないが、例えばBVでは模型試験によるか、他の模型試験結果あるいはdiffraction法による計算結果のいずれかを使用するように記されている。

一方、部材が細長い場合には、 C_D 、 C_m は次の積分形式で計算する。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \int_A C_D u |u| \sin \alpha dA$$

$$F_m = \rho \int_V C_m a dV$$

また、部材が円柱の場合 C_m 、 C_D として次の値を使う。

C_m については、

$$d/\ell \geq 1.0 \quad \text{のとき} \quad C_m = 1.5$$

$$d/\ell \leq 0.1 \quad \text{のとき} \quad C_m = 2.0$$

$0.1 < d/e < 1.0$ の範囲では d/e の値から内挿して求める C_D については、

$$0.5 \leq C_D \leq 1.2$$

の範囲で表面粗度、レイノルズ数、波理論等を考えて定める。ただし、レイノルズ数が 3×10^6 よりも大きいときには、 C_D は0.7以上とする。

表 4.4.4 質量力係数

部材形状	C_m
流れに直角に置かれた平滑表面を持つ円筒	$1 + K_\ell$
平滑表面を持つ円柱体、径を b 、 d とし b が流れに平行のとき	$1 + K_\ell \cdot \frac{d}{b}$
長方形断面柱体で辺を b 、 d とし b が流れに平行のとき	$1 + \frac{\pi}{4} K_\ell \frac{d}{b}$
正四角断面柱体で対角線が流れに 平行のとき	$1 + 1.1 K_\ell$
流れに直角に置かれた平板幅を d とすると、仮想容積は $V = \frac{\pi}{4} d^2 \ell$	K_ℓ
流れに直角に置かれた円板径を d 、 ℓ ($\ell \geq d$) とすると仮想容 積は $V = \frac{\pi}{6} d^2 \ell$	K_ℓ
球體	1.6

$$K_\ell = \frac{1}{1 + (d/\ell)^2}$$

ℓ : 部材の長さ ($\ell > d$)

表 4.4.5 抗力係数

部材形状	C_D
円筒形	$0.7 K_\ell^*$
平板、曲げ板、先端の鋭った断面 を持つ部材	$2.0 K_\ell^*$
長方形断面で角に丸味 ($0 < r < \frac{d}{2}$) を持つ部材	$2.0 K_\ell K_r K_b^*$
正四角柱で対角線が流れに平行	$1.5 K_\ell^*$
流れに直角に置かれた長方形板	$2.0 K_\ell$
流れに直角に置かれた円板	1.2
球体(近くに壁があるときにはそ の影響を考慮する)	0.3 - 0.7

*印は流れに対し、部材の軸は直角の場合

$$K_\ell = \begin{cases} 0.5 + 0.1 \ell/d & \ell/d < 5 \\ 1.0 & \ell/d \geq 5 \end{cases}$$

$$K_b = \begin{cases} 1.0 & b/d \leq 2 \\ (8 - b/d)/6 & 2 < b/d < 5 \\ 0.5 & b/d \geq 5 \end{cases}$$

$$K_r = \begin{cases} 1.0 & r/d \leq 0.10 \\ (4.3 - 13 r/d)/3 & 0.10 < r/d \leq 0.25 \\ 0.35 & r/d \geq 0.25 \end{cases}$$

4.4.2 係留装置の設計条件

海洋構造物の係留装置については、作業用以外のものは一般船舶と同様に各船級協会の艤装数で条件づけられているが、稼働時の位置保持用装置に関しては、4.4.1で算出された外力に耐えるような設備を搭載する必要がある。

図4.4.1は付録表4.1.1からアンカー重量、係留ラインチェーン径を各海域ごとにまとめたものであるが、北海で使用されるチェーン径がやや大きめになっている他、特に大きな差はなく、かなり実績ベースで設計されていることが多いように思われる。

係留システムの設計をする上で、外力条件が定っても、それに対して安全率をどの程度見込むかという問題がある。この点に関しては船級協会で基準を設けているものはNVを除いてほとんどない。

NV②で示されている安全率の考え方

アンカー、アンカーラインについては、

機能上許される荷重が、アンカーの最大保持力及びアンカーラインの破断張力の35%以内になるよう

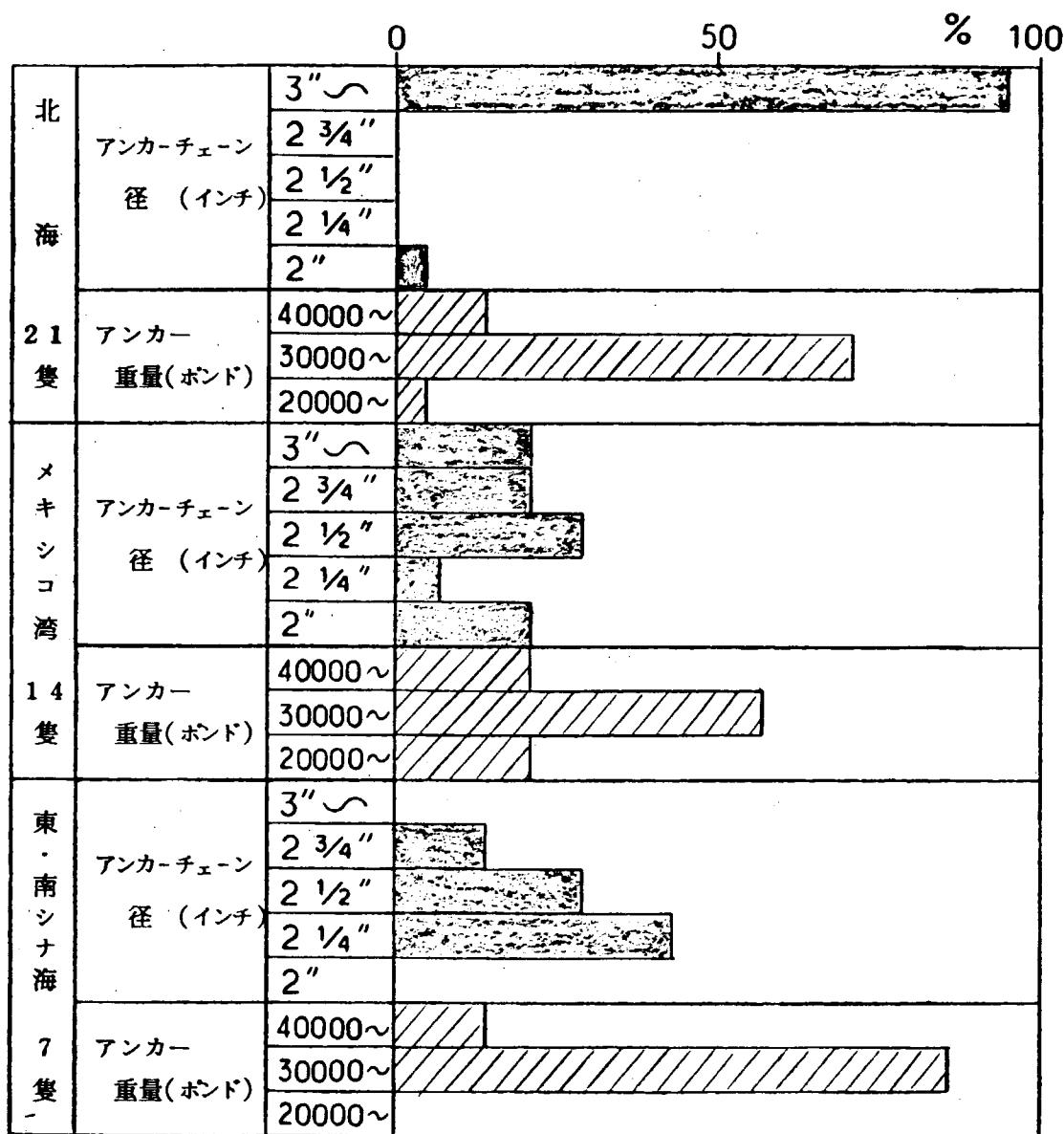


図 4.4.1 各海域で使用されるセミサブ型海洋構造物の係留装置比較

に、アンカー重量、形式、アンカーラインの径を選択する。あるいは、外力による荷重が同じく 50%以内になるようなアンカー、アンカーラインを選択する。

係留ラインについては、許容荷重が破断張力の 50%以内になるように設定する。

ルール以外ではマニュアルとして表 4.4.6 に示すような指針も公表されている。以上から稼働時の係留系に加わる荷重は破断張力、最大保持力の 30%~40%、異常時で 50%程度になるように設計するのが一般的であるようと思われる。

表 4.4.6 係留ラインの設計指針

Design Parameters And Conditions Used For Spread Mooring Analysis

Nominal Operation Designation	Mooring Line			Marine Riser Situation			
	Maximum Tension	Leeward Line Slackening Policy	Maximum Vessel Offset (%)	Condition	Max. Lower Ball Angle (Degrees)	Mud	Operation
Normal Drilling	½ Break	Nominal	Approx. 3	Connected	4	Drilling Mud	Drilling ahead; running casing, BOP, test tools & performing all normal operations.
Drilling	½ Break	Nominal	6	Connected	Under 10	Drilling Mud	Preparing to wait on weather, hoisting, pulling riser, setting cement or barite plugs & critical drilling operations.
Standby	½-½ Break	Equivalent to at least 2 leeward lines completely slackened	10	Connected	10	Displaced w/sea water as needed	No drilling operations with riser ready to be disconnected at moments notice. Waiting on weather.
Survival or Maximum	½ Break or anchor slippage	Equivalent to at least 2 leeward line completely slackened	Unrestricted	Disconnected	—	—	No operations of any kind except possible mooring line manipulation. Rig may not be manned.

"The technology of offshore drilling, completion & production"

ETA Offshore Seminars, Inc.

参 考 文 献

- 1) 例えば 1980-81 Directory of Marine Drilling Rigs : Ocean Industry Sep. 1980
- 2) 米家 卓也：大水深用石油掘削・生産プラットフォームとしての Tension Leg Platform (TLP)について（その 1 開発研究の概要と展望）、日本海事協会誌 №174 1981
- 3) 三和 英一：係留システム（D.P.S. を含む）の考え方について、日本造船学会 第2回海洋工学シンポジウム（浮遊式海洋構造物の係留問題を中心にして） 1976年6月
- 4) 海洋開発技術ハンドブック、朝倉書店、1975年3月
- 5) 日笠 則明、井上 義行：ルール上の海象および設計外力、日本造船学会誌第609号 昭和55年3月
- 6) DET NORSKE VERITAS (NV) : Rules for the Design, Construction and Inspection of Submarine Pipe Line and Pipe Line Riser, 1976

第5章 浮体の挙動及び係留力の推定法

5.1 調査対象範囲

海洋構造物が深海域に係留されているとき、その浮体自身の挙動と係留索鎖の張力を推定する方法に関する調査を実施した。調査は国内外の造船、海洋関係の論文を中心とした文献調査を主としたものである。

調査の対象項目は、係留索鎖の静的・動的特性、緩係留における長周期運動、及び複合索鎖についてである。

また、調査の範囲は、次の通りである。

(1) 索鎖の静的・動的特性

(イ) 深海係留の場合、潮流によって係留索鎖のラインが大きく変形することが予想されるので、その実測例、実験及び計算法について調査する。計算法に関しては、分類整理し各計算を概観する。

(ロ) 係留索鎖の静的・動的特性に関する各計算法の一般的な特徴と、その適用範囲を調査する。動的特性に対する計算法として、準静的計算法と動的計算法があるが、実験結果と各種計算法の結果を比較し、その適用範囲を調査する。

(2) 緩係留における長周期運動

深海係留ゆえに、浮体の質量に対し係留の復原力が小さくなりいわゆる緩係留になり易い。従って、係留系の固有周期が長く、長周期の変動外力が存在すればこれに同調し、運動が大きくなり、係留力も大きくなることが予測される。この長周期変動外力として、風、波、潮流等が考えられるので調査する。また、これらの長周期変動外力による係留浮体の運動応答の計算手法の現状についても調査する。

(イ) 風に関しては、風速の鉛直分布、時間変動、空間変動等の、いわゆる風の構造と、この変動風による長周期の力の取扱い方についての現状を調査する。

(ロ) 波漂流力に関しては、不規則波中で生じる長周期波漂流力の計算法の現状を調査する。

(ハ) 係留浮体の長周期運動の計算法は、応答が線形重ね合せの原理に基づいているとして周波数領域で取扱うスペクトル法と、時間歴として時間領域で取扱うシミュレーション法があるが、これらの計算法の現状を調査する。

(3) 複合索鎖

(イ) 索又は鎖を単独に用いた係留と複合索鎖を用いた係留を比較し、その特徴を調べる。

(ロ) 複合索鎖の係留特性を計算する方法として、ここでは、初期計画における簡便のために、係留ラインの伸びとそれに作用する流体力を無視した二次元カテナリー理論による解析法に関して調査する。この計算法を使って一般的な係留状態における係留特性図表を作成する。

(ハ) 複合索鎖用の係留機器の現状と実施例を調査する。

5.2 潮流による索鎖の大変形及び索鎖の静的・動的特性

深海係留の場合、潮流によって係留索鎖が、大きな変形を起こすことが考えられる。この現状については、静的特性と別に項を設けて調査を行った。

5.2.1 潮流による索鎖の大変形

(1) 潮流による大変形の実測

潮流中の係留索鎖の大変形に関する文献は少なく、実測例として、わずかに T . R . K retschmer¹⁾ がみられる程度である。これは、南カリフォルニア沖の水深 2,900 ft の海域で、海面下に没水したブイを 3 本のワイヤ・ロープで係留し、潮流、ブイの変位、張力等を計測した実験である。この結果は、理論計算結果と比較して、概略よい一致を示している。

(2) 潮流による大変形の計算法

潮流の影響を考慮した計算法についての文献は数多くあり、いくつかの計算例がみられる。^{2), 3), 5)}

9) 他 索鎖に働く流体力及び伸びを無視したカテナリー理論は、水深係留で、かつ、潮流力の影響を大きく受ける場合の解析法として適当でないので、一般には他の方法が用いられる。^{16), 17)} これらの計算法は大別して、級数展開法、²⁾ 直接積分法、^{3), 4)} 要素分割法^{5)～15)} であり、各計算法の概要、特徴、参考文献について表 5.2.1 に示す。

表 5.2.1 潮流による索鎖の変形計算法

	計算法	長所	短所	文献 No
級数展開近似法	係留索鎖の平衡式とともに、級数展開により索鎖に働く、潮流力を考慮する方法。	・計算が簡単	・大変形計算に向き ・適用範囲がせまい ・伸びを考慮していない	Wilson ²⁾
直接積分法	索鎖の微小部分についての力の平衡方程式と幾何学的条件式をライン全体にわたり積分する方法。	・比較的 Simple な係留の場合に有効。	・複合索鎖係留への適用が不可 ・不均一流中計算困難 ・適用範囲がやゝせまい	Pode ^{3), 4)}
要素分割法	係留ラインを有限個の要素に分割し、重力、流体力を節点に集中させて解く方法。	・中間付加物（シンカー、ブイ等）がある場合の計算可能 ・適用範囲が広い	・計算時間が長い	Chang ⁵⁾ , Wang ⁶⁾ Walton ⁷⁾ , Bedendnder ⁸⁾ Webster ⁹⁾ , 吉田 ¹⁰⁾ Dominguez ^{11), 15)} Thresher ¹²⁾ , 小寺山 ¹³⁾ , Skop ¹⁴⁾

(3) 今後の問題点

潮流による索鎖の大変形に関する問題点をまとめると以下のようになる。今後の調査研究が必要と考える。

- 1) 実機あるいは模型試験による理論計算値の検証（要素模型試験を含む）
- 2) 大変形に関する簡易推定計算法の検討
- 3) 索鎖の自重増大による張力、伸びを軽減する係留法の調査
- 4) 被係留浮体の位置制御のための D. P. S. との併用の検討等

5.2.2 索鎖の静的・動的特性

(1) 静的特性

索鎖の静的特性は、カテナリー理論による解析法と、有限要素法に代表される数値解析法によって求めることができる。カテナリー理論は、^{18), 19)} 索鎖の剛性を無視して、重力、浮力、張力の釣合から索鎖の形状、張力を求めようとするもので、一般に、次の仮定がなされる。

- (イ) 係留索鎖の伸びを無視する。
- (ロ) 係留索鎖の変形は2次元的である。
- (ハ) 係留索鎖の特性は一様である。
- (ホ) 係留索鎖に動的流体力は作用しない。

従って、その適用にはかなりの制約を受ける。しかし、カテナリー理論を発展させて、係留索鎖の伸び、中間ブイ・シンカー、複合索鎖等を考慮した静的解析が行われている。^{20)~24)}

数値解析法は、係留索鎖の動的挙動を求める動的解析法へ発展せらるもので、一般には、動的特性の一状態として、静的特性が求められる。数値解析法の特徴は

- (イ) 係留索鎖の伸びを考慮できる。
- (ロ) 係留索鎖の変形を3次元的に取扱える。
- (ハ) 中間ブイ、シンカー、複合索鎖等の特殊係留を取扱える。
- (ニ) 海底勾配等の海底地形を考慮できる。
- (ホ) 海底面と係留索鎖との摩擦（海底土質の影響を受ける）を考慮できる。
- (ヘ) 動的解析法への発展が容易である。

などである。

(2) 動的特性

係留索鎖の動的挙動の実態と計算法に関して調査を行った。索鎖を高周波数で振動させたり、急速に動かしたときの索鎖の形状は準静的に求めたものと異なることが、古くから言われており、また、良く経験することもある。しかし、この実態を述べた文献は少い。近年に、模型実験によって詳細に調べられるようになり、同時に、この実験結果を利用して、各種の動的解析法が検討されている。

(1) 動的挙動の実態

i) 索鎖の張力に対する動的影響

井上²²⁾、小寺山³⁰⁾、島田等³¹⁾の実験によれば、係留ラインの上端を強制的に運動させると、そのときの係留点の反力は、運動の周波数によって大きく変化し、変位のみから求めた、静的な計算では、張力変動を合理的に説明できない。

小寺山は、ラインの各部の垂直方向の運動に対する鎖の付加質量、および抗力を考慮した動的計算を行い、波浪中の係留浮体に働く変動張力を説明した。

強制動搖時の張力を図5.2.1に、また、波浪中における張力を図5.2.2に例示する。

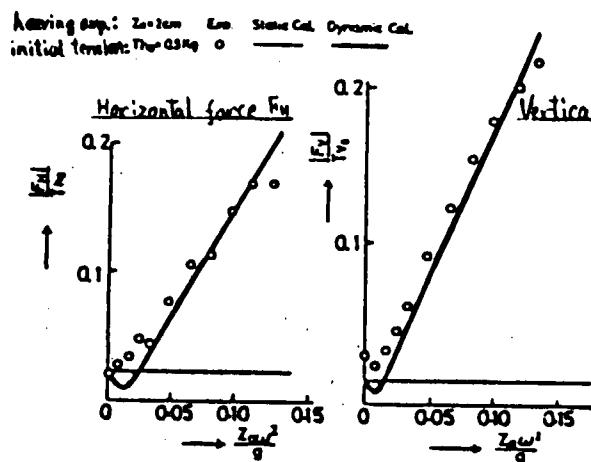


図 5.2.1 Tension amplitude in forced heave ($\Theta_0=0.5\text{kg}$)。

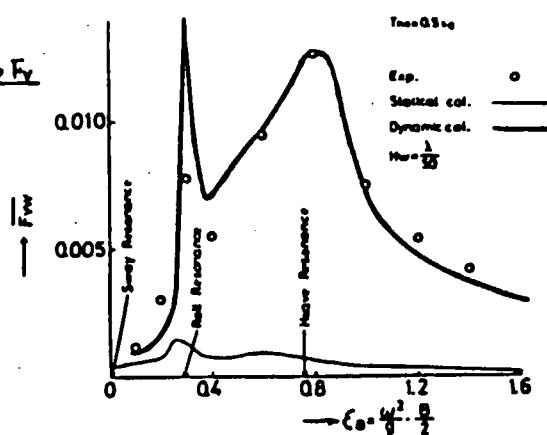


図 5.2.2 Vertical component of tension amplitude of weather side cables ($\Theta_0=0.5\text{kg}$)。

(出典：係留浮体の運動と係留鎖張力について 小寺山亘、西部造船会会報第53号)

ii) 浮体の動搖にに対する索鎖の動的影響

島田ら³¹⁾は、小寺山の示した方法を拡張して、係留ラインの動的張力計算を行い、更に、この方法を応用して、波浪中で係留された双胴型浮体の動搖、および係留張力の推定を行った。島田によると、係留ラインの影響を単に復原力としてのみ取りあつかった場合には、無係留状態と比べて浮体の応用特性はあまり変化しないが、ラインに働く動的影響を考慮すると、ラインに働く抗力の影響で応答振幅が小さくなるとしている。

浮体の動搖に及ぼす影響を図 5.2.3 に、また、張力に対する影響を図 5.2.4 に例示する。

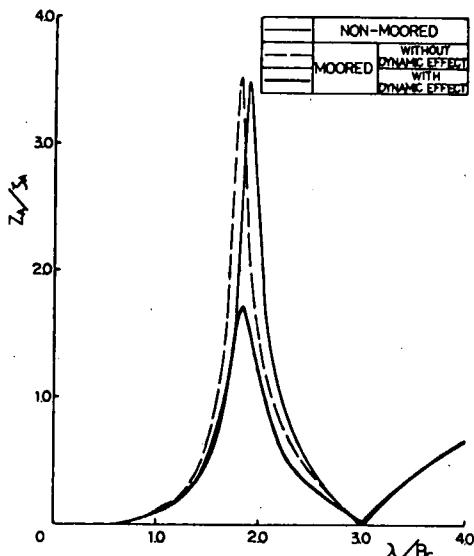


図 5.2.3 Heave amplitude of floating body moored by chains

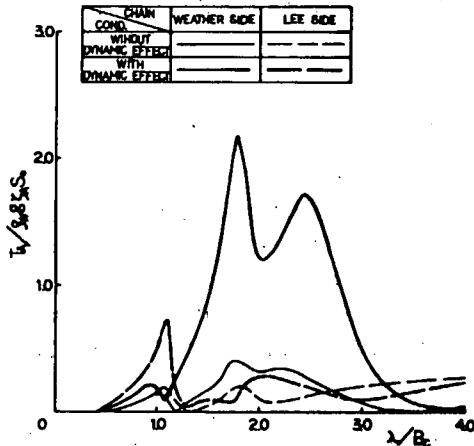


図 5.2.4 Tension amplitude at mooring point

(出典：係留ラインの張力に対する動的影響について、島田潔ほか、

西部造船会会報 第60号)

中嶋ら³⁹⁾は、理論解析と模型試験解析とから次の結論を得た。

- 係留浮体の規模によっては、係留ラインが浮体運動に与える影響は非常に大きくなる。

- b) この原因は、復原力の非線形影響によるものではなく、係留ラインの動的影響による。
- c) 特に、周期の短い所では、ラインに働く変動張力は急激に増大し、係留浮体の運動に与える影響が大きい。また、係留浮体の運動と係留ラインに働く変動張力の間には複雑な相互干渉効果が働き、結果的には、浮体運動を少くする傾向がある。
- d) さらに短い周期になると、浮体自身に働く流体力が小さくなり、運動が小さくなるので、変動張力は急激に減少していく。
- e) 係留ラインの運動が大きいことは必ずしも変動張力が、大きいことを意味しない。
- f) 係留ラインに働く変動張力は、Weather side 側が Lee side 側に比べてかなり大きい。

(d) 動的挙動の計算法

索鎖の動的挙動に関する文献を基に、計算法を整理分類し、各計算法の概要と、その特徴を表 5.2.2 にまとめた。

(3) 今後の問題点

索鎖の静的・動的特性を推定するに当っての問題点をまとめると以下のようになる。

(i) 索鎖の張力推定上の問題点

- i) 索鎖の張力は、浮体の変位量が同一であっても、その振動周波数、あるいは加速度によって複雑に変化する。従って、索鎖の変形および張力が準静的であるとする方法では、張力を過小評価する領域があり危険である。
- ii) 数値解析法は、動的挙動をよく説明するが、計算時間が長い。
- iii) 簡易計算法は、準静的計算法と数値解析法の中間的なもので、計算時間は短いが高周波数領域で実験と一致しない。この計算法は、索鎖の変形が準静的あるとする方法であり、深海係留の場合には、その適用に当って注意を要する。
- iv) 従って、各計算法に対して、水深；周波数等の適用範囲を明確にする必要がある。栖原らの³⁶⁾研究は係留鎖の上端を上下に強制振動させて、その挙動を周波数毎に分類し、カテナリー理論、簡易計算法、Lumped mass 法の適用範囲を示した。このように、数値解析法を用いて張力への周波数、水深及び振幅等の影響を調査する必要がある。
- v) 係留索鎖の付加質量係数、抗力係数のデータが少い。特に係留ラインの斜め、および、接線方向のデータ⁴⁴⁾は少い。従って、データの蓄積のために、実験の実施が必要である。
- vi) 係留索鎖の静的・動的特性を実機へ応用する場合、相似則を考慮して計算と模型試験結果を利用する必要があるが、実機の実測例についての報告が殆んどなく、相似則について現状ではよくわからない。今後の検討が必要である。
- vii) 海底面と係留索鎖との摩擦係数を調べる必要がある。

(e) 浮体の応答推定上の問題点

係留力を単に復原力として取り扱うだけではなく、係留係と浮体を一体として取り扱うことが必要である。

表 5.2.2 動的計算法の分類と特徴

	計 算 法	対象	非定常 解析	減衰力	計算時間	適用範囲	文 献 №
簡 易 法	係留ラインの運動方程式を直接解かず(て)、準静的な運動を用いて、係留ラインに作用する流体力を積み、動的係留力を求めめる方法。	均一 ライン	不可能	非線形	短い	動搖加速度が大きい場合 には不適。	小寺山 30) 島田 31)
線 形 化 法	係留ラインの運動を微小とし、運動方程式を線形常微分方程式に変換して解く方法。	均一 ライン	不可能	線形	短い	動搖振巾が大きい場合 には不適。	Chang 5) Alexandrov 32)
特 性 曲 線 法	係留ラインの運動方程式を特性曲線を用いて連立常微分方程式に変換して解く方法。	均一 ライン	可能	非線形	長い	適用範囲や広い。	Reid 33) Wilson 34)
Lumped mass法	係留ラインを有限個のバネー質点系で置きかえて解く方法。	不均一 ライン	可能	非線形	長い	適用範囲広い。	Thresher 12), 小寺山 13) Walton 35), 棚原 36) 中嶋 37), 39), Nuckolls 38) Griffin 40)
有 限 要 素 法	Lumped mass 法と同様に、係留ラインを有限個の要素でモデル化して解く方法。	不均一 ライン	可能	非線形	長い	適用範囲広い。	Webster 9), 42) 吉田 10), 片山 21) J ohansson 43).

参 考 文 献

- 1) Kretschmer et al.: "SEACON II: An Instrumented Tri-Moor for Evaluating Cable Structure Design Methods" OTC 2365. 1975
- 2) Wilson, B.W.: "Characteristics of Anchor Cables in Uniform Ocean Current." The A&M College of Texas. Department of Oceanography and Meteorology, Technical Report No. 204-1, Apr. 1960
- 3) Pode, L.: Table for Computing the Equilibrium Configuration of a Flexible Cable in a Uniform Stream, David Taylor Model Basin Report No. 687, March. 1951
- 4) Pode, L and L. Rosenthal: Cable Function Tables for Small Critical Angles. Supplement to David Taylor Model Basin Report No. 687, September. 1955
- 5) Chang. P.Y and Pilkey W.D: "Static and Dynamic Analysis of Mooring Lines" J. Hydraulics Vol. 7. No.1 1973
- 6) Wang H.T. et al.: "Effect of Nonplanar Current Profiles on the Configuration of Moored Cable Systems" OTC 1532, 1972
- 7) Walton, T.W and H.Polachek: "Calculation of Transient Motion of Submerged Cables." Mathematical Tables and Aids to Computation, V. 14, 1960
- 8) Bedendender J.W.: "Three-Dimensional Boundary Value Problems for Flexible Cables" OTC 1281, 1970
- 9) Webster R.L.: "Nonlinear Static and Dynamic Response of Underwater Cable Structures Using the Finite Element Method." OTC 2232, 1975
- 10) 吉田宏一郎他: "有限要素法による水中線状構造の応答解析" 造論 S5 3. 12
- 11) Dominguez R.F.: "The Static and Dynamic Analysis of Discretely Represented Moorings and Cables by Numerical Means" Ph.D.Thesis, Oregon State Univ., Corvallis, ORE. 1971
- 12) Thresher R.W. and Nath J.H.: "Anchor-Last Deployment Simulation by Lumped Masses" Asce Vol. 101 No. NW4. 1975
- 13) 小寺山 亘他: "海洋計測用ブイシステムの運動の数値計算法について"
九大応力研所報 53号 1980.

- 14) Skop, R.A. and O'Hara, G.J.: "The Static Equilibrium Configuration of Cable Arrays by Use of the Method of Imaginary Reactions." Naval Research Laboratory Report NRL-6819. FEB., 1969
- 15) Dominguez, R.F. and Smith C.E.: "Dynamic Analysis of Cable Systems" J. of the Structural Division. Aug. 1982
- 16) Berteaux, H.O.: Design of Deep-Sea Mooring Lines. Marine Tech. Soc. J May/June, 1970. Vol.4, No.3
- 17) Casarella. M.J., and M.G. Parsons,: A survey of Studies of the Configuration of Cable Systems under Hydrodynamic Loading, Catholic University of America. Aug. 1970. Report No. 69-10
- 18) 上田 茂他: カテナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表, 港湾技研資料, №379. June. 1981.
- 19) 伊藤達郎他: 海洋開発技術ハンドブック, 通商産業省, 運輸省編集, 朝倉書店
- 20) 庄司邦昭 : 係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究, 日本造船学会論文集, 第138号, 昭和50年12月
- 21) 片山正敏他: 浮遊式海洋構造物の係留解析法, 三菱重工技報, Vol. 13
- 22) 井上義行 : 任意係留ラインの静的特性計算, 石川島播磨技報, 第16巻, 第5号, 昭和51年9月
- 23) P.Y. Chang : The analysis of mooring Lines. OTC-1502, 1972.4
- 24) M. Deha Korkut 他: Some Notes on Static Anchor Chain Curve, OTC-1160, 1970.4
- 25) T.R.Goodman R.Kaplall 他: Static and Dynamic Analysis of a Moored Buoy System, National Data Buoy Center, April 1972
- 26) M.F. van Sluijs J.J.Bolk: The Dynamic Behavior of Mooring Lines, OTC 2881, 1977
- 27) W. Kotera: Motions of Moored Floating Body and Dynamic Tension of Mooring Lines in Regular waves, Report of Research Institute for Applied Mechanics, Sep. 1978
- 28) 安藤定雄: 索鎖の流体力について(その1・部分模型), 西部造船会会報, 第50号, 1975
- 29) 井上義行: 浮遊式海洋構造物の波浪中における運動および係留特性, IHI新報, 第17巻, 第2号,

- 30) 小寺山 亘：係留浮体の運動と係留鎖張力について，西部造船会々報第53号，1977
- 31) 島田潔，小林正典，日根野元裕：係留ラインの張力に対する動的影響について，西部造船会々報第60号，1980
- 32) Alexandrov, M.: On the Dynamics of Cables with Application to Marine Use, MARINE TECHNOLOGY, JAN. 1971
- 33) Reid. R.O.: Dynamics of Deep sea Mooring Lines. Texas A&M Univ. Dept. of Oceanography, 1968
- 34) Wilson. B.W., Garbacci, R.H.: Dynamics of Ship Anchor-Lines in Waves and Current, Journal of the Waterways and Harbors Divi. ASCE, Vol. 93, No. WW4. Paper 5565, 1967
- 35) Walton, R.A., Polacheck. H: Calculation of Nonlinear Transient Motion of Cables, David Taylor Model Basin Report 1279, 1959
- 36) 栖原寿郎，小寺山亘，田才福造，肥山央，渡辺邦夫：振動する係留鎖の挙動と張力，造船学会論文集第148号，1980
- 37) 中嶋俊夫，元良誠三，藤野正隆：特殊係留ラインの動的特性について，第5回海洋工学シンポジウム，1981
- 38) Nuckolls, C.E., and Dominiguez, R.F.: LARGE DISPLACEMENT MOORING DYNAMICS, OTC 2880, 1977
- 39) 中嶋俊夫，元良誠三，藤野正隆：係留浮体の運動を考慮した係留ラインの動的挙動について，造船学会論文集第150号，1981
- 40) Griffin, G.T., Patton, K.T.: Dynamics of Trapezoidal Cable Arrays, Naval Underwater Systems Ctr., Report 441, 1972
- 41) Webster, R.L.: An Application of the Finite Element Method to the Determination of Nonlinear Static and Dynamic Responses of Underwater Cable Structures. PhD Thesis, Cornell Univ., Ithaca. NY, 1976
- 42) Webster, R.L., McCreight, W.R.: Analysis of Deep Sea Moor and Cable Structures, OTC 3623, 1979
- 43) Johansson, P.I.: Non-linear Dynamic Response of a Mooring Line, DET NORSKE VERTAS, Publication No. 106, 1978
- 44) 宮崎芳夫他：一様な流れの中に置かれた錨鎖の形状と張力に関する研究—I 一錨鎖の流体的特性について—，日本航海学会論文集，62号，昭和55年1月

5.3 緩係留における長周期運動

5.3.1 深海係留と長周期運動

ここにいう緩係留とは、海洋構造物の質量に対して係留系による復原力が小さく、系が長周期の固有周期を有するような係留をいう。

浅海係留と深海係留を比較する場合、両者の間の差は特に水深であるが、前者の場合には係留ラインが比較的水平に張られるのに対し、後者の場合には垂直に立った状態に近くなるといえる。復原力を係留ラインのみに依存する浮体の水平面内運動（Surge, Sway, Yaw）を考える時、その復原力となる係留ライン張力の水平方向分力は浅海係留においては強く、深海係留においては弱いといえる。

従って、一般に深海係留は緩係留になると考えられるわけであるが、これに長周期の変動外力が作用すると、たとえそれが小さい力であっても、係留浮体に同調現象としての大きな動搖を誘起することになる。その動搖の大きさは、一つには外力の強さにより、もう一つには系の減衰力の大きさにより決定されよう。

構造物に働く重要な外力としては、波、風、潮流による力がある。波力についてはいわゆる1次のオーダーの力と2次のオーダーの力に分けることができる。前者は波と同じ周期で働く力であって、粗い表現をすれば10秒前後以下の周期の力である。後者は前者より1オーダー小さい力であるが、流体力の非線形影響によって発生する長周期の力であり、長周期の固有周期をもつ係留系には重要な外力となる。

風については、古くは定常外力として考慮されていた。しかし、近年、風速の変動に伴う変動外力が研究されるようになってきている。この外力も、風速そのものが長周期の変動をするため、長周期外力として重要である。

潮流については、例えば潮汐流を考えると12時間、24時間といった変動周期が考えられるが、あまりにも長周期すぎて係留系に対する変動力としては考えられない。工学的には時間に関して定常な流れとして取り扱われる。

この他に、一般に論議されていないけれど、海洋波には例えば林他(1)が報告しているように、波そのものに長周期の成分がみられることがあり、注意を要する。表5.3.1は長周期波の報告例である。

5.3節では長周期運動に関する研究の現状を報告しようとするものであるが、長周期の定義を概略30秒以上とし、従って、波による1次のオーダーの波力についてはここではふれないことにする。5.3.2では風の構造と風外力について述べる。5.3.3では2次のオーダーの波力である波漂流力について述べ、波のスペクトルについては日根野他(2)がまとめているので特に言及しない。5.3.4ではこれらの外力による係留構造物の応答計算手法について述べる。

なお、長周期動搖の誘因として、系の有する非線形性が原因となる分数調和振動のごとき現象もありうるが、本報告では、長周期の外力により励起される長周期運動に焦点をしぼるものである。

5.3.2 風の構造と風外力に関する研究の現状

(1) 風の構造

風は空気の移動現象であって、マクロ的には大気の運動と考える。大気の運動を支配する力として、気圧差による気圧傾度力、地球の自転によるコリオリカ（転向力）、地・海表面による摩擦力、曲線運動に伴う求心力（遠心力）がある。

地・海表面の摩擦の影響はその表面から500～1000mに及び、この層を大気境界層と呼ぶ。

これより上の大气は摩擦の影響を受けず、自由大气と呼ばれる。この有様を模式的に図 5.3.1 に示す。

自由大气における風は三種類ある。一つは地衡風といわれ、気圧傾度力とコリオリカの平衡状態を保とうとして吹く風である。コリオリカに依存するということは、風は地球の緯度により変わるということになる。もう一つは傾度風といわれ、この 2つの力の外に、等圧線が曲率を有している場合に風の進路も曲率をもたねばならず、そのために発生する求心力の作用を受けるものである。最後の一つは、台風の中心部のように等圧線の曲率半径が小さく、気圧傾度力が大きい場合の風で、旋衡風と呼ばれる。ここではコリオリカを省略できる。

工学的対象となるのは、もっぱら大気境界層の風である。この層の風は、地・海表面による摩擦の影響を受け、より複雑な乱流となる。この層の乱流に寄与するもう一つの大きなパラメータは熱対流である。この寄与率は Richardson Number (Ri) によって定まる。

$$Ri = \frac{g}{T} (r_d - r) / \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right)^2 \quad (5.3.1)$$

ここに、 g : 重力加速度、 T : 気温、 r : 気温減率、 r_d : 乾燥断熱減率、 U : 風速、 Z : 高度である。Panofsky (3)によれば「 $|Ri| < 0.01$ であれば熱対流の効果を無視できよう。この状態は低い高度の強風時に現われる。おおよそ $50 m$ 以上の高度になると、熱対流の効果が無視しえなくなってくる。」という。

以下では大気境界層で熱対流の効果を無視できる風について述べる。

(1) 平均風速の鉛直方向分布

もし、Richardson 数が小さく、比較的平坦で一様な地・海表面上を考える場合、時間平均風速 \bar{U} は次の対数法則に従う。

$$\bar{U}(Z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (5.3.2)$$

ここに、 k : カルマン定数(約 0.4)、 Z : 高度、 Z_0 : 地・海表面の粗度長、 u_* : 摩擦速度($= \sqrt{\tau_0/\rho}$)、 τ_0 : 地・海表面でのせん断応力、 ρ : 空気の密度である。 Z_0 の値の一例を表 5.3.2 に示す。この対数法則は風洞実験値および観測値とよく一致するといわれている。しかし、表面粗度の大きい所とか、また大気境界層の上層部等では、対数法則で説明できなくなる傾向がある。

一方、工学的には風速の分布をベキ法則で表わすことが行われている。すなわち、

$$\frac{\bar{U}(Z)}{\bar{U}(Z_1)} = \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^\alpha \quad (5.3.3)$$

ここに、 Z_1 は任意にとられる基準高度である。この法則も万能ではなく、計測値によって種々の α が得られているが、簡便である利点がある。 α の観測結果の例を表 5.3.3 に示す。この表では $Z_1 = 10 m$ ととられている。海上においては資料が極めて少ないが、本四連絡橋調査報告(6)では、 $\alpha = 1/6$ の報告がなされている。

Shears 他(7)によれば、Department of Energy (U.K.) の承認のもとに、海上風の構造の解明を含めた研究プロジェクトが発足しており、すでにいくつかの結果が得られているという。彼の論文の要点を紹介すると以下のとおりである。

平均海水面上での平均風速分布は

$$\bar{U}(Z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{Z}{Z_0} + 5.75 \frac{Z}{h} \right] \quad (5.3.4)$$

となる。ここに、 $h = u_* / 6f$ 、 f ：コリオリパラメータ($\approx 10^{-4}$)である。この関係式は、波高領域から上約200mまでにおいて次のベキ法則で近似することができる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}(Z) &= \bar{U}(10) \cdot (Z/10)^{\alpha} \\ \alpha &= [1.05 + (0.18/u_*)] / \ln(68/Z_0) \end{aligned} \right\} \quad (5.3.5)$$

Z_0 は海面の状態によって変わる。

また、風向方向の風速の変動成分の強さは、その変動のR.M.S (Root Mean Square) σ で表わすと、

$$\sigma(Z) = u_* \times 2.63 \eta \left[0.2 \ln(Z/Z_0) \right]^{\frac{1}{2}} \eta^{10} \quad (5.3.6)$$

ここに、 $\eta = 1 - Z/h$ である。今、 U_* を示す量として風応力係数

$$C_z = (u_*/\bar{U}(Z))^2 \quad (5.3.7)$$

を定義する。Det Norske Veritas (8)は C_{10} として粗い海面で0.002、穏やかな海面で0.0015を与えており。表5.3.5に、いくつかの C_z の観測値を示すが、強風時の観測値でないのが心もとない。一方、 Z_0 に関しては、Hsu(9)によると、発達段階および完全発達状態の海面に対して、風速が20m/sまでならば $Z_0 \approx 0.06m$ である。これらを含めて、報告されているデータはいずれも低風速をもとにしており、Extreme stormへ外挿するには疑問があるので、現状では海上の風を予測し得るに十分な手法が確立されていないといえる。

(d) 風速の時間変動

変動する風は、一般に、ある時間平均値 \bar{U} とそこからの変動成分である $u(t)$ との和として表わされる。この場合、平均時間としていくらを採用するかが問題となってくる。気象観測において、日本では10分をとっているが、イギリス、カナダでは1時間、米国では5分とまちまちである。図5.3.2に風速のスペクトルを示す。図において数日の周期にみられる強い変動成分は、高気圧、低気圧等の気団の通過によるものであり、一方、5分～5時間の周期ではあまりエネルギーがなく、5分以下ではいわゆる風の息といわれる強い変動成分がある。この5分～5時間の部分を“エネルギーギャップ”というが、平均風速の平均時間がこの間にあるということは納得できることである。

さて、まず平均風向の風速であるが、これを

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (5.3.8)$$

と表わす。変動成分 $u(t)$ は多くの観測結果から、正規分布をする不規則現象とみなせることがわかっている。 u の標準偏差と平均風速の比

$$I_u = \sqrt{u^2}/\bar{U}$$

を乱れの強さと呼ぶが、これは図5.3.3に見るように高さとともに減少していく性質を有し、従って風速の変動の仕方も高さによって変わることになる。

この u の時間的変動をエネルギースペクトルで表わすことができるわけであるが、風のエネルギーは、ある周波数の成分が順次、大きい周波数の成分に移項していく性質を有する。エネルギースペクトルは、その周波数の小さい部分から大きい部分に向って、順次、エネルギー搬入部、エネルギー貯蔵部、平衡領域と呼ばれる部分を有する。これを図5.3.4に示す。この平衡領域でも流体の慣性力が支配的な領域では、有名な $-5/3$ 乗則がKolmogorovによって導かれ、多くの確証が得られている。

一方、より高周波数の流体粘性項がきいてくる領域では -7 乗則に従うといわれている。低周波数領域すなわちエネルギー搬入部では諸説があり定かでない。因みに Davenport(12) は 1 乗則を与えているが、多くの実則によれば周波数が小さくなると 0 乗の型を有する。

以下に提案されている代表的なスペクトルを紹介する。

工学的に最も広く使用されているのが Davenport(12) のスペクトルであり、

$$S_u(f) = 2 \frac{K}{f} \overline{U}_{10}^2 \cdot X^2 / (1 + X^2)^{4/3} \quad (5.3.9)$$

ここに、 f は周波数、 $X = fL/\overline{U}_{10}$ 、 $L = 1200m$ 、 \overline{U}_{10} ： $10m$ 高度での平均風速、 K ：表面摩擦係数である。海上では $K = \begin{cases} 0.001 & \text{とされることが多い。} \\ 0.002 & \end{cases}$ 式からわかるように、このスペクトルは高度に無関係に与えられる点が実情にそぐわない。そこで、Davenport(13) は、高さ Z における分散 σ_z^2 を用い、高度に応じたスペクトルとして

$$S_u(f) = \frac{\sigma_z^2}{3f} X^2 / (1 + X^2)^{4/3} \quad (5.3.10)$$

を提案している。ここに $X = fLz/\overline{U}_z$ である。

Kaimal 他(14) は、高度に応じたスペクトルとして

$$S_u(f) = 105 \cdot u_*^2 \cdot \frac{Z}{U} (1 + 33Y)^{-5/3} \quad (5.3.11)$$

ここに $Y = f \cdot Z/U$ 、を提案している。

Panofsky(3) は、 $f \rightarrow$ 小で観測値は高さに無関係になるという事実に Kaimal 他のスペクトルは矛盾しているとし、万能な表現として(5.3.11)式を改良して

$$S_u(f) = A \cdot u_*^2 \cdot \frac{Z}{U} \left(\frac{Z}{\lambda} + B \cdot Y \right)^{-5/3} \quad (5.3.12)$$

を提案している。ここに λ は高度 Z に無関係で、地・海表面固有の値としている。A、B は実測値に合うように定める。

日野(15) は、平均風速の鉛直分布を考慮して次式を与えている。

$$\left. \begin{aligned} S_u(f) &= \frac{0.4751}{2} \cdot \sigma_z^2 \cdot \beta \cdot \left[1 + (f/\beta)^2 \right]^{5/6} \\ \beta &= 1.169 \times 10^{-2} \cdot \frac{\alpha \overline{U}_{10}}{\sqrt{K} \cdot Z_1} \cdot \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^{2\alpha-1} \end{aligned} \right\} \quad (5.3.13)$$

ここで $Z_1 = 10m$ 、 α はベキ法則の指数である。

Harris(16) は、高度変化を無視し、次式を与えている。

$$S_u(f) = 2 \frac{K}{f} \cdot \overline{U}_{10} \cdot X^2 / (1 + X^2)^{5/3} \quad (5.3.14)$$

ここで $X = 1800f/\overline{U}_{10}$ である。

いずれのスペクトルも一長一短ということであるが、我が国では日野あるいは Davenport(5.3.9) 式を使用することが多い。図 5.3.5 は、このスペクトルを実測値と比較した例である。

さて、次に、平均風向に直角方向の変動成分であるが、水平直角方向についてはほとんど資料がみられない。鉛直方向については Panofsky 他、Busch 他、Singer 他、がスペクトルを与えており、それらを塩谷(11) の実測値と比較した例を図 5.3.6 に示しておく。

(4) 風速の空間変動

風速の空間的変動については時間的変動ほど明らかにされていない。現在論議されているのは、変動風速の空間座標方向3成分を考える時、その1成分自身間の空間的相関であり、得られているデータは限定されている。データは現地観測によるものと、風洞実験によるものとある。風洞実験では、乱流格子を用いる方法と、境界層による方法とが使用されている。

空間的風速変動は、相関係数、クロススペクトルで表現されるのが一般的である。風速変動を $u_i(x, t)$ とすると、 x 方向の相互相関関数は、時間おくれを τ 、空間おくれを r として

$$R_{ij}(r, \tau) = \frac{u_i(x, t) \cdot u_j(x+r, t+\tau)}{\sqrt{u_i^2} \sqrt{u_j^2}} \quad (5.3.15)$$

ここで $\tau = 0$ とおいたものを u の空間相関関数という。相関係数の定義は

$$Q_{ij}(r) = R_{ij}(r) / \sqrt{u_i^2} \sqrt{u_j^2} \quad (5.3.16)$$

である。クロススペクトル密度関数は、(5.3.15)式をフーリエ変換して得られ、 $\tau = 0$ の時

$$S_{ij}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(r) e^{-i2\pi kr} dr \quad (5.3.17)$$

となる。なお、 $r = 0$ とし、 τ で変換すれば時間変動に関する

$$S_{ij}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (5.3.18)$$

が得られる。ここに k は波数、 f は周波数である。渦が観測点を通過する間その形を保持するという“ティラーの乱れの凍結に関する仮説”が成立する場合、 $k = f / U$ となる。

いくつかの研究によれば、乱流格子による乱れは、平均風速風向の変動 u に関して、その方向の r の距離にある2点間の相関係数を

$$Q_x^u(r) = \exp \left\{ -r / L_x \right\} \quad (5.3.19)$$

の形で与えることができる。ここに L_x は x 方向の乱れのスケールと呼ばれ、一般に乱れのスケール L は、相関係数 $Q(r)$ により、

$$L = \int_0^{\infty} Q(r) dr \quad (5.3.20)$$

と定義されるものである。

乱れの等方性の仮定によると、(5.3.19)式で考えたのと同じ2点間において、 u に直角方向の変動成分 w の相関係数は、 L_x を用いて

$$Q_x^w(r) = \left(1 - \frac{r}{2L_x} \right) \exp \left\{ -r / L_x \right\} \quad (5.3.21)$$

と与えることができる(4)。

自然風の観測値によると、2点A, B間の変動風速のコーヒレンス関数 $r_{AB}(f)$ を求めることにより、平均風速風向の変動成分 u は

$$\sqrt{r_{AB}^u(f)} = Q_{AB}^u(f) \doteq \exp \left(-k \frac{fr}{U_{10}} \right) \quad (5.3.22)$$

となることが認められている(4)。この関係は、周波数成分ごとの空間相関を示したもので、式にみられるように無次元周波数 $f r / \bar{U}_{10}$ の指數関数となっている。定数 k については、例えば塩谷(17)によると、表5.3.4のごとく与えられている。これは2点を高さ方向にとった場合の例である。2点を u の水平直角方向にとった場合には $k = 5 \sim 8$ とされる。Davenport(18)は $k = 7$ を推している。

u 以外の2方向の変動成分に関しては(5.3.2.2)式のような指數関数が適用されると考えられるようである。

桑島他(19)は海岸で洋上の風を計測したが、50mおよび100m離れた点の変動風速のコヒーレンスが

$$r_{AB}^u(f) = \exp(-4.6 f^{0.5}) \quad (5.3.2.3)$$

となることを報告している。

(2) 風の力

自然界の風は、時間的にも空間的にも変動しているので、構造物に働く風外力も時間的に、また空間的に変動する。風の力は、構造物と風の相互干渉の影響を受け、複雑な挙動を示すが、現在、以下のよき取り扱い方がされているようである。

流体力学的には、流体力は、流体と物体の相対速度 V とその加速度 \dot{V} の関数となるが、空気の密度が小さいため、付加質量効果はほとんど問題とされず、速度の2乗に比例する抵抗力のみを考えるのが一般的の取り扱い方である。すなわち、抗力は

$$F(V, \dot{V}) = C \cdot \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (5.3.2.4)$$

とされる。ここに ρ は空気の密度、 A は物体の投影面積、 C は抗力係数あるいは揚力係数、モーメント係数である。この式はそもそも定常流中で確認される関係であるが、 V が変動しても瞬時瞬時においてこの関係が成立すると仮定される。これを準定常的取り扱い(quasi-steady approach)という。

平均風速風向における時間変動を考えて、この方向の風速を $\bar{U} + u(t)$ 、この方向の物体の運動を $x(t)$ とすると、準定常理論により、 x 方向に働く力すなわち抗力は

$$\begin{aligned} F_x(t) &= C_D \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \left[\bar{U} + u - \dot{x} \right]^2 \\ &\doteq \frac{1}{2} \rho A C_D \left[\bar{U}^2 + 2 \bar{U} u - 2 \bar{U} \dot{x} \right] \end{aligned} \quad (5.3.2.5)$$

と与えられる。ここに、 \bar{U} に比して u 、 \dot{x} は微小量として、その2乗の項は無視されている。厳密にいえば、定常流中の C_D と振動数 f の変動流中でのそれとは異なるとされ、その違いを時間変動空力アドミッタанс $X_t(f)$ として導入し、

$$F_x(t) = \frac{1}{2} \rho A C_D \left[\bar{U}^2 + 2 \bar{U} \cdot X_t(u - \dot{x}) \right] \quad (5.3.2.6)$$

とされる。従って変動風による外力のスペクトル $S_{Fx}(f)$ は

$$S_{Fx}(f) = (\rho A \bar{U} C_D)^2 |X_t(f)|^2 \cdot S_u(f) \quad (5.3.2.7)$$

とされる。ここに $S_u(f)$ は風速のスペクトルである。

揚力については、 u による揚力と、 u に直角方向の変動風速 w による抗力の和として表わされる(4)。吊橋、飛行機の翼については妥当な取り扱いと考えられるが、構造物の下半分が水面下になる海洋構造物については疑問がある。

風力の空間変動については多くの研究がみられ、例えば本四連絡橋調査報告(6)にその取り扱い方が説明されている。風力の空間変動については、以下に示すラティス構造物(格子状構造物)に作用する力の考え方方が根幹となっている。

すなわち、今、風速方向に直角に立った平面ラティス構造物を考え、その構成部材は一様の抗力係数を有するとする。点 a における時間変動外力を

$$P_a(t) = C_D \rho \bar{U} u_a(t) dA_a \quad (5.3.28)$$

とし、 b 点におけるそれを添字 b を用いて表わすとする。

この時、構造物全体に働く力の自己相関関数は

$$\begin{aligned} R_F(\tau) &= \int^A \int^A \overline{P_a(t) \cdot P_b(t+\tau)} dA_a dA_b \\ &= (C_D \rho \bar{U})^2 \int^A \int^A \overline{u_a(t) \cdot u_b(t+\tau)} dA_a dA_b \end{aligned} \quad (5.3.29)$$

となるから、変動抗力のパワースペクトル密度は

$$\begin{aligned} S_F(f) &= (\rho C_D \bar{U})^2 \int^A \int^A S_{ab}(f) dA_a dA_b \\ &= (\rho C_D A \bar{U})^2 |X_s(f)|^2 \cdot S_u(f) \end{aligned} \quad (5.3.30)$$

で与えられる。ここで S_{ab} は(5.3.18)の定義によるクロススペクトルであり、 $S_u(f)$ は変動風速のスペクトルである。 $|X_s(f)|^2$ は空間変動に関する空力アドミッタンスと呼ばれ、(5.3.30)式から明らかのように、

$$|X_s(f)|^2 = \frac{1}{A^2} \int^A \int^A \frac{S_{ab}(f)}{S_u(f)} dA_a dA_b \quad (5.3.31)$$

であり、規準化されたクロススペクトルの構造物全面にわたる積分値である。

時間的変動と空間的変動の双方を含んだ形で風の力のスペクトルを

$$S_F(f) = (\rho C_D A \bar{U})^2 |X(f)|^2 S_u(f) \quad (5.3.32)$$

と表現することもあり、もし、時間と空間の効果が線形重畳できるとするなら、

$$|X(f)|^2 = |X_t(f)|^2 \cdot |X_s(f)|^2 \quad (5.3.33)$$

である。

以上、風の力のとらえ方を見てきたが、以下に計測例を紹介しておく。

Vickery(20)は流れに直角におかれた平板($B \times H$)および角柱に働く力の空力アドミッタンスを調べ、図5.3.7を示している。縦軸は空間変動に関する空力アドミッタンスの平方根、横軸は無次元化周波数である。ラティス構造と仮定した場合の理論値と、平板に働く力の計測値はほぼよい対応を示しているが、実験経験式として

$$|X(f)| = \left\{ 1 + \left[\frac{2f\sqrt{A}}{U} \right]^{\frac{4}{3}} \right\}^{-1} \quad (5.3.3.4)$$

が与えられている。Aは流れに直面する面積(投影面積)である。

Vickery(20)によると、空力アドミッタンスは構造物の大きさ(長さ)Dと風の乱れのスケールLxの比によってかわるとしているが、Bearman(21)によると、図5.3.8に示すように、実験値には理論値との差は現われないとしている。

Kawai他(22)は、構造物の上流の風速と構造物上の圧力の関係を調べ、速度・圧力応答関数X_{up}(f)を導入した。図5.3.9、図5.3.10がその例であり、図中の実線は実験式である。この関数は構造物の形状に無関係で周波数のみに関係するとしている。そして、この関係とラティス理論を用いると実験値を良く説明できるとしている。すなわち、ラティス理論に使われる風速のクロススペクトルのかわりに、圧力の基準化クロススペクトル $\tilde{S}_{P_a P_b}(f)$ を用い、空力アドミッタンスを

$$|X(f)|^2 = \frac{1}{A^2} \int^A \int^A |X_{up_a}(f)| \cdot |X_{up_b}(f)| \cdot \tilde{S}_{P_a P_b}(f) dA_a dA_b \quad (5.3.3.5)$$

と求めるのがよいとしている。その結果を示したのが図5.3.11である。図中 equation(6)が(5.3.3.5)式によるものである。

以上の例はすべて風洞による乱流実験である。変動風による空力アドミッタンスの実機観測例はあまりみられない。特に海上風に関するものは皆無と考えられる。

(3) 現状の問題点

一番の問題点は海上の風の観測データの少ないことであろう。また、計測されていても、Shears他(7)が指摘しているように、低風速時のデータがほとんどであるところに問題がある。すなわち、風が強ければそれだけ海面が荒れているわけで、海面との相互干渉のため風の乱れ方がさらに強まると考えられるからである。図5.3.12は波面と、その海上の風速を同時計測したKondo他(24)の結果であるが、海面の起伏がかなりの高度の風速まで影響を及ぼしていることがわかる。従って、低風速で比較的穏やかな海面上の風のプロフィルを、強風時に対して外挿するのには疑問がある。

強風の海上のデータが是非ほしい所である。

次に、風外力の推定法について見てみると、すでに述べた準定常的取り扱い方が用いられており、ある程度実用的结果を与えてくれるようではある。また、変動風速と変動外力を結ぶ伝達関数といえる空力アドミッタンスが議論されているが、それによると低周波数の現象に関しては、空力アドミッタンスを1とみなしてよいようである。海上の係留構造物にとってあまり重要ではない高周波数になると、これは1より小さい値となる。従って、常にこれを1とみなせば、設計上安全側の考え方になる。

図5.3.13は、Boonstra他(25)が報告した平均風速と平均風外力に関する実測例である。構造物はいわゆるSem-Sub型 ブラットホームで、外力は係留から逆算された。図にはDet Norske VeritasのRuleに従って計算された風外力も示しており、現在の計算法は過剰設計であると彼らは主張している。

空力アドミッタンスに関する今後の研究が望まれ、さらには定常外力の計算法についても見直しが必要かも知れない。

5.3.3 波漂流力に関する研究の現状

船舶も含めて海洋構造物に作用する波漂流力に関しては、比較的多くの研究がなされており、Review をした文献(26)、(27)、(28)、(29)も少なくない。全ての研究例を網羅することはできないので、これらの文献を参考として、主要な研究例を紹介していくこととする。

(1) 規則波による波漂流力

規則波による波漂流力の計測例は古く遡ることができ、有名な末広の実験(30)が1924年に行われている。その後、Havelock(31)が、また花岡(32)が計算法を示したが不十分であった。ボテンシャル論による厳密な答を与えたのが丸尾(33)である。運動量理論を用いて導き出された答は、漂流力は運動浮体による総反射波の波振幅 ζ_r の2乗に比例するというものである。すなわち、波漂流力 \bar{F}_D は

$$\bar{F}_D = 0.5 \rho g \zeta_r^2 \quad (5.3.36)$$

ここに、 ρ ：流体の密度、 g ：重力加速度である。

丸尾は深海波を考えたが、野尻他(34)は有限水深の効果を考慮し、水深 h 、波数 k の時

$$\bar{F}_D = 0.5 \rho g \zeta_r^2 (1 + 2kh \operatorname{cosech} 2kh) \quad (5.3.37)$$

となることを示した。

以上に加うるに、流体にエネルギー損失がある場合も考察されており、例えば高木(26)が導いてい るように

$$\bar{F}_D = 0.25 \rho g (\zeta_i^2 + \zeta_r^2 - \zeta_t^2) (1 + 2kh \operatorname{cosech} 2kh) \quad (5.3.38)$$

と与えられる。ここに ζ_i ：入射波振幅、 ζ_t ：透過波振幅である。エネルギー損失のない場合には $\zeta_i^2 = \zeta_t^2 + \zeta_r^2$ となるので、これを(5.3.38)式に代入すれば、(5.3.37)式が導き出される。

以上は2次元物体に働く波漂流力であるが、丸尾(33)は3次元物体に関しても、波漂流力の水平方向2成分について理論式を示している。これに対し、Newman(35)は丸尾の理論に基づき、Yaw 方向の波漂流モーメントも求める式を示した。3次元においては、2次元の場合のように波漂流力を簡単な形に整理できず、Newman(35)の記号に従うと、波漂流力は

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_{Dx} &= \frac{\rho K^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} |H(\theta)|^2 (\cos\theta + \cos\beta) d\theta \\ \bar{F}_{Dy} &= \frac{\rho K^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} |H(\theta)|^2 (\sin\theta + \sin\beta) d\theta \\ \bar{M}_D &= -\frac{\rho K}{8\pi} \operatorname{Im} \int_0^{2\pi} H^*(\theta) H'(\theta) d\theta \\ &\quad - \frac{1}{2K} \rho \omega A \operatorname{Re} H'(\pi+\beta) \end{aligned} \right\} \quad (5.3.39)$$

となる。ここで $H(\theta)$ は Kochin 関数と呼ばれる、

$$H(\theta) = \iint_{S_B} \left(\frac{\partial \phi_B}{\partial n} - \phi_B \frac{\partial}{\partial n} \right) \exp(KZ + iKx \cos\theta + iKy \sin\theta) \times dS \quad (5.3.40)$$

である。ここで ϕ_B は diffraction potential と radiation potential の和で far-field

に対する値、 S_B は浮体の没水表面、 n は浮体表面の法線方向、 K は波数である。また、 A は進入波の振幅、 β はその入射角、 ω は角周波数である。 $H^*(\theta)$ は $H(\theta)$ の共役関数、 $H'(\theta) = |(d/d\theta)(\theta)|_{\theta=\pi+\beta}$ である。

実験値と理論値の比較も種々行われており、例えば 2 次元においては野尻他(34)の例を図 5.3.1.4、図 5.3.1.5 に示す。これらは矩形断面体である。

3 次元については、計算が困難なため、比較の例は少ないが、箱型浮体については図 5.3.1.6、図 5.3.1.7 を Faltinsen 他(27) が示している。球体については工藤(36)の図 5.3.1.8 があり、円筒浮体については野尻(37)の図 5.3.1.9 がある。

これらの比較例をみると、実験値と理論値は大略一致しているといえるが、両者の差が大きい場合もままみられる。波漂流力は 2 次のオーダーの微小な力であるから、この力を求めるにあたっては、その精度に関して十分な注意が必要であろう。

(2) 不規則波による長周期変動漂流力

不規則波による長周期変動漂流力が、係留構造物にとって重要な外力となることを指摘したのは Hsu 他(38) である。彼等はまた、この力は一波一波の波高の 2 乗の変化に対応して変わるとすればよいとした。この考え方を踏襲して、Remerry 他(39) は、波高が図 5.3.2.0 に示すように時間に関して連続的に変化するとし、線形バネで係留した箱型浮体の運動を求め、長周期動揺が実験値とよく一致することを確認した。その後、Pinkster(40) は、この考え方により、変動漂流力のスペクトル表示式を与えた。それは、波のスペクトルを $S_\zeta(\omega)$ 、規則波による漂流力係数を $D(\omega)$ とする時

$$S_F(\omega) = 2\rho^2 g^2 \int_0^\infty S_\zeta(\mu) S_\zeta(\mu + \omega) D(\mu + \frac{\omega}{2}) d\mu \quad (5.3.4.1)$$

である。また、この力の定常力成分は

$$\bar{F} = \rho g \int_0^\infty S_\zeta(\mu) D(\mu) d\mu \quad (5.3.4.2)$$

である。 $D(\omega)$ の定義は、(5.3.3.6) 式あるいは(5.3.3.7) 式の \bar{F}_D により、

$$D(\omega) = \bar{F}_D(\omega) / 0.5 \rho g \zeta_i^2 \quad (5.3.4.3)$$

である。

Pinkster(40) は、このスペクトルを用いた時の浮体の運動の標準偏差を求め、Remerry 他(39) の結果と比較して図 5.3.2.1 を示した。新井他(41) は Pinkster のスペクトルを使用し、かつ浮体運動の減衰力を正しく導入すれば、係留浮体の運動応答スペクトルを図 5.3.2.2 のごとく推定できるとし、係留系の設計法の一案を示した。中村他(42) は、波のスペクトルと係留バネの強さを種々かえた実験をし、Pinkster のスペクトルを用いた運動のスペクトルの計算値と比較して、運動の変化の仕方が理論と実験で一致することを確認した。

一方、井上(43) は係留浮体における transient sway が長周期動揺の一因となるを示し、この現象は定常漂流力を 2 倍見込んでおけばカバーできるとした。また井上(44) はさらに考察し、長周期運動の標準偏差 σ_y をたかだか

$$\sigma_y = y_s / 2\nu \quad (5.3.4.4)$$

であるとし、これらの結果を用いて係留設計法を提案した(45)。なお、 y_s は定常漂流力による係留

浮体の定常変位、 ν は係留浮体の無次元化減衰係数である。

以上の研究の流れからわかるように、実験的には長周期の変動漂流力は係留浮体の運動を観察することから確認されている。一方、水槽実験において長周期の運動を求めようとする場合、実験開始直後の浮体の過渡的運動の存在、あるいはある時間経過後における水槽からの反射波の存在により、実験の有効計測時間が制限されるという事情がある。変動漂流力についてさらに多くの理論的検討が行われているが、その検証にあたっては、先の事情もあるためか、数値計算が用いられることが多いようである。その主要な研究例を以下に紹介する。

浮体が波浪中におかれの場合の速度ポテンシャル φ を、 ϵ を微小量として

$$\varphi = \varphi_1 + \epsilon \varphi_2 + \dots \quad (5.3.4.5)$$

とおく。さらに浮体の平均水面下の表面積を s 、平均水面から波面までの表面積を s' とすると、2次のオーダーの波力は、Bernoulli equationを導入して圧力積分することにより、

$$F = -\rho \int_{s'} (gZ + \frac{\partial \varphi_1}{\partial t}) dS - \rho \int_s \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} dS - \frac{\rho}{2} \int \left[\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right)^2 \right] dS \quad (5.3.4.6)$$

となる。この式の各項は1次のオーダーの圧力の2乗になることが導きだせる。

今、不規則波を成分波の重ね合せで表わせるとすると、2次のオーダーの波力は、長周期成分のみ残すこととして、

$$\begin{aligned} F &= \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} \zeta_i \cdot h_i \cos(\omega_i t + \delta_i) \right\}^2 \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \zeta_i \cdot \zeta_j \cdot T_{ij}^c \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\delta_i - \delta_j)] \\ &\quad + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \zeta_i \cdot \zeta_j \cdot T_{ij}^s \sin[(\omega_i - \omega_j)t + (\delta_i - \delta_j)] \end{aligned} \quad (5.3.4.7)$$

の形をとる。ここに ζ_i は成分波の波振幅である。

高木(26)は(5.3.4.7)式から出発して、波のスペクトルが狭帯域型の時、Pinksterのスペクトルが導かれたとした。

一方、Faltinsen他(46)は、2次のポテンシャルまで正しく求め、(5.3.4.6)式の各項の寄与率を調べ、また、(5.3.4.7)式の T_{ij}^c T_{ij}^s の寄与率を調べた。まず、 T_{ij}^c の計算例を表5.3.6に、また T_{ij}^s の例を表5.3.7に示す。このような結果から、彼等はNewman(4.7)の仮説、すなわち

$$T_{ij}^c = T_{ij}^c, \quad T_{ij}^s = 0$$

することがほぼ妥当であるとしている。特に ω_i と ω_j が近い場合によくこの関係で近似できることが表からわかる。すなわち、狭帯域の波であればこの仮説を採用できるということであり、また、式の誘導は省略するが、この仮説が採用できればPinksterのスペクトルが成り立つということである。彼等は表の値を(5.3.4.7)式に代入し、変動漂流力の時系列を示している。図5.3.2.3がその結果である。図のComplete expressionがそれで、Newman/FaltinsenとあるのがNewmanの仮説を用いた場合の結果、またcosine expressionとあるのが T_{ij}^s のみ零とした場合の結果である。

また、(5.3.4.6)式の各項の寄与率を示したのが表5.3.8である。表において“First line”は

(5.3.4.6)式の第3項、"second line"は同式の第2項、"third line"は同式のすべての項を含んだ値である。注目したいのは"second line"の値で、これは2次のオーダのポテンシャル φ_2 による力であるが、 $\omega_i = \omega_j$ の時、すなわち規則波の時に零となる。一方 ω_i と ω_j が離れるほど φ_2 の影響が強くなってくることがわかり、無視できなくなってくる。

このような(5.3.4.6)式の各項の寄与率についてはPinkster他(48)も調べている。また池渕(49)も2次のオーダーのポテンシャルまで求め、全ての項を含めた場合の力のスペクトルを求めて、Pinkster(40)による式との比較をし、図5.3.2.4を得ている。図の ω が $\omega_i - \omega_j$ を意味するのであるが、これが大きくなるとPinksterのスペクトルとの差異が大きくなることを示している。

(3) 現状の問題点

Hsu他(38)からPinkster(40)の(5.3.4.1)式に到る流れは波の狭帯域性を前提とし、波高がゆるやかに変化する場合の力として変動漂流力をとらえたものであるが、その後の研究により成分波の周期がはなれて波の狭帯域性を仮定できない場合には、(5.3.4.1)式が不十分になってくることがわかってきた。この後者の例は、Rye他(50)がすでに昔、規則波による漂流力を用いるよりも、振幅変調波により求められる漂流力を用いて変動漂流力のスペクトルを求めた方が、実験値をよく説明できると報告していることにも現われている。今後はこのあたりの事情をつめていく必要があろう。

5.3.4 係留浮体の応答計算方法

(1) 周波数領域

係留浮体の応答計算方法は大別して(1)周波数領域による方法と(2)時間領域による方法にわかれる。

周波数領域の方法は、前提条件として現象が線形重ね合せの原理が成り立つ必要がある。この時、周知のごとく、外力のスペクトル $S_F(\omega)$ 、応答関数 $H(\omega)$ が与えられれば、応答のスペクトル $S_H(\omega)$ は

$$S_H(\omega) = H^2(\omega) \times S_F(\omega) \quad (5.3.4.8)$$

で求めることができる。

外力のスペクトル $S_F(\omega)$ は風と波による成分があり、風によるものは(5.3.3.0)式を踏襲して、風のスペクトルを $S_u(\omega)$ とし、

$$S_{FU}(\omega) = |X(\omega)|^2 \cdot S_u(\omega) \quad (5.3.4.9)$$

で与えられよう。ここに $|X(\omega)|^2$ は空力アドミッタンスである。波によるものは、波のスペクトルを $S_\zeta(\omega)$ とし

$$S_{F\zeta}(\omega) = |F_\zeta(\omega)|^2 \cdot S_\zeta(\omega) \quad (5.3.5.0)$$

$$S_{FD}(\omega) = 2\rho^2 g^2 \int_0^\infty S_\zeta(\mu) S_\zeta(\mu + \omega) D(\mu + \frac{\omega}{2}) d\mu \quad (5.3.5.1)$$

で与えられる。ここに $F_\zeta(\omega)$ は単位振幅の波による1次のオーダーの波力で、従って、 $S_{F\zeta}$ は1次の波力のスペクトルである。 S_{FD} は(5.3.4.1)式に示した変動漂流力のスペクトルである。

$S_F(\omega)$ はこれらの総和であると考えればよい。

一方、係留浮体の係留力が非線形である場合、応答系の線形重ね合せの原理が成立しなくなるので、前述の(5.3.4.8)式のごとき計算ができない。このような場合には、次に述べる時間領域での解析を採用することになる。ただし、その非線形性が弱い場合には、それを注意深く線形近似すれば、周波数

領域での取り扱いが可能な場合もある(51)。

(2) 時間領域

今、説明の簡略化のため 1 自由度振動系を考えることにする。非線形性が復原力にあるとすると、我々が時間領域でシミュレーションに用いる式は一般に、

$$(M+m)\ddot{x} + r\dot{x} + k(x) = F(t) \quad (5.3.5.2)$$

である。ここに M は浮体の質量、 m は流体による付加質量、 r は流体減衰力係数、 k は復原力、 F は外力、 x は浮体の運動、 \dot{x} はその速度、 \ddot{x} はその加速度である。

外力 $F(t)$ は、周知のごとく、外力のスペクトル $S_F(\omega)$ が与えられた時、そのエネルギーを有する個々の正弦波の重ね合せにより与えることができる。

流体力係数 m と r に関しては、便宜的に、波の平均周期、あるいは応答の固有周期のような代表周期をとり、その周期における浮体正弦運動時の値を用いる例が多い(例えば 52)。

しかしながら、時間領域で取り扱う場合には、Oortmerssen(55)が示したように、流体力係数も時間の関数として取り扱うのが正統ではある。この取り扱い手法に関しては高木他(53)、池渕(54)の研究例があるものの、この手法の精度および流体力係数を固定する手法との手法による結果の差異については今後十分に調べる必要が残されている。

時間領域での取り扱い方の説明のため、Shinozuka他(56)の計算例を紹介しておくことにする。彼等は図 5.3.2.5 に示すような洋上に係留された浮体に風力が作用する時の応答計算を試みた。浮体は Sway と Roll をするものとし、Heave は無視した。運動方程式は、記号を原論文に従い、

$$(M_1+m_{11})\ddot{x}_1 + \int_{-\infty}^t K_{11}(t-\tau)\dot{x}_1(\tau)d\tau + C_{11}x_1 = X_1(t) \quad (5.3.5.3)$$

$$(I_2+m_{22})\ddot{x}_2 + \int_{-\infty}^t K_{22}(t-\tau)\dot{x}_2(\tau)d\tau + C_{22}x_2 = X_2(t) \quad (5.3.5.4)$$

である。添字 1 は Sway、2 は Roll を意味する。式中、第 2 項の積分が時間に依存する流体力の部分であり、 K_{11} 、 K_{22} を retardation function と呼ぶ。これらは運動の計算の前に、図 5.3.2.6 に示すごとく、あらかじめ求められる。

X_1 、 X_2 は風外力である。風の平均風速を $\bar{u}(y')$ 、変動成分を $D(t, y')$ とすると、高さ y' における風の力は

$$D(t, y') = q \bar{u}^2(y') + 2q\bar{u}(y') \cdot v(t, y') \quad (5.3.5.5)$$

よって、全風力は、構造物の高さを L として

$$X_1(t) = \int_0^L D(t, y') dy' \quad (5.3.5.6)$$

$$X_2(t) = \int_0^L D(t, y') y' dy' \quad (5.3.5.7)$$

となる。ここで $q = \rho C_D d^2/2$ 、 ρ : 空気密度、 C_D : 抗力係数、 d : 図 5.3.2.5 による。なお、 $v(t, y')$ については、風のスペクトルを

$$S_v(\omega, k) = \frac{K\phi^2}{2\pi^2} \cdot \frac{|\omega|}{\left[1 + \left(\frac{\phi\omega}{2\pi u_{10}}\right)^2\right]^{1/2}} \cdot \frac{\alpha|\omega|}{\pi(a^2\omega^2 + k^2)} \quad (5.3.5.8)$$

とし、成分波の重ね合せにより

$$\nu(t, y') = \sqrt{2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \sqrt{S_\nu(\omega_i k_j) \Delta\omega_i \Delta k_j} \times \cos(\omega_i t + k_j y' + \phi_{ij}) \quad (5.3.5.9)$$

と求めている。 $\alpha = 0.006 \text{m/s}$ 、 $\phi = 1200 \text{m}$ 、 $K = (\text{不明 } 0.001 \sim 0.002)$ 。

図 5.3.2.7、図 5.3.2.8 に彼等の応答計算例を示しておく。

(3) 現状の問題点

現状の問題として以下の点をあげることができよう。

1つには、非線形の場合、時間領域で数値シミュレーションをすることが多いが、比較的簡便な流体力係数を固定する方法がどの程度の精度の答えを与えてくれるかを調べるためにも、retardation function を使用する方法を十分に調査しておく必要がある。

もう一つには、統計値の問題がある。すなわち、例えば最大期待値を求めようとした場合、従来の線形理論で求められている期待値の理論を非線形の系に用いられるかという問題である。新井他(41)をみると、図 5.3.2.9 に示すように、水平動揺(Sway) の最大値がその平均値からみて大きな非対称性を有することが報告されている。同様の傾向は Remery 他(39) の報告にもみられる。また、最近 Robert(57) は非線形の復原力を有する系の長周期動揺について研究し、その分布を図 5.3.3.0 に示すとくなることを報告している。この図にも明らかに非対称性が確認される。このようなことから、長周期動揺がある時の統計値の推定法を十分に調べる必要がある。

長周期動揺は系の同調現象であるから、その定量的把握には系の減衰力を正確に知ることが重要である。この減衰力に関して Wickers 他(58) は興味深い事実を報告している。図 5.3.3.1、図 5.3.3.2 がその一例で、 ω_x の固有周期における減衰係数が、静水中と ω の波の中とでは異なるというものである。彼等はこの差を wave damping と呼び、これは、波の波高と周期に依存し、固有周期 ω_x には無関係であるとしている。また、その大きさは、静水中での粘性抵抗成分と同じオーダーであるとしている。このような減衰力の調査も十分に行う必要があろう。

参考文献

- (1) 林 直樹, 他, "外海における長周期波の観測", 第25回海岸工学講演会論文集, 1978
- (2) 日根野元裕, 他, "海洋波のスペクトル", 日本造船学会誌, 第609号, 1980
- (3) Panofsky, H.A., "Wind Structure in Strong Winds Below 150m", Wind Engineering, Vol.1, No.2, 1977
- (4) 岡内 功, 他, "耐風構造", 丸善, 1977
- (5) 本州四国連絡橋技術調査委員会, "本州四国連絡橋耐風設計指針(1967)および同解説", 土木学会 1967
- (6) 本州四国連絡橋耐風研究小委員会, "本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書", 土木学会, 1975
- (7) Shears, M. and Bell, M.H., "Dynamic Effects of Wind on Offshore Towers", Int. Conf. on Environmental Forces on Engineering Structures, 1979
- (8) Det Norske Veritas, "Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures"
- (9) Hsu, S.A., "A Dynamic Roughness Equation and Its Application to Wind Stress Determination at the Air Sea Interface," J. of Phy. Ocean., Vol.4, 1974
- (10) Van der Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour", J. Meteor., Vol.14, No.160, 1957
- (11) 塩谷正雄, "暴風時における突風の構造(中間報告, その3)", 日本大学生産工学部物理研究室, 1969
- (12) Davenport, A.G., "The Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in High Winds". Quat. J. of Royal Meteorological Society, Vol. 87, 1961
- (13) Davenport, A.G., "The Dependence of Wind Loads on the Meteorological Parameters". Proc. Int. Res. Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures (Ottawa), Univ. of Toronto Press, 1967
- (14) Kaimal, J.C. and et.al., "Spectral Characteristics of Surface-layer Turbulence", Quart. J. Roy. Met Sci. Vol. 98, 1972
- (15) 日野幹雄, "瞬間最大値と評価時間の関係 — 特に突風率について", 土木学会論文集, №117, 1965
- (16) Harris, R.I., "On the Spectrum and Auto-correlation Function of Gustiness in High Winds", E.R.A., Rt. No.5273, 1968

