

社 团 法 人

日本造船研究協會報告

第 21 号

昭 和 33 年 5 月

溶接欠陥の非破壊検査による判定基準と溶接強度との
関連性に関する研究（第2報）

..... 第 32 研究部会

A Study on the Relationship between Weld Strength
and Evaluation Standards of Weld Defects
in Non-destructive Testing (Part 2)

..... The 32nd Research Committee

The Report
of the
Shipbuilding Research Association

of Japan,
Tokyo, JAPAN

No. 21

May 1958

第32研究部会委員名簿

委員長	木原 博		
幹事	石井 勇五郎	多田 美朝	
委員	梅住 剛	宇野 九十九	岡崎 正臣
	蒲田 利喜藏	小西 一郎	笠山 徳太郎
	高木 乙磨	富田 圭一	手塚 敬三
	寺尾 貞一	中島 朝太郎	中田 正也
	中村 林二郎	丹羽 登	藤井 義六
	松岡 忠正	舛田 吉郎	山内 俊平
	渡辺 正紀		

Membership of the 32nd Research Committee

Chairman	Hiroshi KIHARA		
Secretaries	Yūgorō ISHII	Yoshitomo TADA	
Members	Gō UMEZUMI	Tsukumo UNO	Masaomi OKAZAKI
	Rikizō KAMATA	Ichirō KONISHI	Tokutarō SASAYAMA
	Otsuma TAKAGI	Keiichi TOMITA	Keizō TEZUKA
	Teiichi TERAO	Asatarō NAKAJIMA	Masaya NAKATA
	Rinjirō NAKAMURA	Noboru NIWA	Giroku FUJII
	Tadāmasa MATSUOKA	Yoshirō MASUDA	Shunpei YAMANOUCHI
	Masanori WATANABE		

Influence of Weld Defects on Mechanical Strength

It is essential for furnishing a criterion by which to qualify or disqualify a weld on the results of its radiographic test that the influence of defects in the weld of a structural steel plate on the mechanical strength be clarified. Therefore, for the past two years, shipyards, universities and research institutes have been engaged in a joint work for clarification of this influence. The first year was devoted to the preparatory study to fabricate a test piece containing necessary defects; a method was worked out to create an arbitrary defects without causing any qualitative change. On this subject a report was already made in No. 18 of this publication.

This year, static tension, static bending, impact-tension, impact-bending and fatigue tests have been carried out with numerous test pieces containing artificial defects mentioned above as well as natural ones. The results are as follows.

1. Static Tests

a) Static tension test

Test were made on welds containing artificial and natural defects, with the results as indicated by Table 1.2, Fig. 1.4, 1.5, 1.8, 1.43 and 1.44. According to these results, for a small value of defectiveness in relation to tensile strength, that is, up to the JIS Class 3 of defectiveness, or up to 1% area ratio, any harmful influence is hardly observable. Beyond this limit of defectiveness, the influence becomes evident, reducing the strength at a relatively high rate. Moreover, tensile strength in relation to effective area also tends to full, as defectiveness increases.

Meanwhile, presence of defects sharply reduces elongation.

b) Static bending test

Cracking angle in the bending test depends considerably on the location of defects (Table 1.6). Fig. 1.45 and 1.46 compile the statistical data on pieces with natural defects; these data indicate that the influence hereby is similar to that in the static tension test. Fig. 1.38 and Table 1.5 show the required energy of the propagation of crack in the bending test.

2. Impact Tests

a) Impact tension test

Impact tension tests were carried out on test pieces containing various kinds of defects, with the results as indicated in Fig. 1.6 and 1.9. The results show that for smaller values of defectiveness, strength sharply decreases with defectiveness, and for less than 20% of defectiveness, strength remains constant. In this case, presence of defects, particularly higher value of defectiveness, prevent heavy reduction of area.

b) Impact bending test

In Fig. 1.13~1.24 and 1.33~1.36, the results of impact bending tests on a small and a large test pieces are shown. According to the results, in the case of porosities the absorbed

energy is rather large than in the case of their absence, and the transitional temperature falls; in the case of slag inclusion or incomplete penetration, vice versa.

3. Weld Defects and Fatigue Strength of Welded Joint

a) The relation between defects revealed by radiographs and pulsating tension fatigue strength have been investigated with butt welded joints being reinforcements machined off. Testing was conducted at three sites. The first site was for investigation of the relation between the defects conforming to JIS Z 2341 and fatigue strength; the second site for the relation between the defects belonging to IIW group and fatigue strength; and the third for the relation between artificial blow-holes (JIS class) created in a thick plate and fatigue strength. The test results are compiled in Fig. 2.6, 2.10, 2.20, 2.22, 2.23, 2.24, 2.31, and 2.33. As indicated by Fig. 2.22, presence of defective area, however small it may be, will sharply deteriorate fatigue strength. Accordingly it seems that, so far as fatigue strength is concerned, JIS classification which is more elaborate in classifying small retractive areas than IIW counterpart is more reasonable than the latter. Differences depending on plate thickness are not so great in the range of the present test.

b) The propagation of cracks from defects in the process of a fatigue test has been observed radiofluoroscopically in detail by means of an image-intensifier and directly radiographed at intervals. These observations have furnished valuable informations on the influence of defects on fatigue cracks.

4. Investigations on the Relation between Weld Defects and Accidents in Actual Ships

a) Defect distribution in welds of actual ships

On the basis of radiographic test results, 90 vessels constructed by 11 typical shipyards in Japan in the period 1956~58 have been investigated for the extent to which the welds in actual ships contain hidden defects. The results are classified in Fig. 3.2~3.4 in accordance with the class specified by JIS Z 2341. Fig. 3.5 and 3.6 represent the relation between types of defects and classified results. About 1/3 of the results of manual welding before they are trimmed correspond to lower than Class 4 of JIS, which has been mainly due to blow-holes and slag inclusions.

Another investigation was undertaken on 15 foreign vessels. They belong mostly to the days before X-ray inspection came into standard practice, and on the average the welds in them were out of JIS classes. Since the grade of these welds is hard to indicate, their photographs, exemplifying five vessels, are given side by side with reference photographs classified by JIS in Fig. 3.7~12.

b) Influence of weld defects on strength in the test on actual ships.

As the relation between damage and defect in actual ships was not obtainable, a destructive test, in which a simplest cylinder shape welded structure was blown up with explosives, was used to investigate the relation between destruction and defect. According to the results, destruction was divided into the following groups. One represents cracks developing along the bead on the junction of bead and base metal in the longitudinal joint and accounts for about 70% of failures; another represents cracks developing along the entire length of circular joint, independently of longitudinal joint, and accounts for about 30%. Of the latter group, about 60% are cracks originating from circular beads; the rest are ones originating from undercuts, and arc-striken areas. Even in the case of cracks

starting from beads, no clear-cut relation with evaluations by radiographic films could be established. It means that no direct predictions on the results of test pieces can be made with as-weld structures.

5. Principles for Formulation of Evaluation Standards

Fig. 4 shows influences of defectiveness on different types of loads. Fig. 4.66 indicates the applicable range of defects to actual structures. According to this, impact tensile strength and fatigue strength are highly susceptible to defectiveness and unsusceptible to static tension test. As the bending test is heavily affected by the location of defects, the curve in the Figure should be allowed a considerable band; in any case the influence varies with the type of loading. Consequently evaluation standards for welded structures should be formulated by each type of loads.

However, structures are in general as-weld, therefore their strength seems to differ substantially from that of a test piece with the reinforcement machined. For this reason it is advisable that more of the investigative results of testing with actual objects should be taken into account in drafting evaluation standards.

溶接接欠陥の非破壊検査による判定基準と 溶接強度との関連性に関する研究

(第 2 報)

目 次

第1編 溶接欠陥と継手強度の関係.....	(1)
第1章 人工欠陥を有する溶接部材の試験.....	(1)
§ 1. 機械試験	(1)
§ 2. 機械試験の結果	(2)
第2章 自然欠陥を含有する試験片についての試験.....	(24)
第2編 欠陥と溶接構造の疲労強度.....	(31)
§ 1. 溶接突合せ継手の JIS 等級と疲労強度.....	(31)
§ 2. 溶接突合せ継手の IIW 等級と疲労強度	(44)
§ 3. 板厚の大なる場合の欠陥と疲労強度	(52)
§ 4. 総 括	(58)
第3編 実船における溶接欠陥と事故との関係調査.....	(59)
第1章 実船建造におけるX線検査結果の調査.....	(59)
§ 1. 本邦造船所の溶接部分の調査	(59)
§ 2. 総 括	(63)
§ 3. 外国造船所の溶接部分の調査	(64)
第2章 実物試験における溶接部欠陥の強度に対する影響.....	(72)
§ 1. 破壊状況と溶接部欠陥との関係	(72)
第4編 判定規準作成に対する原則.....	(77)
第1章 欠陥度の定義及び強度上からの判定規準作製に対する原則.....	(77)
第2章 溶接技術の水準並びに実物試験より結果する判定規準作製に対する原則…	(80)

第1編 溶接欠陥と継手強度の関係

緒 言

溶接継手の中に含まれる各種の欠陥が、継手強度にどの様な影響を及ぼすか、と云う事を研究する為には、含欠陥試験片について機械試験を施せば宜い。この研究を充分な再現性を以て定量的に取扱う為には同種の同様な欠陥を含藏する試験片を多数に作成して、系統的な実験を行うべきである。

この様な要求を満たす意味で、研究第1年度に於ては、人工的に欠陥を作成して、その種類、数量を制御する方法を研究したのであって、その結果については昨年中間報告書に述べた所である*。

第2年度に於ける研究は、かくの如く作成された、人工欠陥を含藏する試験片について機械試験を施して、その強度的意義を明かにすると云うことであつて、昭和32年度にこの試験研究が行われたのである。施した機械試験は、静的及び衝撃引張り試験、静的及び衝撃曲げ試験、それに疲労試験であつて、この外、拘束試験体としてH型による試験と、カーン型試験片を用いての実験が行われた。之等の機械試験は、夫々、無欠陥試験片と、スラグインクルージョン、プーアペネットレーションおよびプローホールの欠陥を含藏する試験片について行われたのである。又一部、亀裂を有するものについても試験が行われた。

尚、自然発生した欠陥部より試験片を截り出して、之について試験を行う膨大な実験も行われた。

更に JIS 規格、判定基準案に採用されている等級の強度的意義についても検討を加えるべく努力し、等級に対する強度曲線も一部作成した。

之等の実験・研究の成果は所期の目的に充分沿うものではあるが、更に同種の実験データーを累積して、統計的取扱いが可能となる様にすれば完璧と云えるであろう

第1章 人工欠陥を有する溶接部材の試験

§ 1. 機 械 試 験

溶接継手中に存在する欠陥の強度的意義を明らかにする為、定量的に再現性のある欠陥を作成する方法が研究され、之について31年度に研究された結果は中間報告に既にのべた通りである。実際に試験を行うにあたつては、之等人工欠陥を作成した溶接試験片をX線で透過検査し、自然発生欠陥の場合の検査フィルムと比較して、余り不自然でないと云うことを確めた後、機械試験の為の試験片を截り出した。勿論、このフィルムにより、どの位置から試験片を切り出したらよいかと云う事も、誤りなく行えるのである。

第1報にのべた blow hole, slag inclusion, poor penetration の欠陥の外に、人工亀裂とアンダーカットの欠陥も追加して行うこととした。

* 日本造船研究協会報告 第18号（昭和32年5月）p. 56～

実施した機械試験は Table 1・1 の如くである。

Table 1・1 機 械 試 験

引張り試験	静的引張り試験	大型試験片 小型試験片
	衝撃引張り試験	
曲げ試験	静的曲げ試験	大型波験片 小型試験片
	衝撃曲げ試験	
疲労試験	大型	大型波験片 小型試験片
	小型——シェンク曲げ試験	

之等の試験は何れも blow hole, slag inclusion, poor penetration の 3 種の欠陥について行い、一部亀裂試験片についても行つた。

この外、抱束応力による欠陥の破壊スタートに関して、H型試験片による実験と、亀裂伝播状況とエネルギー値を観測する為のカーン型試験片による実験も行われた。

又、アンダーカット欠陥を作成した試験片については、Table 1・1 に示す全般の試験を行つてい る。

§ 2. 機械試験の結果

2・1 引張り試験結果

(a) i) 静的引張り試験

試験片の材料は造船用鋼板で、溶接棒 4~5 mmφ の B-17 を用いて溶接した。機械試験片の作成と、試験要領は次の如くである。即ち、

静的引張り試験片は第 1 図に示し、下記の如き 4 条件の下に試験を行つた。

- (a) 各種人工欠陥を有するもの（但し 切欠の位置は溶接部中央と中央部より 2 mm はずれたもの）
- (b) 各種欠陥を有するも切欠なしのもの
- (c) 溶接部に欠陥なくも切欠を有するもの
- (d) 溶接部に欠陥なく又切欠を有しないもの

以上の 4 種の比較を行う事により、切欠が溶接部に欠陥のない場合及び欠陥のある場合は及ぼす影響について検討を加える事が出来る。尚欠陥の種類は次に示す。

- イ) 無欠陥
- ロ) Blow hole (JIS 6 級程度)
- ハ) Poor penetration (JIS 6 級程度)

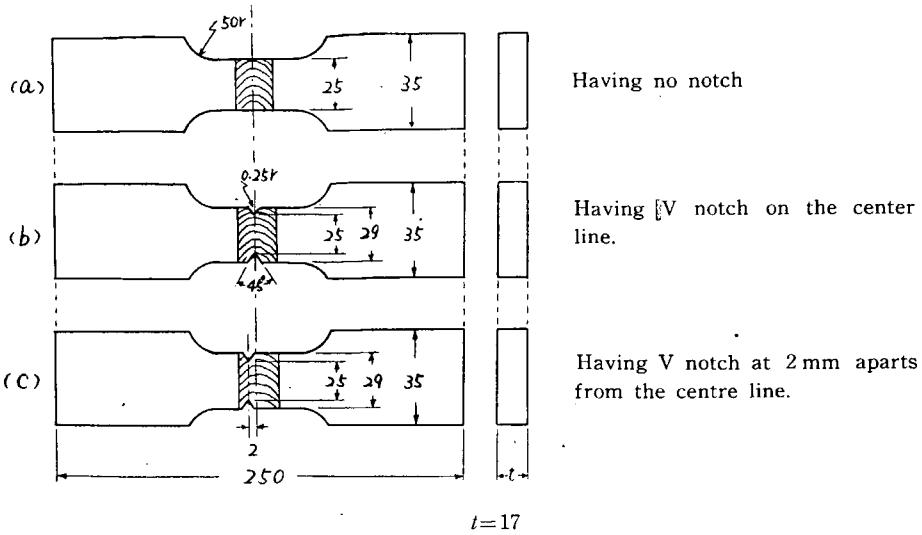


Fig. 1-1 The shape of tensile test piece

二) Slag inclusion (JIS 6 級程度)

である。

又一方 crack の影響については、完全溶接部と crack を有する溶接部の比較を行つた。この場合は試験片は JIS 1 号試験片によつた（板厚 34 mm）。

欠陥の位置及び試験片マークは Fig. 1-2 に示す。

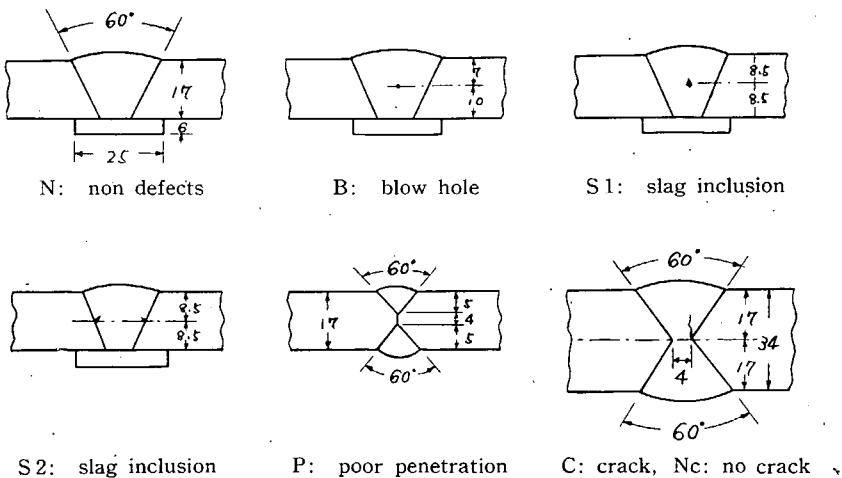


Fig. 1-2 Defects in the specimens and their sign.

ii) 試験結果

試験結果は Table 1-2 に示す。

Table 1-2 靜的引張試験結果

項 目 欠陥種類	試験 No.	切欠無し		切欠有り		切欠有り (中心より 2mmズレ)	
		引張強度 (kg/cm ²)	伸び (%)	引張強度 (kg/cm ²)	伸び (%)	引張強度 (kg/cm ²)	伸び (%)
板厚 17 mm	無欠陥 (N)	1 46.4 (参考) 2 46.5	24.5 (W) — (n)	49.4 (参考) 50.0	18.0 (W) — (n)	48.7 49.5	19.0 (W) — (n)
	Blow hole (B)	1 47.9 2 47.0	— (n) — (n)	50.1 50.1	— (n) — (n)	50.8 51.6	— (n) — (n)
板厚 43 mm	Slag (No. 1)	1 46.3 2 46.1	— (n) — (n)	48.5 50.7	— (n) — (n)	46.0 49.1	— (n) — (n)
	Slag (No. 2)	1 44.1 2 45.9	— (n) — (n)	47.7 47.3	— (n) — (n)	49.5 47.3	— (n) — (n)
Poor penetra- (P)	1 40.4 (参考) 2 41.6	12.0 (n) 13.0 (n)	44.5 (参考) 44.7	1.30 (n) 1.50 (n)	41.3 (参考) 41.7	12.0 (n) 14.0 (n)	
	無欠陥 (N')	1 47.3 2 48.1 3 48.2	23 (M) 24 (n) 23 (n)				
中亀裂	1 46.9 2 45.2 3 47.2	10 (W) 10 (n) 12 (n)					
	1 46.6 2 46.9 3 46.7	25 (M) 24 (n) 11 (W)					

- 注:
- 1) 板厚 34 mm 試験結果中の中亀裂とは深さ 4~6 mm のものを云う。
 - 2) 板厚 34 mm 試験結果中の小亀裂とは深さ 2~3 mm のものを云う。
 - 3) Table 1-2 の伸び欄中の () 内の W は熔接部より破断を示し、M は母材に於ける破断を示す。
 - 4) 伸びの G.L. は、板厚 17 mm はビードより夫々 1.5 mm 外れた個所で、板厚 34 mm に対しては 200 mm とした。又 17 mm に就いては参考的に測定した。

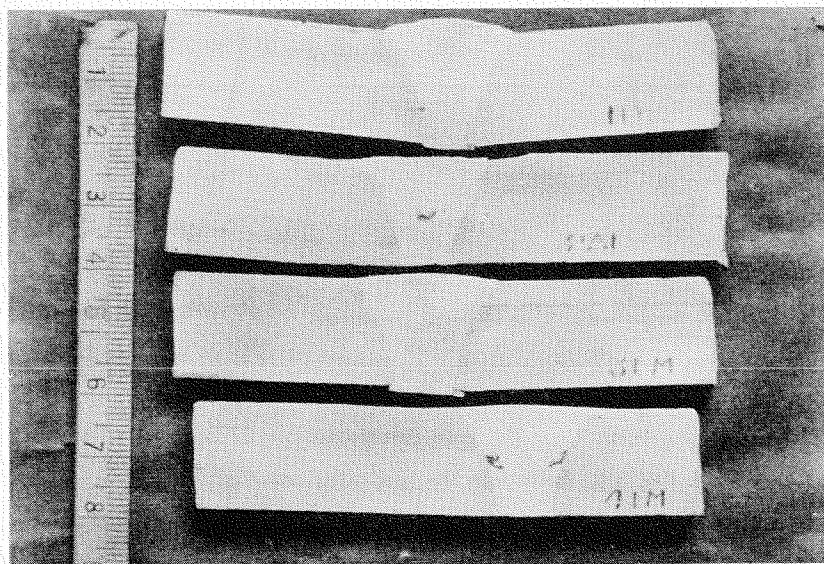
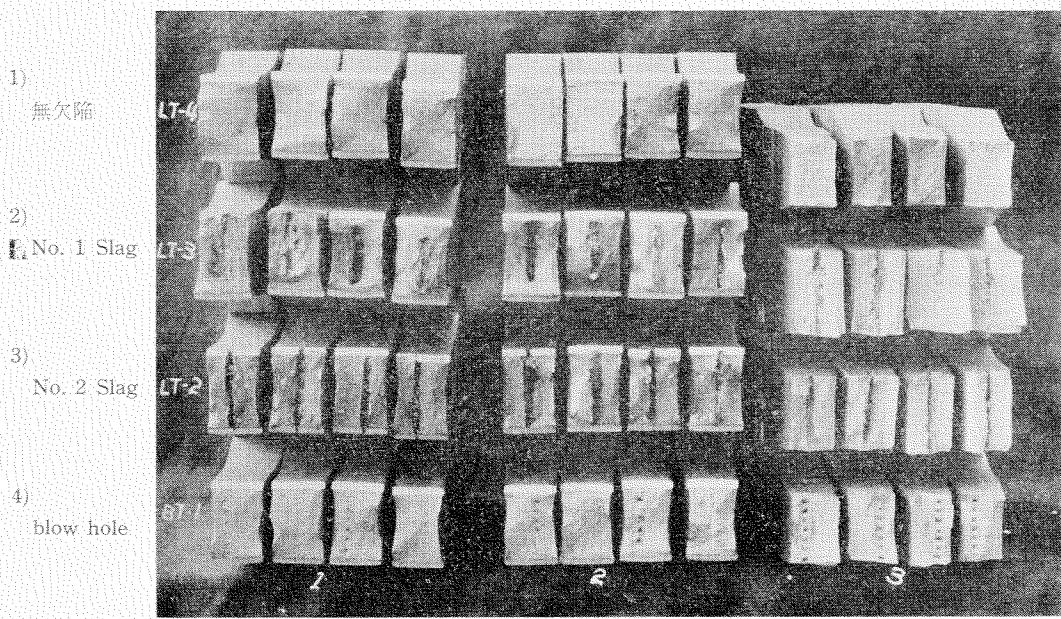
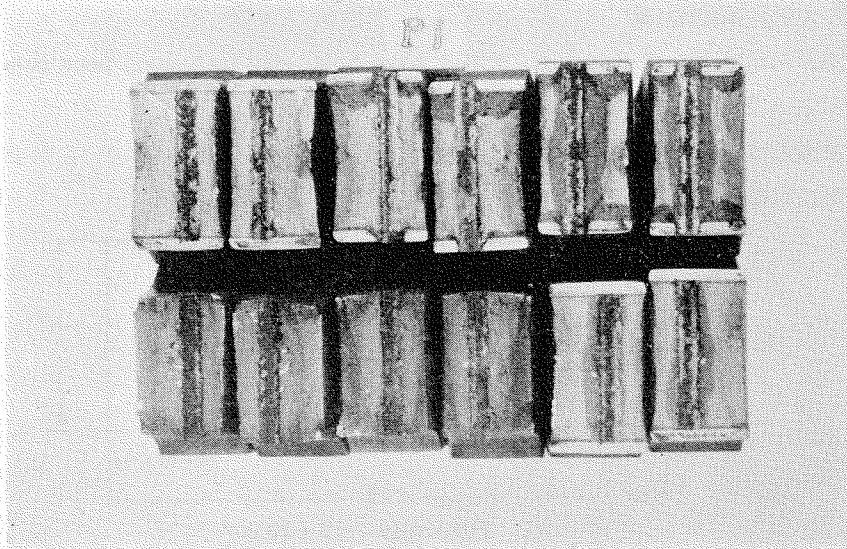


Photo 1-1 Micro-etched cross section of welded specimen having artificial defects of slag line.



2 mm ずれた位置に切欠を有するもの
中央部切欠を有するもの
切欠のないもの

poor penetration



2 mm ずれた位置
中央部切欠
切欠のないもの

Photo 1-2 Macroscopic photograph of fractured surface.

