

“船舶の構造性能に関する基礎的研究”

## 第120研究部会

# 大型船の横部材におけるスロット 周辺のクラック防止に関する研究

## 報 告 書

昭和46年3月

社団法人

日本造船研究協会

# は し が き

本報告書は日本船舶振興会の昭和45年度補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として日本造船研究協会第120研究部会においてとりまとめたものである。

本研究部会の委員は次のとおりである。

## 第120研究部会委員名簿

(敬称略 五十音順)

部会長	秋田好雄(日本海事協会)	
幹事	安東重美(三井造船)	清水作造(石川島播磨重工業)
	鈴木宏(日本鋼管)	原洋一(日立造船)
	藤田謙(東京大学)	真能創(防衛大学校)
	三沢敏夫(住友重機械工業)	三原資巨(三菱重工業)
	安川度(川崎重工業)	山形俊介(三菱重工業)
	山口勇男(日本海事協会)	山越道郎(九州大学)
委員	安藤文雄(船舶技術研究所)	賀来信一(日本海事協会)
	木下勝(三菱重工業)	桑山則男(住友金属工業)
	関内実(三井造船)	高城清(川崎汽船)
	辻寿一(大阪造船所)	中野毅(三井造船)
	中村昭和(川崎重工業)	長沢準(船舶技術研究所)
	永元隆一(三菱重工業)	能登隆一(三菱重工業)
	服部陽一(日立造船)	牧園正孝(山下新日本汽船)
	前田恂(石川島播磨重工業)	村松省吾(三保造船所)
	森正浩(三菱重工業)	八木順吉(大阪大学)
	渡辺次郎(函館ドック)	綿屋悟朗(佐世保重工業)

# 目 次

1. 緒 言	1
2. 統計的損傷調査	2
2.1 ま え が き	2
2.2 調 査 方 法	2
2.2.1 調 査 デ ー タ	2
2.2.2 調 査 対 象 船	2
2.2.3 調 査 デ ー タ の 処 理	3
2.3 調 査 結 果	10
2.4 考 察	22
3. 小型船底模型静的試験	25
3.1 ま え が き	25
3.2 石川島播磨重工業(株)技術研究所における試験	25
3.2.1 試 験 の 概 要	25
3.2.2 試 験 結 果	25
3.2.3 考 察	26
3.2.4 結 論	28
3.3 三井造船(株)千葉研究所における試験	46
3.3.1 供 試 体	46
3.3.2 実 験 方 法	47
3.3.3 計測位置および計測位置の名称	48
3.3.4 実 験 結 果	50
4. 小型模型疲労試験	64
4.1 ま え が き	64
4.2 東京大学における小型模型疲労試験	67
4.2.1 試 験 内 容	67
4.2.2 考 察	67
4.2.3 む す び	69
4.3 日本海事協会技術研究所における小型模型疲労試験	79
4.3.1 緒 言	79
4.3.2 試 験 模 型	79
4.3.3 試 験 の 種 類	79
4.3.4 静的試験による応力測定	79
4.3.5 疲 労 試 験	80
4.3.6 結 言	80
4.4 川崎重工業(株)技術研究所における小型模型疲労試験	89
4.4.1 試 験 要 領	89
4.4.2 試 験 結 果 お よ び 考 察	89
4.5 三菱重工業(株)長崎研究所における小型模型疲労試験	99
4.5.1 静荷重試験結果	99

4.5.2	低サイクル疲労試験結果	99
5.	ガーダ・ウェブ模型振動試験	119
5.1	まえがき	119
5.2	実験方法	119
5.2.1	模          型	119
5.2.2	実験方法	121
5.3	実験結果とその考察	122
5.4	固有振動数の計算	125
5.4.1	格子構造におきかえた場合の固有振動数	125
5.4.2	ウェブをステイフナとステイフナ間パネルの連成系とした 固有振動数の計算	127
5.5	水中で振動する場合の付加水の計算	129
5.6	む      す      び	131
6.	応力解析	133
6.1	まえがき	133
6.2	三井造船(株)千葉研究所のモデル化方式による応力解析	134
6.2.1	応力解析対象モデル	134
6.2.2	計    算    方    法	135
6.2.3	計    算    結    果	136
6.2.4	小型船底模型静的試験結果との比較	145
6.2.5	小型模型疲労試験静的試験結果との比較	150
6.2.6	考          察	155
6.2.7	結          論	183
6.3	日立造船(株)技術研究所のモデル化方式による応力解析	185
6.3.1	模    型    寸    法	185
6.3.2	計    算    方    法	185
6.3.3	計    算    結    果	187
7.	スロット部の疲労解析の例と問題点【参考資料】	194
7.1	まえがき	194
7.2	SR120・45年度小型模型疲労試験の一解析方法	195
7.3	スロット部の疲労解析における種々の問題点	200
7.4	当社社内疲労実験結果との対応	201
7.4.1	KK2予備実験	201
7.4.2	デイベガーダ疲労試験	202
7.4.3	結果について	204

# 1. 緒 言

大型船の横強度部材のウェブには、縦通材を貫通させるためのスロットが多数設けられるが、そのスロット周辺にクラックが多数発生し、大きな問題となつている。このクラックの発生原因は機構的にも複雑で、その原因を明らかにし、このような損傷の発生を防止する対策を見出すためには、系統的な調査と実験研究が必要である。日本造船研究協会第120研究部会は、これらの損傷の原因を究明し、船体構造をより合理的なものにする資料を得るために設置された。

本年度実施された調査・研究の項目および内容の概略は次の通りである。

## (1) 統計的損傷調査

スロット部の損傷発生原因について、不明な点も多いので、多数の損傷例を集め、その実態を統計的に解明し、本研究を進める上に重要な指針を得る。

## (2) 静的模型試験

スロット部の損傷原因および損傷防止対策を究明するため、縮尺  $1/4$  の船底パネル模型を使用し、これに静水圧を加え、スロット部をはじめ各部応力分布等を求め、スロット周辺における各部材の荷重分担率、荷重伝達機構、スロット部の補強効果等を調べる。

## (3) ガーダ・ウェブの振動試験

ガーダの水中および空中振動を模型試験によつて調べ、ウェブの振動とスロット部の損傷の関係を明らかにする。

## (4) 疲労試験

小型ガーダ模型を使用して疲労試験を実施し、変動荷重に対するスロット部の疲労強度について調査する。

## 2. 統計的損傷調査

### 2.1 ま え が き

スロット部の損傷発生原因については、依然不明な点が多く残されている。多数の損傷例を集め、その実態を統計的に解明できれば本委員会の研究を進める上に有力な指針が得られるものと期待できる。

本調査は現在就航中の大型船（油送船、鉍石専用船、鉍油兼用船等）73隻を対象に、その点検時の損傷調査記録を全国の造船所より集め、スロット部の損傷を電子計算機を使用して統計的に解析したものである。本年度は損傷の基礎的な問題の解明に重点を置き、損傷の種類別頻度の実態を明らかにしたり、船種、主機の種類、構造タイプ等スロット部の損傷に影響すると思われる諸因子と損傷頻度との関連等を主な調査項目とした。

### 2.2 調査方法

#### 2.2.1 調査データ

調査対象船はD/W約50,000トン以上の油送船、鉍石運搬船および鉍油兼用船とし、調査対象となり得るおよその隻数を把握するために、損傷データの有無等に関し予備的な調査を行なった後に次のような調査要領に従い本調査を実施し、73隻分のデータを入手した。

データの処理は電算機を使用して行なうので、調査は添付のインプットフォームに直接記入したものを回収することとした。各船のデータはGENERAL DATA/STRUCTURE DATA/INSPECTION RECORDの3グループよりなる。

GENERAL DATAには船種、主要寸法、主機の種類、竣工年月等のほか、隔壁配置、縦通材および横桁の心巨、支材の数等の主要構造配置の記述を含み、STRUCTURE DATAにはスロット、ステイフナ、トリッピングブラケット等の寸法およびタイプを記述する。なお、ステイフナおよびトリッピングブラケットの構造タイプは図2.2.1(1)のごとく分類した。調査した損傷データはINSPECTION RECORDに各横桁ごとに対象としたスロットの総数(N)とともにステイフナ下端にクラックを発生したスロット数(S)、スロットまわりの桁板にクラックを発生したスロット数(W)および前記両者のクラックを同時に発生したスロット数(B)を記入する。その際各横桁は図2.2.1(2)に示すように桁の長さ方向に細区分し、前記N/S/W/Bは同一フレーム内で各区分位置ごとに分けて記入し、さらにスロット部の構造形式（ステイフナかトリッピングブラケットか/カラーの有無等）に応じて記入する。調査記入の対象はあくまで実際に検査したフレームおよび区分位置のみとした。

その他の調査項目の詳細はフォームから自明である。

#### 2.2.2 調査対象船

データを入手した調査対象船の船種およびD/W別の変数は次の通りである。

DW(t)	50,000以上 ~100,000未満	100,000 ~150,000	150,000 以上	小計
油送船	28	12	6	46
鉍石運搬船	16	1	0	17
鉍油兼用船	8	2	0	10
小計	52	15	6	合計 73

注) 対象船は昭和38年1月から昭和43年12月末の間に完工したものの。

## 2.2.3 調査データの処理

各社におけるインプットデータの作製および回収されたデータのチェックには何れもかなりの労力を要した。データ記入の際の説明の不徹底もあつて、データ記入上の解釈の相違または誤記が偶に散見されたが、問合せと修正のための時間の制約等の事情から中には修正が不十分なものも避けられず、それらは調査項目によつては集計対象から部分的に除外した。また損傷発生の傾向が他船と大幅に異なっていると思われるもの5隻については、今回は集計に加えるのを保留した。

インプットされた各船の損傷データは表2.2.1(1)に示すパラメータの組合せにより分類集計され、対応するスロット総数を母数として損傷発生頻度を計算した。アウトプットは1船ごとのチェックアウトプットとともに全船の集計結果を前記集計パラメータの組合せによる条件に対してスロットの総数(N)、それに対応する損傷タイプ別実数(S・B・W)および発生頻度(S/N・B/N・W/N)を示した。

表 2.2.1 データ集計区分パラメータ一覧

番号	内 容	変化個数
1	スロット数・損傷タイプ(N/S/B/W/挫屈数)	5
2	部材別・区分位置別	15
3	ステイフナタイプ別	10
4	年度別(2年以下/同船)	2
5	“(1年ごと)	10
6	ステイフナ基部形状	4
7	ロンジのタイプ	3
8	長さ方向分布	10
9	タンクの種類	4
10	船の種類	3
11	スロットの向き	2
12	D/W区分	3
13	主 横 区 分	2
14	トリッピングブラケットのスペース区分	2
15	直接荷重臨力区分	2
16	センターガードの有無	2
17	サイドガードの有無	4
18	水平メインの有無	2
19	センター/ウイングタンクの区分	2
20	High Shear Area か否か	2
21	High Direct Stress Area か否か	2
22	ステイフナ付とステイフナなしの区分	2
23	カラーの有無	2
24	ステイフナとトリッピングブラケットの区分	2
25	バックブラケットの有無	2
26	ステイフナ下端切欠の有無	2
27	ステイフナ下端すそのRの有無	2

SR120 換機調査用紙 (フォーマット)

GENERAL DATA										LABEL										PROBLEM									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
船のコード番号										船名										主機 RPM									
船のコード番号										船名										主機 RPM									
WING TANK AT DECK										BOTTOM LONG L SPACE										SIDE LONG L SPACE									
AT BOTTOM										PR NO OF TIGHT BHDS (WING TANK)										(1) BHD の APPROX 位置									
TRANSVERSE SPACE (1)										PR NO OF SWASH BHDS (WING TANK)										(2) (9) (10) (11) (12)									
TRANSVERSE SPACE (2)										PR NO OF TIGHT BHDS (CENTRE TANK)										(3) (8) (9) (10) (11) (12)									
TRANSVERSE SPACE (3)										PR NO OF SWASH BHDS (CENTRE TANK)										(4) (7) (8) (9) (10) (11) (12)									
TRANSVERSE SPACE (4)										BOTTOM TRANSVERSE (WING TANK)										BOTTOM TRANSVERSE (CENTRE TANK)									
GDR BHD (1)										SIDE TRANSVERSE (UPPER PART)										SIDE TRANSVERSE (LOWER PART)									
GDR BHD (2)										LONG L BHD WEB (UPPER PART)										LONG L BHD WEB (LOWER PART)									
GDR BHD (3)										DECK TRANSVERSE (WING TANK)										DECK TRANSVERSE (CENTRE TANK)									

REMARKS:

- 船のコード番号; 各造船所の通し番号 (右記つめて記入)
- 船名; NK/LR/AB/NV/BV等
- T=TANKER
- C=CORE CARRIER
- O=ORE OIL CARRIER
- DW; DEAD WEIGHT (t)
- L.B.D.d.; 単位
- 主機種類; (D=DIESEL)
- RPM; 主機回転数 (MCR)
- PS; 主機出力 (MCR)
- シリンダ数; (ディーゼルのとき空機)
- 単位; プロベラ数
- 竣工; 年号は船和, 月は右記つめて記入
- WING TANK 欄; (単位) BOTTOM 欄に付ける値は DECK 等しいとき省略しなさい。
- LONG L SPACE; (単位)
- TRANSVERSE SPACE; (単位)
- GDR 有無; その欄のとき=1
- STRUT (又は HORZ) の位置 (船和); (船和 A)
- TRANSVERSE 欄; (単位) 欄に記入する値は X 軸または Y 軸を記入 (d) (t) (b) (tf)
- (1) BHD の APPROX 位置; (単位)
- CENTRE TANK BHD が WING TANK 等しければ省略可





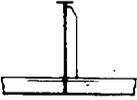
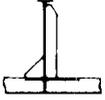
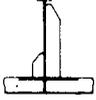
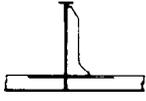
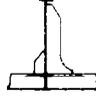
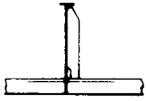
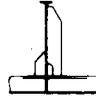
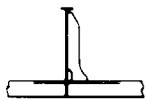
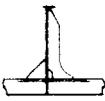
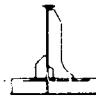
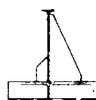
	WEB STIFFENER			BACK BRACKET 材			
	TYPE			TYPE			
WEB STIFFENER	A			P			
	B			Q			
	C		基部に 切欠き あり	R			
	D		基部に 切欠き あり	S			
TRIPPING BRACKET	E		基部切欠 の有無に かかわらず 共通	T			
	F		基部切欠 の有無に かかわらず 共通	U			
	G		基部切欠 の有無に かかわらず 共通				

図2.2.1(i) WEB STIFFENER & TRIPPING BRACKET (TYPE 別記号)

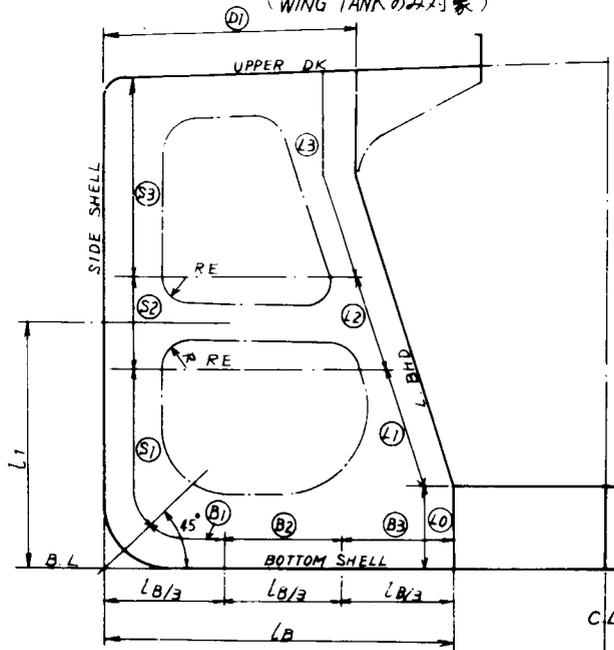
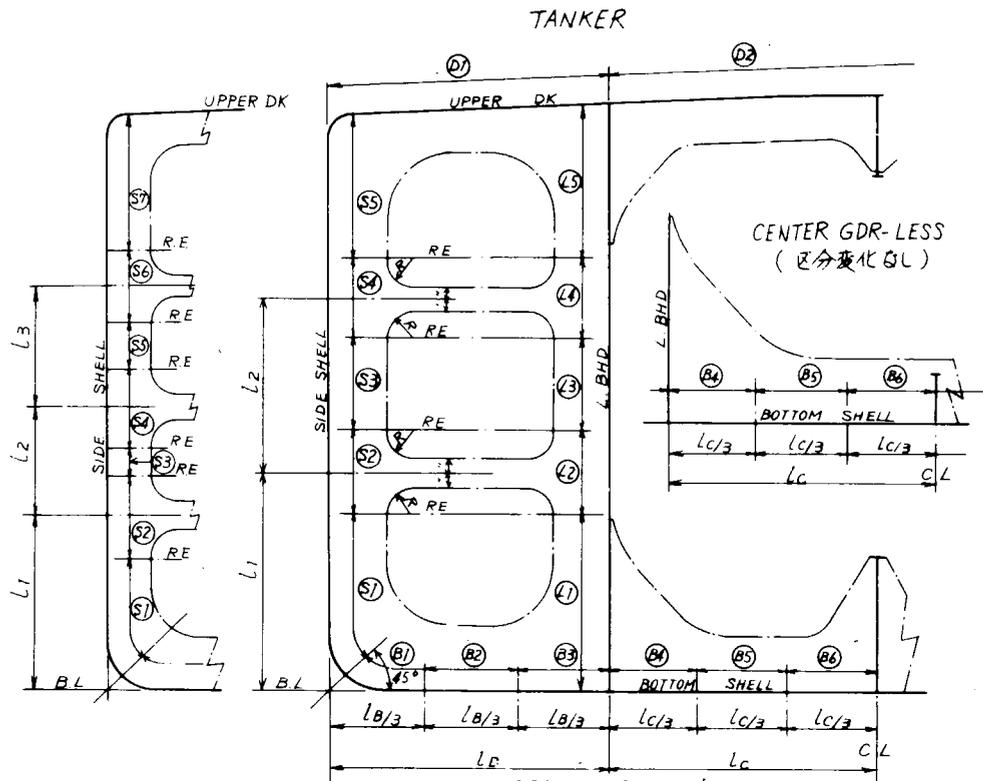
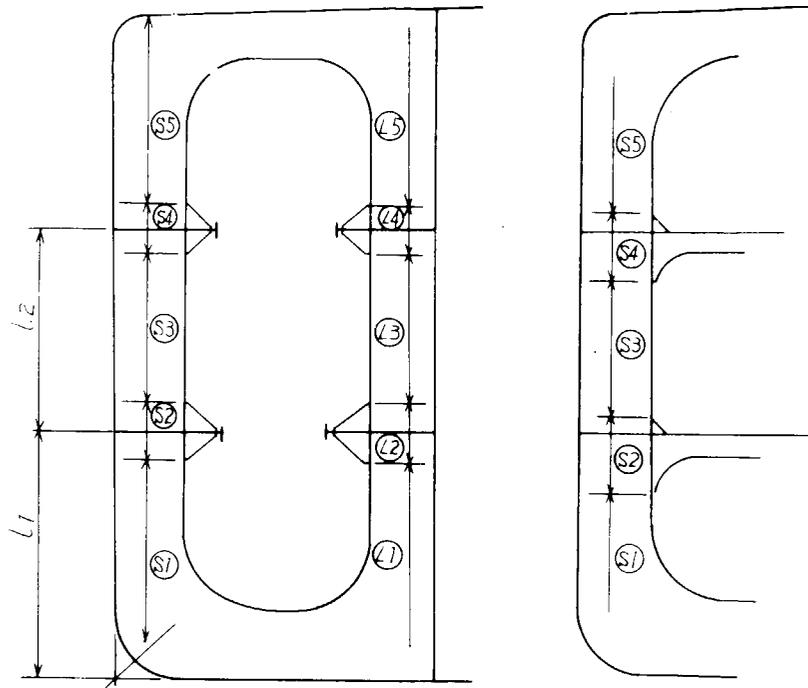


図 2.2.1 (2) 区分位置記号



(注) 特記の他は前頁図にならう。

図2.2.1(3) HORIZONTAL MAIN の場合

IN WAY OF STRUT

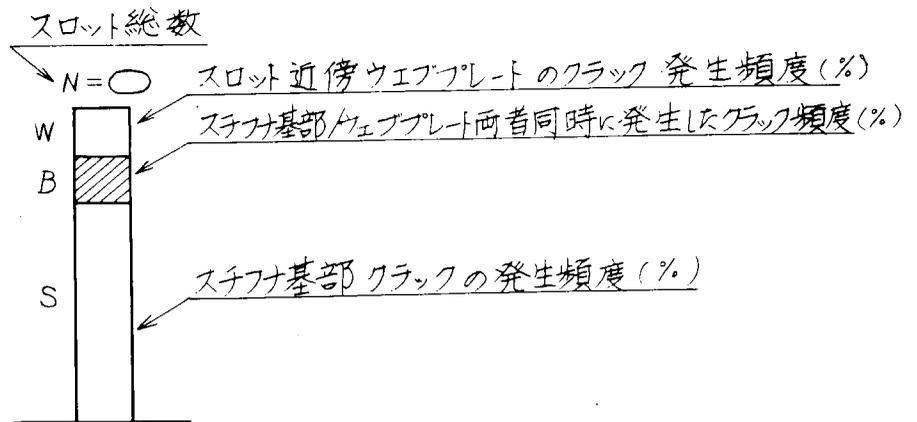
## 2.3 調査結果

調査データの集計・解析は次の各項目について行なった。

- (1) 船種別の比較
- (2) DEAD WEIGHT による比較
  - ① 無条件比較
  - ② ボトムトランスのみの比較
- (3) 主機の種類による比較
  - ① 無条件比較
  - ② ストラット基部対象による比較
  - ③ トリッピングブラケットのスペースによる比較
- (4) 就航年による比較
  - ① 無条件比較
  - ② 船種別による比較
  - ③ 主機の種類による比較
- (5) 船長方向の分布
  - ① 無条件比較
  - ② 主機の種類による比較
  - ③ 就航年による比較
  - ④ 部材別の比較
    - (i) ボトムトランス対象
    - (ii) サイドトランスおよび縦隔壁ウェブ/ストラット基部/サイドトランス最上スパンを対象
- (6) 部材および区分位置別の比較
  - ① 無条件比較
  - ② 船種別比較
  - ③ 就航年による比較
  - ④ (i) ストラット基部とその他の比較  
(ii) High Shear 区域とその他の比較
- (7) スロット近傍構造による比較
  - ① カラーの有無による比較
    - (i) 就航年による比較
    - (ii) ボトムトランス対象による比較
    - (iii) サイドトランスの最上スパン対象による比較
    - (iv) デッキトランス対象による比較
    - (v) 通常のウェブスチフナ付スロット部による比較
    - (vi) トリッピングブラケット付スロット部による比較
  - ② ステイフナとトリッピングブラケットの比較

- ③ スティフナ基部の「かじり」の有無による比較
  - ④ スティフナ基部のすそのRの有無による比較
  - ⑤ ロンジの形状による比較
- (8) スロットの向きによる比較
- ① ポットトランス対象とした比較
  - ② 船種別比較
- (9) タンクの構造配置による比較
- ① センターガーダの有無による比較
  - ② ストラットの数による比較
- (10) スティフナ基部の平均応力による比較
- ① DEAD WEIGHT とスティフナ基部応力
  - ② スティフナ基部応力による比較
- (11) ウェブパネルの座屈の発生頻度

上記各項目についてスティフナ基部のクラック、スロット近傍ウェブプレートのクラックおよび両者同時に発生したクラックのそれぞれの発生頻度（該当する条件または範囲のスロット総数を母数として）をパーセントで示したものを以下のグラフにまとめた。図中Nは上記スロット総数を示す。なお棒グラフで示す場合は下図の表示としている。



項目(11)は、上記のごとき各種クラック発生頻度を関連して参考のためウェブパネルの座屈の発生頻度を調査したもので、頻度の計算はパネル数を代表させる値として便宜的にスロット数を母数として算出したものである。

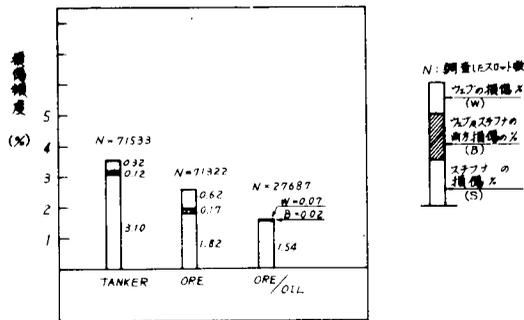


図 2.3.1 船種別の比較

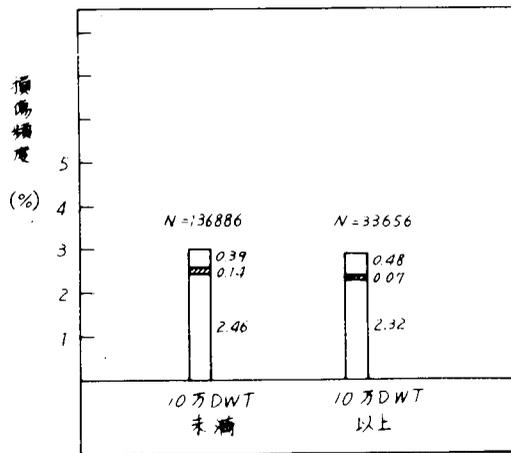


図 2.3.2(1) D.W. による比較

— 無条件比較 —

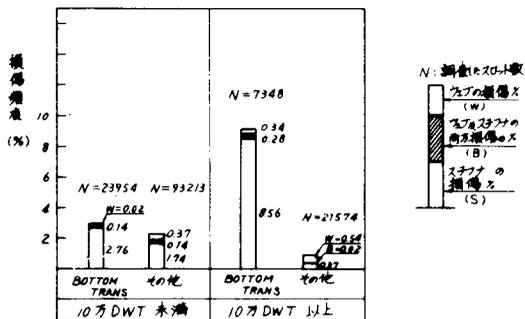


図 2.3.2(2) D.W. による比較

— BOTTOM TRANS のみの比較 —

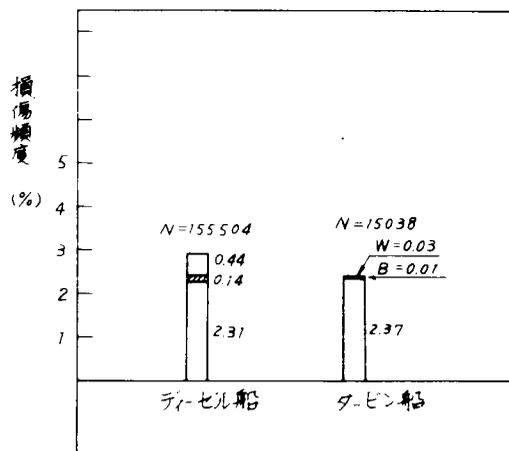


図 2.3.3(1) 主機の差による比較

— 無条件比較 —

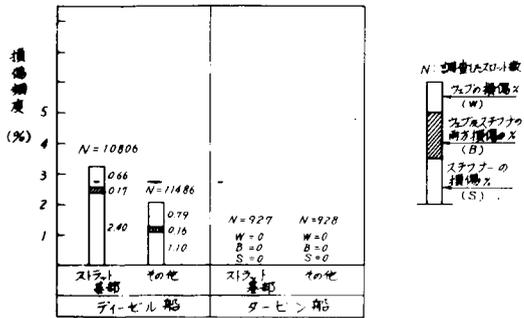


図 2.3.3(2) 主機の差による比較

— ストラット基部のみ対象 —

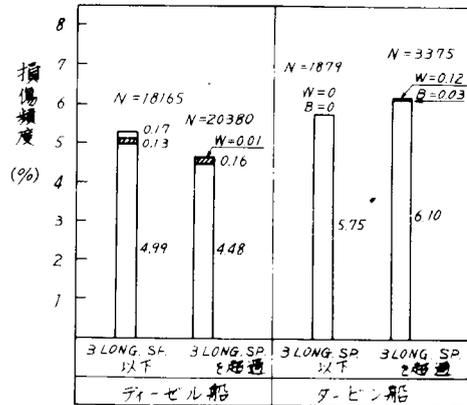


図 2.3.3(3) 主機の差による比較

— T. B<sup>KT</sup> のスペースによる比較 —

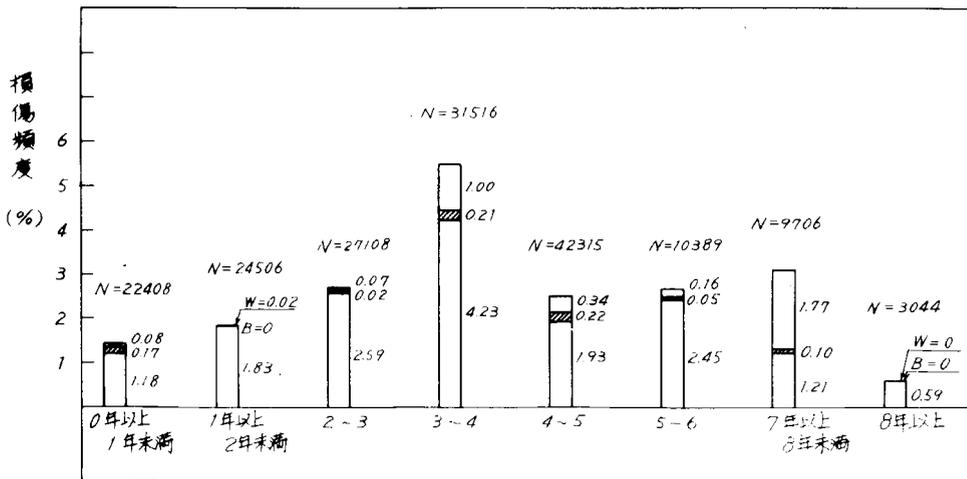


図 2.3.4(1) 就航年による比較

— 無条件比較(1年毎)—

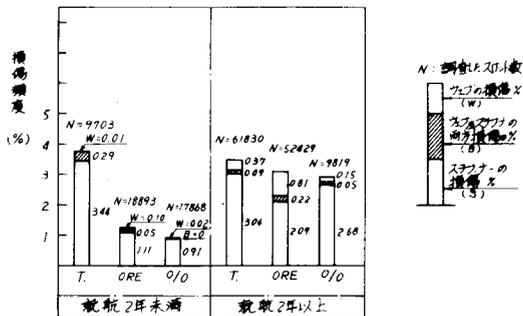


図 2. 3. 4 (2) 就航年による比較  
— 船種別の比較 —

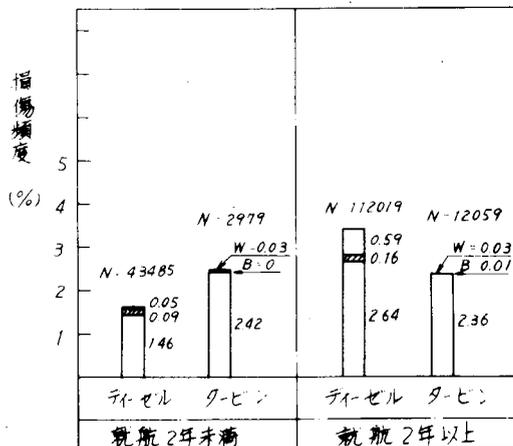


図 2. 3. 4 (3) 就航年による比較  
— 主機の差による比較 —

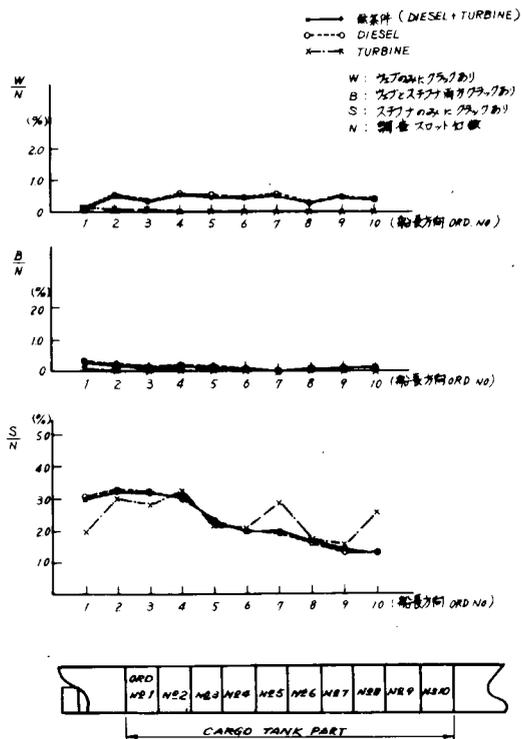


図 2. 3. 5 (1) 船長方向の損傷頻度分布  
(無条件および主機別)

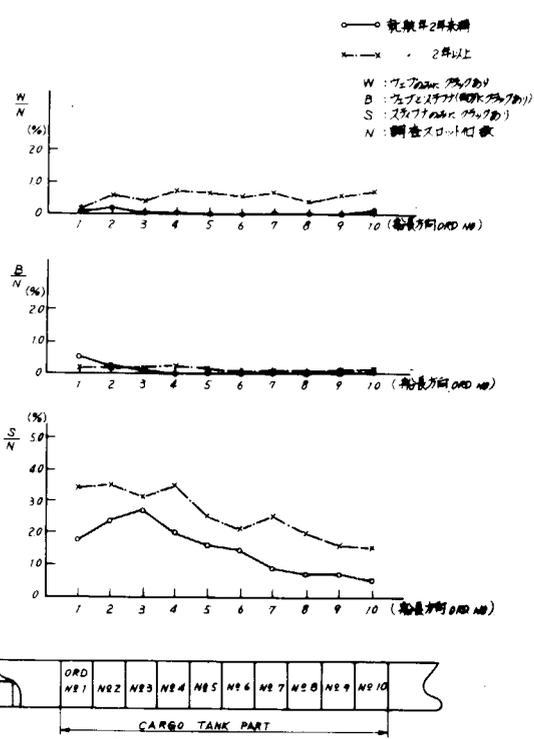


図 2. 3. 5 (2) 船長方向の損傷頻度分布  
(就航年2年未満と2年以上)

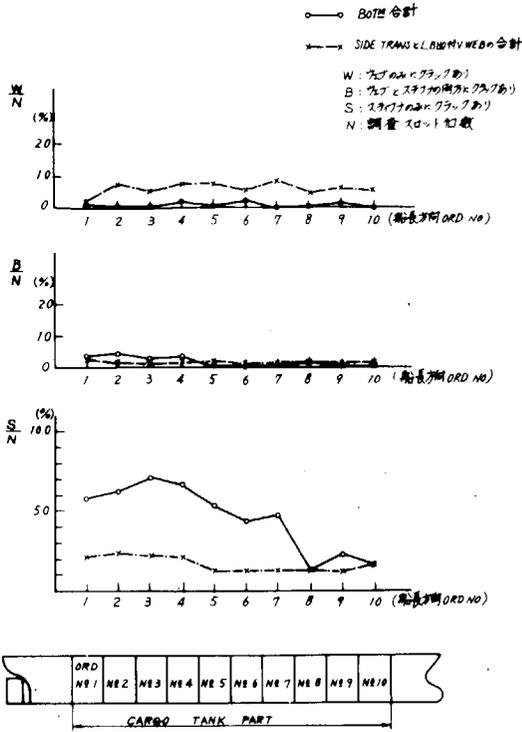


図 2.3.5(3) 船長方向の損傷頻度分布(部材別比較)  
 BOTM全体, (SIDE+L.B.V.WEB)全体

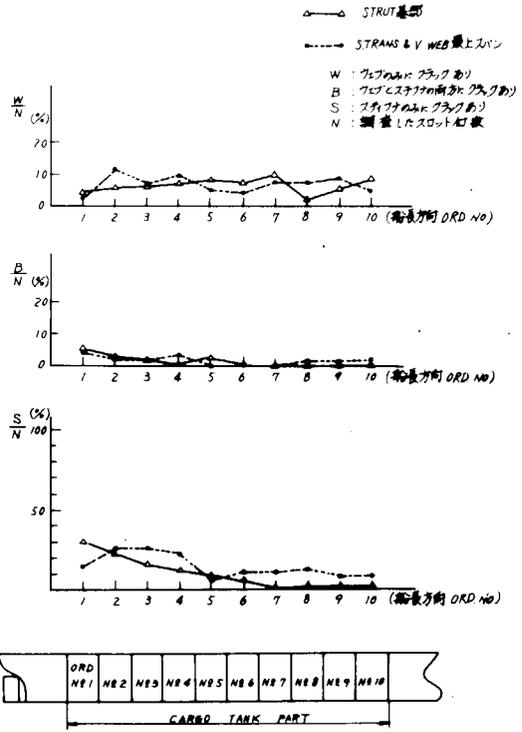


図 2.3.5(4) 船長方向の損傷頻度分布(部材別比較)  
 STRUT基部とSTRANS, V.WEB最上スパン

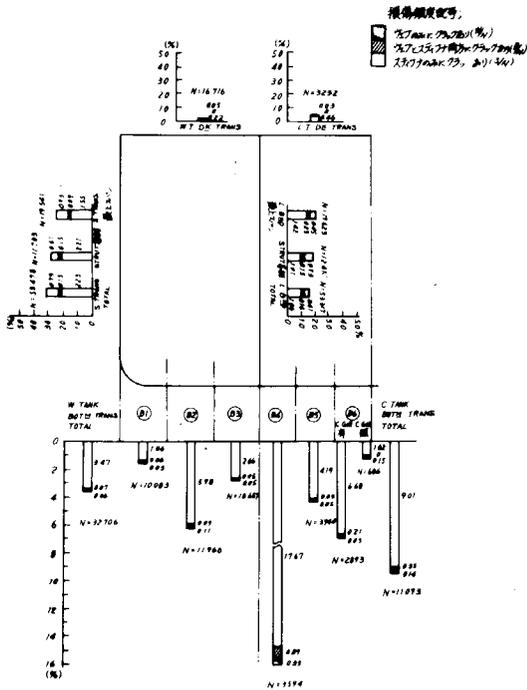


図 2.3.6(1) 部材別比較(無条件)

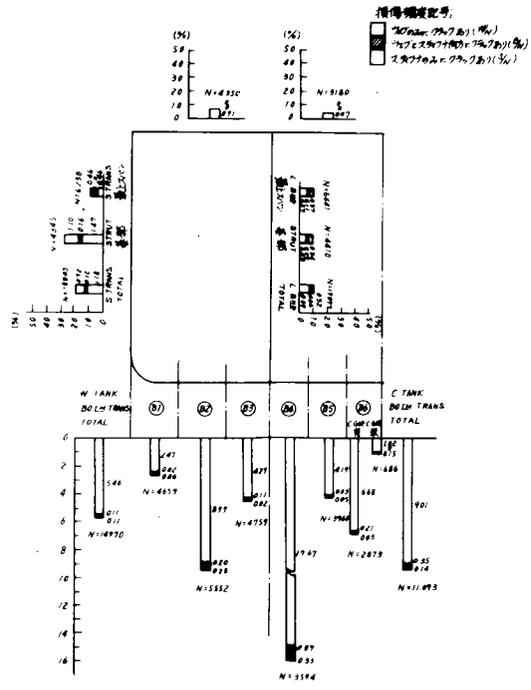


図 2.3.6(2) 部材別比較(TANKER)

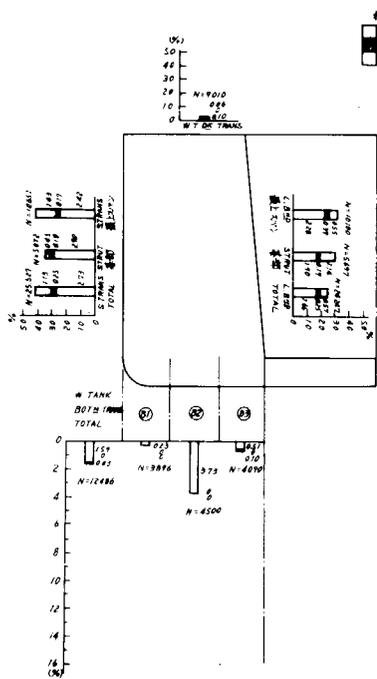


図 2.3.6(3) 部材別比較 (ORE CARRIER)

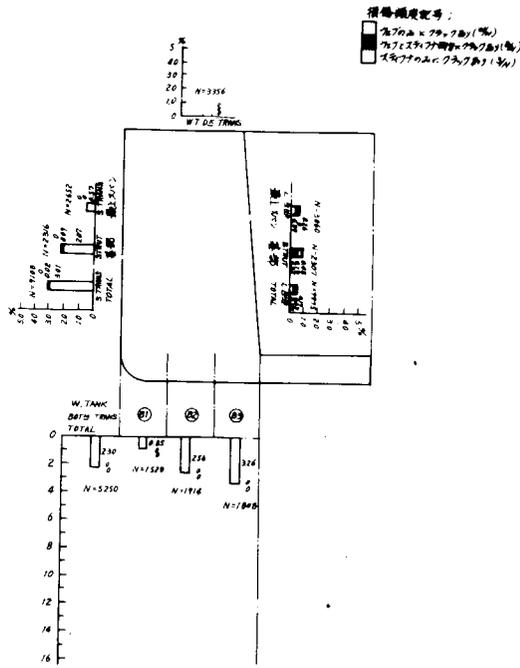


図 2.3.6(4) 部材別比較 (ORE OIL 兼用船)

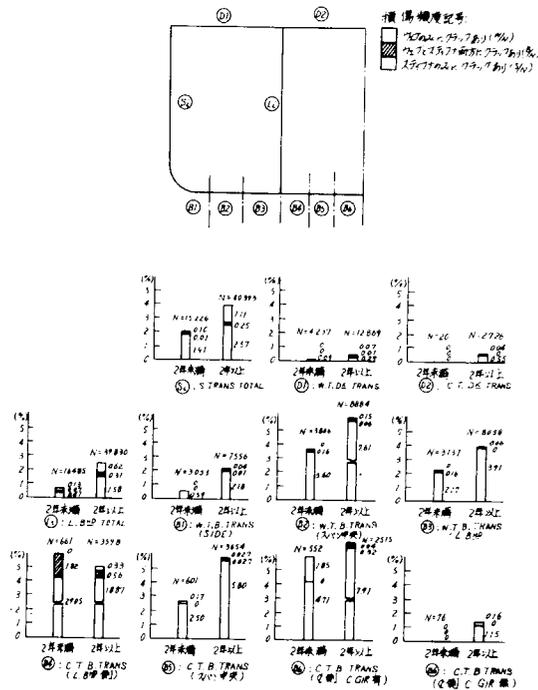


図 2.3.6(5) 部材別比較 (就航年 2年未満と 2年以上)

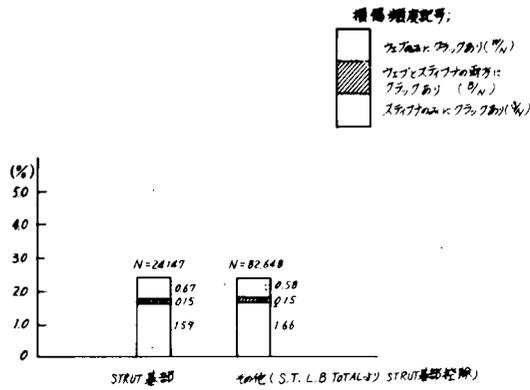


図 2.3.6(6) STRUT 基部とその他の比較  
(SIDE TRANS & L.B.HD 付 V.WEB  
TOTALより STRUT 基部控除)

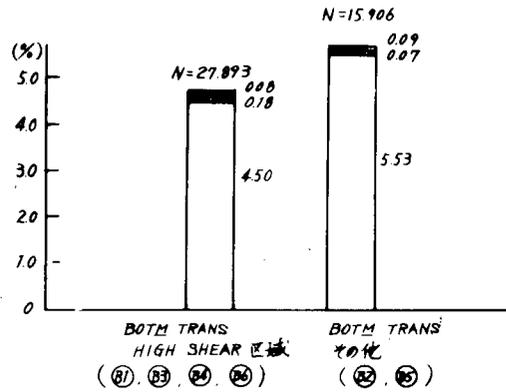


図 2.3.6(7) BOTTOM TRANS HIGH  
SHEAR 区域とその他の比較

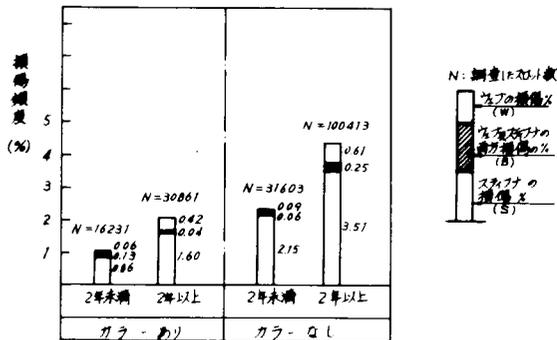


図 2.3.7(1) カラーの有無による比較  
— 就航年による比較 —

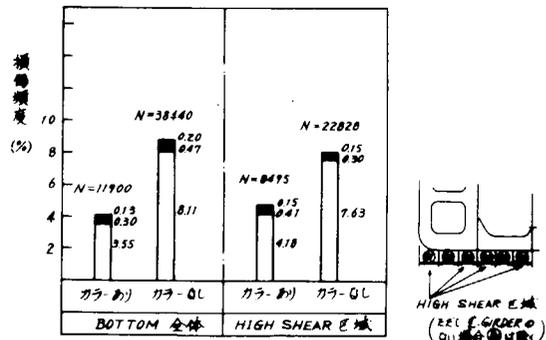


図 2.3.7(2) カラーの有無による比較  
— BOTTOMのみ対象 —

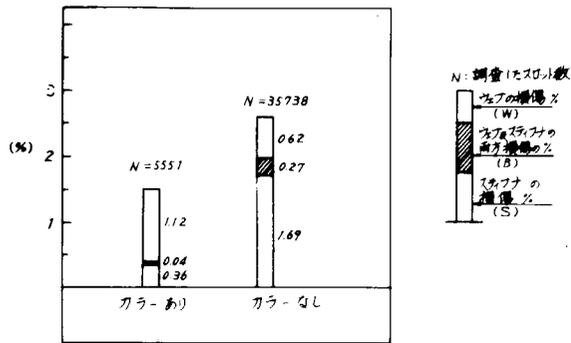


図 2.3.7(3) カラーの有無による比較

— S, TR, & VERT, WEB.

— 最上スパンを対象 —

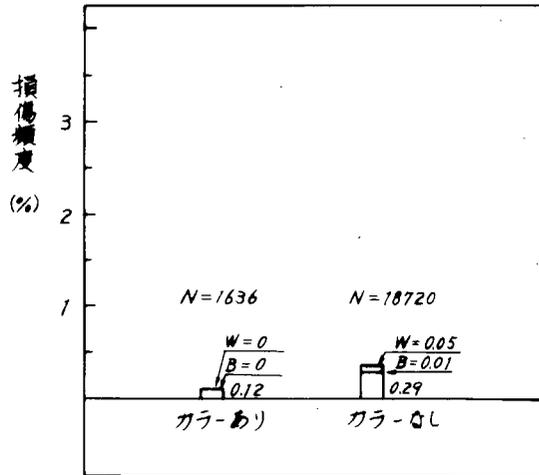


図 2.3.7(4) カラーの有無による比較

— DECK TRANS 対象 —

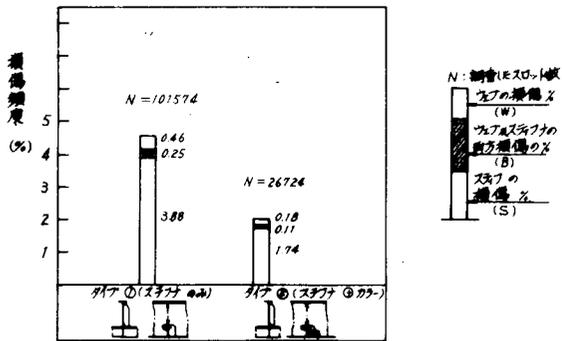


図 2.3.7(5) カラーの有無による比較

— タイプ①とタイプ②の比較 —

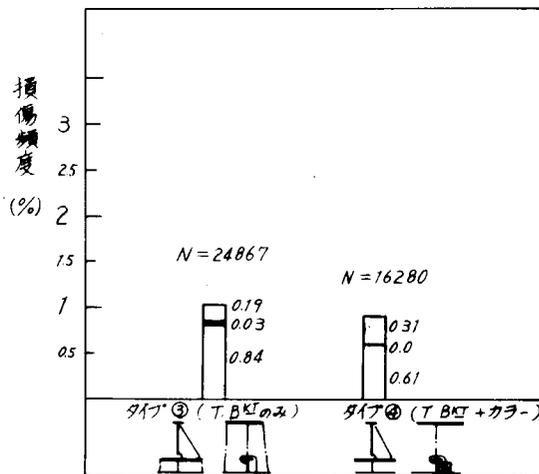


図 2.3.7(6) カラーの有無の比較

— タイプ③とタイプ④の比較 —

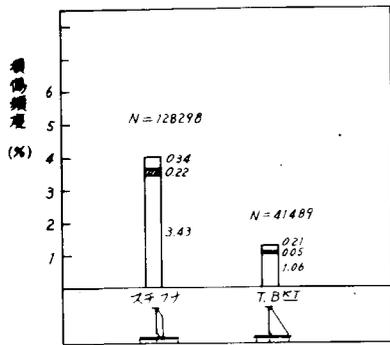


図 2. 3. 7 (7) スロット近傍の構造による比較  
— ステイフナと T.BKT の比較 —

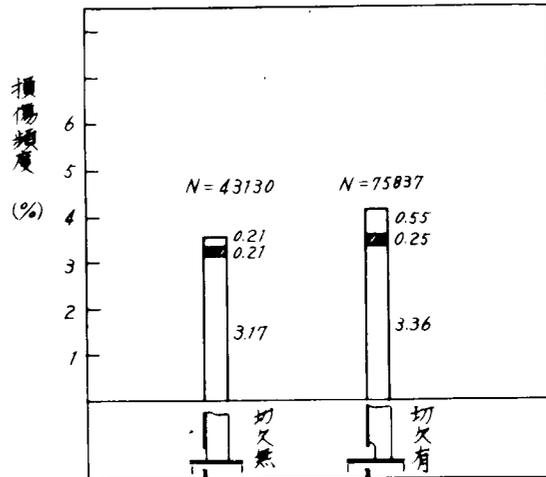
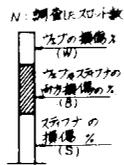


図 2. 3. 7 (8) スロット近傍の構造による比較  
— ステイフナ基部の切欠の有無による比較 —

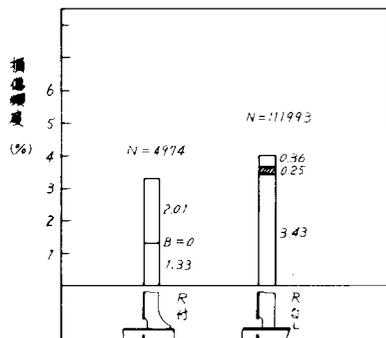


図 2. 3. 7 (9) スロット近傍の構造による比較  
— ステイフナのすそのRの有無による比較 —

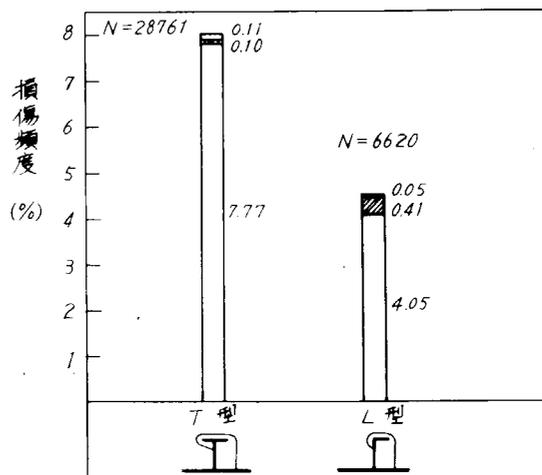


図 2. 3. 7 (10) スロット近傍の構造による比較  
— ロングの型による比較 (BOTTOMのみ対象) —

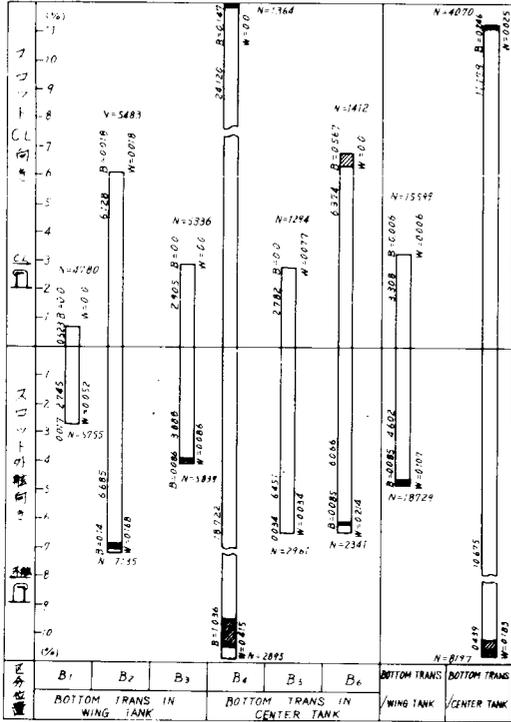


図 2.3.8(1) スロットの向きによる比較  
(ボトムトランス対象)

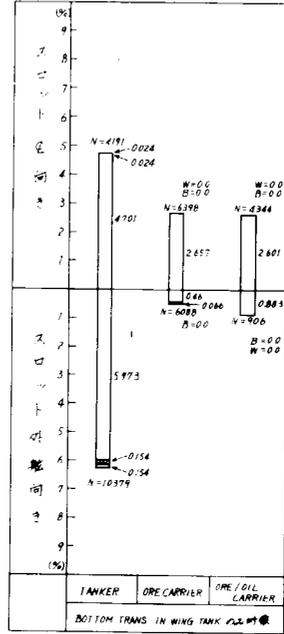


図 2.3.8(2) スロットの向きによる比較  
(船種別比較)

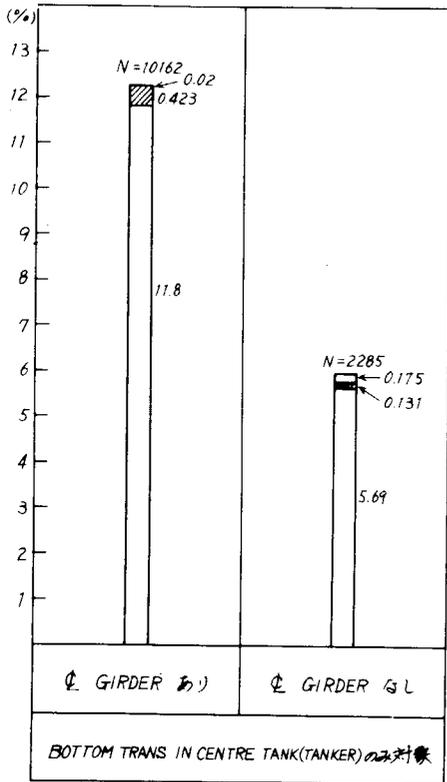


図 2.3.9(1) タンクの構造配置による比較  
(センターガーダの有無による比較)

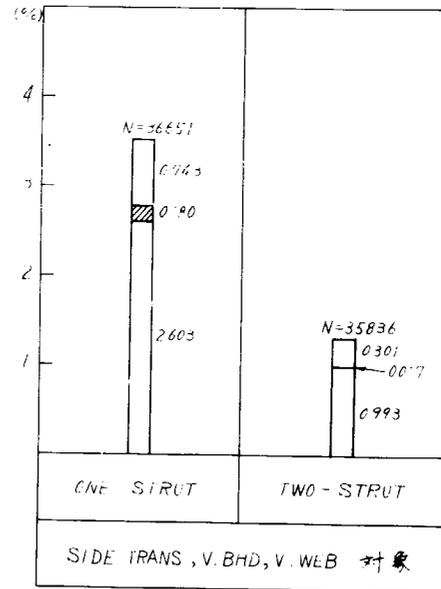


図 2.3.9(2) タンクの構造配置による比較  
(ストラットの数による比較)

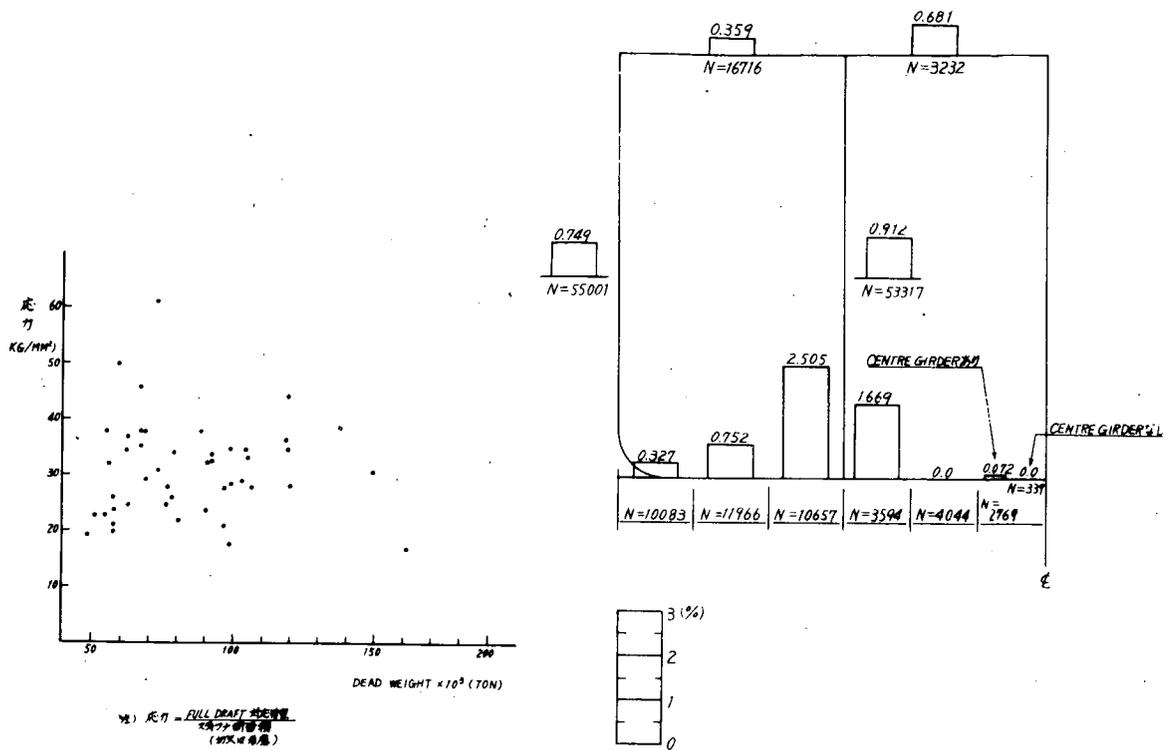


図 2.3.1 0(1) スタイフナ基部の平均応力

による比較

(DEAD WEIGHT と スタイフナ  
基部応力)

図 2.3.1 1 ウェブパネルの座屈の発生頻度

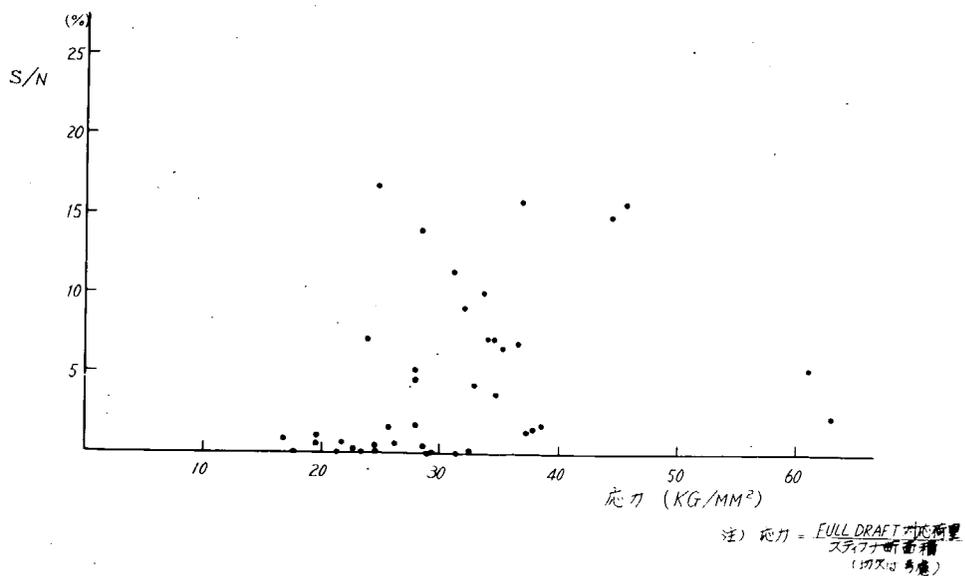


図 2.3.1 0(2) スタイフナ基部の平均応力による比較

( スタイフナ基部応力による比較 )

## 2.4 考 察

本調査は完了した段階ではないので、これらの調査データを前節の項目に分けて整理した目的と現時点で明らかになったことがらについて列挙するに止める。

### 損傷の傾向

図2.3.1の資料から単純に求めた損傷率は約3%であり、その約80%はステイナ基部の損傷で、ウェブの損傷も加わったものを含めると85%を超える。この傾向はこれまでの調査で見出された結果と全く一致している。

なお、各資料から各船の損傷率の頻度分布を求めることは、局部的な損傷調査資料も含まれているのでできなかつた。

### 船種別の比較

船種のちがいによる荷重条件の差、腐蝕の差等が損傷発生にどのように影響しているかを見るために比較した。荷重条件としては鉱石運搬船の玄側タンク部が苛酷と考えていたのであるが、図2.3.1に示すようにタンカーの損傷率が最も高いという結果が得られた。

このような結果になるのは、図2.3.4.(2)2示すように就航2年未満のタンカーの損傷率が他に比べ高いこと、また、図2.3.3(2)および(3)に示すように中央タンクの損傷率が玄側タンクより高いこと等が挙げられる。玄側タンク内の損傷ではタンカーだけは船底部の損傷が多い。このような現象があらわれる原因については不明である。

### DEAD WEIGHT による比較

船型が大型になるほど船底部のステイナ基部の応力が増加する傾向があると見られるので、D.Wと損傷率の関係を調査した。図2.3.2(1)に示すように、大型になつても損傷頻度に差は全然認められなかつた。ただし、10万DWT以上では船底部の損傷が著しく増加する。(図2.3.2(2))

これは船底部のステイナ基部の応力が大型になるとともに増加するためとも思われるが、同時に他の部分の損傷頻度が低下することを考えると、このように説明しにくい。(図2.3.10(1)参照)

### 主機の差による比較

振動がスロット周辺の損傷に影響するのであれば、主機のちがいが損傷頻度に影響すると考えられるので比較した。しかし、図2.3.3(1)に示すように両者の間に有意の差は認められなかつた。ただし、局部的にみると、ストラット基部でははつきり差があらわれている(図2.3.3(2))、この部分の損傷頻度の船長方向分布(図2.3.5(4))は振動の影響らしいものが認められることをあわせ考えると、この部分では主機の影響があらわれているといえる。ただし、ストラット基部の損傷頻度は他の部分と比べて高くない。

(図2.3.6(1)~(5)参照)

振動の影響をみるためトリッピングブラケットのスペースによる比較もしたが、図2.3.3(3)に示すように差は見出せなかつた。

### 就航年による比較

損傷頻度が就航年数によつて特色のある変化を示すかどうかを調査した。ただし、資料の関係で例えば4年目に発見された損傷の中には、それ以前に修理され、再度損傷したものも含まれる。図2.3.4(1)に示すように4年目に損傷頻度のピークが見られるが、これは検査制度の影響とみられる。8年目にも小さな山がみられるが、試料数が余り多くないので、信頼度で劣る。

既述のようにタンカーと他の船では損傷発生の様子が異なり(図2.3.4(2))主機によつても傾向が異なる(図2.3.4(3))。

### 船長方向分布

振動が影響する場合、船尾側の損傷頻度が高くなると思われるので、船長方向の分布を求めてみた。図2.3.5(1)からはディーゼル船では船尾側は頻度が高く、船首に行くに従つて漸減する傾向は認められる。

一方、タービン船ではこのような傾向がみられない。

また、振動が影響する場合、比較的早期に損傷が発生すると思われるので、就航年数による船長方向の分布の差を調査した。(図2.3.5(2))2年未満と2年以上は傾向は似ているが、全般的に頻度が増加する。部材別では船底部が船尾部の頻度が高く、船首側は低下する傾向が見られるが、他の部材ではそのような傾向は見られなかった。(図2.3.5(3))また既述のように頻度は低いが、ストラット基部でも同一の傾向があらわれている。(図2.3.5(4))

#### 部材および区分位置別の比較

従来から認められていたように船底部の損傷頻度は他より高い。特に高いのは、中央タンクのB4の部分で、18%近い損傷率で、何故この部分に損傷が集中するのか研究する必要がある。全体的に中央タンク船底ではB4、B6のブラケット部の損傷率が高く、遂に玄側タンクではB2の等断面部の損傷が高いのも興味ある現象といえる。(図2.3.6(1))

船種別にみると既述のようにタンカーでは船底部が高く、鉱石運搬船では逆に船側、縦隔壁部が高く、ウェブの損傷頻度が高くなっている。鉱油兼用船では両者の中間に位するが、船底部の区分位置別の損傷頻度はタンカーとは異なる。(図2.3.6(2)~(4))

各部分の損傷発生率と就航年の関係を調べると、B4の部分だけが特異な傾向をもち、2年未満の損傷率が高い。振動が影響する場合には、比較的早期に損傷が発生するとすると、B4の損傷原因は振動の面から検討してみるのも一つの方法といえる。ただし、図2.3.6(5)は試料数が少ない例も多いので信頼度の点で若干問題がある。

横桁に働く剪断力の影響を見るため船底横桁を高剪断力の部分(B1、B3、B4、B6)と、その他の部分に分けて損傷頻度を比較したが、はつきりした傾向はつかめなかった。

#### スロット近傍構造による比較

構造方法の差による損傷率の変化を調査した。カラーによる補強効果を種々の場合に分けて調査したが、常にカラーによる損傷頻度の低下は明確に認められた。(図2.3.7(1)~(6))

ステイフナとトリッピングブラケットの損傷頻度の差は図2.3.7(7)に示すように、明らかにトリッピングブラケットのほうが損傷率は小さい。ステイフナ基部の切欠きの有無の差を調査した結果が図2.3.7(8)で、若干切欠きのないほうが損傷が少ないのではないと思われる。ステイフナ基部にRを付けた場合とそうでない場合の損傷率を調査した結果は、図2.3.7(9)に示すように、Rがあるほうが損傷は少ない。

ロンジの形状をL型またはこれに近くすると、ステイフナ基部応力は相当大きく減少するので、L型とT型の損傷頻度の差を調査した結果が図2.3.7(10)で、L型ロンジのほうが明らかに損傷率が低下する。

#### スロットの向きによる比較

船底横桁のスロットは中央タンクでは内向き、玄側タンクでは外玄向きのほうがステイフナ基部応力の上限值が減少する。今回の調査では図2.3.8(1)に示すように、期待とは逆の傾向が認められる。船種別に調べると、図2.3.8(2)に示すように、タンカー以外では期待通りの結果が得られている。タンカーだけが逆の傾向を示す理由は現在のところ明らかでない。

#### タンクの構造配置による比較

横桁の構造によつて損傷発生率に差があるかどうかを調査した。図示のように、中心線ガーダのない構造、ストラット2本の構造では、明らかに損傷は減少する。(図2.3.9(1)および(2))ただし、図2.3.9(1)の場合は中心線ガーダのない場合の試料数はやや少ない。

#### ステイフナ基部平均応力による比較

既述のように、大型化とともにステイフナ基部の応力は漸増傾向にあるように見えるので、単純にロンジから伝達される荷重をステイフナの断面積で除した見かけの平均応力について、D.W.との関係を調べた。(図2.3.10(1))15万D.W.T~20万D.W.Tの船の資料が少なかつたため、同図だけからは結論は下

し得ない。

また、この応力と損傷頻度の関係を求めた。これも高応力の場合の資料が少ないから、明確ではないが応力の増加とともに損傷頻度は増加しているともいえる。(図2.3.10(2)) 本図から極めて雑ではあるが、ステイフナの損傷防止のためには、平均応力をどの程度にすればよいかの目安は求められる。

ウェブパネルの座屈の発生頻度

剪断力の高い船底部のB3、B4の部分に最も多く発生している。スロット部の損傷と傾向が異なり、玄側タンクのほうが頻度が高い。

### 3. 小型船底模型静的試験

#### 3.1 ま え が き

大型船の横桁のスロット付近に頻発している損傷の原因およびその防止対策を究明するための研究の一環として、以下に示す静的模型試験を行ない、桁材各部の応力分布の計測から、スロット部における各部材の荷重の分担率および荷重の伝達機構の解明とウェブのロンジ付きステイフナ、カラープレートおよびトリッピングまたは、バックブラケット等の寸法形状とその補強効果の調査を行ない、該部の損傷防止対策のため、基礎資料を得ることを目的とした。

試験は、石川島播磨重工と三井造船で分担して行なった。石川島播磨重工では、主としてR型スロット形状(後述)について、また、三井造船では、主としてK型スロット形状(後述)についてそれぞれ試験を行なった。これら両者の試験結果と計算結果の比較検討は、6章応力解析で行なっている。この章では、試験結果と、これにもとづく若干の考察を行なった。

#### 3.2 石川島播磨重工業(株)技術研究所における試験

##### 3.2.1 試験の概要

供試試験体は約10万D.W.Tタンカーの船底横桁を模した縮尺約 $\frac{1}{4}$ の船底パネルを使用した。その寸法形状を図3.2.1に示す。この試験体は2横桁、6縦防撓材から構成されており、これに荷重として荷重装置(水圧タンク)により、パネル面に水圧荷重を加えて試験を行なった。

各試験体スロット部の局部構造は、図3.2.3および表3.2.2に示す各構造要素の組合せからなっている。

試験体総数 3個(ガーダー本数6本)

試験体各部の応力分布の計測は、電気抵抗線歪計で行なった。歪計および計測器等は下記を使用した。

歪計 1軸PL-3、2軸PC-5、3軸PR-5-11(いずれも東京測器製)

計測器 多点デジタル歪測定装置SD5FASB型(共和電業製)

自動多点平衡切換器ASB-60N型 3台(共和電業製)

応力分布の計測箇所は下記である。

ウェブのロンジ付きステイフナ

カラープレート

バックブラケットおよびトリッピングブラケット

スロット開孔周辺部

桁のフェイスプレートおよびウェブ

荷重の水圧は、0~0.8Kg/cm<sup>2</sup>を加えたが、計測は2種の方法で行なった。

ブルドン管式ブレッシヤージ(多摩川計器製)

電気抵抗線式圧力計PW-5、ストレンメータTS1B(いずれも東京測器製)

##### 3.2.2 試験結果

各試験体の試験結果は、表と図に示した。

表3.2.1(1)および(2)	試験結果の一覧表
図3.2.3(1)~(11)	ステイフナ端部の応力分布
図3.2.4(1)~(12)	スロット廻りの応力分布
図3.2.5(1)~(12)	ウェブの応力分布

応力計測位置は、同一形状の3スロットについて、中央、外側の2スロット位置で行なつたが、表、図等にその両者を比較して示した。

応力計測は水圧0、0.25、0.50、0.75Kg/cm<sup>2</sup>で行なつたが、図3.2.4(1)~(12)のスロット周りの応力分布は3水圧の計測値を示し、その他は、最高の0.75Kg/cm<sup>2</sup>の計測値のみを示した。

### 3.2.3 考 察

試験結果にしたがつて、以下に考察する。

#### (1) スティフナの端部形状の影響

スロット形状がR型とI型の場合に分けて考える。

まず、R型スロットの場合のスティフナ形状の影響を知るために試験番号1、2を比較する。

表3.2.1(1)および(2)、図3.2.3(1)および(2)によると、端部切欠きの有無によらず、スティフナ端部の応力積分値はまず等しいが、切欠きのある場合には、断面積が減少しているので、平均応力は増加する傾向にある。また、最大応力の計測値は切欠きのある場合のほうが大きくなっている。ただし、応力測定位置の関係で、切欠きのない場合は、最大応力が正しく求められていないので、計測値からの外挿値を考えると、応力集中率は、切欠きの有無によらずあまり差がない。

次に、I型スロットの場合のスティフナの形状の影響を知るために、試験番号3、10を比較する。

表3.2.1(1)および(2)、図3.2.3(3)および(10)によると、端部切欠きの高さがこの程度変つても、応力積分値、平均応力は差異がない。応力集中は、端部の切欠き高さが高くなると小さくなる。これは、切欠き高さが高くなると、スティフナの曲げ剛性に及ぼすガーダーウェブの影響が減少するため、切欠き部の応力集中が小さくなることによると思われる。

図3.2.4(1)および(2)、図3.2.5(1)および(2)等によると、ウェブおよびスロット周りの応力分布に与える、スティフナ端部の切欠きの影響は、スロット形状がR型およびI型の場合、ともに顕著でなく、無視してよいと思われる。

#### (2) バックブラケットの影響

バックブラケット形状の影響を知るために試験番号3、5、6、9を比較する。図3.2.3(3)、(5)、(6)および(9)を比較すると、バックブラケットがある場合には、その大小にかかわらず、スティフナ端部に曲げ応力が生じないことがわかる。これは、スティフナとバックブラケットにはさまれたウェブは、ほとんど面内変形をして、スティフナ端部には曲げモーメントを生じないためである。また、バックブラケットがS型、M型いずれでも、バックブラケットに流れる応力積分値はほぼ等しく、その有効断面積は、スティフナの断面積程度である。

スティフナ端部で曲げモーメントが加わらないため、最大応力は、スティフナ端部の両自由辺で生じ、その値は応力平均値の1.3倍程度である。

表3.2.1(1)および(2)、図3.2.3(4)、(5)および(6)により、バックブラケットのある場合とない場合を比較すると、スティフナ端部の応力積分値はほとんど差異がなく、また、スロット廻りの応力分布もほとんど変化が見られない。

#### (3) スロット形状の影響

まず、A型スティフナについてのスロット形状の影響を知るために、試験番号1、11を比較する。

図3.2.3(1)および(11)によると、スティフナ端部の応力は、O型スロットでは、R型スロットに比較して小さい。これはO型スロットでは、ロンジからの荷重をロンジフェイス上部のウェブとスティフナで2分しているためである。また、O型スロットでは、スティフナ端部には曲げ応力がほとんど生じていない。

図3.2.4(1)および(11)を比較すると、スロットのコーナ部分の応力は、O型スロットでは、R型スロットに比較して、一般に小さい。しかし、ロンジフェイス左端のコーナ部分では若干大きな圧縮

応力を生じている。

図3.2.5(1)および(11)を比較すると、O型スロットの場合、スロット上部のロンジフェイスとウェブの接合部で若干大きな圧縮応力が生じている。これは、ロンジからの荷重をステイフナとスロット上部のウェブがともに受けるためである。

以上より、O型スロットはR型スロットに比較してロンジフェイスとウェブの接合部に圧縮応力が生じるが、全般的に応力が小さく、良好な構造と思われる。

次にB型ステイフナについてのスロット形状の影響を知るために試験番号2、10を比較する。

図3.2.3(2)および(10)によると、I型スロットの場合は、R型スロットに比較してステイフナ端部の応力は小さくなる。

図3.2.4(2)および(10)によると、I型スロットの場合はR型スロットに比較してスロット右端開口周辺部の応力が大きくなる。これは、I型スロットに縦通するロンジが非対称L型であるため、ロンジ側面のウェブの剛性が大きくなり、表3.2.1(1)および(2)にも示されるように、ここからウェブに入る荷重が大きくなり、逆にステイフナ端部に入る力が小さくなるためである。

#### (4) カラープレートの影響

カラープレートの影響を知るために、試験番号2、7、8を比較する。

表3.2.1(1)、(2)および図3.2.3(2)、(7)および(8)を比較すると、カラーのある場合には、カラーのない場合に比較して、ステイフナ端部の応力積分値は、中央スロット位置で、50~60%、外側スロット位置で25%程度減少している。

図3.2.4(2)、(7)および(8)を比較すると、スロット周りの応力分布は、カラーがあることにより、ないものより全般的にかなり小さくなり、とくに、カラー側のスロットコーナ部の応力は40%程度に減少している。これは、カラーの剪断剛性により、ロンジの上方向変位が押えられ、スロットコーナ部を押し広げるモーメントが小さくなるためである。また、図3.2.4(7)に示されるように、N型カラーの場合には、外側スロット位置では、スロット上部右下コーナ部分の応力状態は、カラーのない場合とは符号が異なり、引張応力に転化している。これは、カラーがあるため、ロンジ側面からウェブに加わる剪断力の方向が変りスロット上部右下コーナ部分を押し広げる効果が生じるためと思われる。

図3.2.5(7)および(8)によると、カラーがあることにより、ロンジ側面のウェブが曲げモーメントを受け持ち、横方向応力 $\sigma_x$ が梁理論による応力分布の様相を示している。

以上より、カラーの効果は非常に大きいので、バックブラケットの併用はあまり意味がないと思われる。

#### (5) 新構造形式の特徴

新構造形式の特徴を知るために試験番号1、12を比較する。

試験番号12のK型スロットでは、ロンジフェイス上のステイフナがないため、ロンジ反力がすべてロンジ側面のウェブを通つて伝達される。

図3.2.4(12)によると、ロンジ側面の応力は、剪断、垂直応力ともステイフナのある場合に比較して増加している。また、剪断応力は上に行くほど大きくなり、スロット右側で最大になっている。

K型スロットでは、R型スロットに比較して、右側コーナ部分の曲率半径は12.5mmから50mmと4倍にしているが、外側スロットで約2倍の応力が生じている。また、左側コーナ部分の曲率半径は12.5mmから30mmと約2倍にしているが、応力はむしろ減少している。

以上より、この構造では、ステイフナがないため、スロット周りの応力が大きくなりすぎるが、ウェブの板厚を増加させる、または、カラープレートを使うなどの方法により応力の低減を計れば、ステイフナなしのスロット構造を検討することができると思われる。

### 3.2.4 結 論

約10万DWTタンカーの船底横桁を模した縮尺約 $\frac{1}{4}$ の船底パネルを使用し、スロット部分の局部構造として構造要素の組合せ12種類について、ウェブ、スロット廻り、ステイフナ各部分の応力分布の状態を計測した。試験結果を検討して、次のことがわかった。

- 1) ステイフナ端部の切欠き高さは、とくにステイフナ端部に曲げモーメントが加わる場合にステイフナ端部の応力集中にかなりの影響を与える。
- 2) バックブラケットがあると、ウェブの横倒れが押えられ、ステイフナ端部に曲げ応力が生じない。しかし、ステイフナの応力積分値、スロット周りの応力分布はほとんど変化しない。
- 3) スロット形状の影響については、R型(普通型)と比較して、O型の場合は、スロット上部を除いて、スロット周りの応力は小さく、スロット上部のウェブがバックブラケットと同じ効果を与えて、ステイフナ端部に曲げ応力がほとんど生じない。R型に比較してI型の場合は、スロット周りの応力分布は幾分変化するが、最大値はほとんど差異がない。
- 4) カラープレートがあると、ステイフナ端部およびスロット周りの応力は小さくなる。
- 5) ステイフナのない新構造形式K型スロットは、スロット周りの応力が大きくなり、座屈の心配が生じるが、ウェブの板厚増加、カラープレート使用などで応力低減ができれば、ステイフナなしスロット構造を検討することができると思われる。