- (17) 塩谷正雄, "強風時の乱流の性質", 日本鋼構造協会, 風力委員会資料 44-2, 1975
- (18) Davenport, A.G., "Buffeting of a Suspension Bridge by Stormy Winds", Proc. ASCE, Vol. 87, ST3, 1962.
- (19) 桑島 進, 他, "風の乱れと船の保針-Ⅱ", 日本航海学会論文集, 60号, 1979
- (20) Vickery, B.J., "Load Fluctuations in Turbulent Flow", ASCE, EM1, 1968
- (21) Bearman, P.W., "An Investigation of Forces on Flat Plates Normal to a Turbulent Flow", J. Fluid Mech., Vol. 46, Part 1, 1971
- (22) Kawai, H., Katsura, J. and Ishizaki, H., "Characteristics of Pressure Fluctuations on the Windward Wall of a Tall Building", Proc. of Int. Conf. on Wind Engineering, 5 th(1), 1980
- (23) 小倉義光, 他, "海洋気象", 海洋学講座第3巻, 東京大学出版会, 1975
- (24) Kondo, J., Fujinawa, Y. and Naito, G., "Wave-induced Wind Fluctuation over the Sea", J. Fluid Mech. Vol. 51, 1972
- (25) Boonstra, H., "Analysis of Full Scale Windforces on a Semi Submersible Platform Using Operators Data", OTC 3268, 1979
- (26) 高木又男, "漂流力について", 第2回海洋工学シンポジウム, Ⅱ章1節, 1976
- (27) Faltinsen, O.M. and Løken, A.E. "Drift Forces and Slowly Varying Forces on Ships and Offshore Structures in Waves", Norwegian Maritime Research, Vol. 6, No. 1, 1978
- (28) Sluijs, M.F. van and Minkenberg, H.L., "A Review of Studies of Ocean Platform Motions", Ocean Engineering, Vol. 4, 1977
- (29) Chakrabarti, S.K., "Steady and Oscillating Drift Forces on Floating Objects", ASCE, WW2, 1980
- (30) Suyehiro, K., "On the Drift of ships caused by Rolling among Waves", Trans. INA, Vol. 66, 1924
- (31) Havelock, T.H., "Drifting Force on a Ship among Waves", Philosophical Magazine, Vol. 33, 1942
- (32) 花岡達郎, "波浪中の船の運動と造波抵抗理論", 造船協会論文集, 第98号, 1955
- (33) Maruo, H., "The Drift of a Body Floating on Waves", J. of S.R., Vol. 4, No. 3, 1960
- (34) 野尻信弘他, "規則波中の2次元浮体に働く漂流力に関する研究", 西部造船会会報, 第51号, 1976

- (35) Newman, J.M. "The Drift Force and Moment on Ship in Waves", Journal of Ship Research, 1967
- (36) 工藤君明, "三次元物体の波による漂流力", 日本造船学会論文集, 第141号, 1977
- (37) 野尻信弘, "三次元浮体に働く変動圧力および波浪荷重の研究", 日本造船学会論文集, 第148号, 1980
- (38) Hsu, F.H. and Blenkarn, K.A., "Analysis of Peak Mooring Forces Caused by Slow Vessel Drift Oscillations in Random Seas", OTC. 1159, 1970
- (39) Remery, G.F.M. and Herman, A.J. "The Slow Drift Oscillations of a Moored Object in Random Seas", OTC. 1500, 1971
- (40) Pinkster, J.A., "Low Frequency Phenomena Associated with vessels Moored at Sea:", Soc. of Petroleum Engineers of AIME, SPE Paper No.4837, 1974
- (41) 新井信一, 他, "不規則波中の係留浮体の運動に関する研究", 日本造船学会論文集, 第140号, 1976
- (42) 中村彰一, 他, "係留浮体の長周期漂流に関する実験", 関西造船協会誌, 第163号, 1976
- (43) 井上義行, "横波中における係留浮体の長周期運動(その1)", 日本造船学会論文集, 第143号, 1977
- (44) 井上義行, "横波中における係留浮体の長周期動揺(その2)", 日本造船学会論文集, 第144号, 1978
- (45) 井上義行, "係留システムの設計法", 日本造船学会論文集, 第145号, 1979
- (46) Faltinsen, O.M. and Løken, A.E., "Slow Drift Oscillations of a Ship in Irregular Waves", Applied Ocean Research, Vol.1, No.1, 1979
- (47) Newman, J.N., "Second Order, Slowly Varying Forces on Vessels in Irregular Waves", Int. Symp. Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, London, 1974
- (48) Pinkster, J.A. and van Oortmerssen, G., "Computation of the First and Second Order Wave Forces on Oscillating Bodies in Regular Waves", Proc. 2nd Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley 1977
- (49) 池淵哲朗, 他, "長周期漂流力について", 関西造船協会誌, 第174号, 1979
- (50) Rye, H., Rynning, S. and Moshagen, H., "On the Slow Drift Oscillation of Moored Structures". OTC. 2366, 1975

- (51) Takagi, M. and Arai,S., "A Systematic Approach to Design Problems in Mooring Systems of Large Marine Structures", 1st International Marine Systems Design Conference, London, 1982. (to be published)
- (52) 運輸省船舶技術研究所, "関西国際空港計画に係わる浮体工法の評価のための調査報告書", 1979
- (53) 高木又男, 他, "非周期的造波問題の周波数領域での取り扱い(第1報) — 二次元物体に対するメモリー影響関数 — ", 関西造船協会誌, 第182号, 1981
- (54) Ikebuchi, T., "Hydrodynamic Forces on a Body Moving Arbitrary in Time on a Free Surface", J. Kansai Soc. N.A., Japan, No.181, 1981
- (55) Oortmerssen, G. van. "The Motions of a Moored Ship in Waves", Publication No.510, NSMB, Wageningen, The Netherlands, 1976
- (56) Shinozuka, M. et.al., "Response of Open-Bottom Floating Platforms to Wind", ASCE, HY5, 1978
- (57) Roberts, J., "Nonlinear Analysis of Slow Drift Oscillations of Moored Vessels in Random Seas", J. Ship Research, Vol.25, No.2 1981
- (58) Wickers, J.E.W. and Sluijs, M.F. van, "The Influence of Waves on the Low-frequency Hydrodynamic Coefficients of Moored Vessels", OTC. 3625, 1979

表 5.3.1 波高と周期の複合統計 (1)

波高 (cm)	周期 (分)	波高 10 cm 以上の波								計	
		1~19	20~29	30~39	40~49	50~59	60~69	70~79	80以上		
10~14	F	6	30	51	61	55	57	32	18	310	
	%	1.8	8.8	14.9	17.8	16.1	16.7	9.4	5.3	90.6	
15~19	F		3	1	7	7	5	4	3	30	
	%		0.9	0.3	2.0	2.0	1.5	1.2	0.9	8.8	
20~24	F				1	1				2	
	%				0.3	0.3				0.6	
25~29	F										
	%										
30以上	F										
	%										
計		F	6	33	52	68	63	63	36	21	342
		%	1.8	9.6	15.2	19.9	18.4	18.4	10.5	6.1	100

表 5.3.2 平らな面の粗度定数 Z' (4)

面 の 種 類	$Z'(\text{cm})$
非常に滑らかな面 (泥面・水面)	0.001
芝生・高さ 1 cmまでの草原	0.1
粗い草原 (10 cmまでの高さ)	0.7
密生した草原 (10 cmまでの高さ)	2.3
粗い草原 (50 cmまでの高さ)	5
密生した草原 (50 cmまでの高さ)	9

表 5.3.3 べき法則における指数 α の観測例 (5)

研 究 者	場 所	測定高 (m)	地 表 条 件	α
Sherlock	Ann Arbor (アメリカ)	75	開けたやや起伏のある農地	1/7
Frost	Cardington (イギリス)	305	孤立樹のある平らな農地	1/6.7
Deacon	Sale (オーストラリア)	153	いくらか樹木のあるやや起伏のある放牧地	1/6.25
龟 井	日 本	—	凹凸のある海岸	1/5
Fracken-borg- er & Rudloff	Quickborn (ドイツ)	700	周囲に多くの樹や垣根のある平らな牧場	1/4.35
Smith	Upton (アメリカ)	125	一様な生育不良な高さ 30 m の「かし」や「まつ」の平地	1/4
塩 谷	国分寺 (東京)	45	林や畑のある住宅地	1/4
東京管区気象台	東京タワー (東京)	200	市街地	1/4
Rathbun	Empire State Building (ニューヨーク)	385	大都市中心	1/1.6

表 5.3.4 k 値の測定例 (4), (17)

垂 水	$r_s = z_2 - z_1$ (m)	12.4~19.8~31.5	19.8~31.5~50	50~80
	k	12.8	11.1	8.1
那賀川 ($U: 20 \sim 30 \text{ m/s}$)	$r_s = z_2 - z_1$ (m)	151~111	111~81	81~51
	k	5.3	6.3	7.4
				9.4

表 5.3.5 Full Scale Measurements of Wind Stress Coefficient C_z at z metres above mean sea level. (8)

Ref.	Windspeed Range (m/s)	Location, Method of Measurement and Windstress Coefficient. C_z
5	0-30	Collation of numerous investigations oceanic and laboratory. No eddy correlation data. $\bar{V}_{10} \leq 15 \text{ m/s } C_{10} = 0.5 \bar{V}_{10} \times 10^{-3}$ $\bar{V}_{10} > 15 \text{ m/s } C_{10} = 2.6 \times 10^{-3}$
6	4-17	Ocean station(ship) anemometer at 21m dissipation method. $C_{10} = (1.63 \pm 0.28) 10^{-3}$ Authors suggest linear increase with \bar{V} not proven.
7	3.5-10	Collation of three data sets on or near shores. Profile measurement method up to 10m. (ν - dynamic viscosity) $C_6 = (1.09 \log (u_* z_0 / \nu) + 0.81) 10^{-3}$ in aerodynamically rough regime when $u_* = 0.045 \times \bar{V}_6$, $z_0 = 0.07 u_*^2 / g$ at $\bar{V}_{10} = 40 \text{ m/s } C_{10} = 4.4 \times 10^{-3}$
8	3-22	Sand spit. Nova Scotia, at 10m breakers in fetch zone. Two anemometers eddy correlation method. $C_{10} = (0.63 + 0.66 \bar{V}_{10} \pm 0.23) \times 10^{-3}$ at $\bar{V}_{10} = 40 \text{ m/s } C_{10} = 3.3 \times 10^{-3}$
9	3-16	Lough Neagh profile measurement to 16m $C_{10} = (0.36 + 0.1 \bar{V}_{10}) \times 10^{-3}$ at $\bar{V} = 40 \text{ m/s } C_{10} = 4.36 \times 10^{-3}$
10	In a Hurricane	Lake Okeechobee. Florida surface slope method. $C_{10} = (2.28 \pm (1-7/\bar{V}_{10}) 2.63) 10^{-3}$ Suggested range of applicability $\bar{V}_{10} = 20 - 40 \text{ m/s}$ at $\bar{V}_{10} = 40 \text{ m/s } C_{10} = 4.1 \times 10^{-3}$
11	4-12	From Jonswap data, profile within zone to 8.4m $C_{10} = 1.3 \times 10^{-3} \pm 20\%$

表 5.3.6 Numerical calculations of $T_{ij}^c / (\rho g)$ for a rectangular cylinder in beam sea ($b/d=2.0$) (46)

$\omega_i(d/g)^{1/2}$	$\omega_j(d/g)^{1/2}$							
	1.25	1.18	1.12	0.89	0.84	0.79	0.76	0.69
1.25	0.363	0.317	0.272	0.270	0.286	0.302	0.330	0.406
1.18	0.317	0.336	-0.305	0.260	0.269	0.264	0.261	0.321
1.12	0.272	0.305	0.315	0.245	0.255	0.248	0.228	0.258
0.89	0.270	0.260	0.245	0.326	0.339	0.313	0.236	0.172
0.84	0.286	0.269	0.255	0.339	0.384	0.380	0.300	0.208
0.79	0.302	0.264	0.248	0.313	0.380	0.405	0.337	0.234
0.76	0.330	0.261	0.228	0.236	0.300	0.337	0.280	0.175
0.69	0.406	0.321	0.258	0.172	0.208	0.234	0.175	0.059

表 5.3.7 Numerical calculations of $T_{ij}^s / (\rho g)$ for a rectangular cylinder in beam sea ($b/d=2.0$) (46)

$\omega_i(d/g)^{1/2}$	$\omega_j(d/g)^{1/2}$							
	1.25	1.18	1.12	0.89	0.84	0.79	0.76	0.69
1.25	0.0	0.045	0.059	0.050	0.034	0.031	0.049	0.075
1.18	-0.045	0.0	0.034	0.024	0.002	-0.021	-0.014	0.009
1.12	-0.059	-0.034	0.0	0.009	-0.017	-0.047	-0.048	-0.021
0.89	-0.050	-0.024	-0.009	0.0	-0.026	-0.086	-0.115	-0.067
0.84	-0.034	-0.001	0.017	0.026	0.0	-0.068	-0.111	-0.052
0.79	-0.031	0.021	0.047	0.086	0.068	0.0	-0.053	0.008
0.76	-0.049	0.014	0.048	0.113	0.111	0.053	0.0	0.068
0.69	-0.075	-0.009	0.021	0.067	0.052	-0.008	-0.068	0.0

表 5.3.8 Numerical calculations of the different main contribution to $T_{ij}^c / (\rho g)$ for the rectangular cylinder ($b/d=2.0$) (46)

$\omega_i(d/g)^{1/2}$	$\omega_j(d/g)^{1/2}$							
	1.25	1.18	1.12	0.89	0.84	0.79	0.76	0.69
1.25	-0.592	-0.580	-0.562	-0.523	-0.586	-0.634	-0.513	-0.214
	0.0	-0.029	-0.058	-0.018	-0.008	0.040	0.176	0.377
	0.363	0.317	0.272	0.270	0.286	0.302	0.330	0.406
1.18	-0.580	-0.582	-0.573	-0.561	-0.622	-0.659	-0.522	-0.221
	-0.029	0.0	-0.019	-0.034	-0.028	0.003	0.106	0.289
	0.317	0.336	0.305	0.260	0.269	0.264	0.261	0.321
1.12	-0.562	-0.573	-0.572	-0.588	-0.640	-0.669	-0.522	-0.225
	-0.058	-0.019	0.0	-0.052	-0.046	-0.021	0.059	0.205
	0.272	0.305	0.315	0.245	0.255	0.248	0.228	0.258
0.89	-0.523	-0.561	-0.580	-0.630	-0.679	-0.687	-0.541	-0.372
	-0.018	-0.034	-0.052	0.0	-0.012	-0.036	-0.037	0.008
	0.270	0.260	0.245	0.326	0.339	0.313	0.236	0.172
0.84	-0.586	-0.622	-0.640	-0.679	-0.721	-0.725	-0.584	-0.332
	-0.08	-0.028	-0.046	-0.012	0.0	-0.01	-0.019	-0.002
	0.286	0.269	0.255	0.339	0.384	0.380	0.300	0.208
0.79	-0.634	-0.659	-0.669	-0.687	-0.725	-0.728	-0.595	-0.357
	-0.040	0.003	-0.021	-0.036	-0.01	0.0	-0.004	0.001
	0.302	0.264	0.248	0.313	0.380	0.405	0.337	0.234
0.76	-0.513	-0.522	-0.522	-0.541	-0.584	-0.595	-0.477	-0.266
	0.176	0.106	0.059	-0.037	-0.019	-0.004	0.0	0.028
	0.330	0.261	0.228	0.236	0.300	0.337	0.280	0.175
0.69	-0.214	-0.221	-0.225	-0.281	-0.332	-0.357	-0.266	-0.095
	0.377	0.289	0.205	0.008	-0.003	0.001	0.003	0.0
	0.406	0.321	0.258	0.172	0.208	0.234	0.175	0.059

First line: contribution from velocity square term in Bernoulli's equation; second line: contribution from second order potential; third line: total value

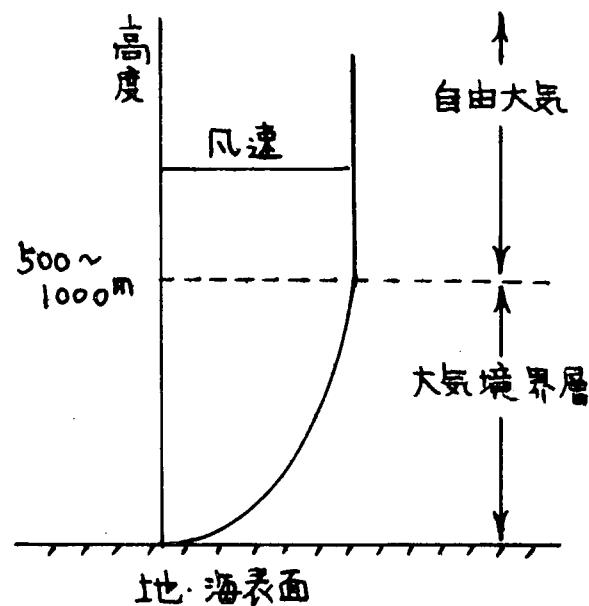


図 5.3.1 風速の高度変化

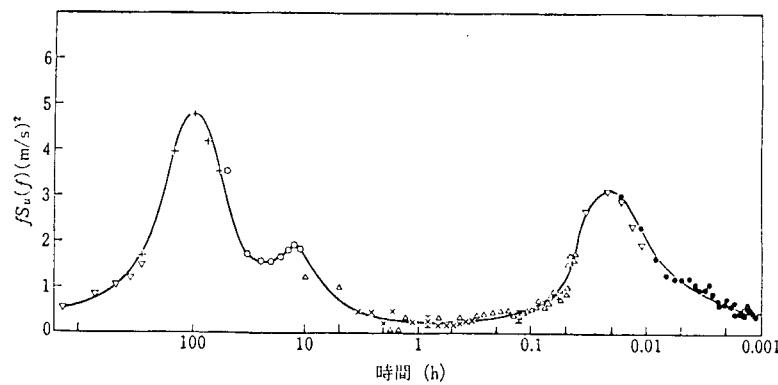


図 5.3.2 風速の長期変動スペクトル (4), (10)

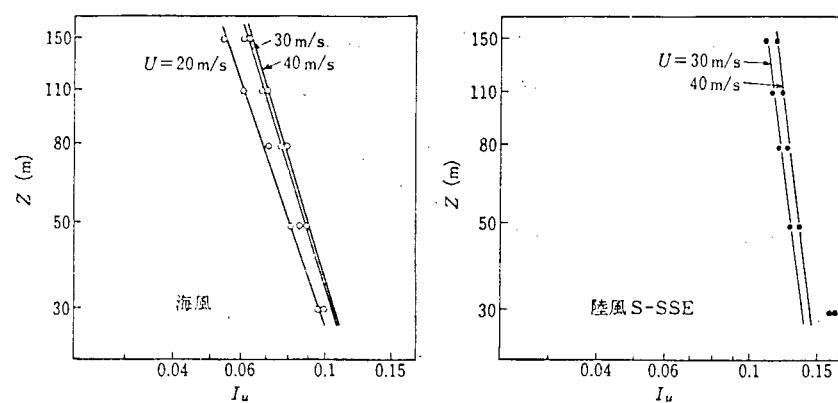


図 5.3.3 亂れの強さ $I_u = \sqrt{u^2} / U$ の高度変化 (4), (11)

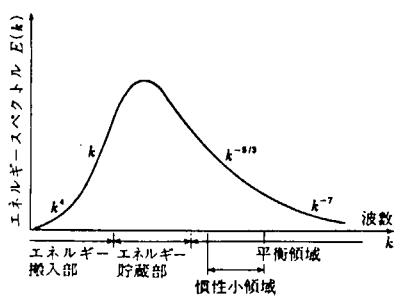


図 5.3.4 亂れのエネルギースペクトル (4)

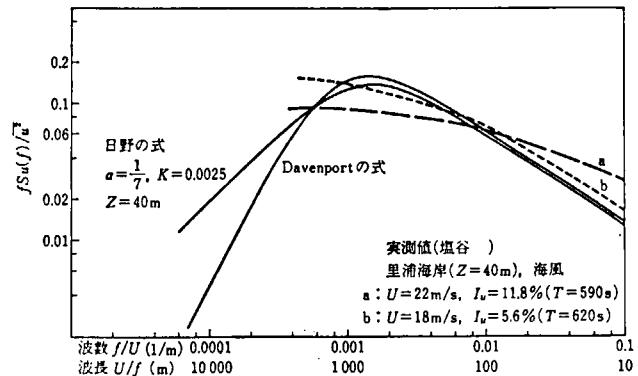


図 5.3.5 平均流方向の変動風速 u の基準化
パワースペクトル密度関数 (4)

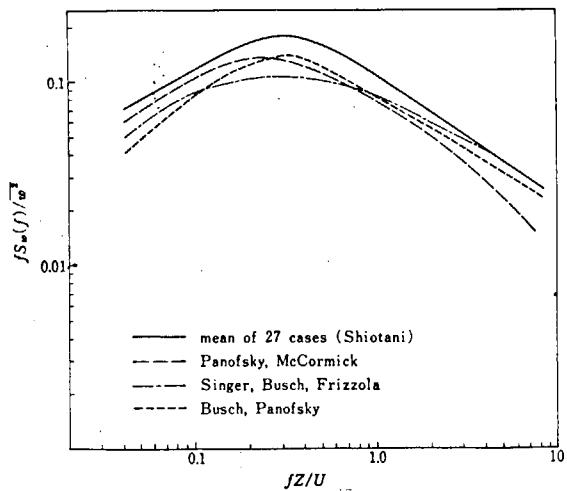


図 5.3.6 鉛直方向の変動風速の基準化
パワースペクトル密度関数 (1)

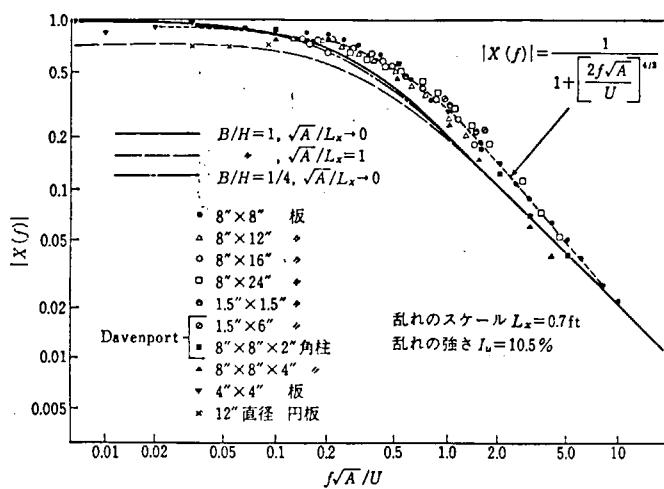


図 5.3.7 流れに直角に置かれた平板などの空力アドミタンス $X^2(f)$ の
実測値と理論値の比較 (4), (20)

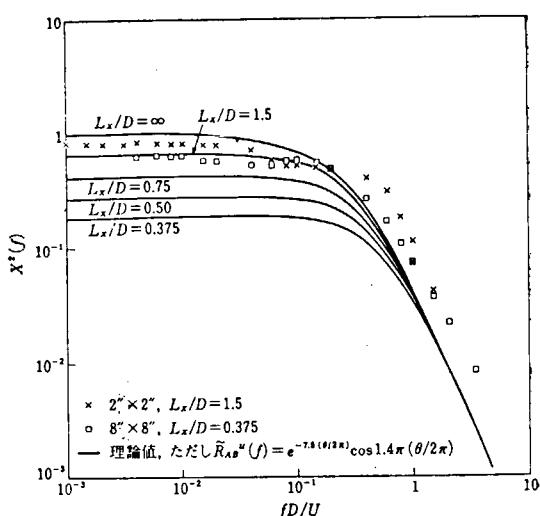


図 5.3.8 流れに直角に置かれた正方形平板の変動抗力の空力アドミッタンス $X^2(f)$ の実測値と理論値の比較 (4), (21)

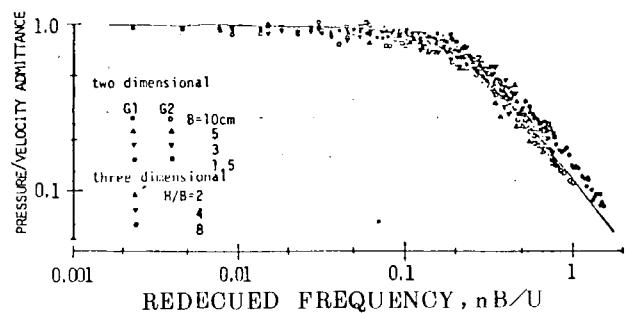


図 5.3.9 Pressure/velocity admittance for various prisms (22)

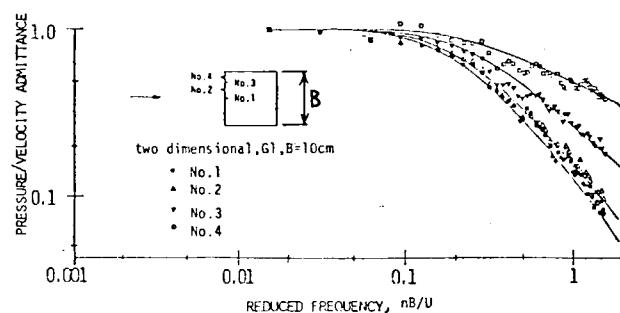


図 5.3.10 Pressure/velocity admittance at various points (22)

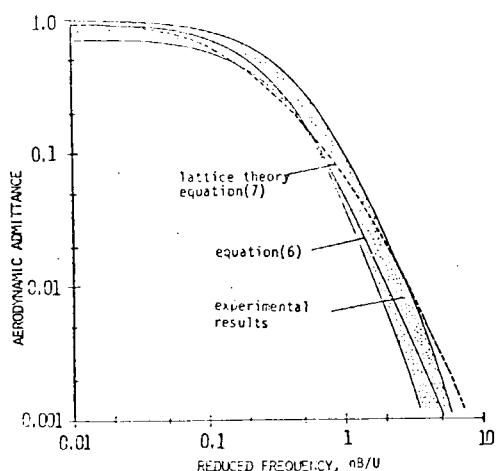


図 5.3.11 Aerodynamic admittance of square flat plates (22)

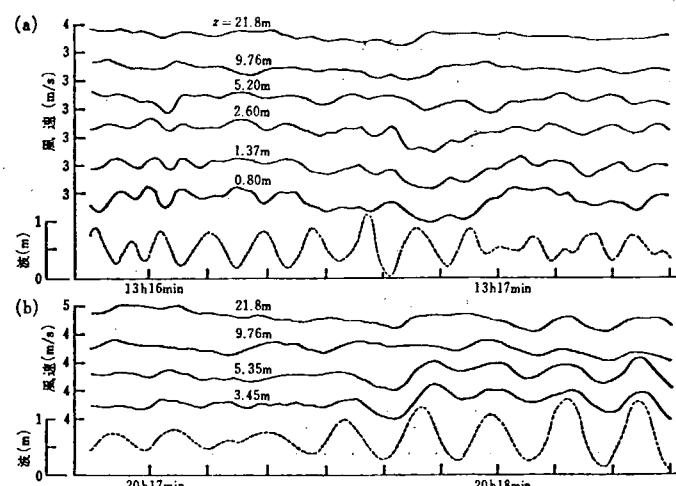


図 5.3.12 海面上の風速の変動 (Kondo et al., 1972) 同時に測定された海面上 4 高度の変動 (風杯型風速計による) とその下の海面の水位変動 (23), (24)

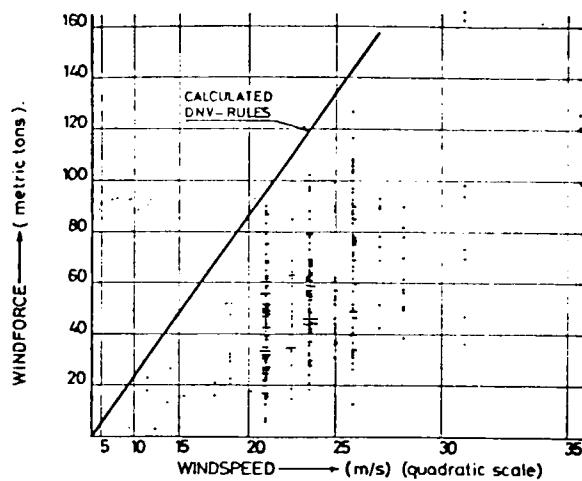


図 5.3.13 Plot of individual observations of windforces. (25)

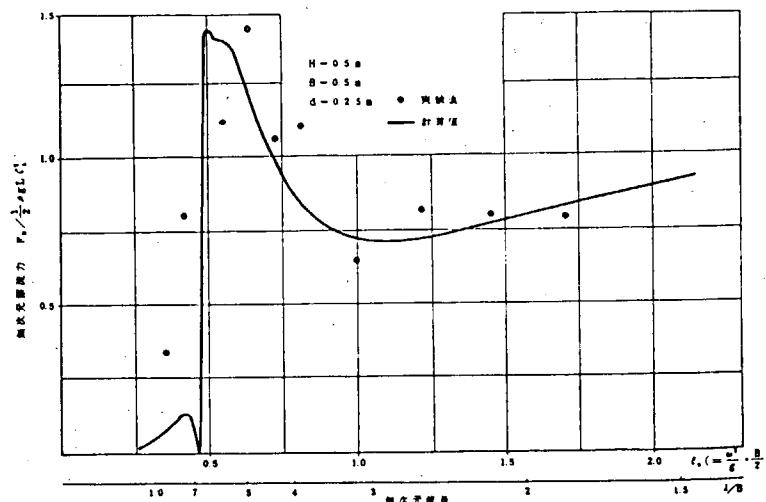


図 5.3.14 有限水深での漂流力(矩形断面模型) (34)

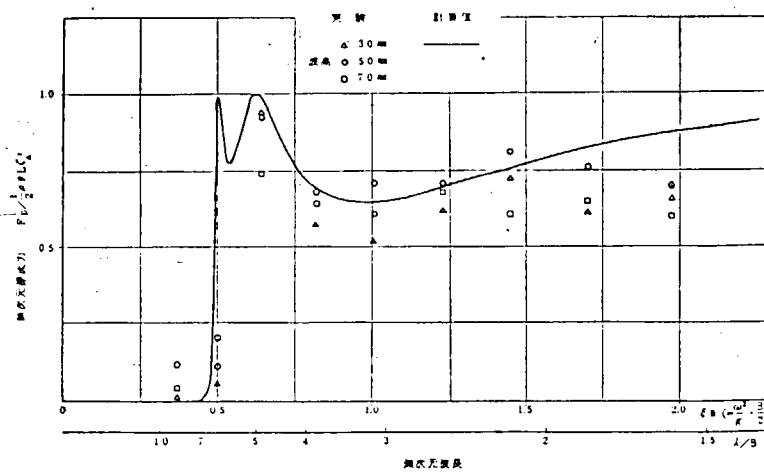


図 5.3.15 動揺時の漂流力 (Lewis Form模型) (34)

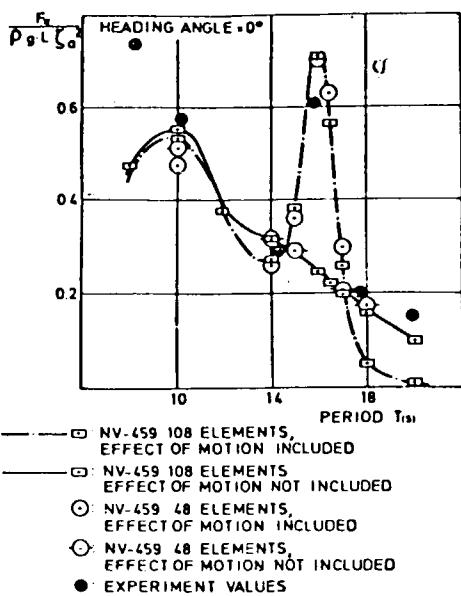


图 5.3.16 Drift force on floating box ($L \times B \times d = 90 \text{ m} \times 90 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) at infinite depth. (27)

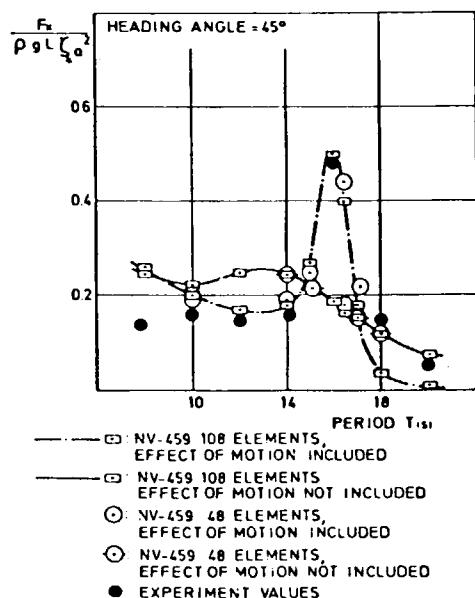


图 5.3.17 Drift force on floating box ($L \times B \times d = 90 \text{ m} \times 90 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) at infinite depth. (27)

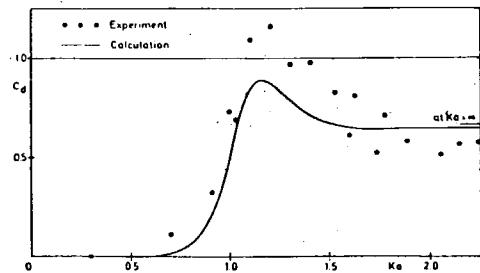


图 5.3.18 Drifting force acting on a freely floating sphere (36)

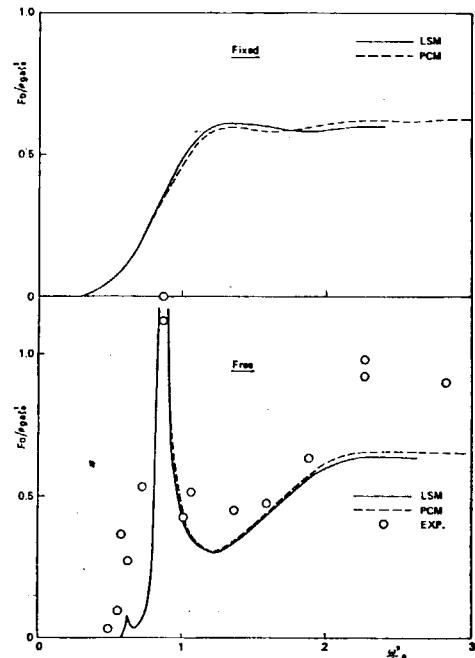


图 5.3.19 Drift force circular dock (37)

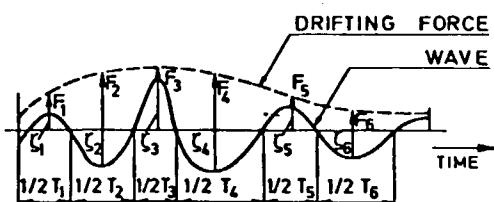


图 5.3.20 Example of drift force obtained from wave record. (27)

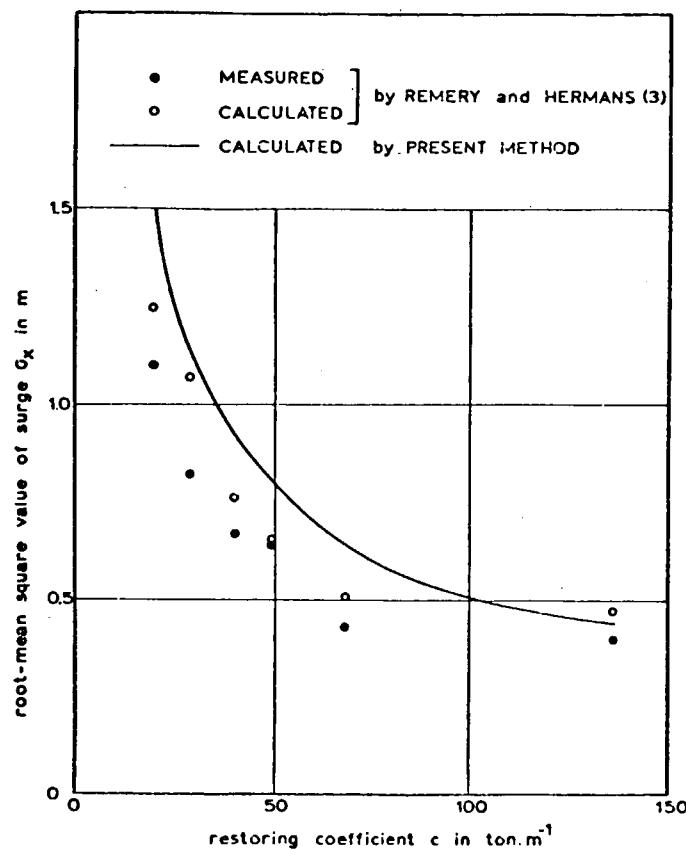


图 5.3.21 Low frequency surge motions of a rectangular barge (40)

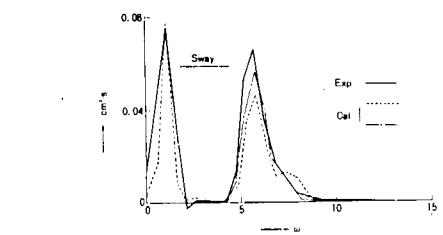


图 5.3.22 Spectra of swaying motions of moored vessel (41)

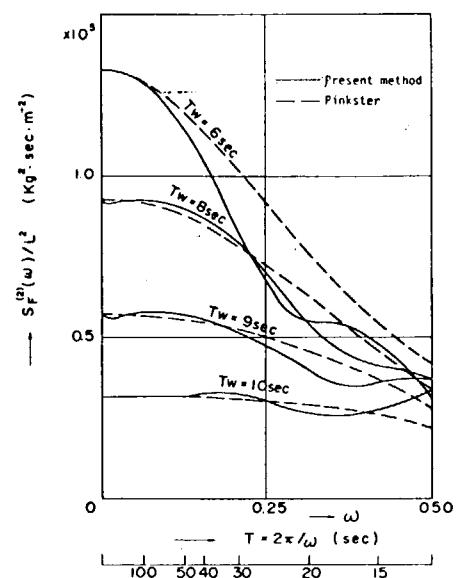


图 5.3.24 Spectra of slowly-varying force. (49)

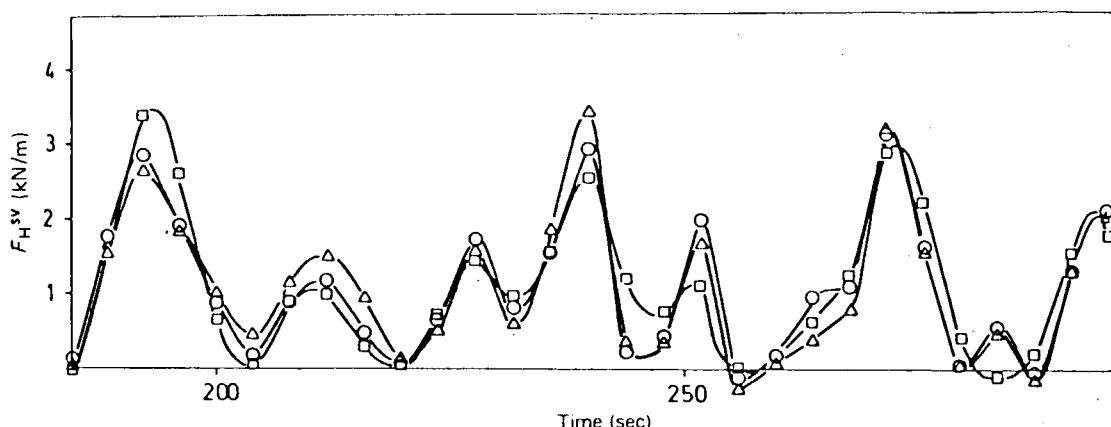


图 5.3.23 Slowly varying horizontal force per unit length of rectangular box ($b/d = 2$). \square , Newman/Faltinsen; \triangle , complete expression; \circ , cosine expression (46)

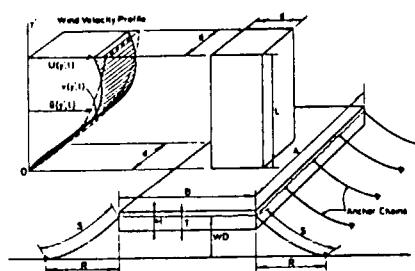


図 5.3.25 High-Rise Tower Supported by Moored Floating Platform and Wind Velocity Profile (56)

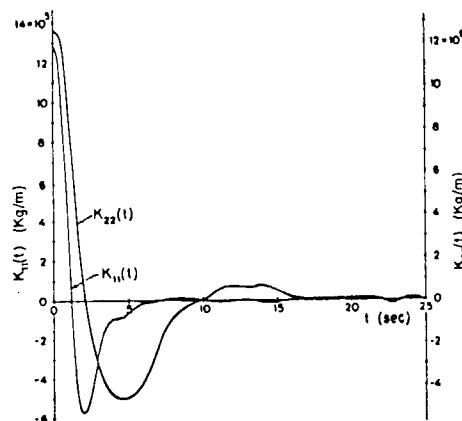


図 5.3.26 Retardation Functions (56)

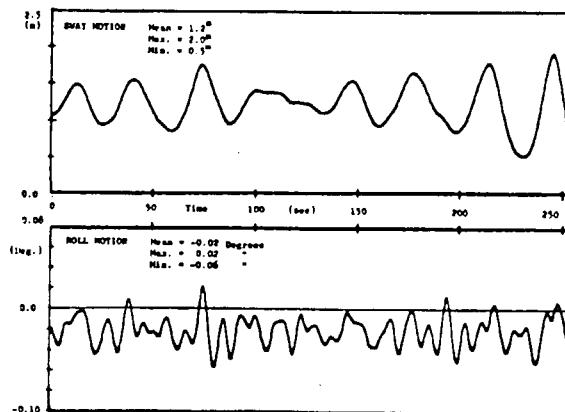


図 5.3.27 Platform Response Time Histories ; Mooring System; 10 Pairs of Anchor Chain, R=96 m (56)

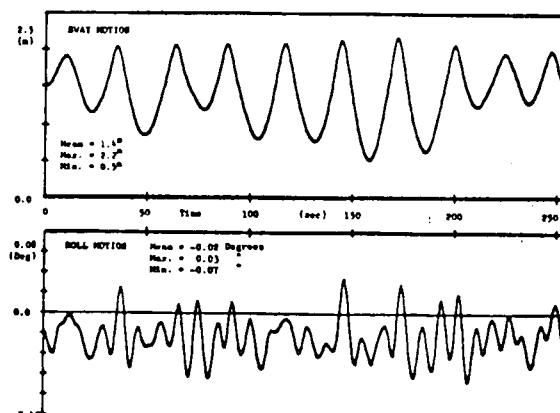


図 5.3.28 Platform Response Time Histories ; Mooring System; Five Pairs of Anchor Chain, R=96 m (56)

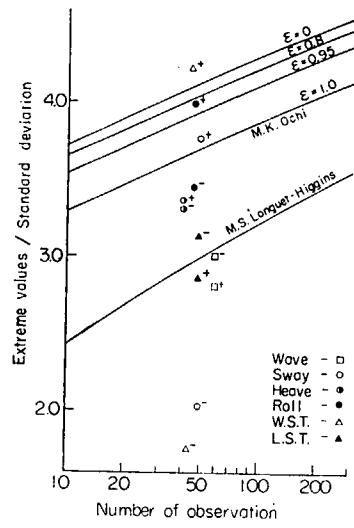


図 5.3.29 Coefficients of extreme values vs. number of observations (41)

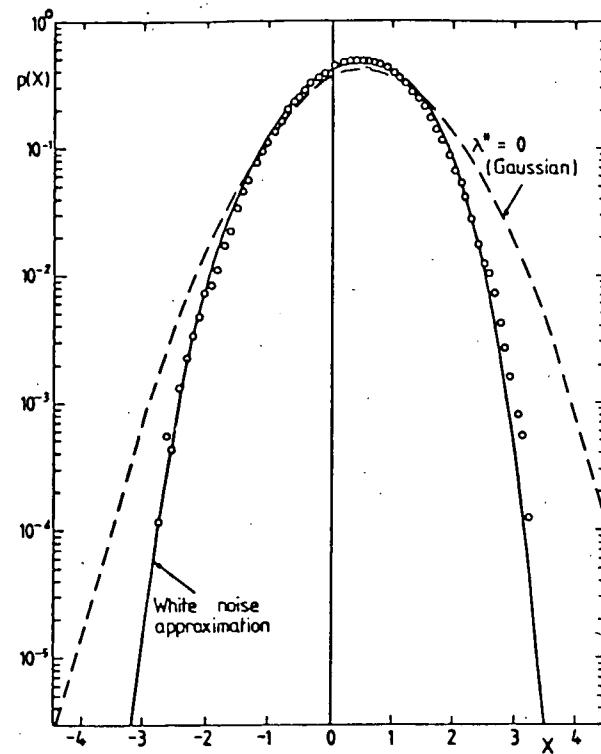


図 5.3.30 Probability density function for displacement respons; $\lambda = 0.2$, $\zeta = 0.05$, and $\epsilon = 1.0$, \circ digital simuation estimates (57)

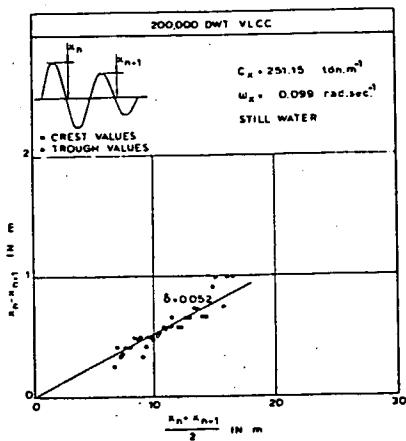


図 5.3.31 Surge motion decay test in still water. (58)

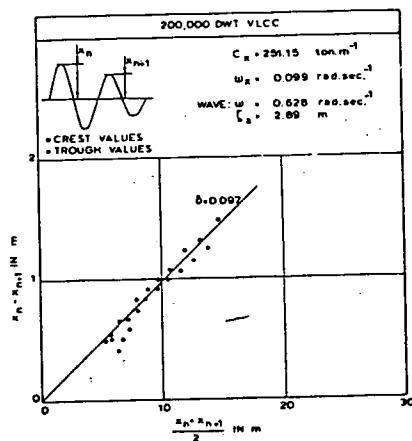


図 5.3.32 Surge motion decay test in regular waves. (58)

5.4 複合索・鎖

5.4.1 複合索・鎖の特徴

複合索・鎖の特徴を定性的に述べると次の様になる。^{1)~3)} 即ち、鋼索と鋼鎖を直列結合した複合索・鎖による係留は、鋼索又は鋼鎖を単独に用いた係留に比べて高い保持力が得られ、その上、初期張力が小さいという特徴がある。ただし、これは鋼索、鋼鎖の破断強度は同程度とし、初期張力の設定は水深の α %移動時にライン発生張力が破断強度/SF_Aとなる様にし、最大保持力はライン発生張力が破断強度/SF_Mとなるときの保持力として条件を統一して比較した場合にいえることである。(SF_A、SF_Mは安全率を表わす。)

前述した複合索・鎖の特徴を具体的にするため、M. Childs の行った計算例⁴⁾の一部を表5.4.1に示す。

表5.4.1 大水深における各種係留ライン特性 ⁴⁾より抜粋

水深 (ft)	係留ライン	ライン長さ(ft)		初期張力 (Kips)	$\frac{1}{2}$ 破断強度時	
		鋼索	鋼鎖		持上長さ(ft)	保持力(Kips)
1000	3" ch	—	3725	249	3530	847
	3 1/4" WR	8100	—	186	7992	1022
	3 1/4" WR+3" ch	4500	1150	152	5417	980
1500	3" ch	—	4425	272	4236	795
	3 1/4" WR	9800	—	199	9719	983
	3 1/4" WR+3" ch	4500	1650	145	5985	957
2000	3" ch	—	5000	290	4789	754
	3 1/4" WR	11400	—	212	11213	952
	3 1/4" WR+3" ch	4500	2175	151	6489	952
3000	3" ch	—	5800	315	5604	620
	3 1/4" WR	13700	—	228	13541	911
	3 1/4" WR+3" ch	4500	3050	194	7372	918
4000	3 1/4" WR+3" ch	4500	3800	240	8107	825

注1) 3" ch ; 3" 鋼線 (空中重量 89.3 lb/ft, 破断強度 B.S=1045 Kips)

注2) 3 1/4" WR ; 3 1/4" 鋼索 (" 19.5 lb/ft, B.S=1050 Kips)

注3) 初期張力 / B.S=1/3 (6%水深移動時)

注4) 最大張力 / B.S=1/2

注5) 8本係留、浮体の動搖は考慮せず

同表から、各水深における初期張力の大きさは

$$3'' \text{ch} > 3\frac{1}{4}'' \text{WR} > 3\frac{1}{4}'' \text{WR} + 3'' \text{ch}$$

となり、保持力については水深 $< 2000 \text{ ft}$ において

$$3\frac{1}{4}'' \text{WR} > 3\frac{1}{4}'' \text{WR} + 3'' \text{ch} > 3'' \text{ch}$$

となり、水深 $> 2000 \text{ ft}$ において

$$3\frac{1}{4}'' \text{WR} + 3'' \text{ch} > 3\frac{1}{4}'' \text{WR} > 3'' \text{ch}$$

となっていることがわかる。しかしながら本計算例では、複合索・鎖において鋼索の長さを水深にかかわらず一定 (4500 ft) としており、鋼索の長さを水深によって適当に選定することによって保持力は常に

$$3\frac{1}{4}'' \text{WR} + 3'' \text{ch} > 3\frac{1}{4}'' \text{WR} > 3'' \text{ch}$$

とすることができます。これについては 5.4.3 において詳述する。

また、水深の増加にともない、各係留方式とも保持力が低減しているが、低減率は、 $3'' \text{ch} > 3\frac{1}{4}'' \text{WR} > 3\frac{1}{4}'' \text{WR} + 3'' \text{ch}$ であり、複合索・鎖が最も有利となっている。

5.4.2 複合索・鎖の係留特性計算法

(1) 一般

係留ラインの伸びおよび流体力を考慮した場合についての取扱いは、5.2 に譲ることとし、ここでは簡便に取扱えること、および複合索・鎖の初期計画に用いることに重点をおき、二次元のカテナリー理論による解析法について述べ、代表的な場合についての数値計算結果を無次元図表化したものを示す。

(2) 二次元・カテナリー理論

複合索・鎖の係留特性については、Niedzwecki^{2), 3)} によって二次元カテナリー解による解法および数値計算結果が報告されており、以下にその主要な結果をまとめる。なお記号説明を図 5.4.1 に示す。

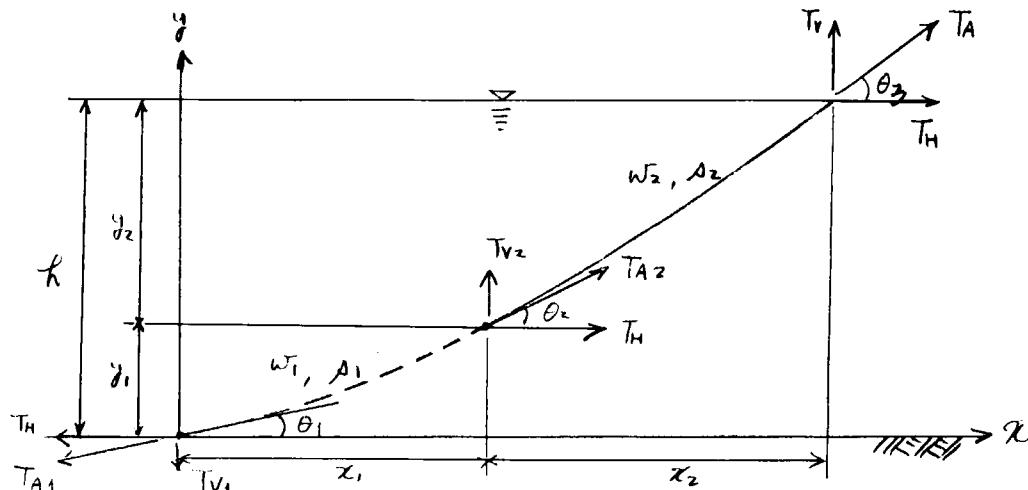


図 5.4.1 記号説明図（その 1）

次の無次元パラメータを定義する。

$$\begin{aligned}
 \bar{w} &= w_2 / w & \tan \theta_1 &= p_1 \\
 \bar{\rho}_1 &= \rho_1 / h & \tan \theta_2 &= p_2 \\
 \bar{\rho}_2 &= \rho_2 / h & \tan \theta_3 &= p_3 \\
 \bar{T}_A &= T_A / (w_2 h) \\
 \bar{T}_H &= T_H / (w_2 h), \quad \bar{T}_{H1} = T_H / (w_1 h) \\
 \bar{T}_{A2} &= T_{A2} / (w_2 h) \\
 \bar{T}_{A1} &= T_{A1} / (w_2 h) \\
 \bar{y}_1 &= y_1 / h \\
 \bar{y}_2 &= y_2 / h \\
 \bar{x}_1 &= x_1 / h \\
 \bar{x}_2 &= x_2 / h
 \end{aligned}$$

$\bar{T}_A, p_1, \bar{\rho}_2, \bar{w}$ を与えることにより、 $\bar{T}_H, \bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{\rho}_1, \bar{T}_{A1}, \bar{T}_{H1}, \bar{x}_2, \bar{y}_2, p_2, \bar{T}_{A2}, p_3$ を求める方法は次の通りである。

- 1) p_3 を仮定する。
- 2) $\bar{T}_H = \bar{T}_A \cos(\tan^{-1} p_3)$
- 3) $\bar{T}_{H1} = \bar{T}_H \cdot \bar{w}$
- 4) $p_2 = p_3 - \frac{\bar{\rho}_2}{\bar{T}_H}$
- 5) $\bar{y}_1 = \bar{T}_{H1} [\sqrt{1 + p_2^2} - \cos h (\sinh^{-1} p_2)]$
- 6) $\bar{y}_2 = \bar{T}_H [\sqrt{1 + p_2^2} - \cos h (\sinh^{-1} p_2)]$
- 7) $F = 1 - (\bar{y}_1 + \bar{y}_2)$

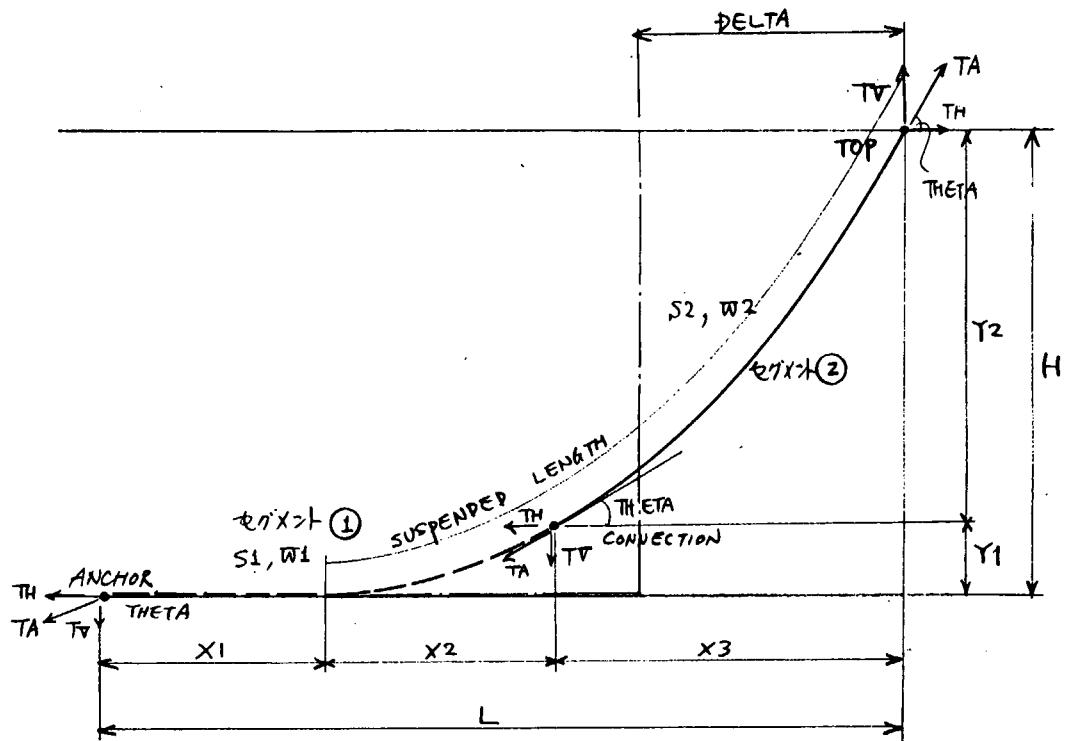
F が許容誤差以内ならステップ 8) へ、許容誤差以上のときはステップ 1) へ

- 8) $\bar{\rho}_1 = \bar{T}_{H1} (p_2 - p_1)$
- 9) $\bar{T}_{A1} = \frac{1}{\bar{w}} \cdot \bar{T}_{H1} \sqrt{1 + p_1^2}$
- 10) $\bar{T}_{A2} = \bar{y}_1 + \bar{T}_{H1} \cos h (\sinh^{-1} p_1)$
- 11) $\bar{x}_1 = \bar{T}_{H1} (\sinh^{-1} p_2 - \sinh^{-1} p_1)$
- 12) $\bar{x}_2 = \bar{T}_H (\sinh^{-1} p_3 - \sinh^{-1} p_2)$

さらに $\bar{S}_T = \bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2, \bar{x}_T = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$ を定義する。

(3) 係留特性

上述の計算手法を拡張し、海底部に残ったラインを考慮した、より一般的な場合(図 5.4.2 参照)を考え、さらに通常の鋼索、鋼鎖を用いるときには $\bar{w} = 0.2$ となることから、 $\bar{w} = 0.2$ として計算した結果を付録表 5.4.2 ~ 表 5.4.6、および図 5.4.3 にまとめた。但し、長さは水深(H 又は h)、力は $W 2 H$ (又は $w_2 h$) で無次元化している。したがって同図を用いることにより、通常の複合索・鎖($\bar{w} = 0.2$)に対する係留特性を簡単に検討することができる。



$S_2/H > 1.0$ のとき

$S_2/H \leq 1.0$ のとき

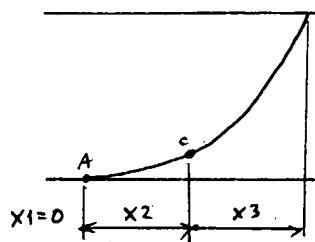
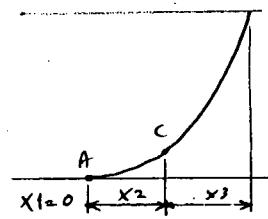
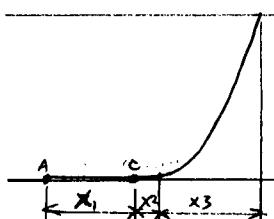
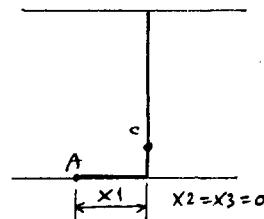
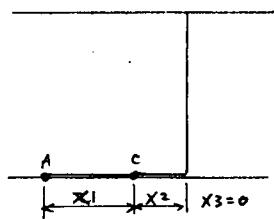


図 5.4.2 記号説明図(その2)

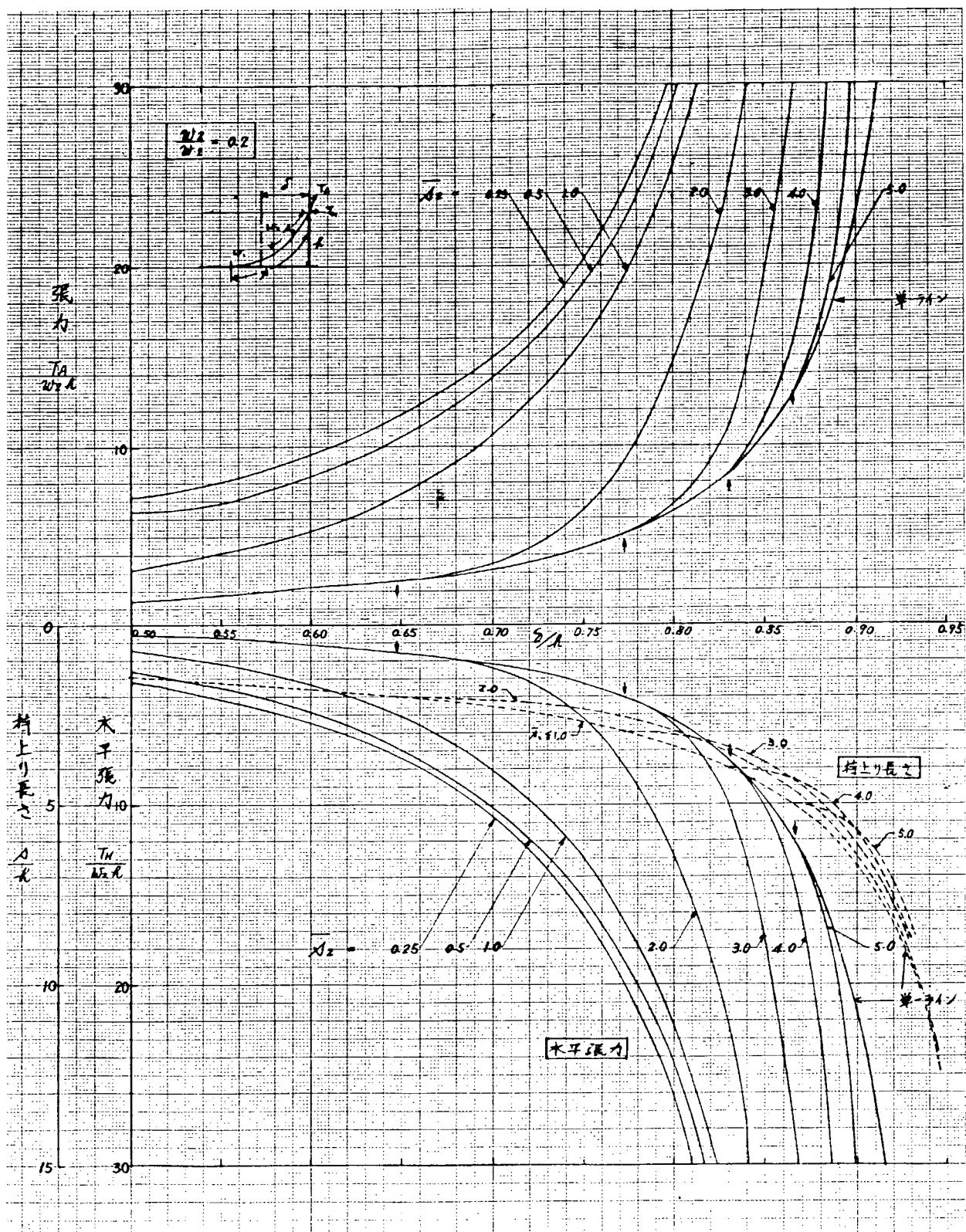


図 5.4.3 複合索・鎖留特性図

図 5.4.3 より、複合索・鎖の係留特性（一本ライン；一点係留）は定性的に次の様にいえる。

- (イ) 同じ発生張力 ($T_A / w_2 h$) に対しては、セグメント 2 の長さ (ρ_2 / h) が長いほど水平移動量 (δ / h) が大きい。
- (ロ) 同じ発生張力 ($T_A / w_2 h$) に対し、セグメント 2 の長さ (ρ_2 / h) が長いほど水平張力 ($T_H / w_2 h$) が大きい。
- (ハ) 初期張力を水深の $\alpha\%$ 移動時に発生張力が破断強度/ $S F_a$ になるように設定すると、初期張力が最小になるセグメント 2 の長さ (ρ_2 / h) が存在する。
- (二) 持上り長さは、セグメント 2 の長さ (ρ_2 / h) の影響をあまりうけない。

5.4.3 複合索・鎖の実施・検討例

(1) 複合索・鎖係留特性図の使用法

図 5.4.3 の使用例を説明するため、表 5.4.1 に示した水深 1500 ft の場合の複合索・鎖について検討する。

<計算条件>	水深	$h = 1500 \text{ ft}$
	重量比	$w_2 / w_1 = 19.5 \text{ lb/ft} / 89.3 \text{ lb/ft} = 0.218 \div 0.2$
	索長比	$\rho_2 / h = 4500 \text{ ft} / 1500 \text{ ft} = 3.0$
	破断強度(索)	1050 Kips
	安全率 3 (水深 6% 移動時)	
	安全率 2 (最大変位時)	

(イ) 初期状態

$$T_A = 1050 \text{ Kips} / 3 = 350 \text{ Kips} \quad \text{〔対海水比重(仮定) } T_A / (w_2 h) = 350 \times 10^3 / (19.5 \times 0.87 \times 1500) = 13.8 \text{ 〕}$$

図 5.4.4 より $T_A / (w_2 h) = 13.8$ のときの $\delta / h = 0.838$

$$(\delta / h)_0 = 0.838 - 0.06 = 0.778$$

このときの $T_A / (w_2 h) = 5.4$

したがって初期張力 $T_{A0} = 5.4 \times 19.5 \times 0.87 \times 1500 \times 10^{-3} = \underline{137 \text{ Kips}}$
(145 Kips ; 表 5.4.1)

(ロ) 最大保持力、持上り長さ

$$T_A = 1050 \text{ Kips} / 2 = 525 \text{ Kips}$$

$$T_A / (w_2 h) = 525 \times 10^3 / (19.5 \times 0.87 \times 1500) = 20.6$$

図 5.4.4 よりこのときの $\delta / h = 0.852$ 、 $\rho / h = 3.9$ 、 $T_H / (w_2 h) = 18.6$

したがって、持上り長さ $\rho = 3.9 \times 1500 = \underline{5850 \text{ ft}}$ (5985 ft ; 表 5.4.1)

最大水平張力 $T_H = 18.6 \times 19.5 \times 0.87 \times 1500 \times 10^{-3} = 473 \text{ Kips}$

保持力 $\approx 2 \times$ 最大水平張力とすると

$$F = 2 \times 473 = \underline{946 \text{ Kips}}$$

(957 Kips ; 表 5.4.1)

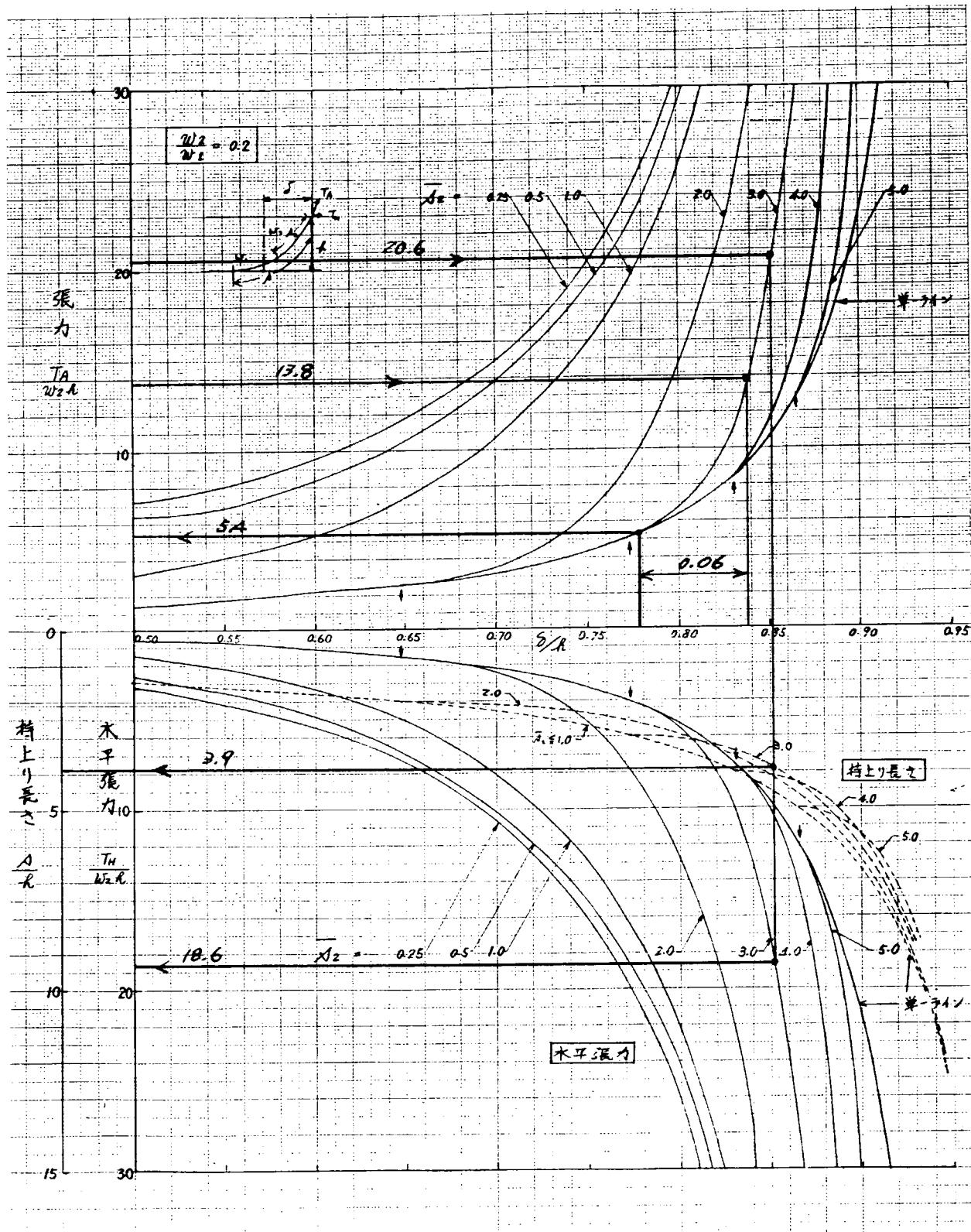


図 5.4.4 複合索・鎖係留特性図使用例

(iv) 最適索長について

(1) 同様の計算条件を用いると、 $\bar{\rho}_2$ を 0.25～5.0 まで変化させた場合の初期張力は図 5.4.5 に示す様に $\bar{\rho}_2$ が 2.0～3.0 の間で最小値となる。

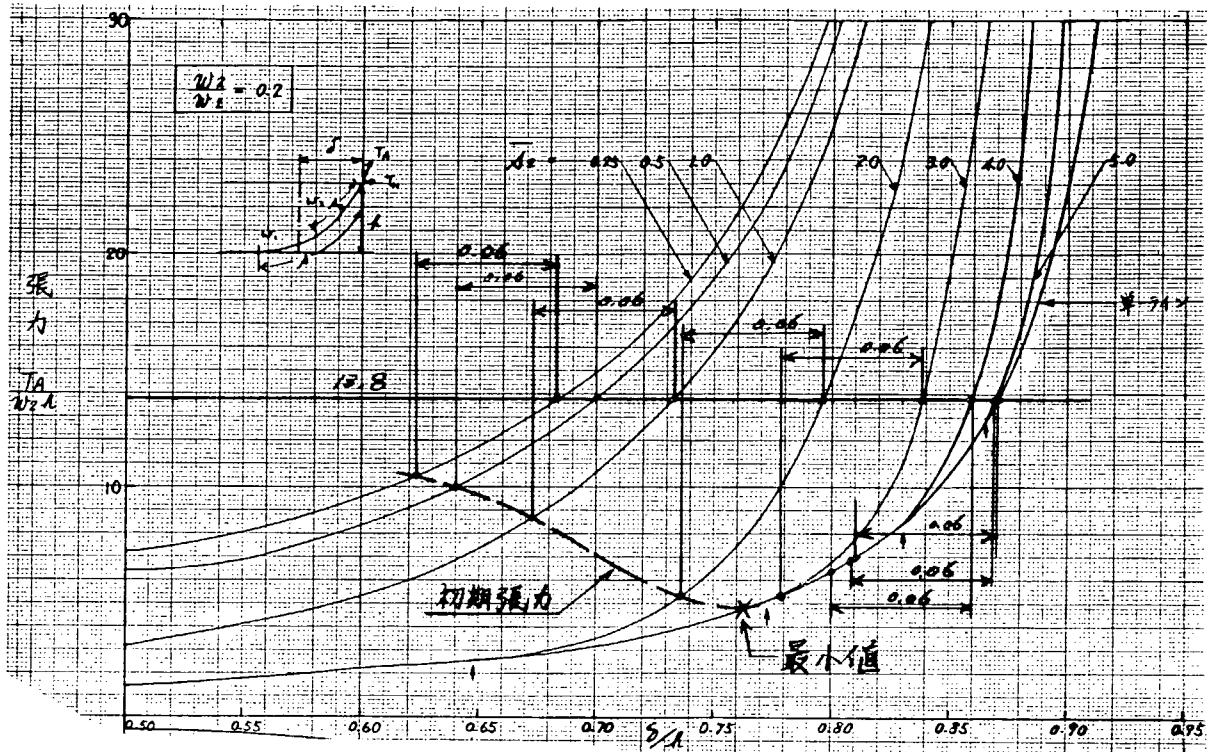


図 5.4.5 索長と初期張力の関係

また、簡単のために 2 本ラインによる係留を考えると、保持力は $\bar{\rho}_2$ が 2.0～3.0 の間で最大となる。（図 5.4.6 参照）

ただし、一般的には最小初期張力および最大保持力となる索長／水深比 ($\bar{\rho}_2$) は異なっているため索長の選定にあたっては総合的な判断が必要となる。

(3) 複合索・鎖用係留機器

鋼索および鋼鎖を用いた複合索・鎖による係留機器については、Ivar Krogstad^{5),6)} によっていくつかの概念や実施例がまとめられている。

以下にその概要を述べる。

(1) Disconnect system

Disconnect system とは、チェインとワイヤの着脱をリグ上で実施するものであり、多くの特許出願がなされている。図 5.4.7 に基本的な着脱機構を示す。チェインおよびアンカーの重量はチェイン・ストッパー型の機器によって支えられ、チェインの結合リンクをはずしてワイヤー端部の結合リンクと接続することによってワイヤー、チェインの複合ラインを構成することができる。本シス

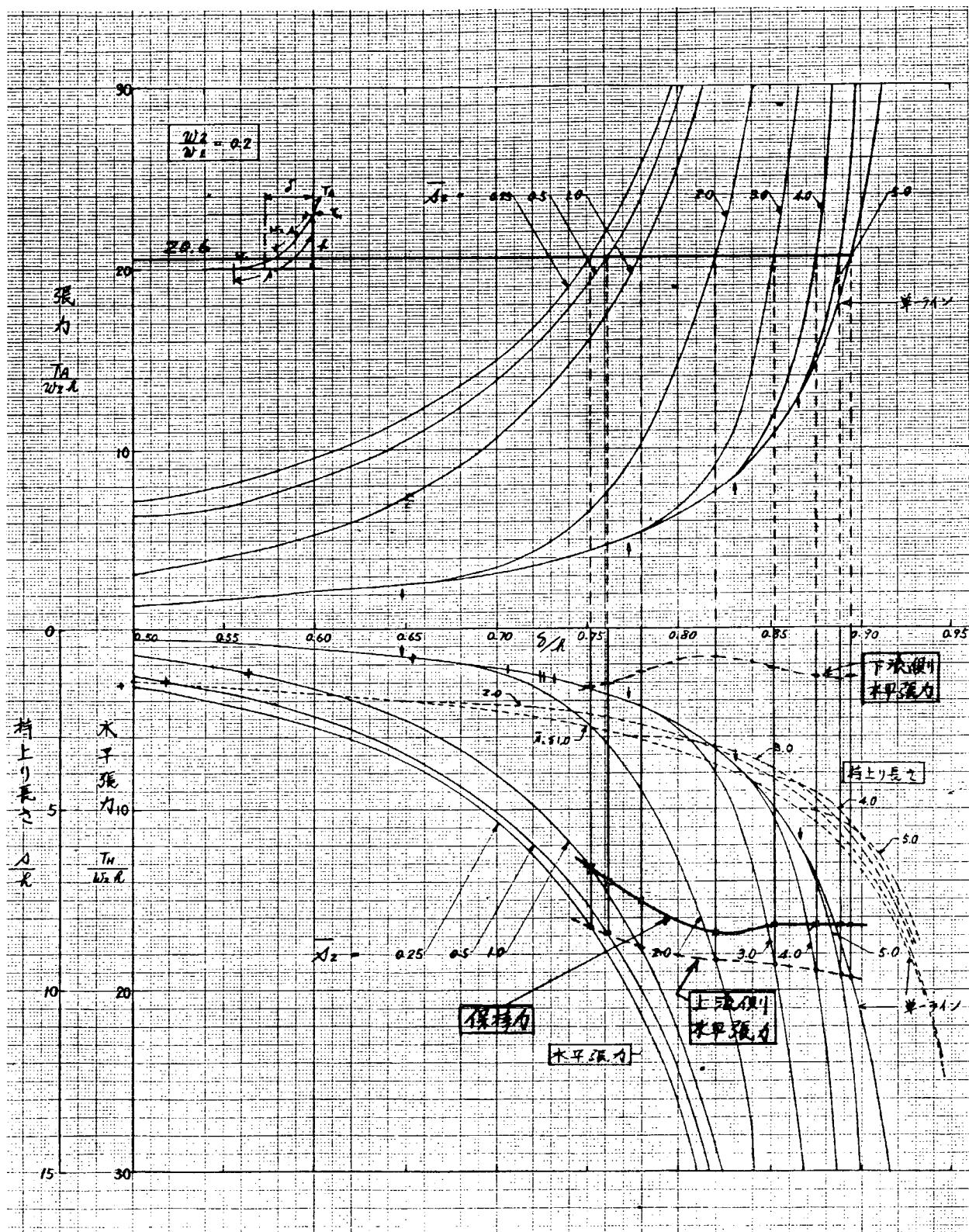


図 5.4.6 索長と最大保持力の関係

テムは、寒冷地や荒天候下では結合リンクの塑性変形やさびつき、あるいはチェイン張力が大きいことなどによって、着脱操作が困難になることが予想される。図 5.4.8 には、機器がコラム頂部に据付けられた例を示す。