以上の試験結果より 17 mm 板厚の試験片の引張強度は、無欠陥、blow hole、No. 1 slag inclusion^{*}等、何れも差は認められないが、poor penetration と S2 slag inclusion に於ては若干引張強度が低下している。

又切欠を入れた場合と無い場合とでは、切欠が無い方が引張強度が低く現われている。

Photo. 1・1 に欠陥の状況を示す。Photo. 1・2 は引張試験後の破断状況を示したものである。

板厚 34 mm の試験片についての 無欠陥と亀裂の試験に於ては、引張強度が無欠陥の場合に比し、亀裂の方が大小にかかわらず稍々低下している。一方伸率に於ては、無欠陥は 20% 以上の伸びを示しているが、亀裂を包含するものは大きく伸びの低下をきたしている。要するに、静的引張強度のみについては、此の程度の欠陥に対しては引張強度は大差ない。板厚 24 mm 材の亀裂欠陥試験片に対しての、伸率の比較は欠陥の大小に左右される。引張強度は欠陥度により若干の影響がある。伸びに於ては相当の変化を来たすので注意を払う要がある。

(b) 衝撃引張り試験

試験片材料は、板厚 17mm および 23mm の造船用鋼板で、その成分は次表の様である。

Table 1・3 使用材料化学成分

材料	成 分	C	Mn	Si	P	S
17 mm		0.17	0.55	0.02	0.024	0.025
23 mm		0.12	0.59	0.08	0.020	0.026
B-17 { 4 mmφ 5 mmφ		0.09	0.52	0.07	0.010	0.021
		0.09	0.45	0.08	0.025	0.012

試験片については

i) 大型引張衝撃試験

試験片形状は Fig. 1・3 に示す。欠陥は blow hole, slag inclusion, poor penetration とし、欠陥作成法は Fig. 1・1 と同様である。

試験温度は +20~−20°C 迄とし、各種欠陥の破断による吸収エネルギーに対する変化を求めると共に断面収縮率との関係に就いて測定を行つた。

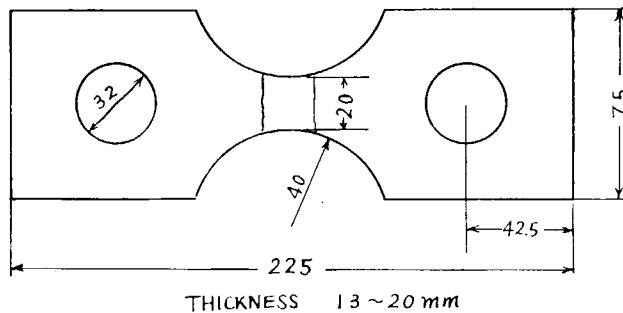


Fig. 1-3 大型引張衝撃試験片

ii) 大型引張衝撃試験の結果

欠陥の種々は母材、無欠陥(1級) blow hole (4~5級), poor penetration, slag inclusion (6級) 等のものとして作成し大型引張衝撃試験を行つた。試験温度は +20, 0, −20°C の 3 点とした。試験結果は Fig. 1・4, Fig. 1・5 に示す。Fig. 1・4 は 15 mm 板厚を用いた場合で、Fig. 1・5 は 20 mm を用いた結果である。

Fig. 1・4, Fig. 1・5 の試験結果より、母材が引張破断吸収エネルギーが大で、次に無欠陥, blow

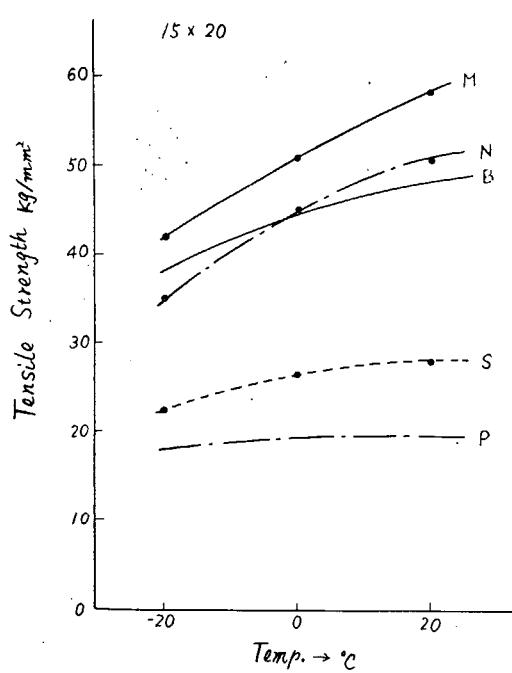


Fig. 1.4

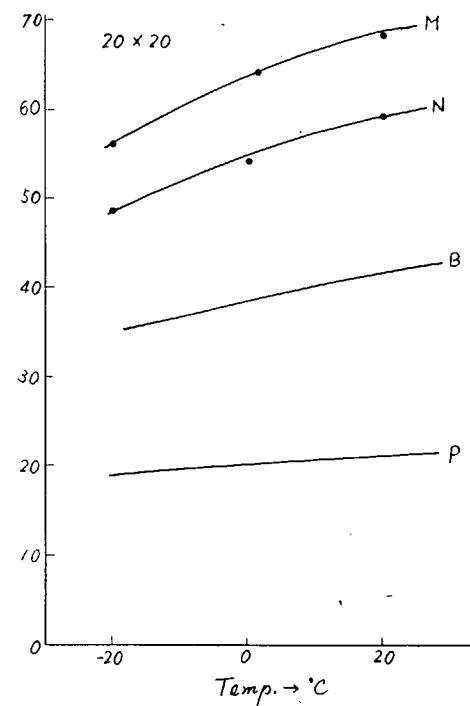


Fig. 1.5

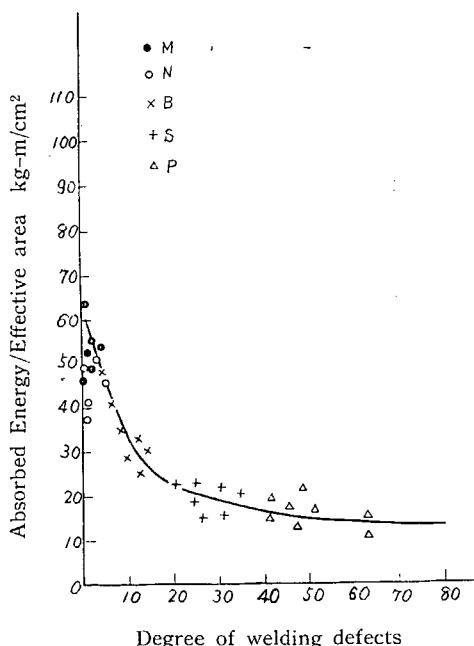


Fig. 1.6 The result of impact-tension tests.

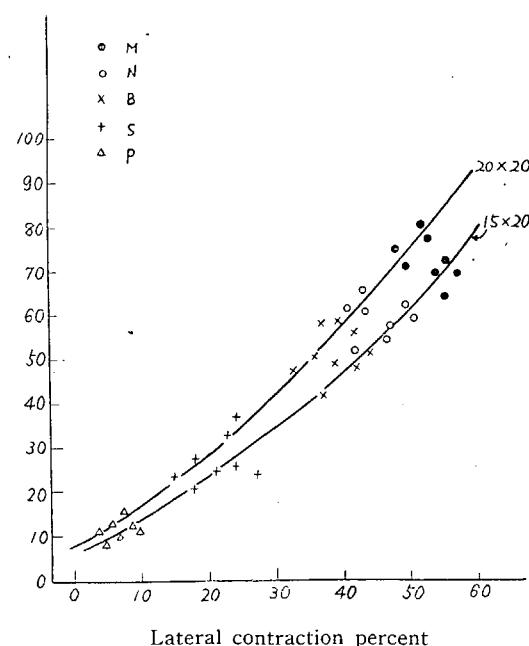


Fig. 1.7 The results of impact tension tests.

hole, slag inclusion, poor penetration の順に吸収エネルギーは低下している。しかし Fig. 1・4, Fig. 1・5 に於いて母材, 無欠陥, poor penetration の吸収エネルギーの値は板厚に対する差は現われていないが, blow hole に就いては差が認められる。これは内部の欠陥が同一数であつても板厚が異なる為め、破断面積に対する欠陥面積の比が違う為と考えられる。

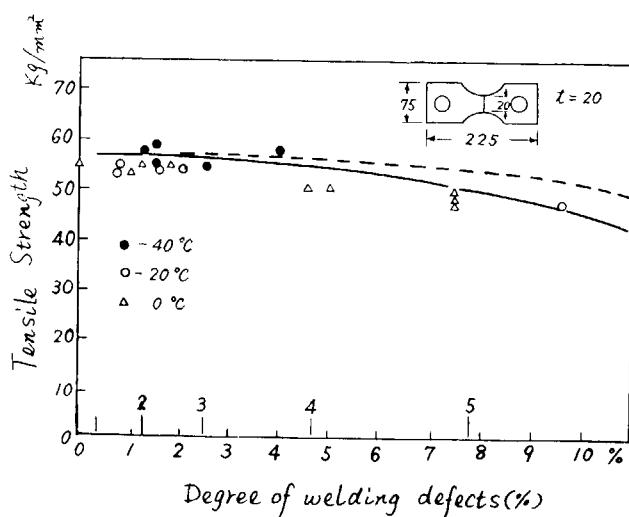
次に Fig. 1・6 には破断吸収エネルギーと破断面の収縮率と欠陥度数の関係に就いて試験を行つた結果である。

この結果から、破断面収縮率は blow hole, 無欠陥の差は若干有るが大差は認められない。slag inclusion, poor penetration 等について非常に少い。参考迄に吸収エネルギーと欠陥度数で現わした結果を Fig. 1・7 に示す。欠陥度数とは次式により計算される。

$$\text{欠陥度数 } (\eta) = \frac{\text{欠陥の力の直角方向に於ける断面積}}{\text{試験片断面積}} \times 100 \text{ (%)}$$

溶接部の欠陥で今回作成し試験に供した欠陥度数は、母材、無欠陥は 0% であるが、blow hole は 8%, slag inclusion 19%, poor penetration に於いては 40% 程度のものであり、欠陥度数が大となるにつれて破断吸収エネルギーが低下する傾向にある。

又欠陥度数が 30% 程度以上になると吸収エネルギーは平行に近くなる。Fig. 1・8 は欠陥と静的強度の関係、Fig. 1・9 は欠陥と吸収エネルギーの関係である。又 Fig. 1・10 は断面収縮率を欠陥に対して plot したものである。



--- は有効断面積に対するもので O. Mass によればこれは一定になる筈であるが僅か欠陥度が大となれば低下する

Fig. 1-8 溶接部欠陥度と静的強度

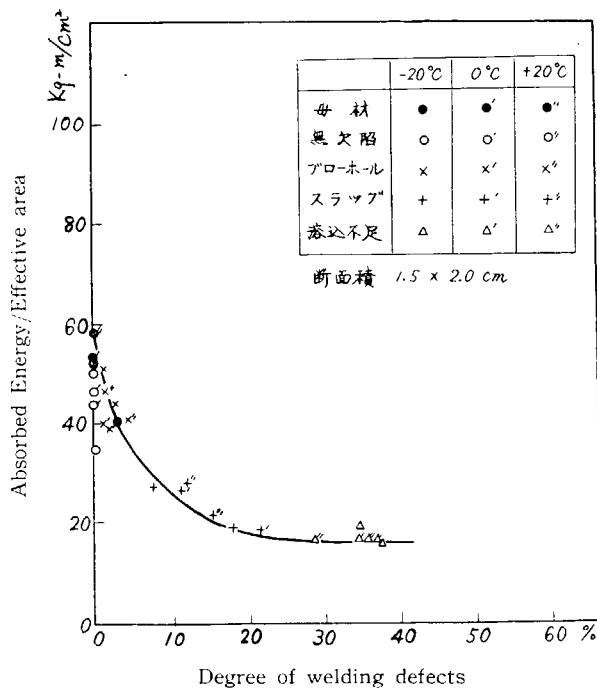


Fig. 1-9 各種欠陥の破断に要するエネルギーに対する影響

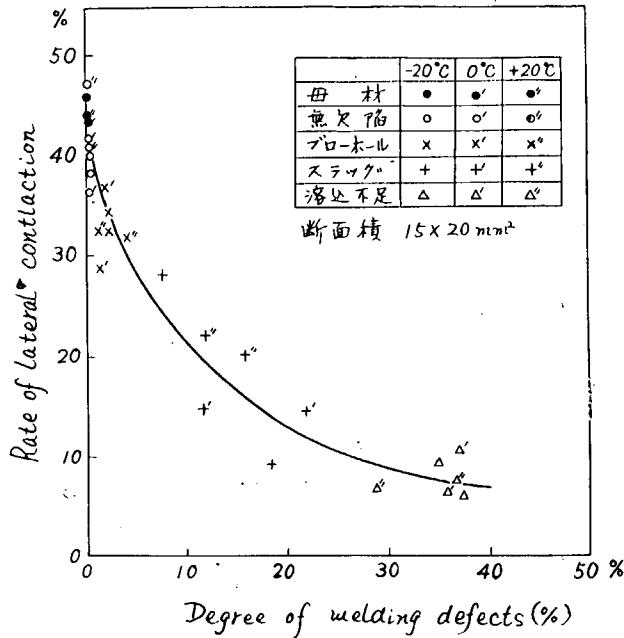


Fig. 1·10

iii) 小型引張衝撃試験

Fig. 1·11 に示す如きシャルピー型引張衝撃試験片の中心部に中の穴をドリルにて穿孔し、常温にて引張衝撃試験を行つた。

試験片は標準型のもので、上図に示す如きものである。

iv) 小型引張衝撲試験結果

試験結果は Table 1·4 に示した、試験結果によると blow hole 欠陥 (12 mm ϕ) を包含する吸収エネルギーは若干低い様であるが、個々の値のバラツキから考えて、この程度の値は試験誤差範囲内に入るものと思われる。

又破断面より調べても blow hole は無く完全な溶接部で破断している。以上の如くこの試験結果からは blow hole の影響は引張衝撲試験には現われない様である。

Table 1·4 小型引張衝撲試験結果

試験片種別	吸収エネルギー kg-m	平均吸収エネルギー kg-m	試験片種別	吸収エネルギー kg-m	平均吸収エネルギー kg-m
完全溶接部材	8.52		含ブロー・ホール材	6.41	
"	5.49		"	8.05	
"	6.67	6.86	"	5.37	6.37
"	6.48		"	6.52	
"	7.16		"	5.49	

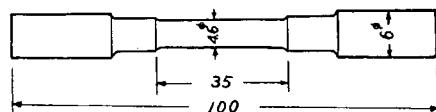


Fig. 1·11

2・2 衝撃曲げ試験

(a) シャルピー V ノッチ衝撃曲げ試験（小型衝撃曲げ試験）

i) 試験片材料及び熔接棒は 4. 1 (b) と同様である。試験片の截出しあは次の如き要領で行つた。

Fig. 1-12 (a) 図に示す如き試験片に B-17 熔接棒を用いて熔接を行い、熔接中に人工的に blow hole, slag inclusion, poor penetration の欠陥を位置及び大きさを変えて作成した。又試験温度は +40~-80°C 迄 20°C きざみにて行い、V ノッチシャルピー遷移温度を求めた。

試験片採取は試験片の X 線透過試験を行い欠陥の位置を確認してから試験片の採取を行つた。Fig. 1-12 (b) の如し。

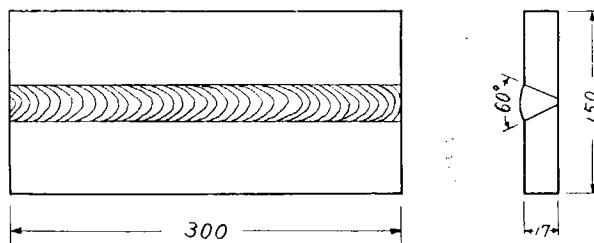
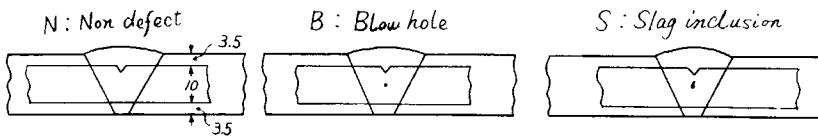


Fig. 1-12 (a) Welded tests plate



The position, numbers and size of these defects can be varied arbitrarily.

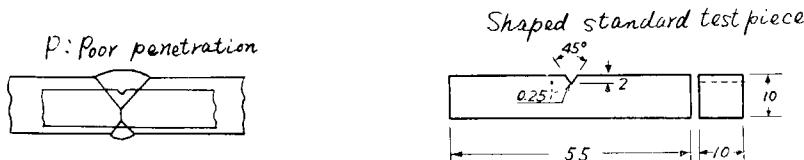


Fig. 1-12 (b) Sorts and marks of test piece for bending test.

ii) 試験結果

(1) 標準曲げ衝撃試験

切欠直下に blow hole 欠陥を包含している試験片に於いて blow hole の数の増加と遷移曲線の関係を求めた結果が Fig. 1-13, 1-14, 1-15, 1-16, 1-17 に示す。

この結果より、無欠陥の試験片について求めた遷移曲線と欠陥包含している場合の遷移曲線を比較すると、無欠陥の遷移曲線が低く現われている。

又欠陥 1 ケの場合と 3 ケ, 6 ケの場合との吸収エネルギーの差は若干有るが、試験誤差範囲内に有る様に思われる。すなわち、衝撃時に亀裂が発生し、亀裂が進展する時 blow hole によりさまたげられる為に、無欠陥の場合に比較して吸収エネルギーが大となる傾向にある。

