

日本船舶振興会昭和50年度補助事業
“船舶の構造・性能に関する基礎的研究”

研究資料 No. 253

第157研究部会

船体構造のメインテナンスフリーに 関する研究

報 告 書

昭和51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50年補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として、日本造船研究会が第157研究部会においてとりまとめたものである。

本年度はメインテナンスフリー船の建造に際し、工作欠陥による損傷を極力少なくするため、工作欠陥による今までの損傷事例と工作欠陥特に溶接内部欠陥の評価に関する調査を行った。

さらに溶接内部欠陥が疲れ強度に及ぼす影響について実験を行い、余盛付き突合せ継手に関するかぎり、有害な工作欠陥は溶込不足やき裂などの平面欠陥であって、プローホールやスラグの巻込み等立体欠陥は強度上影響のないことを確認し、さらにこの種の工作欠陥を容易に発見し得る簡易超音波探傷機に関する実用化試験を行った。

今回の研究調査の結果、工作欠陥による損傷を防止するためには、溶接部の内部には溶込不足を残さないこと、その他の船殻構造はJSQSの許容基準内で建造することが適当であることが分かり、これに対する簡易な検査器具の実用化のメドが立った。

第157研究部会委員名簿

(敬称略五十音順)

部会長	木原 博	
副部会長	寺沢 一雄	
主査	藤田 譲 (東京大学)	
幹事	飯田国広 (東京大学)	飯塚 真平 (住友重機械工業)
	池田一夫 (神戸製鋼)	石黒 隆義 (新日本製鉄)
	井上 肇 (船舶技術研究所)	仰木 盛綱 (佐世保重工業)
	尾上久浩 (三菱重工業)	賀来信一 (日本海事協会)
	川原正言 (日本钢管)	菊池晋一 (三菱重工業)
	岸 康太郎 (三井造船)	後藤大三 (石川島播磨重工業)
	恒成利康 (川崎重工業)	寺本 晋 (三菱重工業)
	永井 明 (日立造船)	船越督己 (川崎製鉄)
	平川 賢爾 (住友金属工業)	
委員	青塚 刪 (横崎造船)	秋田好雄 (日本海事協会)
	石井信夫 (日本郵船)	石橋敬男 (佐野安船渠)
	板垣 浩 (横浜大学)	伊東達夫 (川崎汽船)
	五十川 幸一 (三保造船)	太田幹二 (日本钢管)
	太田元久 (日本防蝕工業)	岡田陽雄 (大阪造船)
	小川泰之輔 (石川島播磨重工業)	金井良助 (三菱重工業)
	金沢 武 (東京大学)	木村朝夫 (中川防蝕工業)
	佐藤邦彦 (大阪大学)	堺由輝 (川崎重工業)
	沢柳政弘 (三井造船)	鈴木省輔 (函館ドック)
	高屋鋪尚史 (出光タンカー)	辻 勇 (九州大学)
	長沢 準 (船舶技術研究所)	永野侃 (昭和海運)
	西川孝寛 (東亜ペイント)	服部堅一 (住友重機械工業)

	藤掛勝正(新和海運)	松崎義男(来島どっく)
	真能創(防衛大学校)	毛利武弘(大阪商船三井船舶)
	八木順吉(大阪大学)	山口勇男(日本海事協会)
討議参加者	岡野伊史(佐世保重工業)	岡本太郎(日立造船)
	神尾善二(三菱重工業)	川崎哲郎(三菱重工業)
	黄瀬利弘(三菱重工業)	桑守彦(中川防蝕工業)
	小林邦彦(川崎製鉄)	小松英雄(住友金属工業)
	齐田正(住友重機械工業)	鈴木孝之(檜崎造船)
	鷲見一峯(三菱重工業)	出納真平(神戸製鋼)
	豊田政男(大阪大学)	豊貞雅宏(日立造船)
	中村隆英(佐世保重工業)	中村義隆(石川島播磨重工業)
	成木朝夫(川崎製鉄)	西村泰治(石川島播磨重工業)
	福原重一(来島どっく)	松本宏之(石川島播磨重工業)
	森修(神戸製鋼)	森田博(川崎重工業)
	柳井博(神戸製鋼)	余川敏雄(川崎重工業)
	渡辺昌健(三菱重工業)	綿屋怡郎(佐世保重工業)

目 次

1 まえがき	1
2 研究の目的と内容	3
3 工作欠陥評価に関する調査	4
3.1 船体損傷調査	4
3.2 欠陥評価に関する研究	14
4 溶接の内部欠陥の評価に関する実験	26
4.1 実験の目的と計画	26
4.2 供試材および試験片	28
4.3 試験材の溶接と欠陥の作り方	32
4.4 余盛付き突合せ継手の疲れ強度	39
4.5 淵込不足を含む継手の疲れ試験	42
4.6 プローホール、スラグの巻込みを含む継手の疲れ試験	68
4.7 溶接部の有害な内部欠陥	70
5 溶接欠陥検出法確立に関する研究	83
5.1 研究の目的	83
5.2 試験片	83
5.3 試験方法	84
5.4 超音波による欠陥深さの測定	88
5.5 試験結果	89
5.6 Flaw Tester の適用限界	96
5.7 まとめ	98
6 メインテナンスフリーを考慮した工作欠陥の許容基準	120
6.1 工作欠陥許容基準の考え方	120
6.2 突合せ溶接継手の欠陥の許容基準	121
6.3 すみ肉溶接継手の欠陥の許容基準	121
6.4 母材部の工作欠陥の許容基準	122
7 結 言	124

1. まえがき

船舶のように複雑かつ巨大な構造物が不確定な海象気象のなかを主として人間の判断で運行するシステムでは、故障が全く起らない完全なメインテナンスフリー船を経済的に成立づ価格で建造することは困難である。

しかし、船舶の大型化、高密度化に伴ないきびしい運航スケジュールが要求されると就航後の損傷の発生が皆無となるような信頼度の高い船舶が関係者から強く要望され、船舶の建造時にその設計工作中特別の配慮をしたメインテナンスフリー船に対する関心が高まっている。

完全な意味でのメインテナンスフリーは望めなくとも、信頼度が高く故障の少ないメインテナンスレス船、あるいは故障してもたやすく修理のできるイージーメインテナンス船は建造時にそれなりの配慮をすれば可能である。

船舶のメインテナンスフリーを考える場合、搭載する機器や機装の問題とともに船体構造の信頼性も重要な因子となる。船体構造のように巨大でしかも常時点検できないものに対しては、信頼度が高く故障の少ないメインテナンスレス船が現実的である。船体構造のメインテナンスレスはいかにして達成されるであろうか。それには船体構造の損傷がどのようにして起っているかを明らかにし、その対策をきめ細かく実施することが必要となる。

船舶の坐礁、爆発、衝突、火災や誤操作による損傷事故をのぞき、船舶が就航後構造上のトラブルを生じ、何らかのメンテナンスのための工事が必要となるのは次の3つに集約される。

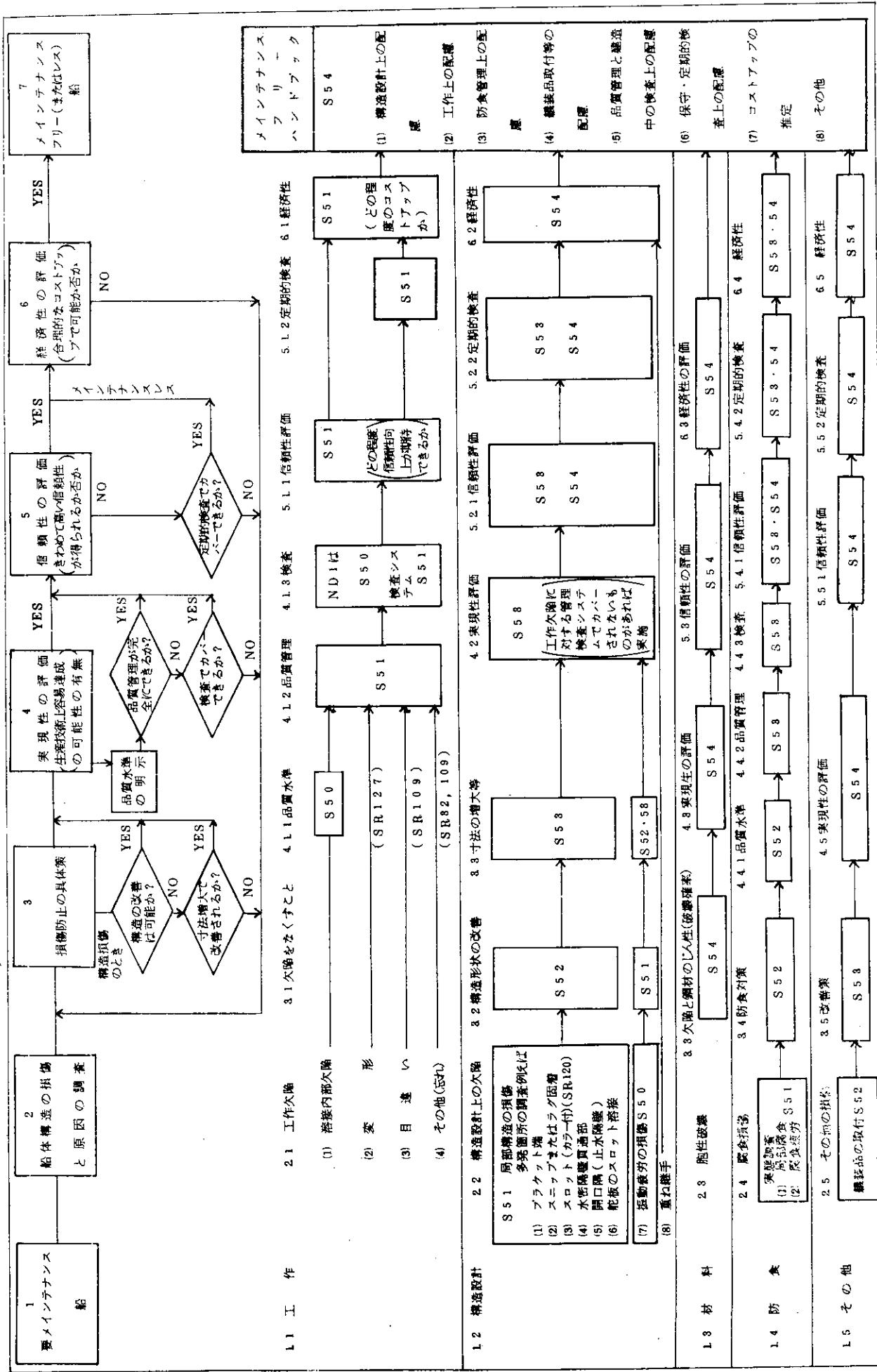
- (1) 構造設計に起因する損傷の補修工事
- (2) 工作欠陥に起因する損傷の補修工事
- (3) 腐食耗耗に起因する損傷の補修および部材の取替補修工事

これら3つの補修工事をできるだけ少なくすることがメンテナンスレス船であり、理想としてのメンテナンスフリー船に近づく道である。この3つの項目の損傷の調査と防止策についてはこれまで10年来各方面で研究が進められており、一部ではすでに実船に応用され良い結果を得たものもあるが、これを追跡調査してシステム化することが必要と考えられる。

本研究は現在各方面で行われている研究の進捗状態を考えて5ヶ年計画とし、最終年度には本研究の結果と従来他の方面で行われた研究結果を総合して「船体構造のメインテナンスフリーマニュアル」を作製することを目的としている。

本研究の実施の手順を表-1に示す。

表-1 SR 157 船体構造のメインナンスフレームに関する研究の進め方



S〇〇は研究調査実施年度を示す。

2. 研究の目的と内容

昭和50年度は初年度として工作欠陥の許容基準の設定と溶接内部欠陥を確実にしかも容易に発見し得る検査機器と検査法を確立することである。この目的のため次の調査研究が行われた。

(1) 工作欠陥に関する調査

船体構造の損傷事例のうち工作欠陥に起因する損傷例を集計調査し、どのような大きさ、種類の欠陥が実際の損傷に結びつくかを明らかにして工作欠陥の許容基準検討の際の基礎資料とする。また工作欠陥と強度との関係について実験研究された報告について調査し、欠陥の種類と大きさが強度にどのような影響を与えるかについて検討を加え、工作欠陥許容基準検討の際の理論的な裏付けとする。

(2) 溶接内部欠陥の評価に関する実験

突合せ継手の内部欠陥は非破壊検査の判定基準に関連して問題となることが多い。継手内部の欠陥の評価を疲れ試験結果でもって行なうこととし、余盛り付き健全突合せ継手の強度を基準にとって欠陥を含む継手の強度低下を実験で確かめ、判定基準確立の基礎資料としたい。

(3) 溶接欠陥検出法確立に関する研究

余盛り付き突合せ溶接継手において継手の疲れ強さを低下させる内部欠陥（たとえば溶込不足）にかぎって検出できる非破壊検査機器とその探傷条件を定める研究を行う。(2)で作製された溶接欠陥を各種の非破壊検査法で試験してその結果を比較するとともに、最近開発された簡易超音波斜角探傷装置を使用して欠陥検出能力を確認し、欠陥探傷感度を設定する。

3. 工作欠陥評価に関する調査

3.1 船体損傷調査

3.1.1 工作欠陥に起因する損傷の統計

(1) 工作欠陥によって損傷を生じた船舶

1968年より1971年までに建造された2000G/T以上の船舶1,820隻について1971年から1947年までの4年間における建造時の工作欠陥に起因する損傷事例について調査を行なった。その結果、明らかに建造時の工作欠陥に起因したと考えられる損傷は529件であり、175隻の船に発生していた。(表3.1.1-1)

大部分の損傷は定期的な検査において発見されて補修されるから船舶の定期的な運航に支障のない程度の軽微なものである。しかしながらごくわずかではあるが工作欠陥から発生したき裂がぜい性破壊となって強力甲板へ伝播したり、外板のき裂となって浸水事故の原因となることもあります。軽視することはできない。

これらの調査対象船舶において構造設計が原因と考えられる損傷を生じた船舶はこれに数倍する隻数で、その件数も数10倍となっており、数の上では工作欠陥は損傷の最も重要な因子ではないように見える。先に行なわれた調査¹⁾でも、構造設計が原因の損傷は不連続構造部のごく局部的な応力集中部に発生する局部的な短かい疲れき裂による損傷で、その場所も限定され予測もできる上き裂の伝播速度もおそく、大きなき裂に成長するまでに発見補修されるし、設計へのフィードバックによって新しく建造される船では次第にその数も少なくなるいわば処理しやすい損傷である。

これに反して工作に起因する損傷はその発生箇所の予測が困難なため初期の段階では発見されず、かなり大きくなって始めて発見され運航に支障を来す損傷となることがある。さらに初歩的なミスが大部分であるため関係者の不信を買ひ、社会的にも問題となるなど影響するところが大きい。

表3.1.1-1 調査対象船と損傷発生船

調査船舶	隻(件)数
調査対象船舶数	1,820隻
一般損傷発生船舶数	846隻
工作が原因の損傷発生船舶	175隻
工作が原因の損傷発生件数	529件

損傷の原因となった工作欠陥は建造時の一寸した不注意によってできたものであり、通常の工作法や管理が正しく行われておれば完全に防止できる程度のもので、このような損傷の絶無を期すことは必ずしも困難なことではな

(2) 損傷原因となった欠陥の種類

工作欠陥は、損傷発生箇所によって分類すると表3.1.1-2のとおりとなる。

表3.1.1-2 工作欠陥による損傷の発生箇所と欠陥の種類

損傷発生箇所	工作欠陥の種類
突合せ継手	溶込み不足、裏溶接忘れ、その他
すみ肉継手	取付精度不良によるギャップ過大、目違い、溶接忘れ、その他
母材部	部材の取付忘れ、溶接変形、寸法誤作、ガスノッチ、その他

この工作欠陥による損傷発生頻度は表 3.1.1-3 のとおりで比較的少ないが、前述のとおり外板や上甲板のせい性破壊の原因となることもあり軽視はできない。

これらの原因別分類は図 3.1.1-1 のとおりで、突合せ継手の溶込不足に起因する損傷がもっとも多く、全体の 42.5%を占めていることがわかる。溶接による変形も全体の 15%近くを占めているが、凹損はき裂損傷ほど強度低下はいちいちるしくない。すみ肉溶接の精度不良に起因する損傷も 15%程度あるが、特に貫通部の損傷が 10%程度もあり、貫通部の精度管理と溶接方法に改善の余地のあることを示している。

目違い、溶接忘れ、部材の取付忘れ、寸法誤作またはガスノッチによる損傷も散見されるが、損傷の数は比較的少ない。

表 3.1.1-3 工作欠陥による船体損傷の頻度

工作欠陥の種類		損傷船発生率 (%)	1隻当たりの損傷発生件数
突合せ溶接	溶込不足	4.1	0.123
	裏溶接忘れ	0.1	0.004
	その他(板厚さテーパ不良、補修不良等)	0.1	0.002
すみ肉溶接	取付不良による 貫通部	0.8	0.029
	ギャップ過大 その他の部分	0.8	0.014
	目違い	0.4	0.007
	溶接忘れ	0.6	0.015
	その他(脚長不足、アンダーカット等)	0.6	0.025
母材部	部材の取付忘れ	0.2	0.003
	溶接変形	0.7	0.042
	寸法誤作	0.1	0.009
	ガスノッチ	0.4	0.006
	その他(塗装不良による腐食、鋲孔からのき裂)	0.3	0.005
全 体		9.6	0.289

突合せ溶接とすみ肉溶接の工作欠陥に起因する損傷の発生件数の比は 288 : 168 すなわち約 7 : 5 であるが、船体構造における突合せ溶接とすみ肉溶接の溶接長の比は約 1 : 4 であるから、単位溶接長さ当たりの損傷発生率の比は 28 : 5 で、突合せ溶接の損傷発生率はすみ肉溶接の約 5.6 倍となり、突合せ溶接に重点を置いて管理が行なわれるべきであろう。

(3) 工作欠陥を生じやすい箇所

工作欠陥は一般にランダムの場所に発生するから損傷箇所を予測することは困難であるが、工作の困難な箇所や管理が行い難い箇所に多く発生する傾向も見られる。

溶込不足による損傷は図 3.1.1-2 のとおりハッチコーミングの頂部のトップレール（カバーブレイトを含む）、各種ガーダの面材の突合せ継手に発生するものがその 2/3 を占めている。

取付不良によるギャップ過大のすみ肉溶接部で損傷を生じるものは図 3.1.1-3 のとおり貫通部が多く、特に隔壁貫通部のすみ肉溶接に発生するき裂が多いことが目立っている。隔壁貫通部では水密・油密構造とするためカラー構造となり溶接線が重なり合って完全な工事がしくく、き裂や洩水の原因となることを示している。隔壁貫通部のなかでは船底部の損傷が半数を占めるほど多いことが分かる。

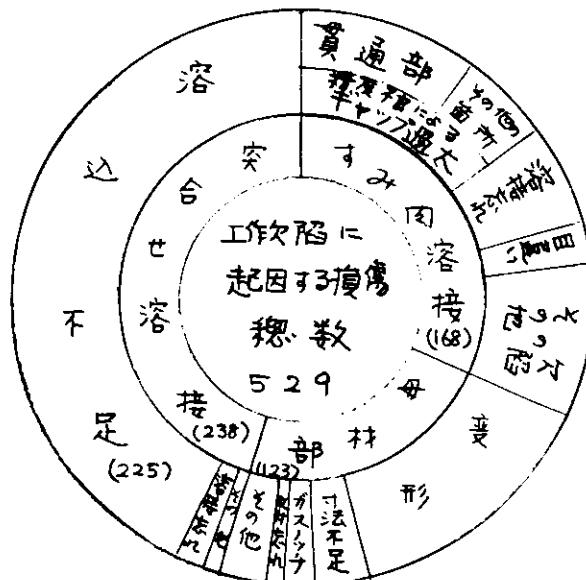


図 3.1.1-1 工作欠陥に起因する損傷の欠陥別分類

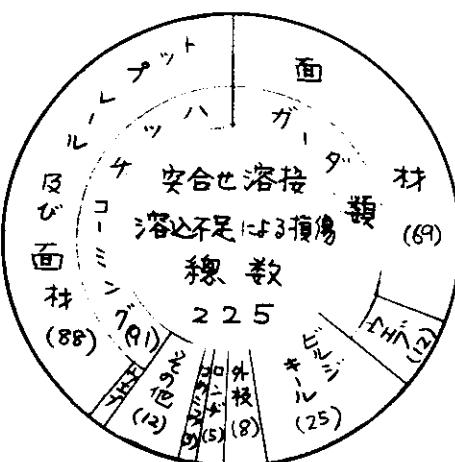


図 3.1.1-2 溶込不足による損傷の場所別分類

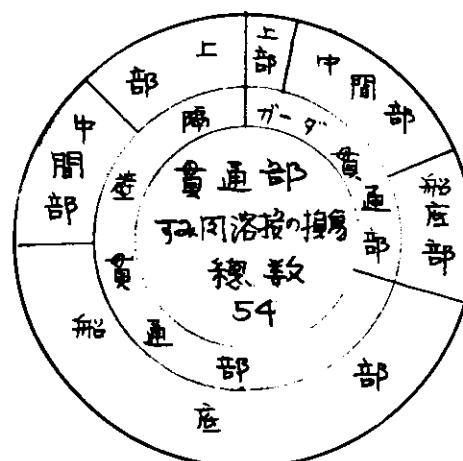
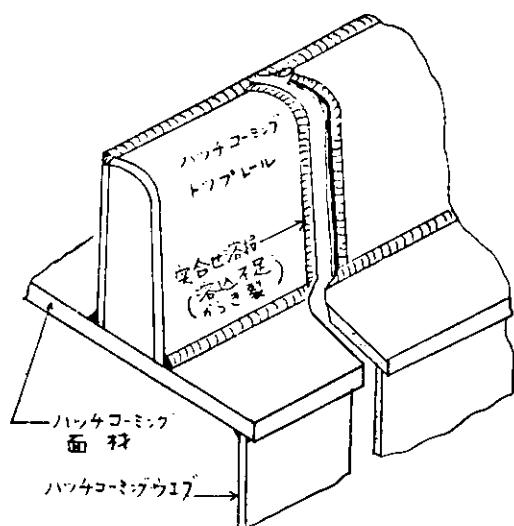


図 3.1.1-3 貫通部のすみ肉溶接の損傷発生場所別分類

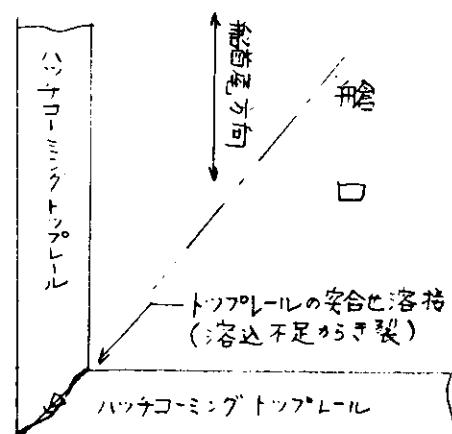
3.1.2 損傷に結びつく工作欠陥の実態と対策

(1) 溶込不足による損傷

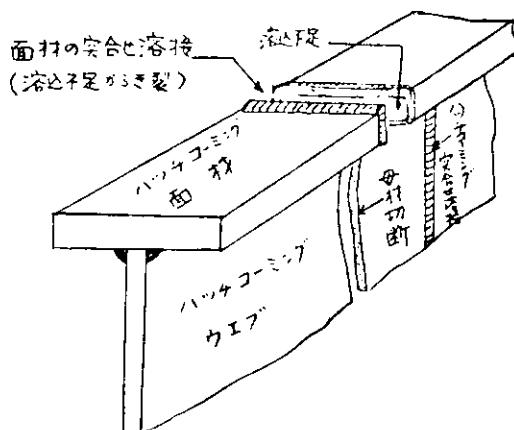
溶込不足による損傷でもっとも数が多いものは倉口縁材頂部トップレール（カバーブレイトを含む）の突合せ継手のき裂である。1969年1月5000 DWTの貨物船がナホトカ沖でこの部分からせい性き裂を発生し、片舷の強力甲板を玄側まで破壊するに至ったことはまだ記憶が新しい。倉口縁材トップレール部の突合せ継手は片面からしか溶接できないため、開先形状、溶接法を充分管理しないと同様の損傷を再び発生するおそれのあることを示している。トップレールばかりでなく倉口縁材の面材やウェップの突合せ継手の溶込不足からき裂を生じて強力甲板に伝ばした例も2～3あり、今後も注意を怠ってはならない欠陥と考えられる。



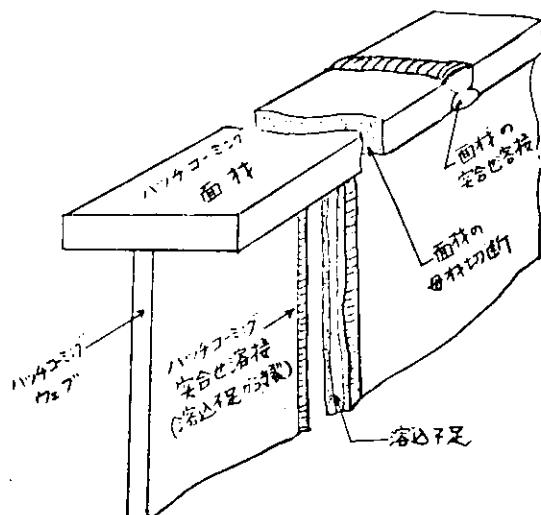
(a) ハッチコーミングトップレール継手の溶込不足による損傷



(b) ハッチコーナにおけるトップレールの角継手の溶込不足による損傷



(c) ハッチコーミング面材継手の溶込不足による損傷



(d) ハッチコーミングの継手の溶込不足による損傷

図 3.1.2-1 溶込不足によるハッチコーミングの損傷

損傷を生じた突合せ継手の溶込不足の長さおよび深さの実例は表 3.1.2-1 のとおりで、通常の管理状態ではあり得ない程度の大きな欠陥であることが分かる。

表 3.1.2-1 損傷を生じた継手の溶込不足

船	A 船	B 船	C 船	D 船
損傷部材	ハッチコーミング トップレール	ハッチコーミング ウェブ	デッキガーダ面材	トランスリング面材
母材の厚さ	12 mm	14 mm	25 mm	28 mm
溶込不足の長さ	全長 300 mm	全長 430 mm	全長 300 mm	全長 250 mm
溶込不足の厚さ	4 ~ 6 mm	10 ~ 12 mm	18 ~ 22 mm	10 ~ 15 mm

内部材のガーダ類の面材は板厚 20 mm ないし 40 mm、巾 200 ~ 300 mm でその継手は現場溶接されるものが多い。この現場溶接は足場上で悪い作業環境の下で行われるため、溶込不足等の欠陥が残ることがあり、これが損傷の原因となるものと考えられる。

図 3.1.2-2 はウェップにスカラップをあけてなかったため、裏溶接が完全に行なうことができず、裏溶接の欠陥からき裂を生じた例である。

強力甲板や外板に取付けられている各種ロンヂ材の突合せ溶接の溶込不足からき裂を生じ、これが強力甲板や外板に伝播した例も 1 ~ 2 報告されている。最近この溶接は消耗ノズルエレクトロスラグ溶接で行なうのが普通であるが、終端部の溶接施工法が適当でないと、強力甲板の突合せ溶接に小さなき裂を生じることがあり、注意が必要と考えられる。(図 3.1.2-3 参照)

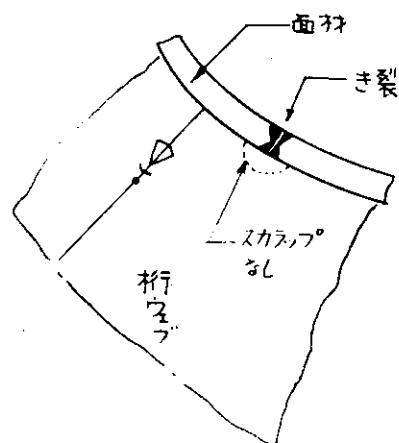


図 3.1.2-2 トランスリングの面材の継手の溶込不足による損傷

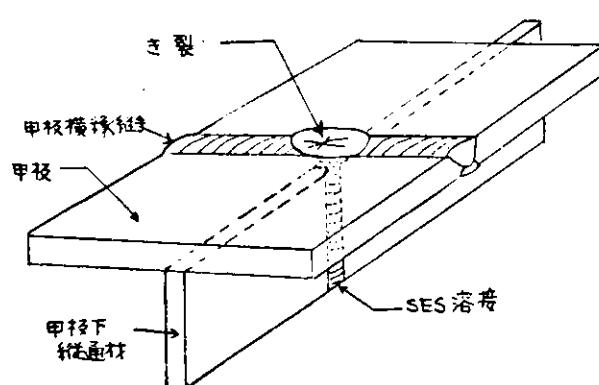
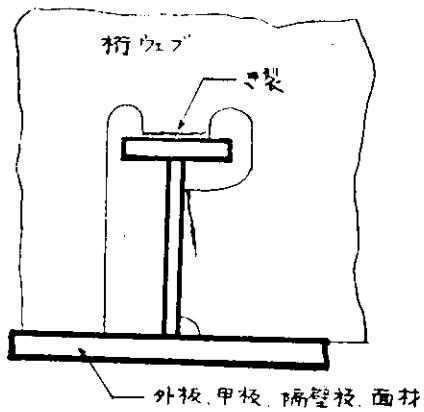


図 3.1.2-3 SES溶接終端部の処理不良によるき裂

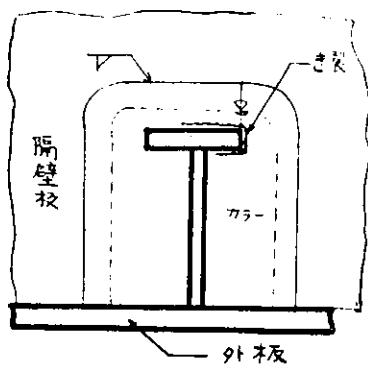
(2) 取付不良によるギャップ過大

取付不良によるギャップ過大のためすみ肉溶接にき裂を生じる損傷はかなり多い。そのギャップが 3 mm 以内であれば強度はむしろ増大し損傷の原因とはならない。しかし、3 mm を越えるギャップがある場合は多少脚長を増しても溶接が完全でなく、建造時あるいは就航時損傷を発生することがある。

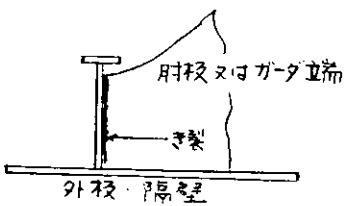
曲型的な損傷例を図 3.1.2-5 に示す。



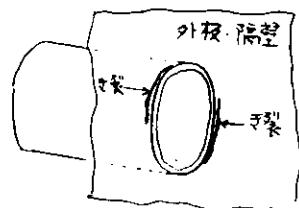
(a) ガーダウェブの貫通部（非水密）



(b) 隔壁貫通部（水密）



(c) ガーダ端部



(d) パイプ貫通部（水密）

図 3.1.2-5 取付不良によるすみ肉溶接の損傷

貫通部は不連続構造部でもあり、その損傷は必ずしも工作欠陥だけによるものではないと考えられるが、ここに記載された件数のものは実物をみて取付不良による過大なギャップが損傷の一次的な原因と判定されたものである。

溶接構造のT継手はリベット構造のそれと異なり、部材の取付精度が即継手強度と直接の関連をもってくる。リベット船ではリベットを確実に施工すればそれなりの強度が得られるが、溶接船の場合部材のギャップが過大であれば良い溶接はできないし、強度も低下する。ギャップが過大のときは脚長を増すとか、ライナーを入れるなどの方法がとられるが、水密構造の場合にはライナーの装着は洩れを防止することが困難となるから始めから正しい取付ができるよう精度の高い工作が望まれる。

(3) 目違い

目違ひには突合せ継手における目違ひとT継手の目違ひがあるが、損傷を生じる目違ひはT継手（十字すみ肉溶接継手）に限られているのは、T継手では反対側の部材の位置が正確に分からぬいため、図3.1.2-6のとおり目違ひとなるものである。

目違ひによる損傷はあまり多くないが、その主な例を図3.1.2-7に示す。目違ひの量は板厚の1～1.5倍程度で、J S Q Sの許容限界である $3/4\ t$ 以内の目違ひで損傷を起した事例はない。

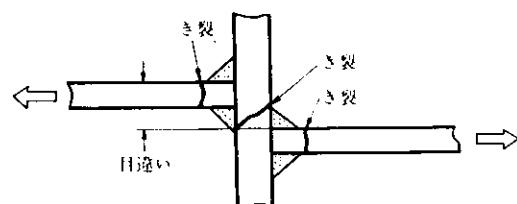
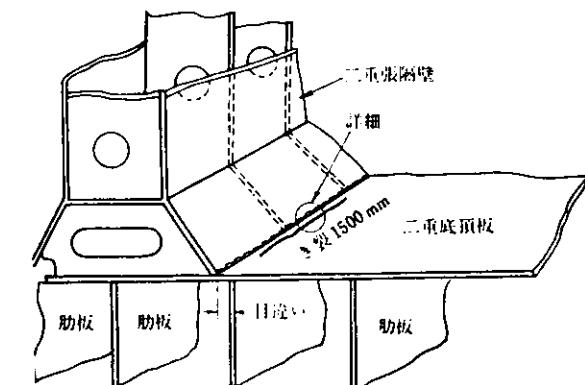
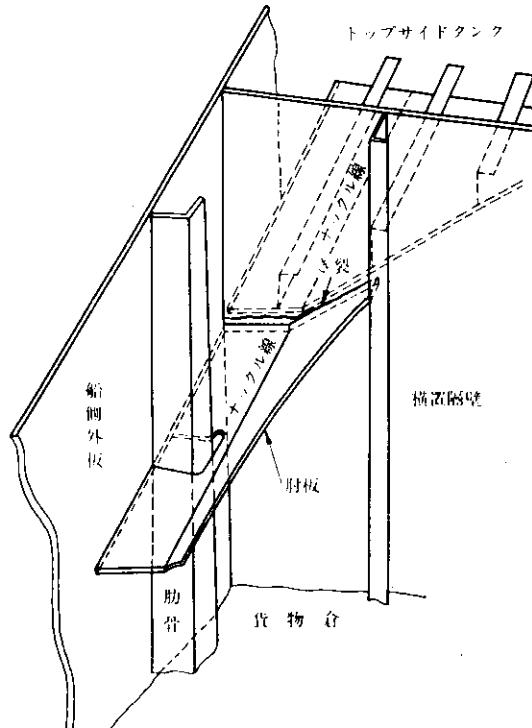


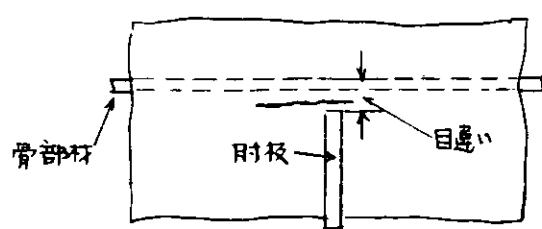
図3.1.2-6 十字継手の目違ひ



(a) 隔壁斜板と肋板との目違ひによる損傷



(c) ブラケット端部の目違ひ



(b) トップサイドタンク前端部底板の目違ひによる損傷

図3.1.2-7 目違ひによる損傷の例

目違ひによる損傷を防止するには精度の高い組立てが必要であり、十字継手の場合、間にはさまれる部材の表裏にマーキングしておき、それを基準として正しく組立てる以外には良い方法はないと思われる。

(4) 変形

建造時の溶接による初期歪が就航中に次第に大きくなって曲がりなおしや補強が必要となるケースは若干ある。この種の損傷は縦通材と梁に囲まれたようなパネルの変形が大部分で、一つの船に集中して発生するのが特徴である。特に大型船のトランス部材にみられる凹凸の変形(図3.1.2-8参照)、横肋骨構造の中小型貨物船の強力甲板や船底外板にみられる凹損(図3.1.2-9参照)等はその典型である。

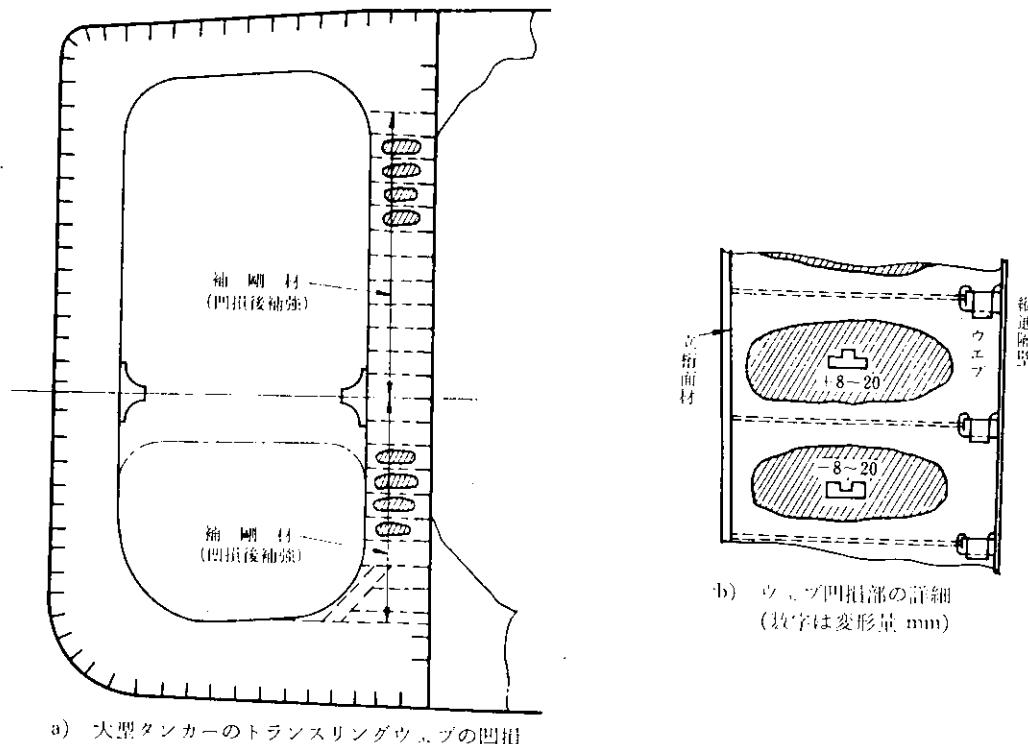


図3.1.2-8 大型タンカーのウェブの凹損

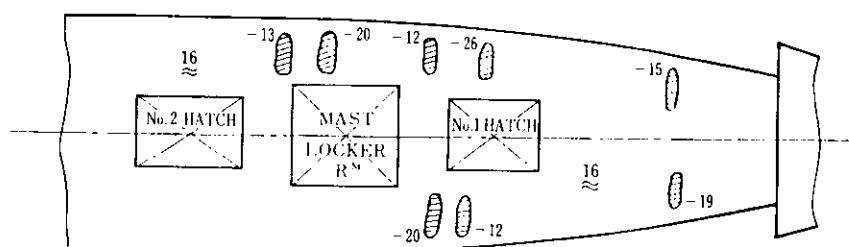


図3.1.2-9 中型貨物船(横肋骨式)の上甲板の凹損
●印は凹損部、数字は凹入量を示す)

残念なことにこれらの損傷を生じた船の建造時の歪(初期歪)がどの程度であったかは不明である。もしJ S Q S の規定する許容限界内であったとすれば、工作欠陥による損傷とはいひ難く、坐屈強度の不足すなわち設計構造上の問題もあるかも知れない。

(5) ガスノッチ

ガスノッチとはガス切断の際誤って母材を切込んだときに残る母材のキズである。

部材組立ての際は多くの組立用治具が溶接され、その後治具はガス炎で削りとられるが、このとき母材にガスノッチを残すことがある。ガスノッチは普通小径の溶接棒で溶接補修の上グラインダ仕上げされるが、まれには手入されないで放置されることもあるが、これが原因となることがある。また通常のガス切断加工の際誤って切断線からそれで母材へノッチ状に切り込み、損傷の原因となることもある。

図 3.1.2-10 (a)～(d)にそれ以外のガスノッチによる損傷例を示す。

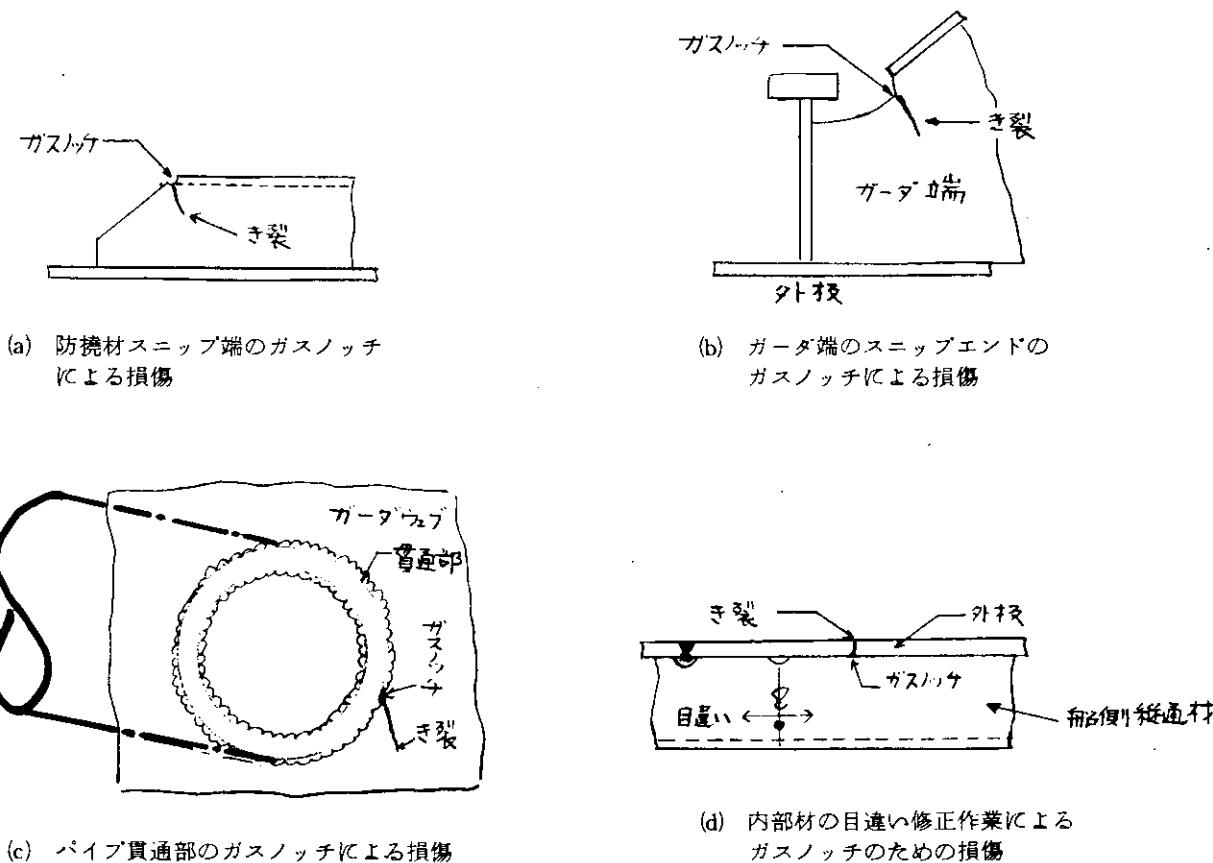


図 3.1.2-10 ガスノッチによる損傷例

図 3.1.2-10(d)のガスノッチは内部材の目違いを手直し作業中誤って外板にガスノッチを作り、これが外板のき裂損傷の原因となったもので、作業中の注意が必要であることを意味している。

ガスノッチによる損傷の防止策はガス切断工あるいは取付工の教育が重要なものとなろう。ガスノッチを完全に防止することは困難であるが、止むを得ずガスノッチを生じたときはこれを完全に手直しする習慣を作業者に徹底しておくことが必要となる。

損傷となるためにはどの程度の深さのガスノッチから問題となるかについては充分な情報は得られていないが、船尾部のような振動の多い箇所では浅いガスノッチからも損傷を生じている。

(6) 誤作および溶接忘れ

誤作とは計画図面どおりできないもので、部材形状の誤り、特に寸法不足、部材の脱落（取付忘れ）が損傷に結びつく。この種の損傷は設計と工作との接点における問題で、正しい工作図とそれによる正しい作業およびブロック検査時の図面との照合。検査員や品質管理担当者が構造の概要を常に頭に入れておくことで損傷を防ぐ上で必要とされ

る。

溶接忘れは溶接の仕残し（残工事）があることで、すみ肉溶接の片側の溶接忘れがもっとも多いが、まれには突合せ溶接の裏溶接を仕残し、それが原因でき裂を発生したことがある。

溶接忘れを防止するには溶接工の1人1人が自分の溶接に責任をもつこと、溶接監督者が部下の溶接工が行なった溶接を点検し、さらに検査員によるダブルチェック方式が必要と考えられる。現場でのブロック継手で目違い等の修正のため、付近の溶接を切断する場合再溶接を忘れることがありますので注意を要する。

(7) その他の工作欠陥

その他の工作欠陥としてはピット（ピンホール）からの洩れ、アンダカット、板厚差のある突合せ継手のテープ不良によるき裂発生、溶接部の塗装不良による著しい腐食等がある。

ピンホールによる洩れは溶接棒の選択、溶接条件、下塗り塗料と清掃によって防止できるものであり、アンダカットによる損傷は長く深い欠陥に限られている。溶接部の腐食は水圧試験時溶接部の塗装を行なわず、水圧試験後急いで塗装を行うと乾燥が充分でなく、塗膜の密着が悪くこれが腐食の原因となるものである。水圧試験に先立ち溶接部の外観検査を充分に行ない、その後水圧試験に先立って全面的に塗装を行ない、その後水圧試験を行なうことが現在国際的に採用されており、このような検査方式をとることによって著しい腐食を防止することは可能となろう。

引　用　文　獻

- 1) 日本造船研究協会研究資料No.111, No.126, No.144, 第109研究部会報告

3.2. 欠陥評価に関する研究

3.2.1. 工作欠陥による疲労強度の低下

(1) 余盛形状

余盛角度の疲労強度に及ぼす影響が文献(1)～(4)には論じられている。Newman-Gurney¹⁾によれば、図3.2.1-1に示すように余盛角度が減少するほど高サイクル疲労強度は低下し、余盛角度が 135° の軟鋼突合せ横継手の 2×10^6 回疲労強度は平滑母材の約 $1/2$ に低下する。Dinsdale²⁾もアルミ合金継手に関し同様な結果を得ている。³⁾また Sandersらは母材から継手形状を擬似した試験片を加工し、余盛角度とトウ部半径が疲労強度に及ぼす影響を調べたし、同様に山口ら⁴⁾も Sandersらと同様な方法により $10^3 \sim 2 \times 10^6$ 回寿命範囲での疲労強度に及ぼす余盛形状の幾何学的効果を調べた。とくに後者の研究成果のうち、 2×10^4 サイクル以下の低サイクル疲労強度に関しては余盛形状ならびに余盛の有無が何等強度低下因子として寄与しないという知見は、山口らの研究においてたとえ溶接冶金的因子が含まれていないという難点があるにせよ、荷重制御低サイクル域での突合せ横継手の疲労強度を論ずる際の重要な基礎知識になるといえよう。

含有率のごく低い内部溶接欠陥と同じく突合せ横継手の余盛形状が 2×10^4 回寿命以下の低サイクル疲労域では疲労強度に何等悪影響を及ぼさないことはA302B鋼(引張強さ 68 Kg/mm^2 、降伏応力 58 Kg/mm^2)を供試材とし、各種の溶接欠陥が疲労強度に及ぼす影響をまとめた石井一飯田の研究⁵⁾にも示されている(図3.2.1-2)。

(2) ブローホール

Harrison⁶⁾はフェライト鋼の溶接横継手に関して各国で1970年頃までに実施された研究のデータをまとめた。例として、図3.2.1-3は含有率3%までの気泡を含む継手のデータの総括図であるが、まとめられたこれらのデータの気泡含有率が断面積での欠陥面積百分率であるかあるいは(適当な継手幅)×(継手長さ)×(板厚)の体積を分母とし欠陥体積の総和を分子とする体積欠陥率であるかの区別が明確でないのが難点である。

石井一飯田⁵⁾によれば気泡の面積欠陥率 α_s をパラメーターとして気泡含有率が多いほど図3.2.1-4のように余盛削除横継手の高サイクル疲労強度は低下するが、一方 $\alpha_s = 6\%$ であっても極低サイクル疲労強度は母材と同等である。余盛削除の気泡含有横継手の高サイクル疲労強度は次式で表わされる。

$$0 \leq \alpha_s \leq 5\% \text{ のとき}$$

$$S_R = 390 (N_f)^{-\exp(0.03284 \alpha_s - 1.749)} \quad \dots \quad (1)$$

$$5\% \leq \alpha_s \leq 20\% \text{ のとき}$$

$$S_R = 390 (N_f)^{-\exp(0.01480 \alpha_s - 1.659)} \quad \dots \quad (2)$$

ここに、 S_R = 応力範囲(Kg/mm^2)

N_f = 破断寿命

(3) スラグ捲込み

Harrison⁷⁾は各国のデータを集め、スラグ捲込みの長さ ℓ_s をパラメーターとして整理を行なった。例として図3.2.1-5および6はルチール系溶接棒による横継手のデータである。低水素系溶接棒による継手の場合はルチール系による場合より若干高い疲労強度が示されている。

一方石井一飯田⁵⁾は α_s および ℓ_s などをパラメーターとした整理を行ない、図3.2.1-7、図3.2.1-8などを得た。 α_s をパラメーターとするS-N線図は(1)、(2)式で与えられる。

(4) 溶込み不足

石井一飯田⁵⁾によれば溶込み不足が高サイクル疲労強度に及ぼす影響は α_s をパラメーターとして図3.2.1-9のようになり、かつS-N線図は(1)、(2)式であらわされる。

人工的に試験片に残留させる欠陥のうち溶込み不足は比較的容易に断面形状を制御し易いため、溶込み不足含有試験片の疲労挙動は破壊力学的解析⁸⁻¹¹⁾の好対象となっている。例として Lawrence⁸⁾らは溶込み不足欠陥を図3.2.