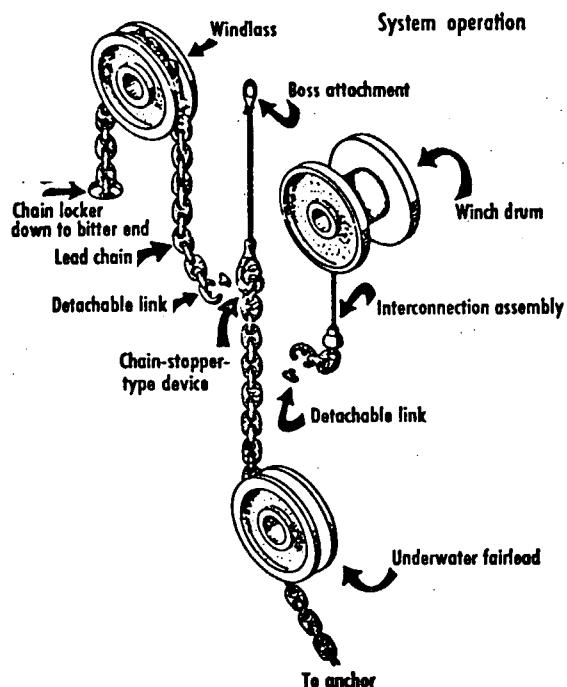


図 5.4.7 Disconnect system 概念図

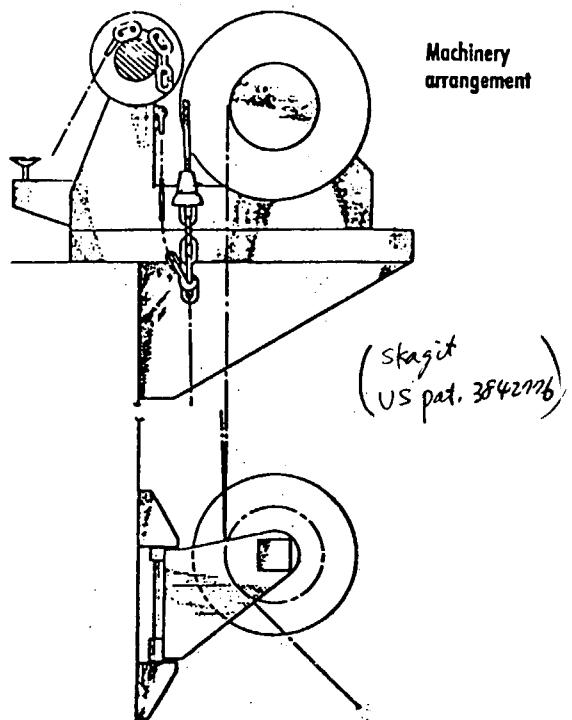


図 5.4.8 Disconnect system 据付例

図 5.4.9 は、チェイン・ストッパーに関する特許であり、作業員のための作業用プラットフォームやチェイン・ストッパーの詳細が示されている。

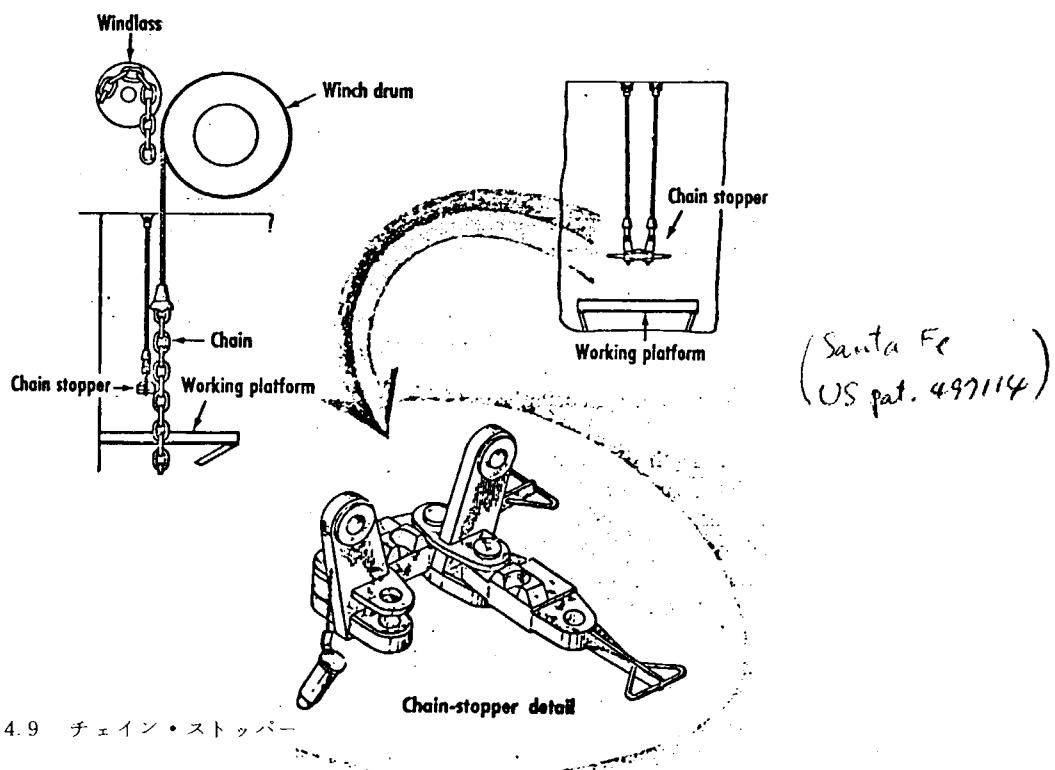


図 5.4.9 チェイン・ストッパー

チェインおよびワイヤーがリグ上で操作されるシステムにおいては、チェイン、ワイヤーの結合部はフェアリーダを通過する必要があり、設計上、留意すべき項目の一つである。図 5.4.1.0 に結合部の一例を示す。結合部が II ～ III の位置にある場合には、ワイヤーのピッチ円半径が増加するため、余分な張力が付加されることになる。図 5.4.1.1 に結合部の他例を示す。

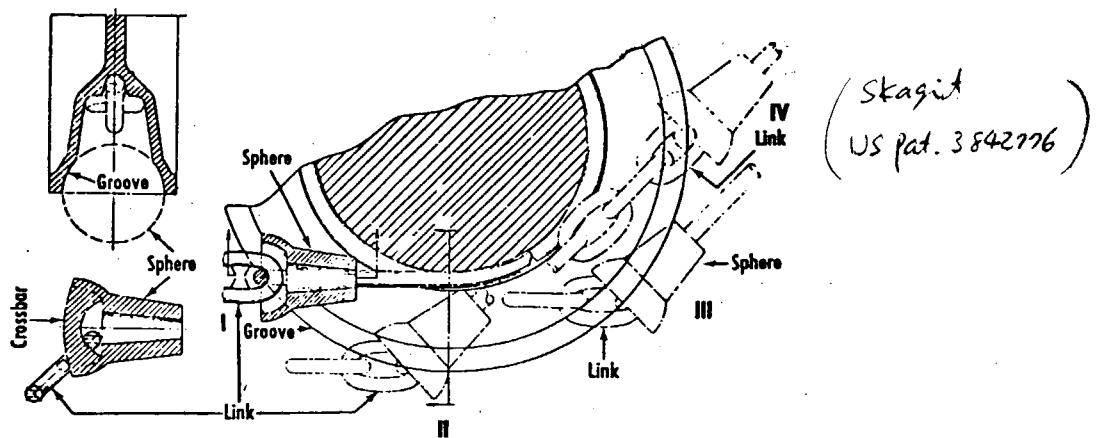


図 5.4.1.0 コネクター例 (1)

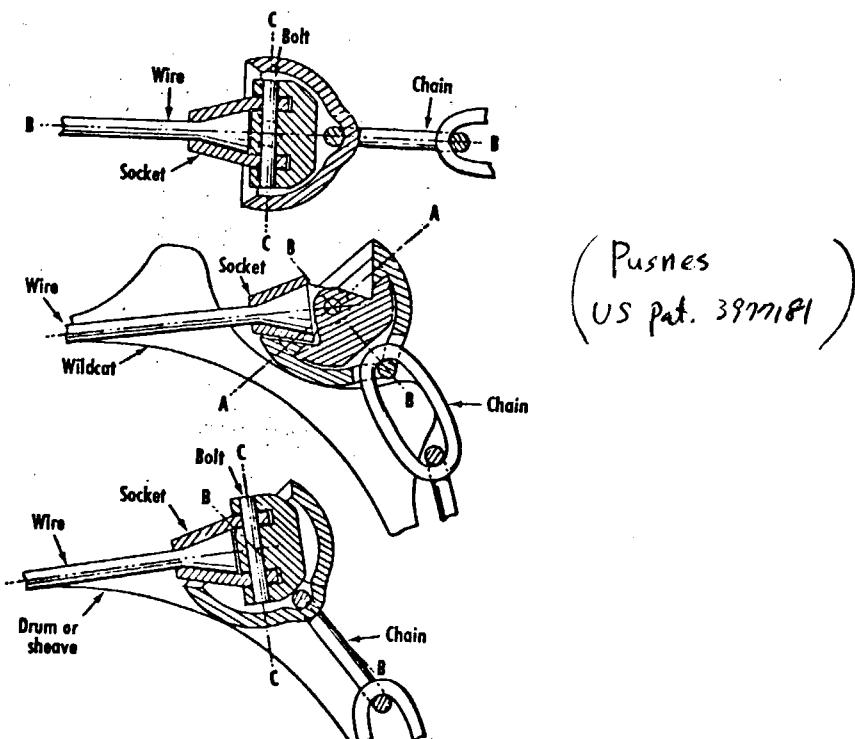


図 5.4.1.1 コネクター例 (2)

(d) Continuous system

Continuous (又は nondisconnect) chain/wire system(図 5.4.12)は、チェインとワイヤを恒久的に結合したもので、巻取り装置としては特別なウインチ・ウィンドラス装置(図 5.4.13)を必要とする。本方式を採用した例としては、海洋石油試掘リグ「OCEAN RANGER」(半潜水式)がある。

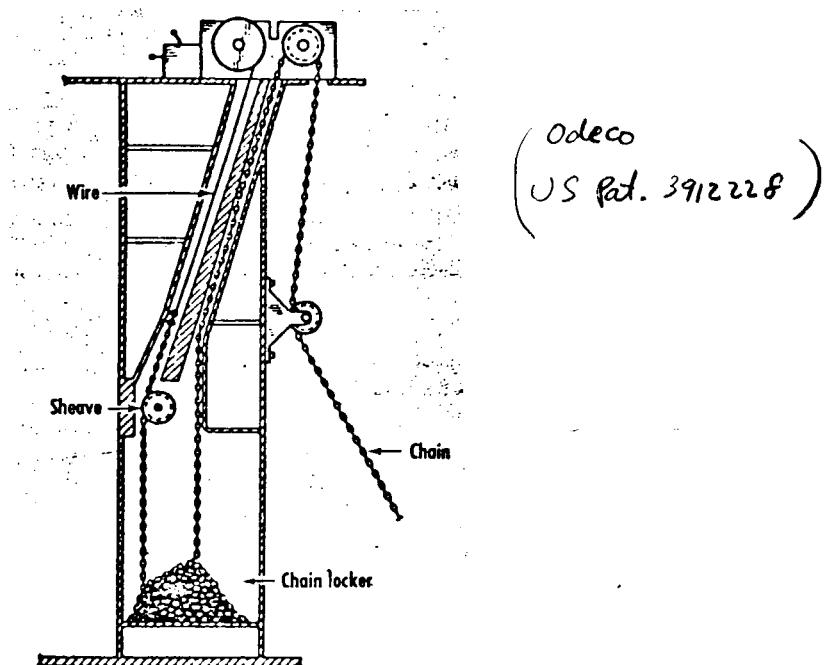


図 5.4.12 Continuous system 概念図

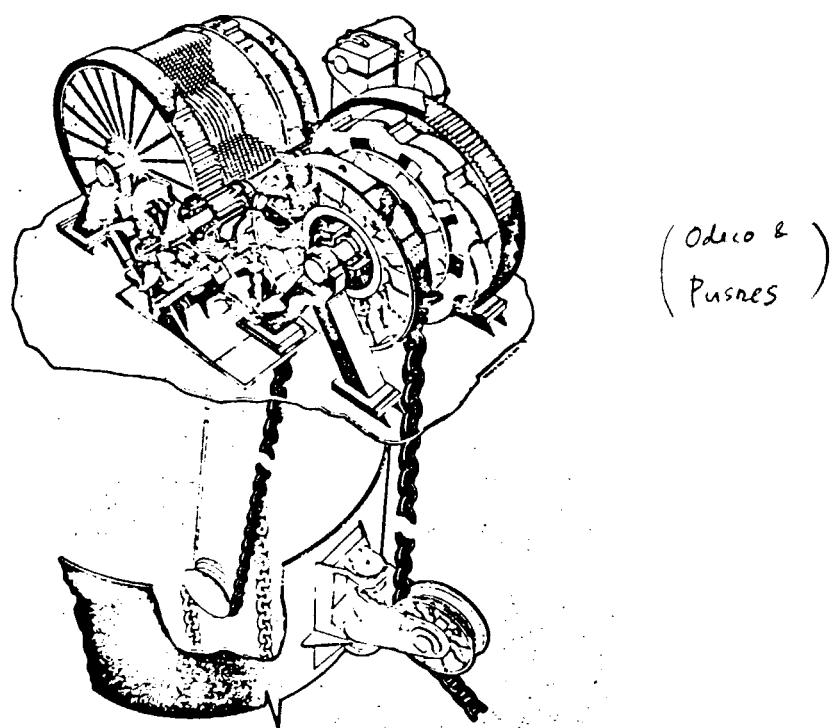


図 5.4.13 Ocean Ranger 使用例

OCEAN RANGER に使用された係留機器の主要目は次のとおりである。

- 12台 ウィンチ／ウィンドラス・システム
- 12本 $89\text{mm}\phi \times 1800\text{m}$ ワイヤ + $82.5\text{mm}\phi \times 1000\text{m}$ チェイン
- 係留可能水深 1150m
- 12台 1000HP 電動機(駆動用)、 $50\text{t}/500\text{t} \times 100\text{m/min}/40\text{m/min}$

また、船舶などの様にウィンチ／ウィンドラスを据付けた甲板下に充分な高さが確保できない場合には、図 5.4.1 4、15 に示す様な配置を考えることができる。図 5.4.1 4 はウィンチにシープを横移動可能に取付けた例である。

また、図 5.4.1 5 はシープとは別に 2つのローラーを横移動可能に取付けた例である。

5.4.4 複合索・鎖の問題点

複合索・鎖に関する川端らの実験⁷⁾によれば、次のような問題点が指摘されている。

- (1) 索・鎖の組合せでは、疲労強度の面から考えるのであれば、静的強度よりも疲れ限度を同一とする様な設計が必要である。
 - (2) 索・鎖に張力が作用すると、索の自転によって鎖がねじれる場合がある。この場合、鎖の自由ねじれ角度以内であれば問題ないが、そうでない場合には結合方法や非回転索の使用などを考慮する必要がある。
- さらに次の様な問題点が考えられる。
- (3) 複合索・鎖(結合手段を含む)の信頼性をもとにした安全率の考え方
 - (4) 鋼索の製作上での長さ制限⁴⁾($80\sim90\text{t}/\text{リール}$; $3\frac{1}{4}''$ 鋼索で $11,000\text{ft}$)があり、大水深になると複合索・鎖でも問題が生じる場合がある。

参考文献

- 1) J. Linehan, Synthetic Rope System for Deep Sea Moorings, Offshore Serv. 1977.
- 2) J.M. Niedzwecki, et. al., On the Design of Mooring Lines for Deep Water Applications, Report of the catholic Univ. of America.
- 3) J.M. Niedzwecki, A Comparison of Non-Metallic Ropes with Wire Rope and Chain Mooring Lines for Deep Water Applications, OTC 3207, 1978.
- 4) M.A. Childers, Environmental Factors control Station Keeping Method, Petroleum Eng. Sept. 1974.
- 5) Ivar Krogstad, New chain/wire mooring systems meet challenge of ultradeep water, the Oil and Gas Journal, Jan. 17, 1977.
- 6) Ivar Krogstad, Offshore Mooring Machinery for Optimum Utilization of Steel wire Rope, OTC 2927, 1977.
- 7) 川端ら, ワイヤロープ・チェーン複合ラインの実験報告, 作業船第122号, 昭和54年3月

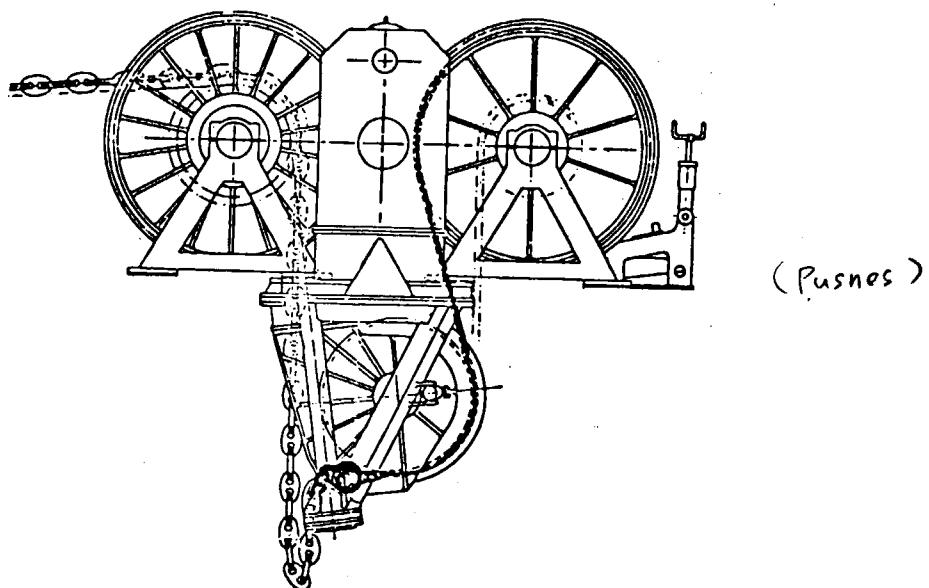


図 5.4.14 可動式シーブ

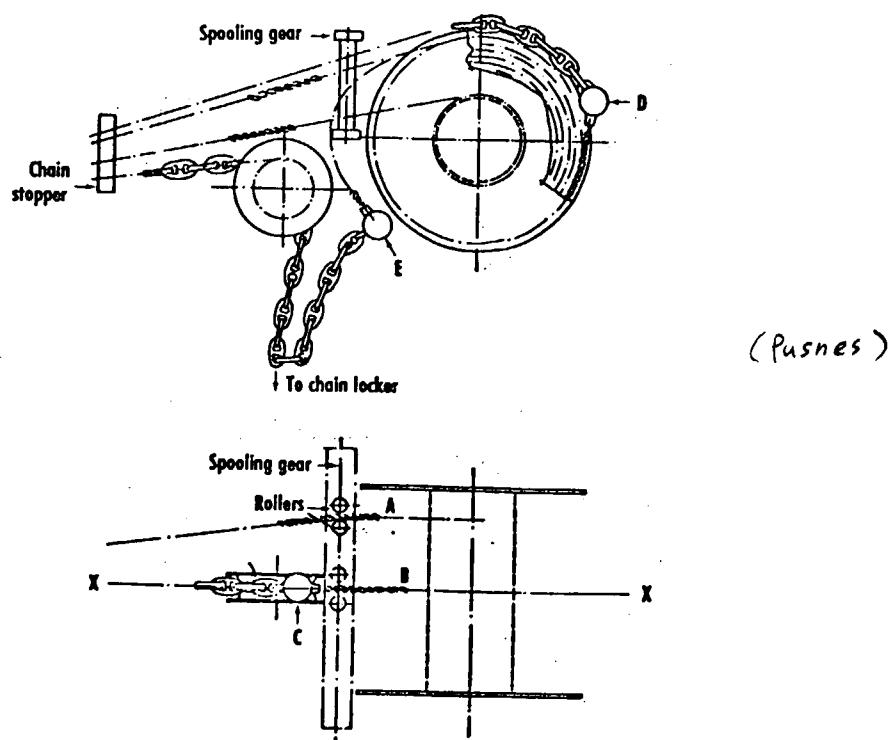


図 5.4.15 可動式ローラ

第6章 係留用要素機器

6.1 調査対象範囲

6.1.1 一般

係留用要素機器の調査にあたり、対象物としては、掘削リグにとどまらず、OTEC、観測ブイも含め、水深は200mより1,000m前後まで考慮した。従って係留方式として一点係留、多点係留のような多数実績のある係留方式からTLPやガイドタワーのような開発途上の係留方式にまで適用できるように、係留ラインの耐久性・耐腐食性、高把駐力アンカー・シンカー、係留設備の施工法および維持補修方法について調査すると共に、さらに深海係留における係留特性向上化のための新係留ラインの適用可能性も調査した。

今年度は文献を中心に調査し、まとめ・問題点を摘出した。

6.1.2 調査項目

今年度実施した調査項目およびその概要は下記の通りである。

- (1) 浅海係留から深海係留に移行するにつれて変化する海洋環境および係留方式について調査し、その相違点をまとめた。
- (2) 海洋構造物の係留用として適用される索（鋼索および繊維索）の種類および構造について、又、長期係留に対しての索の防食のためのコーティングの方法、索の端末加工の方法についても調査し、まとめた。
- (3) 上記索の各種構造、試験条件等による疲労特性を含み、索の耐久性について調査し、まとめた。
- (4) 係留チェーンについても、索と同様にその種類、静的強度、疲労強度を調査し、まとめた。
- (5) 深海係留において係留特性を向上させるために、従来の索鎖に代わる新係留ラインの適用可能性を検討し、新係留ラインの例も調査した。
- (6) アンカー・シンカーについては、従来から実績のある種類に加えて高把駐力アンカー・シンカーの種類も調査した。
さらに海底土質についてその種類および特性も調査し、それに伴う各種アンカー・シンカーの把駐力をまとめた。
- (7) 深海におけるアンカー・シンカーの海底地盤工事も含めた沈設・施工法および係留設備の施工プロセジュアを調査し、まとめた。
- (8) 長期深海係留ではメンテナンスフリーが原則であるが、実用上は維持、補修工事を考慮する必要があり、その維持、補修方法について調査し、まとめた。

6.2 浅海係留と深海係留との相違

6.2.1 浅海係留と深海係留との相違

浅海域から深海域に移行するにつれて海洋環境および係留方式は変化する。その詳細については後述されているが、それらの検討結果より浅海係留と深海係留の主な相違点を以下にまとめ、問題点も摘出した。

(1) 水深

浅海域と深海域をどこで分けるかという議論になると、水深をパラメーターとするのが一般的と思われるが、それを分ける目安はむずかしいが、下記の調査より概略水深を想定する。

海洋環境の水深による変化は下記の通りである。

	水深	備考
海底地形	200 m	社会通念の大陸棚外縁
海洋物理特性	200 m	水温、酸素濃度、塩分が急激に変化する。
生物付着	60 m	これ以深になると生物付着は非常に少ない。

係留方式の水深による変化は下記の通りである。

	水深	備考
多点係留方式	~1,000 m	但しチェーンとワイヤーの複合索鎖方式は 450 m 以深で多く採用
TLP、ガイドタワー	200~300 m 以深	これ以深になると経済性発揮

以上の結果より、浅海域と深海域を分ける水深は概略 200~300 m 前後と考えられる。

(2) 防食・摩耗

深海域における金属材料の腐食は一般には浅海域より小さくなる傾向にあるが、深海係留のように表層から深層を貫通する場合には、各層の境界などで酸素の濃淡による大電池腐食を受けるおそれがあるので注意が肝要である。（酸素の少ない部分が陽極となって激しく腐食をおこす現象である。）

潮流など水速の速いところでは腐食が大きいが、浅海域で海底流も大きいと流砂による係留装置の摩耗も考えねばならない。

(3) 生物付着

浅海域に係留する場合はルイジアナ沖の実状調査でもわかるように 60 m 水深まで生物付着があることが記録されている。これにより海洋構造物の流体力および動的応答も変化するので注意が必要である。

深海域に係留する場合は、表層でも生物自身少なくなるので、（今後の調査を必要とするが）生物付着は浅海域より少ないと思われる。

(4) 係留方式と今後の問題点

大水深用に開発が進められている TLP、ガイドタワー方式は水深 200~300 m 以深の深海域で経済性を発揮するようである。

一方多点係留方式そのものは 1,000 m 前後まで適用されているが、深海になるにつれて経済性を発揮するワイヤーとチェーンの複合索鎖係留方式は 450 m 以深で適用されている。他方深海係留として設計されても、浅海域にまで適用しようとすると、その適用がむずかしくなるので、どの水深まで適用できるかは今後検討を要する。

(5) 係留要素機器と今後の問題点

6.3 から 6.6 に記述されている係留要素機器のうちで、浅海係留と深海係留で大きく相違する項目は新係留索・鎖の可能性、深海における施工法および維持補修方法と思われるが、それらについては各章を参照されたし。

6.2.2 海洋環境

浅海域より深海域に移行するにつれて、変化する海洋環境について係留に関する以下の項目を調査した。

- (1) 海底地形
- (2) 海洋物理特性と防食
- (3) 生物付着
- (4) 波
- (5) 海流・潮流

(1) 海底地形⁽¹⁾

大陸や日本列島のような洋上の島々の周囲には、海岸から沖合へ向かって、比較的平らな浅海が広がっているのが普通であり、これを大陸棚と呼んでいる。

一般的な社会通念としては、海岸から水深200mまでの範囲を大陸棚として受け取っている。

しかし、海底地形学あるいは海底地質学の立場からいえば、どうも一定の水深を決めて、大陸棚の範囲を定義するのは無理のようである。現在のところでは、海岸からずっと沖へ向かってゆるやかに下降している平坦な浅海部分が大陸棚であって、その先で急に海底の傾斜角が増して、大陸斜面に入る縁までをいうのである。いわば、学術的には海底の傾斜角が急増する点までを指している。

この大陸棚外縁の水深は一般的にいって世界中どこの海岸の沖でも、殆んどは水深120±20m程度の範囲に入ってくるようである。従って、一般社会通念としての水深200mより浅いところに、外縁が位置しているというものが実状である。

(2) 海洋物理特性と防食⁽²⁾

海は水深方向で水温、溶存酸素濃度、塩分濃度などが著しく変化する。その状況を図6.2.1に示す。

水深約200mまでは、ほぼ表面の水温に等しい。この層を表層と呼んでいる。水深が約200mを超れば水温は急激に低下を始め水深約1,000mで5~6°Cに達する。この層は躍層と呼ばれる。水深が1,000mを超れば、水温の低下速度は鈍くなり、水深2,000mで1~2°Cのほぼ一定温度となり、これより水深が大となっても水温の変化はない。水深1,000m以深の部分を深層と呼んでいる。

溶存酸素濃度も各層で変わる。一般的に表層では表面とほぼ同じ酸素濃度を示すが躍層では急激に濃度が低下する。深層では逆に急激に酸素濃度が大となり、表層の値より大きくなることもある。

塩分濃度は水温と同様な分布を示すが、その変化の度合は余り大きくなく5%程度である。

一方、海水中の鋼の浸食度は上記水温、溶存酸素濃度、塩分濃度および水速等に影響される。これら因子が腐食にどの程度影響するかについて、浸食度と水温との関係を図6.2.2に、溶存酸素との関係を図6.2.3に、塩分濃度との関係を図6.2.4に、水速との関係を図6.2.5に各々示す。

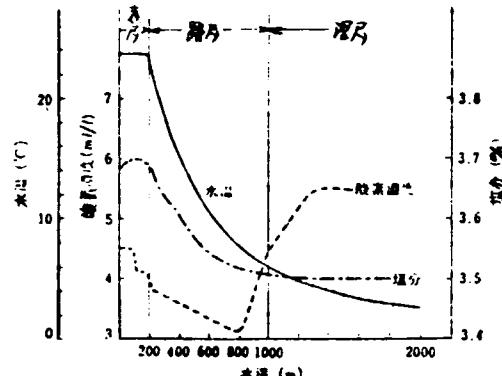


図 6.2.1 水深方向の水温、酸素濃度、塩分の分布

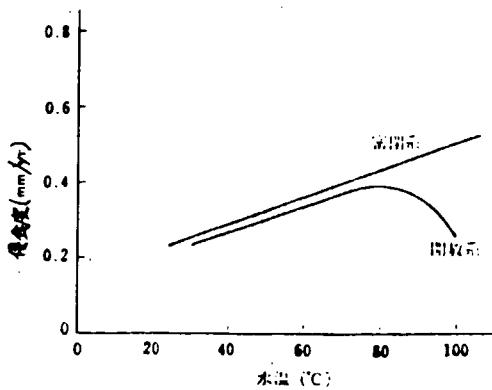


図 6.2.2 鋼の浸食度と水温の関係

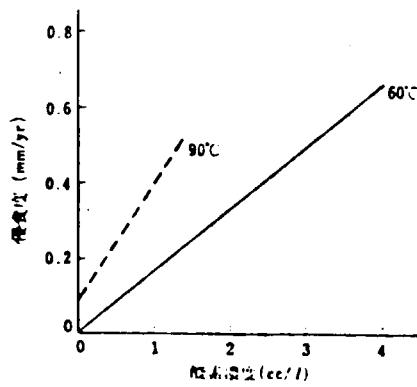


図 6.2.3 鋼の浸食度と酸素濃度との関係

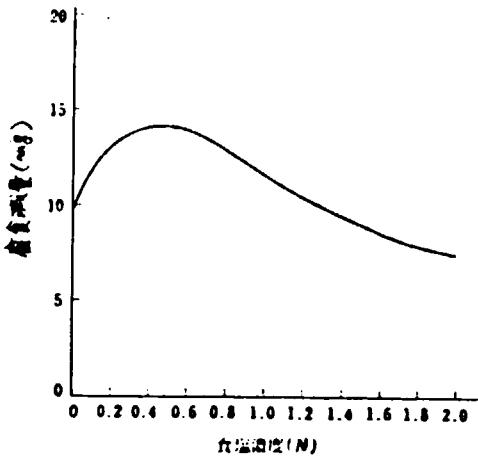


図 6.2.4 鋼の腐食と食塩濃度との関係

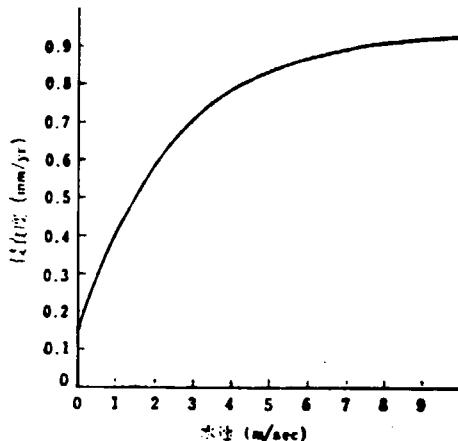


図 6.2.5 海水中の鋼の浸食度と水速との関係

以上の結果より水温が高くなるにつれて、酸素濃度が濃くなるにつれて、又水速がはやくなるにつれて、鋼は腐食されやすい。

従って 1,000m 程度の深海までなら、深層における金属材料の腐食は一般には表層より小さくなる傾向にある。しかしながら深海係留のように表層 → 躍層 → 深層を貫通する場合には表層と躍層、躍層と深層の境界などで酸素の濃淡による大電池腐食を受けるおそれがある。（酸素の少ない部分が陽極となって激しく腐食をおこす現象）これらの腐食防止としては、亜鉛メッキや塗装をしたうえで電気防食（流電陽極法の方が適している。外部電源法は深海での高水圧のため電線の接続部分の絶縁に問題があるため）を併用すべきとしている。

(3) 生物付着⁽³⁾

海洋構造物に付着する生物の影響により、流体力の変化および波、地震による動的応答に変化を与えるかどうか調べるためにルイジアナ沖（メキシコ湾）の海洋構造物について生物付着の実体調査を行なった。

調査した海洋構造物の一覧表を表 6.2.1 に示す。水深毎の付着厚さを図 6.2.6～7 に示す。

表 6.2.1 Offshore Louisiana Structures Inspected

STRUCTURE	LOCATION	WATER DEPTH (ft)	INSTALLATION DATE	INSPECTION DATE	INSPECTION DEPTHS (ft)
1. OCEAN TEST STRUCTURE	SOUTH TIMBALIER BLOCK 67	66	11/1976	6/1978	0-45
2. GI 16-L CONDUCTOR	GRAND ISLE BLOCK 16	55	MID 1967	6/1978	0-55
3. TEST GUYED TOWER	GRAND ISLE BLOCK 86	310	LATE 1975	MAY 1979	0-310
4. GI 16-L	GRAND ISLE BLOCK 16	55	MID 1967	EARLY 1975	25
5. GI 16-T	GRAND ISLE BLOCK 16	48	LATE 1962	EARLY 1975	16
6. GI 16-P	GRAND ISLE BLOCK 16	55	MID 1957	EARLY 1975	17
7. WD 73-A	WEST DELTA BLOCK 73	168	EARLY 1964	1975	28,60,98
8. WD 73-F	WEST DELTA BLOCK 73	170	LATE 1965	1975	26,63
9. WD 30-E	WEST DELTA BLOCK 30	52	MID 1954	1972	18,34
10. SMI 6-A	SOUTH MARSH ISLAND BLOCK 6	63	MID 1963	4/1976	14,38
11. SMI 6-B	SOUTH MARSH ISLAND BLOCK 6	68	MID 1964	4/1976	26,63
12. SMI 73-A	SOUTH MARSH ISLAND BLOCK 73	136	MID 1963	4/1976	25,60,95
13. SMI 73-B	SOUTH MARSH ISLAND BLOCK 73	135	EARLY 1966	4/1976	26,63
14. SMI 73-C	SOUTH MARSH ISLAND BLOCK 73	137	LATE 1972	4/1976	27,64,101
15. EI 295-A	EUGENE ISLAND BLOCK 295	215	LATE 1971	MID 1974	33,145
16. ST 172-A (DRILL)	SOUTH TIMBALIER BLOCK 172	93	LATE 1969	MID 1974	23
17. ST 172-A (PROD)	SOUTH TIMBALIER BLOCK 172	93	LATE 1969	MID 1974	23,64
18. ST 172-A (LIVING)	SOUTH TIMBALIER BLOCK 172	93	MID 1971	MID 1974	64
19. VER 265-A	VERMILION BLOCK 265	165	LATE 1971	MID 1974	32,77,121

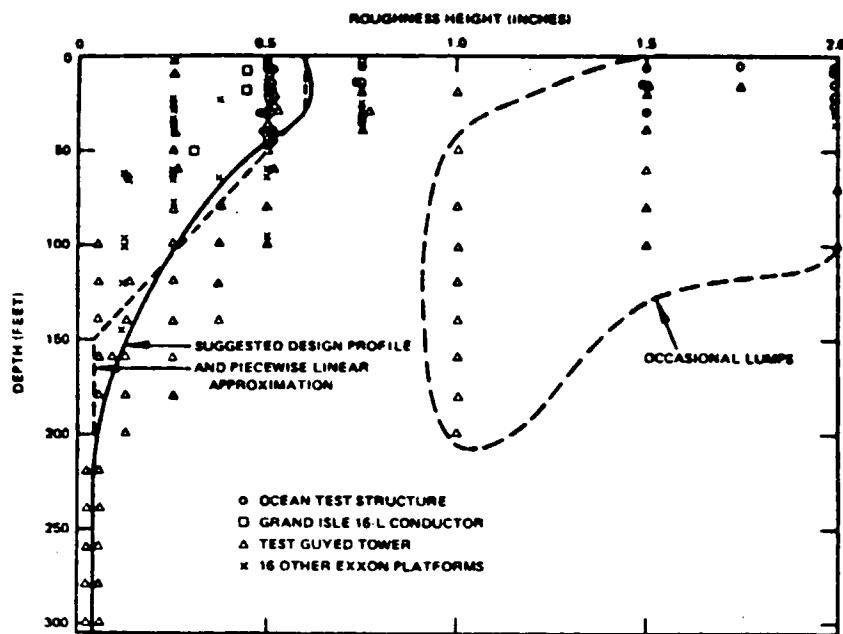


FIG. 6.2.6 AVERAGE MARINE GROWTH ROUGHNESS HEIGHT vs. DEPTH ESTIMATED FROM PLATFORMS OFFSHORE LOUISIANA

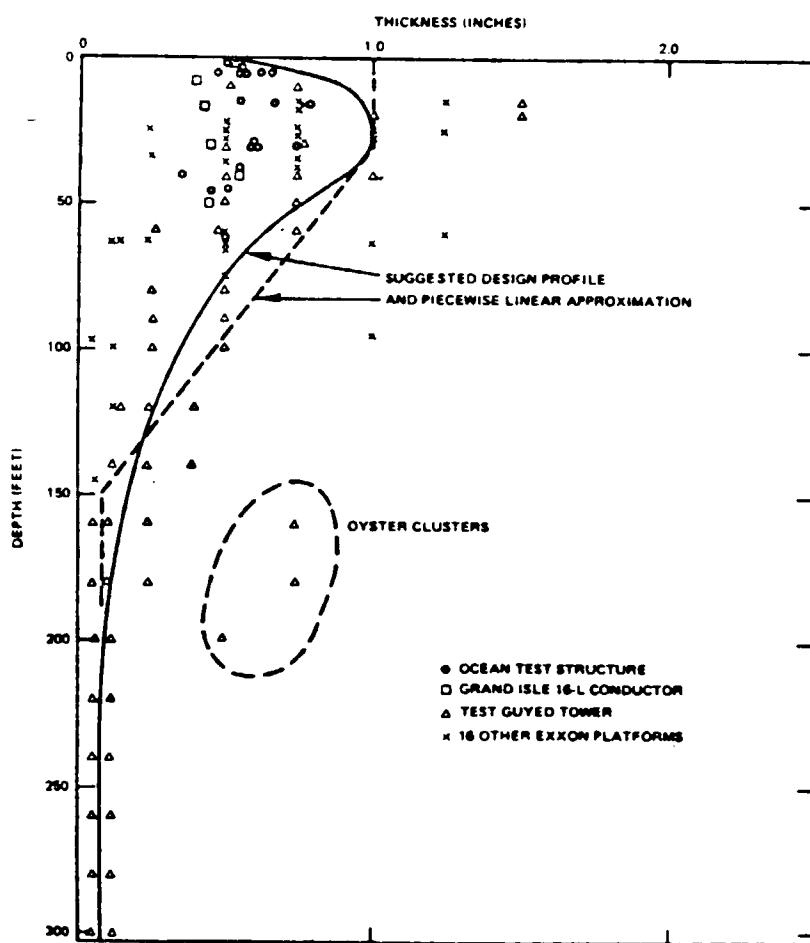


FIG. 6.2.7 AVERAGE MARINE GROWTH THICKNESS vs. DEPTH ESTIMATED FROM PLATFORMS OFFSHORE LOUISIANA.

調査の結果は下記の通りである。

- (イ) 生物付着の平均厚みは 0.6 インチから 1 インチ (25 mm) 程度であった。しかし、この測定は固い生物(フジツボ、貝類)を対象としたものであり、軟かい生物(ヒドロ虫、こけ虫)も含めると 10 ~ 30 ft の水深で 5 インチ (125 mm) の厚みに達する。
- (ロ) 水深が 200 ft (60 m) 以深になると、生物付着は非常に少ない。
- (ハ) ルイジアナ沖は栄養分の少ない海域であるので、生物付着は少なかったが、北海のように栄養分の多い海域ではここより 4 倍も多く生物付着する。

上記生物付着の調査より固い生物が付着した場合の流体力の変化を調査した。

流体力としては抗力係数 (C_d)、質量力係数 (C_m) を図 6.2.8 に示す円柱について調べた結果は下記の通りである。

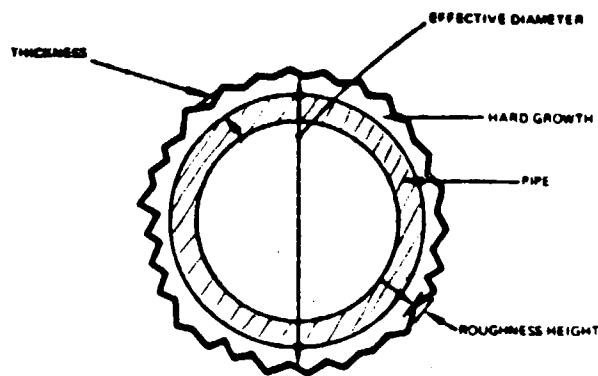


図 6.2.8 SCHEMATIC DEFINING ROUGHNESS HEIGHT, THICKNESS AND EFFECTIVE DIAMETER FOR A CYLINDER WITH MARINE GROWTH.

- (イ) C_d は表面粗度により下図の如く変化する。

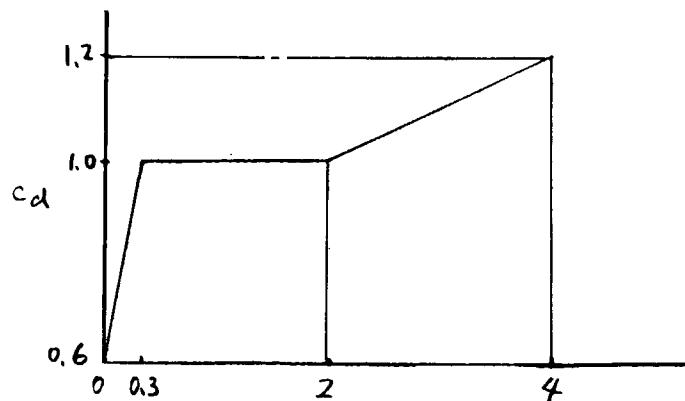


図 6.2.9 Relative Roughness (Roughness height / Effective diameter)

- (口) C_m は C_d 程表面粗度の影響を受けない。
- (イ) base steel (表面粗度 0.01%) から表面粗度 2% に変化した場合 C_m は 1.5 が 1.25 に 17% 減少するが、 C_d は 0.7 から 1.0 に 43% 増加する。
- (ウ) 軟かい生物が付着した場合は、流体力がどう変化するかよくわからないが、かえって表面をなめらかにし、流体力を下げる効果があるという議論もある。

(4) 波 浪⁽⁴⁾

海洋に発生する波浪は、時間的および空間的に非常に複雑な変化をするが、その波浪を構成している 3つの重要な要素は波長(L)、波高(H_w) 及び周期(T)である。

ここで一般的に波浪として取り扱われている重力波について、水深(h)の影響の入った線形理論の関連公式を次の 3つの場合について考える。

(イ) 長波 (著しく水深の浅い場合) $h/L \leq 1/25$

$$L = T \sqrt{gh}$$

(ロ) 浅海波 $h/L < \frac{1}{2}$

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

(ハ) 深海波 $h/L \geq \frac{1}{2}$

$$L = \frac{g T^2}{2\pi}$$

ここで T と L に対する h の影響を見たのが

図 6.2.10 である。一般的な被係留構造物が対象とする波周期は通常 5~20 秒程度であり、例えば波周期を 15 秒とすれば波が水深の影響を受けないのは約 175 m 以深となる。

(5) 海流・潮流^{(5), (6)}

(イ) 海 流

海流はそれが生じる原因によって密度流、吹送流、地衡流、傾斜流などに区別されているが、流れの方向は季節によって若干の変動はあるがほぼ一定である。

海流の流速は各海流により異なっているが大体 0.5~1.5 m/S 程度である。インド洋のソマリ海流のように流速 3.5 m/S に及ぶものもある。

海流の深さ方向の流速分布は一般に深さとともに急激に減少していく、200m の深さでは海面の流速の 1/3 以下になっている。ここに世界的な大海流の一つである Gulf Stream (メキシコ湾流) の水深方向の流速分布を図 6.2.11 に示す。

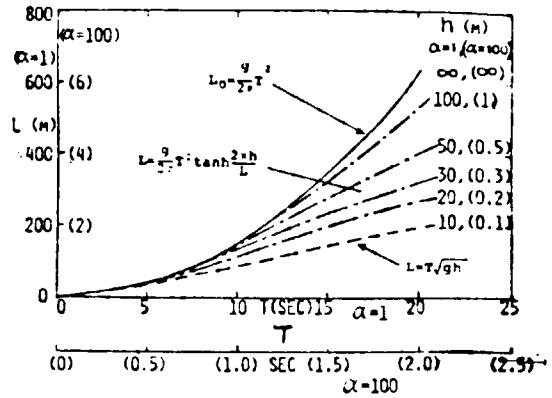


図 6.2.10 規則波の波周期(T)と波長(L)の関係への水深(h)の影響

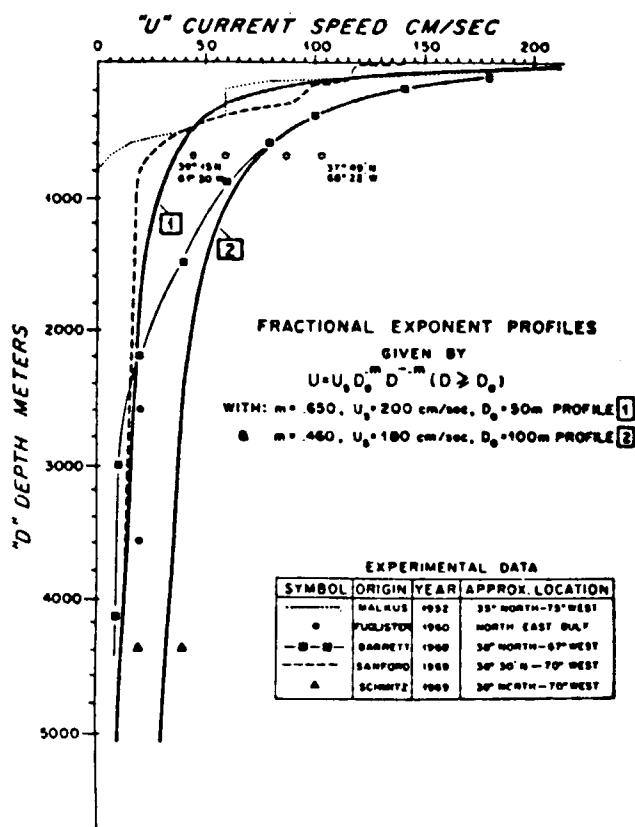


図 6.2.11 Gulf Stream Current Profiles

(ロ) 潮 流

普通 1日に 2回潮汐の干満に伴って流向が反転する潮流の流速は海岸や海底の地形によって大きく影響を受ける。わが国の代表的な海峡、水道における最大潮流流速の値を表 6.2.2に示す。

潮流の深さ方向の流速分布は海底地形、海底摩擦、水温、塩分などによって変化し、又表層と底層では流向が逆になることがあるが、一般的には海底まで流速は余り衰えないと考えるべきで、海底流砂を伴った流れによる係留チェーンの摩耗の問題および流速の速いところでは図 6.2.5により腐食の問題も考慮する必要がある。

表 6.2.2 わが国の代表的な海峡、水道における最大潮流流速の値

海峡、水道名	最大潮流流速 (m/S)
津軽海峡	1.0
紀伊水道	2.1
鳴門海峡	5.2
来島水道	4.1
音戸瀬戸	5.2
大畠瀬戸	3.6
豊後水道	2.1
関門海峡	3.6

6.2.3 係留方式

(1) 係留方式と稼働水深

係留方式としては一点係留、多点係留、TLP、ガイドタワー等が適用されるが、このうち一点係留方式については、Permanent Mooring の実績例（表 6.2.3）⁽⁷⁾では水深 150 m 程度のところまでの浅海域に設置されている。

表 6.2.3
RIGID-YOKE MOORINGS-SITE CONDITIONS

NO.	FIELD	TANKER SIZE (DWT)	WATER DEPTH (FT)	WAVE HEIGHT (FT)	WIND SPEED (MPH)	CURRENT (KNOTS)
1	Aehtart	70,000	220	41	78	2.5
2	Peleng	70,000	180	27	81	3
3	Ardjuna	66,000	140	27	81	3.5
4	Castellon	58,000	389	52	76	2.5
5	Pulai	167,000	220	44	94	2.5
6	Udang	102,000	305	39	69	2.9
7	South Rido	70,000	200	40	75	2
8	Caroupe	54,000	400	51	84	3.5
9	Arsenah	252,000	107	25	82	3
10	Aehtart	135,000	220	41	78	2.5
11	Wilde	80,000	312	60	101	2.3
12	Patch	126,000	130	36	69	3.5
13	Fulmar	210,000	269	85	87	2.4
14	Santa Barbara	50,000	490	41	75	2

多点係留方式については、すでに掘削リグで、水深 1,000 m 前後でも稼働している。しかしながらその係留方式は水深が深くなるにつれてチェーンとワイヤーの複合索鎖方式が多く採用されている。この複合索鎖方式の特徴は図 6.2.12 ~ 15⁽⁸⁾ に示すように

- (1) 200 m 水深で水深の 5 % オフセットにおいて、複合索鎖の最大張力はワイヤー方式とほぼ等しくチェーン方式より小さい。（図 6.2.12）
- (2) 複合索鎖方式はすべての水深で他の方式より復元力が大きい。特にチェーン方式は水深が深くなるにつれて復元力が急激に小さくなる。（図 6.2.13）
- (3) 初期張力はチェーン方式が一番水深の影響を受ける。これは水深が深くなるにつれてチェーンの自重が急激に増加するためである。（図 6.2.14）
- (4) 複合索鎖の懸垂長さはチェーン方式とほぼ等しいが、ワイヤー方式よりはかなり少なくてすむ。（図 6.2.15）

以上の結果より複合索鎖方式は大きな復元力を有し、しかも懸垂長さが少なくすむことから水深が深くなるにつれて、他方式より経済的となり、実績及び文献⁽⁹⁾によると、450 m 以深から適用されている。

生産用プラットフォームとしては現在までのところ固定式に頼っていたが、掘削技術が 1,000 m 前後まで技術的に可能になるにつれて、固定式に代る大水深用生産プラットフォームの開発が進められてきており、その代表的なものが TLP やガイドタワー方式である。これら方式の経済性は図 6.2.16 ~ 19⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾ に示すように概略 200 ~ 300 m 以深から有利性を發揮するようである。

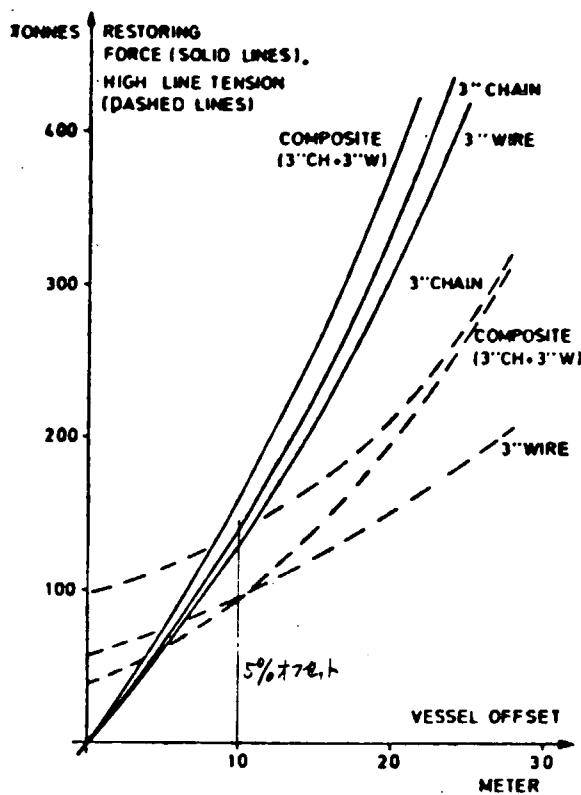


図 6.2.12 Restoring force and high line tension for 8-line mooring systems in 200m water

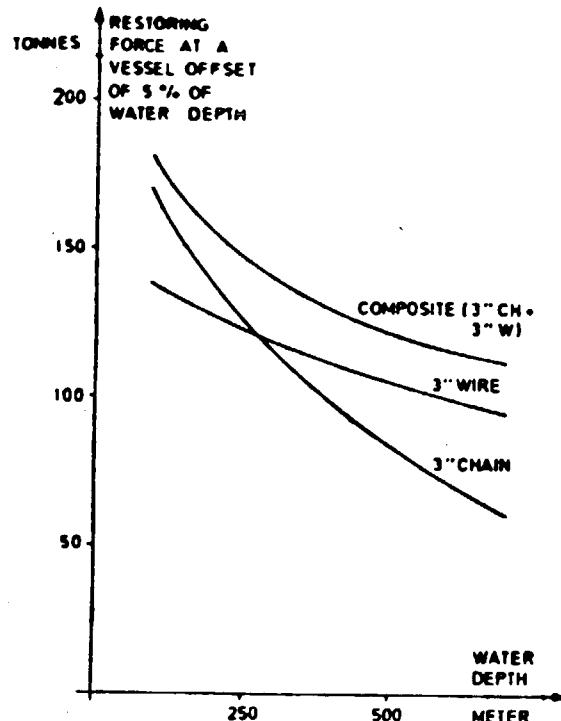


図 6.2.13 Maximum obtainable restoring force in operating conditions.

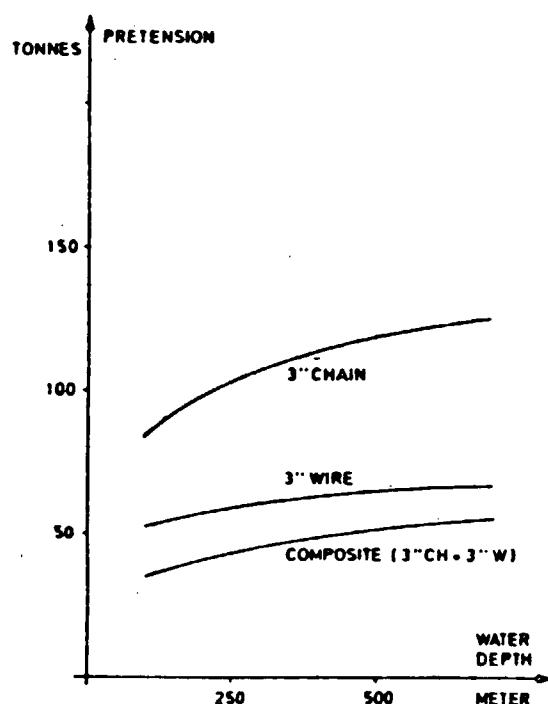


図 6.2.14 Pretension that for a vessel offset of 5% of the water depth results in a high line tension 1/3 break strength.

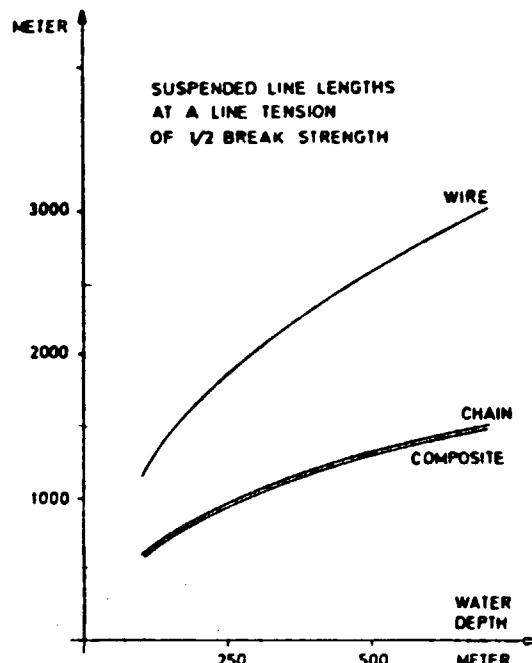


図 6.2.15 Suspended line lengths.

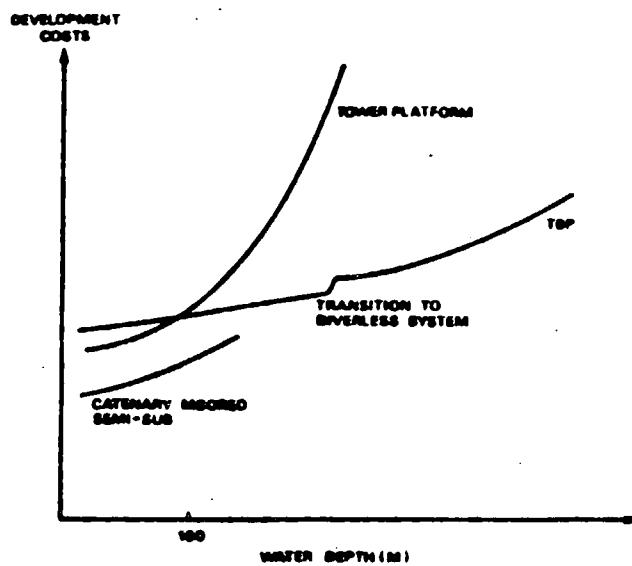


図 6.2.16 The cost curve shapes.

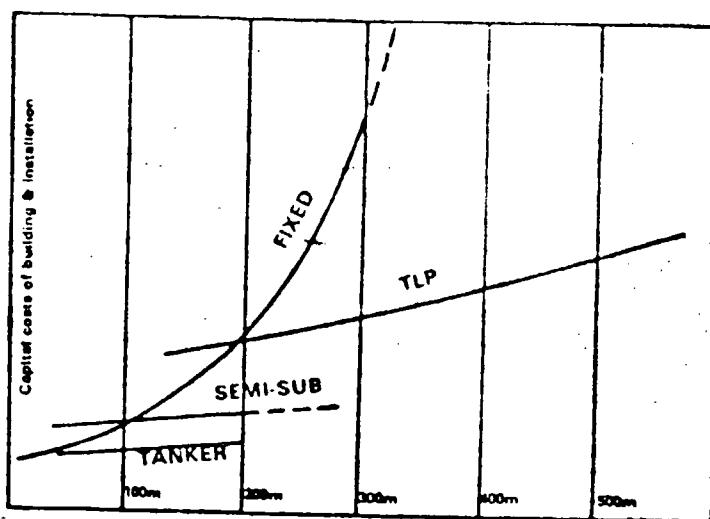


図 6.2.17 Cost/depth comparision of floating platforms and fixed installations.

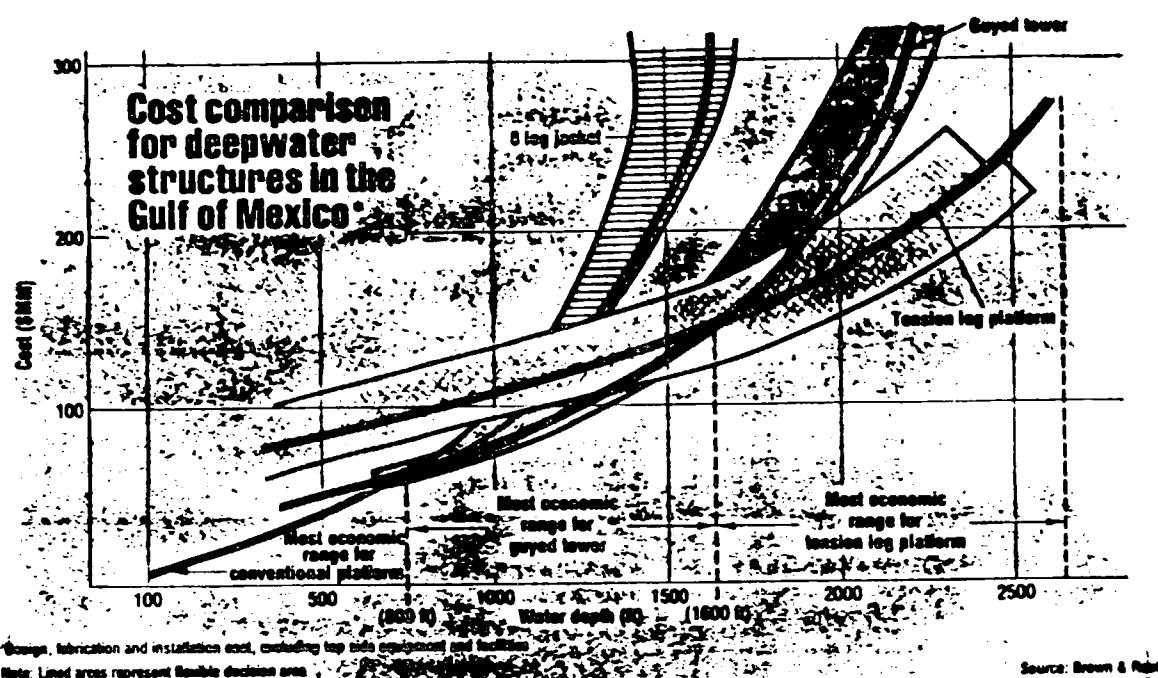


图 6.2.18

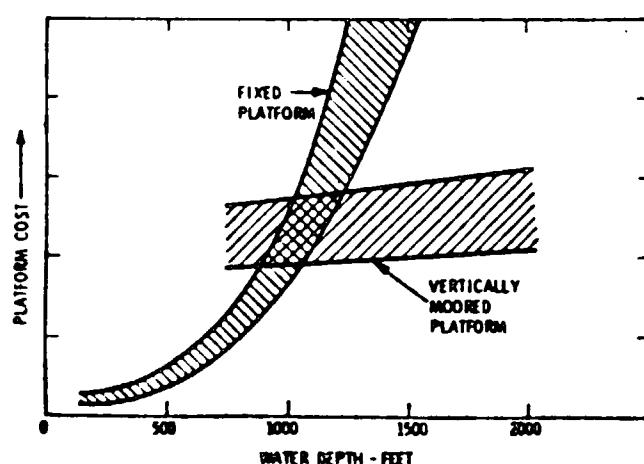


图 6.2.19 Cost comparison.

参考文献リスト

- (1) 海洋科学 大陸棚 Symposium - 5 (1970)
- (2) 防蝕技術 日本学術振興会腐蝕防止第97委員会
- (3) Biological and Engineering Parameter for Macrofouling Growth on Platforms Offshore Louisiana by J.C. Heiselman OCEANS'81
- (4) 海洋構造物水槽試験に使用する波浪(I)
竹沢誠二 日本造船学会誌 第613号(昭55)
- (5) Design of Deep sea Mooring Lines
by H.O. Berteaux Marine Technology Society Journal ('70 Vol 4 No.3)
- (6) 海洋開発技術ハンドブック
- (7) OTC 3567 The Mooring of a Tanker to a Single Point Mooring by a Rigid Yoke by L.H. Smulders OTC 1979
- (8) Mooring System for Offshore Operations
by E. Furcenholt Norwegian Maritime Research (1975 No.4)
- (9) Environmental Factors Control Station Keeping Methods
by M.A. Childers Petroleum Engineer Sept 1974
- (10) OTC 3881 Tethered Buoyant Platform Production System
by G.R. Perrett OTC '80
- (11) Weighing the Pros and Cons of Different Types of Platforms
offshore Engineer April '81
- (12) Analyzing Platform Pricetags by L.L. Blanc offshore March '80
- (13) OTC 3049 The Vertically Moored Platform for Deepwater Drilling and Production by M.Y. Berman OTC '78

6.3 索の構造とコーティング

係留索の種類としては、構造物の係留そのものに用いられる構造用ケーブル（Mechanical Cable）、係留と電気通信用ケーブルを併用した電気通信－構造共用ケーブル（Electro-Mechanical Cable）の2種類がある。

この項では、それぞれのケーブルに用いられている索（鋼索及び繊維索）の種類を述べると共に、石油プラントでのリグやプラットフォーム、またOTEC用など各種の海洋構造物の係留に対して今後用いられるであろうと思われる索の種類についても説明することにした。また、長期の係留に対しての索の防食のためのコーティングの方法、索の端末加工の方法についても記述した。

6.3.1 索の構造

6.3.1.1 構造用ケーブル

(1) 鋼索（ワイヤーロープ）

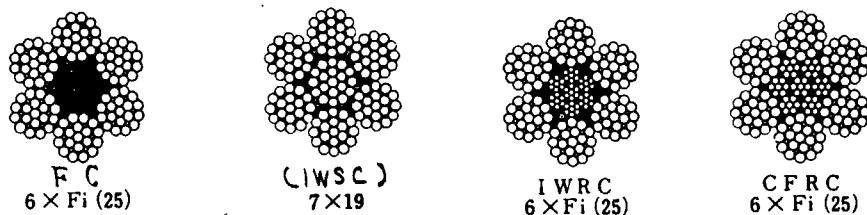
鋼索（以下ワイヤーロープという）の種類、構造は非常に多く多種多様であるが、ワイヤーロープの種類をその構造で分類すると次の様に大別される。1) 2) 3)

(1) ストランドロープ（多重よりロープ）

何本かの鋼線（素線という）を撚り合わせストランドとし、さらにこのストランドを数本撚り合わせてロープしたものである。通常6～8ストランドで形成されるが、ヘルクレスロープのようにストランドを多層に撚ったもの、あるいは、ストランドロープそのものをさらに撚り合わせたケーブルレイロープなどもある。



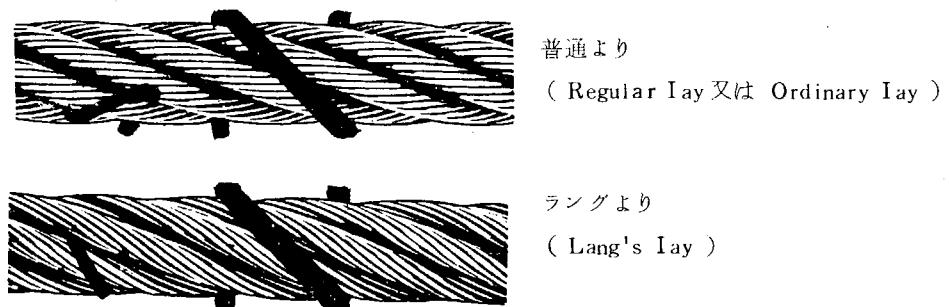
また、ストランドロープの心の種類としては、サイザル、ジュート（黄麻）等の天然繊維やポリプロピレン等の合成繊維を使用した繊維心（Fiber Core, FCと略す）、ストランドを中心とした、ストランド心（Independent Wire Strand Core, IWSC）ロープそのものを心としたロープ心（Independent Wire Rope Core, IWRC又は、Center Fit Rope Core, CFRC）がある。



ストランドロープの特性は、ストランドのより方と構成によって変化する。ストランドのより方としては、各層の素線の径を同一にして、よりの長さを違えて撚った交さよりロープ、各層の素線

のよりの長さを同一に撚った平行よりロープとがある。交さよりロープは、層間の素線が点接触するため点接触よりもいわれ、 6×19 、 6×24 、 6×37 等の構成記号で示されるロープがこれに当る。一方、平行よりロープは各素線が線接触しているため線接触よりもいわれ、 $6 \times S(19)$ 、 $6 \times Fi(25)$ 、 $6 \times WS(36)$ 等の構成記号で示されるロープが平行よりロープである。平行よりロープは、交さよりロープに比べて柔軟性において劣るもの、曲げ、引張に対する耐疲労性にすぐれているのが特徴である。

また、ストランドロープのより方には、ストランドとロープのより方向を反対にして撚る普通より (Regular Lay)、又は Ordinary Lay と、同一方向に撚るラングより (Lang's Lay) とがある。ラングよりロープは普通よりロープに比べ耐摩耗性耐疲労性にすぐれているが、ロープの自転が激しく取扱いが難しいため特殊な用途にのみ使用され、一般的には普通よりロープが多く用いられる。



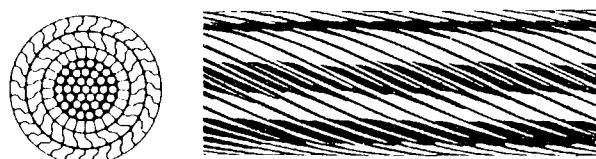
(d) スpiralロープ (一重よりロープ)

素線を数層にわたり撚り合わせたもの。通常心線を除く全素線とも同一の素線のものが使用される。外国では Bridge Strand とも言われる。



(e) ロックドコイルロープ

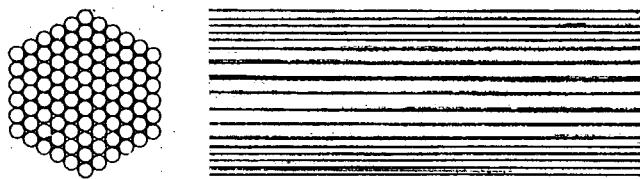
素線と数層にわたり撚り合わせたいわゆるスパイラルロープの上に T 形や Z 形の異形線 (Shaped Wire) を撚り合わせたもので、異形線の層が 2 層のものを C 形、3 層のものを D 形、4 層のものを E 形、5 層のものを F 形と呼んでいる。



(e) 平行線ストランド (Parallel Wire Strand, P.W.S. と略す)

i) 亜鉛めっき鋼線を用いたもの (通常これを P.W.S. と呼んでいる。)

主として 5 φ の亜鉛メッキ鋼線を平行に束ねたもので、断面形状は正六角形と変形六角形がある。弾性係数が大きく、切断荷重が高いのが特徴で長大橋の主索として使用されている。



ii) PC鋼材を用いたもの

PC鋼線 (Pre-stressed Concrete Wire) を平行に束ねた平行線スライドもある。

以上ワイヤーロープについて述べたが、これらの断面状況や特徴等を表 6.3.1 に示す。現在の Oil Rig 等の係留索として使用されているワイヤーロープは、スライドロープが最も多く、特に IWRC 6 × 19 、 6 × 37 Class 又は 8 × 37 Class など 6 ~ 8 スライドで中心ワイヤーロープ入り (IWRC) のものが主として使用されている。^{4), 5), 6)} これらのロープは柔軟性に富んでおり取扱いが容易なこと、ウィンチでの巻取性が良いこと、また端末加工も容易であることなどから最も多く使用されているものと思われる。しかしながら、これらのストランドロープは、

- ① 単位単重に対する切断荷重が低い。
- ② 弹性係数が小さく伸心が大きい。
- ③ ロープの自転力が大きく長尺での使用で問題がある。

等の問題点があり、深海での長尺の係留索や TLP その他 OTEC 等の構造物の係留には適当とは言えない。したがって深海への係留索としては軽くて切断荷重の高い、しかも自転力の小さいワイヤーロープを使用する必要があり、TLP や OTEC 等の構造物に対しては P.W.S. (平行線ストランド) のように切断荷重が高く弾性係数の大きいものを使用するか、⁷⁾ あるいは切断荷重や弾性係数は P.W.S. 等に比べて若干小さいものの比較的取扱いの容易なスパイラルロープやロックドコイルロープを用いる必要がある。現在、アメリカで計画されている大型のガイドタワー式の石油生産プラットフォームでもスパイラルロープの使用が決定しているとの情報もある。

表 6.3.1 係留用鋼索の種類と特徴

鋼索種類	断面形状	構成	引張弾性係数 kg/mm²	標準重量 kg/m	適用規格	特徴
ストラットロード	<p>FC 6x37 IWRC 6x19 Class IWRC 6x37 Class IWRC 6x61 Class IWRC 6x91 Class IWRC 8x19 Class IWRC 8x37 Class 19x7 7x37</p>	6ストラット	FC 6x24 FC 6x37 IWRC 6x19 Class " 6x37 Class " 6x61 Class " 6x91 Class " 8x19 Class " 8x37 Class 多層式 (1171ストロード)	7.000 8.000 9.000 8.000 8.000 8.000 8.000 8.000 8.000	$3.32 \times D_f^2 \times 10^{-3}$ $D_f: 0.7\text{~}7\text{ mm}$ $3.59 \times D_f^2 \times 10^{-3}$ $D_f: 0.7\text{~}7\text{ mm}$ $2.75 \times D_f^2$ $D_f: 0.7\text{~}7\text{ mm}$ $[API 12J3]$ $2.80 \times D_f^2$ 同上 $2.71 \times D_f^2$ 同上	<ul style="list-style-type: none"> JIS G3525-1977 ISO 2408-1976 API (American Petroleum Institute) 9A-1976 Federal Spec RR-W-410C BS (British Standard) 302-1968 NK (日本鋼津協会) 規格 Lloyd 能率協会規格 NV (ルウェイ能率協会) 規格 (その他各国の規格も可能) (銀協会規格がある) <p>柔軟性があり、取扱いが容易である。 伸びが大きい。切削荷重が低い。 係船索としてよく使用される。</p>
			7x19 (IWS-C)	14.000	$0.0395 \times D_f^2$ $D_f: 0.7\text{~}7\text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> 構造用ケーブル材料規格 (日本鋼構造協会規格) <p>ストラットロード中では伸びが小さい。</p>
			7x37			
			1 x 37 1 x 61 1 x 91 1 x 127	16.000	$0.05 \times D_f^2$ $D_f: 0.7\text{~}7\text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> 構造用ケーブル材料規格 ASTM A586-1976 <p>ストラットロードに比べ弾性係数が大きく、伸びが小さい。 切削荷重が高い。</p> <p>(TLPやOTEC等構造物の係留索に使用される)</p>
			C型 D型 E型 F型	16.000	$0.058 \times D_f^2$ $D_f: 0.7\text{~}7\text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> 構造用ケーブル材料規格 <p>同上</p>
P.W.S.	<p>正六角形 变形六角形</p>	正六角形	19 ~ 217	20.000	$0.1537 \times n$ $n: 本数$	<ul style="list-style-type: none"> 弹性係数が大きく、伸びが小さい。 切削荷重が高い。 <p>(TLPやOTEC等の構造物の係留索に適する)</p>
		变形六角形	24 ~ 200			
	PC鋼線	<p>保護管 PC 鋼材 グラウト</p>	19 ~ 421	20.500	—	なし
						同上

(付) ワイヤロープの特性

i) ワイヤロープの切断荷重について

ワイヤロープの切断荷重は、各国の規格で定められているが、同構成のロープでも必ずしも同一ではない。各種ロープの規格切断荷重の例を表 6.3.2～6 に示す。

ii) ワイヤロープの伸びについて^{1) 2)}

ワイヤロープの荷重一伸び曲線の代表的なモデルを図 6.3.1 に示す。

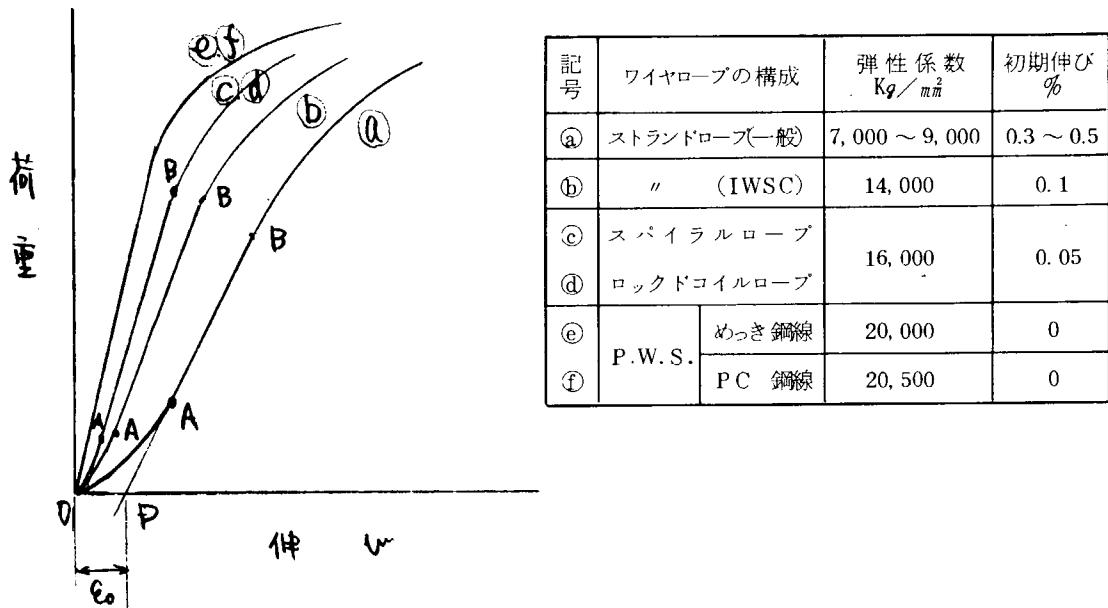


図 6.3.1 ワイヤロープの荷重一伸び曲線

P.W.S. のように擦りのないケーブルでは一般の鋼材と同様に最初から直線的に伸びが増加するが、ストランドロープやスパイラルロープ、ロックドコイルロープでは直線域(A点)に達するまでの間で伸びの大部分がある。この部分は、ロープの構造上の伸びが発生するもので、このOA間の領域は第1種剛性領域とも言われる。またこの領域の伸びは、直線域(AB間)と区別して初期伸び ϵ_0 (OD間で示す) として示される。この初期伸びの大小はロープの伸びの大小に大きく影響する。このモデルに示されるようにストランドロープは弾性係数が小さいと共に初期伸びが大きくなるため全体の伸びが非常に大きくなる。ただしこのモデルに示した荷重一伸び曲線はロープの使用初期のものであり、ストランドロープやスパイラルロープ、ロックドコイルロープでは使用がすすめば伸び特性が変化し弾性係数が大きくなり、初期伸びが減少するのも特徴である。

付表 4 4号 6×24ロープの切断荷重

ロープの径 mm	より方	切断荷重				(参考) 単位質量 kg/m	
		普通		A 種	B 種		
		C 種	t				
8	2.97	29.13	3.21	31.48	0.212	0.212	
9	3.75	36.78	4.06	39.82	0.269	0.269	
10	4.64	45.50	5.02	49.23	0.332	0.332	
11.2	5.82	57.08	6.29	61.68	0.416	0.416	
(12)	(6.68)	(65.51)	(7.22)	(70.80)	(0.478)	(0.478)	
12.5	7.25	71.10	7.84	76.88	0.519	0.519	
14	9.69	89.14	9.83	96.40	0.651	0.651	
16	11.9	116.7	12.8	125.5	0.850	0.850	
18	15.0	147.1	16.2	158.9	1.08	1.08	
20	18.5	181.4	20.1	197.1	1.33	1.33	
22.4	23.3	228.5	25.2	247.1	1.67	1.67	
(24)	(26.7)	(291.8)	—	(1.93)	(1.93)	(1.93)	
25	29.0	284.4	31.3	(307.0)	2.08	(2.08)	
(26)	(31.4)	(307.9)	—	(2.24)	—	(2.24)	
28	36.4	(357.0)	39.3	(385.4)	2.60	(2.60)	
30	41.8	(409.9)	45.1	(442.3)	2.99	(2.99)	
31.5	46.0	(451.1)	49.8	(488.4)	3.29	(3.29)	
(32)	(47.5)	(445.8)	—	(3.40)	—	(3.40)	
33.5	52.1	(510.9)	56.3	(552.1)	3.73	(3.73)	
35.5	58.5	(573.7)	63.2	(619.8)	4.18	(4.18)	
37.5	65.2	(639.4)	70.5	(691.4)	4.67	(4.67)	
40	74.2	(727.7)	80.2	(786.5)	5.31	(5.31)	
42.5	83.8	(821.8)	90.6	(888.5)	6.00	(6.00)	
45	94.0	(921.8)	102	(1000)	6.72	(6.72)	
47.5	105	(1030)	113	(1108)	7.49	(7.49)	
50	117	(1147)	125	(1226)	8.30	(8.30)	
S3	130	(1275)	141	(1383)	9.33	(9.33)	
56	145	(1422)	157	(1540)	10.6	(10.6)	
60	167	(1638)	180	(1765)	12.0	(12.0)	
63	184	(1804)	199	(1982)	13.2	(13.2)	

■ 備考：かっこ以外のロープの径の適用が正しい。

付表 6 6号 6×37ロープの切断荷重

ロープの径 mm	より方	切断荷重				(参考) 単位質量 kg/m	
		普通		A 種	B 種		
		C 種	t				
8	2.97	29.13	3.21	31.48	0.212	0.212	
9	3.75	36.78	4.06	39.82	0.269	0.269	
10	4.64	45.50	5.02	49.23	0.332	0.332	
11.2	5.82	57.08	6.29	61.68	0.416	0.416	
(12)	(6.68)	(65.51)	(7.22)	(70.80)	(0.478)	(0.478)	
12.5	7.25	(71.10)	7.84	(76.88)	0.519	0.519	
14	9.69	(89.14)	9.83	(96.40)	0.651	0.651	
16	11.9	(116.7)	12.8	(125.5)	0.850	0.850	
18	15.0	(147.1)	16.2	(158.9)	1.08	1.08	
20	18.5	(181.4)	20.1	(197.1)	1.33	1.33	
22.4	23.3	(228.5)	25.2	(247.1)	1.67	1.67	
(24)	(26.7)	(291.8)	—	(1.93)	—	(1.93)	
25	29.0	(284.4)	31.3	(307.0)	2.08	(2.08)	
(26)	(31.4)	(307.9)	—	(2.24)	—	(2.24)	
28	36.4	(357.0)	39.3	(385.4)	2.60	(2.60)	
30	41.8	(409.9)	45.1	(442.3)	2.99	(2.99)	
31.5	46.0	(451.1)	49.8	(488.4)	3.29	(3.29)	
(32)	(47.5)	(445.8)	—	(3.40)	—	(3.40)	
33.5	52.1	(510.9)	56.3	(552.1)	3.73	(3.73)	
35.5	58.5	(573.7)	63.2	(619.8)	4.18	(4.18)	
37.5	65.2	(639.4)	70.5	(691.4)	4.67	(4.67)	
40	74.2	(727.7)	80.2	(786.5)	5.31	(5.31)	
42.5	83.8	(821.8)	90.6	(888.5)	6.00	(6.00)	
45	94.0	(921.8)	102	(1000)	6.72	(6.72)	
47.5	105	(1030)	113	(1108)	7.49	(7.49)	
50	117	(1147)	125	(1226)	8.30	(8.30)	
S3	130	(1275)	141	(1383)	9.33	(9.33)	
56	145	(1422)	157	(1540)	10.6	(10.6)	
60	167	(1638)	180	(1765)	12.0	(12.0)	
63	184	(1804)	199	(1982)	13.2	(13.2)	

■ 備考：かっこ以外のロープの径の適用が正しい。

6 x 19 CLASSIFICATION WIRE ROPE, BRIGHT (UNCOATED) OR DRAWN-GALVANIZED WIRE, INDEPENDENT WIRE-ROPE CORE
See pages 17, 18, and 19 for typical wire rope constructions.