表3.2.1(1) 内側スロット位置における実験結果

実験 番号	スロット周り	ステイフナ端応力				ブラケット端応力				剪断力	
	最大応力 (KG/MM <sup>2</sup> )	積分値 (KG)	平均値 (KG/MM <sup>2</sup> )	最大値 (KG/MM <sup>2</sup> )	集中率	積分値 (KG)	平均値 (KG/MM <sup>2</sup> )	最大値 (KG/MM <sup>2</sup> )	集中率	ロンジ 側面 (KG)	カラー 側面 (KG)
1	- 9.82	-331	-1.81	-7.87 (-11.0)*	4.35 (6.08)	-	-	-	-	820	-
2	- 8.28	-471	-3.22	-17.99	5.56	-	-	-	-	703	-
3	-10.97	-529	-3.61	-11.90	3.30	-	-	-	-	625	-
4	- 8.25	-957	-1.4	- 9.34	6.68	-	-	-	-	1050	-
5	- 6.28	-682	-4.66	- 6.36	1.37	-687	-2.12	-5.20	2.46	389	-
6	- 5.72	-688	-4.71	- 5.84	1.24	-641	-4.38	-6.25	1.43	300	-
7	- 4.38	-274	-1.87	- 8.28	4.43	-	-	-	-	543	1210
8	- 7.49	-361	-2.06	- 9.56	4.64	-	-	-	-	322	1110
9	- 2.61	-145	-0.99	- 2.11	2.14	-322	-0.90	-1.75	1.94	697	838
10	-10.11	-558	-3.82	-10.24	2.68	-	-	-	-	798	-
11	-12.77	* -360 (-439)	-1.06 (-1.29)	-2.0 (-2.5)	1.89 (1.94)	-	-	-	-	434	-
12	-11.49	-	-	-	-	-	-	-	-	1240	-

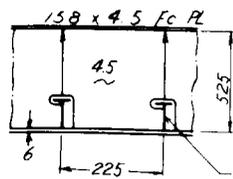
\* ( )内は外挿して求めた値

\*\*\* ( )内は最大値を外挿で求め、ロンジのフランジに溶接されているウェブの断面積をステイフナ断面積に加えて計算した。

表 3.2.1(2) 外側スロット位置における実験結果

実験 番号	スロット周り	ステイフナ端応力				ブラケット端応力				剪断力	
	最大応力 (KG/MM <sup>2</sup> )	積分値 (KG)	平均値 (KG/MM <sup>2</sup> )	最大値 (KG/MM <sup>2</sup> )	集中率	積分値 (KG)	平均値 (KG/MM <sup>2</sup> )	最大値 (KG/MM <sup>2</sup> )	集中率	ロンジ 側面 (KG)	カラ ー側面 (KG)
1	23.94	-1390	-7.64	-16.38 (-25.0)*	2.14 (3.01)	-	-	-	-	440	-
2	23.56	-1530	-10.4	-30.5	2.93	-	-	-	-	564	-
3	21.15	-1410	-9.63	-18.84	1.89	-	-	-	-	703	-
4	19.22	-2750	-4.02	-18.82	4.53	-	-	-	-	843	-
5	27.03	-1530	-10.4	-13.12	1.26	-1900	-5.87	-10.56	1.82	1100	-
6	24.61	-1660	-11.3	-14.60	1.29	-1220	-8.37	-10.97	1.31	1110	-
7	-9.10	-418	-2.86	-6.54	2.29	-	-	-	-	1080	1740
8	-8.99	-434	-2.97	-7.70	2.59	-	-	-	-	711	2570
9	9.53	-372	-2.54	-4.72	1.86	-353	-0.98	-2.81	2.87	1170	2090
10	21.95	-1430	-9.76	-25.59	2.62	-	-	-	-	624	-
11	20.6	-1462 ** (-1641)	-4.30 (-4.82)	-4.86 (-6.00)	1.13 (1.24)	-	-	-	-	1220	-
12	25.01	-	-	-	-	-	-	-	-	1220	-

横桁寸法



縦防撓杖寸法

Web --- : 175 x 45  
Flange : 50 x 9

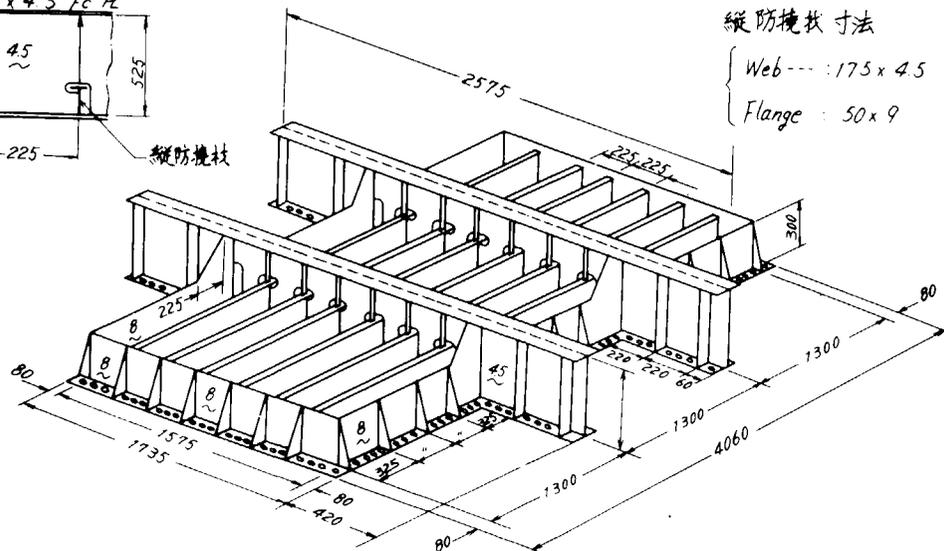
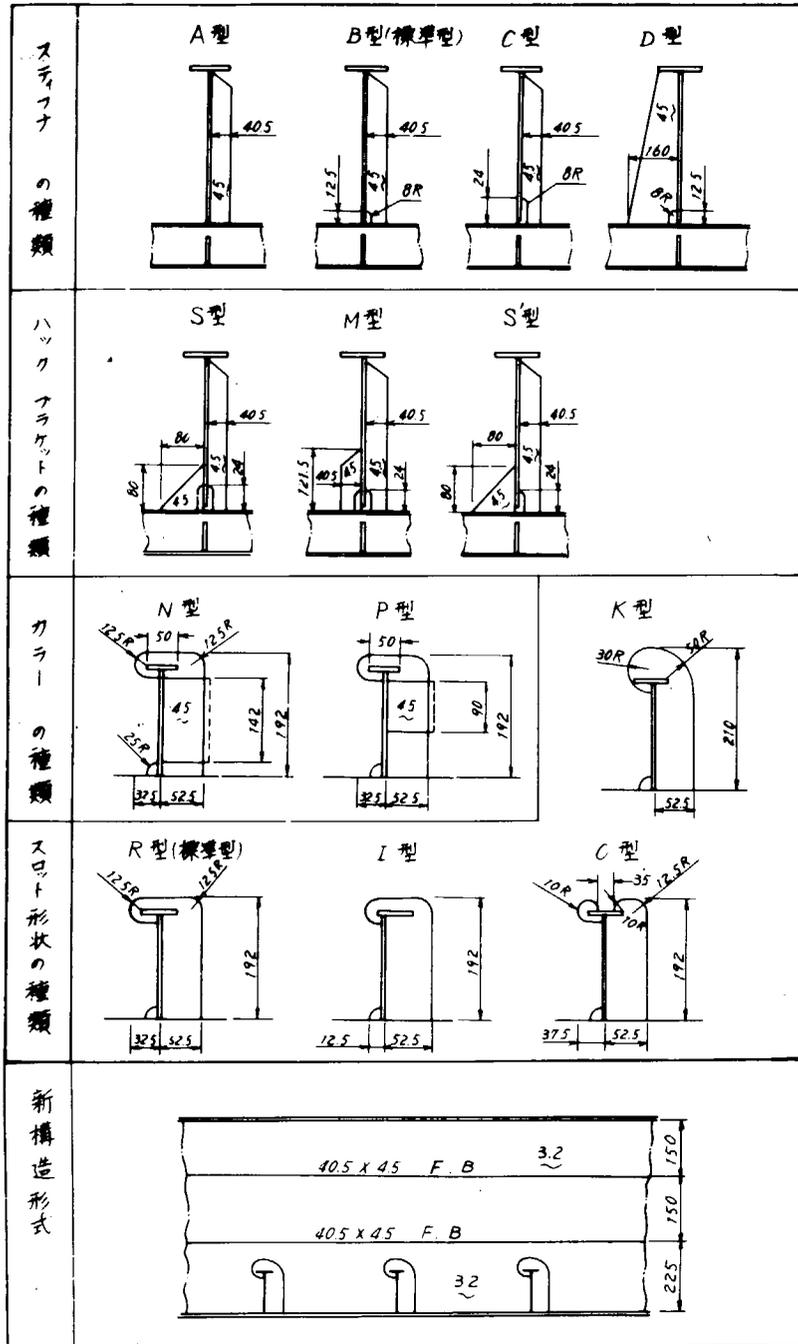


図 3.2.1 供試試験体の寸法形状



注) 標準型は10万DWT 9:11の船尺

図 3.2.2 構造要素の種類

表 3.2.2 試験番号と構造要素 (図 3.2.2 参照)

試験番号	横桁番号	ステイフナ	バック ブラケット	カラー	スロット形状	備考
1	1	A	—	—	R	
2	1	B	—	—	R	
3	5	C	—	—	I	
4	4	D	—	—	R	
5	2	C	S	—	R	
6	2	C	M	—	R	
7	3	B	—	N	R	
8	3	B	—	P	R	
9	5	B	S	N	R	
10	6	B	—	—	I	
11	6	A	—	—	O	
12	4	—	—	—	K	新構造形式

STRESS DIAGRAM OF STIFFENER

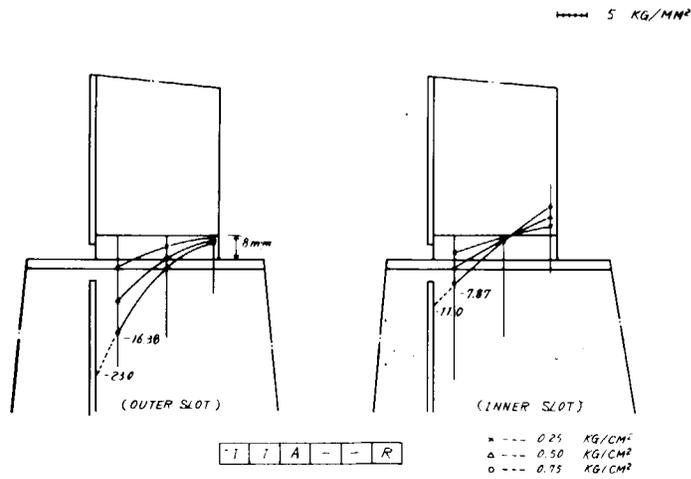
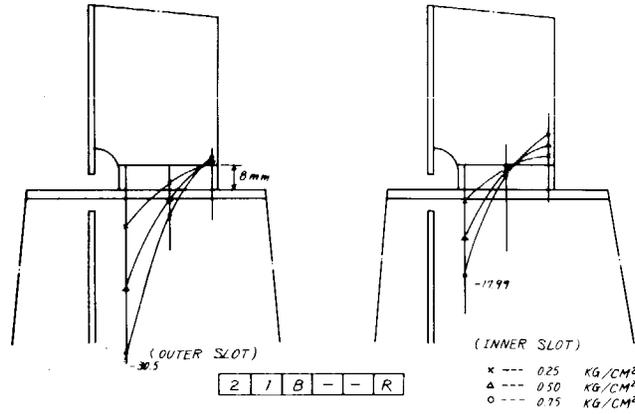


図 3.2.3(1)

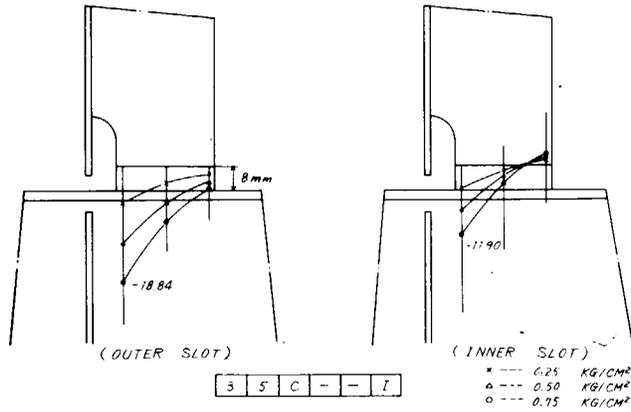
STRESS DIAGRAM OF STIFFENER

5 KG/MM<sup>2</sup>



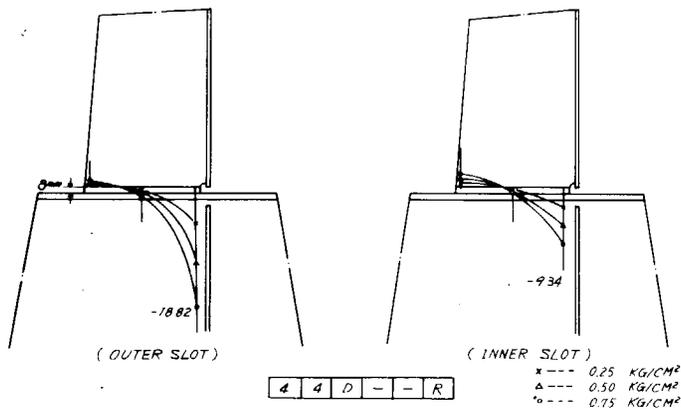
☒ 3. 2. 3 (2)

5 KG/MM<sup>2</sup>



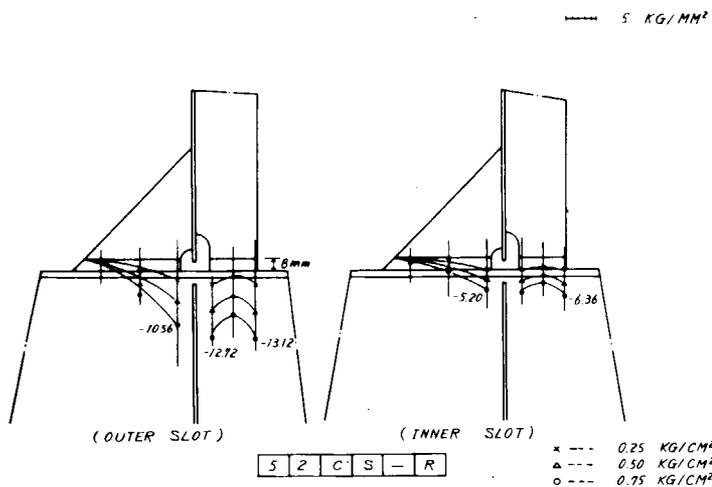
☒ 3. 2. 3 (3)

5 KG/MM<sup>2</sup>

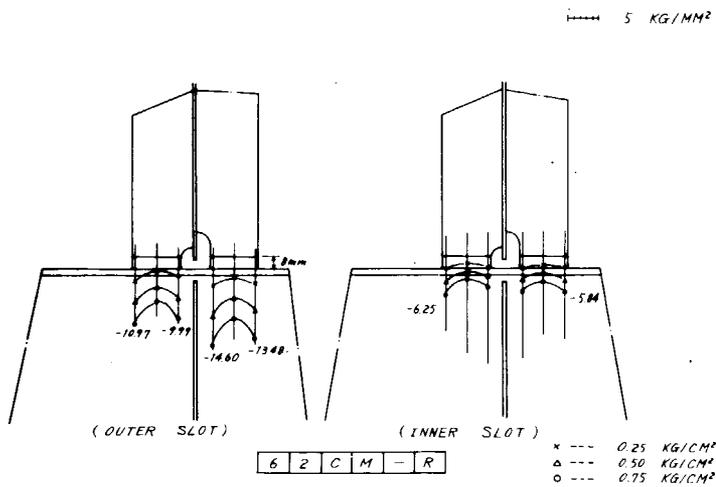


☒ 3. 2. 3 (4)

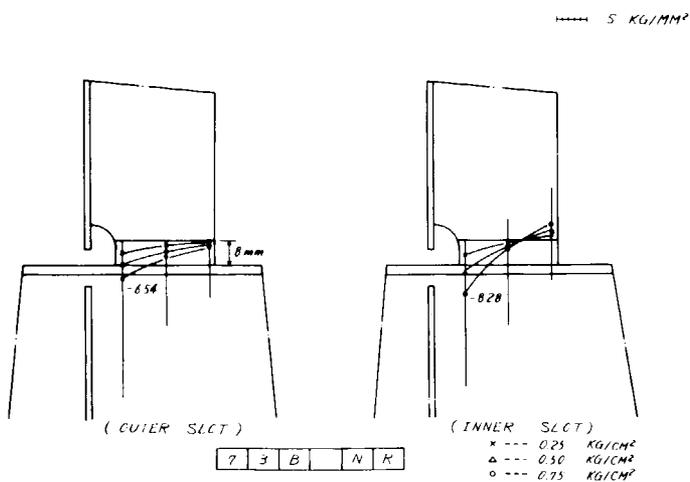
STRESS DIAGRAM OF STIFFENER  
AND BRACKET



☒ 3. 2. 3 (5)

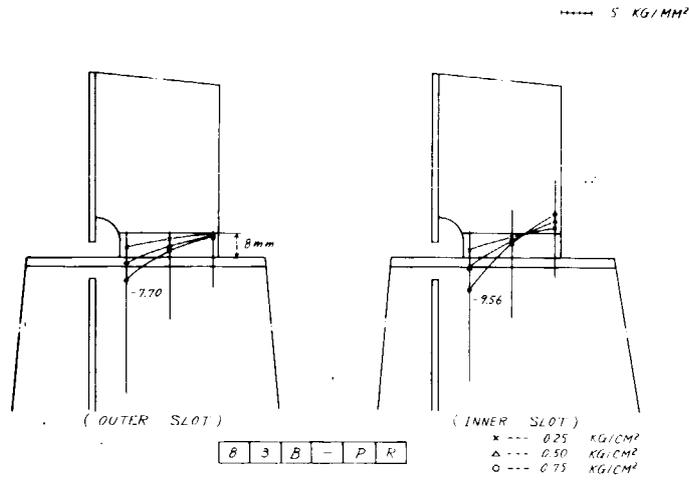


☒ 3. 2. 3 (6)

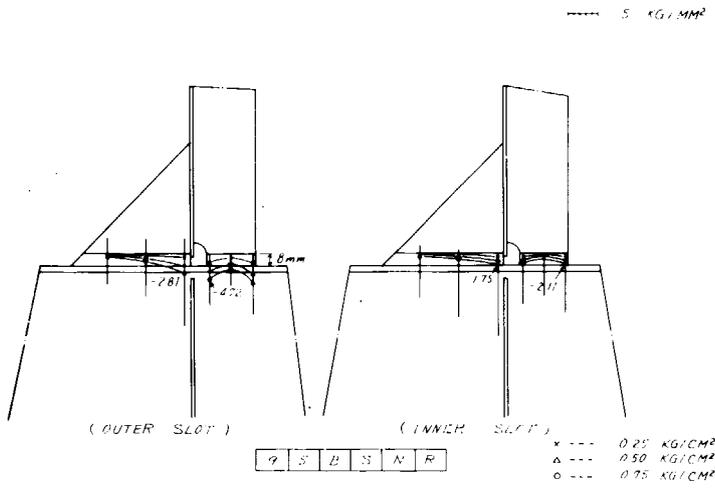


☒ 3. 2. 3 (7)

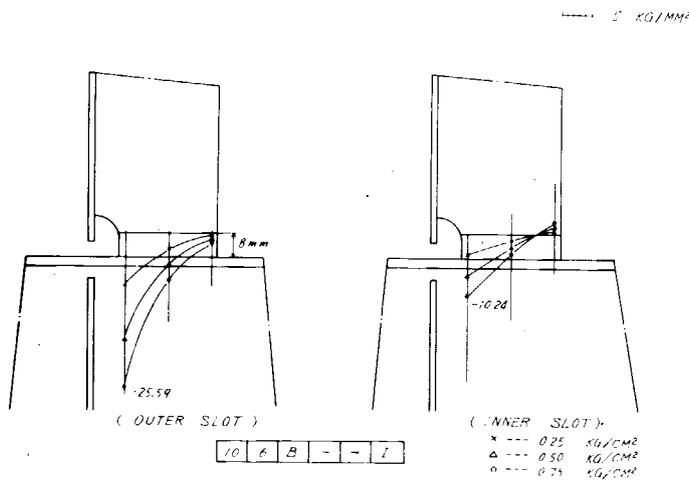
STRESS DIAGRAM OF STIFFENER



☒ 3. 2. 3 (8)

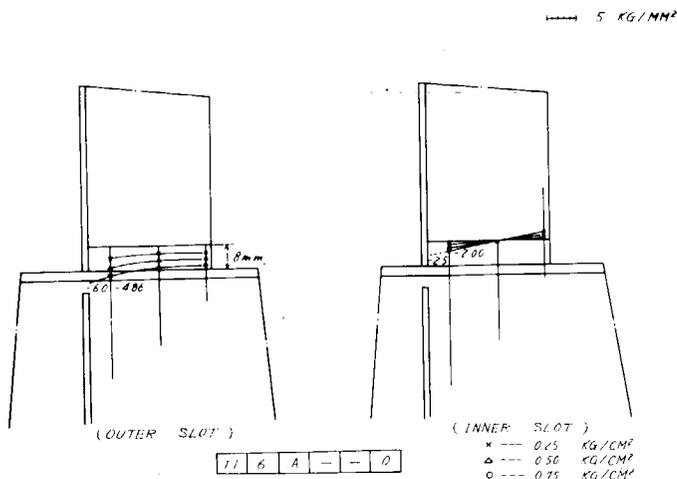


☒ 3. 2. 3 (9)



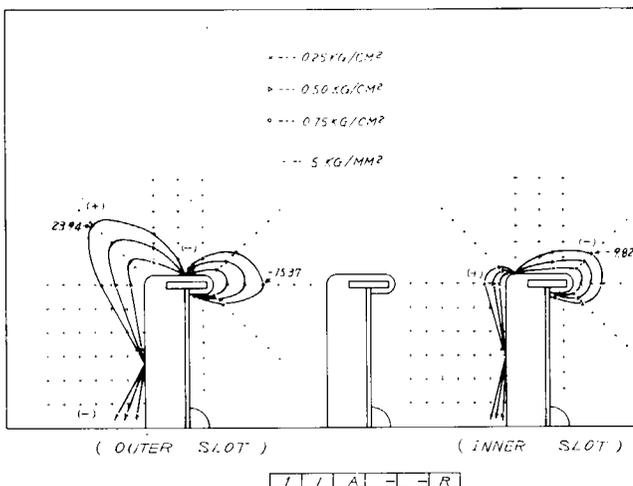
☒ 3. 2. 3 (10)

STRESS DIAGRAM OF STIFFENER

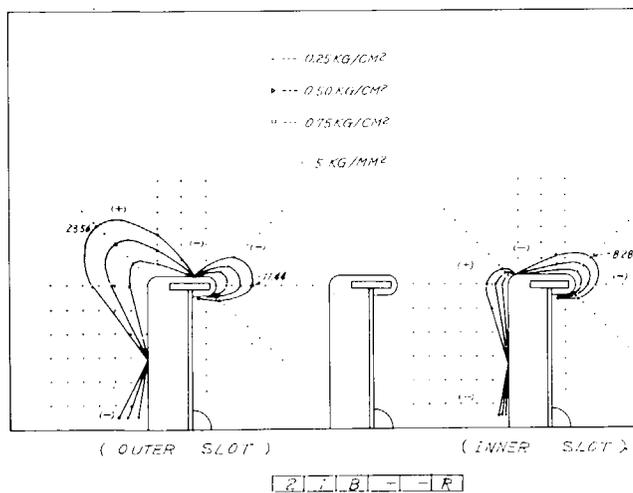


☒ 3. 2. 3 (1)

STRESS DIAGRAM AROUND SLOT

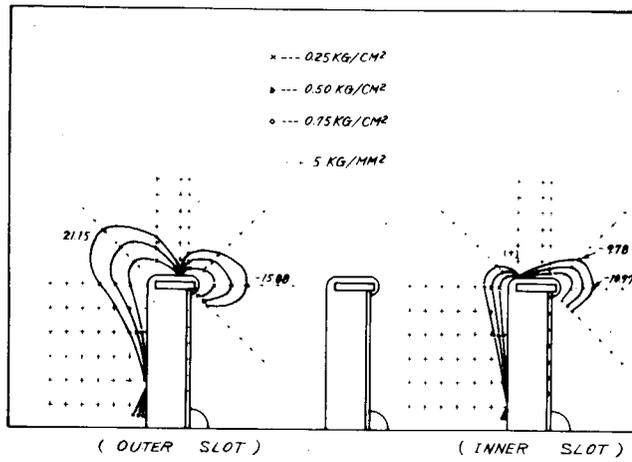


☒ 3. 2. 4 (1)



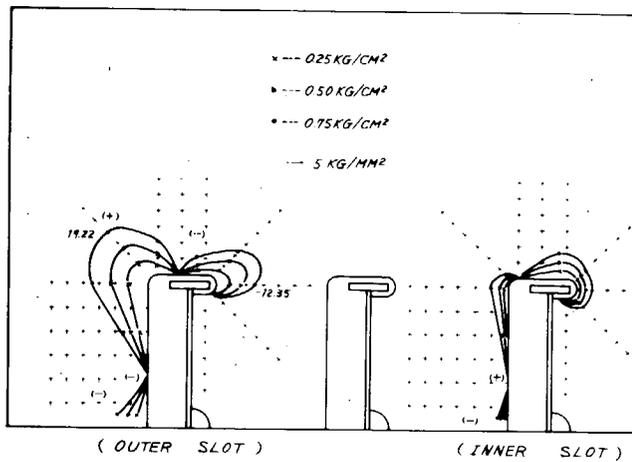
☒ 3. 2. 4 (2)

STRESS DIAGRAM AROUND SLOT



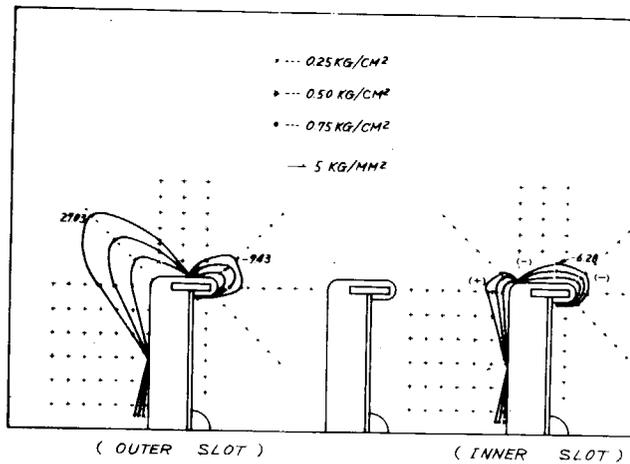
3 5 C - - I

☒ 3. 2. 4(3)



4 4 D - - R

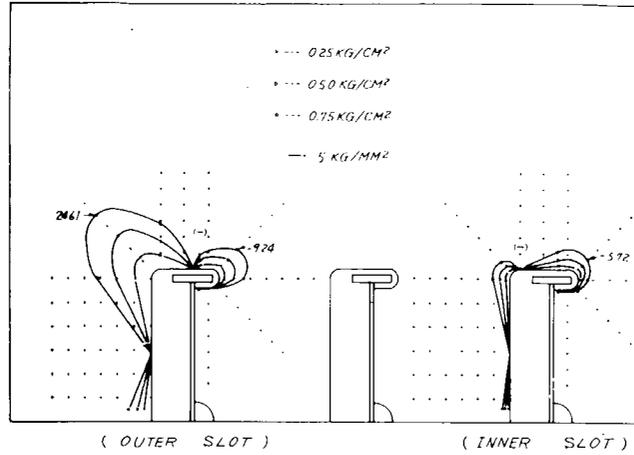
☒ 3. 2. 4(4)



5 2 C S - R

☒ 3. 2. 4(5)

STRESS DIAGRAM AROUND SLOT

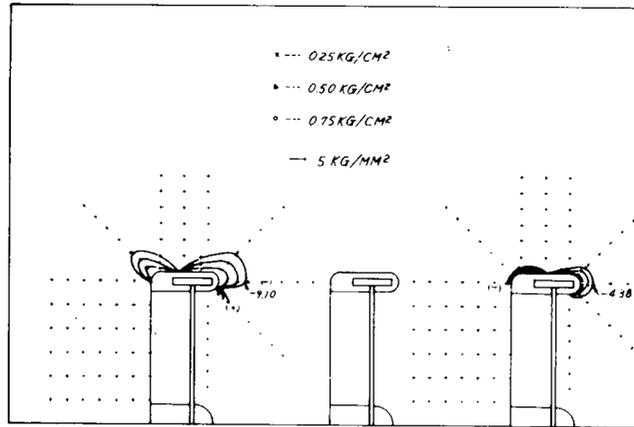


( OUTER SLOT )

( INNER SLOT )

6 2 C M - R

☒ 3. 2. 4 (6)

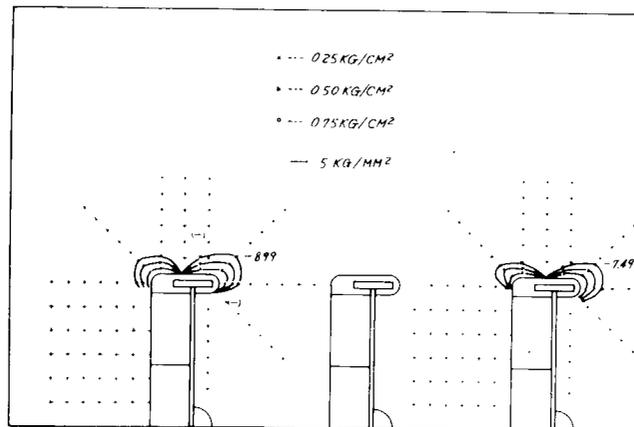


( OUTER SLOT )

( INNER SLOT )

7 3 B - N R

☒ 3. 2. 4 (7)



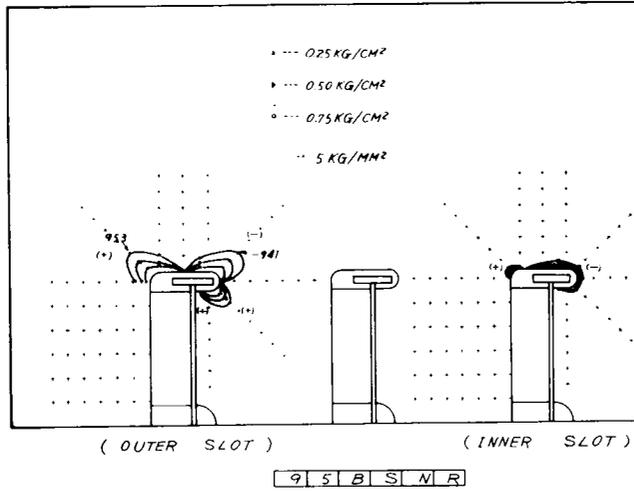
( OUTER SLOT )

( INNER SLOT )

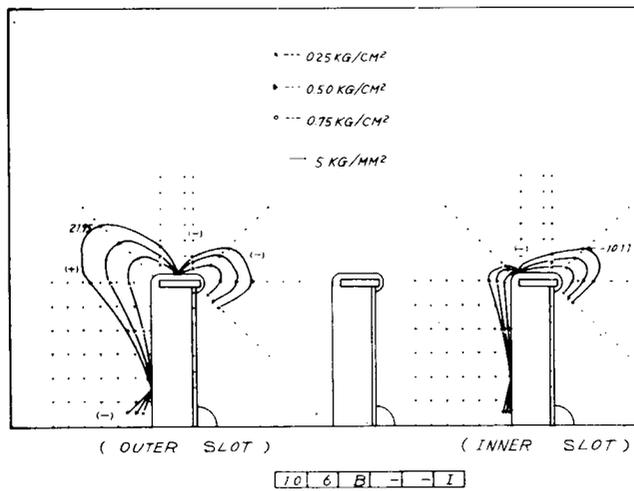
8 3 B - P R

☒ 3. 2. 4 (8)

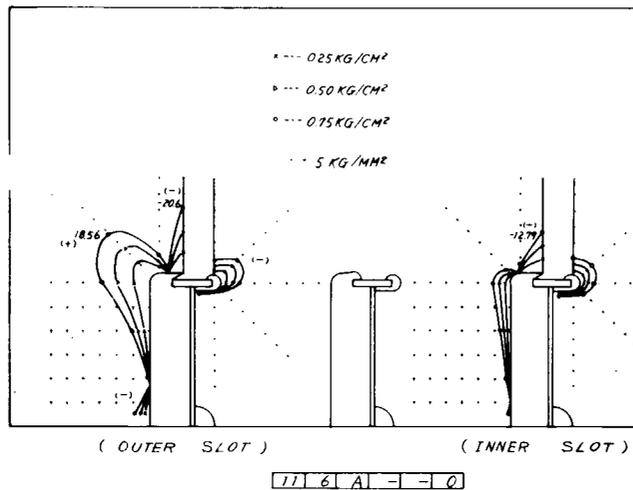
STRESS DIAGRAM AROUND SLOT



☒ 3. 2. 4 (9)



☒ 3. 2. 4 (10)



☒ 3. 2. 4 (11)

STRESS DIAGRAM AROUND SLOT

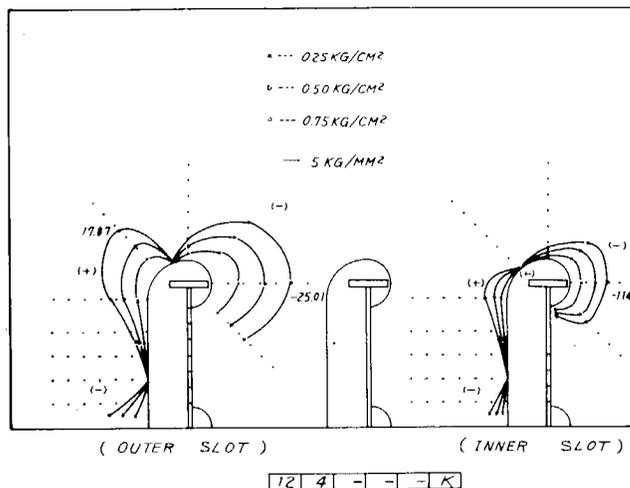


图 3.2.4 (1)

STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE

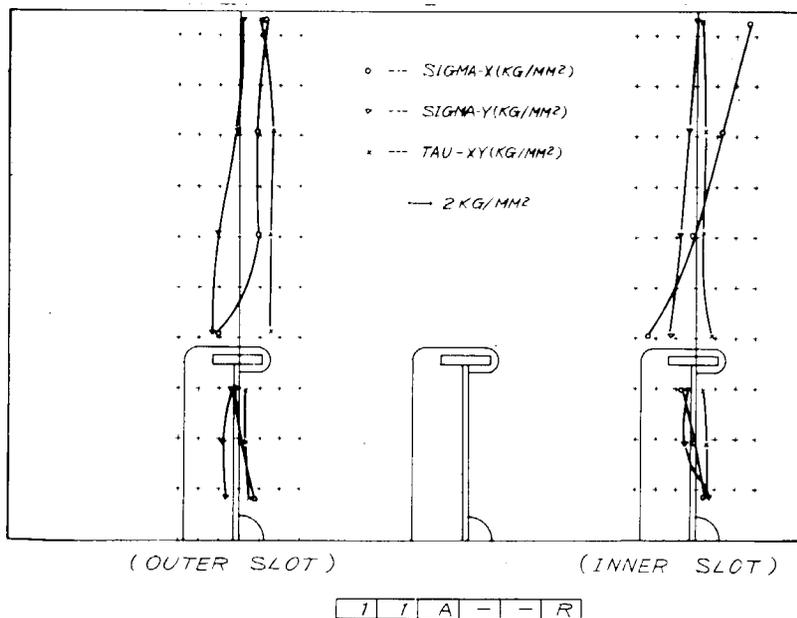
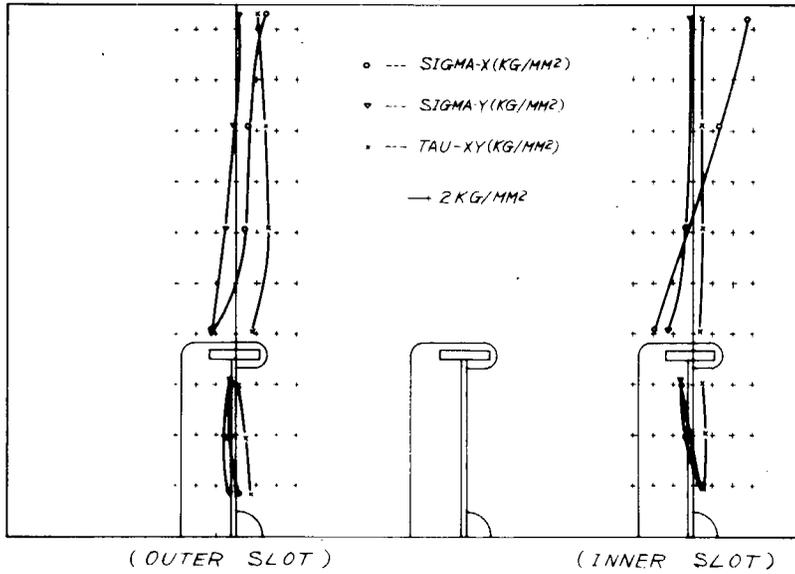


图 3.2.5 (1)

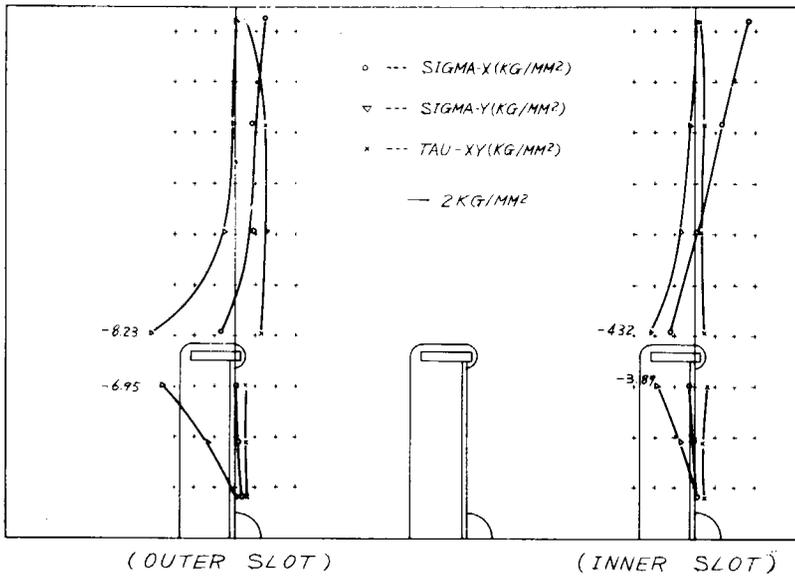
STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



2 1 B - - R

☒ 3. 2. 5 (2)

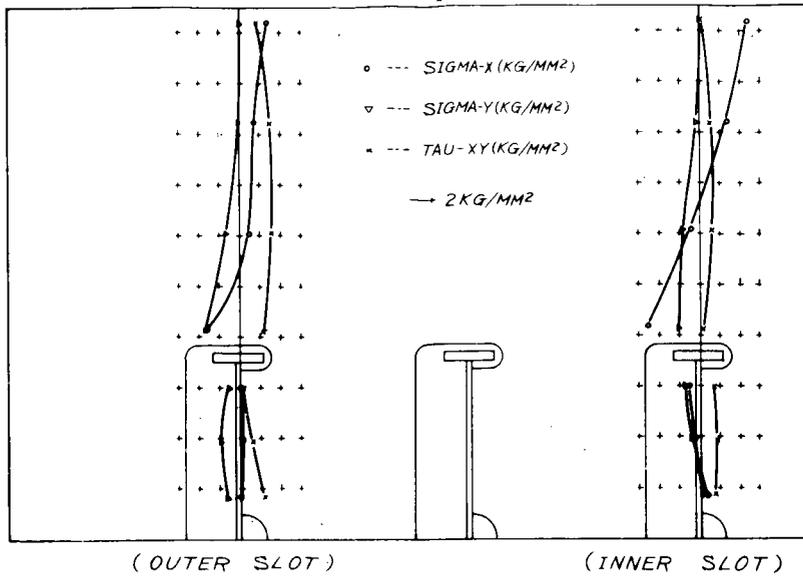
STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



3 5 C - - I

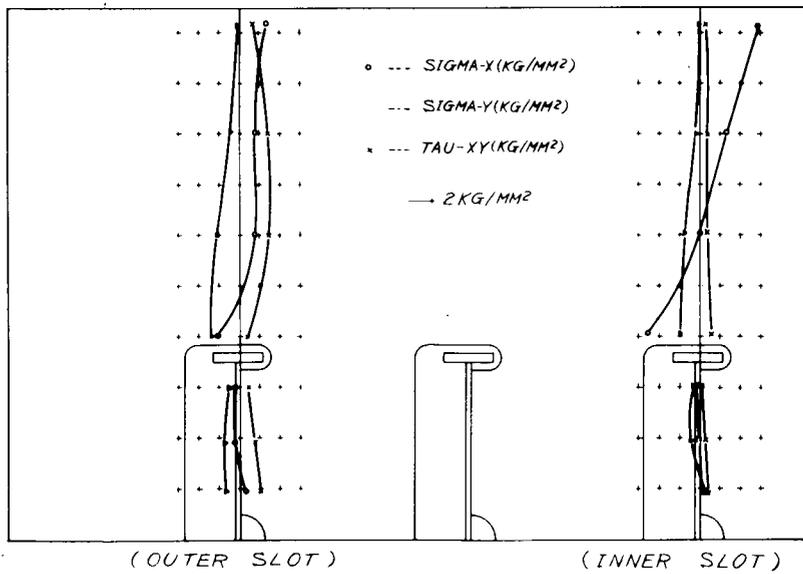
☒ 3. 2. 5 (3)

STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
 UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



4 4 D - - R

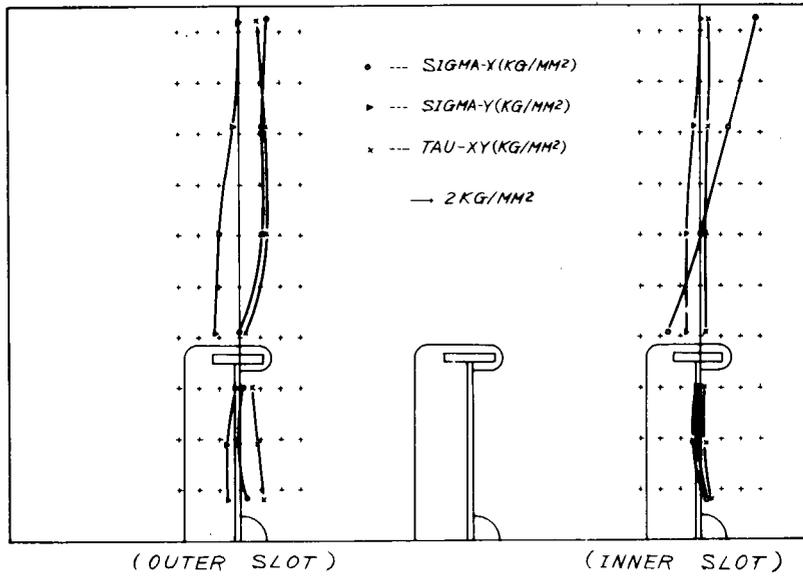
☒ 3. 2. 5 (4)



5 2 C S - R

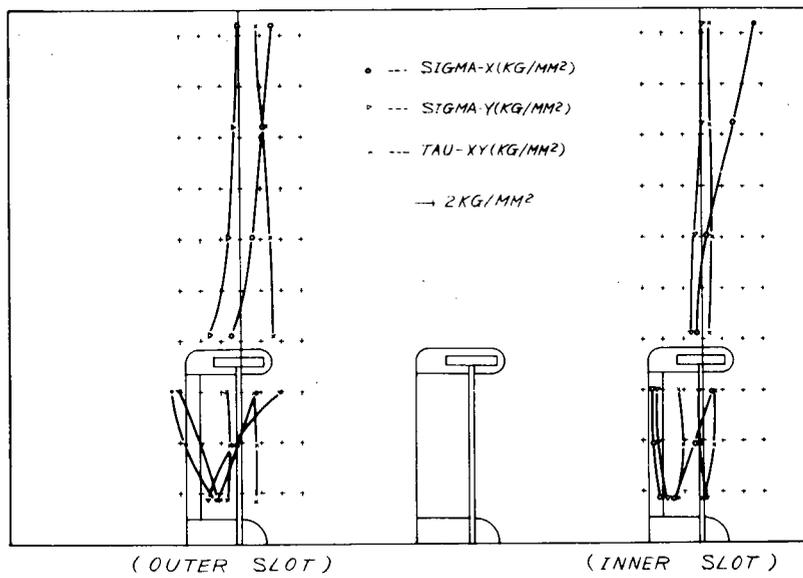
☒ 3. 2. 5 (5)

STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
 UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



6 2 C M - R

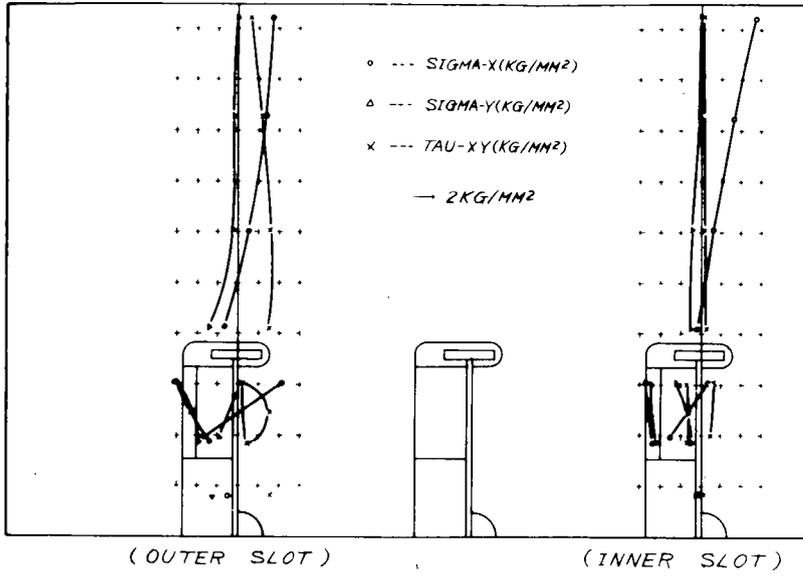
☒ 3. 2. 5(6)



7 3 B - N R

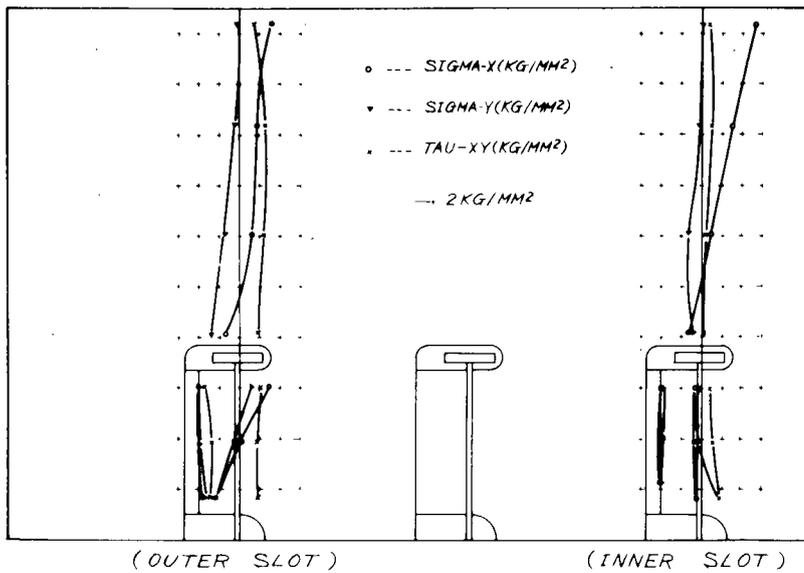
☒ 3. 2. 5(7)

STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
 UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



8 3 B - P R

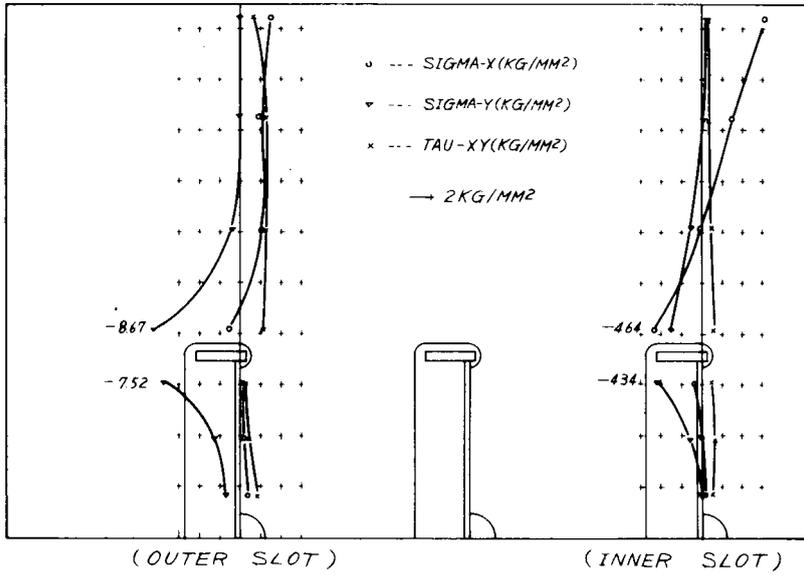
☒ 3. 2. 5(8)



9 5 B S N R

☒ 3. 2. 5(9)

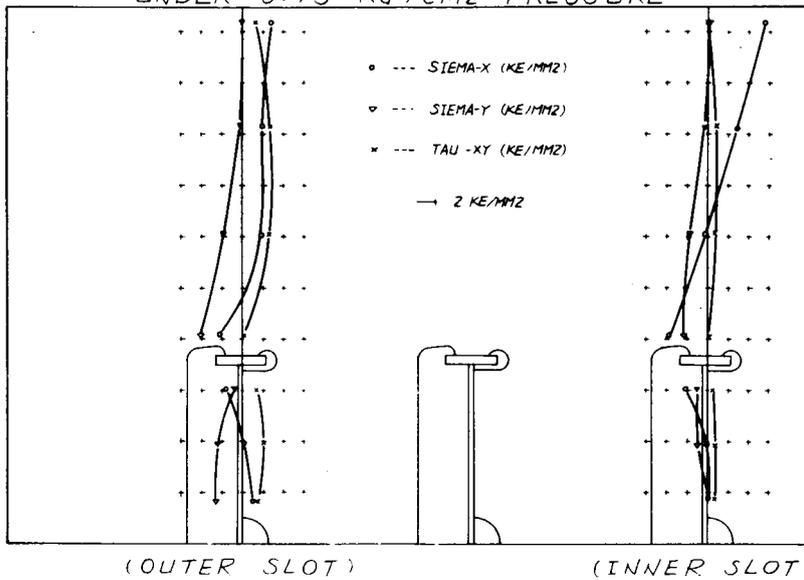
STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



10 6 B - - I

☒ 3. 2. 5 (10)

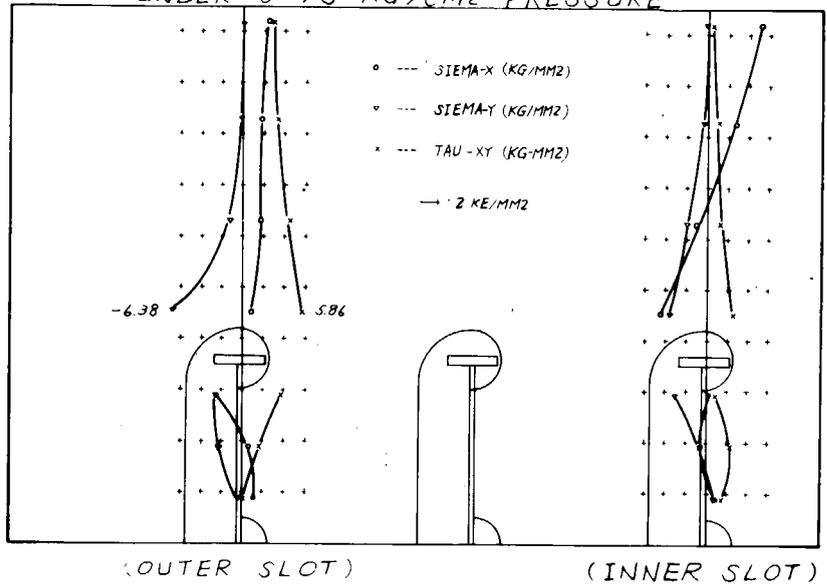
STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



11 6 A - - O

☒ 3. 2. 5 (11)

STRESS DIAGRAM OF WEB PLATE  
UNDER 0.75 KG/CM<sup>2</sup> PRESSURE



1 2 3 4 5 K

☒ 3. 2. 5 (12)

### 3.3 三井造船(株)千葉研究所における試験

#### 3.3.1 供試体

供試体のスロットとステイフナの組み合わせは下の表に示す通りである。また、スロットとステイフナの詳細は図3.3.3に示すものである。

表 3. 3. 1

トランス番号	計測位置の 名 称		スロット形状	ステイフナ形状	カラープレート 有 無		スロットおよび ステイフナ 名 称
	①	a b			有	無	
モデル A 2	①	a	K	E	無	EK-M11	
		b					
	②	a		A	無	AK-M12	
		b					
		c					
	③	a		L	無	AKSM12	
b							
c							
モデル B 3	④	a	W	F	無	FK-M13	
		b					
		c					
	⑤	a		A	無	AW-M13	
		b					
		c					
4	⑥	a	K	G	無	GK-M14	
		b					
		c					
	⑦	a		F	有	FKNM14	
		b					
		c					

次のページにスロットとステイフナ(EK-M11、AK-M12、AKSM12、FK-M13、AW-M13、GK-M14、FKNM14)の写真を示す。

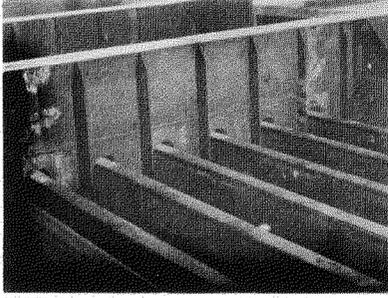


写真1. 機1.トランス  
EK-M11

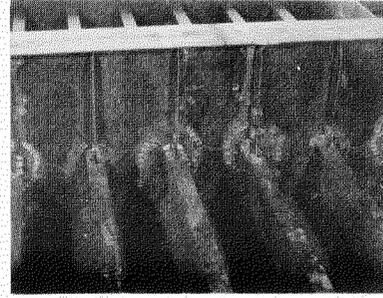


写真2. 機2.トランス  
AKSM12, AK-M12

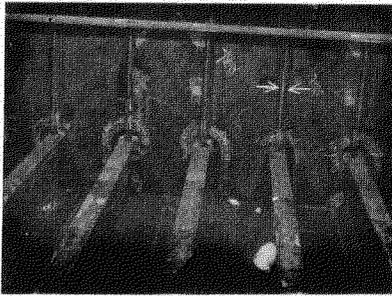


写真3. 機3トランス  
AW-M13, FK-M13

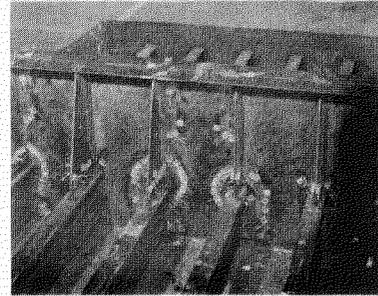


写真4. 機4.トランス  
GK-M14, FKNM14

### 3.3.2 実験方法

4.060 m×1.575 m (長さ×巾)の水圧タンク部と同じく4.060 m×1.575 mの模型を重ねてそのタンク内に水道から水を入れることによつて圧力を掛けた。

圧力の測定はモデルA、Bに対してタンクの側端に取り付けた約4 mのホースにて水頭を計測した。計測はモデルA、Bの1個のトランスに対してステイフナ付根、スロット周縁、トランス・ウェブ、ボットム・プレートの応力、それにボットム・プレートとトランス・フェイスの変位を0.1、0.2、0.3、0.4 Kg/cm<sup>2</sup>の圧力で計測した。

### 3.3.3 計測位置および計測位置の名称

図 3.3.1 および 3.3.2 に計測位置を示し、図 3.3.3 および 3.3.4 に計測位置の名称を示す。

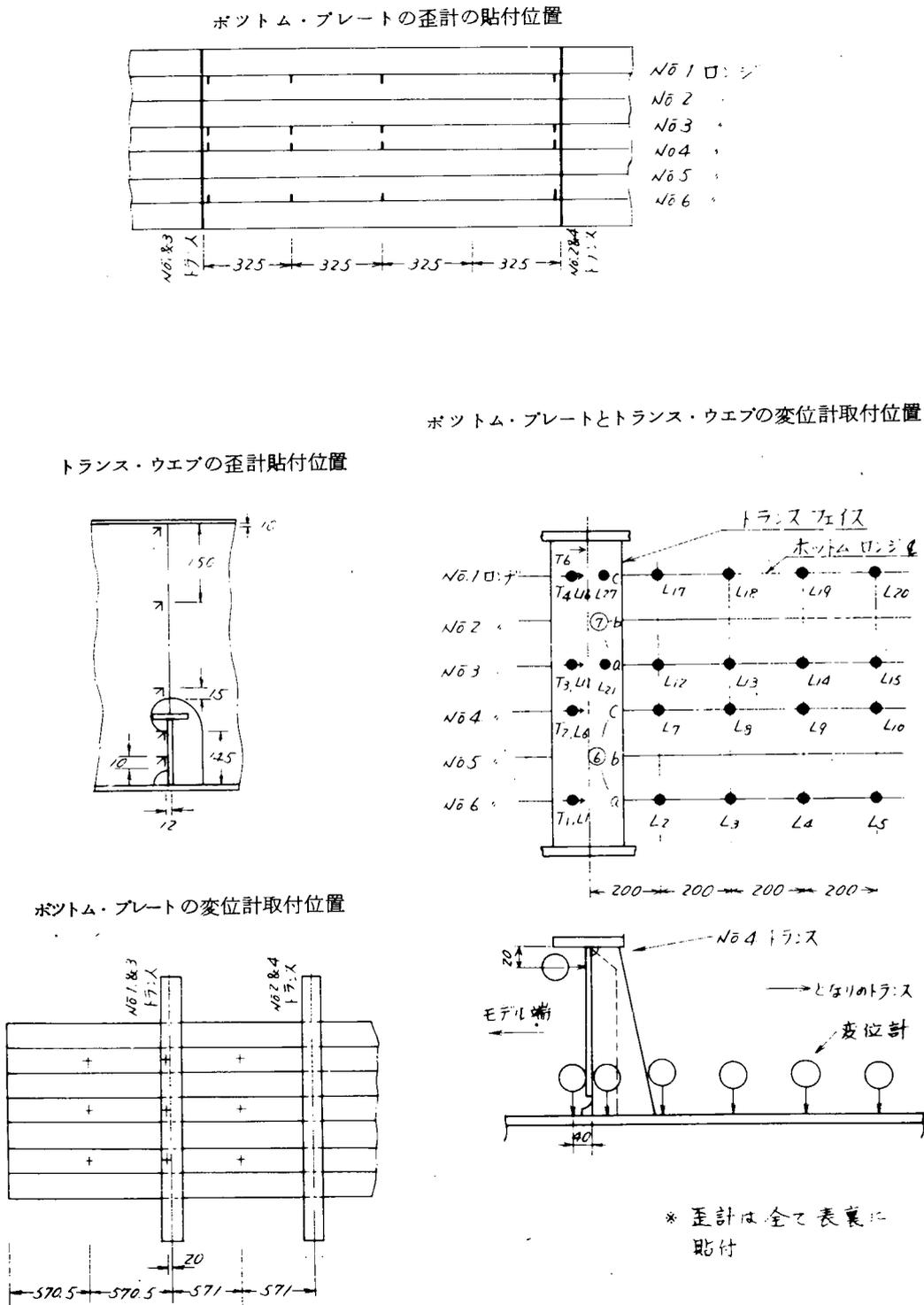
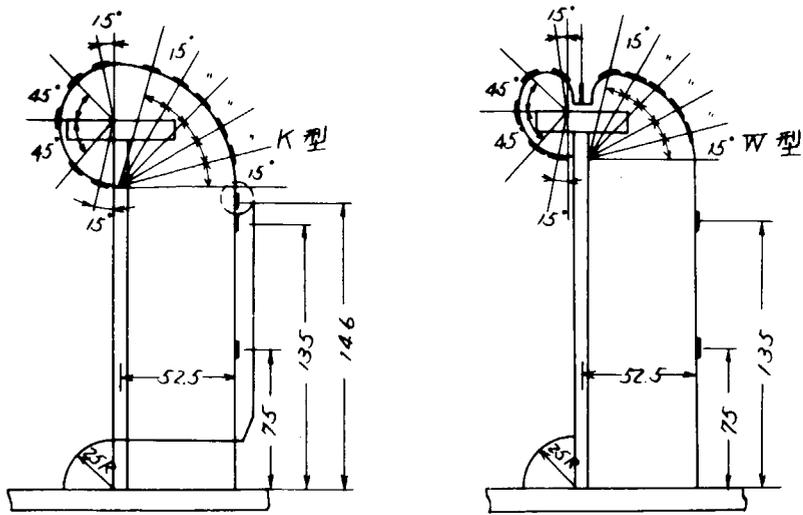
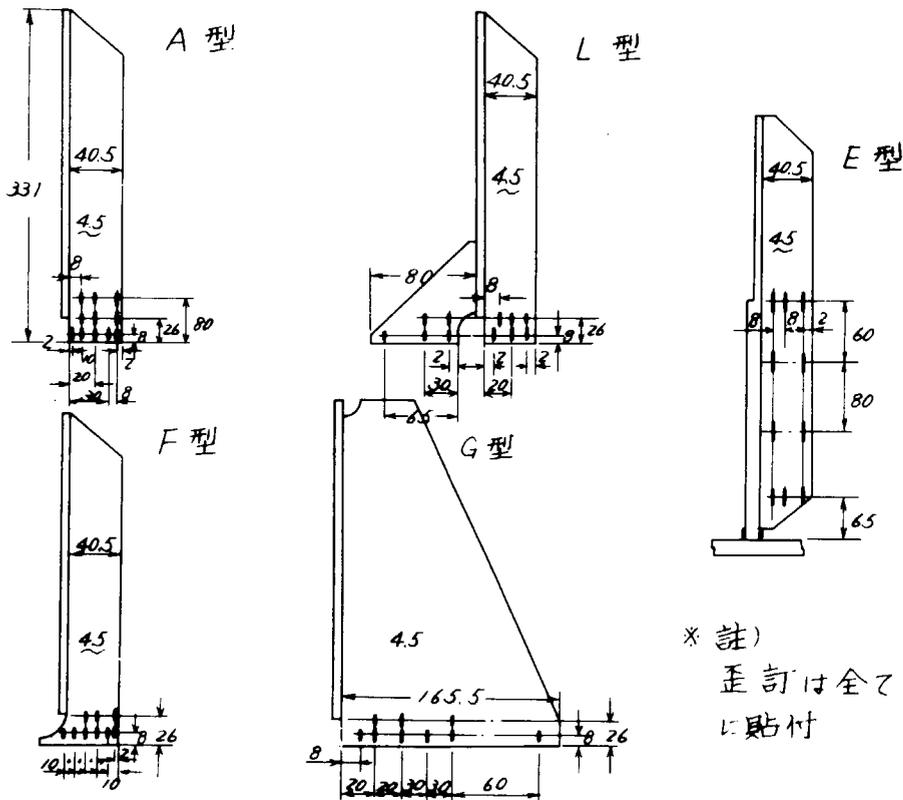


図 3.3.1 計測位置



\* ○の印のものはカラープレート  
のある場合のみ



\* 註)  
歪訂は全て表裏  
に貼付

図 3. 3. 2 スロットおよびステイフナ形状と歪計貼付位置

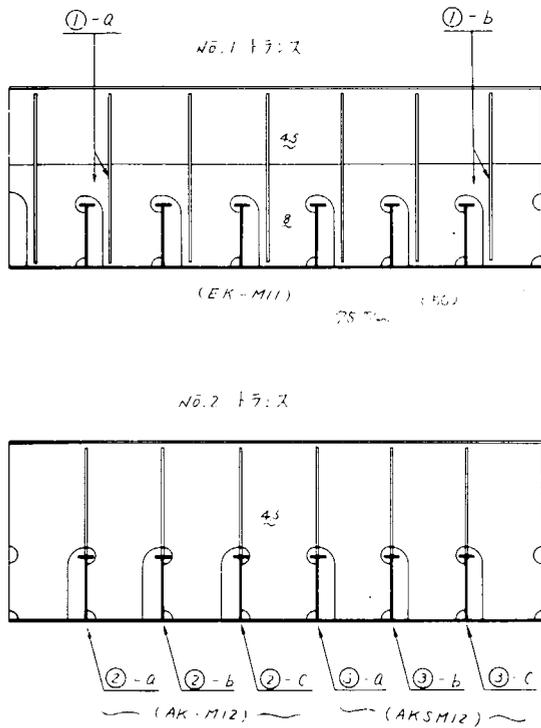


図 3. 3. 3 各計測位置の名称

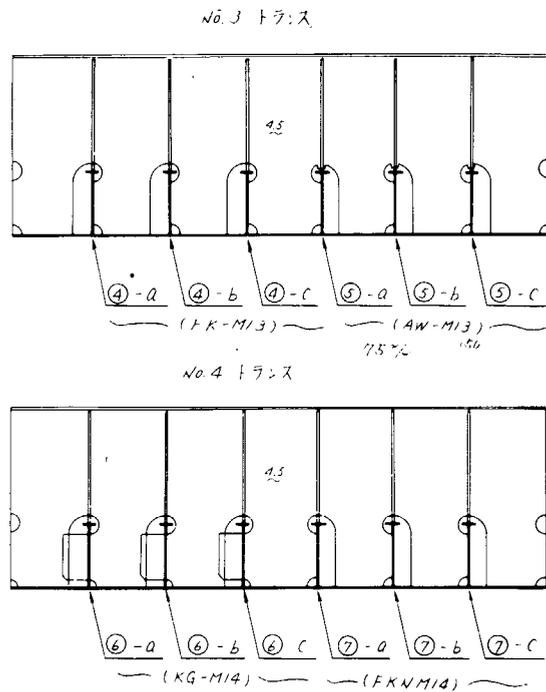


図 3. 3. 4 各計測位置の名称

### 3.3.4 実験結果

実験結果はステイフナについては圧力が  $0.4 \text{ Kg/cm}^2$  のときについて、また、スロットの周縁については圧力が  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$  のときから順に  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$  ごとに  $0.4 \text{ Kg/cm}^2$  までプロットしているが、線を結んでいるのは  $0.4 \text{ Kg/cm}^2$  のときであり、ステイフナおよびスロット周縁の応力はともに線形範囲内に納まりまた線形性を保っている。

また、ウェブ・プレートの応力、ボトム・プレートの応力それにボトム・プレートの変形も圧力が  $0.4 \text{ Kg/cm}^2$  のときで示している。

ステイフナ応力分布を図 3. 3. 5(1)~図 3. 3. 10

スロット周縁応力分布を図 3. 3. 11(1)~図 3. 3. 17(2)

ウェブ・プレートの応力を図 3. 3. 18~図 3. 3. 38

ボトム・プレート応力分布を図 3. 3. 39および図 3. 3. 40

ボトム・プレートの変形分布を図 3. 3. 41および図 3. 3. 42

ロンジとトランス・ウェブ上端の変位を図 3. 3. 43(1)および(2)に示す。

ステイフナ応力分布図 (圧力0.4 覧)

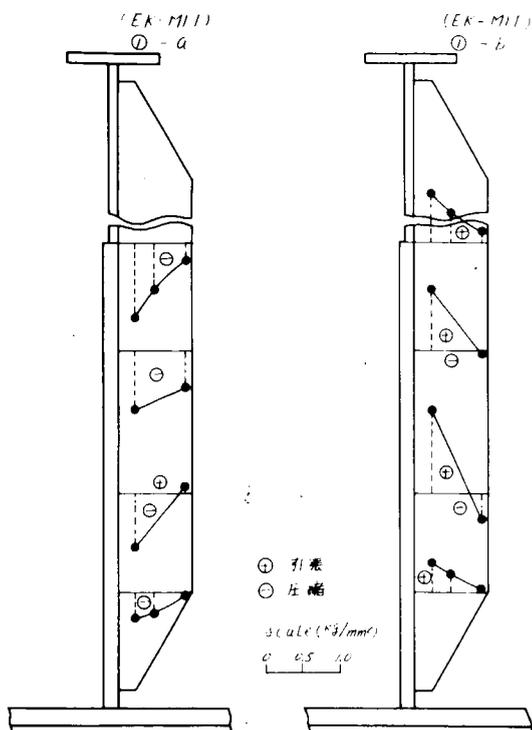


図 3.3.5(1)

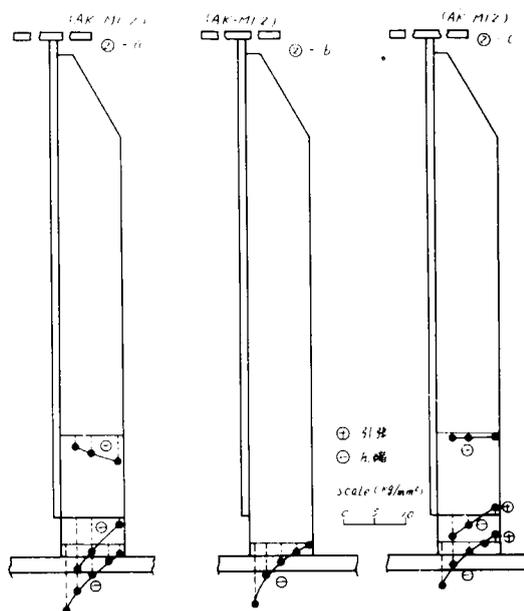


図 3.3.5(2)

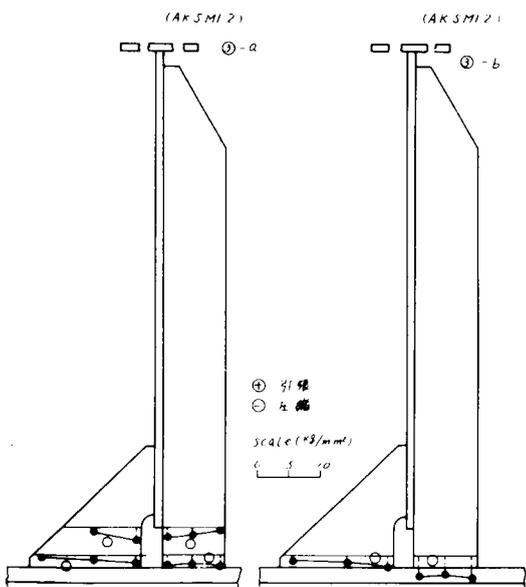


図 3.3.6(1)

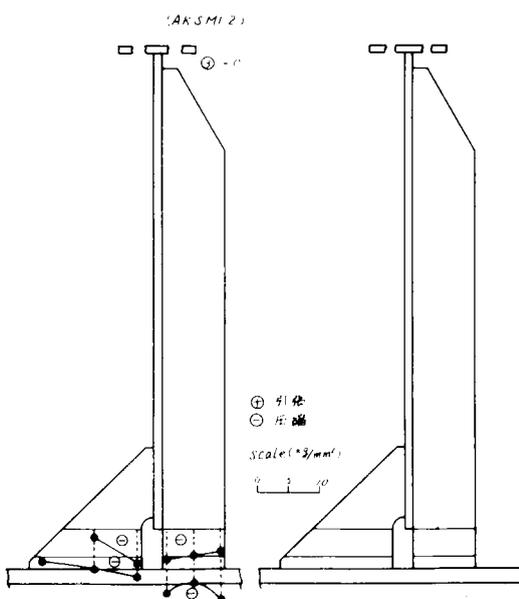


図 3.3.6(2)

ステイフナ応力分布 (圧力 0.4%)

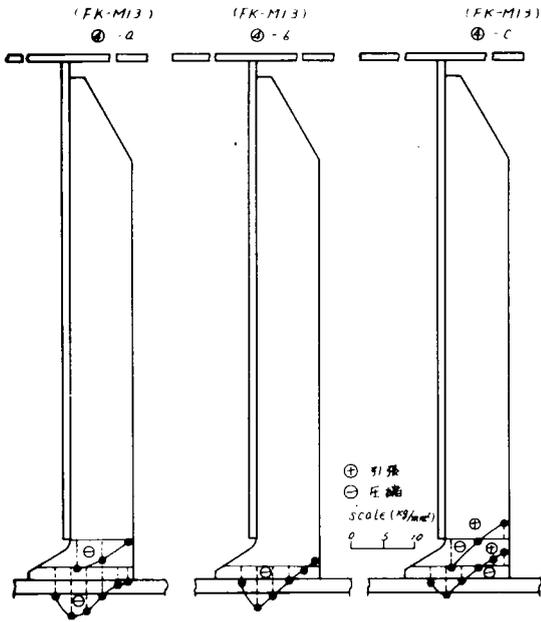


図 3.3.7

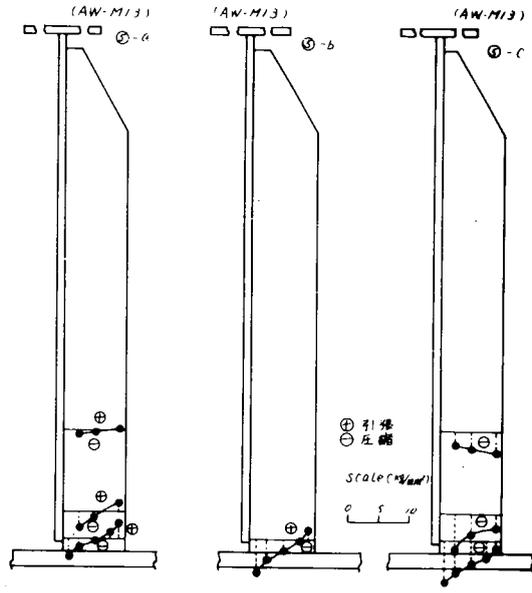


図 3.3.8

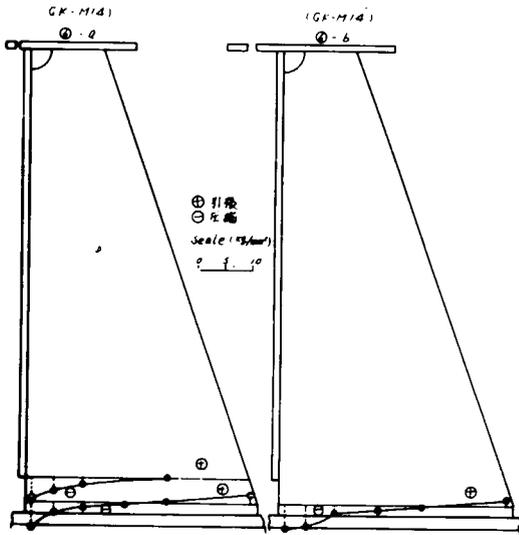


図 3.3.9(1)

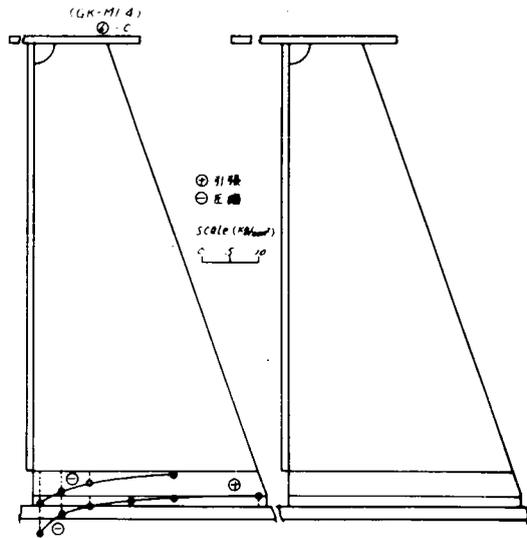


図 3.3.9(2)

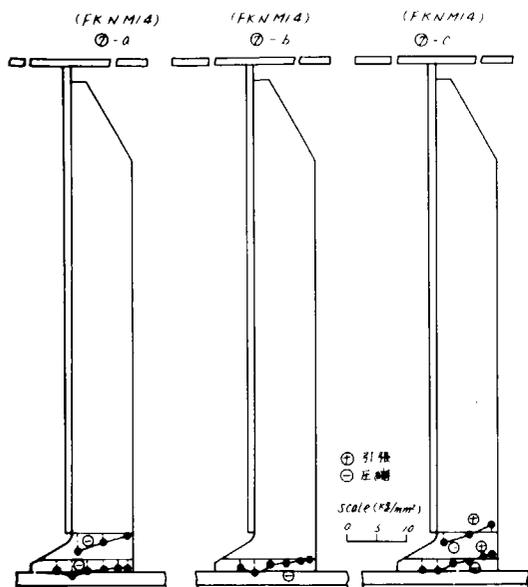


図 3.3.1.0 スティフナ応力分布 (圧力 0.4%)