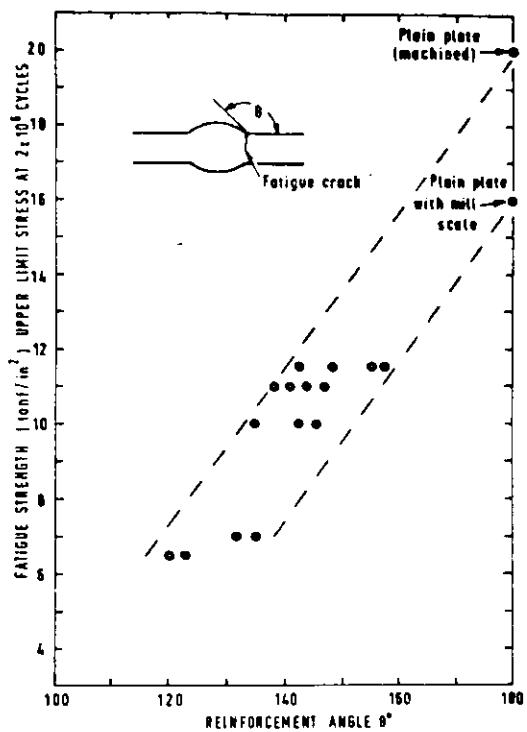


図 3.2.1-1 余盛角度が 2×10^6 サイクル疲労強度に及ぼす影響
〔Newman-Gurney〕

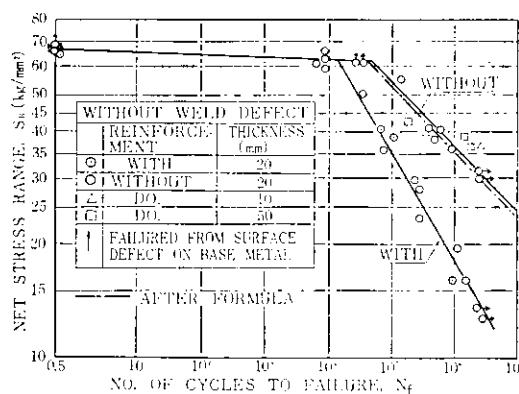


図 3.2.1-2 余盛付および余盛削除突合せ横縫手の荷重制御片振り S-N 線図
〔石井-飯田〕

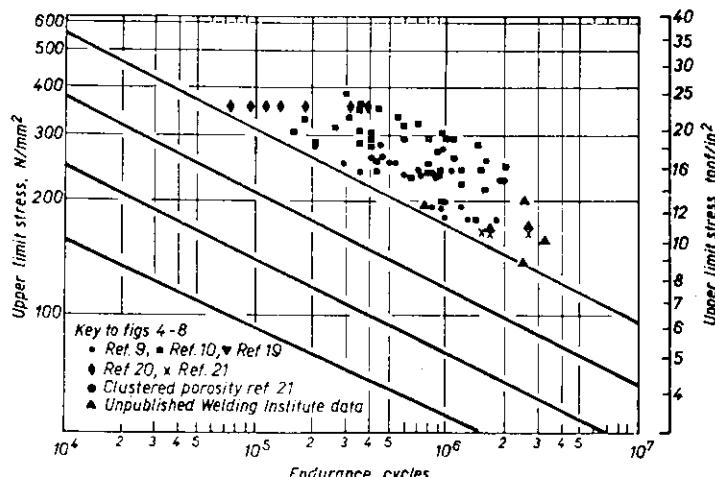


図 3.2.1-3 欠陥含有率 3 %までの気泡を含む突合せ横縫手の片振り S-N 線図
〔Harrison〕

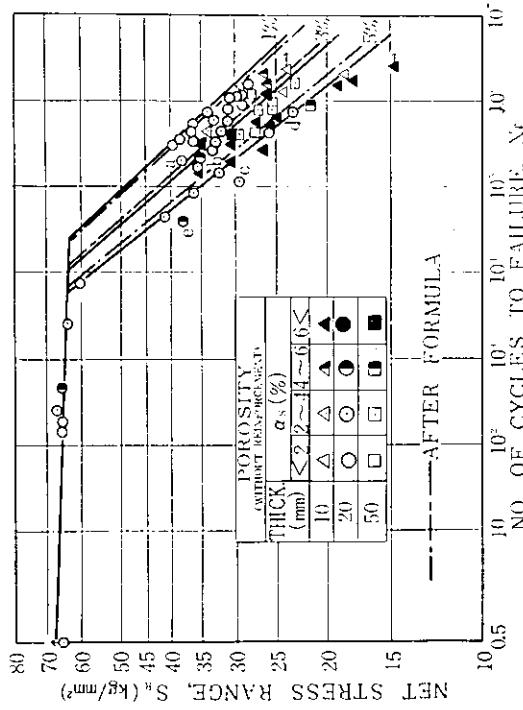


図 3.2.1-4 余盛削除気泡含有突出せ横継手の荷重制御片振り
S-N線図〔石井一飯田〕

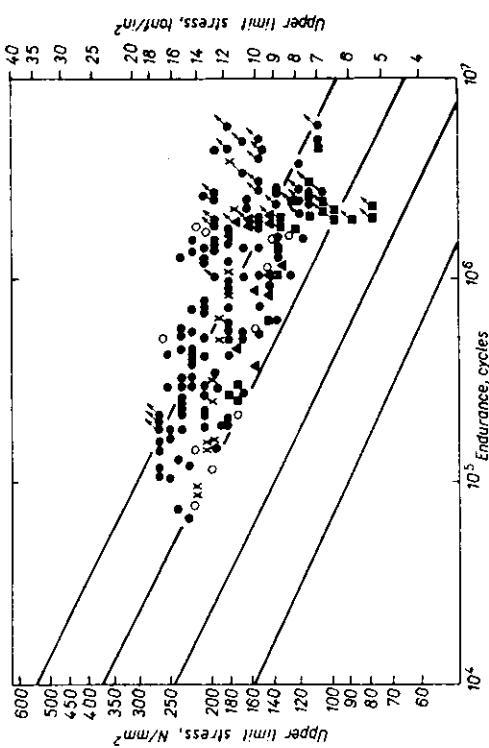


図 3.2.1-5 長さ 1.6 mmまでのスラグ掩込みを含有するルチール系
溶接継手の片振り S-N線図〔Harrison〕

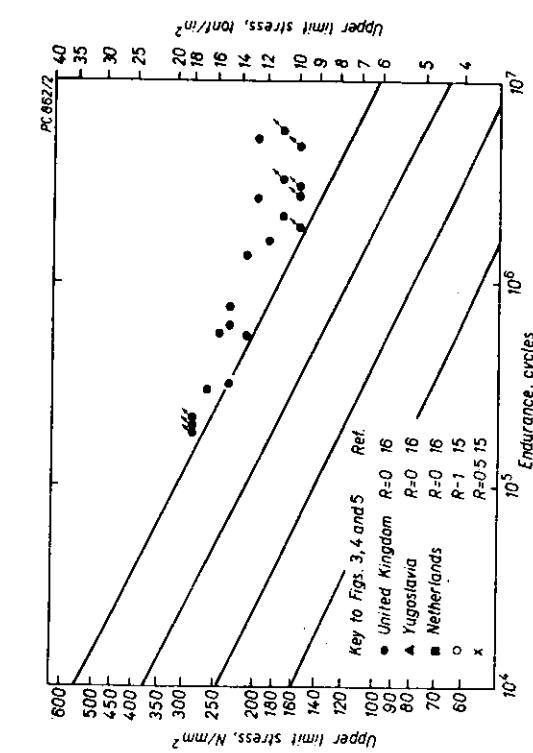


図 3.2.1-6 長さ 1.0 mmまでのスラグ掩込みを含有するルチール系
溶接継手の片振り S-N線図〔Harrison〕

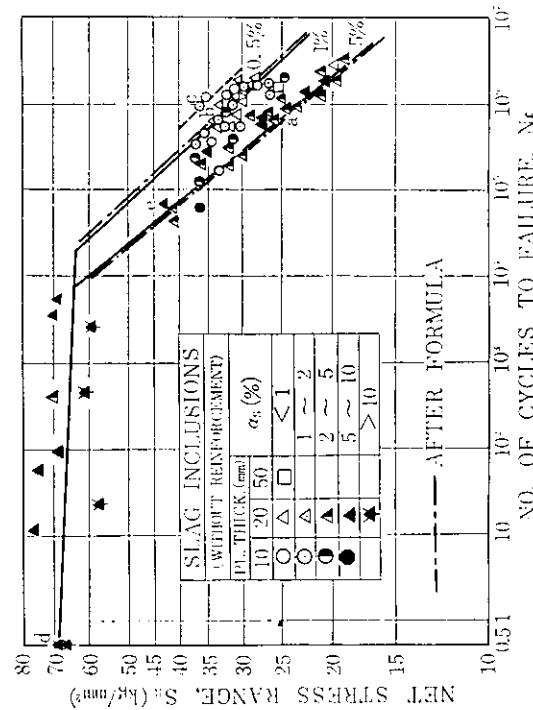


図 3.2.1-7 余盛削除スラグ掩込み含有突出せ横継手の荷重制御片振り S-N線図
〔石井一飯田〕

1-10のようにモデル化し次式によって HY-130 の溶込み不足含有横継手の疲労寿命を解析した。

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C (\Delta k)^n} da \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、 a_0 = 初期欠陥寸法の半分、 a_f = 最終欠陥寸法の $1/2$ 、 C 、 n は Paris 則における定数。

Δa を亀裂の微小成長長さとすれば、(3)式は図 3.2.1-10 の (a) 図に関して

$$N = \frac{a_f^{(1-n/2)} - a_0^{(1-n/2)}}{\left(1-\frac{n}{2}\right) C \left(\frac{2\sigma}{\sqrt{\pi}}\right)^n} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

また、(b) 図に関して

$$N = \sum_{a_0}^{a_f} \left[\frac{\cos \frac{\pi a}{2b}}{a C^{2/n} \sigma^2 \pi} \right]^{n/2} \Delta a \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

となる。ここに σ は片振り引張疲労における上限応力または応力範囲。

疲労試験中しばしば試験を中断し放射線

透過法によって観察した亀裂伝播寿命の実験値と理論値の比較例を図 3.2.1-11 に示す。

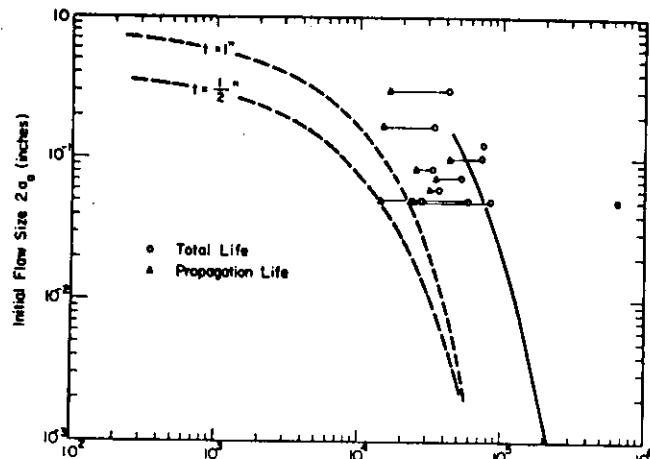


図 3.2.1-11 初期欠陥寸法 $2a_0$ の関数としての亀裂伝播寿命。

応力レベルは 80 ksi。点線は(5)式の解であり、実線は(4)式の解である。水平線はそれぞれ 1 本の試験片のデータであることを示す。

[Lawrence-Radziminski]

(5) 割れ

割れは疲労強度を顕著に低下させる。とくに表面亀裂の場合には低下の度合が著しい(図 3.2.1-12, 図 3.2.1-13)。

(6) アンダーカット

溶接継手に生ずるアンダーカットは図 3.2.1-14 に示すように高サイクル疲労強度を著しく低下させ、その疲労強度は面積欠陥率 5% 程度の気泡含有継手よりも低い。¹² さらに注目すべきことは余盛の有無に拘らずデータが同一の S-N 線図にのっていることである。

3.2.2 欠陥の許容寸法

欠陥の許容寸法は仮想される破壊の種類、すなわち延性破壊、脆性破壊、疲労破壊の別によって論すべきである。おまかに言えば、延性破壊に対しては相当程度の欠陥は許容されるし、また脆性破壊に対してはたとえば微細な気泡は

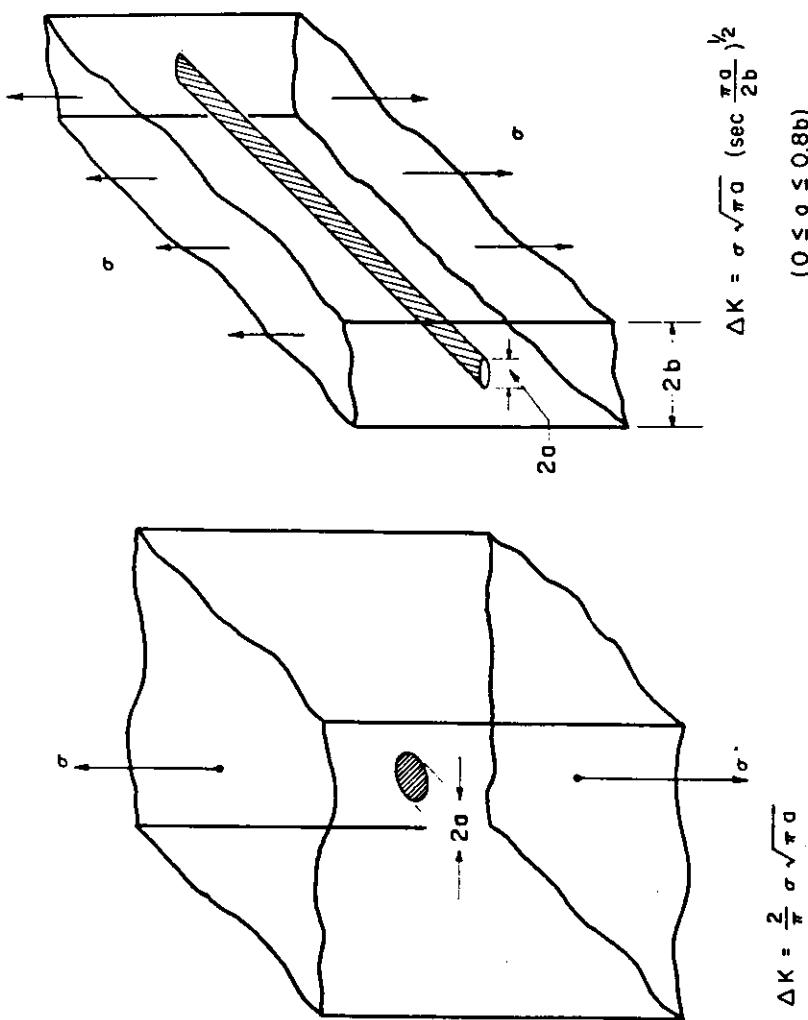


図 3.21-10 欠陥含有継手のモデル化。(a) 無限体における全板幅グラフ [Lawrence-Radziminski]
(b) 有限板における全板幅グラフ

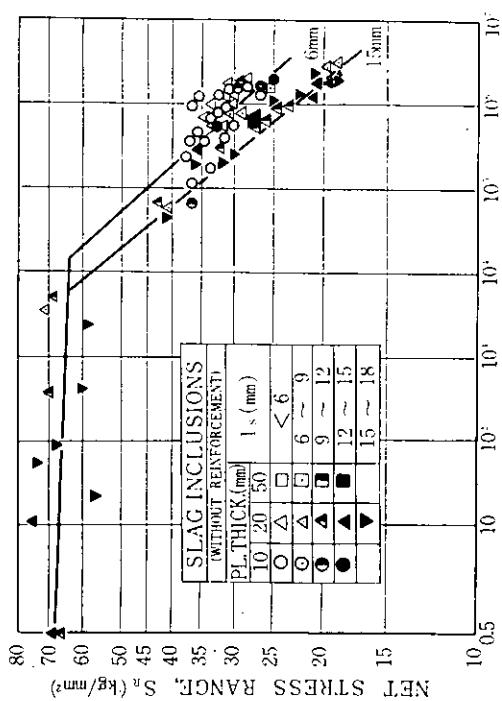


図 3.21-8 余盛削除スラグ捲込み含有突合せ横継手
の荷重制御片振り S-N線図〔石井一飯田〕

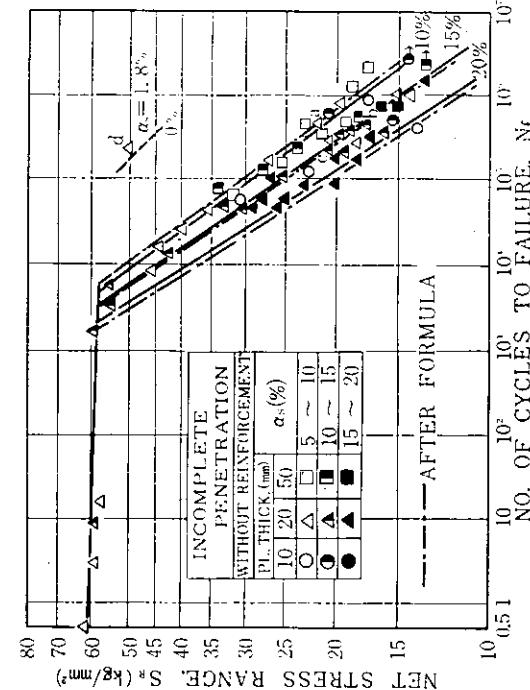


図 3.21-9 余盛削除溶込み不足を有する突合せ横継手
の荷重制御片振り S-N線図〔石井一飯田〕

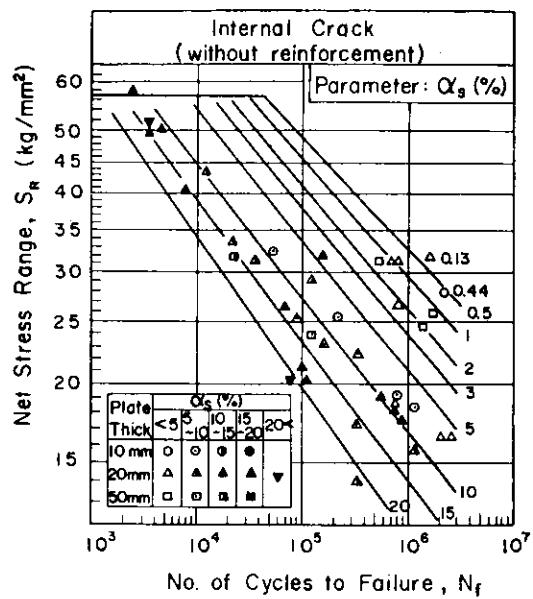


図 3.2.1-12 余盛削除内部割れ含有
突合せ横縫手の荷重制御
片振り S-N 線図
〔石井-飯田〕

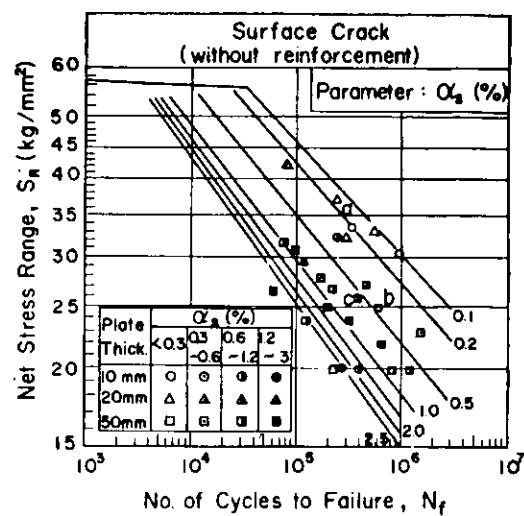


図 3.2.1-13 余盛削除表面割れ含有
突合せ横突手の荷重
制御片振り S-N 線図
〔石井-飯田〕

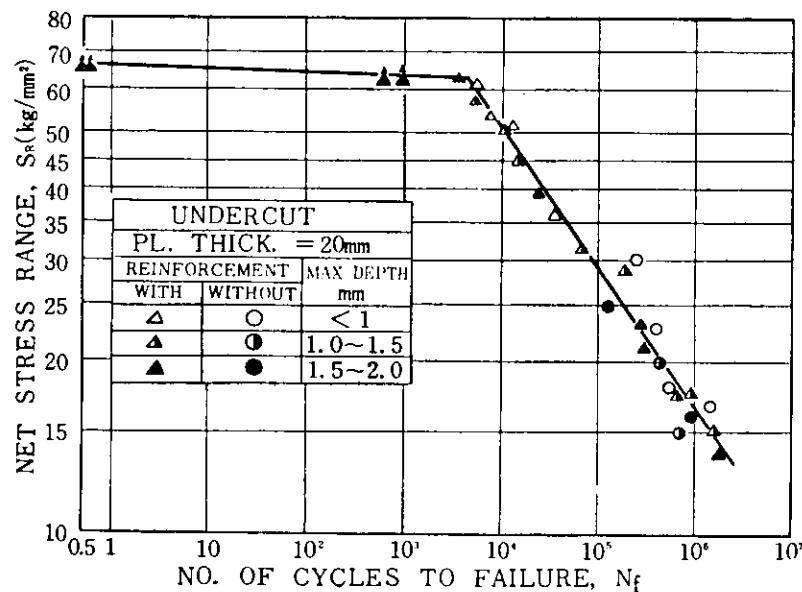


図 3.2.1-14 アンダーカットを有する突合せ横縫手の荷重制御
片振り S-N 線図 〔石井-飯田〕

ほとんど悪影響を及ぼさないであろうが、一方高サイクル疲労に対してはいかなる欠陥もその寸法に応じて影響を及ぼすといえる。¹³ ただし疲労に関しては短寿命域での議論かそれとも長寿命域での議論かをまず明確にする必要がある。ここでは疲労に関する議論にとどめる。

(1) 余盛形状

J S Q S¹⁴ では余盛角(図 3.2.1-1 定義による)を 90° 以上に制限しているが、突合せ横継手に母材の約 $1/2$ の高サイクル疲労強度を期待するのならば 130° 以上に制限すべきであろう(図 3.2.1-1 および図 3.2-2 参照)。ちなみに Santini¹⁵ は表 3.2.1-1 のように軟鋼と高張力鋼とに対しそれぞれ 135° と 150° と別の制限値を提案している。

(2) 気泡、スラグ捲込み

データの最低値を通るような S-N 線図¹² (図 3.2.2-1)に基づく飯田の提案^{13, 16}によれば、余盛付ならば $\alpha_s = 3\%$ 程度までの気泡あるいはスラグ捲込みは許容されるであろうし、一方 Harrison 提案^{6, 17, 18} によれば等級分類に従って図 3.2.2-2 のようになる。ここに V~Z 級は表 3.2.2-2 の品質をあらわす。また Santini¹⁵ によれば表 3.2.2-1 ようになる。

(3) 溶込み不足

データ最低値を通る S-N 線図¹² (図 3.2.2-3)に基づく飯田提案^{13, 16}によれば、余盛付ならば板厚の 2% 程度までは許容されるであろうし、一方 Santini¹⁵ によれば表 3.2.2-1 のようになる。

(4) 割れとアンダーカット

図 3.2.2-1, -3 と同様な整理¹²によれば、余盛付の場合は内部割れに関し $\alpha_s = 2\%$ 、表面割れに関し $\alpha_s = 0.8\%$ 程度¹⁶ までは許容¹⁵ できそうであるが、この点に関しては ASME Boiler and Pressure Vessel Code の Sec. XI の規定(表 3.2.2-3)が参考となる。

アンダーカットについては、J S Q S¹⁴ が 0.5 mm と 0.8 mm 以下、Santini¹⁵ が 0.5 mm 未満の許容値を与え、飯田¹⁶ は母材の 0.8 倍の疲労強度としての設計を提案しているが、 0.5 mm 以下のアンダーカットに関する実験値が少ないのでかんがみて、なお実験追加の必要があろう。

Table 3.2.2 - 1

Limits for defects and imperfections in welded butt-joints (for general criteria of applicability and meaning of zones and symbols, see key and notes at the sheets 3 and 4 of the table)

Types of defects	Mild steel		High strength steel	
	Zone (A)	Zone (B)	Zone (A)	Zone (B)
Weld reinforcement undercuts	$\left\{ \begin{array}{l} h \\ \gamma \end{array} \right.$	$h \leq 3$ or $h \leq \frac{1}{10} S$ (the greater value to be applied)		$\geq 150^\circ$
		$\geq 135^\circ$		
In transverse joints of important platings: practical absence (i.e. D less than 0,5 mm); however limited local undercuts may be tolerated for mild steel.				
- Planar defects (lack of penetration on joints with root face, lack of fusion and similar): - central (within 1/2 S at mid thickness)	—	$D \leq 2; L \leq S$ $d \geq 2,5 S; Lt \leq 50$ D values between 2 and $S/3$ may be permitted provided the area DxL is not greater than $2 S$ (mm^2)	—	$D \leq 1; L \leq 15$ $d \geq 2,5 S; Lt \leq 30$ D values between 1 and 4 may be admitted provided the area LxD is not greater than 15 mm ²
- near surface (within 1/4 S)	—	if $D \leq 1$ L, d, Lt as above if $D \leq 2$ $L \leq 10$ d, Lt as above	—	$D \leq 1$ $L \leq 8 d, Lt$ as above

Types of defect	Mild steels		High strength steels	
	Zone (A)	Zone (B)	Zone (A)	Zone (B)
Elongated slag inclusions ($1 \leq 1,5$) eventually associated to central lack of penetration in joints without rootface	$L \leq 10$ $d \geq 2S; Lt \leq 20$	$L \leq 20$ $d \geq 2S; Lt \leq 80$	$L \leq 5$ $d \geq 2S; Lt \leq 10$	$L \leq 15$ $d \geq 2S; Lt \leq 50$
Not elongated slag inclusions: - central - near surface	$A_l = a_l \leq 9$ $A_l = a_l \leq 4$	$a_l \leq 40, A_l \leq 60$ $a_l \leq 20, A_l \leq 30$	$A_l = a_l \leq 4$ —	$a_l \leq 25, A_l \leq 40$ $a_l \leq 12, A_l \leq 20$
Porosity clusters - Spheroidal ($D \leq 0,5$) - Elongated (wormholes cluster)	$Lt \leq 10; d \geq 80$	$Lt \leq 20; d \geq 30$	as for mild steel	
Single flaws of rounded contour (porosities, blowholes) - Spheroidal - Elongated	$A_l \leq 35$ $N_t \leq 1$	$A_l \leq 100; d \geq 100$	as for mild steel	
Concurrence of different types of defects	As minimum allowed distance between defects of different type shall be generally assumed the average of those specified for each one of the two adjacent types of defects. In each spot examined the "total defective length" (meant as the sum of the lengths of individual defects and/or zones of grouped defects) shall be not greater than 1/3 of the length of the spot.			

Key of symbols

Zone (A)	Zone of the joint including a tract of transversal joint at the crossing, stretching symmetrically to the crossing for a length of about 4 times the thickness of the plate.
Zone (B)	Zone of the joint, about 75 mm long, stretching on both sides of A in prosecution to it (total length of about 150 mm).
h (mm)	Weld reinforcement height.
(°)	Angle between the plate surface and the tangent to the reinforcement at its point of contact with the plate surface.
S (mm)	Thickness of the plate.
L (mm)	Length of the defect.
D (mm)	Diameter or depth of the defect (width in the sense of the plate thickness).
a₁ (mm²)	Area of the defect { parallelly to the plate surface (for radiographic examination, if it is the case)
I (mm)	Width of the defect { (graphic examination, if it is the case)
L_t (mm)	Length of the defective zone.
A₁ (mm²)	Area of the defective zone parallelly to the plate surface (for radiographic examination, if it is the case)
d (mm)	Minimum distance between contiguous defects or contiguous defective zones; when it is referred to the length of the defect or of the defective zone, it must be intended the greater of the two contiguous ones.
N	Number of defects in the zone. It is referred to the maximum diameter; if D is lower N can be greater.
N_t	Number of defective zones.

Notes

- 1) The limits of defect indicated in the table constitute "acceptance standard" for systematically checked crossing of joints of important platings.
- 2) The criterion for zone B, represents also normal "quality standard" outside such crossing or for other joints in general; however in general, when it is thus applied as "quality standard", defects about 30 ; 50% greater than the ones specified in the table for zone B may be tolerated without requiring repairs (depending from circumstances and in particular in case of longitudinal joints).
For the total usual length of spot radiographies (450 mm), the maximum values A₁ and N indicated in the column (B) are to be multiplied per 2.
- 3) For planar defects and not elongated slag inclusions, for which a differentiation is made in the table depending from depth D and/or position of the defect in the thickness, it is realised that in most cases it may be difficult to evaluate such parameters; therefore the applicable size limits will be necessarily decided case by case.
- 4) In the case of manual welding the limits indicated are valid for basic low-hydrogen electrodes.

表3.2.2-2 Harrison 提案の等級分類

品質	気泡 欠陥率 1)	スラブ捲込み長さ (mm)	
		溶接のまま	応力緩和
V	0	0	0
W	3	1.5	6
X	5	1.0	制限なし
Y	5	制限なし	"
Z	5	"	"

1) 放射線フィルム上の投影面積百分率 (%)

表3.2.2-3 ASME B.&P.V Code Sec. XI

(1975)における平面欠陥許容基準

a/ℓ	表面欠陥		内部欠陥 α/t (%)
	α/t (%)		
0	1.88		2.32
0.05	2.00		2.42
0.10	2.18		2.61
0.15	2.42		2.91
0.20	2.71		3.25
0.25	3.08		3.68
0.30	3.48		4.13
0.35	3.48		4.63
0.40	3.48		5.24
0.45	3.48		5.86
0.50	3.48		6.51

 t : 板厚, a : 表面欠陥では欠陥の深さ。内部欠陥では欠陥の板厚方向寸法の $1/2$ ℓ : 荷重軸と直交する欠陥長さ。

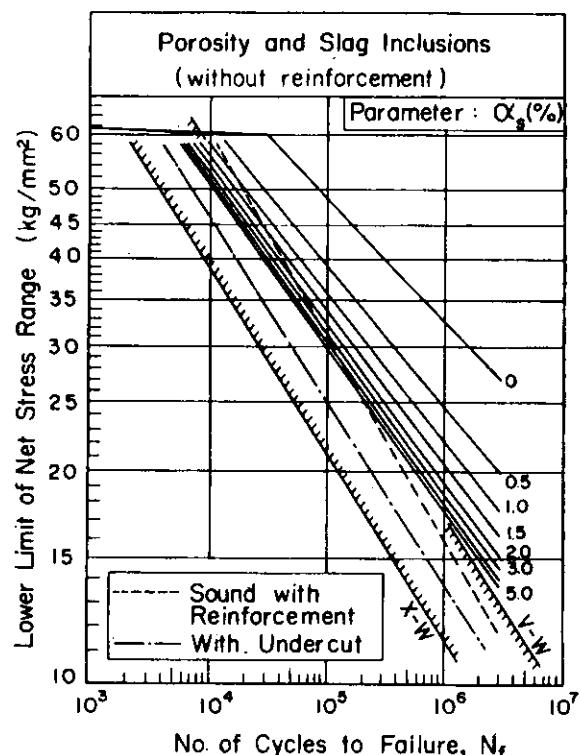


図 3.2.2-1 気泡およびスラグ捲込み含有横
継手の片振り疲労強度設計線図
〔石井一飯田〕

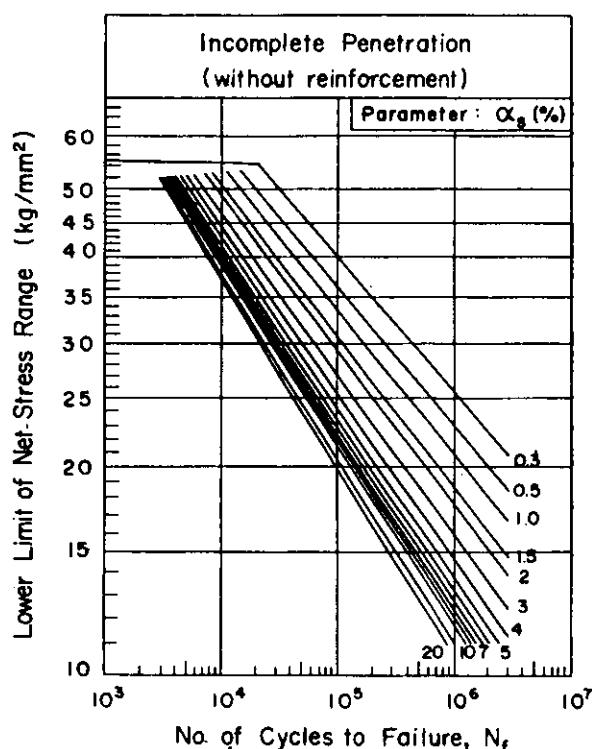


図 3.2.2-3 落込み不足含有横継手の
片振疲労強度設計線図
〔石井一飯田〕

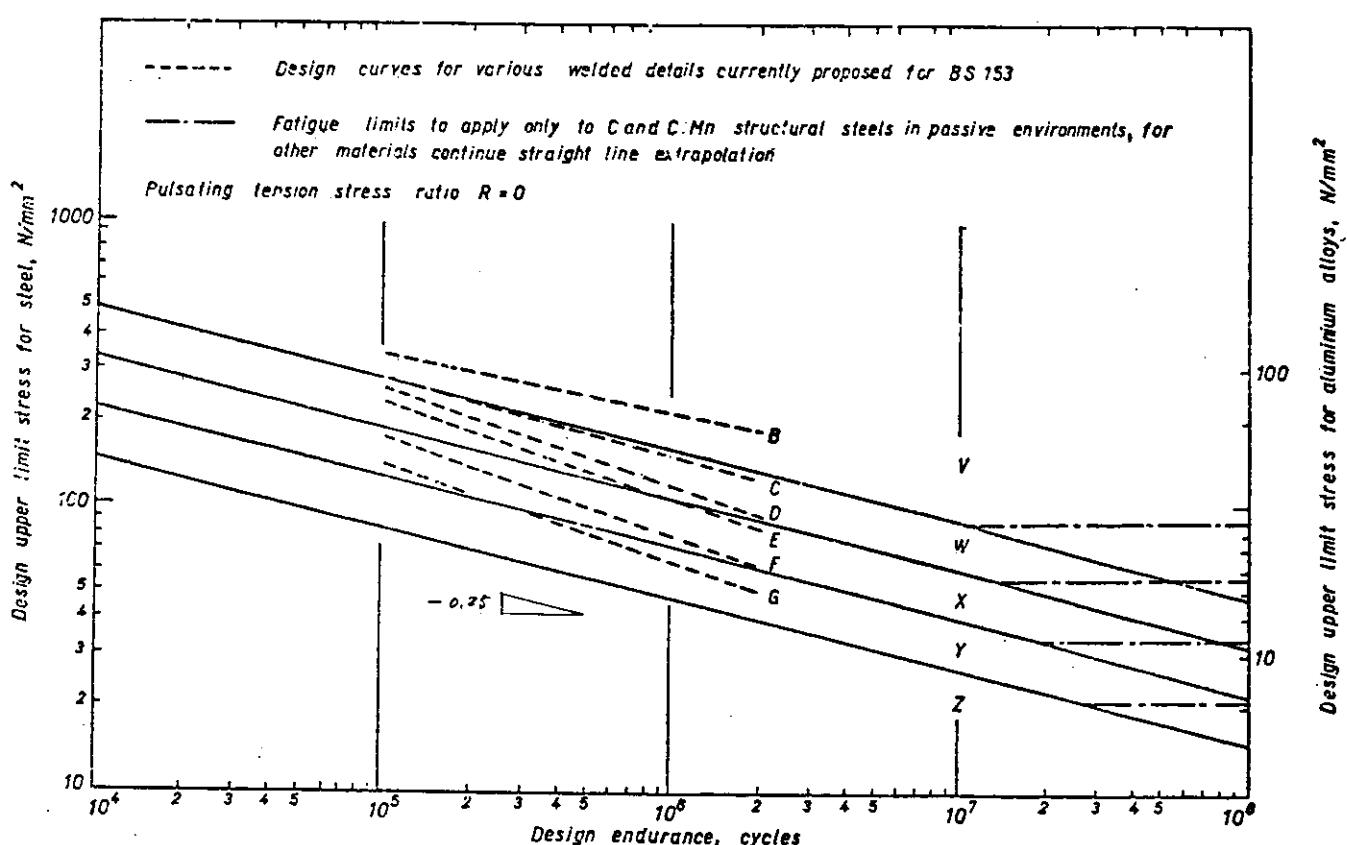


図 3.2.2-2 Harrison 提案による疲労設計線図 (Harrison)

文 献

1. R.P. Newman and T.R. Gurney, "Fatigue Tests of Plain Plate Specimens and Transverse Butt Welds in Mild Steel," British Welding Journal, Dec. 1959
2. W. O. Dinsdale, "Effect of Reinforcement Shape on Fatigue Behaviour of Butt Welds in NP 5/6," British Welding Journal, May 1964
3. W.W. Sanders, A.T. Derecho and W.H. Munse, "Effect of External Geometry on Fatigue Behaviour of Welded Joint," Welding Journal, Feb., 1965
4. I. Yamaguchi, Y. Terada and A. Nitta, "The Fatigue Strength of Steels for Ship Structures," IIW Doc. XIII-425-66
5. Y. Ishii and K. Iida, "Low and Intermediate Cycle Fatigue Strength of Butt Welds Containing Weld Defects," J. Soc. N.D.T. in Japan, Vol. 18, No. 10 (1969)
6. J.D. Harrison, "The Basis for a Proposed Acceptance Standard for Weld Defects, Part 1, Porosity," IIW Doc. XIII-624-71
7. J.D. Harrison, "The Basis for a Proposed Acceptance Standard for Weld Defects, Part 2, Slag Inclusions," IIW Doc. XIII-663-72
8. F.V. Lawrence and J.B. Radziminski, "Fatigue Crack Initiation and Propagation in High-Yield-Strength Steel Weld Metal," Welding Journal, Oct., 1970
9. F.V. Lawrence, "Estimation of Fatigue-Crack Propagation Life in Butt Welds," Welding Journal, May, 1973
10. F.V. Lawrence and W.H. Munse, "Fatigue Crack Propagation in Butt Welds Containing Joint Penetration Defects," Welding Journal, May, 1973
11. S.J. Maddox, "Assessing the Significance of Flaws in Welds Subjected to Fatigue," Welding Journal, Sept., 1974
12. Y. Ishii and K. Iida, "An Analysis of Intermediate Cycle Fatigue Strength of Defective Welded Joints," Trans. Japan Welding Society, Vol. 3, No. 2 (1972)
13. K. Iida, "Fatigue Strength of Defective Butt Welded Joints," Proceedings of the Japan-U.S. Seminar on Significance of Defects in Welded Structures, 1973
14. JSQS (日本鋼船工作法精度標準) 1975年版、船殻関係・鋼船工作法研究委員会第一分科会
15. W. Santini, "Welding Requirements in Ship Building — Acceptance of Defects and Notch Toughness Requirements for Welded Joints of Primary Hull Structures," Registro Italiano Navale, Rep. No. 51, Dec., 1972
16. 飯田, 'JIS 3104 改訂のための一提案' 溶接学会 FS 委員会,
Doc. FS - 377-75
17. J. D. Harrison, '英国における溶接欠陥の評価に関する研究'
(井上訳), 非破壊検査, Vol. 22, No. 11 (1972)
18. J.D. Harrison, "Fatigue under Variable Amplitude Loading and the Fatigue Limit in the Context of the Significance of Defects," IIW Doc. XIII-763-74

4. 溶接の内部欠陥の評価に関する実験

4.1 実験の目的と計画

4.1.1 実験の目的

この実験の目的は船体構造の突合せ溶接継手の内部欠陥の許容基準の基礎となるものである。継手の内部欠陥は当然継手強度の低下をきたすが、実用上何ら支障のない欠陥は許容されるべきである。どのような内部欠陥が実用上問題となるか、また問題とならないかと云うことは前章の調査からも判るが、実験的に確認しておくことが必要と考えられる。

一般に内部欠陥のある継手は欠陥が極端に大きくならないかぎり静的強度には殆んど影響しないことが分かっている。しかし、疲れ強度は内部欠陥があれば低下することが知られている。一方船体構造のような余盛付き突合せ継手の疲れ強度は余盛止端の応力集中のため平滑な母材よりも低下することが知られている。前章の調査の結果、内部欠陥のない健全な突合せ継手では継手部はもちろん余盛止端部においても破壊した事例がないことから、船体構造の突合せ継手としては余盛り付き健全継手と同程度の疲れ強度をもつものであれば実用上なんら支障がないと考えてよい。

種々の内部欠陥を含む継手の疲れ強度を余盛り付き健全継手の疲れ強度と比較し、これを内部欠陥の許容基準を決めるための基礎資料を得ようとするものである。

4.1.2 実験計画

実験は大きく分けて次の2つとなっている。

(1) 溶込み不足の位置、深さ、長さ、近接が疲れ強度に及ぼす影響を確認するための実験

(2) 溶込み不足以外の欠陥が疲れ強度には殆んど影響を与えないことを確認するための実験

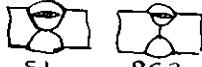
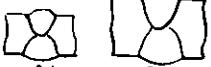
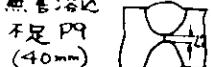
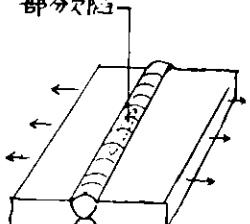
(2)の内容については従来からの各種の実験結果があつてほぼその正当性は実証されているが、実際の非破壊検査の結果の判定にあってしばしば問題となっており、今回確認の意味で実験を行なった。

(1)に関してはごく浅い溶込み不足であれば手直し、補修の必要性は薄いと考えられ、実用上支障のない溶込み不足の深さの限界を知るために、溶込み不足の深さ、位置、長さ、近接の度合をかえて実験を行なった。

試験機の容量の関係で板厚20mmのものを主体とし、板厚による影響を確認する意味で40mmのものについても一部の試験を行なった。船体構造の継手には引張荷重ばかりではなく、曲げ荷重も複合して加わることがある。曲げが加わると圧縮側の応力値が減少するため、継手としては強度的には有利となるはずであるが、その程度に関しても確認のための実験を行なった。

実験の概要を表4.1.2-1に示す。

表 4.1.2.-1 内部欠陥を含む突合せ継手の疲れ試験

溶接部の断面	試験番号	断面寸法 板厚×板巾 (mm)	欠陥の大きさ 厚さ×長さ (mm)	試験 片 数	備 考
溶込不足 	P 1 P 2	20 × 40	0 ~ 5 × 40 5 × 40	10 10	欠陥は板厚中央で深さを変える 欠陥の厚さは一定、板厚内の位置を変える。
溶込不足 	P 3 P 4 P 5	20 × 40	L ₁ × 40 L ₂ × 40 L ₃ × 40	10 10 10	無害な溶込不足の厚さ 中間的な溶込不足の厚さ 有害な溶込不足の最小厚さ
P 3 ~ P 8	P 6 P 7 P 8	20 × 40	0 ~ 5 × 40 L ₁ × 40 L ₃ × 40	10 10 7	低水素溶接棒で欠陥の深さをかえる 低水素溶接棒の無害な溶込不足の厚さ 曲げと引張りの合成力を受ける場合の疲れ強さ
スラグの巻込み(1層) 	S 1 P S 2	20 × 40	スラグ1層 × 40 (スラグ1層) × 40 と L ₁	10 10	スラグ巻込みの無害確認 スラグ巻込みと無害溶込不足の共存
プローチホール(2層) 	B 1 P B 2 B S 2	20 × 40	気泡 × 40 (気泡) × 40 と L ₁ (スラグ1層) × 40 と 気泡	10 10 10	気泡の無害確認 気泡と無害溶込不足の共存 気泡とスラグ巻込みの共存
健全継手 	A 1 A 2	20 × 40 40 × 50	無欠陥	10 10	無欠陥健全継手(20mm) 無欠陥健全継手(40mm)
無害溶込 不足 P9 (40mm) 	P 9	40 × 50	L ₁ ' × 40	10	無害溶込不足の確認(40mm)
部分欠陥 	P 1 0 P 1 1 P 1 2 P 1 3 P 1 4 P 1 5	20 × 150	L ₃ × 20 L ₃ × 40 L ₃ × 80 L ₃ × 20 × 2 L ₃ × 20 L ₃ × 40	5 5 5 5 5 5	短い溶込み不足 板厚の2倍の長さの溶込み不足 やや長い溶込み不足 近接する短い溶込み不足 短くて深い溶込み不足 板厚の2倍の長さで深い溶込み不足

(註) L₁ : P₁ で求められた無害溶込み不足の深さ (mm)L₂ : P₁ で求められた無害と有害の境界値の溶込み不足の厚さ (mm)L₃ : P₁ で求められた有害溶込み不足の最小厚さ (mm)L₁' : L₁ の 2 倍の溶込み不足の深さ (mm)L₄ : L₃ の 1.5 倍の溶込み不足の深さ (mm)

4.2 供試材および試験片

4.2.1 供試材

供試材は船体用軟鋼材と同等材としてSM41で板厚20mmおよび40mmの鋼板でその化学成分、機械的性質は表4.2.1-1のとおりである。

表4.2.1-1 供 試 材

鋼 板	化 学 成 分 (%)					引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び GL: 200 mm (%)
	C	Si	Mn	P	S			
SM41(20mm厚)	0.15	0.15	0.67	0.018	0.020	42	27	34
SM41(20mm厚)	0.11	0.22	0.95	0.018	0.023	43	29	32
SM41(40mm厚)	0.11	0.24	0.92	0.010	0.017	45	31	28

4.2.2 試験板

試験板の寸法と試験片の採取要領は図4.2.2-1～図4.2.2-4のとおりで、内部欠陥はA1, A2及びP10～P15をのぞきすべて継手全長にわたって一様となるよう作製された。P10～P15はいずれも部分欠陥であり、健全な継手に所定の長さの部分欠陥が含まれるよう作製された。

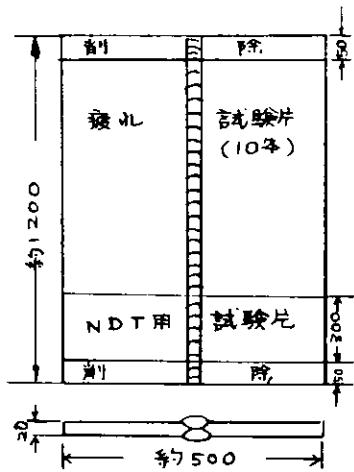


図4.2.2-1 小型疲れ試験用試験板
(P8, A2, P9及び広巾試験を除く)

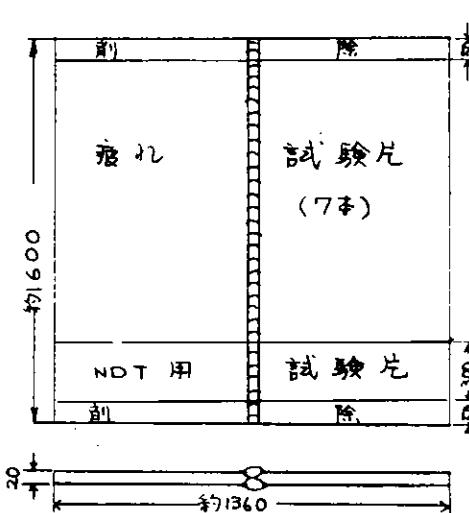


図4.2.2-2 曲げと引張りをうける小型疲れ試験用試験板
(P8試験用)

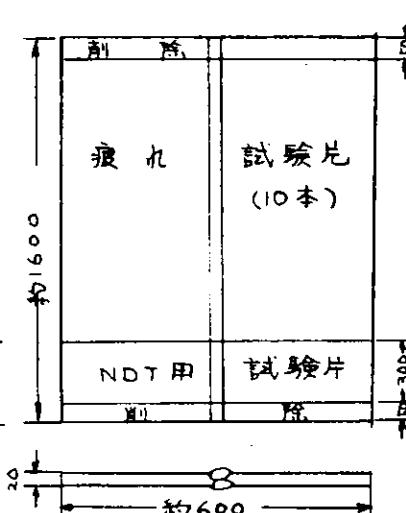


図4.2.2-3 40 mm厚さの小型疲れ試験用試験板
(A2, P9試験用)

溶接は手溶接による両面溶接とし、最終層は立向き溶接とするが、初層および中間各層は下向き溶接で行なった。溶接棒は低水素系と指定のあるものを除き、通常の被覆系の溶接棒（たとえばイルミナイト系またはライムチタニヤ系）が使用された。

試験片の採取はガス切断とし、所定の試験片寸法に機械仕上げを行った。

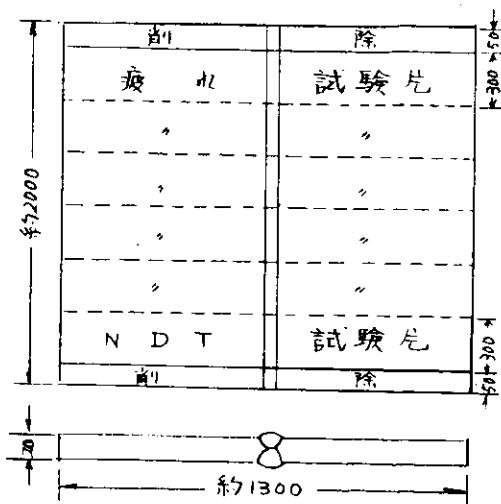


図 4.2.2-4 広巾試験用試験板
(P10～P15用)

4.2.3 試験片

試験片の形状寸法は図4.2.3-1～図4.2.3-4のとおりとする。余盛りは仕上げない。

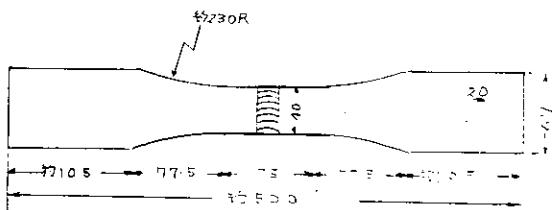


図 4.2.3-1 小型疲れ試験片(P8, A2, P9 広巾試験片を除く)

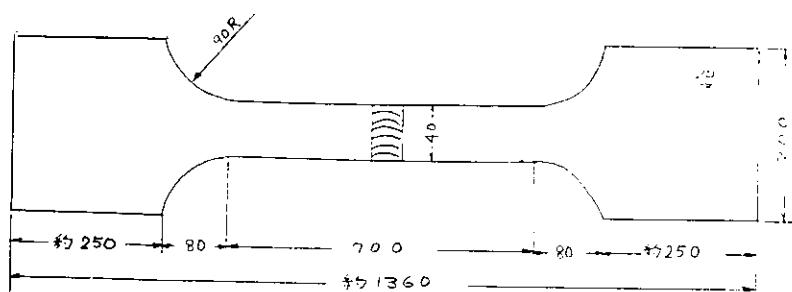


図 4.2.3-2 曲げと引張りを受ける小型疲れ試験片(P8)