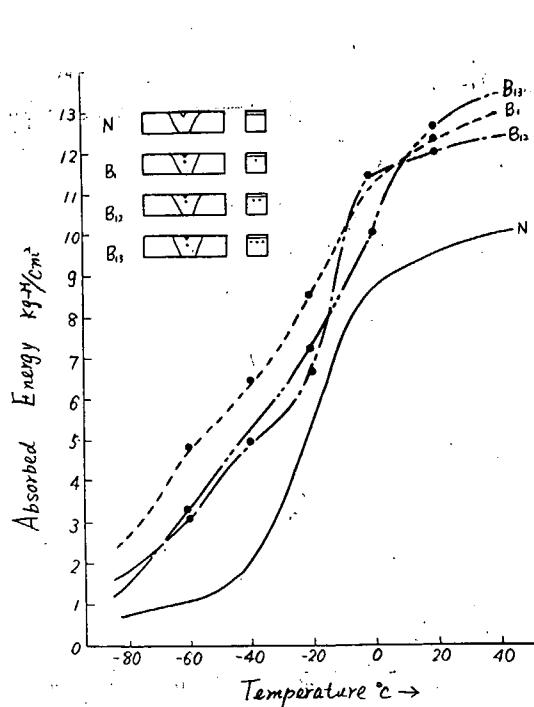


Fig. 1.13

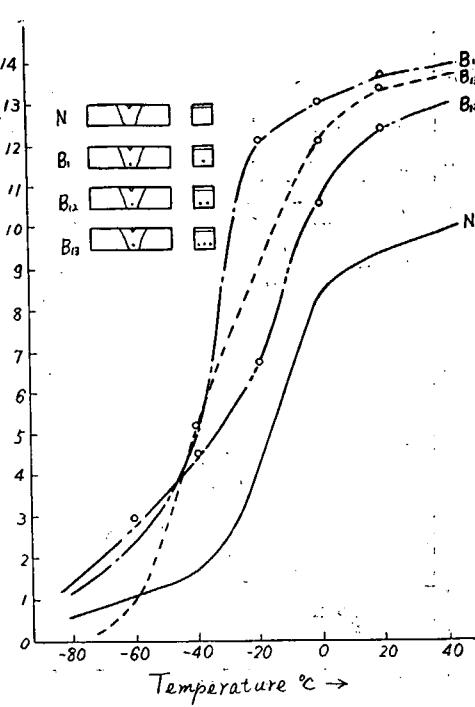


Fig. 1.14

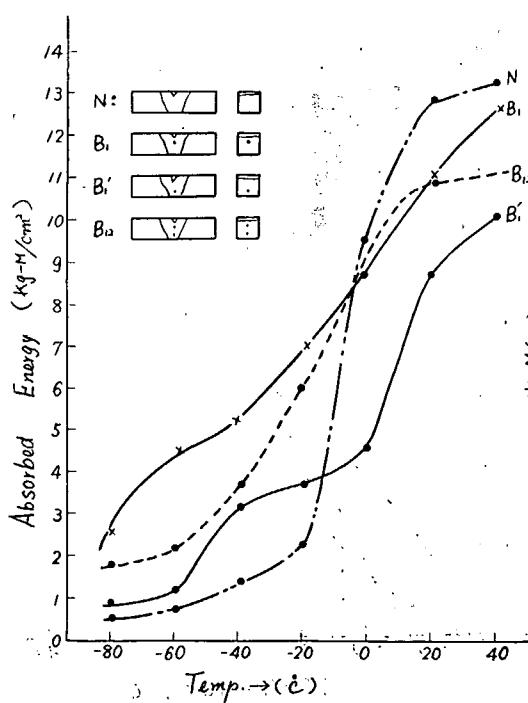


Fig. 1.15

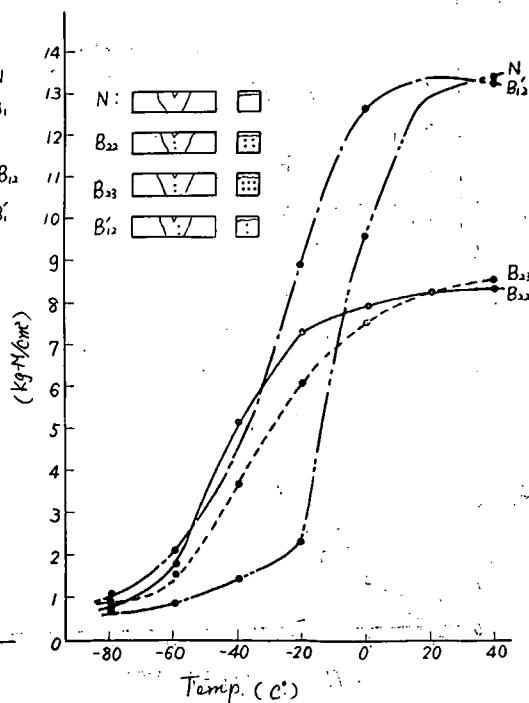


Fig. 1.16

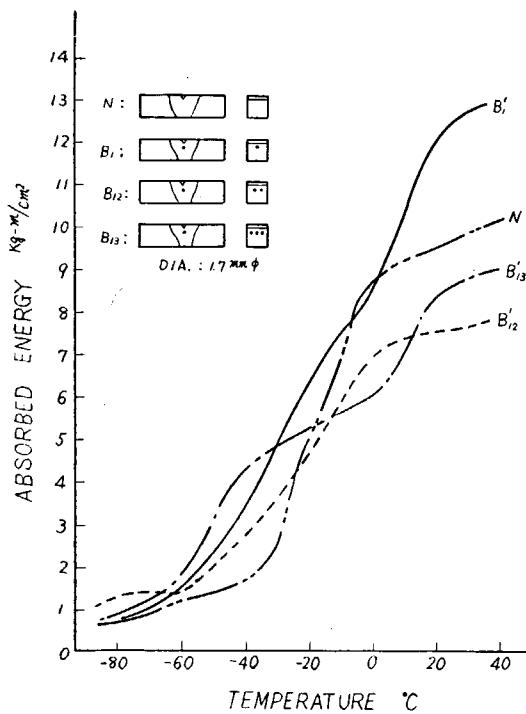


Fig. 1·17

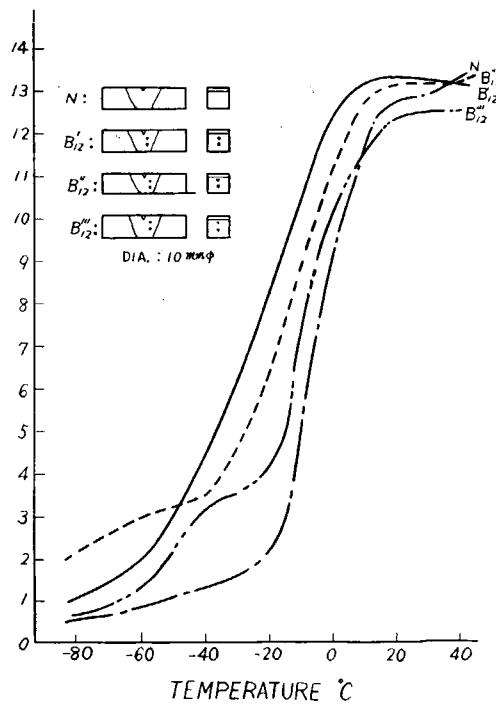


Fig. 1·18

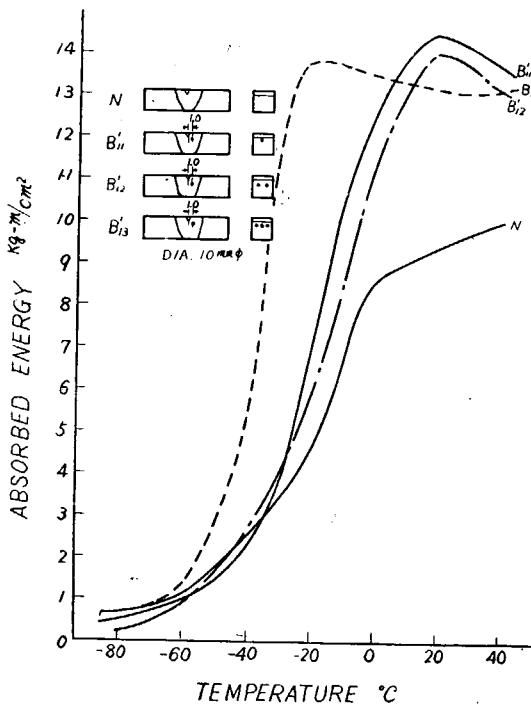


Fig. 1·19

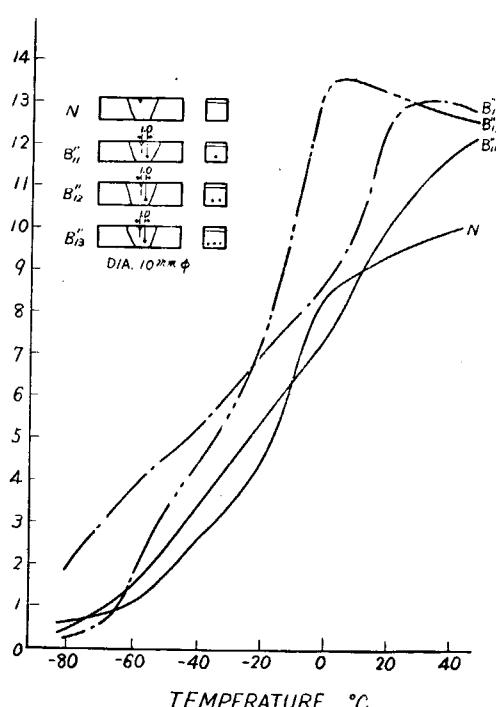


Fig. 1·20

次に欠陥の位置が切欠よりはなれた所にある場合の吸収エネルギーに及ぼす影響については、切欠直下に欠陥を有する時が、はなれてある時よりも吸収エネルギーの値が若干低く現われている。すなはち衝撃を与えた場合、Tension side に有る時によくきき、Compression side に有る場合はあまり吸収エネルギーに影響しない様である。次に欠陥が切欠より 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 mm と横に離れた位置に有る場合、衝撃試験を行つて亀裂進展にどの様に影響を及ぼすかに就き試験を行つた結果が Fig. 1・18, 1・19, 1・20 に示す。この結果では欠陥が切欠直下に有る際よりも吸収エネルギーは大となる傾向に有る。しかし切欠より欠陥が 3.0 mm 離れると亀裂の進行は欠陥よりはずれる様である。

次に slag inclusion, poor penetration の欠陥を有する溶接部と衝撃強度の関係に就いて試験を行つた結果を Fig. 1・21, 1・22, 1・23 に示す。この試験結果に依れば、無欠陥試験片の遷移曲線よりも、slag inclusion, poor penetration を有する場合のそれは低く、又吸収エネルギーは大きい影響を受け、slag inclusion の場合は poor penetration よりも遷移曲線が高くなる傾向に現われている。Fig. 1・24 は上記試験結果より JIS 6 級に該当する blow hole, slag inclusion, poor penetration が無欠陥の場合と比較して差が有るかどうかを検討した結果で有る。無欠陥の場合よりも blow hole は良く、次に slag inclusion, poor penetration の順である。

衝撃曲げ引張り試験片の破断部を調査すると、欠陥部及びその近傍に於ける破面状況が異なる様に思はれたので顕微鏡による観察を行つた。

之等顕微鏡観察の結果、異常ではなく、単に欠陥の周囲が脆性破面となつてゐることに過ぎなかつた。

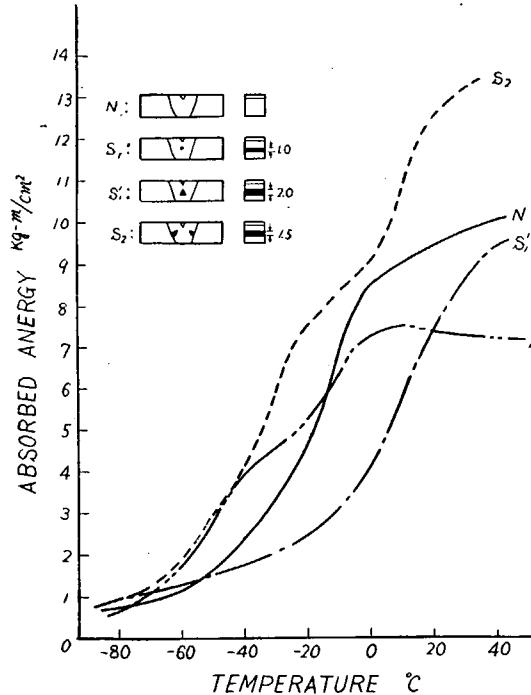


Fig. 1・21

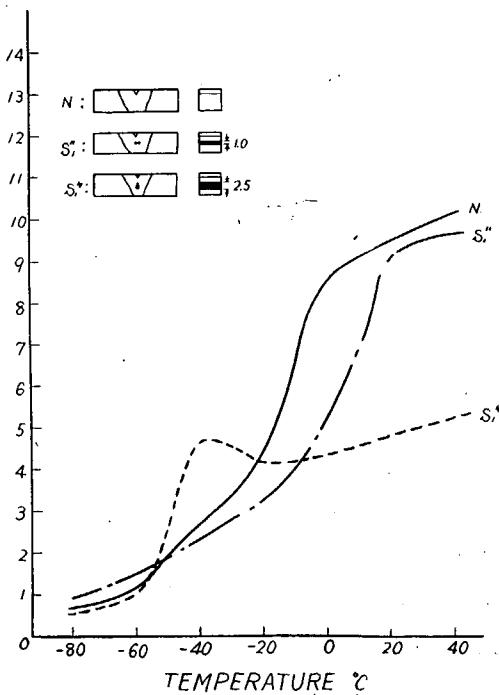


Fig. 1・22

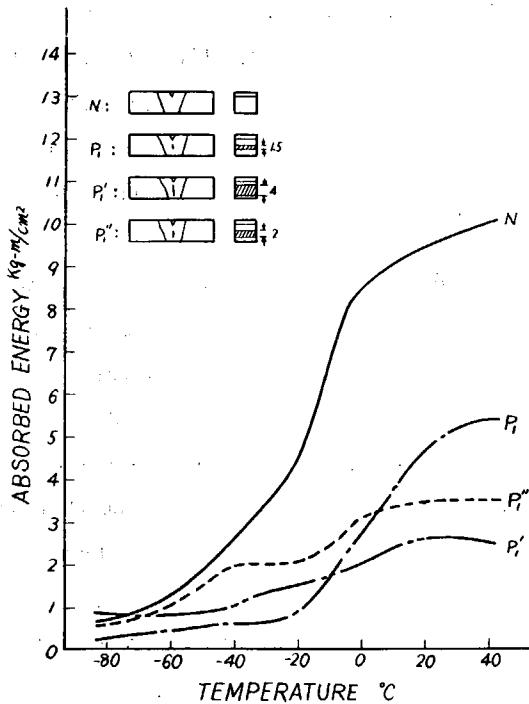


Fig. 1-23

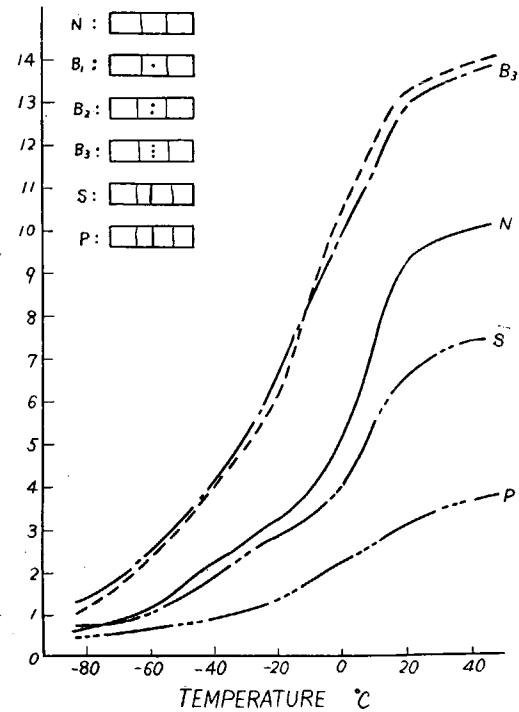


Fig. 1-24

(b) 大型衝撃曲げ試験

i) 板厚 23 mm を用い、 $300 \times 300 \text{ mm}^2$ の試験材より 4 ケ宛試験片を截り出した。機械試験用試験片は Fig. 1-25 の如くである。

試験温度は $-80 \sim +40^\circ\text{C}$ の間である。欠陥の位置及び欠陥数が遷移温度に及ぼす影響も検討した。

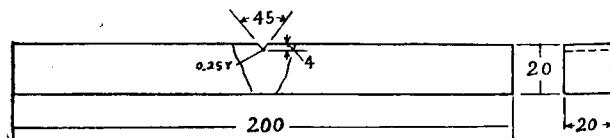


Fig. 1-25 大型曲げ衝撃試験片

ii) 結 果

大型曲げ衝撃試験も小型曲げ衝撃と同様に、切欠直下に欠陥を有する場合と 10 mm 離れた場合とに就き衝撃吸収エネルギー値と欠陥数等につき試験を行つた。試験結果は試験片内に 1 ケ blow hole が有り、且つ欠陥の位置が異なる。又 Fig. 1-26, Fig. 1-28 は、夫々の数が 2, 3 個に増加した場合の遷移曲線を示す。

Fig. 1-29 に slag inclusion, poor penetration の欠陥を包含せしめた場合の遷移曲線を示した。

以上の試験結果によると blow hole が熔接部に欠陥として包含されている場合は無欠陥よりも吸収エネルギーが増加しているが、slag inclusion, poor penetration 等の欠陥を有している時は逆に吸収エネルギーが非常に低下している。

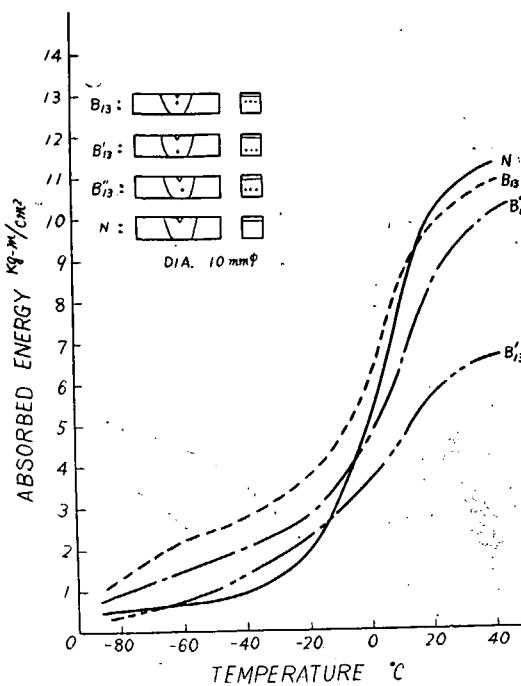


Fig. 1·26

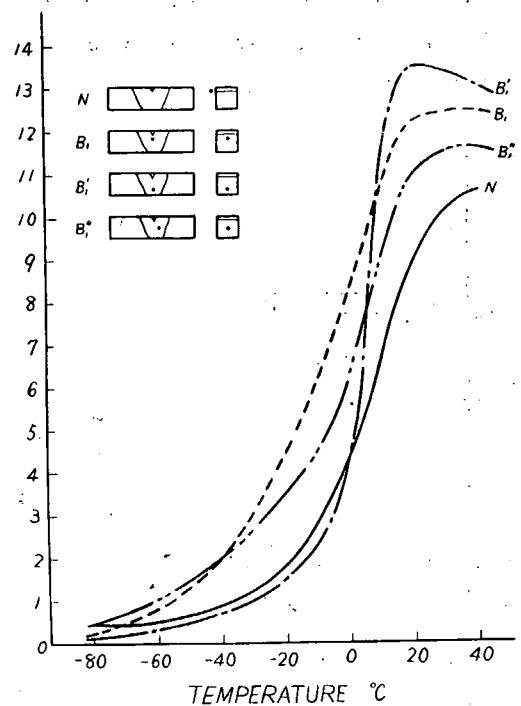


Fig. 1·27

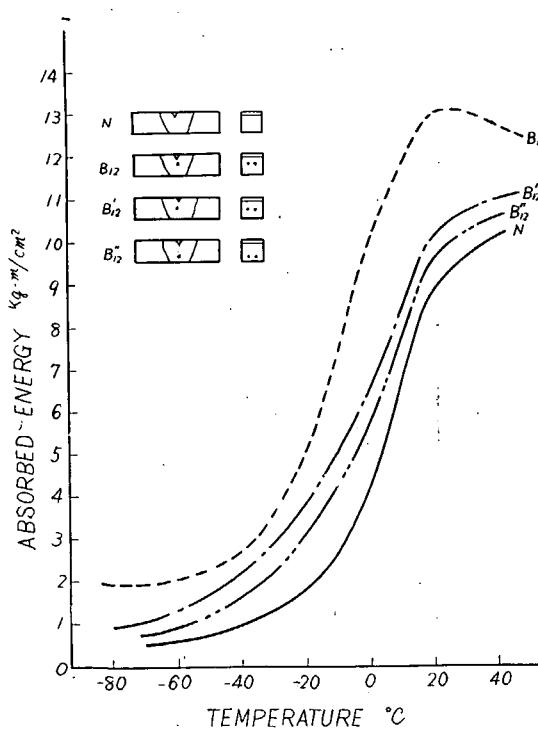


Fig. 1·28

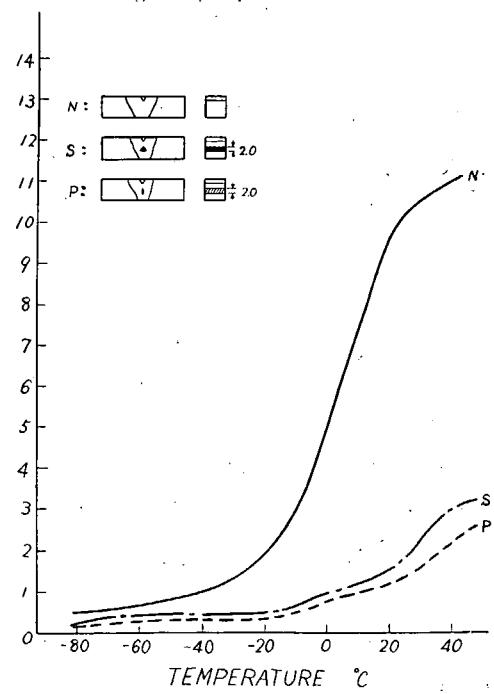


Fig. 1·29

これは小型衝撃試験の場合と同様に blow hole は亀裂進展の arrestor となり、鋭い切欠として動かない事と考えられ、slag inclusion, poor penetration は鋭い切欠として考えられる為め亀裂進展を促進さすものと考えられる。

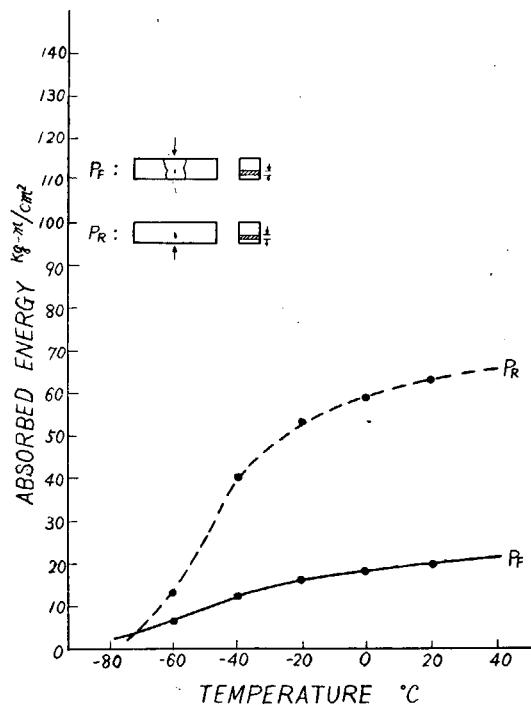


Fig. 1-30

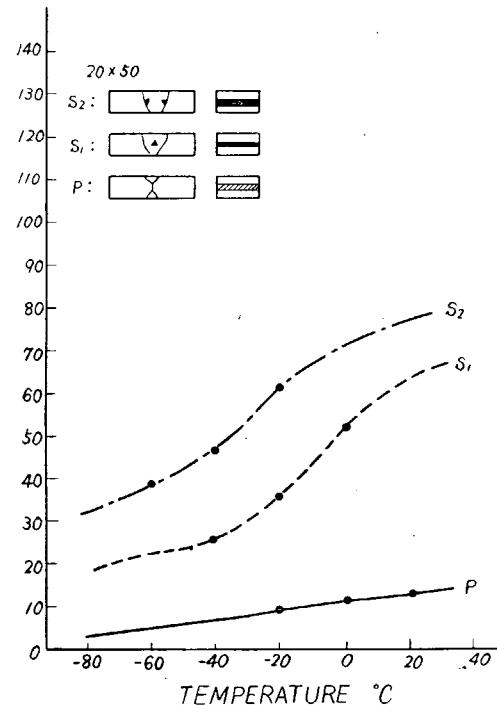


Fig. 1-31

次に大型曲げ衝撃試験片を用い、切欠が無く欠陥の poor penetration が Tension side に有る時と Compression side に有る時に吸収エネルギーに及ぼす影響に就いて試験を行つた。この結果を Fig. 1-30 に示す。すなわち、曲げ衝撃試験に於て欠陥位置が Compression side に有る時は吸収エネルギーは大となるが、Tension side に有る場合は吸収エネルギーは 1/3 倍以下に低下する。

Fig. 1-31 の試験結果は 15(板厚) × 50(巾) の超大型曲げ衝撃試験片による衝撃試験結果であるが、この結果からも、slag inclusion を含む場合が poor penetration の場合よりも吸収エネルギーが大で、且つ slag inclusion が 1 個のものよりも 2 個のものの方が大である。これは衝撃荷重をかけた際に亀裂の発生点が同時に 2 点で起り、亀

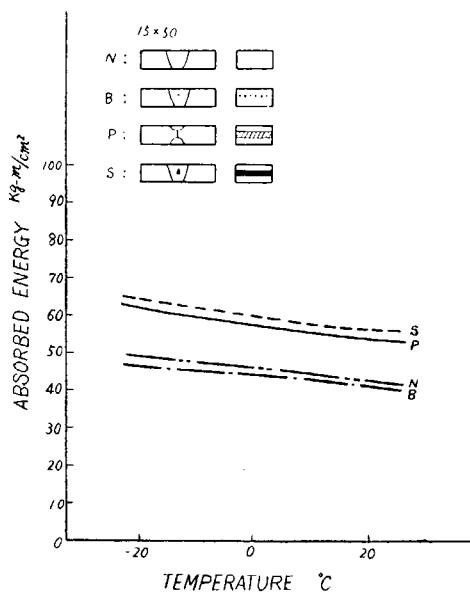


Fig. 1-32

裂進展も2個所有する為全吸収エネルギーは1個の欠陥に比較し増加するのではないかと考えられる。

Fig. 1・32～Fig. 1・36 はやはり大型試験片について行つた。他の実験の結果である。

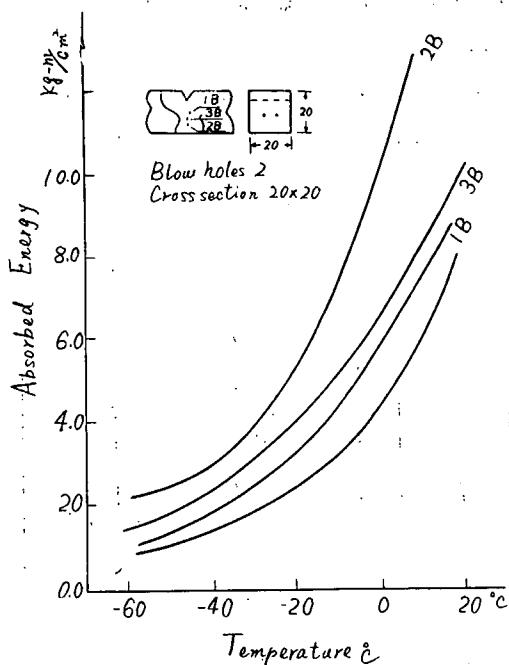


Fig. 1・33

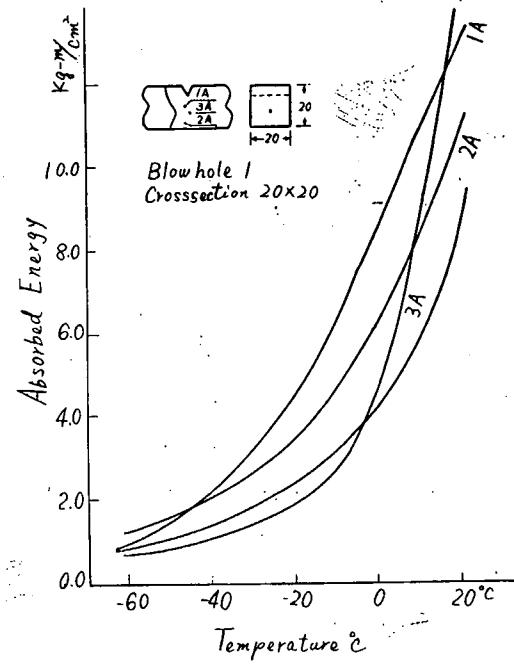


Fig. 1・34

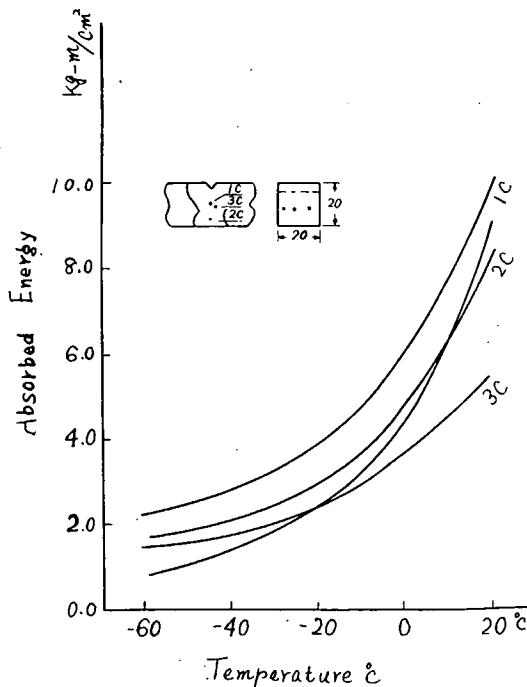


Fig. 1・35

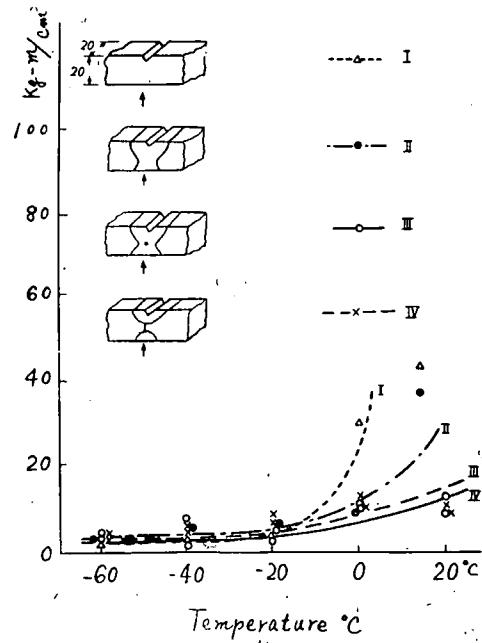


Fig. 1・36 スラグ及び溶込み不足の影響

2・3 静的曲げ試験

(a) 小型試験片による静的曲げ試験

静的曲げに用いた小型試験片は標準型シャルピーVノッチ試験片である。之は試験を問うと同時にシャルピー試験の結果とも対比検討出来る機会を得る為である。

標準シャルピー試験機と同型の刃形および受台を有する治具をアムスラー万能試験機にとりつけ、Fig. 1-37 に示すような各種欠陥を含んだ標準型シャルピー試験片を使用して静的曲げ試験を行い、荷重と歪みとの関係を求めた。これから吸収エネルギーを算出した。最大荷重点までの吸収エネルギーを亀裂を発生させるに要するエネルギー (E_I)、その後の吸収エネルギーを亀裂の進展に要するエネルギー (E_P) と考えて、欠陥がこの両者にどのように影響するか、また全体の吸収エネルギー (E_T) が欠陥の種類によつてどのように変化するかも調べた。いずれもあまり明らかな傾向は示していないようである。強いて傾向を求めるごとくであろう。

i) 亀裂発生エネルギー (E_I) について

切欠のすぐ下に blow hole のあるもの (B-series) は E_I が少ないので、吹き出しが切欠からかなり離れたところにある C-series の E_I が多い。すなわち亀裂発生源 (今の場合切欠) の近くにある欠陥は亀裂の発生を助長せしめ、 E_I を減少せしめる。また blow hole の数が少々増してもその位置が同じところであれば E_I はそれほど変化しない (D, E, F series)。しかるに slag inclusion や、とくに poor penetration などがあれば E_I はかなり大きく減少する。これは試験片の大きさに比して欠陥の大きさが大きすぎたことによるのであるが、poor penetration の場合にはその先端の曲率半径が小さいため応力集中の度が大になり、切欠の底における応力集中とこれが相干渉して互にその集中度を増大し合つてることが原因となつてゐるのである。また欠陥が切欠底から少しずれていても Fig. 1-38 に示すように E_I は余り変化しない。

ii) 亀裂進展エネルギー (E_P) について

亀裂進展エネルギー E_P は Fig. 1-38 に示すように、一つの例外 B-series を除いては、一般に高温の靱性域における E_P は blow hole のある方が無欠陥材より少ないので反し、低温の脆性域における E_P は blow hole のある方が無欠陥材より多くなつてゐる。これは脆性域になると一旦進展