Nominal Diameter	Approx. Mass	Nominal Strength								
		Improved Plow Steel		Extra Improved Plow Steel						
		in.	mm	lb/ft	kg/m	lb	kN	Metric Tonnes	lb	kN	Metric Tonnes
1/2	13	0.46	0.68	23,000	102	10.4	26,600	118	12.1	12.1
9/16	14.5	0.59	0.88	29,000	129	13.2	33,600	149	15.2	15.2
5/8	16	0.72	1.07	35,800	159	16.2	41,200	183	18.7	18.7
3/4	19	1.04	1.55	51,200	228	23.2	58,800	262	26.7	26.7
7/8	22	1.42	2.11	69,200	308	31.4	79,600	354	36.1	36.1
1	26	1.85	2.75	89,800	399	40.7	103,400	460	46.9	46.9
1 1/16	29	2.34	3.48	113,000	503	51.3	130,000	578	59.0	59.0
1 1/4	32	2.89	4.30	138,800	617	63.0	159,800	711	72.5	72.5
1 1/8	35	3.50	5.21	167,000	743	75.7	192,000	854	87.1	87.1
1 1/2	38	4.16	6.19	197,800	880	89.7	228,000	1010	103	103
1 3/4	42	4.88	7.26	230,000	1020	104	264,000	1170	120	120
1 7/16	45	5.67	8.44	266,000	1180	121	306,000	1360	139	139
1 15/16	48	6.50	9.67	304,000	1350	138	348,000	1550	158	158
2	51	7.39	11.0	344,000	1530	156	396,000	1760	180	180

表 6.3.2-(2) ストランドロープ

6 x 6 CLASSIFICATION WIRE ROPE, BRIGHT (UNCOATED) OR DRAWN-GALVANIZED WIRE, INDEPENDENT WIRE ROPE CORE
See pages 17, 18, and 19 for typical wire rope constructions.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nominal Diameter		Approx. Mass		Nominal Strength					
				Improved Plow Steel			Extra Improved Plow Steel		
in.	mm	lb/ft	kg/m	lb	kN	Metric Tonnes	lb	kN	Metric Tonnes
3½	90	22.7	33.8	966,000	4300	438	1,110,000	4940	503
3½	96	26.0	38.7	1,098,000	4880	498	1,264,000	5620	573
4	103	29.6	44.0	1,240,000	5520	562	1,426,000	6340	647
4½	109	33.3	49.6	1,388,000	6170	630	1,598,000	7110	725
4½	115	37.4	55.7	1,544,000	6870	700	1,776,000	7900	806
4¾	122	41.7	62.1	1,706,000	7590	774	1,962,000	8730	890
5	128	46.2	68.8	1,874,000	8340	850	2,156,000	9590	978

[構成: IWRC 6 x WS(61), 6 x FiS(73) etc.]

8 x 19 CLASSIFICATION WIRE ROPE, BRIGHT (UNCOATED) OR DRAWN-GALVANIZED WIRE, INDEPENDENT WIRE-ROPE CORE
See pages 17, 18, and 19 for typical wire rope constructions.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nominal Diameter		Approx. Mass		Nominal Strength					
				Improved Plow Steel			Extra Improved Plow Steel		
in.	mm	lb/ft	kg/m	lb	kN	Metric Tonnes	lb	kN	Metric Tonnes
½	13	0.47	0.70	20,200	89.9	9.16	23,400	104	10.6
¾	14.5	0.60	0.89	25,600	114	11.6	29,400	131	13.3
½	16	0.73	1.09	31,400	140	14.2	36,200	161	16.4
¾	19	1.06	1.58	45,000	200	20.4	51,800	230	23.5
¾	22	1.44	2.14	61,000	271	27.7	70,000	311	31.8
1	26	1.88	2.80	79,200	352	35.9	91,000	405	41.3
1½	29	2.39	3.56	99,600	443	45.2	114,600	507	51.7

[構成: IWRC 8 x S(19), 8 x W(19), 8 x Fi(21), 8 x Fi(25), 8 x WS(26), etc]

6 x 91 CLASSIFICATION WIRE ROPE, BRIGHT (UNCOATED) OR DRAWN-GALVANIZED WIRE, INDEPENDENT WIRE ROPE CORE
See pages 17, 18, and 19 for typical wire rope constructions.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nominal Diameter		Approx. Mass		Nominal Strength					
				Improved Plow Steel			Extra Improved Plow Steel		
in.	mm	lb/ft	kg/m	lb	kN	Metric Tonnes	lb	kN	Metric Tonnes
4	103	29.6	44.0	1,178,000	5240	534	1,354,000	6020	614
4½	109	33.3	49.6	1,320,000	5870	599	1,518,000	6750	689
4½	115	37.4	55.7	1,468,000	6530	666	1,688,000	7510	766
4½	122	41.7	62.1	1,620,000	7210	735	1,864,000	8290	845
5	128	46.2	68.8	1,782,000	7930	808	2,048,000	9110	929
5½	135	49.8	74.1	1,948,000	8670	884	2,240,000	9960	1020
5½	141	54.5	81.1	2,120,000	9430	962	2,438,000	10800	1110
5½	148	59.6	88.7	2,296,000	10200	1040	2,640,000	11700	1200
6	154	65.0	96.7	2,480,000	11000	1120	2,852,000	12700	1290

[構成: IWRC 6 x SeWS(91) 6 x SeFiS(103) etc.]

19 x 7 CONSTRUCTION WIRE ROPE, BRIGHT (UNCOATED) OR DRAWN-GALVANIZED WIRE, WIRE STRAND CORE
See pages 17, 18, and 19 for typical wire rope construction.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nominal Diameter		Approx. Mass		Nominal Strength					
				Improved Plow Steel			Extra Improved Plow Steel		
in.	mm	lb/ft	kg/m	lb	kN	Metric Tonnes	lb	kN	Metric Tonnes
½	13	0.45	0.67	19,700	87.6	8.94	21,600	96.1	9.80
¾	14.5	0.58	0.86	24,800	110	11.2	27,200	121	12.3
¾	16	0.71	1.06	30,600	136	13.9	33,600	149	15.2
¾	19	1.02	1.52	43,600	194	19.8	48,000	214	21.8
¾	22	1.39	2.07	59,000	262	26.8	65,000	289	29.5
1	26	1.82	2.71	76,600	341	34.7	84,400	375	38.3
1½	29	2.30	3.42	96,400	429	43.7	106,200	472	48.2
1½	32	2.84	4.23	118,400	527	53.7	130,200	579	59.1
1½	35	3.43	5.10	142,600	634	64.7	156,800	697	71.1
1½	38	4.08	6.07	168,800	751	76.6	185,600	826	84.2

構造用ケーブル材料規格(日本鋼構造協会規格)

付表2 7x19

ロープ の 径 の 径	最外層 素線径	標準 断面積	切 断 荷 重 tf (kN)		(参考) 単位 重量	
			A 級			
			1 種	2 種		
28	1.88	374	49.7 (487.3)	53.0 (519.8)	3.10	
30	2.00	429	57.1 (559.0)	60.9 (597.2)	3.56	
32	2.14	488	64.9 (536.5)	69.2 (678.6)	4.05	
34	2.27	551				

表6.3.3 スパイラルロープの切断荷重

ASTM A586-1976

A 586

TABLE 3 Properties of Zinc-Coated Steel Structural Strand

Nominal Diameter, in.	Minimum Breaking Strength in Tons of 2000 lb						Approx Nominal Diameter, in.	Approximate Minimum Breaking Strength in Metric Tons						
	Class A Coating			Class A Coating				Class A Coating			Class A Coating			
	Inner Wires	Outer Wires	Gross Metallic Area, in. ²	Inner Wires	Outer Wires	Gross Metallic Area, in. ²		Inner Wires	Outer Wires	Gross Metallic Area, in. ²	Inner Wires	Outer Wires	Gross Metallic Area, in. ²	
1/8	15.0	14.5	14.2	0.150	0.52	12.7	13.6	13.2	12.9	96.8	0.77			
1/8	19.0	18.4	18.0	0.190	0.66	14.3	17.2	16.3	17.2	122.6	0.98			
1/8	24.0	23.3	22.8	0.234	0.82	15.9	21.8	21.1	20.7	151.0	1.2			
1/8	29.0	28.1	27.5	0.284	0.99	17.5	26.3	25.5	25.0	183.2	1.5			
1/8	34.0	33.0	32.3	0.338	1.18	19.1	30.8	29.9	29.3	218.1	1.8			
1/8	40.0	38.8	38.0	0.396	1.39	20.6	36.3	35.2	34.5	255.5	2.1			
1/8	46.0	44.6	43.7	0.459	1.61	22.2	41.7	40.5	39.6	296.1	2.4			
1/8	54.0	52.4	51.3	0.527	1.85	23.8	49.0	47.5	46.5	340.0	2.8			
1	61.0	59.2	57.9	0.600	2.10	25.4	55.3	53.7	52.5	387.1	3.1			
1/8	69.0	66.9	65.5	0.677	2.37	27.0	62.6	60.7	59.4	436.8	3.5			
1/8	78.0	75.7	74.1	0.759	2.66	28.6	70.8	68.7	67.2	489.7	4.0			
1/8	86.0	83.4	81.7	0.846	2.96	30.2	78.0	75.7	74.1	545.8	4.4			
1/8	96.0	94.1	92.2	0.938	3.28	31.8	87.1	85.4	83.6	605.6	4.9			
1/8	106.0	104.0	102.0	1.03	3.62	33.3	96.2	94.4	92.5	644.5	5.4			
1/8	116.0	114.0	111.0	1.13	3.97	34.9	103.2	100.7	99.7	729.0	5.9			
1/8	126.0	123.0	121.0	1.24	4.34	36.5	114.3	111.8	109.8	800.0	6.5			
1/8	138.0	135.0	132.0	1.35	4.73	38.1	125.2	122.5	119.8	871.0	7.0			
1/8	150.0	147.0	144.0	1.47	5.13	39.7	136.1	133.4	130.6	948.4	7.6			
1/8	162.0	159.0	155.0	1.55	5.55	41.3	147.0	144.2	140.6	1025.8	8.3			
1/8	176.0	172.0	169.0	1.71	5.98	42.9	159.7	156.0	153.3	1103.2	8.9			
1/8	188.0	184.0	180.0	1.84	6.43	44.5	170.6	166.9	163.3	1187.1	9.6			
1/8	202.0	198.0	194.0	1.97	6.90	46.0	183.3	179.6	176.0	1271.0	10.3			
1/8	216.0	212.0	207.0	2.11	7.39	47.6	196.9	192.3	187.8	1361.3	11.0			
1/8	230.0	226.0	221.0	2.25	7.89	49.2	208.7	205.0	200.5	1451.6	11.7			
2	245.0	241.0	238.0	2.40	8.40	50.8	222.3	218.6	215.9	1548.4	12.5			
2	261.0	257.0	251.0	2.55	8.94	51.1	236.8	233.2	229.5	1645.2	13.3			
2	277.0	273.0	269.0	2.71	9.49	54.0	251.3	247.7	244.0	1748.4	14.1			
2	293.0	289.0	284.0	2.87	10.05	55.6	265.8	262.2	257.6	1851.6	15.0			
2	310.0	305.0	301.0	3.04	10.64	57.2	281.2	276.7	273.1	1961.3	15.8			
2	327.0	322.0	317.0	3.21	11.24	58.7	296.7	292.0	287.6	2071.0	16.7			
2	344.0	339.0	334.0	3.38	11.85	60.3	312.1	307.5	302.0	2180.7	17.6			
2	360.0	355.0	349.0	3.55	12.48	61.9	326.6	322.1	316.6	2301.2	18.6			
2	376.0	370.0	365.0	3.75	13.13	63.5	341.1	335.7	331.1	2419.4	19.5			
2	392.0	386.0	380.0	3.94	13.80	65.1	355.6	350.2	344.7	2541.9	20.5			
2	417.0	411.0	404.0	4.13	14.47	66.7	378.3	372.9	366.5	2664.5	21.5			
2	432.0	425.0	419.0	4.33	15.16	68.3	391.9	385.6	380.1	2793.6	22.6			
2	448.0	445.0	438.0	4.54	15.88	69.9	410.1	403.7	397.4	2929.0	23.6			
2	464.0	456.0	450.0	4.76	16.46	71.0	448.2	440.9	434.5	3100.0	25.8			
3	538.0	530.0	522.0	5.40	18.90	76.2	488.1	480.8	473.6	1481.9	28.1			
3	584.0	575.0	566.0	5.86	20.51	79.4	529.8	513.5	508.7	3180.7	30.5			
3	625.0	616.0	606.0	6.34	22.18	82.6	567.0	558.8	549.8	4090.3	33.0			
3	673.0	663.0	651.0	6.83	23.92	85.7	610.5	601.5	592.4	4406.5	35.6			
3	724.0	714.0	702.0	7.35	25.73	88.7	656.8	647.7	636.8	4742.0	38.3			
3	768.0	757.0	745.0	7.88	27.60	92.01	696.7	686.7	675.9	5083.9	41.1			
3	832.0	810.0	797.0	8.43	29.50	95.3	745.7	734.8	723.0	5348.7	43.9			
3	878.0	858.0	835.0	9.00	31.50	98.4	796.5	784.7	772.9	5506.5	46.9			
4	925.0	911.0	897.0	9.60	33.60	101.6	839.2	826.5	813.7	6193.6	50.0			

付表2 1×37

ロープ最外周標準絞合面積 A 級 切断荷重 f (kN) (参考)

mm	mm	mm	mm	A 級			B 級			kg/m
				1種	2種	1種	2種	1種	2種	
20	2.86	240	324.6	35.3	32.3	34.5	1.96	63.2	138	1

表 6.3.4 ロックドコイルロープの切断荷重

構造用ケーブル材料規格

C形			
ロープの径 mm	標準断面積 mm ²	切 断 荷 重 tf (kN)	(参考)単位重量 kg/m
34	804	104 (1020)	6.71
36	898	116 (1138)	7.50
38	999	129 (1265)	8.34
40	1110	135 (1324)	9.26
42	1220	149 (1461)	10.2
44	1340	164 (1608)	11.2
46	1460	179 (1755)	12.2
48	1580	195 (1912)	13.2
50	1710	211 (2069)	14.3
52	1840	228 (2236)	15.4
54	1980	245 (2403)	16.5

E形			
ロープの径 mm	標準断面積 mm ²	切 断 荷 重 tf (kN)	(参考)単位重量 kg/m
78	4250	504 (4943)	35.4
80	4460	530 (5198)	37.2
82	4680	557 (5462)	39.0
84	4980	584 (5727)	40.9
86	5130	613 (6011)	42.8
88	5360	641 (6286)	44.7
90	5610	672 (6590)	46.8
92	5850	701 (6874)	48.3
94	6100	732 (7178)	50.9
96	6360	764 (7492)	53.1
98	6610	795 (7796)	55.2
100	6870	827 (8110)	57.3

D形			
ロープの径 mm	標準断面積 mm ²	切 断 荷 重 tf (kN)	(参考)単位重量 kg/m
56	2200	260 (2550)	18.3
58	2350	279 (2736)	19.6
60	2510	299 (2932)	20.9
62	2670	318 (3119)	22.3
64	2840	340 (3334)	23.7
66	3000	359 (3521)	25.0
68	3190	383 (3756)	26.6
70	3380	406 (3981)	28.2
72	3570	430 (4217)	29.8
74	3760	453 (4442)	31.4
76	3960	479 (4697)	33.1

F形			
ロープの径 mm	標準断面積 mm ²	切 断 荷 重 tf (kN)	(参考)単位重量 kg/m
92	5960	692 (6786)	49.7
94	6210	722 (7080)	51.8
96	6470	753 (7384)	54.0
98	6740	785 (7698)	56.2
100	7000	817 (8012)	58.4

表 6.3.4 P.W.S. の切断荷重

(亜鉛めつき鋼線(5φ)を用いたもの)

構造用ケーブル材料規格

正六角形

素線構成 本数	構成記号	断面の形状 及び寸法 mm	断面積 mm ²	切 断 荷 重 tf (kN)	単位重量 kg/m
19	P.W.S.-19		373	58.5 (573.7)	2.92
37	P.W.S.-37		727	144 (1118)	5.69
61	P.W.S.-61		1200	188 (1844)	9.38
91	P.W.S.-91		1790	280 (2746)	14.0
127	P.W.S.-127		2490	391 (3834)	19.5

変形六角形

素線構成 本数	構成記号	断面の形状 及び寸法 mm	断面積 mm ²	切 断 荷 重 tf (kN)	単位重量 kg/m
24	P.W.S.-24		471	73.9 (724.7)	3.69
30	P.W.S.-30		589	92.4 (906.1)	4.61
44	P.W.S.-44		864	135 (1324)	6.76
52	P.W.S.-52		1020	160 (1569)	7.99
70	P.W.S.-70		1370	215 (2108)	10.8
80	P.W.S.-80		1570	246 (2412)	12.3
102	P.W.S.-102		2000	314 (3099)	15.7
114	P.W.S.-114		2240	351 (3442)	17.5

表 6.3.6 PC鋼線を用いた平行線ストランド

2)
の切断荷重

素 線 本 数	PE管 外 径 (mm)	標準断面積 (mm ²)	切 断 荷 重 (t)	単位重量 (kg/m)	
				PC鋼線 のみ	(グラウト 充てん後)
37	87	1424	234	11.2	18.8
55	110	2116	349	16.6	29.2
61	110	2347	387	18.4	30.6
73	110	2809	463	22.0	33.8
85	125	3271	539	25.7	40.9
91	125	3502	577	27.5	42.1
109	125	4194	692	32.9	46.3
121	125	4656	768	36.5	51.3
127	140	4887	806	38.4	55.8
151	140	5810	958	45.6	61.6
163	140	6272	1035	49.2	64.2
187	160	7196	1187	56.5	79.8
199	160	7658	1263	60.1	82.1
211	160	8119	1339	63.7	84.7
223	160	8581	1416	67.3	87.0
241	180	9274	1530	72.8	99.1
253	180	9735	1606	76.4	102
265	180	10197	1682	80.0	105
283	180	10890	1797	85.5	109
301	180	11580	1911	90.9	113
313	180	12044	1987	94.5	116
349	200	13430	2216	105.4	134
367	200	14122	2330	110.8	139
379	225	14584	2406	114.5	155
421	225	16200	2673	127.1	165

(2) 繊維索

ロープ材料としての合成繊維には、ナイロン、ポリエステル（テトロン）、ポリビニル、アルコール（ビニロン）、ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリ塩化ビニル、ポリ塩化ビニリデン、芳香族ポリアミド繊維（ケブラー）などがある。ロープ材料にはこれらの合成繊維のほかにガラス繊維、炭素繊維も用いられる。表6.3.7にこれらの繊維の物性を示す。ここでは表6.3.7に示す材料から成るロープをまとめて繊維索と呼び、合成繊維より成るロープをとくに合成繊維索と呼ぶ。

ケブラー、ガラス繊維、炭素繊維は高い強度を持っているのであるが、これらの繊維は燃ったときはアイスブライスなどの端末加工により著しく強度が低下する。この低い定着性能のため、これらの繊維はまだ十分活用されておらず、これまでに観測用パイの係留索やアンテナのステイとして若干使用されているのみである。

ケブラロープを除く合成繊維索を強度の高いものから順に並べると、ナイロンロープ、ポリエステルロープ、ポリプロピレンロープと続く。係船索には、これらのナイロンロープ、ポリエステルロープ、ポリプロピレンロープが使用され、そのほかのロープはほとんど用いられない。

ナイロンは係船索として最も良く用いられる繊維で、その強度はポリエステルやポリプロピレンより大きいが、湿潤状態において収縮し、強度が低下する。耐摩耗性は大である。

ポリエステルはナイロンより強度が低いが、湿潤状態にあっても強度の低下がない。またナイロンに比べて低弾性である（硬い）ため係船索にはナイロンほど利用されていない。

ポリプロピレンはナイロンやポリエステルより強度がかなり低く耐摩耗性も低い。しかし湿潤状態にあっても収縮せず、比重が小さく、安価であるなどの利点がある。

表6.3.7 繊維の物性
(13)、(15)、(17)、(18)

繊 維		乾 強 度 (kgf/mm ²)	破断時の伸び (%)	弾 性 率 (kgf/mm ²)	湿強度/乾強度 (%)	比 重
種 類	商品名					
ポリアミド系繊維	ナイロン	62～84	18.0	80～600	85	1.14
ポリビニルアルコール系繊維	クレモナ	51～59	11.0～14.0	300～2900	82～84	1.30
ポリエステル系繊維	テトロン	47～102	10.0～18.0	310～2000	100	1.38
ポリエチレン系繊維	ハイゼックス	51～54	15.0	300～850	100	0.96
	カネライト	54	16.0		100	0.96
ポリプロピレン系繊維	パイレン	45～57	20.0～22.0	160～1000	100	0.91
	チップリプロ	22	14.0		100	0.91
	ダンライン	48	15.0		100	0.91
	リーレン	28	9.6		100	0.91
ポリ塩化ビニル系繊維	デビロン	23	22.0		100	1.39
	エンビロン	19～21	20.0～22.0		100	1.37
ポリ塩化ビニリデン系繊維	サラン	16	20.0	40～200	100	1.7
	クレハロン	16	22.0		100	1.7
芳香族ポリアミド系繊維	ケブラー	282	4.0	7900	100	1.44
ガラス繊維		200～350	3.5	7400	100	2.55
炭素繊維	(PAN)	200～350	2.0～3.0	20000～38000		1.75～1.95

(1) 繊維索の構造

i) 3つ打ロープ、8つ打ロープ

合成繊維ロープの製造工程は、まず繊維を撚ったヤーン（糸）を作り、そのヤーンをさらに撚ったストランドを作り、このストランドを撚って、撚りロープを、あるいは、ストランドを互いに編んで編組ロープを作る。

撚りロープには、ストランドの本数により、3つ打ロープ、4つ打ロープ、6つ打ロープ、9つ打ロープがあるが、通常製造使用されているのは、3つ打ロープである。図6.3.2(a)にこの3つ打ロープを示す。

編組ロープには、同様にストランドの本数により8つ打ロープ、12打ロープ、16打ロープ、24打ロープなどがある。この内、通常使用されるのは8つ打ロープである。図6.3.2(b)にその8つ打ロープを示す。

上記の3つ打ちロープや8つ打ちロープに用いる繊維はナイロン、ビニロン、テトロンのほか、ポリエチレン系、ポリプロピレン系繊維である。ケルバーやガラス繊維を撚ると繊維強度が低下（撚り減り）するので、3つ打ちロープや8つ打ちロープにはケルバーやガラス繊維は使われない。

現在、係船索の大部分は8つ打ロープであり、3つ打ちロープの占める割合は極く小さい。これは、3つ打ちロープが形崩れしやすい、キンクを生じやすい、荷重により回転するなどの欠点があるのに對し、8つ打ちロープにはキンクや形崩れが生じず、荷重によりロープが回転することもないなどの長所があることによる。なお、この係船索に對しては、ロープの強度や伸び剛性等の性能を向上させたつきのダブルブレードロープ（2重打ちロープ）の使用がしだいに多くなってきた。

ii) ダブルブレードロープ

ダブルブレードロープの構造は2層から成っており、内層にはゆるく撚られたストランドを編組した芯ロープがあり、これを多数のストランドを編組したロープが包んでいるというものである。

図6.3.2(c)にこれを示す。

このようなロープ構造により、その強度や伸び剛性が、同一材料および同一径の3つ打ち、8つ打ちロープのそれに比べて、ともに約30%向上している。また、内層と外層の繊維種類を変え、それぞれの繊維の長所を活用したロープを作ることができる。

現在、ダブルブレードロープには、ナイロン（外層）—ナイロン（内層）、バイレン—バイレン、テトロン—テトロン、テトロン—ナイロン、ナイロン—バイレンの5種類のロープが製造されている。

iii) 特殊ロープ

図6.3.2(c)に特殊ロープの一例を示す。ロープを構成するストランドは、繊維を撚らずに引揃え、これをシース（ポリエチレンまたはナイロン）で被覆したものである。このストランドを編組して8つ打ちロープとする。

また、引揃えた繊維に樹脂を含浸させ、同様にシーズで被覆したストランドを用いて、3つ打ち、4つ打ちの撚りロープまたは8つ打ち、12打ちの編組ロープを作る場合もある。

これらのロープは使用条件に合わせて個々に設計・製作される。繊維材料にはナイロン、テトロン、ケブラー、ガラス繊維が用いられる。



(a) 3つ打ちロープ



(b) 8つ打ちロープ



(c) 繊維索の機械的性質

ロープの強度は、ロープ構造、ストランド数などのロープサイズ、ヤーンやストランドの撚りなどによって変わる。またナイロンとビニロンではロープが乾燥状態にあるか湿潤状態にあるかによってもその強度が変化する。^{8), 10)}さらにロープ強度は疲労、摩耗、端末加工により大きな影響を受ける。

i) ロープの強度と重量

まず、新しいロープの強度と重量を示す。3つ打ちロープおよび8つ打ちロープの乾燥状態の強度と重量は表6.3.8に示すように日本工業規格(JIS L-2703～L-2706)で規定されている。ロープ重量の許容差は3つ打ちロープで±5%、8つ打ちロープで±7%内で、ロープの引張強度は表6.3.8に示す値以上でなければならないとされている。

ナイロンおよびビニロンロープは湿潤状態では収縮し、強度が低下する。その低下はナイロン3つ打ちおよび8つ打ちロープで破断強度の5～19%、ビニロンロープで15～25%である。その他の繊維では収縮や強度低下がみられない。水中でのロープ重量は次式より求める。

$$W_c = W \left(1 - \frac{1}{r} \right)$$

ここに、 W_c は水中でのロープ重量、 W は乾燥状態のロープ重量、 r は比重である。

ダブルブレードロープについては日本工業規格はないので、その乾燥状態の強度と重量をメーカー カタログより拾い表6.3.9に掲げる。^{13), 14)}湿潤状態ではナイロンロープで約15%、テトロンやポリプロピレン系ロープでは強度低下はない。水中でのロープ重量については、上と同様の方法で求め る。そのとき用いる各ロープの比重を表6.3.10に示す。

特殊ロープは新しいタイプのロープであり、また使用条件にあわせて個々に設計製作されているためその資料は少い。表6.3.11にテトロン繊維を用いた樹脂被覆ストランド(樹脂の含浸なし)・8つ打ちロープの重量と強度を示す。また表6.3.12にケブラーやガラス繊維を用いたロープ設計例のロープ構造、重量、強度を示す。

表6.3.8 合成繊維索JIS規格付表(抜粋)

太さ (直径) mm	ナイロンロープ				ポリエチレンロープ				ビニロンロープ		ポリプロピレンロープ				3つ打ち 8つ打ち	
	重量／200m		引張り強さ		重量／200m		引張り強さ		重量／200m	引張り強さ	重量／200m		引張り強さ		重量／200m	引張り強さ
	3つ打ち	8つ打ち	3つ打ち 8つ打ち	3つ打ち	8つ打ち	1級	2級	3つ打ち 8つ打ち	3つ打ち 8つ打ち	マルチフィラメントロープ	モノフィラメントロープ	紡績糸ロープ	マルチフィラメントロープ	モノフィラメントおよび紡績糸ロープ	t	t
4	1.97	—	0.33	1.66	—	0.18	0.15	2.01	0.15	1.58	1.58	1.52	0.21	0.18	—	—
5	3.08	—	0.50	2.60	—	0.27	0.22	3.13	0.23	2.48	2.48	2.38	0.31	0.27	—	—
6	4.43	4.46	0.71	3.71	3.64	0.38	0.31	4.50	0.33	3.56	3.56	3.42	0.44	0.38	—	—
7	6.03	6.21	0.94	5.03	4.93	0.51	0.43	6.18	0.43	4.85	4.85	4.66	0.58	0.51	—	—
8	7.86	8.10	1.21	6.60	6.47	0.65	0.53	7.96	0.56	6.34	6.34	6.08	0.75	0.65	—	—
9	9.94	10.2	1.51	8.34	8.17	0.81	0.66	10.0	0.70	8.02	8.02	7.70	0.93	0.81	—	—
10	12.3	12.7	1.85	10.3	10.1	0.99	0.81	12.4	0.95	9.90	9.90	9.50	1.13	0.99	—	—
11	14.8	15.2	2.21	12.4	12.2	1.18	0.95	14.9	1.13	12.0	12.0	11.5	1.35	1.18	—	—
12	17.7	18.2	2.80	14.8	14.5	1.42	1.12	17.8	1.37	14.3	14.4	13.0	1.66	1.44	—	—
14	24.0	24.7	3.73	20.1	19.7	1.90	1.49	24.2	1.83	19.0	19.4	17.8	2.21	1.92	—	—
16	31.3	32.2	4.78	26.3	25.8	2.43	1.91	31.5	2.34	25.0	25.1	23.2	2.83	2.47	—	—
18	39.7	40.9	5.94	33.3	32.6	3.03	2.38	39.8	2.92	31.5	32.0	30.5	3.52	3.07	—	—
20	48.9	50.4	7.23	41.1	40.3	3.68	2.89	49.0	3.55	39.0	39.5	37.0	4.29	3.73	—	—
22	59.2	61.0	8.63	49.8	48.8	4.40	3.45	59.2	4.24	47.5	48.0	45.0	5.12	4.46	—	—
24	70.4	72.5	10.2	59.2	58.1	5.17	4.06	70.4	4.98	56.5	56.7	53.0	6.02	5.24	—	—
26	82.6	85.1	11.8	69.5	68.1	6.00	4.71	82.5	5.78	66.0	67.2	62.0	6.98	6.08	—	—
28	95.8	98.7	13.5	80.6	79.0	6.88	5.41	95.6	6.64	77.0	77.3	71.0	8.02	6.98	—	—
30	109	112	15.4	92.5	90.7	7.83	6.15	109	7.55	87.5	88.5	82.0	9.11	7.94	—	—
32	125	129	17.3	105	103	8.82	6.93	124	8.51	100	101	94.0	10.3	8.95	—	—
34	141	145	19.4	119	117	9.88	7.76	140	9.53	113	114	104	11.5	10.0	—	—
35	149	153	20.5	126	123	10.4	8.19	148	10.1	119	121	110	12.1	10.6	—	—
36	158	162	21.6	133	130	11.0	8.63	157	10.6	126	128	117	12.8	11.1	—	—
38	176	181	23.9	148	145	12.1	9.55	175	11.7	141	143	131	14.1	12.3	—	—
40	195	201	26.3	164	161	13.4	10.50	194	12.9	156	158	144	15.6	13.6	—	—
42	215	221	28.7	181	177	14.6	11.5	213	14.1	171	175	158	17.0	14.8	—	—
45	246	253	32.7	208	204	16.6	13.1	245	16.0	196	200	180	19.4	16.9	—	—
50	304	313	39.8	257	252	20.2	15.9	302	19.5	243	248	221	23.6	20.5	—	—
55	368	379	47.5	310	304	24.2	19.0	355	23.3	293	299	272	28.1	24.5	—	—
60	438	451	55.8	370	363	28.4	22.3	433	27.4	349	356	320	33.1	28.8	—	—
65	513	528	64.8	434	425	33.0	25.9	508	31.8	410	418	376	38.4	33.4	—	—
70	596	614	74.3	501	491	37.8	29.7	589	36.5	476	485	439	44.1	38.4	—	—
75	683	703	84.5	577	565	43.0	33.8	675	41.5	546	557	506	50.1	43.6	—	—
80	777	800	95.3	657	644	48.5	38.1	767	46.8	621	634	575	56.5	49.2	—	—
85	874	900	107	744	729	54.3	42.7	866	52.4	701	715	645	63.2	55.1	—	—
90	980	1.009	119	834	818	60.4	47.5	973	58.2	786	802	725	70.3	61.3	—	—
95	1.092	1.125	131	930	911	66.8	52.5	1.081	64.4	875	893	809	77.8	67.7	—	—
100	1.210	1.246	144	1.030	1.009	73.5	57.7	1.200	70.8	970	990	893	85.5	74.5	—	—

表 6.3.9 ダブルブレードロープ重量・強度

直 径 mm	周 径 inch	(ナイロン—ナイロン)		(ナイレンマルチ—ナイレンマルチ)		(テトロン—テトロン)		(テトロン—ナイロン)		(ナイロン—ナイレンマルチ)	
		重量/200m kg	引張り強さ t	重量/200m kg	引張り強さ t	重量/200m kg	引張り強さ t	重量/200m kg	引張り強さ t	重量/200m kg	引張り強さ t
10	1 1/4	12.6	2.65	10.4	1.61	16.2	1.70	15.2	2.82	11.9	2.05
12	1 3/4	19.0	3.92	15.6	2.39	24.5	2.52	21.9	3.99	17.9	2.89
14	1 3/4	25.5	5.16	20.8	3.12	32.7	3.31	29.8	5.35	24.0	3.88
16	2	31.9	6.38	26.1	3.86	43.8	4.37	38.9	6.90	30.0	5.00
18	2 1/4	41.6	8.21	31.4	4.73	54.8	5.42	49.2	8.62	37.8	6.25
20	2 1/4	51.3	9.99	41.9	6.07	65.9	6.44	60.8	10.5	48.2	7.64
22	2 3/4	64.2	12.4	47.3	6.93	82.5	7.99	73.6	12.6	57.9	9.15
24	3	70.7	13.6	57.9	8.22	99.2	9.52	87.6	14.9	66.5	10.8
26	3 1/4	83.7	15.9	68.5	9.66	116	11.1	103	17.3	78.5	12.6
28	3 1/4	103	19.5	79.2	11.0	132	12.5	119	20.0	94.5	14.5
30	3 3/4	116	21.9	89.8	12.5	150	14.0	137	22.8	107	16.5
32	4	129	24.1	106	14.6	174	16.3	156	25.7	122	18.7
34	4 1/4	149	27.6	116	16.0	192	17.7	176	28.9	137	20.9
36	4 1/4	169	31.1	133	18.2	217	20.2	197	32.2	156	23.3
38	4 1/4	182	33.4	148	20.2	242	22.2	219	35.7	171	25.9
40	5	208	38.0	165	23.3	267	24.3	243	39.3	193	28.5
42	5 1/4	227	41.3	181	25.4	292	26.5	268	43.1	211	31.3
45	5 1/4	261	46.9	208	29.0	335	30.1	308	49.2	243	35.7
50	6 1/4	320	57.0	257	35.3	420	37.4	380	60.1	299	43.6
55	6 1/4	386	68.2	310	42.4	504	44.5	460	72.0	359	52.2
60	7 1/4	459	80.3	370	50.0	607	53.1	547	85.0	430	61.6
65	8	538	93.5	429	58.4	708	61.5	642	98.9	501	71.7
70	8 1/4	624	107	505	67.5	819	70.6	745	114	584	82.5
75	9 1/4	723	124	577	76.3	939	80.4	855	130	673	94.1
80	9 1/4	824	140	658	86.6	1,067	90.8	973	147	767	106
85	10 1/4	924	156	739	96.8	1,205	102	1,098	165	861	119
90	11 1/4	1,037	175	837	109	1,359	114	1,231	184	970	133
95	11 3/4	1,157	194	920	120	1,522	127	1,372	204	1,075	147
100	12 1/4	1,279	215	1,028	132	1,676	139	1,520	224	1,195	163

表 6.3.10 ダブルブレードロープの比重

ロープ	(ナイロン—ナイロン)	(ナイレンマルチ—ナイレンマルチ)	(テトロン—テトロン)	(テトロン—ナイロン)	(ナイロン—ナイレンマルチ)
比 重	1.14	0.91	1.38	1.27	1.16

表 6.3.1.1 テトロン樹脂被覆ストランド 8 つ打ちロープの重量、強度¹³⁾

ロープ直径	重 量	引 張り 強 さ	引 張り 強 さ 相 当 ワイ ローブ 径
18	kg/200m 46.0	3.10 t	6 × 24 G/O 8
23	62.1	6.21	6 × 24 G/O 11.2
30	95.3	9.32	6 × 24 G/O 14
33	113	12.3	6 × 24 G/O 16
35	125	15.5	6 × 24 G/O 18
38	140	18.5	6 × 24 G/O 20
40	155	21.7	6 × 24 G/O —
43	169	24.8	6 × 24 G/O 22
47	186	27.9	6 × 24 G/O 24
48	203	31.0	6 × 24 G/O —

表 6.3.1.2 ケブラー、ガラス繊維を用いた各種ロープ^{13)、16)}

繊 維	ロープ径 (mm)	ロープ構造	樹脂含浸	重 量 (%)	強 度 (t)
ケブラー	9	8 つ打ち	なし		2.8
ケブラー	22	8 つ打ち	あり	0.314	14.2
ケブラー	36	8 つ打ち	あり		56
ケブラー	90	トリプルブレイド	なし	6.8 (1.72)	227
ガラス繊維	20	1 × 7	あり	0.345	8.2
ガラス繊維	22	8 つ打ち	あり	0.330	9.62
ガラス繊維	55	パラレル	あり		104.5

() 水中の値を示す。

ii) 荷重一伸び関係

新しい合成繊維索では荷重により、弾性伸びとともに大きな構造伸びが生ずる。またくり返し載荷により履歴曲線を描き、各くり返し毎に残留ひずみが生ずる。

図 6.3.3 にナイロン 3 つ打ちロープの荷重一伸び関係を示し、図 6.3.4 に破断強度の 75 % までの載荷および除荷のくり返しによるナイロン 3 つ打ちロープの履歴曲線を示す。またナイロンロープについて 3 つのロープ構造の荷重一変形曲線を比較すると、3 つ打ちロープ、8 つ打ちロープ、ダブルブレードロープの順に全体伸びが少くなる。これは、上記の順に構造伸びが小さくなることによる。

つぎに各種の構造のナイロン、ポリエチレン、ポリビロビレンロープ(乾燥状態の新しいもの)について破断時の伸びを比較すると、メーク試験より表 6.3.1.3 に示すようになる。

なお、特殊ロープでは構造伸びは非常に小さい。

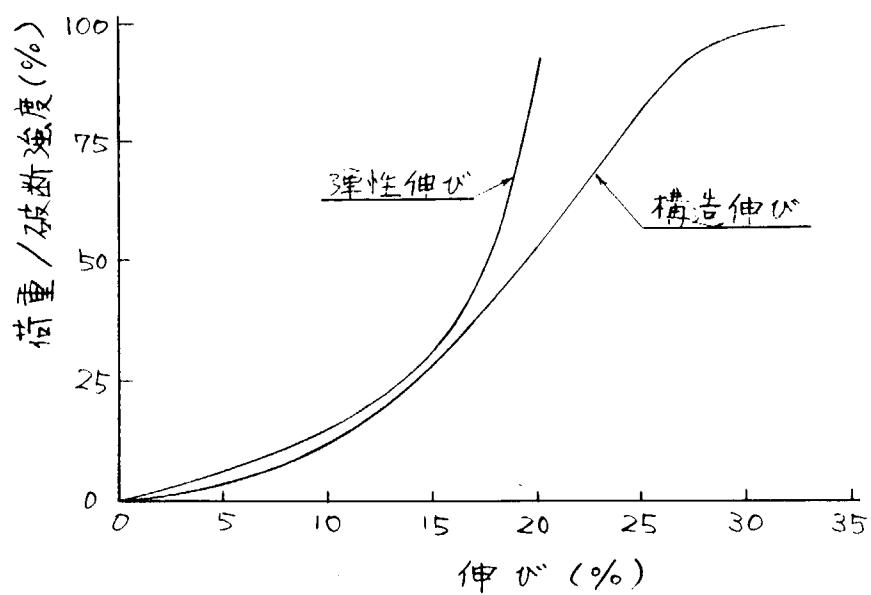


図 6.3.3 ナイロン 3 つ打ちロープの荷重ー伸び関係

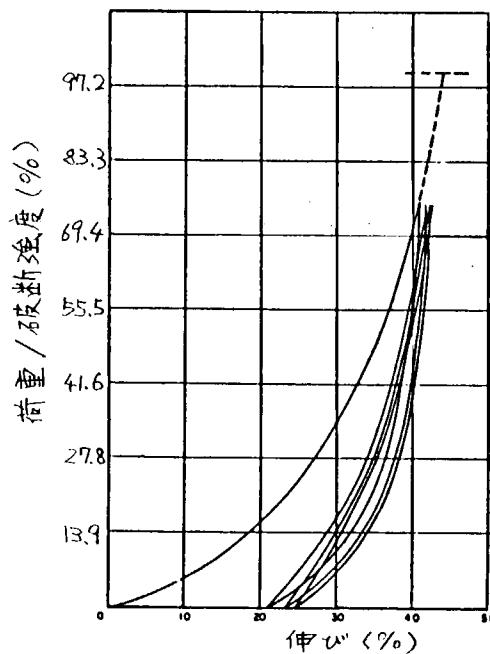


図 6.3.4 7.6 mm φ ナイロン 3 つ打ちロープの履歴曲線

表 6.3.1.3 各種ロープの破断時の伸び(%)

繊維構造	ナイロン	ポリエステル	ポリプロピレン
3つ打ち 8つ打ち	50 ~ 52	31	30 ~ 48
ダブルブレード	34	26	30

6.3.1.2 電気通信・構造共用ケーブル

電気通信・構造共用ケーブル (Electro-Mechanical Cable, E-Mケーブルといふ) は構造用としての係留索と共に電気通信用ケーブルとしての役目を有しているもので、構造用ケーブルの中に銅線等の伝導体が含まれている。

E-Mケーブルの構造は (1)伝導体 (2)絶縁体 (3)緊張部材 (4)被覆材からなっており、その用途に応じて図6.3.5の様に緊張部材が外部にあるもの、あるいは内部にあるものなどがある。¹⁹⁾

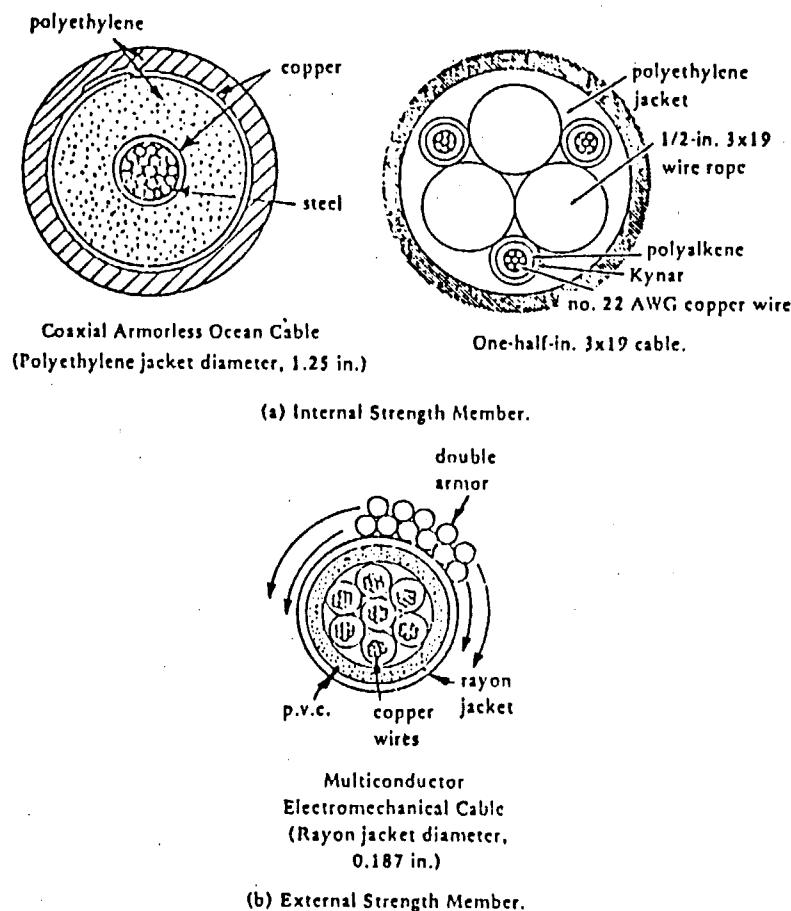


図 6.3.5 E-Mケーブルの構造

E-M ケーブルとして要求される主な特性は

- (1) 軽量であること。
- (2) 防食性の良いこと。
- (3) 架設時あるいは緊張時にケーブルが自転しないこと。
- (4) 生物付着等がないこと。

などであるが、これらの特性を満たすために用いられる各部の材料は次のようなものが挙げられる。

(1) 伝導体

伝導体としてはコストが安く、伝導性の良い銅線が最もよく使用される。

(2) 絶縁体

絶縁材料としては、ポリエステル、テフロン等が一般的である。

(3) 緊張部材

緊張部材としては、めっき銅線を捻り合わせたものあるいはケブラー等の合成繊維が用いられる。

E-M ケーブルの緊張部材の特性としては、引張強度が高いことはもちろんのこと、伸び特性の違いによる伝導体への過荷重を避けるため弾性係数が高いことが要求される。

i) 鋼線

通常、めっき鋼線を何層かに捻り合わせたものが用いられるが、深海用など長尺で使用される場合にはケーブル自体の自転によってキンクを発生する危険性もあるので、緊張部材には非自転ロープを使用する必要がある。非自転ロープとしては、3 または 4 ストランドロープやヘルクレスロープ等多層よりロープなどがある。

ii) 繊維索

E-M ケーブルとしての繊維索には、引張強度の高い、弾性係数の高い材料としてケブラーやグラスファイバー等が使用される。

種々の繊維索の特徴については、6.3.1.1 項で述べたとおりである。

(4) 被覆材

被覆材としては、海水中でのケーブルの防食及び摩耗からの保護の他、ケーブルの海中重量をより小さくするような材料がのぞましく、ポリエチレンやネオプレンなどがよく用いられる。

なお、被覆材料の特性等については、次項 6.3.2 で詳しく述べることにする。

6.3.2 素のコーティング

係留索としてのワイヤロープの防食対策としては構成素線に溶融亜鉛めっき施しさらにロープグリスを十分に塗布する方法が最も一般的である。

しかしながら、このような方法では海中で長期的に使用することは難しく数年でワイヤロープを交換する必要がある。したがって海中で長期的に使用するためにはワイヤロープにプラスチック被覆を施すか、プラスチックのテープを巻きつけるか、あるいはワイヤロープをプラスチックのパイプの中に入れて保護するなどの方法を講じる必要がある。ワイヤロープにプラスチックを被覆する方法は既に開発されており、海中の構造部の一物で実用されている。また、現在アメリカで計画されているガイドタワー式の石油生産プラットフォームの係留索(5"のスピアラルロープ)²⁰⁾の外周に、ポリエチレン被覆することが決定しているとの情報もある。実験的には図 6.3.6 に示すようなケーブルが製作され約 20 年の使用も可としている。

このケーブルはロックドコイルロープ(下層の丸線のすき間にはポリプロピレンが充てんされている。)の上にポリウレタンを被覆したものである。

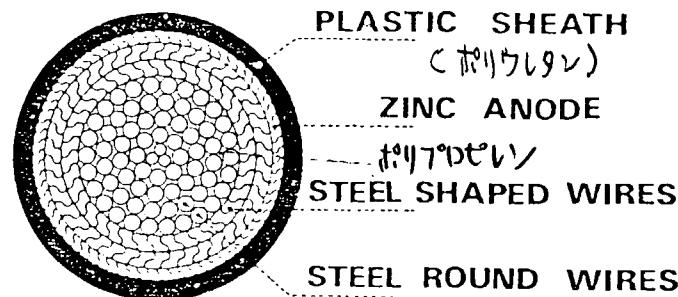


図 6.3.6 ワイヤロープのコーティングの例

ワイヤロープへの被覆材として用いられる主なプラスチック材料とその諸特性を表 6.3.14 に示す。^{21) 22)}
被覆材としてはコスト、吸水率等の面ではポリエチレンがすぐれています。⁶⁾ 耐摩耗性や強度面ではナイロンが最もすぐれていると言える。

ワイヤロープをプラスチックのパイプの内部に入れて保護する方法は、P C 鋼線をポリエチレンパイプに通しケーブルとパイプのすき間にセメントミルク等をグラウトしたいわゆるHiAm ケーブルとして、斜張橋など陸上の構造物に使用されているが、²⁾ 係留索をはじめ海洋の構造物での使用実績はまだ報告されていない。しかし、グラウト材をセメントミルクからゴム系のものにかえることなどにより、TLP や OCTEC 等の構造物の係留索として十分に使用が可能と思われ、すでにその検討もすすめられている。

6.3.3 索端加工

(1) 鋼索の加工

ワイヤロープの端末加工の種類と特徴を表 6.3.15 に示す。^{1) 2) 3)}

係留索に用いられるワイヤロープの端末加工としては、鉄スリーブを使用したアイ形の圧縮加工とソケット加工が一般的である。また、これらの方法は陸上の用途でも最も多く使用されており、ワイヤロープを定着する方法としては最も安定した方法である。

細物のストランドロープでは、スプライス加工を施すこともあるが、スプライス加工は、加工による強度低下が他の加工に比べて大きく、かつバラツキが大きい(加工効率が 70 ~ 90 %)こと、またロープの自転により抜け出しを生じ易いなど欠点が多いため構造用のロープには適用できない。これに対し圧縮加工やソケット加工は、ほぼ 100 % の加工効率が得られ、強度が安定しているのが特徴である。

ソケット加工を海中で使用する場合、鋳込み材に亜鉛を使用するとこれが犠牲陽極となり海水に溶け出してしまうためソケットの鋳込み部をエポキシ樹脂で被覆するか、または鋳込み材をエポキシ樹脂やポリエステル樹脂等の合成樹脂による必要がある。⁶⁾

P C 鋼線の定着方法としては図 6.3.7 に示す HiAm アンカーが最も安定し強度が高い、この方法による定着は、エポキシ樹脂による接着力、鋼球のくさび効果および端部のヘッディングの 3 つからなり常温で鋳込まれるため熱影響による鋼線の静的強度および疲労強度の低下の問題もない。特に耐疲労性

表 6.3.14 鋼索の被覆に用いるプラスチック材料の特性

種類	ASTM 試験法	ポリエチレン		ポリ塩化ビニル (軟質)	ナイロン 1.2	ポリウレタン
		高密度	低密度			
比重	C 792	0.941 ~ 0.965	0.910 ~ 0.925	0.90 ~ 0.91	1.16 ~ 1.35	1.01 ~ 1.02
引張強さ (Kg/cm ²)	D 638、D 651	218 ~ 387	70 ~ 162	302 ~ 401	105 ~ 246	385 ~ 460
伸び (%)	D 638	15 ~ 100	90 ~ 650	250 ~ 700	200 ~ 450	180 ~ 285
引張弾性率 (Kg/cm ²)	D 747	5,624 ~ 10,545	1,100 ~ 2,461	9,139 ~ 14,060	—	13,000 ~ 13,600
圧縮強さ (Kg/cm ²)	D 695	1.6 9	—	598 ~ 703	63 ~ 120	—
曲げ強さ (Kg/cm ²)	D 790	9.8	—	—	—	—
衝撃強さ (ft-lb/in)	D 256	1.5 ~ 1.2	< 1.6	0.6 ~ 6.0	可塑剤の型と量による	10.3 ~ 30
熱膨張係数 (10 ⁻⁵ ℃)	D 696	1.1 ~ 1.3	1.6 ~ 1.8	1.1	7 ~ 25	1.2
耐熱性(連続) (℃)	—	1.2 1	1.0 0	1.35 ~ 1.60	66 ~ 79	—
熱変形温度 (℃)	D 648	6.0 ~ 8.2 (4.6 Kg/cm ²)	4.1 ~ 4.9 (4.6 Kg/cm ²)	9.9 ~ 11.0 (4.6 Kg/cm ²)	—	1.2 8 (4.62 Kg/cm ²)
吸水率 (24hr. 3.18mm厚) (%)	D 570	< 0.01	< 0.015	< 0.01	0.15 ~ 0.75	0.25
太陽光線の影響	—	ブラック必要	表面亀裂 (黒色と褐色以外)	ブラック必要	長期曝露にて暗色	わずかに退色
弱酸の影響	D 543	非常に耐える	耐える	非常に耐える	なし	耐える
強酸の影響	"	酸化性酸に徐々に 侵される	酸化性酸にて徐々に 侵される	酸化性酸にて徐々に 侵される	なし	侵される
弱アルカリの影響	"	非常に耐える	耐える	なし	なし	多少侵される
強アルカリの影響	"	"	非常に耐える	なし	なし	侵される

表6.3.15 鋼索の端末加工の方法

加工の種類	形 状	適用ロープ	加 工 の 方 法	特 徴	問 題 点
スライス加工		ストランドロープ	ストランドを編み込む。	・加工が容易である。 ・加工部が軽量になる。	・加工率が低くバラツキ大きい (70~90%)
圧縮加工		ストランドロープ アルミニウム	アルミニウム、または鋼製のスリーブ内にロープを通し外部から圧縮加工を施す。	・加工が容易である。 ・加工部が軽量である。 ・加工効率が高い(95~100%) Rig用(Pannant line等) として実績多い	・ストランドロープにしか適用できない。 ・アルミニウム製スリーブは海中では電食の問題あり。
ソケット加工		全ワイヤロープ	ソケット内のロープを素線にまでほぐし、洗浄、脱脂した後溶融金属(純亜鉛、亜鉛合金、ホワイトメタル等)またはボリエスチル、エポキシ樹脂等を導込み定着する。	・加工効率が高く、品質が最も安定している。 ・構造用としては最も実績多い	・海中での亜鉛の使用は犠牲陽極による溶け出しが発生する
Hi Am アンカー	図 6.3.7 参 照	PC鋼線	PC鋼線の端末にヘッディング加工を施し、さらにエポキシ樹脂、亜鉛粉末と共に鋼球を流し込んで定着するもの。	・PC鋼線の定着方法としては最も静的強度および疲労強度が高くなる。	・ストランドロープには適用できない。

についてはソケット部での断線が生じないのでケーブル自体の疲労強度を100%発揮できる点で注目されている。

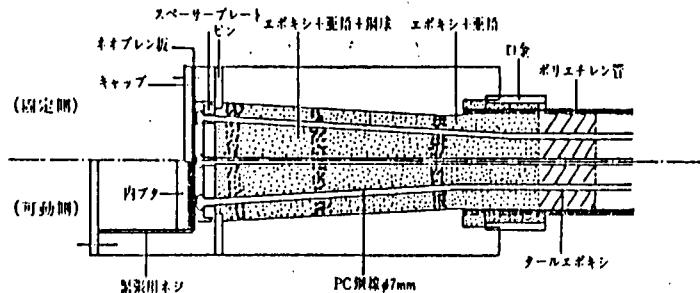


図 6.3.7 Hi Am アンカーの断面

(2) 繊維索の端末加工

繊維索の端末加工には、アイスプライス (eye splice)、ショートスプライス (short splice) ソケット止めがある。

アイスプライスはロープの先端を折り曲げ、その先端のストランドを元のロープの中に編み込むものである。多くの場合、アイ部にはシンプルをはめ込む。

ショートスプライスは2本のロープをつなぐもので、ロープの先端を相互に編み込むものである。大型のタンカーの係船索として、1本のロープの両端をショートスプライスによりつなぎ、両端にアイ部を持つ2重のロープとすることもある。

アイスプライスおよびショートスプライスの強度は通常ロープ自体の破壊強度の90~95%である。ただし、上記の係船索のように、アイ部では1本、平行部では2本のロープから成っている場合には、⁹⁾その強度は2本のロープの破壊強度に対し85%であるという実験結果が得られている(21" 周長ナイロンダブルブレードロープ、破壊強度600t)。

ソケット止めはソケットの中にロープを通してソケット内でストランドをばらすとともにエポキシ樹脂等により詰込むものである。この方法ではまだ安定した耐力が得られていない(50%程度)。

参考文献

- 1) ワイヤロープ便覧編集委員会編：「ワイヤロープ便覧」
- 2) 田中義人：「斜張橋ケーブルとアンカーについて」プレストレスコンクリート vol 20 №4 1978
- 3) 被鋼鋼線工業：「ワイヤロープ」(カタログ)
- 4) Acaster,S.M. : Anchor Lines in the North Sea OTC 1535(1972)
- 5) THYSSEN社：「Thyssen "BIGT" Wire Ropes for the offshore Petroleum Industry」(カタログ)
- 6) Ronson,K.T. : "Ropes for Deep Water Mooring" OTC 3850 (1980)
- 7) 金綱正夫：「テンションレグプラットフォームについて」第4回海洋工学シンポジウム講演集(1979)

- 8) Woehleke S.P., Flory J.F. and Sherrard J.R., : "Hawser System Design for Single-Point Moorings" Journal of Petroleum Technology. July 1979
- 9) Linehan, J., Ingamells, D. and Vodden, D.C., : Instrumentation of a 1000 ton Nylon Single Point Mooring Hawser" OTC 2210 (1975)
- 10) McKenna, H.A., and Wong, R.K. : "Synthetic Fiber Rope Properties Calculations relating to Mooring Systems" ASME Ocean Eng Div. 1979
- 11) 原 博正 : 「係船索の現状と今後の指針(その2)<係船用繊維索>」造船技術 1974年11月
- 12) Wilson, B.W. : "Elastic Characteristics of Moorings" Proc. ASCE. WW4. Nor. 1967
- 13) 東京製綱 : 「合成繊維ロープ」(カタログ)
- 14) 帝国産業 : 「タブラー規格」
- 15) デュポン・ファー・イースト日本支社 : 「高張力有機繊維 KEVLAR 29 アラミッドの特性並びに用途」
- 16) Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd and Mitsui & Co., Ltd. : 「Pendant Line Rope made with Kevlar」
- 17) 島村昭治 : 「高分子材料—主として構造材料について」日本機械学会誌 vol 76 № 661. Dec. (1979)
- 18) 大石不二夫 : 「高分子材料の活用技術」(日刊工業新聞) (1979)
- 19) Nordell, W.J. and Meggitt, J., : "Undersea Suspended Cable Structure" Proc. ACSE, ST6', June 1981
- 20) Falay, B., 他 : "Self-protected Long-life Deep Sea Mooring Cable" OTC 4052 (1981)
- 21) 伊藤公正編 : 「プラスチックデータハンドブック」(工業調査会)
- 22) 海外技術資料研究所編 : 「日本工業材料最適選択マニュアル」

6.4 ロープの耐久性

浮遊式構造物の係留には、チェーンが多く使用されているが、これまででは、水深300mまでの使用例が多い。実際、水深が増すと、チェーン重量の増大により、チェーンだけでは係留が困難になる。したがって、深海域では、ロープあるいはロープとチェーンとの複合ラインによる係留が重要になって来る。

そのために、ワイヤーロープおよび合成繊維ロープの耐久性について調査した。

6.4.1 ワイヤーロープの疲労特性

ワイヤーロープの引張疲労に関する文献を調査し、試験ワイヤーロープの仕様、試験条件、試験結果を付録表6.4.1にまとめた。同表をもとに、疲労寿命と振巾比（荷重振巾／切断荷重）、平均荷重（平均荷重／切断荷重）および最大荷重比（最大荷重／切断荷重）それぞれとの関係を試験ワイヤーロープ径別に分類して図6.4.1～6.4.3に示した。

これらいづれの図をみても、バラツキが大きく、ワイヤーロープの疲労特性を云々することは出来ない。たゞ、ロープ径別にみると、データ数の少ない100mm ϕ 以上のロープを除き、概してロープ径の大きい方が疲労特性は悪い。

付録表6.4.1には、初期断線が生じるまでの繰返し数が測定されているデータがあるので、これを振巾比、平均荷重比で整理してみると図6.4.4および図6.4.5のようになる。これらでみると、図6.4.1などより、データ数の少ないともあるが、比較的バラツキが少なく、△印で示した34mm ϕ のロックドコイルや●印で示したPWS（5mm ϕ —91本のParallel Wire Strand）にそれらの特徴がみられる。

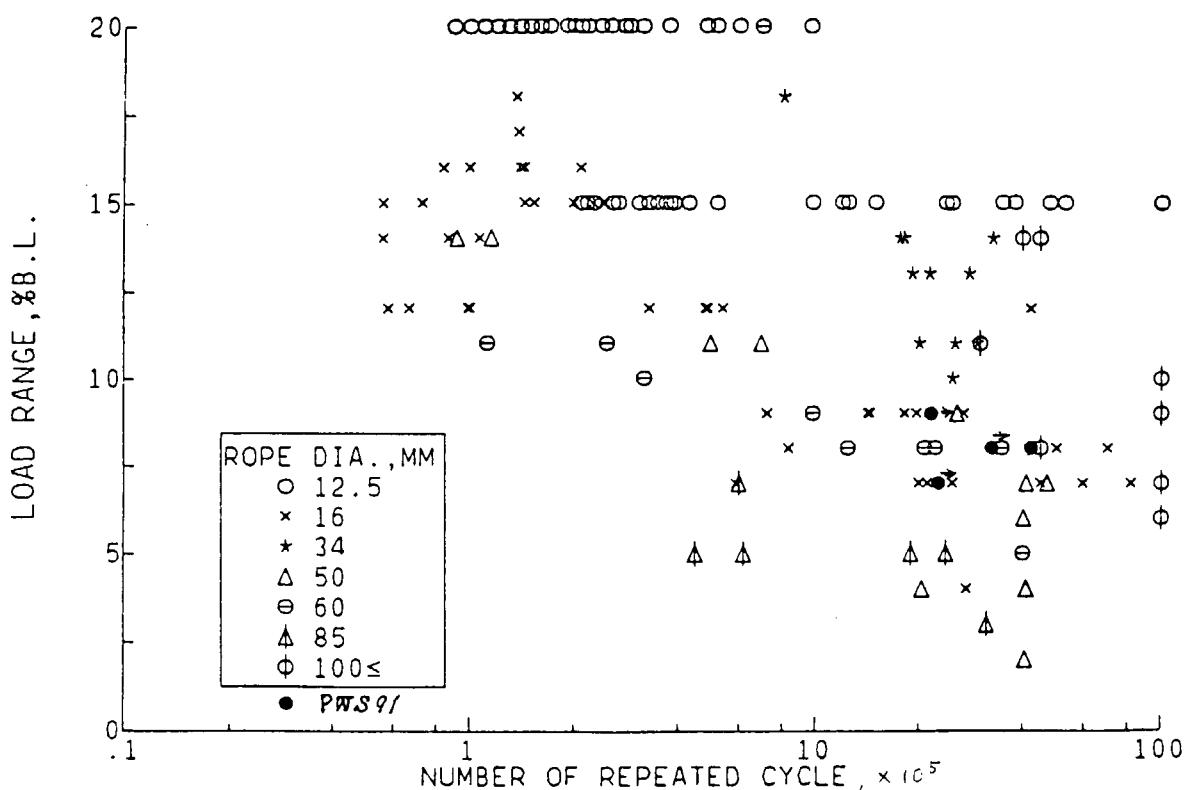


図6.4.1 振巾比と破断寿命との関係

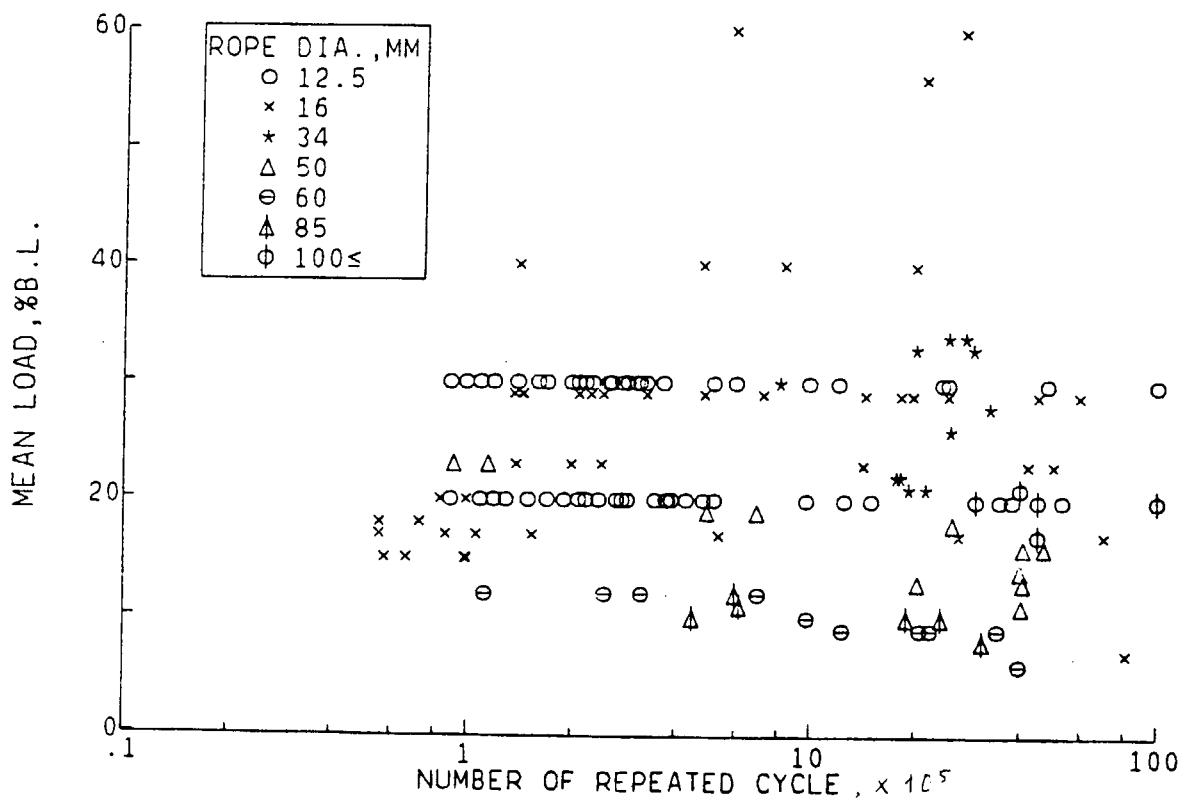


図 6.4.2 平均荷重比と破断寿命との関係

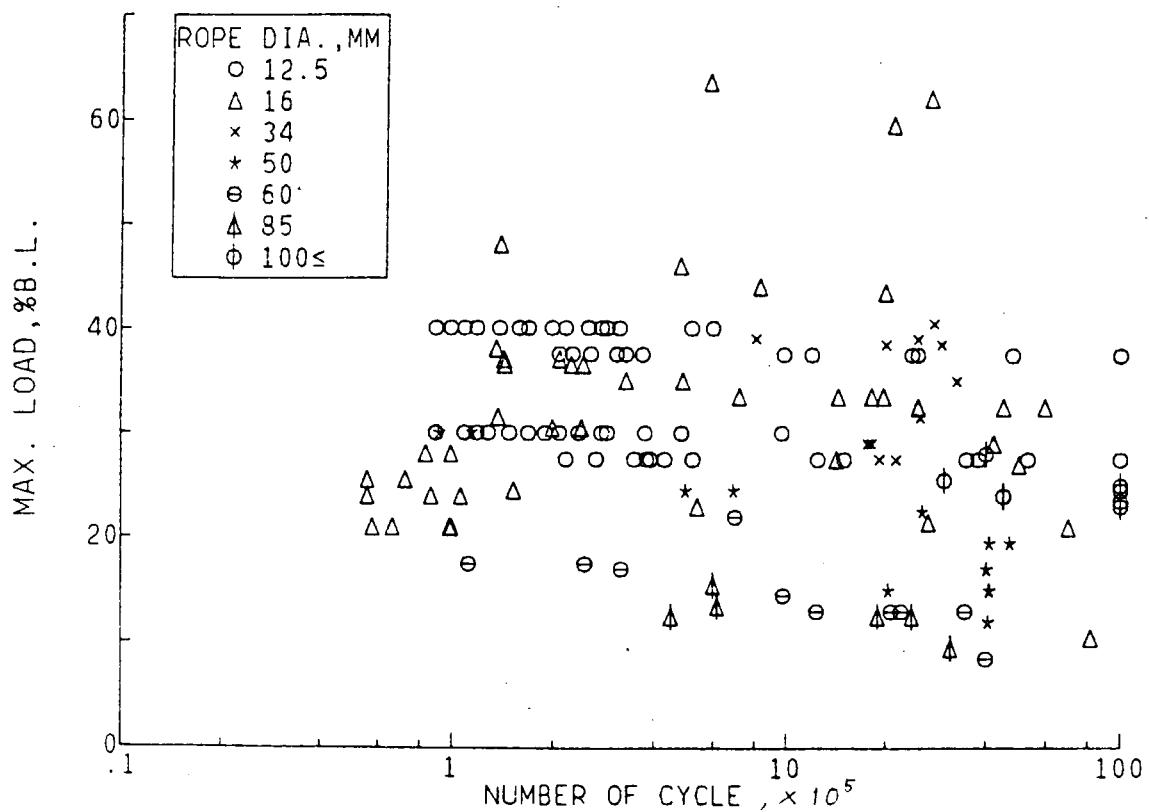


図 6.4.3 最大荷重比と破断寿命との関係

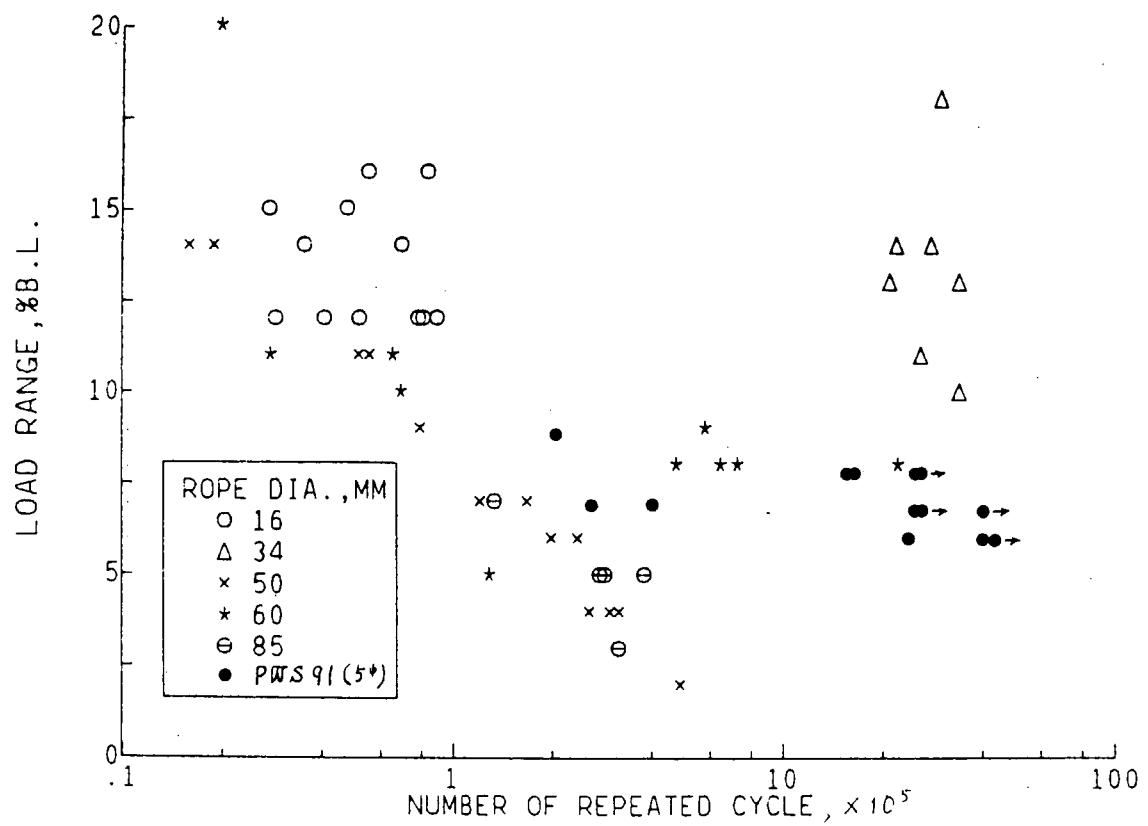


図 6.4.4 振巾比と初期断線の生じる繰返し数との関係

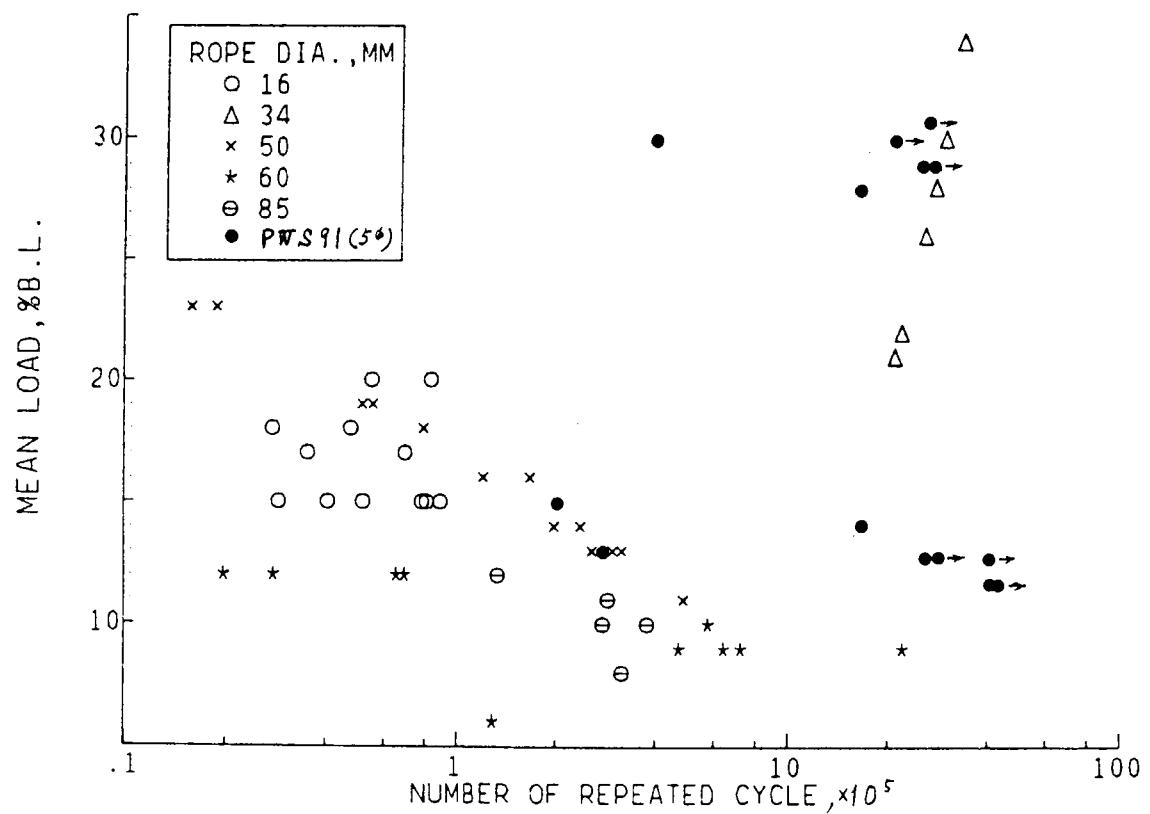


図 6.4.5 平均荷重比と初期断線の生じる繰返し数との関係

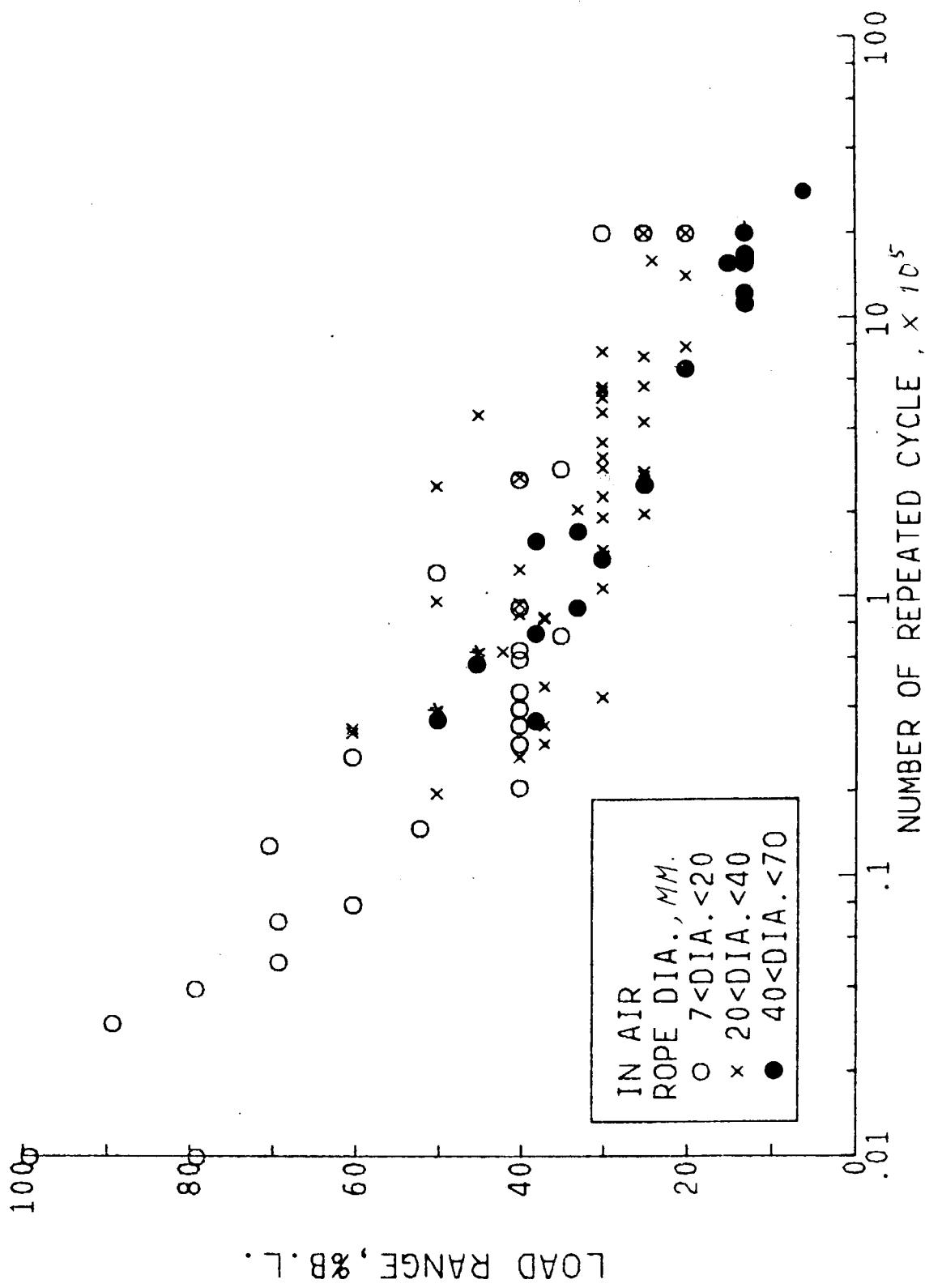


図 6.4.6. 振巾比と破断寿命との関係

また、表 6.4.2 に示した各種ワイヤーロープの疲労データを図示すると図 6.4.6 のようになる。同図は U.S.S. (United States Steel Co) 1 社のデータで、一見、図 6.4.1 よりバラツキが小さいように見えるけれども、バラツキは、振巾比にして約 20 % の巾があり、図 6.4.1 と同程度である。