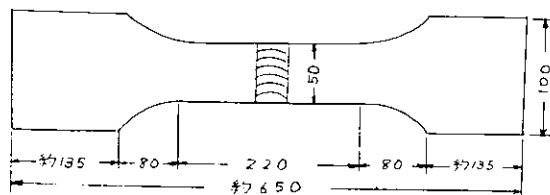


図 4.2.3-3 40mm厚さの小型疲れ試験片(A2, P9用)

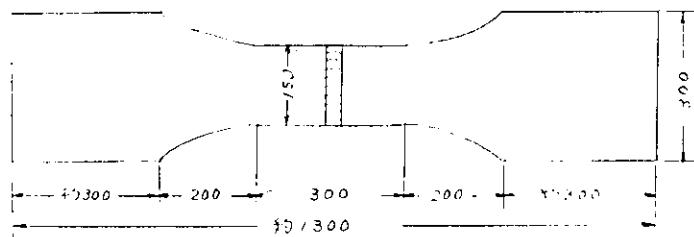


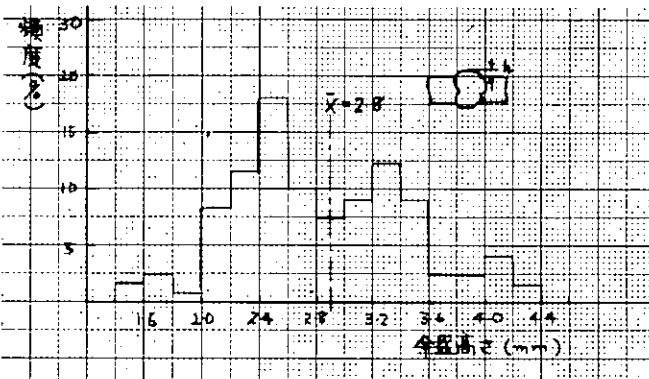
図 4.2.3-4 広巾疲れ試験片 (P10～P15用)

試験片の内部欠陥の位置、大きさ、種類等については表 4.1.2-1 および 4.5 と 4.6 の関係項目を参照されたい。

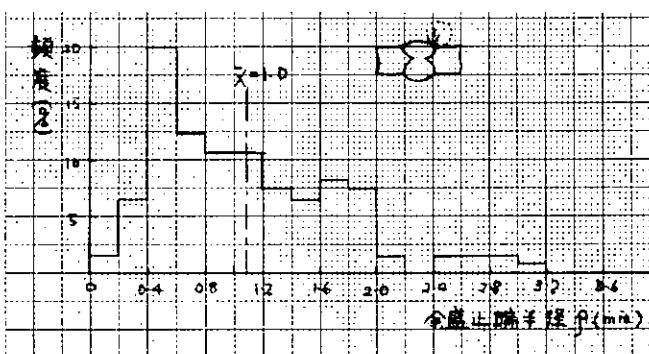
4.2.4 試験片の余盛り

試験片の余盛りの形状は疲れ強度上きわめて重要な影響を与えるので、P1, P2 を除き、下向き溶接と上向き溶接の中間の余盛形状を与えるものとして両面の最終層のみ立向き溶接を行った。この余盛の高さ及びその止端部の形状を確認するため次の要領で余盛高さ h 、止端部の曲率半径 ρ および止端角 θ を測定した。

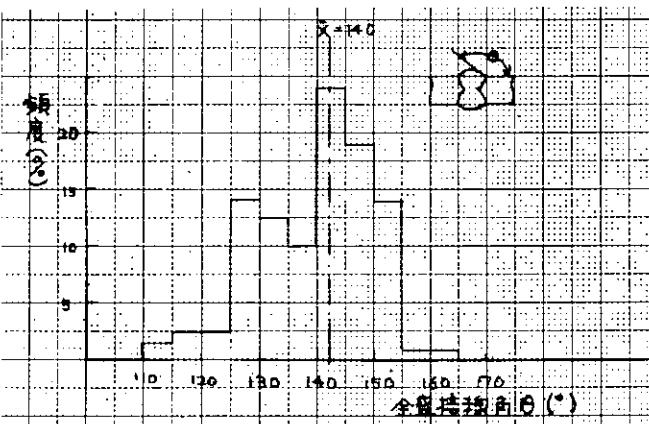
- ビード形状の全体をプラスティックコンパウンド（例えば義歯作製用材料）で凹形にておく。
 - 継手の疲労試験を行い、き裂発生点の凹形に応する位置をマークしておく。
 - マークの付けられた断面を削り出し倍率 20 倍の投影拡大器でビード形状を拡大し、その映像又はこれをトレースした図をもとに h , ρ , θ を測定する。
- 各試験片について h , ρ , θ を測定した結果は図 4.2.4-1(a), (b), (c) のとおりであり、一般の立向溶接と見なされる形状である。



(a) 試験片の余盛高さ h の分布



(b) 試験片の余盛止端半径 ρ の分布



(c) 試験片の余盛接線角 θ の分布

図 4.2.4-1

4.2.5 角変形のある試験片のひずみ直し

試験片の角変形があり、偏心の割合が10%を越える場合には図4.2.5-1に示すように中央の溶接部をのぞき左右別個にひずみ直しを行い、できるだけ試験片の曲がりを小さくした。この場合溶接部、止端部、熱影響部には荷重や応力が生じないよう注意をはらった。

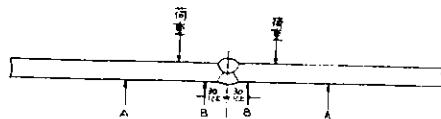


図4.2.5-1 角変形のある試験片のひずみ直し

4.3 試験材の溶接と欠陥の作り方

4.3.1 試験板の溶接条件

(1) 溶接材料

使用した溶接材料の機械的性質を表 4.3.1-1 に示す。

表 4.3.1-1 溶着金属の機械的性質の一例

銘柄	JIS 規格	引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び (%)	0°Cにおける衝撃試験の吸収エネルギー (kg-m)
T B 2 4	D 4303	47	43	32	11.8
S T 1 7	D 4301	47.2	40.7	28.7	10.1
O 1 A	D 4301	47	40	33	10
LB50A	D 5016	54	46	32	20

(2) 開先形状

試験材の溶接開先形状を図 4.3.1-1 に示す。

図中のルート高さ h は溶込み不足の深さ程度により適宜変えるものとする。

(3) 溶接方法

余盛形状のばらつきを出来るだけ小さくするため上層は立向上進手溶接で行ない、他の層はすべて下向手溶接で行なった。

(4) 溶接条件

各種疲れ試験材作成時の溶接条件を表 4.3.1-2 に示す。

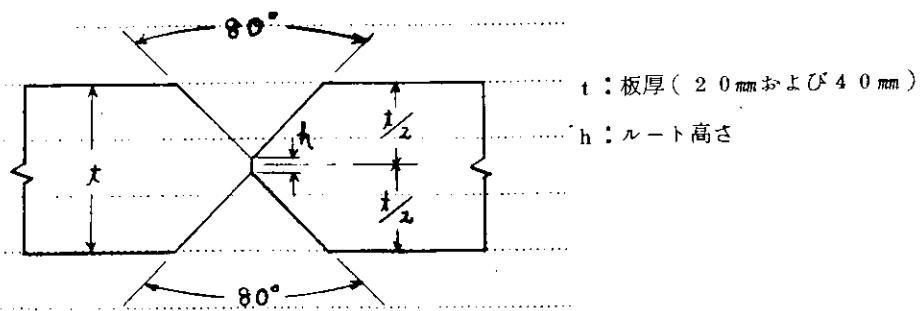


図 4.3.1-1 溶接開先形状

表4.3.1-2 溶接条件

試験番号	層 数	溶接棒の銘柄	棒径(mm^{ϕ})	溶接電流(A)	溶接速度(cm/min)	備 考
A - 1	1	T B 2 4	3.2	160	25	表裏同様
	2	S T 1 7	4	180	24	
	3	0 1 A	5	230	18	
	4	S T 1 7	4	135	7	
P - 3	1	T B 2 4	3.2	160	30 ~ 40	#
P - 4	2	S T 1 7	4	170 ~ 180	24 ~ 29	
P - 5	3	0 1 A	5	220 ~ 230	24 ~ 29	
P - 8	4	S T 1 7	4	130	5 ~ 7	
P - 6	1	LB50A	4	170	17	#
	2	#	#	200	15	
	3	#	#	140	8	
P - 7	1	LB50A	4	170	19	#
	2	#	5	240	16	
	3	#	4	160	8	
P - 9	1	T B 2 4	3.2	160	35	○ 5 ~ 7層は1層2バス盛 ○ 表裏同様
	2	S T 1 7	4	180	30	
	3	0 1 A	5	220	28	
	4 ~ 6	#	6	320	17 ~ 26	
	7	S T 1 7	4	130	5 ~ 6	
A - 2	1	T B 2 4	3.2	160	30	○ 5 ~ 8層は1層2バス盛 ○ 表裏同様
	2	S T 1 7	4	180	27	
	3	0 1 A	5	220	25	
	4 ~ 6	#	6	320 ~ 330	16 ~ 33	
	8	S T 1 7	4	140	5 ~ 6	
S - 1	表 1	T B 2 4	3.2	160	34	○ 裏 3 ~ 4 層間でスラグ巻 込み作成 ○ 裏 3 層は 2 パス盛
	" 2	S T 1 7	4	180	35	
	" 3	0 1 A	5	230	20	
	" 4	S T 1 7	4	130	5	
	裏 1 ~ 2	T B 2 4	3.2	160 ~ 180	33 ~ 35	
	" 3	#	#	130	24	
	" 4	S T 1 7	4	#	30	
	" 5	#	#	170	#	
B - 1	" 6	#	#	140	6	○ 表 2 層及び裏 3 層でプロ ホール作成
	表 1	T B 2 4	3.2	160	31	
	" 2	0 1 A	5	380	48	
	" 3	S T 1 7	4	180	25	
	" 4	#	#	140	5	
	裏 1	T B 2 4	3.2	170	40	
	" 2	S T 1 7	4	180	33	

試験番号	層 数	溶接棒の銘柄	棒径(mm^{ϕ})	溶接電流(A)	溶接速度(cm/min)	備 考
B S - 2	裏 3	0 1 A	5	370	40	○表2層でプローホール作成 ○裏3層は2バス盛 ○裏3~4層間でスラグ巻込み作成
	" 4	T B 2 4	3.2	170	22	
	" 5	S T 1 7	4	140	6	
	表 1	S T 1 7	4	180	28	
	" 2	0 1 A	5	320	22	
	" 3	"	"	190	20	
	" 4	S T 1 7	4	135	6	
	裏 1	T B 2 4	3.2	160	22	
	" 2	S T 1 7	4	180	27	
	" 3	T B 2 4	3.2	120	26	
	" 4	"	"	110	13	
	" 5	0 1 A	5	230	21	
	" 6	S T 1 7	4	140	8	
P S - 2	表 1	T B 2 4	3.2	160	30	○表3~4層間でスラグ巻込み作成 ○表3層は2バス盛
	" 2	S T 1 7	4	180	28	
	" 3	T B 2 4	3.2	125	24	
	" 4	S T 1 7	4	130	15	
	" 5	"	"	140	7	
	裏 1	T B 2 4	3.2	160	28	
	" 2	S T 1 7	4	180	29	
	" 3	"	"	"	26	
	" 4	0 1 A	5	230	22	
	" 5	S T 1 7	4	140	7	
P B - 2	表 1	T B 2 4	3.2	160	38	○表3層及び裏3層で裸棒の状態にしてプローホール作成 ○裏4層は2バス盛
	" 2	"	"	"	36	
	" 3	S T 1 7	4	210	25	
	" 4	T B 2 4	3.2	160	22	
	" 5	S T 1 7	4	140	6	
	裏 1	T B 2 4	3.2	160	41	
	" 2	"	"	170	38	
	" 3	S T 1 7	4	210	23	
	" 4	T B 2 4	3.2	160	32~40	
	" 5	S T 1 7	4	140	6	
P - 1 0	表1~2	T B 2 4	3.2	160	30~40	○P-13~P-15は 裏4層を除いた盛り方
P - 1 1	" 3	S T 1 7	4	180~190	23~29	
P - 1 2	" 4	0 1 A	5	220~240	19~28	
P - 1 3	" 5	S T 1 7	4	140	7~8	
P - 1 4	裏1~2	T B 2 4	3.2	160	24~53	
P - 1 5	" 3~4	S T 1 7	4	180	24~31	
	" 5	0 1 A	5	220	20~25	
	" 6	S T 1 7	4	140	6~8	

4.3.2 溶け込み不足の作り方

(1) 予備試験結果

本疲れ試験で要求されている溶け込み不足の深さは 1 mm , 2 mm , 3 mm , 4.5 mm および $0 \sim 5\text{ mm}$ に連続的に変化させるものの計 5 種類であるが、これら所定の欠陥を作成するために予備試験で溶接電流、開先角度及びルート高さと溶け込み深さとの関係を定量的に確認した。

その結果を図 4.3.2-1 ~ 図 4.3.2-3 に示す。

これらの結果から次のことが明らかになった。

- (i) 溶け込みは溶接電流が高い程、開先角度が大きい程増加する。
- (ii) イルミナイト系溶接棒の場合では溶接電流が適正範囲のほぼ上限の 170 A 、開先角度 80° の条件においても、ルート面まで溶け込まず開先面が約 0.5 mm 残る状態となる。
一方、低水素系溶接棒の場合は開先面は残らずルート面に対して溶け込みゼロの状態となる。
- (iii) ルート高さによって溶け込み状態はほとんど影響を受けない。
- (iv) 棒径の細い溶接棒の方が溶け込みが増し、開先面の不溶着部が小さくなる。

(2) 溶け込み不足の作成条件

予備試験で得られた結果をもとに溶け込み不足を有する継手の作成条件を次のように定めて試験材の溶接を行なった。

- (i) 開先角度は 80° とする。
- (ii) 初層の溶接棒は TB 24 3.2 mm^ϕ を使用する。
- (iii) 溶接電流は 160 A とする。
- (iv) 開先のルート高さは所定の溶け込み不足の深さから TB 24 を使用する場合は 0.5 mm 減じた値を、また LB 50 A を使用する場合は所定の溶け込み不足の深さとする。

以上の条件で作成された試験材の溶け込み不足の深さは所定の値より若干プラス傾向であったがほぼ良好な結果が得られた。

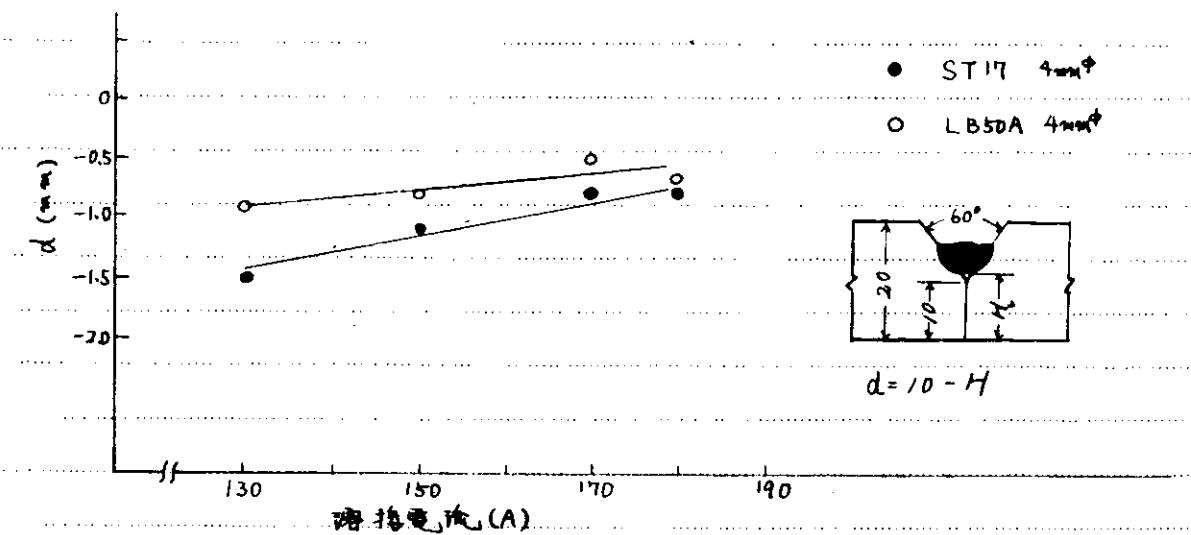


図 4.3.2-1 溶接電流と溶け込み深さとの関係（下向溶接の場合）

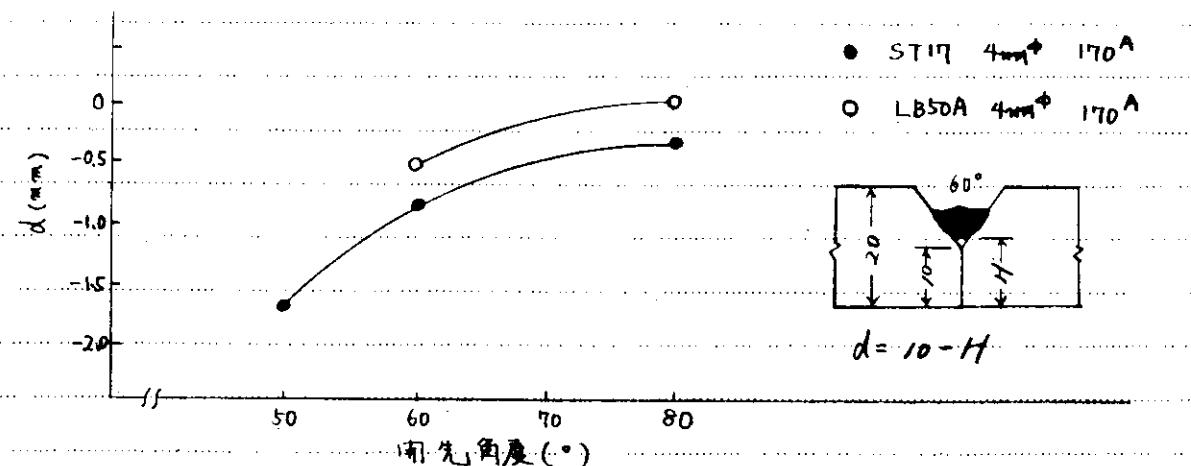


図 4.3.2-2 開先角度と溶け込み深さとの関係（下向溶接の場合）

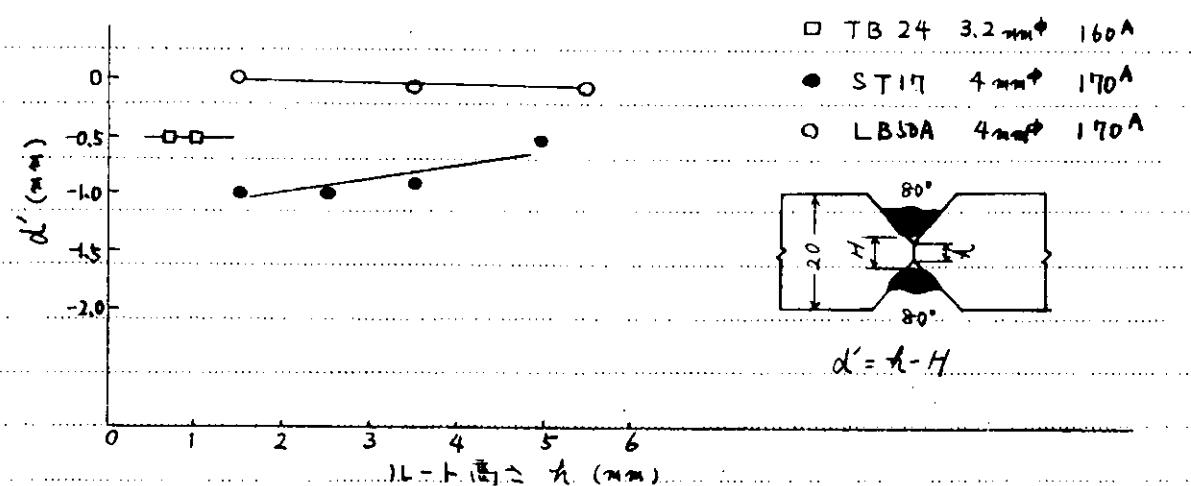


図 4.3.2-3 ルート高さと溶け込み深さとの関係（下向溶接の場合）

4.3.3 プローホールの作り方

(1) 予備試験結果

JIS 4級程度のプローホールを有する継手を作成するために予備試験で溶接電流および溶接棒の加熱温度とプローホール発生量との関係を定量的に確認した。なお、溶接はガウシング溝への1層1バス溶接で行なった。

その結果を図4.3.3-1及び図4.3.3-2に示す。

これらの結果から次のことが明らかになった。

(i) 溶接電流を増す程プローホールの発生は増加する。また、溶接継手全体に均一に発生させるためには適正電流範囲の上限値より100～150A増して溶接する必要がある。

(ii) 溶接棒を適正な再乾燥条件($100^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr}$)より加熱温度を約3倍程度に上げ溶接棒のフラックス中のガス成分を分解する方法はあまり有効ではないが、加熱温度を 500°C に上げ溶接電流を適正電流の上限値より約60A程度増加させて溶接する方法は有効である。

(2) プローホールの作成条件

予備試験で得られた結果をもとにJIS 4級プローホールを有する継手を安定して作成しうる条件を次のように定めて試験材の溶接を行なった。

(i) 溶接棒は原則的に0.1A 5mmØを用い、溶接電流は340A以上とする。

(ii) プローホール作成用の溶接は非常に高い電流を用いるので、溶け込み不足も作成する試験材(PB-2)の場合には溶け込み不足欠陥を溶かしてしまう場合もあるので、ST17 4mmØを用い電流はあまり増さず、フラックスを除去し裸棒の状態に近くしアーケを小さくしてから溶接しプローホールを作成する方法をとる。

(iii) プローホール作成層の上の層に盛る溶接は作成したプローホールを溶かし込まないようにTB24 3.2mmØあるいはST17 4mmØを用い低い電流を用いる。

以上の条件で作成された試験材のプローホール発生状態は所定の条件を満たすことができた。

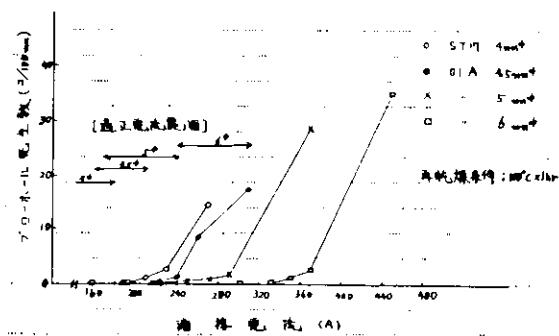


図4.3.3-1 溶接電流とプローホール発生数の関係
(下向溶接の場合)

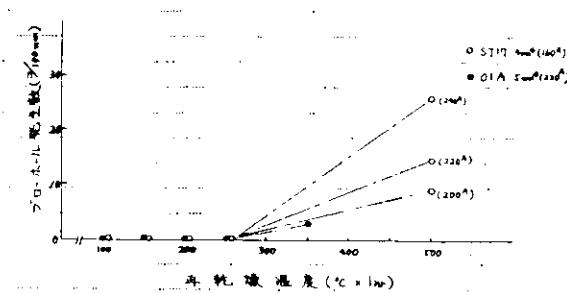
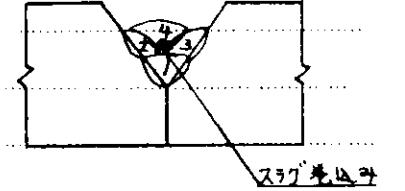


図4.3.3-2 再乾燥温度とプローホール発生数の関係
(下向溶接の場合)

4.3.4 スラグ巻込みの作り方

スラグ巻込みの作り方は適正電流範囲の下限値(120A)を用い、表4.3.4-1に示す如く開先面両側にビードをおき、この両ビードによりノッチ状の溝を作成しその溝が十分溶け込まないよう上盛する方法を予備試験で行なった。

表4.3.4-1 スラグ巻込み作成条件

パス数	溶材 銘柄	棒径 (mmφ)	溶接電流 (A)	盛り方
1	S T 1 7	4	170	
2	"	"	120	
3	"	"	"	
4	"	"	"	

その結果所定の欠陥を容易に得られることがわかったので試験材の溶接では予備テストと同様な方法で欠陥を作成した。

4.4 余盛付突合せ継手の疲れ強度

4.4.1 小型試験(A1)

(1) 試験板および試験片

余盛り付き突合せ溶接継手の内部欠陥が疲れ強度に及ぼす影響について調査するにあたり、その基準となる余盛り付き無欠陥の突合せ継手（健全継手と呼ぶ）の疲れ強度を求めることが必要となる。

図4.2.2-1に示す試験板について、図4.3.1-1の開先形状で欠陥の含まれない継手から図4.2.3-1の試験片10個を作製した。

(2) 試験および試験結果

試験はローゼンハウゼン型40t試験機およびアムスラーパルセータ型50t試験機で400～500cpmの片振り張荷重を加えて行なった。疲れ試験の結果を表4.4.1-1に、SN線図を図4.4.1-1に示す。疲れ破壊の起点はすべて余盛止端であり、破壊発生点の断面の余盛形状（上下左右4箇所の平均値）も表4.4.1-1に示す。代表的な破断写真を写真4.4.1-1に示す。

4.4.2 厚板試験(A2)

(1) 試験板および試験片

4.4.1は板厚20mmの試験片を用いて行なったが、板厚が大きくなても欠陥の影響は板厚に比例するものか否かを確認するため、板厚40mmの余盛り付き健全継手の疲れ強度に対する実験を行った。

図4.2.2-3に示す試験板について図4.3.1-1の開先形状で欠陥の含まれない継手から図4.2.3-3の試験片10個を作製した。

(2) 試験および試験結果

試験は100tアムスラー型試験機に70tパルセータをつけた疲れ試験機で10～20cpmの片振り張荷重を加えて行った。疲れ試験の結果を表4.4.1-1に、SN線図を図4.4.1-1に示す。疲れ破壊の起点はすべて余盛止端であり、破壊発生点の余盛形状の平均値も表4.4.1-1に示す。代表的な破断写真を写真4.4.2-1に示す。

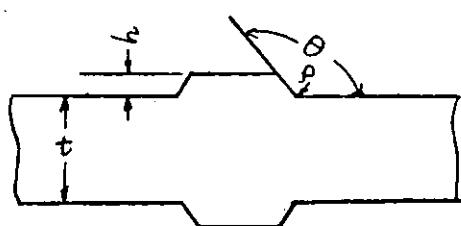
4.4.3 健全継手の疲れ強度

厚板に対する試験は試験機の繰返荷重回数の関係で一部終了していないが、厚板のSN線と小型試験片によるSN線は同一線上にあり、健全継手に関するかぎり板厚の影響はないと考えられる。

表 4.4.1-1 余盛付き健全溶接継手の疲れ試験結果

試験片番号	応力全振幅 (kg/mm ²)	破断までの繰返し回数N	破断位置	欠陥の有無	試験片の余盛形状 1)		
					高さ h (mm)	止端半径 ρ (mm)	接線角 θ (度)
A1-1	18.1	3.31×10^5	止端部	なし	2.3	0.3	136
A1-2	16.0	1.34×10^6	"	"	2.3	0.5	131
A1-3	17.2	4.02×10^5	"	"	2.8	0.7	126
A1-4	14.9	9.05×10^5	"	"	3.1	0.6	132
A1-5	13.0	1.89×10^6	"	"	3.0	0.6	132
A1-6	11.9	2.16×10^6	破断せず	"	2.9	0.5	152
A1-7	12.5	1.50×10^6	止端部	"	3.2	0.5	121
A1-8	11.5	3.84×10^6	破断せず	"	3.1	0.5	131
A1-9	14.0	1.79×10^6	止端部	"	2.7	0.5	140
A1-10	23.9	1.18×10^5	"	"	3.3	0.6	136
A2-1	23.5	—		なし	3.3	1.0	149
A2-2	24.5	—		"	4.1	1.9	144
A2-3	25.5	—		"	3.2	1.3	142
A2-4	26.5	—		"	3.3	1.7	144
A2-5	27.5	—		"	3.5	0.8	126
A2-6	28.5	2.02×10^5	止端部	"	3.5	1.6	142
A2-7	29.5	1.23×10^5	"	"	3.0	1.1	129
A2-8	30.5	1.30×10^5	"	"	3.2	1.2	127
A2-9	31.5	1.40×10^5	"	"	3.3	1.8	141
A2-10	32.5	1.05×10^5	ビード中央	なし	2.5	1.3	128

注 1) 余盛形状は破断面付近の平均の形状



(h, ρ, θ の表示は以下の諸表も同じ)

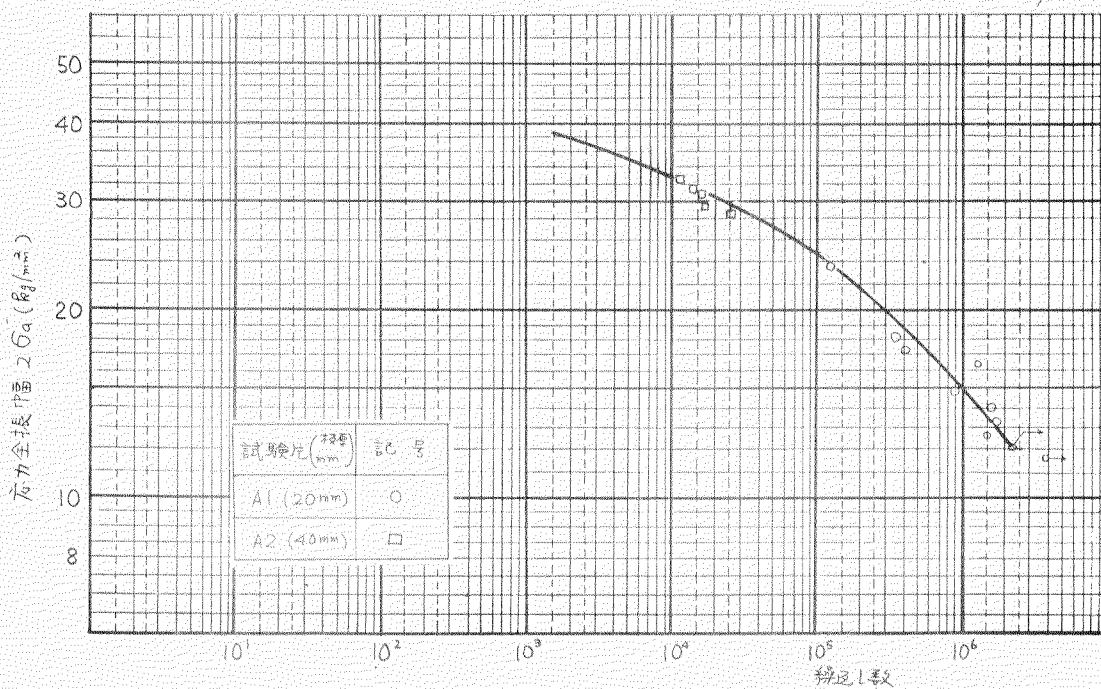


図 4.4.1-1 余盛付き突合せ溶接健全継手試験のS-N線図 (A1およびA2)

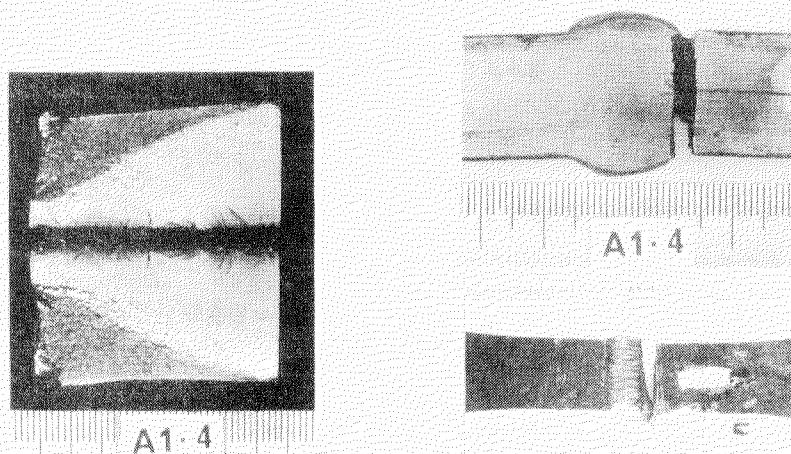


写真 4.4.1-1 余盛付健全突合せ溶接継手試験片の疲労破面

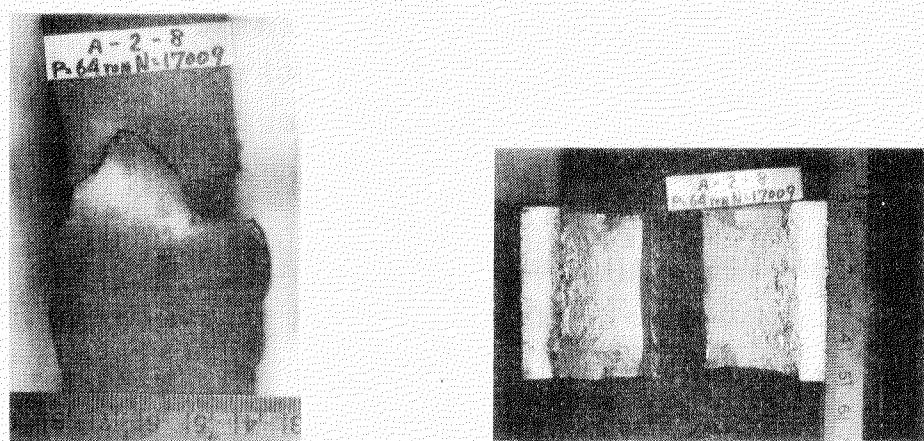


写真 4.4.2-1 余盛付き健全継手(厚板)の破面写真

4.5 溶込不足を含む継手の疲れ試験

4.5.1 溶込不足の位置の影響(P2)

(1) 試験板および試験片の作製

溶込不足の板厚内の位置(表面近くか中心部か)は疲れ強度にいかに影響を与えるかを調査するため溶込不足の深さを一定(5mm)とし、その位置を図4.5.1-1のように板厚中心部から表面に向って変化させた継手を作製した。

母材はSS41、溶接棒はB17(イルミナイト系)を使用し、すべて下向き溶接で行い、最終層は1パスで仕上げた。試験片はP2-1からP2-10まで10本作製した。試験片の仕上り状態を表4.5.1-1に示す。

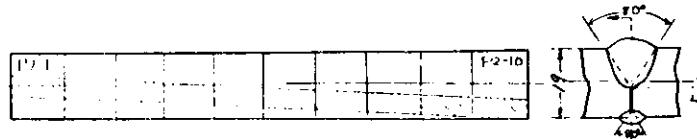


図4.5.1-1 溶込不足の位置

(10体の試験片の溶込不足位置の断面を並べた場合を示すもので、斜線部が溶込不足を示す。)

(2) 試験および試験結果

試験はPHE40~60t油圧式疲労試験機を使用し、荷重制御方式の完全片振引張荷重とし、応力全振幅は0~16kg/mm²、繰返し速度は500rpmとなるようにして行なった。疲労試験の結果を表4.5.1-2に、破断面の代表的な写真を写真4.5.1-1に示す。全ての試験片が溶込不足からき裂を発生し、板厚に垂直に進展して破断した。

(3) 考察

図4.5.1-2に示してある疲労試験結果によると、本試験片寸法程度のものでは溶込不足の位置の影響は現れにくいと判断される。この事を確認るために応力計算を行った。図4.5.1-3に計算モデルと計算結果を示す。計算モデルのビード形状は試験片の標準的な形状とした。溶込不足として3mmのき裂を考えその位置を4通りに変化させ有限要素法を用いて応力計算を行ったものでその結果次の事が判った。

- (i) ビードの余盛部分(対象としているのは図4.5.1-3において小さい方のビード)では応力が急に小さくなっている(破線)。余盛部分から板厚内部に入ると応力分布は平坦になり、その値はAA断面での平均応力(二点鎖線)の1.3倍程の値である。
- (ii) 同図のNo.1からNo.3までのき裂はその応力分布が平坦である部分に存在している。後述するが自由境界の影響は小さいので、この領域ではき裂の位置よりも大きさの影響が優先する事が判る。
- (iii) 無限板で比較すると二点鎖線で示される応力場に同寸法のき裂があるときの応力拡大係数Kの値を1とするとC点のKの値はNo.1, No.2, No.3で1.3, No.4で0.9、またNo.4のC点のKは1.1となる。
- (iv) 自由境界の影響を考慮しても、C点のKの値はNo.1からNo.4までそれぞれ1%, 1.5%, 2%, 6.5%程増加するにすぎない。
- (v) したがって応力計算の結果からもき裂(溶込不足)の位置の影響は現れにくい事が判った。

以上の結果から溶込不足の位置の影響よりも大きさの影響に重点を置いて検討していく事が得策であると思われる。

表4.5.1-1 溶接部の主要寸法と溶込不足の位置および深さ

試験片番号	溶接部平均厚板t(mm)	余盛高さh (mm)	余盛高さh' (mm)	側面角θ(度)	側面角θ'(度)	溶込不足の深さe(度)	溶込不足の位置d (mm)	溶込不足の位置e (mm)
P-2-1	2.2.0	1.70	2.40	160.5	145.5	5.8	8.4	0.02
P-2-2	21.9	1.55	2.00	165.4	131.0	6.0	8.15	1.24
P-2-3	23.0	2.40	2.60	127.3	127.7	6.0	8.15	1.24
P-2-4	22.1	2.50	1.80	161	161.7	—	—	—
P-2-5	21.1	2.00	2.30	150.2	155.0	5.8	5.9	3.49
P-2-6	22.6	1.30	3.50	166.2	146.7	5.3	5.2	4.19
P-2-7	22.1	1.80	2.30	152.8	140	5.2	5.35	4.04
P-2-8	21.9	1.80	2.80	164.0	117.5	—	—	—
P-2-9	23.1	2.50	3.00	154.5	126.0	4.9	2.65	6.74
P-2-10	22.6	2.00	3.30	152.7	146.0	4.4	2.8	6.59

余盛高さは平均値

側面角は端面での最大値

溶込不足の大きさは最大値

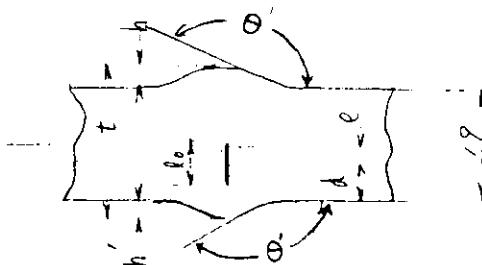


表4.5.1-2 疲労試験結果

試験片番号	溶込不足の深さ ϵ_0 (mm)	溶込不足の位置 d (mm)	溶込不足の位置 e (mm)	破壊繰返し数 N_f (回)	備考
P-2-1	5.8	8.4	0.02	6.11×10^5	P-2-1のみ応力全振幅 $2\sigma a = 20$ (Kg/mm^2)
P-2-2	6.0	8.15	1.24	1.19×10^6	
P-2-3	6.0	8.15	1.24	9.99×10^5	
P-2-4	—	—	—	—	—
P-2-5	5.8	5.9	3.49	7.13×10^5	
P-2-6	5.3	5.2	4.19	8.72×10^5	
P-2-7	5.2	5.35	4.04	3.41×10^6	
P-2-8	—	—	—	—	—
P-2-9	4.9	2.65	6.74	2.09×10^6	破断せず。
P-2-10	4.4	2.8	6.59	9.87×10^5	

破断したものは全て溶込不足からき裂が発生して破断に至った。

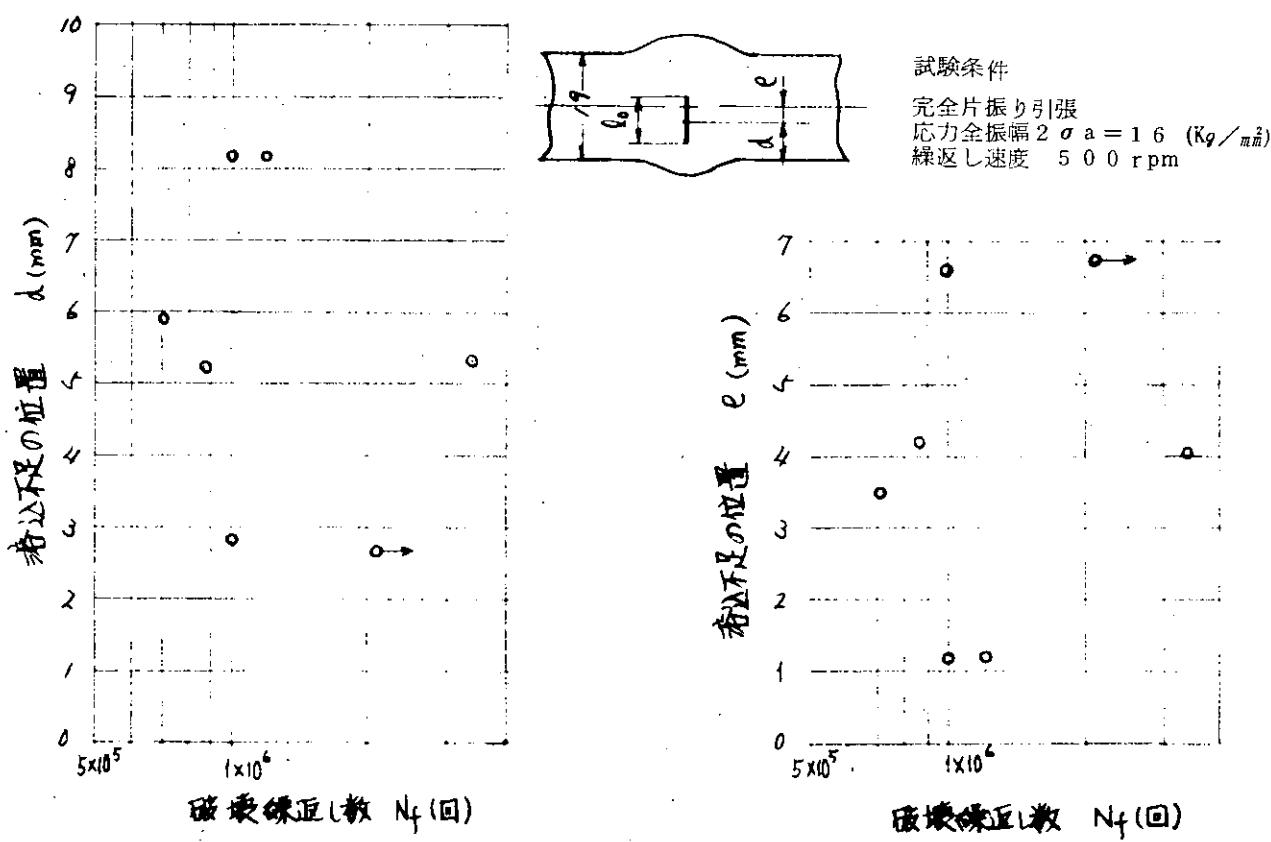


図 4.5.1-2 疲労試験結果

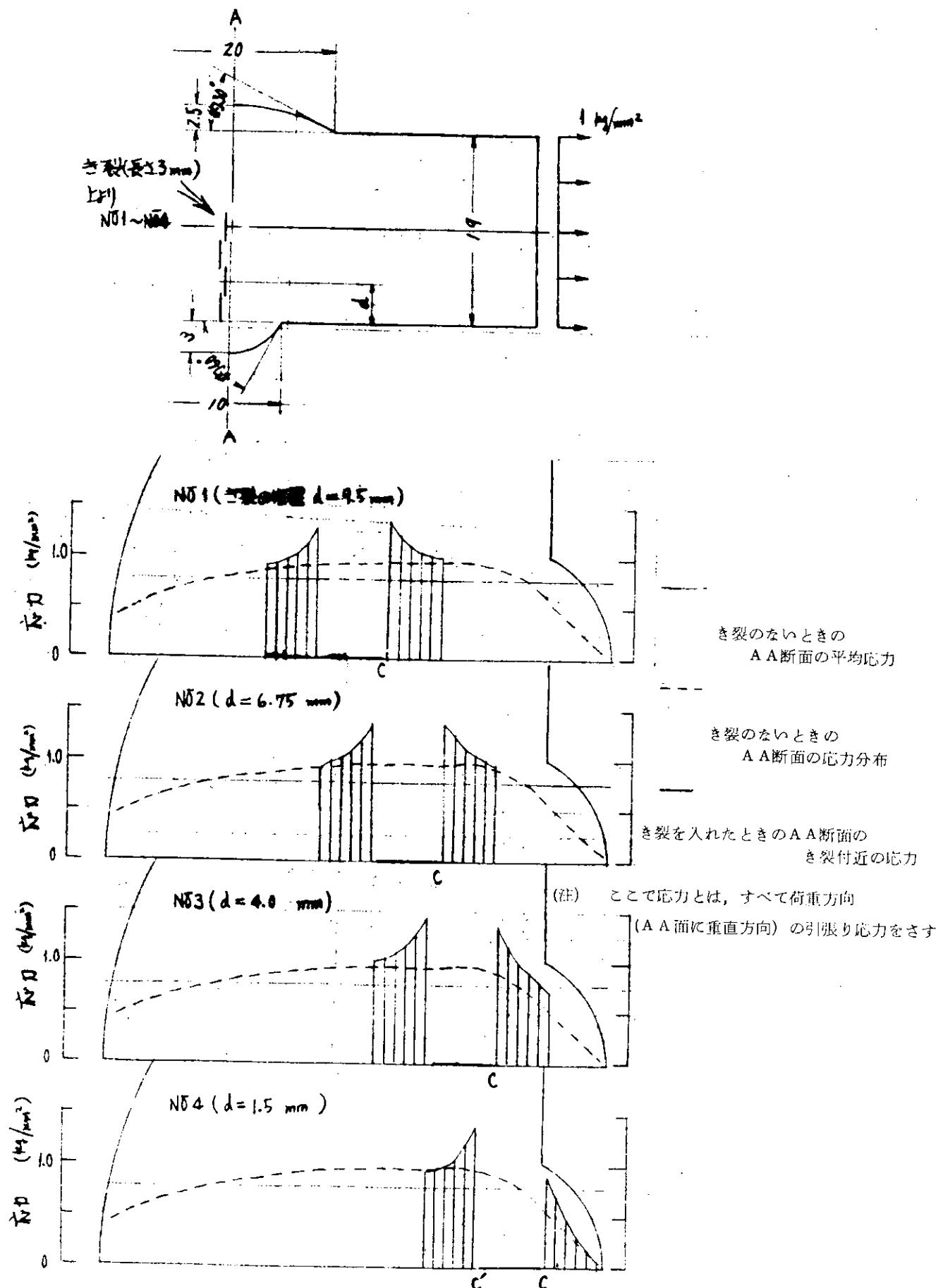
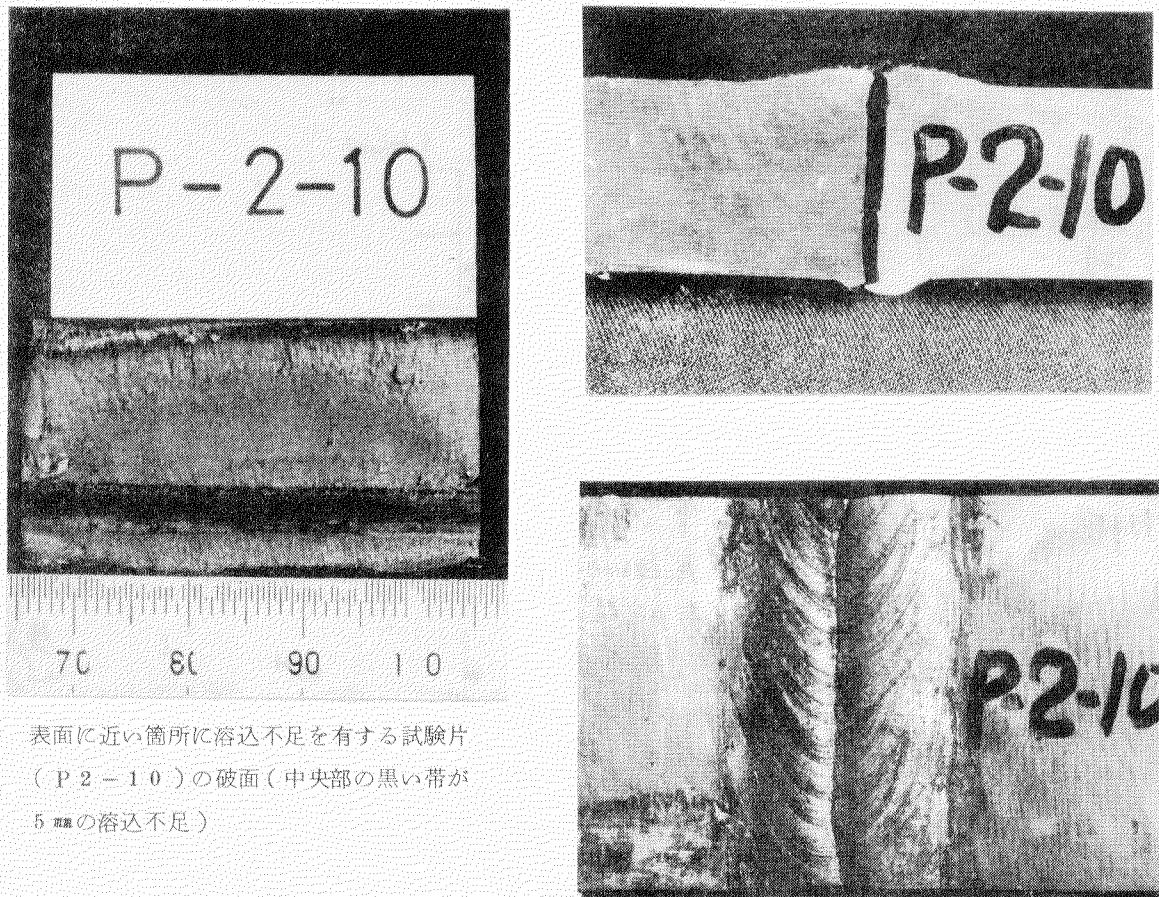