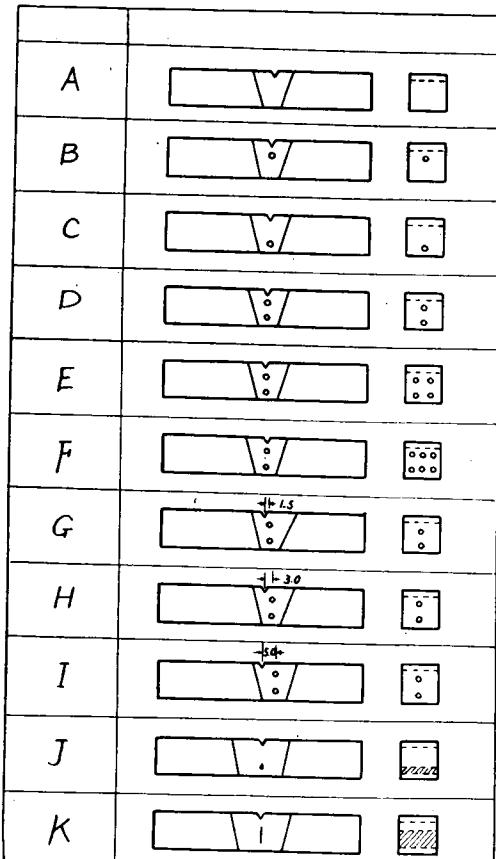


Fig. 1-37 Included defects in bending test piece

し出した亀裂は連続体であれば停止することなく進むのに反し、欠陥材のように不連続体であると一旦この欠陥で停止し、ここからさらに亀裂を発生し、それが進展し出して全体の破壊が生じるというような過程をとるためであろう。slag inclusion や poor penetration を含む試験片が低温側で異常に高い E_P を示すのもこのような現象が現われているのであろう。またこの両者は高温側でも他のものに比べて異常に高い E_P を示しているが、これについては欠陥が試験片の全巾にわたって通つており、丁度 2 枚板のような形になっているので、拘束が少なくなり横収縮が十分にできるためではなかろうかと考えている。切欠と孔とがずれてい場合は、いずれもあまり明瞭な傾向は認められない。

iii) 全吸収エネルギー (E_T) について

全吸収エネルギー E_T に F_T と E_P との和であつて、今の場合 E_P がかなり大きい率を占めて

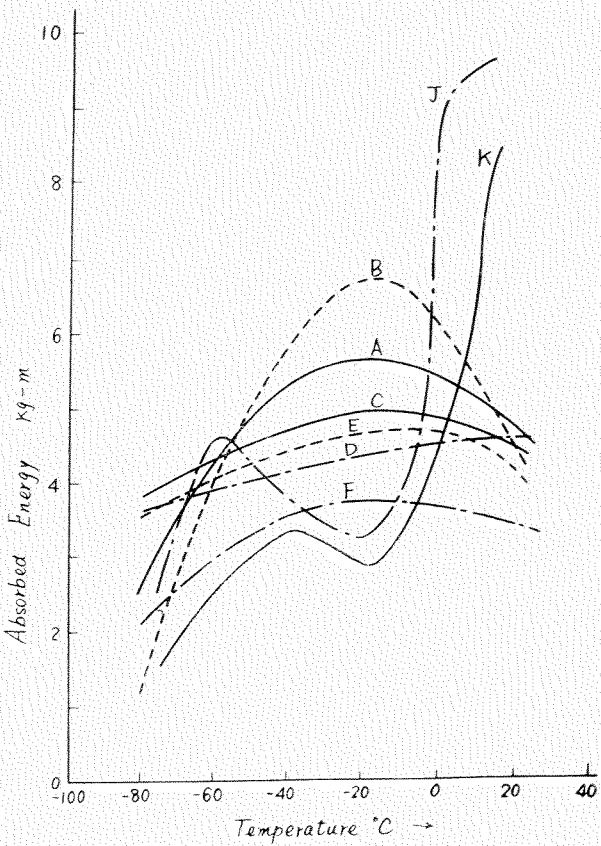


Fig. 1-38 The required energy of the propagation of crack in bending tests. (E_P)

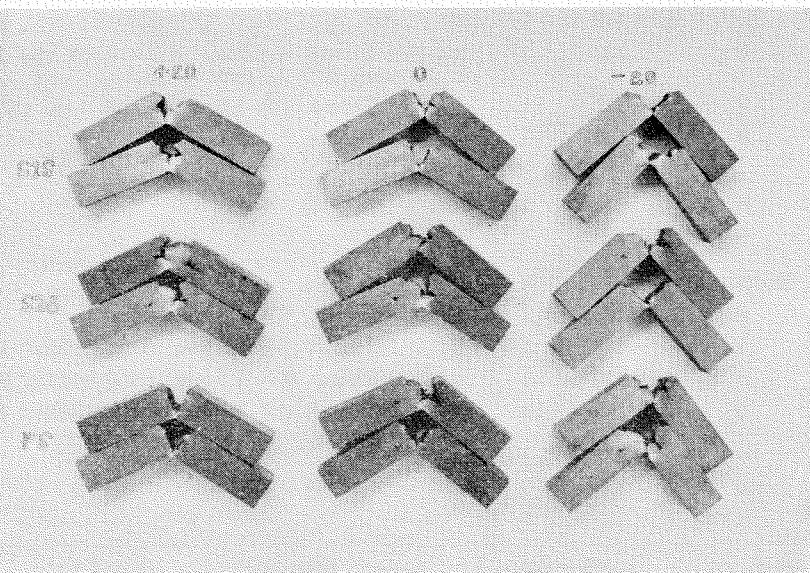


Photo. 1-3

いて、 $E_T = E_P$ のごとき傾向を示しているので、 E_T の傾向はほとんど E_P と同様である。

また他の実験例によると Table 1・5 に示すごとく、slag inclusion や poor penetration が存在すると破断時の曲げ角度や最大荷重にも大いなる影響のあることが明らかになつた。また同じ slag inclusion でもその大きさ、位置等によつてこれらの値が大きく変動することもこの表に示されている。破断状況は写真に示す通りである。

Table 1・5 静的曲げ試験結果

欠陥種類	項目	温度°C			+20			0			-20							
		荷重 kg	曲げ角	吸収エネルギー kg-M	荷重 kg	曲げ角	吸収エネルギー kg-M	荷重 kg	曲げ角	吸収エネルギー kg-M	荷重 kg	曲げ角	吸収エネルギー kg-M					
P S (poor penet.)	800	10	2.2	690	5	1.8	720	7	2.2	710	6	2.8	770	8	2.6			
S 1 S (slag inclusion)	820	6	3.7	910	12	4.0	1130	10	5.5	740	5	2.1	955	10	4.8	930	12	4.0
S 2 S (slag inclusion)	1150	21	10.5	1210	13	11.5	990	17	4.4	1150	19	8.8	990	16	6.6	1180	19	7.0

(b) 大型試験片による静的曲げ試験

Table 1・6 静的曲げ試験結果 (常温に於ける)

種類	試験片寸法 (mm)	割れ発生時の曲げ角度 (°)	試験数量	欠陥の状況及び備考
母材 無欠陥	15×50×250	—	4	170°で折れず
	"	145°	1	
	"	147	2	
	"	150	2	
プローホール	"	150	1	中心部に 1 mmφ 人工プローホール 1 cm 間隔に計 5 ヶ所
	"	146	1	同上
	"	132	1	中心部に 1 mmφ 人工プローホール 1 cm 間隔に計 5 ヶ所、表面に 1.5 mmφ 深さ 1.5 mm の欠陥 2 ヶ所
	"	121	1	表面に 1.5 mmφ 深さ 1.5 mm の欠陥 1 cm 間隔に計 5 ヶ所
	"	120	1	中心部に 1 mmφ 人工プローホール 1 cm 間隔に計 5 ヶ所、表面に 1.5 mmφ 深さ 1.5 mm の欠陥 1 cm 間隔に計 5 ヶ所
溶込不足	"	140	1	収縮部に溶込不足
	"	135	1	同上
母材	20×50×250	—	2	170°で折れず
	"	163	1	表面に 1.5 mmφ 深さ 1.5 mm の欠陥 1 ヶ所
	"	148	1	表面に 1.5 mmφ 深さ 1.5 mm の欠陥等間隔に 4 ヶ所づつ 2 列
	"	130	1	表面に 1.5 mmφ 深さ 1.5 mm の欠陥等間隔に 9 ヶ所 1 列
	"	125	1	表面に 1.5 mmφ 深さ 1.5 mm の欠陥等間隔に 15 ヶ所づつ 2 列
無欠陥	"	135	1	
	"	130	2	
	"	123	1	

- 溶接部中央のプローホールは曲げ角度を小としないが、表面のプローホールは曲げ角度を小とする。
- 溶込不足も圧縮側に存在する場合は割れ発生まで曲げる角度に大きい影響を及ぼさない。

Table 1·6 に示すような大きさの試験片(切欠なし)にたいして静的曲げ試験を行い破断の曲り角を計測した。これらの結果を通覧すると大体次のようなことがわかる。

- 1) 溶接部中央の blow hole は曲げ角を小としないが、表面の blow hole は曲げ角を小とする。
- 2) 溶込み不足も圧縮側に存在する場合は曲げ角度に影響を与えない。

2.4 疲 労 試 験

欠陥の種類と疲労強度との関係を求めるため, Fig. 1·39 に示すような無欠陥継手 (Type 1 試験片), を含んだ継手 (Type 2, 3 試験片), slag inclusion のある継手 (Type 4-試験片), poor penetration のある継手 (Type 5 試験片) の 5 種につき疲労試験を行つてある。Type 2 と Type 3 との試験片の相異は blow hole の位置が異なること——すなわち図示したごとく Type 2 試験片は溶接部の中央に blow hole があるのに対して、Type 3 の試験片は溶接部近傍にそれがあること——である。このように位置を変えたのは、無欠陥溶接部継手の疲労試験を行つて疲労破断を生じる場合、一般に疲労破断を生じる場所は、硬度および組織等の変化による冶金切欠が存在する熱影響部近傍であるから、この冶金的切欠と blow hole による機械的切欠の干渉が、blow hole の位置によつてどの程度生じるかを見るためである。

実験結果は Fig. 1·40 に示すごとくである。図より明らかなごとく無欠陥継手に比し、各種欠陥を

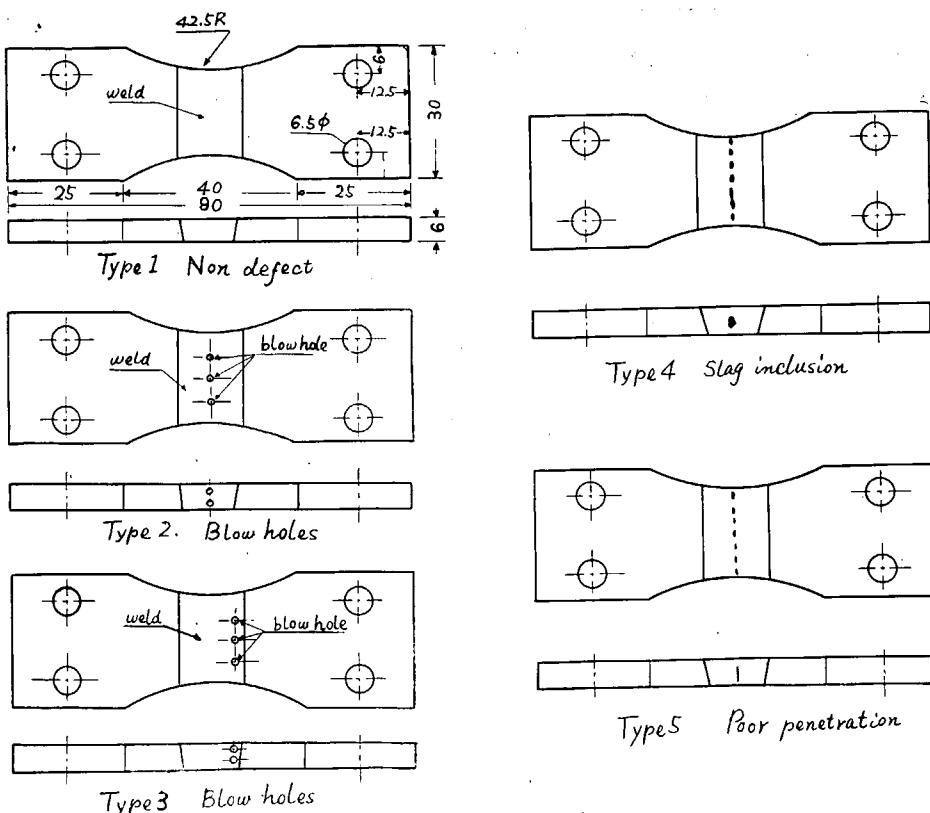


Fig. 1·39 Included defects in the specimen of fatigue tests pieces.

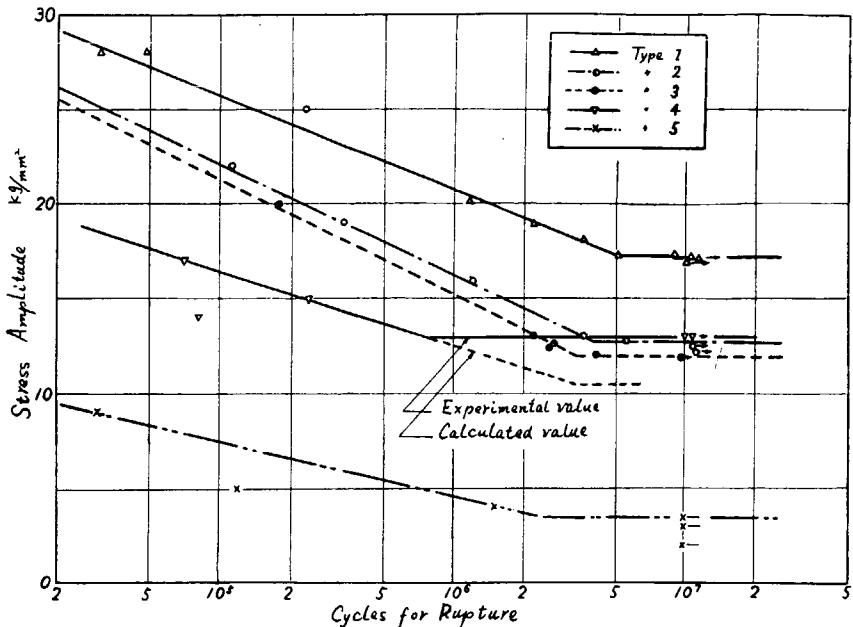


Fig. 1-40 S-N diagrams of specimens, containing 5 sorts of defects.

包含している継手の疲労限度は相当低下する。すなわち、繰返し負荷を受ける溶接継手においては、欠陥のために生じる強度低下の度合は静的な負荷を受ける場合のそれに比して著しい。静的負荷を受ける場合には欠陥の端部に応力集中を生じても、その応力値が降伏点を越すと塑性変形を生じてしまつて、応力集中の危険性がかなり緩和されるが、これに反して、疲労の場合には塑性変形等による応力集中度の緩和等の現象が期待出来難く、欠陥端部における応力集中に非常に危険なものとなる。故に甚しい応力集中を生じるような曲率半径の小さい先端をもつ欠陥は疲労強度を非常に低下させるものと思われる。事実図に示されているように欠陥先端の曲率半径が小さい（この実験における曲率半径は大体 0.1 mm と推定される）。poor penetration は疲労限が非常に低くなつている。

これらの結果について少し考察を加えてみよう。無欠陥継手 (Type 1) といえども前記のような溶接熱影響部の冶金的切欠のため、母材の疲労強度と異った疲労強度を示すはずである。しかるに今回の実験では欠陥の種類の影響のみに注目していたため母材の試験を行っていないから、この冶金的切欠がどの程度のものかを知ることはできなかつた。しかし他の実験によれば、母材の疲労限が 22 kg/mm^2 で無欠陥突合せ継手のそれが 18 kg/mm^2 であるとの報告もあるので、これから切欠係数を求めてみると $22/18=1.22$ となり、冶金的切欠も相当な切欠と考えられる。

次に blow hole を溶接部の中央に副含した Type 2 試験片の場合、板厚 6 mm 板巾 20 mm の試験片の両表面から 1 mm の位置に直径 1.5 mm のドリル孔が 5 mm 間隔に 3 ケあつていて、簡単な仮定をおいて、形状係数を求めてみると 1.38 となる。仮に形状係数と切欠係数とが一致するものとすると、無欠陥材の疲労限は 17.2 kg/mm^2 であるから、この場合の疲労限は $1.72/1.38=12.4 \text{ kg/mm}^2$ となるはずである。この値は大体実測値の 12.7 kg/mm^2 に比較すると約 6% 低下している。これは熱影響部は近い場所に blow hole を作つたため両者が相干渉して各個が単独にあるより

も大なる応力集中を生じたためと考えている。このように同程度の欠陥でも存在場所によって危険の程度が異なり、熱影響部近傍にあるものは溶接部中央にあるものに比べるとやや危険だと言える。

slag inclusion のある Type 4 の試験片は板厚 6 mm, 板巾 20 mm の最少試験片全巾にわたる slag inclusion が入つたものであるが、この形状係数を求めるとき 1.60 となる。形状係数と切欠係数とが一致するものとして、この場合の疲労限を求めてみると、 $1.72/1.60=10.7 \text{ kg/mm}^2$ となり、実測値の 14.0 kg/mm^2 とやや異つた値になる。しかし Fig. 1-40 をみるとわかるように Type 4 の S-N 線図の屈曲点は他の線図に比べて異常に繰り返し回数の低い方になつていて。これを他の線図と釣合の取れる位置にまで斜の線を延長してみると、疲労限は大体 10.5 kg/mm^2 程度になり、計算で求めたものと一致させることができる。

poor penetration を含んだ Type 4 試験片で表面から 1 mm 入つた位置に深さ 4 mm の poor penetration がある。この未溶接部の間隙はほとんど零に等しいが、一応切欠先端の曲率半径は 0.1 mm 程度のものと考えてみると、形状係数は 4.4 となる。これから前と同様にして疲労限を求めるとき $17.2/4.4=3.9 \text{ kg/mm}^2$ となり、実測値の 3.5 kg/mm^2 と大体一致する。

以上のように、形状係数から求めた疲労限と実測して得られた疲労限とが大体相等しいということが確認でき、溶接継手においても無欠陥のものの疲労限と欠陥の形状と位置がわかれば、欠陥のある材料の疲労限は計算によって求め得ることが示された。欠陥の形状、位置を知るということは実際問題として困難なことであるが、もし X-ray の立体撮影等により大体の形と存在位置がわかれれば、これから形状係数を求め、この係数を求め、この係数の大小によって、この欠陥は許容すべきか、どうかという判定を下すことができるわけである。

さらに欠陥の集中程度が、疲労限にどのような影響を与えるかを見るため Fig. 1-41 に示すように孔の数を 0, 1, 2, 3 ケと変えた試験片についても実験を行い Fig. 1-42 に示すような結果を得た。孔数 3 ケの試験片は表面状態が悪くデーターがちらばり疲労限を求めることができなかつたが、0, 1, 2 ケの場合のそれは 21 kg/mm^2 , 19.3 kg/mm^2 , 16 kg/mm^2 であった。これらの試験片の孔縁における応力集中率を簡単な仮定をおいて求めてみると、孔 1 ケ、2 ケの場合それぞれ 1.11, 1.35 となり、孔 0 の場合の疲労限をこれらの値で除すと、 $21/1.11=18.9 \text{ kg/mm}^2$,

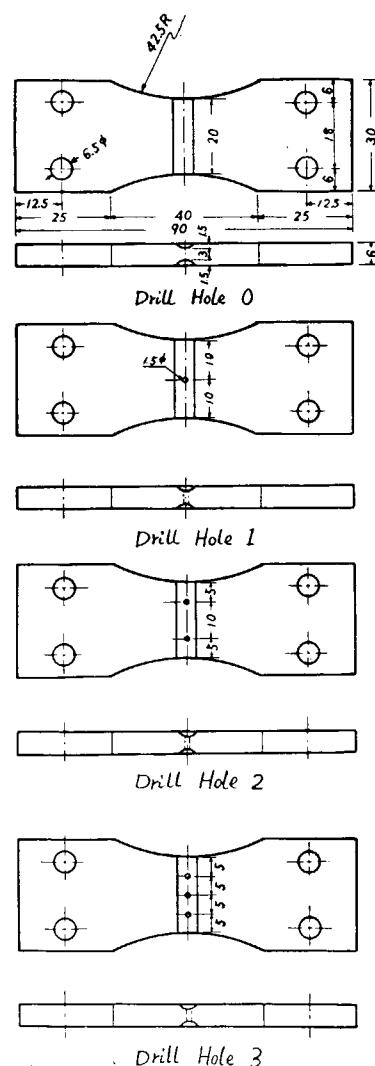


Fig. 1-41 The fatigue test piece containing one, two, and three of blow holes.