ワイヤーロープの疲労データがブラック要因を考察してみる。ワイヤーロープを疲労試験すると、ワイヤーロープを構成する素線の断線は、例えば、図 6.4.7 のように、進行し、断線数が漸次増加するので、ワイヤーロープが完全に破断するまで試験出来ない。³⁾付録表 6.4.1 の破断寿命をみても、断線率を明記されたデータもあるが、一般には、破断寿命の定義が不明である。図 6.4.7 から推測するに、断線率をいくらにするかによって、繰返し数にして数倍のバラツキが生じる。事実、先に示した図 6.4.4.、図 6.4.5 のバラツキが小さいのは、寿命の定義が明確なことによるものと考えることが出来る。そのために、まず破断寿命の定義を明確にする必要がある。定義は、上記のように断線率で示す方法もあるが、疲労試験中、非破壊的に、正確に断線を検出することがむつかしい。

¹⁾また、図 6.4.8 のように、疲労試験中、試験体の伸びを測定し、破断寿命を伸び率で定義するのも 1 つの方法と考えられる。

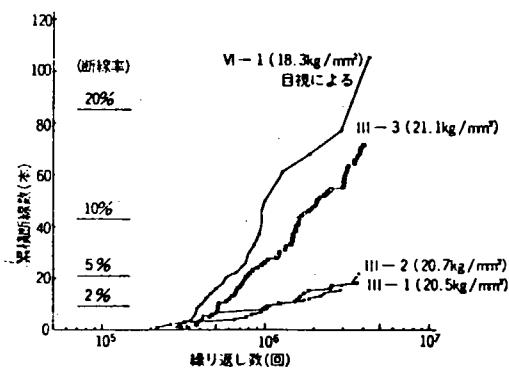


図 6.4.7 $\phi_{8.5}$ ワイヤーロープ疲労試験時の
素線破断状況

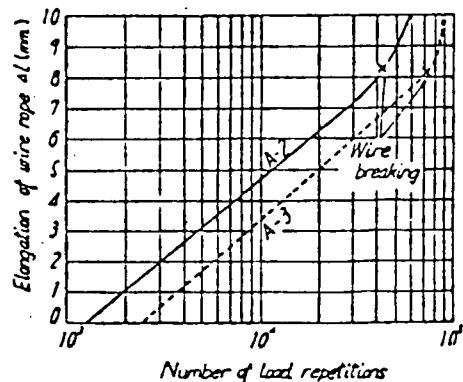


図 6.4.8 Relations between elongation and
cycles of load for filler type
(H.C.) wire rope

ワイヤーロープの疲労データのバラツキは、破断寿命の定義そのものにもとづくことを述べたが、さらに、ワイヤーロープ素線の破断状況をみると、ワイヤーロープの疲労試験中に、素線と素線がこすれ合い、その部分で破断が起っている。そのため、素線と素線との接触の仕方によって、破断寿命が変る。この事実に関連して、ワイヤーロープの疲労特性に影響する要因は多くある。これらは見方を変えれば、疲労データのバラツキの要因ともなるので、それらを次に列挙する。

(1) 試験方法にかかるもの

- (1) 破断寿命の定義、その測定法
- (2) 端末処理法（処理法によっては、端末部で破断する。）
- (3) 試験体の長さ
- (4) 繰返し速度

表 6. 4. 2

RESULTS OF AXIAL TENSION FATIGUE TESTS

Wire Rope Size & Construction	Load Range (% Cat.)	Cycles To Failure	Termin- ation Type	Wire Rope Size & Construction	Load Range (% Cat.)	Cycles To Failure	Termin- ation Type
5/16" 3x19 Torque-Balanced	50	123,000	S/B	7/8" 6x25 FW IWRC	50	20,000	Z
	40	263,000	S/B		50	250,000	Z
	35	287,000	S/B		50	97,000	Z
	30	2,000,000	S/B		40	269,000	Z
	25	2,000,000	S/B		40	126,000	Z
1/2" 3x19 Torque-Balanced	99	680	Z	1-3/8" 6x25 FW IWRC	37	84,000	Z
	89	3,319	Z		37	35,000	Z
	79	3,531	Z		37	30,000	Z
	79	1,222	S		37	48,000	Z
	69	7,432	S		30	290,000	Z
	69	5,080	Z		30	565,000	Z
	40	65,500	S		30	759,000	Z
	40	21,798	Z		30	44,000	Z
	40	46,000	S		30	108,000	Z
	40	30,000	Z		25	273,000	Z
7/8" 3x19 Torque-Balanced	40	40,000	Z		25	570,000	Z
	40	35,000	Z		25	425,000	Z
	40	30,000	Z		25	199,000	Z
	50	39,000	S		25	2,000,000	Z
	40	27,000	S		25	2,000,000	Z
	33	206,000	S		25	282,000	Z
	25	729,000	S		45	450,000	S
	20	2,000,000	S		30	520,000	Z
3/4" 3x46 Torque-Balanced	60	26,785	E		30	550,000	Z
	60	7,585	E		30	140,000	Z
	40	92,000	E		30	318,000	Z
	40	60,000	E		30	360,000	S
	20	2,000,000	E		30	193,000	S
1-1/2" 3x46 Torque-Balanced	42	63,736	Z	1-1/2" 6x25 FW IWRC	60	33,000	Z
	40	87,000	S		60	34,000	Z
	40	95,000	S		45	63,000	Z
	30	229,000	S		37	85,000	Z
	20	1,413,000	S		30	148,000	Z
1-3/4" 3x46 Torque-Balanced	20	789,000	S		30	460,000	Z
	50	40,000	S		24	1,600,000	Z
	33	171,265	Z		38	36,000	Z
	33	91,234	Z		38	36,000	Z
	30	143,000	S	2-1/4" 6x25 FW IWRC 2-11/16" 6x32 (2-Op.)	45	64,000	Z
3/4" 6x25 FW IWRC	25	251,000	S		13	1,696,000	Z
	20	657,000	S		13	1,157,000	Z
	15	1,564,000	S		13	1,183,000	Z
	70	13,000	Z		13	2,000,000	Z
	52	15,000	Z		13	2,000,000	Z
	35	73,000	Z		13	1,657,000	Z
					06	2,828,000	Z
					38	158,000	Z
					38	74,000	Z

S = Swaged Socket

Z = Zinc Socket

E = Epoxy Filled Zinc Socket

S/B = Swaged Socket with Boot

(2) ワイヤーロープにかかるもの

(イ) 素線の強度、疲労特性

(ロ) ワイヤーロープの構成、太さ

(ト) ワイヤーロープのより方、よる技術

(ナ) ワイヤーロープの芯材、オイルの種類

調査の不十分な事もあって、データが少なく、上記の要因について、ほとんど考察することは出来ないが、¹²⁾素線の引張疲労試験データの1例を図6.4.9に示す。同図は、ワイヤーメーカーの異なる5mmφ、亜鉛メッキ線の引張疲労のデータをまとめたものである。ワイヤーの引張強度がそれぞれ多少異なり、また、試験機の異なることもあるけれども、ワイヤー自身の疲労寿命も大きなバラツキのあることがわかる。ワイヤーロープの素線についても、大同小異と思われ、素線の疲労データがブラックと、それはワイヤーロープの疲労データにも影響するであろう。

同じ引張疲労でも、ワイヤーとワイヤーロープとでは、破断の機構が異なるので、両者を直接比較出来ないが、両者の関係をみると、図6.4.10のようになり、多少の関連みられ、やはり、素線の疲労特性のバラツキは、ワイヤーロープの疲労特性のバラツキとなる。

ワイヤーロープを実際に保留ラインとして使用するとき、ドラムやヘンディグシャー等によって、二次的な曲げ荷重が負荷される。図6.4.11¹³⁾に各種ワイヤーロープのU字曲げ強度の実験結果を示すが、曲げによって、著しく強度の低下することがわかる。CFRC 85mmφ(37+9×7+9×WS(36))ワイヤーロープについて、150ton、200tonの軸力を入れた後、スパン3000mmの中央部で、変位±15mmの振動を与え、ワイヤーロープの二次的な曲げ応力による疲労寿命を調べた実験がある。そのときの、曲

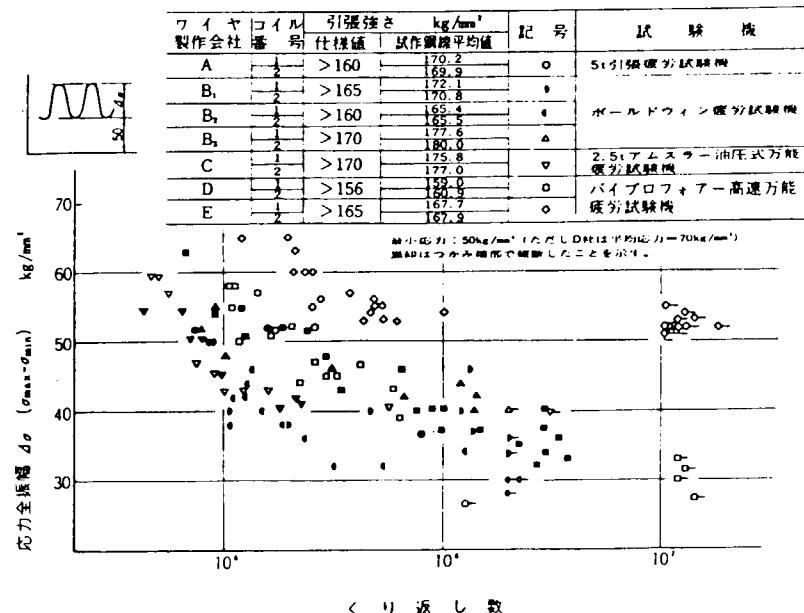


図6.4.9 ケーブルワイヤの部分片振引張疲労試験結果¹⁾

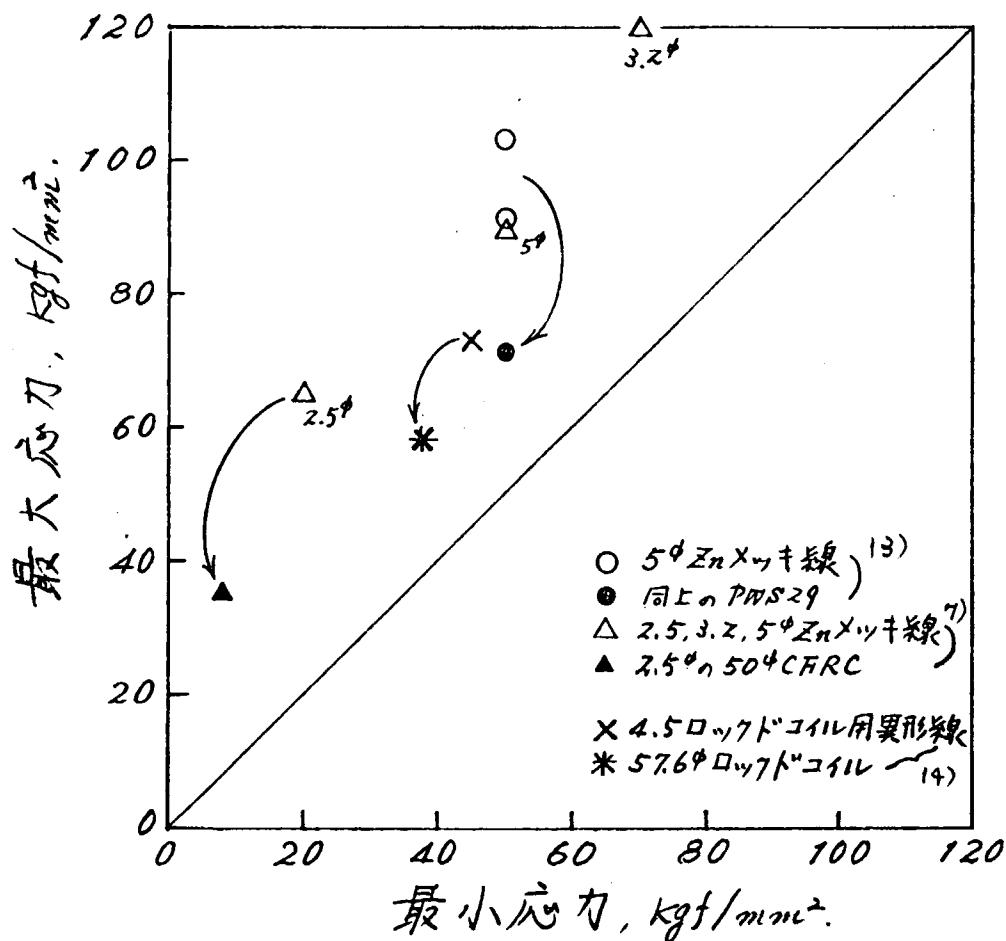


図 6.4.10 素線の引張疲労強度 (2×10^6 回) とワイヤーロープの引張疲労強度 (2×10^6 回) との関係

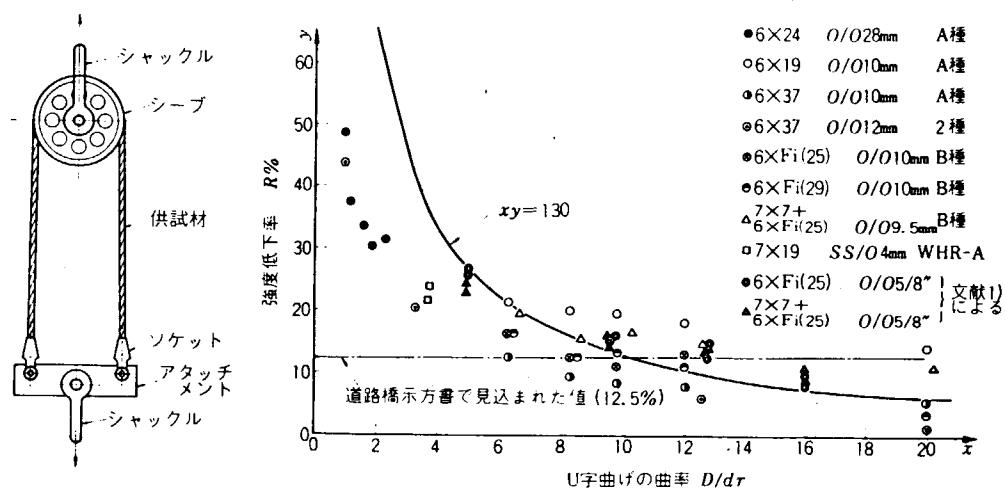


図 6.4.11 U字曲げ強度実験の結果

げ応力度の分布を図 6.4.1.2 に、結果を表 6.4.3 に示した。これからわかるように、曲げによって、局部的に大きな応力が生じ、早期に断線の起ることがわかる。

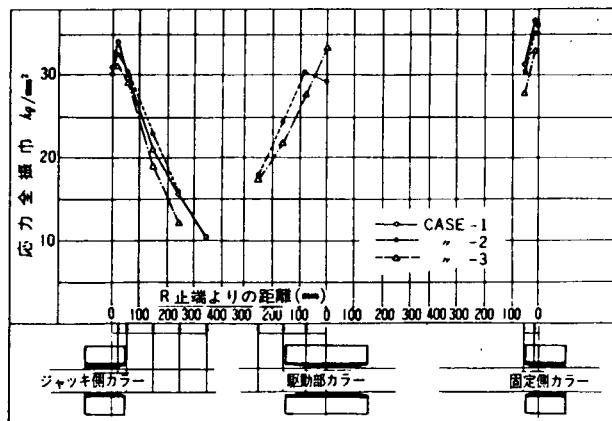


図 6.4.1.2 曲げ応力度の分布

表 6.4.3 疲労試験終了後の観察による断線数

試験条件	軸力 (t)	曲げ 変位 (mm)	カラー 材質	最終繰り返し 回数 (万回)	総断線 箇所数 (箇所)	終了状 況等
CFRC -1	200	15	亜鉛	50.4	545	
" -2	"	"	"	40.4	(652)	1ストランド
" -3	150	"	"	75.6	(488)	破断
" -4	"	"	"	60.1	498	
" -5	"	"	鉄	60.0	542	

注) () は一部調査不能箇所があったことを示す。

6.4.2 海水中におけるワイヤーロープの劣化

付録表 6.4.1 に一部、海水中で試験したデータがあるので、大気中と海水中とのデータを区別し、図 6.4.1.3 に示した。この図でみるとかぎり、両者の差はみとめられない。¹⁶⁾ 図 6.4.1.4 に示すワイヤーの試験結果をみると、海水中で著しく疲労強度の低下することがわかる。これは、鉄鋼材料一般についてよく知られていることである。¹⁷⁾ しかし、ワイヤーロープの海水中での疲労のデータはほとんどない。こゝでは、主としてワイヤーロープの海水中における腐食劣化について述べる。

亜鉛付着量の異なる 3.3 mm φ、5.2 mm φ のメッキ鋼線の海水浸漬試験による腐食減量を図 6.4.1.5 ¹⁸⁾ に示した。この結果をみると、浸漬 1 ヶ月を過ぎると、溶融メッキのもの (HD 51、HD 33) と電気メッキのもの (EG 51、52、53、EG 33) とで腐食減量に差が出て来る。12 ヶ月を過ぎ、亜鉛がなくなってしまったもの (EG 53) は、腐食が急増する。各鋼線の海水浸漬後の機械的性質および疲労限を図 6.4.1.6、¹⁹⁾ 1.7 に示す。これらの値も、12 ヶ月を過ぎると、急激に低下し、鋼線そのものが腐食損傷を受け始めたことがわかる。これらのデータでみるとかぎり、海水中で鋼線を裸使用することは危険と思われるし、亜鉛メッキしたものでも、1 年間程度が使用限度と思われる。

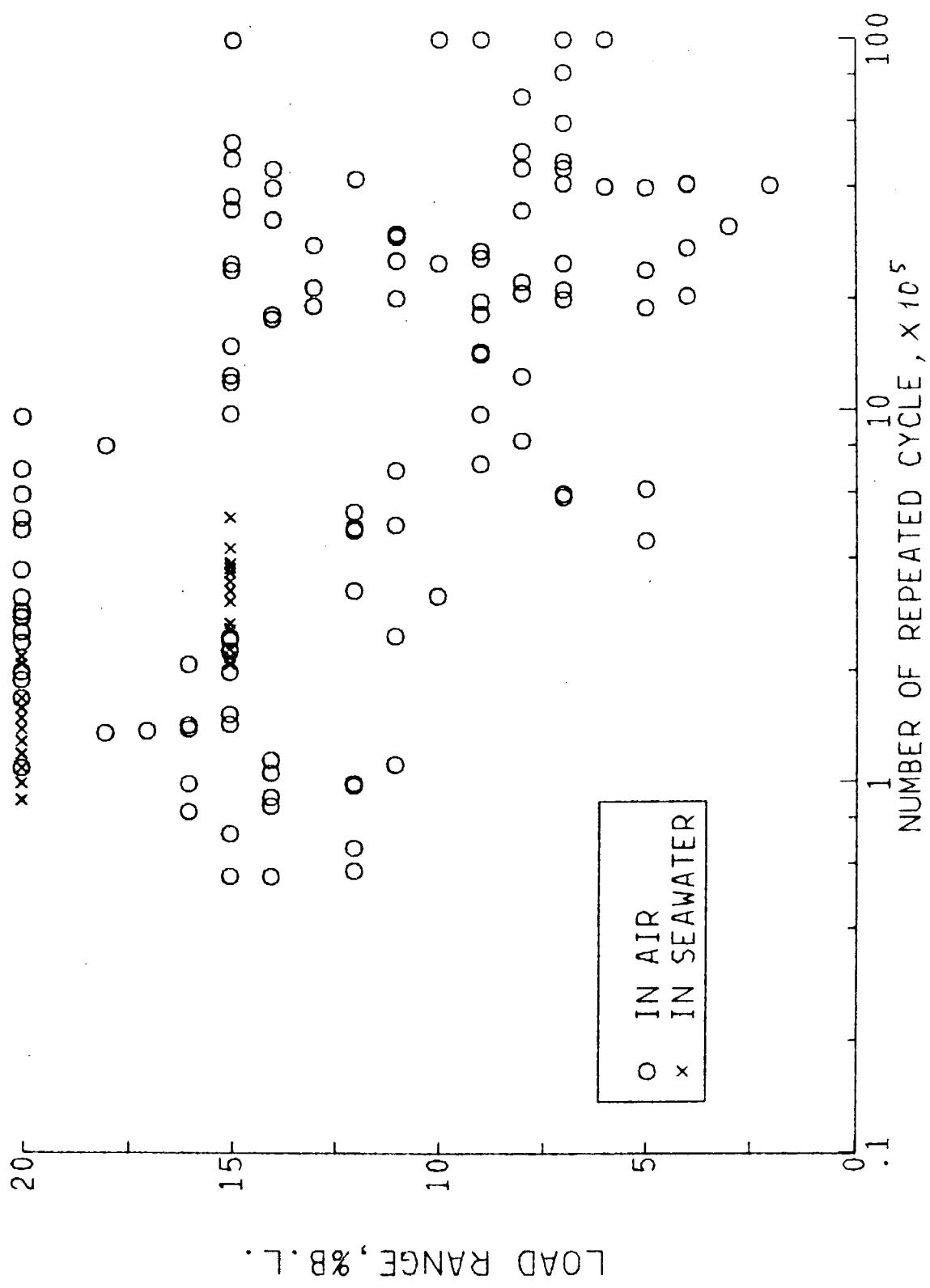


図 6.4.1.3 大気中と海水中とで区別した図

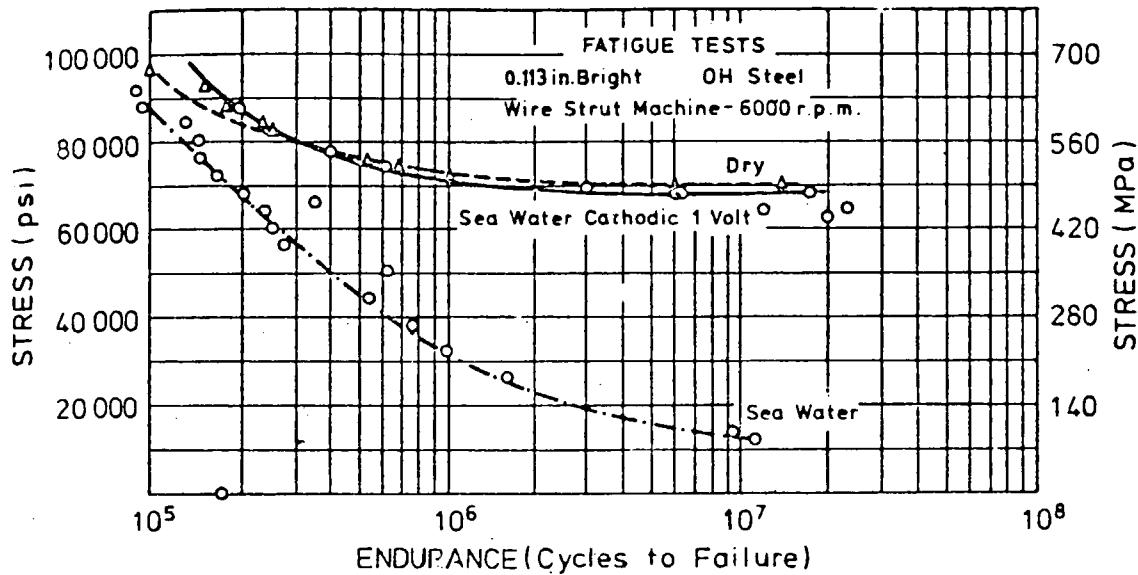


図 6.4.1.4 Corrosion fatigue of steel cable wire in sea water [5]

上記の結果は、1 海域の結果であって、海域が異なれば、結果が異なる。一般に、金属の腐食は、PH (水素イオン濃度)、酸素濃度、温度、流速等の影響を受ける。亜鉛メッキ鋼板の腐食速度におよぼすPHの影響を図 6.4.1.8¹⁹⁾、また、純亜鉛の腐食におよぼす温度の影響を図 6.4.1.9¹⁹⁾に示す。図 6.4.2.0¹⁶⁾は、海水中における鋼の腐食におよぼす温度の影響を示す。図 6.4.2.1、2.2¹⁶⁾は、常温の海水中における鋼および亜鉛の腐食におよぼす流速の影響を示す。

これら金属の腐食に影響する因子は、同一海域であっても、水深によって変る。その1例を図 6.4.2.3²⁰⁾に示す。図 6.4.2.4²¹⁾は、鋼の水深による腐食速度の差異および酸素濃度の影響を示す。

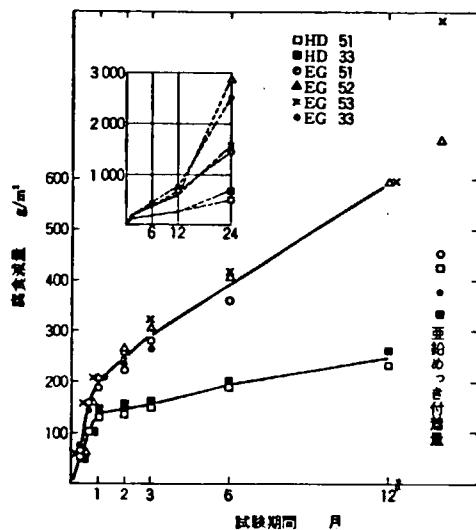


図 6.4.1.5 海水浸漬試験による腐食減量

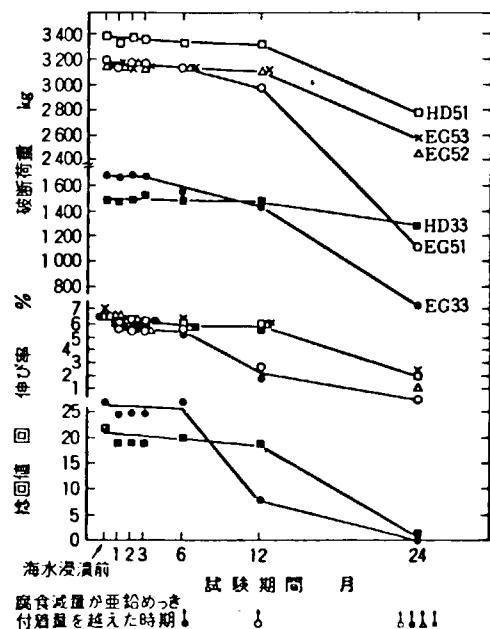


図 6.4.1.6 海水浸漬試験後の鋼線の機械的性質

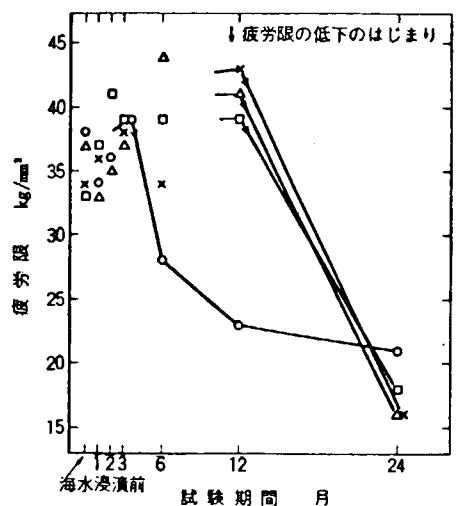


図 6.4.17 海水浸漬試験後の鋼線の疲労限

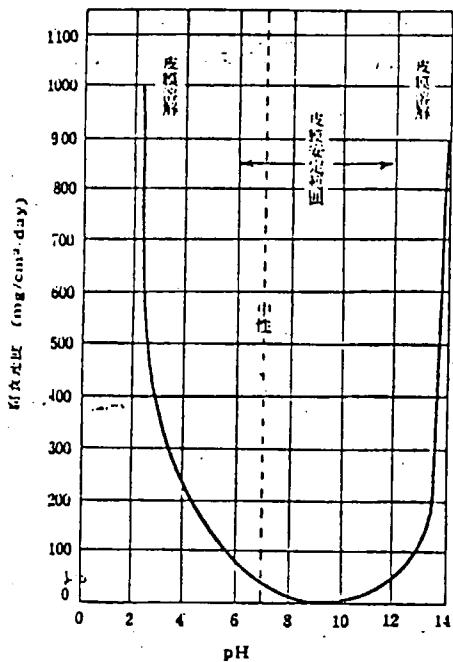


図 6.4.18 水溶液中の亜鉛メッキ鋼板の腐食速度と pH の関係

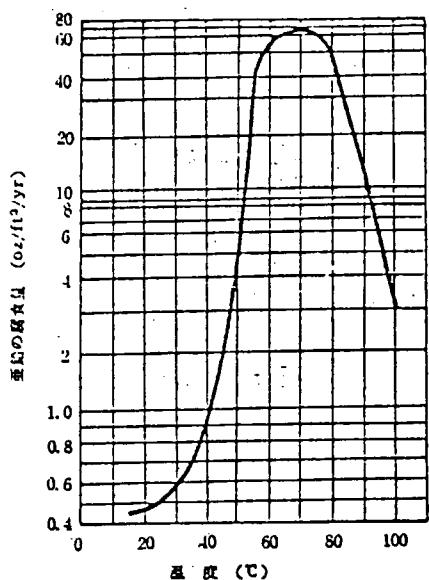


図 6.4.19 蒸留水中の亜鉛の腐食に及ぼす温度の影響 (9.9%Zn, 15日間)

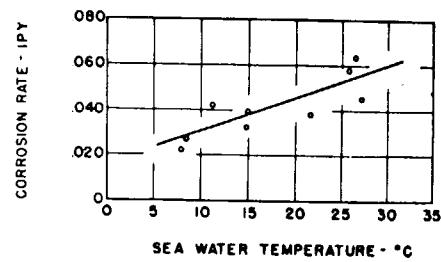


図 6.4.20 Effect of temperature on corrosion of steel of seawater

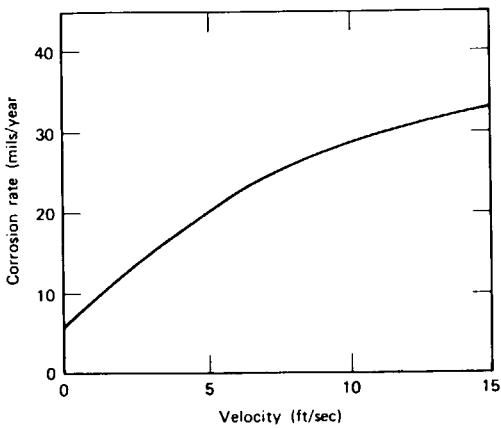


図 6.4.21 Effect of seawater velocity on corrosion of 38 steel at ambient tempeature, exposed 38 bays.

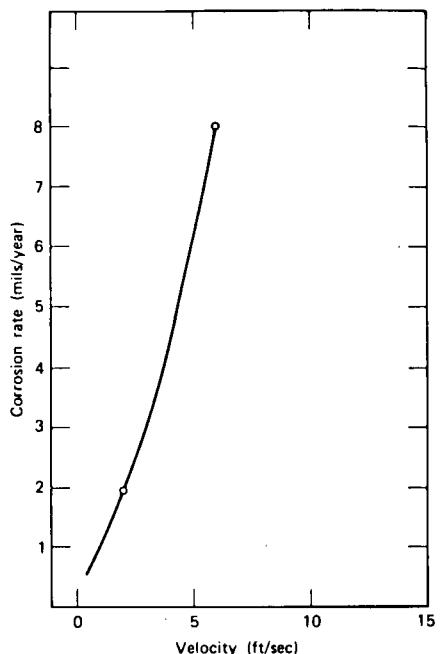


図 6.4.22 Effect of seawater velocity on corrosion rate-zinc ambient temperature.

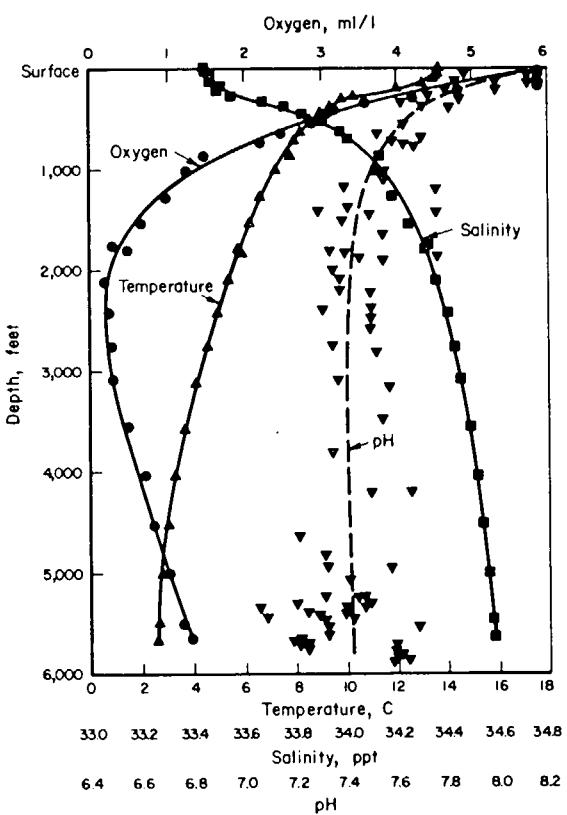


図 6.4.23 OCEANOGRAPHIC DATA TAKEN IN THE PACIFIC OCEAN AT A SITE WEST OF PORT HUENEME, CALIFORNIA(1)

Used with permission of U. S. Naval Civil Engineering Laboratory

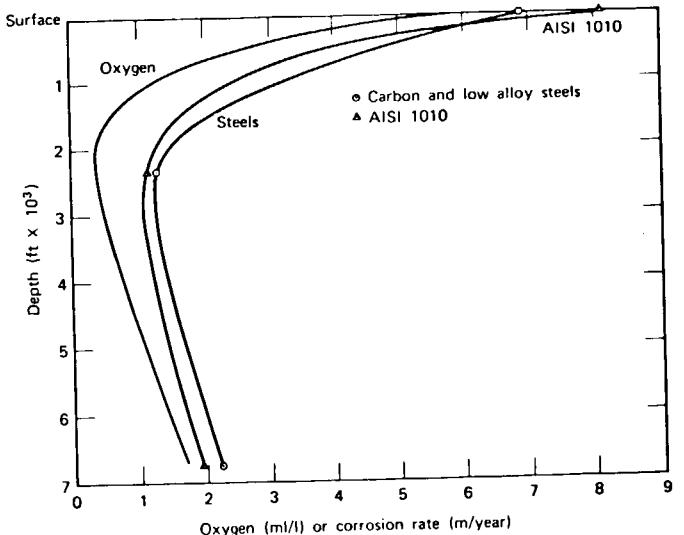


図 6.4.24 Corrosion of steels versus depth after 1 year of exposure.

海水中における鋼は、一般に、 0.25 mm/year 程度の腐食が起る。したがって、ワイヤーロープの海水中での疲労試験をする場合、付録表6.4.1に示した海水中のデータのように、 $3600 \sim 7200 \text{ cpm}$ というような速い繰返し速度では、必ずしも腐食の影響が反映されない。²²⁾ 図 6.4.2.5 は、このような問題を考慮して実験した例である。同図は、裸の $1/2 \text{ in.} \phi$ ワイヤーロープ (6×37) を海水中に $2 \sim 12$ 週間浸漬した後、人工海水中で 129 Hz (7740 cpm) で疲労試験した結果である。2週間海水中に浸漬しただけでも、疲

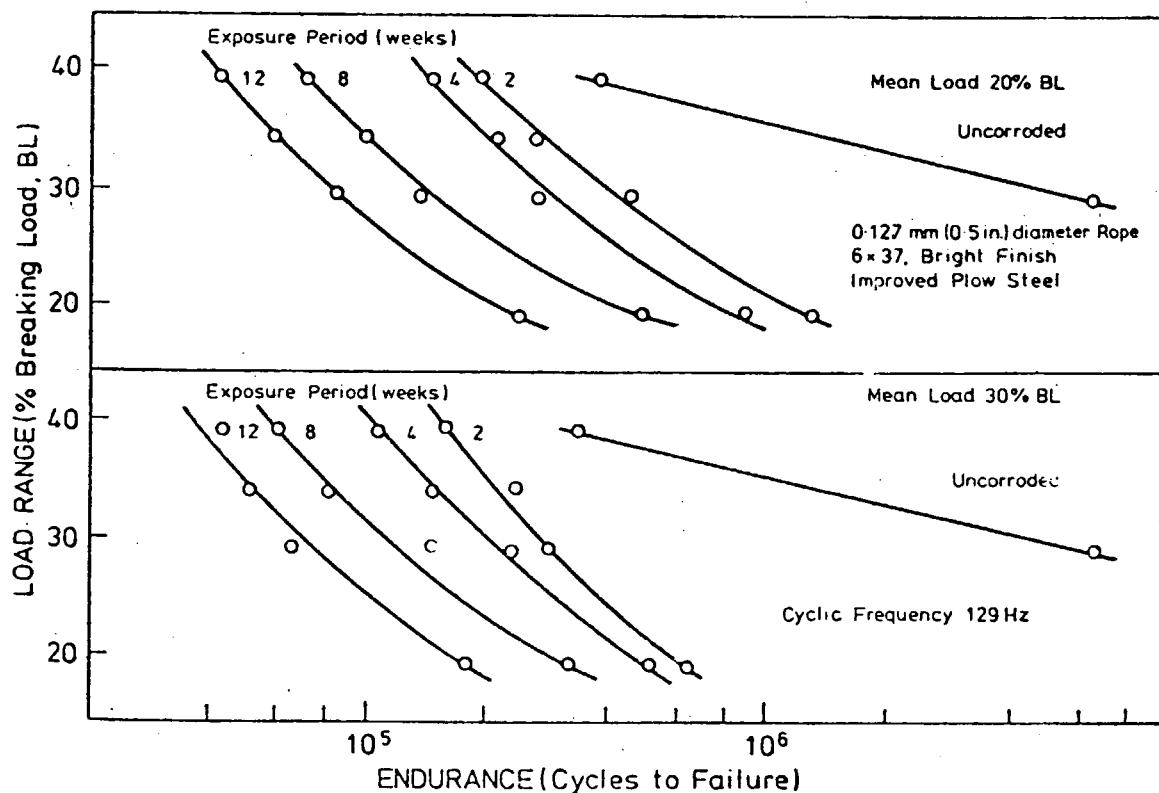


図 6.4.2.5 Effect of prior exposure in sea water and mean stress on fatigue performance of wire in synthetic sea water [5].

労強度が著しく低下することがわかる。図 6.4.2.6¹¹⁾ は、各種ワイヤーロープにブイをつけ、ブイの運動によって、破断強度の $10 \sim 50\%$ の張力がかかるようにして、各ロープの破断までの日数および破断状況を調べたものである。

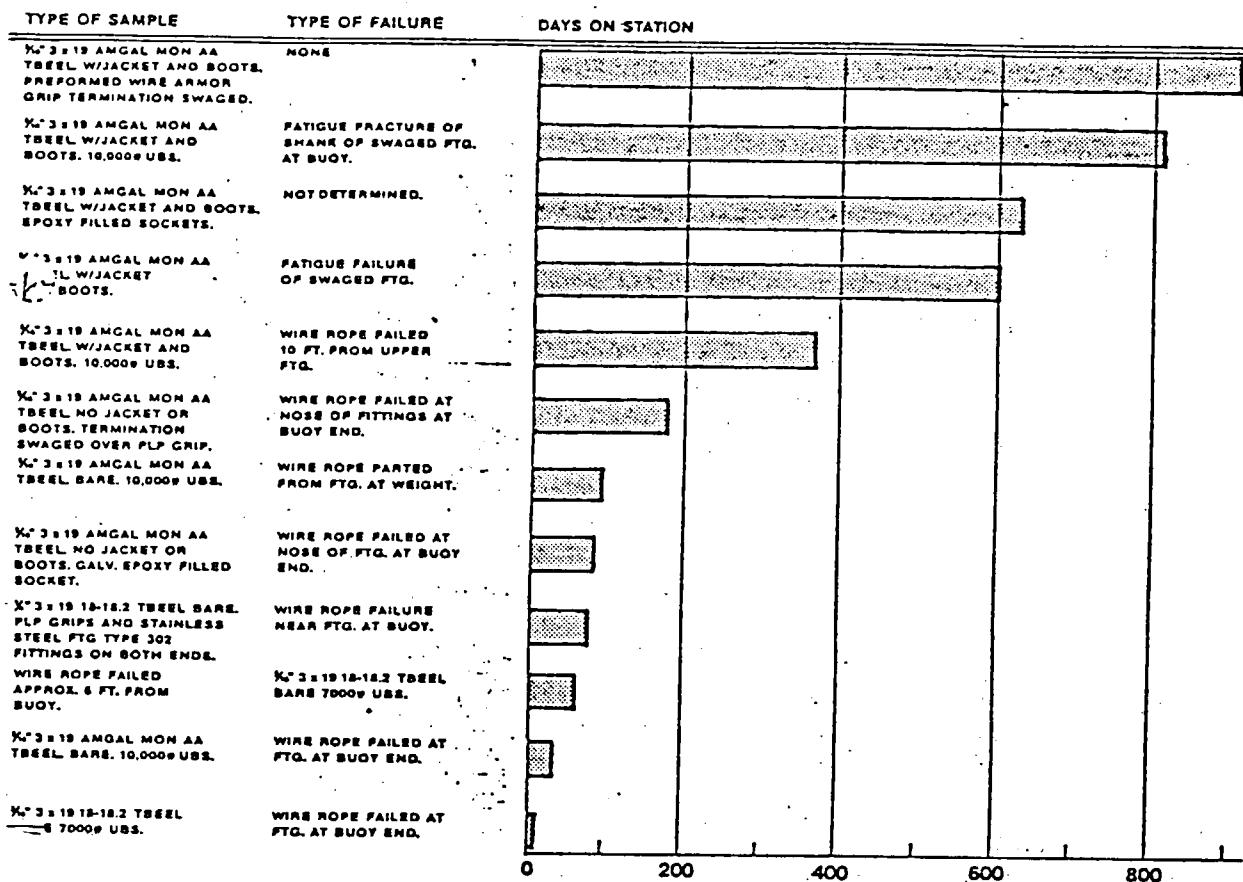


図 6.4.2 6 United States Steel Corp mooring lines wire rope life at Woods Hole Buoy Farm.

この結果をみても、裸ではステンレススチール (AISI 302) の $1/4\text{ in} \phi$ (3×19) ワイヤーロープが、約 100 日で破断している。一方、プラスチック被覆し、端末部にブーツ (Boots) を付けたものは、910 日間、その間、約 11×10^6 サイクルの繰返し荷重を受けたと推定されているが、何の損傷も起っていない。また、破断した試験体の破断箇所は、端末部近傍が多い。

以上述べたところから、海水中における裸ワイヤーロープの長期使用は、困難であると思われる。ところが、あらかじめ腐食代を見込んでおけばよいとの考え方がある。⁸⁾しかし、空隙の多いワイヤーロープにこの考え方は通用しないと思れる。

したがって、ワイヤーロープを 1 年以上の長期にわたり係留ラインとして使用する場合、電気防食あるいはプラスチック被覆等の防食加工を施す必要がある。

このような考えにもとづく、耐食ワイヤーロープが発表されている。例えば、図 6.4.2 7²³⁾ に示す耐食ワイヤーロープがある。これはまだ基礎的な実験の段階で、このものの疲労特性はまだ不明である。また、ナイロン - 12 を被覆したワイヤーロープがある。²⁴⁾ このようにプラスチック被覆したワイヤーロープは、繰返し曲げによって、ワイヤーロープと被覆材が剥離し、被覆材に亀裂の入ることが懸念される。これを図 6.4.2 8

に示す要領で試験した結果、26000回で1ヶ所、30000回で2ヶ所、32000回で3ヶ所亀裂が生じたと報告されている。²⁴⁾このものは、山口県の大島大橋の船舶衝突防護施設に昭和50年から使用されている。

長期係留ラインに使用するワイヤーロープは、電気防食法のむつかしさからプラスチックを被覆したものが、主体になると思われる。しかし、プラスチックも経時変化が起るし、こそれ、衝撃等による機械的損傷を受け易く、種類によっては透湿性の大きなものもあり、深海の高圧下で陰食性が損われるかも知れない。また、魚類にかじられたり、海中の微生物に侵される。

いずれにしても実績がほとんどなく、被覆材の種類等今後、検討すべき事項が多くある。

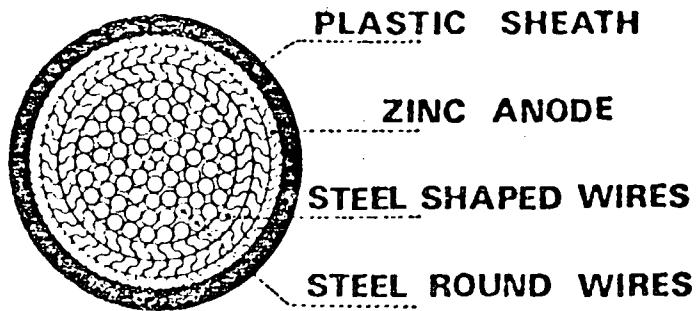


図6.4.27 Cross-Section of a 122 Diameter Cable

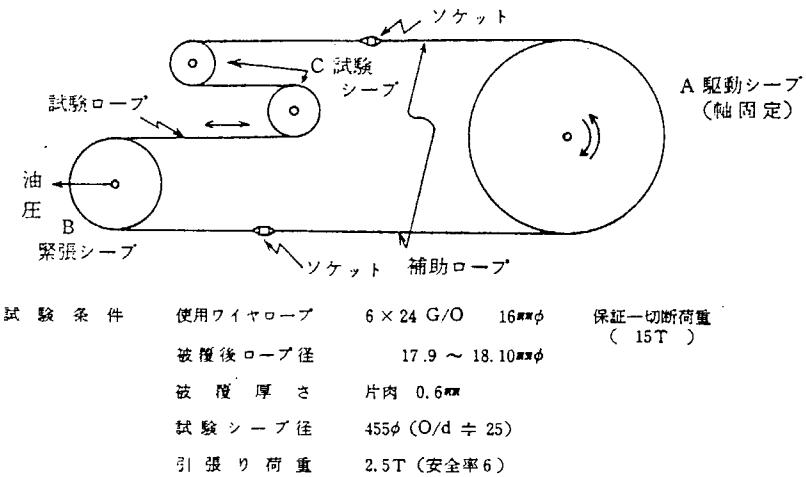


図6.4.28 ナイロン-12被覆ワイヤーロープ疲労試験要領

6.4.3 合成繊維ロープ

合成繊維は、図6.4.29²⁵⁾に示すように軽くて強く、海水中における耐食性にすぐれており、係留ラインの素材としてはすぐれている。しかし、プラスチックは、図6.4.30²⁶⁾に示すように、鋼に比べて耐摩耗性が劣る。これは、プラスチックをワイヤーロープの被覆材や合成繊維ロープとして、係留ラインに使用する場合の問題点である。また、合成繊維ロープは、図6.4.31²⁵⁾に示すように、ナイロンなどはクリープ伸びが大きく、図6.4.32²⁸⁾図6.4.33²⁷⁾に示すように疲労破断する。合成繊維ロープは、極く細いフィラメントからより上げるので、その機械的性質は、より方によって大きく変化する。1データで他を類推することは危険である。

20

最近、アラミド繊維で、ケブラーとして知られている高強度繊維がDuPont社で開発され、ロープ素材としても注目されている。各種繊維の比強度および比剛性を図6.4.2.9に示したが、ケブラーは、他のものに比べて、高剛性であることがわかる。これらを荷重-伸び曲線で示したのが図6.4.2.4²⁵⁾である。また、ケブラーのクリープ特性は図6.4.3.1²⁵⁾に、引張疲労特性を図6.4.3.5²⁵⁾に示す。これらのデータをみると、ケブラーは非常にすぐれた係留用ロープ素材ができることがある。しかし、ケブラーも、繰返し曲げによる劣化が大きい。そのデータを図6.4.3.6²⁹⁾に示す。そのために、ケブラーをよったロープは、端末処理がむつかしいといわれている。

これらいずれの合成繊維ロープも、まだ長期係留のデータがなく、海水中における係留時の劣化程度はまだ推測しがたいものがある。

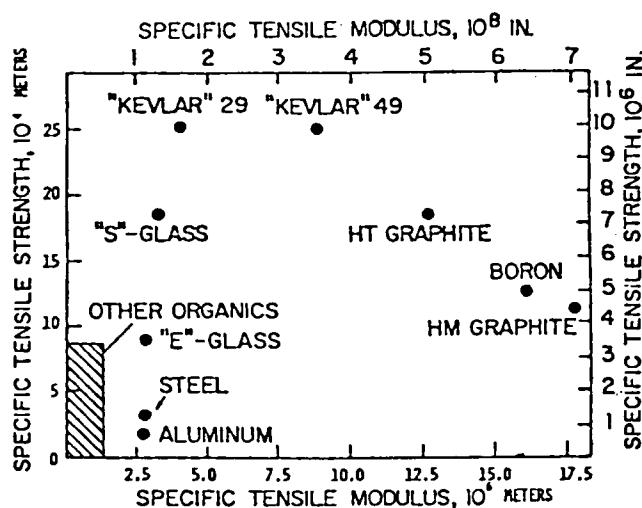


图 6.4.2-9 Specific Tensile Strength vs. Specific Modulus for Several Materials

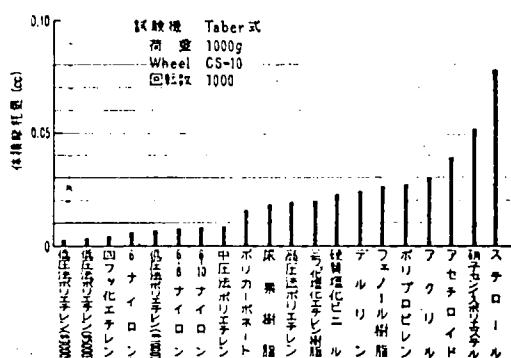


図 6.4.3.0 各種プラスチックの耐摩耗性ランク

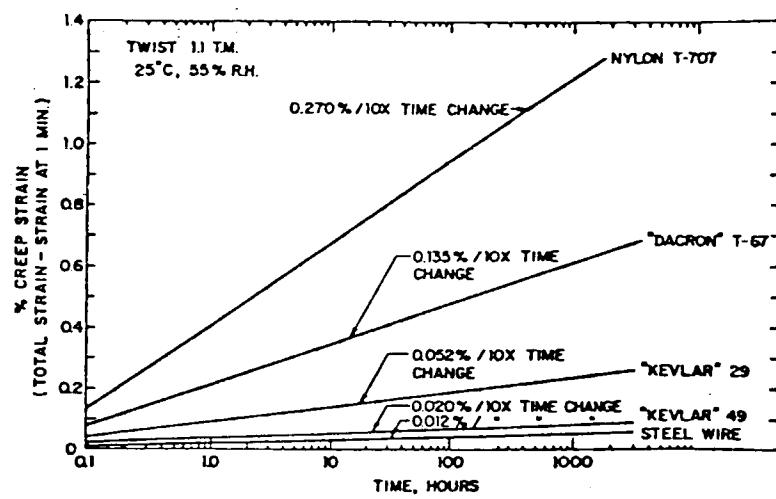


図 6.4.3 1 Creep of Twisted Yarns
at 50 % of Ultimate Strength

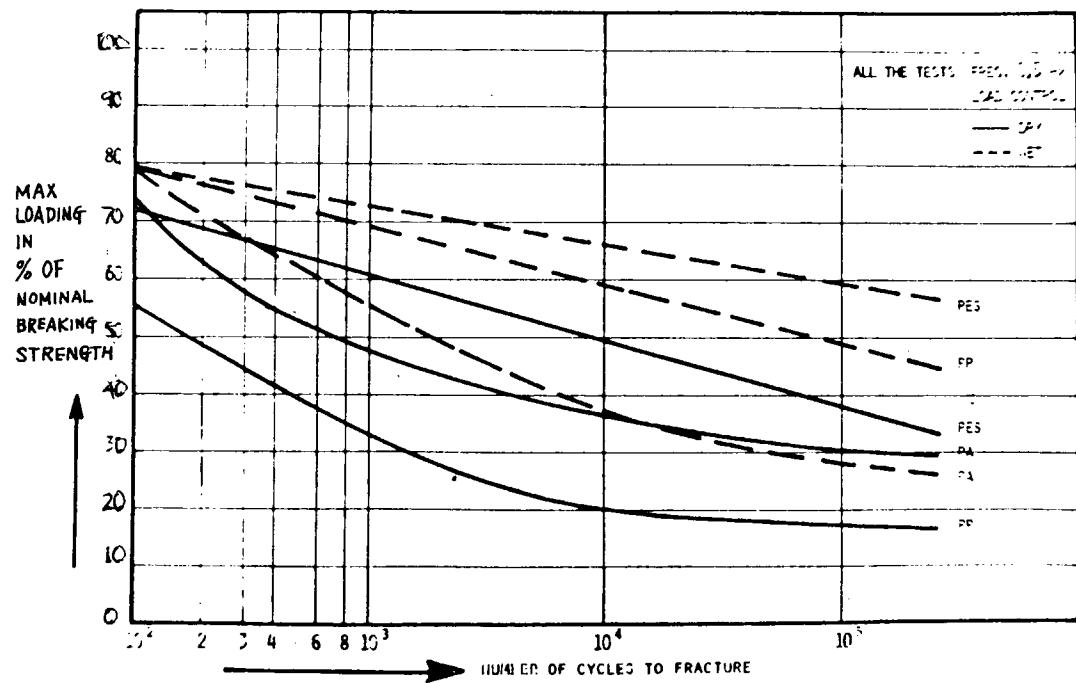


図 6.4.3 2 S-N CURVES AS A FUNCTION OF PROPORTIONAL LOADING

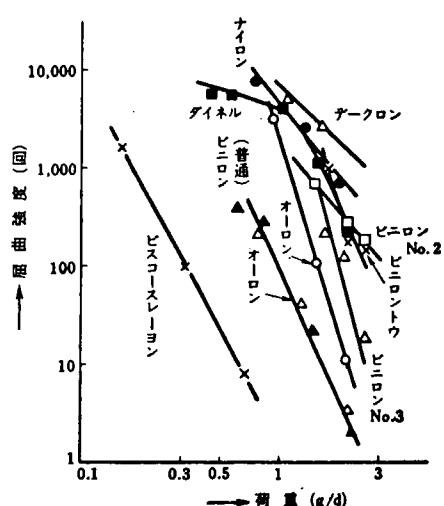


図 6.4.3.3 各種繊維の屈曲強度

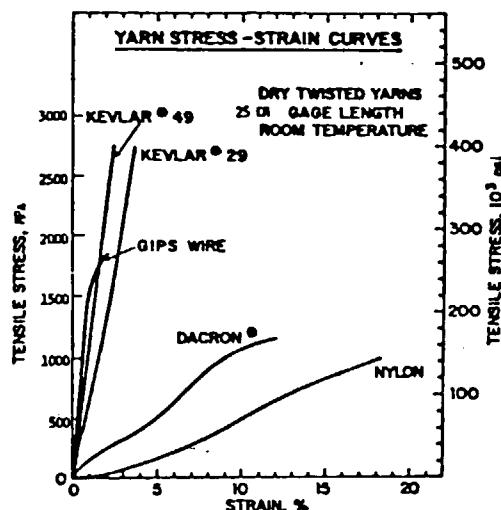


図 6.4.3.4 Yarn Stress-Strain Curves

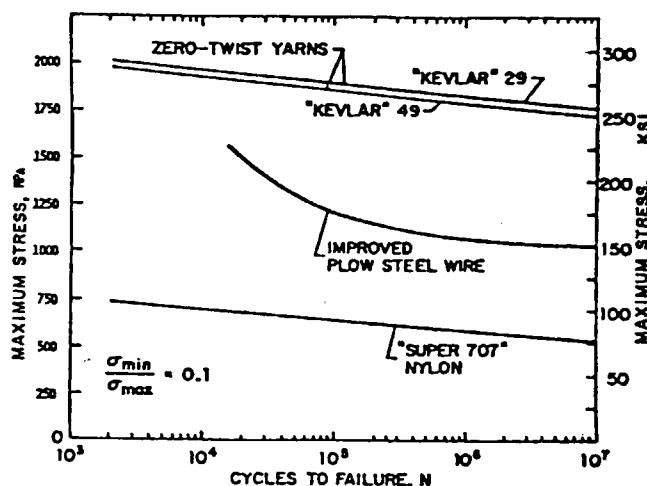


図 6.4.3.5 Tension-Tension Fatigue of Kevlar 29 and Kevlar 49 Yarns Compared with Nylon Yarn and Steel Wire

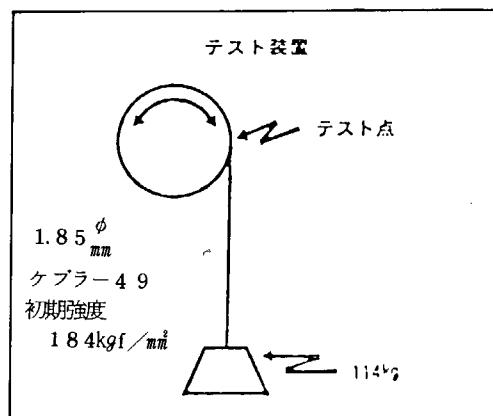


図 6.4.3.6 縁返し曲げ試験要領、その結果

ドラム径	全回数	テスト点の荷重 kg/mm ²	劣化 %
209.5	100,000	133	28
69.8	24,000	130	29

参 考 文 献

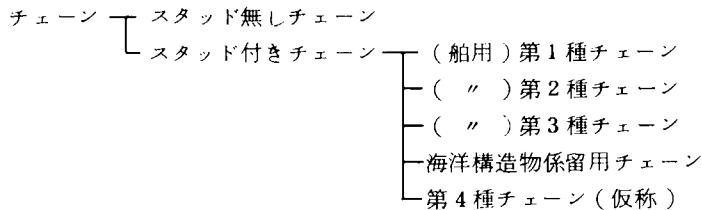
- 1) 小西、他：材料試験、7(1958)、160
- 2) 土井、他：材料、25(1978)、826
- 3) 奥川：本四技報、2(1978)、165、2
- 4) 本四公団：ケーブル分科会資料、昭和50年、P25
- 5) 非破壊検査協会；第4分科会資料、昭和57年7月、P12
- 6) 土井、他：日本鉱業会、全国地下資源分科研究会資料、昭和54年、S-14
- 7) 横田、他：材料強度学会講演論文集、(1979)、6月、P.1
- 8) K. T. Ronson, et al : OTC 3850, (1980), 458
- 9) F. Matanzo : OTC 1579, (1972), 1-649
- 10) 新家、他：R&D、28(1978)、162
- 11) W. A. Lucht, et al : OTC 2924(1977), 361
- 12) 建設省土木研究所；土木研究所資料、(1966)、160、3
- 13) 光島、他：R&D、25(1975)、161、58
- 14) W. Klingenberg, et al : Stahlbau、(1955)、1612、265
- 15) 岸本、他：本四技報、4(1980)、1611、8
- 16) F. L. Laque : "Marine Corrosion", Wiley(1975)、224
- 17) 日本機械学会：“疲れ強さの設計資料Ⅱ環境効果”、機械学会、S49
- 18) 藤井、他：R&D、28(1978)、162、89
- 19) 伊藤：防食技術、
- 20) F.M. Reinhart: Technical Report, R-504, U.S. Naval C.E.L.(1966)
- 21) F. M. Reinhart, et al : Technical Note, N-1213, U. S. Naval Civil Engineering Lab, (January 1972)
- 22) J. A. Hudson, et al : J. Materials Science, 15(1980), 1337
- 23) B. Falcy, et al : OTC 4052, (1981)
- 24) 東京製鋼K.K：“海中に使用するワイヤーロープについて”、技術資料
- 25) P. G. Riewald : American Inst. Eng., 76(1980), 16194, 133
- 26) 渡辺：機械試験所報告、(1962)
- 27) 秋吉、他：“合成繊維”、日刊工業新聞社、昭和39年、181
- 28) J. H. V. Leeuwen : OTC 4003, (1981), 453
- 29) Du-Pont ; KEVLAR、技術資料、K-001

6.5 チェーンの強度

6.5.1 チェーンの種類

チェーンは、普通リンクだけでなく、拡大リンク、端末リンク、スイベル、シャックル等々が連結されて用いられるものであり、これらを総称してチェーンと呼ぶが、ここではその主要部分を占める普通リンクについて述べる。

チェーンには、様式、製造方法、材料等によりいくつかの種類があるが、およそ次のように分類できる。



6.5.2 チェーンに関する規格

これらのチェーンのうち、従来主として船舶の係留用として用いられて来た第1種～第3種のチェーンについては、各船級協会の鋼船規則^{1)～5)}に、ほぼ同一内容の規程がある。海洋構造物係留用チェーンについては、各船級協会とも鋼船規則の規程を準用する形で規定しているが、それらの規則は一時的な係留についてのみ適用できるとしており、長期間の係留に使用する場合は別途考慮が必要であるとする規程もある。

一方 American Petroleum Institute (API)⁶⁾ は、海洋構造物係留用チェーンの規格を定めており、長期間の係留に対する配慮がある程度なされている点で、船級協会の規則と異なっている。

表 6.5.2.1 に、チェーンに関する船級協会規則と API 規格の概要を示す。船級協会規則は各協会ともほぼ同一内容であるので、ここでは日本海事協会 (NK) 規則を例として示す。API 規格の内容は、船級協会規則の第3種チェーンに関する規程と近い関係にあるが、両者を比較すると、以下のような差異がある。

- (1) 船級協会規則ではチェーンの製造単位を一連 2.75 m としているが、API 規格では連続長尺で製造する事となっている。
- (2) API 規格では材料の引張り強さを 65 kg/mm^2 と低く規定しているにもかかわらず、耐力試験荷重、切断試験荷重を船級協会規則よりそれぞれ約 2 % および 7 % 高く定めている。
- (3) API 規格ではスタッドに関して、両端に突起物を持たないこと、フラッシュバット溶接部とは反対側の全周に規定脚長以上の溶接を施すこと、リンクへ極端にくい込ませないこと等、細かく規定している。
- (4) API 規格では、ショットブラスト等により表面をきれいにすることと規定した上で、表面検査に関して細かい規程を設けている。

第4種チェーン (仮称)⁷⁾ は、まだいずれの規則でも規定していないが、材料の引張り強さを 100 kg/mm^2 と高くし、従来のチェーンより比較度を高めている。このチェーンは、「創成2号」、「海明」等で使用された実績がある。また、一部の船級協会では第4種チェーンに対する規則を制定する動きもある。

表 6.5.2.1 チェーンに関する船級協会規則と A P I 規格

項 目		船 級 协 会 規 則 (N K)	A P I 規 則
規定している チエーンの種類		スタッド無しチエーン スタッド付きチエーン 第1種チエーン 第2種チエーン 第3種チエーン	1種類だけ (ORQ)
材 料	化 学 成 分 (%)	第3種 第2種 第1種 C ; 0.36以下 0.25以下 0.15以下 Si ; 0.15~0.55 0.15~0.40 0.04以下 Mn ; 1.00~1.99 1.00~1.50 0.50以下 P ; 0.04以下 同 左 同 左 S ; 0.04以下 同 左 同 左	C ; 0.33以下 Si ; 0.20 ~ 0.35 Mn ; 1.90以下 P ; 0.04以下 S ; 0.04以下 N ; 0.015以下 Cr ; 0.25以下 Cu ; 0.35以下 Nb ; 0.05以下 Ni ; 0.40以下 V ; 0.10以下 Al ; 0.065以下 Mo ; 0.08以下
材 料	機 械 的 性 質	第3種 第2種 第1種 引張強さ(kg/mm^2) 70 50 31 伸 び(%) 17 22 30 紋 り(%) 40 — — 衝撃試験 * 母材部 6 kg-m以上 / 0°C 溶接部 5 kg-m以上 / 0°C	引張強さ 6.5 kg/mm^2 伸 び 17 % 紋 り 40 % 衝撃試験 同 左
チエーンの普通 リンクの寸法		外 長 a = 6 d + 0.15 d, -0 d 外 幅 C = 3.6 d + 0.10 d, -0.10 d 径 d ; d の許容誤差は、 d の大きさに応じて定められている	外 長 同 左 外 幅 C = 3.6 d + 0.05 d, -0.05 d 径 d ; 規定なし (その他) $\ell = 0^\circ \pm 2^\circ$ b = 3 d ± 0.1 d
チエーンの長さ		一連 2.75 m とする 10リンクで 42 d + 1.25 d, 0 d	連続長尺で製造する 5リンクで Min. $\ell = 22 d$ Max. $\ell = 22.55 d$
熱 处 理		焼入れ、焼もどし又は承認した方法で熱処理を行う	焼 準

項 目	船 級 協 会 規 則 (N K)	A P I 規 格
リンクの表面処理	規定なし	ショットブラスト又はサンドブラストを施す事。
表 面 檢 査	規定なし	傷があれば深さが 1.6 mm を起えない様にグラインダーで傷を取り去る。取り去れない場合は、そのリンクを切りはずす。
スタッドの溶接	規定なし	片側(フラッシュバット溶接部と反対側) 全周溶接による。 溶接法について規定有
フラッシュバット 溶接部の検査	規定なし	傷があれば深さが 0.8 mm を起えない様グライナーで取り去る。 検査はマグナフラックス又はダイチェックにより行う。
重 量	最少 $0.0219 d^2$ (kg/m)	約 $0.0228 d^2$ (kg/m)
耐 力 試 験 荷 重	$1.4 d^2$ (44 - 0.08d) (kgf) 全数実施の事	$1.428 d^2$ (44 - 0.08d) (kgf) 同 左
切 断 試 験 荷 重	$2.0 d^2$ (44 - 0.08d) (kgf) 抜きとり実施	$2.153 d^2$ (44 - 0.08d) (kgf) 同 左
スタッド端部の形状	規定なし	端部に突起物を持たない事

*第3種チェーンのみの規定

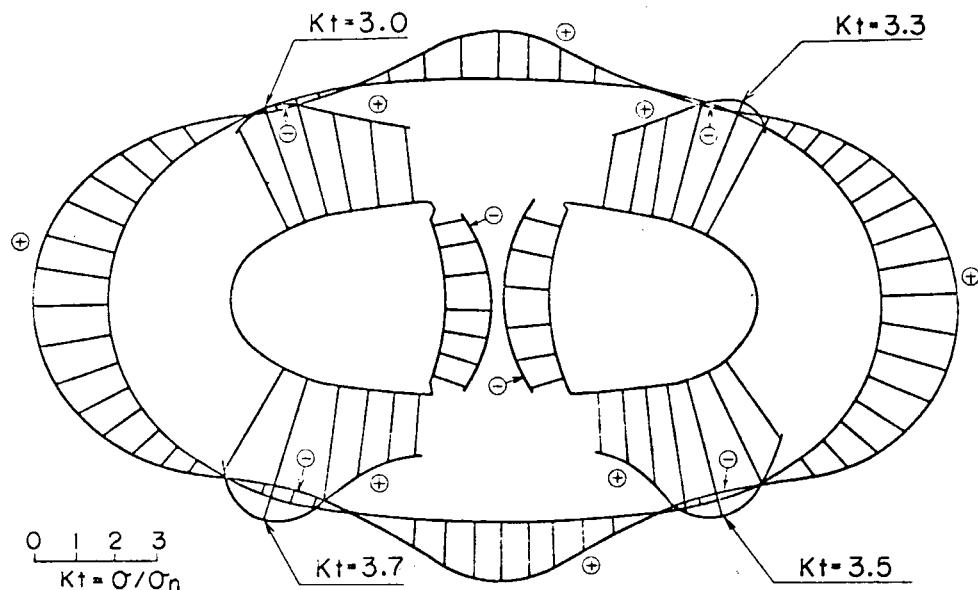
6.5.3 チェーンの静的強度

6.5.3.1 応力分布

⁸⁾ 浜野はチェーンの破断試験を行ない、塑性理論を用いた解析結果と良く一致することを示した。

引張り荷重によるチェーンの弾性応力状態についてのデータは、応力計測によるもの、^{9),10)} FEMによるもの、光弾性実験によるもの等が公表されている。

¹⁰⁾ 日本鋼管津研究所では三次元光弾性実験を実施し、最大応力はリンク内側のペンド部に生じ、その応力集中係数（リンク平行部に生じる公称応力を基準とする）はほぼ 3.7 になることを示した（図 6.5.3.1）。またこれに対し、歪みゲージにより応力を実測した結果、歪み集中率は約 4.3 となるが、これはチェーン



σ_n : 平行部公称応力 + : 引張り応力
- : 壓縮応力

図 6.5.3.1 チェーン三次元光弾性実験結果

の表面が既に塑性域に入っていたためであろうとしている（図 6.5.3.2）。

⁹⁾ 神戸製鋼所構造研究所は FEM によりリンクの応力解析を行ない、歪みゲージによる実測値と良く一致することを示した（図 6.5.3.3）。

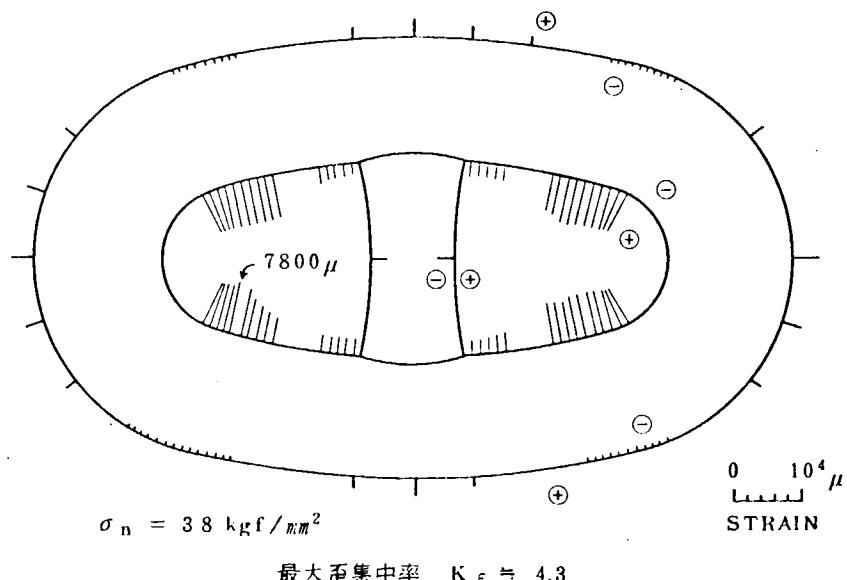


図 6.5.3.2 応力計測結果

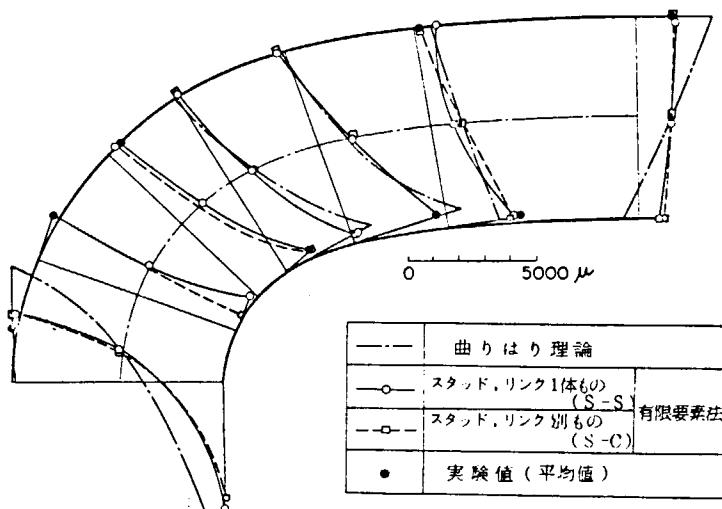


図 6.5.3.3 実験値と理論値の比較(荷重 120 ton)

6.5.3.2 チェーンの曲げ強度

チェーンの曲げ強度に対する考慮も必要である。Flory 他はチェーンがフェアリーダ等の円筒面に接して張力を受ける場合、引張荷重に曲げ荷重が重複し強度が下がる可能性があることを指摘している。¹¹⁾

また Berg 他は、DnVへ報告された1976年から1980年における事故例を解析し、事故の多くはチェーンがフェアリーダ等を通る時に受ける曲げ荷重が引き金となった脆性破壊等によるものであることを示した。¹²⁾

6.5.3.3 比強度

各種チェーンの比強度(切断荷重/単位長さあたりの重量)を図 6.5.3.4 に示す。切断荷重および重量は各規則の値を用いた。第4種チェーンの切断試験荷重は文献 13) により、重量は同じ呼び径の第3種チェーンと同じであると仮定した。

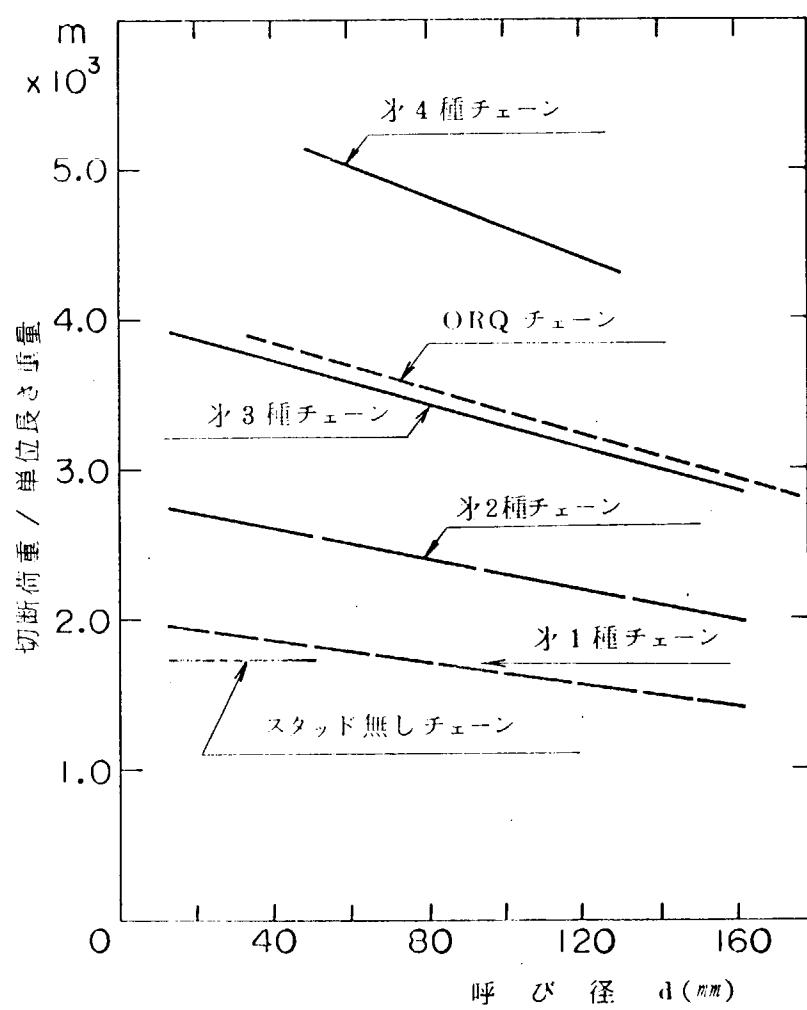


図 6.5.3.4 各種チェーンの比強度

6.5.4 チェーンの疲労強度

現在、海洋構造物の係留にチェーンが多く使用されているが、その疲労強度についての規則等はない。また、公表された疲労強度のデータも極めて少なく、¹⁴⁾ Gilbert、¹⁵⁾ Celander、¹⁰⁾ 川面他、関口他、NKK津研によるデータが散見されるにすぎない。ここでは、これらのデータをまとめて、疲労強度線図内の形で示し、チェーンの疲労強度特性について述べる。

図 6.5.4.1 に電気溶接スタッド付チェーンの疲労強度線図を示す。チェーンの疲労強度線図の表記方法は、様々な方法が考えられるが、ここでは、縦軸に公称応力範囲（〔荷重範囲〕／〔平行部断面積の公称値〕で定義する）を材料の公称引張り強さで除した無次元値を探り、横軸には破断寿命を探った。無次元化に使用した材料の公称引張り強さは、第2種チェーン、第3種チェーン、および海洋構造物係留用チェーンのそれぞれに対し、 4.90 N/mm (5.0 kgf/mm^2)、 6.90 N/mm (7.0 kgf/mm^2)、 6.41 N/mm (6.5 kgf/mm^2)とした。

チェーンには、その製造方法の複雑さから、疲労強度に影響を及ぼす多くの要因、たとえば、フラッシュバット溶接部や、スタッドの溶接部での欠陥の有無、材料欠陥の有無、熱処理方法の差等々が内在するが、これらの影響を限られたデータから論じる事は不可能であるので、一切無視し、次に示す要因について、図 6.5.4.1 をもとに述べる。

- (1) チェーンの種類による差異
- (2) 予荷重の影響
- (3) 腐食の影響
- (4) 破壊様式

(1) チェーンの種類による差異

図 6.5.4.1 に示したデータには、スタッド付電気溶接第2種、第3種、およびORQのチェーンが含まれている。ここでは、この種類による差を明確にするために、これらのデータの中から、耐力試験を予荷重として加えた、腐食の影響の無いデータだけを取り出し、図 6.5.4.2 に示す。図中●印は第2種を、▲印は第3種を、■印はORQチェーンのデータを表わす。縦軸を〔公称応力〕／〔材料の引張り強さ〕と定義した線図上では、高サイクル領域でかなりのばらつきがあるものの、チェーンの種類による強度差はないと言えよう。