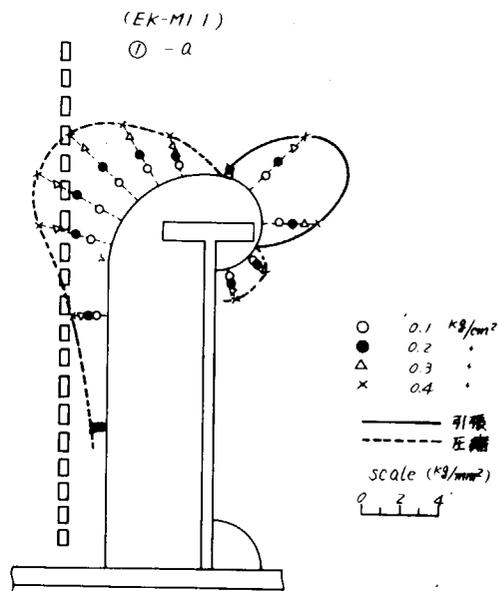


図 3.3.1.1(1) スロット周縁応力分布

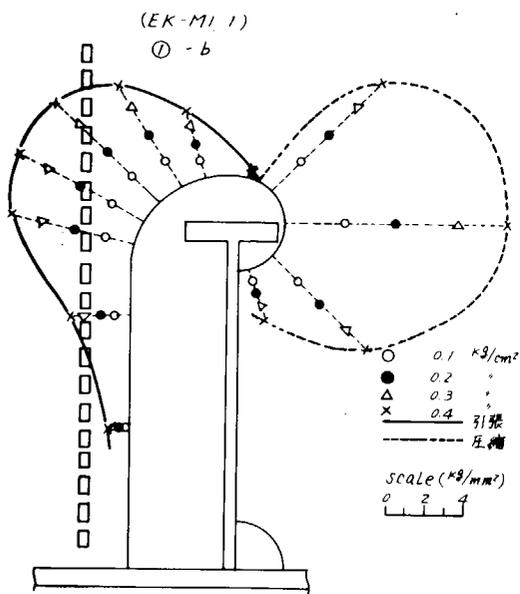


図 3.3.1.1(2) スロット周縁応力分布

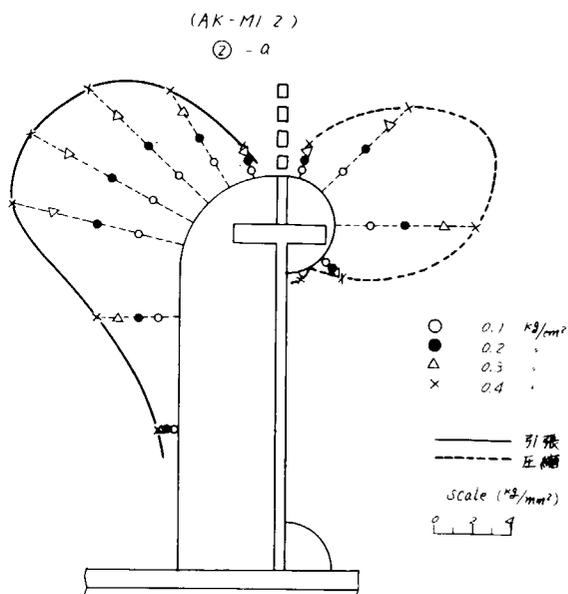


図 3.3.1.2(1) スロット周縁応力分布

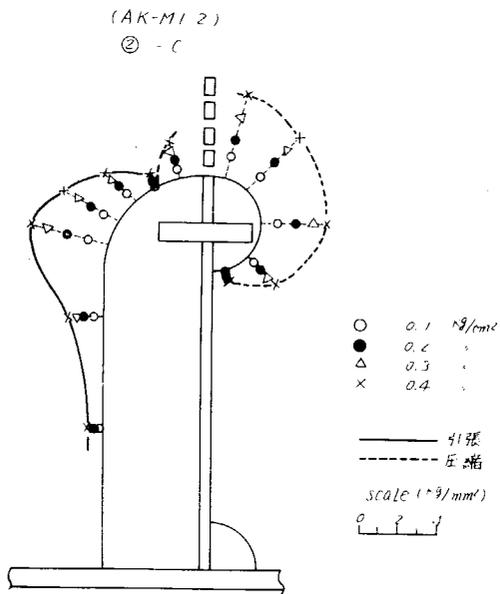


図 3. 3. 1 2 (2) スロット周縁応力分布

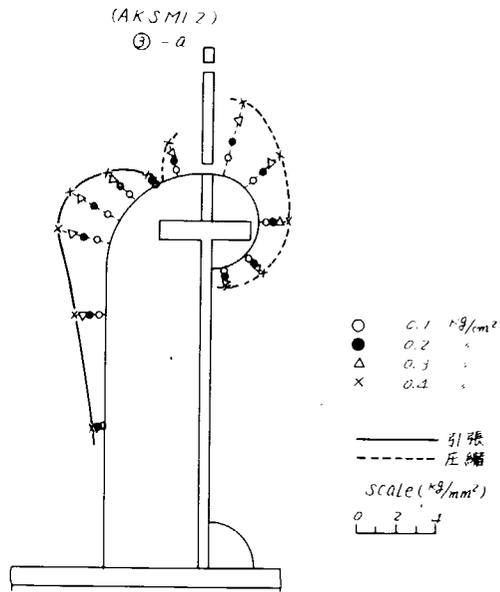


図 3. 3. 1 3 (1) スロット周縁応力分布

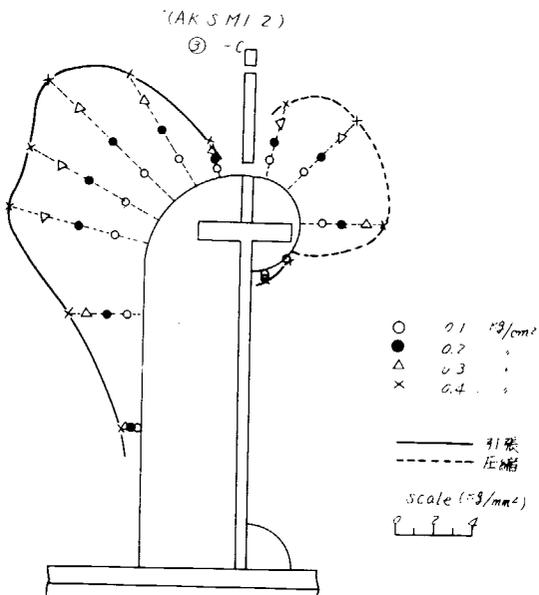


図 3. 3. 1 3 (2) スロット周縁応力分布

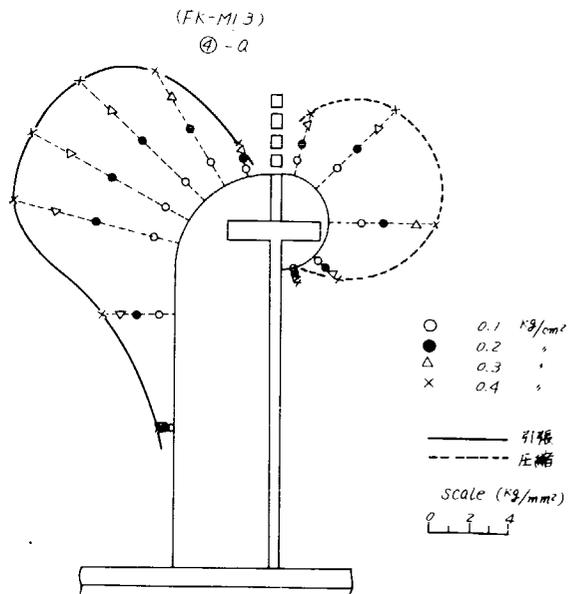


図 3. 3. 1 4 (1) スロット周縁応力分布

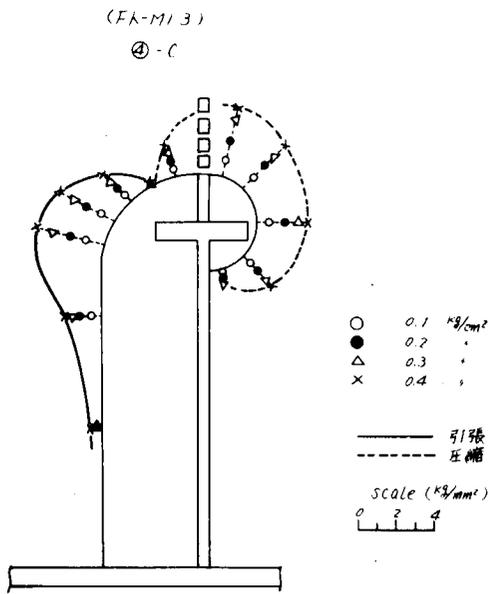


図 3. 3. 1 4(2) スロット周縁応力分布

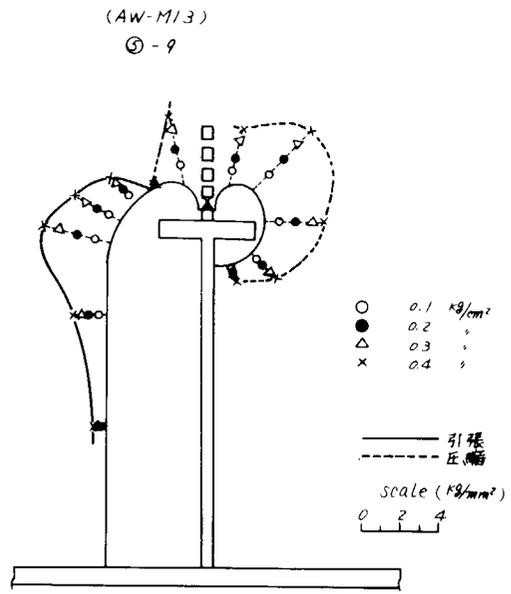


図 3. 3. 1 5(1) スロット周縁応力分布

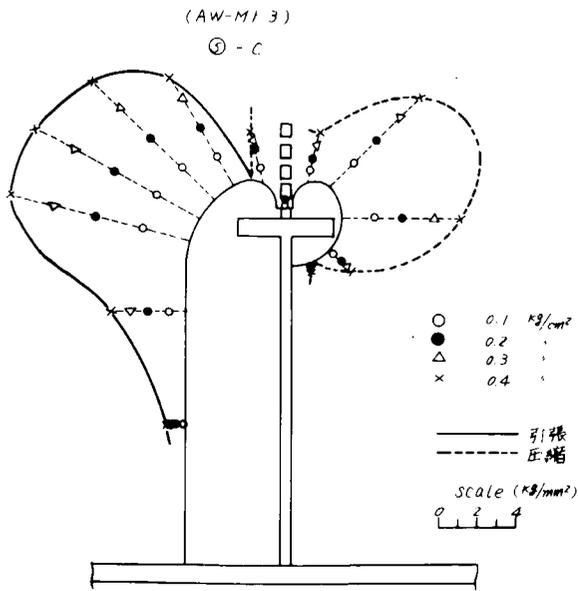


図 3. 3. 1 5(2) スロット周縁応力分布

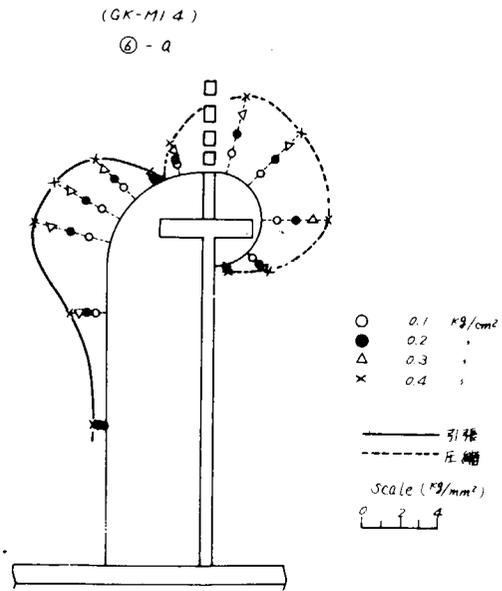


図 3. 3. 1 6(1) スロット周縁応力分布

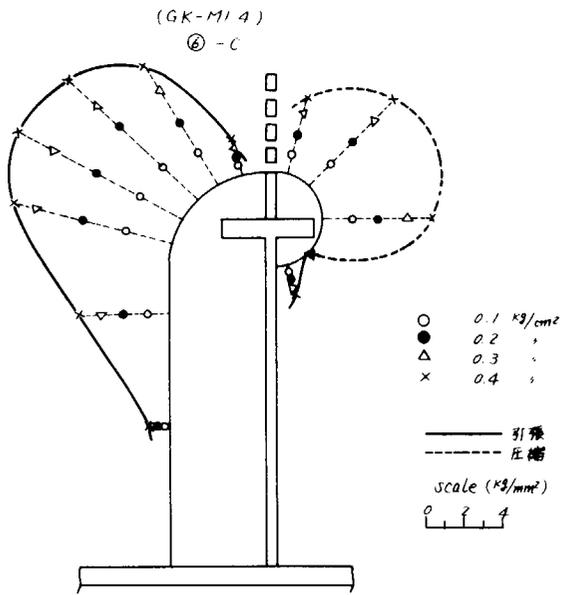


図 3. 3. 1 6 (2) スロット周縁応力分布

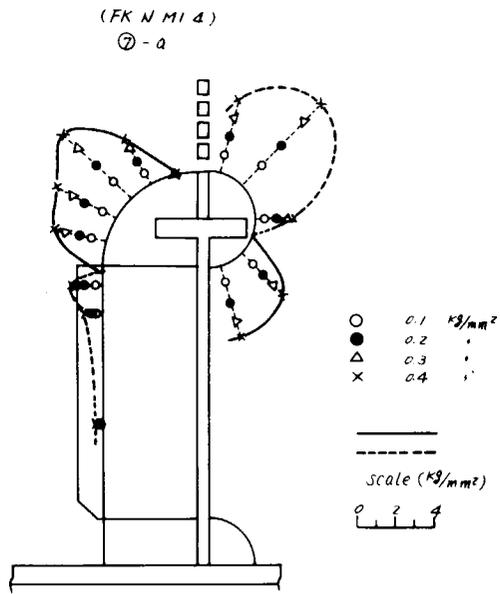


図 3. 3. 1 7 (1) スロット周縁応力分布

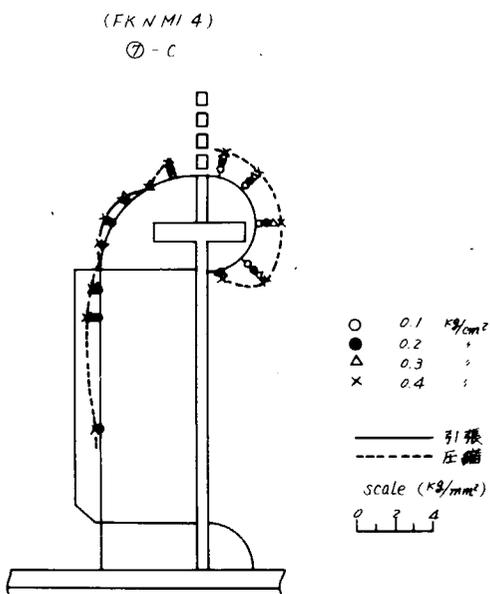


図 3. 3. 1 7 (2) スロット周縁応力分布

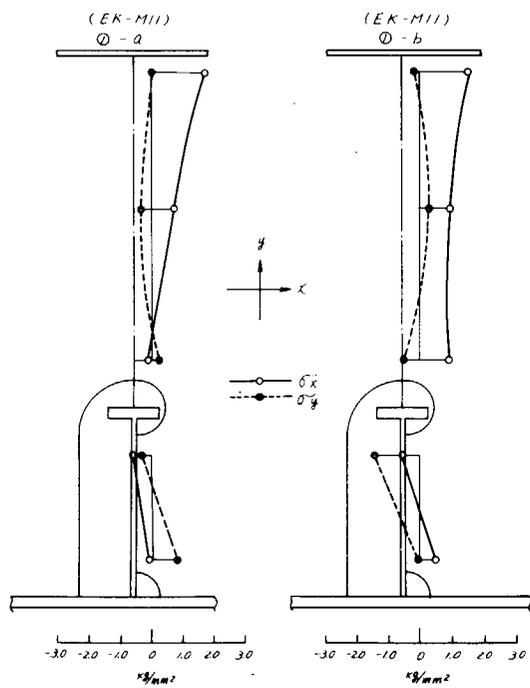


図 3. 3. 1 8 ウェブ・プレート応力 (圧力 0.4 気)

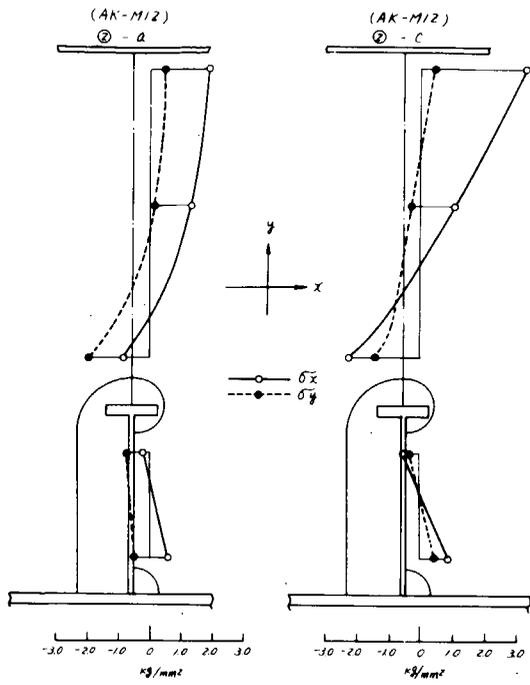


図 3.3.19 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

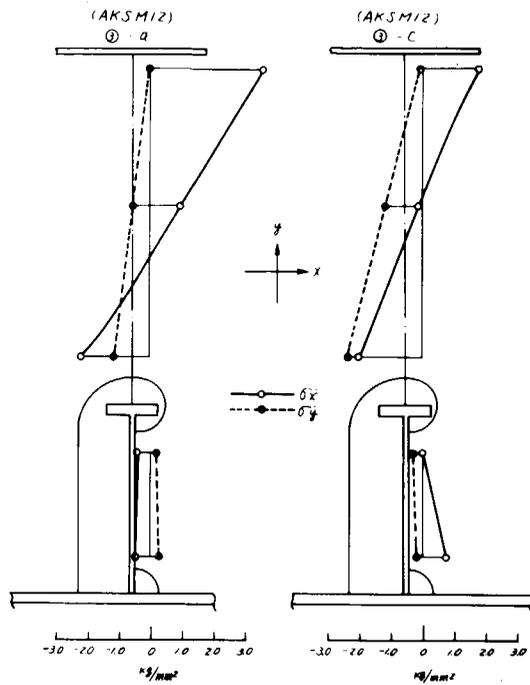


図 3.3.20 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

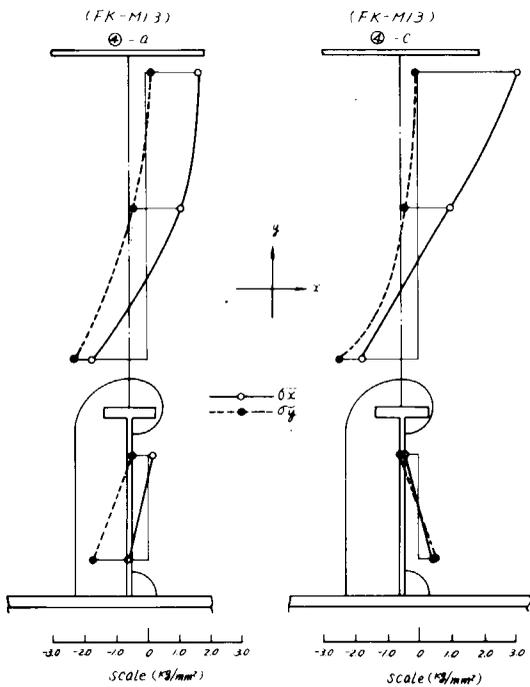


図 3.3.21 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

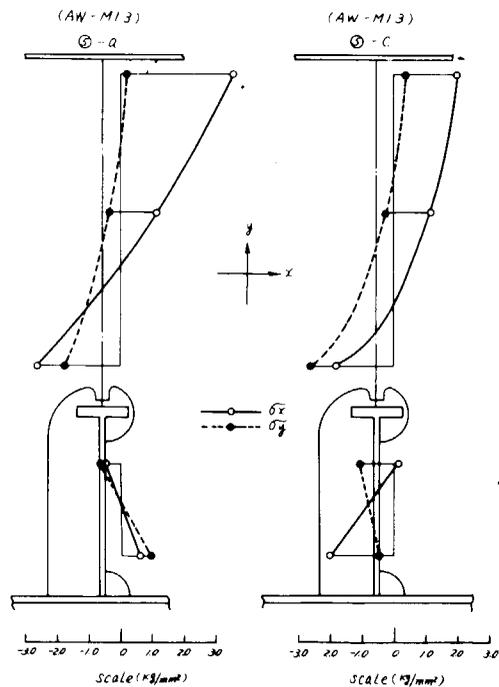


図 3.3.22 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

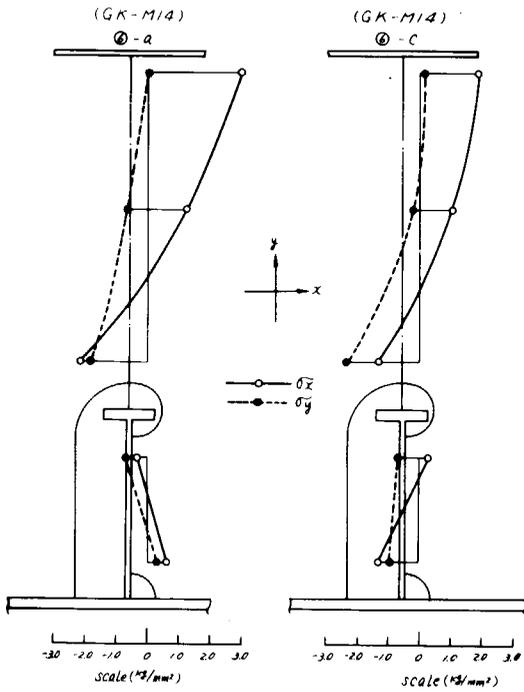


図 3.3.23 ウェブ・プレート応力(圧力 0.4 MPa)

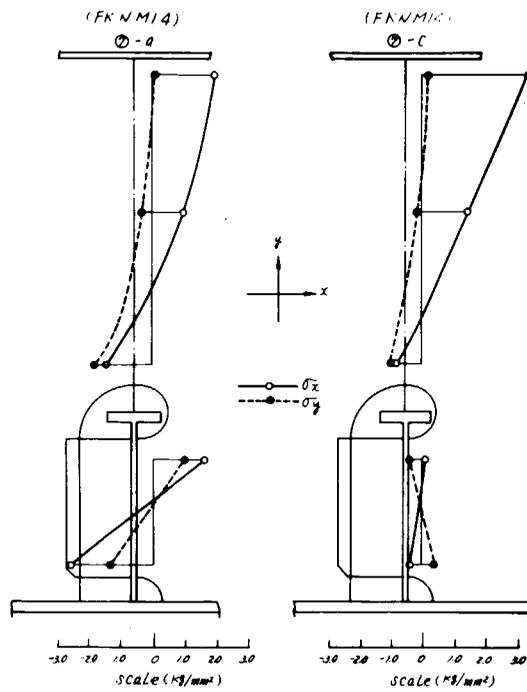


図 3.3.24 ウェブ・プレート応力(圧力 0.4 MPa)

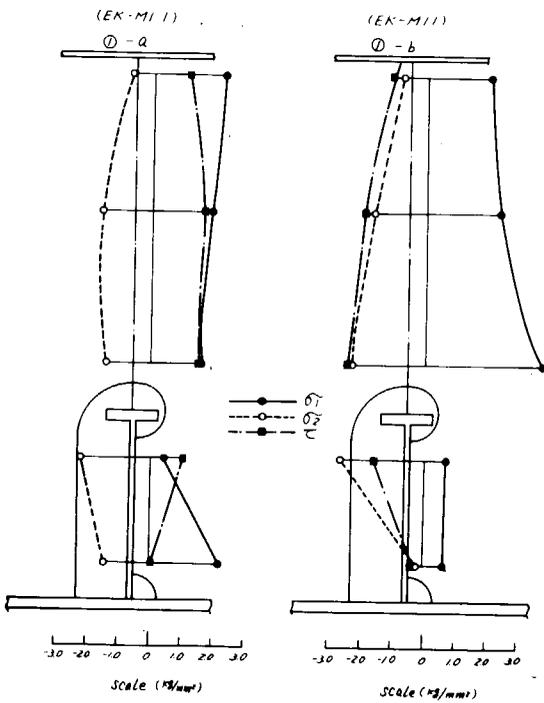


図 3.3.25 ウェブ・プレート応力(圧力 0.4 MPa)

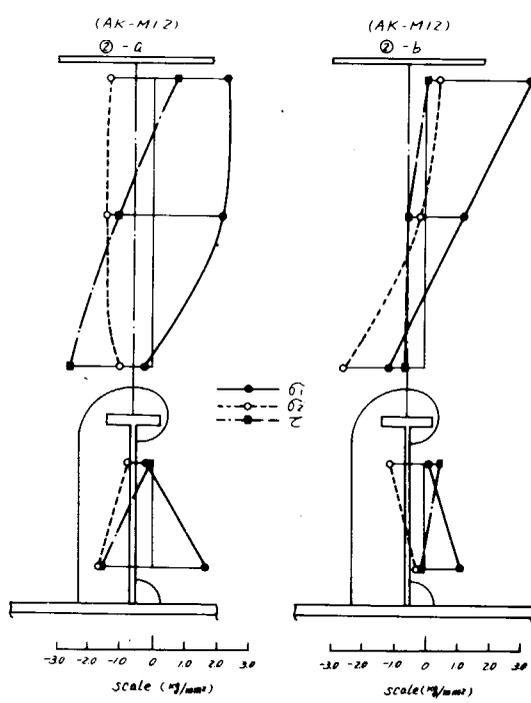


図 3.3.26 ウェブ・プレート応力(圧力 0.4 MPa)

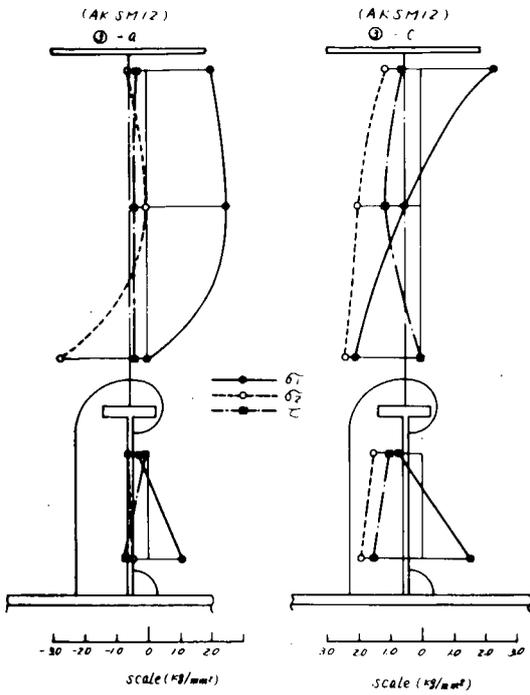


図 3.3.27 ウェブ・プレート応力(圧力0.4 kg)

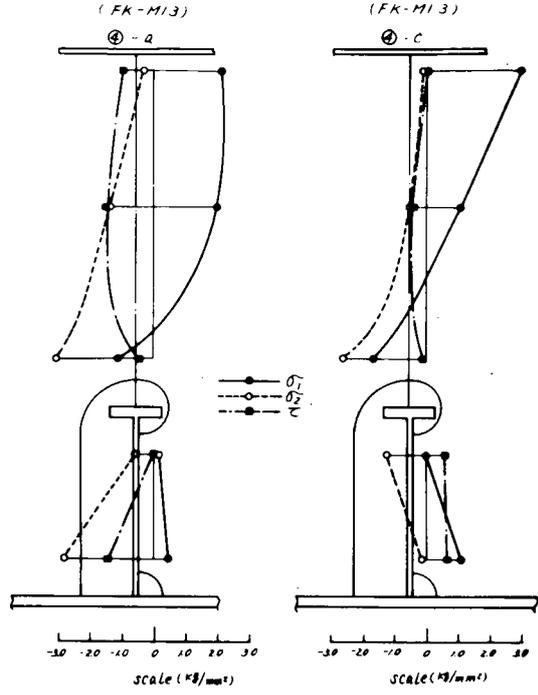


図 3.3.28 ウェブ・プレート応力(圧力0.4 kg)

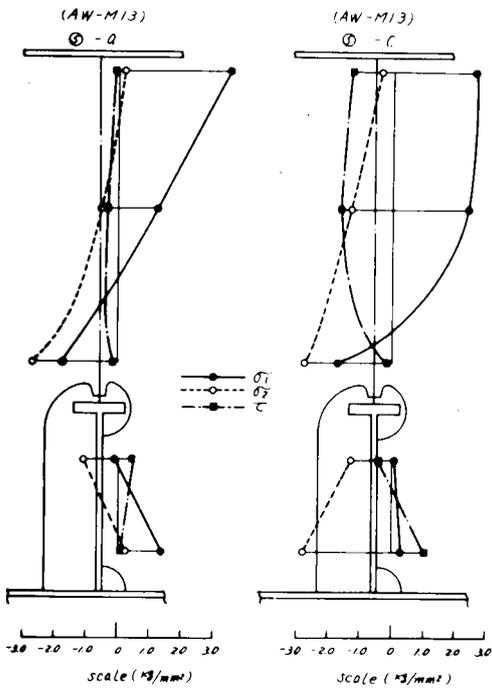


図 3.3.29 ウェブ・プレート応力(圧力0.4 kg)

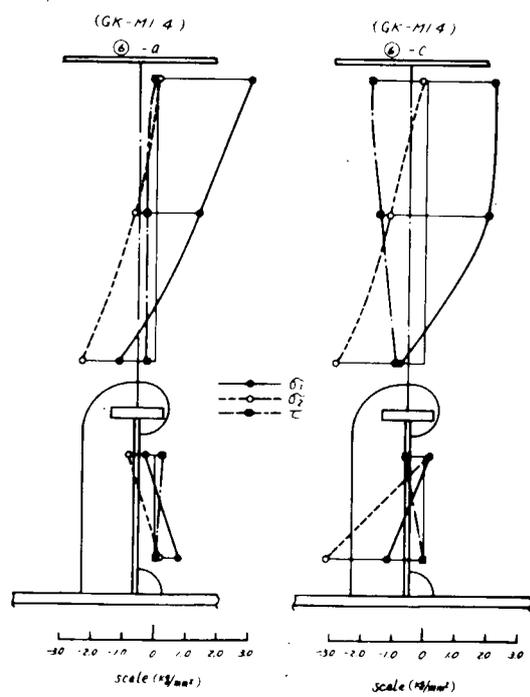


図 3.3.30 ウェブ・プレート応力(圧力0.4 kg)

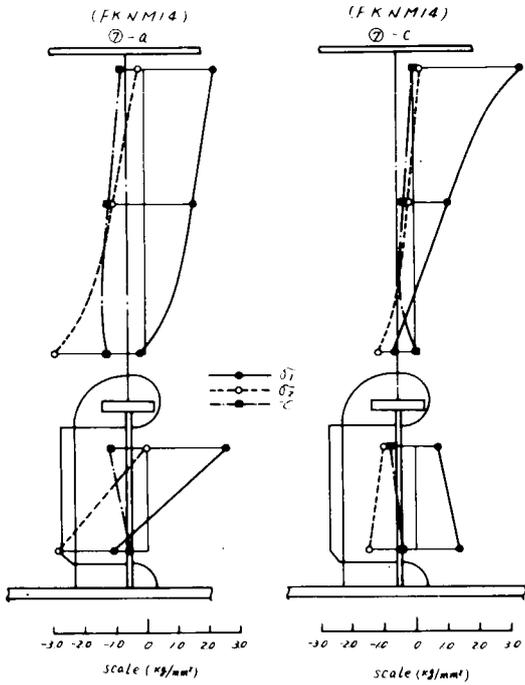


図 3.3.31 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

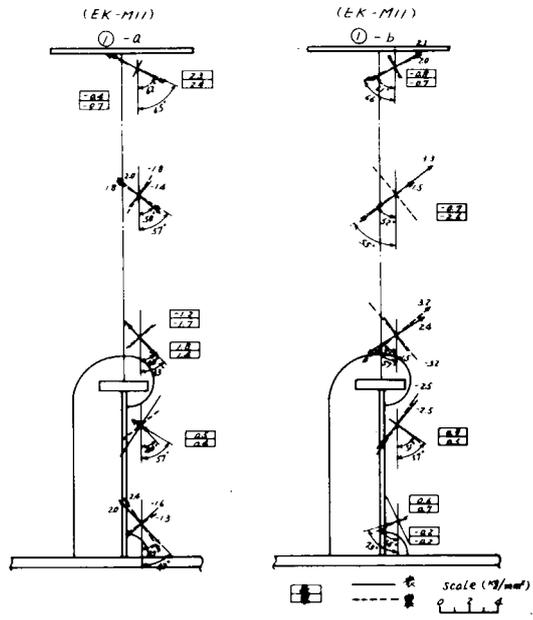


図 3.3.32 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

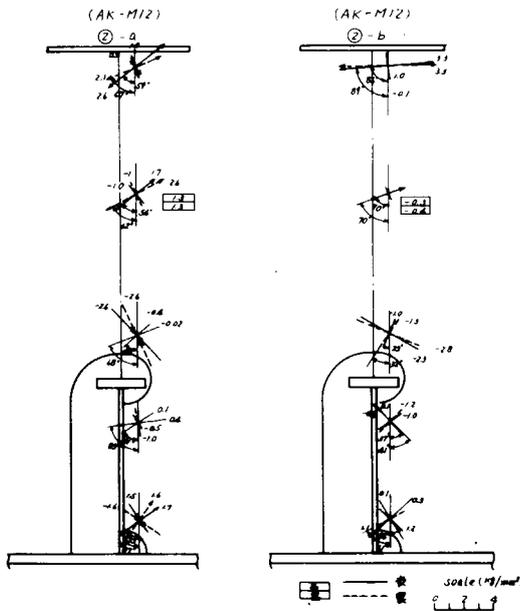


図 3.3.33 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

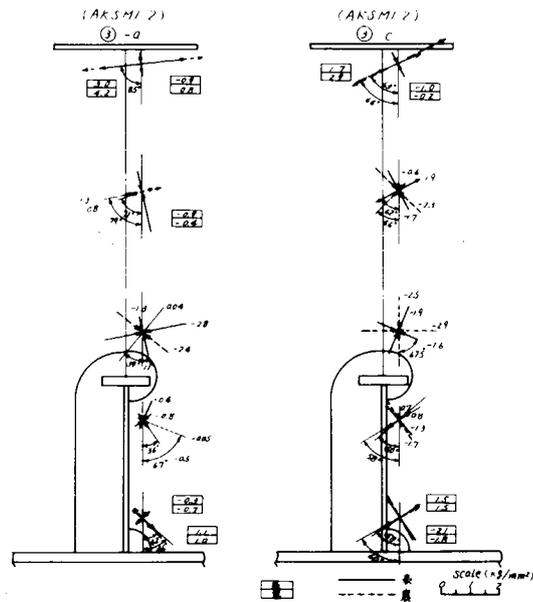


図 3.3.34 ウェブ・プレート応力(圧力0.4%)

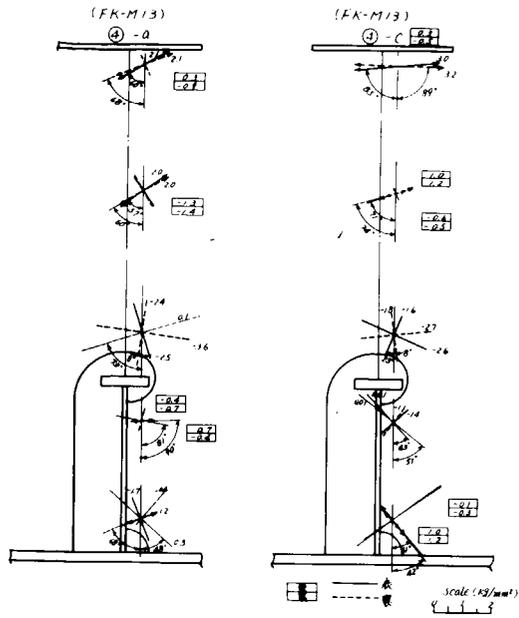


図 3.3.35 ウェブ・プレート応力 (応力 0.4 ㎏)

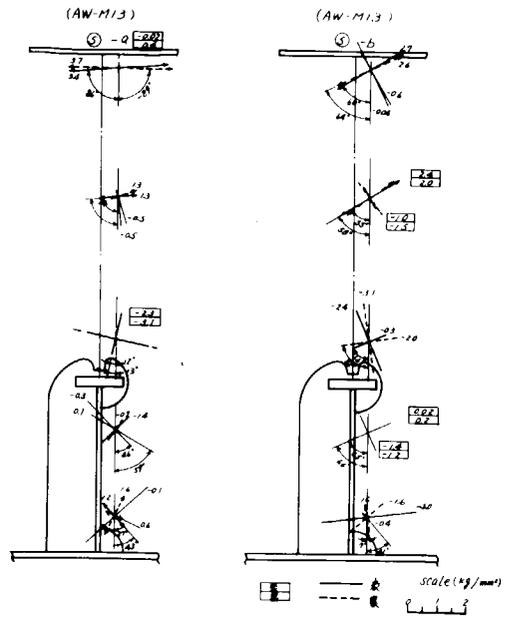


図 3.3.36 ウェブ・プレート応力 (応力 0.4 ㎏)

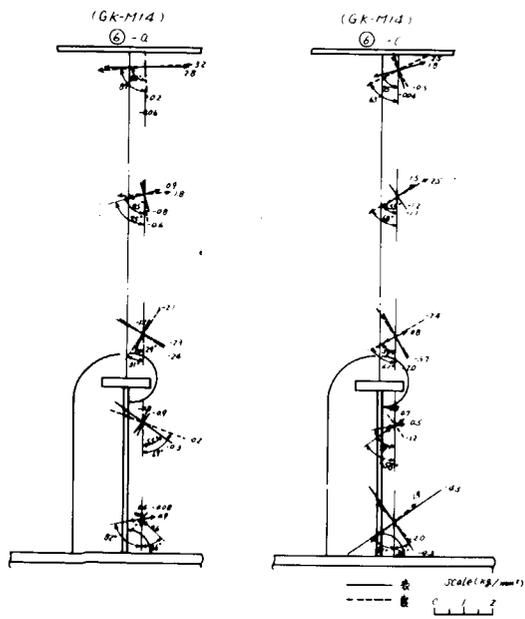


図 3.3.37 ウェブ・プレート応力 (応力 0.4 ㎏)

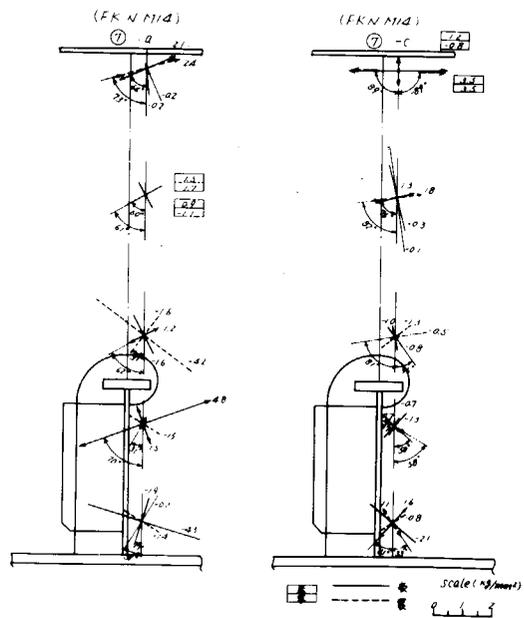


図 3.3.38 ウェブ・プレート応力 (応力 0.4 ㎏)

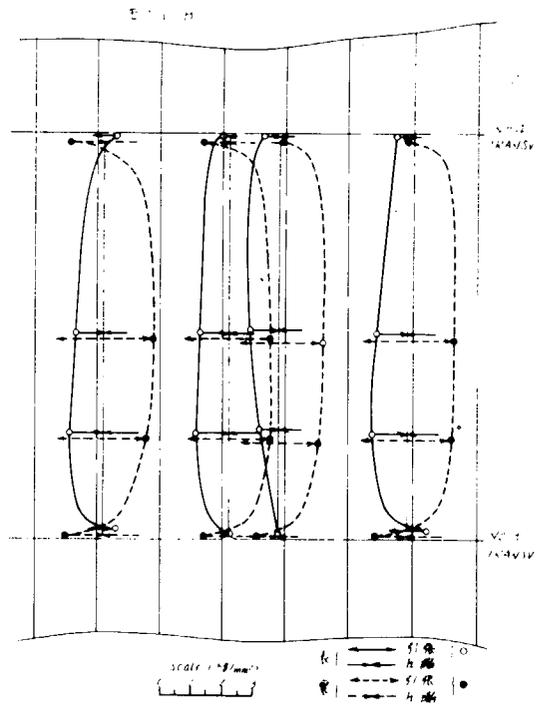
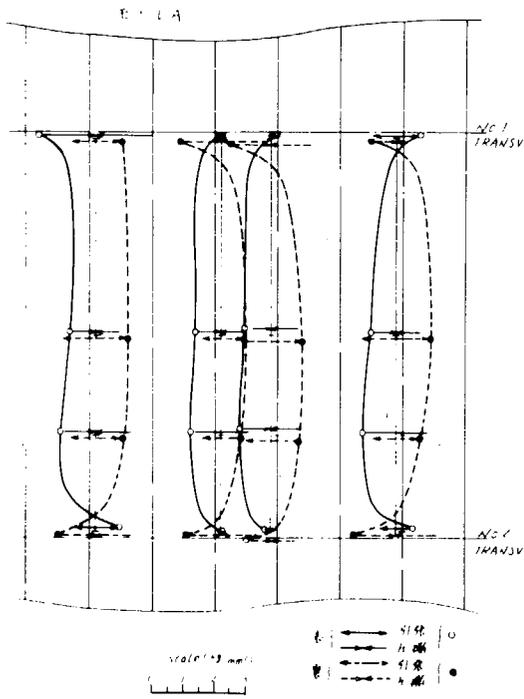


図 3.3.39 ボトム・プレート応力分布(圧力0.4%) 図 3.3.40 ボトム・プレート応力分布(圧力0.4%)

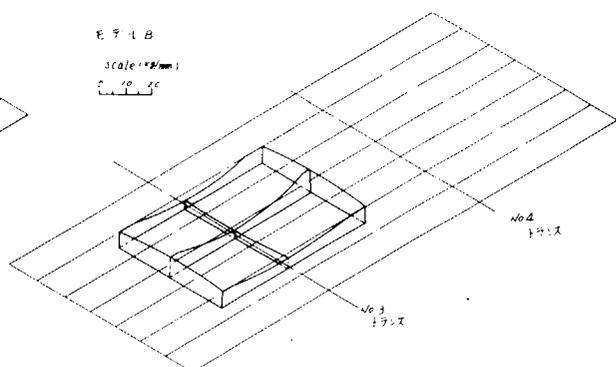
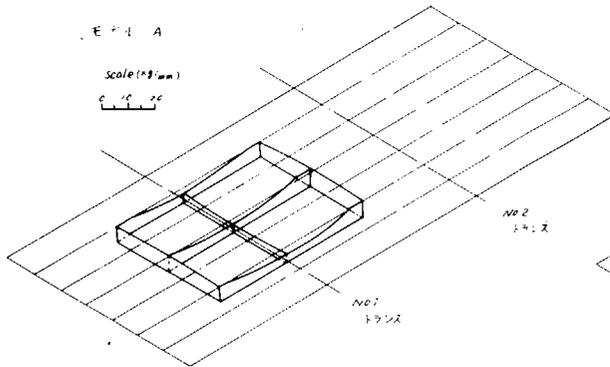


図 3.3.41 ボトム・プレートの撓み分布(圧力0.4%) 図 3.3.42 ボトム・プレートの撓み分布(圧力0.4%)

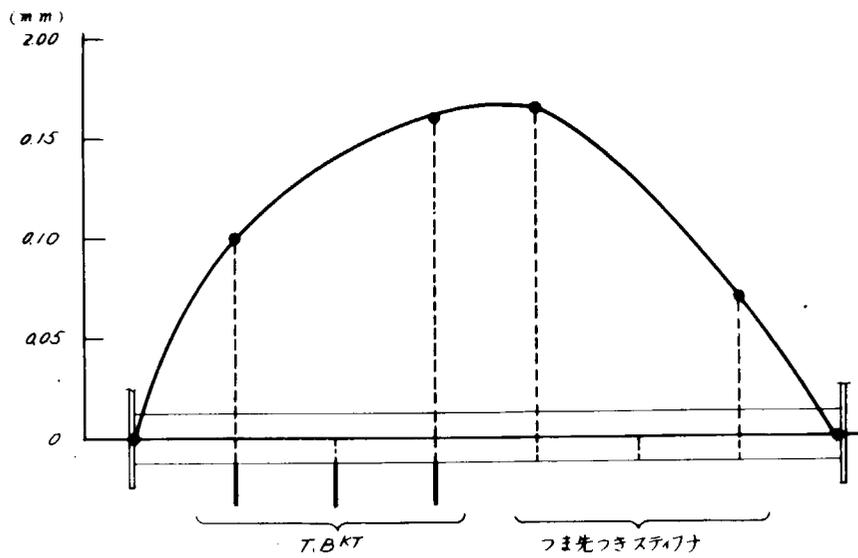


図 3. 3. 4 3 (1) 図 3. 3. 1 の計測位置の T 点の変位

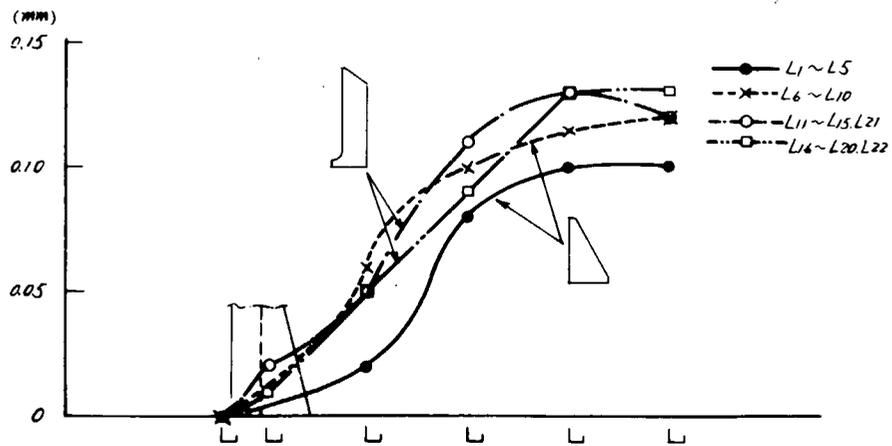


図 3. 3. 4 3 (2) 図 3. 3. 1 の計測位置の L 点の変位

## 4. 小型模型疲労試験

### 4.1 ま え が き

大型船の横強度部材のウェブには、縦通材の貫通するスロットが多数あげられる。そのスロット周辺、特にウェブの防撓材と縦通材フランジとの結合部にクラックの発生する損傷が多い。この原因を明らかにするため、約10万D.W.Tタンカーの1/4縮尺モデルに相当する長さ1,100mm、高さ525mmの小型ガーダ模型60個を製作し、片振りの疲労実験を実施し、変動荷重に対するガーダのスロット周辺部の亀裂の発生、伝播の状況および疲労強度について調査研究した。

疲労試験は、その性質上、長時間の実験を必要とするので、試験を「東京大学」、「日本海事協会技術研究所」、「三菱重工業」および「川崎重工業」の4個所に分けて、各15個を分担し、実験の再現性と信頼性の確認も併せて検討した。試験体の種類および分担は表4.1.1に示すとおりである。

これらの試験体の形状は、現在使用されているスロット周りの形状の代表例を主体として、少数の新しい試みを加えたものである。そのVariationは以下のものが考えられている。

- 1) Web Stiffenerの形状
- 2) BackingおよびTripping Bracketの形状および有無
- 3) Collar Plateの種類および有無
- 4) Slot周りの形状
- 5) 新しいStiffeningの方式

図4.1.1に試験体の形状とその呼称が示されている。(以下の報告書の中で、これらの呼称が用いられる)

試験の結果については、各分担者間の試験結果には比較的よい相関が見られ、異なつた場所で実施された疲労試験の結果を1つにまとめることの有効性と信頼性が確認されたが、実験結果の総合的、かつ詳細な検討は次年度以降の実験結果がすべて得られてから行なうこととした。

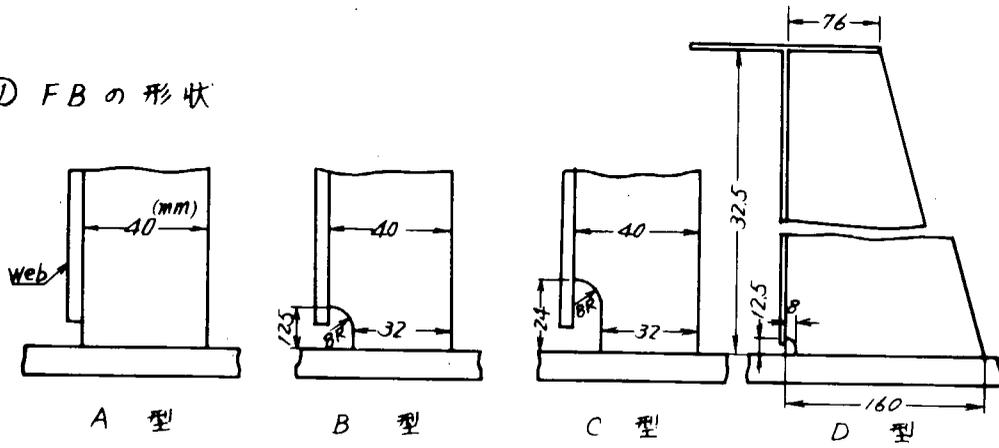
以下に各分担者別の試験結果について報告する。

表 4.1.1.1 試験体種類および分担

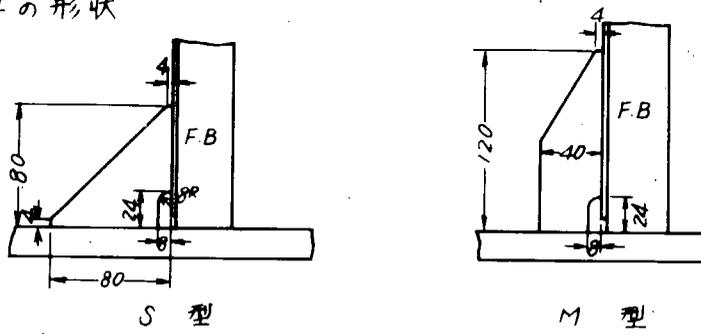
分担 会社	桁模型 寸法	荷方 法	小型疲労試験桁					模 型 製 作 数
			標準模型	FBの形状	BKT	Collar	Cut-out形状	
東 大	1100×400 ×540 (L×B×D) 3long <sub>L</sub> Space250	両端支持 中央集中荷重 (0～ Tension)	FBのみ(A型) カラーBKTなし (別紙)	FBの基部の 形をCut-up (B型C型)	BKT(D型S型) +FB Cut-up (A型)	カラー(N型) +FB Cut-up (A型B型)		
			3	3×2	2×2	2		
NK 技研	"	"	"		BKT 3種 (L型 S型 M型) +FB Cut-up (A型)	カラー(N型P型) (A型)		
			3		3×2	4(N)+2(P)		
三菱長崎	"	"	"	FBの基部の 形をCut-up (B型)	BKT(M型) +FB Cut-up (A型orB型)			
			2	5	6			
川重技研	"	"	"			Cut-outのRを 変化させ(R型) +FB Cut-up (B型) (2荷重) 3×2	Long <sub>L</sub> Invert Angle使用 (2荷重) 3×2	
			3					
							計	60

※ 予備

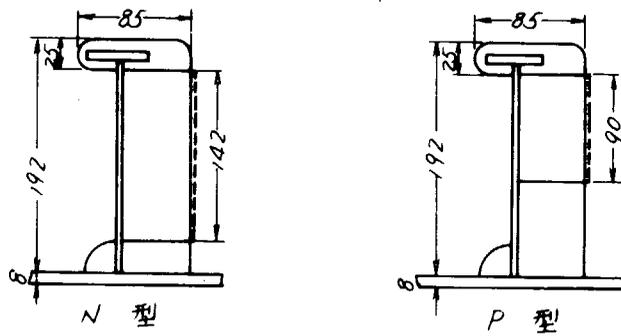
① FBの形状



② B.KIの形状



③ Collarの形状



④

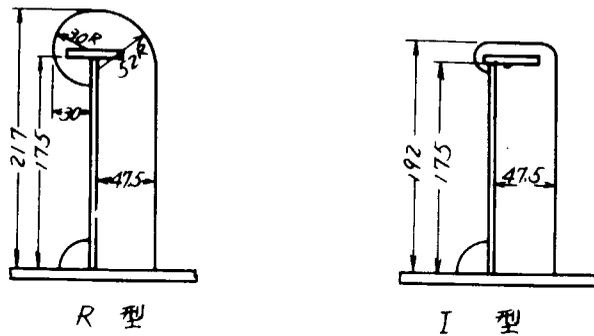


図 4.1.1 試験体の形状

## 4.2 東京大学における小型模型疲労試験

### 4.2.1 試験内容

疲労試験体の総数は15個で、そのうち4種6個の試験体は三菱重工で、3種9個の試験体は川崎重工で加工された。図4.2.1に試験体の符号、種類および寸法が示されている。表4.2.1には供試材の引張試験結果、表4.2.2には実験の内容が示されている。

#### (1) 応力分布の測定

静荷重によるスロット周辺の応力分布を知るために応力分布を測定した。表4.2.2に示すように試験体7種の内A T Oのみは2個について測定し、ほぼ再現性が確かめられたので以後は各種1個のみ応力分布を測定した。

応力分布の測定は試験体の両側に下図に示すごとく連動した油圧ジャッキを挿入し、左右同時に静荷重をかけた。また油圧ジャッキの下に

Load Cellを入れて荷重を測定した。荷重は各試験体の応力がほぼ $20\text{Kg}/\text{cm}^2$ を越さないように注意したが、T O-2のスロット部下辺に $23\text{Kg}/\text{mm}^2$ の応力が発生した。また、ほとんどの試験体に3 tonの荷重をかけたが、3 tonの荷重をかけなかつた試験体の測定結果は荷重3 tonに換算されている。

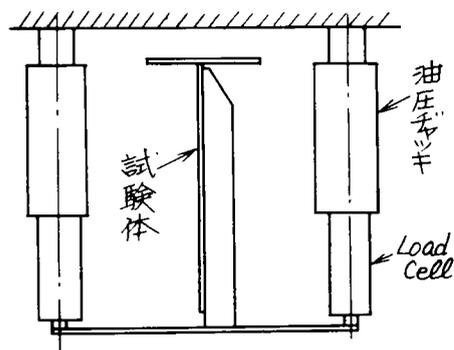


図4.2.2は応力分布計測位置の一例である。

図4.2.3～4.2.7は、STIFFENER部の応力分布である。同じく図4.2.8～4.2.11はSLOT部およびUPPER FLANG部の応力分布を示し、応力値を矢印の線の長さで表示し、特に測定点を曲線で結ばなかつた。なお数字は応力を示している。

#### (2) 疲労試験

試験は50 tの構造物繰返し試験装置を使用し、繰返し速度は300 r.p.mである。上限荷重は、8 t、12 t、16 tの3段階で、下限荷重はそれぞれの上限荷重の $\frac{1}{10}$ を目標に荷重をかけた。図4.2.12は実験の状態を示したもので、50 tパルセーターよりの荷重は荷重伝達丸棒により試験体のLong.  $\frac{1}{2}$ の両端に負される。荷重伝達丸棒のほぼ中央にstrain gageを貼布し、Dynamic strain Meterを通しOscill graphにより荷重を計測した。尚荷重伝達丸棒の先端と試験体との間には案内を設けて荷重位置を固定している。

図4.2.13～4.2.26は亀裂の発生と進展の様態を示した図である。表4.2.3は疲労試験の結果である。ANTO-1は上限荷重8.2 tで実験を行なつたが、ステイフナに亀裂が発生し、約22 mmまで亀裂が進んだが1,000,000回になつても亀裂の進展が遅いので、荷重を16.0 tに上げて実験を続けた。( )内の数字は、荷重16.0 tにおける値である。図4.2.27は表4.2.3の実験結果をプロットしたものであり、ステイフナの亀裂発生と破断に至る繰返し数と上限荷重との関係を示している。なお括弧内の数値は、3 tonの静荷重下におけるステイフナの最高応力を参考のため記入したものである。

### 4.2.2 考察

#### (1) 応力分布

ステイフナの応力分布の計測は、図4.2.2に示すようにステイフナの高さ方向で3箇所計測したが

中央と上部の応力は0～4 Kg/mm<sup>2</sup>程度であり問題はなかつた。下部の応力についてステイフナA型、B型、C型の応力分布を比較すると、標準型のB型が最も大きく(約20 Kg/mm<sup>2</sup>)次にC型(約14 Kg/mm<sup>2</sup>)、A型(5～8 Kg/mm<sup>2</sup>)の順序になつている。(図4.2.3および4.2.4参照)応力値の傾斜についてもこの順序であり、特に標準型のステイフナにおける応力値の傾斜の大きいことに注目する必要がある。しかし、カラープレートのある試験体"ANTO"と"NTO"とを比較してみるとほぼ12 Kg/mm<sup>2</sup>程度で有意の差はその分布の形以外は見られない。(図4.2.7)

一般にステイフナの応力分布はウェブ側の基部(亀裂発生部)が最も大きく、先端部(反対側の基部)に向つて急激に減少し、圧縮応力になるものもある。しかし、バックブラケットがついている試験体"ASTO"(図4.2.5)の場合には、バックブラケットの影響ではほぼ平坦あるいは多少逆の傾向が見られ応力値(6 Kg/mm<sup>2</sup>以下)は大巾に緩和されている。これに反して、大きな倒れどめのある"DTO"(図4.2.6)の場合には、切欠きが標準型(B型)であるためもあつてか、全体の応力値は低いにもかかわらずウェブ側基部近傍で急激に立上り20 Kg/mm<sup>2</sup>以上の応力が発生しているのは注意を要する。図4.2.27に示されるように応力分布の最大応力値と亀裂発生までの繰返し数との間にはよい相関が見られる。スロット部の応力分布は図4.2.8～4.2.11に示すごとくスロットのR部と、スロットのウェブと外板とのつけ根の部分に大きな応力が発生している。全般的に、カラー付きのA型(A N型)の場合に応力値が低いほか(図4.2.11)は、型式による差異は認められなかつた。"TO-2"(図4.2.9)スロット下端の応力値25.5 Kg/mm<sup>2</sup>はgage不良によるものと考えられる。また、フランジ両側に貼布したgageにより、試験体が非対称なための横曲りを計測したが、横曲りはほとんど計測されなかつた。

## (2) 疲労試験

疲労試験の場合には、一般に、まず①ステイフナのウェブ側基部から亀裂が発生し、さらに亀裂は進展して破断に至る。ステイフナの破断前後から②スロットのR部に亀裂が発生し、さらにスロットのR部の亀裂が進行すると③スロット下部からも亀裂が発生する。

ステイフナの亀裂の発生と進展はウェブ側基部から反対側に向つて進行するのであるが、"ATO-2"の試験体は基部の両側から亀裂が発生して連絡して破断した。これはまずウェブ側から亀裂が発生し溶接が剝離し、図4.2.20に示すように約24 mmで停止し、それから反対側から亀裂が入つたものと思われる。

"ASTO"の試験体(図4.2.14)ではウェブの反対側から亀裂が発生しているが、これは応力分布の計測結果からも、推定できる結果で、バックブラケットの影響と思われる。図より明らかなように、ステイフナ基部の亀裂はすべてステイフナ側の溶接熱影響部から発生しており、この部分はFilletの形状による応力集中部にもあたつており、工作上十分の注意が肝要であろう。

図4.2.27のステイフナの亀裂発生と破断の図に見るように、ステイフナ基部の亀裂の発生はステイフナB型(標準型)が一番早く、次にA型、C型の順になつている。ステイフナ基部における応力の最大値はC型のステイフナはB型のステイフナより30%程度低い応力となつていたが、最も応力の低いA型よりも大きな応力値であるにもかかわらず亀裂発生は遅くなつている。しかし、破断までの繰返し数を比較すると、A型とC型ではほとんど差はなく、B型は荷重の低いところで特に劣るようである。これは亀裂発生の際には型式による応力集中度が影響するが亀裂発生後はその影響が減少すると考えられるからである。また、A型の亀裂発生から破断までの寿命が他の2型式に比して長いのは、ステイフナ巾の大きいことにあると思われる。他の型式については、試験体の数が少ないので、この実験から結論的な結果を抽出するのは困難である。また、危険を伴うが、本実験に関する限りでは以下のことが推定される。

1) 大きな倒れどめのある"DTO"型は、応力分布からも推定できるように、標準型"TO"とほぼ

同程度の繰返し数で亀裂が発生しているが、巾が広いので破断までの寿命は、カラープレート付き（"NTO"）について長い。

- 2) バックブラケット（"AS"）型は応力分布からも最も亀裂発生までの寿命が長い。しかし、亀裂発生から破断までは極めて短かく、破断までの寿命はほぼ標準型のそれに近い。
- 3) カラー型は、亀裂発生についてはC型とほぼ同じ強度を持ち、かつ、破断までの寿命も一番長い。

亀裂発生と伝播の型式から分類すると次の3通りとなる。

- a) スティフナ型、バックブラケット型  
スティフナが完全に破断してから、他の部分に亀裂が生ずる。
- b) カラープレート型 スティフナ基部から発生した亀裂がある程度進むと、他から亀裂が発生し始め、次いでスティフナが破断する。
- c) 倒れ止め型（"DTO"）まずスティフナ基部から亀裂が発生し、続いてスロットのR部から亀裂が出て、ほとんど同時にスティフナとウェブが破断する。  
これはa)では亀裂発生によつて荷重分担の変動が少なく、b)では亀裂の発生により荷重分担が変りスティフナの効きが急速に悪くなるためと考えられる。

#### 4.2.3 むすび

今回の実験は予備実験であり、試験体の個数も少なく、今後の実験にまつ必要があるが、今回の実験から得られた予備的結果は以下の通りである。

- 1) 今回の実験により実験の方法の検討などほぼ所期の目標を完了できた。
- 2) 今回の実験結果からは（図4.2.2.7参照）
  - i) 静荷重による応力分布と亀裂発生までの繰返し数との間には当然のことながらよい相関が見られる。
  - ii) スティフナ型式としては、標準型の切欠きの高さのみを増したC型が有望である。
  - iii) カラーは、亀裂発生を上記C型程度に遅らせ、また破断寿命を延すのには最も効果がある。
  - iv) バックブラケットは亀裂の発生を最も遅らせるが破断寿命は余り標準型と変わらない。
  - v) 大きい倒れ止め（D型）では亀裂の発生は標準型とほぼ同時で、やや早いですが、破断寿命はカラー型につづいて長い。
  - vi) 試験体の型式によつて亀裂発生と伝播の様相が異なる。

表4.2.1 供試材の引張試験

試験片 名称	試験片寸法 (mm)	降伏点 Kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ Kg/mm <sup>2</sup>	伸び率 %
	板厚×巾×標点距離			
1	4.53×25.01×50.0	25.5	33.4	47.8
2	4.53×25.12×50.0	25.7	34.3	48.4
4	4.53×25.00×50.0	26.1	34.0	42.4
A3-1	4.53×24.93×49.8	24.7	33.5	48.8
A3-2	4.61×24.93×49.5	25.7	35.5	45.5

JIS5号試験片による

表4.2.2 実験内容

試験体 名称	試験体 符号	応力分布	疲労試験 上限荷重 ton	記 事
1-1	ASTO-1	計 測	12.0	
1-2	ASTO-2	—	16.2	
2-1	DTO-1	計 測	12.0	
2-2	DTO-2	—	16.2	
4	ANTO-1	計 測	8.2 (16.0)	0~1000000:::8.2t 1000000以上:::16.0
5	NTO-1	計 測	12.0	
A-1	ATO-1	計 測	8.0	
A-2	ATO-2	計 測	12.0	
A-3	ATO-3	—	—	引張試験片採取
B-1	TO-1	—	12.1	
B-2	TO-2	計 測	7.8	
B-3	TO-3	—	16.1	
C-1	CTO-1	計 測	8.0	
C-2	CTO-2	—	12.0	
C-3	CTO-3	—	16.0	

試験片番号	WEB STIFFの形状	BACK BIZの形状	SLOTの形状	COLLARの形状
AS To	A型	S型	R型	—
DT*	D型	—	R型	—
ANTo	A型	—	R型	N型
NTo	B型	—	R型	N型
ATo	A型	—	R型	—
To	B型	—	R型	—
CTo	C型	—	R型	—

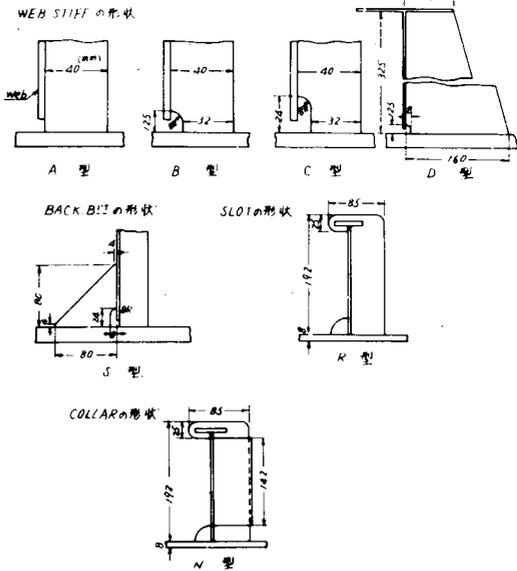


図 4.2.1 試験体の種類

荷重 3.0ton scale 1/1

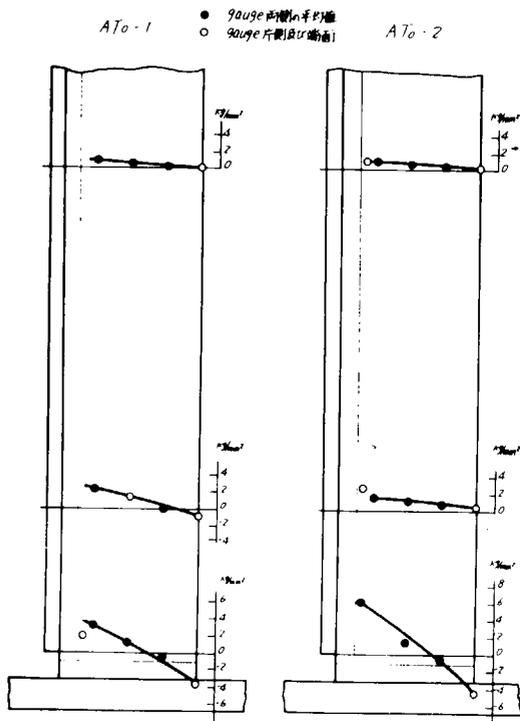


図 4.2.3 応力分布 (STIFFNER)

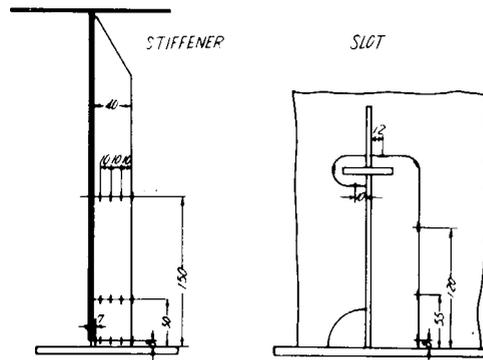
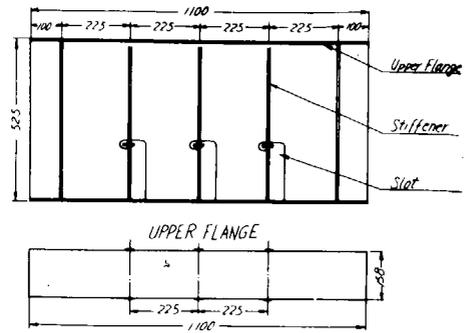


図 4.2.2 応力分布計測位置の一例

荷重 3.0ton scale 1/1

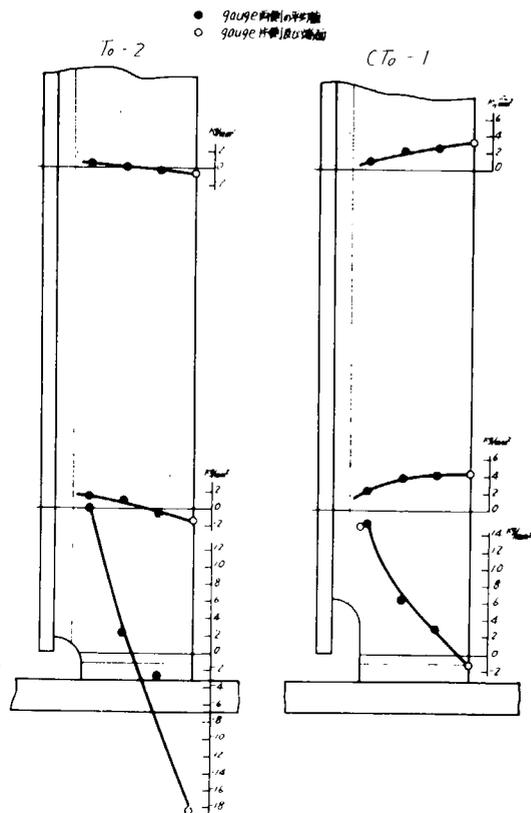


図 4.2.4 応力分布 (STIFFENER)

ASTo-1 荷重 3.0ton scale 1/1

- gauge 両側の平均値
- gauge 片側だけの場合

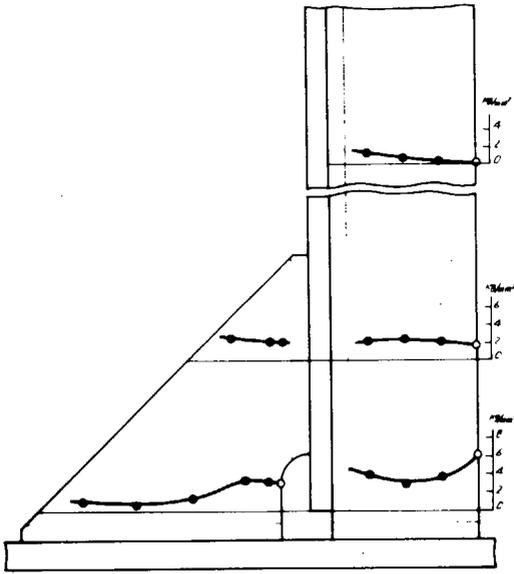


図 4.2.5 応力分布 (STIFFENER および BKT)

DTo-1 荷重 3.0ton scale 1/1

- gauge 両側の平均値
- gauge 片側だけの場合

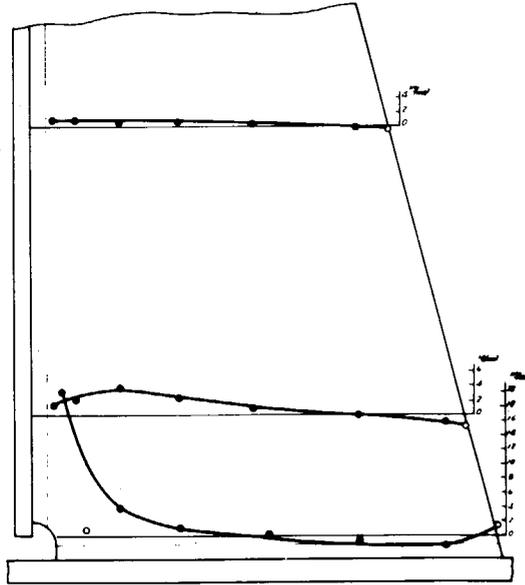


図 4.2.6 応力分布 (STIFFENER)

荷重 3.0ton scale 1/1

- ANTo-1
- gauge 両側の平均値
- gauge 片側だけの場合

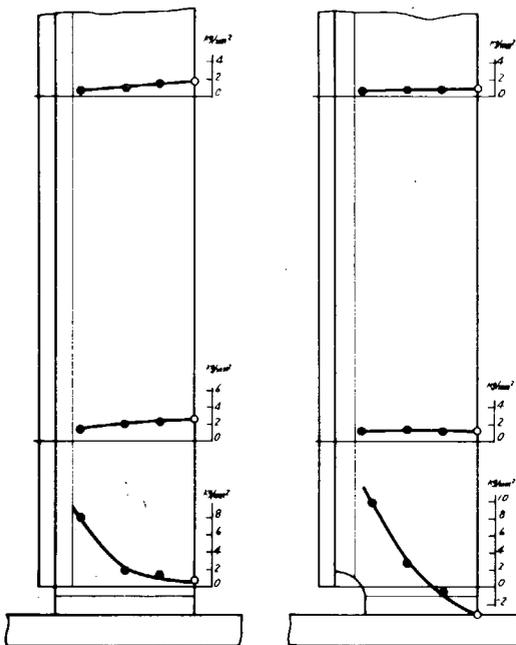
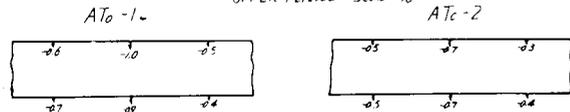


図 4.2.7 応力分布 (STIFFENER)

荷重 30 ton

UPPER FLANGE scale 1/10



0 2 4 6 kg/cm²

ATo-1

SLOT scale 1/2

ATo-2

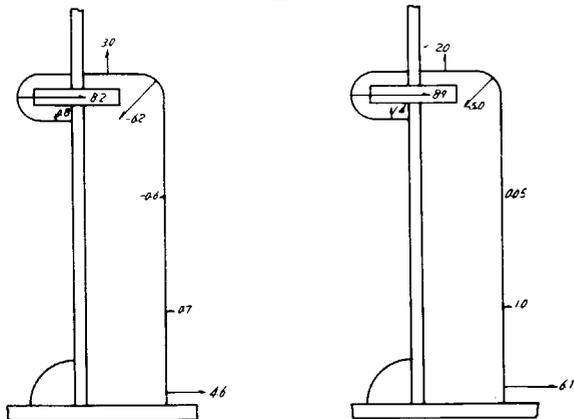


図 4.2.8 応力分布 (UPPER FLANGE および SLOT)

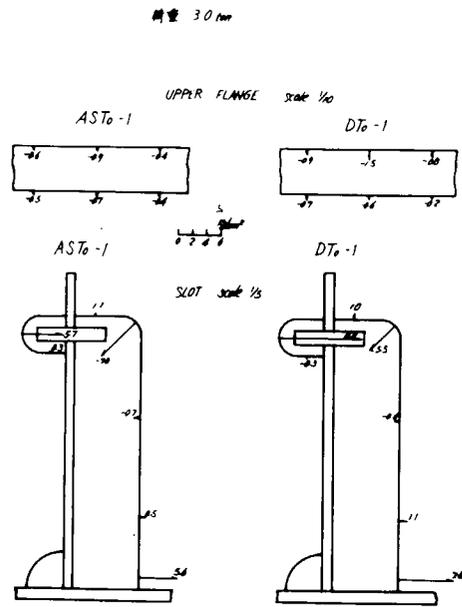
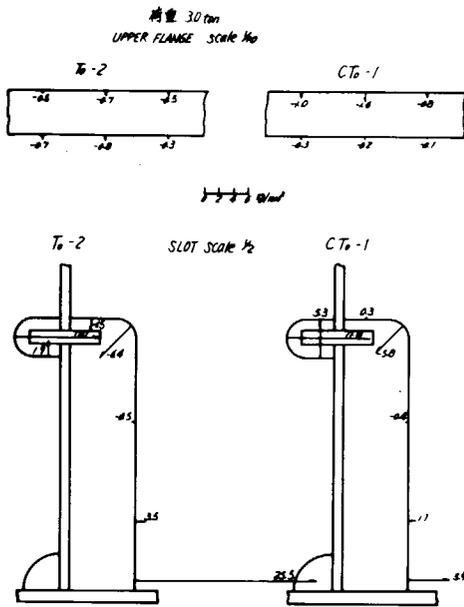


図 4.2.9 応力分布(UPPER FLANGEとSLOT)      図 4.2.10 応力分布(UPPER FLANGEおよびSLOT)

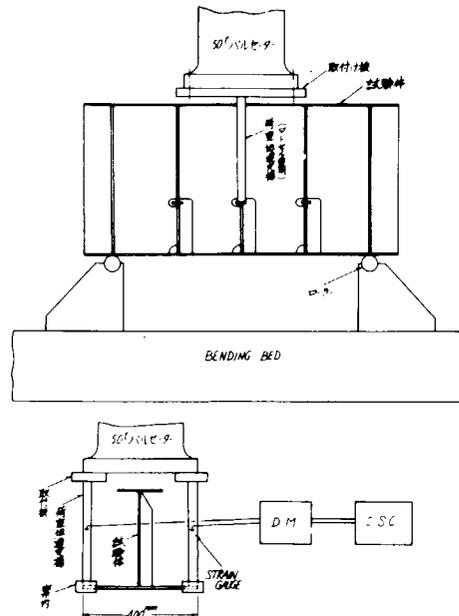
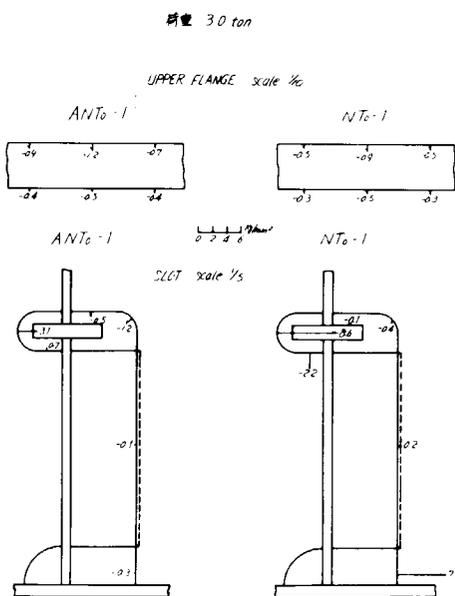


図 4.2.11 応力分布(UPPER FLANGEとSLOT)      図 4.2.12 実験の状態

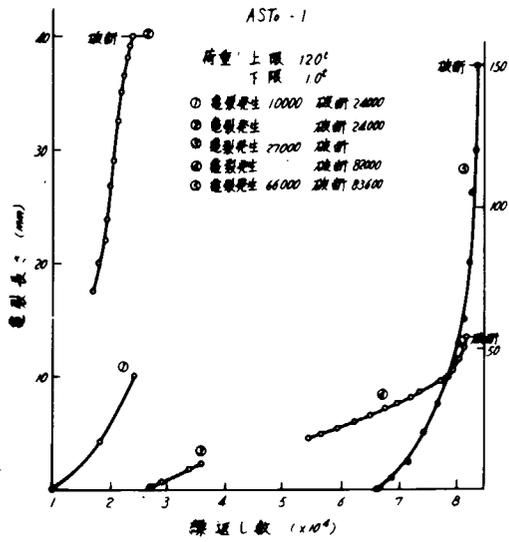
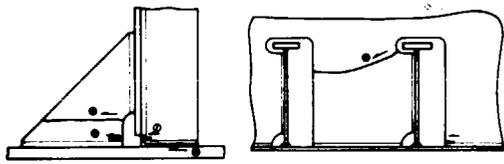


図 4.2.13 亀裂の発生と進展

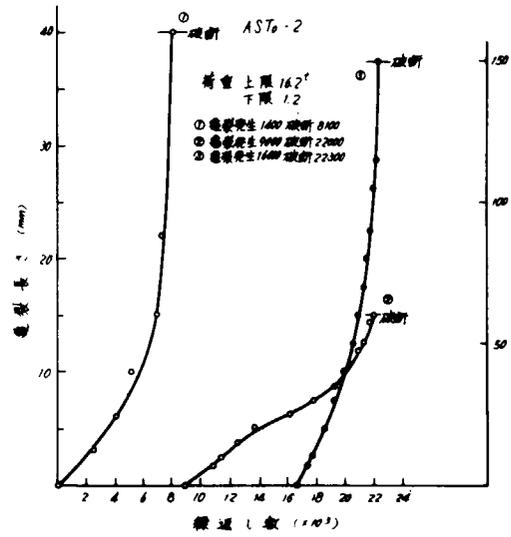
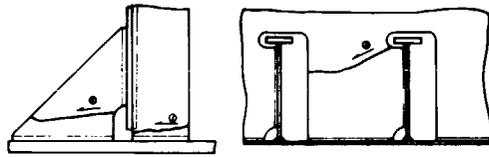


図 4.2.14 亀裂の発生と進展

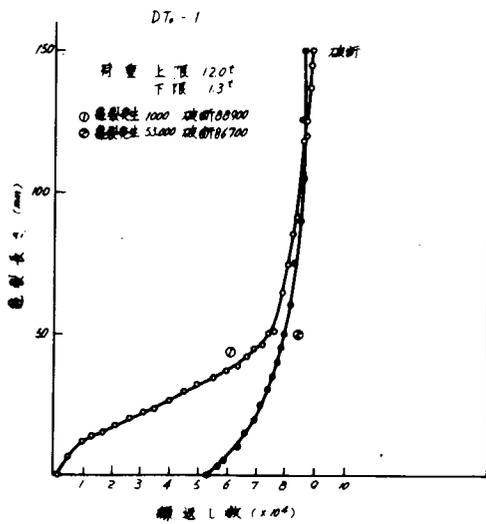
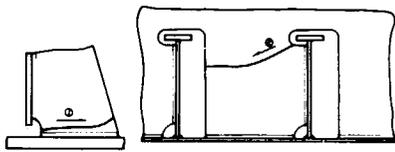