図 4.5.1-3 き裂の位置の影響に関する応力計算結果



表面に近い箇所に溶込不足を有する試験片
(P-2-10) の破面 (中央部の黒い帯が
5 mm の溶込不足)

写真 4.5.1-1 溶込不足の位置をかえた試験片の疲れ破壊状況の例

4.5.2 溶込不足の深さの影響

(1) 予備実験 (P-1)

(a) 試験板および試験片の作製

溶接部の有害な欠陥である溶込不足はその深さ (L) が大きくなれば強度は大きく低下するし、 L が小さければ強度の低下は小さい。 L が継手の厚さにくらべてかなり小さければ、余盛り止端部の応力集中による疲れ強度の低下の方が溶込不足による低下よりも著るしいことも考えられる。

溶込不足の深さ L が変化したとき、疲れ強度がいかに変化するかについて、図 4.5.2-1 のとおり L を連続的に変えた継手に対し、一定振巾で疲れ試験を行なった。

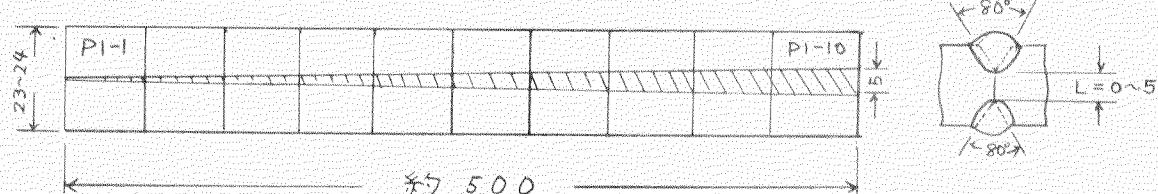


図 4.5.2-1 溶込不足を連続的に変えた試験材の断面 (斜線部は溶込不足) (P-1 シリーズ)

溶接棒は B-17 (イルミナイト系) を用いてすべて下向溶接で行ない、最終層は 1 パスで仕上げた。余盛高さは、
1.5 ~ 2.2 mm、余盛角は 156.5 ~ 166°、止端部の曲率半径は 3 ~ 4 mm であった。

試験片は図4.2.3-1の通り溶込み不足は図4.5.2-1のとおりP1-1からP1-10まで10本作製した。

(b) 試験および試験結果

試験はPHE40/60油圧式疲労試験機を使用し、荷重制御方式の完全片振引振りで応力値が0~16kg/mm²となるように引張試験を行なった。試験の結果は表4.5.2-1および図4.5.2-2のとおりで、き裂は写真4.5.2-1のとおりいずれも溶込み不足から発生し、疲れ破壊となった。

(c) 考 察

- i) 溶接ビードの仕上りが良好でなめらかなビード形状となったため、かなり高い疲れ強度であるにもかかわらず、ごく浅い溶込み不足からき裂を生じた。余盛り付き横突合せ継手の 2×10^6 回時間強度は $\sigma_a = 7 \text{ kg/mm}^2$ 程度で余盛止端から破断するのが普通であるが、今回の実験では 2×10^6 回時間強度は $\sigma_a = 8 \text{ kg/mm}^2$ で余盛止端から破断せず、溶込み不足から破断するに至っている。このことは、溶込み不足L=1mmの継手の時間強度は、余盛付き継手と同じ時間に対する強度より大きいことを示しており、L=1mmの継手は健全な余盛付き継手と同等以上の強度を有しているものと考えられる。
- ii) 下向き継手の場合の余盛形状は、立て向き溶接や自動溶接の余盛り形状にくらべてなめらかにすぎるので、限界溶込み不足の確認のためには適当でなく、疲れ強度の点で中間的な余盛り形状を示す立て向き溶接による余盛りを以後の実験に用いることになった。

表4.5.2-1 溶込み不足の疲れ試験結果(P1)

試験序	溶込み不足深さ L (mm)	破壊回数	備 考
P1-1	0.90	1.48×10^6	
P1-2	1.45	8.78×10^5	
P1-3	2.30	2.21×10^5	
P1-4	2.75	3.47×10^5	
P1-5	3.30	2.88×10^5	き裂は溶込み不足のルートから発生し破断
P1-6	3.45	1.71×10^5	
P1-7	4.00	2.12×10^5	
P1-8	4.50	1.37×10^5	
P1-9	4.95	2.29×10^5	
P1-10	5.45	1.40×10^5	

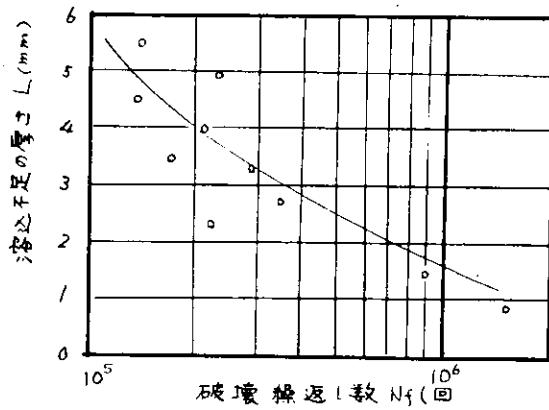
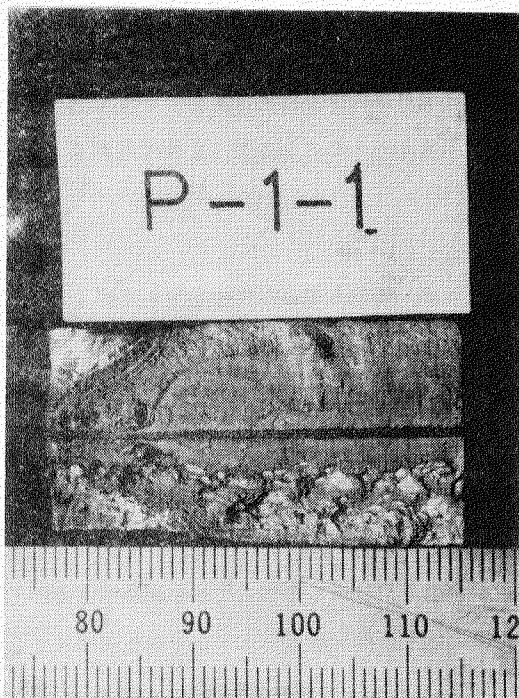


図4.5.2-2 溶込み不足を連続的にえた継手の
破壊線返し数(P1)



ごく浅い溶込不足から疲れ破壊をした例
溶込不足の深さは1mm以下で、通常は余
盛止端から破壊するが、溶込不足から破
断した珍らしい例。疲れ強度は健全継手
と同じ程度である。破面中央の黒線が溶
込不足である。

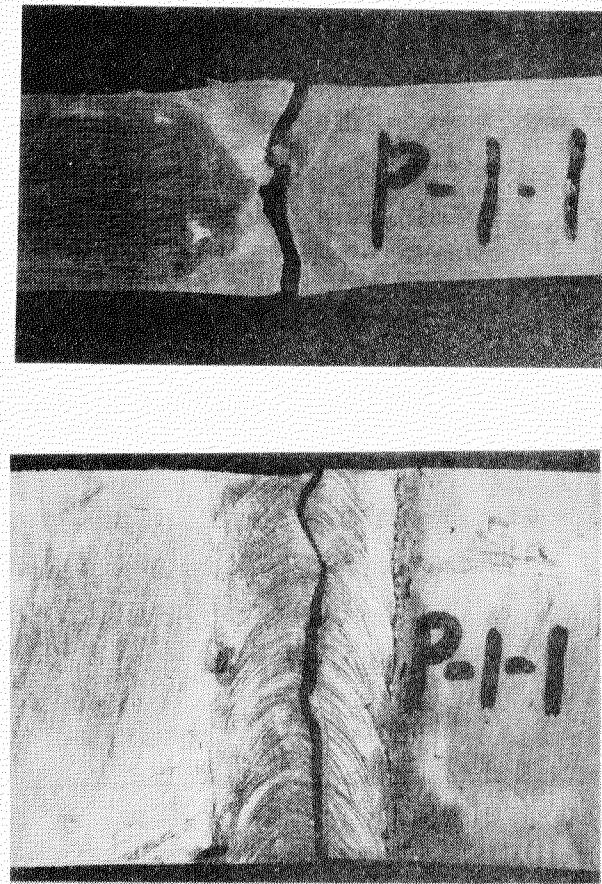


写真4.5.2-1 溶込不足を連続的に変えた試験片の疲れ試験写真の1例(P-1)

(2) 溶込不足の深さの影響(P-3, P-4, P-5およびP-9)

(a) 試験板および試験片の作製

溶込不足の深さLが変化したとき、継手の疲れ強度がいかに変化するかについて図4.5.2-3に示す継手断面の試験板から図4.2.3-1の試験片各10個を採取した。なお、板厚が大きくなつた場合の影響を調査するため、図4.5.2-4に示す継手断面を有する試験板(図4.3.2-2参照)から図4.2.3-3の試験片10個を採取した。



(a) 1 mmの溶込不足(P-3) (b) 2 mmの溶込不足(b4) (c) 3 mmの溶込不足(P-5)

図4.5.2-3 溶込不足を含む試験片

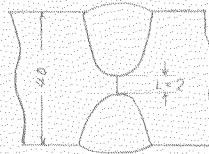


図4.5.2-4 厚板の溶込不足(P-9)

試験板の溶接は4.3.1項および4.3.2項のとおりで、最終層は立て向き溶接が行なわれた。

(b) 試験および試験結果

試験はP-3はシェンク製60tハイドロパルス型試験機で120~300cpmの片振り張、P-4およびP-5は40tローゼンハウゼン型試験機で550cpmの片振り張、P-9は100tアムスラー万能試験機(パルセータ:70t)で20cpmの片振り張で行なつた。試験の結果は表4.5.2-2および図4.5.2-5のとおりである。疲れ破壊はP-3は大部分が余盛り止端から発生しているが、P-4、P-5およびP-9は溶込不足の先端からき裂を発生している。

P 3, P 4, P 5 および P 9 の各試験の代表的な破面等を写真 4.5.2-2 ないし 4.5.2-5 に示す。

(c) 考 察

- i) 溶込み不足が約 1 mm (実際は $0.8 \sim 1.5\text{ mm}$, $0.04 \sim 0.07 t$ t : 板厚) のものは疲れ強度は健全継手とほとんどかわらず、破壊も大部分が余盛止端から発生し、溶込み不足の悪い影響はないと考えられる。しかし P 9 のように板厚が 4.0 mm のものでは板厚の $0.08 t$ すなわち 3 mm 程度の溶込み不足も健全継手にくらべて強度低下がみられており、板厚の $0.05 t$ が無害溶込み不足の限度と思われる。
＊
- ii) 溶込み不足の深さが約 2 mm または 3 mm のものの疲れ強さは健全継手にくらべて若干低く、疲れき裂はビードの熱影響部を通り斜めに進展するもの多かった。これは余盛止端部から発生したき裂と溶込み先端部から発生したき裂とが連結したものもあると考えられる。

＊ P 3 の疲れ試験において溶込み不足から破断したものは、破面に 1.8 mm および 2 mm の溶込み不足があり、P 4 に属する試験片と考えられる。

表4.5.2-2 溶込不足を含む試験片の疲れ試験結果

試験片番号	応力 (kg/mm ²)	破断までの繰返数	破断位置	破面の溶込不足 (mm)	破面の欠陥面積率(%)	試験片の余盛形状 ¹⁾		
						高さ h (mm)	止端半径 ρ(mm)	接線角 θ(度)
P 3-1	37.5	5.18×10^3	止端部	1.5	7.5	2.0	1.88	144
P 3-2	12.5	2.12×10^6	破断せず	—	—	2.7	1.75	148
P 3-3	17.5	7.05×10^5	ルート部	1.8	9.0	2.2	1.85	152
P 3-4	27.5	6.09×10^4	止端部	1.3	6.5	2.0	1.41	146
P 3-5	13.5	2.0×10^6	破断せず	—	—	2.0	1.29	145
P 3-6	22.5	2.00×10^5	ルート部	2.0	10.0	2.2	4.18	151
P 3-7	27.5	5.07×10^4	止端部	1.3	6.5	2.2	1.71	144
P 3-8	15.5	2.0×10^6	破断せず	—	—	2.2	2.89	152
P 3-9	32.5	2.18×10^4	止端部	1.6	8.0	2.7	1.89	149
P 3-10	32.5	2.41×10^4	ルート部	1.9	9.5	2.4	2.00	144
P 4-1	22.7	1.06×10^5	ルート部	2.0	10.1	2.4	1.97	152
P 4-2	16.7	4.47×10^5	〃	1.9	9.5	1.7	1.77	152
P 4-3	13.8	7.66×10^5	〃	2.1	10.6	2.5	0.44	145
P 4-4	11.6	2.21×10^6	〃	2.2	11.1	2.7	0.41	144
P 4-5	33.3	1.05×10^4	〃	2.1	10.6	2.1	0.90	152
P 4-6	18.8	2.18×10^5	〃	2.3	11.5	2.2	0.92	150
P 4-7	28.3	3.91×10^4	〃	2.3	11.5	2.4	0.91	143
P 4-8	39.4	1.3×10^3	〃	2.4	12.0	2.5	1.01	142
P 4-9	37.6	2.1×10^3	〃	2.2	11.1	2.5	0.28	142
P 4-10	44.9	静的引張	母材	—	—	2.4	0.38	142
P 5-1	20.6	1.31×10^5	ルート部	3.3	16.7	1.8	0.41	151
P 5-2	16.0	6.54×10^5	止端部	—	—	2.4	0.48	133
P 5-3	13.2	1.01×10^6	止端部	—	—	2.8	0.48	146
P 5-4	10.5	2.50×10^6	破断せず	—	—	2.2	0.40	129
P 5-5	30.6	1.16×10^4	ルート部	3.6	18.1	2.0	0.69	148
P 5-6	25.9	6.18×10^4	〃	3.4	17.1	2.1	0.47	133
P 5-7	37.1	2.1×10^3	〃	3.6	18.1	2.4	0.83	148
P 5-8	34.5	4.1×10^3	〃	3.4	17.1	2.1	0.37	129
P 5-9	19.0	2.31×10^5	〃	3.6	18.1	2.8	0.63	129
P 5-10	44.4	静的引張	〃	3.5	17.6	2.7	0.32	139
P 9-4	27.5	2.6×10^4	ルート部	3.4	8.5	3.9	2.54	145
P 9-6	28.5	2.03×10^4	〃	3.2	8.0	3.9	1.36	134
P 9-7	29.5	1.45×10^4	〃	3.0	7.5	3.6	1.95	135
P 9-8	30.5	9.01×10^3	〃	3.0	7.5	3.7	3.17	140
P 9-9	32.5	6.47×10^3	〃	3.3	8.3	3.8	2.70	138
P 9-10	31.5	7.75×10^3	〃	3.8	9.5	3.1	—	—

注 1) 試験片の余盛形状で、止端部破壊のものは破壊した部分の余盛形状の平均値、他は試験片全体の平均した形状を示す。

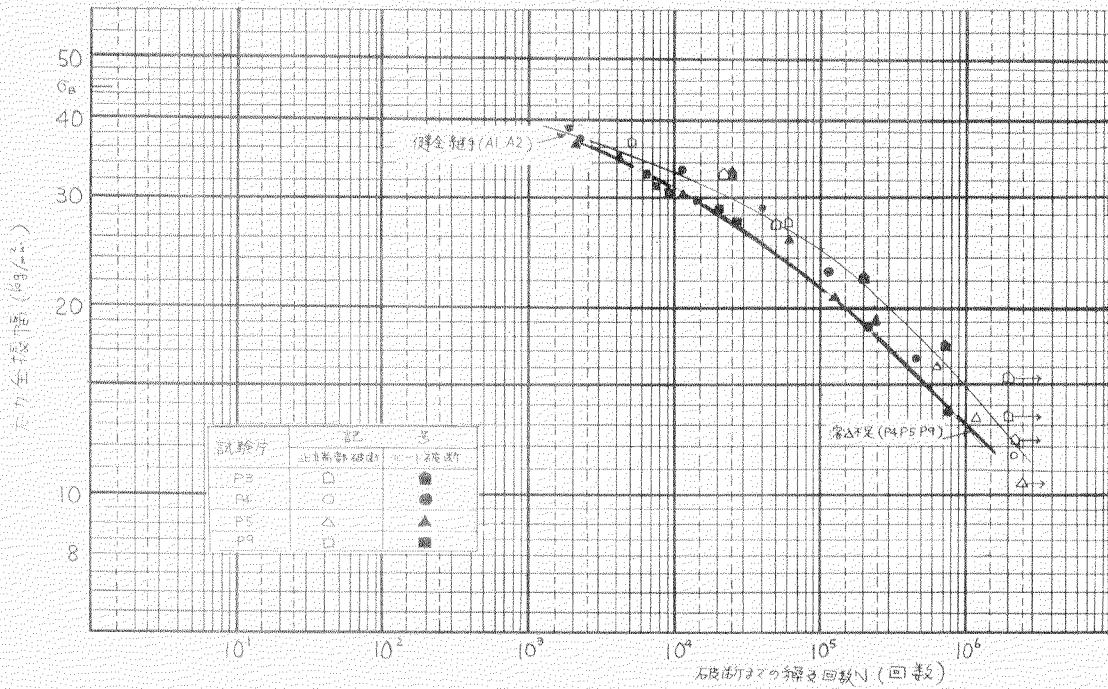


図 4.5.2-5 溶込み不足を含む継手の S-N 線図 (P3, P4, P5, P9)

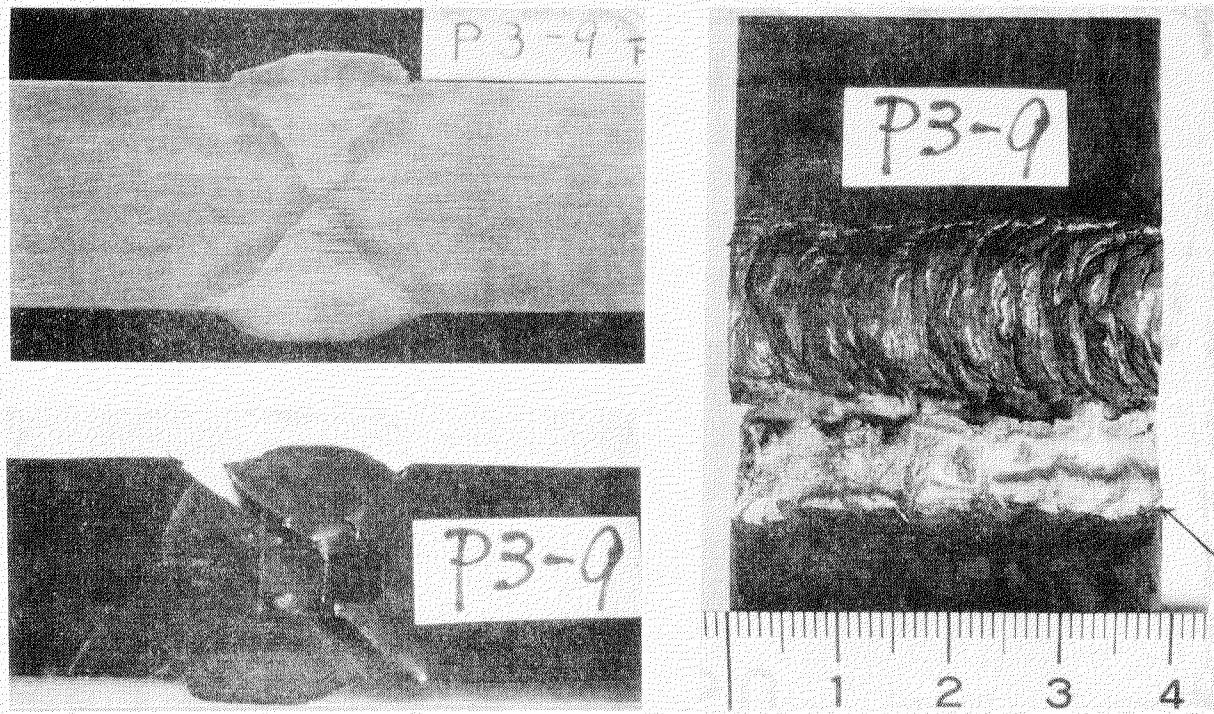


写真 4.5.2-2 溶込み不足を含む継手で余盛り止端から破壊した例 (無害な溶込み不足)

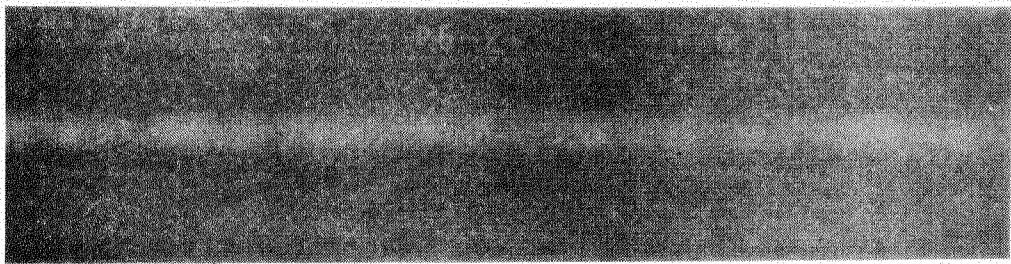
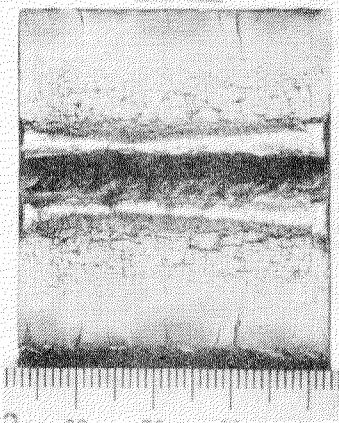
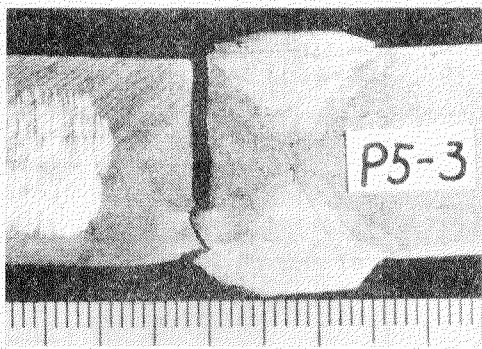
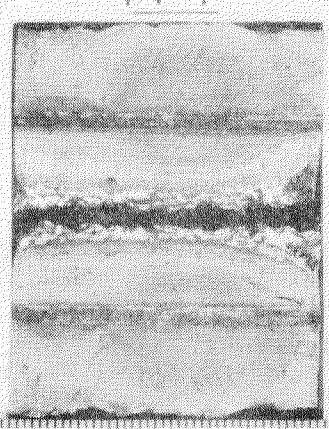
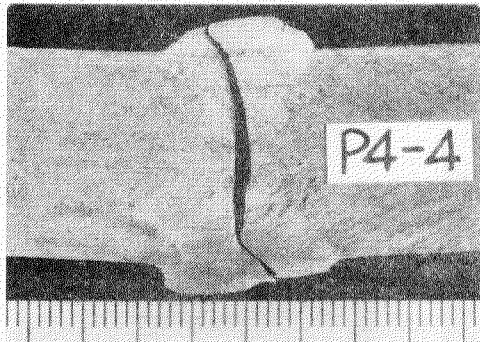
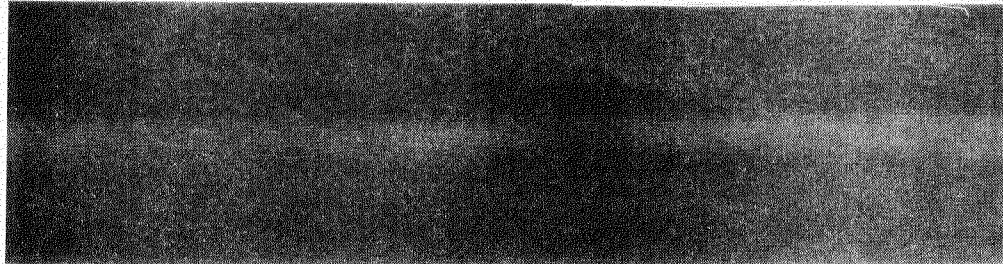


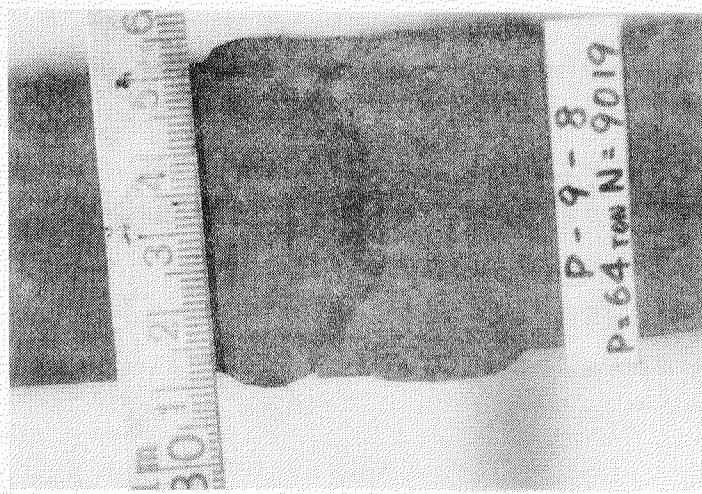
写真 4.5.2-3 溶込不足を含む継手で余盛止端から破壊した疲れ試験の破面とX線写真



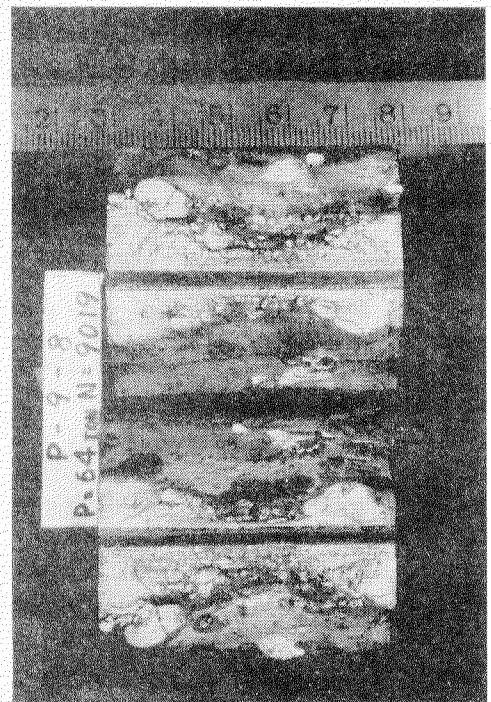
破面中央の黒い帯状の溶込不足 (2.2 mm)



77 写真 4.5.2-4 溶込不足を含む継手で溶込不足から破壊した疲れ試験の破面とX線写真



中央の溶込不足から発生した亀裂はヒート表面に達する。



破面中央の黒い線は3mmの溶込不足

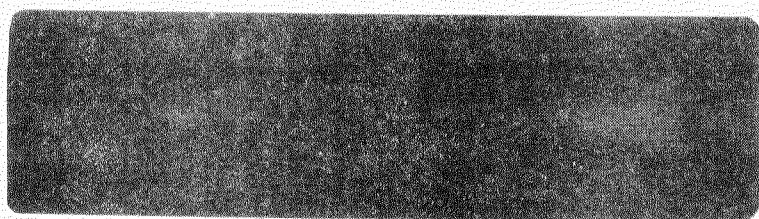


写真4.5.2-5 約3mmの溶込不足を含む4.0mm厚の継手でヒート中央に疲れ破壊を生じた例

4.5.3 溶着金属の強さの影響

(1) 予備試験 (P 6)

(a) 試験板および試験片

溶接継手の溶着金属の強度が母材強度より若干大きければ、強度の低い溶着金属の継手にくらべて大きな欠陥があっても余盛止端で破壊が起ることも考えられる。表 4.3.1-1 のように低水素系溶接棒を使用した場合溶着金属の引張強さは他の被覆の溶接棒のそれより 15% ぐらい大きいから、低水素溶接棒を使用して溶込み量を連続的に変えた試験片について疲れ試験を行ない、無害な溶込不足（溶込不足の深さが小さく、余盛止端破壊を起す限界の溶込不足深さのもの）が普通の溶接棒を使用した場合のそれとどの程度異なるかを調査した。

継手の溶込不足の状況は図 4.5.2-1 と同様で、溶接棒は L B 50 A を用い最終層以外は下向きで最終層は立て向き溶接を行なった。試験板は図 4.2.2-1、試験片は図 4.2.3-1 のものを P 6-1 から P 6-10 まで 10 本を作製した。

(b) 試験および試験結果

試験機は 50 t アムスラー型疲労試験機を用い、繰返速度 300 cpm 片振引張りで試験を行なった。試験の結果は表 4.5.3-1 および図 4.5.3-1 のとおりで、溶込不足の深さ 0 および 2 mm のものが止端部から破壊したほかはすべて溶込不足から破壊を生じていた。

(c) 考察

余盛止端から破壊する限度の溶込不足の深さは約 2 mm と考えられ、イルミナイト系溶接棒の許容溶込不足 0.8 ~ 1.5 mm よりも若干大きいと推定されるがデータは少ないので確認のための試験がさらに必要と考えられる。

(2) 無害溶込不足の確認 (P 7)

(a) 試験板および試験片

(1) の予備試験で見当がつけられた無害溶込不足 2 mm を確認するため、溶込不足が 1.5 ~ 2 mm の試験片を 10 本作製した。試験板は図 4.2.2-1、試験片は図 4.2.3-1 とおりとし継手形状は図 4.5.2-3(b) と同様である。溶接棒および溶接方法は、前項(1)(a) と同様である。

(b) 試験および試験結果

試験の方法は前(1)(b) と同様で、試験の結果は表 4.5.3-1 および図 4.5.3-2 のとおりで、試験片は 1 個をのぞきすべて溶込不足から破断した。

(c) 考察

- i) 実際の溶込不足が 1.5 ~ 2 mm と予備試験の溶込不足より小さ目であったにもかかわらず、溶込不足から破断し、余盛破断をしなかったのは予想外であった。
- ii) 健全継手の S-N 曲線と比較してみると P 7 は若干下廻っており、溶着金属の強度が大となつたため、許容しうる溶込不足を大きくすることは危険側にあることを示している。
- iii) 無害溶込不足の深さは溶着金属の強さに無関係に 1 mm 程度と考えられる。

表 4.5.3-1 低水素系溶接棒を用いた溶接試験片の疲れ試験結果

試験片番号	応力 (kg/mm ²)	破断までの繰返し数	破断位置	破面の溶込不足 (mm)	破面の欠陥 面積率(%)	試験片の余盛形状 ¹⁾		
						高さ h (mm)	止端半径 ρ (mm)	接線角 θ (度)
P 6 - 1	35.4	5.47×10^4	止端より溶接	0	0	2.7	1.51	154
P 6 - 2	25.1	3.97×10^4	ルート部	5.1	25.5	3.4	0.65	137
P 6 - 3	19.6	9.97×10^4	"	5.0	25.0	3.5	1.49	146
P 6 - 4	9.8	1.28×10^6	破断せず	(4.4)	22.0	4.1	1.83	143
P 6 - 5	15.0	4.54×10^5	ルート部	4.0	20.0	3.4	1.14	143
P 6 - 6	29.4	1.88×10^4	"	4.0	20.0	3.4	1.19	148
P 6 - 7	14.7	1.23×10^6	破断せず	(3.5)	17.5	3.5	0.69	145
P 6 - 8	17.3	3.50×10^5	ルート部	3.0	15	4.1	0.78	144
P 6 - 9	12.5	1.33×10^6	破断せず	(2.0)	10	4.3	1.19	140
P 6 - 10	16.3	4.36×10^5	止端部	2.3	11.5	4.0	0.63	143
P 7 - 1	35.1	2.90×10^3	母材	2.1	10.5	3.2	1.19	154
P 7 - 2	25.0	7.60×10^4	ルートから止端	1.9	9.5	3.1	1.48	149
P 7 - 3	20.0	2.00×10^5	ルート部	1.3	7.5	3.1	1.10	153
P 7 - 4	15.0	6.96×10^5	"	1.5	7.5	3.8	0.96	145
P 7 - 5	29.3	2.59×10^4	"	1.6	8.0	3.2	1.03	152
P 7 - 6	12.2	1.35×10^6	破断せず	(1.5)	7.5	3.5	1.91	146
P 7 - 7	17.1	3.69×10^5	ルート部	1.5	7.5	3.5	2.84	150
P 7 - 8	30.5	2.65×10^4	ルート部から止端	1.8	9.0	3.3	2.51	151
P 7 - 9	22.0	1.62×10^5	ルート部	1.5	7.5	3.5	1.39	148
P 7 - 10	27.5	5.69×10^4	"	1.7	8.5	3.2	0.94	144

注 1) 試験片の余盛形状において、止端部破壊のものは破壊した部分の余盛形状の平均値、他は試験片全体の平均値を示す。

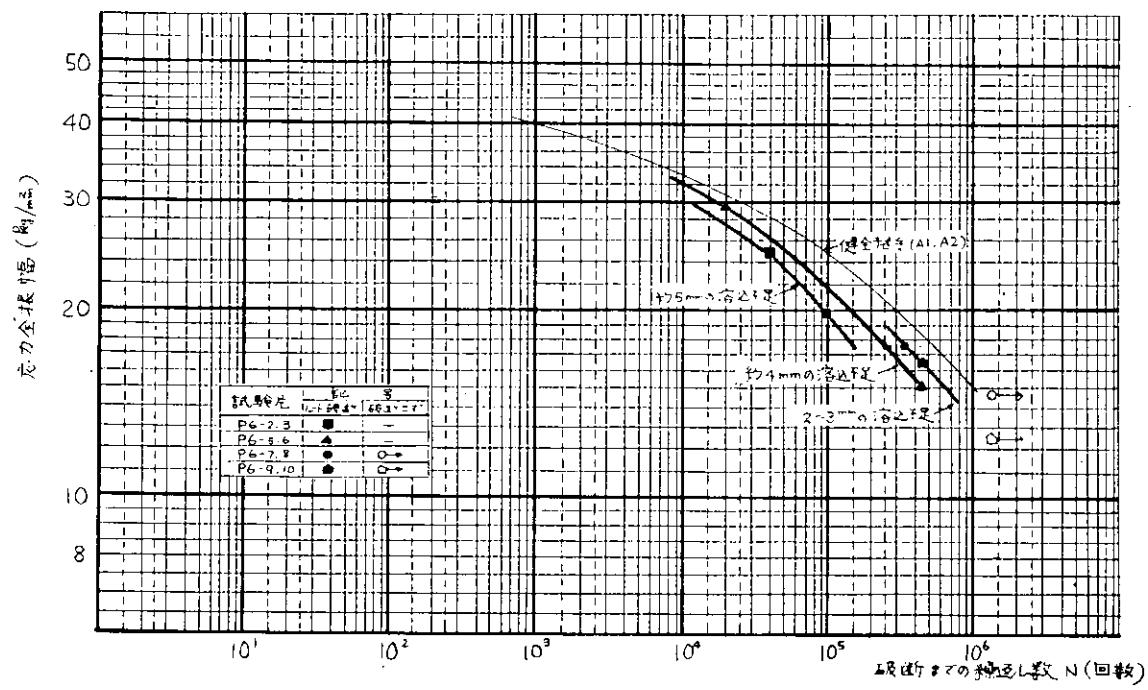


図 4.5.3-1 2~5 mmの浴込み不足を有する突合せ継手（低水素系溶接棒を使用）の疲れ強度（P 6）

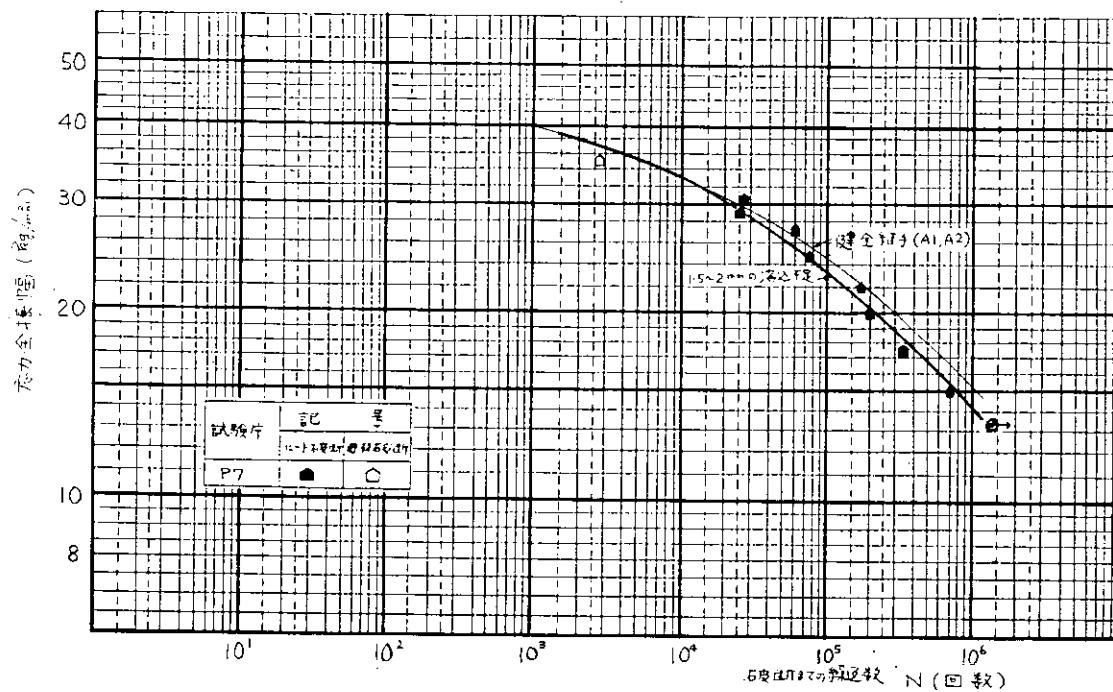
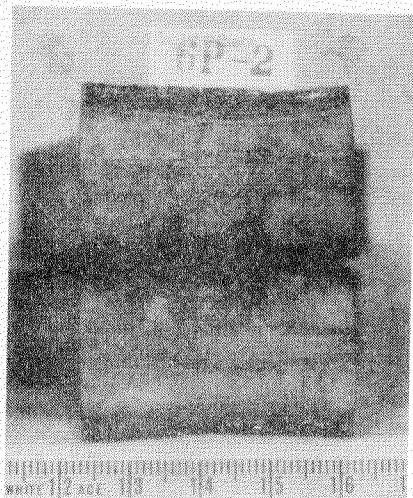
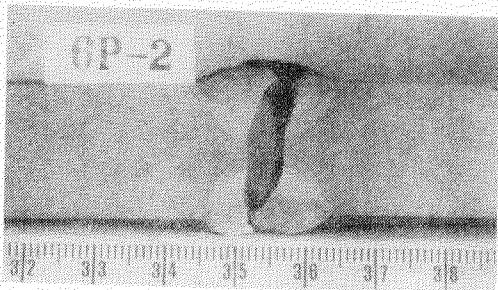
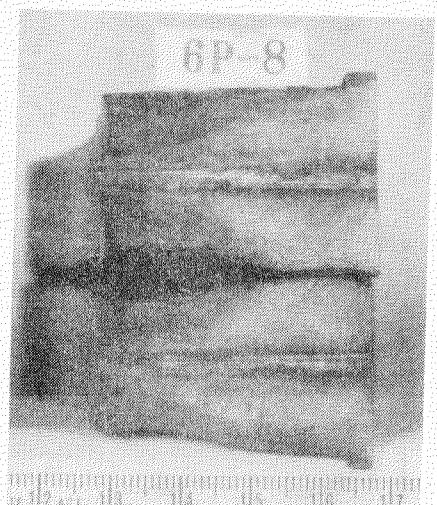
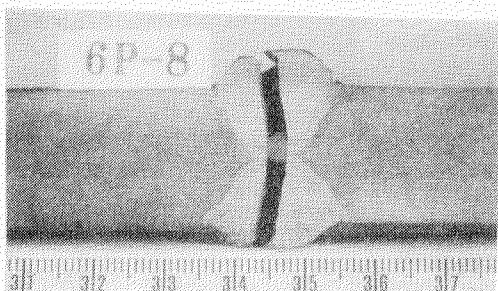


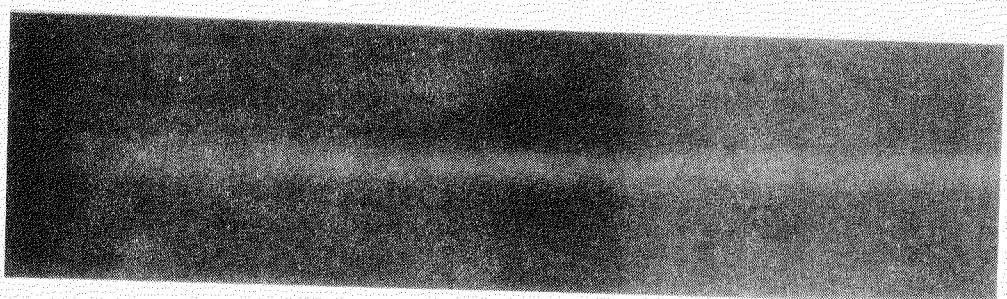
図 4.5.3-2 1.5~2 mmの浅い浴込み不足を有する突合せ継手（低水素系溶接棒を使用）のS-N線図（P 7）



a) 約 5 mm の溶込不足を有する突合せ継手の疲れ試験の破面 (P6-2 $\sigma = 25.1 \text{kg/mm}^2$ $N = 3.97 \times 10^4$)

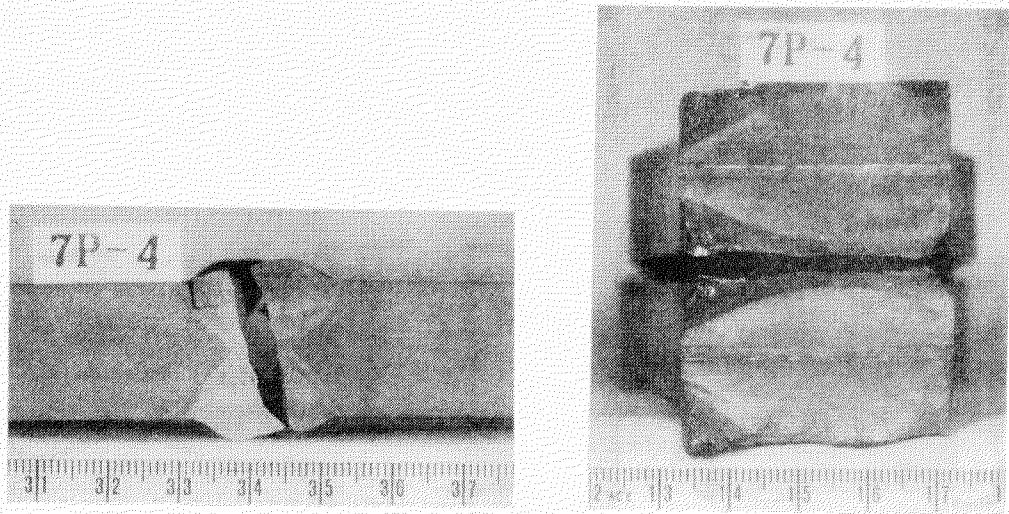


b) 約 2 mm の溶込不足を有する突合せ継手の疲れ試験の破面 (P6-8 $\sigma = 17.3 \text{kg/mm}^2$ $N = 3.50 \times 10^5$)

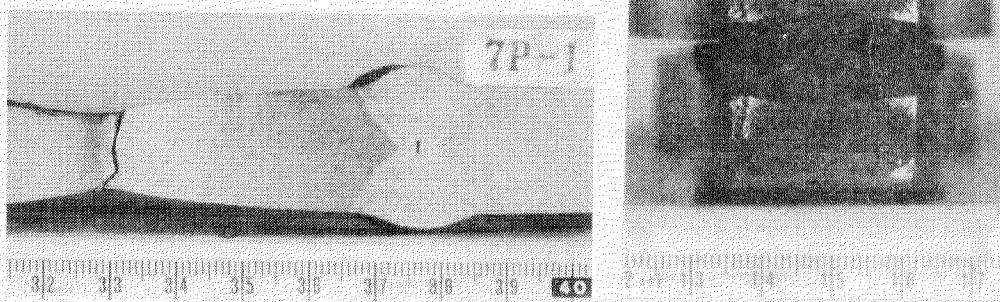


c) P6 試験板の突合せ継手のX線写真

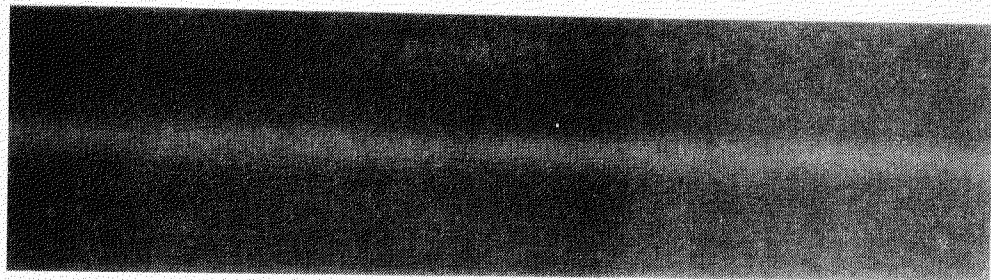
写真 4.5.3-1 溶込不足の深さを連続的に変えた突合せ継手 P6 (低水素接棒使用) の
疲れ試験破面と X 線写真



a) ルート部の溶込不足から破断した例 (止端部にもき裂が発生している) ($\sigma = 1.50 \text{ kg/mm}^2$ $N = 6.96 \times 10^5$)



b) 母材部から切断した例 ($\sigma = 3.51 \text{ kg/mm}^2$ $N = 290 \times 10^3$)



c) P 7 試験板の突合せ継手のX線写真

写真 4.5.3-2 ごく浅い溶込不足 (1.5 ~ 2 mm) を有する突合せ継手 P 7 (低水素系溶接棒使用) の
疲れ試験破面と X 線写真

4.5.4 曲げ引張りの複合荷重の影響

(1) 試験板および試験片

船底外板の継手のように曲げと引張の両方の荷重をうける継手は溶込不足があるとどのような影響を受けるかを調査するため、約3mmの溶込不足を含む継手を作製して疲れ試験を行なうことになった。試験板の形状寸法は図4.2.2-2、試験片の寸法は図4.2.3-2、溶込不足は板厚中央に作製した。

(2) 試験及び試験結果

試験機は100tのサーボパルサに5tの横曲げ用サーボパルサーを取り付けた試験機（写真4.5.4-1参照）を使用し、同期させた正弦波荷重を試験片に60～180cpmで加えた。軸応力成分 σ_m と曲げ応力成分 σ_b の比は2対1になるように軸荷重と曲げ荷重の値を制限した。

試験の結果は表4.5.4-1、S-N線図は図4.5.4-1、破面の写真等を写真4.5.4-2に示す。

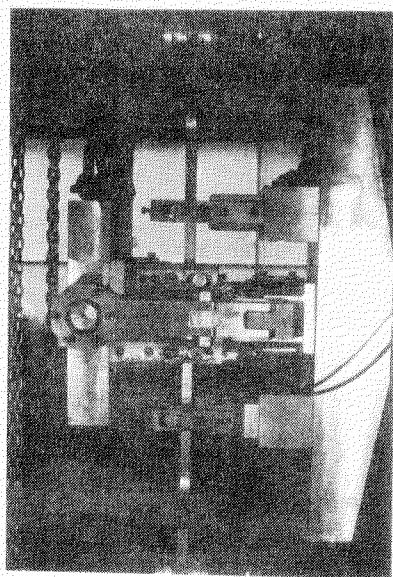


写真4.5.4-1 曲げと引張りの複合荷重を加える疲れ試験機

表4.5.4-1 曲げと引張りの複合荷重をうける溶込不足を含む継手の疲れ試験結果

試験片番号	引張応力全振幅 (kg/mm^2)	曲げ応力全振幅 (kg/mm^2)	破断までの繰返し回数N	破断位置 ¹⁾	破面の溶込不足	試験片の余盛形状 ²⁾			
						高さh (mm)	止端半径 ρ (mm)	接線角θ (°)	
P8-1	15.7	7.6	3.05×10^5	ルート部 (止端部)	2.5	2.5	1.0	157	
P8-2	19.9	9.7	7.9×10^4	ルート部 (止端部)	2.5	2.5	0.8	152	
P8-3	12.8	6.4	2.5×10^5 で異常荷重のため中止				2.9	0.6	148
P8-4	13.0	6.7	5.53×10^5	止端部 (ルート部)	2.6	2.4	1.2	152	
P8-5	10.9	5.4	2.00×10^6	ルート部 (止端部)	2.5	2.5	0.8	153	
P8-6	22.6	10.1	5.59×10^4	ルート部 (止端部)	2.5	2.9	1.0	150	
P8-7	16.6	7.9	1.91×10^5	ルート部 (止端部)	2.5	2.3	0.6	149	

注 1) ()内は主なき裂より小さいが疲れき裂を発生した箇所

2) ρ , θ は止端部でき裂発生のものはその箇所におけるもの、その他は平均値を示す。

(3) 考察

- 曲げによる応力と軸応力を加えた表面応力で考えると図4.5.4-1の実線のとおり疲れ強度は健全継手の強度を上回り、溶込不足の影響はないと考えてよい。すなわち表面応力を考慮して設計されておれば溶接欠陥の影響は顕著ではなく軸応力の加わる溶接継手より大きい欠陥まで許容できる。
- 曲げも加わるにもかかわらず曲げ応力を無視して軸応力のみで欠陥の影響を考えると図4.5.4-1の破線のとおり危険側となる。
- 本実験の溶込不足先端の半径は $0.2 \times 10^{-3} \sim 0.01 \text{ mm}$ 程度であるが、繰返し荷重下においてかなり早く内部