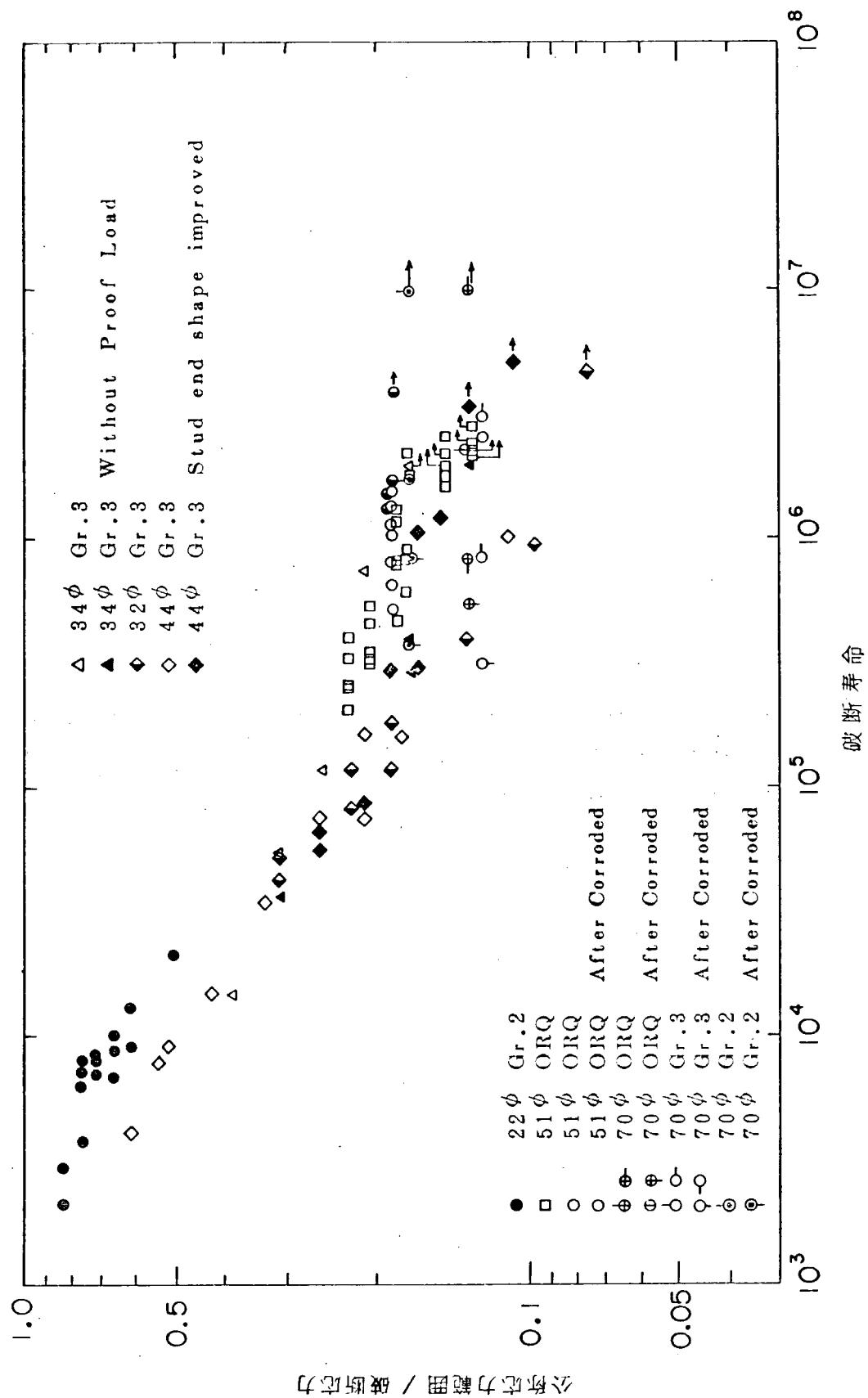


図 6.5.4.1 電気溶接スタッド付チューインの疲労強度

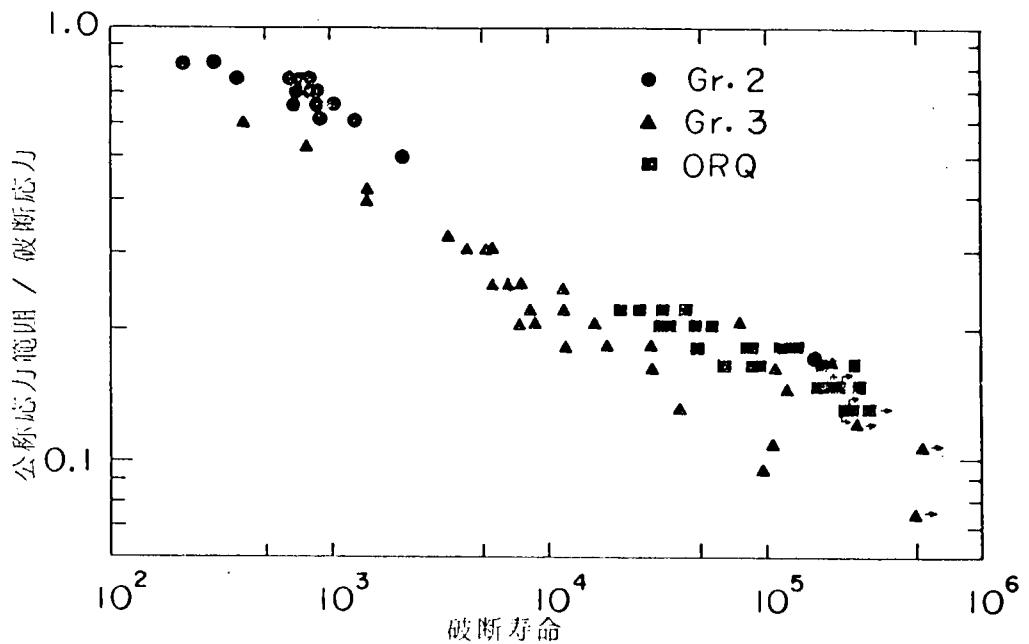


図 6.5.4.2 チェーンの種類と疲労強度

(2) 予荷重の影響

関口他は、第3種チェーンについて、予荷重なしの試験体（図6.5.4.1中▲印）と耐力試験を行なった試験体（△印）について疲労強度の比較を行い、予荷重なしの強度が低下する事を示した。とくに、高サイクル領域で差異が顕著に現われ寿命が 2×10^6 回での時間強度が約25%低下するとしている。また、Celander¹⁵⁾は、ORQチェーンを供試体にして予荷重の大きさを65%切断荷重（耐力試験荷重に相当）から95%切断荷重まで7段階に変化させて疲労試験を行い、腐食していない試験体では予荷重が大きい程寿命が伸びる事を示した。¹⁵⁾¹⁷⁾耐力試験を行うとチェーンはほぼ全面塑性に近い応力状態となり応力集中の大きい所では周囲の拘束によって圧縮側の残留応力が生じる。このことが、予荷重をかけると寿命が伸びる原因と推察される。

一方、腐食させた試験体ではこの傾向が顕著に現われない事が Celander¹⁵⁾により示されている。

(3) 腐食の影響

Celander¹⁵⁾はORQ、第2種チェーン、第3種チェーンについて4ヶ月間海水に浸けた後、空中で高サイクル領域での疲労試験を行い大幅な寿命低下がある事を示した。図6.5.4.3に耐力試験荷重を予荷重としてかけた試験体に関する結果を示す。

一方、海水中での疲労強度についてのデータは非常に少なく、現状で定量的に特性を示すことができないが、浅野らが行った実験結果を図6.5.4.4に示す。図中□印は、30°CのASTM規格人工海水中で実施した腐食疲労試験結果で、△印は、同じ試験体を使用した空気中での試験結果である。両者の間には明確な差があり、特に高サイクル領域でその差は顕著となる。

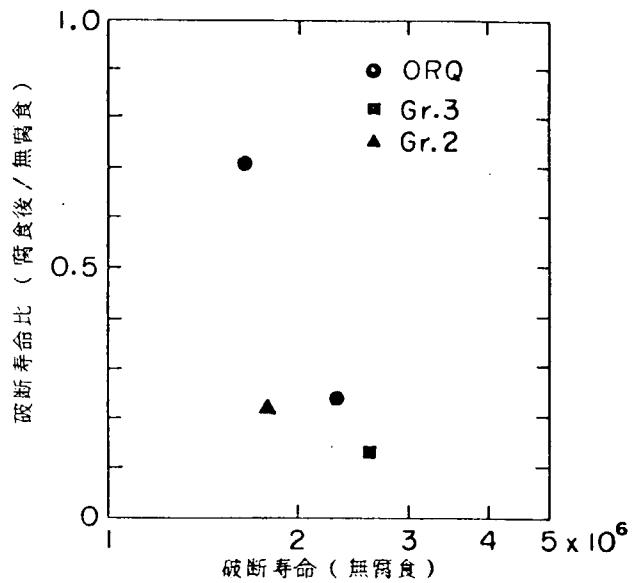


図 6.5.4.3 腐食による疲労強度の減小比

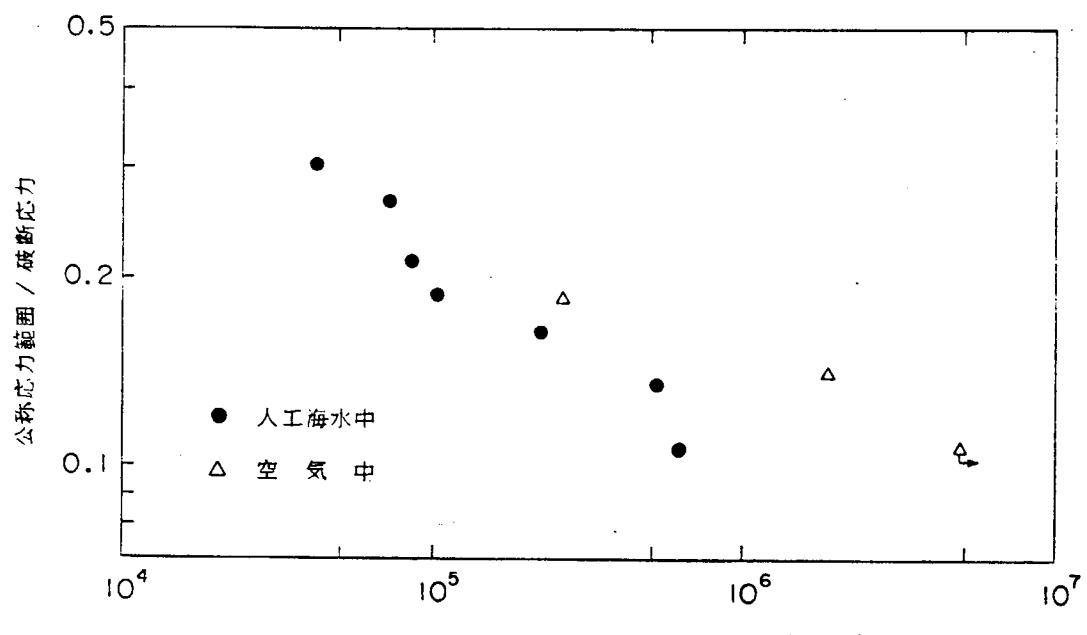


図 6.5.4.4 チェーンの腐食疲労試験結果
10)

(4) 破壊様式

図 6.5.4.1 に示したデータのチェーンの破壊様式をまとめて図 6.5.4.5 に示す。

クラウン部からの破壊は極低サイクル領域に多く見られる。一方、ペンド部は、応力解析の結果この部分の応力が最大となっており、破壊もすべての領域で最も多く起きている。スタッド端部からの破壊は、チェーン製作時のスタッドのリンクへの押し込みによりリンク内側に生じる切欠きに起因する破壊である。¹⁰⁾ この切欠きは、特に高サイクル側の疲労強度を低下させる事が報告されている。

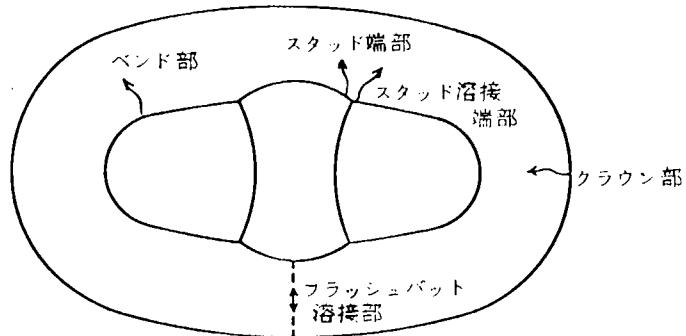


図 6.5.4.5 チェーンの疲労破壊様式

6.5.5 チェーンの強度についての問題点

海洋でチェーンを使用する際、腐食の影響を明確にする事は、最も重要な事柄の一つである。しかしながら、現状では公表されたデータはほとんどなく、第4種チェーン開発時に行われた材料の腐食試験結果⁷⁾、および、少數の海水中腐食疲労試験結果¹⁰⁾が存在するにすぎない事から、この分野の研究が待たれる。

ところで、スイベル、シャックル等のチェーンの付属品とも言うべき機器の静的あるいは疲労強度のデータはほとんど無いが、実機における事故例の中には、これらの機器の事故も報告されていることからも問題点の一つであろう。

また、チェーンを比較的深海域で使用する場合には、平均応力が疲労強度に及ぼす影響を考慮する必要がある。

番号	著者	表題	出典
1	日本海事協会	鋼船規則集	1979
2	American Bureau of Shipping	Rules for Building and Classing Steel Vessel	1979
3	Bureau Veritas	Rules and Regulations for the Construction and Classification of Steel Vessel	1980
4	Det Norske Veritas	Rules for Classification Steel Vessel	1980
5	Lloyd's Register of Shipping	Rules and Regulations for the Classification of ships	1980
6	American Petroleum Institute	Specification for Mooring Chain	Spec. 2 F, 3rd Edi, 1981
7	日本船用機器開発協会	海洋で使用する高張力チェーンの開発研究	昭和51年事業報告書
8	浜野和夫	錆鋼錨鎖の強度について	日本造船協会会報第38号、1948
9	神戸製錬所 構造研究所	係留アンカーチェーンの破壊強度特性	日本海事協会係留研究委員会資料、MA-2-3
10	日本钢管 津研究所	チェーン疲労強度	同上 MA-5-1
11	Flor, J.F. 他	Strength of Chain Tensioned over a Carved Surface	OTC 3855, 1980
12	Berg, A. 他	Long-Term Mooring and Anchoring of Large Structure and Drilling Units (Reliability and Safety of Anchor Chain System)	OTC 3813, 1980
13	浜中製鎖	ORQチェーン LOAD一覧表	山本氏よりの私信
14	Gilbert, L.	Fatigue Tests on Anchor Chain-Cable	OTC 1503, 1971
15	Celander I.	Preload Influence on Fatigve Characteristics of Chain Cable Exposed to Salt Water and Atmospheric Conditions	OTC 1578, 1972
16	川面武雄他	係留索鎖用低サイクル疲労試験機の概要と実験結果の一例について	船舶技術研究所研究発表会講演集、1975
17	関口進他	ハイテンチェーンの実物疲労特性について(太径ハイテンチェーンに関する研究Ⅳ)	鉄と鋼、第63年、第4号、1977

6.6 基礎調査

6.6.1 新係留ラインの可能性

6.6.1.1 一般

深海係留になると、ラインの自重による係留力のロスを小さく（係留効率の増加）するための検討が必要となる。いま、簡単のために自重のみを考慮した伸びのない単一ラインを例に最大張力発生時の係留ライン特性について考えてみる。

図 6.6.1.1 に模式化した係留ラインおよび記号を示す。

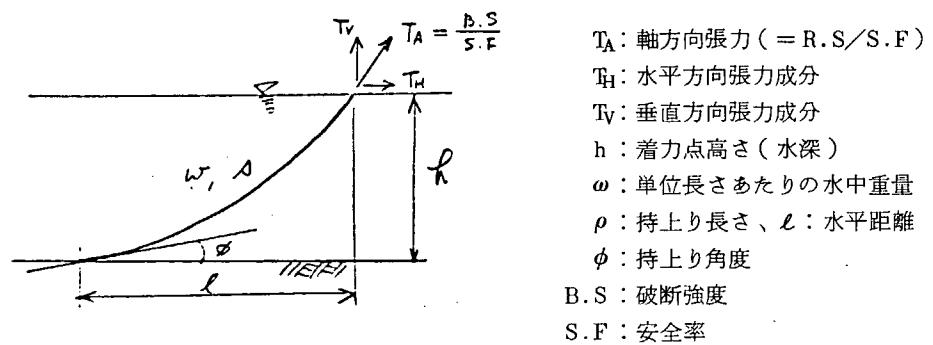


図 6.6.1.1 記号説明図

カテナリー解を用い、さらに無次元化を行うと各種係留ライン特性は次の様に表示できる。

$$\left. \begin{aligned} \hat{T}_H &= T_H / (B.S/S.F) \\ \hat{T}_V &= T_V / T_A = T_V / (B.S/S.F) \\ \hat{h} &= h / (B.S/S.F/w) \\ \hat{\rho} &= \rho / h \\ \hat{\ell} &= \ell / h \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \quad (1)$$

(1) 通常カテナリーの場合 ($w70, \phi = 0$)

$$\hat{T}_H = 1 - \hat{h} \quad \dots \dots \quad (2)$$

$$\hat{T}_V = \sqrt{\hat{h}(2-\hat{h})} \quad \dots \dots \quad (3)$$

$$\hat{\rho} = \sqrt{\hat{h}(2-\hat{h})} / \hat{h} \quad \dots \dots \quad (4)$$

$$\hat{\ell} = \{(1-\hat{h})/\hat{h}\} \ln \{ (1 + \sqrt{\hat{h}(2-\hat{h})}) / (1-\hat{h}) \} \quad \dots \dots \quad (5)$$

(2) 持上り角度を有するカテナリーの場合 ($w70, \phi \neq 0$)

$$\hat{T}_H = \cos \phi (1 - \hat{h}) \quad \dots \dots \quad (6)$$

$$\hat{T}_V = \sqrt{\sin^2 \phi + \hat{h}(2-\hat{h}) \cos^2 \phi} \quad \dots \dots \quad (7)$$

$$\hat{\rho} = \{ \sqrt{\sin^2 \phi + \hat{h}(2-\hat{h}) \cos^2 \phi} - (1-h) \sin^2 \phi \} / \hat{h} \quad \dots \dots \quad (8)$$

$$\hat{\ell} = \cos \phi \left(\frac{1-\hat{h}}{2} \right) \ln \left\{ \frac{1 + \sqrt{\sin^2 \phi + \hat{h}(2-\hat{h}) \cos^2 \phi}}{(1-\hat{h})(1+\sin \phi)} \right\} \quad \dots \dots \quad (9)$$

(3) Neutral buoyancy の場合($\omega = 0$ 、 $\phi \neq 0$)

$$\hat{T}_H = \sqrt{1 - \frac{1}{\alpha^2}} \quad \dots \quad (10)$$

$$\hat{T}_V = \frac{1}{\alpha} \quad \dots \quad (11)$$

$$\hat{\rho} = \alpha (= \rho / h) \quad \dots \quad (12)$$

$$\hat{\ell} = \sqrt{\alpha^2 - 1} \quad \dots \quad (13)$$

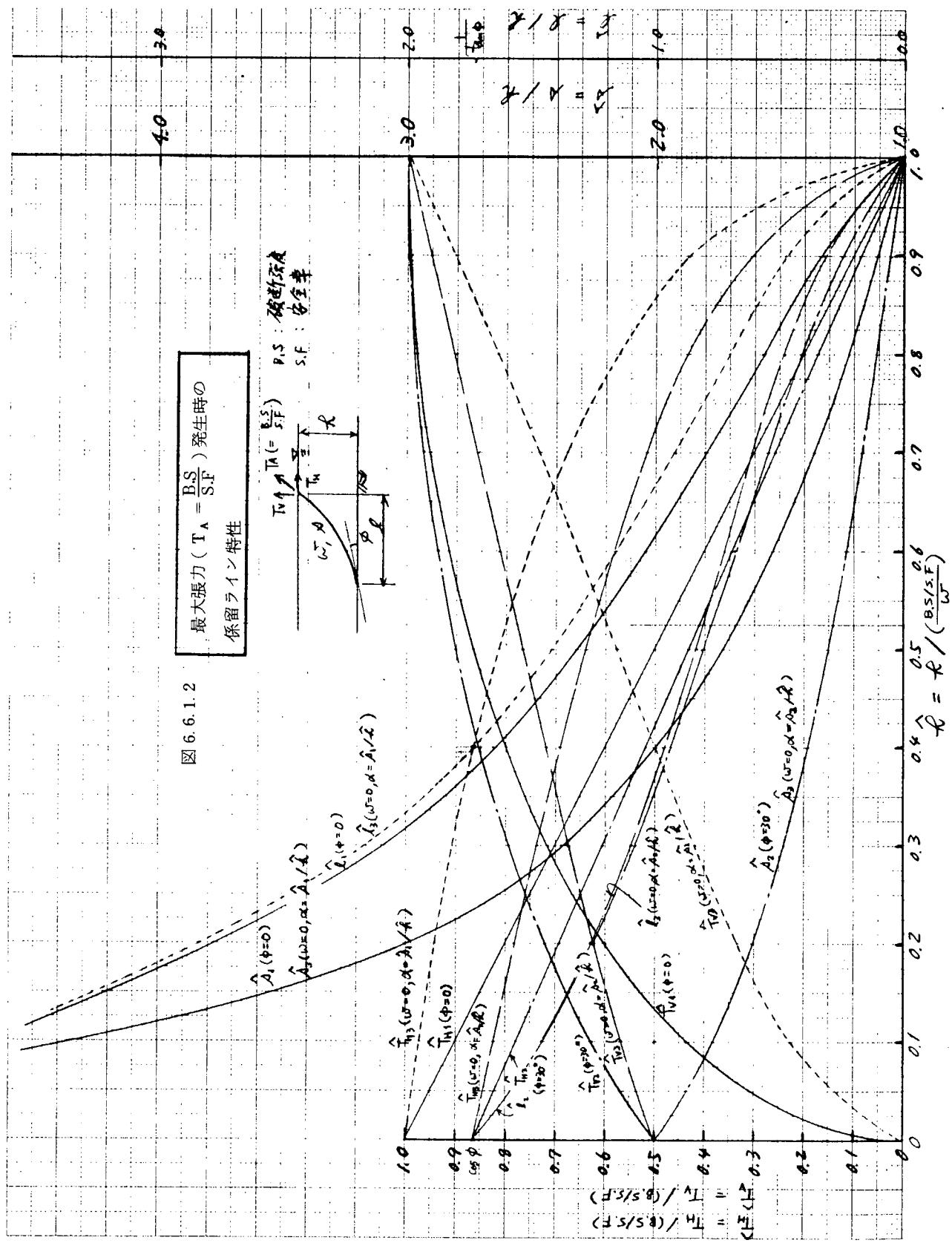
(2)～(5)式および $\phi = 30^\circ$ とした場合の(6)～(9)式およびそれらに対応した α 即ち $\hat{\rho}$ を用いた(10)～(13)式を図 6.6.1.2 に示す。同図より次のことがいえる。

- (1) 係留力に相当する水平張力 (\hat{T}_H) は水深 (\hat{h}) の増加とともに減少し、その傾きは水中重量 (ω) に比例する。
- (2) 最大張力発生時の持上り長さおよび水平距離と水深の比 ($\hat{\rho}$ 、 $\hat{\ell}$) は、水深 (\hat{h}) の増加とともに減少する。
- (3) 係留浮体のT.P.C (毎センチ排水量) に関係する垂直張力 (\hat{T}_V) は、水深 (\hat{h}) の増加とともに増大する。
- (4) 係留限界水深を増加させるには、破断強度 (B.S) を上げ、水中重量 (ω) を小さくすれば良い。(強度／重量比の増加)
- (5) 係留力を増加させるためには破断強度 (B.S) を上げれば良い。(強度の増加)

特に(4), (5)はいわゆる弛緩係留方式のみならず、緊張係留方式についてもいえることであり、次に現在使用されている鋼索、鋼鎖、合化繊維ロープなどの強度、重量などをまとめるとともに、いくつかの新係留ラインについて同様の整理をしてみる。

6.6.1.2 強度および重量特性

鋼索、鋼鎖、合化繊維ロープおよびH.C.L (Hollow Cylindrical Links; Westinghouse)、C.L (Chain links; shell) について強度および水中重量の関係を図 6.6.1.3, 図 6.6.1.4 に示す。



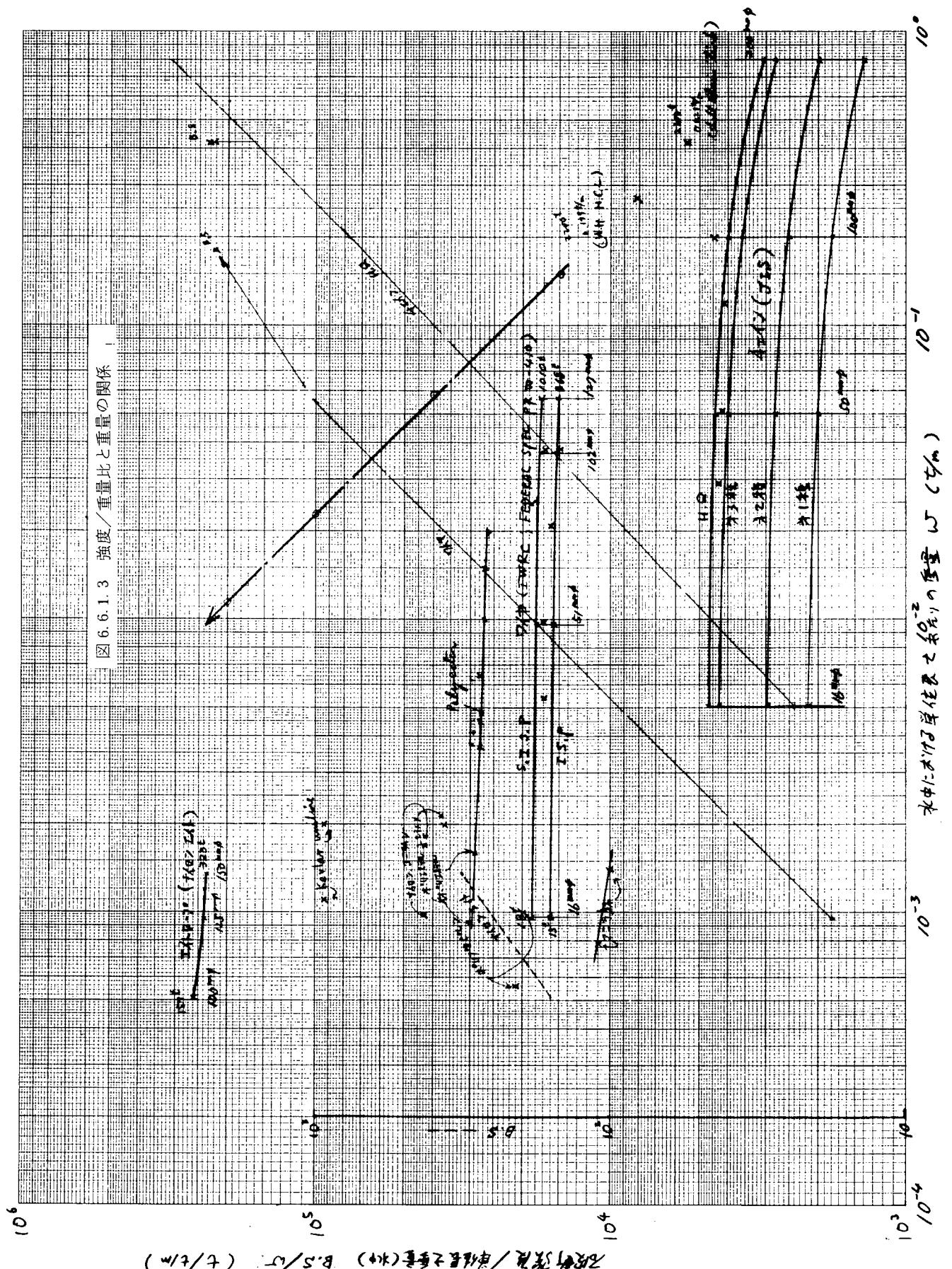
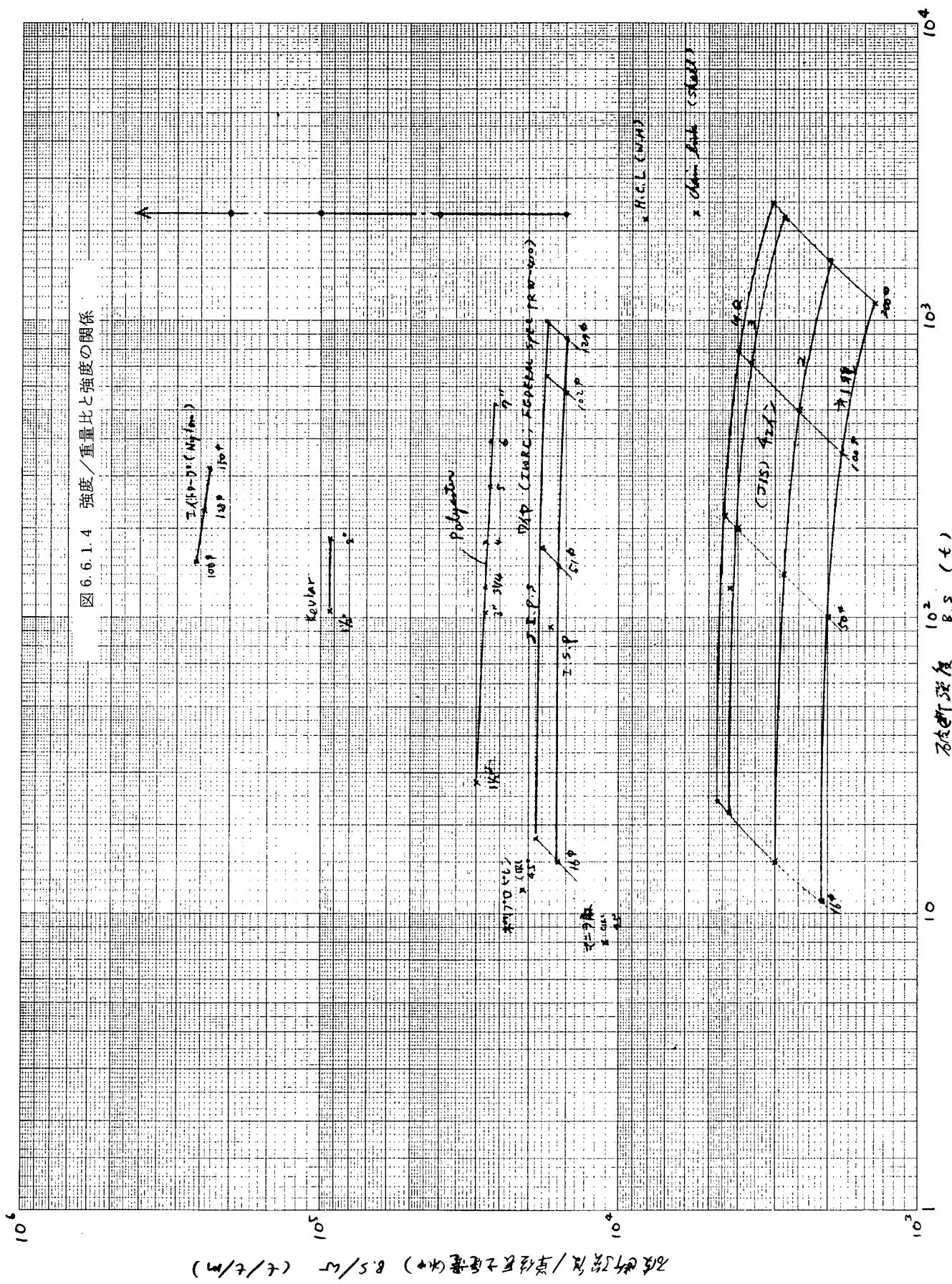


図 6.6.1.4 強度／重量比と強度の関係



6.6.1.3 新係留ラインの例

先の図 6.6.1.3、図 6.6.1.4においてチェインおよびワイヤの外挿域を占めるものとしてそれぞれ Chain Links (shell)、Hollow Cylindrical Links (Westinghouse) の例が上げられる。これらはいずれも鋼材を用いた多節リンクであり、中実 (C.L) 又は、中空 (H.C.L) にすることで水中重量を調整することができる。

一方、既存のチェイン、ワイヤ、合化繊維ロープなども、材料の強度特性や組成方法の改良によって破断強度（疲労強度）を向上させる努力が成されている。

ここでは構造型式がチェイン、ワイヤと異なる C.L, H.C.L についてその概略を紹介する。またラバー・ジョイナー⁴⁾についても概要を述べる。

(1) Chain Links

本係留ラインは、Shell が Castellor 油田で使用している SALS (Single Anchor Leg System)¹⁾ の係留ラインとして用いているものであり、概略図を図 6.6.1.5 に示す。

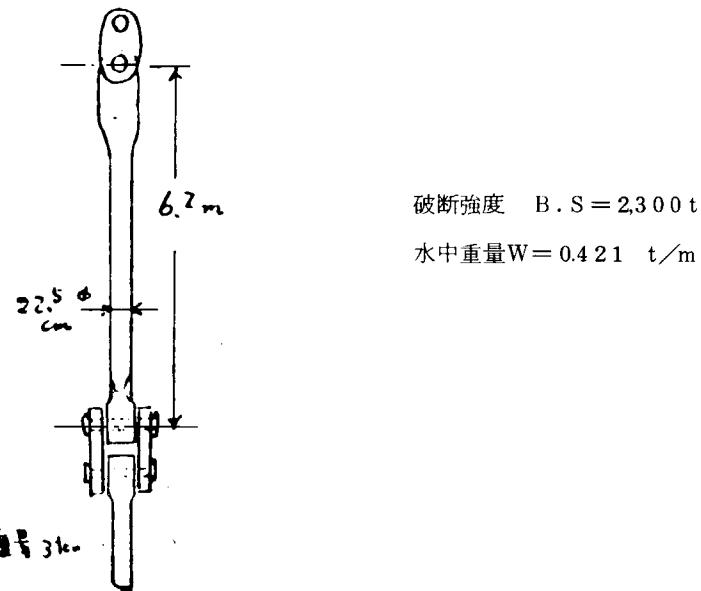


図 6.6.1.5 Chain Links (Shell)

(2) Hollow Cylindrical Links

OTEC プロジェクトの一環として Westinghouse が提案しているもので中空（耐圧）の鋼管を用いた多節リンク²⁾であり、概略を図 6.6.1.6 に示す。

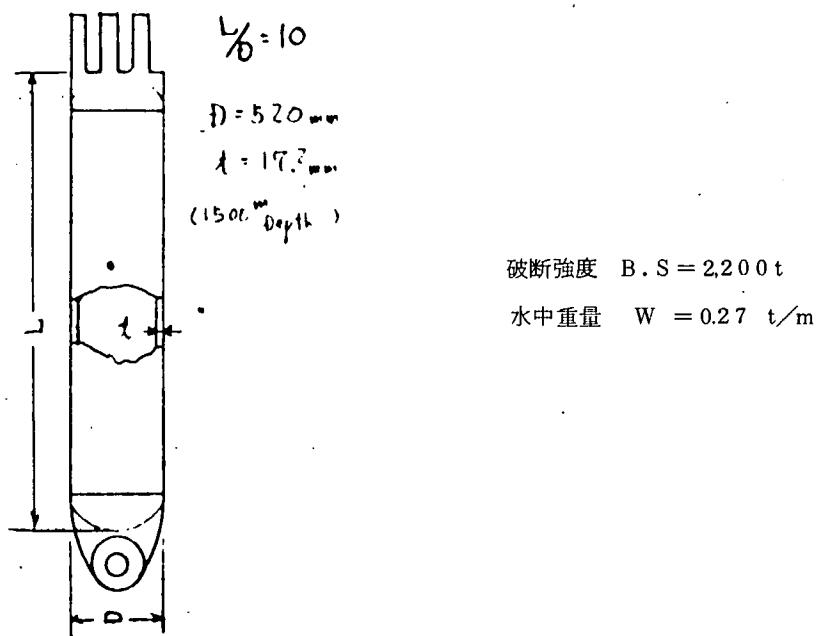


図 6.6.1.6 Hollow Cylindrical Links (Westinghouse)

また、同じく O T E C プロジェクトで Lockheed の提案した H.C.L を図 6.6.1.7 に示す。³⁾

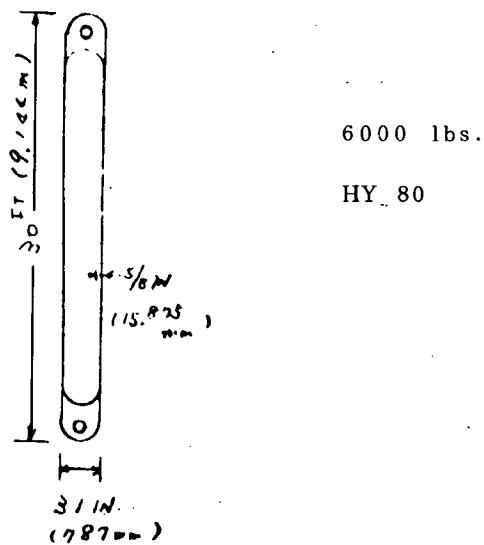


図 6.6.1.7 H.C.L (Lockheed)

(3) ラバー・ジョイナー

チェインの耐腐食性、耐摩耗性、耐衝撃性を高めるために、チェインをラバーでコーティングしたものがあり、ラバー・ジョイナーと呼称されている。図6.6.1.8に断面図を示す。本ラインは比重が約2.0であり、最終強度はチェインと同等である。したがって図6.6.1.4に示したチェインの破断強度／単位長さ重量比を約1.8倍高めることができる。

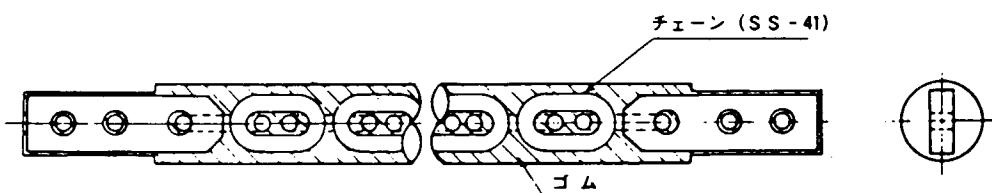


図6.6.1.8 ラバー・ジョイナー断面図

6.6.1.4 新係留ラインの可能性について

大水深における係留特性を向上させるためには、

- (1) 強度（破断強度、疲労強度など）の増加
- (2) 水中重量の低減（これには、カテナリを利用する係留方式の場合には下限がある。）

等が必要であり、大別すれば次の様に方向づけることができよう。

(1) 材料の静的強度特性の改良

高張力鋼化、新規材料の開発など

(2) 材料の動的強度特性（疲労、摩耗など）の改良

新規材料（複合材料、既存材料の組合せなど）の開発など一例としてはラバージョイナーがあげられる。

(3) 水中重量の低減

- ・形状の変化……H.C.L、C.Lなど
- ・中間ブイの使用
- ・浮力材の使用……ラバー・ジョイナーなど

参考文献

- 1) 船用機器開発協会「夢」 №43、昭54.3
- 2) P.Gawa, et al., A Feasible Concept for An Integrated OTEC Floating Structures, OTC 3334, 1978.
- 3) L.C.Trimble, et al., Ocean Thermal Energy Conversion, OTC 2258, 1975.
- 4) 川上ら、チェーンおよびラバージョイナーの引張試験、シバタ工業技術レポート、昭55.10

6.6.2 深海施工法

石油掘削用のリグや海上作業船等の一時係留は水深 500 m 程度の水深で行われている。海洋構造物の永久係留としては 300 m が現在のところの実績であり、これらは、石油生産プラット・フォームの支援係留システムで、水深 335 m で SHELL 社 Cognac プラットフォーム、水深 274 m で EXXON 社 Hondo プラットフォーム等が設置されている。いずれにしろ、深海域永久係留設備の建設は少く、施工に関する資料も十分得られない。そのため、必ずしも深海に十分適用可能とは思えないものや、概念だけのものをも含めて調査した。

深海永久係留システムの施工実施にあたっては、

- (イ) 施工機器、アンカー等のロワリングとそれら位置保持システム
- (ロ) 海上作業船の係留と位置保持システムおよび係留用機器のハンドリング設備
- (ハ) 施工の制御、監視システムと施工度の検査法
- (ヲ) 耐波浪、耐潮流性に富んだ施工システム

等の要素技術の開発は重要であるが、ここでは言及しない。

一方、深海係留システムとして想定されるものは、

- (イ) アンカ／ムアリングラインとの組合せ
- (ロ) ベース・ストラクチャーと浮体との機械的接続

であろう。

これらの係留システムに関し、以下に示すように分類し報告する。

- (イ) ドラグ／グラビティ・アンカーの施工
- (ロ) 特殊アンカーの沈設
- (ハ) 杭式・アンカーの施工
- (ヲ) ベース・ストラクチャーと浮体の接続法

6.6.2.1 ドラッグ／グラビティ・アンカーの沈設

(1) 一般的なアンカリングプロセデュア(図6.6.2.1)

水深が増大すると、作業船の能力(馬力、アンカーハンドリング装置、位置保持)が一段と要求される。

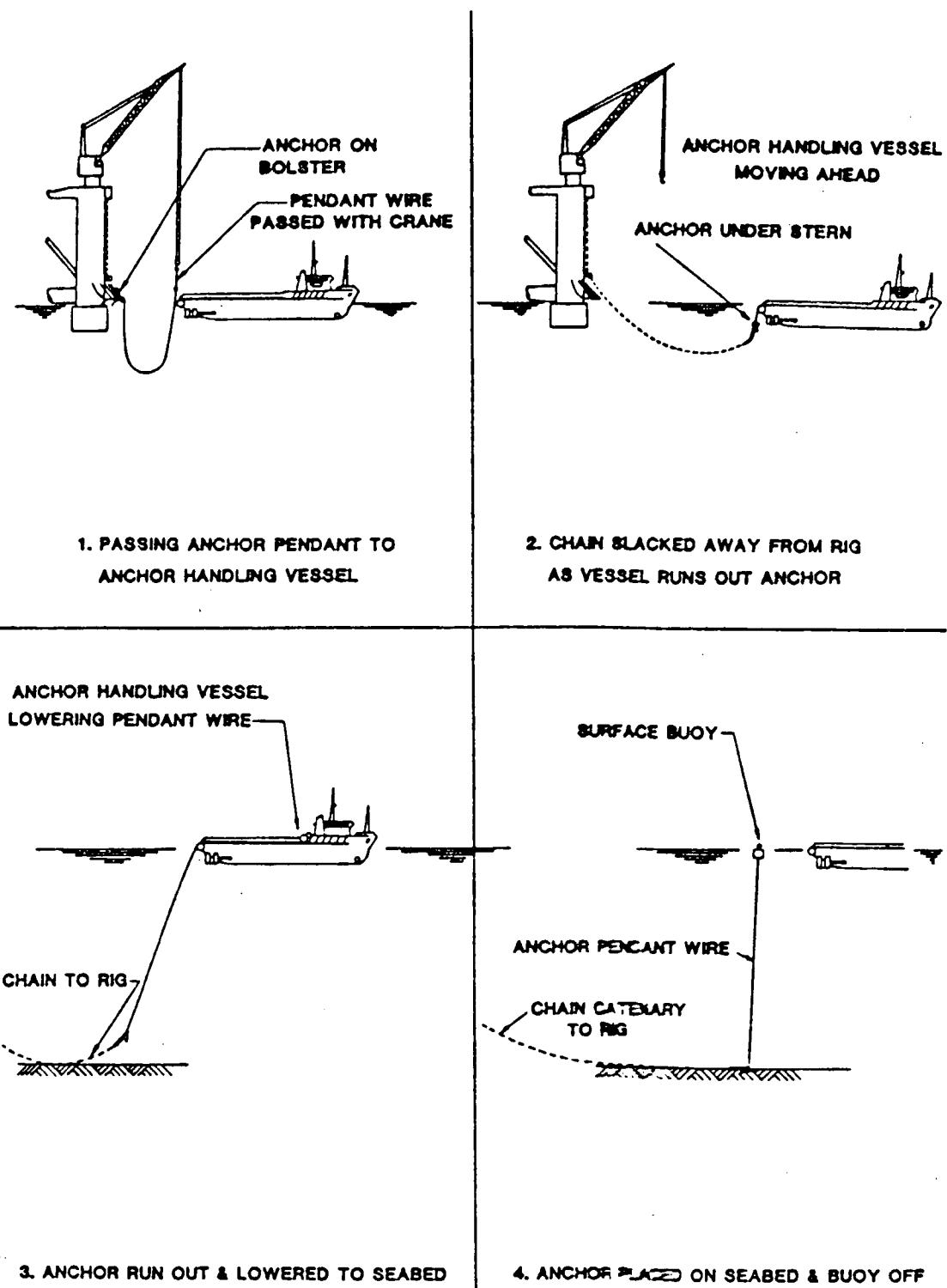


図6.6.2.1 一般のアンカーの沈設法¹⁾

(2) ガイドタワーにおける係留ライン施工法

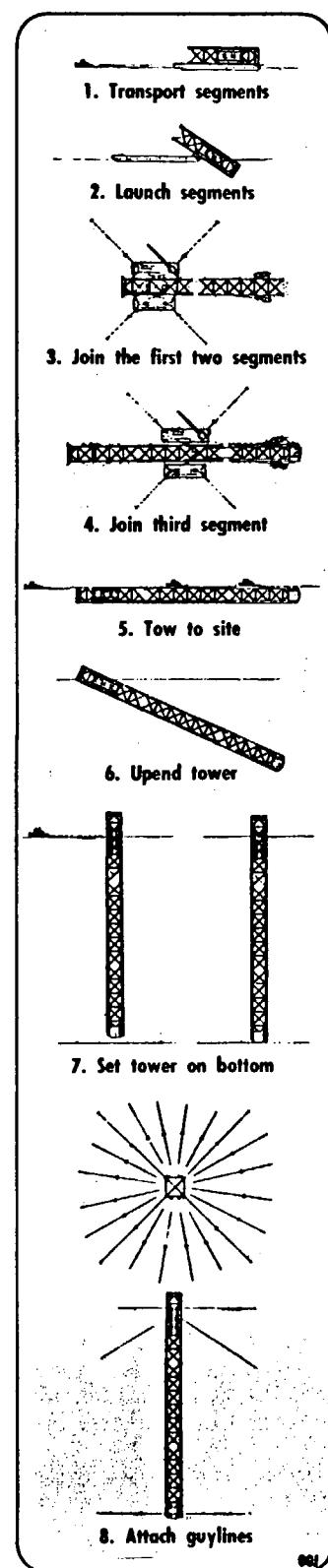
(1) ガイド・タワーの施工プロセデュア(図6.6.2.2)

構造体を2つ以上のセグメントに分割し輸送し、現地あるいは静穏海域で一体化を計る。

その後浮体は浮力コントロールにより建てられ、3~4体の仮設ラインで係留される。

そして、上部に取付けられた浮力用チャンバーに注水し、着底させ、最後にガイラインが取り付けられる。このあと、デッキストラクチャーが、クレーンワークによりとり付けられる。

図6.6.2.2
ガイド・タワーの施工法²⁾



(d) 係留装置の施工プロセデュア(図6.6.2.3)

ガイドラインの設置は次の2通りの方法が提案されている。

- i) バージにより、ガイドラインをタワー上端部のフェアリーダを通して引き出し、クランプとアンカーにより海底に設置する。
- ii) アンカー、クランプを海底に設置してからガイドラインをタワーまでひき込み取り付ける。

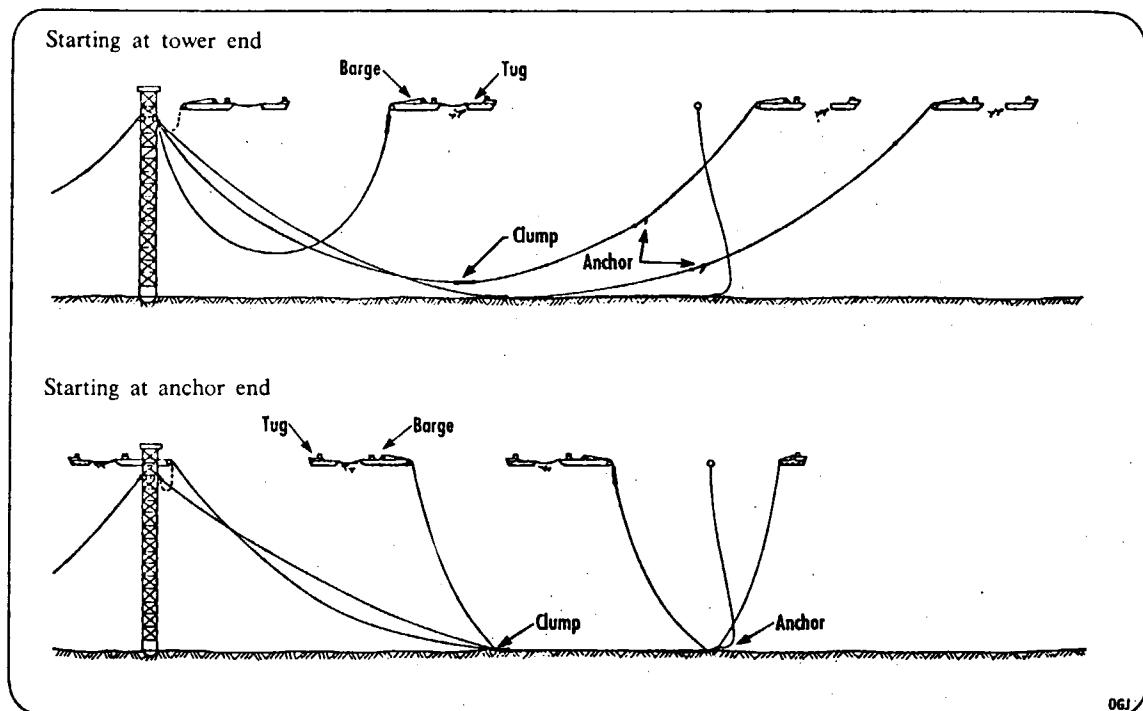


図6.6.2.3 ガイドラインの施工法²⁾

なお、クランプは図6.6.2.4の
ような構造を有し、異状時にはダ
ンバーとしての効果を発揮する。

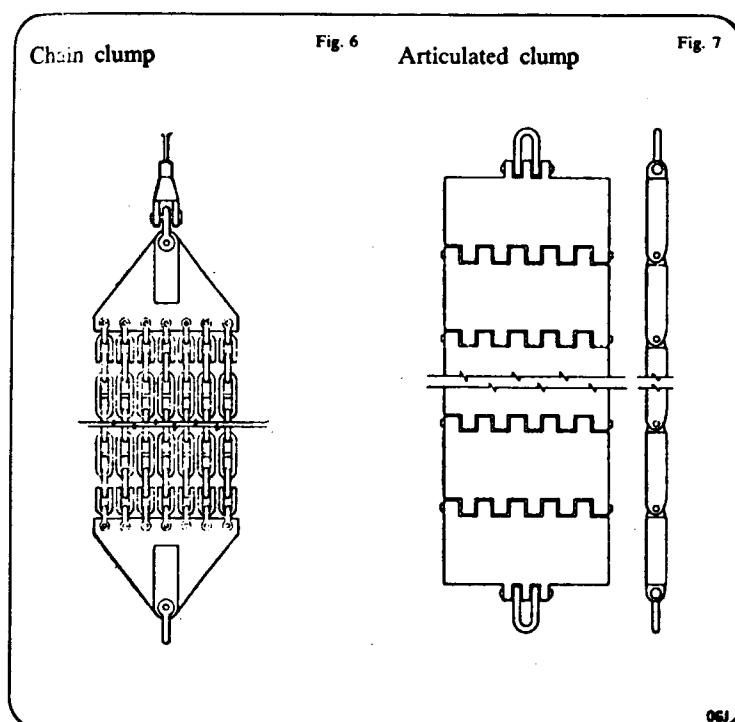


図6.6.2.4 クランプの構造²⁾

6.6.2.2 特殊アンカーの沈設

(1) サンクション杭の沈設

(1) サンクション杭の構造 (図 6.6.2.5)

施工性上から、打設杭、掘削／グラウト杭、ドラグ／重力アンカ、に代るべく、サンクション杭が提案されている。実際に外径 3.8 m なる 5～10 m の長杭のテストが行なわれており、この結果 200 t 台の把駐力が得られると報告されている。

原理は、底部が開いた中空杭を海底に落下させ、杭頭に設置しているポンプの吸入力により土中に本体を貫入させる。

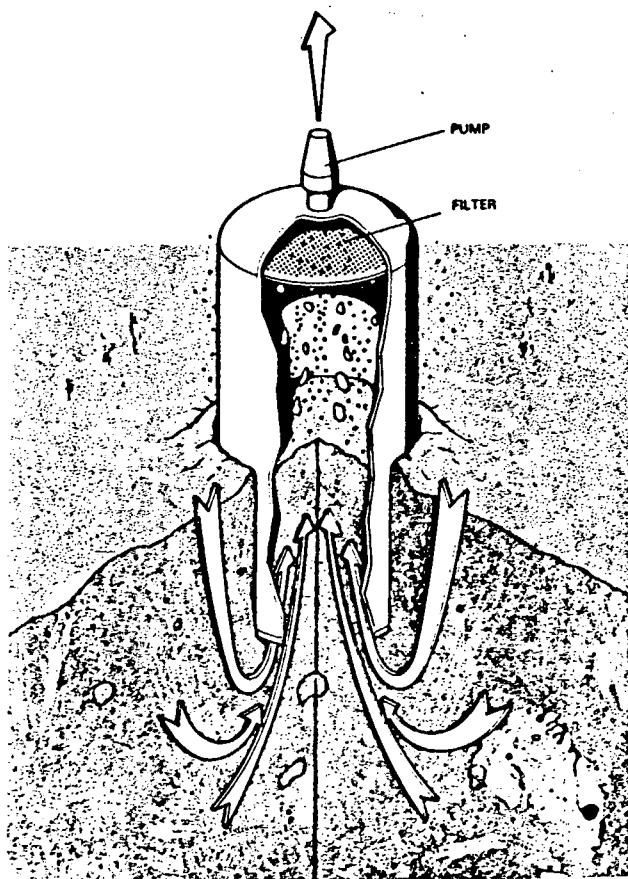


図 6.6.2.5 サンクション杭³⁾

(d) サンクション杭係留ラインの施工

法(図6.6.2.6)

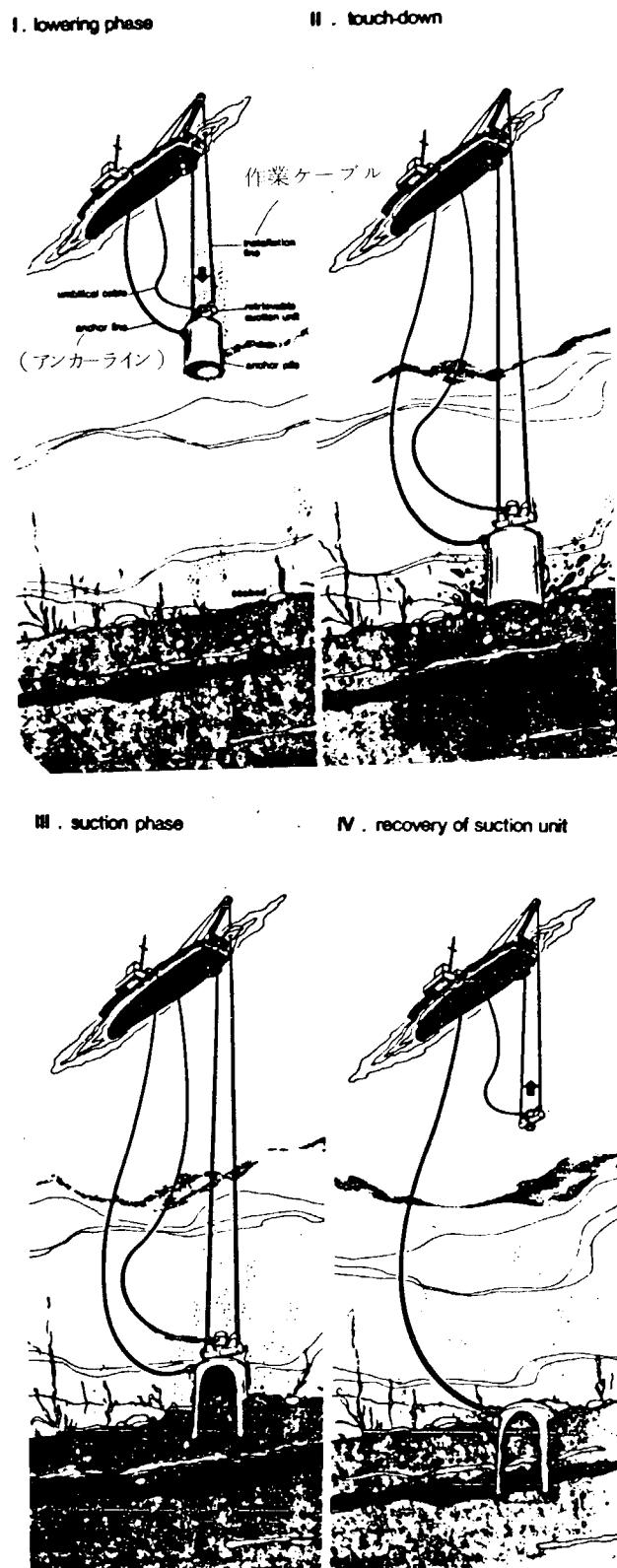


図6.6.2.6 サンクション杭の施工法³⁾

i) 施工手順は作業船上よりサンクション杭を施工用ワイヤーを使って海底に下げる。杭はポンプを駆動するためのアンビリカルケーブルやアンカーラインと本体からなる。

ii) 海底に着底するとある程度自沈する。

iii) つづいてポンプを動かし杭中の圧力を低下させその結果生ずる吸引力で杭を下げる。

iv) 所定の深さまで貫入した後、バルブを開き施工のためのアンビリカルケーブルを取り外して終了する。

(2) スラリーを用いた重力式アンカー施工(図 6.6.2.7)

図のような鋼製の構造体にスラリーをバラストとした動力式アンカーである。

施工プロセデュアは第一にアンカーを浮遊曳航し、現場打ち杭をガイドに作業船で沈設する。浮力を有しないものであれば、クレーンで海底に降ろす。

アンカーの向きや位置はトランスポンダでモニターしながら管理する。

海底着地後は、バルブ操作で海水を注水し安定させる。

その後、船上よりスラリーをライザーパイプにて送り、タンク内の海水と置換する。

アンカーの回収はこの手順を逆に行なう。

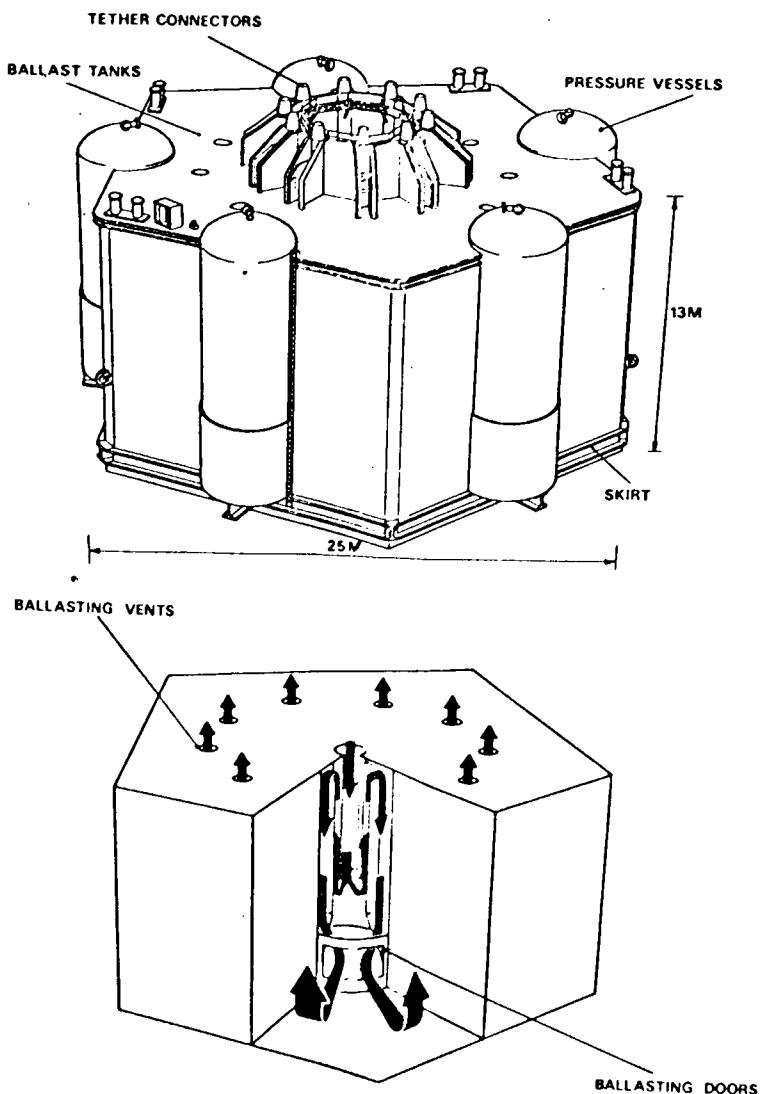


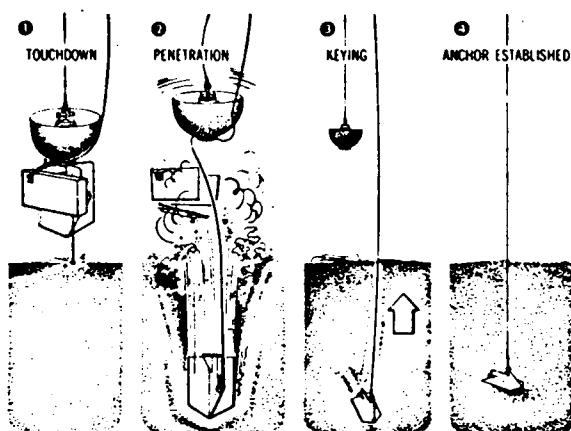
図 6.6.2.7 スラリーを用いたグラビティアンカー⁴⁾

(3) プロペラント・エンベッドメント・アンカーの施工(図6.6.2.8)

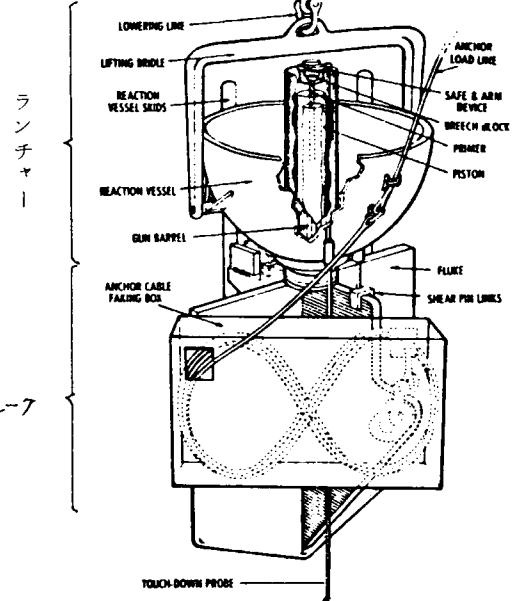
新しいアンカーとして提案され、引きぬき抵抗は砂質土で250K 1b(113t) 正規圧密土で150K 1b(68t) が期待できる。

沈設の手順としては、アンカーが着底する瞬間に、爆発を起し、フルーケを埋設させる。

構造は図のようにランチャーとフルーケからなる。

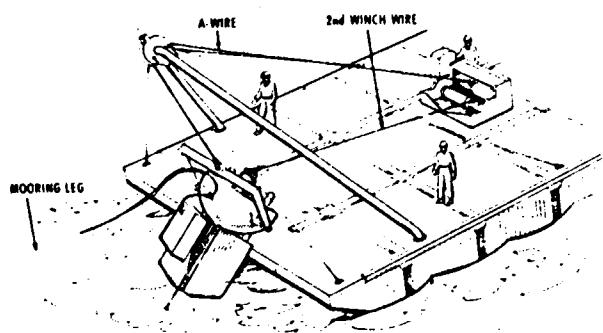


(イ) 手順



フルーケ

(ロ) 構造



(ハ) 船上作業

図6.6.2.8 プロペラントアンカーの施工と構造 5)

(4) QMC パイル・フルーケンカー(図 6.6.2.9)

杭とフルーケを結合したアンカーシステムが提案されている。

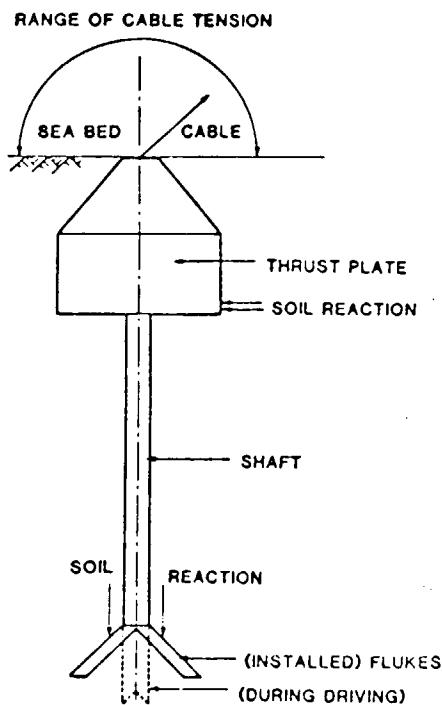


図 6.6.2.9 QMC アンカー¹⁾

6.6.2.3 杭式アンカーの施工

(1) 杭式アンカー(図 6.6.2.10)

ムアリングのアンカーとして杭を用いる場合の案で、杭とムアリング・ラインとの結合は杭に取り付けられたアイプレートあるいは、杭頭のフランジにつけたアイプレートによって行なわれる。永久係留装置としては実用度が高い。

(2) 水中ハンマーによる杭の打設(図 6.6.2.11)

1977年の段階では、杭径 84" のものを水深 1020'(306m) で 24 本打設した実績がある。今後、更に深海向けの水中ハンマーが期待されている。
ハンマーの構造としては、i) 水深相当以上の圧力の流体を連続的に送る構造。ii) 浮力を相殺するようなバラストを与えられる構造。iii) スリーブで杭頭にハンマーを保持できる構造。等が考えられる。

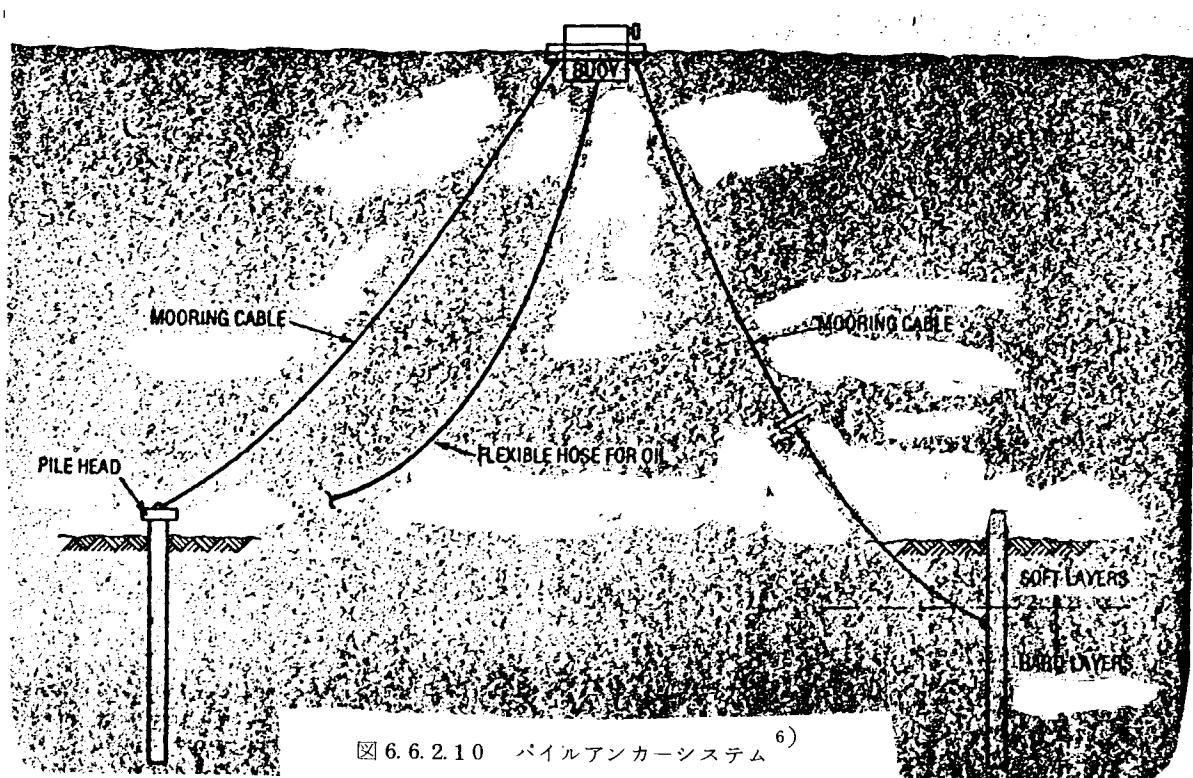


図 6.6.2.10 パイルアンカーシステム⁶⁾

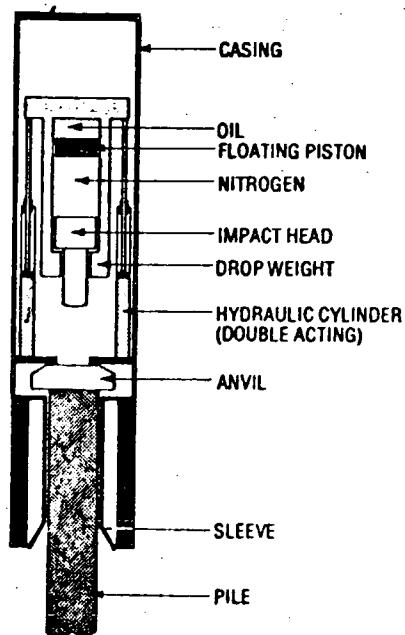


図 6.6.2.11 水中ハンマーの構造⁶⁾

水中ハンマーのハンドリング方法は海底土質によって変わる。海底土質が硬い場合、杭と水中ハンマーとをヨーク・ガイドラインからなるペベットシステムを通して海底に降下させ海底部のフレーム等に杭を装入した後、打設を行なう。

一方軟質土の場合は杭だけ自然貫入させ、その後にハンマーをセットする。特に十分横抵抗が期待できる場合は杭とハンマーを一体で降下させ自重貫入後、杭打ち作業を行う。

水中ハンマーは2本のガイド・ラインを通して取り離して点検したり、杭頭への再設置が行われる。ペベットシステムのようにガイドラインを用いる場合、

図6.6.2.1-3に示すように、海底部の構造物と作業船の運動や潮流等影響で杭頭とガイドラインと干渉があるのでエレベータ（あるいはヨーク）を用いた方法がとられる。

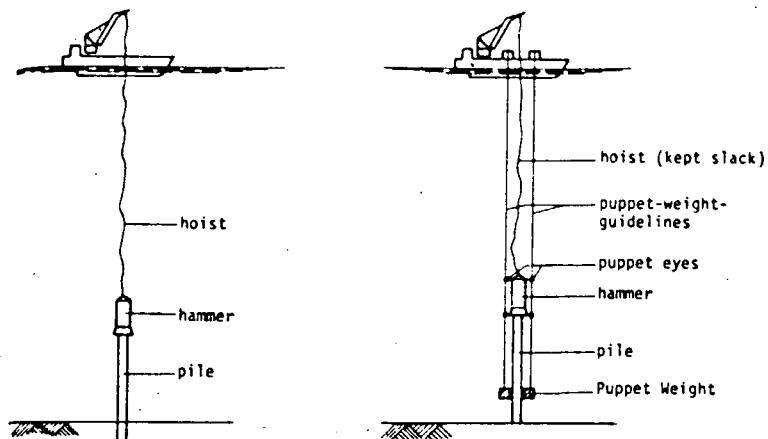


図6.6.2.12 水中ハンマーによる打設⁷⁾

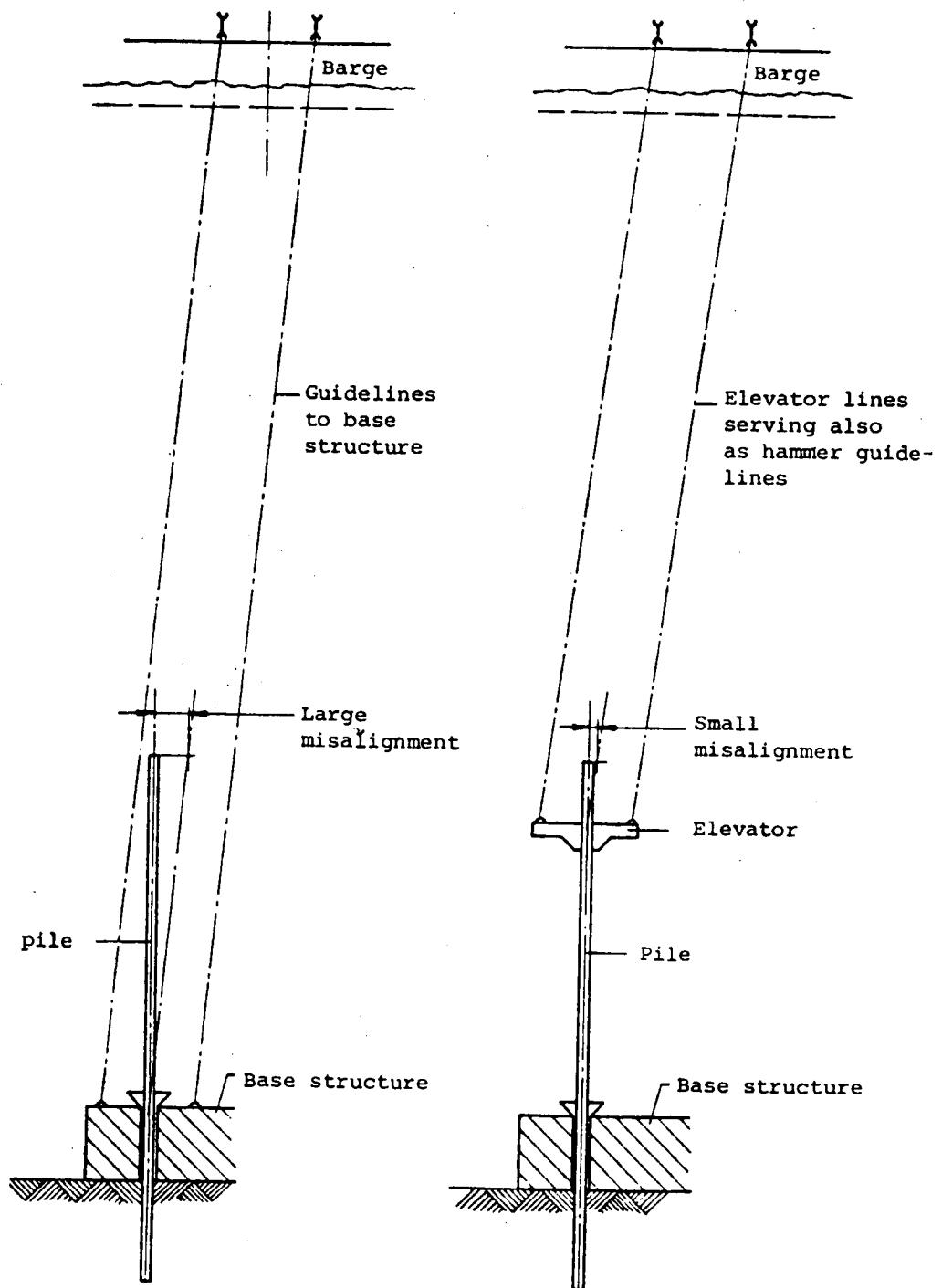


図 6.6.2.13 エレベーターを用いる場合

(3) ジェティングによる杭の打設(図 6.6.2.14)

前述したLOGNAC プラットフォームの永久係留体としての支援システムの施工において、スプリング・ブイ、埋設アンカバブルの設置にはジェティングが行われる。

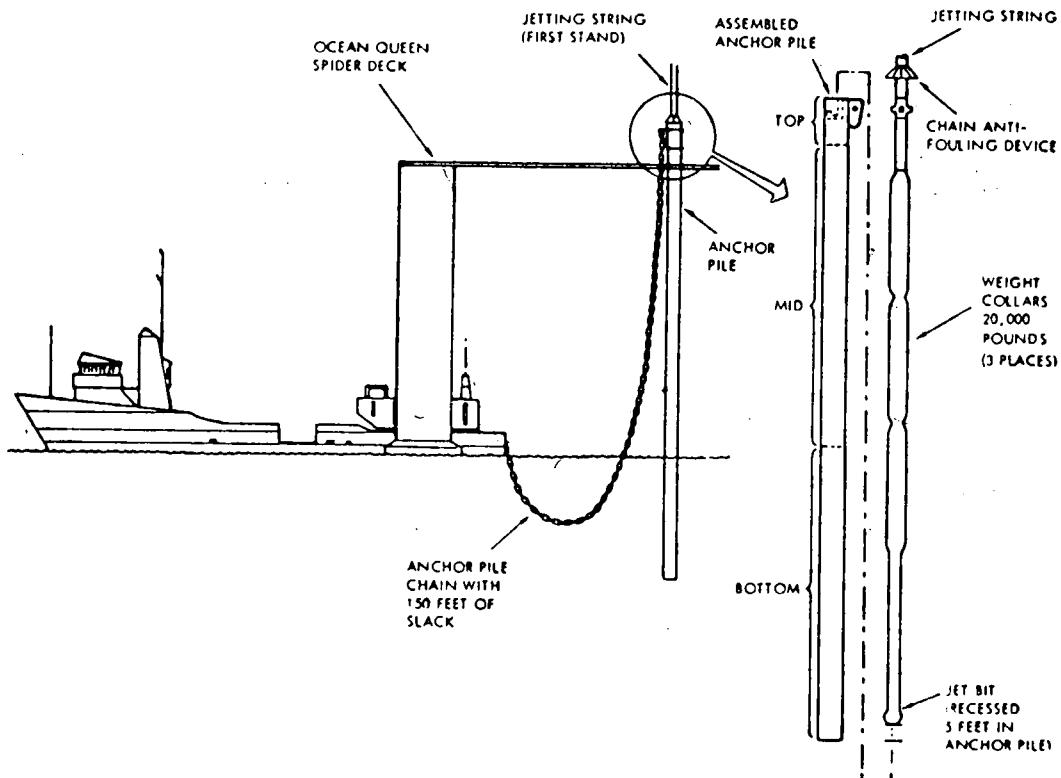


図 6.6.2.14 ジェティングによる杭の打設 8)

作業はあらかじめ杭のアイプレートにチェーンを取り付け、杭内にジェティング・トールを操入しておく。全体はチェーンが杭内にもぐり込まないよう落下防止工がとりつけられた 20,000 ポンドの重量からなるカラーから構成されている。

このトールの下端にはスタビライザーと 16" ビットのジェットが杭底から 5 フィート上に位置するよう丁ラッチで取り付けられる。

施工の手順は以下の通りである。

- I) ジェティング・トールを杭に操入しこれを海底に降下させる。
- II) 同時にチェーンを繰り出す。
- III) 杭が海底に着地すると同時に、マッドポンプを運転し約 100 gpm で、海水を用いジェティングする。
- IV) ジェティング作業は 2 ~ 4 時間にわたった。

なお、このアンカーの把駐力は 432 キロポインツであり海底下 260 フィートまで打込まれた。
(約 200 t) (80M)
杭径は 30"、肉厚 1" である。

(4) 掘削／グラウト杭の施工(図6.6.2.15、図6.6.2.16)