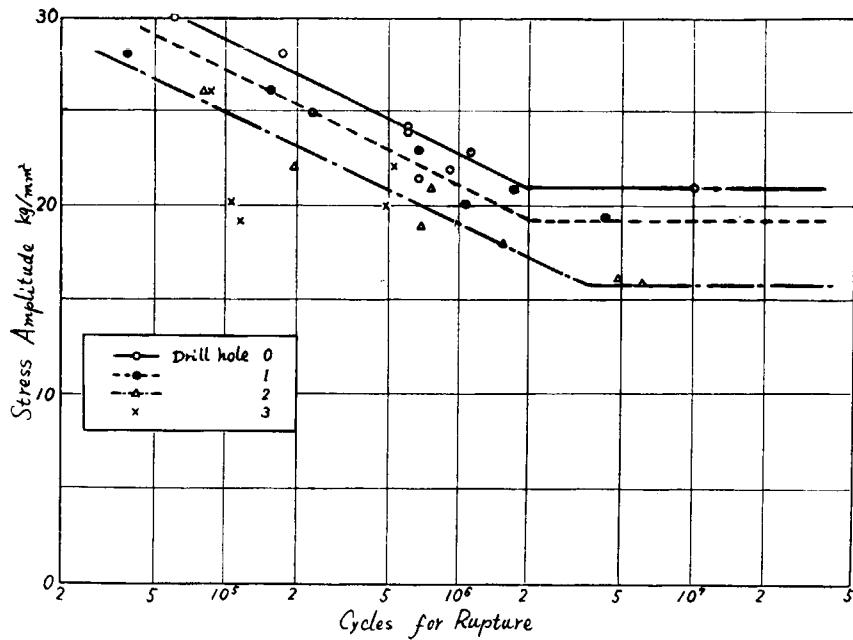


Fig. 1.42 The relation between the fatigue strength and the number of blow holes.

$21/1.35=15.5 \text{ kg/mm}^2$ となり大体近い値となる。すなわちこの程度までの孔の密度であれば、密度の大になるほど応力集中率は大になり、ほぼこの率に比例して疲労限が低下する。しかしこれらの実験において興味のあることは破断が孔の部分に生ぜず、孔より熱影響部寄りの所を通っていることである。これについては熱影響部の冶金的切欠と孔との相互干渉が原因となつているものと考えている。なお、孔が4ヶになれば孔の部分で切れ疲労限が孔1ヶの場合と同程度にまで上昇するような傾向を示す実験データーも得られているが、これについては更に補足実験も行い検討を加えてゆくつもりである。

2・5 その他の試験

基本的な諸機械的性質については以上に述べた所で大体尽されるが、この外拘束試験をしてH型試験片によつて、抱拘力下に於ける亀裂発生と欠陥の関係に関する実験を行つた。

又、カーン型試験片を作成して、欠陥と亀裂伝播状況及び方向の観察、吸収エネルギーの算定が各温度でなされた。

更にアンダーカットを有する試験片についても行はれている。全般的な機械試験の結果は、始めの予定外であり、少々遅れる見込みであるので後から追加することとした。大型疲労試験についても同様である。

第2章 自然欠陥を含有する試験片についての試験

欠陥の強度的意義を知る為には、組織的な研究を行わねばならず、この為人工欠陥による方法を推進して、今までに示した様な多くのデーターを得た。

しかし乍ら、人工的に欠陥を作成した場合は、自然発生の欠陥を含む試験片と、根本的な特性の差がありはしないかと云う疑念が持たれるので、この点を明かにしなければならない。

一方、自然発生した欠陥についての過去数年間の研究結果を検討し、まとめてみた。ここにその研究成果の一部を載せることにする。

i) 試験方法

試験片採取方法は、溶接完了後 X 線透過検査を行い Film に現われた欠陥を別紙に試験片採取個所を記入し、試験片と別紙とを合せ欠陥の位置を確認して、試験片に採取個所を記入し、採取を行つた。又、試験片採取後再び X 線透過検査を行い再判定し試験を行つた。

ii) 試験結果

静的引張試験結果は Fig. 1・43, Fig. 1・44 に示した。Fig. 1・43 には 17 mm 板厚に於ける下向、立向の溶接姿勢別の結果で、Fig. 1・44 には 25 mm に於ける下向、立向溶接姿勢の結果を示した。

試験結果より NDI に基づく判定等級に於いて 4 級程度迄は引張強度は低下しない様であるが、5 級以下になると若干強度が下る傾向にある又姿勢別には立向溶接に比較し下向溶接の方が稍々引張強度が良い様に思われる。

次に曲げ強度試験の結果を Fig. 1・45, Fig. 1・46 に示した、この試験結果からして 3 級迄の欠陥であれば曲げ強度には影響は少なく、4 級程度から曲げ角度が少なく、5, 6 級になると全々曲がらなくなり折曲する傾向に有る。曲げ強度は板厚及び姿勢の差は認められない様である。

Fig. 1・47, Fig. 1・48 には衝撃試験結果を示した。衝撃時の吸収エネルギーは JIS 及び NDI 基準の 4 級程度までは低下していない様であるが、5 級になると 1 級すなわち無欠陥に比較し吸収エネルギーが 1/2 倍に低下し、6 級では相当少ない結果が得られた。

この結果によれば判定基準の 1~3, 4 級程度迄は blow hole が多く、4~6 級では slag inclusion, poor penetration の欠陥を多く包含している様に思われる。

blow hole は静的、衝撃強度にはあまり影響を及ぼさないが、slag inclusion 及び poor penetration は相当悪影響を及ぼすものと考えられる。しかるに以上の試験結果を総合して考えるに、1 級と 3 級とでは静的強度、及び衝撃強度には差は認められないが、5~6 級は強度に悪影響を及ぼすことが云える。しかし JIS 規格の各等級の Boundary が明確でない為め判定に困難をきたす。

自然欠陥の試験片 X 線撮影フィルムにより欠陥の大きさ、すなわち欠陥の力の方向に対する断面積を推定し測定し、此の値を試験片断面積で割つた値を欠陥度数と仮定すると、欠陥に対する機械的強度が解明出来、且つ現在の NDI の基準案との関連性が考えられる為測定を行い整理した結果を Fig. 1・49 に示す。すなわち NDI の基準案に於いて 1 級から 6 級迄の等級を欠陥度数に現わすと下記の如くの値になる。

1 級	0~0.2%	4 級	~4.7%
2 級	~1.25%	5 級	~7.8%
3 級	~2.45%	6 級	~7.8% 以上

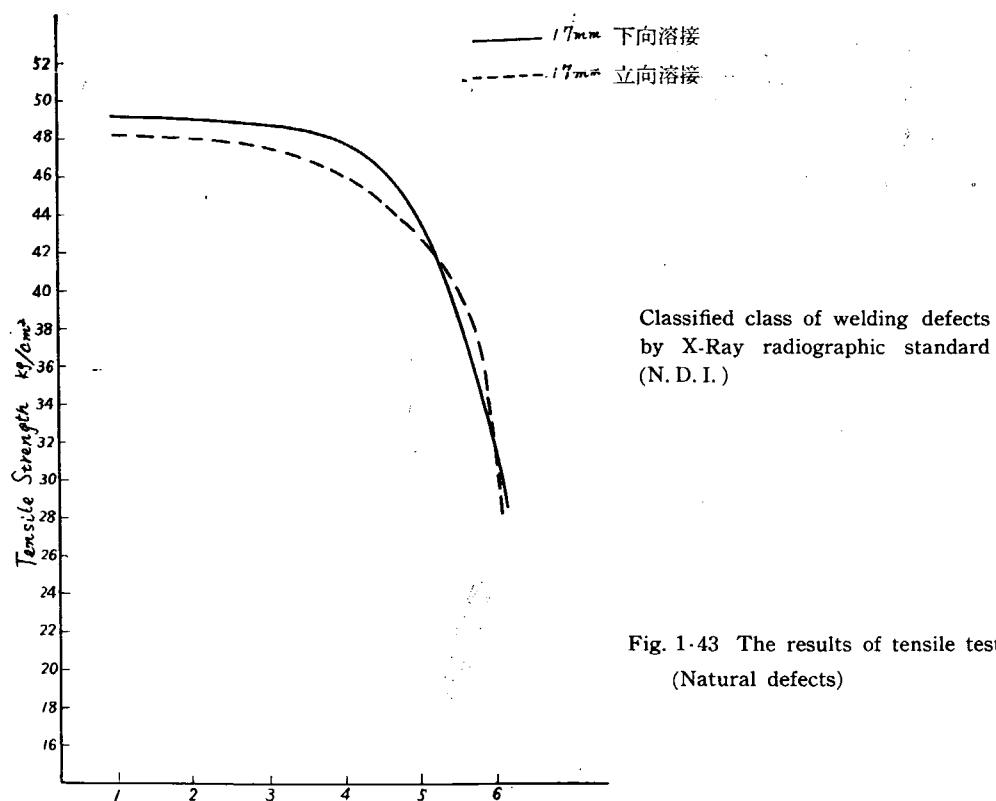


Fig. 1.43 The results of tensile tests
(Natural defects)

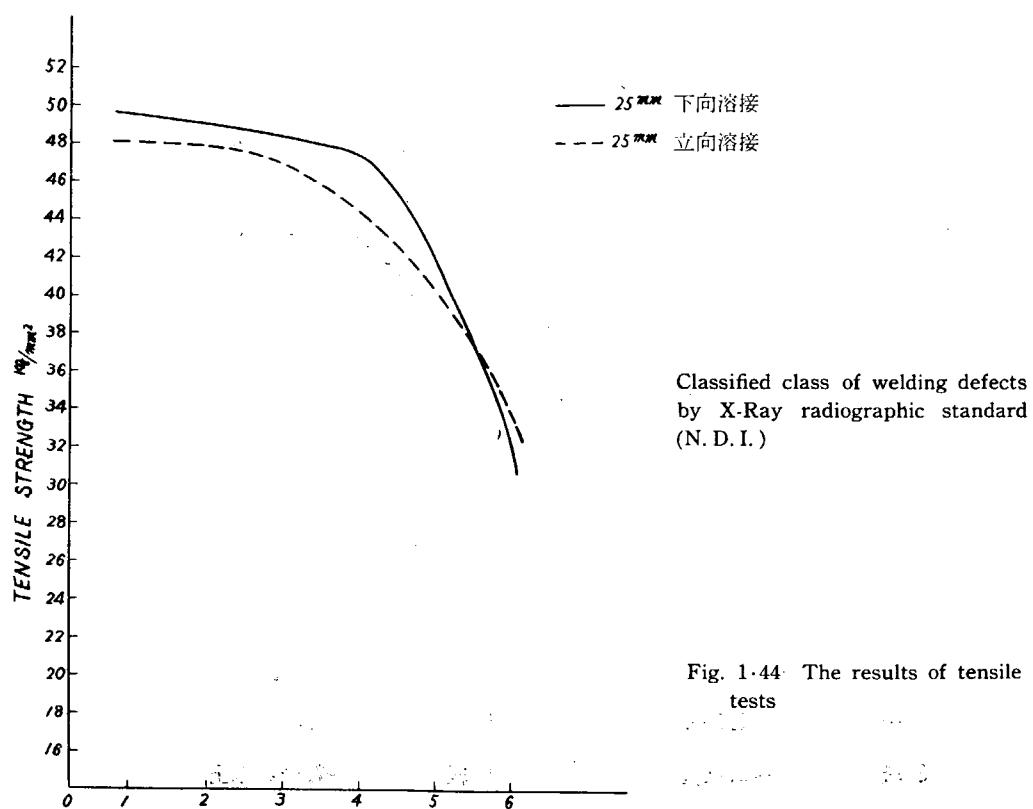


Fig. 1.44 The results of tensile
tests

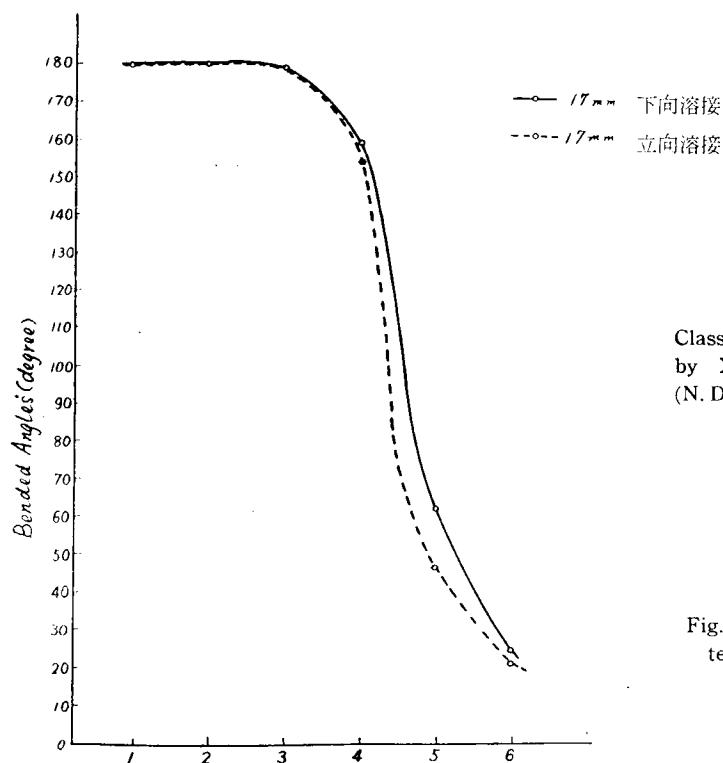


Fig. 1·45 The results of bending tests.

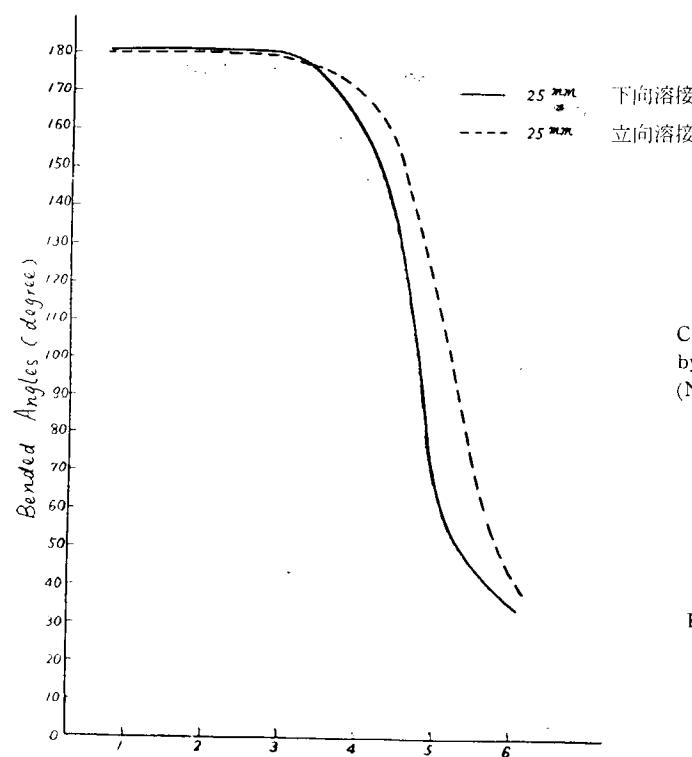
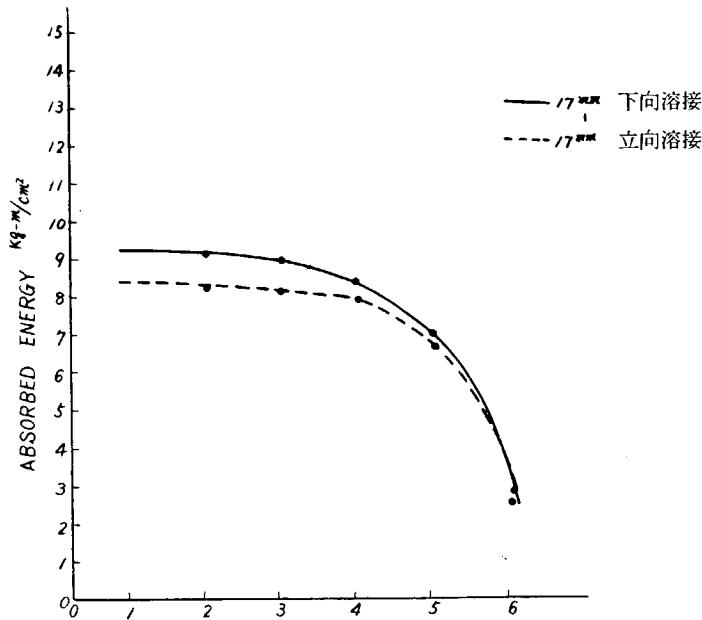
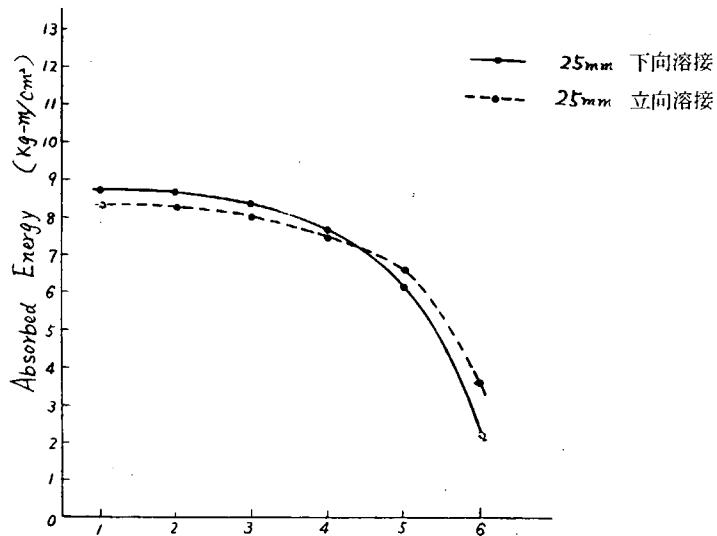


Fig. 1·46 The results of bending tests.



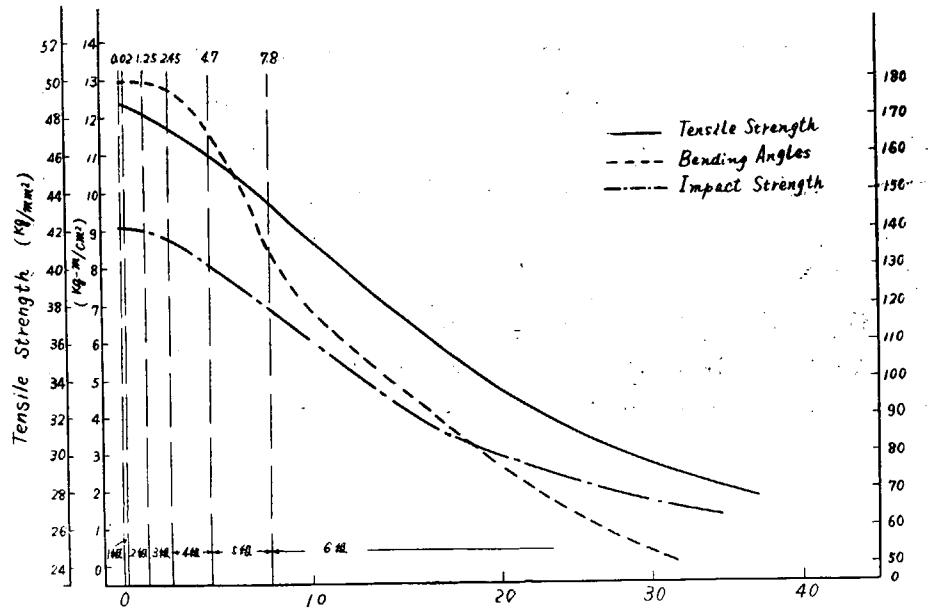
Classified class of welding defects by X-Ray radiographic standard (N. D. I.)

Fig. 1·47 The results of V notched Charpy impact tests.



Classified class of welding defects by X-Ray radiographic standard (N. D. I.)

Fig. 1·48 The results of V notched Charpy impact tests.



Classified class of welding defects by X-Ray radiographic standard (N. D. I.)

Fig. 1-49

試験結果によると引張強度は 1~5 級迄は等級が悪くなるにつれ若干低下するが、顕著な低下は認められない。しかし 6 級になると引張強度は低下する。曲げ角度に於ては 4 級までは大差はないが 5 級程度より曲げ角度が少なくなり 6 級では相当悪く曲らなくなる傾向に有る。又、衝撃強度も引張強度と同様の結果が得られ、欠陥度数が増加するにつれ若干吸収エネルギーは低下している様である。

引張、曲げ衝撃試験に於いて 1~5 級迄は 3 者共同様の傾向にあるが、6 級に於ては欠陥の範囲が広い為め強度が低下する。

欠陥度数に影響ある欠陥は blow hole, slag inclusion, poor penetration の順になり、特に slag inclusion 及び poor penetration は影響が大となる。この様な考え方であれば 5 級、6 級には slag inclusion, poor penetration の欠陥が相当多いと云う事が考えられ、blow hole の欠陥単一の如き状態では 6 級でも問題がないと云う事が云える様に思われる。

総 括

人工欠陥を作成した試験片についての機械試験結果を、自然発生欠陥を含む場合の結果と対比して検討するに、人工欠陥を作成したが為の特性上の変化は殆んどないと云うことが明らかとなつた。

かくして、全般に涉つて眺めると、

(1) 現行 “JIS 規格、X 線による欠陥判定規準” に示される。2 mm 以下の欠陥に対しての 3 級程度まででは強度に殆んど大きい影響を及ぼさない。

2 mm 以下では blow hole が主体であり、その外、形状雑多な小さい slag inclusion も含

まれる。

- (2) poor penetration が最大に存在するときは亀裂の存在と同様に考へてよく、不合格である。
- (3) その他の欠陥については無数の実験を行つて、欠陥に対する統計的な取扱いが可能となる様にしなければ一概には云えない。

と云う様な事が結論出来るのであつて、個々の現象に対しては之等のデーターのみから云々する事は困難である。

欠陥について云える事は、

- (1) 欠陥は常に亀裂のスタートポイントとなり得る。
- (2) 一方に於て、亀裂進路に欠陥があると、破壊エネルギーのプールポイントとなる。つまり、亀裂アレスターとしての働きも有する場合がある。

と云う二つの事柄である。

第2編 欠陥と溶接構造の疲労強度

この章においては、溶接突合せ継手のX線透過写真で検出される欠陥と引張疲労強度の関係についての研究結果を述べる。曲げ疲労強度については既に前章に述べられているのでここには述べない。ここに述べる研究は次の3点を明らかにする目的で行はれた。

- (1) JIS Z 2341 の溶接欠陥の等級と疲労強度の関係
- (2) I.I.W. 標準写真の等級 (Group) と疲労強度の関係
- (3) 板厚が大なる場合の欠陥と疲労強度の関係

JIS Z 2341 の等級は現在我が国の放射線写真判定の基準となつてゐるもので、これと疲労強度との関係は比例することが期待されている¹⁾。しかしこの関係は明確な実験的根拠を欠いてゐるので、JIS の等級と疲労強度の関係を明らかにすることは第1の重要な事である。

一方、欧洲においては I.I.W. の標準写真が溶接の品質判定の参考として流布しつつあり、米国ではこれに類似した ASTM の標準写真が用いられんとしている。これらの標準写真は欠陥の程度の極めて著しいものまで含み、判定基準としての適否には疑問の余地があるが、これと疲労強度の関係も気孔については報告されているが²⁾。全般的には明らかにされていない。従つてこの国際的な基準の疲労強度との関係を明らかにすることは第1に劣らず重要なことであり、その結果は JIS の判定基準を補足するに役立つ。次に欠陥が疲労強度に及ぼす影響はその欠陥の絶対寸度が主因子となるのか、板厚その他に対する相対的寸度が主因子となるのか不明である。この点を明らかにしなければ板厚の異なる場合の溶接欠陥の合理的評価は不可能となるから、この研究を逸することはできない。

これらの見地より3種の研究が行はれたが、これらの諸点を完全に明らかにすることは設備ならびに時間的の制約上不可能ではあつた。しかし現在までの研究の結果は概略の傾向を掴むには充分な成果を得ており、合理的な判定基準確立の根拠は与えられたものと考えてよいようである。

§1. 溶接突合せ継手の JIS 等級と疲労強度

1・1 実験方法

- (1) 試験片
 - (a) 使用した母材: SM 41 W
 - (b) 母材寸法: Fig. 2-1 の通りである。
 - (c) 溶接棒: B-17
 - (d) 溶接条件: 溶接棒径、速度、電流、層数は故意に欠陥を作るためいろいろ変えた。溶接は Fig.