欠陥からき裂が発生し、これが応力の大きい側へ伝播するものと考えられ、き裂先端部の応力拡大係数K値を考えて伝播寿命を推定することが可能である。

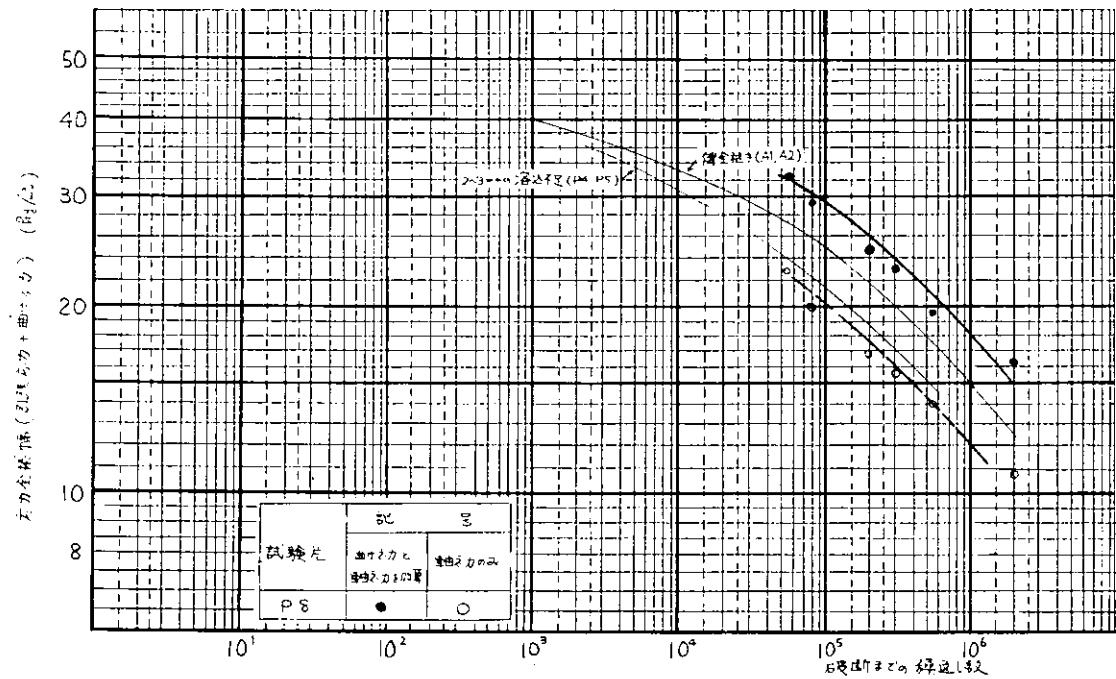


図 4.5.4-1 曲げと引張の複合荷重をうける溶込み不足を含む継手の S-N線図

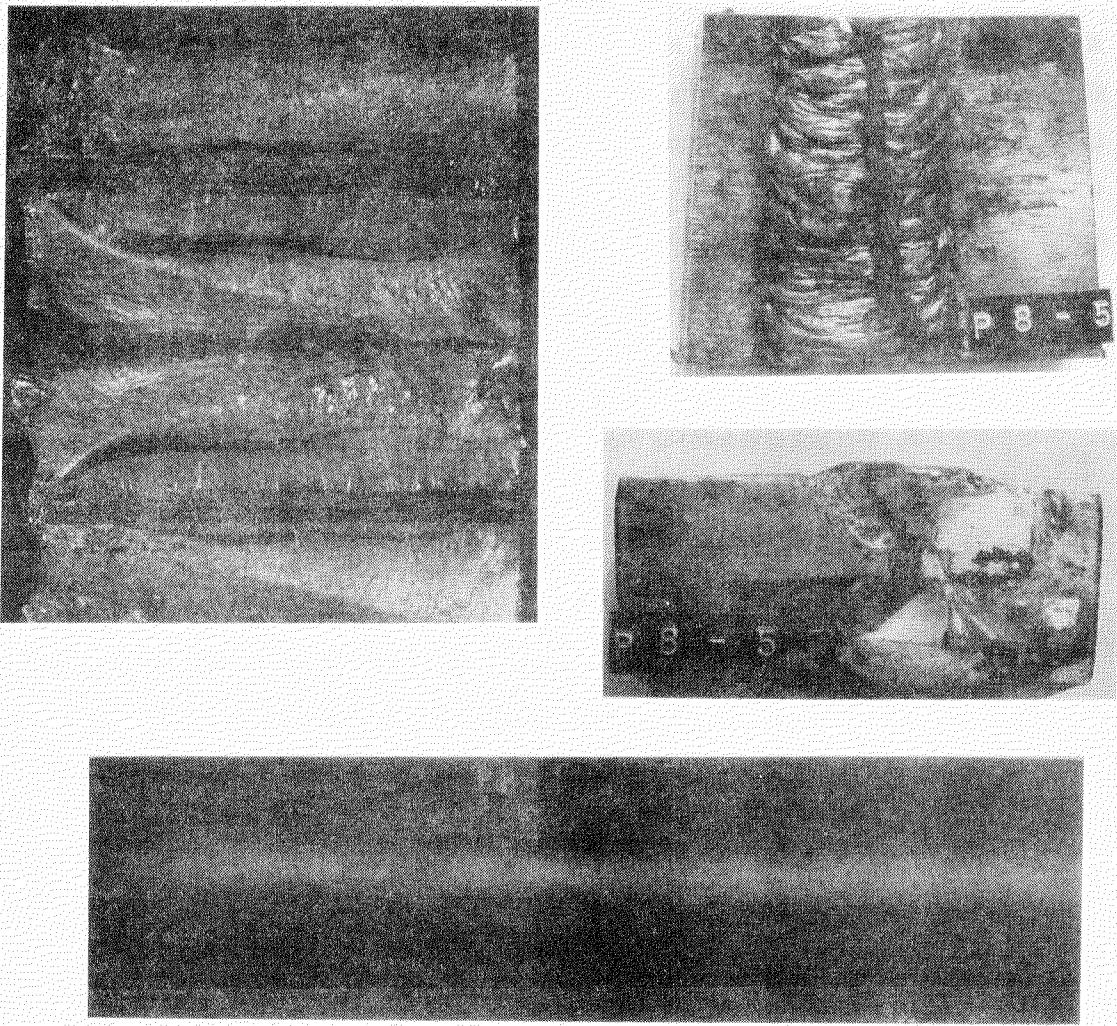


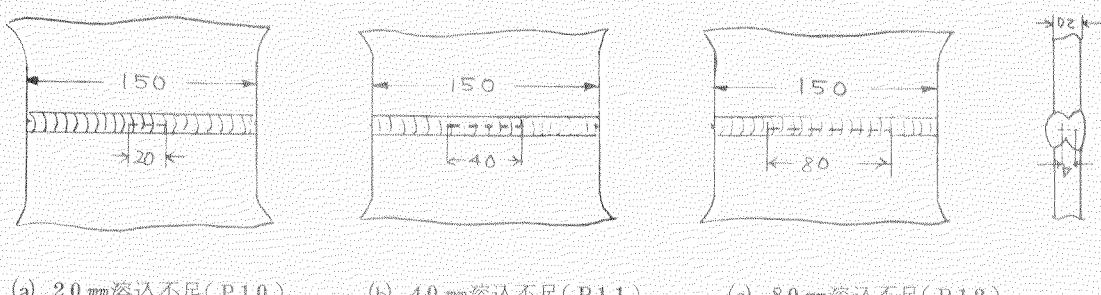
写真 4.5.4-2 曲げと引張りを受ける溶込不足を含む継手の疲れ試験片の破面と継手のX線写真

4.5.5 溶込不足の長さの影響 (P 10, P 11, P 12)

(1) 試験板および試験片

溶接継手の長さ方向に部分的に存在する溶込不足の長さの影響を調べるため、溶込不足の長さをそれぞれ 20, 40, 80 mm と変えた試験片について試験を行なった。溶込不足の深さはすべて 3~4 mm とした。試験板の形状寸法は図 4.2.2-4, 試験片の寸法は図 4.2.3-4 のとおりである。

試験片の溶込不足は図 4.5.5-1 の位置に各内蔵されている。



(a) 20 mm溶込不足(P 10) (b) 40 mm溶込不足(P 11) (c) 80 mm溶込不足(P 12)

図 4.5.5-1 広巾試験片の溶込不足の位置

試験片は各シリーズとも 5 本作製した。

(2) 試験および試験結果

試験は 200 t パルセータおよび 100 t のローゼンハウゼン型疲労試験機を使用し、500 cpm で片振引張荷重を加えて行った。試験の結果は表 4.5.5-1 のとおりで、P10 シリーズの 3 本の試験片を除きすべて内部欠陥の溶込不足からき裂が進行し破断した。P10-2, -4 及び -5 は余盛止端部および溶込不足の両方からき裂が進行している。疲れ試験の S-N 線図は試験片の数が少ないのでバラツキが大きいが図 4.5.5-2 に、疲れ試験片の破面等を写真 4.5.5-1 に示す。

(3) 考 察

- i) 溶込不足の長さが長くなるにしたがって急速に疲れ強度が低下しており、長い溶込不足は早期にき裂の発生のおそれがある。
- ii) 板厚と同じ程度の長さの溶込不足は余盛止端における応力集中と溶込不足の先端的同时にき裂の発生がみられる場合があるが、疲れ強度は健全継手よりかなり低い。その理由は、部分的にある溶込不足はその長さ方向の両端には三次元的な応力集中を生じ、き裂の板厚貫通が比較的早い時期に起るためではないかと考えられる。
- iii) 溶込不足からの疲れき裂の伝播は、欠陥を包絡するような梢円状で拡大するものは少なく、溶込不足を内在梢円欠陥として応力拡大係数で整理しても、同一バンド内にはまとまらなかった。

表 4.5.5-1 溶込不足の長さの異なる溶接継手の疲れ試験結果 (P 1 0, P 1 1, P 1 2)

		応力全振幅 (kg/mm ²)	破断までの繰返し数 N	破断位置	※1 溶込不足の長さと幅 (mm)	※2 破面の面積 欠陥率 (%)	試験片の余盛形状※3		
							高さ h (mm)	止端部半径 ρ (mm)	接触角 θ (度)
P 1 0	1	16.0	1.27×10^5	内部欠陥と余盛止端	4×29	4.3	3.7	0.8	121
	2	23.9	4.49×10^4	内部欠陥と余盛止端	4×30	4.0	2.8	1.5	133
	3	28.5	1.36×10^4	内部欠陥	4×34	4.5	3.0	3.0	125
	4	19.0	3.53×10^5	内部欠陥と余盛止端	3.5×33	3.9	3.3	2.5	135
	5	14.0	5.29×10^5	"	4×31	4.1	2.9	1.6	120
P 1 1	1	14.0	3.40×10^5	内部欠陥 (人工欠陥とスラグ捲込み)	4×41	5.5	3.2	1.7	136
	2	24.0	1.94×10^4	内部欠陥	4×42	5.6	3.4	2.3	140
	3	29.0	5.98×10^3	"	4×43	5.7	3.5	0.8	125
	4	19.0	1.03×10^5	"	4×42	5.6	2.9	0.6	130
	5	9.0	1.92×10^6	"	3.5×40	4.7	3.3	1.7	144
P 1 2	1	16.2	1.07×10^5	内部欠陥	4×81	10.8	3.0	3.5	110
	2	24.0	1.03×10^4	"	4×80	10.7	3.4	1.9	136
	3	19.0	2.96×10^4	"	4×81	10.8	2.4	3.2	115
	4	14.0	4.84×10^5	"	4×82	10.9	2.2	1.8	128
	5	7.0	3.59×10^6	未破断	--		2.6	0.9	117

※1. 欠陥寸法は長さも幅も正確な矩形でないため各平均寸法をとった。

※2. 欠陥率は母材の公称断面積 ($20 \times 150 \text{ mm}$) で欠陥断面積を除した値を示す。

※3. 余盛高さは表、裏ビードの平均値を示す。

止端半径 (ρ)、接触角 (θ) は、疲労き裂の発生しているものについては、その発生位置、その他のものは 4ヶ所の平均をとった。

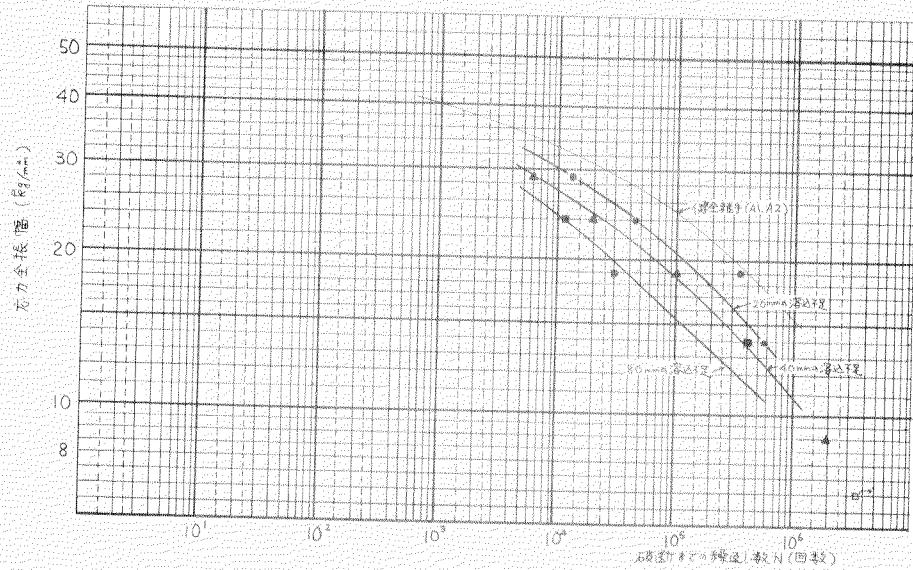
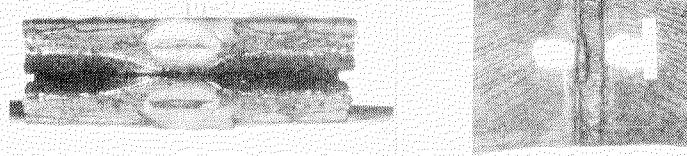
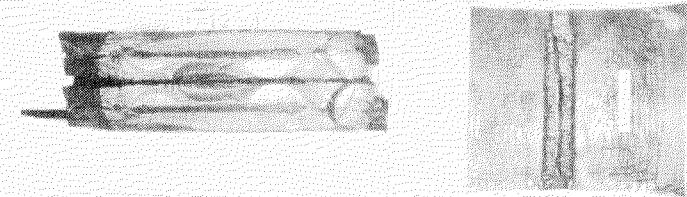


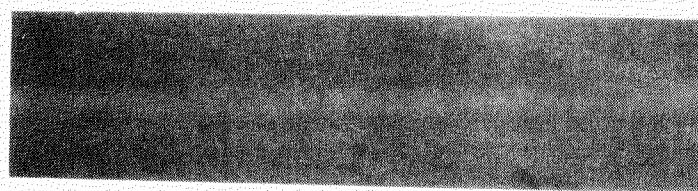
図 4.5.5-2 近接する溶込み不足、部分的に深い溶込み不足の疲れ試験結果



a) 余盛止端と溶込み不足の両方から疲れき裂を発生した例



b) 内部の溶込み不足から疲れき裂を発生した例



c) P 10 試験板の溶接継手のX線写真

写真 4.5.5-1 長さの異なる溶込み不足を含む溶接継手のX線写真と疲れ試験破面

4.5.6 近接する溶込み不足、部分的に深い溶込み不足の影響 (P13, P14, P15)

(1) 試験板および試験片

溶接継手の長さ方向に二つに分かれて

近接して存在する部分的欠陥 (P13),

ごく短いが深い欠陥 (P14), 深い部分

欠陥 (P15) の疲れ強度に及ぼす影響を

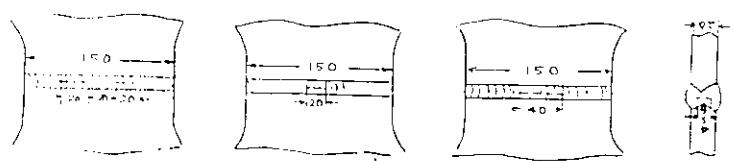
調査するため試験を行なった。試験板の

形状寸法は図 4.2.2-4, 試験片の寸法

は図 4.2.3-4 のとおりであるが、溶込

不足の位置等は図 4.5.6-1 のとおりで

ある。



(a) 20 mmの間隔で
近接する溶込み不
足 (P13)

(b) 6 mmの深く短い
溶込み不足 (P14)

(c) 5～6 mmの
深い部分的な
溶込み不足 (P15)

図 4.5.6-1 広幅試験片の部分的な溶込み不足の位置

(2) 試験および試験結果

試験は 150 t 電気油圧疲労試験機を用い 120 ~ 480 cmm の片振り張荷重を加えて行い、試験中 10 倍の実体顕微鏡によって欠陥からのき裂が板面を貫通するときの繰返し数を調べた。

試験の結果を表 4.5.6-1 に示す。いずれも板厚中央の欠陥部から破断している (写真 4.5.6-1 参照)。S-N 線図は図 4.5.6-2 に示すとおり P13, P14 および P15 はほぼ同一直線上にあり、疲れ強度に大きな差異は認められなかった。

(3) 考察

- i) 試験片は破断する前に欠陥から発生したき裂がビード表面へ貫通するが、このき裂貫通までの繰返し数と破断までの繰返し数の比は高応力側で 1 : 3 の程度であるが、低応力側ではほとんど 1 に近づき、疲れき裂がビード表面に現われたと同時に破断する。
- ii) 欠陥を横円欠陥とみなし、応力拡大係数の範囲 K_R で整理した結果を図 4.5.6-3 に示す。 K_R で整理しても 3 つの試験は 1 本の直線であらわすことができ、3 者に大きな差異がなかったことが分かる。

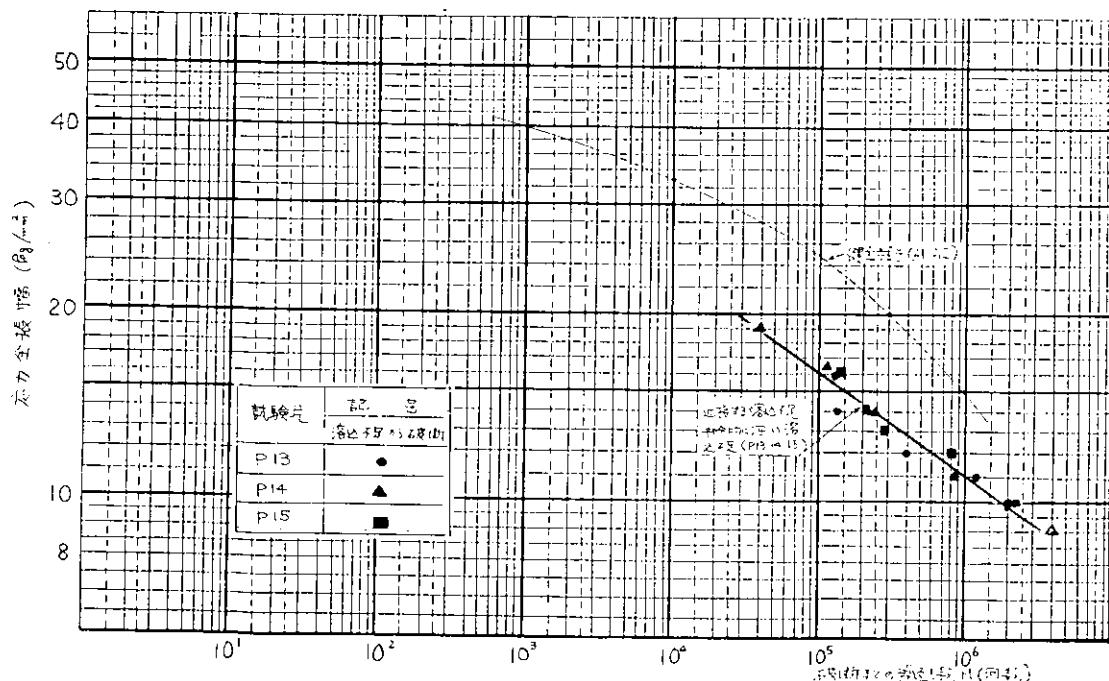


図 4.5.6-2 近接する溶込み不足、部分的に深い溶込み不足の疲れ試験結果

表 4.5.6-1 近接する溶込不足、部分的に深い溶込不足を含む継手の疲れ試験結果

試験片番号	応力全振幅 (kg/mm ²)	破断までの繰返し数 N	破断位置	破面の欠陥寸法 (mm)	破面の面積欠陥率(%)
P 13-1	12.0	4.17×10^5	内部欠陥	4.4 × 21.3 4.2 × 22.0	6.2
P 13-2	10.0	2.03×10^6	内部欠陥 上端部	4.2 × — — × —	—
P 13-3	14.0	2.29×10^5	〃	4.7 × 21.0 5.0 × 24.0	7.8
P 13-4	16.0	2.23×10^5	〃	4.5 × 21.0 4.7 × 22.0	6.5
P 13-5	11.0	1.15×10^6	〃	4.0 × 21.0 4.5 × 22.0	6.1
P 14-1	19.0	4.26×10^4	〃	6.4 × 25.0	5.3
P 14-2	9.0	3.99×10^6	破断せず	—	—
P 14-3	14.0	2.78×10^5	内部欠陥	5.9 × 25.0	4.9
P 14-4	11.0	8.43×10^5	〃	6.0 × 23.0	4.6
P 14-5	16.0	1.22×10^5	〃	6.0 × 23.0	4.6
P 15-1	14.0	2.16×10^5	〃	4.8 × 40.0	6.4
P 15-2	16.0	1.33×10^5	〃	5.7 × 44.0	8.3
P 15-3	12.0	8.24×10^5	〃	5.0 × 42.0	7.0
P 15-4	10.0	2.10×10^6	〃	4.5 × 40.0	6.0
P 15-5	13.0	2.96×10^5	〃	5.2 × 40.0	6.9

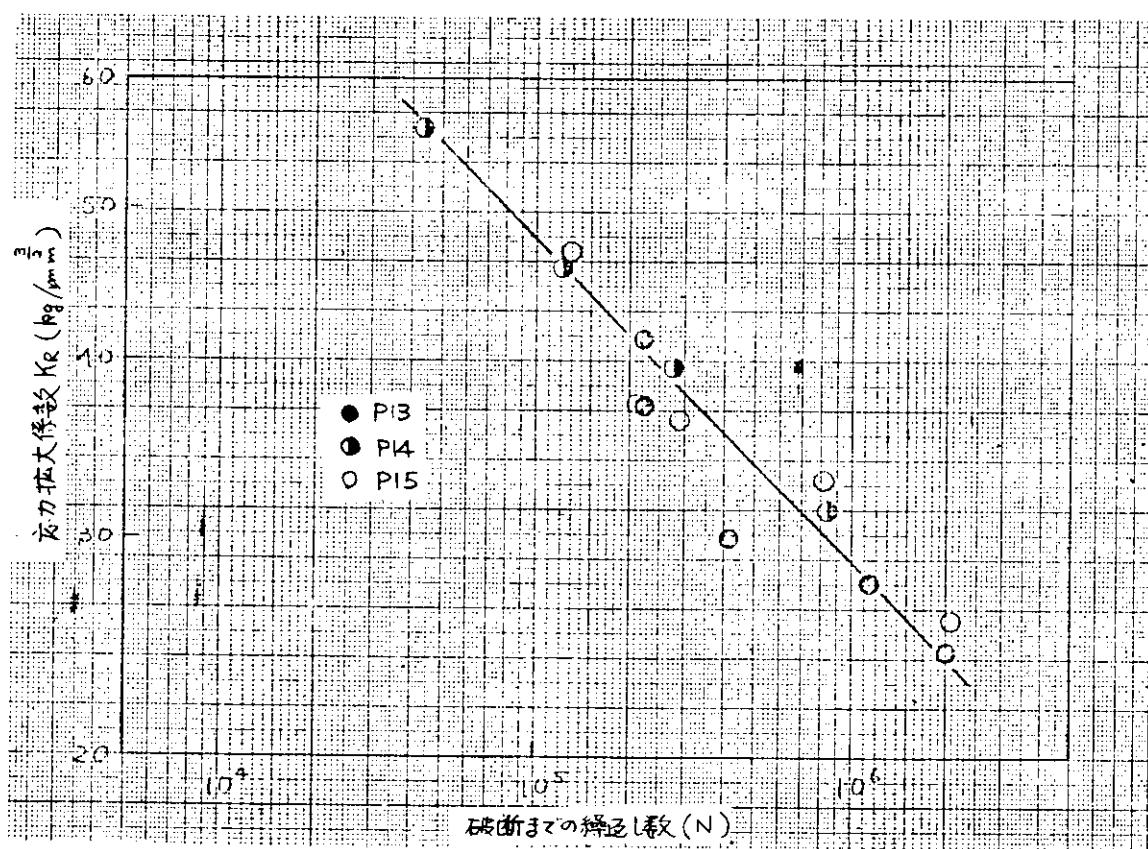
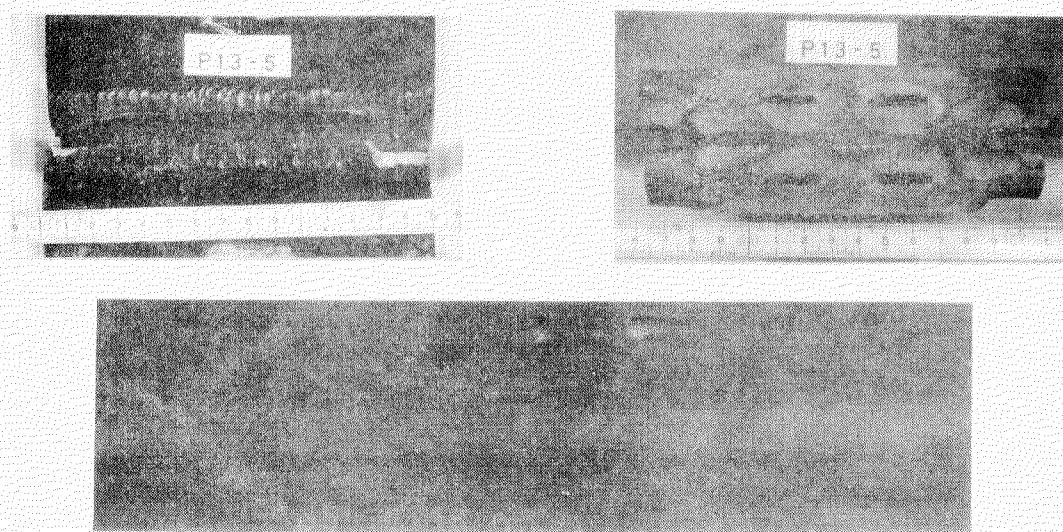
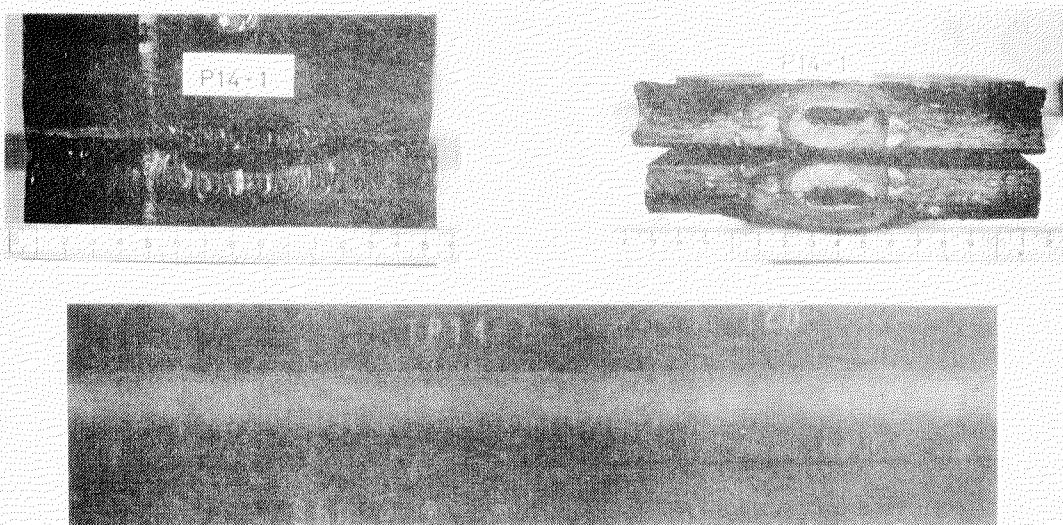


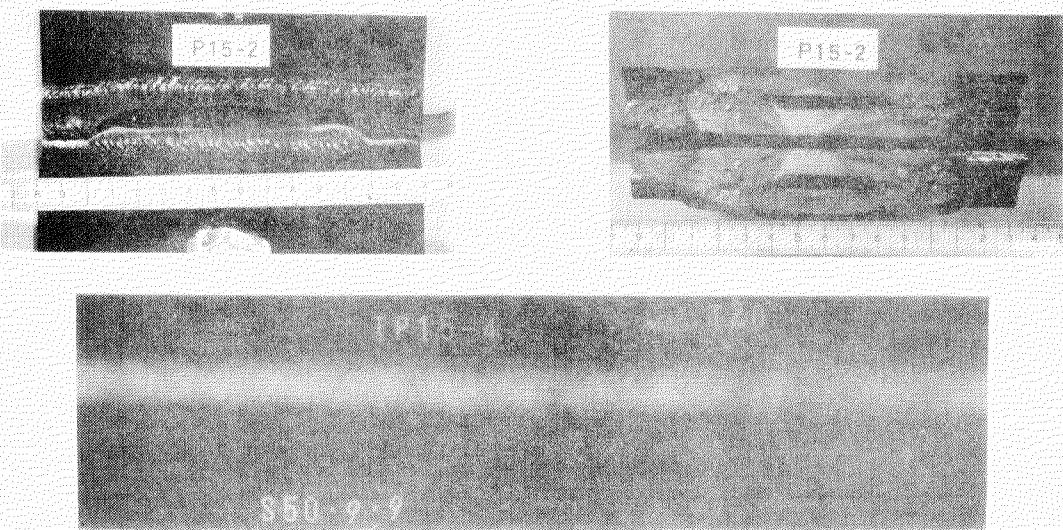
図 4.5.6-3 疲れ試験結果の応力拡大係数による整理



(a) 近接する部分溶込み不足の試験片の疲れ試験破面とX線写真(P13)



(b) 深くて短かい溶込み不足の試験片の疲れ試験破面とX線写真(P14)



(c) 深くて長い部分溶込み不足の試験片の疲れ試験破面とX線写真(P15)

写真4.5.6-1 近接する溶込み不足、部分的に深い溶込み不足の影響に関する疲れ試験片

4.6 プローホール、スラグ巻込みを含む溶接継手の疲れ強度

4.6.1 プローホールだけを含む溶接継手の疲れ強度

(1) 試験板と試験片

余盛付き突合せ継手においては、プローホールは無害欠陥と考えられるが、2層にわたってプローホールを含む継手の疲れ試験を行なった。図4.6.1-1にプローホールを含む継手の断面形状を示す。試験板および試験片の形状寸法は図4.2.2-1および図4.2.3-1のとおりで、プローホールの作製は4.3.3に従って行なった。プローホールは写真4.6.1-1のとおり継手全長にわたって分布しており、X線検査の結果JISZ3041では2種4級の欠陥と考えられる。

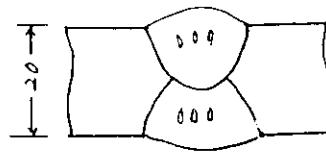


図4.6.1-1 プローホールを含む継手の断面形状

(2) 試験および試験結果

試験機は士60t電気油圧サーボ型疲れ試験機を使用し、荷重制禦、繰返し速度500cpm片振り張荷重で試験を行なった。試験の結果等を表4.6.1-1および図4.6.1-2に示す。試験片の破面等を写真4.6.1-1に示す。

試験片の破断位置は高応力側では内部欠陥であるプローホールから発生し、低応力側では溶接余盛止端部であった。

(3) 考察

- i) プローホールは疲れ強度に影響を与えないから、破壊はすべて余盛り止端部から発生するものと考えられているが、試験の結果高応力側ではプローホールから発生していた。破面をみると面積欠陥率が3、4.2および6%となっており、3%のプローホールの場合は止端部にも疲れき裂が発生している点から考えて3%がプローホールから破壊する限界値であるかも知れないが、バラツキの範囲を考慮すれば5%程度かも知れない。
- ii) 図4.6.1-2から分かるとおり、疲れ強度は破断位置にかかわらず余盛り付き健全継手を上回っており、この程度のプローホールは疲れ強度に影響を与えないと考えてよい。

表4.6.1-1 プローホールを含む突合せ溶接継手の疲れ試験結果(B-1)

試験片番号	応力全振幅 σ (kg/mm^2)	破断までの繰返し数N	破断位置	破面の欠陥	破面の面積 欠陥率(%)	試験片の余盛形状 ¹⁾		
						高さh (mm)	止端半径 r (mm)	接線角 θ (度)
B1-2	32.6	2.30×10^4	プローホール	プローホール	4.2	2.4	0.5	134
B1-7	28.6	8.10×10^4	プローホール	プローホール	6.0	2.1	0.9	127
B1-3	25.1	1.61×10^5	プローホール	プローホール	3.0	3.5	0.1	130
B1-9	22.4	2.24×10^5	止端部	—	—	2.6	0.4	125
B1-1	20.1	3.16×10^5	止端部	—	—	4.2	0.4	117
B1-8	18.0	4.96×10^5	プローホール	プローホール	—	3.6	0.3	136
B1-4	15.9	8.98×10^5	止端部	—	—	3.3	0.4	110
B1-6	13.6	1.36×10^6	止端部	—	—	2.9	0.7	128
B1-5	12.4	2.00×10^6	破断せず	—	—	3.1	—	—

注 1) 試験片の余盛形状は破断したもののみ記載、止端部破壊のものは破壊発生点における形状、他は平均の形状

表 4.6.2-1 プローホールと 1 ~ 2 mm の浅い溶込不足を含む溶接継手の疲れ試験結果 (PB-2)

試験片番号	応力全振幅 σ (kg/mm^2)	破断までの繰返し数 N	破断位置	溶込不足の深さ (mm)	破面の面積 欠陥率 (%)	試験片の余盛形状 ¹⁾		
						高さ h (mm)	止端半径 ρ (mm)	接線角 θ (度)
PB2-6	27.7	1.66×10^5	欠陥部	—	6	1.6	0.3	144
PB2-2	24.1	1.43×10^5	欠陥部	—	5	2.8	0.1	130
PB2-9	22.5	2.57×10^5	欠陥部	—	5	2.3	0.3	154
PB2-7	22.0	2.84×10^5	欠陥部	—	8	1.5	0.8	144
PB2-1	19.1	4.35×10^5	止端部	—	—	2.3	0.1	123
PB2-8	16.3	6.46×10^5	欠陥部	—	7	2.0	0.7	140
PB2-3	15.2	7.33×10^5	欠陥部	—	5	2.0	0.5	132
PB2-4	13.9	2.00×10^6	止端部	—	—	1.6	0.8	162
PB2-5	12.6	2.16×10^6	破断せず	—	—	1.5	—	—

注 1) 余盛形状は破断した試験片についてのみ記載、止端部破壊のものは破壊発生点における形状、他は平均の形状

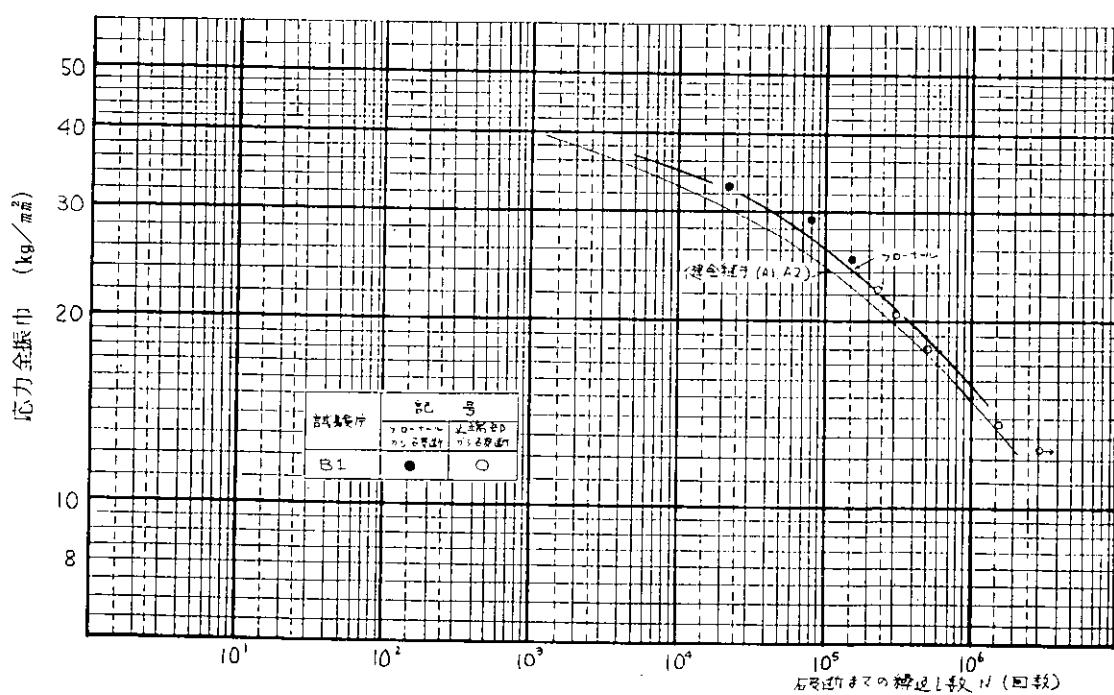
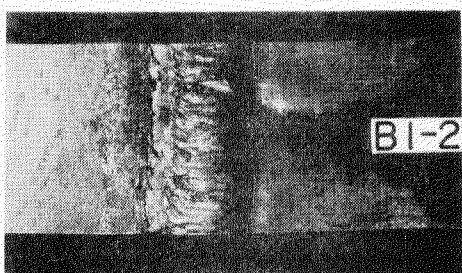
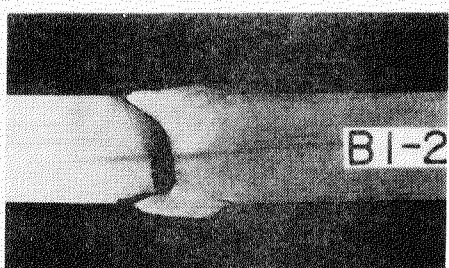
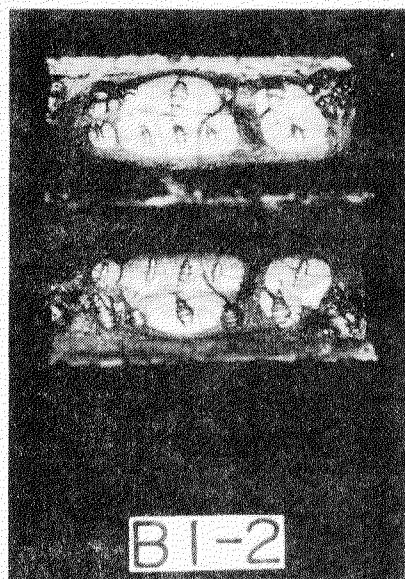
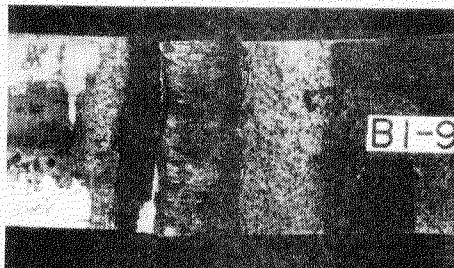
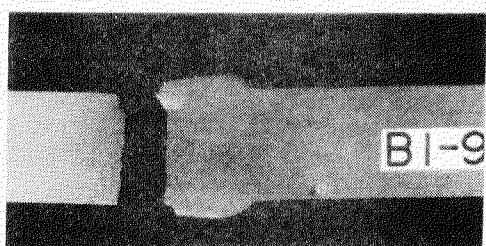
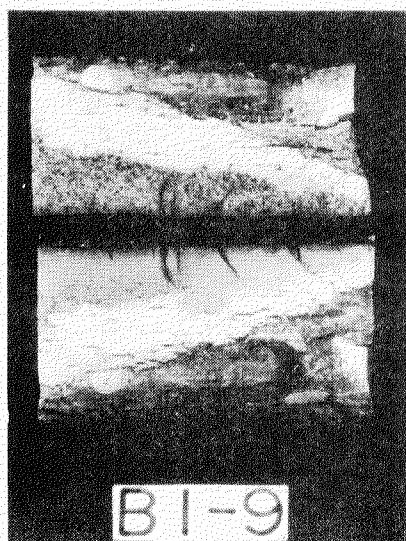


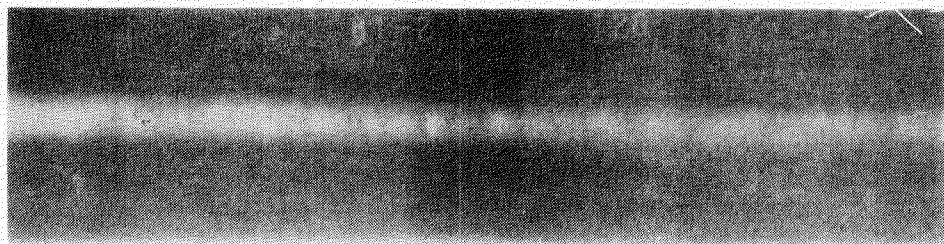
図 4.6.1-2 プローホールを含む突合せ溶接継手の疲れ試験結果



プロホールから破壊した疲れ試験の破面 ($\sigma = 3.2.6 \text{ Kg/mm}^2$, $N = 2.3.0 \times 10^4$)



プロホールを含む溶接継手でピード余盛止端部から破壊した疲れ試験の破面 ($\sigma = 22.4 \text{ Kg/mm}^2$, $N = 2.24 \times 10^5$)



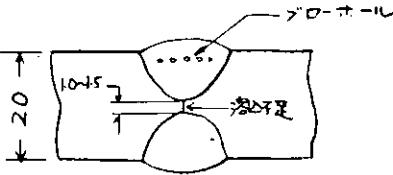
B1 試験板の溶接継手のX線写真

写真4.6.1-1 プロホールを含む溶接継手の疲れ試験破面とX線写真 (B1)

4.6.2 プローホールと浅い溶込み不足を含む溶接継手の疲れ強度 (PB2)

(1) 試験板と試験片

余盛付き突合せ継手においていずれも無害欠陥と考えられるプローホールとごく浅い溶込み不足がともにある場合の疲れ強度がどのように影響されるかについて調査するため、図4.6.2-1に示す継手を有する試験片について試験を行なった。



試験板および試験片の形状は、図4.2.2-1および図4.2.3-1のとおりで、プローホールはJISZ3401で2種4級に属する欠陥のものを4.3.3に従って作製し、溶込み不足は4.3.2に従って深さ1~1.5mmのものが継手全長にわたってあるように作製した。

図4.6.2-1 プローホールと浅い溶込み不足を含む継手

(2) 試験および試験結果

試験機は±60t電気油圧サーボ型疲れ試験機を使用し、荷重制観、繰返し速度500cpm、片振引張荷重で試験を行なった。試験の結果を表4.6.2-1および図4.6.2-2に示す。試験片の止端部の形状と面積欠陥率を表4.6.2-2に示す。

試験片の破壊発生点はほとんどが溶接部の内部欠陥である溶込み不足から生じ、プローホールからき裂を生じたものはなかった。

(3) 考察

- プローホールも浅い溶込み不足もいずれも単独では余盛付き突合せ継手の疲れ強度を低下させるものではなく、余盛り止端部から破壊が発生するものと考えられていたが、実際には大部分が溶込み不足から破断していた。溶込み不足から破断した試験片は溶込み不足の深さが1.3mm以上ものに限られており、それ以下の場合は止端部から破断したものと考えられる。このことは4.5.2(2)においても認められている。
- プローホールから破壊が発生した例はないが、同じ程度の面積欠陥率のプローホールと溶込み不足が共存する場合、溶込み不足の方が疲れ強度に及ぼす影響は大きいことは当然である。

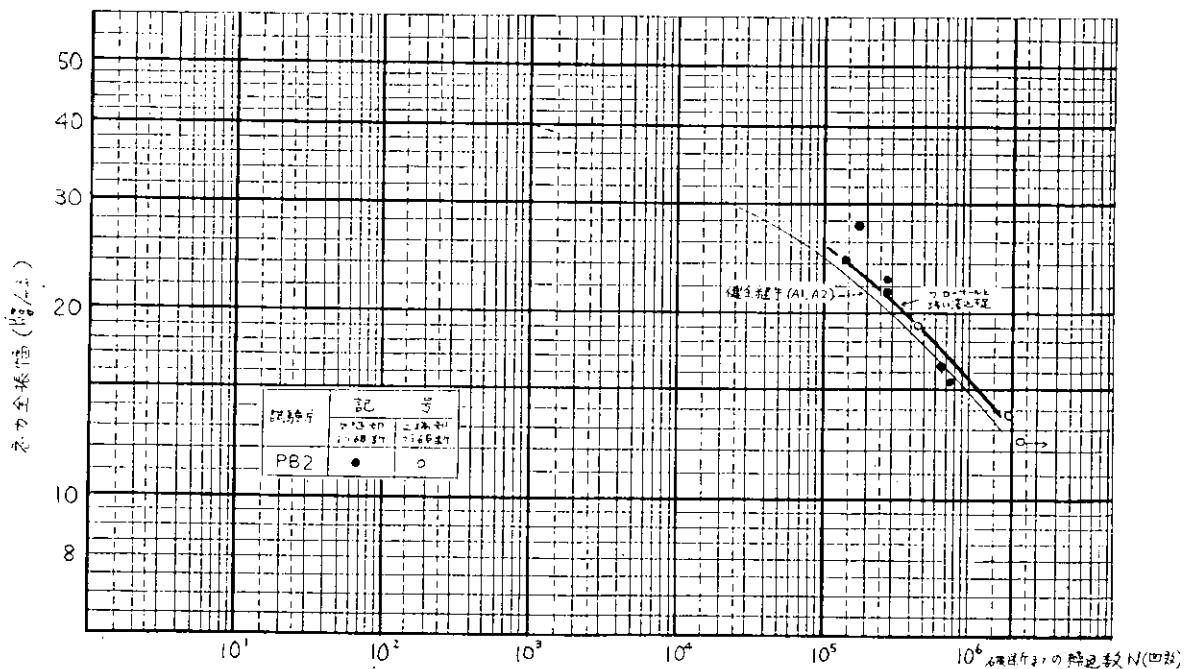
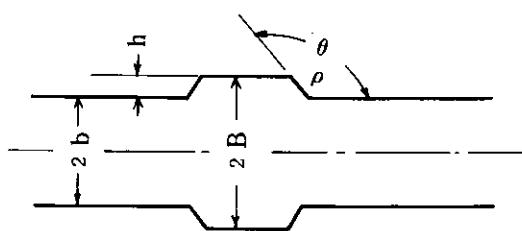


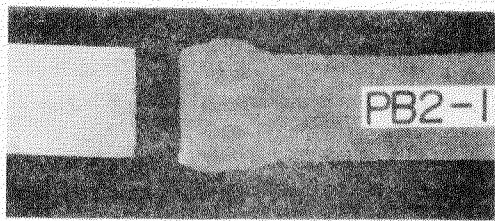
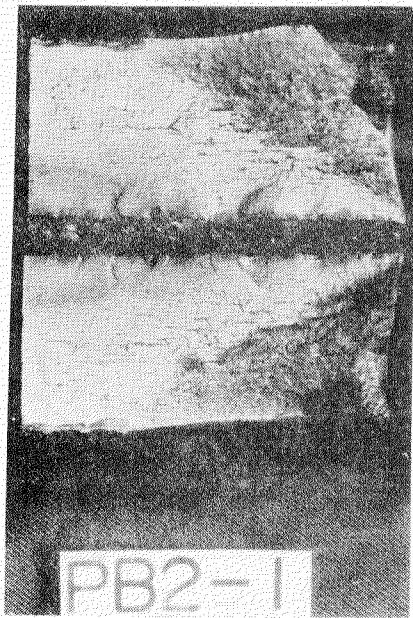
図4.6.2-2 プローホールと1~2mmの浅い溶込み不足を含む溶接継手の疲れ試験結果

iii) 図 4.6.2-2 から分かることおり、プローホールと浅い溶込不足を有する継手の疲れ強度は破壊発生の位置にかかわらず、余盛り付き健全継手と同一と考えられ、この程度のプローホールと溶込不足との共存は疲れ強度には影響を与えないものと考えられる。

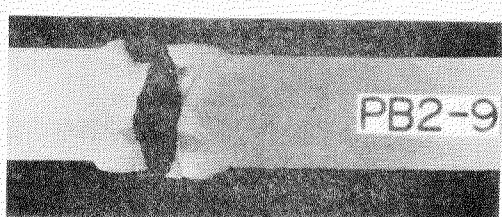
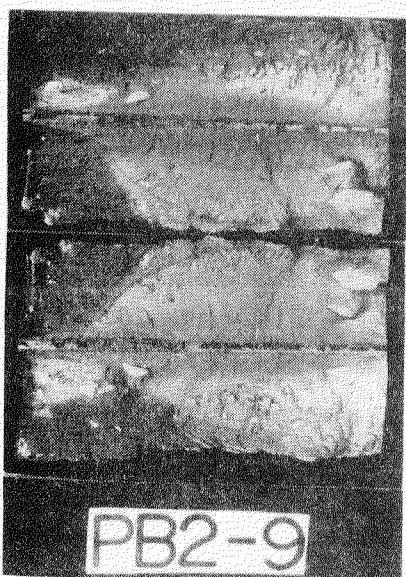
表 4.6.2-2 破断部の止端部形状と面積欠陥率

試験片番号	試験片形状			止端半径 ρ mm	接線角 θ 度	欠陥部面積 mm ²	面積欠陥率 %	破断位置
	B mm	b mm	h mm					
PB2-1	12.6	9.79	2.25	0.1	12.3	—	—	止端部
PB2-2	12.1	9.83	2.80	0.1	130	52.7	5	欠陥部
PB2-3	12.1	9.85	2.00	0.5	132	44.1	5	欠陥部
PB2-4	12.3	9.87	1.60	0.8	162	—	—	止端部
PB2-5	11.6	9.88	1.50	—	—	—	—	破断セズ
PB2-6	12.3	9.91	1.55	0.3	144	56.1	6	欠陥部
PB2-7	12.5	9.91	1.50	0.8	123	84.2	8	欠陥部
PB2-8	12.8	9.91	1.95	0.7	140	56.1	7	欠陥部
PB2-9	12.5	9.94	2.30	0.3	154	52.1	5	欠陥部