図 4.2.15 亀裂の発生と進展

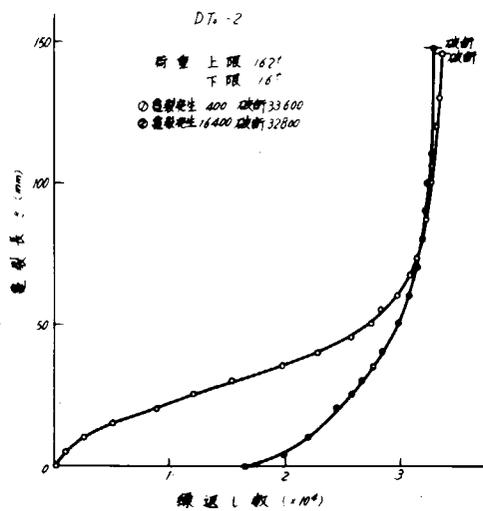
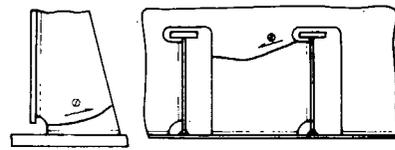


図 4.2.16 亀裂の発生と進展

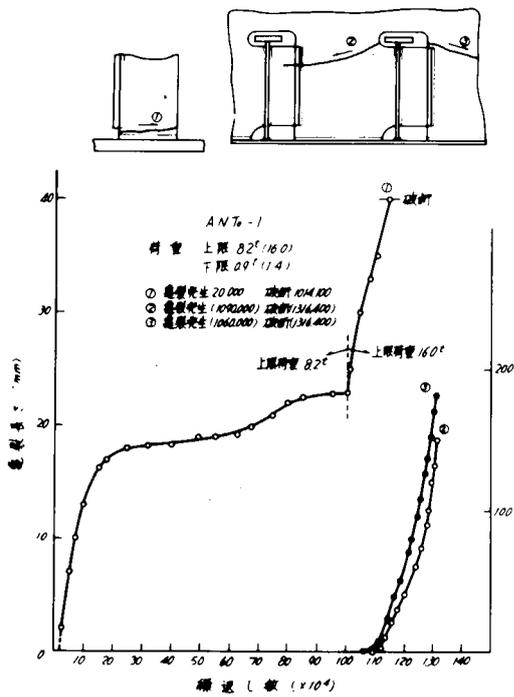


図 4.2.17 亀裂の発生と進展

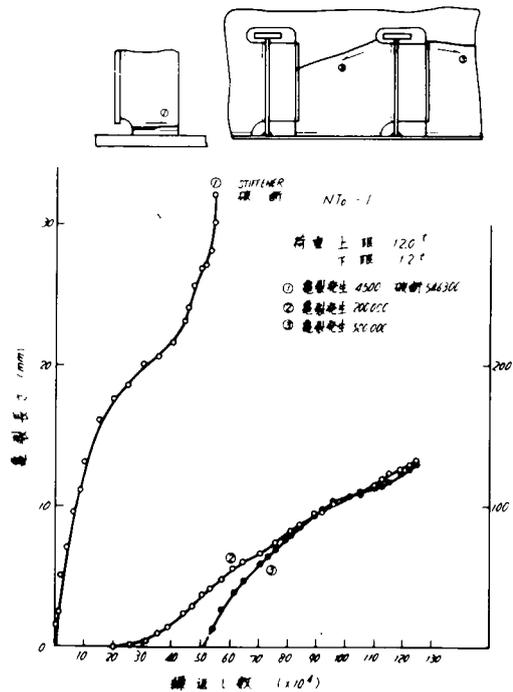


図 4.2.18 亀裂の発生と進展

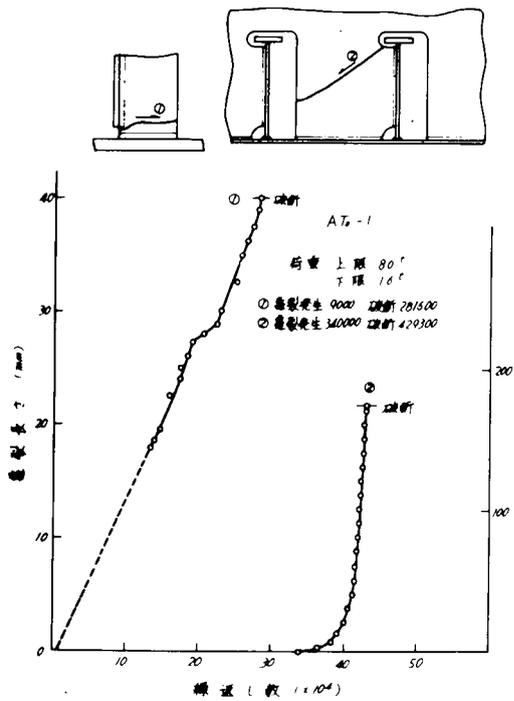


図 4.2.19 亀裂の発生と進展

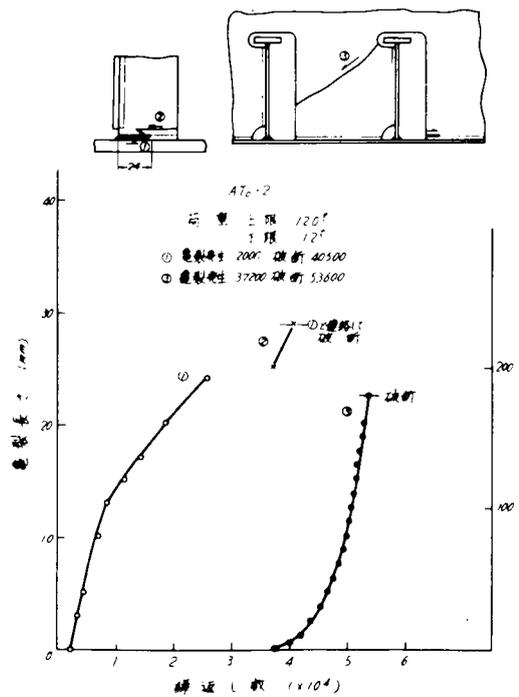


図 4.2.20 亀裂の発生と進展

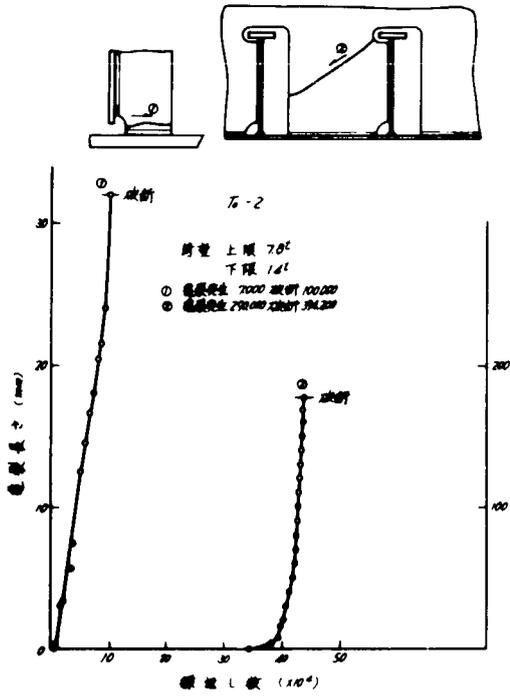


図 4.2.2.1 亀裂の発生と進展

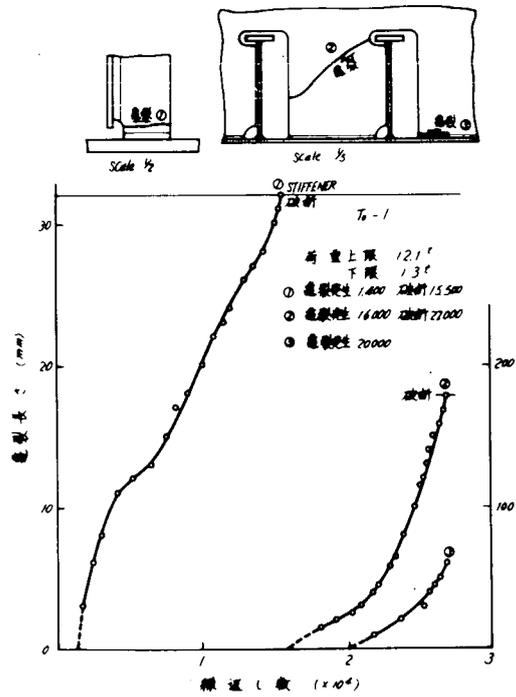


図 4.2.2.2 亀裂の発生と進展

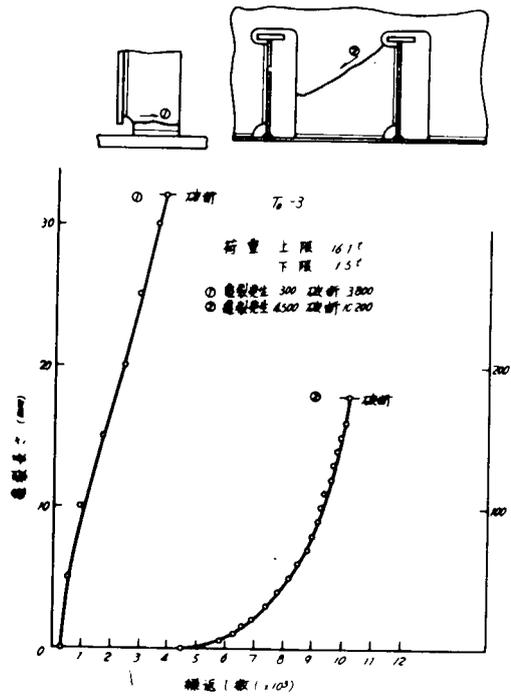


図 4.2.2.3 亀裂の発生と進展

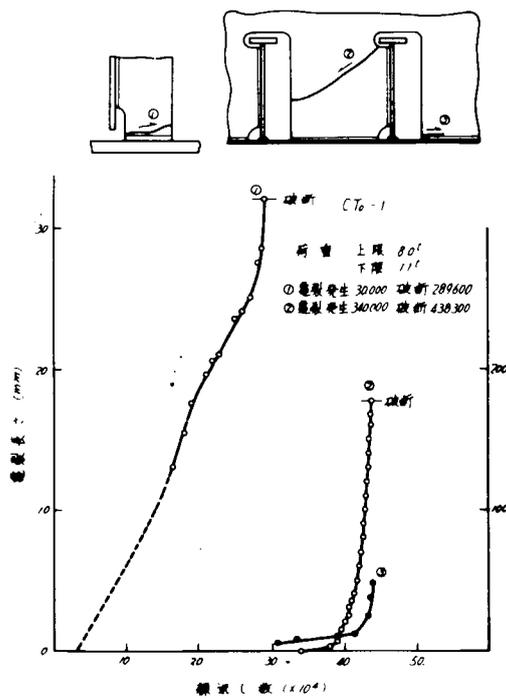


図 4.2.2.4 亀裂の発生と進展

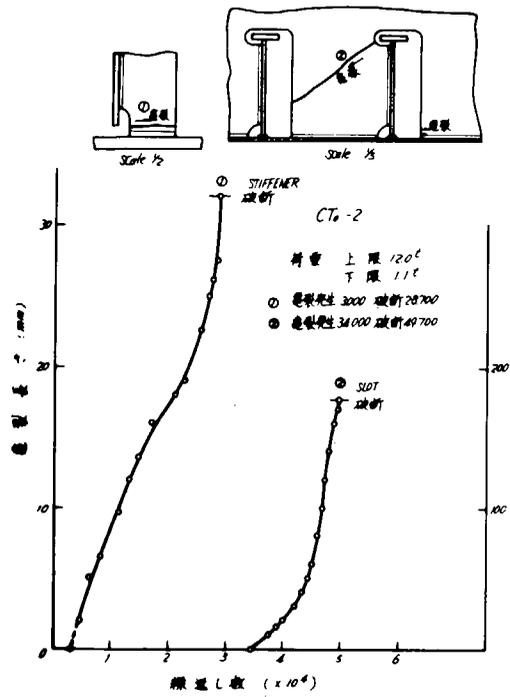


図 4.2.2.5 亀裂の発生と進展

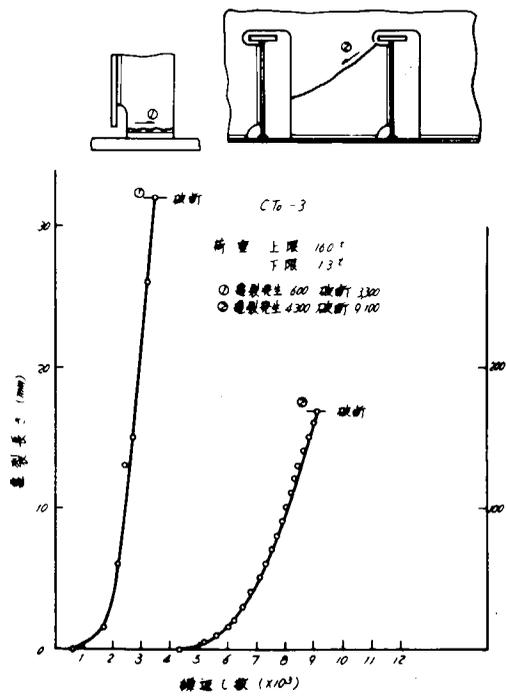
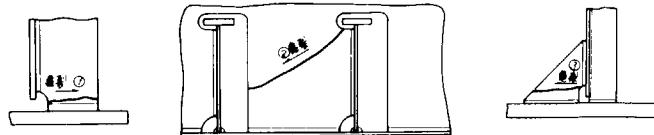


図 4.2.2.6 亀裂の発生と進展

表 4.2.3 疲労試験結果

試験符号	繰返し回数 10 <sup>6</sup>		① スリット		② スロット		③ パックオフ		備考
	上限	下限	亀裂発生	破断	亀裂発生	破断	亀裂発生	破断	
ASTa-1	12.0	1.0	10,000	24,000	88,000	23,000	—	27,000	
ASTa-2	16.2	1.2	1,400	8,100	15,000	22,300	9,000	22,000	
DTa-1	12.0	1.3	1,000	28,900	53,000	86,700	—	—	
DTa-2	16.2	1.6	400	33,000	16,400	32,800	—	—	
ANTa-1	12.0	1.2	20,000	(10,000)	(100,000)	(130,000)	—	—	
NTa-1	12.0	1.2	4,500	546,300	200,000	1250,000	—	—	
ATa-1	8.0	1.0	9,000	281,600	340,000	429,300	—	—	
ATa-2	12.0	1.2	2,000	40,500	37,200	53,600	—	—	
Ta-2	7.8	1.4	7,000	100,000	290,000	394,200	—	—	
Ta-1	12.1	1.3	1,400	15,500	16,000	27,000	—	—	
Ta-3	16.1	1.5	300	3,800	4,500	10,200	—	—	
CTa-1	8.0	1.1	30,000	289,600	340,000	438,300	—	—	
CTa-2	12.0	1.1	3000	28,700	34,000	49,700	—	—	
CTa-3	16.0	1.3	600	3,300	4,300	9,100	—	—	



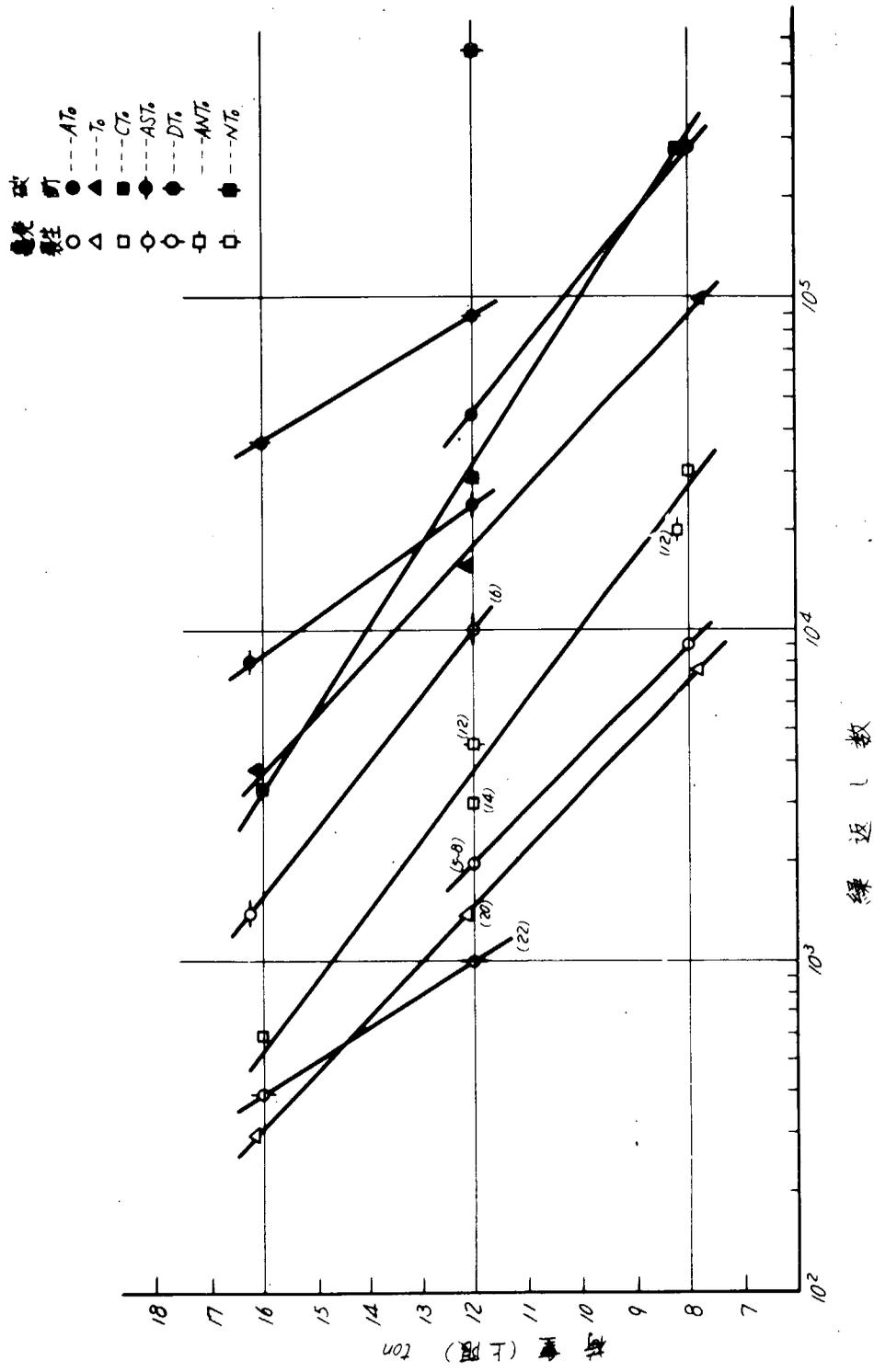


図 4.2.27 スタイフィナの亀裂発生と破断

### 4.3 日本海事協会技術研究所における小型模型疲労試験

#### 4.3.1 緒言

大型船の横部材におけるスロット周辺、とくに縦通材とステイフナとの固着部にはかなり多くのクラックが発生し、その防止対策についての研究が要望されている。本研究は、これらの防止対策のうち、小型模型により、スロット周辺の応力分布および疲労強度を試験したものである。

#### 4.3.2 試験模型

本研究で試験した模型の種類は6種類、模型の総数は15個である。そのうち、標準模型の概観図を図4.3.1に示した。図からわかるように模型の長さは1,100mm、幅は400mm、高さは525mmであつて、3条の縦通材が通つている。模型のウェブおよびステイフナ等に使用した鋼板は4.5mmのSS41であつて、その降伏点は約26Kg/mm<sup>2</sup>、引張り強さは約34Kg/mm<sup>2</sup>、伸びは約47%である。

図4.3.1に示した標準試験模型のほかに、カラー付(2種類)、バックブラケット付(2種類)、ブラケット型ステイフナ付の5種類の模型について試験を行なつた。各模型のスロットカットアウト部の形状を図4.3.3に示す。また、各模型のスロットカットアウト部とステイフナとの組合わせの内容を表4.3.1に示した。

表4.3.1 試験模型の内容

名 称	記 号	ステイフナ	カラー	バック ブラケット	個数	関 連 図 面
標 準 型	Nk	標準(切欠あり)			3	4.3.2(a)+4.3.3(a)
カ ラ ー 付	ANNk	標準(切欠なし)	フルカラー		4	4.3.2(b)+4.3.3(a)
ハーフカラー付	APNk	〃	ハーフカラー		2	4.3.2(c)+4.3.3(a)
ブラケット型 ステイフナ付	DNk	ブラケット型			2	4.3.2(a)+4.3.3(b)
バックブラケット (S型)	ASNk	標準(切欠なし)		S型	2	4.3.2(a)+4.3.3(c)
バックブラケット (M型)	AMNk	〃		M型	2	4.3.2(a)+4.3.3(d)

#### 4.3.3 試験の種類

静的荷重によるスロット周辺の応力分布測定(各種模型1個づつ)と変動荷重による疲労試験の2種の試験を行なつた。

荷重は図4.3.1に示すように、模型の両端から100mmのところまで支持し、特別な治具で、中央の縦通材の両端を下向に押した。このような荷重は、実船の場合にたとえると、船底水圧より倉内荷重が大きい場合に相当し、ステイフナと縦通材の固着部には引張りの応力が発生し、疲労に対してはもつとも弱い状態である。

#### 4.3.4 静的試験による応力測定

各模型の歪ゲージ貼付位置を図4.3.2および図4.3.3に示した。歪ゲージはゲージ長さ3mmのものを使用し、板面には両面に貼付してその平均値を採用した。応力の測定は中央のスロット周辺だけでは

なく、全部について行なつた。

実験結果の一例として、荷重5 tの場合の応力分布を図4.3.4～図4.3.9に示した。図4.3.4はいわゆる標準模型の応力分布、図4.3.5はフルカラー付模型の応力分布、図4.3.6はハーフカラー付模型の応力分布、図4.3.7はブラケット型ステイフナ付模型の応力分布、図4.3.8はS型バックブラケット付模型の応力分布、図4.3.9はM型バックブラケット付模型の応力分布を示し、これらの図において、(a)はスロットカットアウト部の応力分布を、(b)はステイフナおよびバックブラケットの応力分布を示す。

これらの図からわかるように、標準模型に対し、カラーやバックブラケットをつけた模型の応力は、カットアウト部やステイフナ固着部でかなり減少し、カラーやバックブラケットによる補強がかなり有効であることを示している。

#### 4.3.5 疲労試験

本実験に使用した疲労試験機はスイスアムスラー社製パルセーターであつて、実験時の繰返し速度は200 rpmである。荷重はすべて片振り荷重で、静的試験と同様、ステイフナと縦部材との固着部に引張り応力が生ずるような荷重である。ただし、この場合の最低荷重は1 tとした。

まず、最高荷重10 t、最低荷重1 tで疲労試験を行ない、前述の6種類の模型について、クラックの発生順序および疲労強度を調査した。表4.3.2はこれらの結果をまとめたものである。

表4.3.2において、静的試験でかなり高い応力が発生していた標準模型がバックブラケット付模型(S型)に比べて、疲労強度が高くなっているのは、模型製作上の工作の相違によるものではないかと思われる。<sup>※</sup>

また、模型のステイフナ部やブラケット部のクラックの状況を図4.3.10にカットアウト部のクラックの状況を図4.3.11に示した。次に、ステイフナおよびカットアウト部のクラック長さと繰返し数との関係をそれぞれ、図4.3.12および図4.3.13に示した。

これらの結果からわかるように、まず、ステイフナおよびバックブラケットにクラックが入り、これらが破断した後、ウェブのカットアウト部にクラックが発生し、ウェブが破断するという経過を示している(ただし、ブラケット型ステイフナの場合は、ブラケットが破断しない時点でウェブにクラックが発生している)。また、バックブラケット付模型の場合のステイフナのクラック発生点は他の模型の場合と反対方向(図4.3.10参照)であるが、このことは静的試験で、このクラック発生点付近にもつとも高い応力が発生しているので(図4.3.8(b)参照)、当然の結果かも知れないが、非常に興味ある現象である。

カラー付模型を除いて、ウェブのカットアウト部のクラック伝播速度はステイフナの伝播速度に比べてかなり早かつた。ただし、カラー付の模型においては、ウェブカットアウト部のクラックはかなりおそく、その上クラック長さが100 mmになると急にその速度が低下した。この原因については今後検討する必要がある。

#### 4.3.6 結言

今回6種類の模型について静的試験および疲労試験を行ない、スロット周辺の応力分布や疲労強度およびクラックの発生状況などを調査した。疲労試験に関しては模型の数が少なく、定量的な結論を導くことはできなかったが、大略、次のような定性的傾向をつかむことができた。

---

※ 標準模型と他の模型とは製作所が異なっている。

- 1) カラーやバックブラケットをつけることにより、スロット周辺の応力はかなり減少する。
- 2) ブラケット型模型を除き、ウェブのカットアウト部のクラックはステイフナ切断後に発生する。
- 3) ステイフナのクラック発生状況はバックブラケットの有無により異なる。すなわち、バックブラケットがない場合は、ウェブ側（遊縁の反対側）からクラックが発生し、バックブラケットのある場合は遊縁側からクラックが発生する。これは、バックブラケットの有無による応力分布の相異によるものと思われる。

なお、今後、数多くの試験模型について疲労試験を行ない、定量的な結論を得る必要がある。

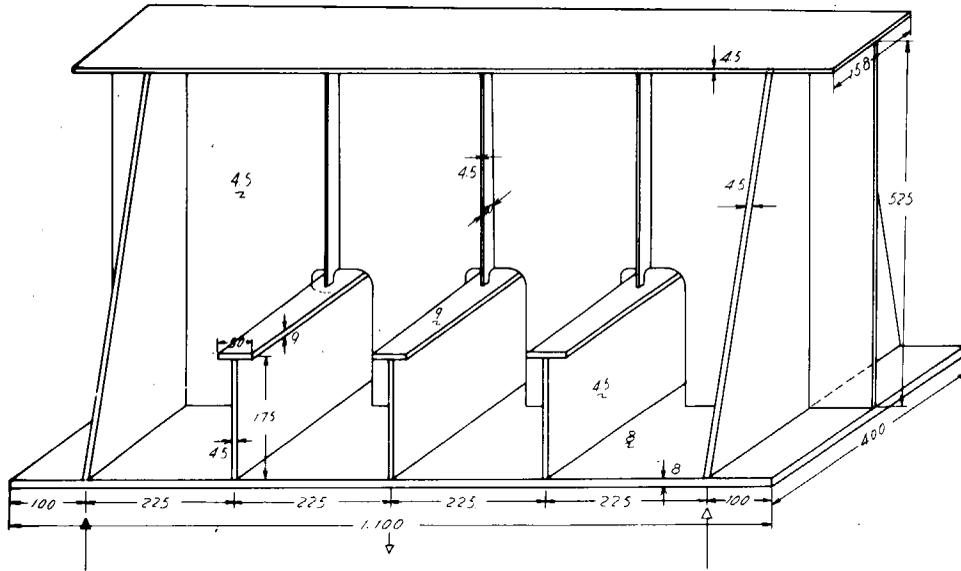


図 4.3.1 試験模型の概観図

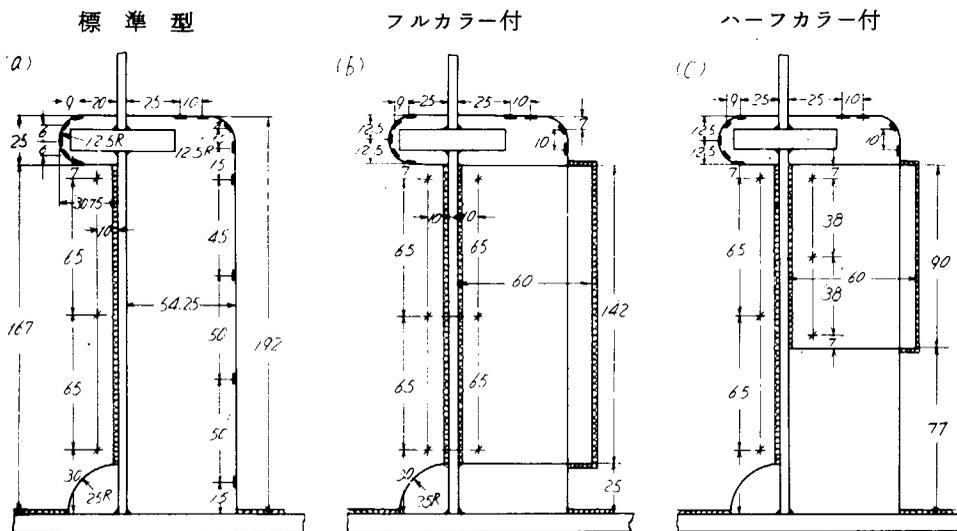


図 4.3.2 スロット・カットアウト部の形状および歪計貼付位置  
(■ 印一方向歪計 \*印3方向歪計)

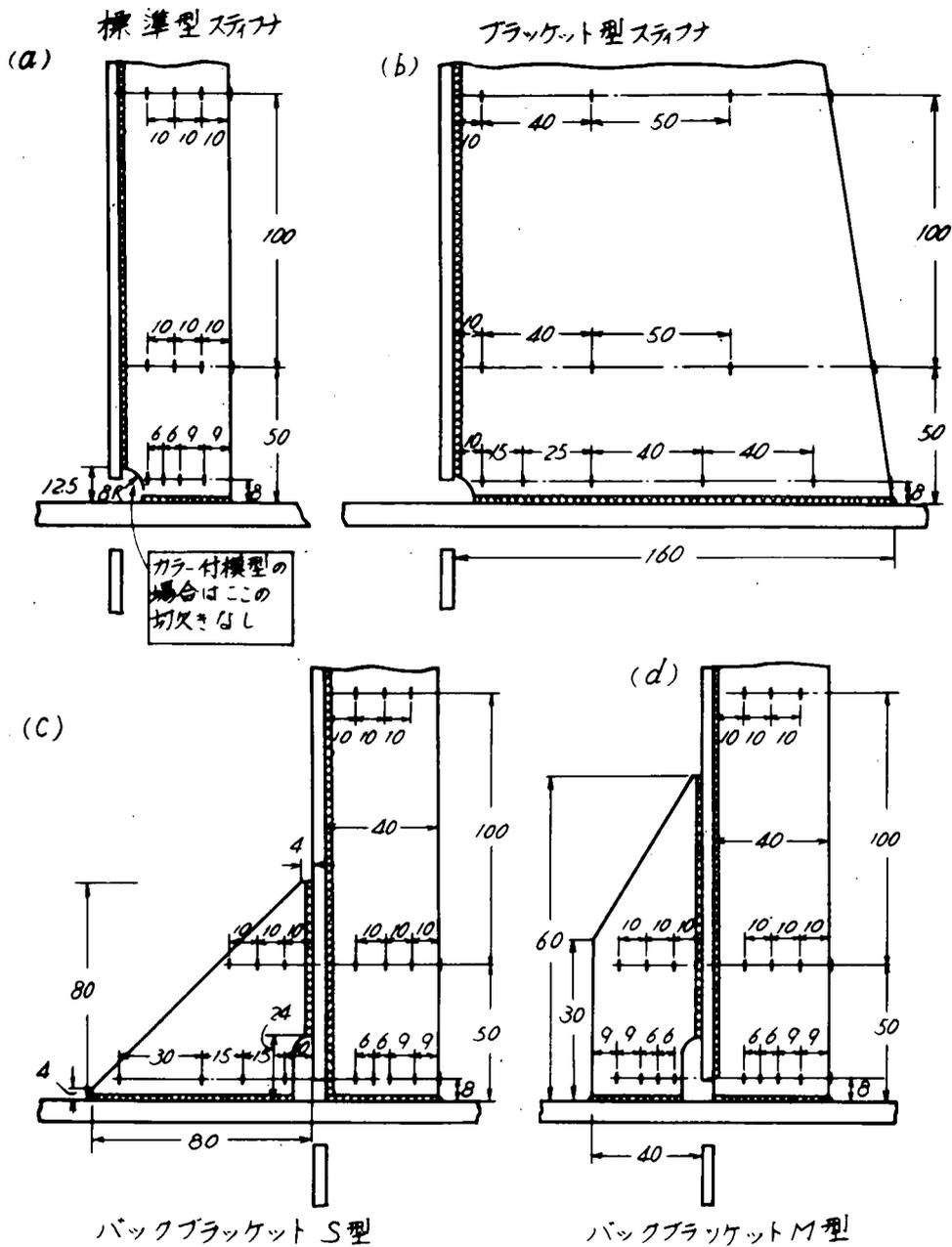


図 4.3.3 スライファおよびバックブラケットの形状および歪計貼付位置  
 ( ■ 印歪計貼付位置 )

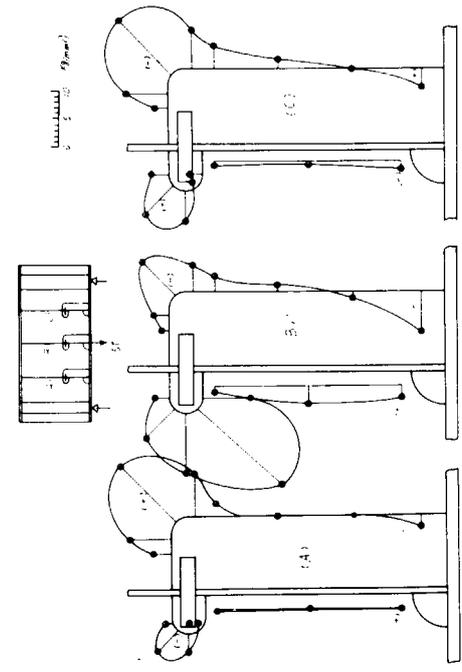


図 4.3.4(a) 標準模型(カットアウト部)の応力分布

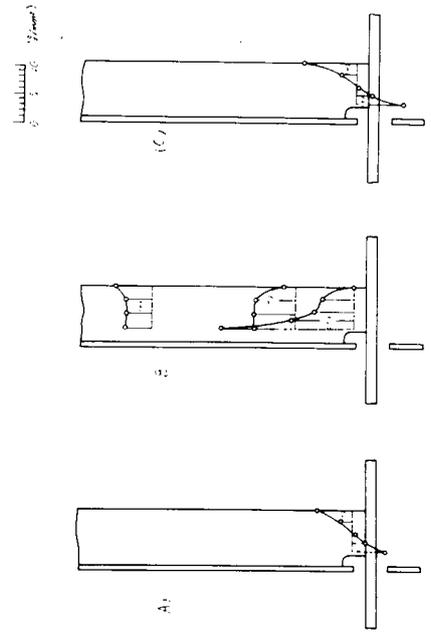


図 4.3.4(b) 標準模型(ステイフナ部)の応力分布

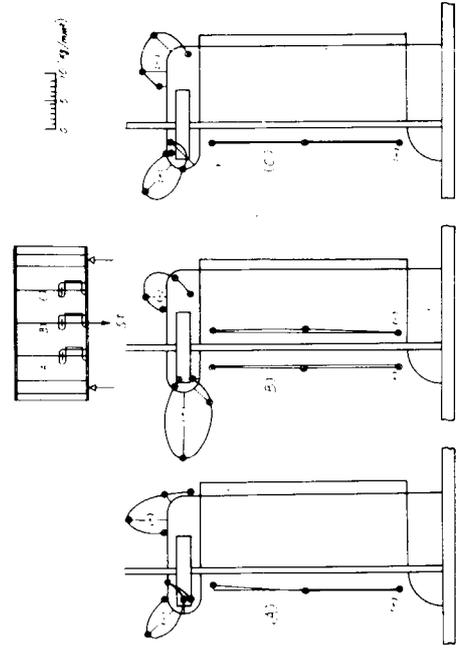


図 4.3.5(a) フルカラー付模型カットアウト部の応力分布

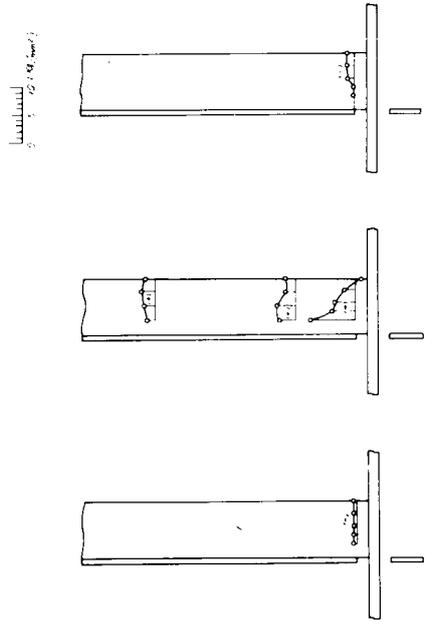


図 4.3.5(b) フルカラー付模型ステイフナ部の応力分布

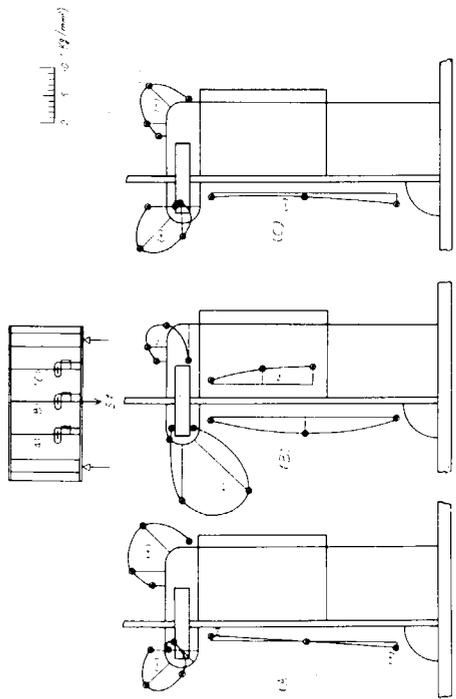


図 4.3.6 (a) ハーフカラー付模型スロットカッタウト部の応力分布

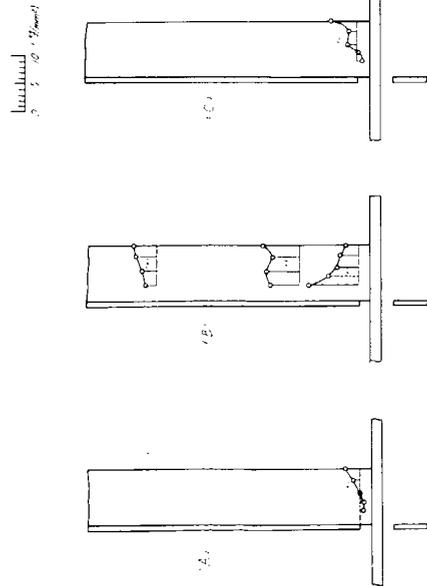


図 4.3.6 (b) ハーフカラー付模型スライフナ部の応力分布

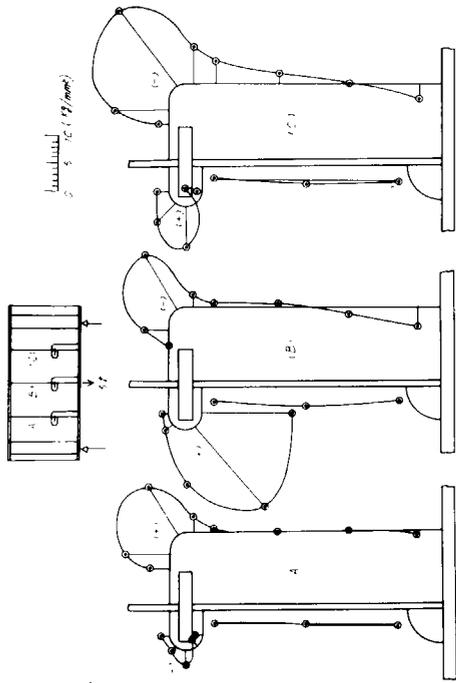


図 4.3.7 (a) ブラケット型スライフナ付模型のスロットカッタウト部の応力

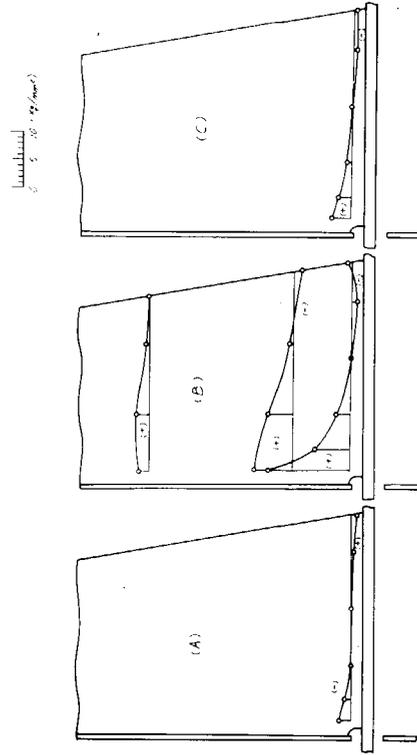


図 4.3.7 (b) ブラケット型スライフナ付模型のスライフナ部の応力分布

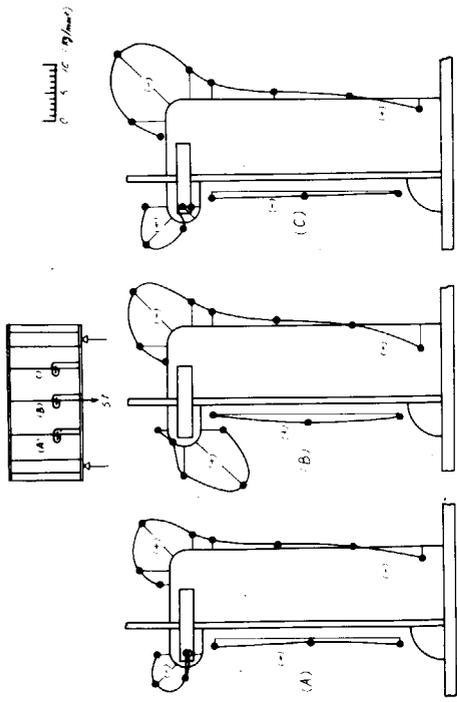


図 4.3.9(a) バックブラケット (M型) 付模型カッタウト部の  
応力分布

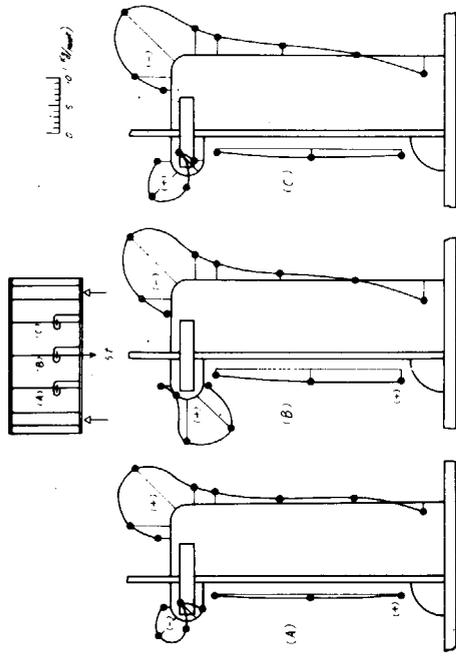


図 4.3.8(a) バックブラケット (S型) 付模型スロットカッタ  
アウト部の応力分布

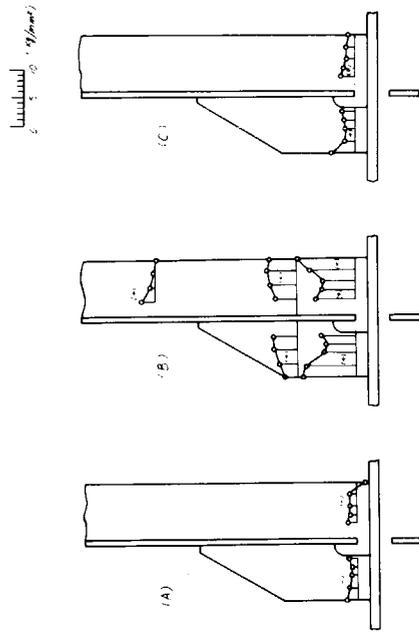


図 4.3.9(b) バックブラケット (M型) 付模型ステイフナ部の  
応力分布

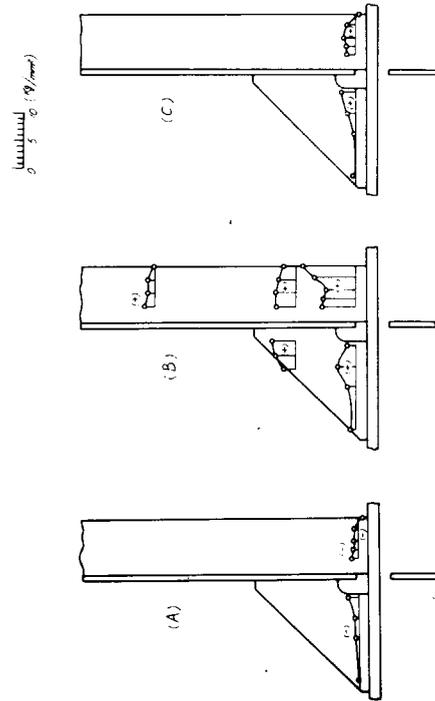


図 4.3.8(b) バックブラケット (S型) 付模型ステイフナ部の  
応力分布

表4.3.2 クラック発生状況

クラック	模型	標準型	カラー付	ハーフカラー付	ブラケット型	バックブラケット(S型)	バックブラケット(M型)
		Nk	ANNk	APNk	D.Nk	ASNk	AMNk
ステイフナ	クラック発見時の繰返数	8,000	4,500	7,000	7,900	5,000	10,000
	10mm進行時の繰返数	22,300	36,000	20,000	19,600	11,000	36,000
	破断時の繰返数	49,400	178,100	118,100	114,800	22,000	56,000
バックブラケット	クラック発見時の繰返数					31,000	58,400
	10mm進行時の繰返数					36,000	63,000
	破断時の繰返数					65,300	72,200
ウェブカットアウト	クラック発見時の繰返数	54,000	203,000	118,100	50,000	49,400	75,500
	10mm進行時の繰返数	64,200	261,000	155,000	70,000	55,000	80,000
	破断時の繰返数	70,500			114,800	67,350	89,800
その他のクラック			図 4.3.11の②.③.④にもクラックが発生している。	図 4.3.11の②.③.④にもクラックが発生している。	50,000でウェブと外板との溶接部にクラック		
備考			1050,000回で中止 クラック長さ約106mm	治具故障のため 200,000回で中止			

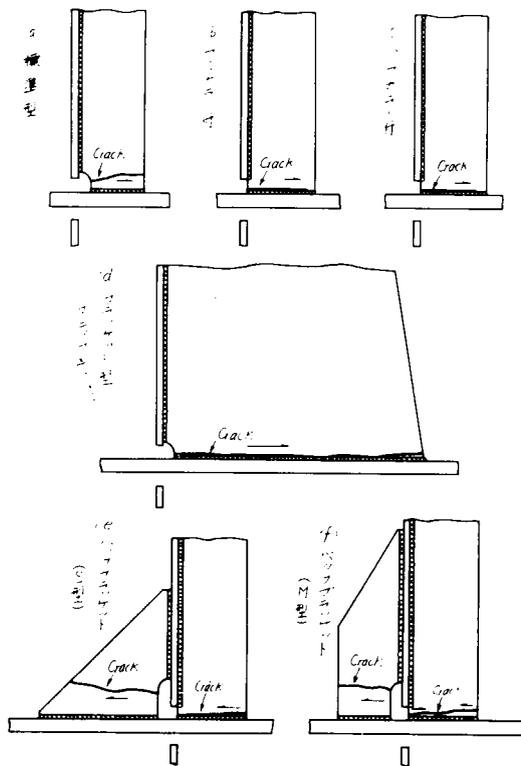


図 4.3.10 スティフナーおよびブラケット部のクラック

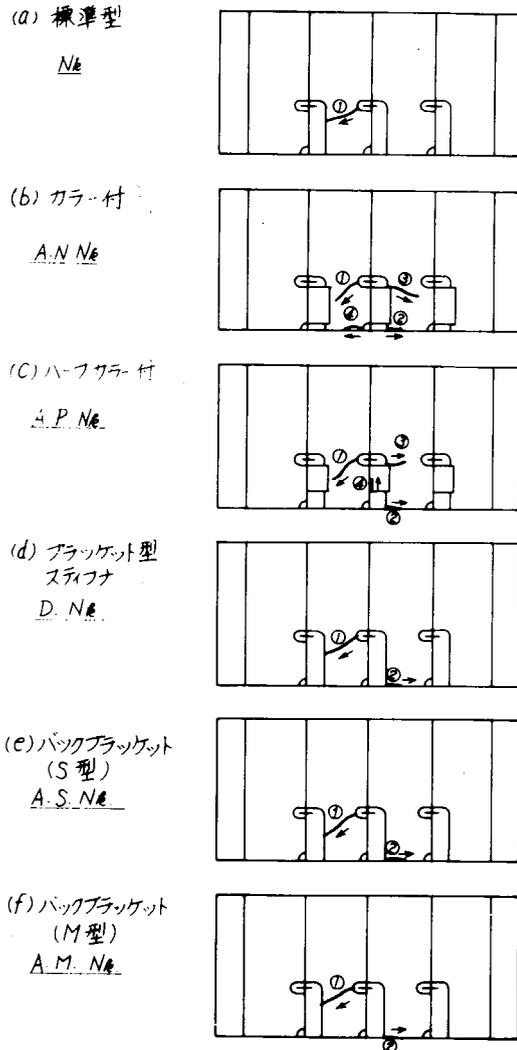


図 4.3.11 カットアウト部のクラック

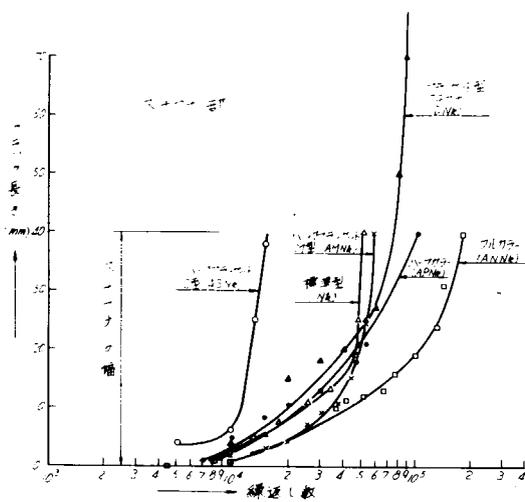


図 4.3.12 クラック長さと繰返し数との関係 (スティフナー)

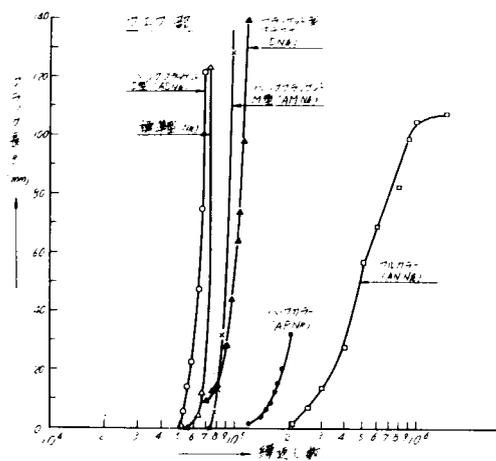


図 4.3.13 クラック長さと繰返し数との関係 (ウェブ)

## 4.4 川崎重工業(株)技術研究所における小型模型疲労試験

### 4.4.1 試験要領

#### (1) 供試体

図4.4.1に供試体の主要寸法を、図4.4.2にそのスロット周辺の詳細を示す。供試材は4.5 mm、8 mmおよび9 mm厚の軟鋼材で4.5 mm厚材の機械的性質は

$$\sigma_{uy} = 23.3 \sim 26.3 \text{ Kg/mm}^2, \sigma_B = 32.4 \sim 35.6 \text{ Kg/mm}^2, \text{伸び} = 43 \sim 49\%$$

であつた。各部材の組立ては全て無開先で、脚長4 mmの連続すみ肉溶接とし、部材端部は必ず回し溶接とした。

図4.4.2に示した3種類の模型は

- a) BRKa型 一般に使用されている代表的な形状
- b) CKKa型 longi. 上面付近の開口部を大きくして、web と longi. の face との間を長くし、stiff. に生じる平均ひずみを減少させ、かつ、開口部縁の応力集中が低くなるような形状
- c) BIKa型 longi. の face を invert して、longi. の face 付近の開口を小さくし、web の有効な剪断剛性を増加させ、stiff. にかかる力を減少させようとしたもの。

ということを意図した。

#### (2) 使用試験機

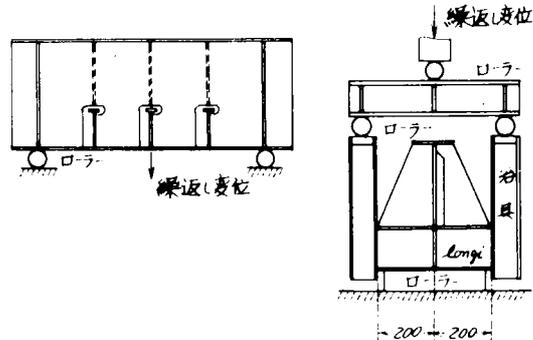
レバー式定変位型疲労試験機を30%の繰返し速度で用いた。

#### (3) 試験方法

右図に示すように模型の両端をローラで支持し、中央の longi. beam の両端に治具を介して繰返し変位を与えた。

試験中は stiff. に生じるひずみと荷重変化を計測した。

亀裂の検出および進展長さを求めるために浸透探傷液を用いた。



### 4.4.2 試験結果および考察

#### (1) 破壊の様相

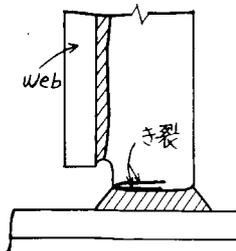
今回の試験にて見出された亀裂および破断箇所は、stiff. とスロット縁である。その破壊の様相を以下に示す。なお、最初に亀裂発生を生じた箇所は stiff. で、stiff. の破断とスロット縁の亀裂の発生の後先は模型により異なり、図4.4.3にそれを示す。

#### (a) stiff. について

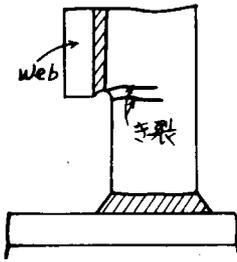
BRKa型

BIKa型

亀裂の発生は、longi. の face と stiff. の溶接接合部の止端で、web 側であり、伝播は stiff. の長さ方向に対してほぼ直角方向である。そしてその径路は必ずしも溶接の止端ではなく、母材を通るものが多かつた。



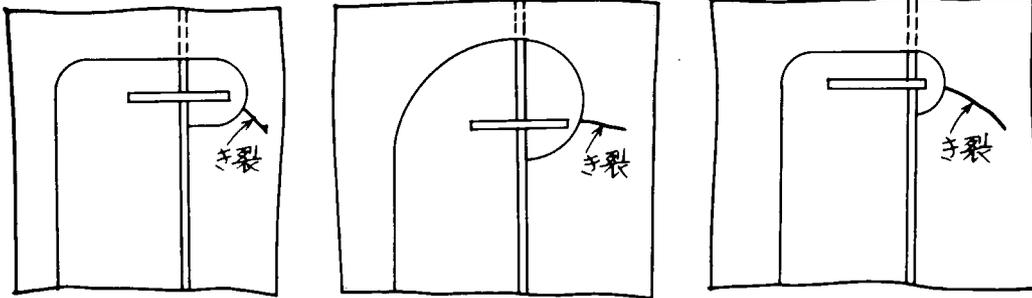
CKKa型



亀裂の発生は、webとstiff.の接合部のscallopのある個所で、その溶接止端または、scallopの形状粗悪な個所であり、伝播はstiff.の長さ方向にはほぼ直角方向である。

(b) スロット縁周辺

いずれの模型においてもwebとlongi.の接合側のアールの中央よりやや底板よりの位置に亀裂を生じている。(下図参照)



BRKa型

CKKa型

BIKa型

試験はこの部の亀裂が10~20mm(BRKa, CKKa型)および10~30mm(BIKa型)に進展するまで続行したが、その間、他の個所には亀裂を生じなかった。

(2) 試験荷重と寿命の関係

表4.4.1に試験結果を、さらにこれを図示したものが図4.4.3である。ただし、模型BRKa-2と3は初めからstiff.の溶接止端に割れを生じていたように見受けられ同図ではこの系列を示していない。ここに示す荷重は、50回の繰返し後の値をとっている。図によるとBIKa型のstiff.の亀裂発生までの寿命は、CKKa型より短い、stiff.の破断時の寿命は両者共ほぼ等しい。stiff.の破断とスロット縁の亀裂発生までの寿命は、BIKa型の場合、わずかであるが、stiff.の破断前に亀裂を生じており、CKKa型の場合、stiff.の破断後に亀裂を生じている。しかし、この寿命域内ではいずれが先に生じようとも、寿命に大差はない。BRKa型の場合、初めにあつた割れの長さの短いBRKa-3(図4.4.11参照)で寿命を推定するとstiff.の亀裂発生までの寿命は、BRKa-1を参考にして、他の模型の場合より大きくならないようであり、形状的にBIKa型に近いので、BIKa型に等しいとしてみると、stiff.の破断およびスロット縁の亀裂発生までの寿命は、他の模型のそれより若干短いと推測される。

(3) stiff.のひずみ分布とその履歴

本試験で用いたような小型模型の場合、stiff.の亀裂発生個所の近傍の形状は、実船とかなり異なつたものしか作りえない。したがつて亀裂発生については、さらに大きな模型かあるいはこの部分を取り出した局部模型によつて検討する必要があるが、前者の場合は、種々の点で実験が困難であるため、後者の実験を今後行なうに必要な情報としてstiff.のひずみ分布およびその履歴を測定した結果の一例を、図4.4.4~図4.4.10に記した。

(4) 亀裂の伝播について

stiff.に生じた疲労亀裂の長さの測定値と繰返し数との関係を図4.4.11~図4.4.13に示す。

本試験の場合、これらの関係は真数目盛ではほぼ直線となり、しかも2段階に分けられる。この最初の関係をStage-1、その後の関係をStage-2と称することにする。このStageが変化することについては、その原因ははつきりしないので、亀裂伝播時のStiffに作用する荷重や、ひずみ分布を検討する必要がある。特にCKKa型では、この変化点が他の場合に較べて、亀裂長さの短い時期に現われている。

これらの図から各Stageについて亀裂伝播速度を求め、これを図4.4.14～図4.4.15に記した。これによるとStage-1の場合BIKa型が最も速度が遅く、次いでCKKa型、BRKa型の順になる。Stage-2の場合もほぼ同様な傾向を示している。

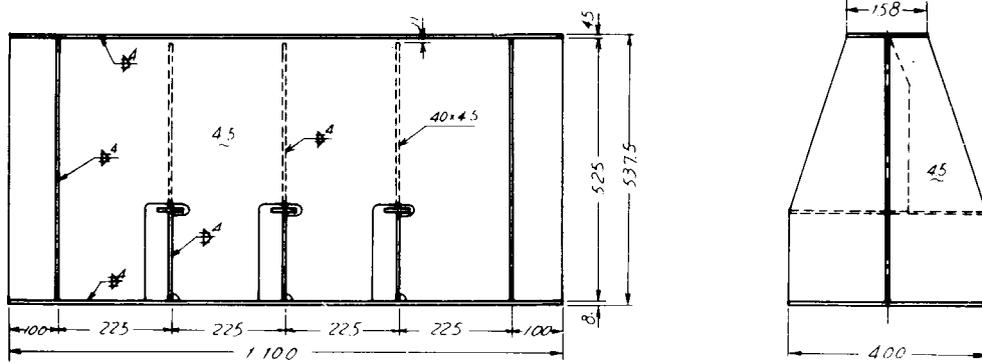
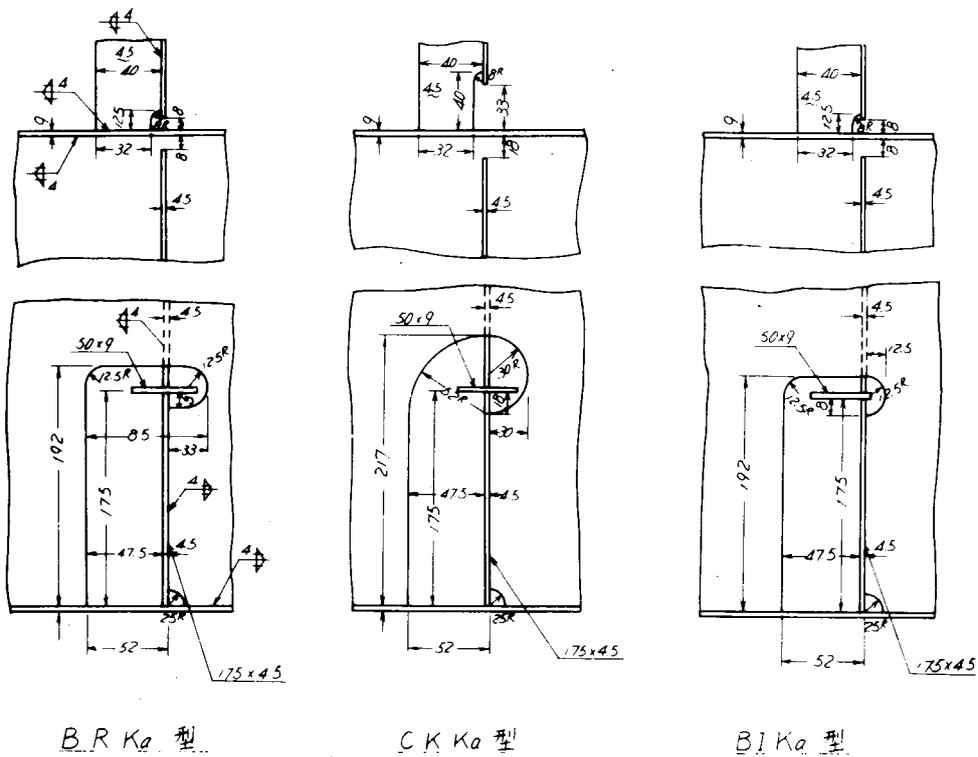


図 4.4.1 供試体主要寸法



B.R. Ka 型

C.K. Ka 型

B.I. Ka 型

図 4.4.2 スロット周辺形状

表4.4.1 疲 勞 試 験 結 果

供試体	最小荷重	最大荷重	荷重振幅	ステイフナ 亀裂発生	ステイフナ 破 断	スロット部 亀裂発生
Ka 1	2.88 <sup>ton</sup>	23.00 <sup>ton</sup>	20.12 <sup>ton</sup>		450	1,160
" 2	2.68	12.74	10.06		20,780	(19,600)
" 3	2.88	9.67	6.79		32,240	62,000
IKa 1	3.09	10.49	7.40	9,440	183,750	130,000
" 2	3.09	13.75	10.66	3,840	23,670	(24,000)
" 3	2.88	18.29	15.41	390	12,300	9,470
" 4	3.29	10.16	6.87	630	82,800	180,000
" 5	3.09	18.08	14.99	550	15,630	13,200
" 6	3.09	13.14	10.05	17,200	75,500	70,000
CKKa 1	3.09	13.14	10.05	9,800	未測定	72,000
" 2	3.09	17.66	14.57	5,100	9,430	(11,000)
" 3	3.09	13.14	10.05	15,000	26,880	(67,000)
" 4	3.09	10.16	7.07	(126,000)	181,000	
" 5	3.09	17.87	14.79	(3,300)	(6,000)	6,630
" 6	3.09	10.08	6.99	34,300	80,500	

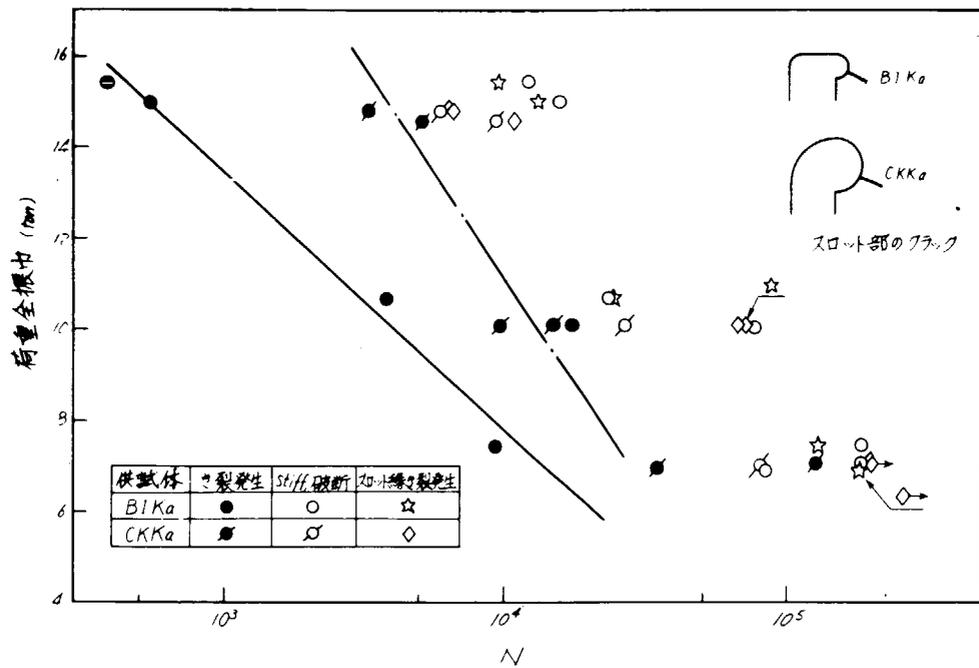


図 4.4.3 寿命と荷重の関係

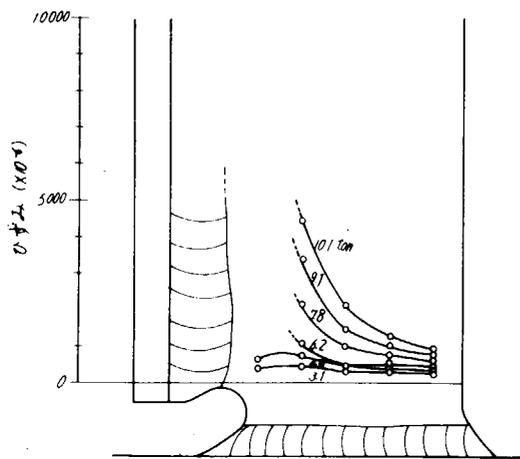


図 4.4.4 Stiff. のひずみ分布 (BRKa-3)

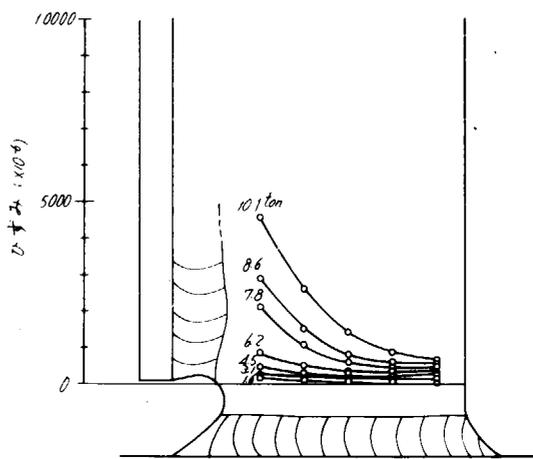


図 4.4.5 Stiff. のひずみ分布 (BIKa-1)

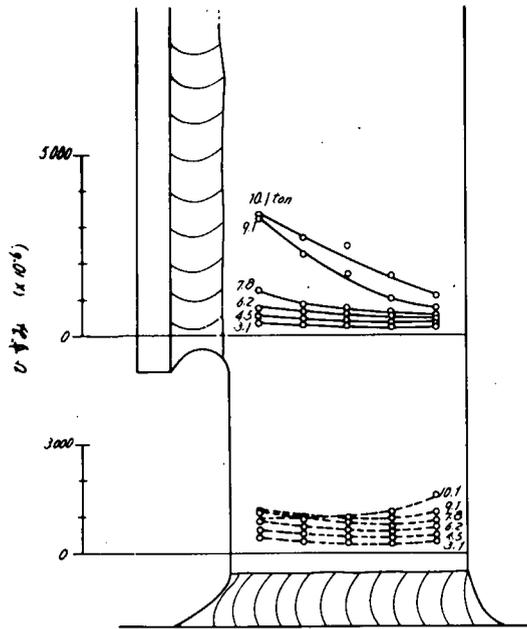


図 4.4.6 Stiff. のひずみ分布 (CKKa-6)

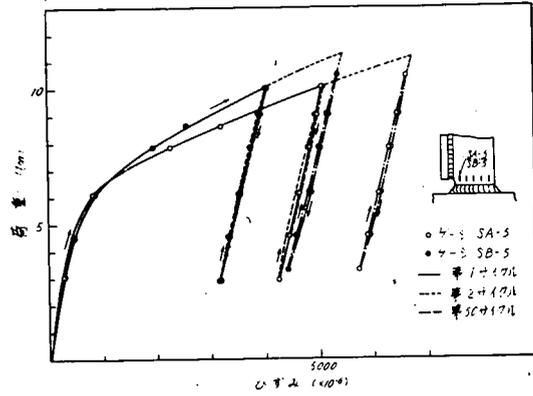


図 4.4.7 Stiff. の荷重-ひずみ履歴曲線 (BIKa-1)

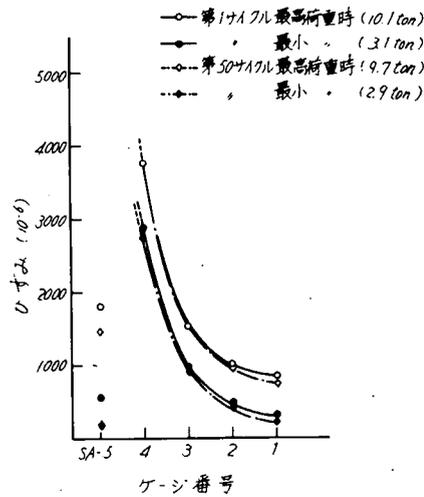
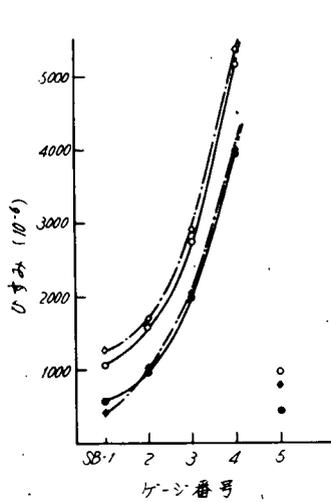


図 4.4.8 Stiff. のひずみ履歴と分布 (BRKa-3)

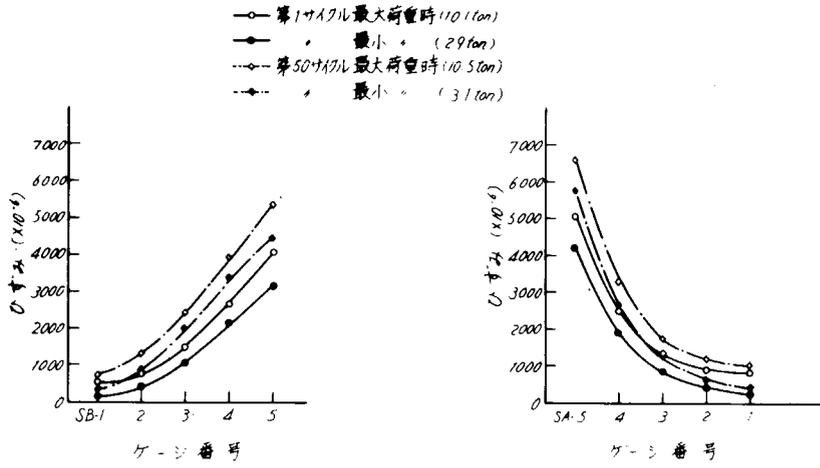


図 4.4.9 Stiff. のひずみ履歴と分布 (BIKa-1)

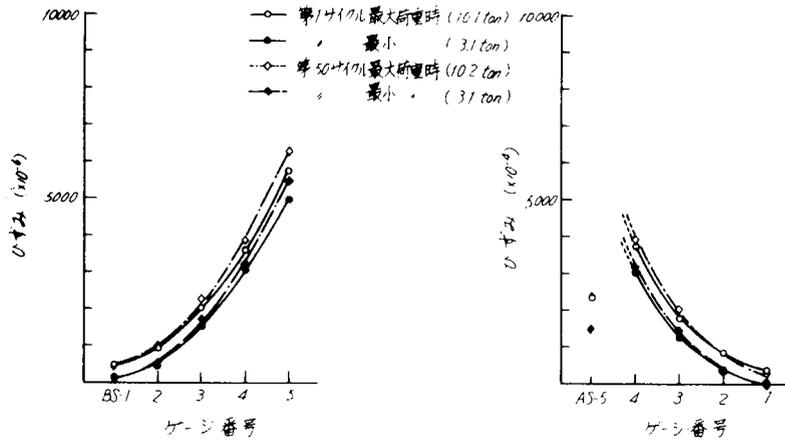


図 4.4.10 Stiff. のひずみ履歴と分布 (CKKa-4)

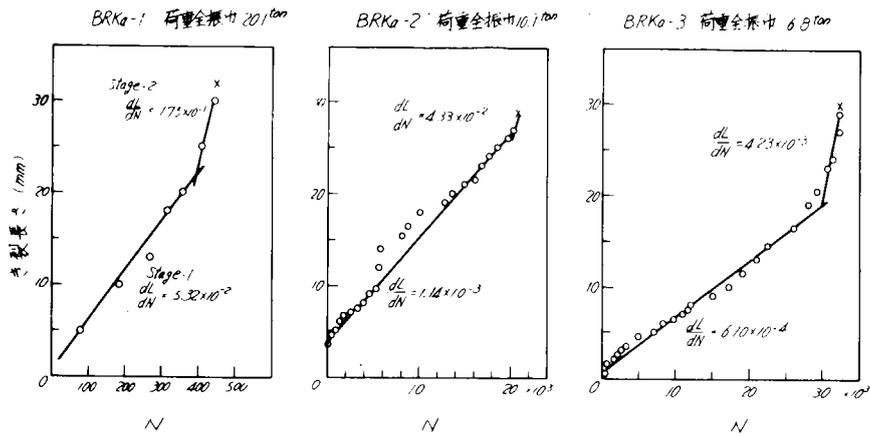


图 4.4.1 1 亀裂進展曲線 (BRKa型)

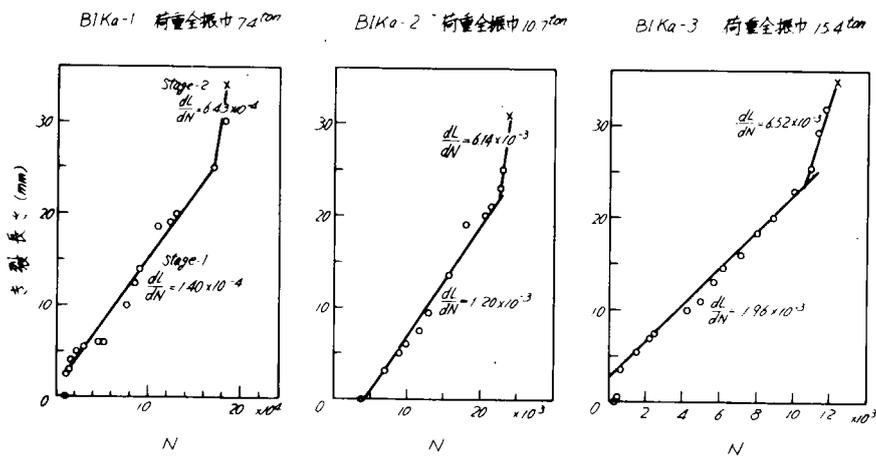


图 4.4.1 2 亀裂進展曲線 (BIKa型)

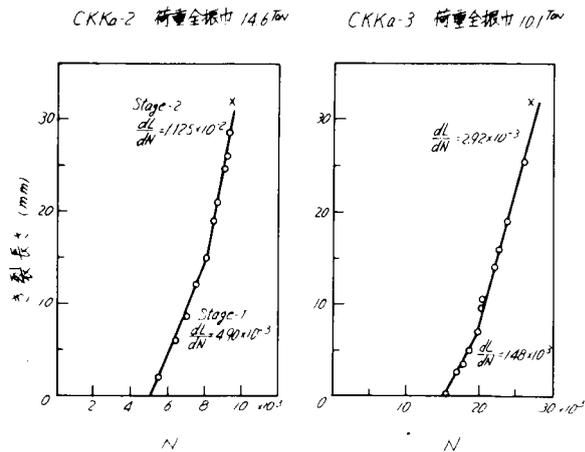


图 4.4.1 3 亀裂進展曲線 (CKKa型)

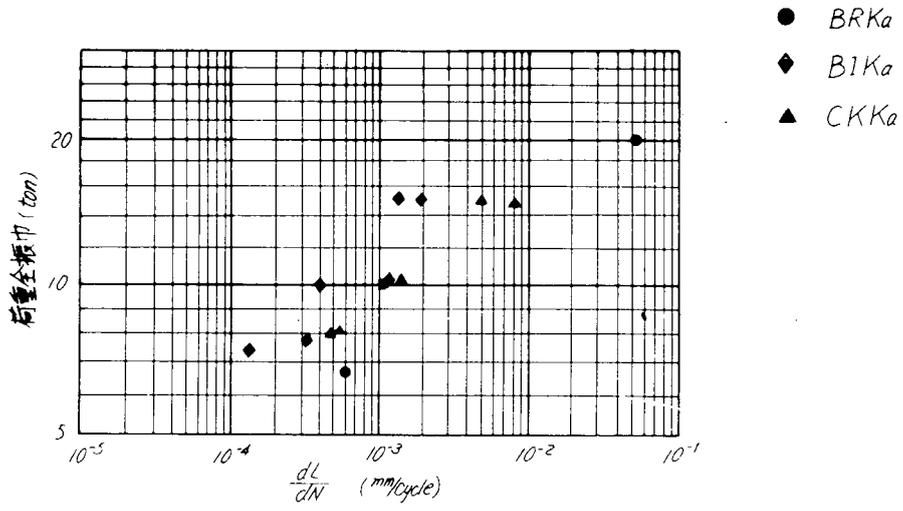


图 4.4.14 龟裂伝播速度 (stage-1)

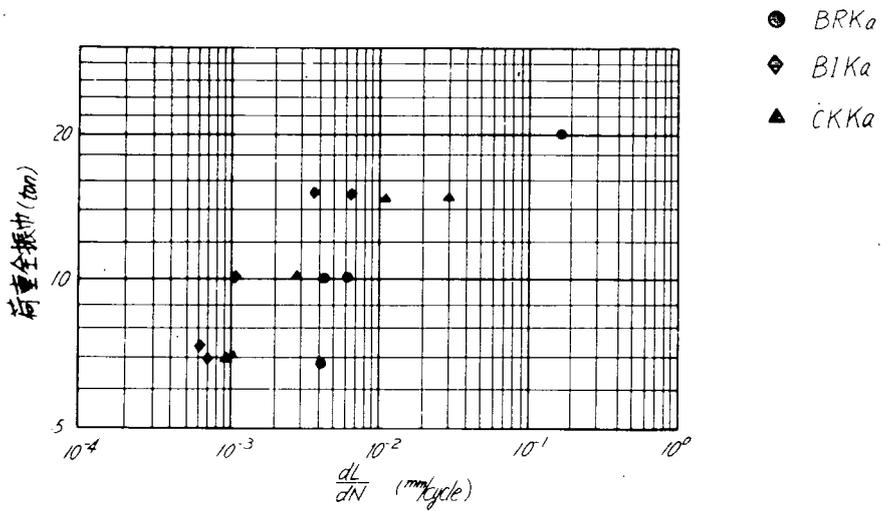


图 4.4.15 龟裂伝播速度 (stage-2)