2-1 の板2枚に逆歪を与えて突合せ溶接した。

- (e) 欠陥を作るためとった方法: 溶込み不足は Fig. 2-2 の如く開先を X型とし、第1層の

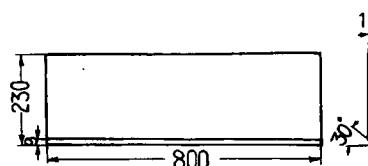


Fig. 2-1 Base Metal for Welded Specimens

溶接を軽く行い、裏ハツリを行わず裏側第1層をも軽く溶接した。

融合不良は Fig. 2・3 の如く中間の層を中高に或いは Fig. 2・4 に示す如く片側にかたよらしてその上を低電流で溶接した。

スラッグまき込みや気孔は溶接未熟者の行つた溶接より選ぶか、ミル・スケールを故意に入れて作つた。

(f) 疲労試験片： 溶接試験片よりの疲労試験片の採取はガス切断によつた。ガス切断の熱影響は 5 mm 以内であると考えて、5 mm 以上を機械仕上により除くようにした。疲労試験片の形状は Fig. 2・5 に示す。ビードは充分深く削つて仕上げてある。

(2) 放射線検査

Fig. 2・5 に示した試験片を次に示す条件で X 線透過写真を撮影した。

- (a) 焦点フィルム間距離: 600 mm
- (b) 電圧: 125 kVp
- (c) 電流: 10 mA
- (d) 時間: 4 分
- (e) フィルム: 富士 #80
- (f) 増感紙: 鉛箔, フロント 0.03 mm 厚, バック 0.1 mm 厚
- (g) 現像: 指定 20°C, 5 分

判定は JIS Z 2341 によつて行つたが、板厚の 3% 以下の大きさの欠陥は欠陥として採らなかつた。上述の放射線写真フィルムの感度は約 1% であつた。

(3) 疲労試験

疲労試験片は溶接部を軽く腐蝕し溶接範囲を明確にし、この上にラッカーを塗布して試験機にとりつけ疲労試験を行つた。疲労試験に関する条件は次の通りである。

- (a) 疲労試験機: Losenhausen UHS 35/20, 静荷重 35 t, 繰返し荷重 20 t
- (b) 試験速度: 600 r.p.m.
- (c) 荷重の種類: 片振引張, 下限応力 0 kg/mm²

1・2 実験結果

(1) 疲労試験の結果

疲労試験の結果は Table 2・1 に示す通りである。

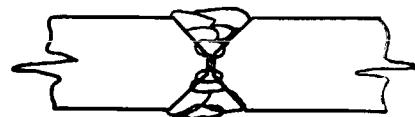


Fig. 2・2 Passes of Weld to Produce Incomplete Penetration.

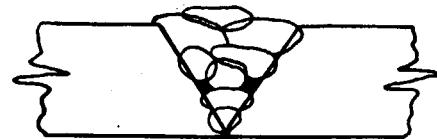


Fig. 2・3 Passes of Weld to Produce Parallel Line Lack of Fusion.

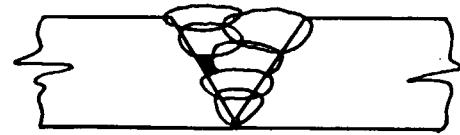


Fig. 2・4 Passes of Weld to Produce Single Line Lack of Fusion.

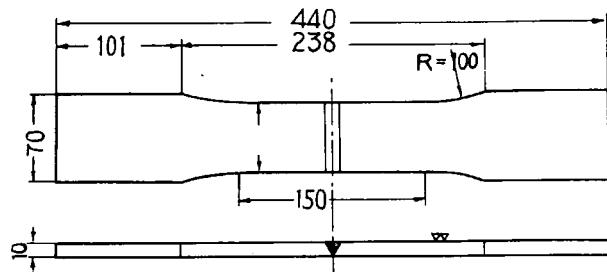


Fig. 2・5 Fatigue Test Specimen of Welded Butt-Joint.

Table 2.1

試験番号	欠陥の種類	等級	繰返し荷重 kg/mm ²	繰返数	備考	試験片番号	欠陥の種類	等級	繰返し荷重 kg/mm ²	繰返数	備考
1	気孔	2 級	0~24	404,200		54	溶込み不足	4 級	18	1,857,850	
2	スラッシュ、気孔	6 級	17	195,000		55	気孔	2 級	25	378,370	
8	スラッシュ、気孔	"	"	329,960		57	スラッシュ孔	4 級	20	820,300	
10	融合不良、気孔	4 級	18	2,073,670	破断せず	58		3 級	22	575,200	
11	気孔	2 級	22	2,087,310		59	"	"	21	1,874,520	
13	"	"	29	208,990		60	欠陥孔	1 級	26	644,960	
15	気孔、スラッシュ	6 級	25	828,750		61	無気	4 級	20	790,000	
19	気孔	"	14	185,000		62	"	2 級	26	274,430	
20	"	"	18	950,000		63	"	3 級	20	4,317,600	
21	気孔、融合不良	"	17	30,810		64	無気	1 級	23	1,150,300	
22	"	"	"	188,500		72	"	"	"	524,250	
23	気孔、スラッシュ	"	"	142,520		74	"	"	22	2,094,400	
24	"	"	20	207,000		75	"	3 級	26	373,780	
25	スラッシュ	"	16	185,780		77	欠陥孔	1 級	22	2,030,620	
27	"	"	"	240,000		80	スラッシュ、気孔	4 級	20	727,600	
28	スラッシュ、気孔	4 級	24	454,000		81	スラッシュ	2 級	26	221,000	
29	スラッシュ	2 級	22	346,000		82	スラッシュ、気孔	4 級	20	127,400	
30	"	3 級	25	140,360		84	"	3 級	19	1,606,100	
31	"	5 級	26	105,400		87	"	"	18	1,209,600	
32	スラッシュ、気孔	4 級	21	271,630		88	スラッシュ	2 級	20	939,200	
33	スラッシュ	5 級	30	81,040		89	気孔	"	23	902,000	
37	気孔	4 級	18	2,147,500	破断せず	90	気孔、スラッシュ	3 級	19	384,100	
39	無気	2 級	20	2,065,000		92	スラッシュ	2 級	"	1,350,300	
40	欠陥孔	1 級	24	1,046,300		93	スラッシュ、気孔	3 級	18	2,037,000	
42	"	3 級	"	227,350		94	欠陥孔	1 級	27	332,580	R 部破断
47	溶込み不足	6 級	17	915,440		100	"	"	"	845,770	R 部破断
48	"	"	"	2,671,520	破断せず	145	スラッシュ、気孔	6 級	26	77,500	
49	"	"	"	287,170		146	気孔	2 級	30	270,500	
50	"	"	"	219,220							

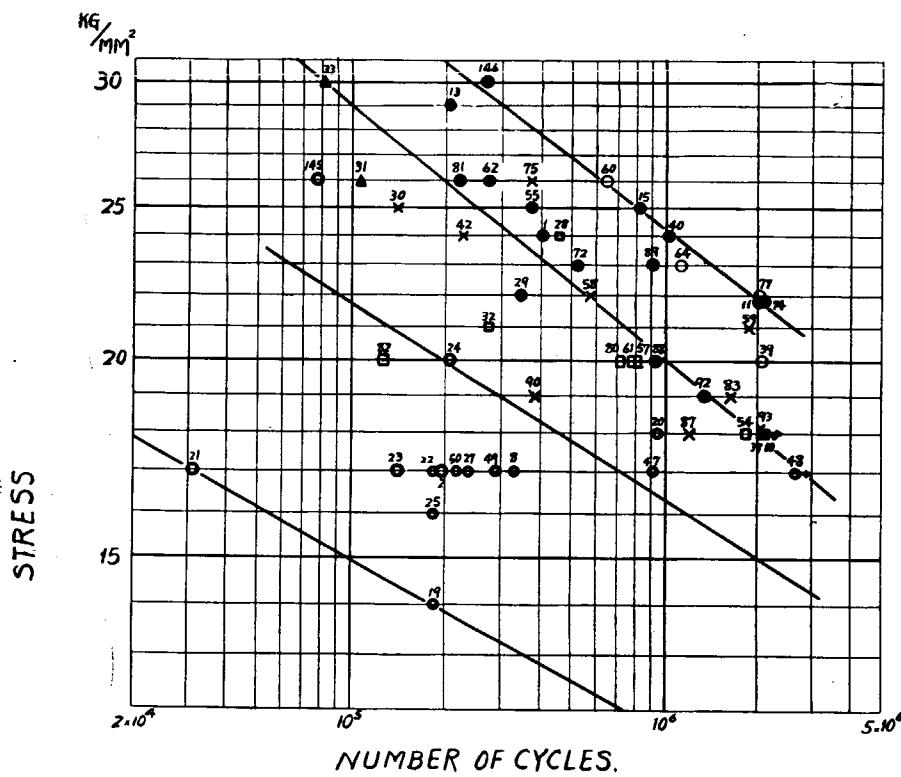


Fig. 2·6 S-N Diagram of Fatigue Test of Welded Joints.

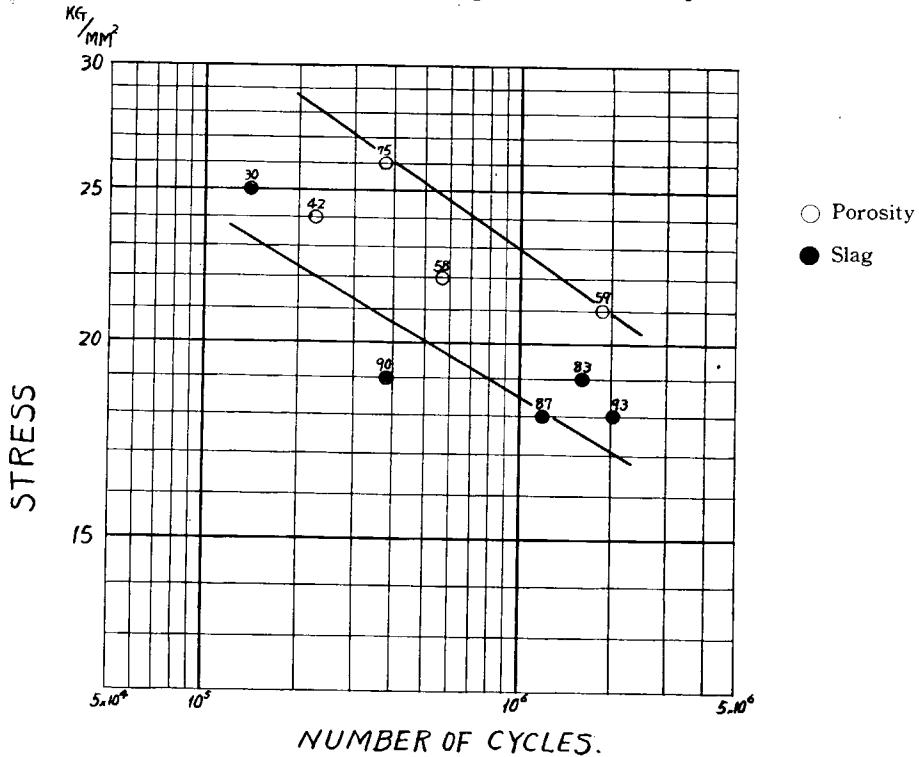
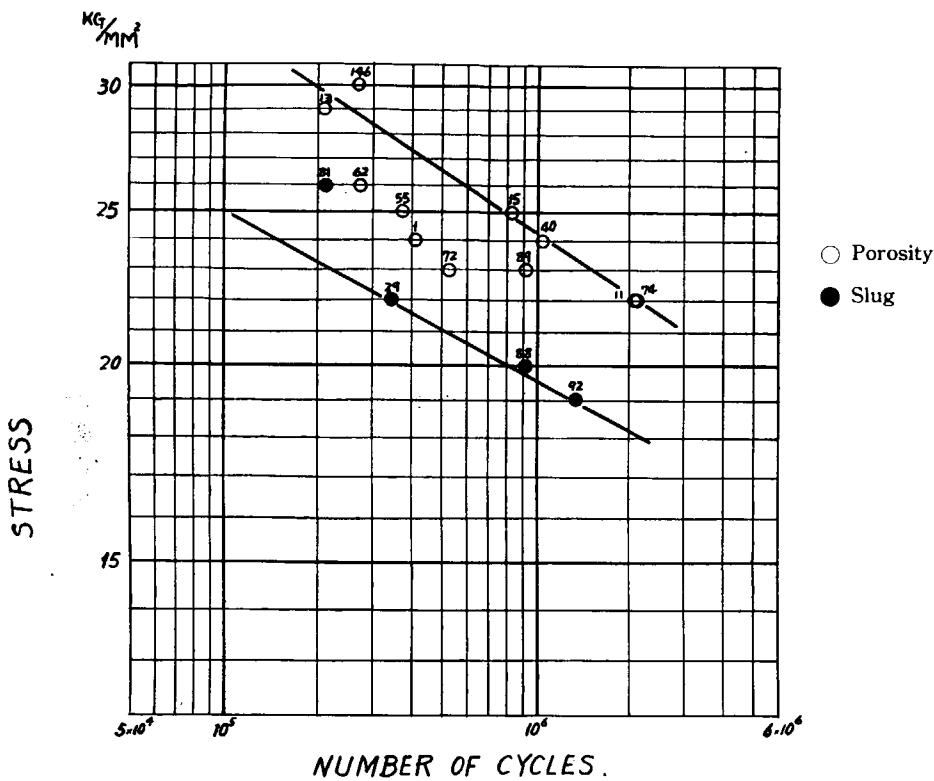


Fig. 2·7 S-N Diagram of JIS Class 2 Welds.



これを図示すれば Fig. 2.6 に示すようになり、JIS 2 級のみを抜き出せば Fig. 2.7、JIS 3 級のみを抜き出せば Fig. 2.8 に示すようになる。

この表より次式により 2×10^6 回疲労強度 S を計算することができる。

$$\sigma/S = (n/N_{=2 \times 10^6})^{-K}$$

K は 2×10^6 に対する S の大きさで異なるが、

Fig. 2.6 に記入してある 4 本の S-N 曲線の K を S に対しプロットして見ると Fig. 2.9 のようになるので、 K は S に対し次式の如き直線関係があるものと見なした。

$$K = 0.05 + 0.005 S$$

かくの如くして求めた JIS の各級に対する 2×10^6 疲労強度を推計紙上にプロットし、平均値、および疲労強度がこれより下らない確率 5% および 95% を疲労強度の下限および上限としてこれを求める、Table 2.2 の如くなる。

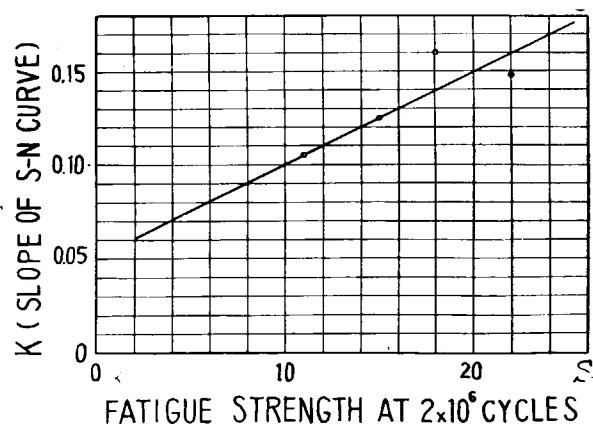


Fig. 2.9 Relationship between Slope of S-N Curve to the Fatigue Strength (at 2×10^6 Cycles).

Table 2-2

(単位 kg/mm²)

		J I S 級					
		1	2	3	4	5	6
疲 労 強 度	下限 (5%)	18.8	17.0	14.3	16.0	—	10.3
	平均	21.6	20.0	18.1	18.0	19	14.0
	上限 (95%)	24.5	22.8	23.0	19.7	—	18.0

これを図示すれば Fig. 2-10 となる。これらの試験片のX線透過写真ならびに疲労試験後の破断面の写真的代表的なるものを Fig. 2-11 に示す。

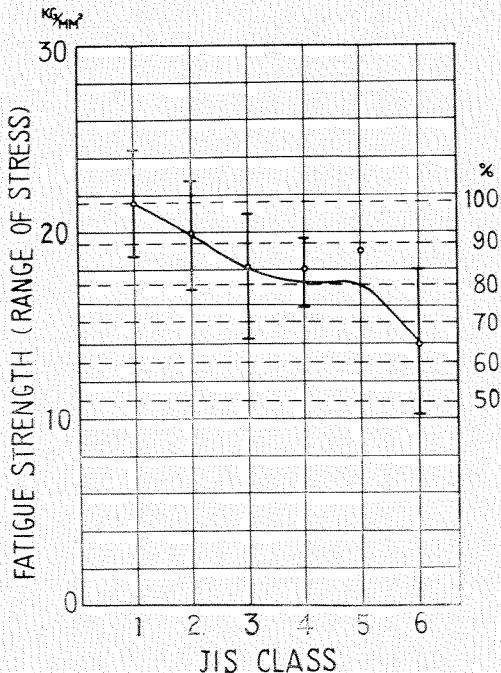
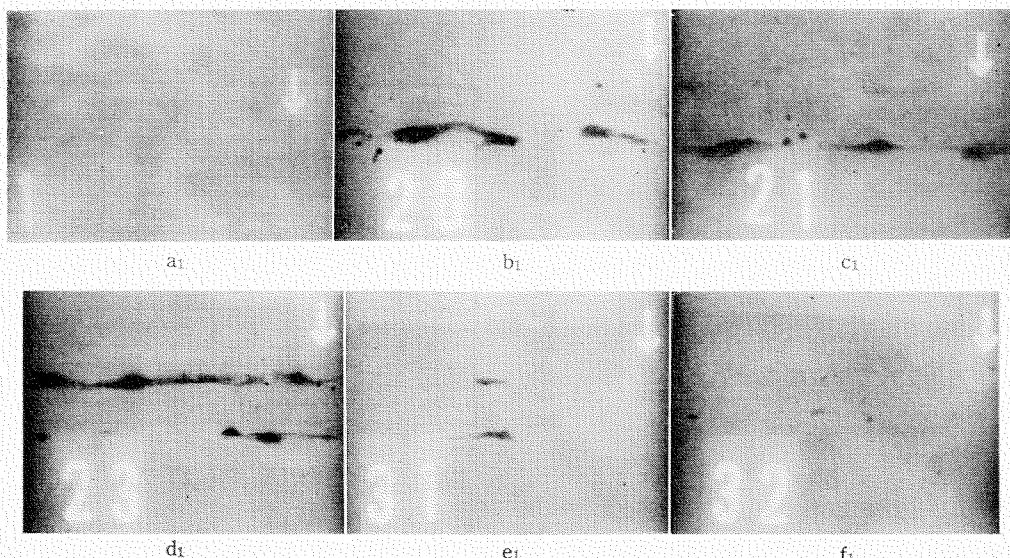


Fig. 2-10 Relationship between Fatigue Strength (at 2×10^6 Cycles) and JIS Class.



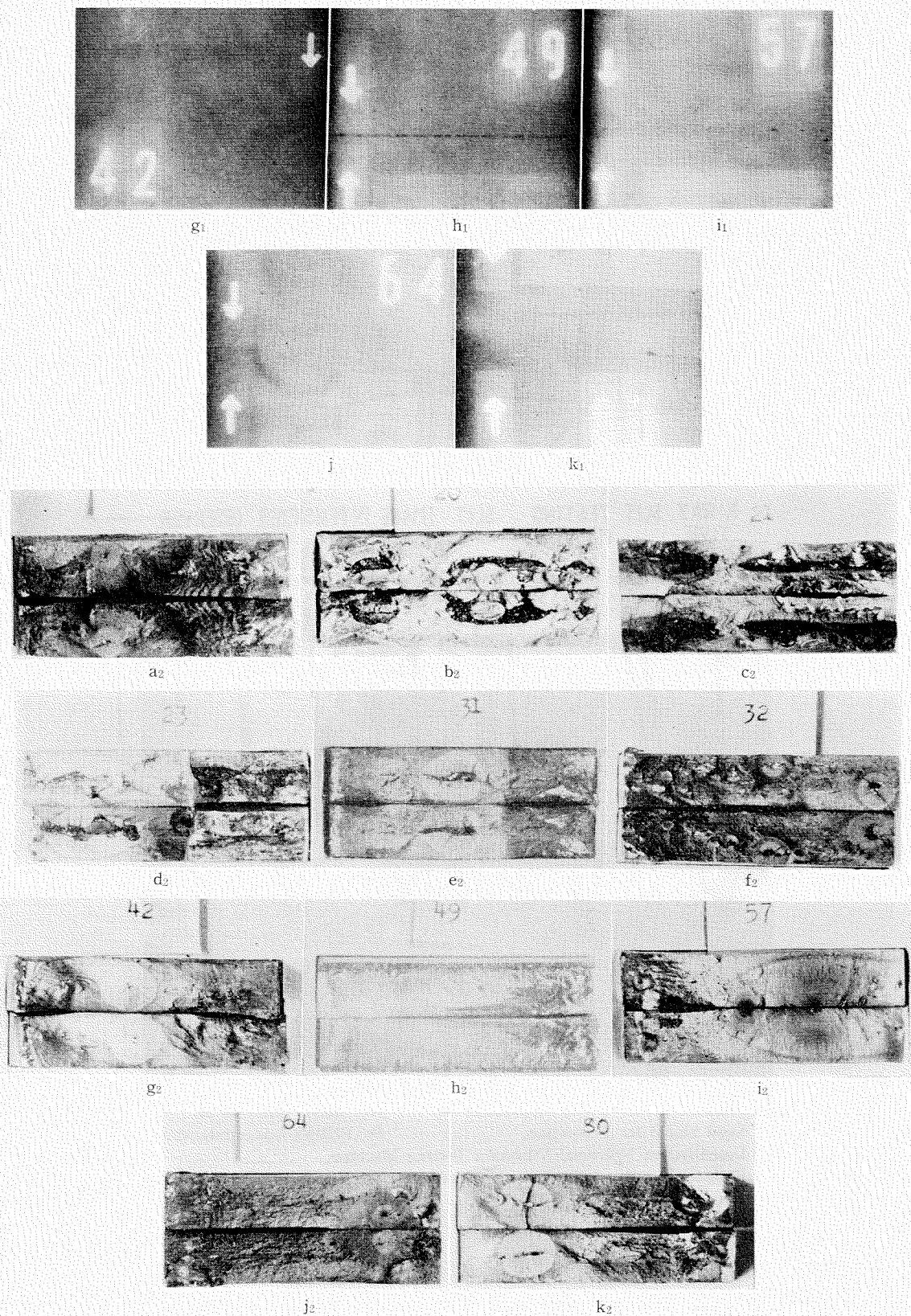


Fig. 2.11 Typical Radiographs of Fatigue Test Specimens (a₁~k₁) and Photographs of Failed Surfaces (a₂~k₂)

1・3 イメージ・インテンシファイナーによる疲労亀裂進行の観測

以上述べた疲労試験の間において、疲労破壊の様相、特に亀裂の発生時期を調べるために、この中の4本については試験開始から破壊に至るまで連続的にイメージ・インテンシファイナーにより欠陥附近のX線透過像の観測を行つた。又肉眼の代りに小型カメラにより撮影記録した。この際にある時間間隔をおいて普通のX線透過写真撮影も行つた。この実験に用いた装置の配置を Fig. 2-12 に示し、その状況写真を Fig. 2-13 に示す。

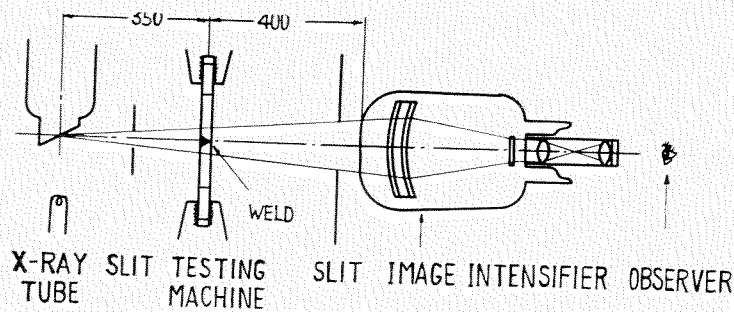
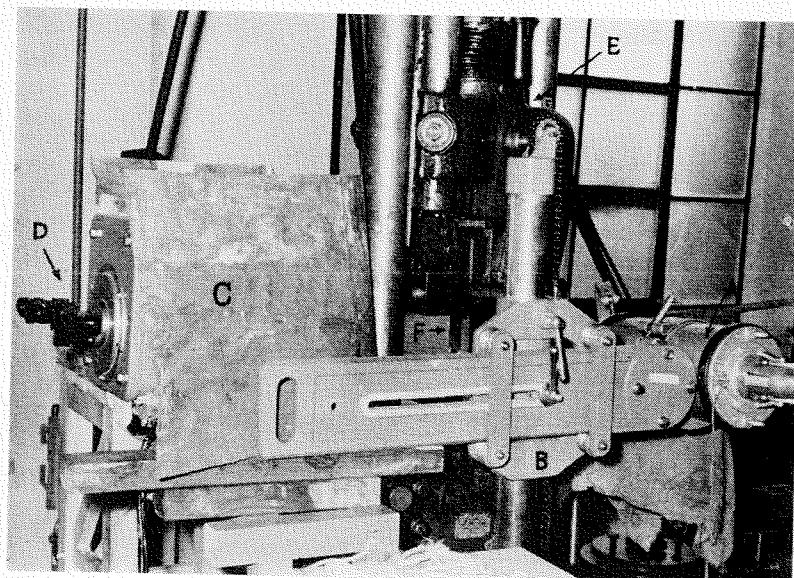


Fig. 2-12 Schematic Diagram of Observing the Fatigue Crack Development by Image-Intensifier.