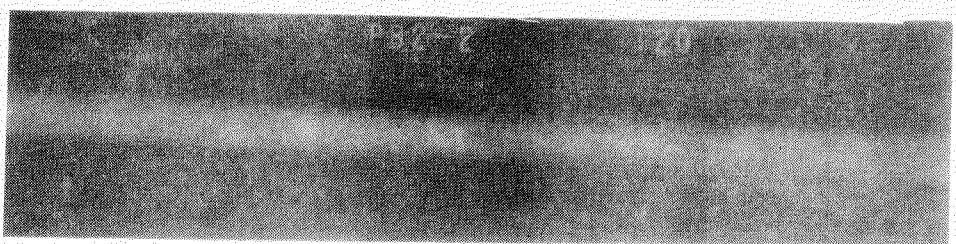




浅い溶込不足とプロホールを含む溶接継手で余盛止端部から疲れ破壊した試験片の破面



浅い溶込不足(1~2mm)から破壊したプロホールを含む歎手の疲れ試験片の破面



P.B.2 試験板の継手のX線写真

写真4.6.2-1 1~2mmの浅い溶込不足とプロホールを含む歎手の疲れ試験破面とX線写真

4.6.3 スラグの巻込みを含む継手の疲れ強度 (S 1)

(1) 試験板および試験片の作成

余盛付き突合せ継手においてスラグの巻込みが疲れ強度にいかに影響を与えるかについて調査するため、

図 4.6.3-1 に示すスラグ巻込みを継手内に含む試験片について試験を行った。

試験板および試験片の形状寸法は図 4.2.2-1 および

図 4.2.3-1 のとおりである。スラグの巻込みは J I

S Z 3 1 0 4 で 1 種 4 級に属する欠陥で 4.3.4 に従つ

て継手全長にわたって分布するように作製された。ス

ラグ巻込の状況は写真 4.6.3-1 のとおりである。

(2) 試験および試験結果

疲れ試験は 50 t サーボ油圧式疲れ試験機を使用し、

繰返し速度は 300 C P m, 荷重制御片振り張りとし

た。試験の結果を表 4.6.3-1 および図 4.6.3-2 に示す。

試験片はすべて内部欠陥から破壊が発生しているが、破面を観察すると写真 4.6.3-1 のとおり、すべて溶込み不足が含まれていた。S 1-5 は内部欠陥と止端部との両者から発生したき裂によって破断していた。

(3) 考 察

i) スラグの巻込みのような立体欠陥は余盛り付き突合せ継手では、余盛止端部の応力集中にくらべて疲れ強度の低下が少なく、ブローホールと同様あまり有害な欠陥ではないと考えられたが、実験結果は内部の欠陥から破断している。しかし、破面にはスラグ巻込みだけではなく、溶込み不足も発見され、結果的には 4.6.4 のスラグの巻込みと溶込み不足の両方の欠陥が含まれている継手に対する試験となったと考えられる。

ii) スラグの巻込みを含む継手の疲れ破壊は内部欠陥から破壊していても、その疲れ強さは図 4.6.3-2 のとおり健全継手の疲れ強さとほぼ同程度であり、この程度の大きなスラグ巻込みでも有害な欠陥と考えなくても差しつかえない。

表 4.6.3-1 スラグの巻込みを含む突合せ溶接継手の疲れ試験結果 (S 1)

試験片番号	応力全振幅 (Kg/mm ²)	破断までの 繰返し数 N	破断位置	溶込み不足 (mm)	破面の面積 欠陥率(%)	試験片の余盛形状 1)		
						高さ h (mm)	止端半径 ρ (mm)	接線角 θ (度)
S 1-10	45.4	静的引張	母材	—	—	—	—	—
S 1-1	16.4	6.70×10^5	内部欠陥	0.4	6.1	4.0	1.5	136
S 1-3	15.1	1.44×10^6	破断せず	—	—	3.4	1.8	138
S 1-5	25.2	1.70×10^5	内部欠陥	0.5	4.6	2.9	1.1	135
S 1-6	29.0	5.1×10^4	内部欠陥	1.1	5.4	2.7	1.2	143
S 1-9	20.2	3.89×10^5	内部欠陥	1.2	7.3	2.2	0.9	147

注 1) 試験片の余盛形状は破断したものの各部の平均値を記載

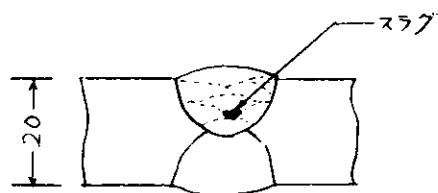


図 4.6.3-1 スラグ巻込みの継手

表4.6.4-1 スラグ巻込みと1~1.6 mmの溶込不足を含む突合せ溶接継手の疲れ試験結果 (PS2)

試験片番号	応力全振幅 (kg/mm ²)	破断までの 繰返し数N	破断位置	溶込不足 (mm)	破面の面積 欠陥率	試験片の余盛形状 1)		
						高さ h (mm)	止端半径 ρ (mm)	接線角 θ (度)
PS2-11	45.5	—	母材	—	—	—	—	—
PS2-1	22.6	1.38×10^5	内部欠陥	0.8	7.1	2.2	1.54	141
PS2-2	12.5	2.26×10^6	破断せず	—	—	—	—	—
PS2-3	25.1	8.47×10^4	内部欠陥	1.3	10.8	2.2	1.38	144
PS2-4	20.1	3.05×10^5	"	1.3	10.5	2.4	1.75	145
PS2-5	26.3	5.05×10^4	"	1.6	11.7	2.5	1.20	146
PS2-6	28.8	1.96×10^4	"	1.6	13.3	2.7	1.14	149
PS2-7	15.0	7.12×10^5	"	1.5	12.7	2.5	1.50	151
PS2-10	17.6	2.98×10^5	"	1.3	9.0	2.5	0.98	147
PS2-12	16.3	8.05×10^5	"	1.2	8.6	2.4	2.74	155

注 1) 試験片の余盛形状は破断したもののみ各部の平均値を記載

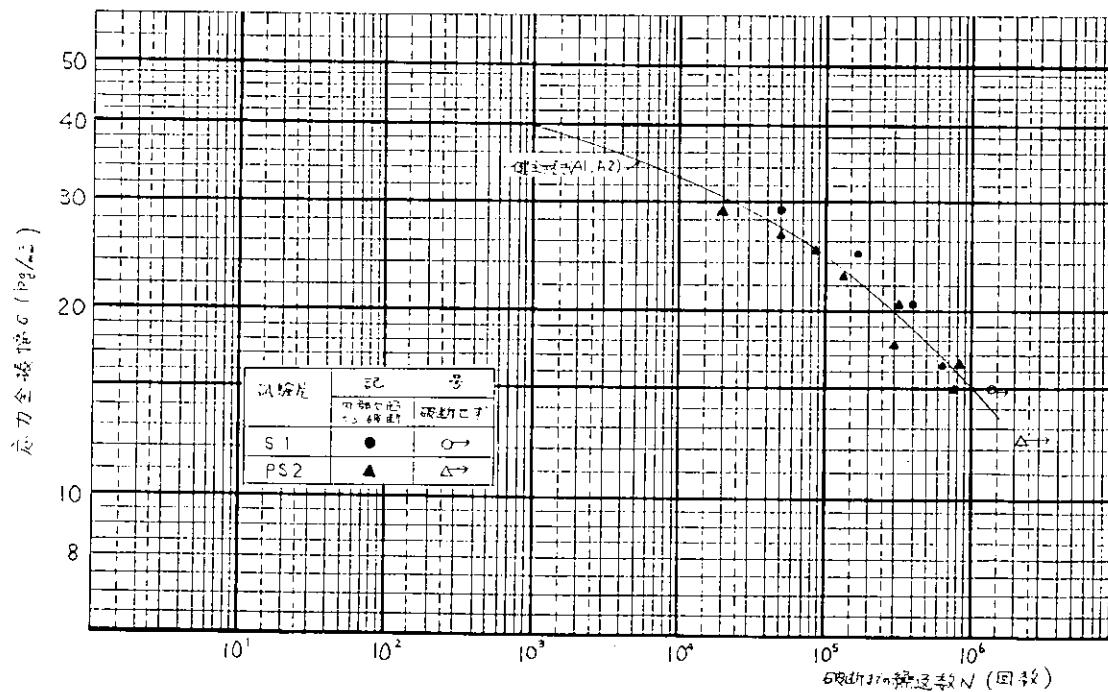
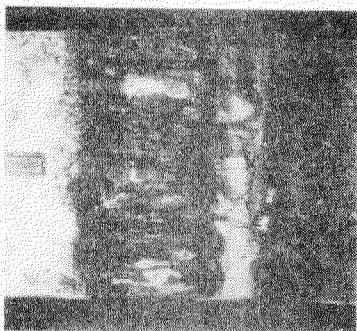
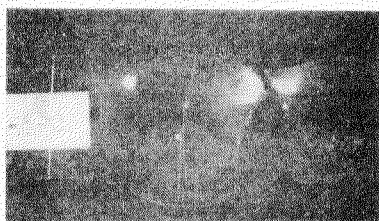
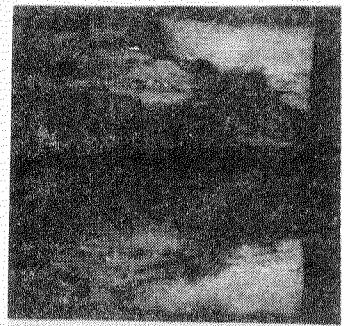
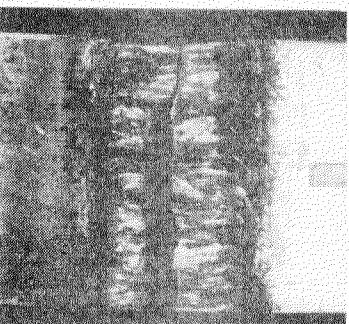
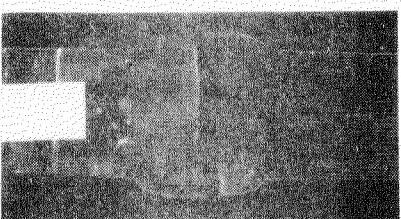


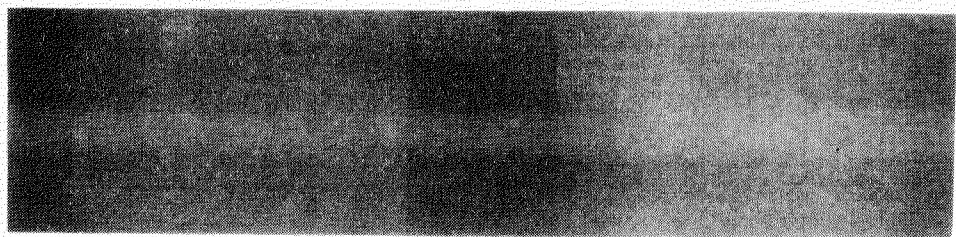
図4.6.3-2 スラグ巻込みと溶込み不足が共存する溶接継手の疲れ試験結果



a) 部分的に余盛り止端部から疲れ破壊したスラグ巻込みの試験片 (S 1-5 $\sigma = 25.2 \text{ kg/mm}^2$ $N = 1.70 \times 10^5$)



b) スラグ巻込み部から疲れ破壊した試験片 (S 1-1 $\sigma = 16.4 \text{ kg/mm}^2$ $N = 6.70 \times 10^5$)



c) S 1 試験板の溶接継手のX線写真

写真4.6.3-1 スラグ巻込みを含む溶接継手の疲れ試験破面と継手のX線写真

4.6.4 スラグ巻込みと浅い溶込み不足を含む継手の疲れ強度 (PS2)

(1) 試験板および試験片の作製

余盛付き突合せ継手においてスラグの巻込みと浅い溶込み不足がともにある場合の疲れ強度がどのように影響されるかを調査するため試験を行なった。これらの欠陥は4.5.2のP.3および4.6.3のS.1で確認されているように単独では健全な継手の疲れ強度を下回るほどの悪い影響を与えるものではないが、共存した場合には重量効果があることも予想される。

試験板および試験片の形状寸法は図4.2.2-1および4.2.3-1のとおりである。スラグの巻込は写真4.6.4-1(b)のとおり継手全長にわたって分布している。

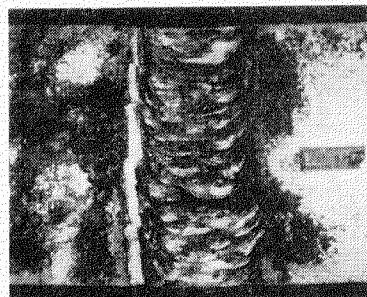
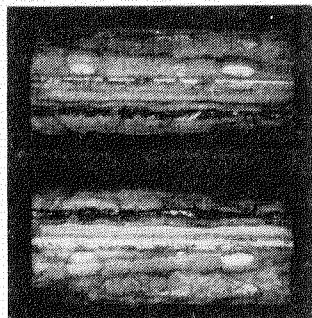
(2) 試験および試験結果

疲れ試験は50tサーボ油圧式疲れ試験機を使用し、繰返し速度は300cpm、荷重制禦片張り引張りとした。試験の結果を表4.6.4-1および図4.6.3-2に示す。

試験片はすべて内部欠陥から破壊が発生していた。

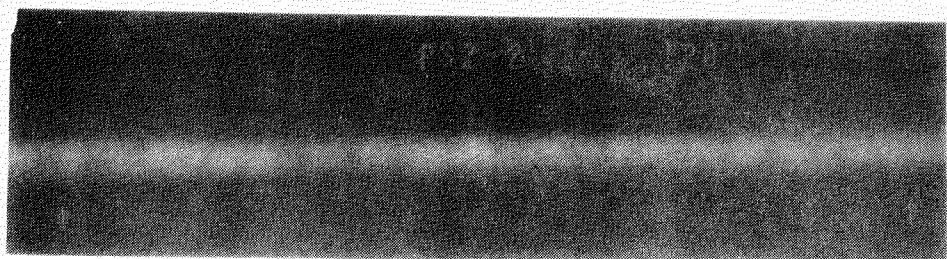
(3) 考察

疲れ試験の破断はすべて溶込み不足又はスラグ巻込みから発生しているが、SN線図からみると疲れ強度は健全継手のそれと一致しており、強度上は無欠陥の余盛り継手と同等と考えられる。



a) 0.8~1.6mmの溶込み不足とスラグ巻込みから疲れ破壊した試験片の破面 (PS2-3)

$$(\sigma = 25.1 \text{ kg/mm}^2, N = 8.47 \times 10^4)$$



b) PS2の試験板のX線写真

写真4.6.4-1 浅い溶込み不足とスラグの巻込みを含む溶接継手の疲れ破面とX線写真

4.6.5 プローホールとスラグを含む継手の疲れ強さ (B S 2)

(1) 試験板および試験片

突合せ溶接継手のスラグ巻込みおよびプローホールが共存する場合、これらの欠陥が疲れ強さに及ぼす影響について調査するため、図 4.6.5-1 の継手断面の試験片から図 4.2.3-1 の試験片各 10 個を採取した。プローホールおよびスラグの巻込みは JISZ3104 で判定して 4 級に属する欠陥で 4.3.3 および 4.3.4 の方法によって作成された。

(2) 試験および試験結果

試験はローゼンハウゼン型 40 t 試験機およびアムスラー・パルセータ型 50 t

試験機で 400 ~ 500 cpm の片振り張荷重を加えて行なった。試験の結果を表 4.6.5-1 に、S-N 線図を図 4.6.5-2 に、試験片の破面および X 線写真を写真 4.6.5-1 に示す。試験片のうち B S 2-4 だけがスラグの巻込みから破断したほかはすべて溶接余盛止端から破断した。

(3) 考察

スラグの巻込みとプローホールが共存する余盛り付き突合せ継手試験片の疲れ試験においては、大部分が余盛止端を起点として疲れ破壊をしており、またスラグ巻込みから破断した試験片を含めて健全継手の S-N 線図と一致していることは、プローホールやスラグの巻込みが共存しているための疲れ強度の低下は、余盛止端の応力集中による強度低下より影響が小さく、この種の立体欠陥は非常識に大きなものでないかぎり、余盛り付き溶接継手の疲れ強度にはほとんど影響を与えないものといえる。

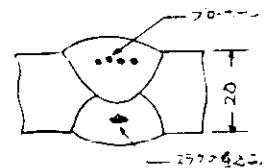


図 4.6.5-1 スラグ巻込み
とプローホー
ールを含む継手

表 4.6.5-1 スラグ捲込みとプロホールの共存する溶接継手の疲れ試験結果 (BS 2)

試験片番号	応力全振幅 (kg/mm ²)	破断までの繰返し数 N (回数)	破断位置	破面の欠陥	破面の面積欠陥率 (%)	試験片の余盛形状 1)		
						高さ h (mm)	止端半径 ρ (mm)	接線角 θ (度)
BS 2-1	12.0	2.40×10^6	破断せず	—	—	2.3	0.55	142
BS 2-2	14.0	1.09×10^6	止端部	—	—	2.3	0.52	129
BS 2-3	16.1	7.48×10^5	"	—	—	3.0	0.88	143
BS 2-4	13.0	1.70×10^6	内部欠陥	プロホール スラグ	6.5 %	2.7	0.50	132
BS 2-5	16.0	7.25×10^5	止端部	—	—	3.0	0.63	116
BS 2-6	12.6	2.22×10^6	"	—	—	2.8	0.58	124
BS 2-7	20.0	3.03×10^5	"	—	—	2.7	0.58	127
BS 2-8	18.0	3.35×10^5	"	—	—	3.2	0.75	130
BS 2-9	12.2	1.58×10^6	"	—	—	2.6	0.58	137
BS 2-10	25.1	1.18×10^5	"	—	—	3.0	0.53	149

注) 余盛り形状は止端部から破断したものは破壊発生断面の形状、その他の試験片は各部の平均的な形状。

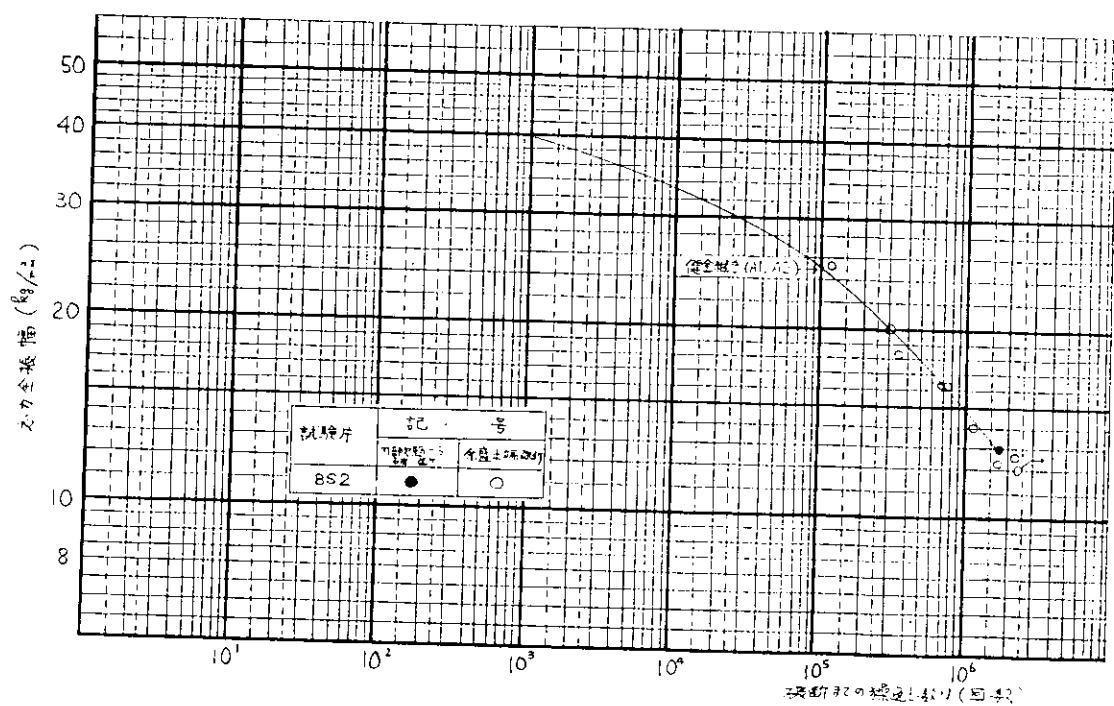
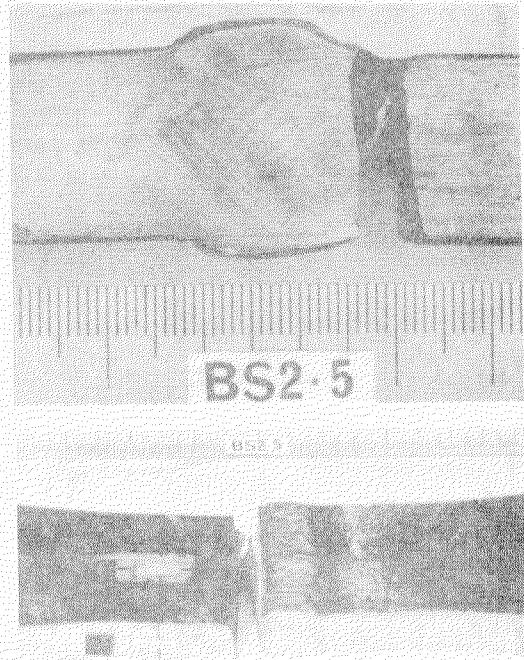
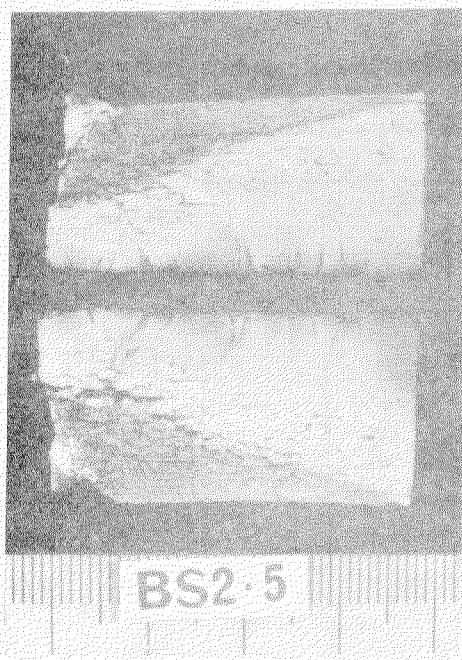
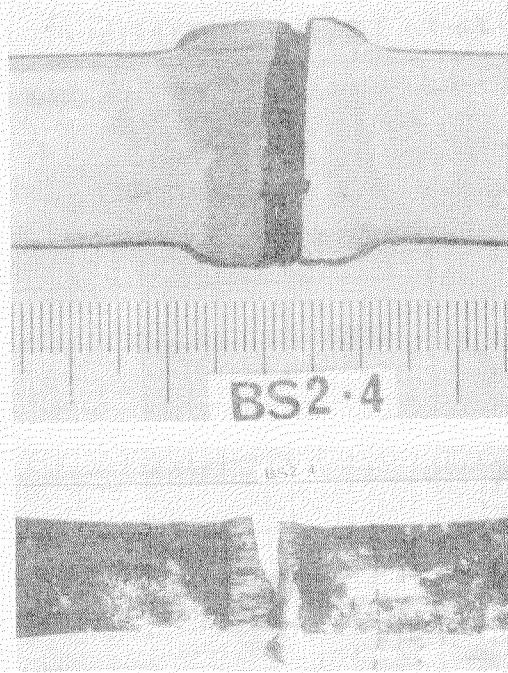
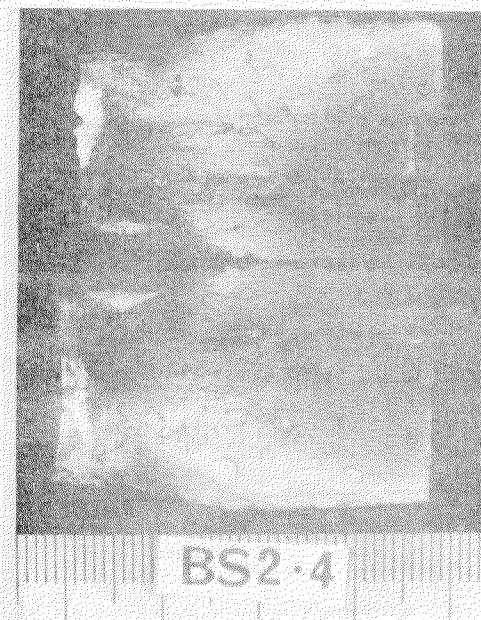


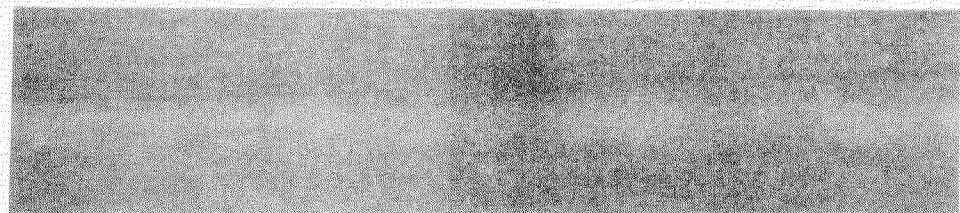
図 4.6.5-2 スラグ捲込みとプロホールの共存する溶接継手の疲れ試験結果



a) 余盛止端から疲れ破壊したスラグ巻込みとプロホールの共存する継手 ($\sigma = 1.6 \text{ kg/mm}^2$, $N = 7.25 \times 10^5$)



c) B-S-2 の試験板の溶接継手のX線写真



b) 内部欠陥から破断したスラグ巻込みとプロホールを含む継手の疲れ破面 ($\sigma = 1.3 \text{ kg/mm}^2$, $N = 1.70 \times 10^6$)

写真 4, 6, 5-1 スラグ巻込みとプロホールの共存する突合せ溶接継手の疲れ試験破面とX線写真

4.7 溶接部の有害な内部欠陥

4.7.1 継手全長に分布する溶接欠陥

継手全長に分布する比較的浅い溶込不足あるいはプローホール、スラグ捲込みのような欠陥が各単独に、あるいは共存する場合、疲れ強度を健全継手と比較してその影響の度合を比較すると次のとおりである。（図4.7.1-1参照）

i) 溶込不足は継手の疲れ強度をいちぢるしく低下させるが、板厚の5%以下の深さの溶込不足は、余盛止端部の応力集中による疲れ強度の低下にくらべて影響が小さく、疲れ強度上無害と考えられる。

ii) プローホール、スラグの捲込みはJIS Z 3401で4級と判断されるような欠陥であっても、疲れ強度の低下は余盛止端部の応力集中によるものより小さく、疲れ強度上無害と考えられる。なお、これらの欠陥が共存しても疲れ強度は余盛付き健全継手と同じ程度である。

iii) 溶込不足が5%を越えると疲れ強さは溶込不足の深さに比例して低下する。

静的な強度は溶着金属の強さと継手の最小断面積（余盛を含む）に比例し、一般に溶着金属の強さは母材の引張強さよりも大きく、継手表裏の余盛りの高さの合計値は母材の厚さの10～20%となるのが普通であるから、静的強度上は15～25%の大きな溶込不足があった場合にはじめて継手は母材より劣ることになる。したがって通常継手内にみられる10%前後のプローホールやスラグの巻込みは溶込不足がない限り手直しの要はない、溶込不足もその深さが5%以下であることが分かれば手直しの要はないと考えられる。

4.7.2 継手内に部分的にある深い溶込不足

継手内に部分的に深い溶込不足があると、継手内の欠陥面積率が小さくても疲れ破壊の原因となるので注意を要する。深さが板厚の10%を越え、長さが板厚を越えると溶込不足の先端からビードに疲れき裂を生じることがある。

溶込不足の長さについて考察すると、長さ2b、深さ2aの溶込不足を橢円き裂と見なすと、応力拡大係数は次式(4.7.2-1)によって計算される

$$K = \frac{\sigma (\pi a)^{1/2}}{\Phi_0} \quad \left. \begin{aligned} \text{但し, } \Phi_0 &= \int_0^{\pi/2} \left[1 - \left(\frac{b^2 - a^2}{b^2} \right) \sin^2 \theta d\theta \right] \end{aligned} \right\} (4.7.2-1)$$

b/a と $\Phi_0^{-1} = Kb/K_{\infty}$ の関係を図4.7.2-1に示す。ただし、 Kb 、 K_{∞} はそれぞれ長さ2bの内部き裂と貫通き裂に対する応力拡大係数である。 b/a が3以上となると Φ_0^{-1} は0.9以上となり、内部欠陥と貫通欠陥の差はほとんどないと考えられる。実際の部分的な溶込不足も b/a は10以上が普通であり、長さの短かい欠陥だから溶込不足の深さを参酌することは適当ではない。

溶込不足は裏掘り不良が主たる原因で、深く短かい溶込不足は実際には殆んどなく、相当な長さ連続するのが普通である。また部分的な溶込不足があった場合、繰返し荷重の下では部分的に貫通き裂を生じ、次第にそのき裂が溶接線に沿ってひろがる傾向がある。したがって当然補修溶接をともなうため、早期に発見され大事に致らなくても、メンテナ

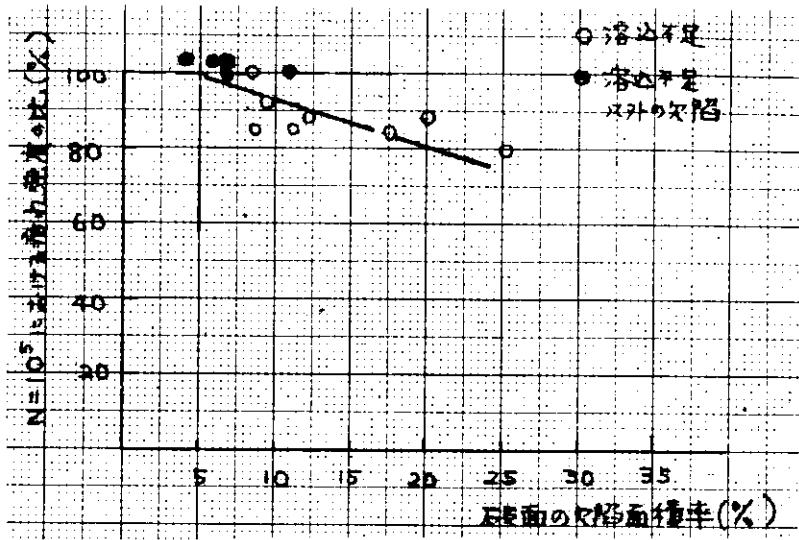


図4.7.1-1 継手内の欠陥率と疲れ強度の低下

ンス上工事を必要とするから、クラックフリーとするためには、47.1に従ってごく浅い溶込不足（板厚の5%以下）までしか許容すべきではないと思う。

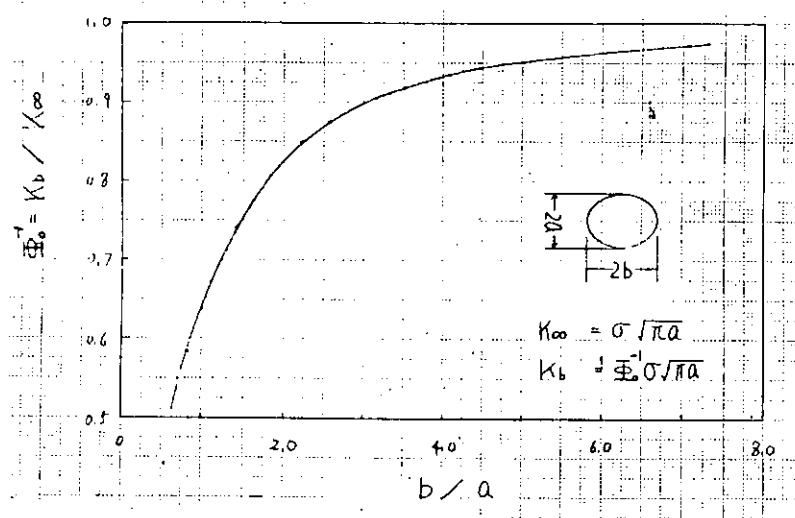


図 4.7.2-1 欠陥形状による応力拡大係数の変化

5. 溶接欠陥検出法に関する研究

5.1. 研究の目的

鋼溶接継手部の検査は、一般に放射線透過試験および超音波探傷試験で行なわれておる、いずれの方法も微細な欠陥から大きな欠陥まで検出できる。

^{1),2)} これらの試験はいずれも J I S で規定されており、試験要領および検出欠陥の等級分類等が規定されている。

検出対象欠陥をわれ、溶け込み不足、など連続した大きな欠陥と限定した場合、これらが簡便化した非破壊試験計器で検出可能であるかの点と、その検出限界を求める目的で、非破壊試験の未経験者でも操作出来るよう超音波探傷器を簡略化したフローテスターで実験を行なった。

5.2. 試験片

試験片には4章に記述した疲れ試験片と非破壊用試験片採取前の大型試験片および採取後の非破壊用試験片（以下NDT試験片と略す。）を使用し、検査対象は各試験片の全溶接継手とした。表5.2-1に試験片の概略を示す。

大型試験片は溶接線が長いことから、図5.2-1に示すようにX線フィルム長さに相当する250mm間隔で分割し、子番号をつけた。

なお、大型試験片の分割記号とNDT試験片との対比は、例えばP-8-1=P-8のように一致しない。これは大型試験片から、疲れ試験片の採取を先にしたためである。目安としての対比を表5.2-2に示す。

表 5.2-1 試験片概要

大型試験片			NDT試験片	
記号	溶接線長さ(mm)	製作時意図した欠陥	記号	溶接線長さ(mm)
A 1-1 ~ 5	各 250	無	A 1	300
A 2-1 ~ 10	"	"	A 2	"
B 1-1 ~ 5	"	ブローホール	B 1	250
S 1-1 ~ 5	"	スラグ巻込み	S 1	300
B S 2-1 ~ 5	"	ブローホール・スラグ	B S 2	"
P B 2-1 ~ 5	"	溶込不足・ブローホール	P B 2	250
P S 2-1 ~ 5	"	溶込不足・スラグ	P S 2	300
P 3-1 ~ 5	"	溶け込み不足	P 3	"
P 4-1 ~ 5	"	"	P 4	"
P 5-1 ~ 5	"	"	P 5	"
P 6-1 ~ 5	"	"		
P 7-1 ~ 5	"	"	P 7	300
P 8-1 ~ 10	"	"	P 8	"
P 9-1 ~ 10	"	"	P 9	"
P 10-1 ~ 10	"	"	P 10	"
P 11-1 ~ 10	各 200	"	P 11	"
P 12-1 ~ 10	各 250	"	P 12	"
P 13-1 ~ 10	"	"	P 13	"
P 14-1 ~ 10	"	"	P 14	"
P 15-1 ~ 10	"	"	P 15	"

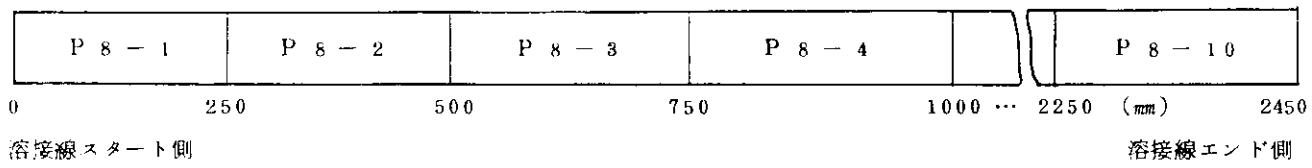


図 5.2-1 大型試験片の分割（例：P 8）

表 5.2-2 大型試験片とNDT試験片との対比

大型試験片	NDT試験片	大型試験片	NDT試験片
A 1 - 1	A 1	P 7 - 4	P 7
A 2 - 1	A 2	P 8 - 1	P 8
B 1 - 4	B 1	P 9 - 1	P 9
S 1 - 2	S 1	P 10 - 3	P 10
B S 2 - 3	B S 2	—	P 11
P B 2 - 1	P B 2	P 12 - 5	P 12
P S 2 - 1	P S 2	P 13 - 3	P 13
P 3 - 1	P 3	P 14 - 3	P 14
P 4 - 1	P 4	P 15 - 5	P 15
P 5 - 3	P 5		

5.3. 試験方法

各試験片の全溶接継手に対し、放射線透過試験（以下X線検査と略す。）、超音波探傷試験（以下超音波検査と略す。）、Flaw Tester検査を実施した。

次に各試験方法の適用要領について述べる。

5.3.1. X線検査

撮影、フィルム判定ともJIS Z 3104にしたがって行なった。

(1) 検査要領

装置 …… 理学電機製 Radioflex-200 EG
 管電圧 …… 200 KV
 管電流 …… 5 mA
 露出時間 …… 2 min.
 フィルム …… Fuji 100番
 増感紙 …… 鉛箔
 現像液 …… フジレンドール液
 現像時間 …… 5 min.
 現像温度 …… 20 °C

5.3.2. 超音波検査

探傷手順、欠陥エコーの読みとり、等級分類ともJIS Z 3060にしたがって行なった。

(1) 検査要領

探傷器 …… 三菱電機製 FD-210P型
 探触子 …… 三電製 5Z10×10A70（実測屈折角70°）
 接触媒質 …… マシン油

探傷感度 …… 図 5.3.2-1 に示す距離

振幅特性曲線（エコー高さ区分線 L, M, H.）を作製し、エコー高さを領域 I, II, III, IV で表示し、基準感度は斜角探傷用 J I S - S T B - A 2 型感度標準試験片（以下 S T B - A 2 と略す）の $4\phi \times 4$ やび、 $2\phi \times 2$ の平底ドリル穴が 1 スキップの位置でそれぞれ 50 % で得られる感度とした。

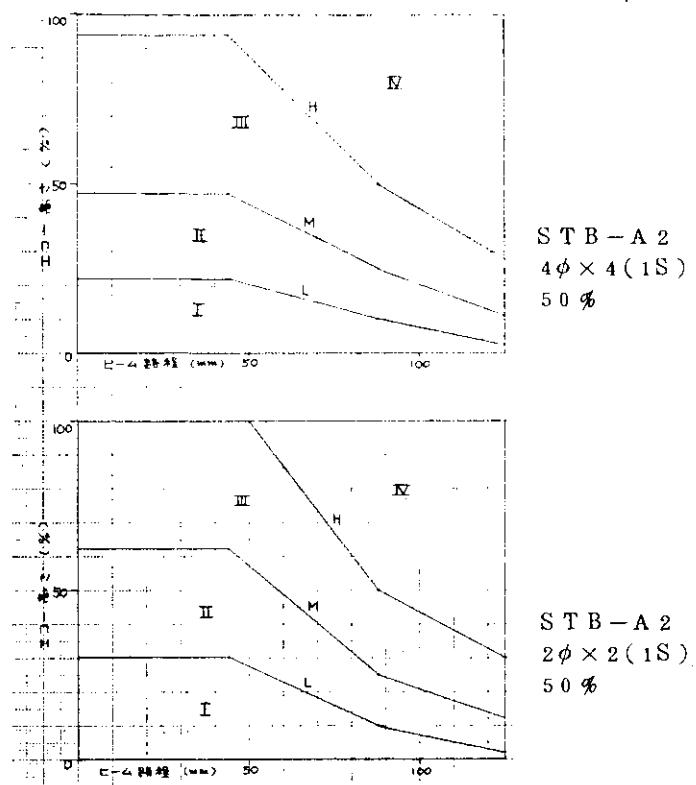
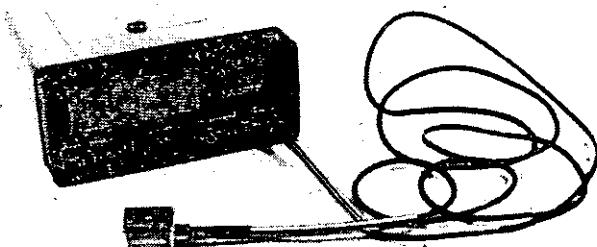


図 5.3.2-1 距離振幅特性曲線

5.3.3. Flaw Tester 検査

三菱電機製の Flaw Tester を使用した。写真 5.3.3-1 に外観図を示す。欠陥表示のブラウン管を取り除くことで、小型化を計り、欠陥表示は初めて設定した警報レベル以上の反射エコーがあった場合のみブザー音発生とランプ点燈で行なう。探傷可能な板厚は 50 mm までである。



三菱電機製 FD-50型 Flaw Tester

寸法： 160 × 125 × 70 (mm)

写真 5.3.3-1 Flaw Tester 外観図

(1) 計器の調整

調整はゲート起点 (G_S)、ゲート幅設定 (G_L)、距離感度補償起点 (D_S)、距離感度補償幅設定 (D_{SL})、感度 (G) の 5 個のデジタルスイッチで行ない、各スイッチは 0 から 9 までの目盛があり、試験者は板厚に応じて G_S , G_L を、検出対象欠陥に応じて D_S , D_{SL} , G の目盛を選ぶ。

(a) G_S , G_L の選択

母材厚さ 20 mm の突合せ継手部の場合、入射超音波が溶接全断面に行きわたるようにするには、原則として図 5.3.3-1 の A 点から B 点まで探触子を動かす。この場合入射超音波のビームの中心の鋼板内伝ば距離は、最短で $O'A$ (直射法, 58 mm), $O'CB$ (1 回反射法, 116 mm) であり、入射超音波の伝ば距離上で欠陥有無の監視範囲は溶接断面に相当する $O'A$ を起点とし、 $O'CB - O'A$ の幅の間である。

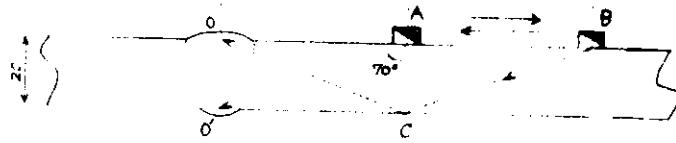


図 5.3.3-1 入射超音波のビーム中心

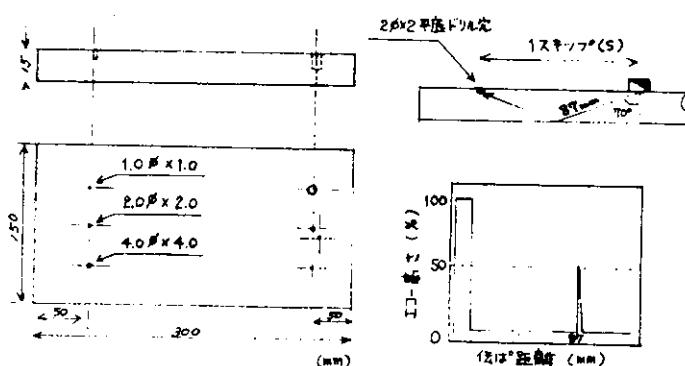
G_S は起点 $O'A$ を、 G_L は幅 $O'CB - O'A$ を決めるスイッチで表 5.3.3-1 に示すように 0 から 10 の目盛に応じて値が決められており、この場合 G_S に 5 を、 G_L には 2 を選ぶ。

表 5.3.3-1 G_S , G_L 目盛の値

スイッチ種類	(単位: mm)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G_S	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
G_L	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190

(b) D_S , D_{SL} , G の選択

検出対象欠陥が小さい場合は、STB-A 2 の $2\phi \times 2$ 、大きい場合は $4\phi \times 4$ の平底ドリル穴からの反射エコーが図 5.3.3-2 に示すように 1 スキップ (S) の位置でいずれもブラウン管上 50 % で得られる感度で行なうこととし、G 目盛を 0 にすれば $2\phi \times 2$ (1S) 50 % に、4 では $4\phi \times 4$ (1S) 50 % に感度設定される。表 5.3.3-2 に各目盛ごとにあらかじめ設定されている値を示す。



JIS-Z-2848
斜角探傷用 A2 型感度標準試験片
(STB-A2)

図 5.3.3-2 感度の設定

表 5.3.3-2 G 目盛の値

目盛	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
設定感度 (dB)	0 $2\phi \times 2$ (1S) 50%	-2.5	-5.0	-7.5	-10 $4\phi \times 4$ (1S) 50%	-12.5	-15.0	-17.5	-	-

STB-A 2 の 1 スキップの距離で設定した感度も、同じ平底穴に対し伝ば距離が長くなれば減衰によりエコー高さは小さくなり、感度は低下する。逆に伝ば距離が短くなればエコー高さは大きくなり、感度は増加する。

初め設定した感度が、欠陥検出の監視範囲で一定であるようにするため、距離感度補償回路 (DAC 回路) が内

記されており、起点と幅を D_S と D_{SL} で決める。 D_S と D_{SL} も表 5.3.3-3 に示すように、0 から 9 の目盛に応じてあらかじめ値が決められており、先に決めた G_S と G_L が含まれる値を選ぶ。板厚 20 mm では $D_S = 5$ 、 $D_{SL} = 2 \sim 9$ となる。

表 5.3.3-3 D_S , D_{SL} 目盛の値

目盛 スイッチ種類	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_S	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
D_{SL} (dB/cm) *	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
(200)	(182)	(167)	(154)	(143)	(133)	(125)	(118)	(110)	(105)	

*() 内は DAC 補償可能なビーム路程 (mm) を示す

(c) 警報レベル

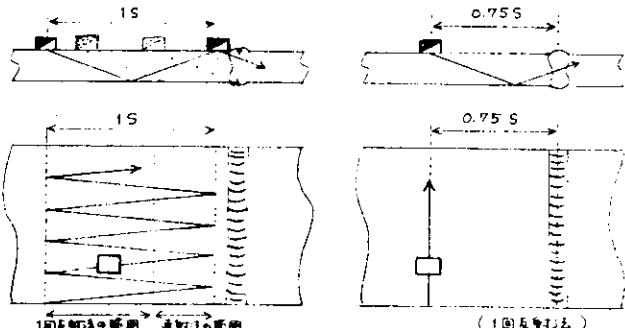
G 目盛の数字に応じて警報レベルが定められ、例えば $G = 0$ の場合、STB-A 2 $2\phi \times 2$ (1S) 50 % が警報レベルとなり、これ以上の反射エコーがあれば警報装置が作動する。

(2) 検査手順

検査対象欠陥が連続した大きな欠陥であることから、探触子の走査は、超音波探傷で行なわれているジグザグ走査ではなく、図 5.3.3-3 に示すように 1 回反射法で、入射超音波のビーム中心が溶接断面の中心に達する母材位置に探触子を置き、溶接線に平行に動かすこととした。

なお、欠陥の傾きを考慮に入れ、走査は溶接線の両側から行なった。

G_S , G_L , D_S , D_{SL} の目盛は (1), (2) 項の要領で定め、母材厚さが同じ場合は変えずに、 G 目盛は検出を意図する欠陥に適した数字を得るために、同一継手部に対し 0 から 9 まで順次変えて行なった。



(i) ジグザグ走査 (ii) Flaw Tester での走査

図 5.3.3-3 探触子の走査

5.4 超音波検査による欠陥深さの測定

欠陥深さの測定方法には、探触子を前後走査した場合の欠陥距離の差あるいは探触子の走査長さ等、種々の測定方法が提唱されており、図 5.4-1 は Trampf Heller が提唱した -6 dB 法である。

いずれの方法も、欠陥の形態、傾き、面あらさ等種々の因子が影響する反射エコー高さによることと、伝ば超音波の広がりを利用することから一般的に過大評価すると云われている。³⁾

このことを、図 5.4-2 に示す試験片で実験を行ない、図 5.4-3 に示す結果が得られ、確認された。なお、プラウン管のない Flaw Tester では欠陥深さの測定は不可能である。

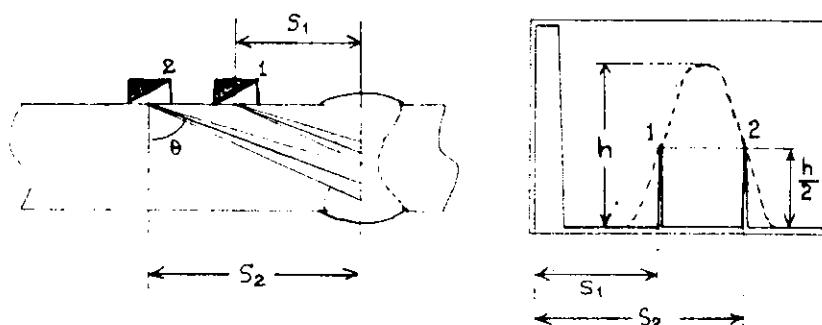


図 5.4-1 超音波探傷による欠陥深さの測定原理

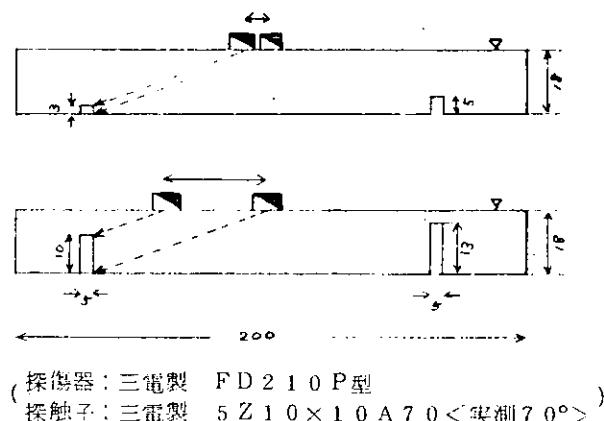


図 5.4-2 試験片と測定要領

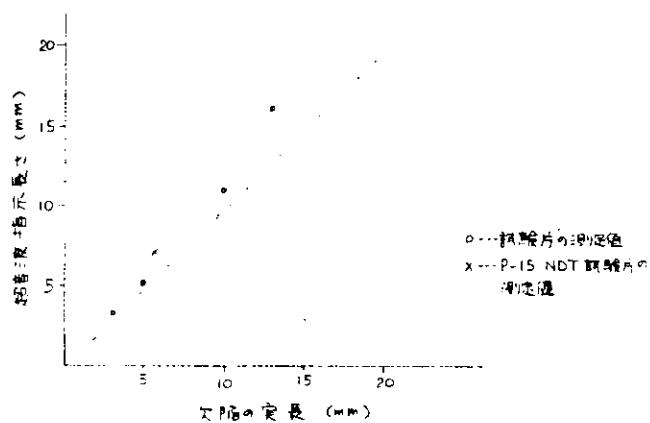


図 5.4-3 実験結果 (-6 dB 法)

5.5. 試験結果

N D T 試験片の X 線検査(図表では X T と略), 超音波検査(図表では U T と略), Flaw Tester 検査の試験結果を試験片ごとに整理したものと付表 5.5.-1 ~ 15 に, この結果も含む大型試験片の結果を付表 5.5.-1 ~ 4 に示す。

なお, 超音波探傷で領域 I に属する欠陥は記入していない。

5.5.1. 各種試験結果の比較

表 5.5.1-1 に試験結果の比較概要を示す。X 線検査と超音波検査はそれぞれの長短所が相互に表裏関係にあり, 両法は選択, 併用あるいはバックアップ手法として使用されている。従って結果の比較は検出性の優劣を決めるものではないが, 概略 X 線検査で大きく長く認められた欠陥は, 超音波検査, Flaw Tester 検査でも同じに認められる。

X 線検査は, プロー・ホール, スラグ等立体的欠陥に対し検出性が良いとされているが, B 1, S 1, B S 2, P B 2, P S 2 の結果はこのことを顕著に示している。^{4), 5)}

他方, 溶込不足, 割れ等面状欠陥に対し検出性が良いとされている超音波検査でこのことが顕著に認められるのは, P 4, P 8, P 10 で他の試験片では X 線検査と同程度の検出性を示している。^{4), 5)}

また, P 2, P 3, …… P 15 と順次溶込不足が大きくなるにつれて, 検出に必要な感度は小さくなるはずであるが, これがほとんど変っていない。

欠陥の長さは, それぞれの測定値が近似しているものもあるが, 一致しない場合が多い。

表 5.5.1-1 大型試験片の結果比較

試験片	製作時意図した欠陥	概要
B 1	プロー・ホール	X T の検出性良好
S 1	スラグ巻込	X T の検出性良好, U T • F T ではやや小さく評価
B S 2	スラグ巻込・プロー・ホール	X T の検出性良好
P B 2	溶込不足・プロー・ホール	X T の方が幾分検出性良い
P S 2	溶込不足・スラグ巻込	X T の検出性良好
P 3	溶込不足	X T, U T, F T とも同程度の検出性
P 4	"	U T, F T の検出性良好
P 5	"	X T, U T, F T とも同程度の検出性
P 6	"	"
P 7	"	"
P 8	"	U T, F T の検出性良好
P 10	"	"
P 11	"	X T, U T, F T とも同程度の検出性
P 12	"	"
P 13	"	"
P 14	"	"
P 15	"	"

(F T : Flaw Tester 検査)

5.5.2. X 線検査による検出欠陥の種類

X 線検査で検出された欠陥の種類は, 溶け込み不足が一番多く, 表 5.5.2-1 ~ 2 に内容を示す。

表 5.5.2-1 大型試験片の欠陥種類

(単位: 個)

等級分類 欠陥種類	1種4級		2種4級		合計
	プローホール [*] (BH)	溶込不足(IP)	スラグ巻込(SL)	融合不良(LF)	
個数	5	85	10	3	103

^{*} ここでプローホールは集中プローホールを意味する。

表 5.5.2-2 NDT 試験片の欠陥種類

(単位: 個)

等級分類 欠陥種類	1種4級		2種4級		合計
	プローホール [*] (BH)	溶込不足(IP)	スラグ巻込(SL)		
個数	2	11	2		15

^{*} 集中プローホール

5.5.3. Flaw Tester の検出欠陥

Flaw Tester 検査の結果を前項の X 線検査の結果と比較し、感度目盛と欠陥種類との関係をみると、超音波で検出が容易と言われている溶け込み不足は検出されているが、高い検出感度を必要としている。表 5.5.3-1～2 に内容を示す。

表 5.5.3-1 大型試験片の検出欠陥

感度目盛(G) 欠陥種類	1種4級		2種4級		合計
	プローホール (BH)	溶込不足 (IP)	スラグ巻込 (SL)	融合不良 (LF)	
0	5	83	10	—	98
1	3	82	9	—	94
2		74	6	—	80
3		69	3	—	72
4		42	—	—	42
5		29	—	—	29
6		9	—	—	9

表 5.5.3-2 NDT 試験片の検出欠陥

感度目盛(G) 欠陥種類	1種4級		2種4級		合計
	プローホール (BH)	溶込不足 (IP)	スラグ巻込 (SL)		
0	2	11	2	—	15
1	1	11	2	—	14
2	1	10	—	—	11
3	1	6	—	—	7
4	1	1	—	—	2
5		1	—	—	1

5.5.4. Flaw Tester の欠陥検出率

X 線検査の欠陥検出率を 100 とし、Flaw Tester の検出率 $\left(\frac{\text{Flaw Tester での検出数}}{\text{X 線検査での検出数}} \times 100 \right)$

を求める、これを表 5.5.4-1 に示す。

表 5.5.4-1 Flaw Tester の欠陥検出率

(単位: %)

試験片 感度目盛 (G)	大型試験片	NDT 試験片
0	95	100
1	91	93
2	78	73
3	70	47
4	41	13
5	28	7
6	9	—

5.5.5. Flaw Tester による欠陥長さの測定

Flaw Tester の使用目的は欠陥有無の簡易判断であり、欠陥長さの測定は目的に反するが、欠陥検出中、警報

表 5.5.5-1 Flaw Tester 欠陥長さ比較

感度目盛 (G)	記号	1種4級	2種4級	
		ブローホール (B H)	溶込不足 (I P)	スラグ巻込 (S L)
0	○		44	
	△		14	
	×	5	25	10
1	○		39	
	△		21	
	×	3	22	9
2	○		29	
	△		14	
	×		31	6
3	○		14	
	△		20	
	×		35	3
4	○		8	
	△		10	
	×		24	
5	○		7	
	△		6	
	×		16	
6	○			
	△		1	
	×		8	

(注) X線結果の密集又は連続長さを ℓ とし、Flaw Tester による測定値を、つきの範囲別

に○、△、×の記号で表示した。

$$l - 20 < l < l + 20 \cdots \cdots \circ$$

$$l - 40 < l < l + 40 \cdots \cdots \triangle$$

上の範囲をこえるもの \cdots \cdots \times

装置が作動していることから、この間の母材上の距離を欠陥長さとし、X線フィルムから得た長さと比較した。表5.5.