## 4.5 三菱重工業(株)長崎研究所におけるN型模型疲労試験

一連の小型模型疲労試験のうち、当所で担当したMh一系およびMMh一系の模型に関する静荷重試験および低サイクル疲労試験結果について報告する。

供試体は図4.5.1および図4.5.2のごときのものであり、MMh系はWEB STIFFENERの反対側にBACK B<sup>KT</sup>を設けたものである。当所にて製作分担した模型の機械的性質を表4.5.1に示している。JIS規定値に比べ、引張り強さが低目になっている。溶接棒はイルミナイト系を使用し、溶接脚長は4mmとした。

### 4.5.1 静荷重試験結果

図4.5.3～図4.5.5に歪ゲージの貼付位置を示している。ゲージは板縁面を除きすべて表・裏面に貼付し、以後のデータはすべて板曲げ成分を除去した表・裏面の平均値で表わしている。

図4.5.6は荷重方法を示したもので、模型両端をローラで支持し、中央のLong<sup>1</sup>端部に固定した負荷棒を介して、STIFF.付根に引張荷重が加わるようにした。写真4.5.1は静荷重試験状況を表わしている。なお、Long<sup>1</sup> Stiffenerに傾きを生じると、WEB STIFF.の応力分布に影響すると考えられたので、図4.5.7のごとく、A、B点の変位を測定し、その影響を調べた。荷重1.2TONでA、B点の変位差が約 $\frac{4}{100}$ mmのとき、応力分布への影響はかなり小さいことがわかったので、疲労試験も含めて以後の試験はすべて、変位差を約 $\frac{5}{100}$ mm程度以下におさえるように調整して実施した。

図4.5.8～図4.5.12にMh一系模型の応力測定結果を示す。それぞれ図4.5.8はSTIFF.付根の弾性応力分布を、図4.5.9は歪分布を、図4.5.10は荷重と歪の関係を表わしている。なお、歪が1%以上になるとゲージが断線して計測できなかつた。図4.5.12はWEBの主応力およびせん断応力分布を表わしたものであり、荷重1.0TONではSTIFF.付根の全断面が塑性域に入っているので、降伏応力を $25\text{Kg/mm}^2$ とすれば、荷重分担率はおよそWEB STIFF.が36%、WEB PLATE50%の割合となっている。

図4.5.13～図4.5.18に、MMh系模型の応力測定結果を示す。それぞれ、図4.5.13はSTIFF.およびBACK B<sup>KT</sup>の弾性応力分布、図4.5.14は歪分布を、図4.5.15および図4.5.16は荷重と歪の関係を、また、図4.5.18はWEBの主応力およびせん断応力分布を表わしている。低荷重域ではWEB STIFF.、BACK B<sup>KT</sup>ともにはほぼ等しい荷重を分担しているが、荷重が増加するとWEB STIFF.の歪が急激に増加する傾向が見られる。BACK B<sup>KT</sup>の切欠R部には当然応力集中があるものと考えられるが、今回は計測していないので明らかでない。

また、荷重1.0TONのときの荷重分担率を求めてみると、WEB STIFF.およびBACK B<sup>KT</sup>で、約67%、WEB PLATEが29%となっており、BACK B<sup>KT</sup>がSLOTの歪集中低下に有効であることがわかる。しかし、WEB STIFF.に対しては、低荷重域では有効であるが塑性域がかなり進行した高荷重域では、BACK B<sup>KT</sup>の効果が低下するものと思われる。

### 4.5.2 低サイクル疲労試験結果

静荷重試験に引続き、低サイクル疲労試験を実施した。荷重は片振、定荷重とし、試験機の都合から $P_{\max}/P_{\min}=1.0$ となるように荷重の上・下限を決定した。亀裂の発生・進展は表面を180番エメリペーパーで研磨し、ルーペにより観察した。

表4.5.2にMh一系模型、表4.5.3にMMh系模型の疲労試験結果をまとめている。なお、試験はWEB STIFF.およびWEB PLATEが破断するか、あるいはWEBに座屈を生じて試験が不可能になるまで繰返し負荷した。

Mh一系模型では、WEB STIFF. 付根①にまず、亀裂が発生し、次にSTIFFの破断後スロット下部溶接部③に亀裂を生じる。その直後スロット②にも亀裂を生じ進展・破断という経過をたどっている。なお、②に比べ③の亀裂進展は遅いものである。Mh-2模型( $P_{max} = 20t$ )では荷重が大きいため②の亀裂は途中で座屈を生じ破断までには至らなかった。

図4.5.19は亀裂の発生・破断繰返数と最高荷重 $P_{max}$ の関係を表わしており、図4.5.20~4.5.22はそれぞれ亀裂①、②、③の亀裂長さとの繰返し数の関係を表わしている。

MMh一系模型では、WEB STIFF. ①、BACK B<sup>KT</sup> ④、スロット下部溶接③の順序で亀裂が発生し、①、④が破断した後にスロット②に亀裂が発生するという経過をたどっている。WEB STIFF.およびBACK B<sup>KT</sup>では、内側の応力集中部から発生する亀裂④と、外側の溶接部に生じる亀裂③の2種類がある。

低荷重では、どちらか一方の亀裂が進展し、他方は停留する傾向が見られるようである。

図4.5.23は亀裂の発生・破断繰返数と $P_{max}$ の関係を表わしており、図4.5.24~4.5.27は亀裂長さとの繰返し数の関係を表わしている。写真4.5.2~4.5.8に試験終了後の亀裂の状況を示している。

以上のMh一系模型、MMh一系模型を比較してみると、静荷重試験結果からは、BACK B<sup>KT</sup>はSTIFF.付根の応力(歪)に対して高荷重下ではそれほど効果はないが、SLOT周りの応力に対しては、かなり有効であると考えられた。しかし、疲労試験結果によれば、スロット②の亀裂は、WEB STIFF.およびBACK B<sup>KT</sup>が破断するまでは発生せず、また、発生後の亀裂②の進展速度はMh、MMhともに等しいので、結局、BACK B<sup>KT</sup>のスロット②の亀裂に及ぼす効果としては、STIFF.およびBACK B<sup>KT</sup>の破断繰返数の増加分だけしか期待できなくなる。例えば、表4.5.2および表4.5.3 Mh一系、MMh一系を比較すると、 $P_{max} = 15TON$ では、WEB STIFF.、BACK B<sup>KT</sup>の破断寿命の増加は $\Delta N_1 = 1.14 \times 10^4$ であり、スロット②の破断寿命の増加は、 $\Delta N_2 = 1.096 \times 10^4$ であり、スロット②の破断寿命の増加は、 $\Delta N$  場合は、 $\Delta N_1 = 2.21 \times 10^3$ 、 $\Delta N_2 = 2.24 \times 10^3$ である。

なお、今後引続き46年度も実験が行われる計画であり、実験点数も少ないので、ここでは結果を述べるに止める。

表4.5.1 供試材(SS41)の機械的性質

試験片 名称	試験片寸法	降伏点 (Kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (Kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)
	板厚×巾×標点距離 (mm)			
ASTO ASNK	4.53×25.01×50	25.5	33.4	47.8
DTO DNK	4.53×25.12× "	25.7	34.3	48.4
ANTO ANNK	4.53×25.00× "	26.1	34.0	42.4
Mh	4.53×24.90× "	26.4	34.4	45.2
MMh	4.52×25.00× "	24.4	33.8	46.0

5号試験片による。

表 4. 5. 2 低サイクル疲労試験結果一覧表 ( Mh 型 )

試験片 符号	繰返荷重		① ステイフナ		② スロット		③ スロット下部溶接		備 考
	上 限 ( ton )	下 限 ( ton )	亀裂発生 ( Cycle )	破 断 ( Cycle )	亀裂発生 ( Cycle )	破 断 ( Cycle )	亀裂発生 ( Cycle )	亀裂長さ ( mm )	
Mh-1	10	1	3,300	※ ( 25,000 )	28,302	39,537	27,902	44	※印の破断 Cycle は図 4.5.2.0 より推定した
△ Mh-5	12.5	1.25	308	3,605	7,159	11,768	5,342	47.1	①の亀裂発生位置にきづあり
Mh-3	15	1.5	980	4,700	4,900	6,963	4,700	105	
△ Mh-7	15	1.5	290	3,808	5,550	7,535	5,650	59	①の亀裂発生位置にきづあり
△ Mh-4	17.5	1.75	135	2,712	2,700	3,496	740	破 断	①の亀裂発生位置にアンダーカ ットとラミネーションあり
Mh-2	20	2	350	884	1,360	※ 1,680	※ ( 1,000 )	69	※印の発生 Cycle は図 4.5.2.2 より推定した。 ※印の Cycle で W E B が座屈
△ Mh-6	20	2	溶接割れ	499	1,150	※ 2,065	568	50	Stiffener 溶接部に溶接割 れがあつた ※印の Cycle で W E B が座屈

注) 1. 試験片符号 Mh-6,7 は  
川重製作の供試体であ  
る。

2. ③の亀裂長さは②の破  
断(座屈)時の長さであ  
る。

3. 試験片符号の△印の Mh-  
4, 5, 6, 7 が今回の報告  
である。

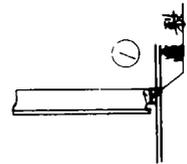
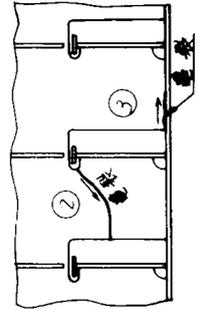
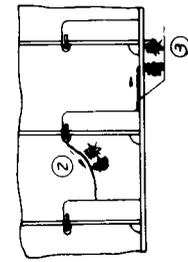


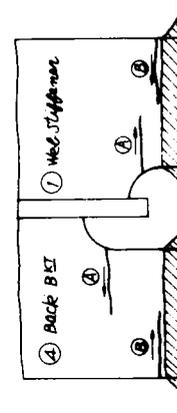
表 4.5.3 低サイクル疲労試験結果一覧表 (MMh 型)

試験片 符 号	繰返荷重 (ton)		① Web Stiffener		④ Back B <sup>KT</sup>		② スロット		③ スロット下部溶接		備 考
	上 限 (ton)	下 限 (ton)	亀裂発生 (Cycle)	破 断 (Cycle)	亀裂発生 (Cycle)	破 断 (Cycle)	亀裂発生 (Cycle)	破 断 (Cycle)	亀裂発生 (Cycle)	亀裂長さ (mm)	
△ MMh-6	12.5	1.25	④ 16215 ⑤ 19200	* 25000	④ - ⑤ 3680	- 16275	23880	27814	17190	85.7	*印の Cycle で亀裂 A・B がつかがる。
MMh-2	15	1.5	④ 4130 ⑤ 1930	進展せず *(7600)	④ 8750 ⑤ 3830	16111 進展せず	16334	17923	* (5500)	128	*印の破断 Cycle は図 4.5.2.4 図 4.5.2.7 より推定した。
△ MMh-5	17.5	1.75	④ 3180 ⑤ 2580	* 9000	④ 3800 ⑤ -	8800	9400	10120	6200	125.8	*印の Cycle で亀裂 A・B がつかがる。
MMh-1	20	2	④ 600 ⑤ 700	2000	④ 2400 ⑤ 1900	3097	3520	※ 3920	2400	132	※印の Cycle で WEB が座 屈
MMh-4	22.5	2.25	④ 1050 ⑤ 480	* 1373	④ 880 ⑤ 600	1647	2050	※ 2200	790	破 断	*印の Cycle で亀裂 A・B がつかがる。 ※印の Cycle で WEB が座屈
MMh-3	25	2.5	④ 270 ⑤ 270	* 460	④ 1000 ⑤ 1200	1516	1600	※ 1666	600	破 断	*印の Cycle で亀裂 A・B がつかがる。 ※印の Cycle で WEB が座屈



注) ③の亀裂長さは②の破断(座屈)時の長さである。

試験片符号の△印のMMh-5,6が今回の報告である。



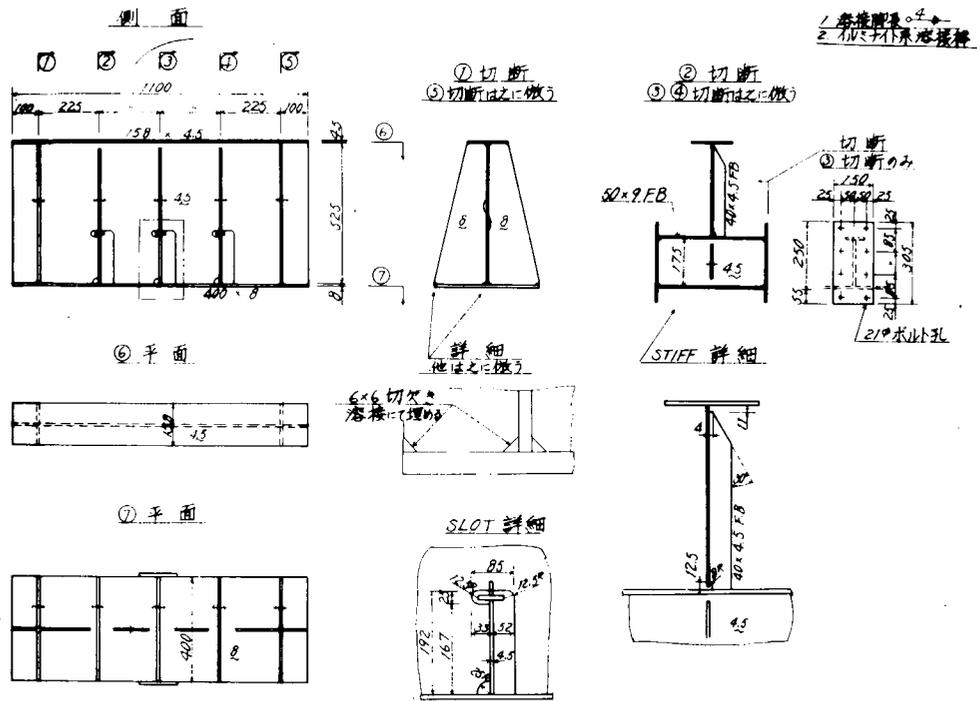


図 4.5.1 Mh 模型の形状, 寸法

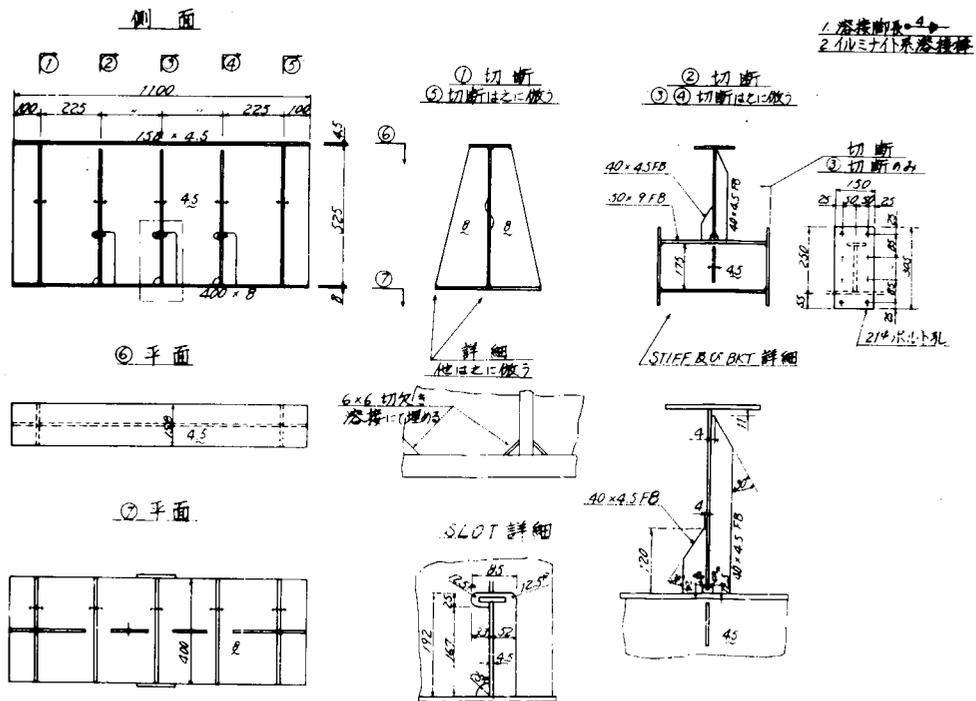


図 4.5.2 MMh 模型の形状, 寸法

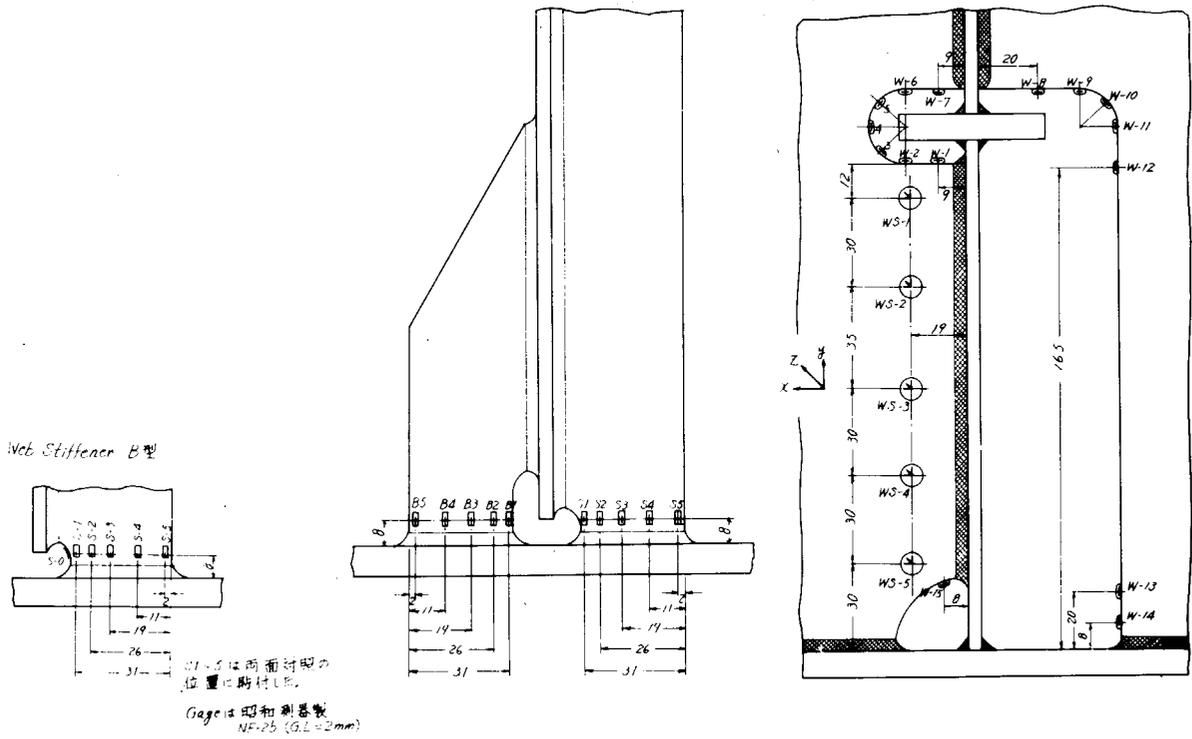


図4.5.3 Web Stiffener付根の Strain Gage貼付位置 (Model : Mh)

図4.5.4 Web Stiffener, Back, BKT付根のStrain Gage貼付位置 (Model : MMh)

図4.5.5. Web Plateおよびスロット 周りのStain Gage貼付位置

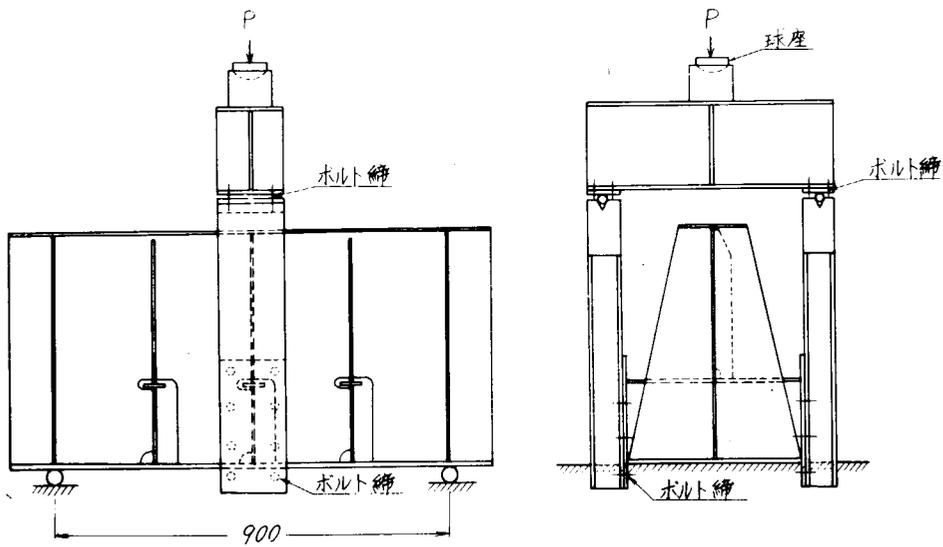


図 4.5.6 負荷装置

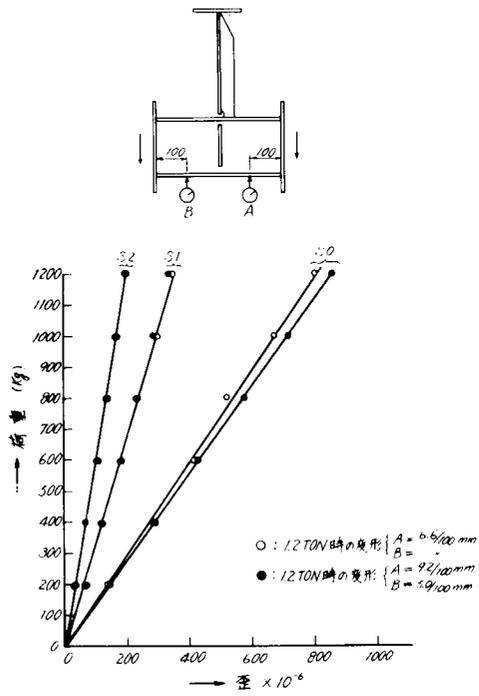


図 4.5.7 歪への変位差の影響

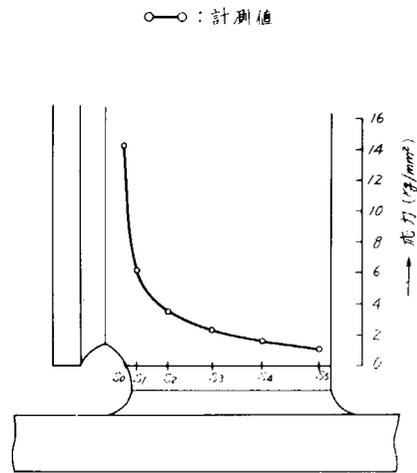


図4.5.8 Web Stiffener 付根の負荷 1 Ton 時の応力分布 (Mh-1 Model)

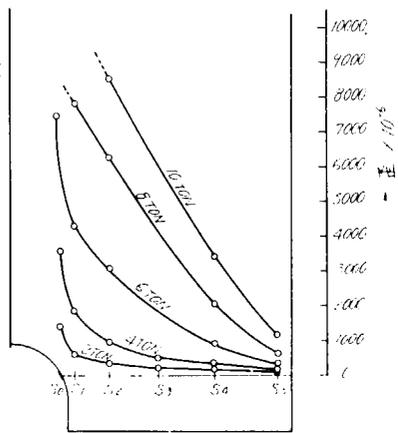


図 4.5.9 Web Stiffener 付根の歪分布 (Mh-1 Model)

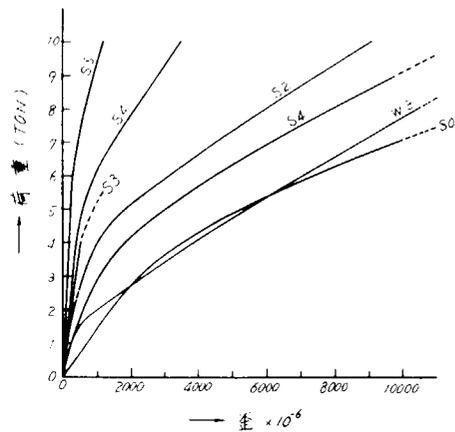


図 4.5.10 Mh-1 Model の荷重と歪の関係

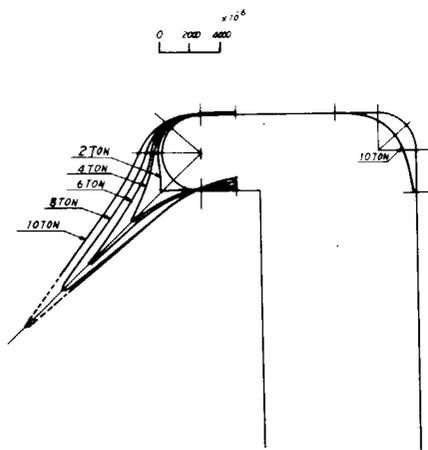


図 4.5.11 スロット周りの歪分布  
(Mh-1 Model)

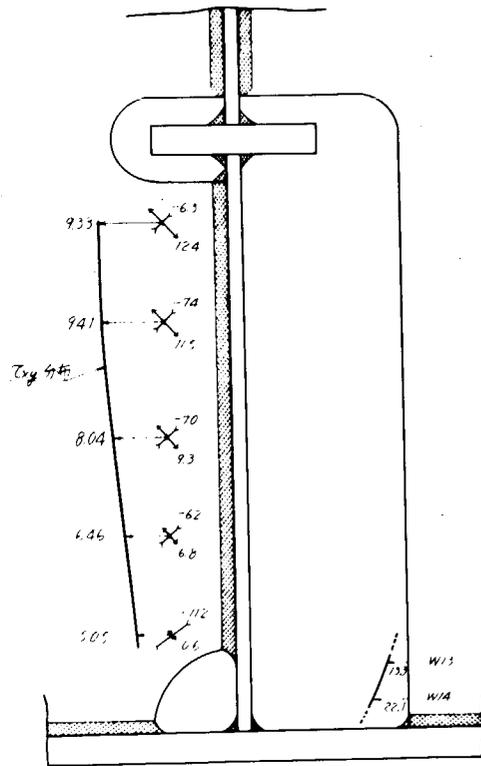


図4.5.12 負荷10 ton 時のWeb Plateの応力分布  
(Mh-1 Model)

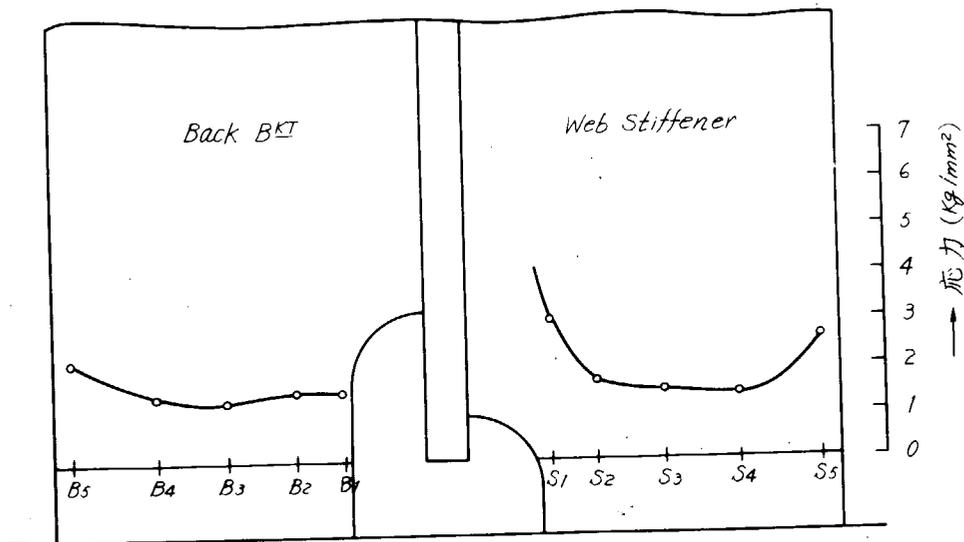


図 4.5.13 Web Stiffener, Back B<sup>KT</sup> 付根の負荷1 ton 時の応力分布  
(Model MMh-2)

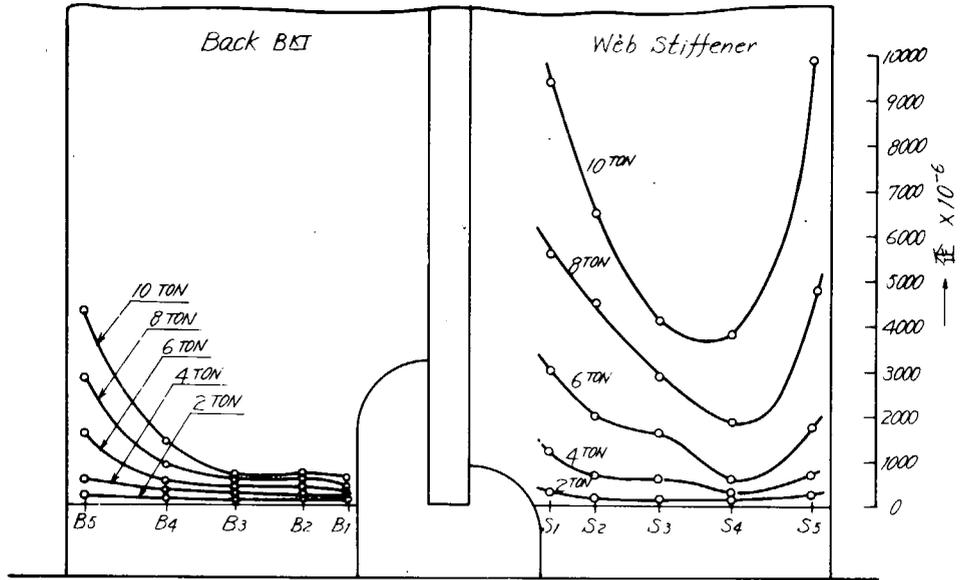


図 4.5.14 Web Stiffener, Back B<sup>KT</sup> 付根の歪分布  
(Model MMh-2)

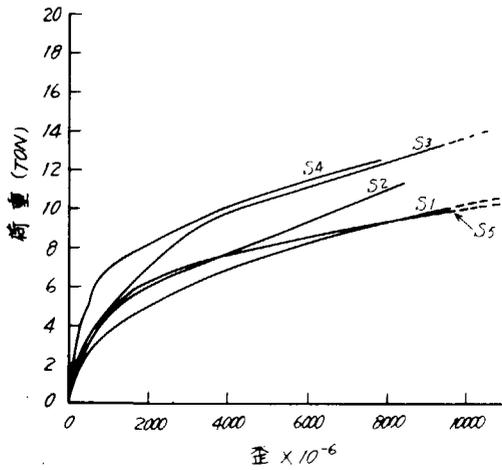


図 4.5.15 Web Stiffener の荷重と歪の関係  
(Model MMh-2)

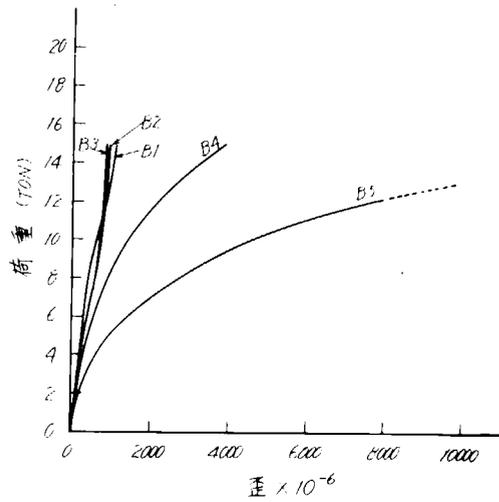


図 4.5.16 Back B<sup>KT</sup> の荷重と歪の関係  
(Model MMh-2)

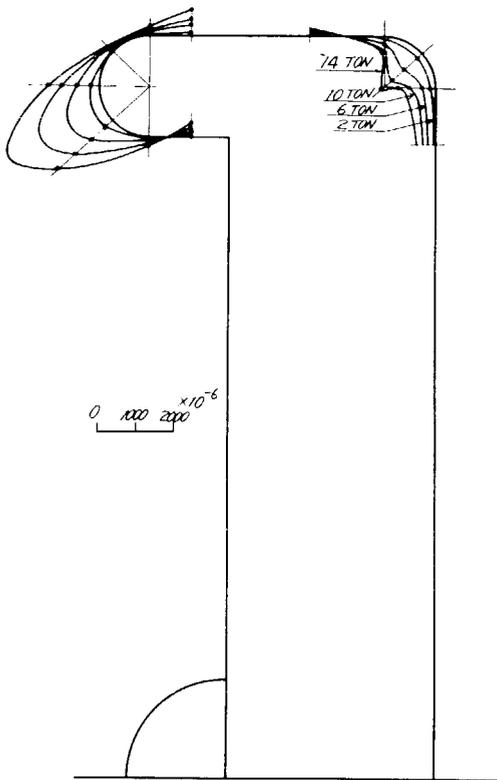


図 4.5.17 スロット周りの歪分布  
(Model MMh-2)

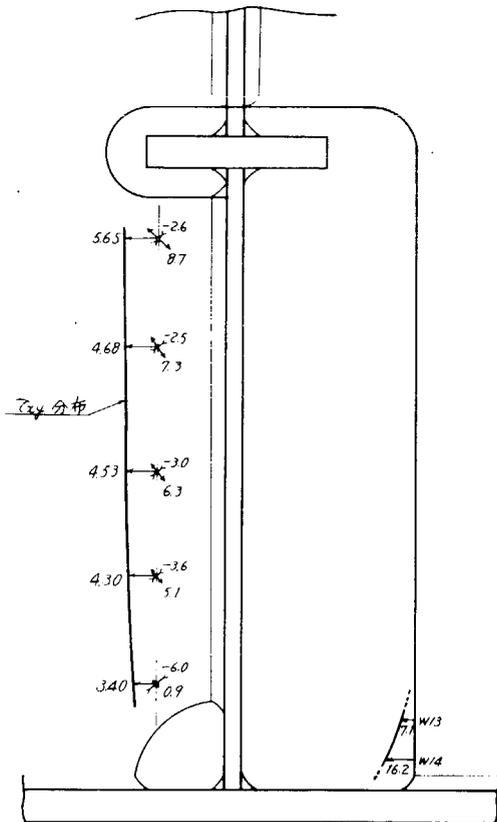


図 4.5.18 負荷 10 ton 時の Web Plate の応力分布  
(Model MMh-2)

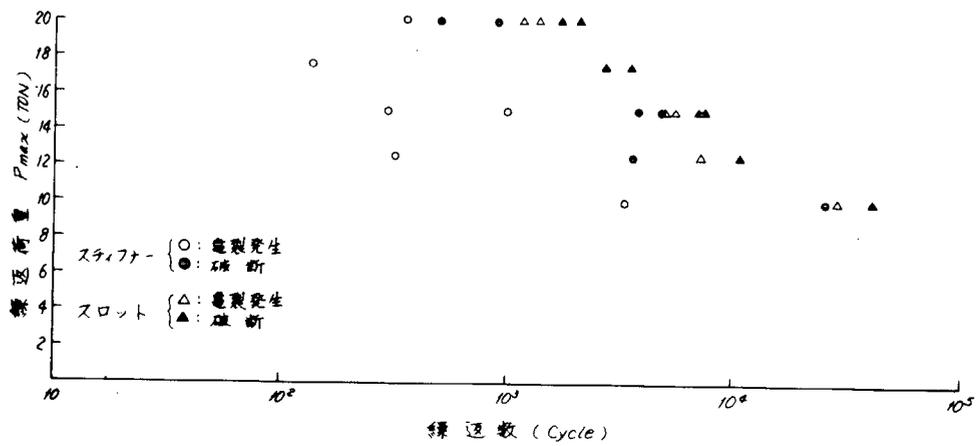


図 4.5.19 低サイクル疲労試験結果

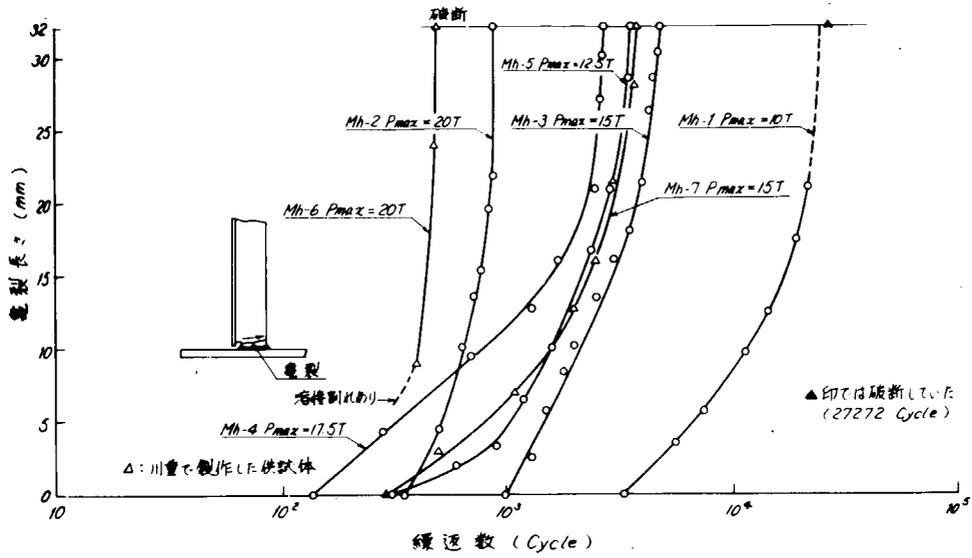


図 4.5.20 Web Stiffener ①の亀裂伝播状況 (Mh Model)

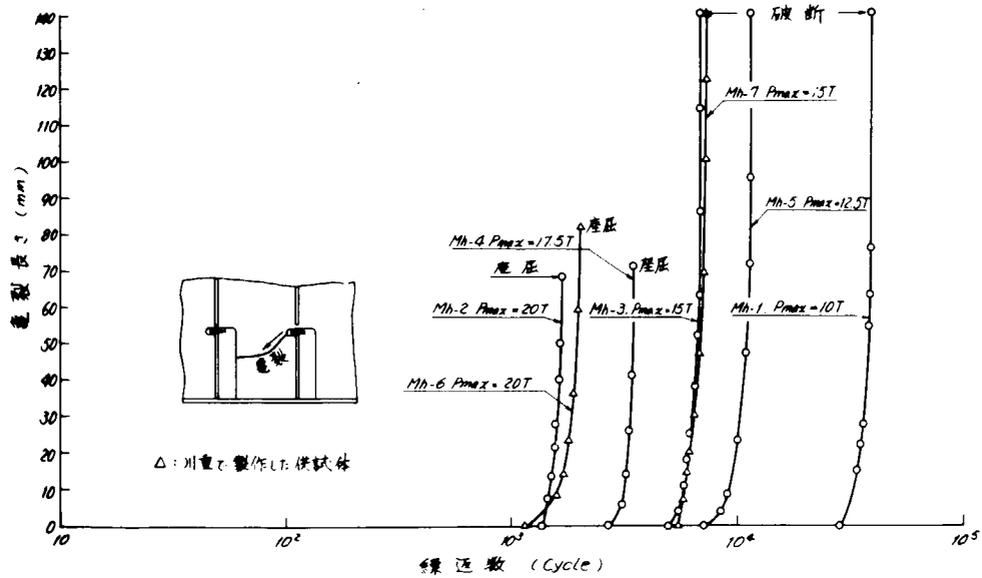


図 4.5.21 スロット②の亀裂伝播状況 (Mh Model)

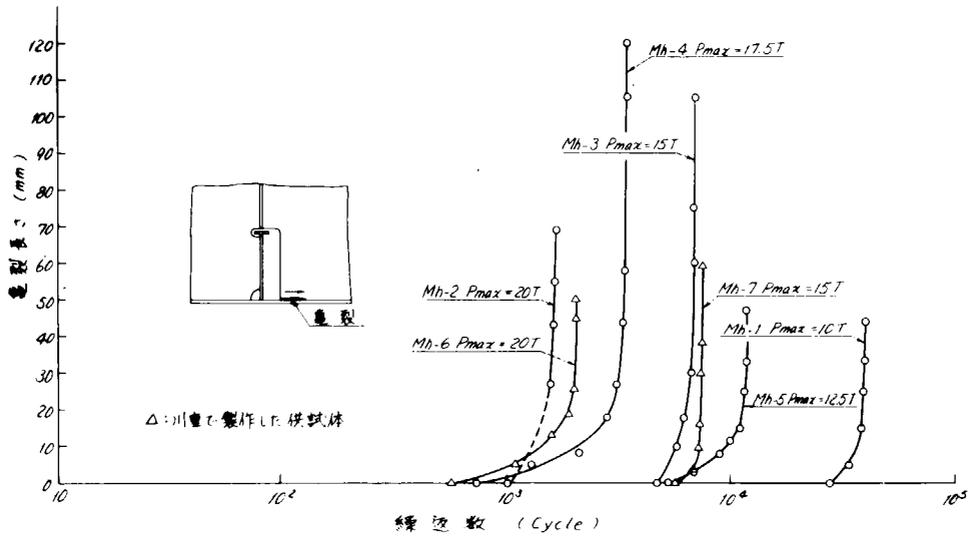


図 4.5.2.2 スロット下部溶接③の亀裂伝播状況 (Mh Model)

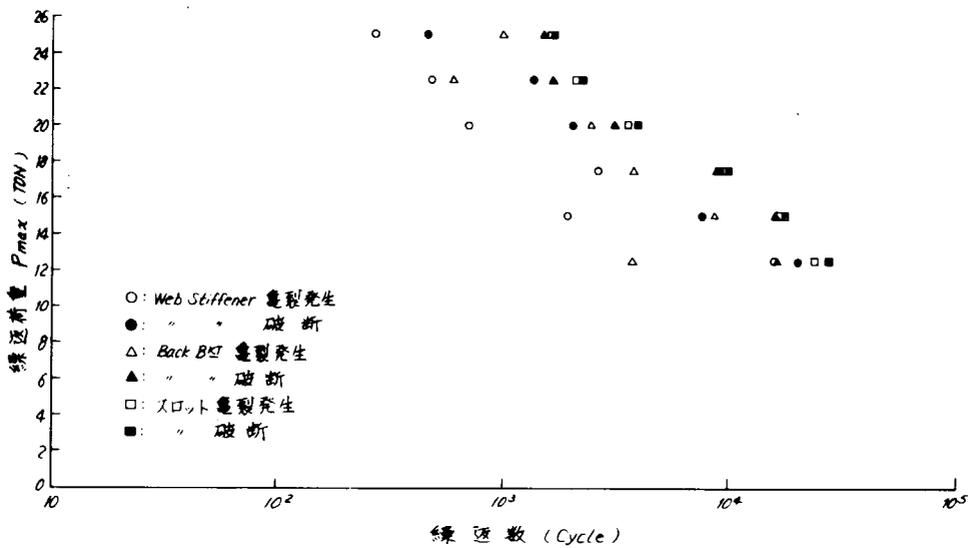


図 4.5.2.3 低サイクル疲労試験結果 (Model MMh)

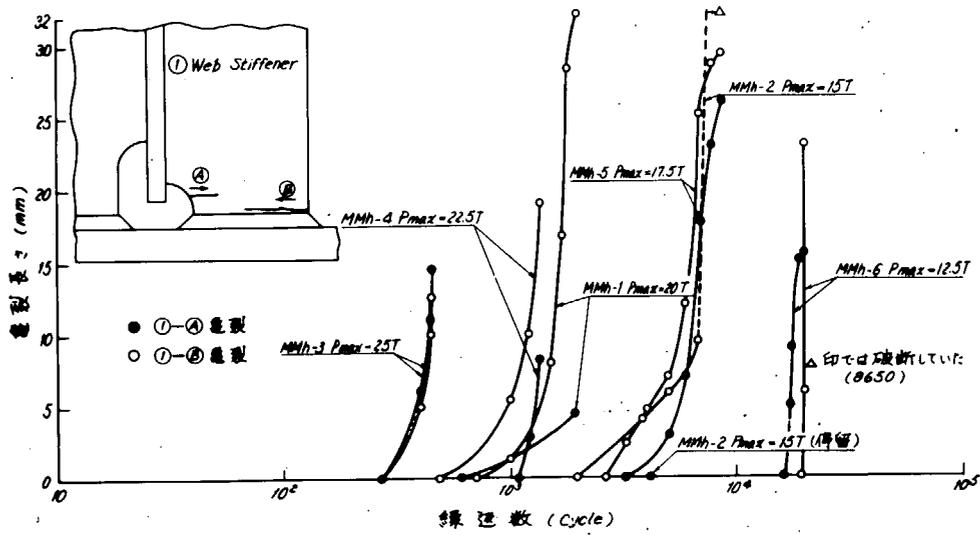


図 4.5.2.4 Web Stiffener ①の亀裂伝播状況 (Model MMh)

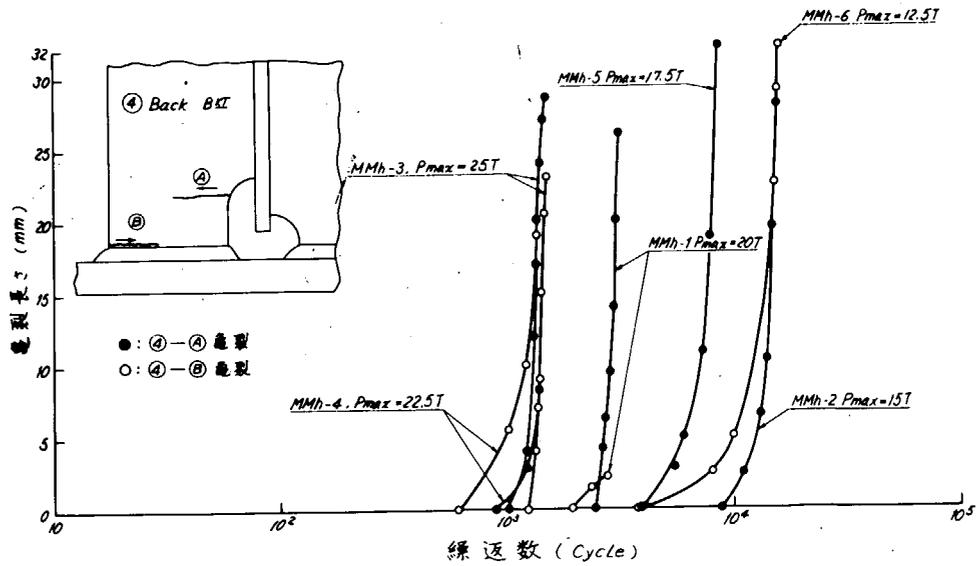


図 4.5.2.5 Back B<sup>K</sup>T ④の亀裂伝播状況 (Model MMh)

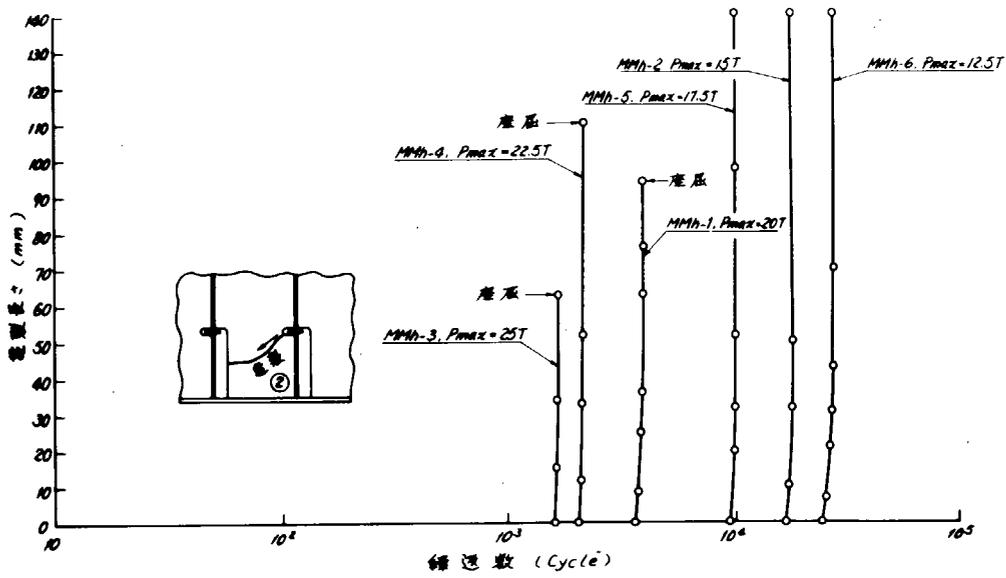


図 4.5.26 スロット②の亀裂伝播状況 (Model MMh)

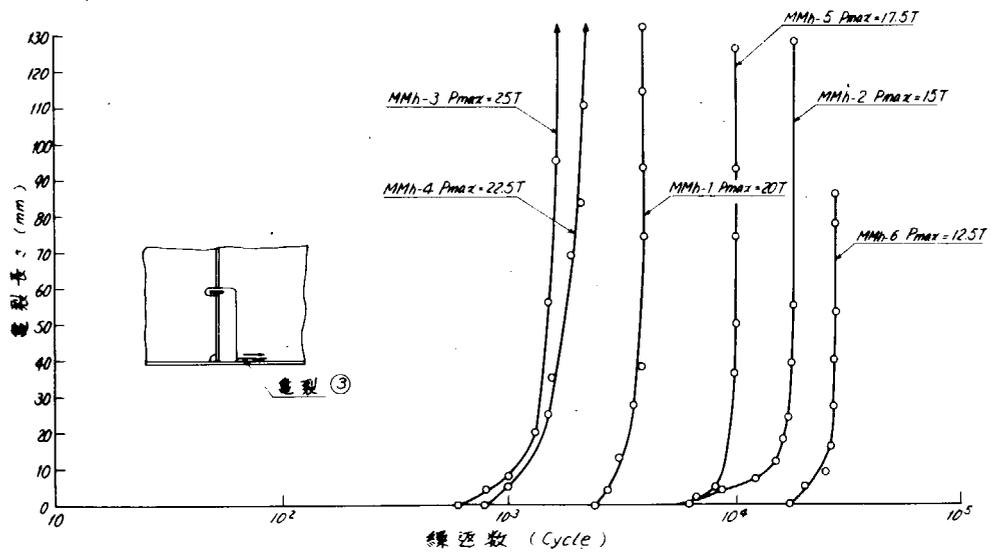


図 4.5.27 スロット下部溶接③の亀裂伝播状況 (Model MMh)

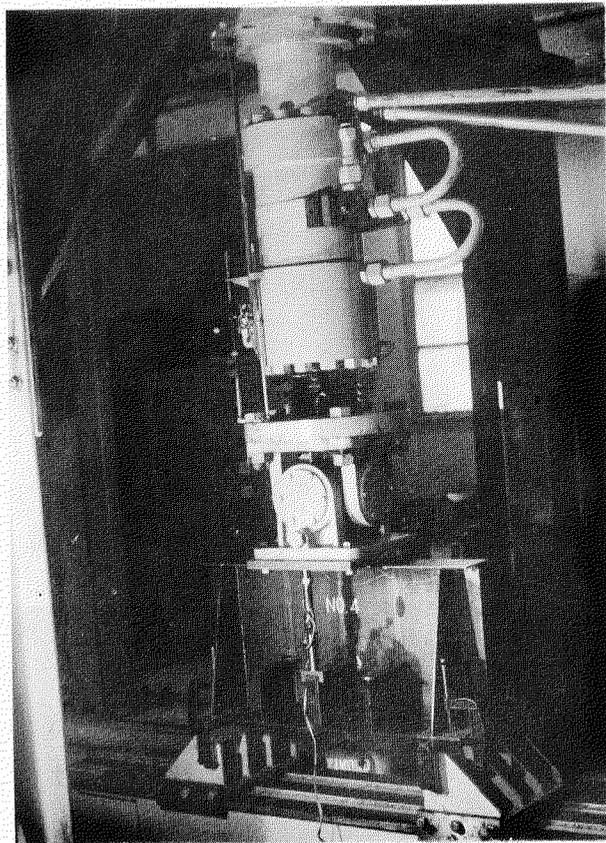


写真 4.2.1 疲労試験状況

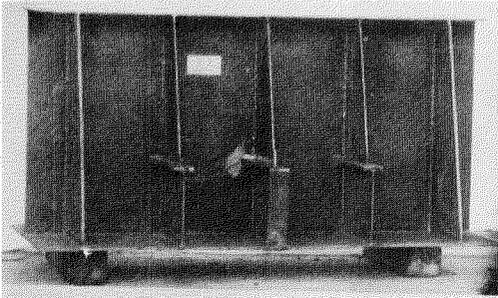


写真4.2.2 「DT0-2」試験体荷重16.2t



写真4.2.3 「CT0-2」試験体荷重12.0t

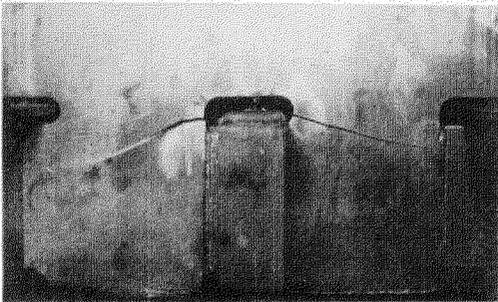


写真4.2.4 「AST0-2」試験体スロット部の亀裂

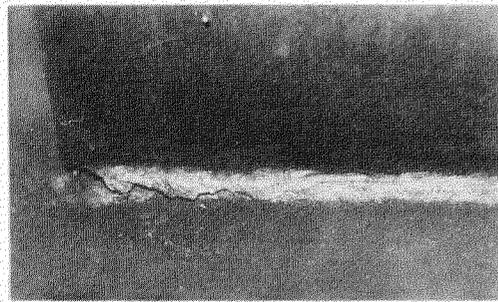


写真4.2.5 「DT0-2」試験体スロット下部の亀裂



写真4.2.6 「CT0-2」試験体ステイフナの破断

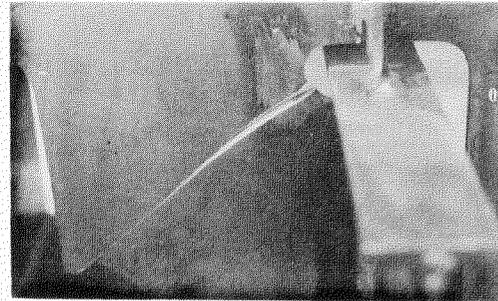


写真4.2.7 「CT0-2」試験体スロット部の亀裂

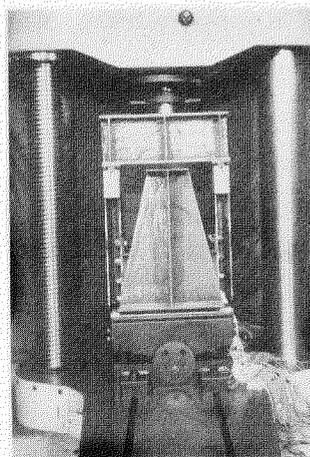
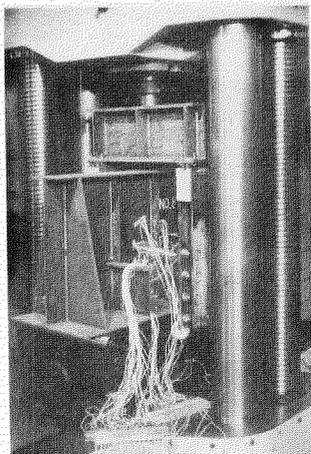
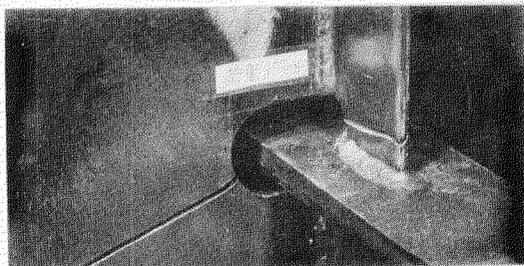
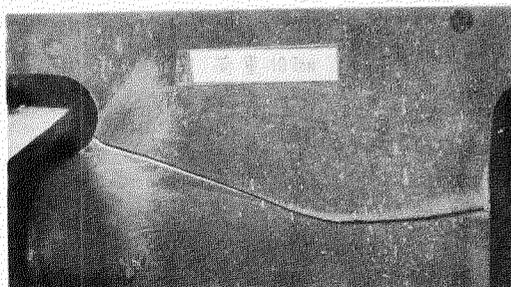


写真 4.5.1 静荷重試験状況



Web Stiffener

写真 4.5.2(1) Model Mh-1 の亀裂状況  
( $P_{max} = 10 \text{ ton}$ )



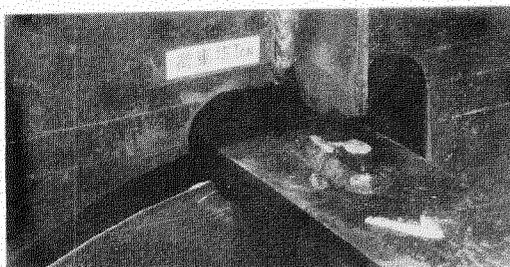
Web Plate

写真 4.5.2(2)



スロット下部溶接

写真 4.5.2(3)

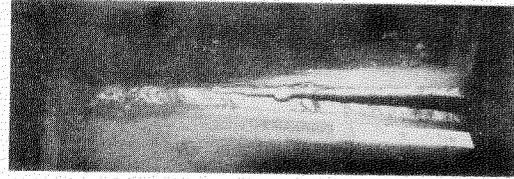


Web Stiffener

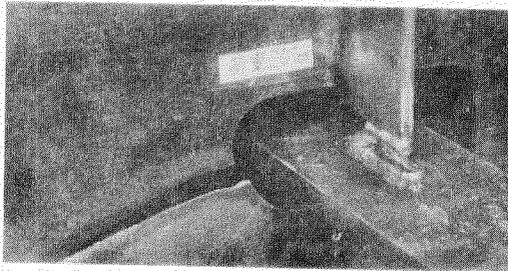
写真 4.5.3(1) Model Mh-3 の亀裂状況  
( $P_{max} = 15 \text{ ton}$ )



Web Plate  
写真 4.5.3(2)



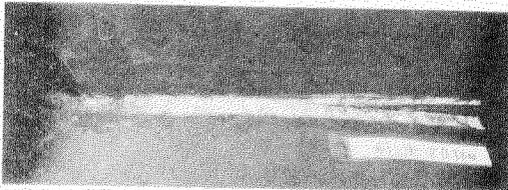
スロット下部溶接  
写真 4.5.3(3)



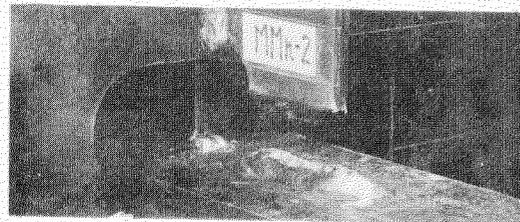
Web Stiffener  
写真 4.5.4(1) Model Mh-2 の亀裂状況  
( $P_{max} = 20\text{ton}$ )



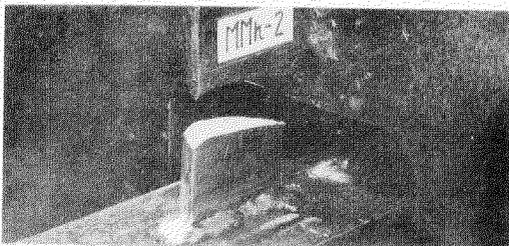
Web Plate  
写真 4.5.4(2)



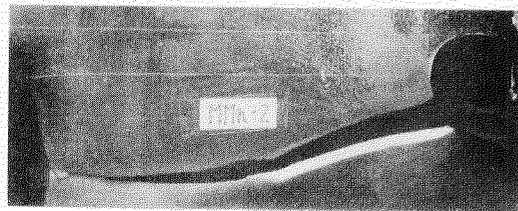
スロット下部溶接  
写真 4.5.4(3)



Web Stiffener  
写真 4.5.5(1) Model MMh-2 の亀裂状況  
( $P_{max} = 15\text{ton}$ )



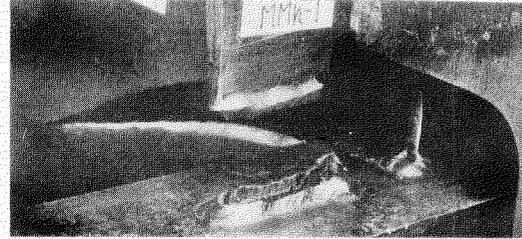
Back B<sub>K</sub>T  
写真 4.5.5(2)



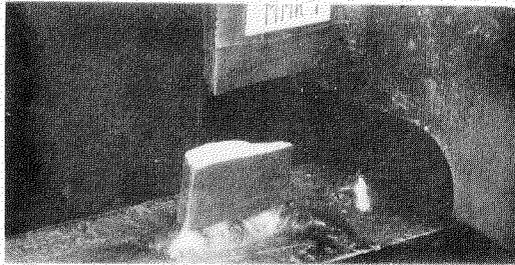
Web Plate  
写真 4.5.5(3)



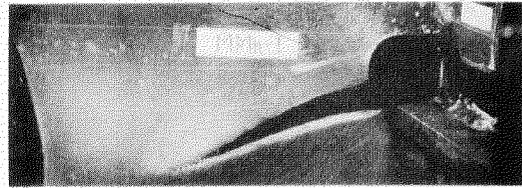
スロット下部溶接  
写真 4.5.5(4)



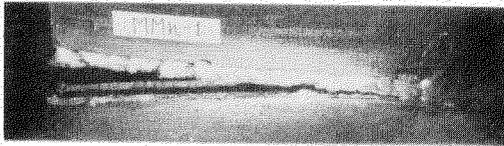
Web Stiffener  
写真 4.5.6(1) Model MMh-1 の亀裂状況  
( $P_{max} = 20\text{ton}$ )



Back  $B_{KT}$   
写真 4.5.6(2)



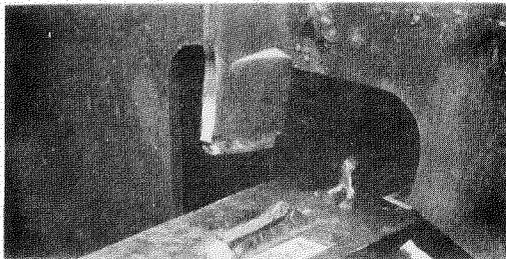
Web Plate  
写真 4.5.6(3)



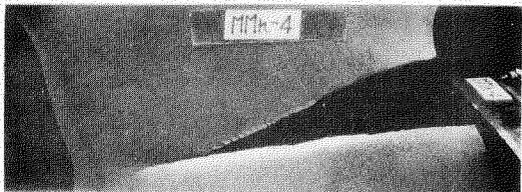
スロット下部溶接  
写真 4.5.6(4)



Web Stiffener  
写真 4.5.7(1) Model MMh-4 の亀裂状況  
( $P_{max} = 225\text{ton}$ )



Back  $B_{KT}$   
写真 4.5.7(2)



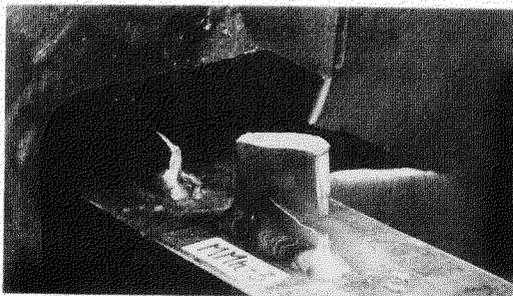
Web Plate  
写真 4.5.7(3)



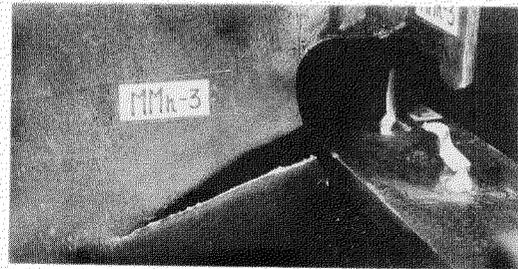
スロット下部溶接  
写真 4.5.7(4)



**Web Stiffener**  
写真 4.5.8(1) Model MMh-3 の亀裂状況  
( $P_{max} = 25 \text{ ton}$ )



Back B<sup>K</sup>T  
写真 4.5.8(2)



**Web Plate**  
写真 4.5.8(3)



スロット下部溶接  
写真 4.5.8(4)

## 5. ガーダ・ウェブ模型振動試験

### 5.1 ま え が き

近年、大型タンカー横部材のスロット周辺にクラックの発生する損傷がしばしば生起しており、その原因のひとつとして横部材の振動による疲労破壊が考えられる。これに対する基本的な対策を行なうためには、空気中および液体中における横部材の固有振動数と振動モードを知る必要がある。

第1年度ではアクリル樹脂により簡単な船体タンクおよび横部材を製作し、空気中および水中における振動性状を定性的につかむことを目的として振動実験を行なった。

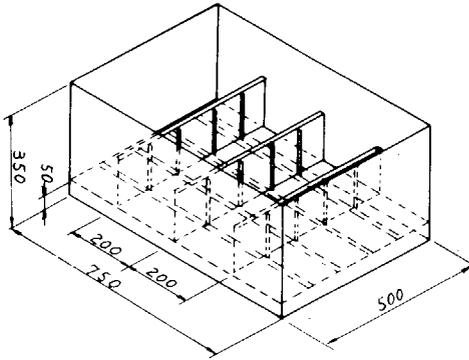
### 5.2 実 験 方 法

#### 5.2.1 模型

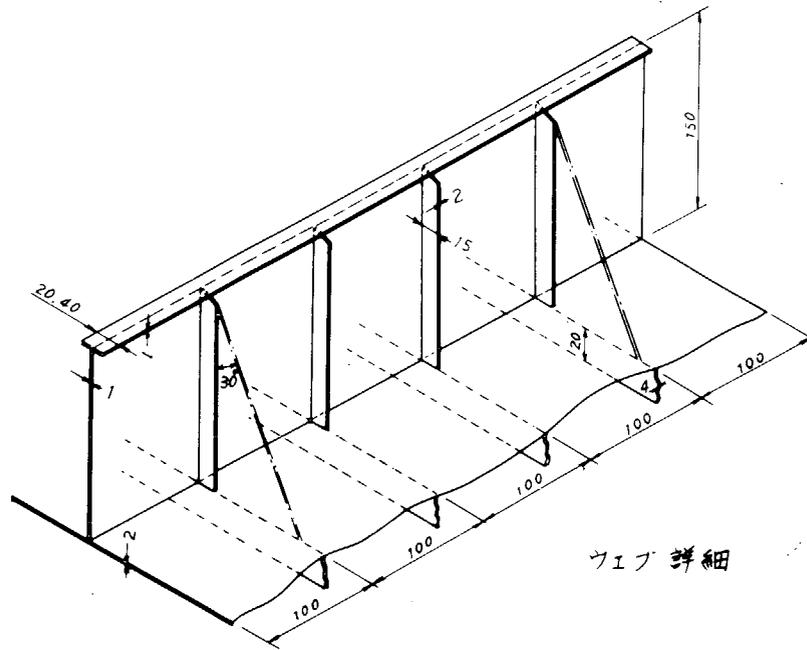
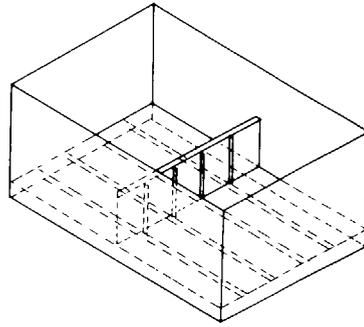
船体タンクを模する矩形の箱(500 mm × 750 mm × 300 mm)をアクリル樹脂で作し、中にウェブを設ける。ウェブはタンク中央に1枚入れるものと等間隔に3枚入れるものの2系列とする。ウェブのfaceにつけるフランジは幅の広いものと狭いものの2種とし、ステイフナの有無、ブラケットの有無により模型の種類は表5.2.1に示すごとくになる。

ロンジは問題を簡単にするために設けず、タンク底面の剛性をあげるため裏側に補剛材を入れた。スロットの有無はウェブ全体の振動にはほとんど影響がないと考えられるのでスロットは設けないこととした。模型略図を図5.2.1に示す。

模型タンク内のウェーブ  
が3枚ある場合



模型タンク内のウェーブ  
が1枚ある場合



ウェーブ 詳細

図 5.2.1 試験模型

表 5.2.1 模型種類

タンク内ウェブの数	フランジ幅 (mm)	ステイフナ個数
1	20	なし
3	"	"
1	40	"
3	"	"
1	20	4 個
3	"	"
1	40	"
3	"	"
1	20	4 個
3	"	ただし両端ステイフナはブラケットつき
1	40	"
3	"	"

材料はアクリル樹脂、 $E=460\text{Kg/mm}^2$  比重 1.19、模型タンク板厚 5 mm、剛性をあげるため補剛材にて補強してある。

### 5.2.2 実験方法

模型を振動台にのせ模型タンクの長手方向（ウェブの面に垂直方向）に加振した。（図 5.2.2）模型タンク内に水をはった場合とはらない場合とにつき固有振動数、振動モードを測定した。

計測は加速度ピックアップ（重量 1.5 グラム）5 個をウェブ上に接着、1 個を模型タンクの底に接着し、使用した。振動台の振動数を変化させ各振動数について各ピックアップの加速度の値およびピックアップ相互間の位相の関係を計測した。

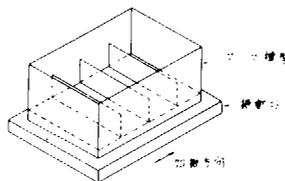


図 5.2.2 加振方法

水をはる場合の水深は 290 mm とした。なお、ウェブの高さは 150 mm である。

### 5.3 実験結果とその考察

ウェブが空中で振動する場合および水中に没して振動する場合の代表的な周波数応答曲線を図 5.3.1～5.3.3 に示す。これらの図において横軸には振動数を取り縦軸には加速度ビックアップで測定した各点の加速度を振動台の加速度でわつた値をとつており、測定点と振動台が同位相の場合は⊕、逆位相の場合は⊖の符号をつけて表わしてある。

また、最低次の共振時の振動モードの代表的な例を図 5.3.4 に示す。この図の尺度も周波数応答曲線の縦軸と同じ加速度の倍率（すなわち、振巾の倍率）で表示してある。なお、付録として全 Mode の最低次の共振の場合の振動モードをのせた。

実船の場合、問題になるのは最低次の振動であると考えられるので、最低次の共振振動数とそのときの測定した振巾倍率とを表 5.3.1 に示す。

表 5.3.1 より空中で振動する場合はフランジ幅の広いほうが、また、ブラケットのつくもののほうが、剛性が高いので、共振の振動数が高くなるという当然の傾向がみられる。水中で振動する場合も同様の傾向がみられるが、空中の場合ほど明らかではない。

振動モードとしては、ウェブ全体が一様に前後に振動し、さらにステイフナ間でパネルが振動するという形になつており、いわば、ステイフナとフランジの骨組構造とステイフナにかこまれたパネルとの連成振動と考えることもできる。このように考えると空中でパネルが振動する場合はステイフナの剛性により固有振動数がかなり変化するのに対し、水中の場合は同様の傾向はあるものの、それほど差がないのは、水中の場合は付加重量としての水の効果が大きく、ステイフナ間パネルの振動が全体の振動に対して、かなり支配的なためとも考えられる。

振幅の値は、表 5.3.1 にみるようにならばらついており、実験精度の点でも問題があるが、空中で振動する場合にくらべ、水中で振動する場合のほうが、振幅倍率が大きくなつており、ブラケットをつけた場合は、ブラケットのない場合より当然のことながら小さくなつている。

高次の振動は水中で振動する場合は図 5.3.3 および図 5.3.4 からわかるように梁の 2 次振動のモードのような振動やステイフナとステイフナ間のパネルとが逆位相になるような振動などがみられるが、空中の場合は振動数が高くなるため、最低次のものしか測定されていない。

表 5.3.1 最低次共振振動数とそのときの振幅倍率

環境	試 験 体			共振 振動数 (Hz)	共振時振幅倍率								
	タンク内 ウェーブ数	フランジ 幅(mm)	ステイフ ナ 数		測 定 点								
					1	2	3	4	5	6	7	8	
空中	1	40	0	63	2.6	12.2	16.6	3.5	12.2	*	*	*	
	3	"	"	56	2.9	12.6	17.9	1.8	12.2	*	*	*	
	1	20	4	125	18.0	30.8	*	18.0	16.1	*	13.2	*	
	3	"	"	135	14.3	17.2	12.5	10.0	9.5	*	9.2	*	
	1	40	"	165	11.0	20.0	*	4.2	19.0	*	4.0	*	
	3	"	"	155	19.7	*	22.5	16.0	*	16.1	8.0	5.6	
	1	20	4.但し両 端はB区	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	"	"	138	14.0	22.0	21.0	6.8	8.6	6.8	9.6	8.0	
	1	40	"	130	8.0	*	10.0	7.5	6.8	*	*	5.6	
	3	"	"	175	5.6	17.7	*	6.5	18.0	*	*	2.8	
	水中	1	40	0	7.3	7.3	26.2	14.5	3.5	5.6	*	*	*
		3	"	"	7.5	3.5	6.5	9.8	1.9	11.2	*	*	*
1		20	4	18.5	17.5	17.5	13.3	17.0	17.0	7.2	11.0	*	
3		"	"	15.5	20.0	24.8	24.7	*	16.6	*	15.3	*	
1		40	"	19.5	26.0	49.5	50.0	18.0	36.0	30.0	29.0	16.0	
3		"	"	21.5	6.0	16.5	17.4	6.0	*	13.3	5.0	*	
1		20	4.但し両 端はB区	18.5	28.0	34.5	—	18.0	14.0	—	17.5	—	
3		"	"	21.5	10.0	14.3	*	5.0	10.5	*	4.2	*	
1		40	"	19.5	16.0	*	18.7	10.8	*	11.0	*	*	
3		"	"	23.5	3.8	*	15.0	4.0	*	20.0	*	17.5	

振幅倍率を測定した位置および番号は右図

		1	4	
		2	7	
		3	8	
			5	
			6	

$$\text{倍率} = \frac{\text{測定点加速度}}{\text{ウェーブ下端での加速度}}$$

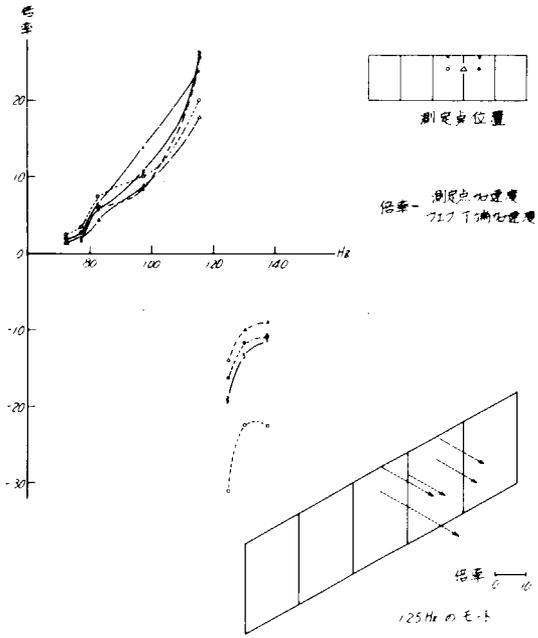


図 5.3.1 周波数応答および共振モード  
(フランジ幅 20mm, ウェブ1枚, ステイフナ4本, 空中)

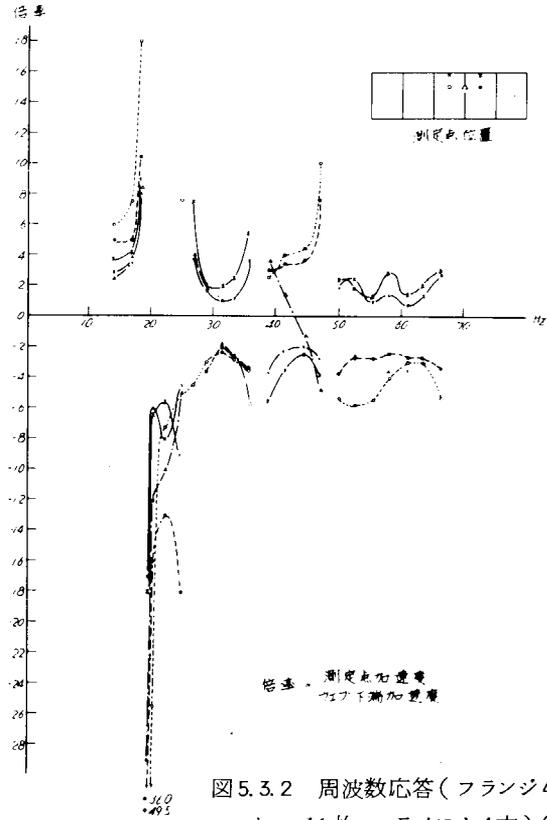


図 5.3.2 周波数応答 (フランジ 40mm,  
ウェブ1枚, ステイフナ4本) (水中)

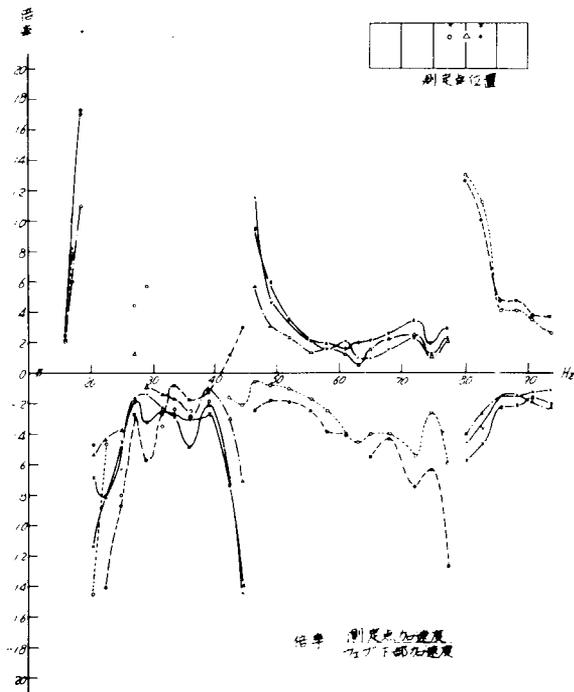


図 5.3.3 周波数応答 (フランジ 20mm, ウェブ1枚, 水中)

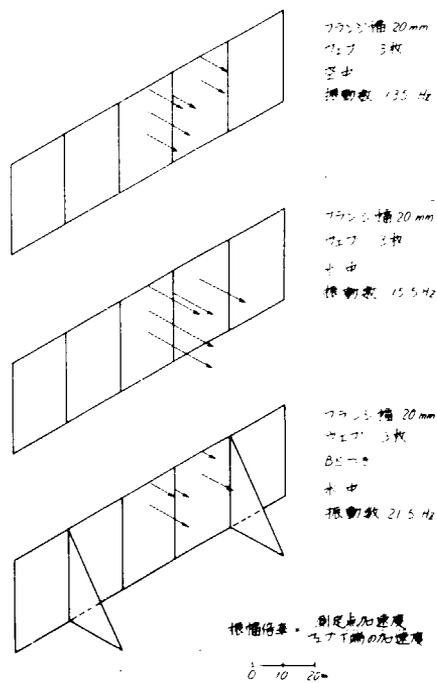


図 5.3.4 最低次共振モードの代表例

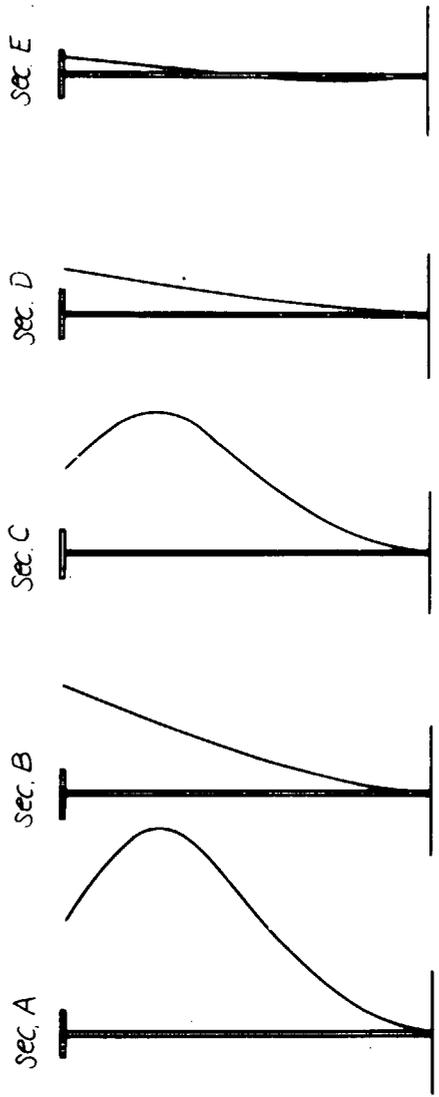
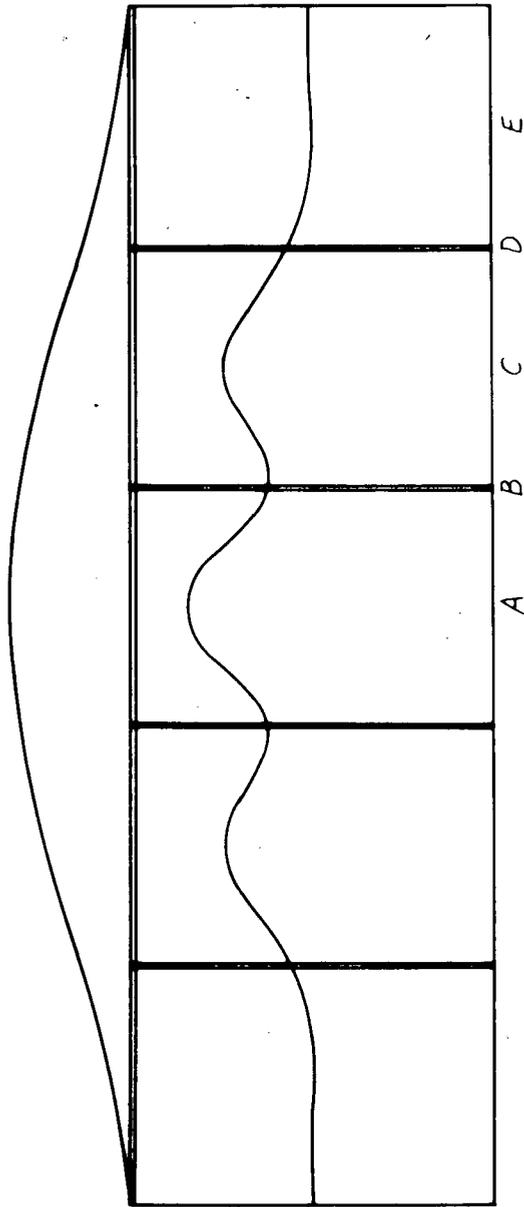
## 5.4 固有振動数の計算

防撓板の固有振動数を求める方法としては、これまで、防撓材間のパネルの剛性を適当な有効幅をとって防撓材につけ、剛性の増加した防撓材だけの格子構造として解くか、あるいは防撓材とパネルの連成振動として解く方法がとられている。ここでも実験値に合う値を比較的手軽に求めるためこの2つの手法を用いて計算を試みた。

### 5.4.1 格子構造におきかえた場合の固有振動数

前述の実験結果によるとステイフナ間のパネルもそれ自体が振動系として振動している。従つて、当実験に用いた模型のようにパネルの剛性がステイフナの剛性に比べて弱く、ステイフナ間でパネルが大きく振動する場合にはパネルを適当な有効幅をとつてステイフナにつけ、格子構造として解く方法は適当ではない。そこでパネルそのものをも格子としてとるという方法を取り、格子構造としての計算を行つた。

計算の詳細は省略するが、計算は骨組構造のための石川島播磨重工業で作成したプログラムを用い計算した。フランジ幅20 mm、ステイフナ4本の場合の計算結果を図5.4.1に示す。共振点は計算では136 Hzとなり、実験値とよく一致している。



フランジ 20 mm  
 スティフナ 4本  
 共振 136 Hz

図 5.4.1 格子構造におきかえた計算による共振モード

### 5.4.2 ウェブをステイフナとステイフナ間パネルの連成系とした固有振動数の計算

前述の方法は計算に手数がかかり結果の見透しがつけにくい。ため簡単に計算できる式を作成した。

計算方針はステイフナからなる骨組構造(図5.4.3)をある等価な質量  $m_s$  とバネ定数  $k_s$  を有する1質点系におきかえ、ステイフナ間パネルも質量  $m_p$ 、バネ定数  $k_p$  を有する1質点系とし、ウェブ全体を図5.4.4のような2質点系として固有振動数を求めるものとした。

- (1) ステイフナの骨組としてのバネ定数および重量

ステイフナおよびフランジを図5.4.