A: Müller's 150 kV X-Ray Apparatus, B: Holder Stand of A,
 C: Lead Shield for Protection, D: Philip's Image-Intensifier,
 E: Losenhausen Universal Vibration Testing Machine,
 F: Fatigue Test Specimen to be observed.

Fig. 2-13 Observation of Fatigue Crack Development by Image-Intensifier.

X線管球の焦点は鮮鋭な像を得るために 0.4 mm の大きさのものを用いた。観測者に対する放射線障害を避けるため、鉛スリットにより X 線を必要最小限に絞つた。観測に際して試験機の振動の妨害が

心配されたが、運転速度 600 r.p.m. で試験片応力 $20\sim30 \text{ kg/mm}^2$ を生ずる荷重では、観測に支障を生ずるような振動は生じなかつた。Fig. 2-12 の配置においてイメージ・インテンシファイサーの一次螢光像の倍率は約 2 であつて、ヘネトラスター識別感度は約 3% であつた。観測に用いた X 線発生或いは写真撮影条件は次の通りである。

(a) イメージ観測の場合

電圧: 110 kV 電流: 2 mA

イメージ撮影

カメラ: Leica 3 F 紋り: 1.8 時間: 2~3 sec

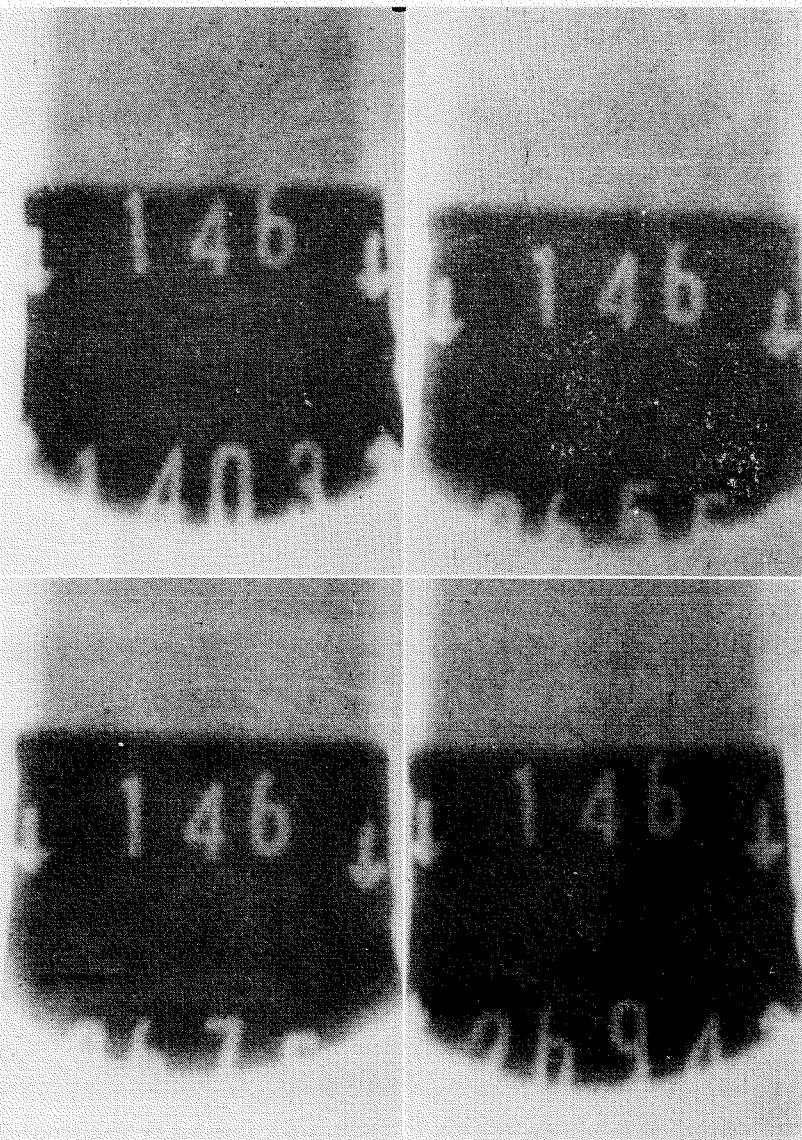


Fig. 2-14 Development of Fatigue Crack of Specimen No. 146, observed by Image-Intensifier.

(b) 直接写真

電圧: 140 kV 電流: 2 mA

フィルム: 富士 #80 増感紙: 鉛箔

これらの写真を Fig. 2·14, 2·15, 2·16, 2·17, 2·18 に示す。Fig. 2·14 はイメージ像であり、Fig.

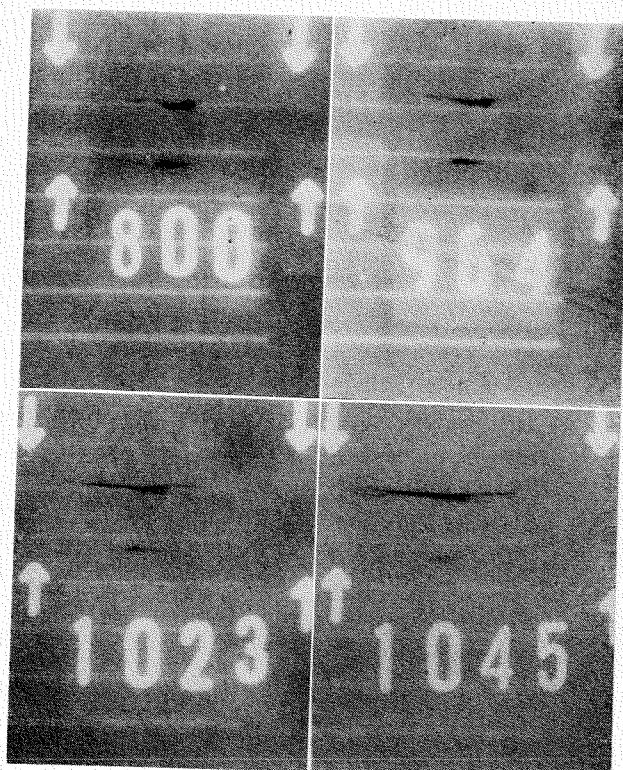


Fig. 2·15 Development of Fatigue Crack of Specimen No. 31, Directly Radiographed.

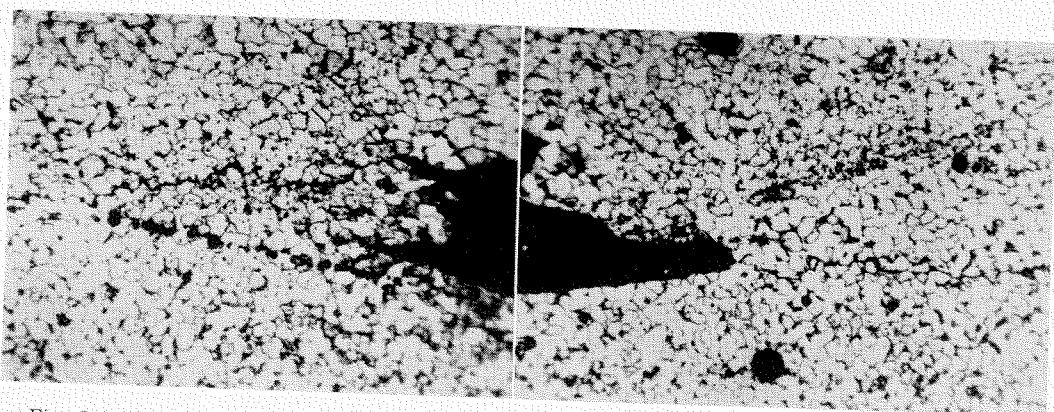


Fig. 2·16 Micrographs of Intercrystalline Crack, which is not revealed by Radiographs, at the End of the Smaller Slag shown at the Lower Parts of Radiographs in Fig. 2·15.

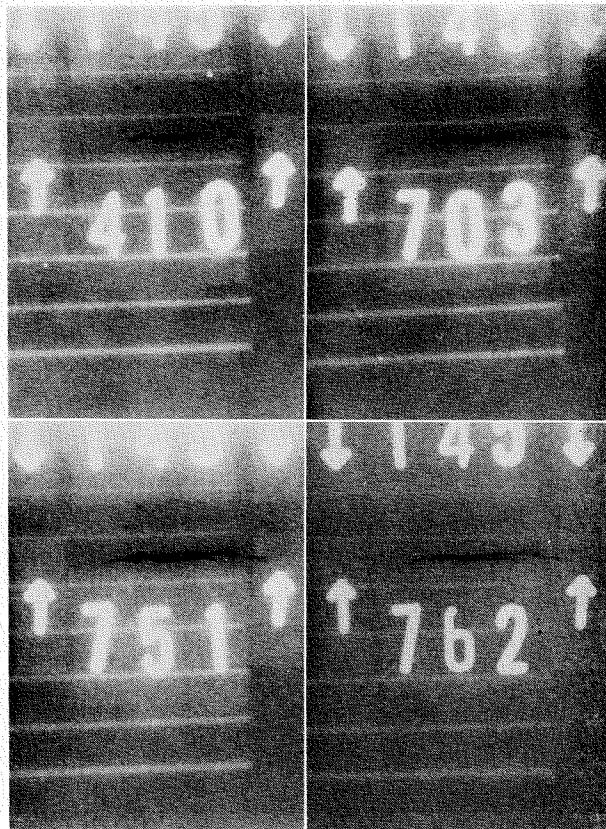


Fig. 2-17 Development of Fatigue Crack of Specimen No. 145, Directly Radiographed.

2-15, 2-17, 2-18 は直接透過写真である。これらの写真において上の数字は試験片番号、下の数字は 100 を単位とした荷重繰返数を示す。

イメージの観測と直接撮影では後者が勿論感度が高い。特に欠陥の端部に微細な亀裂が発生した場合にX線フィルムの方が早く分る。しかしその後の亀裂の進行状況、各欠陥から亀裂が発生進行する相互の関係を見るにはイメージ・インテンシファイアは甚だ有効であつた。Fig. 2-14 はイメージの写真記録で、あまり明瞭でないが、これは映像面のちらつきがボケとなつて記録されているためであつて、実際にはもつとよく観測される。

Fig. 2-16 は Fig. 2-15 の写真的下側の小さい分の欠陥の端の部分の断面の顕微鏡写真であつて、X線写真では表わされていない結晶粒界亀裂の存在が認められる。

この観測より得られた重要な事実は欠陥端部より亀裂が拡がり始まると間もなく破断すると云うことである。これは Table 2-3 に明らかである。

試験片 31 には 2 つのスラッグまき込みがあり、このうちの大きい方の欠陥より亀裂が発生して破断した。小さい方のスラッグはそのままで何等の変化も認められなかつたが、この欠陥の先端部は先

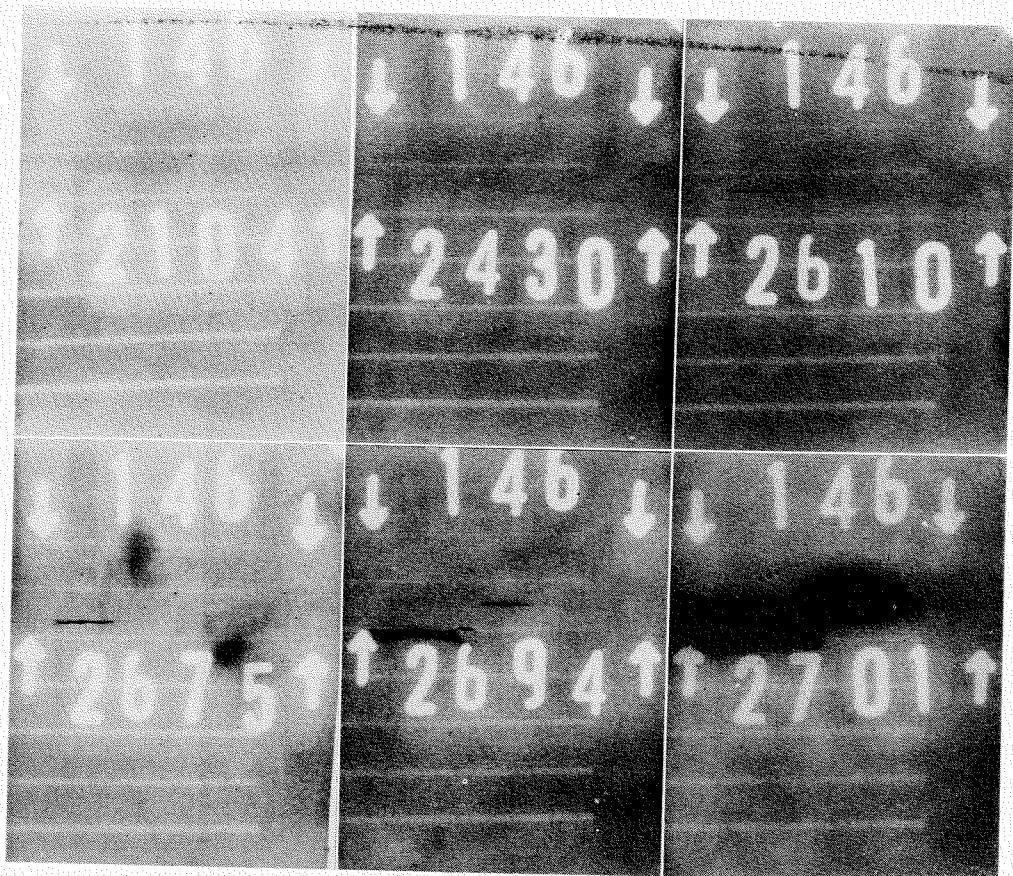


Fig. 2-18 Development of Fatigue Crack of Specimen No. 146, Directly Radiographed.

Table 2-3 X線フィルムに亀裂が現われた繰返数と破断繰返数

試験片番号	X線フィルムに亀裂が現われた繰返数(正確ではない) N_e	破断繰返数 N_f	N_e/N_f
31	96,400	105,400	0.91
145	70,300	77,500	0.91
146	243,000	270,500	0.90

に示したような粒界亀裂が発生している。この亀裂はX線フィルムでは発見されず発生時期も明らかではないが、その発生時期、発生応力を求めることは有意義なことであると考えられる。

試験片146では2つの気孔のうち一方の気孔より亀裂が進行し、破断直前に他方の気孔よりも亀裂が発生し、両亀裂面は相当離れていたにも拘らず連結して破断した。しかしこの試験片では先に発生した亀裂によつて破断は決定的であり、後の亀裂は破断繰返し数に大した影響は及ぼさなかつたものと考えられる。かくの如く応力に垂直な同一平面上にない欠陥が如何なる相互作用を及ぼすかは、欠陥と強度の関係を考える上に重要な意義を有する。破断試験片の全部を調べた結果では、破断線は巾5mm以内に入るものが殆どであつた。

1・4 実験結果の考察

この実験においては、X線透過写真は欠陥が最もよく検出されるような技術で撮影されたものであるが、実験結果の考察にはフィルムのみでなく破面の状況をも調査し、両者を総合考慮することとした。

(1) 疲労試験片の破面の状況 破面には疲労亀裂の開始面と、それが相当広がつて断面積が小となり残存断面の応力が大となり塑性変形を生じている破面との2部分が明瞭に見出される。溶接欠陥で板厚の2~3%以上の大さのものは殆ど全て疲労亀裂開始面の核となつてゐる。従つてこの試験片のように表面を仕上げた場合はX線フィルム上検出される溶接欠陥はすべて疲労亀裂の発生源となるものと考えられる。

疲労破面の中にはFig. 2-11 a₂、或いはもつと明瞭にはg₂に示される如く欠陥を中心とした白円状の部分、いわゆる銀点、白点、フィッシュ・アイに類するものを有するものと、Fig. 2-11 i₂に示す如くこれを欠く貝殻状のものとある。白点は普通の引張試験で現はれるものより大であるが、それが発生の時期、拡り方、或いは水素の影響によるか否か、等はつきり掴むに至らなかつた。

(2) JIS 等級に従つて分類しプロットした S-N 線図 Fig. 2-6 を見ると相当ばらつきがある。これは疲労性質に固有のもの、等級判定の巾、JIS の判定法では板厚方向の寸法が考慮されない等々が原因であると考えられる。

しかし一応1級から6級に至るに従い順次疲労強度は低下しており、現在のJISは大体において正しい傾向を示しているものと認められる。但し5級などは試験片数が少いため考察の対象とするには不充分であり、6級は範囲が広過ぎはつきりしたことが分らない。

(3) イメージ・インテグレーターおよび直接X線撮影により疲労亀裂の進行現象の連続的観測を行うことが現象究明に有利な方法であることを実証した。これにより得た結果の1は亀裂が拡がり始めてから破断するまでの寿命は全寿命の1/10以下であることであつて、繰返し荷重により亀裂の発生が認められたならば直ちに補修の要あることの示されたことである。

(4) 応力に垂直な同一平面上にない欠陥は、その面間距離が5mm以上離れていると相互影響は及ぼさないようである。これより見ると現在のJISの判定区割50×10mm²内の欠陥を数えて加算する方法は区割を例えれば50×5mm²内とすると云うように再検討する必要がある如く考えられる。しかしこれも板厚や欠陥の大きさに關係することも考慮する必要がある。

(5) 欠陥の中気孔はスラッグに比し疲労強度に悪い影響を及ぼさない。これはFig. 2-7およびFig. 2-8を見れば明瞭である。

又スラッグでも大きい場合は疲労強度が低い。例えば試験片番号30および90参照。この点でJISの欠陥の評価法はなお改善の余地があるようである。

§ 2. 溶接突合せ継手の IIW 等級と疲労強度

2・1 実験方法

(1) 試験片

溶接試験片は NDI で集めた溶接片を X 線検査して代表的な欠陥を含むものを選び出した。従つて母材および溶接の詳細は不明であるが、母材は SS 41、棒は大部分 E 4301 と考えられる。溶接片の大きさは約 400×400 、板厚は 8~16 mm である。

疲労試験片は Fig. 2-19 に示す形状とした。切断は機械切断とした。ビードは充分深く削つて表面欠陥の影響は除いてある。

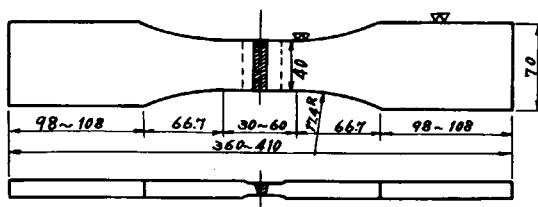


Fig. 2-19 Fatigue Test Specimen of Welded Joint.

(2) 放射線検査

最終的放射線検査は疲労試験片に仕上げる前ビードの削成を終り長方形に切出した段階で行った。フィルムは富士 #80、鉛箔増感紙を使用し、電圧は板厚により変えている。撮影されたフィルムは最上の品質を有するものである。

判定は IIW 標準写真と慎重に比較して行った。但し等級決定は疲労試験片の巾の部分、フィルム巾の中央部 40 mm につき行つた。

(3) 疲労試験

疲労試験は片振引張で行つた。

(a) 疲労試験機： 高砂森試験機製作所製 ローゼンハウゼン型 35/20 t

(b) 試験速度： 500 r.p.m.