5.-1に結果を示すが、X線結果との一致は余りみられない。

5.5.6. 切断確認試験

超音波では検出性が高いと言われている溶け込み不足に、超音波検査、Flaw Tester 検査とも高い感度を必要としていることから、欠陥確認のため、P=4, 11, 12, 14の試験片で切断確認試験を行なった。

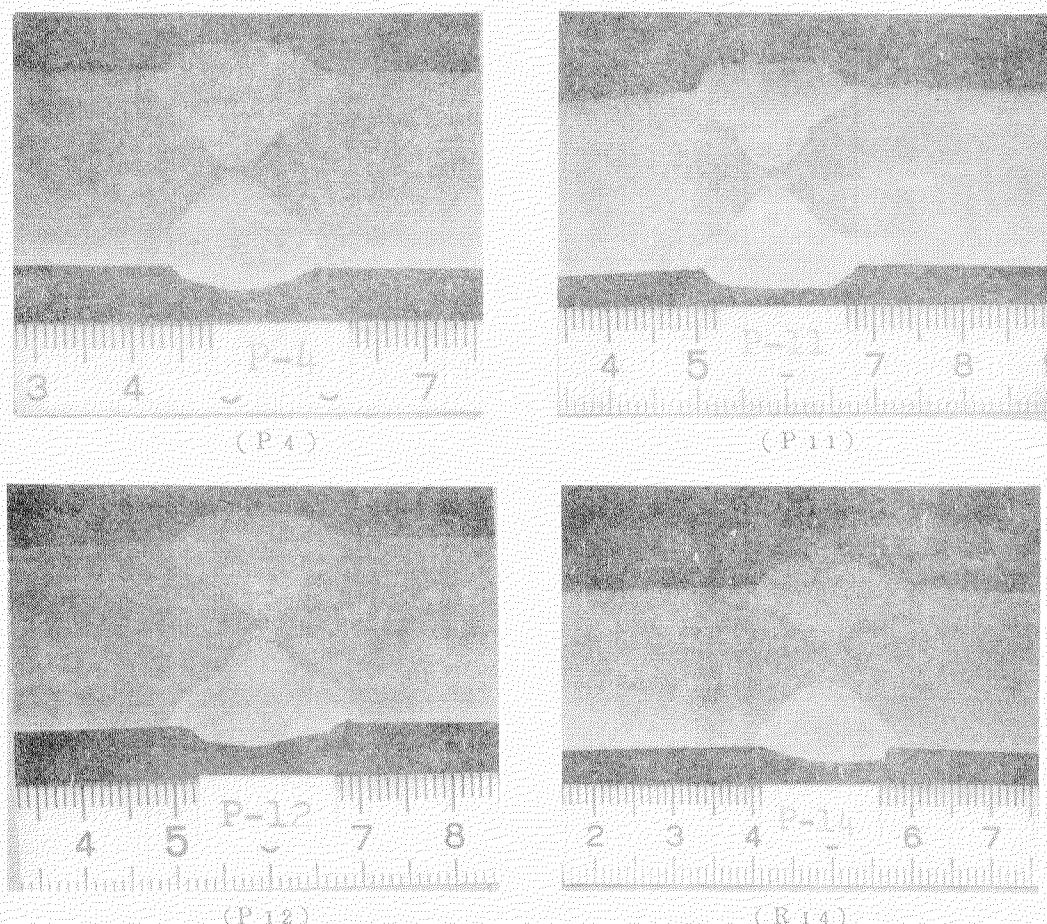
断面のマクロ写真を写真5.5.6-1に示すが、入射超音波の反射面は鏡面である。

このため、入射超音波は図5.5.6-1に示すように鏡面反射する。なお、超音波の入射を同図の位置A(直射法)、B(-1回反射法)で行なっても検出性の向上は認められなかった。

この種の欠陥では、深さの小さい方が欠陥の両端での反射のため検出性が良く、深さが大きくなると漸に検出性は悪くなるものと思われる。

このことを表5.5.6-1に示す疲れ試験破断面で測定した溶込不足の深さと、その検出に要した Flaw Tester の感度目盛を対比させた図5.5.6-2で示した。

鏡面の原因は、試験片製作時、溶込不足の深さを正確に出すため、ルートライスを機械仕上(W)したためと思われる。



(注) 各試験片の切断位置はそれぞれ付図の実験結果に記してある。

写真 5.5.6-1 断面マクロ写真

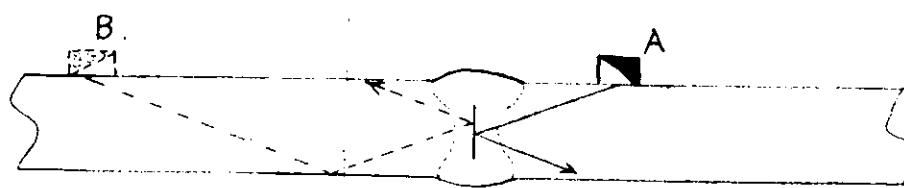


図 5.5.6-1 鏡面での超音波の反射

表 5.5.6-1 溶込不足の深さ測定値

試験片記号	深さ (mm)	試験片記号	深さ (mm)
P 3	0.7～1.8	P 8	2.4～2.6
P 4	1.9～2.4	P 9	3.0～3.8
P 5	3.3～3.6	P 13	4.0～4.7
P 6	4.0～5.2	P 14	5.9～6.4
P 7	1.2～2.0	P 15	4.5～5.7

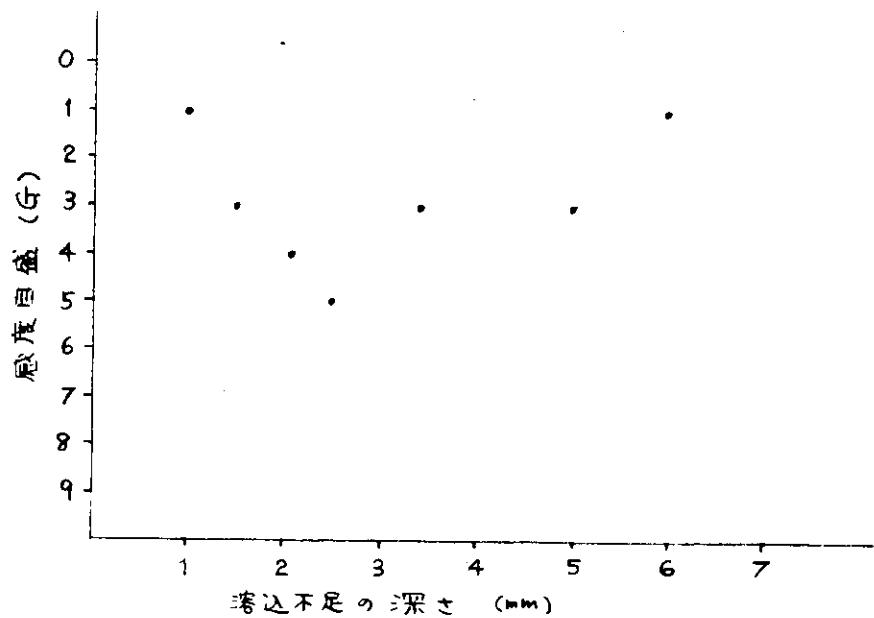


図 5.5.6-2 溶接不足の深さと感度目盛り関係

5.5.7 自然欠陥への適用

前項の実験に使用した試験片内の溶込不足は、面状欠陥ではあるが超音波の反射面が鏡面であることから高い検出感度を必要とした。

そこでルートフェイスを機械加工せず、SS 41 をアーク溶接法で自然欠陥が発生するように溶接し、新たに、16枚の試験片を作製して、今までと同じ要領でX線検査と、Flaw Tester 検査を実施した。

(1) 試験片

試験片の内容とX線検査の結果を表5.5.7-1に示す。

表5.5.7-1 試験片とX線検査結果

試験片番号	母材厚さ(mm)	X T 結 果		
		等級分類	欠陥名称	密集又は連続長さ(mm)
1	13	2-2	スラグ巻込	12
2	"	1-4	プローホール	70
3	"	2-4	スラグ巻込	15
4	15	2-2	"	5
5	"	1-4	プローホール	60
6	"	2-3	スラグ巻込	10
7	20	1-4	プローホール	20
8	"	1-4	"	100
9	"	2-4	溶込不足	135
10	13	2-4	"	170
11	17	2-4	"	200
12	22	2-4	"	50
13	"	2-4	"	62
14	"	1-4	プローホール	105
15	13	2-4	溶込不足	225
16	15	3-4	割れ	12

(2) Flaw Tester 検査結果

各試験片の検査結果と欠陥部のマクロ写真を付図5.5.7-1~16に、これらの結果からX線検査による欠陥種類別にFlaw Tester が必要とした感度目盛を表5.5.7-2に、X線検査による欠陥長さとFlaw Tester で測定した欠陥長さの比較を表5.5.7-3に示す。

溶込不足、割れはプローホールより低い感度で検出されており、面状欠陥に対する検出性がすぐれていることと、欠陥長さも高い感度ではX線検査と一致している結果が得られている。

表 5.5.7-2 欠陥種類と感度目盛

欠陥種類 感度目盛(G)	1 種		2 種			3 種
	3 級	4 級	2 級	3 級	4 級	
0	○	○	○	○	○	○
1	○	○	○	○	○	○
2	×	○	○	○	○	○
3		△	○	○	○	○
4		△	×	×	○	○
5		×			○	○
6					○	×
7					○	
8					△	
9					△	

○ 検出

△ 検出されぬものもある

× 検出できない

表 5.5.7-3 欠陥長さの比較

欠陥種類 感度目盛(G)	1 種		2 種			3 種
	3 級	4 級	2 級	3 級	4 級	
					I P	S L
0	△	△	○	○	○	○
1	×	△	△	○	○	○
2		△	△	△	○	△
3		△(一部X)	×	△	○	△
4		△(70mm以上)		×	△	×
5		×			△	

○ 一致

△ 一致しないものもある

× 測定できない

5.6 Flaw Testerの適用限界

5.6.1 専用感度標準試験片

溶接部の超音波探傷では、探傷器の感度設定は、STB-A2 の $2\phi \times 2$ 、または $4\phi \times 4$ の平底ドリル穴で行なわれる場合が多く、この感度で検出された欠陥エコーと欠陥実体との対比資料も多い。⁶⁾

Flaw Testerも感度目盛が 0 と 4 では自動的にこれらの平底ドリル穴で設定した感度になるが、試験時、計器感度のチェックには STB-A2 が必要である。STB-A2 は Flaw Tester より重く、大きいことからチェック用だけに現場持參をするには不便である。

のことから図 5.6.1.-1 に示す感度チェック専用の試験片を作製した。GS, GL, DS, D_{SL} の目盛を STB-A2 でチェックする値にした後、G が 0 ~ 2 の場合は探触子を A の位置に、G が 4 の場合は B の位置に置き、警報装置が作動すれば Flaw Tester は正常とみなす。

なお、詳細な点検は STB-A2 によらねばならない。

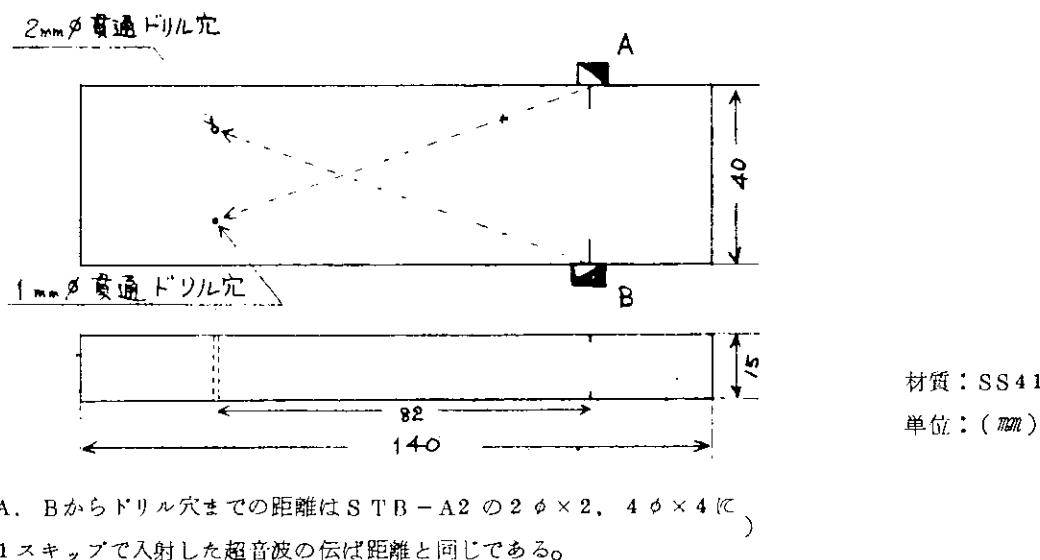


図 5.6.1.-1 専用感度標準試験片

5.6.2 適用限界

実験に供した試験片の全欠陥検出に必要な感度目盛は、大型、NDT 試験片では溶込不足で、1. プローホール、スラブ巻込んで、0 であり、自然欠陥内含試験片では、それぞれ 6. 1. であった。

のことから立体的欠陥であるプローホール、小さなスラグ巻込等の検出に適した感度目盛は、0、または 1、となる。しかしこの感度では面状欠陥である溶込不足、割れ等も検出され、両者の判別は難かしく実用に適さない。

溶込不足に対する検出感度に差があるのは、切断確認試験で、大型試験片の欠陥形状によることが確認された。したがって、溶込不足の深さが 1 ~ 2mm の P3, P4 試験片の欠陥が、感度目盛 3 ~ 4 で検出されたことと、自然欠陥試験片で長さ 20mm の溶込不足が感度目盛 6 ~ 7 で検出されていることから、板厚 13 ~ 22mm の場合、深さ 2mm、長さ 20mm の溶込不足は欠陥位置によらず、感度目盛 4 で充分検出できるものと思われる。

探触子は、余盛からのエコーで警報が作動しないようにするため、入射超音波が 1 回反射で溶接断面中心に達する母材上の位置 (0.75S) に置き、溶接線に平行に動かす。

これらから、Flaw Tester で非破壊試験未経験者が気を使わずに、欠陥有無判別の対象にできる最小欠陥は、深さ 2mm、長さ 20 ~ 30mm であろう、この場合感度目盛は 4 が適している。

なお、検出対象欠陥がこれより大きい場合は、感度を下げる必要がある。

5.6.3. Flaw Tester の改造

現場使用により、改造希望の点も多くなることと思うが、実験に使用した範囲で、非破壊試験未経験者が使用することを考慮し、気づいた点を次に記す。

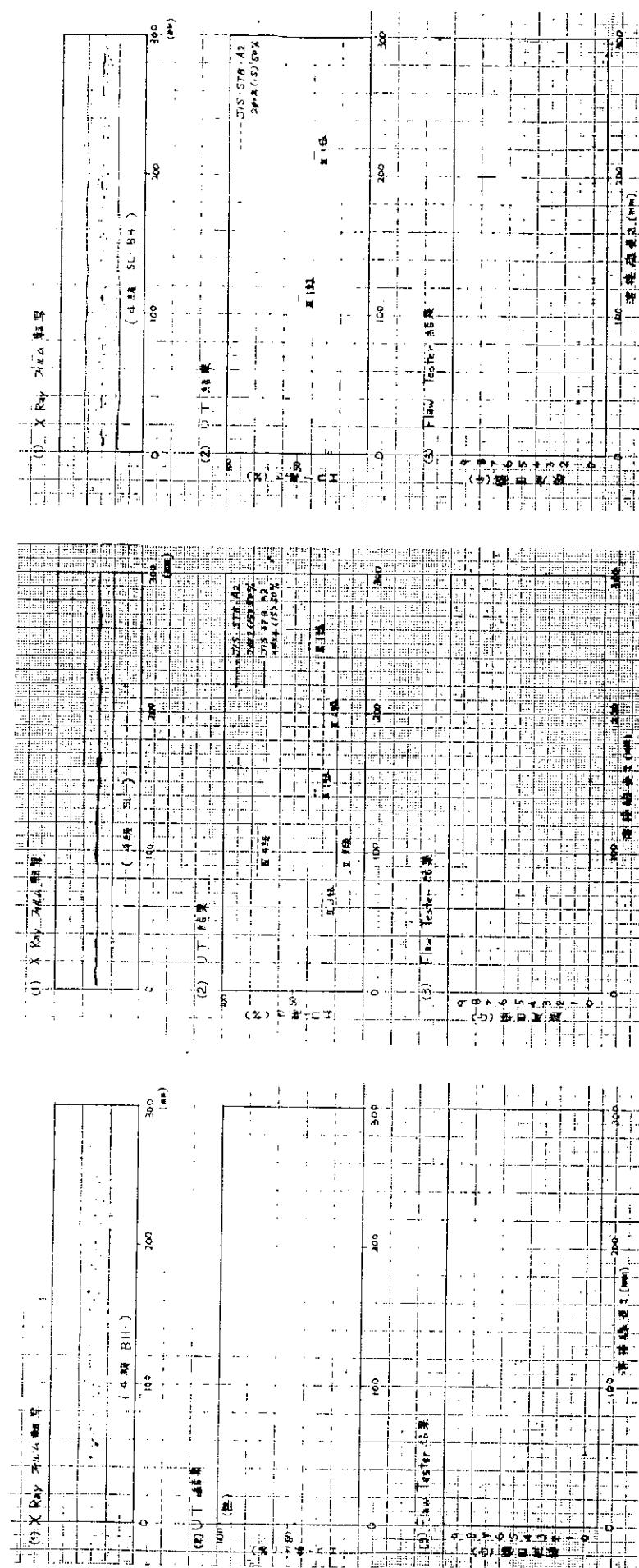
- (1) 現場での持ち運びは、バンドに固定できる大きさ(約 $120 \times 70 \times 30$)まで小さくできれば良いと思う。
- (2) 接触媒質に油を使用するが、多数の溶接継手をチェックする場合は別として、少数箇所のチェック用として Flaw Tester 収容箱に、スポンジを入れた小油缶が付けられれば、便利であろう。
- (3) 運搬、使用中の探触子コードの断線もありえることであり、本体に、超音波が鋼板中に入射している事を表示する機構が必要と思われる。
- (4) 5 個ある計器調整スイッチのうち、GS と DS は機能は異なるが、探傷時、同じ目盛数字であり、1 つの目盛でも良いと思う。

5.7 ま と め

今回の実験で、目的である連続した大きな欠陥を簡単な操作の計器で検出することは、可能なことが判明した。現場使用にあたり、溶込不足の長さ別に適用条件の細分化。板厚が厚い場合の適用条件の確立の点と、溶接施行者がこの種の検査計器使用の場合を考慮し、計器管理も含めた検査体系の検討も必要と思われる。

引 用 文 献

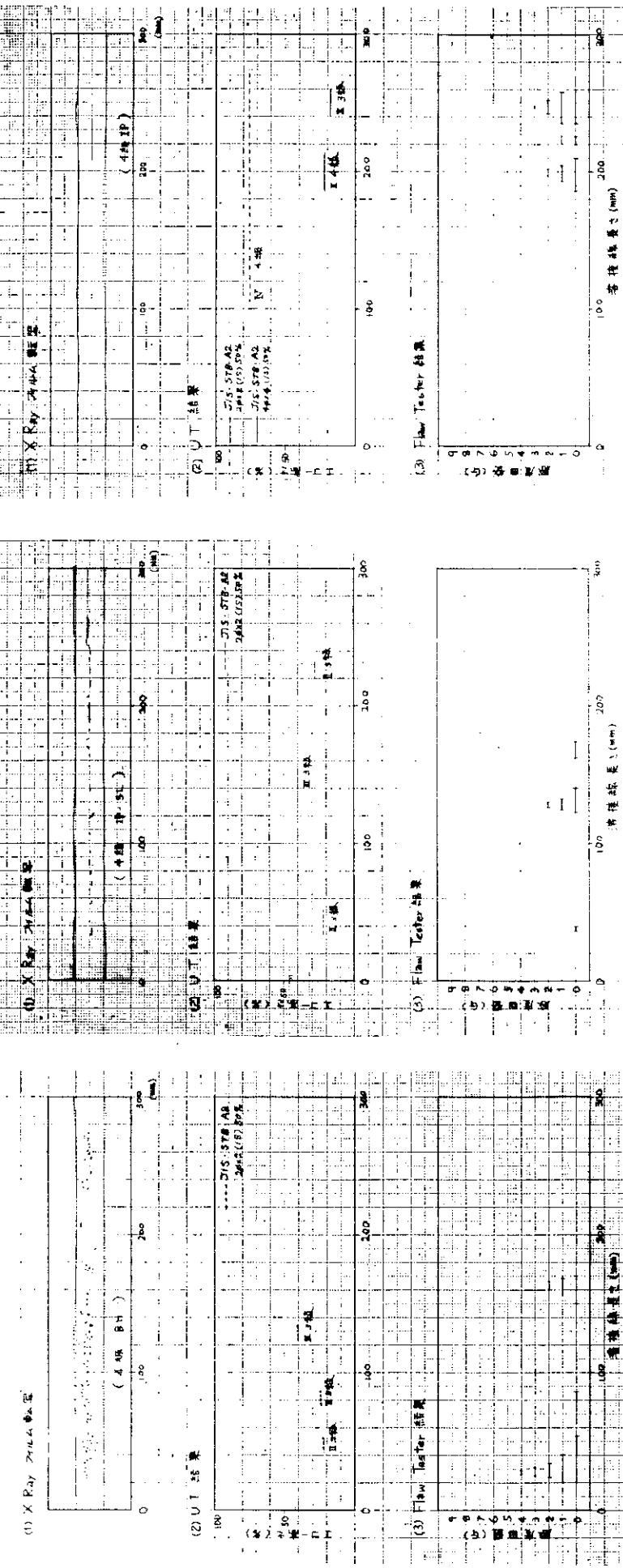
- 1) 鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法
- 2) 鋼溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法
- 3) E. Mundry "Defect evaluation by Ultrasonics"
Welding and Metal Fabrication, April 1972
- 4) 石井 "非破壊検査上からの破壊に対する対策" 高圧力 vol. 9. No. 5. 1971
- 5) 神尾, 木村 他 "溶接欠陥の評価と継手強度に関するシンポジウム特別号"
非破壊検査 vol. 22. No. 8. 1973
- 6) 超音波探傷試験 A
日本非破壊検査協会 1975



付圖 5.5-1 実験結果 (B1)

付圖 5.5-2 実験結果 (S1)

付圖 5.5-3 実験結果 (BS2)

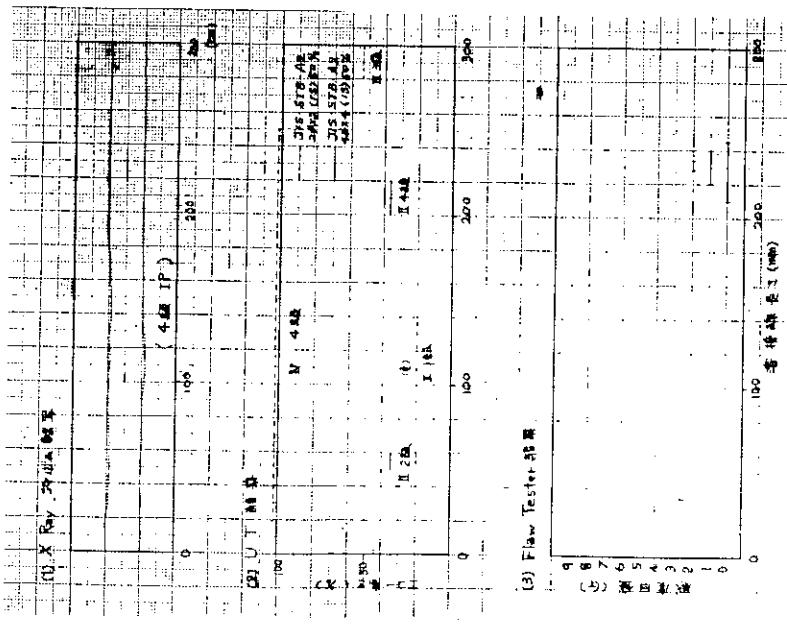


付図 5.5-4 実験結果 (PB2)

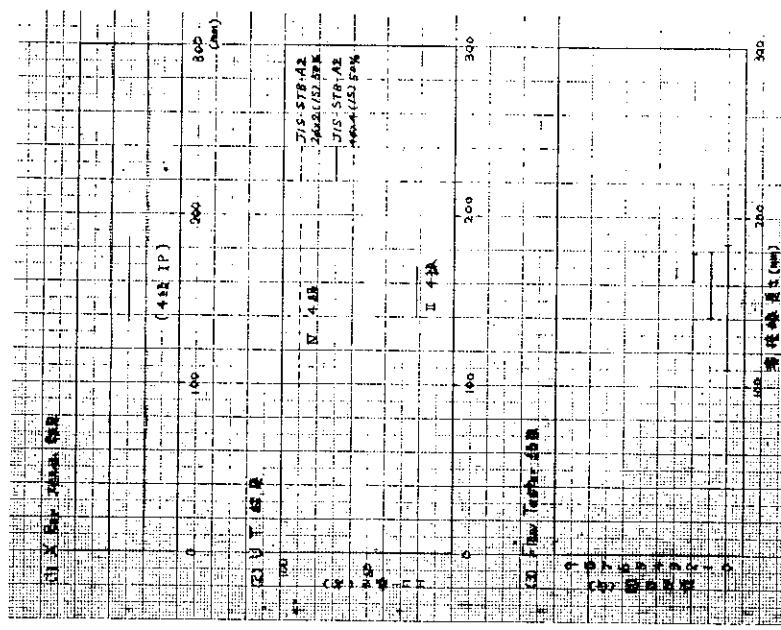
付図 5.5-5 実験結果 (PS2)

付図 5.5-6 実験結果 (P3)

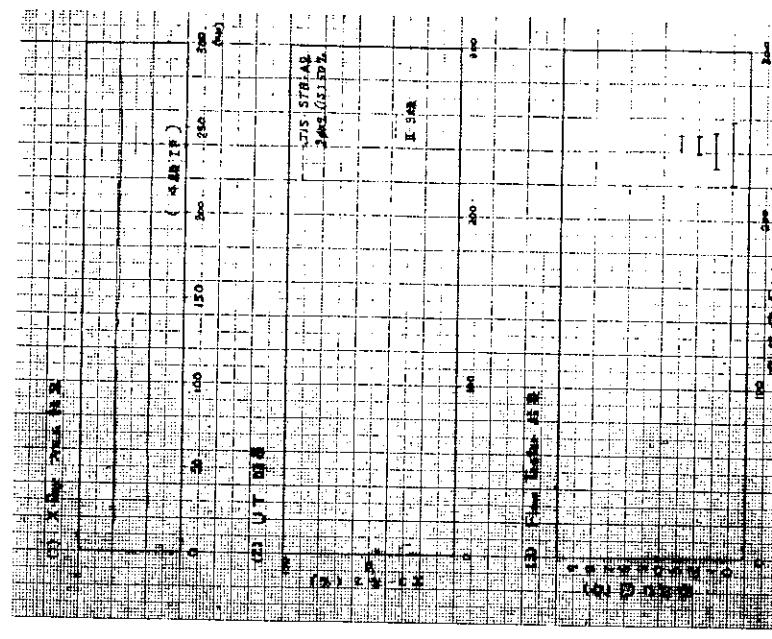
付図 5.5-7 実験結果 (P 4)

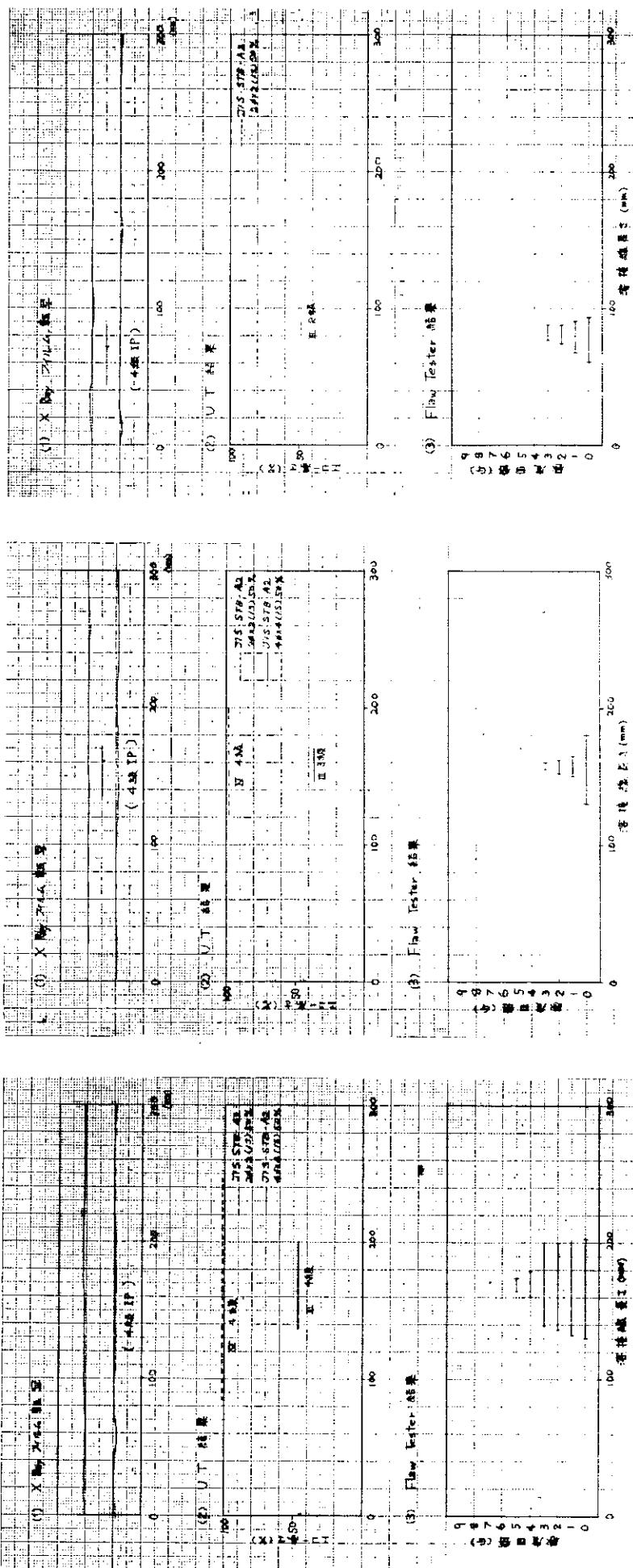


付図 5.5-8 実験結果 (P 5)



付図 5.5-9 実験結果 (P 7)

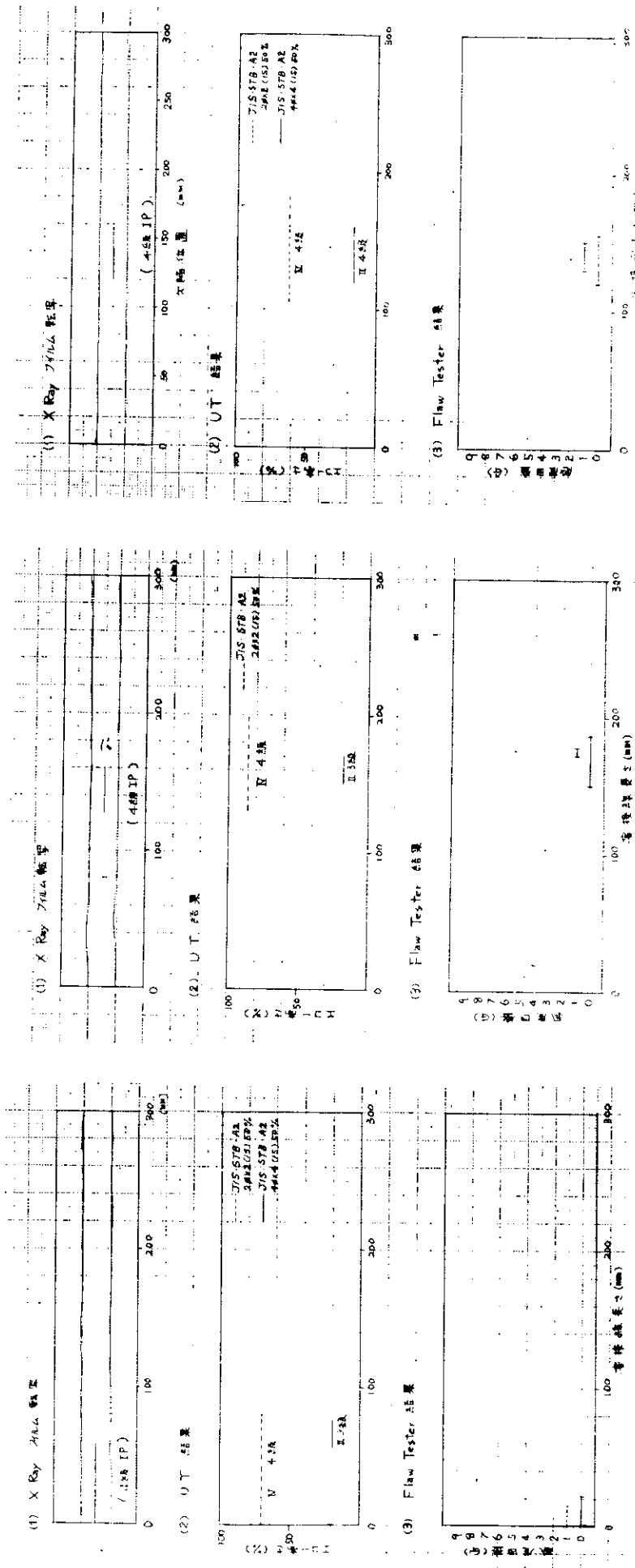




付図 5.5-10 実験結果 (P 8)

付図 5.5-11 実験結果 (P 10)

付図 5.5-12 実験結果 (P 11)



付図 5.5-13 実験結果 (P12)

付図 5.5-14 実験結果 (P14)

付図 5.5-15 実験結果 (P15)

付表 5.5-1 大型試験片の試験結果

試験項目	試験片番号 (厚さmm)	Flaw Tester 結果						UT 結果 4φ×4(1S)50%			備考 厚さ=20mmの デジタル設定値	
		感度目盛 G=0	1	2	3	4	5	6	等級	欠陥種類	密集又は連続長さ (mm)	
A 1 (20)	1	○	点	○	点	○	点		2-1	SL	1	2
	2								1			
	3								1			
	4								1			
	5								2-1	SL	1	
	1								2-1	SL	7	
	2								1-1	BH	1	
	3								1-1	BH	1	
	4								1			
	5								1-1	BH	3	
A 2 (40)	6								1-1	BH	1	
	7								2-4	LP.SL	45	
	8								1-1	BH	2	
	9								1-1	BH	3	
	10								1-1	BH	1	
	1	○	30	○	点				1-4	BH	250	3 35
	2	○	40	○	点				1-4	BH	250	
	3	○	30	○	点				1-4	BH	250	

4	○	15													
5	○	20													
1	○	65	○	35	○	10									
2	○	30	○	点											
S 1 (20)	3	○	40	○	20	○	10								
4	○	70	○	40	○	20	○	点							
5	○	50	○	30	○	15	○	点							
1	○	81	○	88	○	28									
2	○	163	○	76	○	26	○	10							
B S 2 (20)	3	○	30	○	点										
4	○	23	○	13											
5	○	点													
1	○	50	○	35	○	20	○	10							
2	○	60	○	40	○	20	○	15	○	5					
P B 2 (20)	3	○	150	○	120	○	80	○	30	○	10				
4	○	170	○	130	○	70	○	35	○	20	○	5			
5	○	200	○	175	○	95	○	95	○	95	○	86			
1	○	40	○	10	○	5									
2	○	118	○	118	○	108	○	105	○	90	○	57	○	7	2-4
P S 2 (20)	3	○	61	○	38	○	30	○	6					2-4	IP
4	○	120	○	115	○	85	○	80	○	52	○	10		2-4	IP
5	○	185	○	125	○	117	○	103	○	103	○	100	○	60	2-4
														IP	SL
														205	3
														195	

付表 5.5-2 大型試験片の試験結果

試験項目	Flaw Tester 結果					XT 結果					UT 結果 $4\phi \times 4(1S)50\%$	備考	
	感度目盛 $G = 0$	1	2	3	4	5	6	等級	欠陥種類	密集又は連続長さ (mm)	頭块		
P 3 (20)	1	○	5.5	○	4.0	○	2.5	○	5			2-4	IP
	2	○	13.0	○	6.0	○	2.0	○	5	○	点	2-4	IP
	3	○	13.5	○	6.0	○	2.0	○	点			2-4	IP
	4	○	13.0	○	10.0	○	6.0	○	2.0	○	点	2-4	IP
	5	○	14.0	○	11.5	○	7.0	○	3.0	○	10 ○	2-4	IP
	1	○	3.5	○	2.0	○	5					2-4	IP
	2	○	24.0	○	24.0	○	8.2	○	4.1	○	2.0	2-4	IP
	3	○	10.0	○	10.0	○	7.0	○	5.0	○	10	2-4	IP
	4	○	8.5	○	8.5	○	5.0	○	3.0	○	1.5 ○	2-4	IP
	5	○	9.0	○	9.0	○	9.0	○	8.5	○	2.5 ○	2-4	IP
P 4 (20)	1	○	6.0	○	4.5	○	2.0	○	5			1	
	2	○	8.0	○	6.5	○	2.0	○	点			2-4	IP
	3	○	9.0	○	6.0	○	2.5	○	1.0			2-4	IP
	4	○	11.0	○	8.5	○	7.0	○	5.5	○	4.0	2-4	IP
	5	○	13.0	○	13.0	○	11.0	○	10.0	○	5.5	2-4	IP
	1	○	17.0	○	12.5	○	8.5	○	3.0			2-4	IP
	2	○	14.0	○	8.0	○	4.0	○	1.0			2-4	IP
	3	○	7.0	○	5.5	○	2.0	○	5			2-4	IP
	4	○	10.0	○	8.0	○	6.0	○	4.0	○	2.0	2-4	IP
	5	○	12.0	○	10.0	○	8.0	○	6.0	○	4.0	2-4	IP
P 5 (20)	1	○	8.0	○	6.5	○	2.0	○	点			2-4	IP
	2	○	9.0	○	6.0	○	2.5	○	1.0			2-4	IP
	3	○	11.0	○	8.5	○	7.0	○	5.5	○	4.0	2-4	IP
	4	○	13.0	○	13.0	○	11.0	○	10.0	○	5.5	2-4	IP
	5	○	17.0	○	12.5	○	8.5	○	3.0			2-4	IP
	6	○	14.0	○	8.0	○	4.0	○	1.0			2-4	IP
	7	○	7.0	○	5.5	○	2.0	○	5			2-4	IP
	8	○	10.0	○	8.0	○	6.0	○	4.0	○	2.0	2-4	IP
	9	○	12.0	○	10.0	○	8.0	○	6.0	○	4.0	2-4	IP
	10	○	14.0	○	12.0	○	10.0	○	8.0	○	6.0	2-4	IP
P 6 (20)	1	○	8.0	○	6.5	○	2.0	○	点			2-4	IP
	2	○	9.0	○	6.0	○	2.5	○	1.0			2-4	IP
	3	○	11.0	○	8.5	○	7.0	○	5.5	○	4.0	2-4	IP
	4	○	13.0	○	13.0	○	11.0	○	10.0	○	5.5	2-4	IP
	5	○	17.0	○	12.5	○	8.5	○	3.0			2-4	IP
	6	○	14.0	○	8.0	○	4.0	○	1.0			2-4	IP
	7	○	7.0	○	5.5	○	2.0	○	5			2-4	IP
	8	○	10.0	○	8.0	○	6.0	○	4.0	○	2.0	2-4	IP
	9	○	12.0	○	10.0	○	8.0	○	6.0	○	4.0	2-4	IP
	10	○	14.0	○	12.0	○	10.0	○	8.0	○	6.0	2-4	IP

	4	○	30	○	点											2-1	SL BH	3	3	
	5	○	190	○	180	○	146	○	105	○	60	○	12			2-4	IP	160	2	
	1	○	30	○	点											2-4	IP	25		
	2	○	8	○	8											1				
P7 (20)	4	○	40	○	25	○	19	○	12							2-4	IP	10		
	5	○	63	○	63	○	44	○	26	○	2					2-4	IP	40	2	
	1	○	75	○	70	○	65	○	60	○	20	○	10			2-4	IP	40	3	
	2	○	250	○	249	○	217	○	195	○	147	○	123	○		58	2-4	IP	85	4
	3	○	250	○	250	○	250	○	250	○	247	○	246	○		189	2-4	IP	80	4
	4	○	250	○	250	○	250	○	250	○	250	○	200	○		115	2-4	IP	65	4
	5	○	250	○	250	○	250	○	250	○	245	○	205	○		70	2-4	IP	10	4
	6	○	250	○	250	○	250	○	250	○	225	○	195	○		170	2-1	LF	3	4
	7	○	250	○	250	○	250	○	250	○	250	○	250	○		250	2-4	IP	15	4
	8	○	250	○	250	○	250	○	250	○	230	○	220	○		202	1-1	BH	2	4
	9	○	250	○	245	○	245	○	200	○	155	○	129	○		27	2-2	IP	10	4
	10	○	152	○	152	○	147	○	115	○	50	○	45	○		15	2-4	IP	60	2
	1★	○	25	○	15	○	5	○	点							2-4	IP	35	3	
	2★	○	38	○	35	○	25									2-4	IP	47	2	
	3★	○	60	○	60	○	60	○	27	○	20	○	2			2-4	IP	45	2	
	4★	○	20	○	20	○	5	○	5							2-4	IP	42	2	
	5★	○	10	○	10	○	10	○	5	○	5	○	3			2-4	IP	46	2	

☆印は
疲れ試験片
供用

付表 5.5-3 大型試験片の試験結果

試験項目 試験片番号 (厚さmm)	Flaw Tester 結果						XT 結果			UT 結果 4Φ×4(IS 50%		デジタル設定値 GS → 9 GL → 5 DS → 9 DSL → 8	
	感度目盛 Q=0		1	2	3	4	5	6	等級	欠陥種類	密集又は連続長さ(mm)	指示長さ(mm)	
P 9 (40)	1	○	25	○	5				2-2	IP SL	9	2	点 厚さ=4.0mm○
	2								2-2	IP BH	6		
	3								2-1	SL BH	8		
	4								1-1	BH	1		
	5	○	15	○	5				2-4	IP	30	2	5
	6								1-1	BH	1		
	7								2-4	IP	10		
	8								2-1	SL	5		
	9								1-1	BH	2		
	10	○	6						2-2	IP	5		
P 10 (20)	1	○	35	○	35	○	20	○	10	○	2		
	2☆	○	60	○	50	○	40	○	40	○	20	2-4	IP 3.8 3 9.5 厚さ=2.0mm○
	3	○	45	○	15	○	5	○	5	○	2	2-4	IP 2.8 4 1.25 デジタル設定値 GS → 5 GL → 2
	4	○	120	○	33	○	22	○	17			2-4	IP 4.0 3 3.6 DS → 5
	5	○	190	○	35	○	27	○	27	○	20	2-4	IP 3.0 3 1.25 DSL → 8
	6☆	○	42	○	27	○	25	○	20	○	10	2-4	IP 2.3 3 1.0 ☆印は疲れ試験片に供用
	7	○	250	○	110	○	105	○	65	○	15	○	8 2-4 IP 1.0 4 7.5
	8☆	○	250	○	200	○	80	○	55	○	8	○	2 2-4 IP 2.7 4 6.5

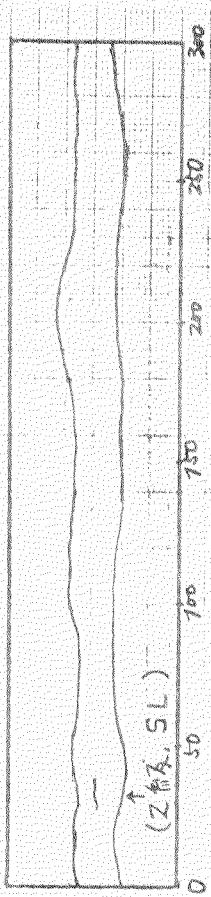
9☆	○	120	○	25	○	10	○	5						2-4	IP	25	3	90	
10☆	○	62	○	22	○	15	○	5	○	5	○	点		2-4	IP	25	4	55	
1	○	60	○	60	○	60	○	55	○	35	○	25		2-4	IP	87	3	70	
2☆	○	40	○	40										2-4	IP	81	3	55	
3	○	60	○	60	○	50	○	10						2-4	IP	100	3	80	
4	○	80	○	80	○	80	○	80						2-4	IP	90	3	100	
5	○	65	○	65	○	65	○	10						2-4	IP	70	3	65	
6☆	○	80	○	80	○	25	○	5						2-4	IP	79	3	85	
7☆	○	75	○	65	○	20	○	10	○	5				2-4	IP	81	3	90	
8☆	○	50	○	40	○	20	○	10	○	点				2-4	IP	85	2	60	
9☆	○	50	○	50	○	5								2-4	IP	86	3	60	
10	○	40	○	20										2-4	IP	90	3	45	
1	○	40	○	40	○	40	○	20	○	18	○	8		2-4	IP	45	3	45	
2☆	○	40	○	40	○	35	○	21	○	10				2-4	IP	41	3	42	
3														1					
4														2-1	IP	2			
5☆	○	30	○	30	○	25	○	22	○	20	○	7	○	点	2-4	IP	42	2	40
6														2-2	IP	3			
7	○	40	○	35	○	30	○	25	○	20	○	20		2-4	IP	20	3	53	
8☆	○	30	○	30	○	30	○	30	○	30				2-4	IP	43	2	35	
9☆	○	39	○	25	○	12	○	5	○	5				2-4	IP	44	2	45	
10														1					