3のような骨組構造とし、座標、記号も下図のようにとる。

ステイフナ間パネルに等価な系

ステイフナに等価な系

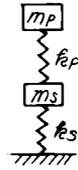


図 5.4.2 等価連成系

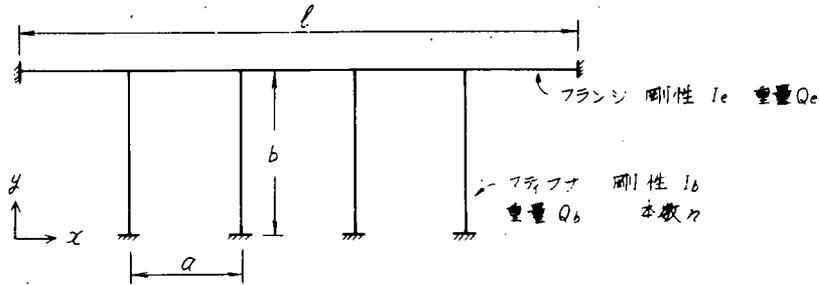


図 5.4.3 ステイフナとフランジの骨組

フランジの変形を(1)式のように正弦波の  $\frac{1}{2}$  周期とおく

$$w_u = A \sin \frac{\pi x}{l} \sin \omega t \quad (1)$$

ステイフナの変形を片持梁の変形と同じにおくと、1番目のステイフナの変形は

$$w_i = A \sin \frac{i\pi}{n+1} \left\{ 2 \left( \frac{y}{b} \right)^2 - \frac{4}{3} \left( \frac{y}{b} \right)^3 + \frac{1}{3} \left( \frac{y}{b} \right)^4 \right\} \sin \omega t \quad (2)$$

フランジの kinetic energy は

$$\frac{1}{2} \int_0^l \frac{Q_x}{l_g} (w_u)^2 dx = \frac{1}{4} \frac{Q_l}{g} A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t$$

i本目のステイフナの kinetic energy は

$$\frac{1}{2} \int_0^b \frac{Q_b}{b_g} (w_i)^2 dy = \frac{52}{405} \frac{Q_b}{g} A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t \sin^2 \frac{i\pi}{n+1}$$

よつて図5.4.3に示される骨組の全体の kinetic energy は

$$K_s = \left\{ \frac{1}{4} \frac{Q_l}{g} + \frac{26}{405} \frac{Q_b}{g} (n+1) \right\} A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t$$

次に変形による potential energy を求める。

フランジの potential energy は

$$\frac{EI_l}{2} \int_0^l \left( \frac{\partial^2 w_u}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{EI_l \pi^4 A \sin^2 \omega t}{4l^3}$$

i 本目のステイフナの potential energy は

$$\frac{EI_b}{2} \int_0^b \left( \frac{dw_i}{dy} \right)^2 dy = \frac{8}{5} \frac{EI_b A^2}{b^3} \sin^2 \frac{i\pi}{n+1} \sin^2 \omega t$$

よつて全体の potential energy は

$$P_S = \left\{ \frac{EI_b \pi^4}{4l^3} + \frac{4}{5} \frac{EI_b}{b^3} (n+1) \right\} A^2 \sin^2 \omega t$$

フランジとステイフナだけの 1 質点系としたときの等価な質量  $m_S$  は  $k_S$  を  $\frac{1}{2} A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t$  でわればよく、等価なバネ定数  $k_S$  は  $P_S$  を  $\frac{1}{2} A^2 \sin^2 \omega t$  でわればよく、次のようになる。

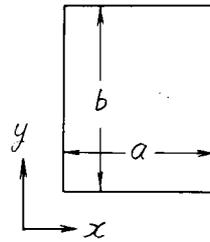
$$m_S = \frac{1}{2} \frac{Q_l}{g} + \frac{52}{405} \frac{Q_b}{g} (n+1) \dots \dots \dots (3)$$

$$k_S = \frac{EI_b \pi^4}{2l^3} + \frac{8}{5} \frac{EI_b}{b^3} (n+1) \dots \dots \dots (4)$$

(2) ステイフナ間パネルの等価バネ定数および質量

パネル 1 枚につき右のように座標をとり、たわみを次のようにおく。

$$w_p = B \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{\pi y}{b} \right) \sin \omega t \dots (5)$$



パネルの重量を  $Q_p$  としてこのパネルの運動エネルギーを計算し、それを  $\frac{1}{2} B^2 \omega^2 \cos^2 \omega t$  でわればパネル 1 枚を 1 質点系とした場合の等価質量が求められ  $\frac{3}{16} \frac{Q_p}{g}$  となる。

パネルの固有振動数はパネルの y 軸に平行な辺は固定、x 軸に平行な辺は支持として(6)式のようになる。

$$\omega_p = \sqrt{\frac{D g b}{Q_p a^3}} \dots \dots \dots (6)$$

D; 板定数      c;  $\frac{b}{a}$  による定数

ウェブを図 5.4.2 のような 2 質点系とおくとステイフナとフランジで構成される骨組の等価のバネ定数および Mass は(3), (4)式で求めたものでよい。ステイフナ間のパネルについては上述の等価 Mass  $\frac{3}{16} \frac{Q_p}{g}$  を用いると中央のパネルも、はじのパネルも同じ効果をもつことになり適当でない。

そこで図 5.4.2 の Model にうつる過程として図 5.4.4 のようなモデルを考え、i 番目のパネルの等価バネ定数を  $k_{pi}$  等価 Mass を  $m_p$  とする。

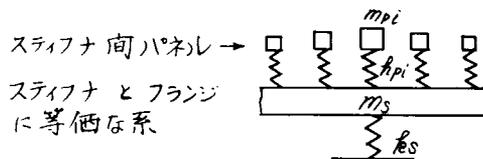
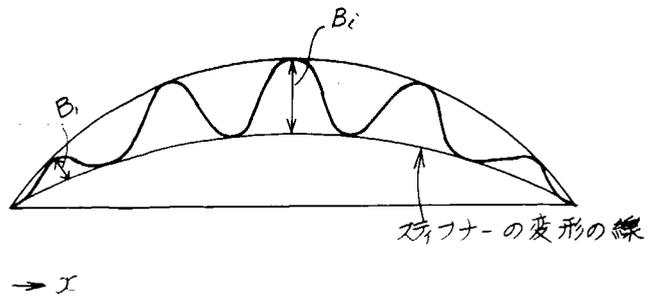


図 5.4.4

ウェブの変形を図 5.4.5 のように仮定し、  
*i* 番目のパネルの中央のステイフナとフ  
 ランジの骨組の変形線からの変位を  $B_i$   
 とおきパネルを含む包絡線と骨組の変形  
 線との差を正弦波とおくと、*i* 番目のパ  
 ネルの骨組の変形線からの振巾は



$$B_i = B \sin \frac{\pi(2i-1)}{2(n+1)}$$

図 5.4.5

これより *i* 番目のパネルの kinetic energy を計算し、等価質量が(7)式のように求められる。  
 また、ステイフナ間のパネルの固有振動数はすべて同一で(6)式で求められるものとして(6)、(7)式より  
 等価バネ定数も(8)式のように求められる。

$$m_{pi} = \frac{3}{16} \frac{Q_p}{g} \sin^2 \frac{\pi(2i-1)}{2(n+1)} \quad \text{----- (7)}$$

$$k_{pi} = \frac{3}{16} C^2 \frac{D_b}{a^3} \sin^2 \frac{\pi(2i-1)}{2(n+1)} \quad \text{----- (8)}$$

パネル全体を 1 質点系とした場合の  $m_p$   $k_p$  は、各パネルの和になるから

$$m_p = \frac{3}{16} \frac{Q_p}{g} \sum_{i=1}^{n+1} \sin^2 \frac{\pi(2i-1)}{2(n+1)} \quad \text{----- (9)}$$

$$k_p = \frac{3}{16} C^2 \frac{D_b}{a^3} \sum_{i=1}^{n+1} \sin^2 \frac{\pi(2i-1)}{2(n+1)} \quad \text{----- (10)}$$

ウェブ全体を図 5.4.2 のようにおいた場合の固有振動数は(11)式により求められる。

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \{ \omega_s^2 + \omega_p^2 (1+\mu) \} - \frac{1}{2} [ \{ \omega_s^2 + \omega_p^2 (1+\mu) \}^2 - 4 \omega_p^2 \omega_s^2 ]^{1/2} \quad \text{(11)}$$

ここで

$$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s} \quad \omega_p^2 = \frac{k_p}{m_p} \quad \mu = \frac{m_p}{m_s}$$

(11) 式に値を入れて計算すると空中での値はフランジ幅 20 mm の場合で 1.48 Hz、40 mm の場合で 1.63 Hz となり験値と大きな誤差はなく見当をつけるには有用である。

## 5.5 水中で振動する場合の付加水の計算

板が水中で振動する場合の付加水の計算はこれまで水の動エネルギーによる計算がいろいろ行なわれている。当実験の場合にもこの方法を適用してみた。精度の点で問題はあるが、一応の目安になるのでその概要を記す。

座標を図 5.5.1 のようにとり、  
 ステイフナとフランジのみを考  
 えた骨組は、*y* 方向には直線的  
 に変形するとし、パネルは(5)式

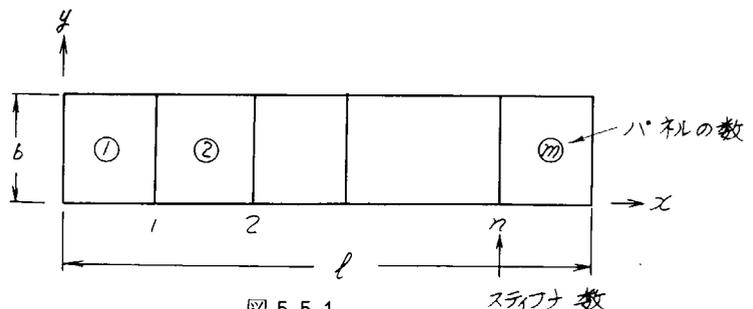


図 5.5.1

のように変形すると仮定する。パネルの中央を結ぶ包絡線とステイフナの変形線との差を  $\sin$  波とおく。

(図 5.4.5)

ステイフナ部の  $y$  方向の直線変位を計算しやすいため、正弦波のはじめの直線と考えられる部分を取り

$$\frac{A}{\sin \theta} \sin\left(\theta \frac{y}{b}\right) \text{ とする。 } (\theta \text{ は } \sin \theta = \frac{a}{b} \text{ の成立する角})$$

全体の変形は (12) 式のようになる。

$$w = \left\{ \frac{A}{\sin \theta} \sin\left(\theta \frac{y}{b}\right) \sin \frac{\pi x}{\ell} + B \sin \frac{\pi x}{\ell} \sin^2 \frac{n+1}{\ell} \pi x \sin \frac{\pi y}{b} \right\} \sin \omega t \dots (12)$$

水の速度 potential を  $\phi$  とすると  $\phi$  はラプラスの方程式を満足し、かつ、板の表面で下式を満足しなければならない。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial t}$$

ここで  $\phi$  を (13) 式のようにおく

$$\phi = \left[ F \sin \frac{\pi x}{\ell} \sin \frac{\theta y}{b} e^{-\alpha z} + \sin \frac{\pi y}{b} \left\{ G \sin \frac{\pi x}{\ell} e^{-\beta z} - \frac{H}{2} \sin \frac{2m+1}{\ell} \pi x e^{-\tau z} + \frac{K}{2} \sin \frac{2m-1}{\ell} \pi x e^{-\tau z} \right\} \right] \cos \omega t \dots (13)$$

上記 2 条件より  $F, G, H, K, \alpha, \beta, \tau$  が決定される。

水の運動エネルギーは板の両面接水の場合 (14) 式のようになる。

$$T_w = -\rho \iint \phi \frac{\partial \phi}{\partial z} ds \quad \rho ; \text{水の密度} \dots (14)$$

一様な質量分布を有する板が変形  $w$  で振動している場合の運動エネルギーは、単位面積当りの質量を  $m$  とおくと、(15) 式のようになる。

$$T_m = \frac{1}{2} m \iint \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 ds \dots (15)$$

(14) 式と (15) 式とを等しいとおくと  $m$  が板に均等につく付加質量となる。

以上のようにして単位面積当りの付加質量は

$$m_v = \rho \left\{ \frac{1}{a \sin^2 \theta} \frac{1}{4\theta} \left( \theta - \frac{1}{2} \sin \theta \right) + \frac{R^2}{64} \left( \frac{4}{\beta} + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau} \right) + \frac{R}{4\pi} \left( \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{8\theta} \left( \theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + \frac{3}{64} R^2 + \frac{R}{4\pi} \right\}$$

ここで  $\theta$  ; 微小角

$\rho$  ; 水の密度

$$\alpha = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{1 + \left( \frac{\ell \theta}{b\pi} \right)^2} \quad \beta = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{1 + \left( \frac{\ell}{b} \right)^2} \quad \tau = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{(2m+1)^2 + \left( \frac{\ell}{b} \right)^2}$$

$$\tau = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{(2m-1)^2 + \left( \frac{\ell}{b} \right)^2}$$

$$R = \frac{\omega^2}{\omega_p^2 - \omega^2}$$

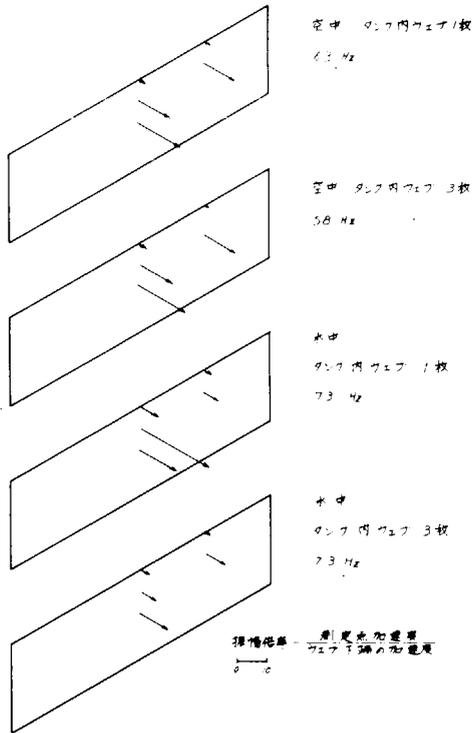
この式により  $M_{ass}$  を計算し、その値を用いて(11)式で振動数を求めてみるとフランジ20mm、ステイフナ4本の場合に21.8 Hzとなり、一応の目安になりうることがわかる。

## 5.6 む す び

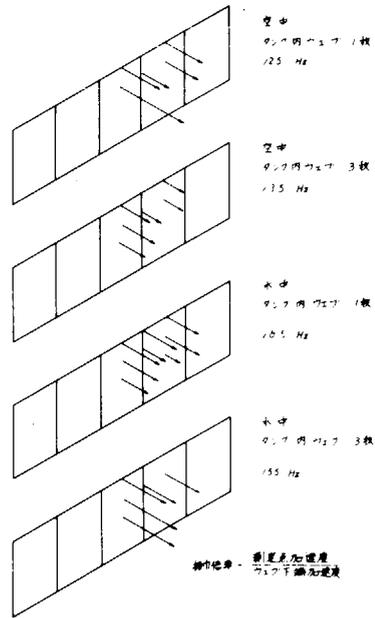
アクリルによる模型振動実験の結果を以下に要約する。

- (1) ウェブは、補剛材と補剛材間パネルとが連成系をなすような形で振動している。
- (2) ウェブを格子構造として固有振動数を求める方法は実験値とよく一致する。この場合、格子のとり方は振動が補剛材とパネルとの連成系になつているため格子をパネルの中にもとる必要がある。
- (3) 補剛材と補剛材間パネルとをそれぞれ等価なバネと質量をもつ系におきかえる方法も簡単に振動数をチェックするには有用である。
- (4) ウェブが水中で振動する場合、付加質量のため固有振動数は大幅に低下する。この付加水を求める当報告書の方法は計算自体は厳密さを欠くが、目安にはなる。
- (5) タンク内にウェブを1枚入れたものと3枚入れたものの差は当実験では、はつきりしなかつた。このトランスリングスペースの影響については引続き第2年度の実験で解明していく予定である。

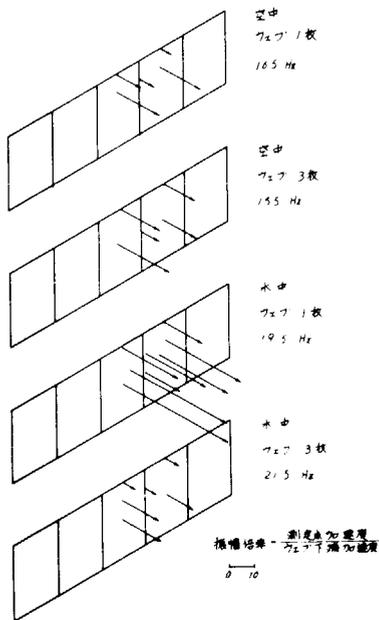
附録 最低次共振モード



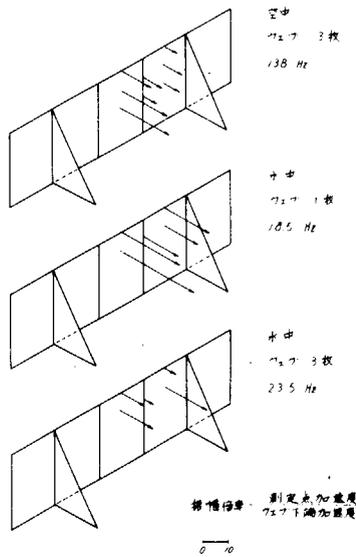
附図1. フランジ4mm, スティフナなしの場合のモード



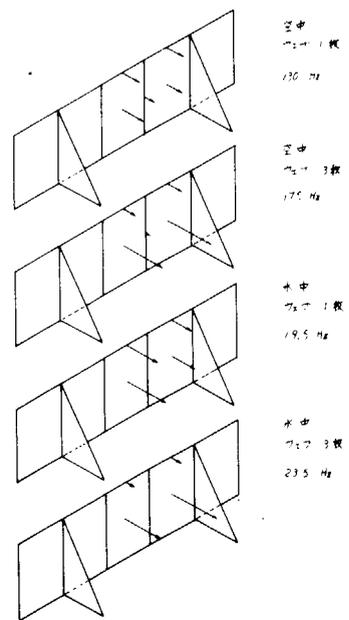
附図2. フランジ幅2mm, スティフナ4本の場合のモード



附図3. フランジ幅4mm, スティフナ4本の場合の振動モード



附図4. フランジ幅2mm, ブラケットつきの場合の振動モード



附図5. フランジ幅4mm, ブラケットつきの場合の振動モード

## 6. 応 力 解 析

### 6.1 ま え が き

小型船底模型静的試験の模型を対象として、有限要素法(FEM)計算を行ない、計測値と比較検討することを目的とする。

現在スロット部の応力解析法としては、三井千葉研の方法<sup>1)</sup>、日立技研の方法<sup>2)</sup>、それに西部造船会損傷委員会のSWGの方法<sup>3)</sup>、(三菱長崎研の方法<sup>4)</sup>含む)の3種がある。このうちSWGの方法は今回の解析には使用しなかつたが、SR120とは別に行なつた作業報告が近日中に出るものと思われる。

三井千葉研の方法は、3次元構造物であるスロット部を2次元FEM計算したもので、スロットを中心として1ロングスペース×トランス高さの1パネルを面外部材等価剛性をとりこんだウェブ面FEM計算と、ウェブに相当する面外部材等価剛性をとりこんだステイフナ面FEM計算を行なう。

この方法により、船体構造委員会関東地区部会のスロット懇談会ではスロット問題に対し、とりあえずの対策を求める作業をした。<sup>5)</sup>

日立技研の方法は、3ロングスペース×トランス高さの連続3パネルの3次元FEM計算を行なう方法である。

ここでは、三井千葉研の方法および日立技研の方法により分担作業を行なつて先の目的に従い、応力解析を行なつた。両者の解析手法はそれぞれ実験値とほぼ良い一致を示すことが確認された。以下、実験値との対比と検討、小型模型疲労試験(小型船底模型のFEM計算結果を一部修正)静実験との対比、スロット対策懇談会作業の妥当性などにつき言及したい。

---

1) 船体構造委員会関東地区部会、東71-5-4

2) 堀徹“標準ユニット法による船体局部強度解析”、日本造船学会論文集 No.127 119/128 (1970)

3) SWG資料参照

4) 永元隆一他、“大骨材に設けられた小骨材貫通部切欠(SLOT)周辺の応力”、西部造船会会報、No. 37 127/143(1968)

5) 造船学会学会誌 1971.6月号

## 6.2 三井造船(株)千葉研究所のモデル方式による応力解析

### 6.2.1 応力解析対象モデル

表 6.2.1 応力解析対象モデル

番号	IHI 番号	略 称	スロット	ステイ フナ	実 験	計 算	備 考
①		EK-MI1			三 井	三 井	
②		AK-MI2			"	"	
③		AKSMI2			"	"	
④		GK-MI4			"	"	D型ステイフナで切欠なしをG型と称す
⑤		FKNMI4			"	"	
⑥		FR-MI3			"	"	
⑦		AW-MI3			"	"	
⑧	4	DR-IH4			I H I	"	
⑨	5	CRSIH2			"	"	
⑩	6	CRMIH2			"	"	
⑪	8	BRPIH3			"	"	
⑫	11	AO-IH6			"	"	
⑬	12	HK-IH6			"	"	
⑭	9	BR <sub>N</sub> <sup>S</sup> IH5			"	"	模型はバックブラケット部に切欠を設けなかつたので計算もそのようになった
⑮	1	AR-IH1			"	三井・日立	
⑯	2	BR-IH1			"	日 立	
⑰	3	CI-IH5			"	"	
⑱	7	BRNIH3			"	"	
⑲	10	BI-IH6			"	"	

応力解析対象モデルは表6.2.1に示すような19種類の各種スロットステイフナ形式のうち15種類である。残りの4種類の計算は日立造船で行なわれるが、全ケースを見わたして補強効果等を云々せねばならないので、この6.2節においては静応力解析を表6.2.1の⑬～⑰については実験値を主体に行なつた。

なお、表6.2.1において、略称は小型船底模型静的試験に対するものを示した。

## 6.2.2 計算方法

詳細は船体構造委員会関東地区部会“東71-5-12”を参照していただくこととし、ここではごく簡単に述べる。

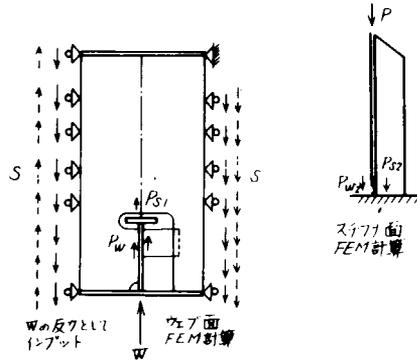


図 6.2.1 計算対象パネル

図6.2.1に示すように、1ロングスペース×トランス高さのスロット・ステイフナを中央に含むパネルをとり出して、ロングからの集中荷重 $W$ と剪断力 $S$ の単位荷重を加える。(ウェブ面FEM計算)一方、ステイフナ面に対しても同じく単位荷重 $P$ を加えた計算をしておく。(ステイフナ面FEM計算)このステイフナ面FEM計算は、トランス・フェイスの拘束模型端のステイフナ変形拘束性を考えて、上端の横方向(トランスの面外方向)変位を自由の場合と拘束の場合の2種類計算しておく。

なお、ステイフナ面計算のときのウェブ要素、ウェブ面計算のときのステイフナ要素は、互いに他面計算による応力集中係数により有効断面積に換算したものをを用いる。ウェブ面FEM計算で単位外力 $W$ 、 $S$ に対するステイフナの分担力 $P_{S1}$ がわかるから、ステイフナ面ランで得られるステイフナの分担力 $P_{S2}$ を $P_{S2} = P_{S1}$ となるよう調整する。こうして、ウェブ面FEM計算でスロット周りの応力分布は求まり、面外部材のステイフナの応力分布はステイフナ面FEM計算による応力分布に $P_{S2} = P_{S1}$ となるよう係数をかけることで求まることになる。

本来なら、 $P_{S1}/P_{W1} = P_{S2}/P_{W2}$ となるべき性格をもつものであり、従つて $W$ をかけたとき、直接ステイフナの応力分布が求められるべきであるが、今回は実際には、ウェブ面計算をまず、スロット対策懇談会の作業で得られたステイフナの高さに沿う応力集中係数を用いて行ない、それによつて、得られたウェブ面の集中係数を用いたステイフナ面の計算を行なつた。(一部(⑮AR-IH1)のみチツクのため往復計算を行なつた。)ウェブ面とステイフナ面の2面独立FEM計算をする結果、 $P_{S1}/P_{W1} \doteq P_{S2}/P_{W2}$ としかならざるを得ないし、一方、剪断力 $S$ については、ステイフナ面のこのモデルリングでは直接荷重をかけられないので、かくのごとく分担についてはウェブ面を正とし、ウェブ面FEM計算結果からステイフナの分担力を決定後、ステイフナ面の応力分布はステイフナ面ランによるとしたのである。

後述(6.2.6-(3)項)の3次元FEM計算結果、あるいは日立のプログラムによる結果においてもステイフナ基部の応力分布は、図6.2.2に示すごとく集中荷重 $W$ に対する場合にも剪断力 $S$ に対する場合にも応力分布形状にほとんど差異はなく、 $W$ に対しても $S$ に対しても応力集中係数は同じとみてよいことがわかっている。



図 6.2.2

各外力に対するステイフナ基部

定性的応力分布形状

(同一の外力に対しては、ステイフナ基部応力は  
W に対するものが S に対するものより大きい)

### 6.2.3 計算結果

図 6.2.3 に有限要素分割を示す。

図 6.2.4 および図 6.2.5 に単位荷重  $P=1 \text{ ton}$  に対する各ステイフナの応力分布を示す。同図中、実線はステイフナ面 FEM 計算においてステイフナの上端の水平変位自由②とした場合、破線は拘束③とした場合を示す。なお、応力は、歪ゲージ貼付のステイフナのロンジ・フェノスよりの距離が  $8 \text{ mm}$  に対するものを示す。

図 6.2.5 ~ 図 6.2.9 に単位荷重  $W=10 \text{ ton}$ 、 $S=10 \text{ ton}$  に対するスロット周りの応力分布を示す。なお、応力は歪ゲージ貼付の、フリーエッジよりの距離  $3 \text{ mm}$  に対するものを示す。また、① EK-M11 についてはステイフナ応力分布(実験値)から有効巾を求め再度ウェブ面 FEM 計算をしたが、ステイフナ断面積フルとしたのとほとんど変化なかった。

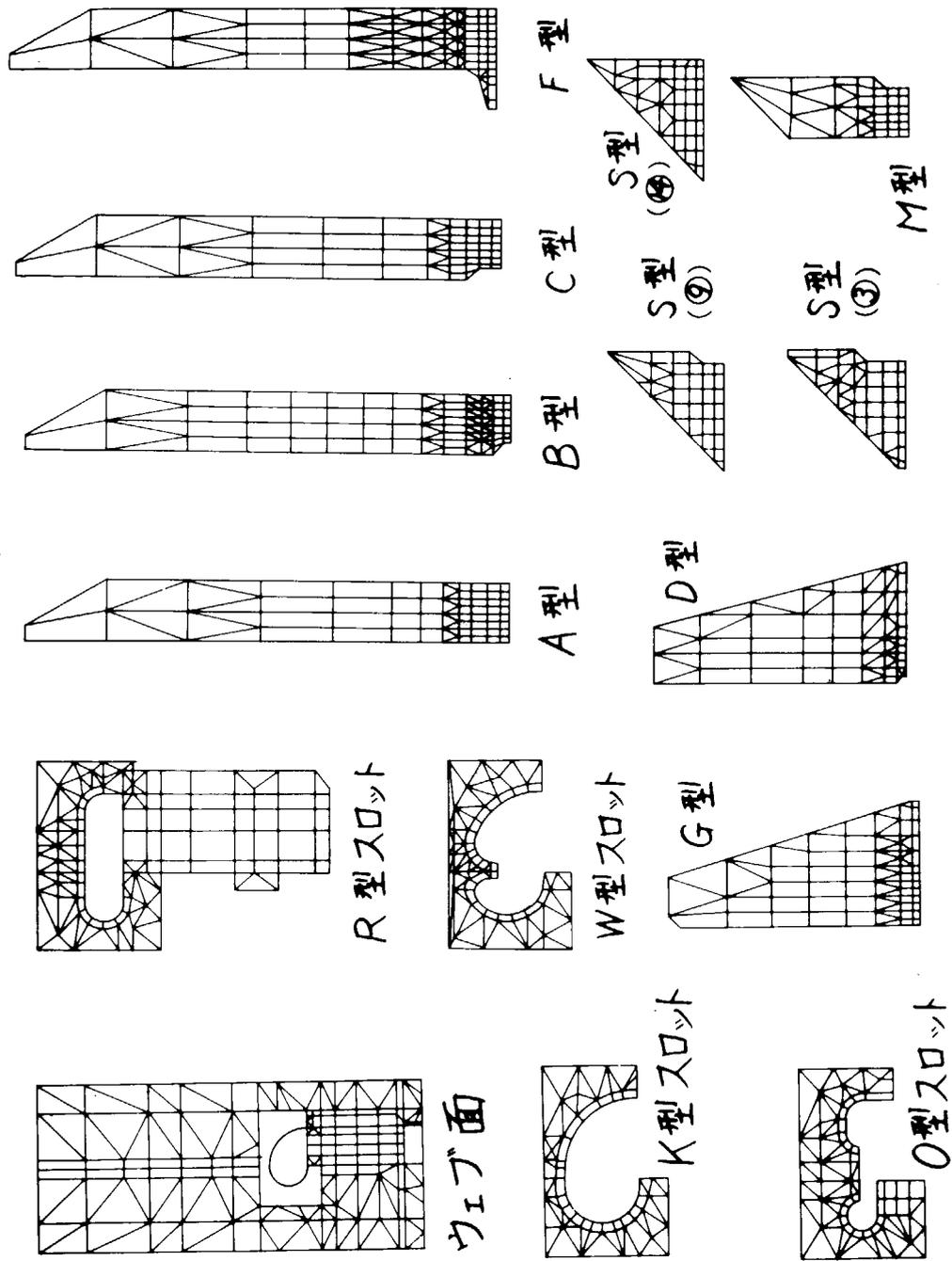


図 6.2.3 有限要素分割

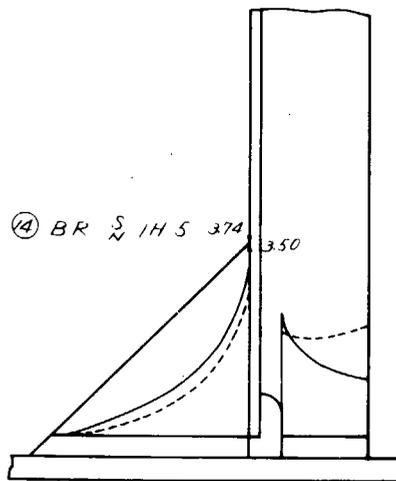
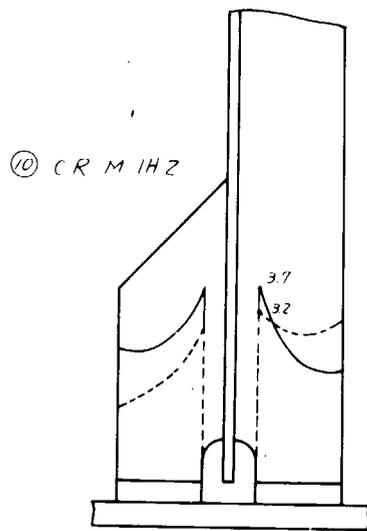
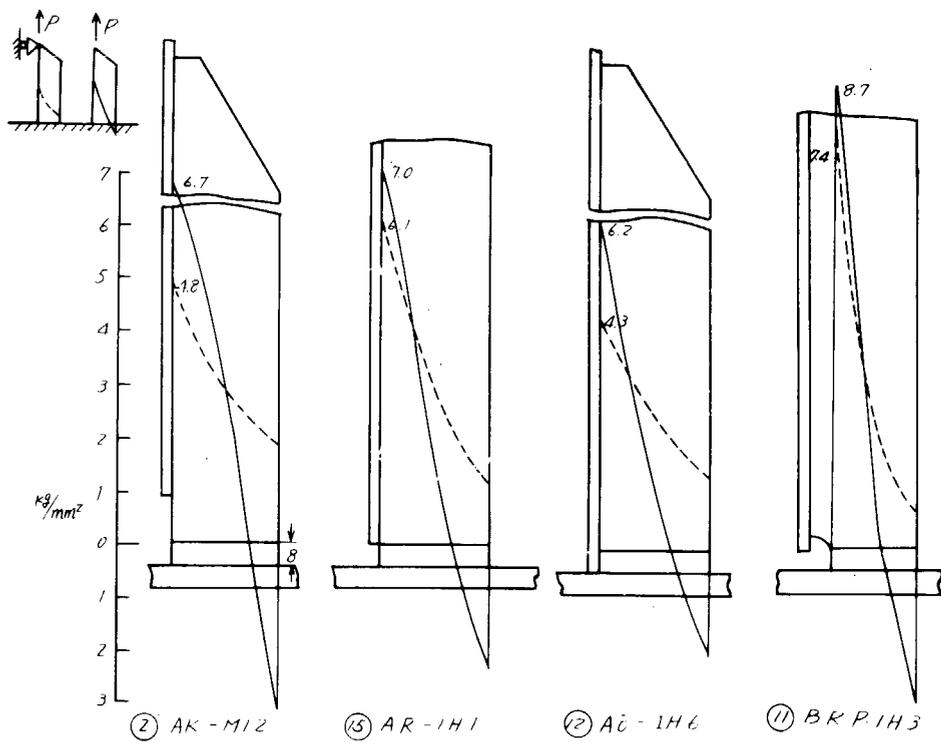
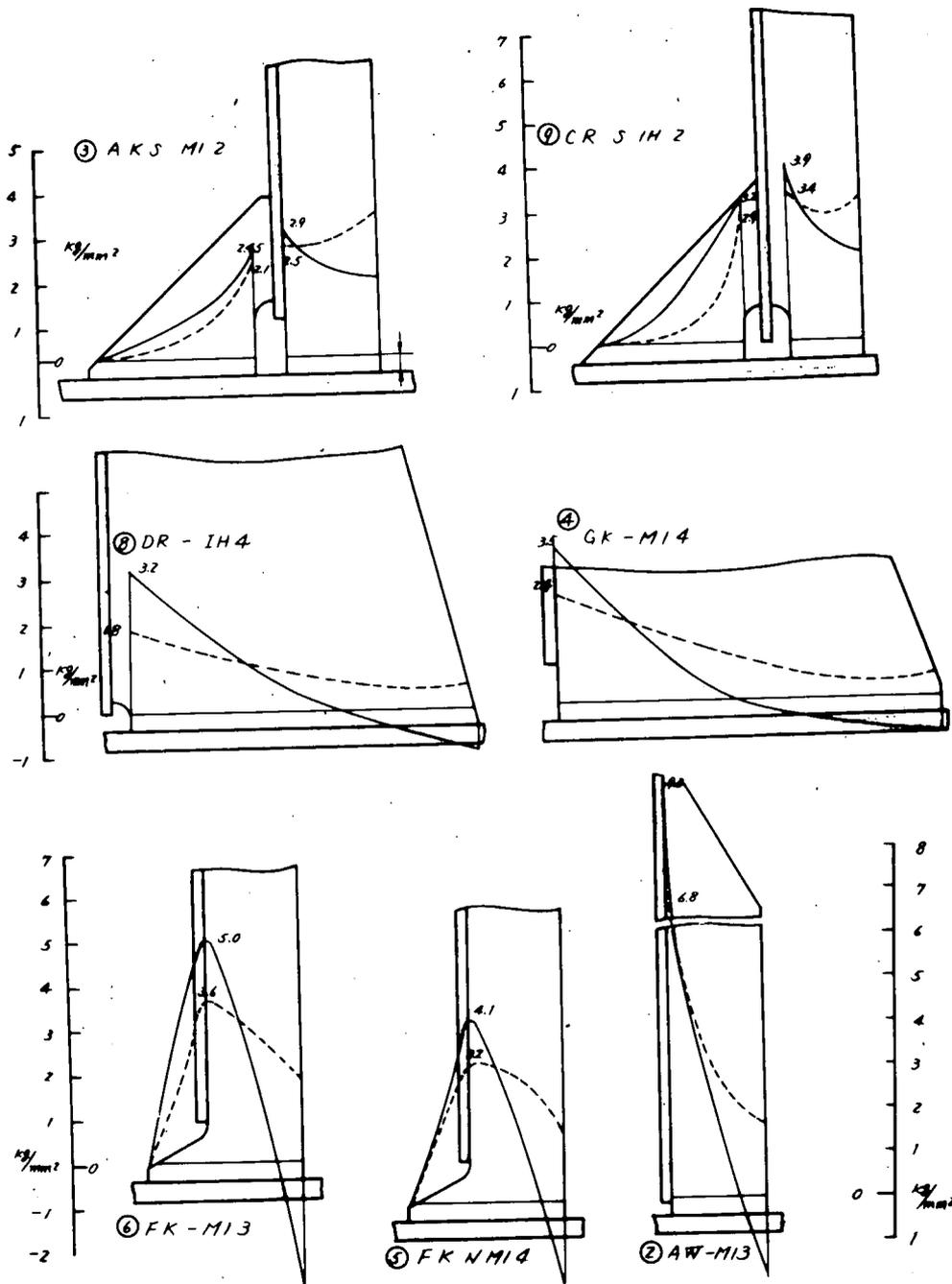


図 6.2.4 単位荷重 (P=1 ton) によるステイフナ応力分布



☒ 6.2.5

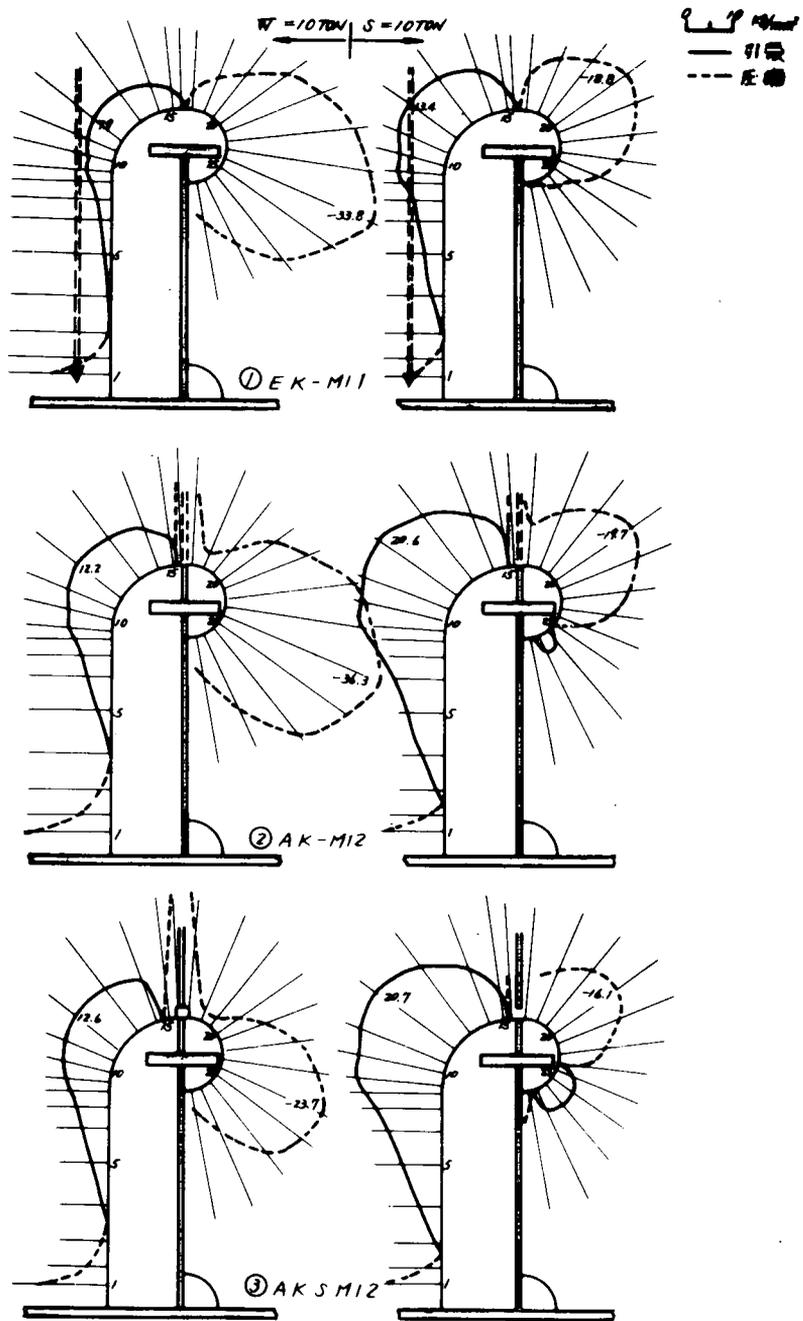


図 6.2.5 単位外力によるスロット周り発生応力

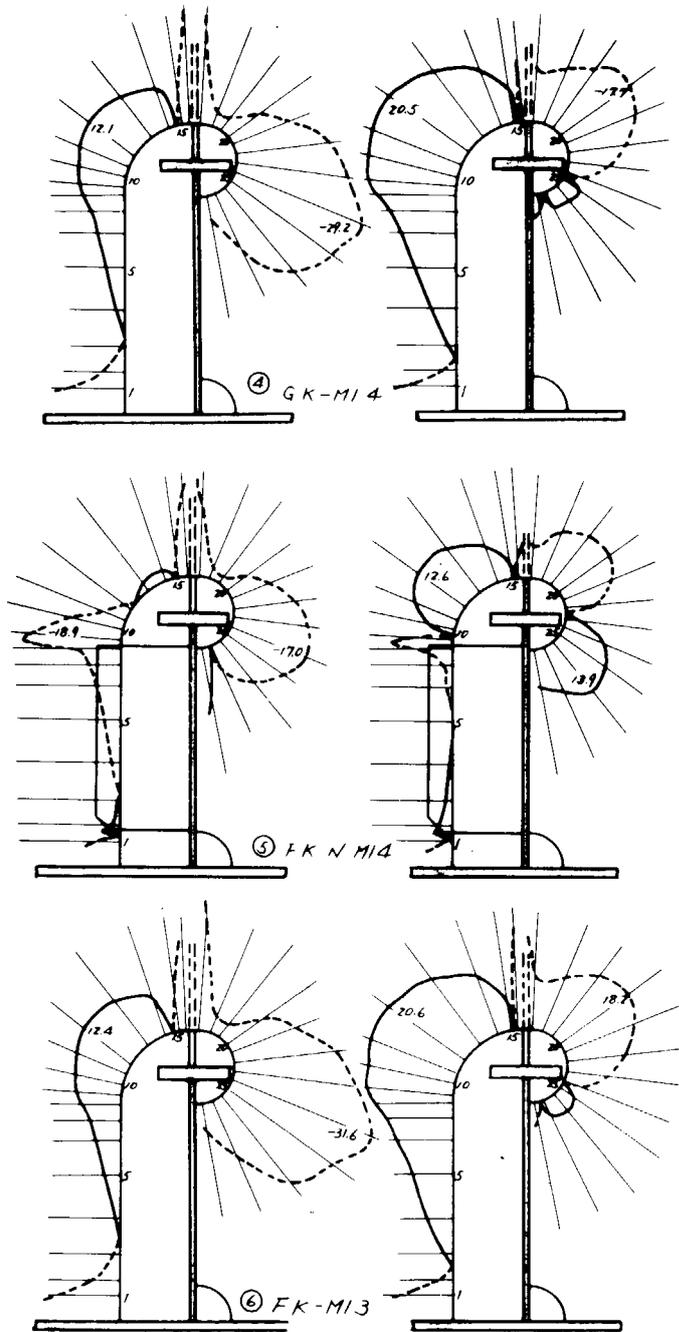
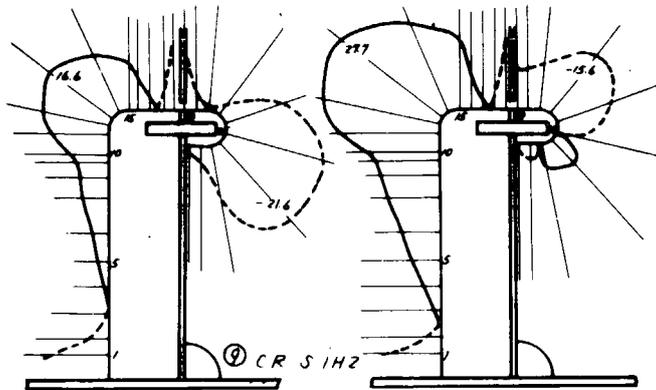
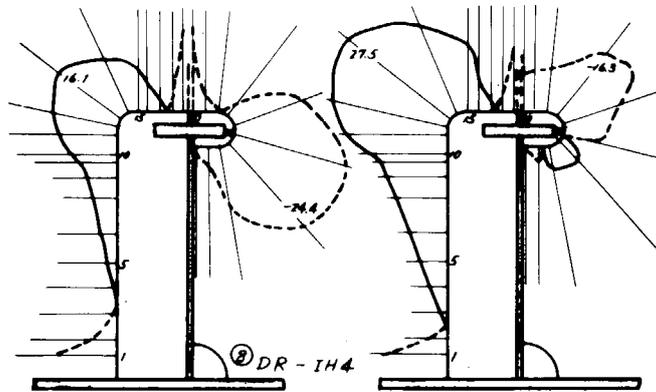
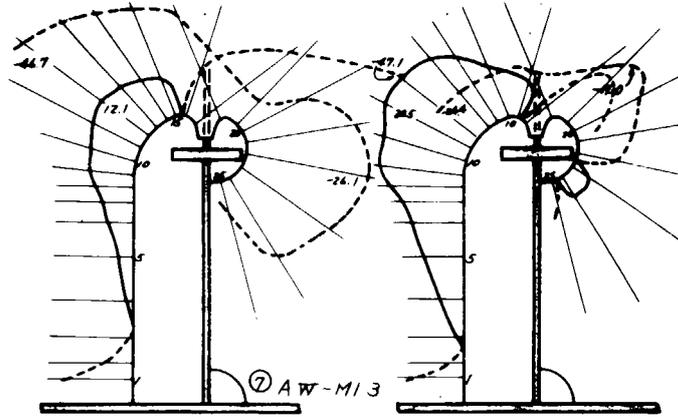
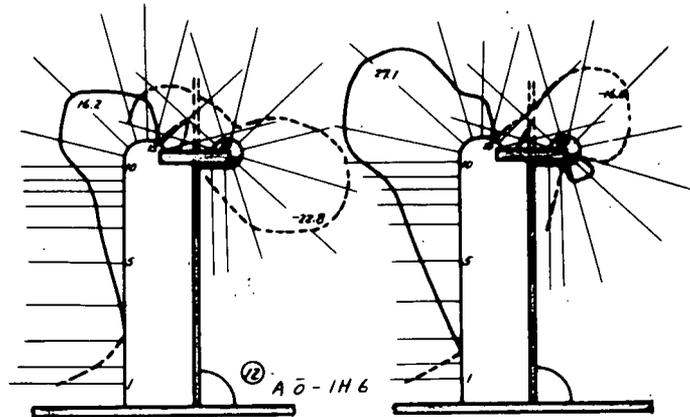
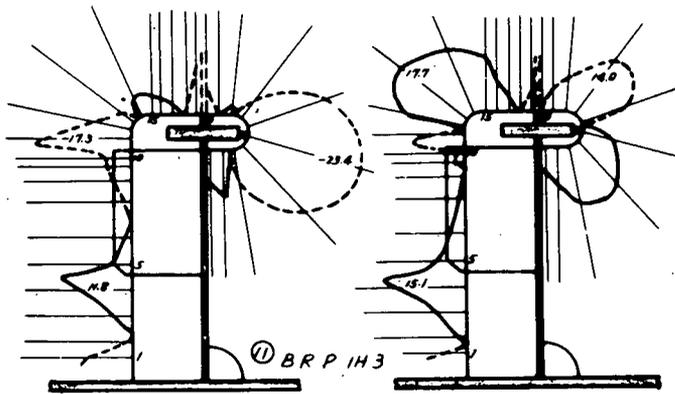
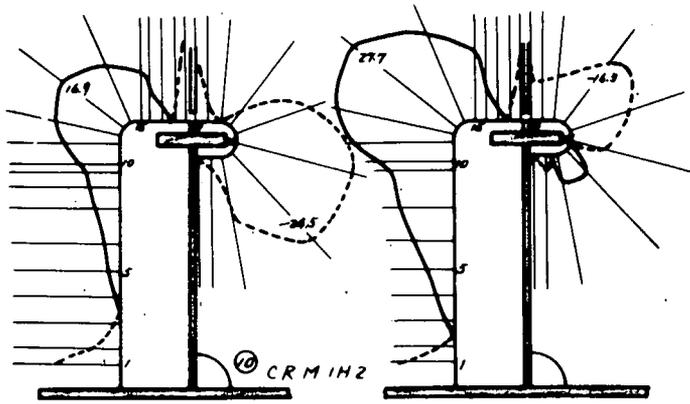


图 6.2.6



☒ 6.2.7



☒ 6.2.8

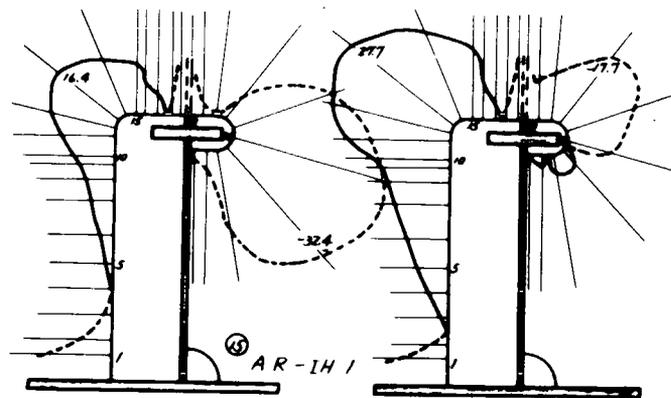
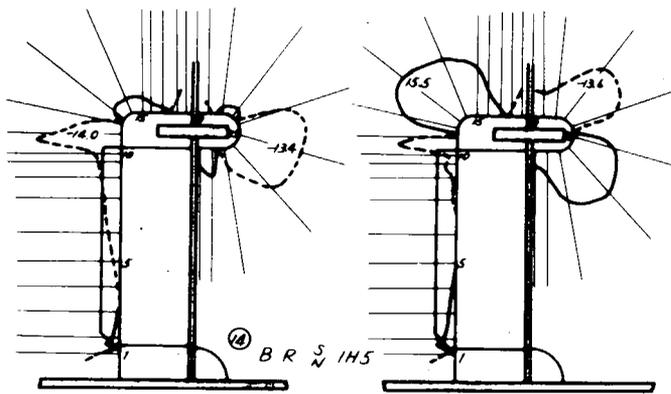
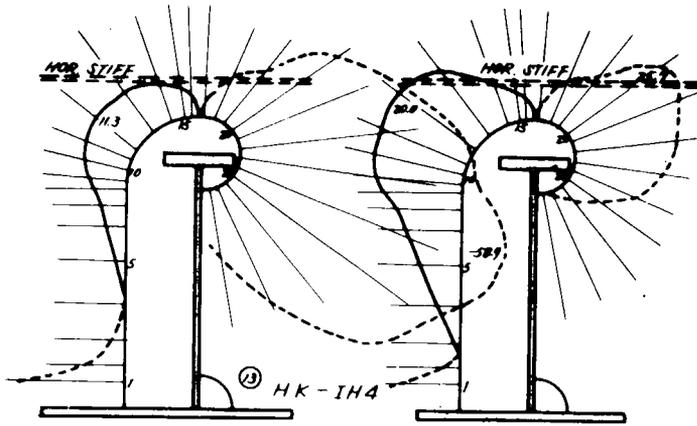


图 6.2.9

#### 6.2.4 小型船底模型静的試験結果との比較

表6.2.1の①～⑮のスロット・ステイフナ形式について水圧の $4 \text{ Kg/cm}^2$ に対する実験値と計算値を比較した。石播の実験結果は水圧 $0.75 \text{ Kg/cm}^2$ に対するものを、三井実験の $0.4 \text{ Kg/cm}^2$ の実験結果と比較検討のため、 $0.4 \text{ Kg/cm}^2$ に比例換算した。

一方、計算は、 $W = 0.4 \text{ Kg/cm}^2 \times 130 \text{ cm} \times 22.4 \text{ cm} = 1.16 \text{ t}$ で、また剪断力は

最も内側ステイフナ個所で $S = 0.5 W = 0.58 \text{ t}$

中間ステイフナ個所で $S = 1.5 W = 1.74 \text{ t}$

最も外側ステイフナ個所で $S = 2.5 W = 2.90 \text{ t}$

すなわち、前項の単位荷重に対する計算結果をこの実験荷重により換算重畳した。模型は、①EK-MI1が同じ向きにスロットが向いているのが1トランスに6個ある以外は、残りすべてが1トランスに2形式3スロットづつが、ロンジからの集中荷重 $W$ と剪断力 $S$ による応力がステイフナ基部に重畳する向きをとっている。

図6.2.10～図6.2.24に実験値と計算値の比較を示す。①～⑦については、ステイフナ基部は3スロット位置とも示している。(3スロット位置とも実験計測値があるため、他は最も内側のものと最も外側のもののみ計測値あり)

スロット周り応力分布は、ステイフナの剛性(すなわち、ウェブ面ランにおけるステイフナの剛性)のとり方により余り応力分布に影響しないので、1種類のみ示し、ステイフナ基部については、ステイフナ面FEM計算時のステイフナ頂部の水平変位拘束の有無により、大いに応力分布に影響があるので2種類示した。

② E-K-M17  
 (スロットの向き同じの場合) (ただし、ある)  
 スパ: 本スワ付(W+S)      本スワ付(W-S)

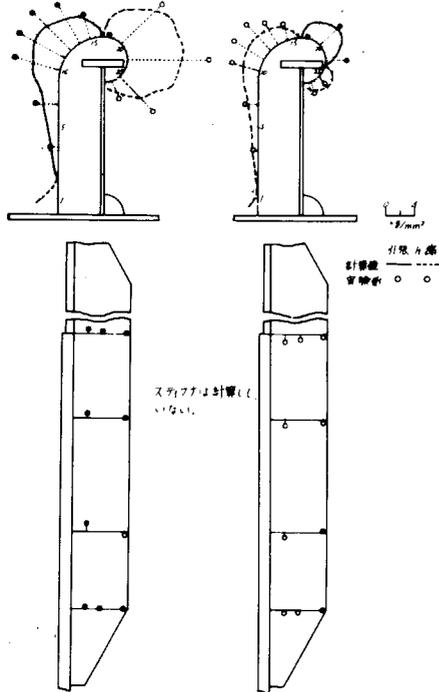


図 6.2.10

スロット周りとステイフナの応力分布

② A-K-M17  
 板(外側)のみ      板(内側)のみ

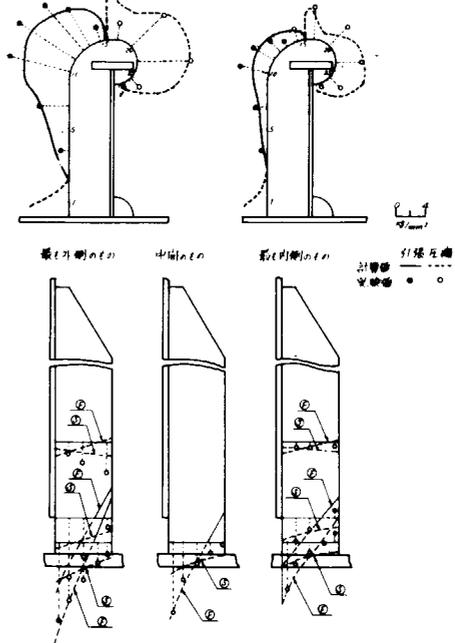


図 6.2.11

スロット周りとステイフナの応力分布

③ A-K-M17

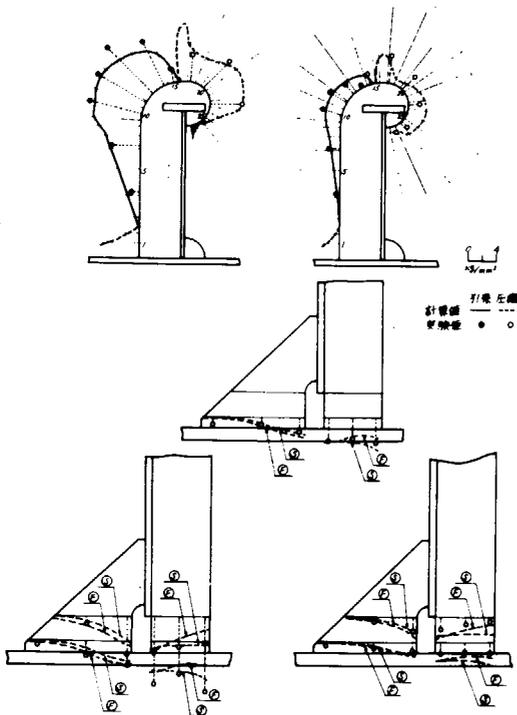


図 6.2.12

スロット周りとステイフナの応力分布

④ G-K-M17

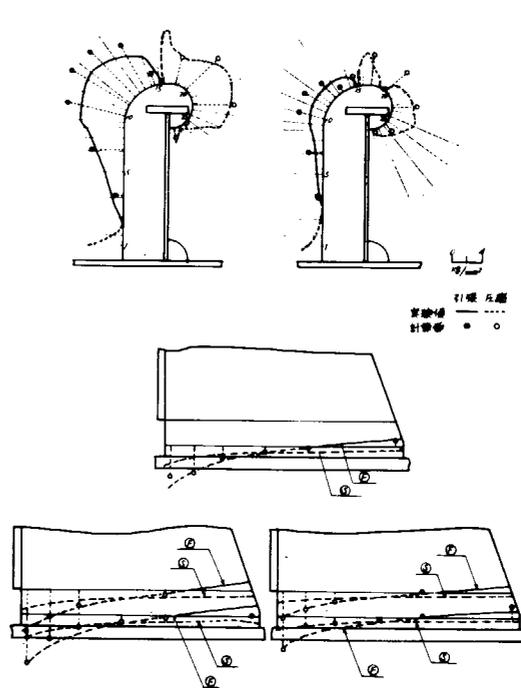


図 6.2.13

スロット周りとステイフナの応力分布

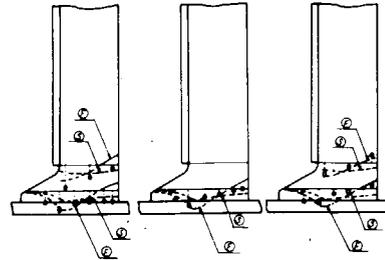
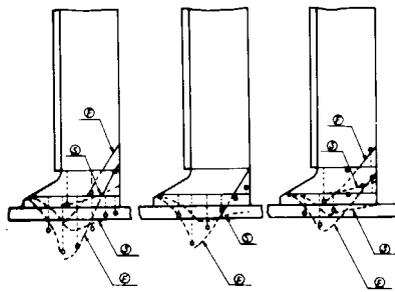
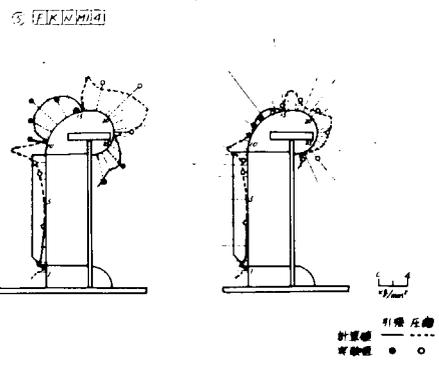
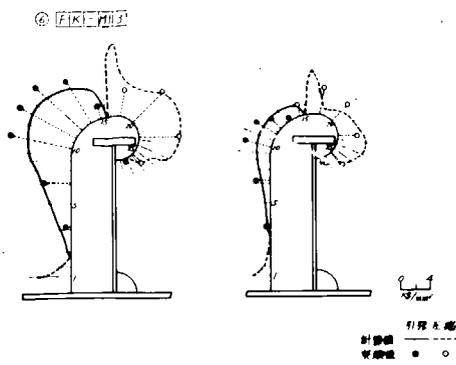


図 6.2.14

スロット周りとステイフナの応力分布

図 6.2.15

スロット周りとステイフナの応力分布

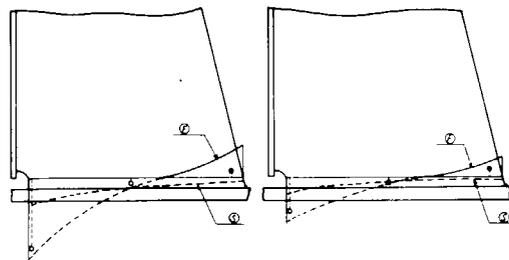
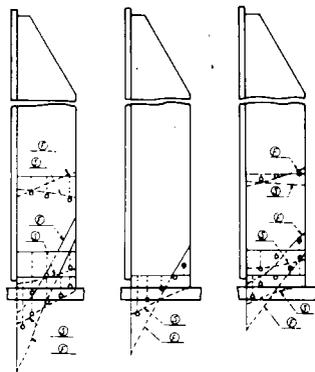
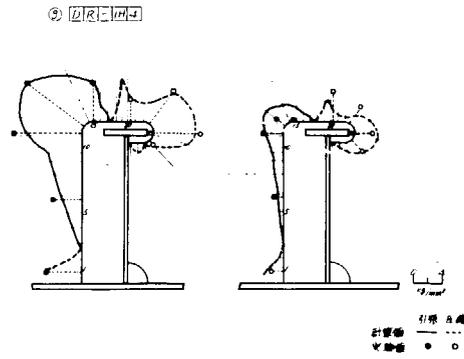
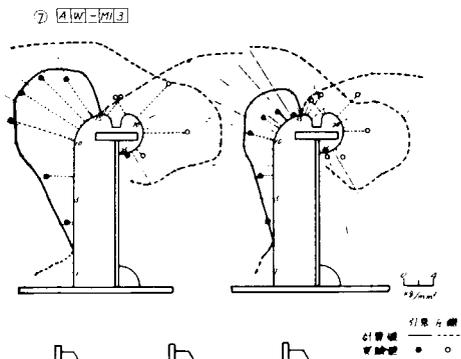


図 6.2.16

スロット周りとステイフナの応力分布

図 6.2.17

スロット周りとステイフナの応力分布

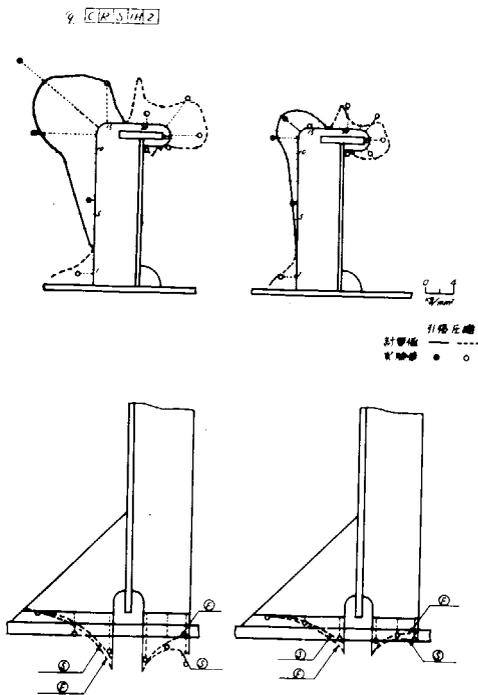


図 6.2.18

スロット周りとステイフナの応力分布

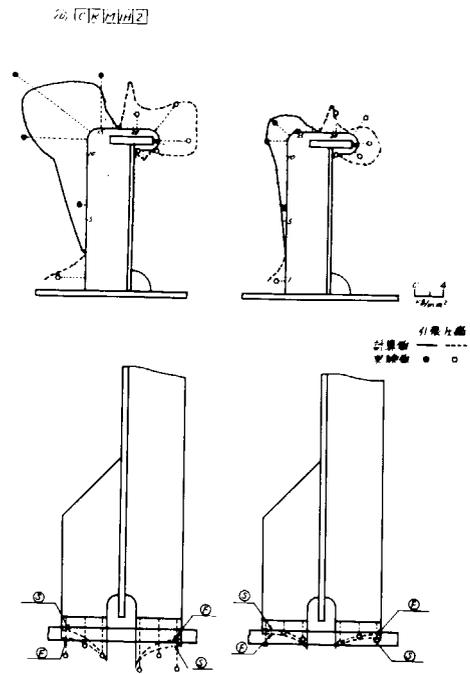


図 6.2.19

スロット周りとステイフナの応力分布

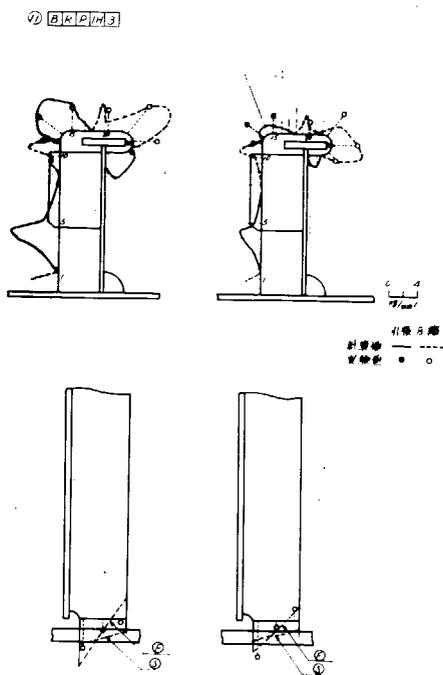


図 6.2.20

スロット周りとステイフナの応力分布

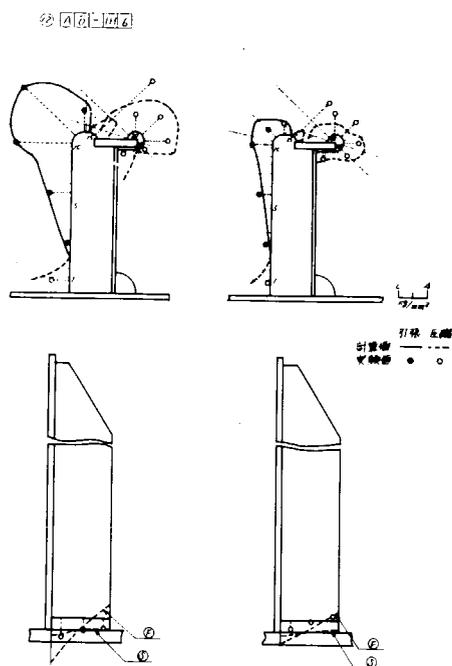
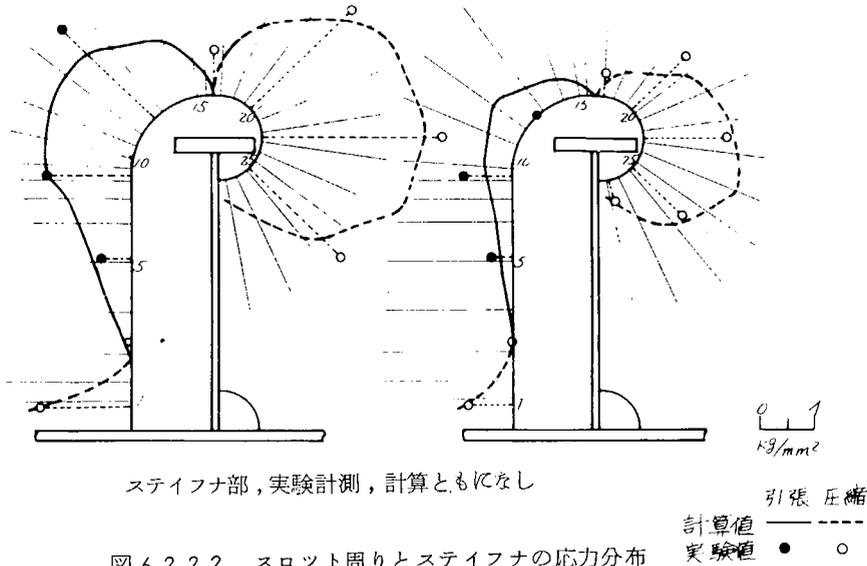


図 6.2.21

スロット周りとステイフナの応力分布

③ HK-1H4



ステイフナ部, 実験計測, 計算ともになし

図 6.2.2.2 スロット周りとステイフナの応力分布

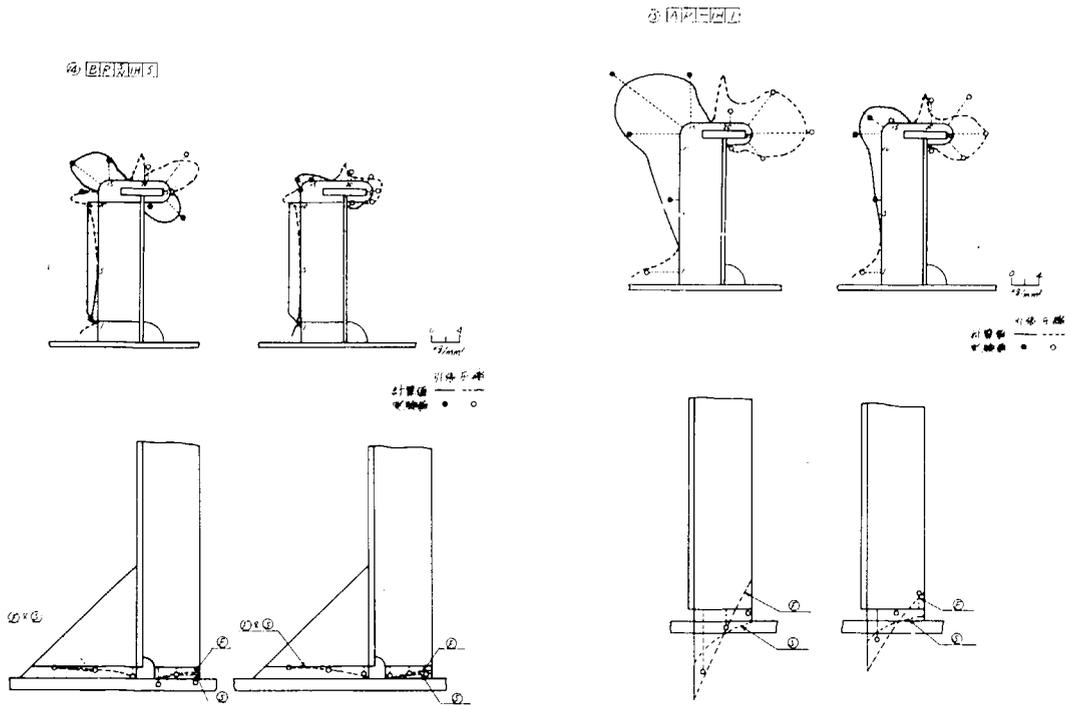


図 6.2.2.3

スロット周りとステイフナの応力分布

図 6.2.2.4

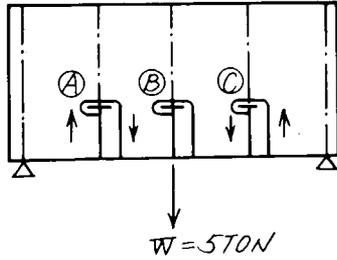
スロット周りとステイフナの応力分布

## 6.2.5 小型模型疲労試験静的試験結果との比較

当方で静水圧実験モデルの19種類のうち15種類について応力計算を行なった。この結果を疲労試験モデルにも適用する訳であるが、静水圧モデルと疲労試験モデルでは外板板厚が前者が6mmに対し、後者8mmを始めステイフナ切欠の形状が違うものがある。スロット周りに及ぼすステイフナ切欠形状による影響は、例えばフラットバーステイフナならフラットバーで切欠の有無により、あまり変わらないのではほぼ同じステイフナ形状のものを流用し、ステイフナ基部については、表6.2.2のように修正した。

表6.2.2 疲労試験モデルへの適用方法

モデルの略図	略号	スロット周縁応力適用モデル	ステイフナ基部発生応力適用方法
	ARS To 1-1 1-2 ARS Nk -	CRSIH2を流用	分担率 = $\frac{AR-IH1}{AK-MI2} \times AKSM12$ ; for W62.8%, for S25.9% 応力分布はAR-IH1とAK-MI2のちがいをAKSMI2について修正した。
	DR-To 2-1 2-2 DR-Nk -	DR-IH4を流用	DR-IH4を流用
	ARM Nk -	CRMIH2を流用	分担率 = $\frac{(A+M)の断面積}{(C+M)の"}$ $\times$ CRMIH2 ; for W53.7% for S22.0% 応力分布はM側はCRMIH2と同じ、A側はステイフナ面計算のCRMIH2とAKSMI2のstiff.のちがいをとりこんだ。
	BRMMh 1 2 3	CRMIH2を流用	分担率 = $\frac{(A+M)の断面積}{(C+M)の"}$ $\times$ CRMIH2 ; for W53.7% for S22.0% 応力分布の修正はARMN <sub>k</sub> -と同様にした。
	ARPNk -	BRPIH3を流用	分担率 = $\frac{Aの断面積}{Bの"}$ $\times$ BRPIH3 ; for W25.7% for S3.24% 応力分布はステイフナ面計算のAR-IH1とBRPIH3の比により修正した。
	AR-To A-1 A-2	AR-IH1を流用	AR-IH1を流用
	CK-Ka 1 2 3 6	AK-MI2を流用	分担率 = $\frac{Cの断面積}{Aの"}$ $\times$ AK-MI2 ; for W24.9% for S6.7% 応力分布はステイフナ面計算のAR-IH1とBRPIH3ではhsがちがうのであるがここでは両者の中間値とした。



$W=0$     $W=5\text{Ton}$     $W=0$   
 $S=-2.5\text{ton}$     $S=0$     $S=2.5\text{ton}$

図 6.2.25 負荷状況

示した。

図 6.2.26 ~ 図 6.2.38 に実験値と計算値の対比を示す。

静的試験の負荷状況は図 6.2.25 に示すごとくで、  
 $W$  は種々あるので、一応比較は  $W=5\text{ton}$  について  
 行ない、Ⓐ、ⓐ スロットも計測しているものについて  
 はⒶとⓐの平均値（絶対値の平均値）について計算値  
 と比較し、この比較は、ⓐスロットとして示している。  
 スティフナの応力分布は基部以外も計測しているもの  
 もあるが、基部以外の比較は略した。スティフナにつ  
 いては、スティフナ面 FEM 計算でスティフナ上端の  
 水平変位を拘束した場合ⓑと自由の場合Ⓒの 2 種類を