硬質地盤の場合や、重力式アンカーでは把駐力が不足する場合に用いられる。施工手順は次の通りである。

- i) 掘削装置により所定の深さまで掘削する。
- ii) 杭を操入する。
- iii) セメントィング・ツールを杭頭に戴せ、地盤と杭間をグラウトする。

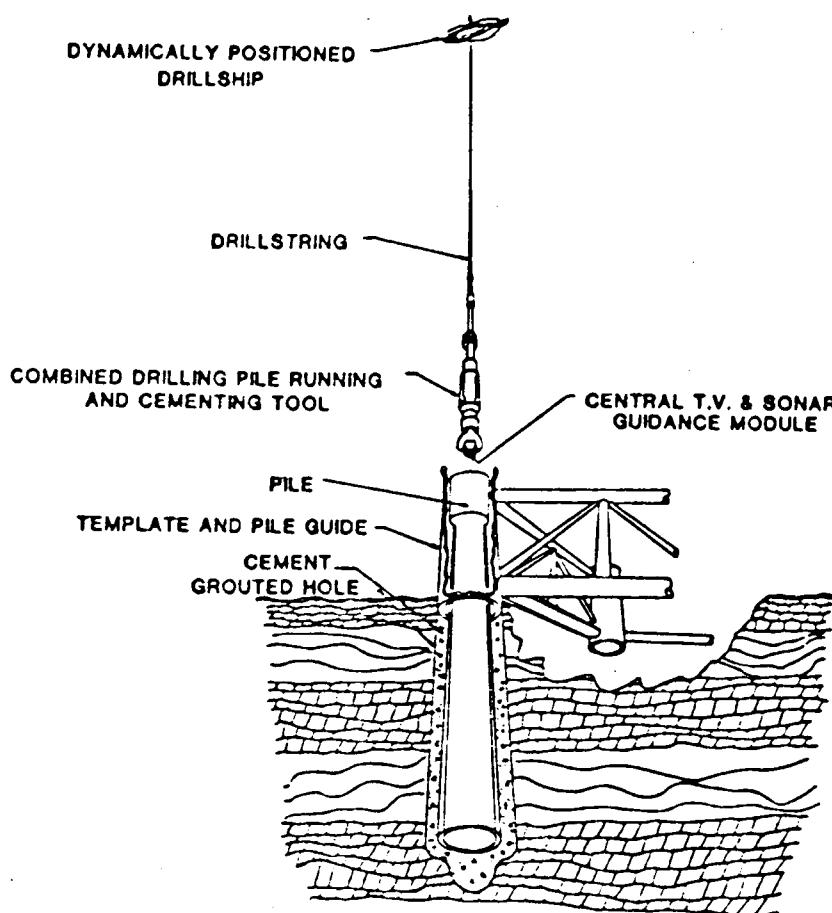


図6.6.2.15 掘削／グラウト杭の施工¹⁾

そして、適用例案と
してOTEC用のパイル・
テンプレートがある。
このテンプレートはテ
ンションレグの下部構
造でもある。

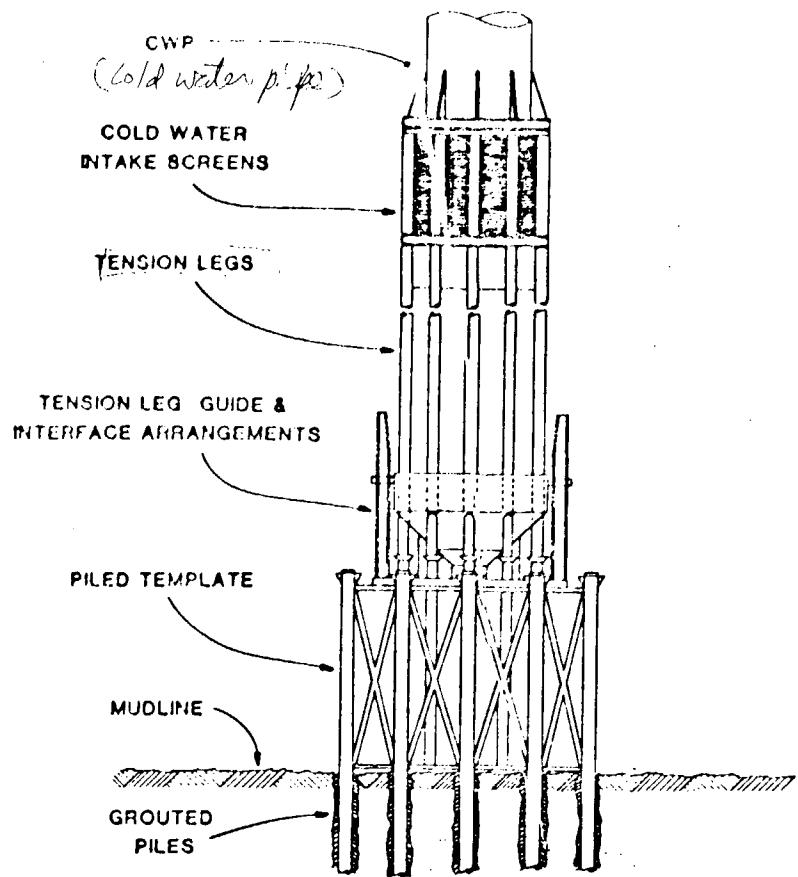


図 6.6.2.16 挖削／グラウト杭の施工案 1)

(5) ジャキング・ツールによる杭の打設

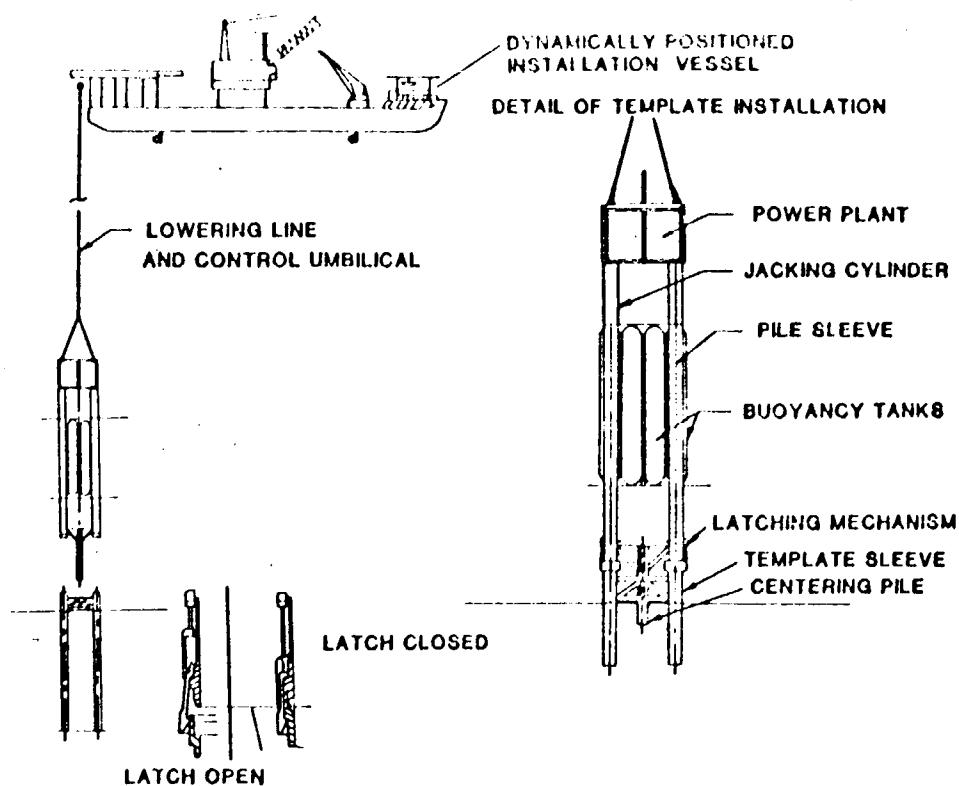


図 6.6.2.17 ジャキング・ツールによる打設 1)

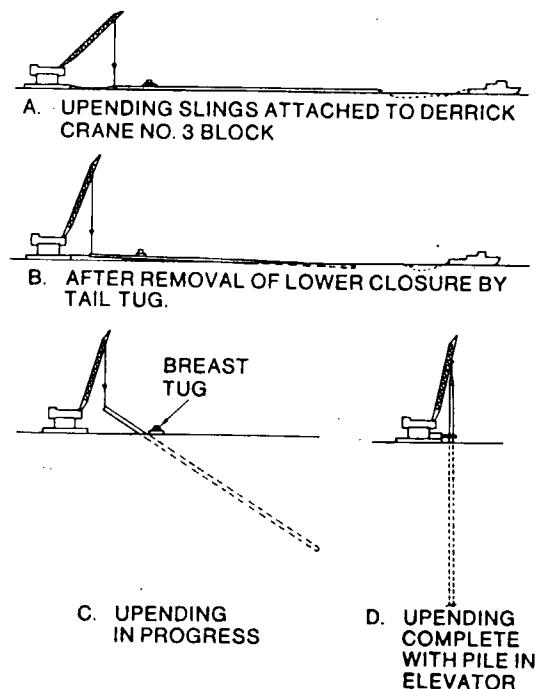
アイデアの一段階であるが杭の打設をハイドロリック・ジャッキで行う。このツールの四隅にスリーブが設置され、それに杭を操入し、その頭部にジャキを載せる。この位置決めはソナーとスラスターを用いる事が検討されている。また、とりつけられた浮力タンクにより、このツールのあげ降ろしや、注水を行い杭打設の反力を自重で受ける。ツールと海底部のテンプレートの結合は、ツールが降りて来るとメカニカルにラッチするような機構となっている。

(6) 杭打施工一般

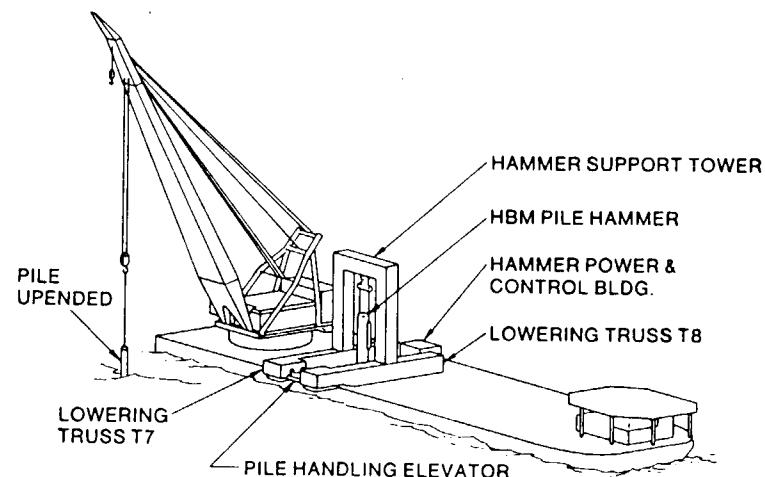
(イ) 長尺杭の建て込み(図 6.6.2.18)

水深が深くなると長尺杭のハンドリングが重要である。曳航された杭の片端のクロジャープレートを切り、注水していくと杭は傾く。更に中間部に設けたクロジャープレートをとり更に注水し、5~10分位いで建てこむ。

杭のハンドリングはエレベーターを用いて行う。このエレベーターを介し杭を固定し注水し更にロワリングする。



(ロ) アッペンディング



(ロ) ロワリング装置

図 6.6.2.18 長尺杭のハンドリング 9)

(ロ) 杭の建て込みの監視(図6.6.2.19)

杭の建て込みは図の

のようにTV・カメ

ラやソナーでモニタ

ーしながら行われる。

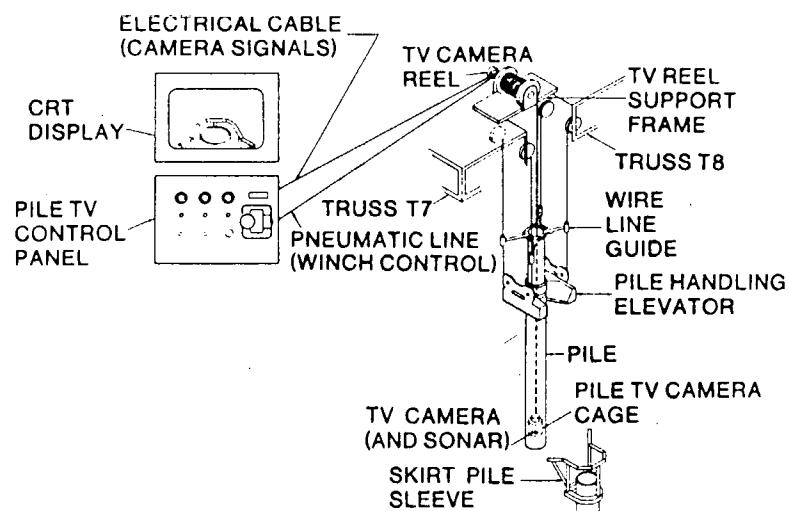
スカート杭ではス

リーブの位置まで、

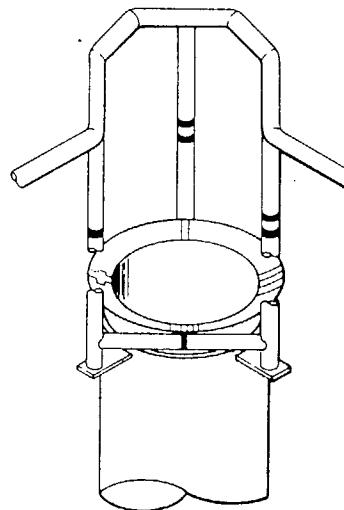
ガイド・ワイヤーに

より保持しロワリン

グした例もある。



(イ) モニタリングシステム



(ロ) スリーブ

図6.6.2.19 杭建て込みのためのモニター
とガイド、スリーブ構造⁹⁾

(イ) 単杭設置のための仮設テンプレート(図6.6.2.20)

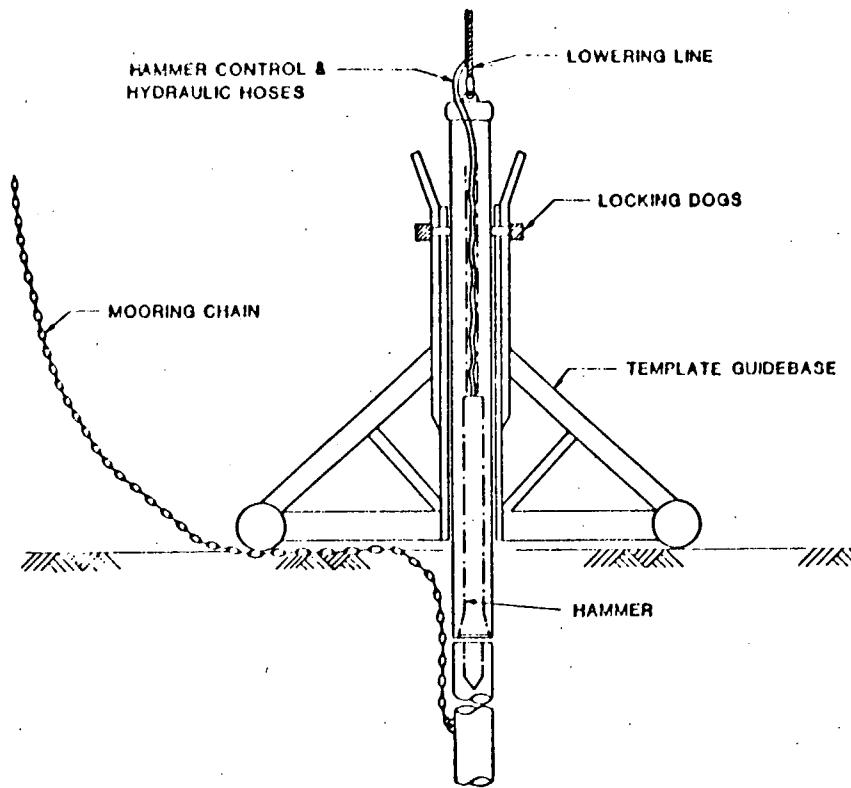


図6.6.2.20 仮設テンプレートによる杭の建込み¹⁾

軟質地盤ではハンマー・杭を一体でロワリングし自重で建て込み、その後、杭を打設する方法や、ブレットシステムといわれるガイド・ラインを用いた建て込みが行われる。一方、図6.6.2.20のようにテンプレートを用いてパイルを位置保持し打設することも行われる。

(=) テンプレートのロワリング位置保持(図 6.6.2.21)

テンプレート・ロワ

リングのための位置保

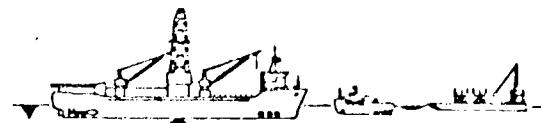
持はトランス・ポンダ

ーにより行うことが多

い。図にはテンプレー

ト・ロワリング手順を

示したものである。

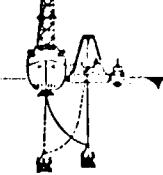


1 ANCHOR TEMPLATE BARGE ARRIVAL

2. LOWER TEMPLATE WITH "A" FRAME



3. TRANSFER LOAD FROM
"A" FRAME TO DRILL
SHIP DRAWWORKS



4. CONNECTING
TRAILING LINE
TO TEMPLATE



5. LOWERING
TEMPLATE AND
TRAILING LINES

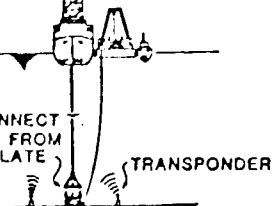


図 6.6.2.21 テンプレートのロワリング 1)

(分) 杭の切断 (図 6.6.2.21)

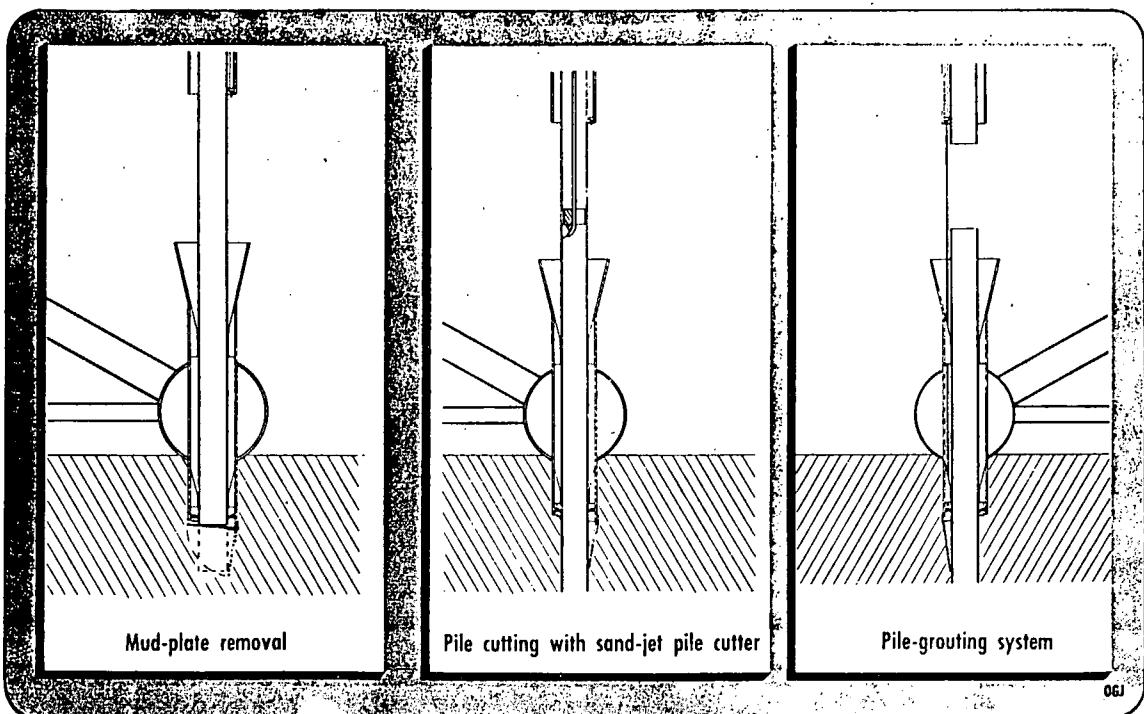


図 6.6.2.21 杭の切断 11)

打設杭は不必要的部分は切断される。図はアイデアであるが次の要領で切断が行われる。

- i) 杭のスリーブに杭を操入する。
- ii) 杭の操入後マッド・プレートをとりさる。
- iii) 所定の長さまでの杭を打設する。
- iv) サンド・ジェットによる杭の切断を行う。
- v) グラウト作業。

図に示されるように打設後の水中部の杭は 1) 切断、2) フォロワーの使用、3) 特殊な継手をもつフォロワーを使用により取り除かれる。

6.6.2.4 海底部構造と浮体の接続法

(1) SALM ブイ・ライザー設置(図 6.6.2.23)

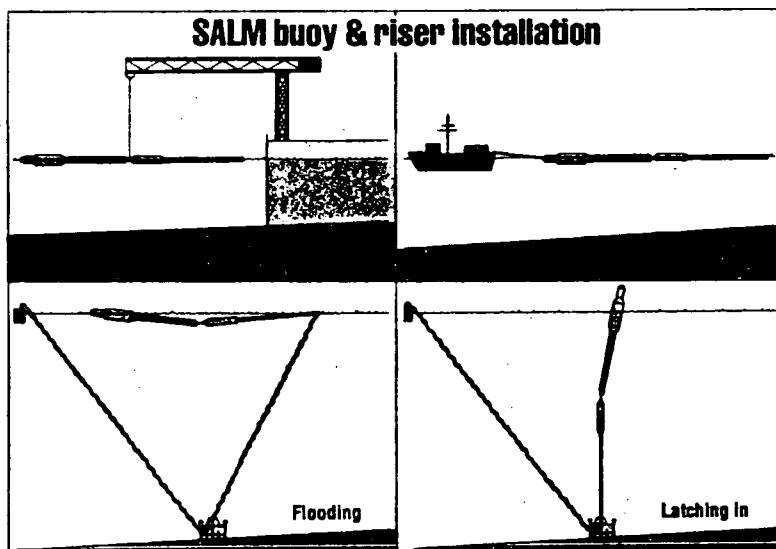
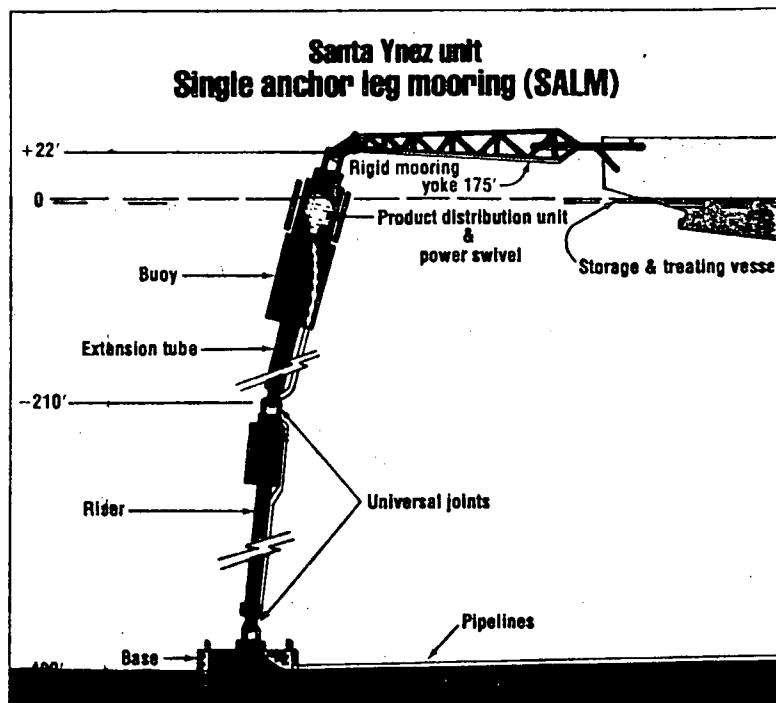


図 6.6.23 SALM施工¹⁰⁾

図にはHondo プラットフォーム、払い出し設備である SALM である。

水深 490 フィート (150M) の施工例である。施工はブイ／ライザーの曳航からはじまる。

次にあらかじめ、海底に設置された下部構造に施工用ラインを通す。ひきつづき、浮力調整を併用しブイ／ライザーを下部構造にラッチし留める。

(2) T、L、P のためのレグのアンカー法 (図 6.6.2.24)

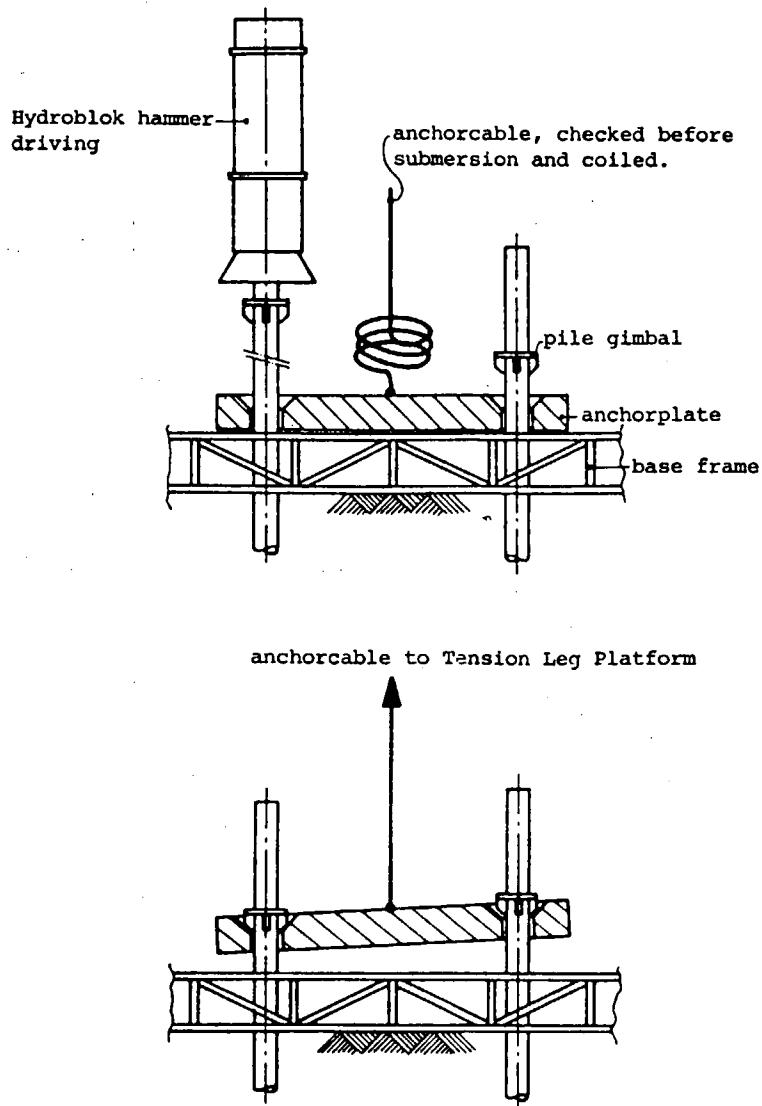


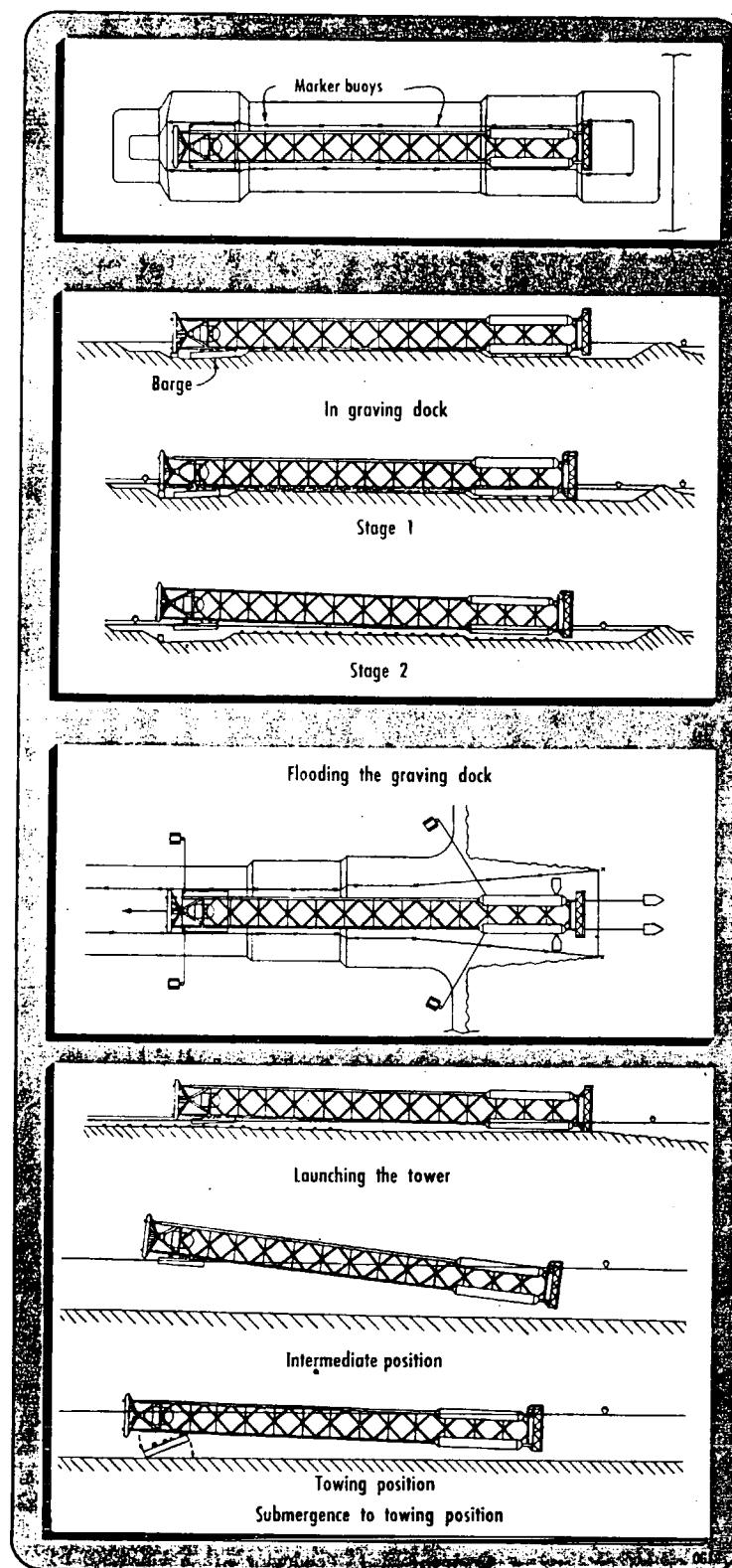
図 6.6.2.24 T、L、P のためのレグのアンカー施工法⁶⁾

T、L、P のためのアンカーシステムで PAPS (Piled Anchor Point System) と呼ばれるものである。

マンカーブレートはイコライザーの機能として役割をはたす。

施工はベース・フレームをアンカーブレートを杭で固定するため水中ハンマで行う。

(3) ブイヤント・タワーの施工 (図 6.6.2.25)



11)
図 6.6.2.25 B.T. の施工

デバラスト機能を有する特別に掘削して作られたドライ・ドックで構造は製作される。

デッキは進水まえに構造物に取り付けられる。

構造物は進水され、ドックより浮遊し、輸送開始点まで引出される。そのため二つの浮力タンクと進水バージが用いられる。

以下、手順を示す。

- (イ) デッキ側が浮くまでドックを浸水。
- (ロ) 底部側が浮くまで、進水バージをデバラストする。
- (ハ) 海水面までドックを浸水。
- (ヘ) 進水バージのバラストをすべてぬく。

4つのクレーンと2台のタグでドックをはなれる。水深30m位の所で、進水バージを取り脱し、輸送開始する。

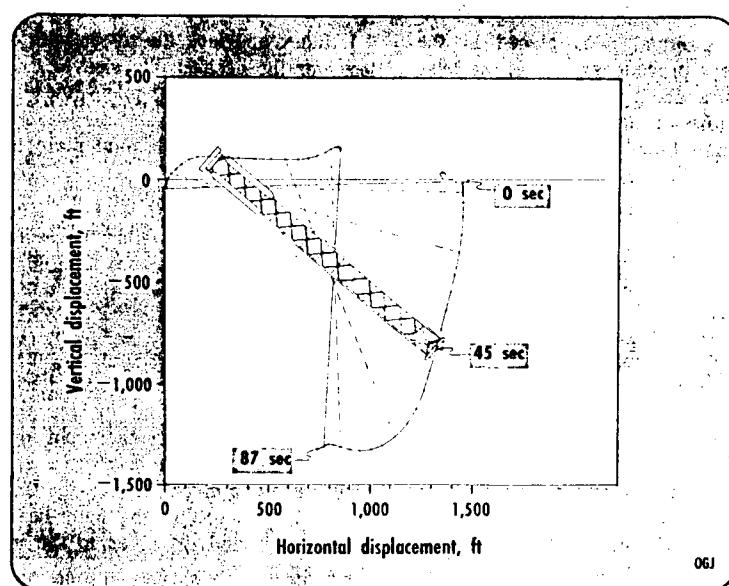


図 6.6.2.26 タワー部のアッペンディング 11)

現地に曳航されたタワー部は、底部に取り付けたタンクに注水することで、図 6.6.2.26 に示されるようにスイング・ダウンする。デッキ側の2つのタンクで吊り下げられた状態で建つ。ここで、このタンクに更に注水して海底に着底させる。このあと下部構造に杭を打ち込み、海底に固定する。

参 考 文 献

- 1) "DEEPWATER HIGH CAPACITY MOORINGS" OTC number 4050
- 2) "Guyed tower platform design nearing offshore test on Gulf of Mexico" Oil & Gas Journal July 4, 1975
- 3) "Field Trials with Large diameter Sunction Piles" OTC number 3817
- 4) "Tethered Buoyancy Platform Production System" OTC number 3881
- 5) "Large Propellant Embedment Anchor for Offshore Moorings" OTC number 3668
- 6) "Submarine Pile Driving for Deepwater Installations" Ocean Resorces Eng. Sep., 1977
- 7) "Under water Pile driving. Todays Experiences and What is About to Come." BOSS 79
- 8) "Marine Equipment and Procedured for the Cognac Platform Installation " OTC 3498
- 9) "Installation of the Pile Foundation for the Cognac Platform." OTC 3497
- 10) "Marine Construction Report" Offshore Nov 1980
- 11) "BUOYANT TOWER WOULD FOLLOW DEEPWATER PLATFORM DRILLING" OIL&GAS JOURNAL OCT. 28, 1974

6.6.3 維持補修方法

係留設備の維持補修は、一般に法令に基づいて実施する検査と通常の自主的に実施する保守点検等を行って異常箇所を発見し、その異常箇所を正常に復帰させるか経年劣化状態を調べて復帰させる時期を推定する等であるといえる。したがって、係留設備の維持補修は、広範囲かつ多岐に亘るので、法令に基づく検査及び自主的な保守・点検等に関しては概説するに止め、係留設備の監視法及び検査法について現状を記述することにする。

6.6.3.1 法令に基づく検査

係留設備は、法令に基づいて検査を受けなければならないようになっている。その検査の種別は次の通りである。

(1) 製造検査及び第1回定期検査

製造検査及び第1回定期検査においては、係留設備について設計検査を含め、材料、配置、構造、寸法並びに工事等の詳細検査が義務づけられている。

(2) 定期検査

第1回の定期検査終了の日から4年ごとに係留設備について細部に亘る綿密な検査を行い、係留設備が正常な状態にあることを確認することが義務づけられている。

(3) 第1種中間検査

第1種中間検査は定期検査または第1種中間検査終了の日から2年を経過した期日に係留設備が正常な状態にあることを確認することが義務づけられている。

(4) 臨時検査

臨時検査は、定期検査または第1種中間検査の時期以外の期日で係留設備に損傷が生じるか修繕もしくは変更しようとする場合、検査の要請があった場合または検査の必要性が生じた場合に行う検査である。

6.6.3.2 自主的な保守・点検

自主的に行う保守・点検は、1日1回以上の日常点検、年2回以上の定期自主点検等があり、点検表及び記録簿等を作成するが義務づけられている。

6.6.3.3 検査・点検の項目

係留設備は、係留方式によって検査・点検する項目が相違するが、主要な項目としては次に掲げるものである。

- (1) ドルフィン、ゴムダンパー及び連結装置
- (2) アンカー、チェーン及びロープ
- (3) ウィンドラス及びウインチ
- (4) シャックル及びスイーブル
- (5) 中間ブイ及び中間シンカー
- (6) その他検査・点検を行う必要があると認められる箇所

これらの箇所に関しては、製造上の欠陥、腐食、磨耗、変形、生物付着、捩れ、キンク、疲労及び作動等に関して調べる必要がある。

これまでの事故例から想定して特に注意を払って入念に検査・点検を行う必要がある箇所は、シャックル、スイーブル、チェーン及び中間ブイ等であるといえる。

6.6.3.4 監視法及び検査法

係留設備の維持補修方法としては、これまで記述して来た法令に基づく検査、自由的な保守・点検及び検査・点検項目等が如何に詳細かつ充実したとしても監視装置や検査・点検装置の充実が最も重要な課題であるといえる。

それは、水面上であれば従来の目視または既存の計測装置によって製造上の欠陥、腐食、磨耗、変形、生物付着、捩れ、キンク及び作動等について監視、検査または点検がある程度まで可能であり、水面下でも海洋構造物の浮上、ダイバーまたはモニター等によって多少の範囲の監視、検査または点検が可能であるといえる。しかしながら、水面上及び水面下の個所の疲労や残存強度等の予測及び非破壊検査並びに大水深域での監視、検査及び点検等については現有の技術では不可能である場合が多い。

したがって、現在の目視、計量、X線及び超音波等による製造時及び使用済の検査では、十分なる安全性が確保されるとはいえず、常時または定期的に監視、検査及び点検できる装置またはシステムの技術開発が不可欠であるといえる。特に、最近注目されているAE(Acoustic Emission)による非破壊検査法等の技術開発も必要であろう。

6.6.4 海底土質

6.6.4.1 海底土質の分類法

海底土質の分類は、通常土質工学会の前進である日本土質基礎工学委員会が土木・建築・農業土木等の分野に關係ある土質試験法を統一的に決め、日本工業規格の原案を作成したものに基づいて最近、土質工学会が土質試験法の中に日本統一土質分類法(JISF 規格 M 1-73)を示している。

この土質工学会基準によれば海底土質も分類できると思われる。

それによると土の分類は、粒径 75mm 以下の土質材料と粒径 75mm 以上の岩石質材料及び廃棄物とに大別して行っている。

まず、土の粒度成分に区分してその呼び名を示したものが図 6.6.4.1 である。

つぎに、粒度 75mm 以下の地盤材料の土の分類、分類名及び分類記号を示したものが図 6.6.4.2 である。

また、土質名とその定義または説明並びに工学的分類体系との対応を示したものが図 6.6.4.1 である。

その他、柱状図用図式記号が図 6.6.4.3 で、土層断面の彩色及び土層英字記号が表 6.6.4.2 である。

最後に、一般に土の分類としてよく用いられている三角座標はふるい分けによるものと比重浮ひょうによるものとで図 6.6.4.4 に示す 2 種類である。

以上が日本統一土質分類法の一部を紹介したものである。

他の土質分類法として図 6.6.4.4 に近いが僅かに相違している図 6.6.6.5 の三角座標分類法がある。左図は米国道路局のもので一般に広く親しまれているもので、右図はミシシッピー河管理委員会のもので運輸省を初め港湾関係でよく用いられているものである。また、AASHTO 分類法(表 6.6.4.3)、米国統一土質分類法(表 6.6.4.4)及びPIANC(常設国際航路会議)の分類法(表 6.6.4.5)等がある。

6.6.4.2 海底土質分布図

日本近海における海底土質に関する資料は、土質工学会の日本沿岸海底土質資料調査報告書が最も収集されており、それを再録すると付録表 6.6.4.6 に示すように莫大なものである。したがって、この表を参考にして必要個所の海底土質を判断することが可能であるといえる。

しかしながら、海底土質の表面層だけでアンカーやシンカーの把駐力に十分活用できるわけではなく、

埋設アンカー等では表面層だけでは不十分で海底土質構造を究明することも必要となる。

6.6.4.3 海底土質試験法

海底土質を単に 6.6.4.1において述べた分類法に基づいて分類しただけでは、海底土質に対するアンカーやシンカーの把駐特性が判断できるとはいえない。それは、これまで数多く実施されて来ている室内実験及び実海実験のアンカーやシンカーの把駐特性の結果に相当バラツキがあることから判断できよう。

一方、土質工学会の土質試験法によると土質試験方法の種類を見ると表 6.6.4.7 に示すように観察判別試験、物理的性質試験、化学的性質試験及び力学的性能試験がある。そして、一般に土質調査、土質試験、現地実験、土質測量、ボーリング等が使われているが、お互に僅かに差があるものの広義の土質調査が土質を調べる総ての作業が含まれるのだそうである。また、実海で行うサウンディングの一種に貫入試験がある。この調査結果から判明する事項は、総合判定より構成土質の深さ方向の強度変化、支持層の位置及び軟弱層の有無等が判り、N 値から直接推定できることは、砂地盤では相対密度、内部摩擦角及び支持力係数等が求められて破壊や沈下に対する許容支持力が推定でき、粘土地盤ではコンシステンシー、一軸圧縮強さ、粘着力及び破壊に対する支持力等が求められる。したがって、アンカー・シンカーの把駐特性には静的または動的なサウンディングが重要であるといえる。その他、ボーリングやサンプリング等があるが、海底土質試料を採取する際に乱れる可能性があるので十分注意する必要がある。

以上から判断すると実際の海底土質の特性を知り、アンカー・シンカーの把駐特性を判断するには、サウンディングがなされている調査資料が最も役立つ資料であるといえる。

	1μm	5μm	74μm	0.42mm	2.0mm	5.0mm	20mm	75mm	30cm
クロイド	粘土	シルト	細砂	粗砂	細粒	中粒	粗粒	コブル	ポルダー
			砂			砾			
土質材料									

(注 1) 土質材料の粒径区分による粒子名を意味するときは、上記区分名に「粒子」という言葉をつけ、上記粒径区分幅の構成分を意味するときは、上記区分名に「分」という言葉をつけて、分類名、土質名と区別する。

(注 2) 土質材料の74μm以下の構成分を「細粒分」、74μmから75mmまでの構成分を「粗粒分」という。

図 6.6.4.1 粒径の区分とその呼び名

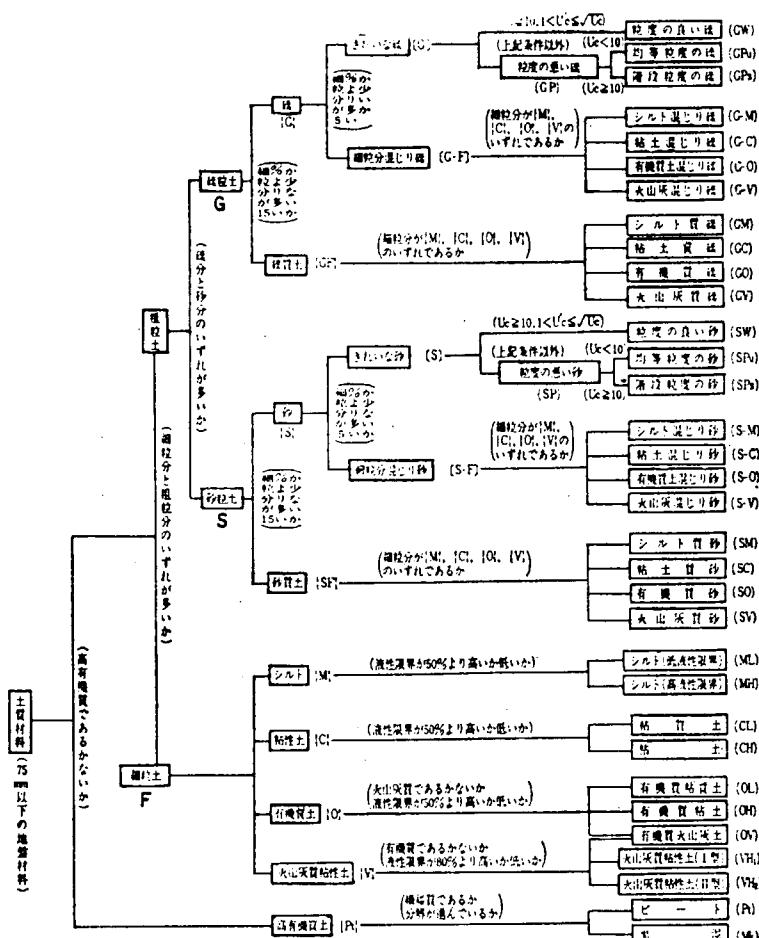


図 6.6.4.2 工学的土質分類体系

区分	分類名	電荷地プリンターコード	手書き式記号	区分	分類名	電荷地プリンターコード	手書き式記号
岩石質材料	硬岩	|||||	|||||	やや詳しい分類の例	きれいな砂 (G)	|||||	|||||
	中硬岩	|||||	|||||		粗粒分混じり砂 (G-F)	|||||	|||||
	軟岩又は風化岩	|||||	|||||		粗 質 土 (GF)	|||||	|||||
	ガルダ	BBBBBBB BBBBBBB BBBBBBB BBBBBBB BBBBBBB	○ ○		きれいな砂 (S)	|||||	|||||
	コブル	CCCCCCC CCCCCCC CCCCCCC CCCCCCC	○ ○		粗粒分混じり砂 (S-F)	|||||	|||||
	泥 [C]	XXXXXXX 0000000 0000000 0000000	○ ○		砂 質 土 (SF)	.....	.....
	粗 質 土 (GF)	0000000 0000000 0000000	○ ○		粘 質 土 (CL)	.....	.....
	砂 [S]	.....	○ ○		粘 土 (CH)	.....	.....
	砂 質 土 (SF)	.....	○ ○		有機質粘質土 (OL)	Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y	Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y
	シルト [M]	.....	○ ○		有機質粘土 (OM)	Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y	Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y
易 分類	粘 性 土 [C]	.....	○ ○		有機質火山灰土 (OV)	Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y	Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y
	有機質土 [O]	Y Y Y Y Y Y Y Y	○ ○		(VH ₁ , VH ₂)はVの4倍及び、ピート(P), 黒泥(M)は有機質土に付し、特殊記号を用いる。		
	火山灰質粘性土 [V]	.....	○ ○		貝 鰐	0000000 0000000 0000000	000 000 000
	高有機質土 [P]	Y Y Y Y Y Y Y Y	○ ○		浮 石	PPPPP PPPPP PPPPP PPPPP PPPPP PPPPP PPPPP PPPPP PPPPP PPPPP △ △	△ △ △ △ △ △
	電 質 土 [W]	VVVVVV VVVVVV VVVVVV VVVVVV	W		瓦 土・埋 土	[SP]	[SP]

図 6.6.4.3 柱状図用図式記号

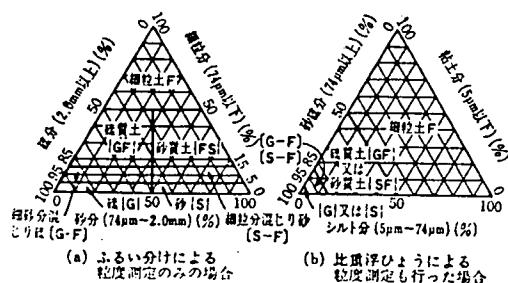


図 6.6.4.4 三角座標

表 6.6.4.1 土質名とその定義または説明並びに工学的分類体系との対応

簡易分類名	土質名	定義又は説明			工学的分類体系との対応	
砂	粗 砂 中 砂 細 砂	細粒分が 5% 未満	ほとんどの粒子が 2~75 mm の場合 〃 20~75 mm の場合 〃 5~20 mm の場合 〃 2~5 mm の場合 かなりの砂分を含む礫	(G)		(G)
	シルト 粘土 有機質土 火山灰	粗 砂 中 砂 細 砂	細粒分が 5% 以上 15% 未満	細粒分がシルト 〃 粘性土 〃 有機質土 〃 火山灰質粘性土	(M) (C) (O) (V) (G-M) (G-C) (G-O) (G-V)	(G-F)
礫質土	シルト 粘土 有機質土 火山灰	粗 砂 中 砂 細 砂	細粒分が 15% 以上 50% 未満	〃 シルト 〃 粘性土 〃 有機質土 〃 火山灰質粘性土	(M) (C) (O) (V) (GM) (GC) (GO) (GV)	(GF)
砂	漂流じり砂 粗 砂 細 砂	粗粒分が 5% 未満	礫を含む砂 ほとんどが 74 μm から 2.0 mm の場合 〃 0.42 mm から 2.0 mm の場合 〃 74 μm から 0.42 mm の場合	(S)		(S)
	シルト 粘土 有機質土 火山灰	砂 粗砂 細砂	細粒分が 5% 以上 15% 未満	細粒分がシルト 〃 粘性土 〃 有機質土 〃 火山灰質粘性土	(M) (C) (O) (V) (S-M) (S-C) (S-O) (S-V)	(S-F)
砂質土	シルト 粘土 有機質土 火山灰	砂 粗砂 細砂	細粒分が 15% 以上 50% 未満	〃 シルト 〃 粘性土 〃 有機質土 〃 火山灰質粘性土	(M) (C) (O) (V) (SM) (SC) (SO) (SV)	(SF)
シルト	砂質シルト シルト 粘土質シルト			砂分が目立つ ダレイターン シーエフ現象が現 るで乾燥強さ が低い。	$w_L < 50$ (ML)	(M)
粘性土	砂質粘土 シルト質粘土 粘土			砂分が目立つ シルトとシル ト質粘土の中 間的	$w_L \geq 50$ (MH)	
有機質土	有機質シルト 有機質シルト粘土 有機質砂質粘土 有機質粘土 黒ぼく、闇雲ローム(褐色)など		50% 以上	ダレイターン シーエフ現象がな く、乾燥強さ が高い。又は 中くらい。	$w_L < 50$ (CL) $w_L \geq 50$ (CH)	(C)
火山灰質粘性土	火山灰 土 関東ロームなど各地のローム			無機成分はシルト 無機成分はシルト を含み、 褐色又は無機成分は砂質粘 土色で、土 有機臭がある 無機成分は粘土	$w_L < 50$ (OL) $w_L \geq 50$ (OH)	(O)
				無機成分に火山灰質粘土	(OV)	
				火山灰質粘性土で $w_L < 80$ 〃 $w_L \geq 80$	(VH ₁) (VH ₂)	(V)
高有機質土	泥炭など 有機泥など			高有機質の腐有機質土 分解の進んだ高有機質土	(Pt) (Mk)	(Pt)

表 6.6.4.2 土層断面の彩色及び土層英字記号

地質区分	土 質	彩 色	土層の英字記号*
沖積層	表土、埋土、盛土	黄土色	埋立て材料を英字記号で示し、下に横線を付す。
	礫 (G)	黄緑色	AG
	礫質土 (GF)	黄緑色に水色の彩線入り	AGF
	砂 (S)	黄色	AS
	砂質土 (SC)	黄色に水色の彩線入り	ASF
洪積層	粘性土 (C)	水色	AC
	礫 (G)	緑色	DG
	礫質土 (GF)	緑に青の彩線入り	DGF
	砂 (S)	山吹き色	DS
	砂質土 (SF)	山吹き色に青の彩線入り	DSF
沖積層又は洪積層	粘性土 (C)	青又は群青色	DC
	シルト (M)	ねずみ色	AM 又は DM
	火山灰質粘性土 (V)	肌色	AV 又は DV
	有機質土 (O)	茶色	AO 又は DO
	有機質火山灰土 (OV)	肌色に茶色の彩線入り	AOV 又は DOV
	高有機質土 (Pt)	黒色	APt 又は DPt

* 第1文字のAは沖積層、Dは洪積層を示し、それに続く文字は土質を示す。洪積層、洪積層の同一地質時代の同種土質層に番号を付す場合は、上部より1, 2, 3の数字を添字として用いる。また、同一地質時代の上部・中部・下部の層であることを示すために、u, m, lの添字を用いてもよい。

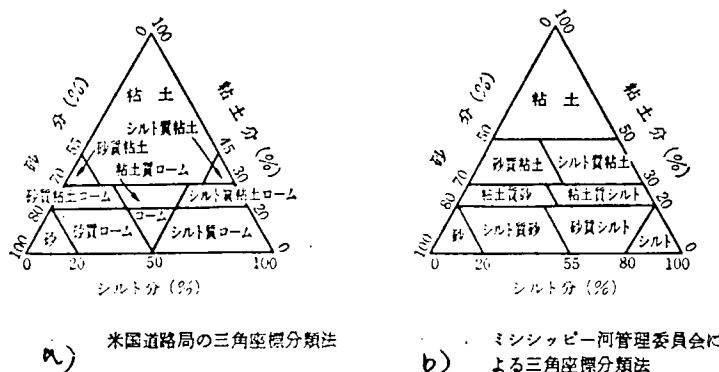


図 6.6.6.5 三角座標分類法

表 6.6.4.3

大分類	粗粒土 (No.200 ふるい通過量 35% 以下)						シルト、粘土質土 (No.200 ふるい通過量 35% 以上)				
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7			A-7-5*	A-7-6
ふるい分析 (通過量 %)											
No. 10 (2.00 mm)	50以下	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No. 40 (425 μm)	30以下	50以下	51以上	—	—	—	—	—	—	—	—
No. 200 (75 μm)	15以下	25以下	10以下	35以下	35以下	35以下	35以下	36以上	36以上	36以上	36以上
No. 40 ふるい通過分の性質											
液性限界	—	—	40以下	41以上	40以下	41以上	40以下	41以上	40以下	41以上	41以上
塑性指数	6以下	N.P.	10以下	10以下	11以上	11以上	10以下	10以下	11以上	11以上	11以上
普通の主要構成物	石片、礫、砂	細砂	シルト質又は粘土質の礫及び砂				シルト質土	粘土質土			
結果としての良否	優～良						可～不良				

注)* (A-7-5 の $I_p \leq w_L - 30$, (A-7-6 の $I_p > w_L - 30$)

表 6.6.4.4

主 要 区 分		分類記号	代 表 的 名 称	分類基準	
50 μm ふるい通過量が 50% 以上 75 μm ふるい通過量が 50% 以上	A-1 粒径分布の範囲	GW	粒径分布の良い礫 砂混合土 粒径分布はほとんど又は全然なし	$C_s = D_{10}/D_{60}$ が 4 より大 $C_s = (D_{10})^3 / D_{10} \times D_{60}$ が 1~3 の範囲	GW に関する基準に合わないもの
		GP	粒径分布の悪い礫 砂混合土 粒径分布はほとんど又は全然なし		
	A-2 粒径分布の範囲	GM	シルト質礫 砂-シルト混合土	アーベルグ限界が A 線より下、又は塑性指数が 4 より小	アーベルグ限界が下限の粒度部の場合は境界分類で二つの記号を用いる
		GC	粘土質礫 砂-粘土質混合土		
	A-3 粒径分布の範囲	SW	粒径分布の良い砂 粘土質砂 粒径分布はほとんど又は全然なし	$C_s = D_{10}/D_{60}$ が 6 より大 $C_s = (D_{10})^3 / D_{10} \times D_{60}$ が 1~3 の範囲	SW に関する基準に合わないもの
		SP	粒径分布の悪い砂 粘土質砂 粒径分布はほとんど又は全然なし		
	A-4 粒径分布の範囲	SM	シルト質砂、砂-シルト混合土	アーベルグ限界が A 線より下、又は塑性指数が 4 より小 アーベルグ限界が A 線より上で塑性指数が 7 より大	アーベルグ限界が下限の粒度部の場合は境界分類で二つの記号を用いる
		SC	粘土質砂、砂-粘土混合土		
50 μm ふるい通過量が 30% 以上 75 μm ふるい通過量が 30% 以上	A-5 粒径分布の範囲	ML	無機質シルト、極細砂、岩粉、シルト質又は粘土質細砂	塑性線図 細粒土及び細粒土の細粒分の分類用 新規部のアーベルグ限界は境界分類で二つの記号を用いる。	CH A 線 : $w_L - 0.73 (w_L - 20)$
		CL	塑性が低いないしは中ぐらいの無機質粘土 無機質土、砂質粘土 シルト質粘土、粒りけの少ない粘土		
		OL	塑性の低い有機質シルト及び有機質シルト 粘土		
	A-6 粒径分布の範囲	MII	無機質シルト、泥炭質又は非燃質細砂又は シルト、弾性のあるシルト	CL MII 及び OH	CH A 線 : $w_L - 0.73 (w_L - 20)$
		CH	塑性の高い無機質粘土 粘性の高い粘土		
		OH	塑性の中ぐらいないし高い有機質粘土		
高 有 機 質 土	PT	泥炭、泥炭その他の高有機質土	日本による判別、ASTM:D 2488 参照		

* 75 μm ふるい通過材料に基づく

(注) ふるいの ASTM 基準が一部 1970 年に改訂されている。

表 6.6.4.5 PIANC 分類法

種類	粒径(㎜)	識別	強さなど												
Boulders (巨礫)	200を超える														
Cobbles (大礫)	200~60														
Gravels (礫)	Coarse(粗) 60~20 Medium(中) 20~6 Fine(細) 6~2														
Sands (砂)	Coarse 2~0.6 Medium 0.6~0.2 Fine 0.2~0.06	乾燥時に僅かな粘性	シルトまたは粘土と混合すると固くしまった砂になる。												
Silts (シルト)	Coarse 0.06~0.02 Medium 0.02~0.006 Fine 0.006~0.002	粒子は肉眼で識別不能。乾燥したかたまりは指の力で粉末となる。	しばしばFine sand または粘土と混合されている。												
Clays (粘土)	0.002未満。ただしシルトと粘土は粒径だけの分類では、その区別が不正確である。	強い粘性と塑性をもち、ダイレタシードラムシーバーはない。 乾燥したかたまりは粉末にならない。	<table border="1"> <tr> <td>かたさ(その状態)</td> <td>剪断力kg/cm</td> </tr> <tr> <td>V.Soft(指でたやすくおしつぶせる)</td> <td>0.17元済</td> </tr> <tr> <td>Soft(指でたやすくこねることができる)</td> <td>0.17~0.45</td> </tr> <tr> <td>Firm(強く指でおさないといとこねられない)</td> <td>0.45~0.90</td> </tr> <tr> <td>Stiff(指でこねられない。親指でへこませられない)</td> <td>0.90~1.34</td> </tr> <tr> <td>Hard(固く、親指の爪でもへこますのう困難)</td> <td></td> </tr> </table>	かたさ(その状態)	剪断力kg/cm	V.Soft(指でたやすくおしつぶせる)	0.17元済	Soft(指でたやすくこねることができる)	0.17~0.45	Firm(強く指でおさないといとこねられない)	0.45~0.90	Stiff(指でこねられない。親指でへこませられない)	0.90~1.34	Hard(固く、親指の爪でもへこますのう困難)	
かたさ(その状態)	剪断力kg/cm														
V.Soft(指でたやすくおしつぶせる)	0.17元済														
Soft(指でたやすくこねることができる)	0.17~0.45														
Firm(強く指でおさないといとこねられない)	0.45~0.90														
Stiff(指でこねられない。親指でへこませられない)	0.90~1.34														
Hard(固く、親指の爪でもへこますのう困難)															
Peats and Organic soils (有機質土)	有機質														

表 6.6.4.7 土質試験方法の種類

種類	試験の名称	試験結果から求める値	試験結果の利用	試験法の規格
機 構 判 別 試 験	土の判別分類 一般観察	土の分類名 色、臭気、組織、構造、粒子の性質	土の简易な判別分類 土質試験計画の裏表決定	JSF M 1-73
	ダイレイタンシー 乾燥強さ	シルトと粘土の判別 シルトと粘土の判別		ASTM D 2488-69
	タフネス	塑性的程度		
	塩酸反応	石灰含有量		
	塊 破 め	泥炭の分解度		DIN 18196-70
	土粒子の比重	土粒子の比重 間隙比 飽和度	土の基本的性質の計算	JIS A 1202
	含水量 粒度 ふるい分析 水分分析	含水比 粒径加積比 有効径 均勾等数 曲率係数	土の基本的性質の計算 粒度による土の分類 材料としての土の選定	JIS A 1203 JIS A 1204-79 JSF T 22-71
物 理 的 的 性 質 試 験	コンシステンシー 液性限界 塑性限界	液性限界 流動指數 塑性限界 塑性指數 コンシステンシー指數	コンシステンシーによる土の分類 材料としての土の選定	JIS A 1205-79
	收縮限界	收縮限界 收縮比 体積変化 線收縮 pF-含水量関係	自然状態の粘性土の安定性の判定	JIS A 1206-78
	pF 吸引法 遠心法 加压法 蒸気圧法	遠心含水当量		JIS A 1207-78
	湿润密度	湿润密度 乾燥密度	土の基本的性質の計算 土の密め度	BS 1377 T 14-1967
	強熱減量		泥炭の有機物含有量、粘土鉱物の判定	JSF T 6-68
	pH	pH	安定処理材の適否、底物の親属性の判定	JSF T 7-68
	有機物含有量 強熱減量法 重クロム酸法	泥炭の有機物含有量 泥炭以外の土の有機物含有量	工学的性質や安定処理工法への影響の判定	JSF T 8-68 JSF T 9-68
試 験	水溶性成分 試料溶解製法 含量試験	水溶性成分含有量	安定処理材の適否などの判定	JSF T 10-68 JSF T 11-68
	塩化物含有量	塩化物含有量	地盤への海水の影響の判定	JSF T 12-68
	硫酸塩含有量	硫酸塩含有量	ソイルセメントの適用性、構造物の腐食性などの判定	JSF T 13-68 JSF T 14-68
	土の氯化物含有量 土中の粘土鉱物判定の基礎調査	氯化物含有量 粘土鉱物判定	粘土鉱物の判定	JSF T 23-71T JSF T 24-72

力 学 的 性 質 試 験	静 命 め 標準ニネルギーによる充 満め 重エネルギーによる充固 め 振動せきめ 相対密度	含水比-乾燥密度曲線 最大乾燥密度 最適含水比 相対密度	密合及び溝土の 施工方法の決定 施工の管理 自然状態の非貫土の安定性 の判定 たわみ性状及強度の設計 透水性状の設計	JIS A 1210-79 BS 1877 T 13-1957 ASTM D 2049-64T JIS A 1211-79 JIS A 1218-73
	CBR 透 水 冠水位透水 浸水位透水 圧 密	CBR 透水係数 間隙比-荷重曲線 圧縮係数 体積圧縮係数 圧縮指数 圧密降伏応力 時間-圧密度曲線 圧密係数 透水係数	粘性土の沈下量の計算 粘性土の沈下透さの計算 基礎、斜面、擁壁などの安 定性の計算	
	せん 断 直抜せん断	定まった面のせん断抵抗 せん断抵抗角 ϕ_s 粘着力 c_s		ASTM D 3080-72
	一輪圧縮	一輪圧縮強さ 粘着力 c_s 没収比 S_t 応力-ひずみ関係 単圧に応する圧縮強さ せん断抵抗角 ϕ_s 粘着力 c_s		JIS A 1216
	三輪圧縮	応力-ひずみ関係 せん断抵抗角 ϕ_s 粘着力 c_s せん断抵抗角 ϕ_{ss} , ϕ_d 粘着力 c_{ss} , c_d 応力-ひずみ関係		ASTM D 2850-70
	特殊せん断 室内ペーンせん断	ペーンのトルクと回転角 粘着力 c_s		土質工学会基準案
	单纯せん断 ねじりせん断 特殊三輪		研究用 " "	

6.6.5 海底土質と把駐力

6.6.5.1 海底土質の状態定数

土の基本的な構成要素は土粒子の部分とその間隙であるが海底土質では地下水面より上の土と異なり土粒子の間隙は海水で満たされている。

土の性質を表わすいくつかの量を次に示す。(1)

(1) 比重 (G_s)

土の比重 G_s は次式により求められる。

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (6.6.5.1)$$

ここに m_s : 土粒子の質量 (kg)、 V_s : 土粒子の体積 (m^3)、 ρ_w : 水の密度 (kg/m^3) である。

(2) 単位体積当りの水中重量 (r_s)

土の単位体積当りの水中重量 r_s (N/m^3) は次式により求められる。

$$r_s = \frac{(m_s - \rho_s V_s) g}{V_s} \quad (6.6.5.2)$$

(3) 間隙量

土中の間隙が占める量は間隙比 e 及び間隙率 n によって表わされる。それらは各々次式により求められる。

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 \quad (6.6.5.3)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (6.6.5.4)$$

ここに V_s : 体積 V の土に含まれる土粒子の体積、 V_v : 体積 V の土に含まれる間隙の体積で

$V = V_s + V_v$ である。

(4) 粒径加積曲線(粒度曲線)

土を構成している大小の粒子の混合の割合を粒度という。土粒子の粒径を測定する粒度試験は粗粒土に対してはふるいにより、細粒土に対しては比重計を使って測定している。粒度試験の結果は粒径と加積通過率の関係として示される。

粒度曲線より求めた通過率 60% の粒径 D_{60} と 10% の粒度 D_{10} の比を均等係数 U_c といい次式により求められる。

$$U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6.6.5.5)$$

また、 D_{10} を有効径、 D_{50} を中央(粒)径という。

(5) 鋭敏比

自然の土は一般に各種の粒径の粒子が混合して組織を構成しているがこの自然の構造は一旦練り返されると微粒子間の結びつきが破壊され骨組みの強さが減少する。この現象は微粒子間の粘着力が失われたあとに粗粒子的な構造のみが残るために考えられている。この強さの変化は一軸圧縮試験によって求められる。強さの前後の比を鋭敏比 S_t (sensitivity ratio) といい次式により求め

られる。

$$S_t = \frac{q_u}{q_{ur}} \quad (6.6.5.6)$$

ここに q_u : 亂されない土の最大圧縮応力、 q_{ur} : 練り返した土の最大圧縮圧力である。

(6) 含水比

土に含まれる水の量を示す含水比 W は次式で表わす。

$$W = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (6.6.5.7)$$

ここに m_s : 質量 m の土に含まれる土粒子の質量、 m_w : 質量 m の土に含まれる水の質量である。含水比が高いと土は一定の形を保つことができず液状を示し、含水比が低下するに従って体積は縮小し塑性状態になる。含水比の変化とこのような土の性質の関係を図 6.6.5.1 に示す。土の液性と塑性の領域の境界を液性限界 W_L といいこの含水比以上では剪断抵抗はほとんど消滅し、斜面であれば崩れやすく基礎地盤であれば支持力は期待できない。塑性域での土は剪断力が強く道路、築堤工事において締め固めのよくきく状態であり支持力、安定度などが最も期待できる。

一般に砂質土では含水能力の限界は狭いので土の性質の変化も少ないが細粒土は含水の範囲が極めて広くなり土の性質もかなり変化する。砂は水分が乾燥しても液状から塑性や固体状にならず粒体状になる。このため砂には液性限界 W_L 、塑性限界 W_P がない。(2)

6.6.5.2 海底土質の種類と特性

(1) 粒径による土質の分類

アンカーの把駐力をしらべる際の海底土質としてここでは図 6.6.5.2 に示す 6 種類を主な対象として考える。これは粒径による分類に基づくものである。粒径の範囲と土質名称の一例を表 6.6.5.1 に示す。土を構成している大小の粒子の混合の割合は図 6.6.5.3 のような粒径と加積通過率の(重量百分率)の関係として示される。図 6.6.5.3 はカリリフォルニア海岸と大西洋の底質を調査したイリノイ工科大学 (Illinois Institute of Technology) の報告資料を中心に示したが、これらの各底質についての特性を表 6.6.5.2 に掲げる⁽³⁾。これによると海底土質は水深 30m 程度の浅海では砂分が多く、粘土分が少ないが水深が増すにつれて砂分は減少し、逆に粘土分が増える傾向にある。表 6.6.5.2 に示す土質分類は図 6.6.5.4 に示した三角座標式土質分類法によるものである。この分類法は砂、シルト、粘土の三種の混合の状態によって区別されている。図中の番号は表 6.6.5.2 の番号に対応している。

その他、土の種類を粒径で定義したものに PIANC (Permanent International Association of Navigation Congresses、常設国際航路会議協会) の土質分類がある。その分類を表 6.6.5.3 に示す⁽⁴⁾。ここでは粘土についてはさらに固さに対して剪断力により分類されている。土粒子の粒径による分類では泥 (mud) という区分はないが細粒土のもので含水量が多いゆるい状態のものを泥と呼び、さらに非常にゆるい状態の粘土水という方が適当と思われるものをヘドロ又は浮泥 (floating mud) と呼んでいる。

(2) 砂と粘土の工学的性質の特徴

砂と粘土は土質力学で取扱われる性質について対照的な相違をみせる。文献(5)は人違的に砂と粘土を配合して粘土含有量に対する土質の特性の変化について調べたものである。

土の剪断強度は一般にクーロンの摩擦式と呼ばれる次式で表わされる。

$$S = C + \sigma \tan \phi \quad (6.6.5.8)$$

ここに S : 剪断強度、 C : 粘着力、 σ : 有効鉛直応力、 ϕ : 内部摩擦角である。砂の場合には剪断抵抗に占める粘着力の値が小さいので(6.6.5.8)式において $C = 0$ と考えて差し支えない。図 6.6.5.5 は粘土含有量に対する剪断強度(実線)と粘着力(破線)について圧密応力パラメータに示したものである。この図によると粘土含有量が約 30%以下になると粘着力の占める割合が急激に小さくなり、10%以下では大部分の剪断強度は砂の内部摩擦のみで生じている。このような実験結果から一般的に砂に対して粘土含有量が 20%以下では土が外力を受けても直接粘土の粒子に力が作用しないので、これを砂質限界とし、粘土含有量が 40%以上になれば粘土のみの性質と等しいのでこれを粘土質限界とする。この 2 つの限界によって粘土含有量の多小に対して粘土質領域、中間領域・砂質領域の 3 つの領域に分けられる。

表 6.6.5.4、図 6.6.5.6 は文献(6)における特性値の例である。表 6.6.5.5 は鋭敏比(S_t)についての資料である。(7) 図 6.6.5.7 も同じく鋭敏比の資料であるが液性限界との相関はあまりみられない。鋭敏比を使って乱された粘土の粘着力は次式により求めることができる。

$$C_a = C / S_t \quad (6.6.5.9)$$

ここに C_a : 亂された粘土の粘着力、 C : 亂されない粘土の粘着力である。

6.6.5.3 把駐力係数

傾斜角が θ で把駐力係数 μ の海底にアンカーがおかれた場合、予想される係留張力 T_0 に抵抗するために必要な重量はアンカーに働く力の作用線図から推定できる。図 6.6.5.8 は張力が斜面下方に向かう状態に対して作用する力の関係を示している。これを鉛直方向の釣り合い方程式として示すと次のようになる。

$$W = B + T_0 \sin \phi_0 + \mu N \sin \theta + N \cos \theta \quad (6.6.5.10)$$

$$\mu N \theta = T_0 + \phi_0 + N \sin \theta \quad (6.6.5.11)$$

ここに W はアンカーの重量、 B はアンカーの体積に対する水の重量、 T_0 は張力、 N は海底の垂直抗力そして μN は把駐力である。これらの式から N を消去して把駐力係数を求めると

$$\mu = \frac{(W - B - T_0 \sin \phi_0) \sin \theta + T_0 \cos \phi_0 \cos \theta}{(W - B - T_0 \sin \phi_0) \cos \theta + T_0 \cos \phi_0 \sin \theta} \quad (6.6.5.12)$$

もし $\theta = 0$ ならば

$$\mu = \frac{T_0 \cos \phi_0}{W - B - T_0 \sin \phi_0} \quad (6.6.5.13)$$

把駐力係数として単に張力とアンカーの空中重量又は水中重量の比の形に表わされているのも多い。これらを(6.6.5.13)式で求めた把駐力係数 μ と区別するために次式により求められる。 K_1 又は K_2 とする。

$$K_1 = \frac{T_0}{W} \quad (6.6.5.14)$$

$$K_2 = \frac{T_0}{W - B} \quad (6.6.5.15)$$

係留線の単位長さ当たりの重量が大きいときには懸垂線形状の影響により係留線の両端部での張力の大

きさと作用線の方向が異なる。図 6.6.5.9 はこのような状態を示したもののが(a)、(b)の状態に対して次式により、上端部の張力 T からアンカーに取り付けた下端部での張力 T_0 の分力 T_{x0} 、 T_{z0} を求めることができる。

(1) 海底に係留線の一部分が這う状態

$$\left. \begin{array}{l} T_{x0} = T - W_0 Z \\ S_1 = \sqrt{T^2 - T_x^2} / W_0 \\ S_0 = S - S_1 \\ T_{x0} = T_x - f_M \cdot S_0 \\ T_{z0} = 0 \end{array} \right\} (6.6.5.16)$$

(2) 係留線全体が海底から持ち上がっている状態

$$\left. \begin{array}{l} S_2 = (ZT / W_0 - (S^2 + Z^2) / 2) / S \\ T_{x0} = \sqrt{T^2 - W_0^2 (S + S_2)^2} \\ T_{z0} = W_0 S_2 \end{array} \right\} (6.6.5.17)$$

ここに T_x : 曳索が海底から離れる点での張力、 f_M : 曳索の単位長さ当たりの海底移動抵抗、 S_0 : 海底を這う部分の係留線長さ、 S_1 : 海底に係留線の一部分が這う状態で S から S_0 を除いた長さ、 S_2 : 係留線全体が海底から持ち上がる状態で仮想的に懸垂線をシンカー端から下方に延長してその接線が水平になる点までの長さ、である。

次に把駐力の定義を統一しておく必要がある。文献(8)によりその用語をまとめると次のようになる。

(イ) 走錨把駐力 (T_r) : アンカーを引張っているときに計測される把駐力 (一般に引張り速度の関数となる)

(ロ) 静止把駐力 (T_s) : 引張り速度 0 に対する走錨把駐力

(引張り速度と走錨把駐力のグラフを引張り速度 0 の点まで延長して得られる)

(ハ) 受動把駐力 (T_p) : 停止しているアンカーに静荷重を徐々にかけて走錨し始める時の把駐力

(ニ) 主動把駐力 (T_a) : アンカーが土に押されて後方に倒れようとするときに釣り合う把駐力

主動、受動という表現は図 6.6.5.10 に示すように土を主体にしたものである。これらの把駐力の関係は図 6.6.5.11 のようになる。

引張り速度 0 で把駐力が増大するのは停止しているアンカーに静荷重をかけて走錨し始めるときにはアンカーと土の間には静摩擦が作用しているが、アンカーが走錨しているときには動摩擦が作用しているためと考えられる。これらのことから、把駐力とは走錨開始時の受動把駐力を意味すると考えられるが、走錨開始後すぐに把駐力は静止把駐力の近くまで落ちるので静止把駐力を代表的な把駐力の値とする方が安全側である。主動把駐力は、受動把駐力や静止把駐力よりも低い値で最も安全側にあるといえるが実験によると静止把駐力に近い値をとるアンカーが多いようである。

6.6.5.4 各種アンカーの把駐力

(1) かき込み埋没アンカー

かき込み埋没アンカーは海底土質の中へ深く埋没し、水平力によって引き摺られるときに海底を掘

って入りこみ充分把駐力を発揮するように設計されている。このアンカーは次のような特性をもつてゐる。

- (イ) 軽いわりに水平引張り力に対する抵抗力が大きい（把駐力係数が大きい）。
- (ロ) アンカーが埋没し把駐力を発揮するまでにアンカーの長さの1～3倍程度海底を引摺る必要がある。
- (ハ) 係留線が短かく垂直力が錨柄端部に働くと把駐力は減少する。

かき込み埋没アンカーは図6.6.5.12のように分類される。またそれらのいくつかを図6.6.5.13に示す。

錨及び錨鎖の把駐力については古くは表6.6.5.6に示すような旧海軍において用いられた値があるがその後の実験によってこの値はやや高いと考えられている。いくつかの実験結果をまとめたものを表6.6.5.7～10に示すが、これらは表6.6.5.6よりも低い値となっているものが多い。これらの把駐力係数はいずれも把駐力を空中重量で除した値である。

各種の模型アンカーについての乾燥砂と浸潤砂における実験結果を表6.6.5.11に示す^{(12), (13), (14)}。乾燥砂と浸潤砂における把駐力係数は把駐力をアンカーの有効重量W-Bで除したK₂でくらべると同程度になることがわかる。このことは底質砂における実験に対する一つの示唆を考えている。JIS改4型については2.90 tonの実物実験においてもJIS型に対する有効性が示されている⁽¹⁵⁾。

その他爪型アンカーについて文献^{(16), (17)}では砂及び粘土の中での把駐性能に関する模型実験、実物実験結果が示されている（表6.6.5.12）。ここでは実物実験は定速で引張った場合のアンカーの把駐力（T_r）が計測されているが対応する速度で引張った砂及び粘土における模型実験結果の中間の値になった。そのことから、砂と粘土の混合底質における把駐力係数を次式によりある程度予測できることが示されている。⁽¹⁷⁾

$$K_e = K_c e_c + K_s (e_s + \frac{2}{3} e_s e_c) \quad (6.6.5.18)$$

ここにK_e：砂、粘土混合底質における把駐力係数、K_c：粘土における把駐力係数、K_s：砂における把駐力係数、e_c：混合底質中の粘土の割合、e_s：混合底質中の砂の割合（ただしe_c+e_s=1）である。

この実験結果では砂よりも粘土における把駐力が大きい傾向を示しているがアンカーの爪の開き角度に対する把駐力の傾向が図6.6.5.14に示されるように底質により変化すると思われる。したがってアンカー製造の際にも爪の開き角度に注意する必要がある。また粘土質における把駐力は鋭敏比などの影響によってもかなりばらつくことが示されている。

岩や礫におけるデータは少ないが表6.6.5.13によると岩、礫においてあまり高い把駐力は期待できないものと思われる。図6.6.5.15ではFluched TypeとPick Typeのアンカーについて把駐力の推定をしているがここでは両者にほとんど差がないこと、砂の方が粘土におけるより把駐力が高い結果を示している。

(2) 重量アンカー

鉄塊、簡単な形状コンクリート塊、古い車輪、鎖の束、そして密度の大きいものはほとんど重量アンカーとなりうる。この種のアンカーは簡便で低廉である。しかしながら重量アンカーは水平引張り力を受けた場合に横移動しやすい。海底の傾斜や凹凸によって把駐力はさらに減じられる。したが

って重量アンカーの使用は張力が主に垂直方向に働くと予想されるところに使用されるべきであろう。横移動防止のためには爪をつけたり格子状のくさびをつけたりすることが考えられている。深海用の海洋の海洋温度差発電施設に対する最大係留線角度は 80° に仮定されているものもある⁽⁶⁾。従って深海用の係留に対する係留線角度はかなり垂直方向に近くなると考えられるので重量アンカーは深海用として比較的有効であろう。

図 6.6.5.16～18は立方体シンカーの把駐性能に関する実験結果である。⁽¹⁹⁾ 図 6.6.5.16, 17 は底質が砂における実験値を示している。乾燥砂と浸潤砂における把駐力係数 μ の実験値はアンカーの水中重量で把駐力を除しているためかき込み埋没アンカーの場合と同様に同程度の値となった。また、把駐力係数は走錨状態では立方体シンカーの方が大きいが静止把駐力に対してはかき込み埋没アンカーの方が大きい。底質の異なる図 6.6.5.18においては砂における値より低い結果が得られた。図 6.6.5.19に示す爪付きコンクリートアンカーについての現場実験と陸上実験の結果を表 6.6.5.14 に示すがここにおいても乾燥砂と浸潤砂における把駐力係数 (K_2) の同一性がみられる。現場における把駐力係数は泥まじりの底質のため陸上実験結果よりも小さい傾向を示している。図 6.6.5.20 に示すような爪付きのアンカーを OTEC 装置の係留用に使用するために推定された把駐力についての結果を図 6.6.5.21 に示す。把駐力は軟粘土、シルト、砂の順に高い値を示す。しかし深海において仮定された荷重 (18MN) に対しては軟粘土においてもある程度抵抗することができるようである。⁽¹⁸⁾

岩、礫、砂における重量アンカーの実験値を表 6.6.5.15 に示す。
これはかなり低い値になっている。錨鎖は一種の重量アンカーと考えられるが英國における実験結果を表 6.6.5.16 に示す。⁽⁹⁾ これによると底質砂で 0.75、泥で 0.6 程度になっている。

(3) 平板アンカー

海底土中に平板を埋没させるものである。その概要を図 6.6.5.22 に示す。平板の形状としては正方形、矩形、などのものが考えられている。断面形状としては図 6.6.5.23 に示すように中実断面 (solid section) のものと軽量化をはかった中空断面 (hollow section) のものがある。平板アンカーの長所は把駐力係数が高いことである。欠点としては、把駐力限度をこえて荷重が働いたときに平板アンカーは引きぬかれはほとんど抵抗なく移動してしまうことである。その他の欠点は平板をいかに土中に埋め込むかということである。約 $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ の平板を埋め込む方法が見い出されれば他の種類のアンカーにくらべて優れた性能を示すものとなるであろう。

図 6.6.5.24 は正方形平板アンカーの把駐性能に対する推定値である。これらの結果も軟粘土、シルト、砂の順に把駐力が高くなっている。図中の Long-term とは一定の上向きの力が静的にゆっくり作用してアンカーが引き抜かれるときの状態における値であり、short-term とは急激にアンカーが荷重を受ける状態で求められた値である。

(4) 杭アンカー

代表的な杭型アンカーの概略図を図 6.6.5.25 に示す。杭アンカーは係留線の角度が大きいときは、かなり把駐力係数が大きくなる。従って重量アンカーにくらべてかなりの重量を軽減できる。しかし低い係留線角度では、重量アンカーと同程度の把駐力係数となる。深海において杭アンカーを使用する際の困難な点はその据え付けである。

軟粘土、粘土、シルト、砂の 4 種類の底質における水平方向把駐力、軸方向把駐力を図 6.6.5.26、27 に示す。⁽⁶⁾ 図中の short analysis は杭を剛柱として仮定して求めた値であり、long

pile analysis は杭の変形を考慮して求められた値である。水平方向、軸方向ともに同一形状のアンカーに対しては軟粘土、粘土、シルト、砂の底質順に高い把駐力を示している。

6.6.5.5 まとめと問題点

ここでは海底土質として 6 種類とり上げているが、岩・礫における把駐力に関する資料はあまり見られなかった。深海における海底土質は粘土及び軟粘土が主成分であると考えられている(3)、(21)。粘土質の海底における把駐力は砂質の海底における把駐力より低い場合が多いので係留に際してはこの点に注意してアンカーを選定する必要がある。砂における把駐力にくらべらつきが多いことも粘土における特徴といえよう。各種のアンカーの比較については単に把駐性能だけではなく経済性、据え付けの難易など様々な要素を総合的に評価する必要がある(2)。表 6.6.5.17 に示すような OTEC 装置のための深海での係留条件に対しては重量アンカーが有効かつ経済的であるという結論が示されている(21)。しかし、かき込み埋没アンカーでは深海の土質と考えられる粘土質において把駐力が砂質におけるより高い値を示す場合があることや、かき込み埋没アンカーと重量アンカーを組み合わせて使用することによりお互いの長所を生かすような工夫もなされていることを考えると明確な判断はくだせない。

今後さらに土質の剪断強度などの詳細な特性値と把駐力の関係、アンカーの把駐力に対する経年変化などについても調査されるべき問題点である。

表 6.6.5.1 粒径範囲と土質名称

礫		2.0 mm 以上
砂	粗砂	0.42 ~ 2.0
	細砂	0.074 ~ 0.42
シルト		0.005 ~ 0.074
粘土		0.001 ~ 0.005
軟粘土		0.001 mm 以下

表 6.6.5.2 海底土質の特性

図 6.6.5-2 の 番号	場 所	深 度	位 置	粒 径 分 布			土 質 分 類	真比重
				砂 %	シルト %	粘土 %		
1	カリフォルニア海岸	30 m	36° 6' N, 119° 11' W	70	21	9	シルト質砂	2.69
2	“ 沖合(I)	2,000 m	33° 48' N, 119° 36' W	10	63	27	粘土質シルト	2.65
3	“ 沖合(II)	4,000 m	32° 1' N, 120° 38' W	0	31	69	粘土	2.76
4	大西洋	3,000 m	34° 55' N, 74° 39' W	30	39	31	シルト質粘土	2.67
5				1	63	36	シルト質粘土	2.69
6				2	92	6	シルト	2.14
7	東京海洋大学舎			98	2	0	石ヶ	
8	神奈川大学舎			100	0	0	石少	

表 6.6.5.3 PIANCによる土質分類

種類		粒径 (mm)	識別	強さなど														
Boulders (巨礫)	Granular (粒)	200を超えるもの																
Cobbles (大礫)		200~60																
Gravels (礫)	(非粘性)	Coarse(粗)60~20 Medium(中)20~6 Fine(細)6~2																
Sands (砂)		Coarse 2~0.6 Medium 0.6~0.2 Fine 0.2~0.06	乾燥時に僅かな粘性	シルトまたは粘土と混合すると固くしまった砂になる。														
Silts (シルト)	粘	Coarse 0.06~0.02 Medium 0.02~0.006 Fine 0.006~0.006	粒子は肉眼で識別不能。乾燥したかたまりは指の力で粉末となる。	しばしば、fine sand または粘土と混合されている。														
Clays (粘土)	性	0.002未満ただしシルトと粘土は、粒径だけの分類では、その区別が不正確である。	強い粘性と塑性をもち、ダイレイタンシーはない。乾燥したかたまりは粉末にならない。	<table border="1"> <tr> <td>かたさ(その状態)</td> <td>剪断力 kg/cm²</td> </tr> <tr> <td>V, Soft (指でたやすくおしつぶせる。)</td> <td>0.17 未満</td> </tr> <tr> <td>Soft (指でたやすくこねることができる。)</td> <td>0.17 ~0.45</td> </tr> <tr> <td>Firm (強く指でおさないところねられない。)</td> <td>0.45 ~0.90</td> </tr> <tr> <td>Stiff (指でこねられない。親指でへこませられない。)</td> <td>0.90 ~1.34</td> </tr> <tr> <td>かたさ(その状態)</td> <td>剪断力 kg/cm²</td> </tr> <tr> <td>Hard (固く、親指の爪でもへこますのが困難。)</td> <td>1.34を超える</td> </tr> </table>	かたさ(その状態)	剪断力 kg/cm²	V, Soft (指でたやすくおしつぶせる。)	0.17 未満	Soft (指でたやすくこねることができる。)	0.17 ~0.45	Firm (強く指でおさないところねられない。)	0.45 ~0.90	Stiff (指でこねられない。親指でへこませられない。)	0.90 ~1.34	かたさ(その状態)	剪断力 kg/cm²	Hard (固く、親指の爪でもへこますのが困難。)	1.34を超える
かたさ(その状態)	剪断力 kg/cm²																	
V, Soft (指でたやすくおしつぶせる。)	0.17 未満																	
Soft (指でたやすくこねることができる。)	0.17 ~0.45																	
Firm (強く指でおさないところねられない。)	0.45 ~0.90																	
Stiff (指でこねられない。親指でへこませられない。)	0.90 ~1.34																	
かたさ(その状態)	剪断力 kg/cm²																	
Hard (固く、親指の爪でもへこますのが困難。)	1.34を超える																	
Peats and Organic soils (有機質土)	有機質		黒または茶色、しばしばつよい有機質のにおいをもつ。															

表 6.6.5.4 海底土質の特性(文献(6)による)

海底工質	単位体積当りの 水中重量 γ_s (kN/m^3)	鋭敏比 S_t	摩擦角 ϕ (deg)
石	6.75	10	30
シルト	6.75	2~7	35
粘土	5.81	3~10	30
軟粘土	4.08	2~7	30

表 6.6.5.5 日本各地における鋭敏比の例

	四日市	八幡浜	尾ヶ崎	清水	横浜	川崎
鋭敏比 S_t	7~12	2~5	2~12	2~5	5~15	5~11

表 6.6.5.6 旧海軍に用いられた把駐力係数値

底 質	粘土	硬泥	砂泥	砂、 貝砂	砂礫	平岩
錨	10	9	8	7	6	5
錨鎖	3	2	2	2	1.5	1.5

表 6.6.5.7 把駐力係数(実験結果)
(文献(9)による)

種類	重さ	把駐力係数 （錨の質量 に対する 割合）	底質 (場所)	実験方法	把駐力係数	
					砂 (瀬戸内 港内)	泥 (瀬戸内 港内)
JIS型ストラ ッグルスアンカ ー	2.9t	4.2	瀬戸内港内	実験実験	8	8
	1.0t	5.3	瀬戸内港内 （静止地 点）	実験実験	1	1
	320kg	3.1	砂 (瀬戸内 港内)	実験実験	23	23
	320kg	1.25	泥 (瀬戸内 港内)	実験実験	18	18
	10,20,30 kg (静止地 点)	3.0	砂 (瀬戸内 港内タツ 島、海面 17m) (のりの)	実験実験	120 以上	120 以上
	11kg	2.8	砂 (瀬戸内 港内タツ 島、海面 14m)	実験実験	100	100
A.S.S (Admiralty Standard Stockless Anchor (Hall Byer) (Taylor type)	5t	3.5				
	3t	3.5				
	1t	3.5				
	1/20t	3.5				

Manual of
Seamanship
(vol III, 1951) による

表 6.6.5.8 錨の把駐力係数(文献(9)による)

錨の重さ	底質	概要
42c.w.t	砂、小石	Pwellhai 実験
42 "	泥	"
27 "	砂	Weymouth 実験
36 "	"	"
36 "	3.1	"
54 "	2.8	"
11,000 lbs	砂、泥	米巡洋艦 実験
14,000 "	"	"
11,000 "	6.1	"

表 6.6.5.9 AVERAGE ANCHOR HOLDING POWER
(文献(10)による)

Anchor Type	Bottom Type	
	Sand	Mud
Stockless*	6	2 or less
Lightweight*	16	9
Stato*	20	15
Boss**		35

*Smith, 1965.