付表 5.5-4 大型試験片とNDT試験片の試験結果

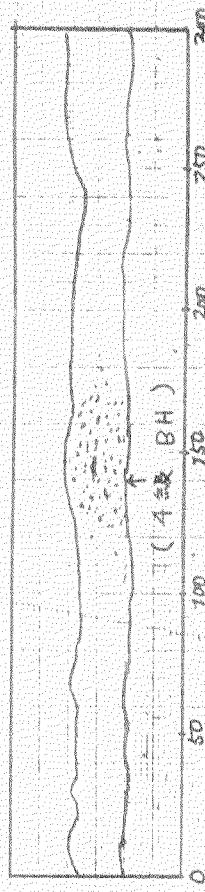
試験項目 試験片番号 (厚さmm)	Flaw Tester 結果						UT 結果 4Φ×4(1S) 50%			備考 厚さ=20mmの デジタル設定値
	G=0 感度目盛 警報 長さ (mm)	1 長さ (mm)	2 警報 長さ (mm)	3 警報 長さ (mm)	4 警報 長さ (mm)	5 警報 長さ (mm)	6 警報 長さ (mm)	密閉又 は連続 状態 領域 等級 欠陥 種類	UT結果 4Φ×4(1S) 50%	
P 1 4 (20)	1☆○	25○	25○	25○	10○			1		
	2○									
	3○	17○	10○					2-4 IP	3.5	2 0 GS → 5
	4☆○	20○	20○	10○	10○			2-4 IP	2.2	3 2 GL → 2
	5○							2-4 LF	3.0	3 0 DS → 5
	6○							2-4 IP	2.0	3 2 DS1 → 8
	7☆○	10○	10○	5○	5○			2-4 IP	2.8	4 0 ☆印は 疲れ試験片に 供用
	8☆○	25○	5○					2-4 IP	2.8	2 30
	9○							2-4 LF	1.2	2 20
	10☆○	20○	20○	20○	15○	15○	10○	2-4 IP	2.2	4 35
P 1 5 (20)	1☆○	40○	40○	40○	20○			2-4 IP	4.2	3 45
	2○							1		
	3☆○	25○						2-4 IP	4.2	2 50
	4☆○	50○	40○	40○	25○			2-4 IP	5.0	3 47
	5○	40○	15○					2-4 IP	4.5	2 40
	6○							1		
	7○	45○	45○	30○	28○			2-4 IP	4.4	3 45
	8☆○	40○	30○	25○	15○			2-4 IP	4.3	2 40

9	○							1		2	2 5	
10☆	○	30	20	○	10			2-4	IP	42		
A 1 (20)	○							1-1	BH	点		
A 2 (40)								2-1	SL	7		
B 1 (20)	○	10						1-4	BH	200		
S 1 (20)	○	25	○	点				2-4	SL	250	2 0	
BS 2 (20)	○	32	○	4				2-4	SL	250	DSL → 8	
PB 2 (20)	○	60	○	32	○	16	○	6	○	3		
PS 2 (20)	○	34	○	8	○	3		1-4	BH	160		
P 3 (20)	○	55	○	40	○	15	○	点	2-4	IP	135	
P 4 (20)	○	35	○	20	○	5		2-4	IP	30	2 50	
P 5 (20)	○	74	○	40	○	17	○	5		2-4	IP	50 2 30
P 7 (20)	○	38	○	21	○	11	○	9		2-4	IP	15
P 8 (20)	○	72	○	68	○	64	○	60	○	19	○	10
P 9 (40)								2-4	IP	40	3 64	
P 10 (20)	○	50	○	15	○	10	○	5		2-1	SL	5
P 11 (20)	○	34	○	23	○	14	○	12		2-4	IP	40 3 20
P 12 (20)	○	22	○	15	○	点			2-4	IP	44	
P 13 (20)									1-1	BH	点	
P 14 (20)	○	37	○	6				2-4	IP	35	2 20	
P 15 (20)	○	35	○	20	○	点		2-4	IP	42	2 40	

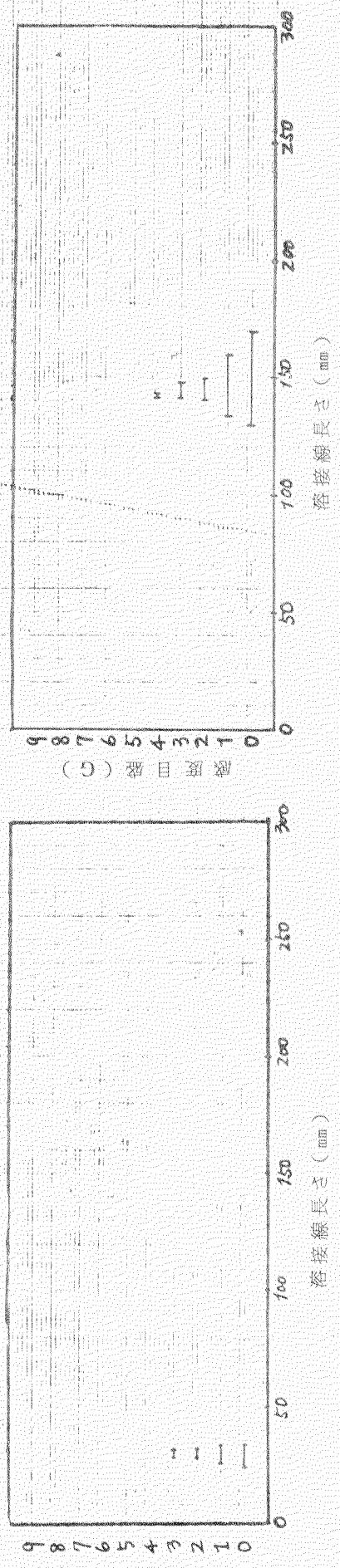
(1) X Ray フィルム転写



(1) X Ray フィルム転写



(2) Flaw Tester 結果



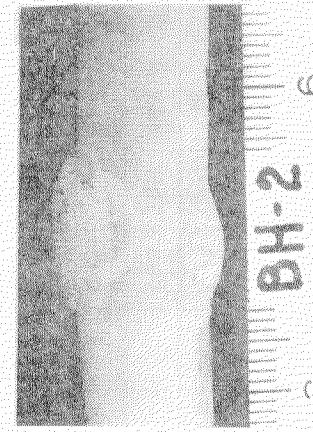
(2) Flaw Tester 結果

(3) 欠陥部マクロ写真



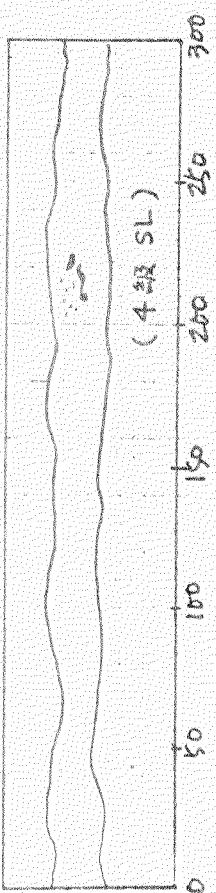
付図 5.5.7-1 実験結果 (No. 1)

(3) 欠陥部マクロ写真

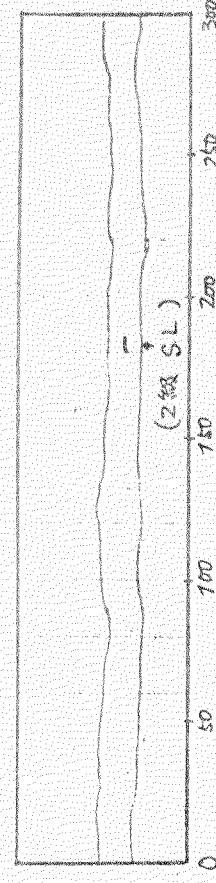


付図 5.5.7-2 実験結果 (No. 2)

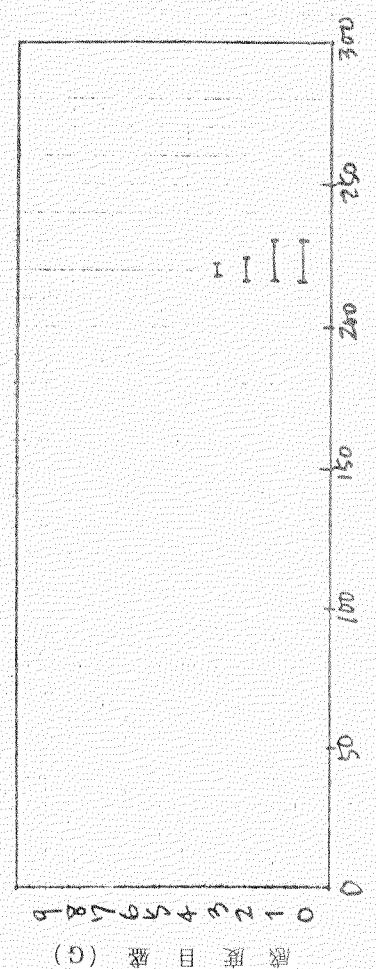
(1) X-Ray フィルム転写



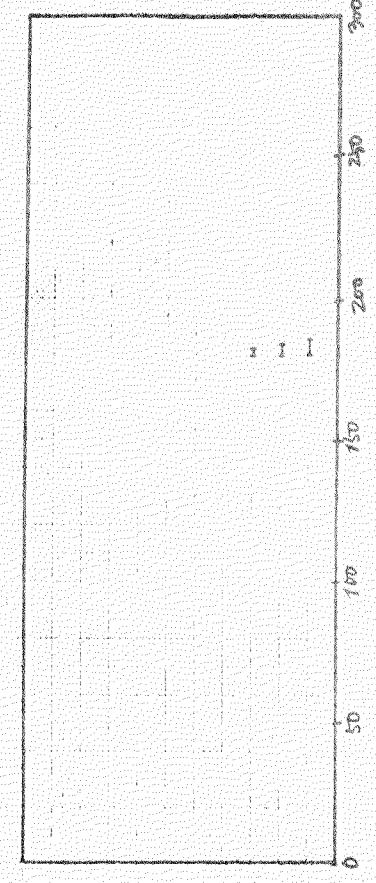
(1) X-Ray フィルム転写



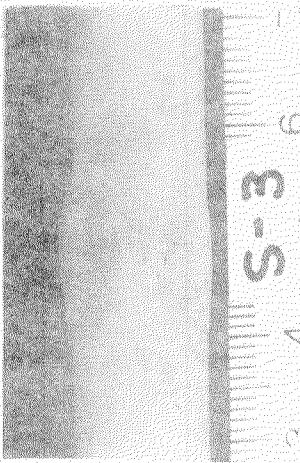
(2) Flaw Tester結果



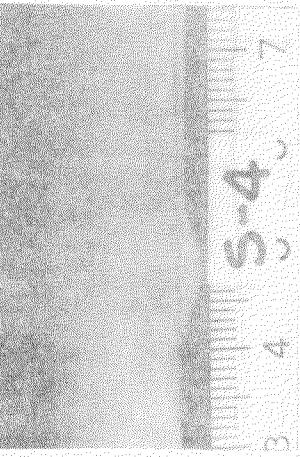
(2) Flaw Tester結果



(3) 欠陥部マクロ写真



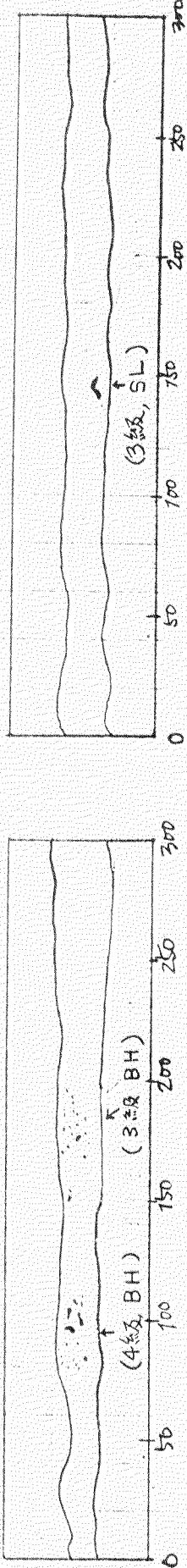
(3) 欠陥部マクロ写真



付図 5.5.7—3 実験結果 (図3)

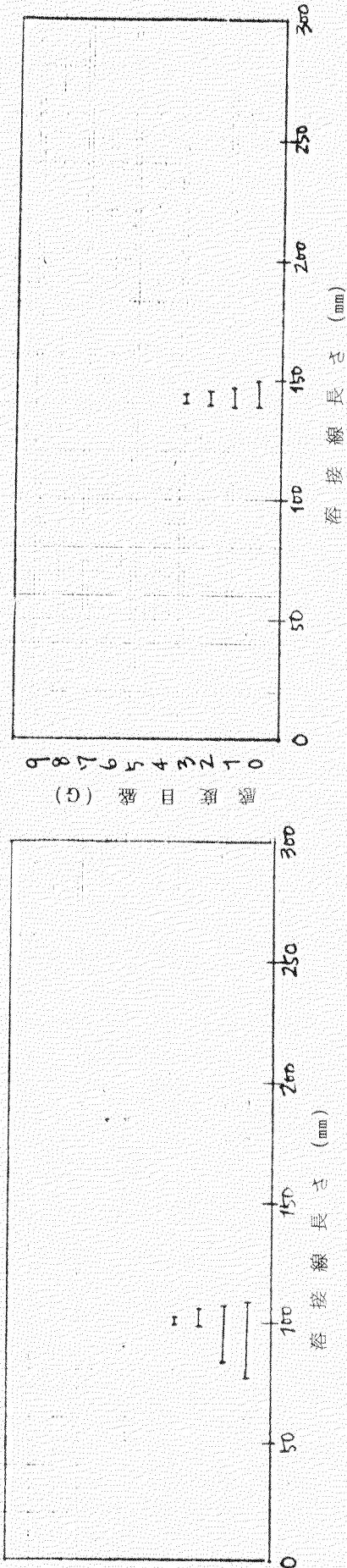
付図 5.5.7—4 実験結果 (図4)

(1) X Ray フィルム転写



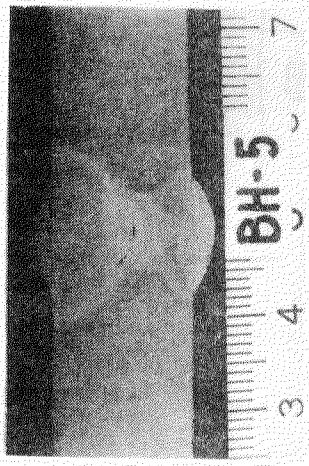
(1) X Ray フィルム転写

(2) Flaw Tester 結果

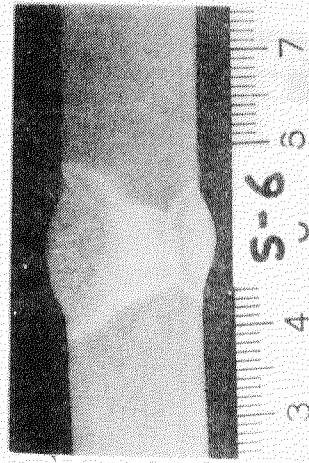


(2) Flaw Tester 結果

(3) 欠陥マクロ写真

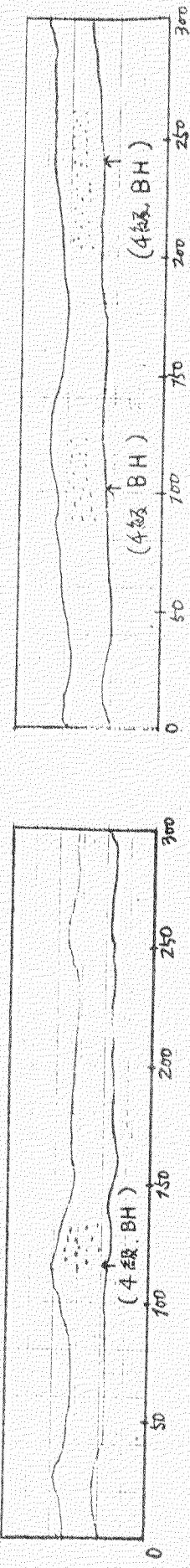


付図 5.5.7-5 実験結果 (No.5)

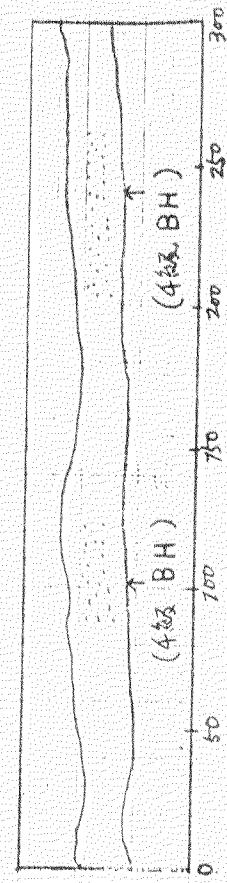


付図 5.5.7-6 実験結果 (No.6)

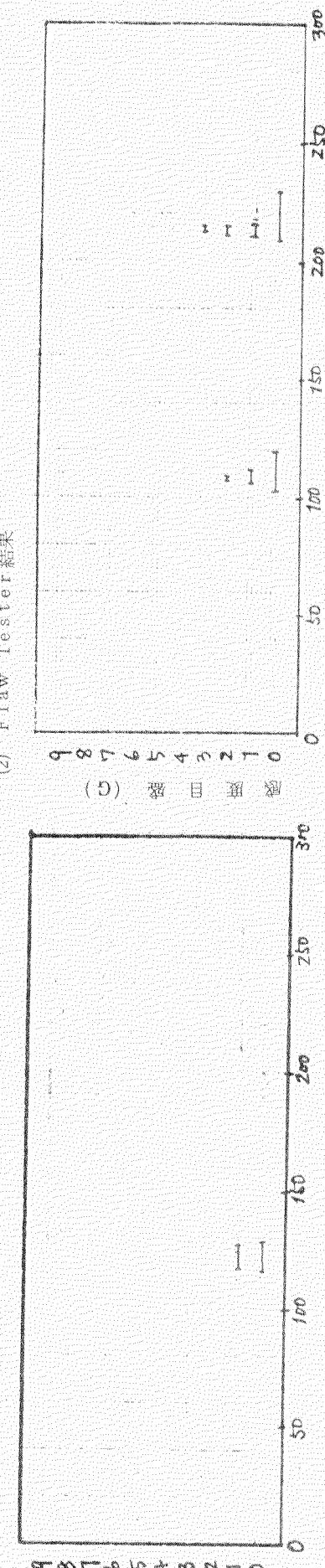
(1) X Ray フィルム転写



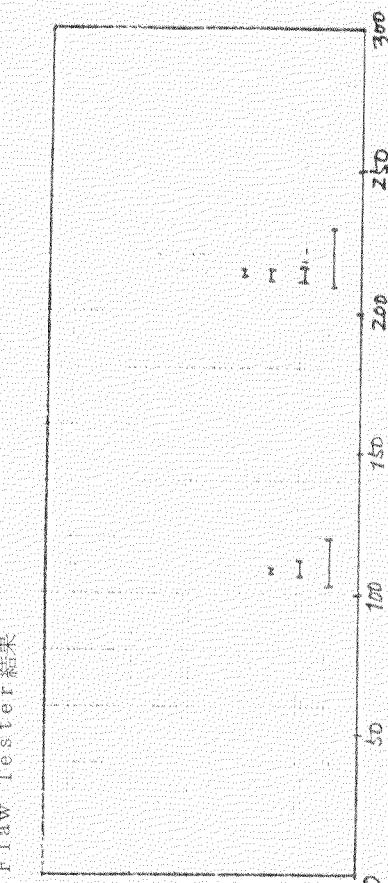
(1) X Ray フィルム転写



(2) Flaw Tester 結果



(2) Flaw Tester 結果



(3) 欠陥部マクロ写真



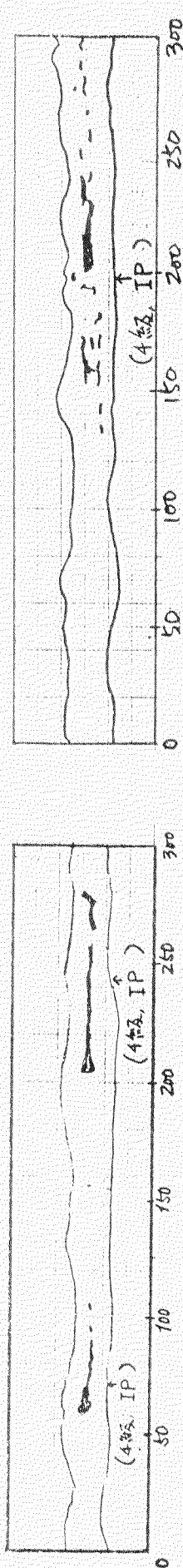
(3) 欠陥部マクロ写真



付図 5.5.7-7 実験結果 (No.7)

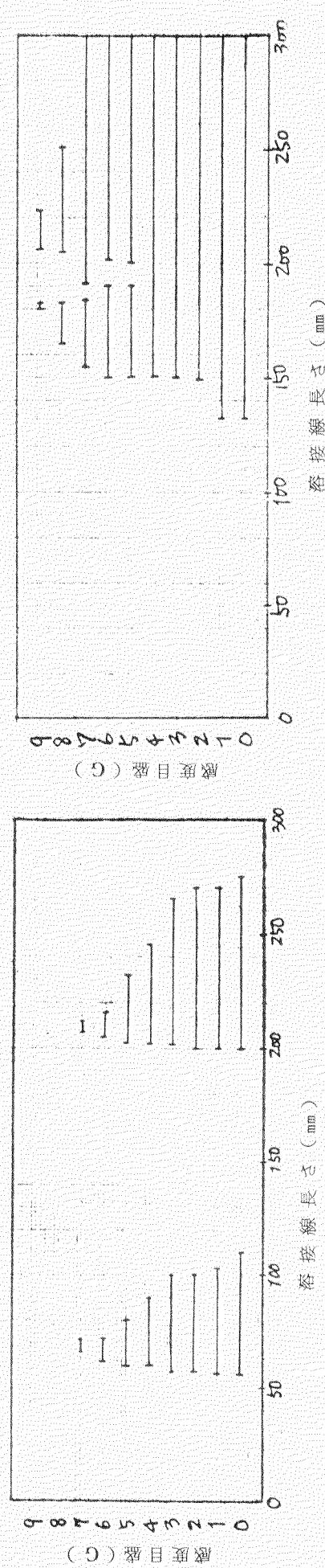
付図 5.5.7-8 実験結果 (No.8)

(1) X Ray フィルム結果

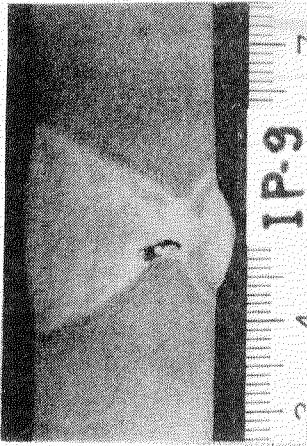


(1) X Ray フィルム結果

(2) Flaw Tester 結果



(3) 欠陥部マクロ写真



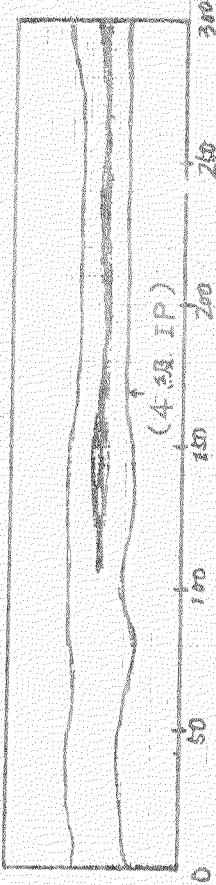
付図 5.5.7-9 実験結果 (No. 9)

付図 5.5.7-10 実験結果 (No. 10)

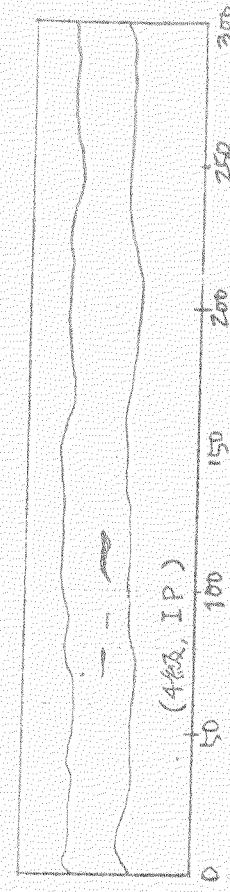


付図 5.5.7-10 実験結果 (No. 10)

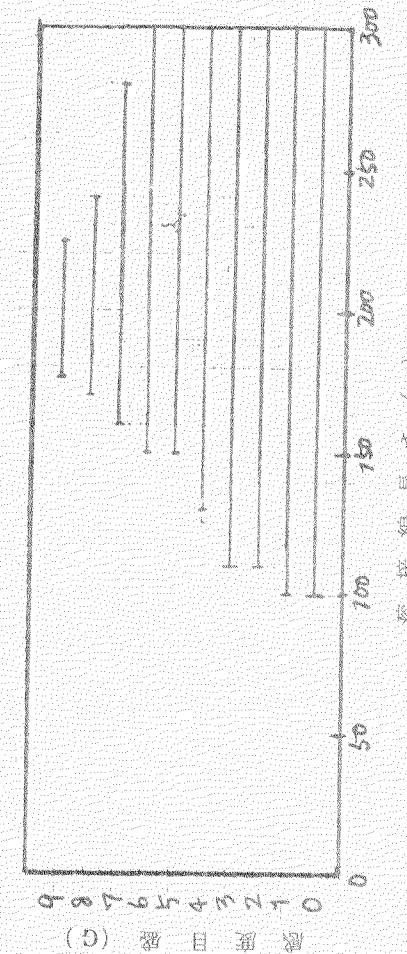
(1) X Ray フィルム転写



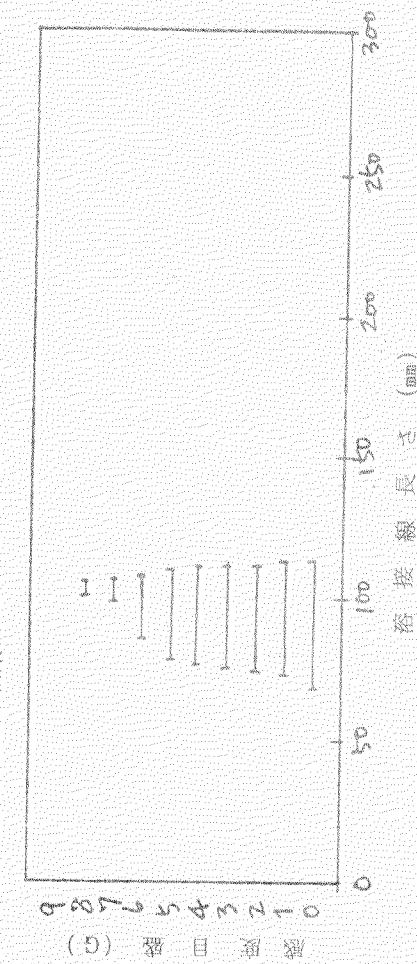
(1) X Ray フィルム転写



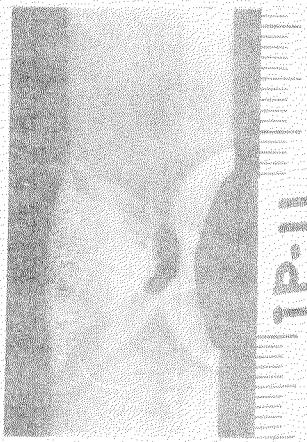
(2) Flaw Tester 結果



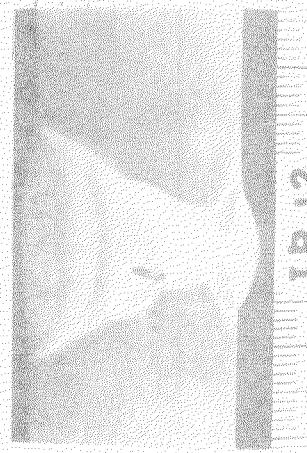
(2) Flaw Tester 結果



(3) 欠陥部マクロ写真

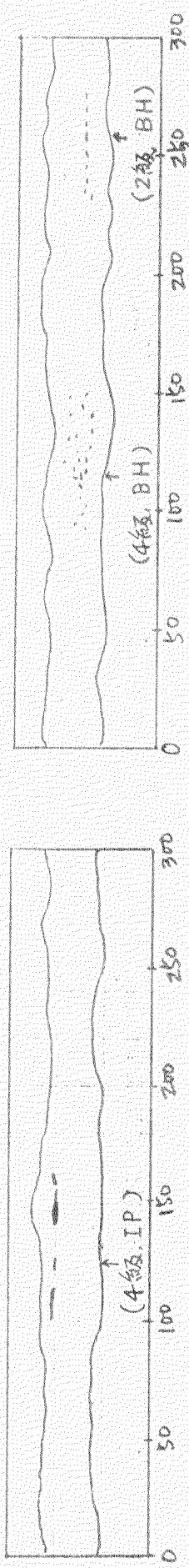


付図 5.5.7-11 実験結果 (No. 11)

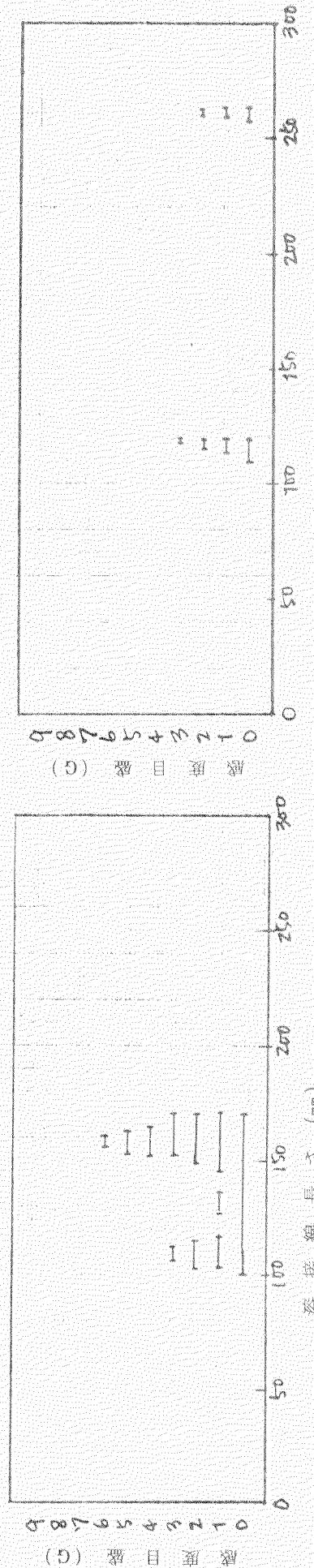


付図 5.5.7-12 実験結果 (No. 12)

(1) X Ray フィルム写真



(2) Flaw Tester 結果

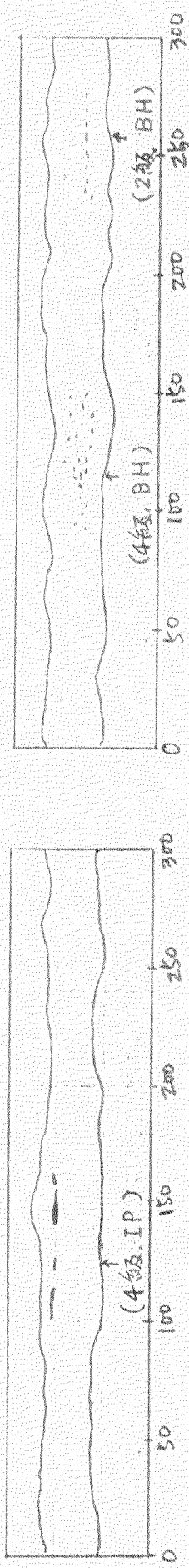


(3) 欠陥部マクロ写真

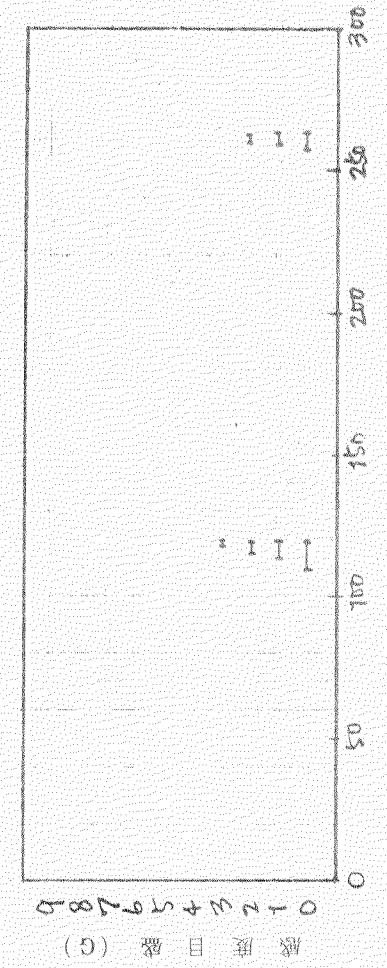


付図 5.5.7-13 実験結果 (No.13)

(1) X Ray フィルム写真



(2) Flaw Tester 結果

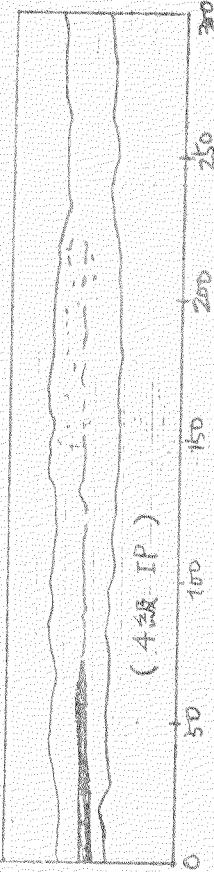


(3) 欠陥部マクロ写真

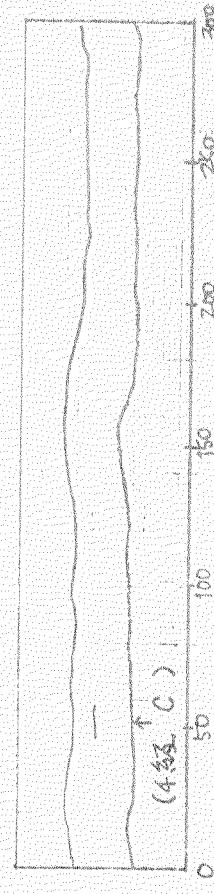


付図 5.5.7-14 実験結果 (No.14)

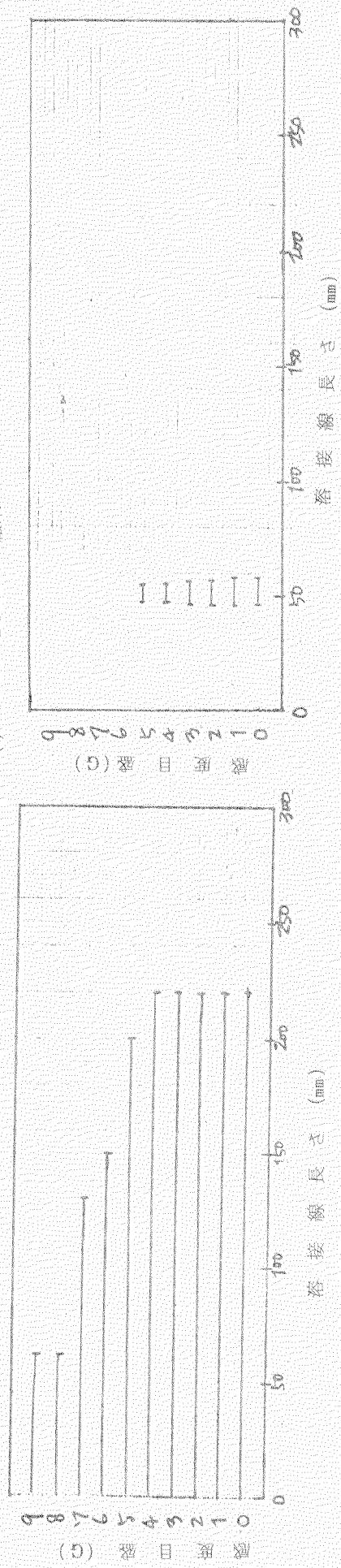
(1) X Ray フィルム転写



(1) X Ray フィルム転写

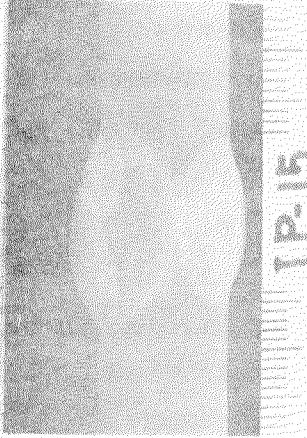


(2) Flaw Tester 結果

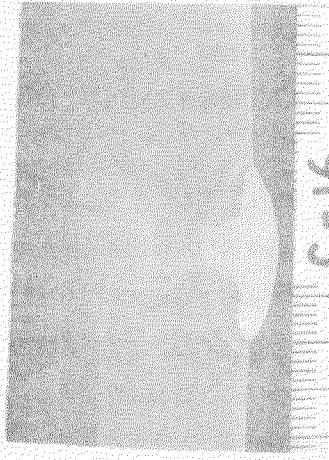


(2) Flaw Tester 結果

(3) 欠陥部マクロ写真



(3) 欠陥部マクロ写真



付圖 5.5.7-15 実験結果 (No.15)

付圖 5.5.7-16 実験結果 (No.16)

6. メインテナンスフリーを考慮した工作欠陥の許容基準

6.1 工作欠陥の許容基準の考え方

6.1.1 工作欠陥の種類

船体構造は工作の見地からみると鋼材を切断して溶接あるいは切断後曲げ加工して溶接し、最後に塗装するという工程から成り立っている。もちろんこの間に運搬工程があるが工作欠陥を生じる可能性が低いので省略する。工作欠陥はこの切断、曲げ、溶接および塗装の4工程内のミスによって発生する。塗装の欠陥は腐食損傷の原因となり、別の機会に検討することとし、本章においては鋼材の切断、曲げ及び溶接の3つの工程内に生じる欠陥について検討する。

切断工程において生じる工作欠陥は切断精度不良に起因する部材間のギャップの過大、ミスカットによるガスノッチ、開先形状不良による溶込不良等溶接内部欠陥につながるものである。曲げ工程において生じる欠陥は、曲げ加工精度不良による目違い、冷間加工によるき裂、ガス炎加工による材質の劣化等が考えられる。溶接工程における工作欠陥は溶込不足をはじめ各種の溶接欠陥、目違い、脚長不足、アンダカット、溶接忘れ、部材の取付忘れ等がある。

一方工作欠陥の発生部位からみると、溶接継手部と継手でない母材部に分けられる。3に説明したとおり、継手部（突合せ継手とすみ肉継手）と母材部とでは損傷発生頻度は継手部の方がはるかに高い。

船舶が工業製品である以上、いささかの欠点もない完全無欠なものとするためにはほう大な費用を必要とするが、必ずしも完全無欠である必要はなく、使用中に損傷が発生することがなければ、修理不要なわらメインテナンスフリーが成り立つわけである。いいかえれば損傷を起きない程度の欠点は欠陥と考えなくても良いわけである。

6.1.2 許容基準の考え方

工作過程において発生した欠点はどの程度のものまでそのままにしておいてよいか。またどの程度のものから補修せねばならないかの基準の設定は難しい問題であるが、判断の基礎となるものは次の3つであろう。

- (i) その欠点が原因でたびたび損傷が起っているか否か。
- (ii) その欠点はどの程度構造物の強度低下をもたらすか。
- (iii) その欠点をなくすことが工作上容易にできるか否か。

上記の三条件を常に考慮しながら欠点の許容基準を考えることにしたい。特に強調すべきことは工作欠陥を皆無にすることは工作精度をきびしくしたり、無欠陥な溶接を強いたり、検査を厳重にすることによってコスト上昇を招いてはならないことである。例えば部材寸法にゆとりをもたせて使用応力を低くおさせることによって同じ欠陥でも損傷とならないことがある。部材寸法を増加することと工作を町寧にすることとどちらを選ぶかはコストの比較できることである。

しかし、工作過程においてごく僅かな配慮で有害な欠陥を殆んど完全に防止できるとすればコスト的にもきわめて有利となることは論をまたない。

損傷の原因となった工作欠陥は溶込不足、溶接忘れ、部材の取付忘れ等アウトオブオーダーとしか思えない工作ミスか又は日本造船学会鋼船工作法委員会で立案制定された鋼船工作法精度（J S Q S）において通常0.3%の頻度でしか発生しないとされている許容限界値を逸脱する精度不良によるもので、いずれも管理ミスによるものと考えられる。

損傷の実績と管理ミスの防止の二つの見地から許容基準を決めるることは、今後の新しい構造様式の船舶に対し普遍性に疑問が残る。したがって強度の面からの検討が是非必要となる。工作欠陥があればどの程度強度が低下するものであるか。

工作欠陥を再現して静的強度試験を行っても著しい強度低下を示すものは少ない。特に溶接内部欠陥は静的強度はあまり低下しない程度のものでも実際には損傷の原因となることがある。脆性破壊の発生に関しては残念ながら工作

欠陥と脆性破壊との関連を再現できるよい試験法が開発されていないため、工作欠陥の許容基準を脆性破壊の見地から定めることが困難である。

疲れ破壊については再現実験も可能であり、健全継手に対し欠陥を含む継手の時間強度の低下率が明らかである。実船の損傷が建造直後より7～8年後に多く発生する点を考えれば、疲れ破壊的な可能性も考慮する必要があろうが、疲れ強度的観点だけから許容基準をきめると安全側にすぎることがあるので注意を要する。

メインテナンスフリー船においては一般の船よりも格段に損傷が少いことが要求される。このためには工作欠陥自身を少くする配慮は当然であるが、工作欠陥と構造上の不連続が重複する場合もかなりあり、工作も単独にすると同時に構造的にも有利になるように配慮するなどトータルシステム的な考え方も忘れてはならない。

6.2 突合せ溶接継手の欠陥の許容基準

6.2.1 溶込不足およびき裂

溶込不足およびき裂は継手強度に重大な影響を与えるので、継手全長にわたるものはもちろん、局部的なものもあってはならない。このためには裏掘り検査の励行と簡易な非破壊検査の励行が望まれる。

余盛付き突合せ継手では余盛止端部の応力集中による疲れ強度の低下に相当する浅い溶込不足は許されると考えられるが、その深さは板厚の5%程度であり、溶込不足の深さの計測は現在の非破壊検査技術では困難な点があるので認めるべきではないと考えられる。ある長さの継手で部分的にある溶込不足も、それからき裂を発生することがあり許容すべきではないと考えられる。

突合せ継手において施工中あるいはその直後き裂を発生することは、軟鋼や50kg/mm²高張力鋼ではまれである。はめこみ溶接など拘束の著しい溶接を行う場合は慎重な施工を行い、き裂の発生を防ぐ配慮が必要である。

6.2.2 プローホールとスラグの巻込み

通常のプローホールとスラグの巻込みは静的強度も疲れ強度も健全継手とかわらないから許容してもよいと考えられる。ただしスラグの巻込みは溶込不足を伴うことがあるので6.2.3の注意が必要である。

プローホールやスラグの巻込みは技師資格を有する溶接工であれば通常の注意すべて防止できる程度のものであり、作業上の問題として注意を与えることがあっても、手直しを要求する必要はない。

6.2.3 共存する内部欠陥

溶込不足、プローホール、スラグの巻込みが1箇所に共存することはあるが、溶込不足がある場合は疲れ強度の低下が著しく許容すべきではない。プローホールとスラグの巻込みの共存は非常識に多くの場合を除き4級程度であっても健全継手と同程度の強度を有し、補修の要はなく許容できる。

6.2.4 アンダカット

アンダカットは表面欠陥で余盛止端部に発生するため重要な欠陥と考えられるが、一般に発生するアンダカットの深さは0.8mm前後のものが多くこの程度のものは余盛による強度低下の影響にかくれてしまう。実際に強度低下につながるのは0.5mmを越えるものであり、J S Q Sに従って0.6L級の外板強力甲板に対し連続するものは0.5mm以上、その他は0.8mm以上のものを欠陥と見なし補修の対象とすべきであろう。

6.2.5 溶接忘れ

溶接忘れは許容できないことは当然である。突合せ溶接では裏掘り忘れ、裏溶接忘れとなる。

6.3 すみ肉溶接継手の欠陥の許容基準

6.3.1 部材組立精度不良によるギャップ過大

T継手の溶接を行うとき部材間にギャップがあると、それが3mm以下であれば溶込みの増大に伴い強度は増加するが、3mmを越えるとビードの形成が困難になり強度が低下する。特に溶接順序が正しく守られず収縮の多い部分があ

とで溶接される場合施工中あるいは施工後にき裂を生じ、建造時発見されないと就航後損傷の原因となることがある。

特に 3.1.2(2)の貫通部は水密、非水密をとわず精度が確保し難いことが多く、構造設計を伴なう損傷防止対策、すなわち押込ロンド方式やカニの目玉型スロットが考案されているが、その実績のほどは明らかにされていない。

また T 継手の部材間のギャップは水洩れや油洩れ（いわゆるツタイ）の原因となり、必要に応じ水切り溶接の完全な実施が必要となる。

パイプ貫通部の周囲のすみ肉溶接もき裂損傷が多く、ギャップが 3 mm を越えて過大にならないように慎重に工作を行なわれなければならない。

ギャップが 3 mm を越える場合にはライナを挿入する方法も規定されているが、新造船の場合は好まれないため切替えることが多い。このとき切替え部の突合せ溶接には欠陥が残りやすく、その溶込み不足から損傷を生じた例もある。

6.3.2 目違い

目違いは損傷実績上は 1.0 t を越える損傷が発生すると考えられるが、強度の低下率から考えると目違いが 1/3 t ~ 1/2 t となると強度は 8 ~ 12 % 低下することが実験的に確認されており、JSQSにおいてもこの範囲を許容限界とし、これを外れるものは 0.3 % の頻度でしかないとされており、問題なく可能である。

6.3.3 脚長不足

すみ肉溶接の脚長は船級協会（日本海事協会）において負の許容差が 10 % まで認められており、これが原因となって損傷を生じた事例もなく、これを厳格にする必要性もないと考えられる。

6.3.4 ピット

ピットは強度低下率は低く無害と考えられるが、きわめてまれに水洩れ、油洩れの原因となることがある。この場合のピットは単独のものではなく群れをなしており、水切り溶接も適切に行なわれていない場合が多く、この種の欠陥は通常の施工管理で容易に防止できる。

6.3.5 アンダカット

すみ肉溶接のアンダカットは構造上の不連続部にある場合損傷の原因となる。したがって構造の改善によってそれらの損傷をカバーすることが第 1 である。アンダカットに対しては JSQS にて 0.8 mm までは許容してもよいと考えられるが、構造の改善が充分でない場合は局部的に注意をはらうべきであろう。

6.3.6 溶接忘れ

溶接忘れは当然許容できない。また水切溶接忘れも忘れてはならない。

6.4 母材部の工作欠陥

6.4.1 溶接による変形

溶接による変形は致命的な損傷に結びつかないが、修理を要する欠陥であり、その判定基準は現在検討中であるが、取敢えず JSQS と SR 127 の結果を入れて図 6.4.1-1 を提案しておきたい。問題はこの溶接変形をどの時期にチェックするかである。プロックの段階で許容範囲内であっても船台塔載後溶接変形が増加し、損傷の原因となることがある。

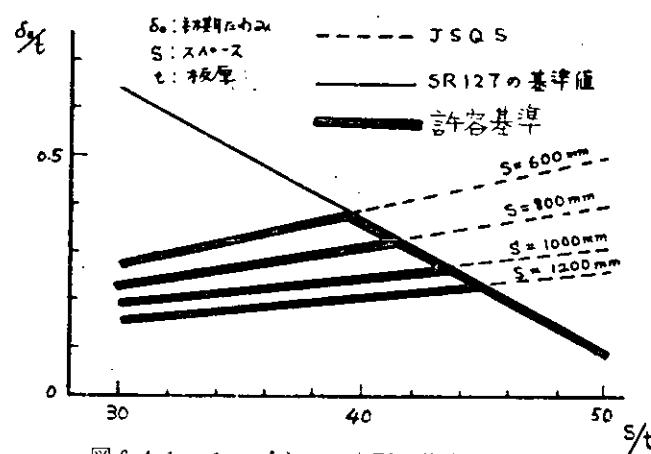


図 6.4.1-1 パネルの変形の許容基準

6.4.2 ガスノッチ

部材の自由端に残るガスノッチはJ S Q Sの基準に従い、シャストレーキの上縁や強力甲板・外板の開口等特に重要な部材はガスノッチは許容されないが、その他は重要度に応じ1～3mmを許容基準としてよい。

6.4.3 取付忘れ・誤作

取付忘れ・誤作は許容されないのが当然である。

7. 結 言

メインテナンスフリー船を指向して就航後工作欠陥による損傷を極力少くするため、工作欠陥の許容限度を溶接継手部、母材部に分けて検討し、溶接部の内部欠陥については溶込不足が許容されないこと、その他の部分についてはJ S Q S Kに従った許容基準が適当であることを述べた。

溶接内部欠陥の許容基準の判定にあたっては疲れ試験結果を重視し、船体構造の荷重条件としては苛酷にすぎるきらいはあるが、メインテナンスフリー船であることと、現在関係方面で採用されている非破壊検査基準を大幅に緩和し得るものであることの両者から考えて、現段階においては適当なものであると思う。

今回の実験は軟鋼に対してのみ行ったが将来は高張力鋼についてもさらに検討することも考えられ、またこの種の工作欠陥を船体構造に作らないまた残さない管理検査システムについても検討が加えられるべきと思われる。