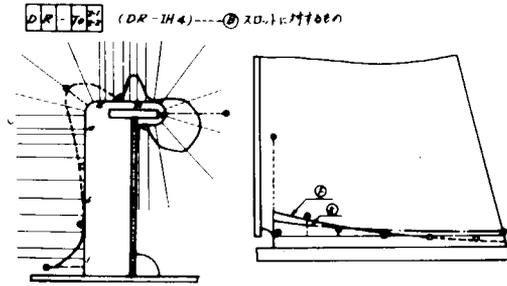


図 6.2.26 小型模型疲労試験結果との比較

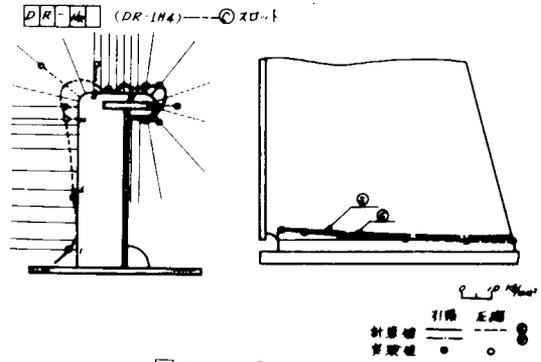


図 6.2.27

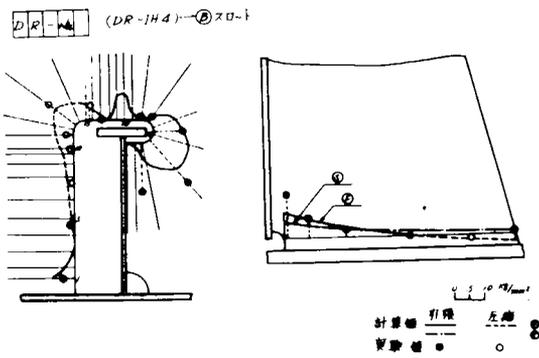


図 6.2.28

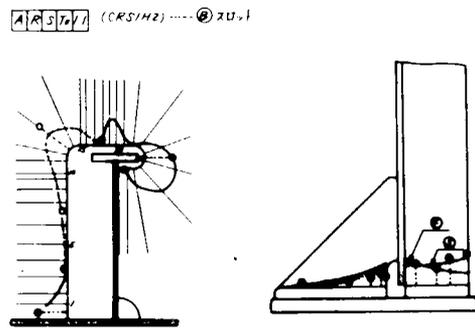


図 6.2.29

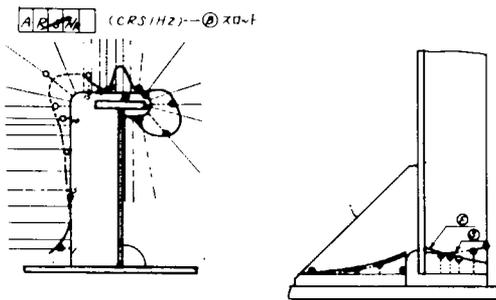


図 6.2.30

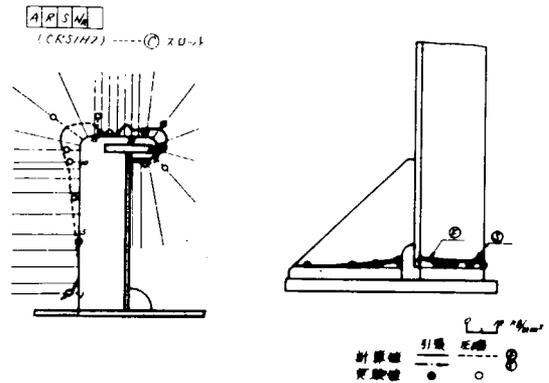


図 6.2.31

BRM (CMMH) --- ② XU-1

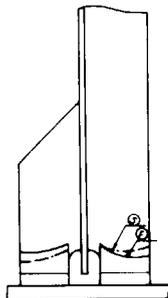
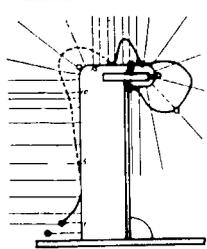


图 6.2.32

图 6.2.32



ARM (CMMH) --- ③ XU-1

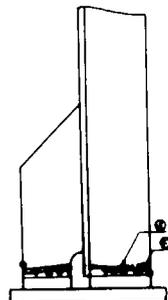
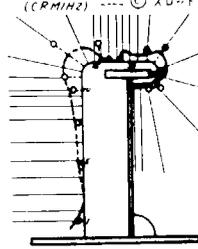


图 6.2.33

图 6.2.32

AKM (CMMH) --- ④ XU-1

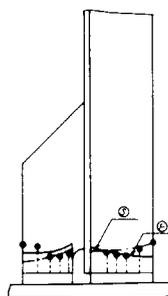
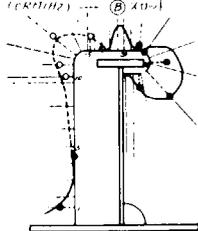
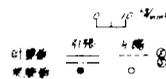


图 6.2.34



AKP (CMMH) --- ⑤ XU-1

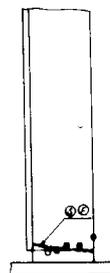
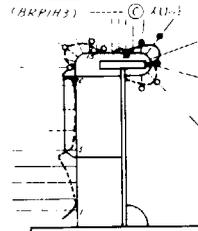


图 6.2.35

CK-AB (AK-MH) --- ⑥ XU-1

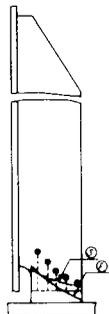
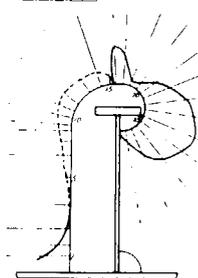


图 6.2.36

AK-AB (AK-MH) --- ⑦ XU-1

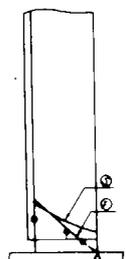
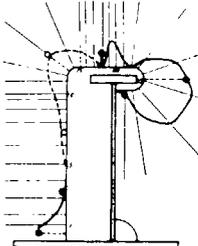
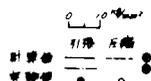


图 6.2.37



ARPR (BRP) --- ② スロツ

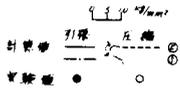
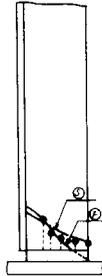
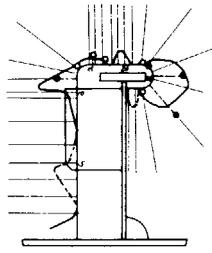


図 6.2.38

註) 計算値は( )の中のものを使用する。

## 6.26 考 察

### (1) 小型船底模型静的試験結果との比較について

ここでは、静水圧実験結果とスロット対策懇談会にて提示している、いわゆる三井千葉研式と FEM 計算により総合的に考察する。三井千葉研式の信頼性のチェック並びに最良スロット・ステイフナ形式の探索を行なう。

#### (a) 実験結果および計算値

実験値のナマ値全部についてはすでに3章にて示してあるのでここでは表6.2.3にステイフナ基部、スロット・フリーエッジ、トランスの剪断力、曲げモーメントを示すにとどめた。トランスの剪断力、曲げモーメント以外はすべて( )内が三井千葉研式による値であり( )外が実験値である。比較の基準圧力は $0.4 \text{ Kg/cm}^2$ に換算している。

表6.2.3について

#### ○ ステイフナ ;

$\sigma_{\text{mean}}$  ; 外側スロットのステイフナ基部の実験値から求めた平均応力および三井千葉研式による平均応力

Area ; ステイフナ基部断面積

$\sigma_{\text{max}}$  ; 外側スロットのステイフナ基部の実験値の最大値

$P_{\text{stiff}}$  ; 外側スロットのステイフナの分担力および三井千葉研式による分担力

$\text{cal/exp}$  ;  $P_{\text{stiff}}$  の計算値と実験値の比

#### ○ フリーエッジ ;

$\sigma_{R1, R2}$  ; 外側スロットでの実験値の最大値と三井千葉研式による値

$\text{cal/exp}$  ; 計算値と実験値の比

#### ○ ステイフナ分担率(1) ;

for W, for S ; ロンジからの集中荷重および剪断力によるそれぞれの分担率で( )内に三井千葉研式によるもの、\*はウェブ面計算から求めたもの、最上段は外側と内側のスロット位置のステイフナの平均応力からWによるものとSによるものを分離した結果の値である。

#### ○ ステイフナ分担率(2) ;

FEMステイフナ面計算結果から求めたステイフナ分担率

#### ○ 剪断力 ;

外側および内側スロットのそれぞれの剪断力の実験値と梁理論による値

#### ○ 曲げモーメント

外側および内側スロットのそれぞれの曲げモーメントの実験値と梁理論による値

表 6.2.3 静水圧実験結果及び計算値(0.4%) ( ) 内千研式による計算値&米PBM値

( ) 外計測値

層 号	層 名	スライファ		フワーレンツ		スライファ相違(1)		新 力		層外側のスロート		層内側のスロート	
		gmax (kg/cm <sup>2</sup> )	gmin (kg/cm <sup>2</sup> )	Cal (kg/cm <sup>2</sup> )	Cal (kg/cm <sup>2</sup> )	Cal (kg/cm <sup>2</sup> )	Cal (kg/cm <sup>2</sup> )	S (kg)	Cal (kg)	S (kg)	Cal (kg)	Cal (kg/cm <sup>2</sup> )	Cal (kg/cm <sup>2</sup> )
1	SA-W1.1												
2	AK-W1.2												
3	AKSH1.2												
4	OR-W1.4												
5	FRW1.4												
6	FR-W1.3												
7	AR-W1.3												
8	DR-IR.4												
9	CRSH.2												
10	CRMR.2												
11	BR-IR.3												
12	AC-IR.6												
13	HR-IR.4												
14	BRSH.5												
15	AR-IR.1												
16	BR-IR.1												
17	CR-IR.5												
18	BR-IR.5												
19	RI-IR.6												

注: 1. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。2. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。3. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。4. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。5. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。6. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。7. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。8. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。9. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。10. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。11. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。12. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。13. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。14. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。15. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。16. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。17. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。18. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。19. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。20. 計算値は千研式による計算値と米PBM値の平均値である。

(b) トランスの剪断力および曲げモーメントについて

剪断力については、 $cal/exp$  が外側スロット位置で約0.7~1.4、内側slot位置で約0.5~1.0で中には実験値が非常に小さいものもある。3軸ゲージ貼布が5~6点で少ないことも、 $cal/exp$  にちらばりが出た原因であろうと考えられる。

曲げモーメントについては、外側スロット位置では固着度は0.35~0.65程度で内側スロット位置では0.7~0.85程度である。

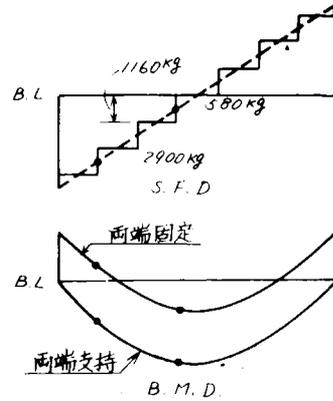


図 6.2.39

S.F.D. と B.M.D

(c) スティフナについて

スティフナ面計算の定性的応力分布は、図6.2.40に示すように上端の横方向変位を拘束するときとしないときで大きく変ってくる。関東スロット対策懇談会において示している $f$ のチャートは図6.2.40 b. で求めたものである。外側スロット位置では a. に内側スロット位置では b. に近いと考えられる。外側スロットのほうがS.F.が大きく計測応力値も集中荷重と剪断力が重畳して大きいので、比較的計測値に信頼性がある。そこで表6.2.3のスティフナの $\sigma_{mean}$ 等は外側スロットのものを示している。しかし、この外側スロットは面内には非常に剛な模型周壁に隣接しており、トランスのフェイスの変位拘束は実船の場合より、はるかに強いので留意を要する。

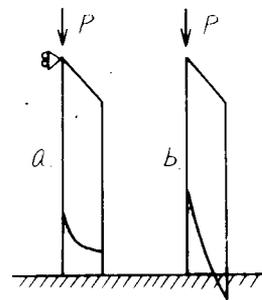


図6.2.40 スティフナ面計算の拘束条件

(i) スティフナの分担率について

三井千葉研式は当初図6.2.40のbのスティフナ面計算とウェブ面計算のFEM計算により信頼性を高めてきた。スティフナ面計算においては図6.2.41②のようにトランス・ウェブに対してスティフナが一方にしかない場合、上端完全自由であると大きな曲げモーメントが働く。そのため、ウェブに相当する伸縮バネには軸力に重畳する多大な曲げによる応力が働き、一方、スティフナのフリー・エッジ側ではウェブ側と逆符号の応力となる。結局、スティフナの分担率が低下することになる。しかし、図6.2.41③のようにトランス・ウェブの両側に補強材があるときは、反力分布は上端の自由拘束にかかわらず、ほぼ一定であるためスティフナの分担率は一定である。これは表6.2.3のスティフナ分担率(2)でも示されている。

われわれは、ウェブ面については集中荷重 $W$ および剪断力 $S$ に対して別個に分担率を求めるが、スティフナ面については両外力に対して一つの計算しか行なっていないので一見不合理と思える。しかし、これは次のように考えたのである。ウェブ面計算ではウェブは $W$ と $S$ により大いに挙動が異なるが、パネル中心線上のスティフナは分担率が異なるだけで応力分布形状には影響はない。スティフナ面計算のスティフナの応力積分値 $P_s$ をウェブ面計算のスティフナの分担力に合わせることで適合性を保持している。ウェブ面とスティフナ面を独立に計算してこのとき $W$ に対しては本来ならスティフナの分担率は両者で一致するべきであるが、ウェブ面計算のときはウェブは面外変形は考慮されておらず、スティフナ面計算のときはスティフナは面外変形は考慮されてい

ない訳で、両面の適合性はとれない性格をもっているのである。

このたびの F E M 計算は、ほぼノウハウも固つた段階での  $f$  曲線<sup>\*</sup> をアスペクト比、 $h_s$  長さを考慮して修正したものをステイフナ面のステイフナの剛性に使用している。先に 6.2.4 および 6.2.5 項で示したように実験値と相関を見ても、表 6.2.3 のステイフナの分担率(1)と(2)の差程度はあまり多くないと見てよからうと考えられる。後にこの点をチェックした結果を 6.2.6-(3)項に示す。

ステイフナ分担率(1)のウェブ面 F E M 値と三井千葉研式とは良好な一致を見ているが、実験値から求めた  $W, S$  に対する分担率は計算値とはかけはなれている。これは  $\sigma_{mean}$  が外側スロットと内側スロットでは外力の大きさに比例して大きくなっていないため、外側スロット位置ではステイフナ上端が自由の状態から離れ、 $\sigma_{mean}$  が内側スロットに比較して大きいため、 $S$  による分担率が多大に出ることになった。

トランスの両側にステイフナ・メンバーがあるタイプはこの影響が比較的少ないので計算値に少しは近づいている。

表 6.2.3 の  $P_{stiff}$  は外側スロット位置のステイフナの実験値と計算値を示しているが、計算値はステイフナ上端自由として求めたものである点を考慮すれば、三井千葉研式はかなり信頼がおけることがわかる。 $cal/exp$  の平均値は約 0.9 (⑫は除外) となり、ある程度ステイフナ上端は拘束されているとはいうものの定量的把握はできないが、どちらかといえば拘束度合は少ないと見るべきであろう。

3.3 「三井造船千葉研究所における試験」において、No. 4 トランス (スロット・ステイフナの組合せは、④ G K - M I 4 と ⑤ F K N M I 4 ) のロンジの上下方向変位およびトランス・フェイスの横方向変位が計測されている。

図 3.3.4 3 (1) および (2) をみると、トリツピング・ブラケットがあるからといってロンジの上下方向変位・トランスフェイスの横方向変位が阻止されていることは認められない。トリツピング・ブラケット位置で不動と仮定し、トランスフェイスの位置のステイフナに対するバネ定数  $K$  を  $K = \infty$  とする考え方は、今回の実験からは適当でないということがわかる。

ステイフナとロンジの相対角変化により引き起こされる曲げモーメントによる応力が大きいこと、さらにシア・ラグによりステイフナの曲がり引き起こされ、これによる応力が重畳することを考えると、ステイフナ応力の解析時にステイフナのみ取り出し、ロンジとの取合部で変形なし、すなわち、ロンジは剛としてステイフナとの相対角変化を取り込まないなら、ステイフナ上端を  $K = \infty$  として解析をするほうが良いと思われる。(  $K = \infty$  としても基部にはモーメントが発生することはするが、量的に少ないからである。) 6.2.4 項において、ステイフナ上端が自由の場合と拘束 (  $K = \infty$  ) の場合の応力分布の中間を実験値がとることが示されており、どちらかといえば  $K = 0$  とした場合に近いことから、 $K = \infty$  とすることは適当でないことがわかる。

(ii) ステイフナの応力集中係数  $F$  について

表 6.2.4 に各型式ステイフナの最も外側のものにつき計測点の外挿としての  $\sigma_{max}$  と  $f_{exp} = \sigma_{max} / \sigma_{mean}$ 、 $f_{cal}$  およびスロット対策懇談会の  $f$  を示す。 $f_{cal}$  ( $y=4$  mm) のもとになった応力分布はすでに図 6.2.1 0 ~ 図 6.2.2 4 に示してあるので、ここでは  $f_{cal}$  ( $y=4$ ) のもとになる応力分布を図 6.2.4 2 に示す。実線はステイフナ上端フリー、破線は拘束に対応する。図 6.2.4 3 は表 6.2.4 を図示したものである。 $y=4$  はスロット対策懇談会で与えている  $f$ -チャートの対応位置にほぼ等しい。

なお、 $f_{cal}(y=4)$  の⑯~⑲は日立の F E M 計算結果 ( $y=4.5$  に相当) を示している。

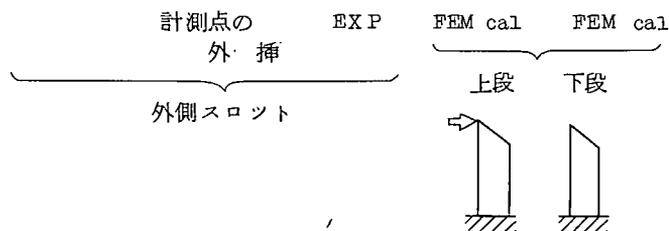
\* スロット対策懇談会資料 S.L-8-92-A

表 6.2.4 ステイフナの応力集中係数  $f$

	$\sigma_{\text{mean}}$ ( $\text{kg/mm}^2$ )	$\sigma_{\text{max}}$ ( $\text{kg/mm}^2$ )	$f_{\text{exp}}$ ( $y=8$ )	$f_{\text{cal}}$ ( $y=8$ )	$f_{\text{cal}}$ ( $y=4$ )	$f$ (スロット)
②	- 5.50	- 12.50	2.27	1.48 3.60	1.63 3.95	4.15
③	- 3.04	- 6.60	2.17	1.90 2.20	2.02 2.53	4.35
④	- 1.57	- 8.10	5.16	2.50 7.45	2.56 7.50	6.30
⑤	- 2.10	- 2.55	1.21	1.50 2.90	1.43 2.57	3.20
⑥	- 5.37	- 7.95	1.48	1.70 3.20	1.72 2.88	3.20
⑦	- 4.50	- 7.60	1.69	1.55 3.34	2.22 4.51	6.00
⑧	- 2.30	- 13.34	5.80	2.35 6.30	2.42 6.34	8.35
⑨	- 3.50	- 6.93	1.98	2.15 2.70	2.25 2.80	4.10
⑩	- 5.54	- 8.54	1.54	1.15 1.40	1.23 1.45	-
⑪	- 1.89	- 4.80	2.54	2.10 5.19	2.20 5.26	6.80
⑫	- 2.24	- 2.57	1.15	1.75 3.68	1.84 3.84	8.00
⑭	- 0.85	- 2.56	3.01	3.15 3.53	3.20 3.57	-
⑮	- 4.85	- 12.80	2.64	2.10 4.10	2.15 4.14	5.60
⑯	- 6.48	- 18.40	2.84	X	3.31	6.80
⑰	- 5.61	- 10.05	1.79		5.80	
⑱	- 1.89	- 3.79	2.01		3.07	6.80
⑲	- 5.54	- 16.00	2.89		3.06	6.80

← 本模型のスケールでは  $y=4$  におけるものを表現したことになっている

← ウェブがロンジフェイスに付いている



注;  $f_{\text{cal}}(y=4)$  の ⑯~⑲は日立 FEM 計算値による。

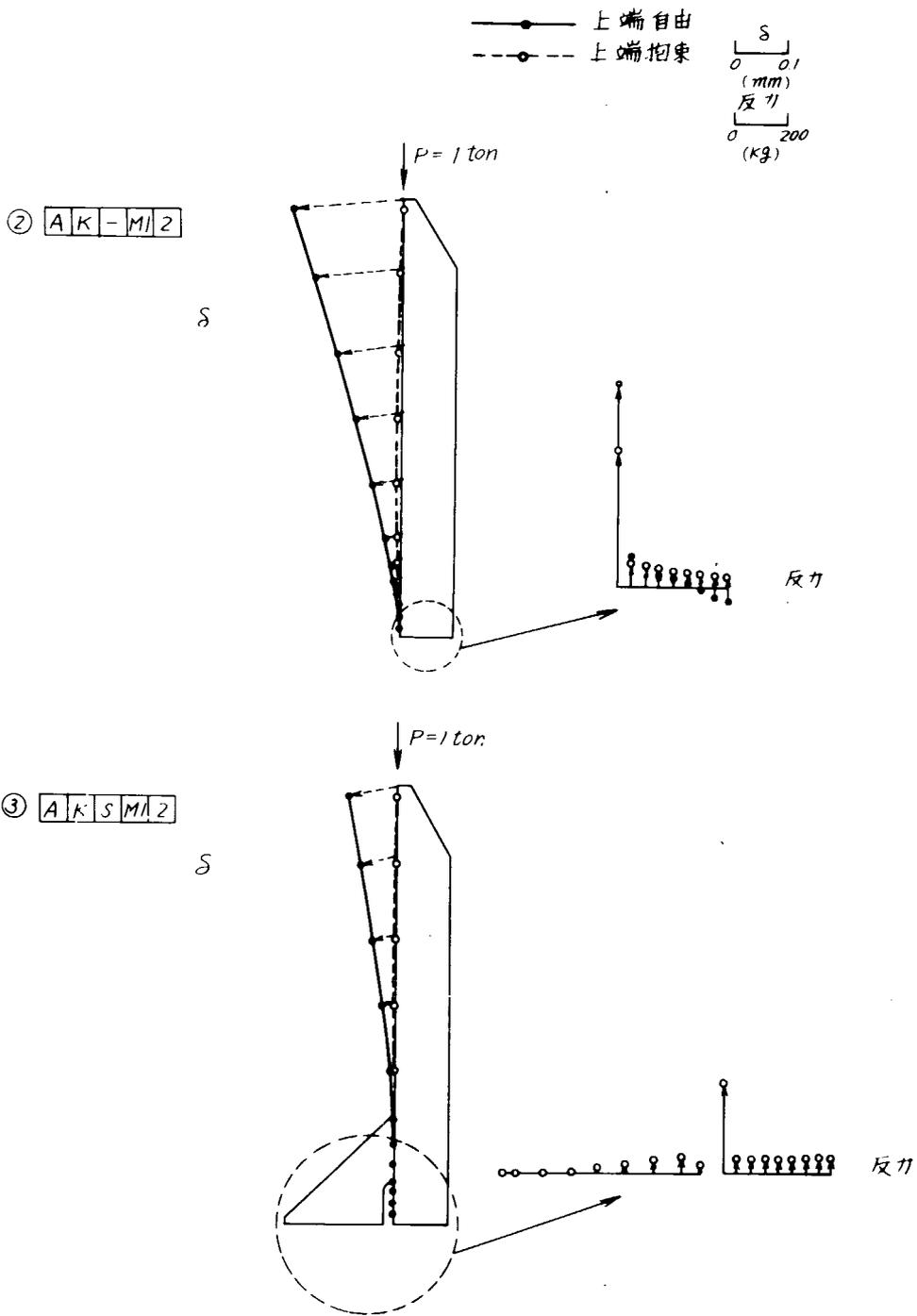


図 6.2.4 1 スタッフナの変位と基部の反力分布

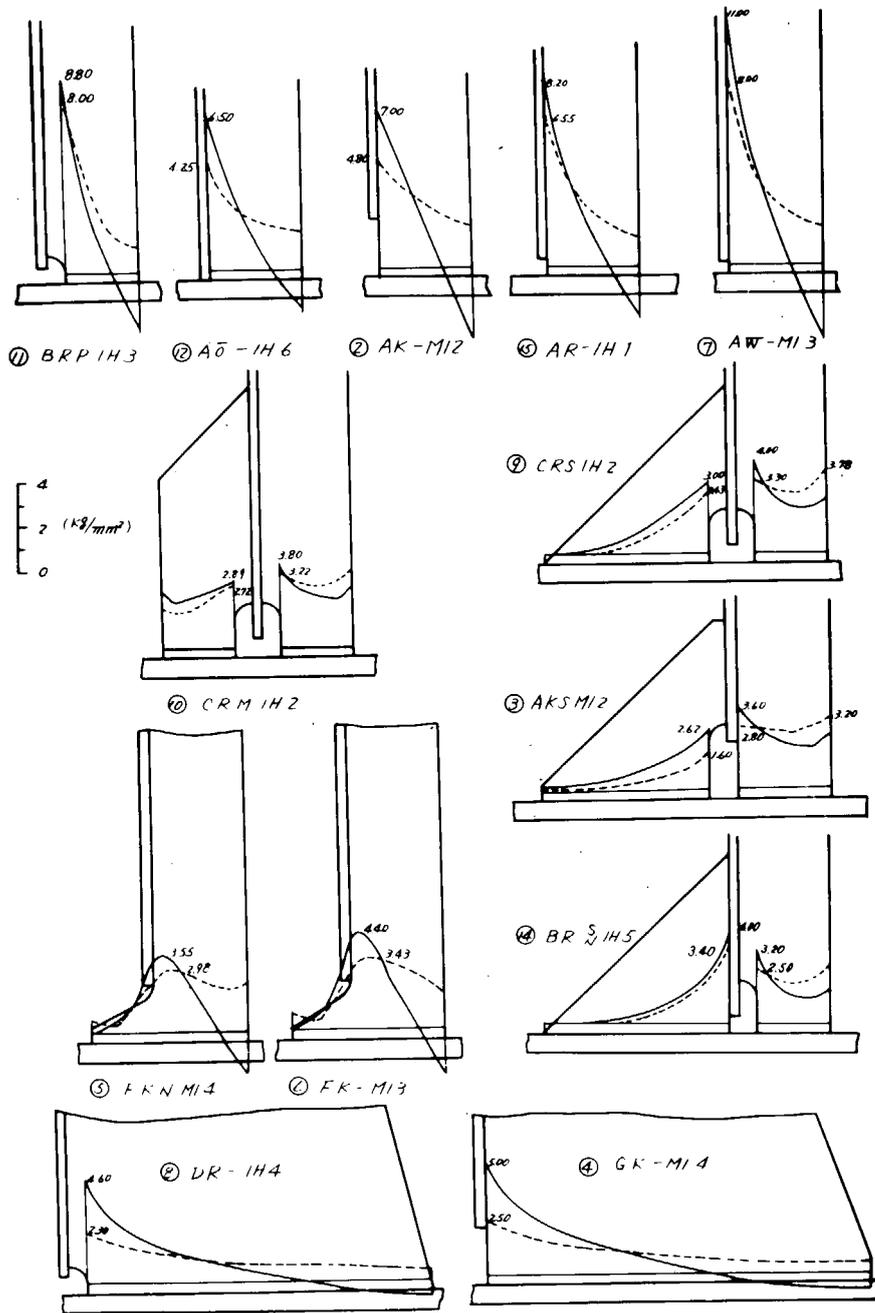


図 6.2.4 2 各ステイフナの  $h=4\text{ mm}$  の  $p_y$  分布 ( $P=1\text{ ton}$ )

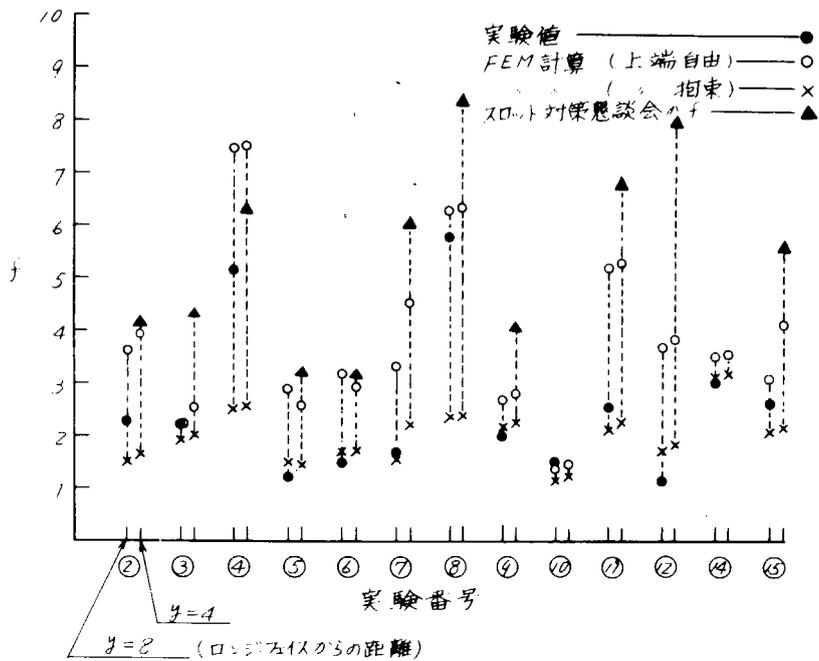


図 6.2.4.3 スティフナの応力集中係数  $f$

図 6.2.4.3 によると、 $y=8$  mm の位置の  $f$  は、ほぼスティフナ面ランの上端自由と拘束の間に位置していることから、 $y=4$  においてもこの傾向を示すと考えられる。同図にスロット懇談会の  $f$  を示しているが、同  $f$  はこの度の計算よりも大きめに見つもつていることになる。今回はスティフナ基部の応力分布のウェブ側のフリーエッジへの外挿をやや鈍に見つもつた感があり、スロット懇談会はこの点を安全側にもつて行くよう心したから、大きめに見つもつた結果となつた。

(C) スロットのフリーエッジ応力について

表 6.2.3 の  $\sigma_{R1}$ 、 $\sigma_{R2}$  の実験値計算値を図 6.2.4.4 に図示する。スロットのフリーエッジ応力は、R1 部の W による応力  $\sigma_{WR1}$  のみスティフナ基部の剛性が関与するが、その他はスロットの形状によつて決まってしまう。一部を除いて測定誤差を考えるとほぼ計算値と実験値は合っているが、概して  $\sigma_{R1}$  は計算値が大きく、 $\sigma_{R2}$  は計算値のほうが小さい。

$\sigma_{R1}$   $\sigma_{R2}$   
 実験値 ● ○  
 計算値 ■ □

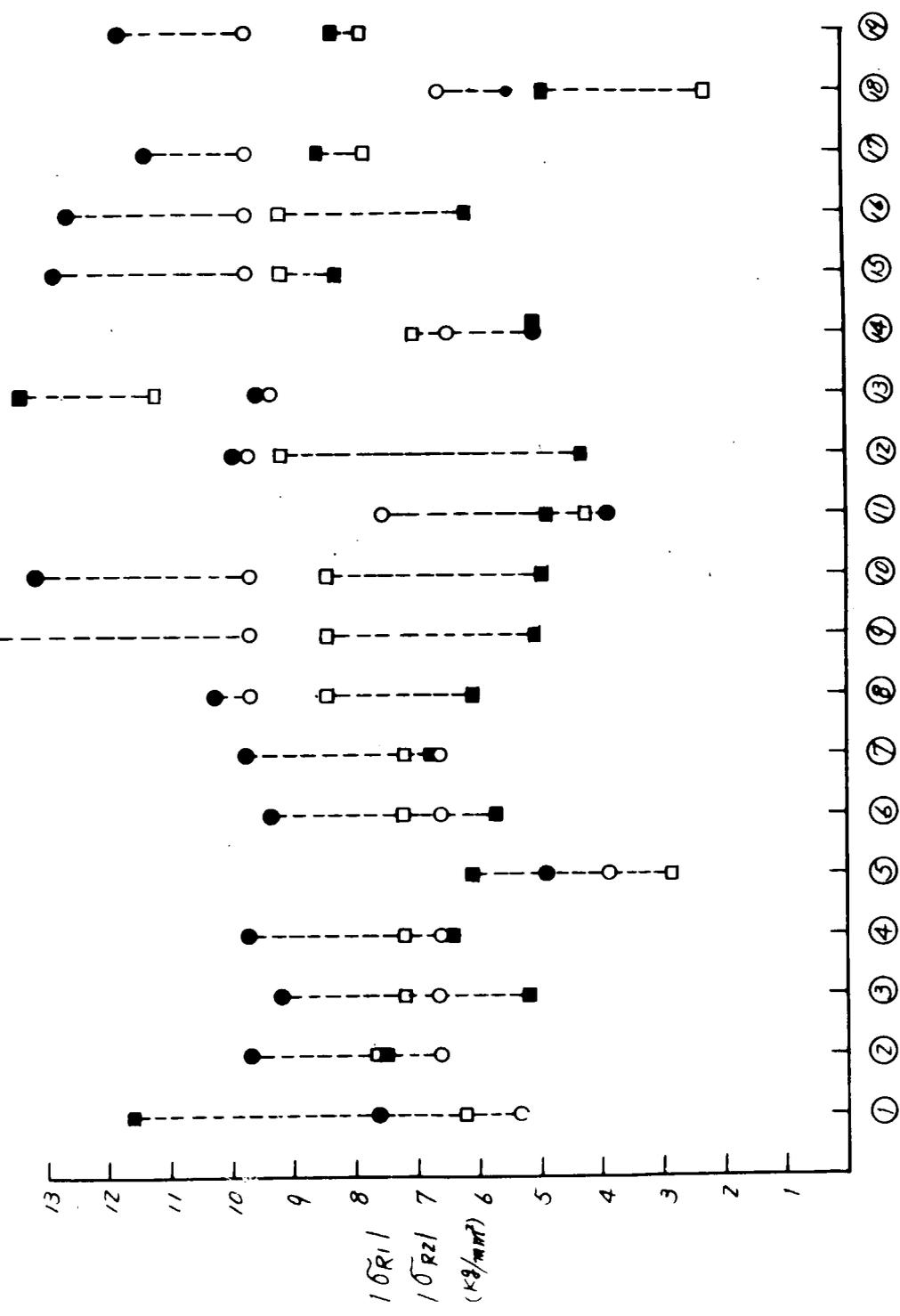


図 6.2.4 フリーエッジ応力

(e) スロットとステイフナ形状の各部応力に及ぼす影響

実測値を主体にして述べる。ステイフナ基部計測点が②～⑦と⑧～⑱で異つているため、stiffの最大応力値については $y=4\text{ mm}$ に換算した値について比較検討する。まず比較しやすいように各部の $\sigma_{\max}$ を表6.2.5に示す。

表6.2.5 各部応力の最大値

( $\text{Kg/mm}^2$ )

番号	スロット	ステイフナ	略称	$\sigma_{\text{stiff}}$	$\sigma_{R1}$	$\sigma_{R2}$
①			EK-MI1	-	-11.62	7.62
②			AK-MI2	-13.60*	-7.44	9.70
③			AKSMI2	-7.35*	-5.20	9.20
④			GK-MI4	-8.26*	-6.40	9.75
⑤			FKNMI4	-2.34*	-6.10	4.90
⑥			FK-MI3	-7.68*	-5.70	9.35
⑦			AW-MI3	-10.72*	-6.75	9.75
⑧			DR-IH4	-13.70*	-6.06	10.26
⑨			GRSIH2	-7.23*	-5.03	14.44
⑩			CRMIH2	-8.90*	-4.93	13.13
⑪			BRPIH3	-4.90*	-4.79	3.90
⑫			AO-IH6	-2.71*	-4.27	9.90
⑬			HK-IH4	-	-13.32	9.54
⑭			BR <sub>N</sub> <sup>S</sup> IH5	-2.60*	-5.02	5.08
⑮			AR-IH1	-15.10*	-8.20	12.77
⑯			BR-IH1	-24.00**	-6.11	12.56
⑰			CI-IH5	-13.10**	-8.48	11.28
⑱			BRNIH3	-4.92**	-4.85	5.34
⑲			BI-IH6	-20.80**	-8.22	11.70

\* 図6.2.4.3により修正したもの

\*\* 図6.2.4.3の $y=1.5$ のFEM計算による $f$ と $y=4$ のFEM計算による $f$ のちがいはほぼる:2とみて、表6.2.4の $\sigma_{\max} \times 1.3$ を示した。

(i) スティフナ応力に及ぼす影響

(イ) スロット形状

②⑦⑫⑮はA型スティフナ

⑫、⑦、⑮、②の順に $h_s$ は長くなり、 $R$ は⑫⑦⑮は、ほぼ同じで、②だけ大きいから②がもつ $\sigma_{stiff}$ は小さくなるべきであり、また⑰も $l_1$ が他と比べて短いから小さいはずであるが、⑦が以外に小さい。

⑯⑲はB型スティフナ

⑯はRスロット、⑲はIスロットで⑲のほうがウェブ分担分が多いので⑯の $\sigma_{stiff}$ のほうが大きくなるべきであり、そのとおりになっている。

⑧はD型スティフナ、④はG型スティフナで切欠の有無のちがいはあるが、いずれもトリッピング・ブラケットである。④はKスロット、⑧はRスロットであり、このちがいでより⑧の $\sigma_{stiff}$ が大きいのかかもしれないが、切欠の有無もからむので不明である。

(ロ) バック・ブラケット

②③⑥はすべてK型スロット

②はA型スティフナのみ、③はA型スティフナ+S型バック・ブラケット、⑥は、つま先付スティフナであるが、③⑥ともに②のほぼ55%に $\sigma_{stiff}$ は低下している。

⑨⑩はR型スロット

⑨⑩は、それぞれS型M型バック・ブラケットであるがR型スロットにA型スティフナのみ⑮に比べて60%に $\sigma_{stiff}$ は低下している。

(ハ) カラー・プレート

⑤⑥はF型スティフナ

フル・カラー・プレートをつけることで $\sigma_{stiff}$ は30%に低下

⑨⑭はほぼ同じタイプのスティフナ

フル・カラー・プレートをつけることで $\sigma_{stiff}$ は35%に低下

⑯⑱はいずれもB型スティフナ

⑯は⑱よりスティフナ分担率は増加するはずで、事実そのとおりで計測されている。ここで⑯を⑱と比べるとフル・カラー・プレートをつけることで $\sigma_{stiff}$ は20%に低下していることがわかる。

⑪のパート・カラー・プレートは当然のことながらカラーなしとフル・カラー・プレートの中間的効果を示している。

(ニ) スティフナ切欠高さ

⑰⑲はI型スロット

切欠高さが高いほど $\sigma_{stiff}$ は低下することが認められる。

(ii) スロット・フリーエッジ応力に及ぼす影響

(イ) スティフナの形状

③のバック・ブラケットつきスティフナの場合に $\sigma_{R1}$ がわずかに下ることが認められ、 $\sigma_{R2}$ については②③ともほぼ等しい。三井千葉研式において、 $\sigma_{R1}$ についてはスティフナの断面積と $f$ がパラメータに入っており $\sigma_{R2}$ はパラメータ分けはないが、これは実験とも符合している。すなわち、スティフナ形状は $\sigma_{R1}$ のみに影響し、 $\sigma_{R2}$ に対してはほとんど影響を及ぼさない。

(ロ) スロットの形状

②⑦⑫⑮はいずれもA型スティフナ

$R_1/l_1$ あるいは $R_2/l_2$ が小さいほど $\sigma_{R1}$ 、 $\sigma_{R2}$ も大きいということは三井千葉研式と一致している。

⑰⑱ はI型スロット

$R_1/l_1$ が大きいにもかかわらず、 $\sigma_{R1}$ が大きいということは三井千葉研式と一致しないが、集中係数の低下よりもウェブ分担力の増分のほうが相対的に大きくなったためと思われる。

⑫は $\bar{O}$ 型スロット

$\sigma_{R1}$ が非常に低いこれはロンジより、ステイフナと取り合っているウェブ部に直接流入する力が大きくなったためと考えられる。

(\*) カラーブレードの効果

⑤⑥ はF型ステイフナ⑨⑭ もほぼ同型のステイフナ

いずれも $\sigma_{R1}$ はかえって上昇するが、 $\sigma_{R2}$ は50%に低下している。しかし、カラープレートとウェブの交差部において多大な応力集中がおこると考えられるので注意を要する。

(iii) ロンジ・フェイス上にステイフナが無い新型スロット形式について

①はスロット横にトランス上下にF.B.ステイフナをボトム・プレートからトランス・フェイスまでスニップさせ、トランスの下半分のウェブ板厚が4.5mm~8mmに増厚されたもので、⑬は水平に2条のF.B.ステイフナをつけたものである。①、⑬いずれも通常のロンジ付ステイフナ・タイプに比較して $\sigma_{R1}$ が1.5~2倍程度になっているが、 $\sigma_{R2}$ は変わらない。ただ、ウェブの分担率が100%になるので、ウェブの剪断、直応力とも他と比べて大きく、座屈の恐れもあろう。

以上、概略的に実験値を主体として結果をみたが、モデルそのものが小さくて細部にわたり定量的検討を加えるまでに至らなかったが、次のような定性的傾向がつかめた。

- 1)  $\sigma_{stiff}$  はバック・ブラケットをつけることで約55%に低下する。
- 2)  $\sigma_{stiff}$  はカラー・プレートをつけることでWとSの本実験の重畳度の場合は約30%に低下する。
- 3)  $\sigma_{R1}$ 、 $\sigma_{R2}$  はスロット隔部半径Rを大きくすると低下する。
- 4)  $\sigma_{R1}$  はバック・ブラケットとカラー・プレートをつけるとわずかに低下する。
- 5)  $\sigma_{R2}$  はバック・ブラケットとカラー・プレートをつけてもほとんど変わらないが、カラー・プレートをつけると50%に低下する。しかし、カラーとウェブの交差部に応力集中がおこるので注意を要する。
- 6) ステイフナをロンジにつけずかわしてつけたスロット形式は $\sigma_{R1}$ が1.5~2倍になるが、 $\sigma_{R2}$ は通常のタイプと変わらない。ウェブの剪断、直応力が大きくなるので、要注意。

(2) 良好な結果が期待できるスロット・ステイフナ形式

選択の基準となる項目として

- A. 発生応力が低いこと。
- B. 工作が容易なこと。
- C. クラック阻止とともにウェブ自体の座屈も阻止し得ること。

等があげられよう。

表6.2.6 総合評価表

試験番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	
A	$\sigma_{stiff}$	◎	×	◎	◎	◎	◎	○	×	◎	◎	◎	◎	◎	◎	×	×	○	◎	×
	$\sigma_{R1}$	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	$\sigma_{R2}$	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	○	○	○	◎	◎	○
B	スロット	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	ステイフナ	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	カラー	◎	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎	◎	×	◎	◎	×	◎	◎	◎	◎	×	◎
C		×	○	○	◎	○	○	○	○	◎	○	○	×	◎	○	○	○	◎	○	

表6.2.7 評価の基準

		◎	○	×	
A	$\sigma_{stiff}$	EXP	$\sigma \leq 8.75$	$8.75 < \sigma \leq 12.5$	$12.5 < \sigma$
		ship	$\sigma \leq 3.5$	$3.5 < \sigma \leq 5.0$	$5.0 < \sigma$
	$\sigma_{R1}$	EXP	$\sigma \leq 1.0$	$1.0 < \sigma \leq 1.5$	$1.5 < \sigma$
		ship	$\sigma \leq 4.0$	$4.0 < \sigma \leq 6.0$	$6.0 < \sigma$
	$\sigma_{R2}$	EXP	$\sigma \leq 1.0$	$1.0 < \sigma \leq 1.5$	$1.5 < \sigma$
		ship	$\sigma \leq 4.0$	$4.0 < \sigma \leq 6.0$	$6.0 < \sigma$
B	スロット	K,R型	I型	○型	
	ステイフナ	ステイフナのみ	バック ブラケットつき		
	カラー・プレート	無し		有り	
C		カラーつき	カラーなし	①と⑬	

16m水頭とする

表6.2.6の◎○×は表6.2.7の基準によりつけたが、ABCの項目のうちどれを最優先させるかということでも大いに変ってくるし、またこれ以外に選択の基準が考えられるかもしれない。

④のトリッピング・ブラケットは全スロットにつけるのは余りにも不経済である。

⑥は③と同様の効果を出しているにもかかわらず、一体ステイフナであることは注目に値する。

⑨、⑩もいずれもバック・ブラケットつきであるが、特に⑩のM型ブラケットはステイフナ基部の応力緩和にかなり効果的である。スロット形状をK型にすれば $\sigma_{R2}$ も、さらに下げられよう。

⑫の $\sigma_{stiff}$ は良好であるが、ロンジ・フェイス上にうまくウェブがくるかどうか工作精度が要求されよう。

①、⑬はウェブの座屈が心配である。

#### (g) 結論

- 1) ③、④は良好である。
- 2) ⑩のステイフナ形式をK型スロットに用いるとよい。
- 3) ⑥のステイフナ形式はステイフナ自体の座屈がなければ有効である。
- 4) ①、⑬の新形式はウェブのR1部をステイフナ等で補強すればかなり有望である。
- 5) 表6.2.3によるとインバート・アングル・タイプのスロット形式についても三井千葉研式と実験値の相関は、その他のスロット形式と同程度であることがわかる。

例えば③を実船に用いた場合 $S=2.5$  W位置（剪断の向きはWと重畳する向き）では

$$\sigma_{stiff} = -26.4 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{R1} = -20.8 \text{ "}$$

$$\sigma_{R2} = 36.8 \text{ "}$$

程度となる。

#### (2) 小型模型疲労試験静的試験結果との比較について

図6.2.26～図6.2.38に示されているごとく、スロット周り応力については実験値と計算値は、ほぼ良好な一致を示しているのは6.2.6-1)項の静水圧実験モデルと同じである。

ステイフナ基部応力については、トランス・フェイス位置でのステイフナの拘束度は静水圧実験時とくらべて相対的に小さいので、計算応力分布の③よりもむしろ⑩と良い相関をもつと考えられるが、一概にそうとはいえないようである。これは負荷方式がロンジに2点集中荷重を与えているために、静水圧による負荷と傾向が違ってきたものと思われるが、オーダーとしては実験値と計算値は合っているといえよう。

結論として、実験値と計算値はほぼよい相関をみているということは、疲労試験結果に対する解析は実船の水圧を受ける状態に対応しているものだということができる、といえるようである。

#### (3) 三井造船千葉研究所モデル化方式に対するチェック

##### (a) チェック方法および結果

6.2.2項にも述べたように、当所で実施したFEM計算は3次元構造物であるスロット部をウェブ面とステイフナ面の2面のFEM計算をするという方法をとっている。2次元といつてもウェブ面FEM計算時にはステイフナ等の面外部材は等価剛性をとりこんで計算し、ステイフナ面FEM計算時には、面外部材となるウェブの等価剛性をとりこんで計算しているので近似計算とはいえ、かなり精度よく計算できるのである。この近似計算の精度をさらに向上させるには、ウェブ面とステイフナ面の往復計算をさらに繰返し行なえばよい訳であるが、今回のFEM計算はほぼ固つたノウハウで行なつたもので、信頼性があると考えられる。しかし、ここでは更に繰返し計算をするかどうか、ウェブ面FEM計算である境界条件を変えた場合に結果に影響があるか等について調査すること

とにする。

全ケースについて実施することはやめ、小型船底模型静的試験のうち⑮A R-I H 1 (三井、日立ともに計算するケース)についてチェックする。

図6.2.45に計算過程表を示す。

㉔はステイフナの高さ沿いの各位置での応力集中係数 $f$ をステイフナ形状・アスペクト比・スロットの上のスキ長さ等を考慮して定めたもの

㉕は、ステイフナの各高さで、ステイフナ全巾のときの剛性 $\times \frac{1}{f}$ としてインプットしたウェブ面FEM計算

㉖は㉕の結果からウェブの有効巾を求めること

㉗は㉖で求めたウェブ有効巾つきのステイフナ面FEM計算をステイフナ上端水平変位を拘束して行なつたもの

㉘は㉗と同じことをステイフナ上端自由としてFEM計算したもの

㉙、㉚は㉘、㉙の結果からステイフナの高さ沿いの $f$ を求めること

㉛、㉜は㉙、㉚の結果からステイフナの剛性を決めて、ウェブ面FEM計算したもの

以下同様に図6.2.45に示す計算を行なつた。

㉝、㉞は同じステイフナの拘束状態で、ウェブ面とステイフナ面の往復計算をしたときの収束性をみるためのものであり、㉟、㊱はステイフナ面の計算のときの上端自由度の想定と逆の想定で前のウェブ面計算が行なわれているとき、計算結果に影響がどの程度あるかを見るものである。(本報告のシリーズ計算は、ステイフナ上端自由の場合のウェブ面計算結果をステイフナ面計算段階で上端自由拘束ともに兼用した。これでよかつたかどうかチェックするためである。)

6.2.3項の計算結果は図6.2.45の㉕、㉖、㉗段階のものである。

図6.2.46に図6.2.45の㉔、㉕、㉖、㉗、㉘、㉙、㉚各ステップの $f$ を示す。㉔、㉕すなわち、㉗と㉘が良好な一致を示すこと、㉙、㉚すなわち、㉛と㉜が良好な一致を示すことがわかり、さらに㉔と㉕はほぼ一致することで今回の片道計算(ウェブ面→ステイフナ面)が妥当性あるものということが確認された。また、㉟、㊱のチェックの結果、大して影響ないことがわかる。

図6.2.47に㉕、㉖、㉗各ステップの $f'$ を示す。 $f'$ は(ウェブ全巾)÷(ウェブ有効巾)である。)  $f'$ はステイフナの上端の自由拘束に関係ないことがわかる。

図6.2.48にロンジからの集中荷重 $W=10\text{ ton}$ 、剪断力 $S=10\text{ ton}$ に対する各ステップのウェブ面FEM計算結果を示す。同図中には図6.2.49に示す有限要素分割により3次元FEM計算(変位関数は不完全4次)した結果も示している。

図6.2.50で実験値と計算値の比較を示している。

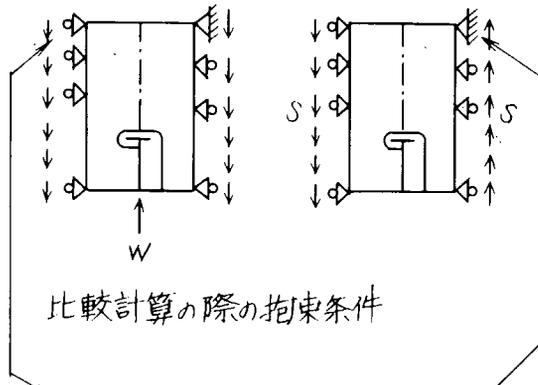
既述のごとく本章のFEMシリーズ計算は、集中荷重 $W$ に対するものと剪断力 $S$ に対するものをモデル共通、負荷のみ2種類の形で行ない、計算の効率化をはかっているが、図6.2.51に示す図のごとく集中荷重 $W$ に対しても剪断力 $S$ に対してもウェブの両端を左右同等の支持にしたほうが直感的には自然なモデリングである。実は標準計算法(注、参照)の場合の拘束点反力は分布荷重の大きさになり、標準計算法の共通モデリングで良いのであるが、念のため別のモデリングに分けてチェック計算を行なつた。結果を図6.2.51に示すが、標準計算法の結果と全く同じであつた。もちろん、ステイフナ基部応力についても変化なかつた。

図6.2.52は外力 $P=1\text{ ton}$ に対するステイフナ基部(高さ4mm位置)における応力分布をステイフナ上端の水平変位を拘束した場合としない場合の2種に分けて示している。

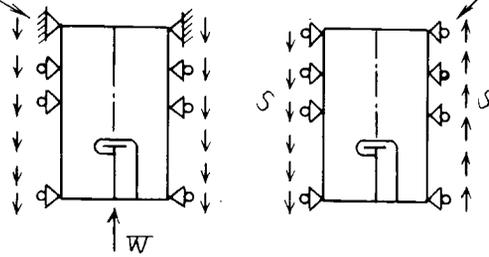
図6.2.53に実験値と計算値の比較を示す。ここで実験値は6.2.6-(1)-(c)-(ii)項を勘案してロンジフェイスから4mm高さ位置に修正している。

⑨：ウェブ面 FEM 計算の拘束条件

本報告の標準計算法



比較計算の際の拘束条件



6.2.6 (1)-(c)-(j)項でも触れたように、三井千葉研方式の FEM 計算はウェブ面とステイフナ面の適合は両面のステイフナ分担率を合わせることで近似的に得るということにしている訳である。この仮定の良否はステイフナとトランス・ウェブの取合位置における上下変位量 S により確認できよう。図 6.2.4 5 の各ステップごとに S をプロットしたのが、図 6.2.5 4 である。同図にはトランス・フェイス位置との相対変位量を表示している。

$h \neq 0$  すなわち、ステイフナ基部付近における  $\epsilon$  (歪) は  $\epsilon = \frac{d\delta}{dh}$  となるから、ステイフナ基部の応力  $\sigma$  は  $\sigma = E \frac{d\delta}{dh}$  となる。図 6.2.5 4 によると、ウェブ面においては  $\frac{d\delta}{dh}$  は ㉑、㉒、㉓、㉓' はほぼ一致しており、特にステイフナ上端自由としたときステイフナ剛性をとりこんでいる ㉑、㉒、㉓' およびステイフナ上端自由に近いと考えられる 3 次元 FEM 結果が良く一致しており、今回行なったウェブ面を正としてステイフナ面をウェブ面に合わせようにする方法はまず良かったと考えられる。

また、㉑が ㉒、㉓、㉓' に近いということはウェブ面ランはステイフナ剛性のとり方にさほど影響されない、いいかえればウェブ面全体の剛性でみたらステイフナの剛性が占める割合が大きくない、ということになる。

ステイフナ面については、上端の拘束の有無により基部の  $\frac{d\delta}{dh}$ 、 $\delta$  の絶対値とも相当異なるが、拘束の有り無し、それぞれのグループについては、 $\delta$  の絶対量は異つても  $\frac{d\delta}{dh}$  がほぼ等しい。今回のシリーズ計算は図 6.2.4 5 の第一段階で打ち切つたのであるが、応力値からみた場合かなり良い近似は得られているといえよう。

ウェブ面とステイフナ面を比較すると、 $\delta$  の絶対量はかなり異つているが両面の計算の  $\frac{d\delta}{dh}$  がほぼ等しいようで、今回の仮定はまず妥当性のあつたことが確認された。

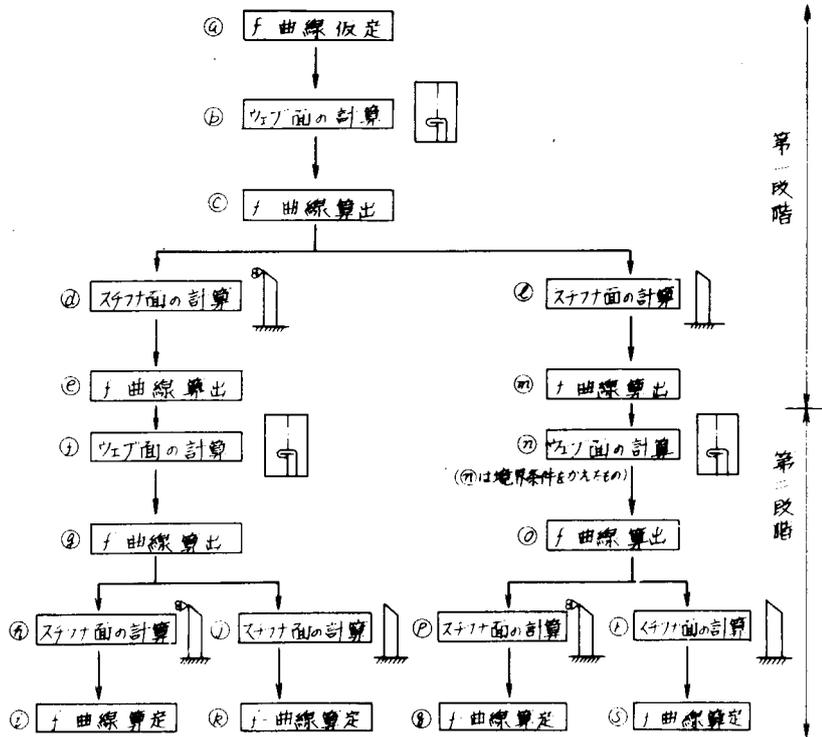


図 6.2.45 15 AR-IH1 についてのチェック計算過程表

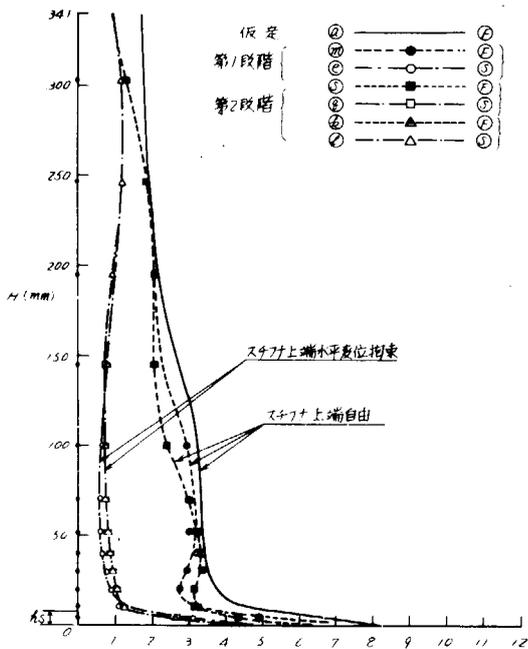


図 6.2.46 15 AR-IH1 スチフナーの  $f$  曲線

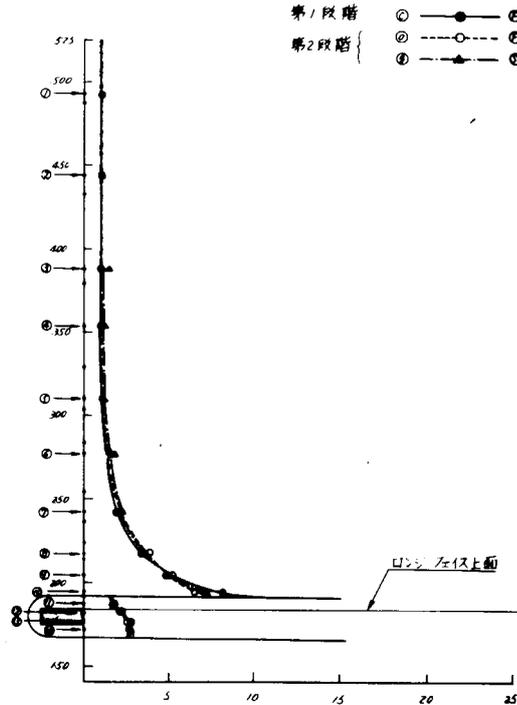


図 6.2.47 15 AR-IH1 R型ウェブ面  $f$  曲線

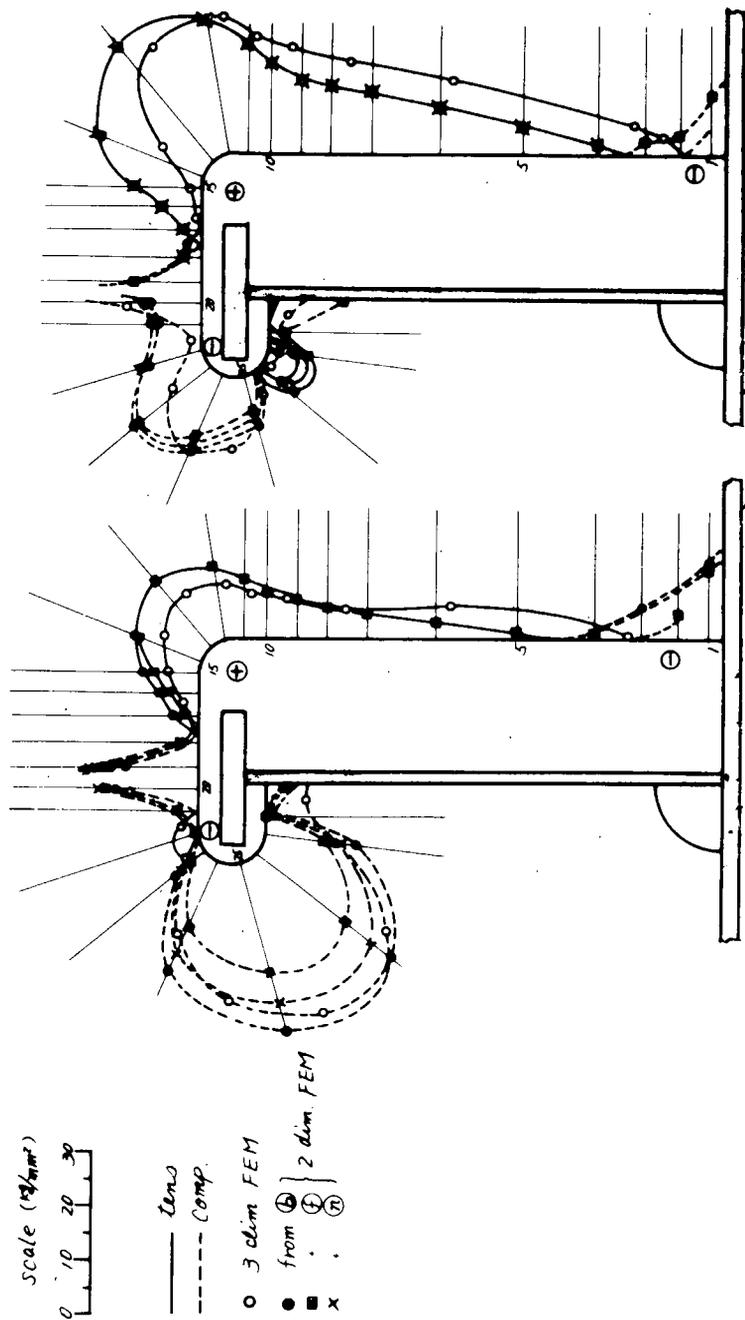
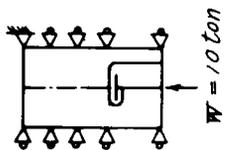
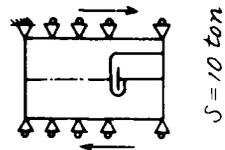


図 6.2.4.8 単位荷重によるスロット周り応力分布



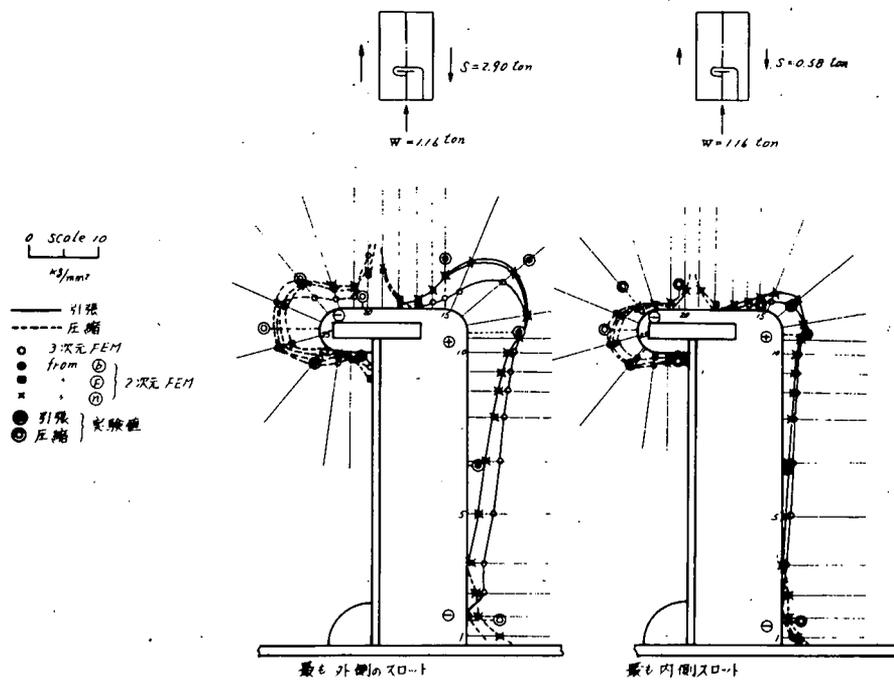


図 6.2.50 実験値との比較

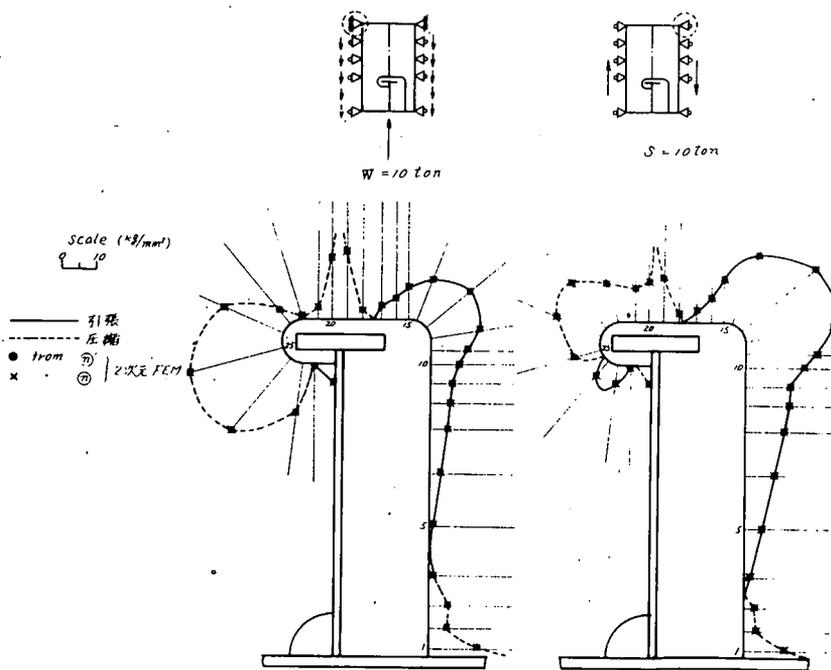


図 6.2.51 ウェブ面 FEM 計算での境界条件による違い

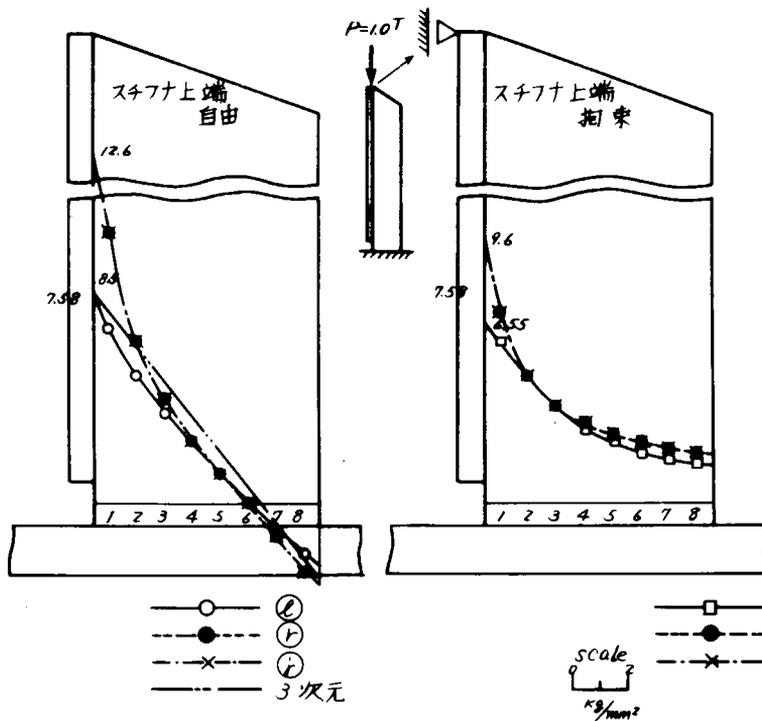


図 6.2.5.2 単位外力  $P=1\text{ton}$  に対するスチフナ応力分布

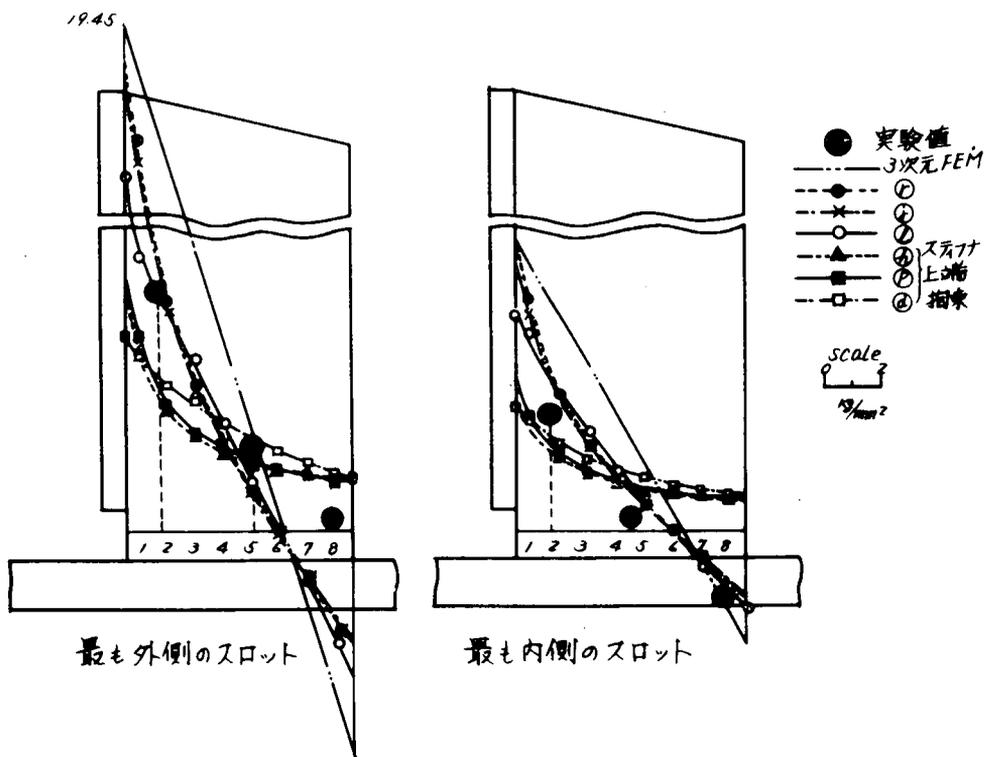
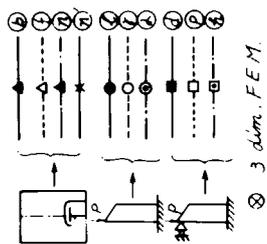


図 6.2.5.3 実験値との比較



本図は横軸にスライファ上端との相対変位量  $\delta$ 、縦軸に  $r/H$  をとっているが、表現をかえて、横軸に  $r/H$ 、縦軸に各位置の絶対変位量とすれば、スライファ基部において  $\delta/H$  が全て一致する傾向を明らかに示すことができる。

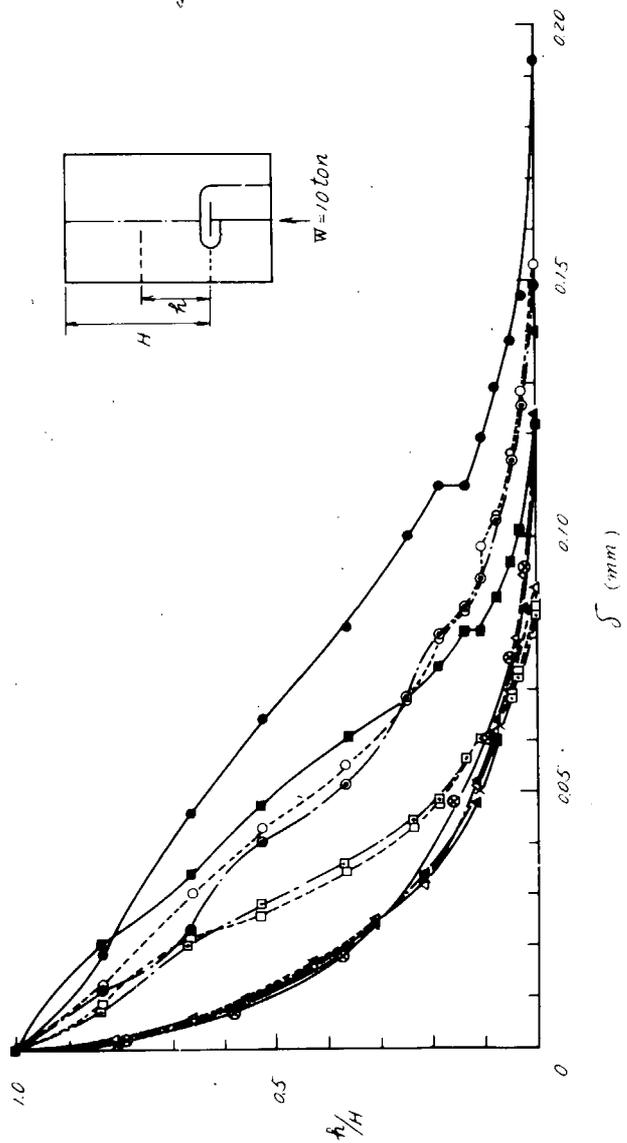


図 6.2.5.4 スライファとトランス・ウエブの取合位置における上下変位量  $\delta$

(b) スロット・フリー・エッジ応力について

⑩のウェブ面 FEM 計算にとりこんだステイフナ剛性は、ステイフナ上端の水平変位を許したステイフナ面 FEM 計算結果から得たもので、⑩と⑪の相関度がフリー・エッジ応力の信頼性を示すことになる。

⑫はステイフナ上端の水平変位を拘束したステイフナ面 FEM 計算からステイフナ剛性をとりこんだウェブ面 FEM 計算で、⑬は⑩と比較してステイフナが剛としてインプットされているから、ウェブの R<sub>1</sub> 部の分担力は小さいので発生応力が小さくなるということが、図 6.2.48 の W に対する結果からわかる。W に対しては⑩、⑪はほぼ一致している。

剪断力に対しては、ステイフナはパネル中心線上にあるので、ステイフナの剛性はスロット・フリーエッジ応力にさして影響せず、スロットの隅部半径の大きさに大きく支配されると考えられる。図 6.2.48 の S に対する結果からも⑩、⑬、⑭ 3段階とも R<sub>1</sub> 部ではほぼ一致していることがわかる。R<sub>2</sub> 部では、W に対しても S に対しても変らないのは、外板剛性のとりこみ方にも影響受けると考えられるが、外板の剛性はトランス・ウェブに比して小さいので、R<sub>2</sub> 部はほとんど隅部半径で応力は決まると考えて良いであろう。

3次元 FEM 計算は、図 6.2.49 に示すように境界条件は 2次元 FEM 計算と同様な挙動をとるようにしているが、2次元 FEM 計算とほぼ良好な一致をみている。

図 6.2.50 で外側スロットと内側スロットで、実験値と計算値が、ほぼよい相関を示していることは、ウェブ面 FEM 計算結果には、模型端、中央部とも同様に適用できることを示している。すなわち、実船においてロンジ・バルクヘッド付近もトランス平行部も同じ計算方式をとれることを示している。

結果的には、6.2.3 項の計算結果は、ほぼ良い近似で与えられているといえよう。

(c) ステイフナ基部応力について

図 6.2.52 をみてわかるように、ステイフナの応力分布は根本的に境界条件の違いによる影響が甚大であることは、以前にも示した。さらに局部応力集中が生じるウェブ側では、ステイフナ面 FEM 計算時のトランス・ウェブに相当する伸縮バネの剛性の大きさにより応力分布は大いに異ってくる。ステイフナ上端の水平変位を拘束した場合は、ステイフナ分担率が上端自由の場合よりも大きいので、局部応力集中部の違いは上端自由のものより少ないが、それでも最大応力の違いでみて、⑩と⑪では⑪が 46% 大きく、⑬と⑭では⑭が 66% 大きくなっている。

しかし、ステイフナ分担率をウェブ面 FEM 計算の結果から得られたステイフナ分担率とリンクさせて修正し、実験値と比較した図 6.2.53 では、①、②、③と④、⑤、⑥はそれぞれ良好な一致をみているようで、6.2.3 項で示した計算結果は、ほぼ良い近似で与えられているとみてよいであろう。

ただ、このステイフナ・スロット形式の実験値のうち、内側スロット位置の中央のゲージ位置は計測値に不審な点があり、実験値と計算値の相関はここでは触れないことにする。

(4) 三井千葉研のモデル化方式のさらに進んだ方式について

今までに示した方式は、3次元構造物を2次元にモデル化して計算したもので、本質的に3次元計算を一度に行なつた結果とは異っていることは先にも述べた。ステイフナの応力分布は頂部の拘束度合を定量的につかみ得ないので、完全拘束の場合と完全自由の2種を示したが、今後、模型実験のみならず実船の各ロンジ位置の値を一意に得たい場合にはどうしたらよいかを以下に、小型船底模型静的試験に対するものを例にとつて示す。

ステイフナの、いわゆる付根応力はステイフナ・トップがウェブの面外方向に変位フリーであるか、拘束であるか、弾性支持的に中間であるかにより応力集中率が変わり、従つて最高応力が変わることが考

えられる。

往時はステイフナはトランスのフェイスまで延し、スニップするのが普通で、この場合、トリツピン  
グ・ブラケットのアレンジメントによつてはフェイスの面内剛性は高く拘束に近いことが考えられたが、  
近時船の大型化とともにステイフナは、いわゆる水平・ステイフナにて止めるほうが多くなり、  
この場合、水平・ステイフナの剛性は小さいのでフリーの状態に近づくと考えられる。

当研究室の通常のFEMランは、安全側をとり、トップはフリーの状態に計算したもので実務用チャ  
ートをつくり、よつて、設計段階で安全側になるようにしている。(変位拘束状態で設計チャートをつ  
くり、あと状況に合わせて修正するやり方は実際的でなく、たんに軽率なミスにより危険な設計をする恐  
れがある)

しかし、次の段階として少なくとも研究段階では、実際の拘束度はどの程度か、また、それによる応力  
軽減はどの程度が調査する必要がある。よつて図6.2.55のごとき通しかたの、いわゆるステイフナ面ラ  
ンを弾性支持型式または変位型荷重型式で行なうときインプットする支持弾性または変位を求めたい。

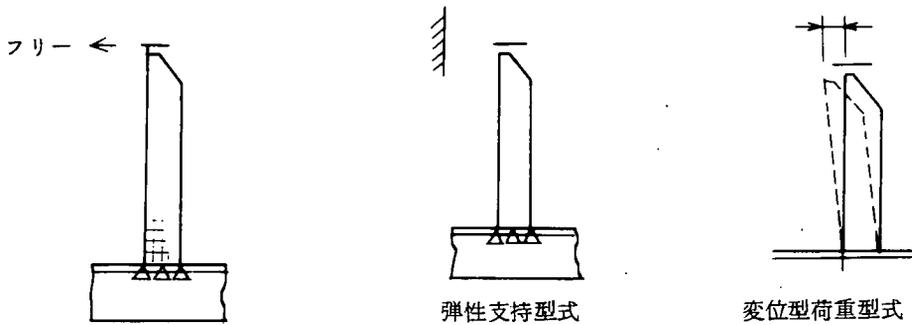


図 6.2.55

弾性支持方式の場合の問題点

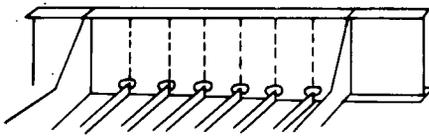
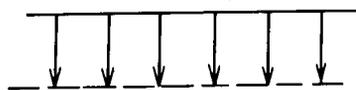