**Beck, 1972.

表 6.6.5.10 Holding efficiency of several anchors compared (文献10)による)

ANCHOR TYPE	WEIGHT (TONNE)	HOLDING EFFICIENCY IN			HOLDING POWER (TONNES)		
		SAND	MUD	HARD SOIL	SAND	MUD	HARD SOIL
Stockless	29.9	4	2	3	120	60	90
US Navy	22.4	7	6	5			
AC.14	22.4	14	8	6	310	180	130
AC.14B	22.4	10	6	3			
LWT/Danf. Offdrill/ Moorfast	22.4	15	2-7	11			
Stevin	22.4	17	12	13			
Steyfix	22.4	28 (22)	18 (15)	17 (14)	780 (624)	560 (459)	670 (490)
		35 (28)	25 (20)	30 (22)			

表 6.6.5.11 各種アンカーの乾燥砂と浸潤砂における把駐性能の比較 ($\phi_0 = 0^\circ$)

(文献12,13,14,16による)

アンカーの種類	空中重量 (kg)	乾燥砂	浸潤砂	
		把駐力係数 $K_1 (=k_2)$	把駐力係数 K_1	把駐力係数 K_2
Mooring (stocked)	4.84	3.82	3.68	4.27
Admiralty (stocked)	6.74	3.28	3.40	3.95
Hall	9.57	4.31	3.56	4.14
Smith	7.16	5.66	4.33	5.02
Klip	8.77	6.33	4.62	5.36
JIS	9.57	5.21	4.02	4.67
JIS	19.39	4.78	3.59	4.17
JIS	28.52	4.55	3.80	4.41
JIS ^改	9.68	4.93	3.86	4.48
JIS改 ^{4型} (^{40°傾斜を許す} ^{Tripping Point 大きく})	10.68	6.83	5.79	6.72
防衛庁型	10.20	5.24	4.33	5.03
New Navy Stockless ^改	9.66	9.53	9.08	10.54
New Navy Stockless ^改 (^{45°傾斜を許す} ^{Tripping Point 小さく})	10.53	9.29	8.63	10.02
Danforth	11.27	9.42	8.82	10.24

表 6.6.5.12 各種アンカーの砂と粘土における把駐性能の比較 ($\phi_0 = 0^\circ$)
(文献16,17による)

アンカーの種類	模型実験			实物実験	
	アンcker重量 W(kg)	内部砂の抵抗力 係数 $K_1 = T_s/W$	外部砂の抵抗力 係数 $K_1 = T_r/W$	アンcker重量 W (kg)	砂粘土混合状態における抵抗力係数 $K_1 = T_r/W$
JIS-stockless	19.36	3.62	4.67	1042	6.77
KS-4.2	21.00	6.36	7.66	1098	8.63
JNR	19.22	5.54	—	—	—
AC-14	21.23	6.86	6.80	1252	10.18
ONO-35	21.73	4.49	4.82	—	—
ONO-45	21.08	6.74	5.54	978	9.21
ONO-55	21.32	3.39	6.01	976	3.93

表 6.6.5.13 岩, 磯, 砂におけるかき込みアンカーの把駐性能 (文献18による)

ストレッス	空中重量(t)	水中重量(t)	底質	計測値とアンカーの把駐		把駐力係数 $K_1 = T/W$
				水平距離(m)	垂直距離(m)	
ストレッス	2.35	2.04	岩	110.50	40.31	1.28
			砾	157.10	43.80	3.70
			砂	138.50	43.65	2.16
ストレッス	5.15	4.43	岩	105.10	39.53	1.02
			砾	159.60	43.85	0.78
			砂	145.00	43.65	3.50
ストレッス	5.12	4.44	岩	111.00	40.39	2.50
			砾	158.80	43.86	0.86
			砂	138.80	43.65	3.43

表 6.6.5.14 爪付きコンクリートアンカーの把駐性能(文献20による)

実験場所	底質	引張り角度(°)	固定力(T)	把駐力係数 $K_2 = T/(w - B)$	
市振海岸沖合(水中)	砂泥	34°	280 kg	6.7	アンカーリング
	"	17°	290	6.9	
	"	17°	62, 55, 60	1.4	アンカーリングなし
	"	29°	58, 55, 60	1.3	
"	"	40°	56, 50, 48	1.1	
市振海岸(陸上)	乾燥砂	0°	125 kg	2.1	
	"	30°	121	2.0	
	"	60°	85	1.42	
	浸潤砂	0°	128	2.15	
	"	30°	122	2.05	
	"	60°	87	1.46	

表 6.6.5.15 岩、礫、砂における重量アンカーの把駐性能(文献18による)

空中重量(t)	水中重量(t)	底質	計測したアンカーフル面積		把駐力係数 $K_1 = T/w$
			水平距離(m)	垂直距離(m)	
直方体コンクリートブロック	5.45	3.20	岩	101.50	38.93
			石砾	162.00	43.86
			石子	146.20	43.65
三角柱5連続コンクリートブロック	4.75 (1.97+1.23 +0.86+0.40 +0.29)	2.40 (0.97+0.66 +0.40+0.21 +0.16)	岩	104.10	39.39
			石砾	160.20	43.52
			石子	140.00	43.65
テトラボルト	5.52	3.24	岩	100.90	38.98
			石砾	163.20	43.87
			石子	—	—
箱型コンクリートブロック	5.00	2.44	岩	109.80	40.26
			石砾	157.00	43.80
			石子	144.90	43.65

表 6.6.5.16 鎚鎖の把駐力係数(文献(9)による)

Sea bed	Length in fathoms	Size	Weight in Cwts	Holding Coeff. $K_h = T/W$
Horsea mud	30	1 1/4", studded	24.3	0.60
Horsea mud	30	1 3/4", studded	45.9	0.65
Pwllheli sand	45	1 3/4", studded	67.6	0.62
Pwllheli sand	45	1 3/4", studded	67.6	0.72
Weymouth sand	30	2", studded	64.6	0.70
Weymouth sand		After silting 5 months		1.00
Weymouth sand	30	2 1/2", studded	90.0	0.60
Horsea mud	30	2 1/2", studded	95.0	0.59
Horsea mud	30	3", studded	137.0	0.52
Horsea mud		After silting 4 months		0.58
Horsea mud	30	3 1/2", studded	187.0	0.61
Horsea mud	30	3", mooring	155.0	0.75
Horsea mud		After silting 4 months		0.80
Horsea mud	30	3 1/2" mooring	233.0	0.70

表 6.6.5.17 深海における係留条件(文献(21)による)

特 性	設 計 条 件
海面状態	温 和
水 深	6 000 m
海底土質	軟 粘 土
水平 力	0~18 MN ($0~1.8 \times 10^6$ kg)
垂 直 力	0~10 MN ($0~1.0 \times 10^7$ kg)
係 留 角	0~1.4 rad ($0~80^\circ$)
荷重方 向	多 方 向

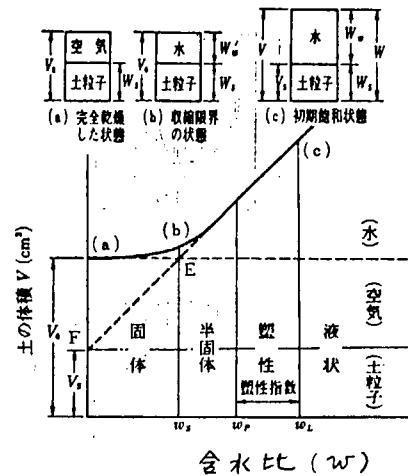


図 6.6.5.1 土の含水比と体積変化(文献(1)による)

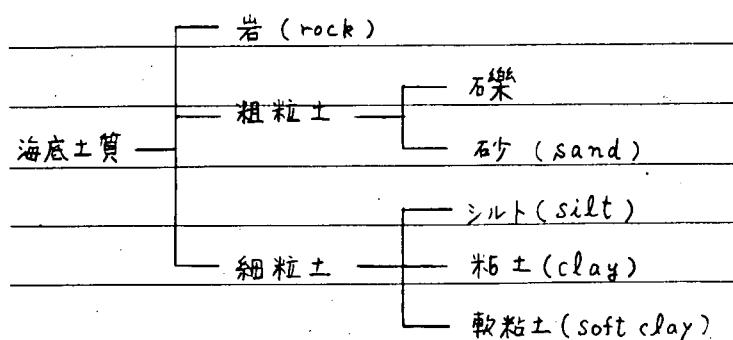


図 6.6.5.2 海底土質の分類

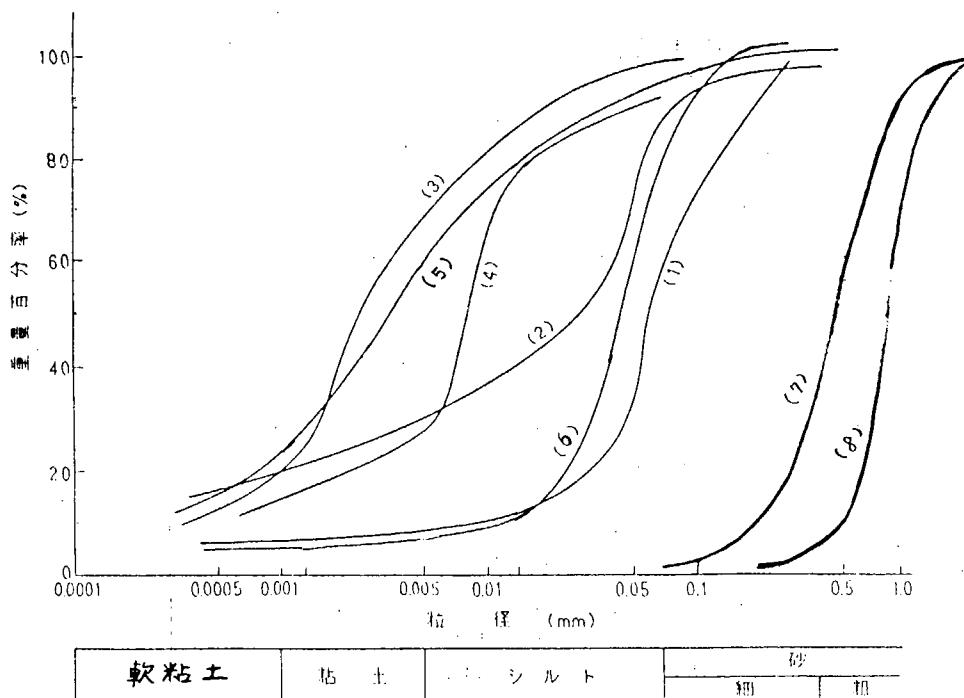


図 6.6.5.3 海底土質の粒径分布(粒径加積曲線)

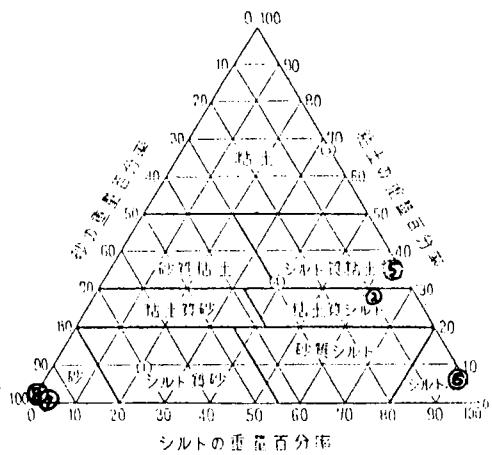


図 6.6.5.4 三角座標式土質分類法

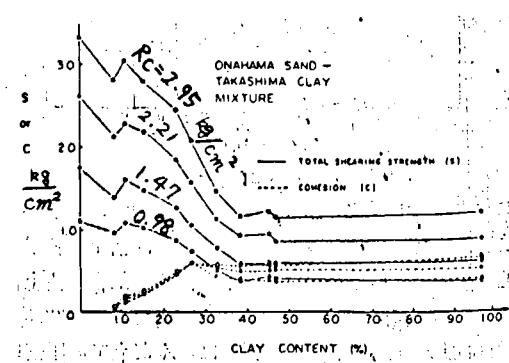


図 6.6.5.5 粘土含有量に対する剪断強度と
粘着力(文献(5)による)

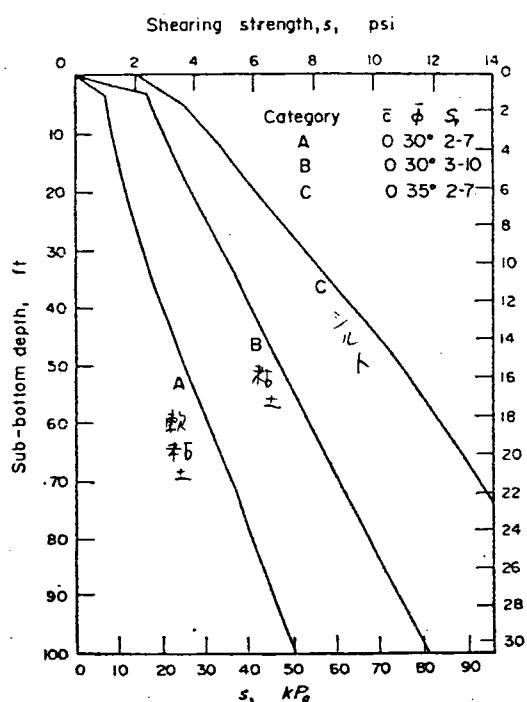


図 6.6.5.6 海底深さと剪断強度
(文献(6)による)

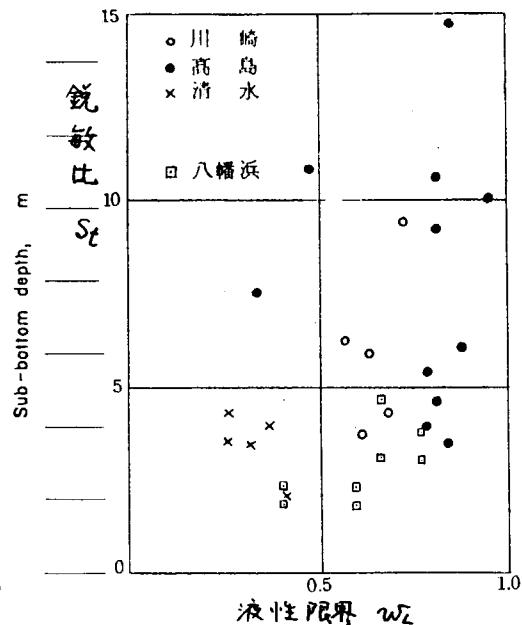


図 6.6.5.7 沖積粘土の鋭敏比

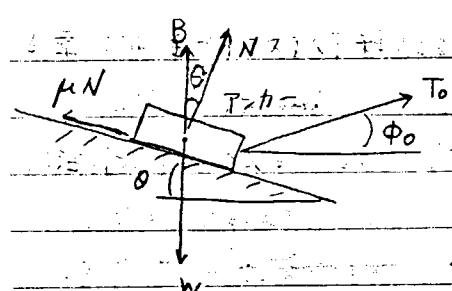


図 6.6.5.8 アンカーに働く力の関係

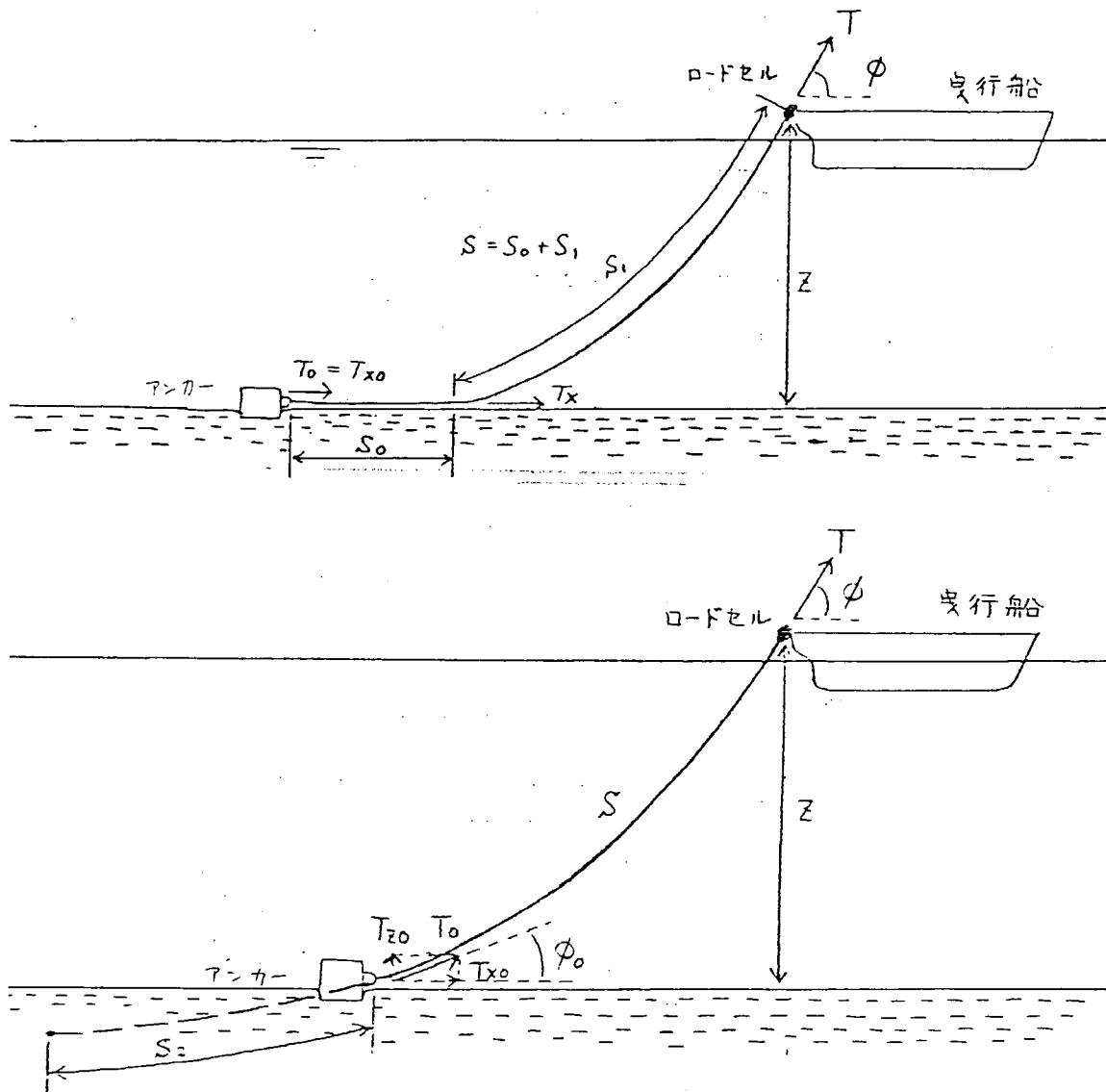


図 6.6.5.9 係留線の影響

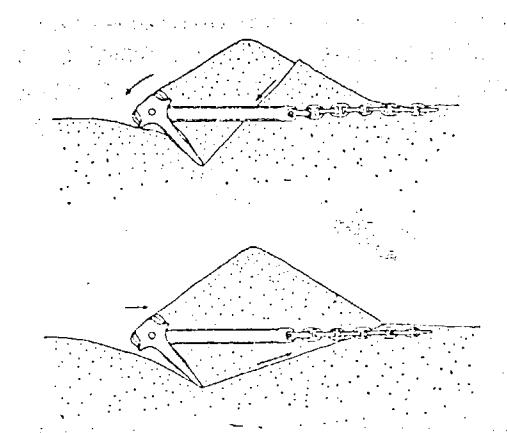


図 6.6.5.10 主動状態（上）と受動状態（下）

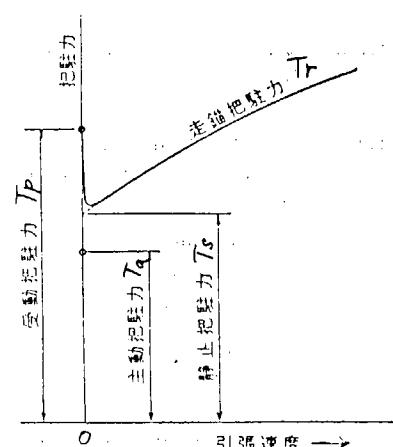


図 6.6.5.11 各種把阻力の関係

	爪型アンカー fluked type anchor	STATO, Danforth, BOSS, Stevin's, flipper delta, Lightweight, JIS型, AC14,
かき込み埋没アンカー (drag embedment anchor)	つまはしがたアンカー pick type anchor	BRUCE, HOOK, Admiralty mooring,
	泥用アンカー mud type anchor	Doris, Paravane,

図 6.6.5.12 かき込み埋没アンカーの分類

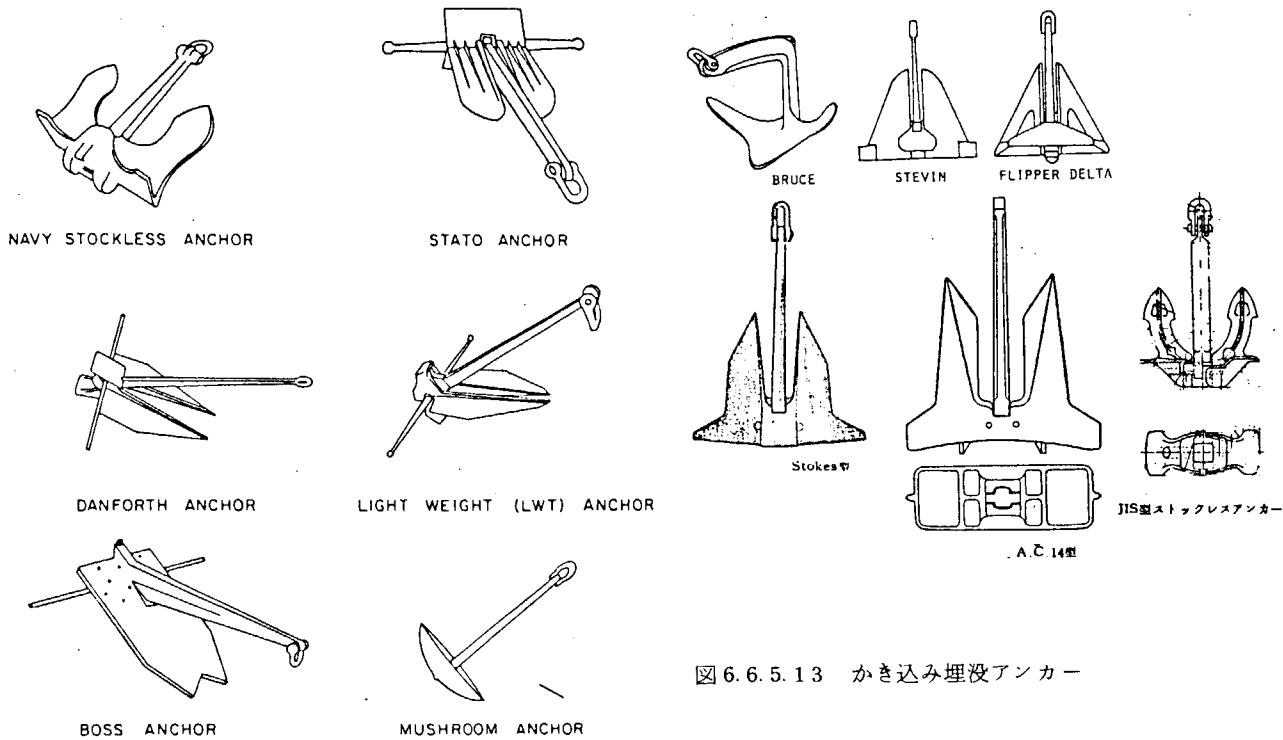


図 6.6.5.13 かき込み埋没アンカー

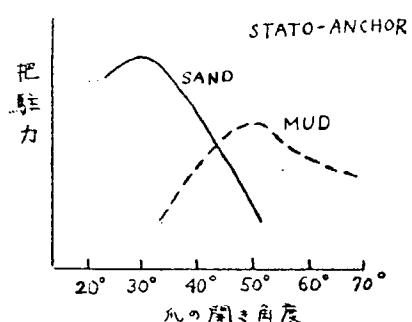
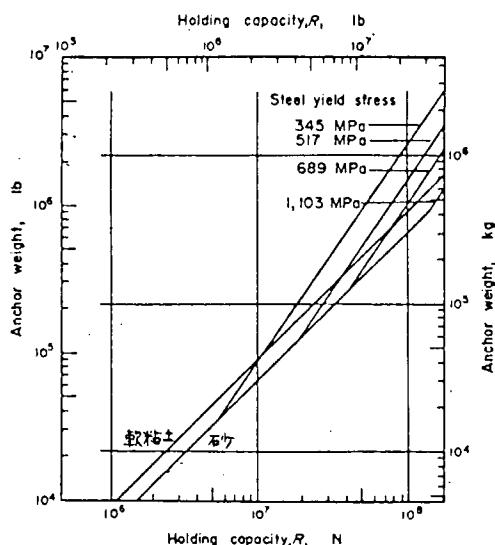
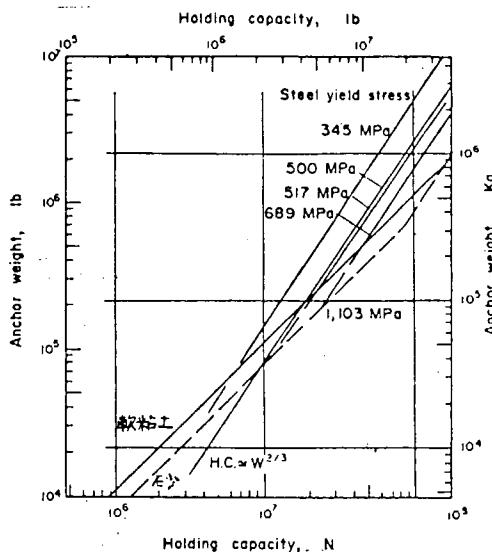


図 6.6.5.14 爪の開き角度と把駐力(文献11)による)



(a) STATO anchor weights required to produce desired holding capacities.



(b) BRUCE anchor weights required to produce desired holding capacities.

図 6.6.5.15 Fluked Type と Pick Type Anchor の比較 (文献(5)による)

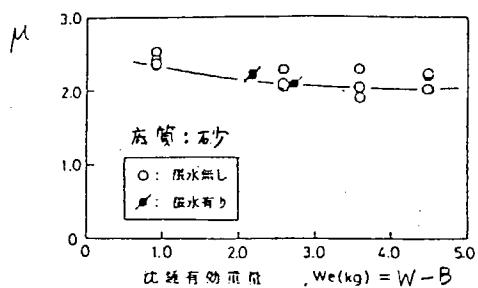


図 6.6.5.16 把駐力係数に及ぼす有効重量の影響

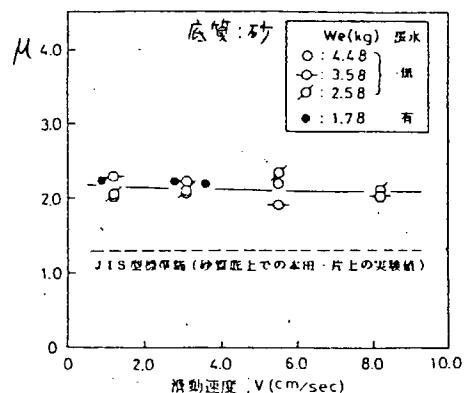


図 6.6.5.17 把駐力係数に及ぼす滑動速度の影響

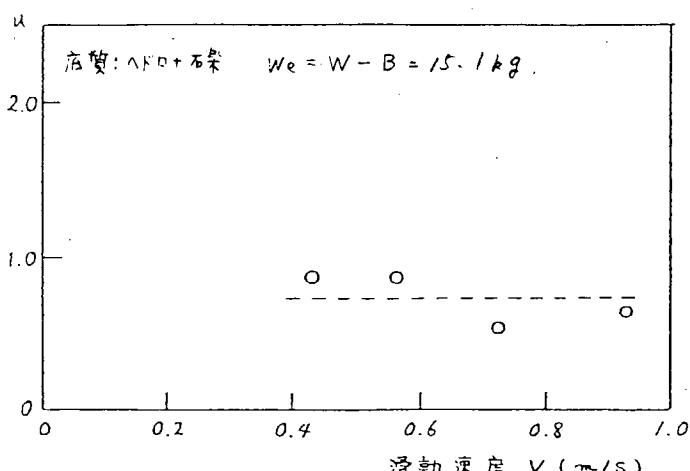


図 6.6.5.18 把駐力係数に及ぼす滑動速度の影響

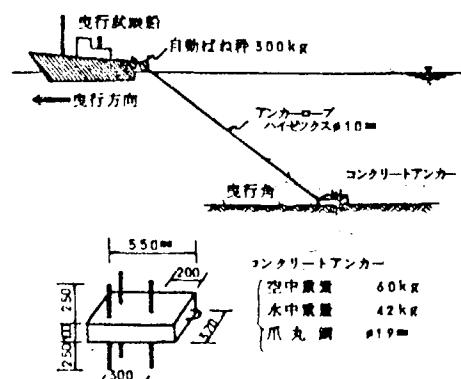


図 6.6.5.19 現地アンカー固定力測定およびコンクリートアンカー図

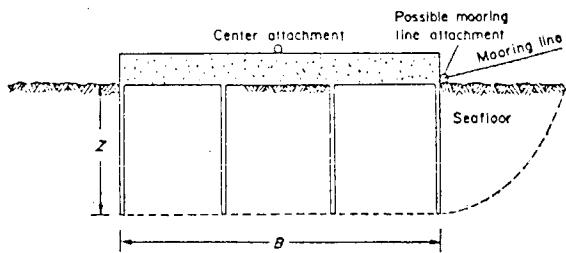


図 6.6.5.20 OTEC 装置係留用重量アンカー

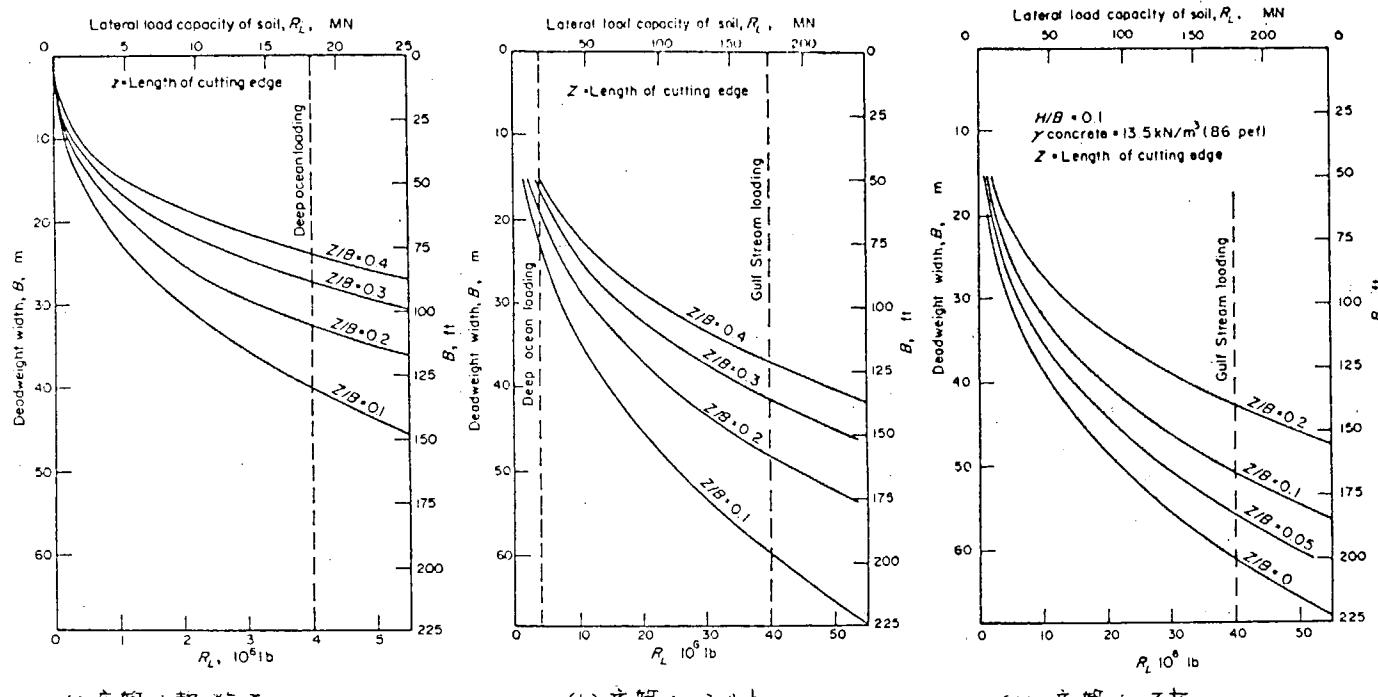


図 6.6.5.21 OTEC 装置係留用重量アンカーに於ける水平方向の把駐力（文献(6)による）

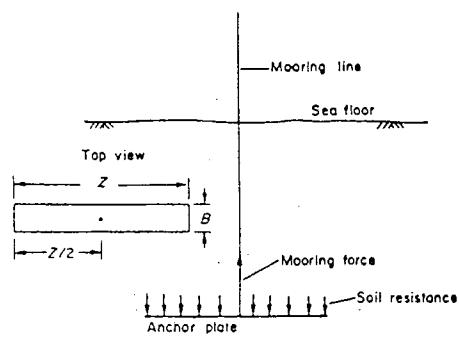


図 6.6.5.22 平板アンカーの模式図

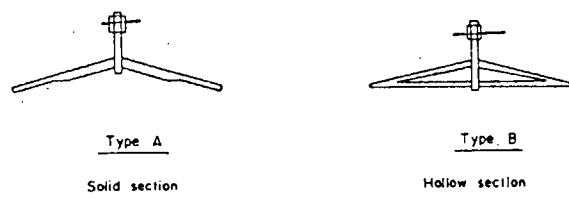
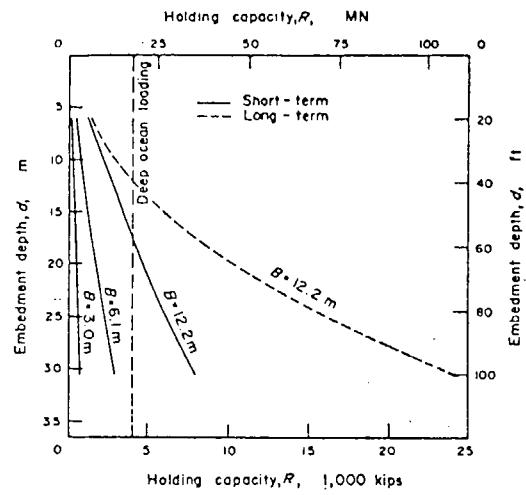
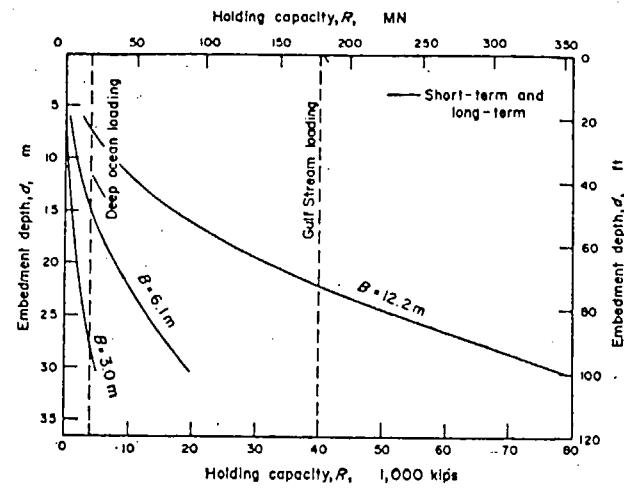


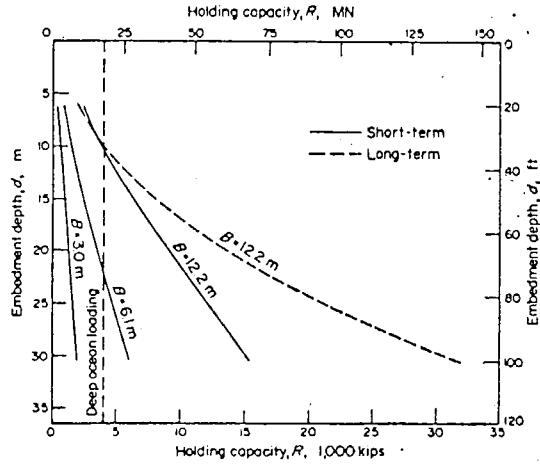
図 6.6.5.23 平板アンカーの断面形状



(a) 底質：軟木土



(c) 底質：砂



(b) 底質：シルト

図 6.6.5.24 正方形平板アンカーの把駐性能
(文献(6)による)

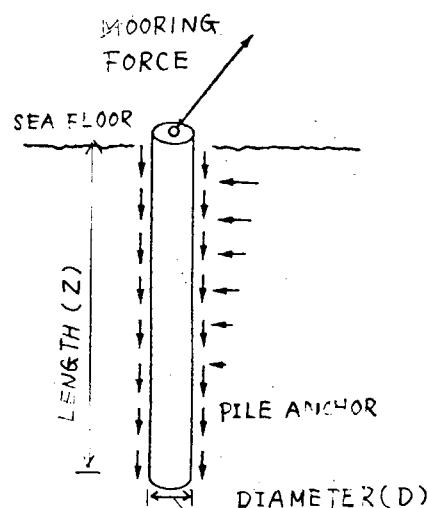


図 6.6.5.25 杭アンカー

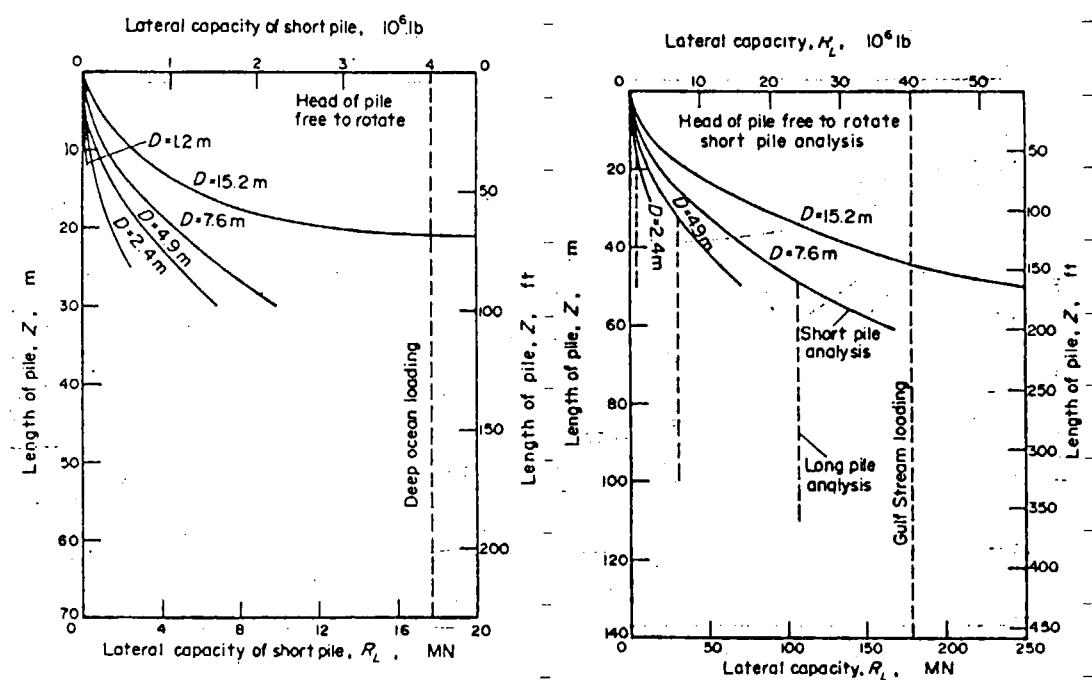
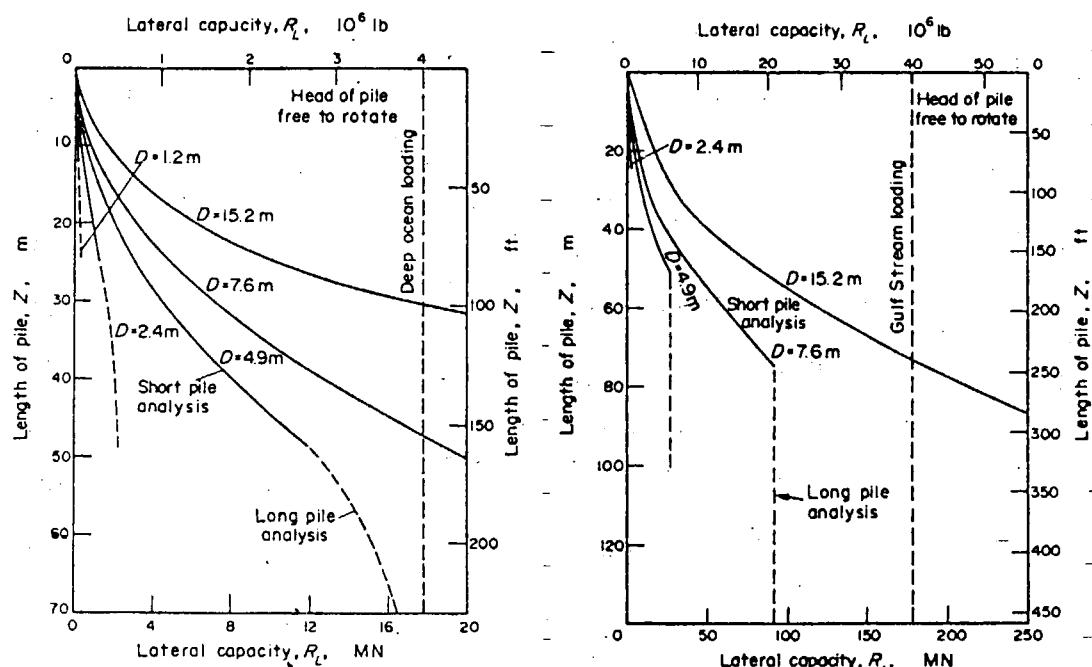


図 6.6.5.26 杭アンカーに対する水平方向の把駆力（文献(6)による）

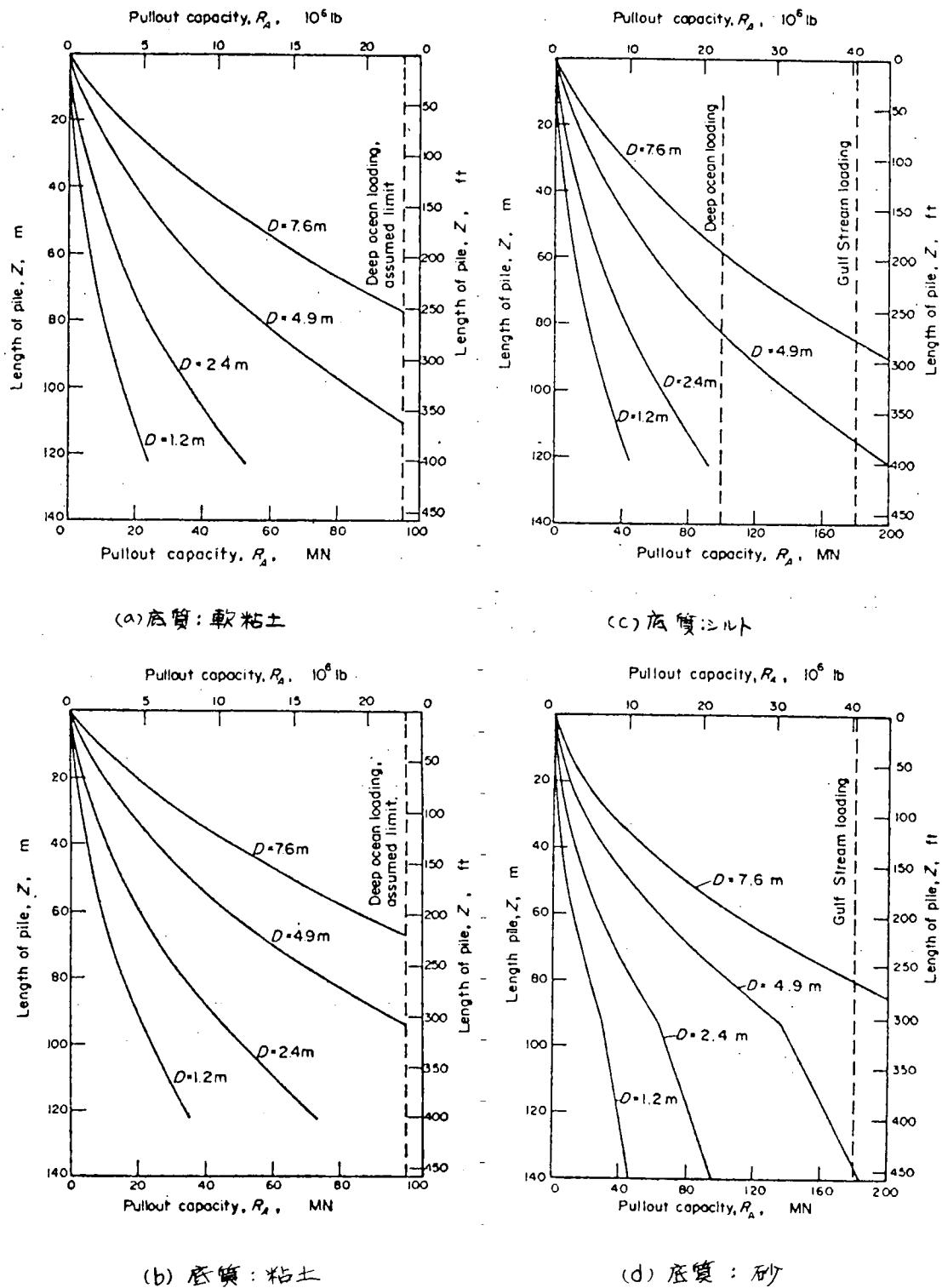


図 6.6.5.27 杭アンカーに対する軸方向の把駐力(文献(6)による)

参 考 文 献

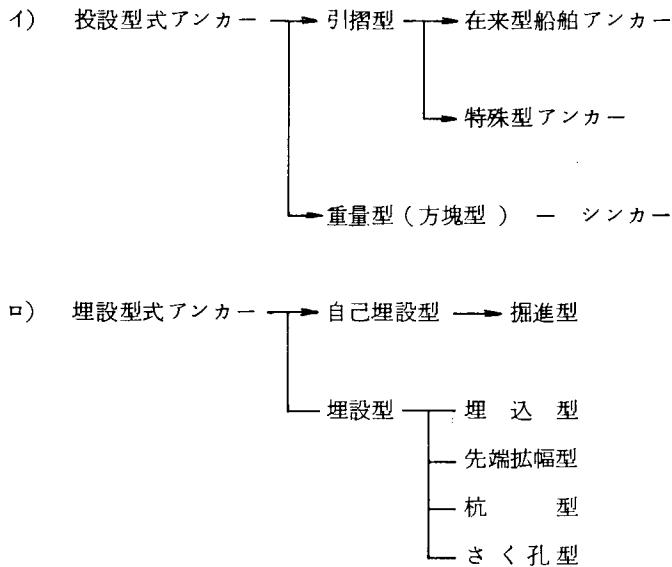
- (1) 土木工学全集編集委員会編：土質力学、理工図書、土木工学全集第5巻（1980年6月）
- (2) 本田啓之輔：特殊型アンカー、航海第68号 PP49~54（昭和56年6月）
- (3) 日本海難防止協会：大型専用船の錨泊の安全に関する調査研究 昭和48年度 中間報告書
- (4) 日本海難防止協会：大型専用船の錨泊の安全に関する調査研究 昭和49年度 中間報告書
- (5) 倉田 進・藤下利男：砂と粘土の混合土の工学的性質に関する研究、運輸技術研究所報告
第11巻 第9号 PP1~36(1961年10月)
- (6) P.J.Valent, R.J.Taylor, J.M.Atturio and R.M.Beard: Single Anchor Holding Capacities for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) in Typical Deep Sea Sediment, Ocean Engineering Vol.6 P.P.169~245(1979)
- (7) 日本海難防止協会：海難防止の調査研究事業報告書（大型専用船の錨泊の安全に関する調査研究
昭和50年度 完了報告書）（昭和51年3月）
- (8) 翁長一彦：アンカーの把駐性能、船舶第40巻第12号 PP.98~104（昭和42年12月）
- (9) 航海便覧編集委員会：航海便覧、海文堂
- (10) H.O.Berteaux: Buoy Engineering, John Wiley & Sons.
- (11) R.Van den Haak: Design of Anchors, Cables and Mooring Wires,
Trans.I.Mar.E.(C). Vol 92, Conference No.6 Paper C50
- (12) 本田啓之輔・片上圭四郎・杉浦昭典：水槽実験によるアンカーの把駐特性、日本航海学会誌 第22号、
P.P.143~155（昭和35年3月）
- (13) 本田啓之輔・片上圭四郎：JIS型ストックレスアンカーの把駐性に関する水槽実験、
日本航海学会誌第24号、P.P.73~82（昭和36年2月）
- (14) 山口篤利・片上圭四郎・本田啓之輔
現用商船錨の改良について、日本航海学会誌第25号 PP.89~98（昭和36年6月）
- (15) 玉置 誠・日座斌雄：函館港における青函連絡船の錨及び錨鎖の把駐力に関する実験について、
日本航海学会誌 第26号 PP.95~103（昭和36年12月）
- (16) 中村彰一・本田啓之輔：アンカーの把駐性向上に関する模型実験、
関西造船協会誌 第140号 PP.3~12（昭和46年6月）
- (17) 中村彰一・本田啓之輔：アンカーの把駐性に関する実験的研究、
関西造船協会誌 第149号 PP.31~42（昭和48年6月）
- (18) 近畿地方建設局本州四連絡調査事務所：アンカー試験報告書（昭和40年2月）
- (19) 岩井 聰・庄司邦昭・亀田久治：船舶の衝突に対する緩衝施設に関する研究（その1）
—海底設置シンカーの滑動抵抗について—、東京商船大学研究報告 第32号 自然科学編
- (20) 福島俊一郎・吉牟田長生：ロープ式ワカメ養殖施設のアンカーに関する実験研究
農業土木試験場技報D 第4号 PP.1~12（昭和43年3月）
- (21) J.M.Atturio, P.J.Valent and R.J.Taylor: Preliminary Selection of Anchor Systems for Ocean Thermal Energy Conversion,
Ocean Engineering Vol.6 PP.139~167(1979)

6.6.6 高把駐力アンカー・シンカー

6.6.6.1 アンカー・シンカーの種類

一般に使用されるアンカー・シンカーは、船舶用の錨すなわち、海底土質によって自重以上の張力に耐えるものをアンカーといい、海底土質に余り関係なく自重または海底との摩擦力によって張力に耐えるものをシンカーということにする。したがって、シンカーはアンカーの一部であるといえる。

各種のアンカーを大別すると投設型式の埋設型式に区別することができよう。そして、それらを細分類すると次のようになる。



(1) 投設型式アンカーは、海面上から投下させて海底に落下した状態で把駐力を発生するものである。

引摺型は、ある程度引摺ることによりアンカーの爪が海底土質に食い込んで把駐力がアンカーの自重より大きくなるものであり、ストックアンカー、ストックレスアンカー、ダンフォースアンカー、マッシュルームアンカー、アメリカ海軍のLWTアンカー、A.C.14アンカー及びスタトウアンカー等の在来型船舶アンカーと把駐特性やアンカー重量を改良したスティブン、デルター、ホーク、ブルース及びスティブディック等の特殊型アンカーである。これらは最近、軽量高把駐力のアンカーや大型、強力化による高把駐力のアンカーが開発されているが、大型海洋構造物を長期間に亘り定位置保持しておくためのアンカーとしては把駐力の不足または走錨の恐れがある。しかしながら、この型式のアンカーは、船上から投下できるため、これまでの実績では水深が1,500mで20~30t程度のものが開発され使用した例がある。

一方、重量は、コンクリート、鉄、砂、礫等の方塊を海底に沈め、垂直方向の把駐力は自重で、水平方向の把駐力は海底土質との摩擦で把駐力を発生するものであり、これを一般にはシンカーという。この型式のアンカーとしては、海洋無線中継船に使用した実績があり、水中重量が160tのシンカーを水深が200mに設置したものである。

(2) 埋設型式アンカーは、水中ジェット、起爆または自由落下等により海底土質に埋没する自己埋設型と人為的に海底土質に埋設する埋設型とがある。

イ) 自己埋設型アンカー

自己埋設型アンカーは、埋設型式アンカーよりも相当高い把駐力が期待できるアンカーである。

この型式のアンカーには、英國 NEL が開発したアンカー自体に水ジェット装置が取り付いていてジェットで海底土質を洗掘してアンカーが埋没するハイドロピン、米国海軍でも重量が 55t で 125t の把駐力が得られるハイドロピンを開発している。その他、米国陸軍が開発した火薬を用いて平板アンカーを海底土質内に打ち込むものがある。また、アンカーを自由落下させ、その運動エネルギーを利用して海底土質内に押込むものもある。

一般に掘進型は小型のアンカーが多く、把駐力としては 200~300t 程度であるが、深海域における設置例が多い。

ロ) 埋設型アンカー

埋設型アンカーは、一般に把駐力が非常に大きいのでパーマネントアンカーとして採用されている。したがって、高把駐力アンカー・シンカーは、埋設型アンカーア方式のものが多いといつても過言ではない。

i) 埋込型アンカー

海底土質を掘った空の中に重量型アンカーを入れて埋め戻す型式のアンカーである。

この型式のアンカーは、重量型アンカーの周面摩擦及び重量型アンカーと海底土質の重量と海底土質の剪断抵抗等がアンカーの把駐力を高めるために寄与するので、重量型アンカーの把駐力の数倍の高把駐力となる。

ii) 先端拡幅型アンカー

先端拡幅型アンカーは、掘進型アンカーのハイドロピンアンカーと似た機能を有するアンカーである。ただし、先端拡幅型アンカーは、海底土質に打ち込む途中に先端部が拡幅するため垂直方向の把駐力が大きくなる。この種のアンカーは、有効な埋設深さには限界があり、回収も可能である。したがって、次に述べる杭型アンカーと比較すると比較的浅い埋設で高把駐力が得られるため埋設手段が開発されるならば、軽量でかなり締った海底土質にも埋設が可能になり、大水深海域にも使用できると思われる。

iii) 杭型アンカー

杭型アンカーは、陸上においてよく用いられており、杭型アンカーの垂直方向や水平方向の把駐力、群杭効果及び施工法等について陸上における数多くの研究資料がある。海洋における杭型アンカーとしては、近年大型の杭打船（わが国でも杭径 2.5m、杭長 70m）が建造され、杭打設の際に使用したテンプレートを群杭の上部構造物に発展させる工法が開発された。杭型アンカーでは、水深 100m で群杭方式で一基 2,000t の水平把駐力のものがあり、吊り下げ式水中杭打ち法が開発され水深 150m で杭長 185m、杭径 2.5m の杭の打ち込みを行った事例がある。

iv) さく孔型アンカー

海底が岩盤等の硬質の地盤で施工される型式のアンカーで、掘削機等によって地盤をさく孔し、その孔にチェーンや鋼管等を入れてコンクリートで固めるものである。この型式のアンカーの事例としては、沖縄海洋博のアクアポリスの係留用アンカー及び本四架橋工事で試験用アンカー等で施工している。

この型式のアンカーは、高把駐力が期待でき、かつ施工が安定しているために信頼性が高い。

第7章 昭和57年度において実施する実験方案

昭和56年度において実施した多岐に亘る係留技術に関する文献に基づいて、今後早急に究明すべき課題を挙出し、それらの課題と中から共通的・基礎的な課題で特に重要な項目として索・鎖の要素に働く流体力、索の強度及び鎖の強度を選定した。そして、昭和57年度において各実験で実施すべき内容、供試模型、試験状態等を設定した。

7.1 索鎖要素に働く流体力に関する実験

7.1.1 目的

「5.2 潮流による索鎖の大変形及び索鎖の静的・動的特性」で、潮流中における索鎖の大変形および係留力の計算法、さらには動搖する索鎖に作用する付加質量および抗力等の動的影響を考慮した係留力の計算法等の現況について述べているが、いずれの計算法も索鎖の単位長さ当たりの流体力係数が正確に推定されていることを前提としている。

したがって、索鎖の抵抗係数を調べるための抵抗試験、および索鎖の付加質量係数を調べるための強制動搖試験を索鎖の要素模型を用いて実施し、これらの流体力係数の特性を明らかにする。

7.1.2 供試模型

供試模型として、ストランドロープおよびスパイラルロープの索模型2種類と、スタッド付きチェーン模型1種類を使用する。これらの模型の要目を表7.1.1に、概略形状を図7.1.1に示す。

7.1.3 実験の種類

(1) 索鎖要素の抵抗試験

潮流速および潮流方向をバラメータとし、索鎖要素の抵抗係数を求める。

(2) 索鎖要素の強制動搖試験

動搖振幅、動搖周期、動搖方向をバラメータとし、索鎖要素の付加質量係数および抗力係数を求める。

なお、これらの係数に及ぼす潮流速および潮流方向の影響についても調査する。

7.1.4 実験条件

実海面における潮流速および実験装置の能力等を勘案し、実験に用いる各条件を表7.1.2に示すものとする。

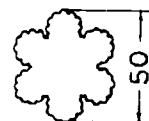
表 7.1.1 模型要目

索 模 型	
種類	ストランドロープ、スパイラルロープ
直径	50mm
長さ	500mm
チエーン模型	
形状	スタッド付きチエーン
呼び径	12mm
長さ	504mm

表 7.1.2 実験条件

潮流速	0.0 ~ 1.5 m/s
潮流方向	0°(接線方向) ~ 90°(法線方向)
動搖振幅	5 ~ 15 cm
動搖周期	1 ~ 5 s
動搖方向	接線方向、法線方向

索模型

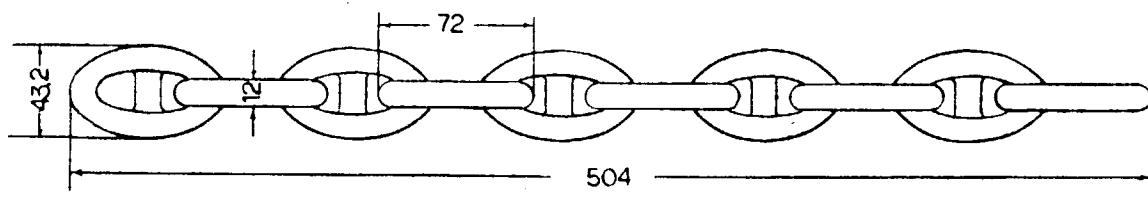


ストランドロープ



スパイラルロープ

チエーン模型



(単位:mm)

図 7.1.1 供試模型

7.2 素の強度に関する実験

7.2.1 目的

鋼索の静的強度は、JISやAPI(American Petroleum Institute)等の規格およびNK NV等の船級協会の規則によって決められているが、動的強度については、規格等ではなく各方面等からの疲労試験の結果が報告されているのみである。本報告書では6.4にそれらの疲労試験の結果をまとめている。

しかし、それらの試験結果では、供試材が各種にわたり、試験条件も異なるため疲労強度のバラツキがかなり大きくなっている。そこで昭和56年度には、供試材の種類および試験条件を限定し、以下に示す引張疲労試験を実施して鋼索の径と引張疲労強度の関係および索の疲労強度のばらつきについて調査・検討する。

7.2.2 供試材

供試材の諸元を表7.2.1に示す。

表7.2.1 供試材

鋼索の構成	種別	鋼索の径 mm	標準断面積 mm ²	規格切断荷重(3) t
1WRC 6×WS(36)% ⁽¹⁾	(2) B種	22.4	256	34.6
		31.5	506	68.4
		45	1030	140

(注) (1) %は裸(めっきなし)で普通Zよりロープであることを示す。

(2) B種は、素線の公称引張強さが180kg/mm²である。

(3) 規格切断荷重はJISに準拠した。

なお、表7.2.1では供試材を裸ロープとしているが、裸ロープとめっき(溶融亜鉛めっき)との疲労強度の比較を行うためめっきロープの追加試験も検討する。

7.2.3 試験方法

(1) 試験設備

50tバ尔斯ータ型引張疲労試験機(堅形)による。

(2) 供試体

供試体の形状を図7.2.1に示す。

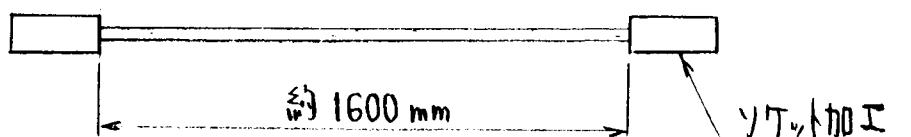


図7.2.1 供試体

(3) 試験条件

試験条件を表 7.2.2 に示す。本試験は、部分片振り引張疲労試験で平均荷重を鋼索の規格切断荷重の約 $1/5$ で一定にし、荷重振幅を 3 種類に変化させる。

なお、荷重の繰返し速度は 250~500 cpm である。

表 7.2.2 試験条件

鋼索の径 mm	最小荷重(応力) t (kg/mm ²)	最大荷重(応力) t (kg/mm ²)	平均荷重(応力) t (kg/mm ²)	荷重振幅(応力) t (kg/mm ²)
22.4	4.5 (17.6)	9.5 (37.1)	7 (27.3)	2.5 (9.8)
	3 (11.7)	11 (43.0)		4 (15.6)
	2 (7.8)	12 (46.9)		5 (19.5)
31.5	9 (17.8)	19 (37.5)	14 (27.6)	5 (9.9)
	6.5 (12.8)	21.5 (42.5)		7.5 (14.8)
	4 (7.9)	24 (47.4)		10 (19.8)
45	18.5 (18.0)	37.5 (36.4)	28 (27.2)	9.5 (9.2)
	13 (12.6)	43 (41.7)		15 (14.5)
	8 (7.8)	48 (46.6)		20 (19.4)

(4) 試験の方法

表 7.2.2 に示す試験条件で繰返し引張荷重を負荷し、鋼索が切断（1ストランド以上の切断）するまでの繰返し回数を測定する。ただし 2×10^6 回に達しても鋼索が切断しなかったときは、 2×10^6 回を終了点とする。

7.3 鎖の強度に関する実験

7.3.1 目的

第 6 章に述べた文献調査結果から明らかなように、チェーンの疲労強度に関するデータは極めて少ない。特に深海係留では荷重振幅に比しチェーンの自重による平均荷重が大きくなるが、これを考慮に入れた実験データは皆無である。チェーンの疲労強度を明らかにするため、実物チェーンの疲労実験を行う。

7.3.2 供試チェーン

供試チェーンは、呼び径 40 の第 3 種チェーン (NK 規格) とする。

耐力試験荷重 = 91.4 トン

切断試験荷重 = 131 トン

公称破断荷重 (平行部公称断面積 × 公称引張強さ) = 176 トン

全てのチェーンについて耐力試験を実施する。

7.3.3 試験方法

(1) チェーンの疲労試験

荷重レンジと応力比を変えて次の 7 種類の疲労実験を行う。

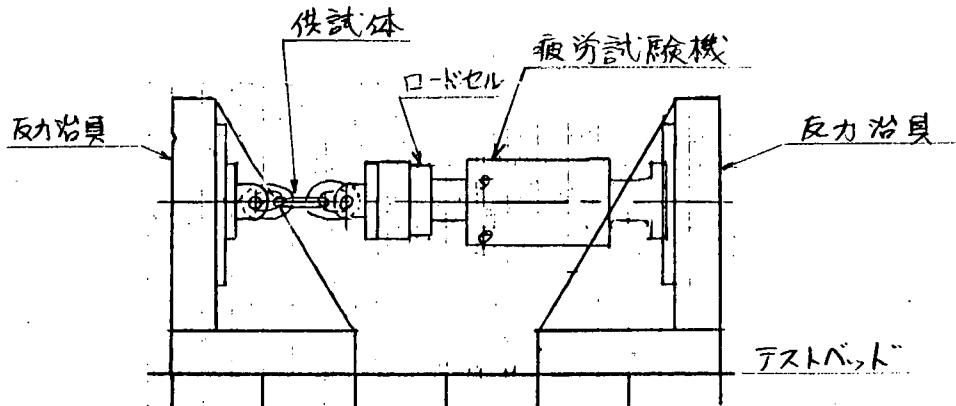
荷重レンジ	応力比 R	0.05	0.3	0.5	0.75
18トン		1 ~ 19	8 ~ 26	—	54 ~ 72
50トン		3 ~ 53	21 ~ 71	50 ~ 100	—
90トン		5 ~ 95	—	—	—

$$\text{ただし応力比 } R = P_{\min} / P_{\max}$$

荷重レンジ／公称破断荷重の値は約 0.1~0.5 であり、予想される疲労寿命としては $5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6$ サイクルである。

使用する疲労試験機は 100 トン油圧サーボ式疲労試験機、繰り返し速度は 0.5~5 Hz とする。

疲労試験に先立ち、歪みゲージによる歪み計測を行う。

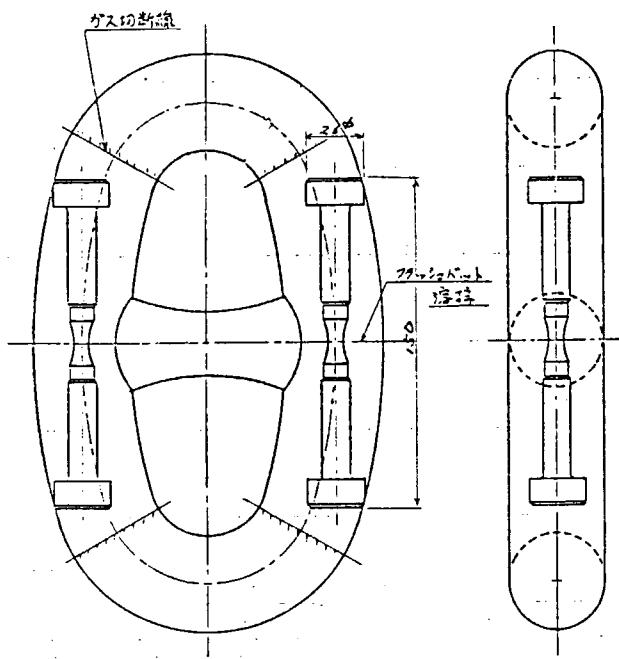
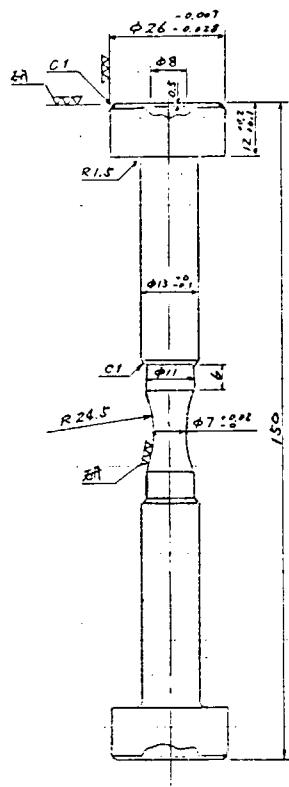


上図のように加力機構を組んで疲労実験を行う。

制御方法は荷重制御とし、亀裂の観察はルーペを用いて目視にて行う。

(2) 素材の疲労実験

チェーンの疲労強度を評価する際の基準とするため、リンクから砂時計型試験片を切り出し、疲労実験を行う。試験片形状およびリンクからの切出し要領を下図に示す。



疲労試験は 10 トン油圧 サーボ式疲労試験機を使用し $\phi 7$ のくびれ部の径歪み制御にて行う。

第 8 章 結 言

以上が海洋構造物の深海係留に関する調査研究として第 187 研究部会が 4 ケ年計画の初年度の昭和 56 年度において実施して来た内容を詳述したものである。

本調査研究を実施するに当たって、本調査研究の目的及び基本的考え方を検討し、その検討結果に基づいて既存の浮遊式海洋構造物の稼動水深、係留方式及び設置条件等について文献調査を行った。その結果、深海域における浮体の挙動及び係留力の推定法と係留用要素機器について本研究部会は調査研究を行うことにした。

なお、本年度は本調査研究の初年度であるため、広範囲に亘る文献調査を主体とした調査研究を行い、既存技術の現況及びその技術の深海係留への適用性と問題点を摘出した。そして、摘出された問題点の中から、共通的・基盤的な技術課題で早急に実験的な研究で究明すべき課題として係留用索・鎖の要素に働く流体力特性、係留用索の疲労強度及び係留用鎖の疲労強度を選定し、その試験方案を作成した。

本研究部会としては、今後、本年度の貴重な調査研究結果を踏えて昭和 57 年度以降において文献の補足調査及び実験的研究を行い、深海域における浮遊式海洋構造物の係留技術が確立できるよう委員及び事務局が一体となって努力致したい。