図 6.2.56

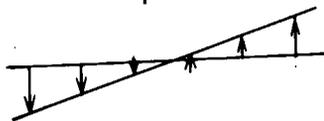
例えばSR120 45年度静的実験モデルのうち6  
ロンジのスロットstiffが同一で、スロットの向きが  
同方向のトランスを例にとれば

上から見てステイフナ基部モーメントによる自由変位は



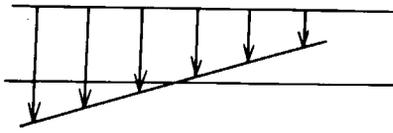
集中荷重による自由変位

+



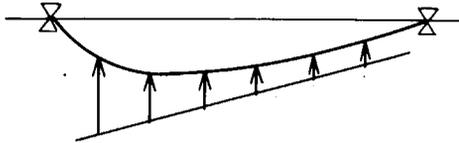
剪断荷重による自由変化

||



自由変位

一方、フェイス剛性があるのででき上りモードは



すなわち、各ロンジにおいてフェイスによる変位戻し量、すなわち、スプリング反力が異り、フェイスの変形量と比例関係でない、すなわち、スプリング剛性は各ロンジで異なるものをインプットしなければ

ならないが、問題はでき上りモデルとフリー・モードの差を要し、従つて、両方の計算を準備として要することであり、ことにでき上りモードは各ロンジを含むトランス全体の系として解かねばならぬことである。つまり、各ロンジ位置における変位が所要なら、いきなり変位型荷重で入れることのほうが手間が省ける。



図 6.2.5 7

以上は換言すれば、系の一部(1ロンジ)を、いわゆるステイフナ面計算の形で解こうとすれば、系の全体挙動は、この一部が他とつながるフェイスの剛性の形で全体挙動を反映せしめる要があり、この全体挙動は単に系の剛性だけでなく荷重状態により異なるので、いわゆる剛性要素のみでは表現できないことを意味する。

フェイスのモードの求め方

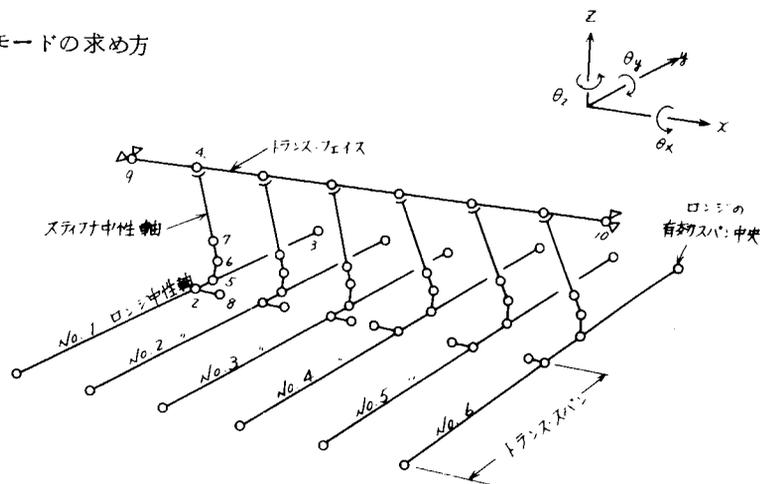


図 6.2.5 8 モデル体

例えば、SR120 静水圧実験モデルで1トランスにステイフナ形状2種、スロットの向きはトランス・スパン中央より振り分け外向きのものを例にとり軸組系として図示すると図6.2.58のごとくなる。No.1 ロンジだけ取り出し、真横から見ると図6.2.59のごとくなる。また、トランス面で見ると図6.2.60のごとくなる。

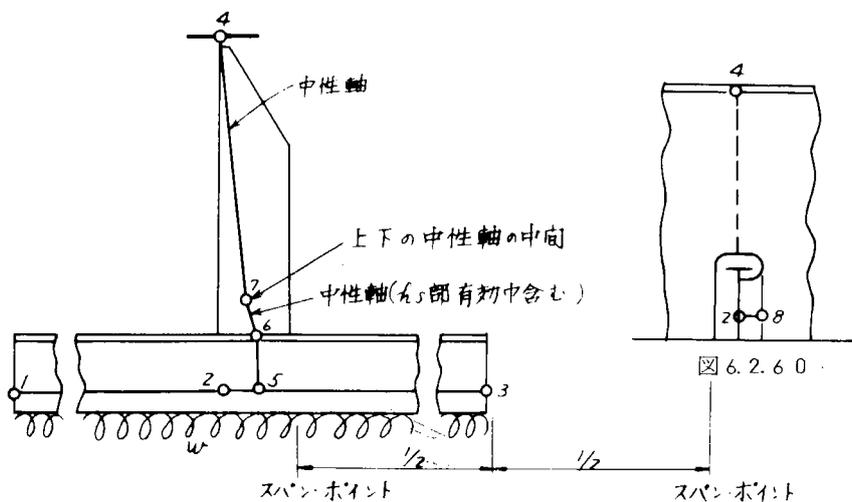


図 6.2.59

かくのごとく、モデル化することにより、集中荷重および剪断荷重によるステイフナとウェブのもち構造により、発生するステイフナを曲げる力を表わし、かつ、ロンジの曲げモードの影響もとりこむことができる。

次に各ジョイントの拘束条件と残存自由度を考える。

影響が大きくない限り、残存自由度を減じて解法の簡潔をはかる。

(a) まづ、集中荷重のみ取り出して、その場合につき考える。

ジョイントNo.	変位方向					
	x	y	z	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
1	×	×	×	○	×	×
2	×	×	○	○	×	×
3	×	×	○	×	×	×
4	×	○	×	×	×	○
5	×	×	○	○	×	×
6	×	○	○	○	×	×
7	×	○	○	○	×	×
8	×	×	×	×	×	×
9 & 10	×	×	×	×	×	○

×印拘束 ○印自由

荷重はロンジに分布荷重を与える。

(b) 次に剪断荷重のみ取り出してその場合につき考える。

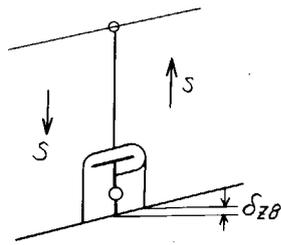
考えられるやり方として、剪断剛性を持つトランスをモデルに付加することがまづあるが、8番

ジョイントが、その場所のウェブ剪断変形に合わねばならぬので、トランス・メンバーを上下に分割し、トップ位置と8番高さに設ける必要がある。これは図示することに無理がある。

次は4番、8番にその位置における剪断変形量を別途通常の剪断ビームとして求め、これを $z$ の変位型荷重として与えることである。

(前頁拘束条件表では4番、8番の $z$ 方向 $\times$ が $\circ$ となる。)

これは、すなわち、いわゆる三井千葉研式の考え方と同じである。次に、これをもつと簡単にする。剪断外力によるFaceの変位は4番、8番の変位型荷重によるのであり、4番、8番の相対的な変位型荷重の差により決るのであるから、その差を8番のみの(4番に対する)相対的な差としてインプットすることによい。このとき、4番のインプットを省略し、かつ4番の2方向拘束を残し得る。



(相対変位置を図示すれば図6.2.61の $\delta_{z8}$ のごとし、このときロンジ位置はウェブとステイフナももちもち変形を考えないものであることは当然である。

もちもち変位は、 $\delta_{z8}$ を与えたのちモデルの挙動としておこなう)

この最もインプットの簡単なもので解けばよからう。

図 6.2.61

- (c) 実際の計算では集中荷重によるもの、剪断荷重によるものを別々に解く要はないので、ロンジの分布荷重、8番の変位型荷重を同時にインプットする。

#### 付記1

モードが出てからのSR120 静的実験解析用FEM計算のやり方

FEM計算はロンジとの取合個所でFixしているの、インプットするフェイス・トップの変位型荷重は前述の軸組計算のアウト・プット変位を2番ジョイントにおけるボトム・ロンジの回転角により修正したものとなる。

No.1ロンジとNo.3ロンジは変位型荷重が異なるのみであるので、同一モデルで荷重ケース2個で行けばよく、スプリングをフェイスに考える場合に比し、(2のとき計算時間1ロンジ分 $\times$ 2倍)少なくすむ(1ロンジ分 $\times$ 1.2倍)ので、特にNo.2ロンジを代表として解きNo.1、No.3に換算する工数をかけることはない。

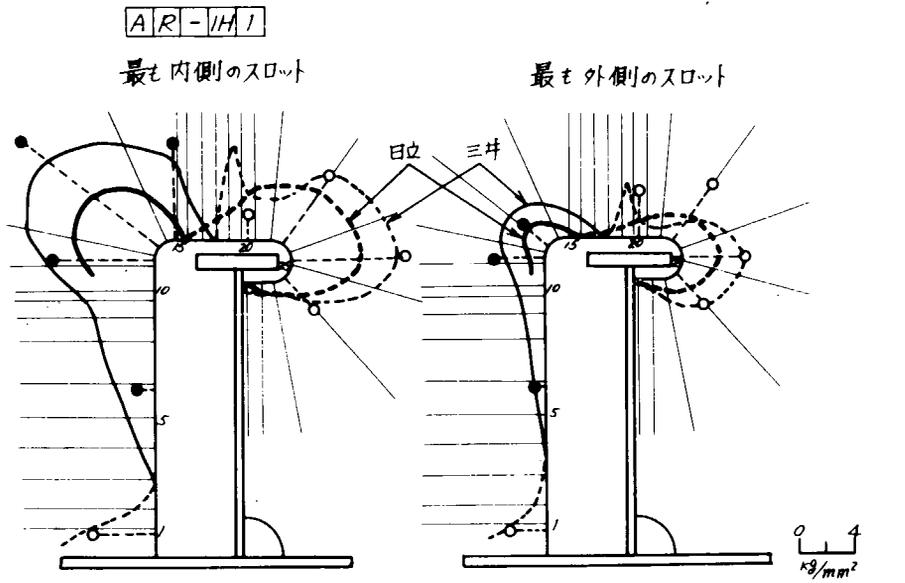
次に、求めたステイフナ上端変位を3次元FEM計算で変位型荷重として、ロンジからの集中荷重 $W$ 、剪断力 $S$ と重畳さすのである。6.2項で2次元FEM計算を用いて解析してきたのは、スロット対策懇談会ではこの方法をベースに作業を進めてきたのであり、これに対するチェックもここでとり行ないたかつたからである。

先にもいつたが、三井千葉研式はインバート・アングルのときのスロット形状に対しても他の通常のスロット形状に対すると同様な近似を与えることがわかつた。

## 6.27 結 論

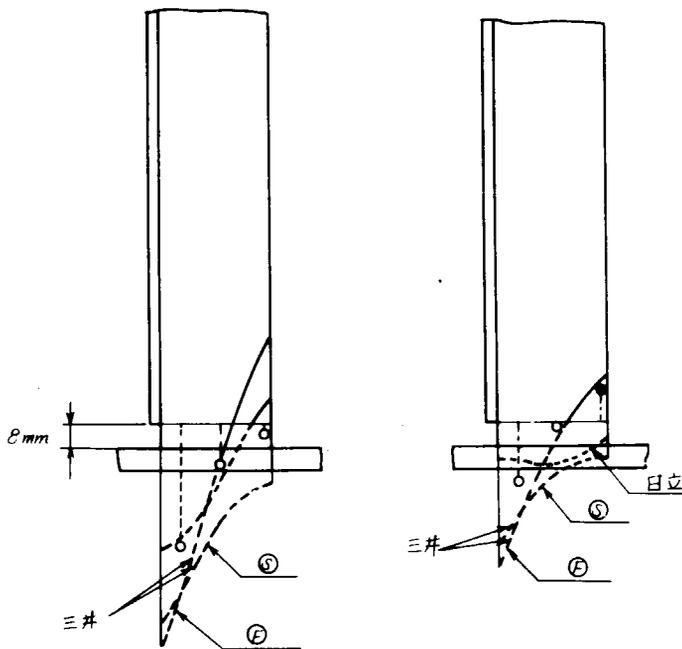
三井千葉研のモデル化方式による解析を行ない、次の結論を得た。

- (1) 小型船底模型静的試験、小型模型疲労試験静的試験に対し、本方法を適用した結果、実験値との相関程度はほぼ良く、本方法の妥当性が確認できた。
- (2) スロット対策懇談会の与えた許容応力は少々安全側を与えている。
- (3) 小型船底模型静的試験で扱った19種類のスロット・ステイフナ形式のうちでは、③AKSMI2が良好で、⑩CRMIH2もスロットをK形にすればかなり良好と思われる。実船での最大応力はステイフナ基部で $26 \text{ Kg/mm}^2$ 、スロットフリーエッジの $R_1$ 部で $21 \text{ Kg/mm}^2$ 、 $R_2$ 部で $37 \text{ Kg/mm}^2$ 程度となる。ただし、16mm水頭で剪断力が集中荷重の2.5倍をして重畳する場合で、これは実船のトリッピング・ブラケット配置を考えれば通常のスレイフナ形式の中では最もきびしい状態についていることになる。



日立資料の  $w$  は  $W$  に含ませて、 $M$  (モーメント)、 $N$  (トランス軸力) は無視した。  $M, N$  と考慮すれば若干ではあるが増減するものと思われる。

引張圧縮  
 計算値 ————  
 実験値 ● ○



図A-1. スロット周りとステイフナの応力分布

## 6.3 日立造船(株)技術研究所のモデル化方式による応力解析

### 6.3.1 模型寸法

本節における計算の対象とする模型は、表 6.3.1 に示す 5 種類である。

表 6.3.1 計算対象模型

型式名称	説明
A R	無切欠ステイフナ、標準型スロット
B R	中切欠ステイフナ、標準型スロット
C R	高切欠ステイフナ、標準型スロット
B R N	中切欠ステイフナ、標準型スロット、フルカラー
B I	中切欠ステイフナ、インバート型スロット

これら 5 種類の模型の計算上用いられた形状寸法は図 6.3.1 に示す通りである。

ウェブの面材(158×4.5)、縦通材の面材(50×9)および外板(1300×6)は集中断面積として取扱う。

### 6.3.2 計算方法

計算の対象となるパネルをはさんで左右 3 - 縦通材間隔の間の連続 3 - パネルならびにこれに取付けられているウェブ・ステイフナおよびウェブ・ステイフナの深さの範囲の縦通材からなる構造系を考え、これを図 6.3.2 に示すような片持梁として考える。

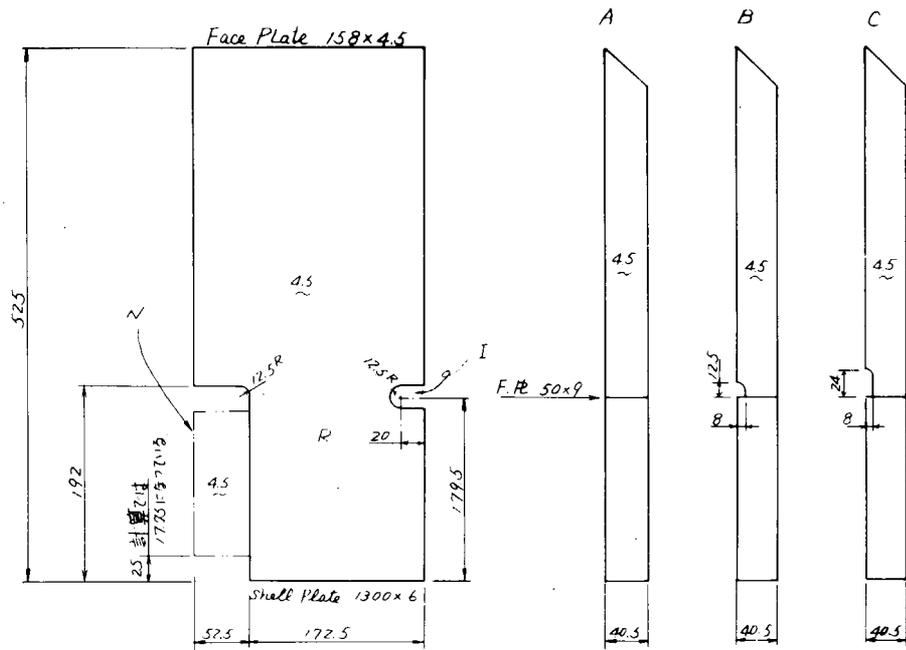


图 6.3.1 模型寸法

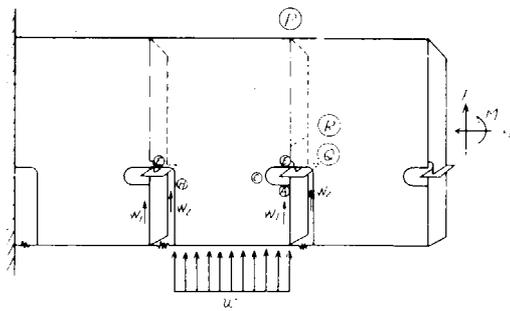


図 6.3.2 計算の対象となる構造系

この構造に対して外力として自由端側に剪断力  $F$ 、軸力  $N$  および曲げモーメント  $M$  を、また、縦通材から伝わる力として  $W_1$ 、 $W_2$  を、さらに外板からウェブに直接伝わる力として分布荷重  $W$  などを考えることができる。対象とする中央のパネルについてはこの 5 種類の外力による応力を重畳することにより任意の外力状態に対する応力が得られる。

そこで今回の計算では、この 5 種類の単位外力に対する次の 5 case の計算を行なった。

- case 1  $M=1 \text{ t-m}$
- case 2  $F=1 \text{ t}$  (ただし、中央パネルの中央における曲げモーメントが零になるように  $M$  を加えている)
- case 3  $N=1 \text{ t}$
- case 4  $W_1=W_2=0.5 \text{ t}$  (すなわち、 $W=W_1+W_2=1 \text{ t}$ )
- case 5  $W=1 \text{ t/m}$

図 6.3.2 に示した 3 パネルからなる構造をウェブ・ステイフナおよび縦通材を含めて有限要素に分割する。この分割は 3 つのパネルについて合同であるので、その 1 つのパネルだけについて、分割の状態を図 6.3.3 に示す。

B I 型を除く他の 4 種類の模型についてはウェブの形状は同一なので、図 6.3.3(1) に示す分割を共通に採用している。ただし、図 6.3.3(1) のカラープレートについては、実際にカラープレートがあるのは B R N 型のみであるので、その他の A R 型、B R 型および C R 型についてはカラープレートの板厚を非常に小さいものとして計算を行なっている。

B I 型のウェブの分割は図 6.3.3(2) に示す通りであつて、図 6.3.3(1) の分割と相似である。

ウェブ・ステイフナの分割は図 6.3.3(1) に示し、特に切欠部の詳細は図 6.3.3(3) に示す通りであつて、切欠のない A R 型、中切欠の B R、B R N、B I 型および高切欠の C R 型に対してそれぞれ異なつた分割となつている。

### 6.3.3 計算結果

計算結果は図 6.3.4 以下に示す。

5 種類の模型について、次の各断面 (図 6.3.2 参照) の応力分布を、前述 case 1 ~ case 5 の各単位外力に対して画いている。

- (1) ウェブ・ステイフナの付根部断面④における曲げ応力分布 (図 6.3.4)
- (2) ウェブ・ステイフナの付根より 37.5 mm 上方の断面⑤における曲げ応力分布 (図 6.3.4)
- (3) スロット周辺 A C E および B H の縁応力分布 (図 6.3.5)
- (4) ⑥断面におけるウェブの水平圧力、垂直応力およびせん断応力の分布 (図 6.3.6)

計算は図 6.3.2 に示したとき片持梁の形式の構造系について行なっているが、各単位外力に対する

応力分布を画いているので、任意の外力状態に対する応力分布は、これらを実際の外力の比で重畳することによって得ることができる。

一例として、No. 2 模型について、図 6. 3. 7 に示す負荷状態における負荷断面の Web ステイフナ の応力分布およびスロット周辺の応力分布を求め、実験値（本報告中、小型模型疲労試験における静的試験結果として報告されているもの）との比較を行ない、図 6. 3. 8 に示した。

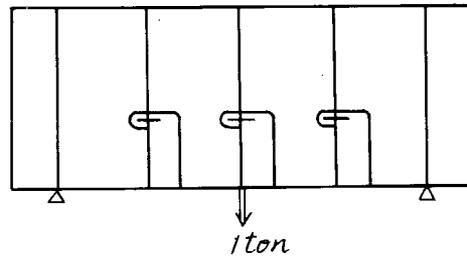


図 6. 3. 7

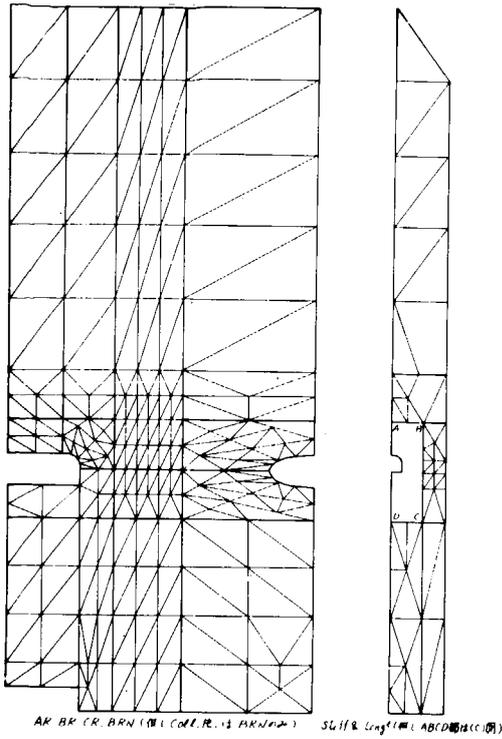


図 6.3.3 (1) 有限要素分割

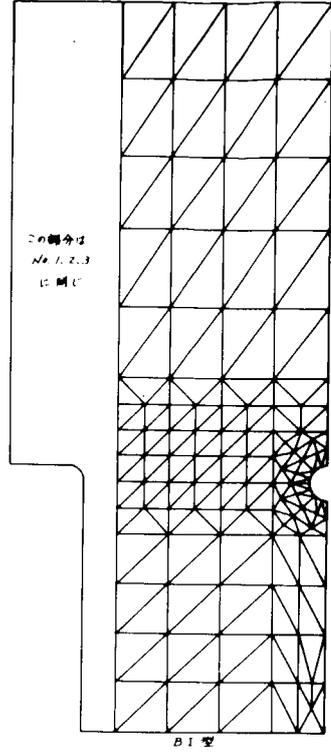
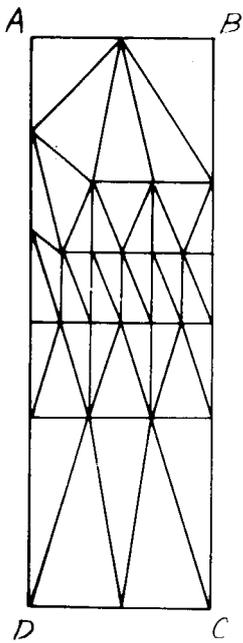
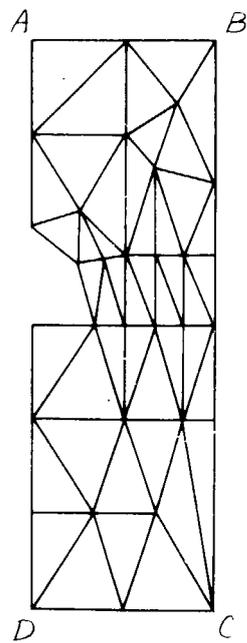


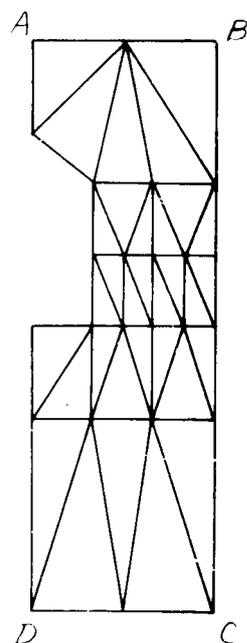
図 6.3.3 (2) 有限要素分割



AR型



BR, BRN, BI型



CR型

図 6.3.3 (3) 有限要素分割 ( (1) 図の ABCD 部詳細 )

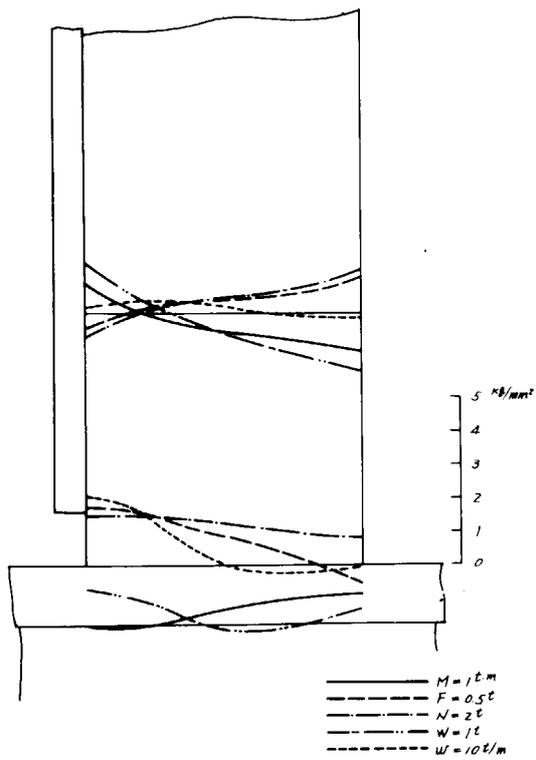


図 6.3.4(1) Web Stiffener 曲げ応力分布 (AR)

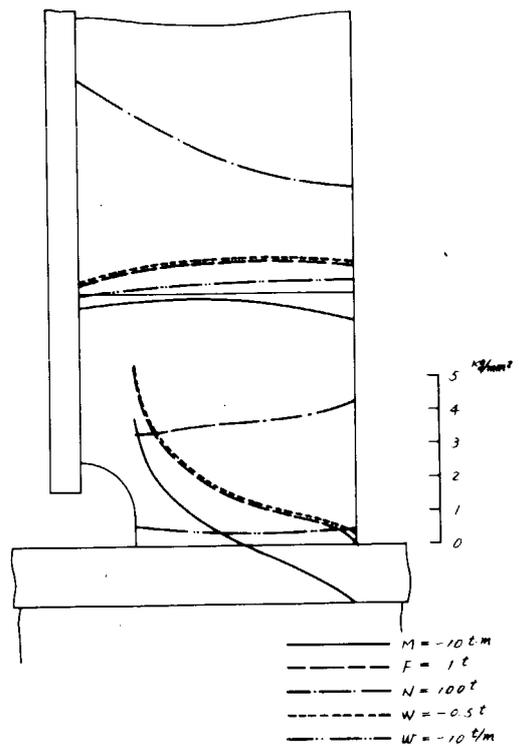


図 6.3.4(2) Web Stiffener 曲げ応力分布 (BR)

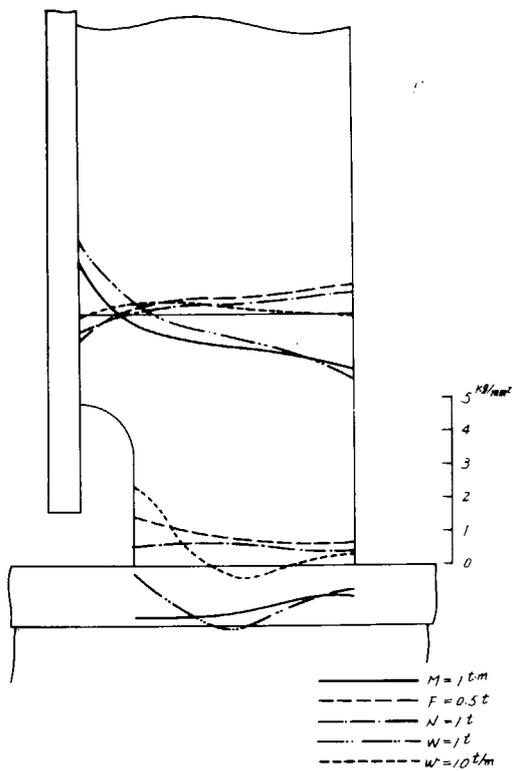


図 6.3.4(3) Web Stiffener 曲げ応力分布 (CR)

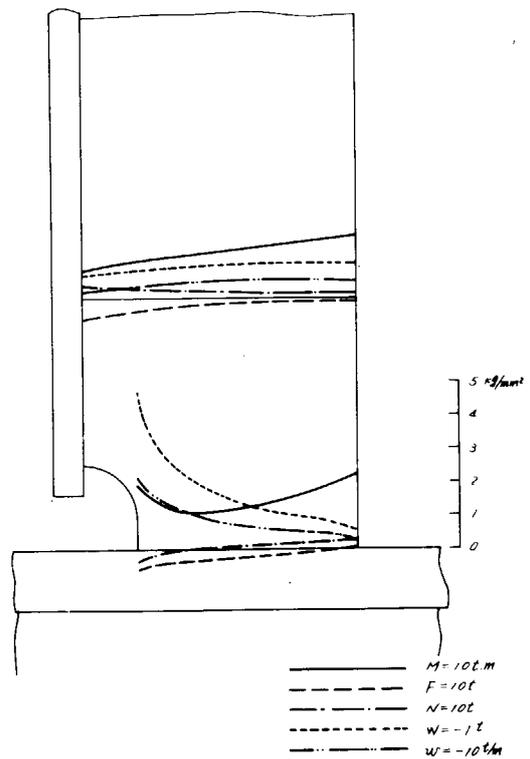


図 6.3.4(4) Web Stiffener 曲げ応力分布 (BRN)

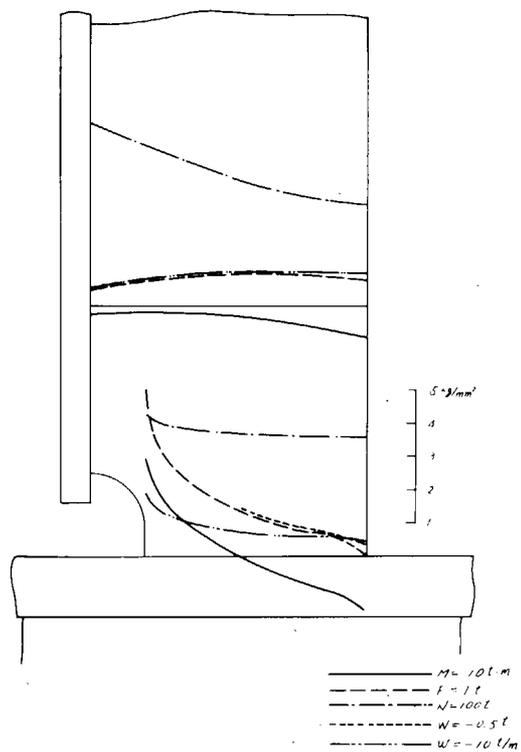


图 6.3.4(5) Web Stiffener 曲线应力分布 (BI)

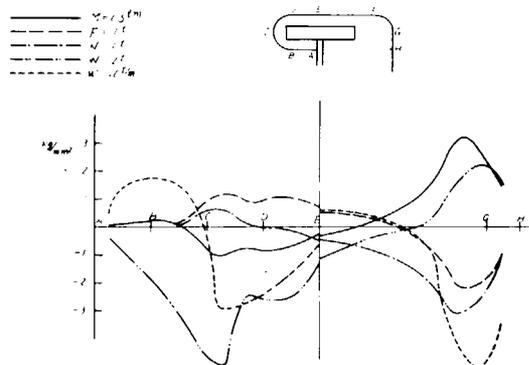


图 6.3.5(1) Slot 周边应力分布 (AR)

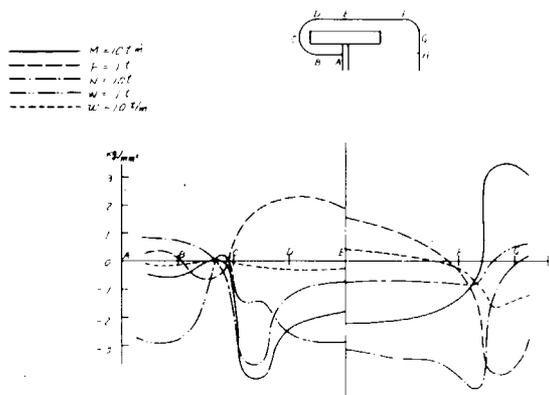


图 6.3.5(2) Slot 周边应力分布 (BR)

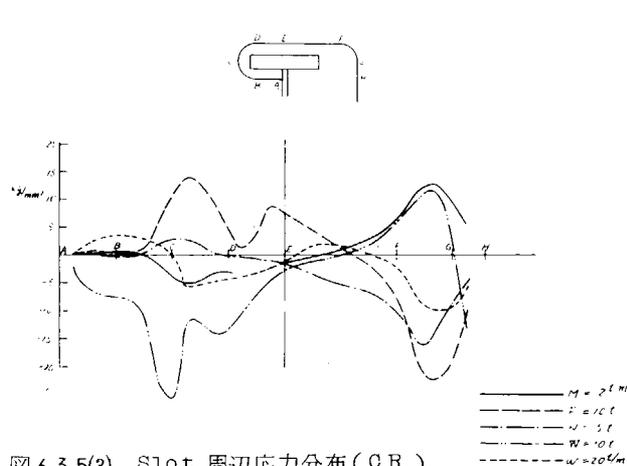


图 6.3.5(3) Slot 周边应力分布 (CR)

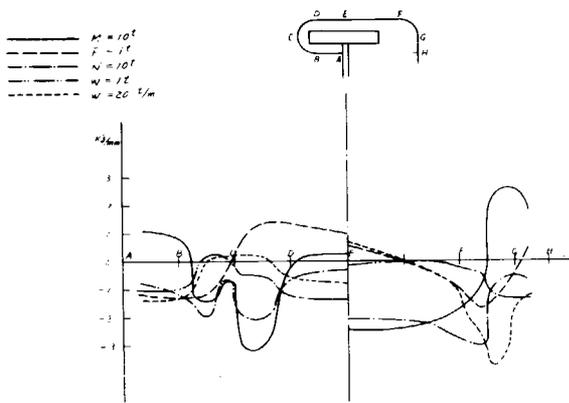


図 6.3.5(4) Slot 周辺応力分布 (BRN)

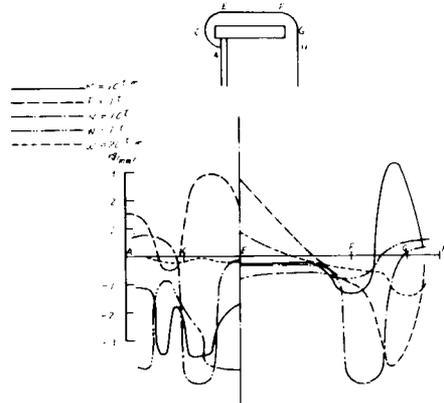


図 6.3.5(5) Slot 周辺応力分布 (BI)

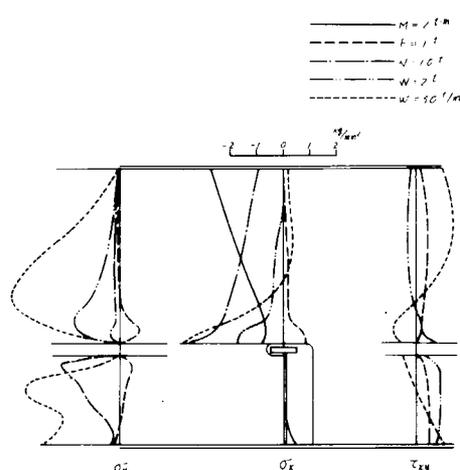
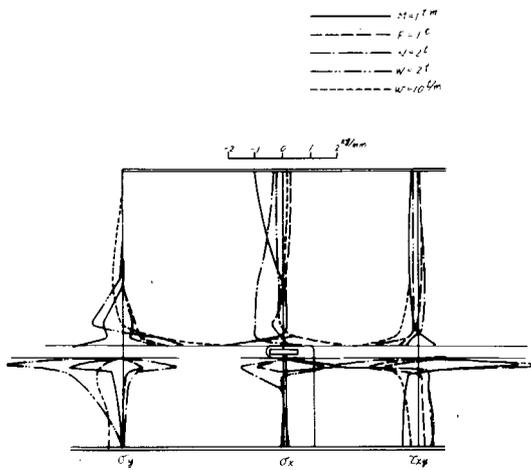


図 6.3.6(1) Long 上貫通断面におけるWebの応力分布(AR) 図 6.3.6(2) Long 上貫通断面におけるWebの応力分布(BR)

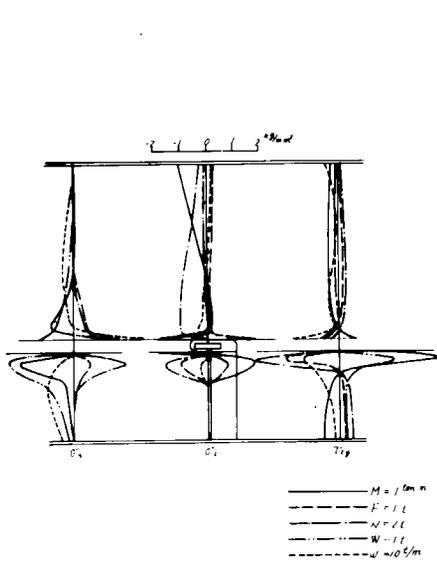


図 6.3.6(3)

Long 1 貫通断面におけるWebの応力分布 (CR)

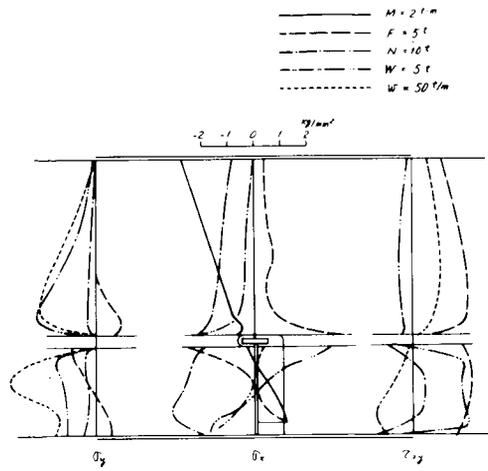


図 6.3.6(4)

Long 1 貫通断面におけるWebの応力分布 (BRN)

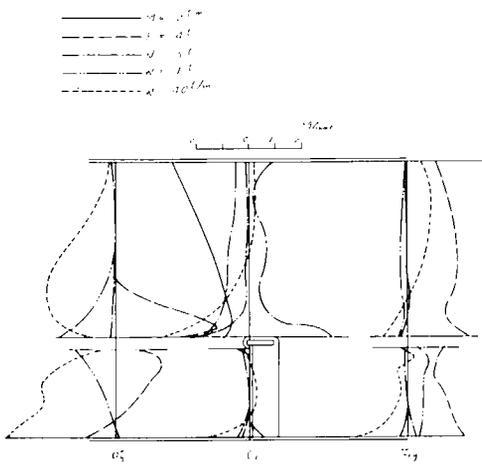


図 6.3.6(5)

Long 1 貫通断面におけるWebの応力分布 (BI)

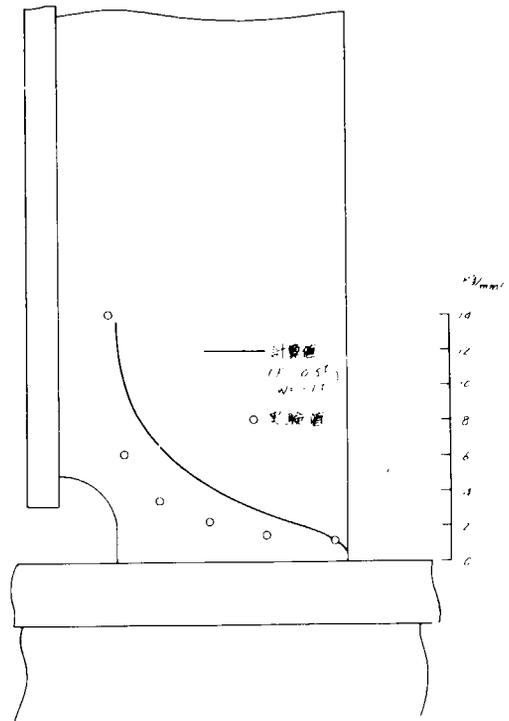


図 6.3.8

BR型模型の計算値と実験値の比較

## 7. スロット部の疲労解析の例と問題点〔参考資料〕

### 7.1 ま え が き

完工時の水張りテスト時にステイブナ基部およびスロット周りに亀裂が入ったり切断したりすることはなく、ある程度就航後に、亀裂や切断が見られるということは、静的引張のみによる損傷ではなく、疲労によるものであると考えない訳にはゆかない。

スロット部の構造形式は複雑な上に、船体に作用する外力が現在ではまだ精度良く把握されていない。スロット部の疲労に関しては、SR120部会で45年度に実施した<sup>2)3)4)</sup>ものがあり、これが唯一の系統的研究である。モデルは10万DWTタンカーの $\frac{1}{4}$ スケールで、3ロンジスペースを中央ロンジに負荷している。スロット部の受ける荷重により発生する応力として、専用バラスタンクについていうと、荷油の積下しによる1次荷重により発生する応力、波浪に起因する2次荷重による応力、さらに振動による3次応力が重畳していることが考えられ、図7.1.1のごとき応力波形(弾性計算)が考えられる。

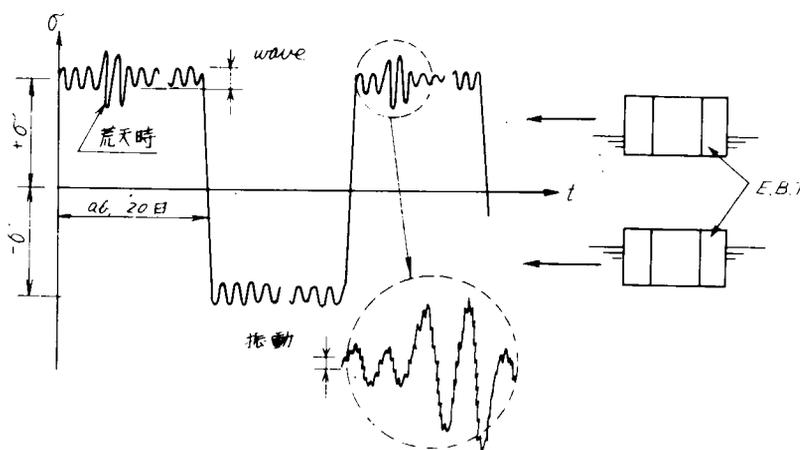


図 7.1.1 スロット部の受ける応力波形

次に、それぞれのサイクル数を1年間でみると、

$$n_{\#1} = 8 \text{ 航海/年} = 8 \quad \text{1次荷重}$$

$$n_{w1} = 3 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \times 600 \text{ 回/時} = 4.32 \times 10^4 \quad \text{2次荷重}$$

$$n_{v1} = 300 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分} \times 500 \text{ 回/分} = 2.16 \times 10^8 \quad \text{3次荷重}$$

となる。ただし、2次荷重によるサイクル数は1年間の就航日数300日<sup>7)</sup>をある波浪変動応力に対する等価日数30日に換算したもの、3次荷重によるサイクル数はプロペラの常用回転数×翼数を500とみた場合である。

サイクル数からみて、1次荷重によるものは極低サイクル、2次荷重によるものは低サイクルで年数を経るにつれ、中サイクルになる。また、3次荷重によるものは極高サイクル領域である。

スロット損傷問題を疲労的見地から語る際には、腐食影響も考慮に入れて、極低サイクルから極高サイクルに至るS-N曲線を精度良く求める必要がある。

低サイクル領域においては、局部的に塑性状態に入っていることを考慮する必要があり、振動による応力に対するサイクル数は極高サイクルで、腐食疲労限度の有無により大いに疲労強度に影響する。現在では、1次荷重による応力、すなわち、荷油の積下しによるものか、あるいは波浪による2次荷重による応力が、スロット部の疲労強度に対し、支配的な因子と考えられているが、振動による応力も絶対値は小さいとは

いえ、サイクル数が非常に大きいので見逃す訳にはゆかないのである。この振動応力の重畳効果はSR120部会46年度計画の一環としてある程度、定量的把握が可能と考えられる。

疲労解析を考慮した設計基準は現在のところ、ASMEのBoiler and Pressure Vessel Code, Sec III “Rules for Construction of Nuclear Vessels”(1963)しかなく、船舶設計基準も疲労を考慮した合理的なものに移行すべきであろう。

## 7.2 SR120.45年度小型模型疲労試験の一解析方法

2)3)4)

SR120の前回に提出された資料に計60個のスロット模型のうちの15個が試験終了したことが示されている。

応力値自体がいかほどであれ、1次荷重による応力(荷油の積下しによる)、2次荷重による応力(波浪による)、振動による応力は、1項で述べべごとく $n_{\ell 1} \sim n_{\ell 20} = 8 \times 10^0 \sim 1.6 \times 10^2$ 、 $n_{w1} \sim n_{w20} = 4.32 \times 10^4 \sim 8.64 \times 10^5$ 、 $n_{v1} \sim n_{v20} = 2.16 \times 10^4 \sim 4.32 \times 10^5$ となる。

表7.2.1に示すように、60個のうちの15個は、サイクル数が1次荷重による応力と2次荷重による応力の中間で行なわれており、極低サイクルおよび高サイクル領域がカバーされていない。(等価波浪応力を高めに見積れば $10^3 \sim 10^5$ あたりで2次荷重による応力を検討できるかもしれないが、等価波浪応力の定量的把握に難がある。)

ここでは、今回の小型模型疲労試験結果の一整理方法を示すこととし、種々の問題点を後述することにする。

高サイクル疲労と低サイクル疲労間の主要な差異は、前者では塑性的挙動をほんの少し伴うか、または全く伴わないが、それに反して後者では塑性的挙動を伴うことである。塑性領域における疲労による損傷は塑性歪の関数であることが判明している。従つて、この領域で使用するための疲労曲線は応力よりもむしろ歪を制御量として行なうテストにもとづくべきである。<sup>1)</sup> このテストに使用する歪値は、便宜上、弾性係数を乗じて実際応力でない仮想応力(fictitious stress)を示すようになってきているが、こうすれば弾性挙動を仮定して計算した応力値と直接に比較できるという利点があるためである。

さて、今回の15個の疲労試験は、損傷が発生しているステイフナ基部およびスロット・フリーエッジ部の応力集中部を歪制御で行なうには困難を伴うので、ロンジフェイスの負荷点近くの変位量を制御するか、または、荷重制御により試験を実施している。

しかし、応力を制御量として用いても、モデル全体で塑性領域に入るのは、切欠効果の存在するステイフナ基部とスロット・フリーエッジの一部であり、切欠部周辺部材は弾性挙動をとっているから、切欠部は実際は歪サイクルを受けていると考えられる。<sup>1)</sup> ここで示す整理法は、仮想応力の計算をスロット対策懇談会で用い、また、SR120部会の応力解析でも用いた、いわゆる三井千葉研式により計算した応力をS-N曲線の縦軸に使用するものである。

試験はほぼ完全片振引張で行なわれている。最大荷重 $P_{max}$ による計算応力(計算応力は $P_{max}$ によるステイフナの最大応力)はいずれも $\sigma_y$ (=供試材試験によると約 $23 \text{ Kg/mm}^2$ )を超えており、文献1)の考え方によれば、修正グッドマン線図で両振に換算すると平均応力が0で $P_R$ (荷重range)が働くことに等価である。すなわち、修正グッドマン線図を使用して降伏強さを越える計算応力を生じる場合の調整法は、

$S'_{mean}$  = 荷重サイクルから直接計算された平均応力の基準値

$S_{mean}$  = 調整平均応力値

$S_{alt}$  = 応力の変動振巾(変動領域の半分)

$S_y$  = 降伏強さ

とすると、

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Salt} + S'_{\text{mean}} \leq S_y \text{ のとき } S_{\text{mean}} = S'_{\text{mean}} \\
 \text{Salt} + S'_{\text{mean}} > S_y \text{ かつ } \text{Salt} < S_y \text{ のとき } S_{\text{mean}} = S_y - \text{Salt} \\
 \text{Salt} \geq S_y \text{ のとき } S_{\text{mean}} = 0
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \text{c. f} \\
 \text{図 7.2.1}
 \end{array}$$

となり、今回の15個のスロット模型はすべて  $\text{Salt} \geq S_y$  の範ちゆうに入る。

文献3)によると、図7.2.2のようにステイフナ基部の応力集中部で荷重制御のような歪履歴をとつてはいるが、ステイフナの端の応力集中がさらにはなほだしいところでは歪制御に近い挙動をしていると考えられるので、以上のような考え方をとつてよからうとした。

まず、全荷重振巾  $P_R$  を平均応力を0にして、表7.2.1の右のほうに示すように、ピーク応力を  $P_R/2$  を外力にして三井千葉研式により計算応力を求めプロットしたのが図7.2.3である。表7.2.1の供試体番号6, 7の2個は疲労試験を行なう前からステイフナ基部に亀裂が入っていたので、ここでは除外する。

○印はステイフナに亀裂が入つたときのNと計算応力の対応を示す。

◎印はステイフナが切断したときのNと計算応力の対応を示す。

×印はステイフナの破断に関係なく、(すなわち、ステイフナの分担率減少に伴い、ウェブの分担率が増大する訳であるが)計算応力とNとの対応を示したもの。

⊗印はステイフナの分担率を考慮して、スロットフリーエッジに亀裂が入つたNとそのときのフリーエッジ応力の対応をとつたものである。

ステイフナに亀裂が入り切断するまで徐々にウェブ荷重分担が増大してゆき切断と同時に外力はすべてウェブ経由することになる。

ここでは、残存ステイフナ巾とステイフナ分担力に直線関係があるものとして、フリーエッジ応力を計算して⊗にプロットした。こうすることにより、ステイフナ基部とスロットフリーエッジの場所ごとでなく、亀裂が入るNと計算応力の対応が一義にとれると考えられるからである。事実、図7.2.3に見られるように○と⊗は同一直線で表現されるようである。

スロット・フリーエッジに亀裂が入る時期よりも、ステイフナ切断の時期のほうが遅いのが2個あるが、フリーエッジに亀裂が入つたときのNに対するステイフナ残存巾が、文献3)に示されているのでこれを使つて先にいつた方法で内挿している。

○と⊗が同一直線で表現できるということは、縦軸の計算応力を三井千葉研式により計算することの正当性が確認できたことになる。

ここでステイフナ切断応力についても、スロットフリーエッジに亀裂が入つてからのウェブ分担力減少を勘案して計算応力を出す必要があるが、ウェブ分担力減少によりステイフナ分担力が増大することはほとんどないと仮定してとりこまなかつた。

N=0.25に示す実験値は当社が以前に行なつた静実験による破壊結果を示しており、このときはスロットフリーエッジに亀裂は見られなかつた。

図7.2.3の3本の直線はそれぞれ50%確率を示している。もしも図7.2.3からスロット・フリーエッジの亀裂発生サイクル数を求める場合には、ⓑでなくて◎を使うほうが簡単である。

(ⓑのスロット・フリーエッジ応力はステイフナの荷重分担力減少に伴うウェブの荷重分担増大を勘案しているから計算が1段階複雑になるからである。)

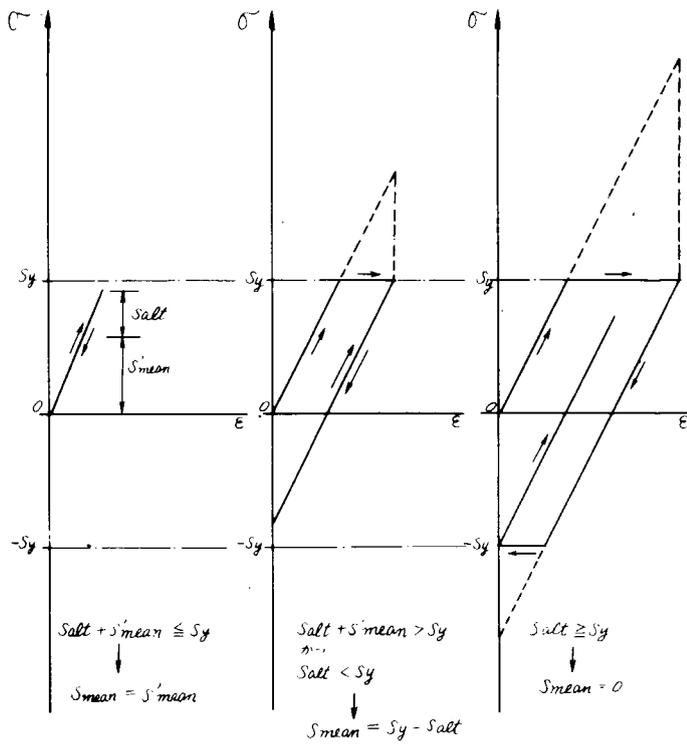


図 7.2.1  $S_{mean}$  と  $S_{salt}$  の組合せ

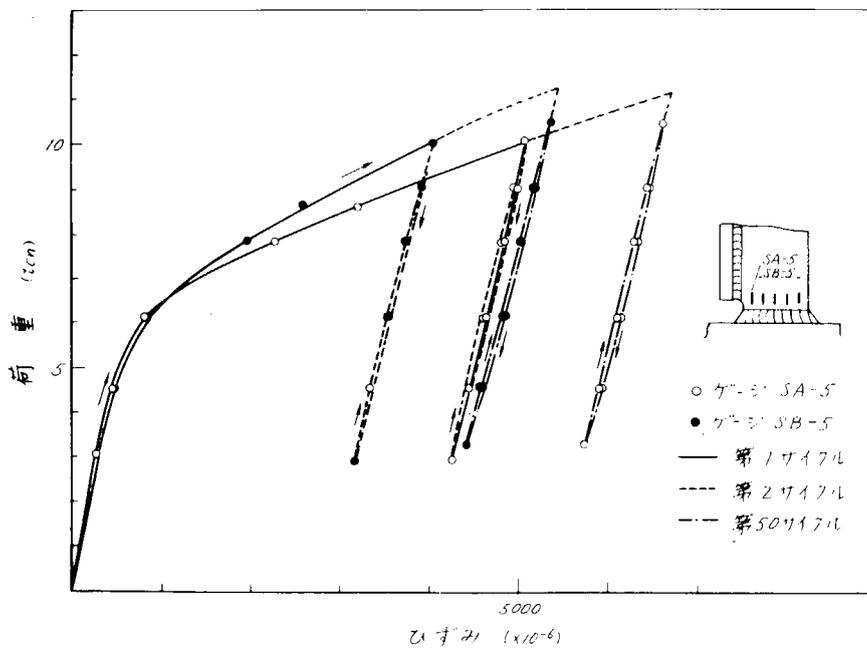


図 7.2.2 Stiff の荷重-ひずみ履歴曲線 (BIKa-1)(SR120-委 3-28から流用)

表7.2.1 SR120・45年度の疲労試験結果(60個のうち終了の16個)と千研式による応力値

番号	供試体略号	Slot	Stiff.	Pmin (ton)	Pmax (ton)	制御方式とc p m	Pr(range) (ton)	Stiff./crack 入る	Stiff. 切 断	Slot freeedge /crack	Stiff. 集中係数	Pmax ベース (Kg/mm <sup>2</sup> )						stiff. 断面積 (mm <sup>2</sup> )	PR ベース		PR ベース stiff. 断面積 (mm <sup>2</sup> )	
												$\sigma_{stiff\ mean}$	$\sigma_{stiff\ max}$	$\sigma_{R1}$	$\sigma_{R2}$	$\sigma_{stiff\ mean}$	$\sigma_{stiff\ max}$		$\sigma_{R1}$	$\sigma_{R2}$		$P_R$ (Kg)
1	AR-ToA-1			1.6	8.0	荷重制御 300% <sub>m</sub>	6.4	9×10 <sup>4</sup>	2.816×10 <sup>5</sup>	*	6.3	$\sigma_{stiff\ mean}$ 18.2	$\sigma_{stiff\ max}$ 46.0	$\sigma_{R1}$ 38.0	$\sigma_{R2}$ -11.8	7.30	15.2	-4.72	182	1330	1870	26.0
2	OR-ToC-1			1.1	8.0		6.9	1.1×10 <sup>5</sup>	2.896×10 <sup>5</sup>	*	4.9	17.8	37.5	39.5	-14.8	7.65	17.1	-6.39	144	1100	2350	25.1
3	BR-ToS-2			1.4	7.8		6.4	(7×10 <sup>4</sup> )	1×10 <sup>5</sup>	*	6.5	20.9	55.8	38.5	-11.5	8.59	15.8	-4.72	"	1235	1965	25.7
4	ARNT04			0.9	8.2	6.3	(2×10 <sup>4</sup> )	*	*	6.3	13.7	33.0	86	-18.6	5.24	-7.15	-1.58	182	925	2198	-10.27	
5	BR-Ka1			2.88	23.00	20.12	( 1 )	4.5×10 <sup>5</sup>	1.16×10 <sup>6</sup>	6.5	61.7	175.0	114.0	-34.0	26.9	49.9	-14.85	144	3870	6190	81.1	
6	BR-Ka2			2.68	12.74	10.06	initial crack	2.078×10 <sup>6</sup>	(1.96×10 <sup>6</sup> )	"	34.1	87.5	62.8	-18.8	13.5	24.8	-7.42	"	1945	3085	(40.4)	
7	BR-Ka3			2.88	9.67	6.79	"	3.224×10 <sup>6</sup>	6.20×10 <sup>6</sup>	"	25.8	59.0	47.7	-14.3	9.08	16.8	-5.05	"	1310	2085	27.4	
8	BI-Ka1			3.09	10.49	7.40	変位制御 30% <sub>m</sub>	9.44×10 <sup>5</sup>	1.8375×10 <sup>6</sup>	1.30×10 <sup>6</sup>	"	14.4	33.2	57.5	-15.5	5.10	2.03	-5.47	"	734	2966	(25.3)
9	BI-Ka2			2.88	13.75	10.66	"	3.84×10 <sup>5</sup>	2.367×10 <sup>6</sup>	(2.40×10 <sup>6</sup> )	"	18.9	47.6	75.3	-20.3	7.32	2.92	-7.86	"	1053	4277	36.4
10	BI-Ka3			3.09	18.29	15.41	"	3.90×10 <sup>5</sup>	1.23×10 <sup>6</sup>	9.47×10 <sup>5</sup>	"	25.1	68.6	100.0	-27.0	10.60	-4.21	-11.38	"	1527	6178	(52.5)
11	CK-Ka1			3.09	13.14	10.05	"	9.80×10 <sup>3</sup>	*	7.20×10 <sup>4</sup>	4.9	28.0	10.70	46.8	-14.3	52.4	17.9	-5.46	"	1540	3485	25.8
12	CK-Ka2			3.09	17.66	14.57	"	5.10×10 <sup>3</sup>	9.43×10 <sup>3</sup>	(1.10×10 <sup>4</sup> )	"	37.7	7.63	62.9	-19.3	15.60	26.0	-7.97	"	2250	5035	37.6
13	CK-Ka3			3.09	13.14	10.05	"	1.50×10 <sup>4</sup>	2.688×10 <sup>4</sup>	(6.70×10 <sup>4</sup> )	"	28.0	52.4	46.8	-14.3	10.70	17.9	-7.47	"	1540	3485	25.8
14	BR-Mh1			1.0	10.0	9.0	"	3.3×10 <sup>3</sup>	(2.5×10 <sup>4</sup> )	2.83×10 <sup>4</sup>	6.5	26.8	12.10	49.4	-14.8	78.3	22.2	-6.67	"	1742	2758	36.2
15	BR-Mh2			2.0	20.0	18.0	"	3.5×10 <sup>2</sup>	8.84×10 <sup>2</sup>	1.36×10 <sup>3</sup>	"	53.6	157.0	98.8	-29.6	24.20	44.5	-13.30	"	3480	5520	72.6
16	BR-Mh3			1.5	15.0	13.5	"	9.8×10 <sup>2</sup>	4.70×10 <sup>3</sup>	4.90×10 <sup>3</sup>	"	40.1	117.0	74.1	-22.2	18.00	33.4	-10.00	"	2590	4160	54.2

( )は推定  
\*は更に繰返しを続行すれば  
crack発生すると考えら  
れる。

stiff.  
web  
分担力

( )はstiff.  
切断よりfree  
edgesに crack  
のほうが深い  
もの

\*米; 図7.2.1の応力値に使用したのもの

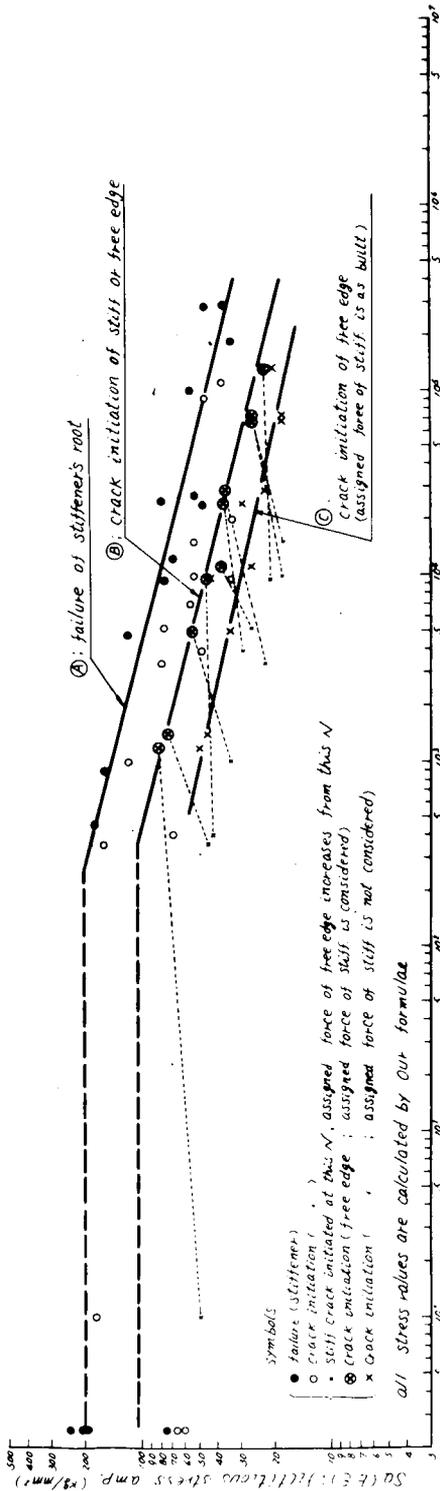


Fig 7.2.3  $S_a(E\epsilon) \sim N$   
( $R=-1$ , in air)

### 7.3 スロット部の疲労解析における種々の問題点

7.2節で行なつた整理では、 $d_c/d_N$ など材料屋独特の考察は行なわず、もつぱら構造屋的な話の進め方をした。以下に疲労解析に際しての種々の問題点を述べてみる。

- (1) ASME の BOILER & PRESSURE VESSEL CODE の DIV. 2, SEC. 3は疲労解析が重要な根底をなしており、疲労設計法を確立した初めてのものであるとはいえ、腐食影響は考慮されていない。船舶の場合は腐食影響は重要な要素であり、空気中での実験結果から求めたSN曲線を安全率という形で修正するにせよ、塩水中あるいは水中、さもなくばこれに準じる腐食環境下での実験結果からSN曲線を求めるにせよ、この腐食影響についての確実な適用方法が見当たらないので、今後SR部会でも説明してゆくことが必要と思われる。S=0のN(時間基準)は板厚自然衰耗と対応するとしてもよいであろうが、時間ベースを回数ベースに換算することが必要である。
- (2) 7.2節で切欠部(切欠効果があると考えられる部分)は、荷重制御であつても歪サイクルを受けているとして、話を進めてきた訳であるが、実際そうであるかどうかの確認の手だてではない。  
また、計算応力ではステイフナ基部に相当の高応力が発生しており、ステイフナ全面が塑性領域に突入したとすると、ステイフナの荷重分担力はある値で頭打ちになり、その分だけウェブが荷重分担増大する結果となる。7.2節ではこれについては考慮しておらず、図7.2.3はステイフナについては安全側に、また、スロットフリーエッジについては⊕線の⊗印はよいが、⊙線の×印が危険側に見積っていることになる。しかし、現在弾塑性挙動が計算できるFEMプログラムが完成しておらず、定量的に分担力をつかんでSN曲線の精度を上げることはできない。
- (3) 7.1節で図7.1.1に示したような応力波形をもつ船舶では、ある平均応力のもとに、さらに波浪あるいは振動による応力が重畳するので、図7.2.3の表現形式のSN曲線を使用する場合、これを平均応力が0となるときの等価な応力振巾を求めねばならない。この等価応力振巾 $S_{eq}$ をASME<sup>1)</sup>では、

$$S_{eq} = \frac{S_{alt}}{1 - \frac{S_{mean}}{S_u}} \quad S_u; \text{Ultimate tensile strength}$$

と求めるとしている。しかし、 $S_{alt}$ 自体が、荷油積下しによる全応力振巾を $\sigma$ としたとき、疲労によるものが $\sigma_R = 0.075\sigma$ 、振動によるものが $\sigma_R = 0.025\sigma$ 程度であろう、というくらいで、現在のところ正確につかめていないのが現状であり、今後の課題として残っている。7.1節でいつたように、船舶の場合Nが極低サイクルから極高サイクルまでにあつており、それ相応に多数の実験を行なつて精度よいSN曲線を作成する必要がある。

- (4) その他、応力波形の形状の影響もあり、図7.1.1の1次荷重による応力はほぼ台形で、上下辺のholding timeによる効果があるはずである。また、残留応力・寸法効果・工作精度などを最終的に修正係数(安全率)という形でとりこんで設計図表を作成するにしてもその定量的把握に困難さを伴うことは必至であろう。

7.4 当社社内疲労実験結果との対応

7.4.1 KK2予備試験<sup>5)</sup>

表 7.4.1 KK2予備実験結果

		$P_{1\max}=0.55\text{Kg/cm}^2$			$P_{2\max}=0.28\text{Kg/cm}^2$			$P_{3\max}=0.29\text{Kg/cm}^2$			$\Sigma(\frac{n}{N})$
		$\sigma_{\max}$	$\frac{n_1}{N_1}$	$\frac{n_1}{N_1}$	$\sigma_{\max}$	$\frac{n_2}{N_2}$	$\frac{n_2}{N_2}$	$\sigma_{\max}$	$\frac{n_3}{N_3}$	$\frac{n_3}{N_3}$	
No.5 slot	P	198	(50) $2.40 \times 10^2$	0.218							0.218
	S	"	(48) "	0.200							0.200
No.4 slot	P	168	(55) $5.00 \times 10^2$	0.110							0.110
	S	"	(55) "	0.110							0.110
No.3 slot	P	137	(500) $1.10 \times 10^3$	0.454							0.454
	S	"	666 "	0.605	70	824 $1.70 \times 10^4$	0.049				0.655
No.2 slot	P	107	666 $3.00 \times 10^3$	0.222	54	1522 $5.00 \times 10^4$	0.031	56	1361 $4.40 \times 10^4$	0.031	0.284
	S	"	666 "	0.222	"	1522 "	0.031	"	1361 "	0.031	0.284
No.5 slot	P	15.7	(60) $1.65 \times 10^5$								$\ll 1$
	S	"	(60) "								"
No.4 slot	P	12.1	(60) $5.50 \times 10^5$								"
	S	"	(60) "								"
No.3 slot	P	8.6	(500) $2.60 \times 10^6$								"
	S	"	(500) "								"
No.2 slot	P	7.3	(666) $5.45 \times 10^6$		3.7	1522 $1.20 \times 10^8$		3.9	1677 $1.00 \times 10^8$		"
	S	"	666 "		"	1522 "		"	1677 "		"

表 7.4.1 に試験結果を示す。10 ロンジ × 1 トランス・スペースの 8 万 DWT タンカーの  $\frac{1}{5}$  模型で、水圧タンクを介して外板に水圧負荷した。圧力はほぼ完全両振りで行なったが、ステイフナ基部の応力はステイフナに引張軸力がかかるときの圧力を基準に計算した。また、R 部の応力は PS 5, 4, 3 については R<sub>2</sub> 部の応力を PS 2 は R<sub>1</sub> 部の応力を示す。(実験でも PS 5, 4, 3 では R<sub>2</sub> 部から、PS 2 は R<sub>1</sub> 部から亀裂が入った。) 表 7.4.1 でダ円で囲った時点でステイフナについては切断、スロット・フリーエ

ツジについては亀裂が入ったことを示す。  $N_1$  ,  $N_2$  ,  $N_3$  は図7.2.3の④線⑤線から読みとつたサイクル数である。スロットフリーエッジの  $N_2$  ,  $N_3$  が  $10^8$  以上になっているが、これは⑤線を単に延長したもので、実際は疲労限以下の応力値かもしれない。

#### 7.4.2 ディープガータ疲労試験

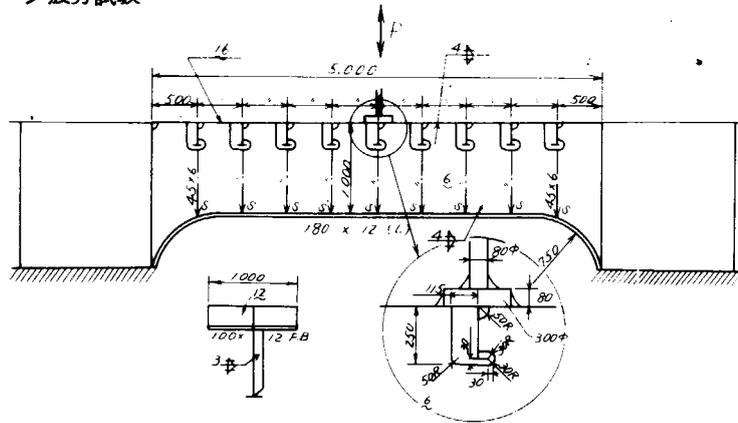


図 7.4.1 疲労試験の供試体と試験機との取付部

当所の疲労試験機の受け渡しテストに関連して実施されたもので、各ステージの  $n$  と荷重は分っているが、ステイフナ切断・スロットフリーエッジ亀裂発生時点共不明である。(スロットフリーエッジに亀裂が入つたのはステイフナ切断後まもなくで7あるいは8ステージであつたと考えられる。)

表 7.4.2 負荷状況

ステージ	$P_{min}$ (ton)	$P_{max}$ (ton)	$n(\text{cycle})$
1	-10.0	0	$7.2 \times 10^3$
2	0	10.0	$2.6 \times 10^4$
3	1.5	13.5	$7.9 \times 10^4$
4	1.0	17.0	$1.6 \times 10^4$
5	2.0	20.0	$5.3 \times 10^4$
6	3.0	25.0	$1.6 \times 10^4$
7	2.0	30.0	$6.3 \times 10^3$
8	-42.0	42.0	$9.0 \times 10^3$

(-)はステイフナ軸力が圧縮

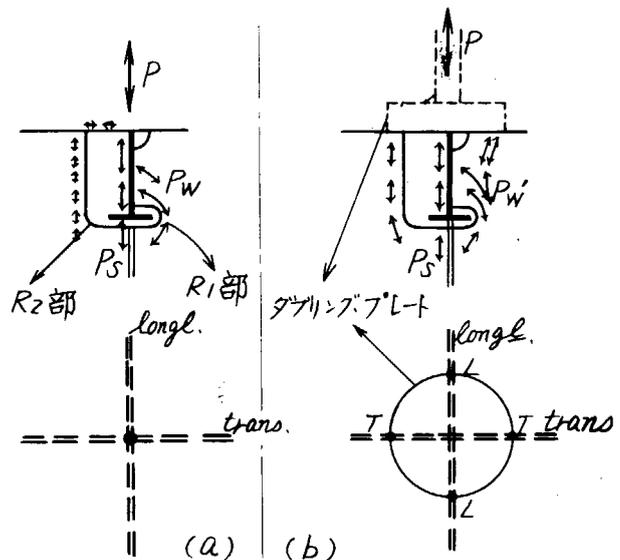


図 7.4.2 荷重のかかり方と力の流れ

三井千葉研式による応力計算は、図7.4.2中の(a)に示す荷重のかかり方のときに適用でき、(b)のようにダブルング・プレートを介して負荷する場合は  $P$  をそのまま集中荷重として計算式に代入することはできない。

(b)状態でもステイフナに圧縮軸力がかかる場合は、ほぼ三井千葉研式が適用できる状態であるとはいえ、とくに引張力がかかる場合は、ロンジとウェブの分担力を考慮して計算する必要がある。ここでは、精算は別途行うこととし、 $P$  の8割が引張・圧縮ともロンジに集中荷重として働くと仮定した場合と、同4

割の2ケースにつき図7.2.3のS-N曲線と対比してみることにする。

図7.4.2中の(b)の力の分配については、図7.4.3のように

$$\begin{aligned}
 P &= P_L + P_T && \text{外力} \\
 P'_S &= P_{LS} + P_{TS} && \text{ステイフナ分担力} \\
 P'_W &= P_{LW} + P_{TW} && \text{ウェブ分担力 (R}_1\text{部)} \\
 P_{TS} &= P_{TW}
 \end{aligned}$$

$$P_L = P_{LS} + P_{LW} \quad (\text{三井千葉研式によると } P_{LS} = 0.585 P_L, P_{LW} = 0.415 P_L)$$

であると仮定する。なお、R<sub>2</sub>部はクラックが入らなかつたので、図7.2.3のS-N曲線との対比は行なわない。

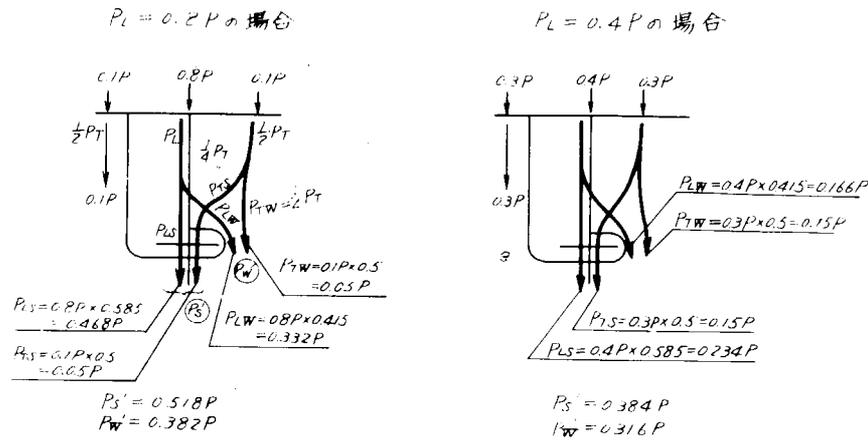


図7.4.3 力の流れの仮定

両振に換算するには7.3節の(3)の式

$$Seq = \frac{Salt}{1 - \frac{Smean}{Su}} \quad (\text{Salt, Smeanとも、それぞれ } Palt, Pmean \text{ による、ステイフナ、スロットフリーエッジの平均を代入して } Seq \text{ を平均値として求め、次に応力集中係数をかけたのが、表7.4.3の } Seq)$$

を用いて算出した。Su = 41 kg/mm<sup>2</sup> としている。表7.4.3に結果を示す。

表7.4.3 S-N曲線との対比の結果

① ステイフナ基部 (P<sub>L</sub> = 0.8 P)

② ステイフナ基部 (P<sub>L</sub> = 0.4 P)

ステイジ	Seq	n <sub>i</sub>	N <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> /N <sub>i</sub>	Σ <sub>i</sub> (n <sub>i</sub> /N <sub>i</sub> )
1	26.2	7.2×10 <sup>5</sup>	9 × 10 <sup>5</sup>	0.008	0.008
2	34.8	2.6×10 <sup>4</sup>	3 × 10 <sup>5</sup>	0.087	0.095
3	45.5	7.9×10 <sup>4</sup>	9.4×10 <sup>4</sup>	0.841	0.936
4	63.9	1.6×10 <sup>4</sup>	2.5×10 <sup>4</sup>	0.640	1.576
5	77.5	5.3×10 <sup>4</sup>	1.2×10 <sup>4</sup>	4.500	6.076
6	108	1.6×10 <sup>4</sup>	3 × 10 <sup>3</sup>	5.333	11.409
7	152	6.3×10 <sup>3</sup>	6.4×10 <sup>2</sup>	9.850	22.259
8	252	9.0×10 <sup>3</sup>	—	—	—

ステイジ	Seq	n <sub>i</sub>	N <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> /N <sub>i</sub>	Σ <sub>i</sub> (n <sub>i</sub> /N <sub>i</sub> )
1	20.2	"	2.5×10 <sup>6</sup>	0.003	0.003
2	24.8	"	1.1×10 <sup>6</sup>	0.024	0.027
3	31.6	"	4.3×10 <sup>5</sup>	0.184	0.211
4	43.7	"	1.2×10 <sup>5</sup>	0.133	0.344
5	52.0	"	5.6×10 <sup>4</sup>	0.946	1.290
6	69.0	"	1.9×10 <sup>4</sup>	0.842	2.132
7	93.0	"	5.5×10 <sup>3</sup>	1.145	3.277
8	186	"	3.3×10 <sup>2</sup>	27.25	30.527

③ スロット周り ( $P_L = 0.8 P$ )

ステージ	$S_{\text{eq}}$	$n_i$	$N_i$	$n_i/N_i$	$\sum_i (n_i/N_i)$
1	7.1	"	$7.4 \times 10^6$	0.001	0.001
2	7.5	"	$5.8 \times 10^6$	0.005	0.006
3	9.2	"	$2.4 \times 10^6$	0.033	0.039
4	12.3	"	$5.2 \times 10^5$	0.307	0.346
5	14.1	"	$2.8 \times 10^5$	0.189	0.535
6	17.6	"	$1.1 \times 10^5$	0.146	0.681
7	22.8	"	$3.2 \times 10^4$	0.197	0.878
8	60.5	"	$4.5 \times 10^2$	20.000	20.878

④ スロット周り ( $P_L = 0.4 P$ )

ステージ	$S_{\text{eq}}$	$n_i$	$N_i$	$n_i/N_i$	$\sum_i (n_i/N_i)$
1	5.8	"	$1.4 \times 10^7$	0	0
2	6.2	"	$1.3 \times 10^7$	0.002	0.002
3	7.5	"	$5.8 \times 10^6$	0.014	0.016
4	10.0	"	$1.5 \times 10^6$	0.011	0.027
5	11.5	"	$7.8 \times 10^5$	0.068	0.095
6	14.3	"	$2.7 \times 10^5$	0.059	0.154
7	18.4	"	$8.5 \times 10^4$	0.074	0.228
8	50.2	"	$9 \times 10^2$	10.000	10.228

### 7.4.3 結果について

7.4.1項のKK2予備実験は早くいかれすぎ、7.4.2項のデイープガード疲労試験は、ステイフナ破断・スロット周り亀裂発生時点とも不詳とはいえもちすぎの傾向を示している。(面圧荷重と一点集中荷重のちがい?)

しかし、図7.2.3のS-N曲線自体が、わずか14実験点で構成されており、残りの実験点をプロット(このとき全プロット点につきスロット対策懇談会の最新の応力最大係数を用いる)して精度あるS-N曲線により検討をせねばならないと考えられる。今回示したものは一応の目安と考えてよいだろう。

#### 参考文献

- 1) ASME, criteria of the ASME boiler and pressure vessel code for design by analysis in sec. III and VIII. Division 2 (1963)
- 2) SR120資料; 3委26 (東大 作成)
- 3) " 3委28 (川重 " )
- 4) " 3委29 (三菱 " )
- 5) SR133資料 (三井 " )
- 6) スロット対策懇談会資料、SL-4-47 (三井 作成)
- 7) Isao Yamaguchi, "Fatigue failures in ship structures and their Countermeasures," IIW Doc. XIII-504-68 (1968)