(c) 荷重の種類： 片振引張、下限応力 $2 \sim 3 \text{ kg/mm}^2$

2×10^6 回に達しても破断しない場合は更に長い回数まで延したものもある。又、一部は 2 kg/mm^2 の階段で 2×10^6 回宛の階段的応力漸増法を適用したものもある。

2・2 実験結果

(1) 疲労試験の結果

疲労試験の結果は Table 2-4 に示す通りである。この応力は試験片の外形寸法より断面積を求め算出したもので公称応力である。

Table 2-4

試験片 記号	板厚 mm	欠陥の種類	欠陥の程度 IIW	応力 上限～下限 kg/mm ²	繰返数 万回	破断 有無	推定 2×10^6 疲労強度 (全振巾)	備考
20 2	10.05	無 欠陥	Black (1)	26.0～3.0	80.2	有	20	
" 3	9.87	"	"	24.0～3.0	223.8	無	>21.4	停 止
" 4	10.23	"	"	28.0～3.0	25.3	有	18.7	
17 1	7.61	Aa 気孔	"	24.0～3.0	206.4	無	>21	停 止
" 3	7.92	Ba スラッダ	Blue (2)	24.0～3.0	61.4	有	17.8	
" 4	7.29	"	"	26.0～3.0	25.6	"	17.3	
" 5	7.11	"	Green (3)	22.0～3.0	202.6	無	>19	停 止
37AL1	10.16	C 融合不良	Red (5)	14.0～3.0	146.2	有	10.6	
" 2	11.10	"	"	16.0～3.0	99.3	"	12	
" 4	10.68	Ab バイブ	Brown (4)	14.0～3.0	205.3	無	>11	停 止
133 1	8.17	"	Green (3)	20.0～3.0	62.2	有	14.6	
" 2	7.59	D 溶込み不足	"	16.0～3.0	94.8	"	12	
" 4	7.80	Aa 気孔	"	15.0～3.0	72.1	"	10.8	
30 1	12.95	無 欠陥	Black (1)	26.0～3.0	121.1	"	>21.4	母材平行部 末端破断
" 2	13.20	Aa 気孔	Brown (4)	14.0～2.0	230.0	無		
" "	"	"	"	16.0～2.0	65.0	有	13.2	
" 3	13.34	"	Green (3)	14.0～2.0	392.4	"	12.9	
88 1	14.19	Ba スラッダ	Red (5)	14.0～2.0	155.6	"	11.7	
" 3	14.65	"	"	12.0～2.0	201.5	無	>10	停 止
" 4	13.55	"	"	13.0～2.0	66.8	有	9.9	
124 1	13.70	D 溶込み不足	"	12.0～2.0	2.1	"	6.8	
" 3	14.05	"	"	8.0～2.0	11.6	"	4.9	
" 4	13.78	"	"	16.0～2.0	157.9	"	3.9	
181 1	8.85	キレツ	"	8.0～3.0	173.3	無	>4.9	停 止
" 3	9.11	"	"	10.0～3.0	200.2	"	>7.0	"
" 4	9.25	"	"	12.0～3.0	72.0	有	8.2	
167A 1	12.36	D 溶込み不足	"	10.0～2.0	213.0	無	>8.1	停 止
" 2	11.87	"	Brown (4)	14.0～2.0	210.0	"		
" "	"	"	"	16.0～2.0	200.7	"		
" "	"	"	"	18.0～2.0	204.9	"		
" "	"	"	"	20.0～2.0	205.0	"		
" "	"	"	"	22.0～2.0	201.0	"		
" "	"	"	"	24.0～2.0	20.0	有	20.5	
" 3	12.03	Bb スラッダ	Green (3)	22.0～2.0	200.0	無		
" "	"	"	"	24.0～2.0	200.0	"		
" "	"	"	"	26.0～2.0	200.0	"		
" "	"	"	"	28.0～2.0	184.9	有	>29.6	母材平行部 末端破断
44 1	9.85	無 欠陥	Black (1)	20.0～3.0	205.4	無		
" "	"	"	"	22.0～3.0	231.0	"		
" "	"	"	"	24.0～3.0	233.5	"		
" "	"	"	"	26.0～3.0	208.0	"		
" "	"	"	"	28.0～3.0	201.2	"		
" "	"	"	"	30.0～3.0	28.3	有	>27.6	母材平行部 末端破断
" 2	9.79	Ba スラッダ	Brown (4)	18.0～3.0	116.4	"	14	
" 3	9.52	"	"	22.0～3.0	10.0	"	13.5	
" 4	10.05	無 欠陥	Black (1)	30.0～3.0	55.5	"	>22	母材平行部 末端破断

試験片記号	板厚mm	欠陥の種類	欠陥の程度IIW	応力上限～下限kg/mm ²	繰返数万回	破有無	推定 2×10^6 疲労強度(全振巾)	備考
164A 1	11.71	無欠陥	Black (1)	22.0～2.0	242.6	無		
"	"	"	"	24.0～2.0	55.8	有	22	
" 2	11.87	"	"	24.0～2.0	91.9	"	19.6	
" 3	11.84	"	"	26.0～2.0	60.0	"	20	
1A 1	14.67	D溶込み不足	Green (3)	24.0～2.0	64.0	"	18.6	
" 2	14.75	Baスラッグ	Blue (2)	20.0～2.0	142.0	"	17.3	
" 3	14.76	気孔	Black (1)	22.0～2.0	200.0	無		
"	"	"	"	24.0～2.0	59.1	有	21.4	
16 1	7.61	無欠陥	"	24.0～3.0	183.7	"	20.6	
" 2	7.61	Aa気孔	Blue (2)	22.0～3.0	75.0	"	16.6	
" 3	7.31	Abバイブル	Brown (4)	18.0～3.0	200.0	無		
"	"	"	"	20.0～3.0	31.2	有	15.7	

この表に推算してある 2×10^6 強度は、§1,1・2(1) の方法により推算したもので、2・1 の実験と比較可能とするため全振巾(応力範囲)で示してある。

又 §1,1・2(1) に準じ IIW 各級の疲労強度の上限下限および平均値を示せば Table 2・5 の通りと

Table 2・5

IIW Group						
	Black (1)	Blue (2)	Green (3)	Brown (4)	Red (5)	
疲労強度	下限 (5%)	18.2	10.0	8.3	9.2	3.8
	平均	21	16	12.4	12.3	7.4
	上限 (95%)	24.4	24.5	18.0	16.0	15.0

なり、これを図示すれば Fig. 2・20 となる。

これらの試験片のX線透過写真ならびに疲労試験後の破断面の代表的なものの写真を Fig. 2・21 に示す。

2・3 実験結果の考察

(1) 疲労試験片の破面の状況、この疲労破面では §2,1・4 に述べたとは異り白点が殆ど認められていない。これはこの白点が水素が原因ならば、試験片の溶接後比較的時間が多く経過し水素が脱出したによるものと考えると、白点の水素説を支持するようである。その他は大体 1・4 に述べたことが当はある。

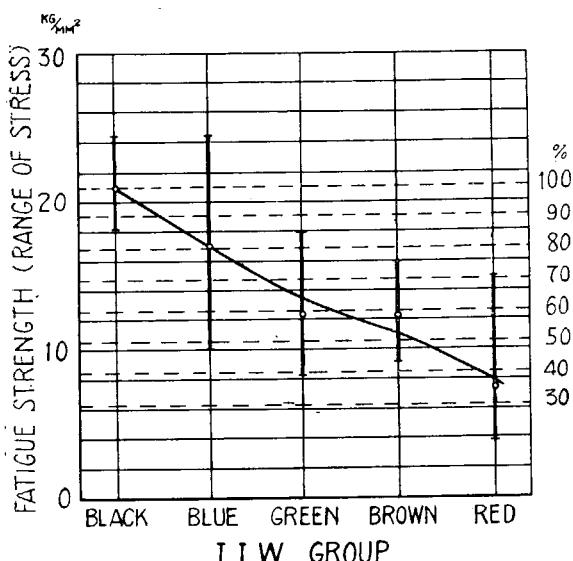


Fig. 2-20 Relationship between Fatigue Strength (at 2×10^6 Cycles) and IIW Groups.

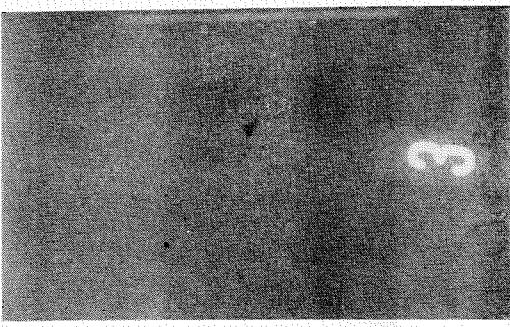
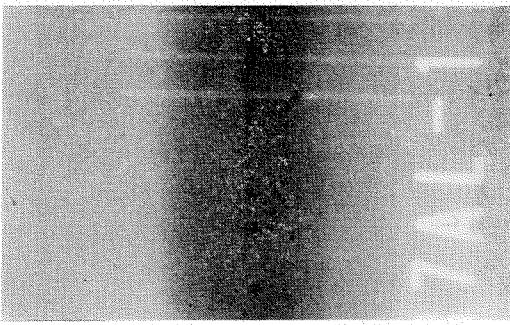
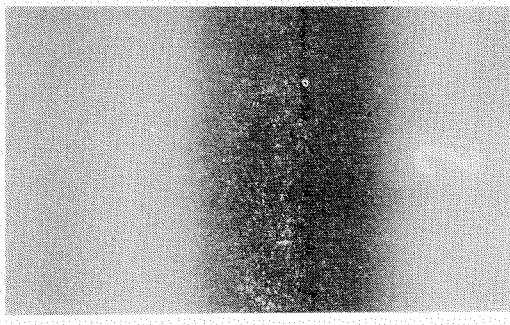
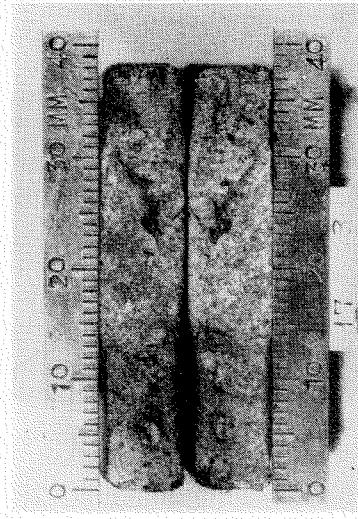
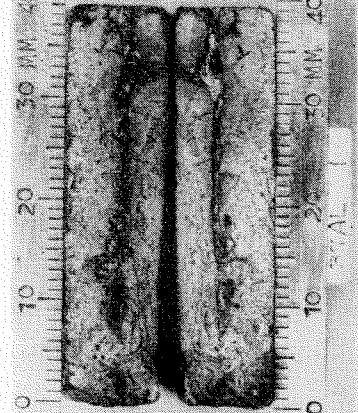
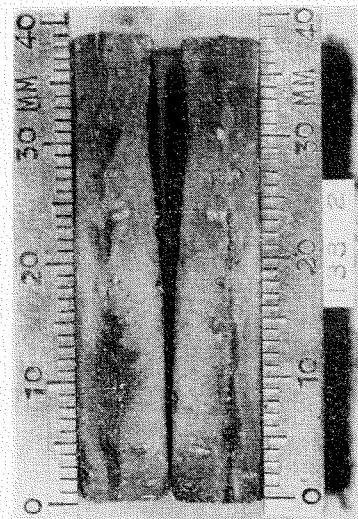
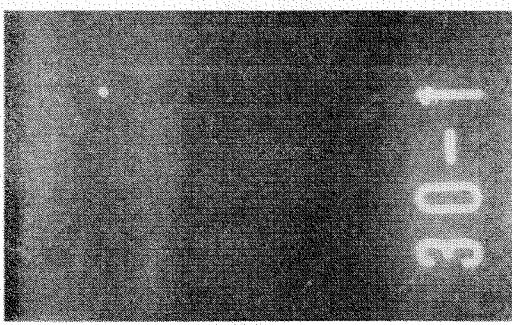
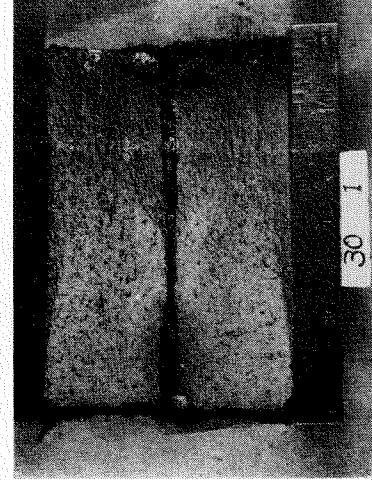
a₁b₁c₁a₂b₂c₂

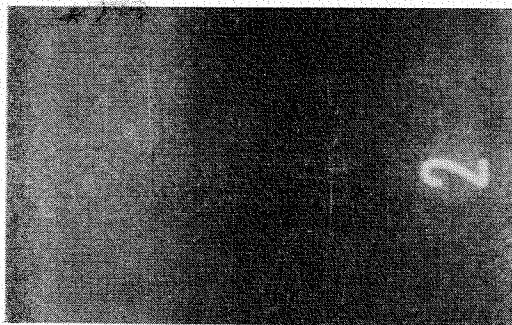
Fig. 2.21 Typical Radiographs of Fatigue Test Specimen (a₁~k₁), and Photographs of Failed Surfaces (a₂~k₂).



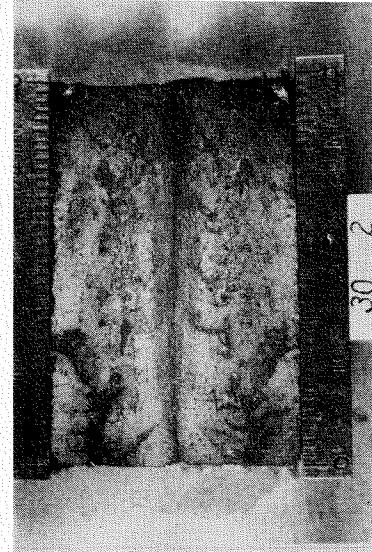
d₁



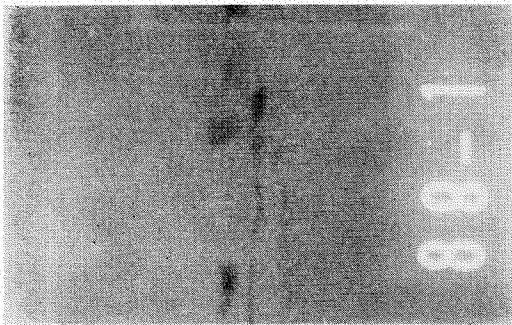
d₂



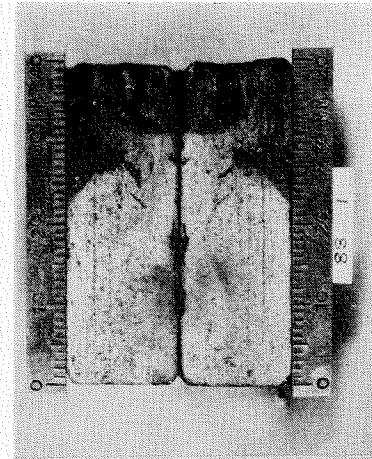
e₁



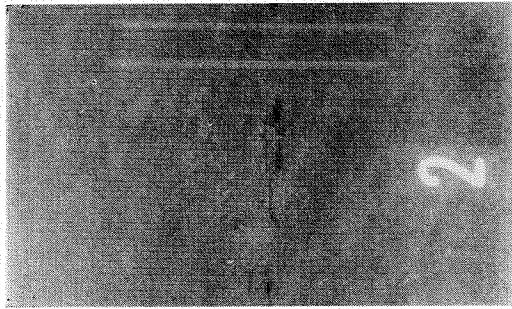
e₂



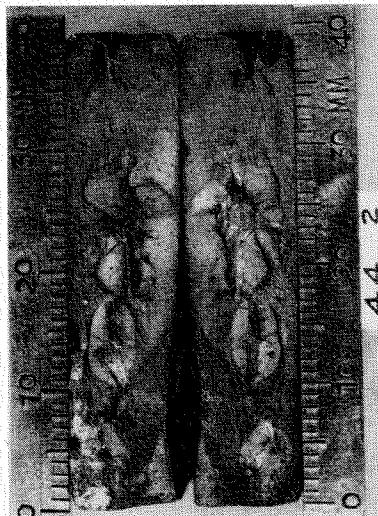
f₁



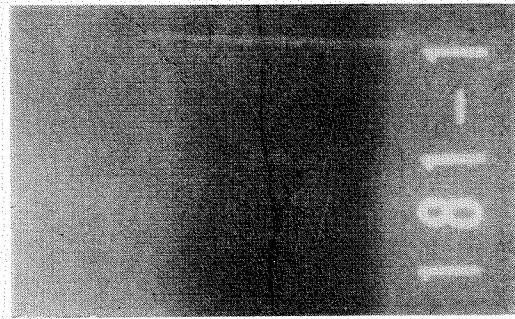
f₂



i₁



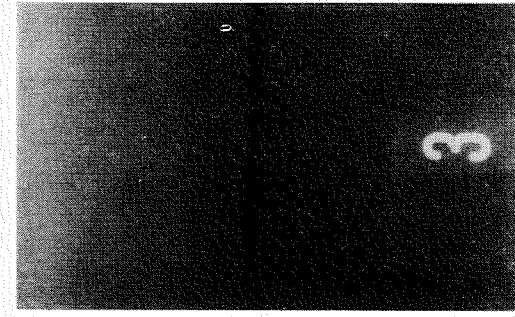
i₂



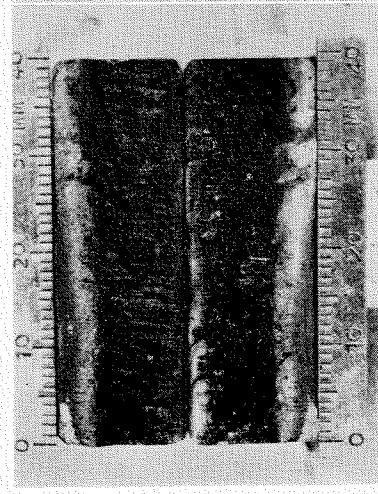
h₁



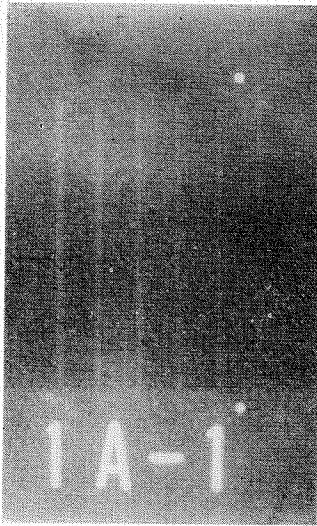
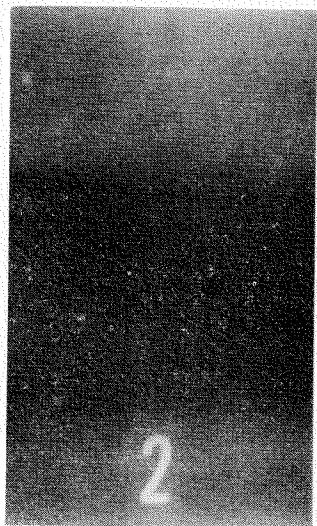
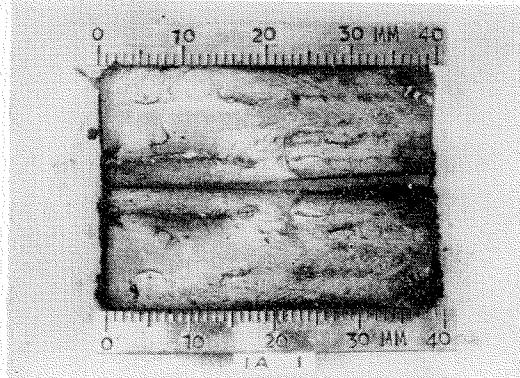
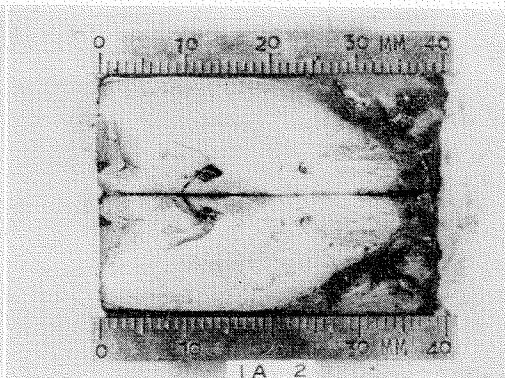
h₂



g₁



g₂

j₁k₁j₂k₂

(2) IIW 等級と疲労強度 Table 2·5 および Fig. 2·20 に示す如く IIW 等級が下ると疲労強度は低下し, Black に対する低下率は Blue で 20%, Green で 36%, Brown で 48%, Red で 63% であり相当著しい。又そのばらつきは Black では大でないがそれ以外では大分大である。ばらつきの大なることは標準として精度の悪いことを示しているものと考えられる。

(3) 欠陥率と疲労強度 これらの疲労試験片の破断面写真印画より欠陥部を切出し, その重量を精密天秤で測つて欠陥面積を求めた。欠陥面積と全断面積の比を欠陥率とし, 欠陥率に対する疲労強度の関係を求めるとき Fig. 2·22 に示す通りになる。又欠陥率を対数でとると Fig. 2·23 の示す通りとなり, 欠陥率の 1% 以下および 100% 附近を除き疲労強度と直線関係がある。

公称断面より欠陥面積を除いた真断面より疲労強度を求めるとき Fig. 2·24 に示す関係が得られる。これより見ると欠陥により疲労強度の低下するに 2 つの要因があるようである。1 は応力集中による疲労強度の低下, 2 は真断面積の減小による見掛け上の強度低下である。前者は僅かの欠陥により疲労強度の急激な低下を生ずる。しかしこれには限度があつて約 10 kg/mm^2 以下には下らないようであ

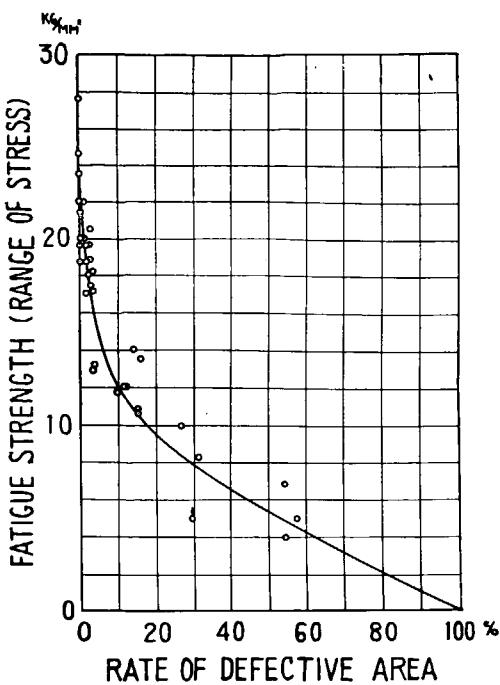


Fig. 2.22 Relationship between Fatigue Strength (at 2×10^6 Cycles) and Rate of Defective Area.

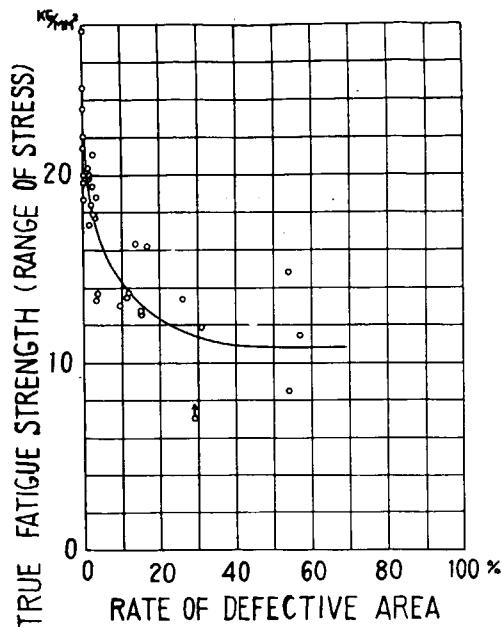


Fig. 2.24 Relationship between True Fatigue Strength (at 2×10^6 Cycles) and Rate of Defective Area.

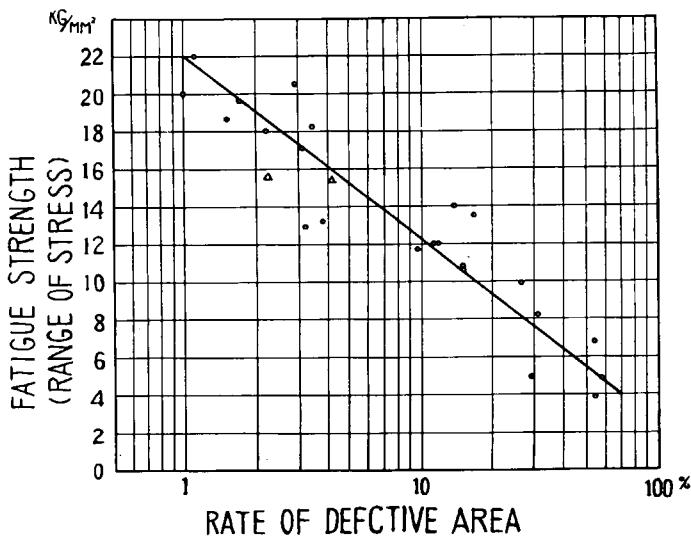


Fig. 2.23 Logarithmic Relationship between Fatigue Strength (at 2×10^6 Cycles) and Rate of Defective Area.

る。亀裂や溶込み不足でもしかりである。欠陥が著しくなると次は断面積の減小による影響が利いて来る。これだけの実験では未だデータが不足であるが、如何なる条件の下でも尖鋭な切欠きに対する疲労強度の下限の存在することが明らかとなれば、欠陥に対する評価法の変つて来ることが予想される。

§ 3. 板厚の大なる場合の欠陥と疲労強度

3・1 実験方法

(1) 試験片

(a) 使用した母材: SM 41 25 mm

分析成分; C 0.14, Si 0.07, Mn 0.69, P 0.011, S 0.032

機械的性質; 試験片寸法 22.00×44.00 mm, 附伏点 25.8 kg/mm^2 ,

引張強さ 44.1 kg/mm^2 , 伸 30.0%

(b) 母材寸法および試験片採取要領:

Fig. 2-25 に示す通りである。

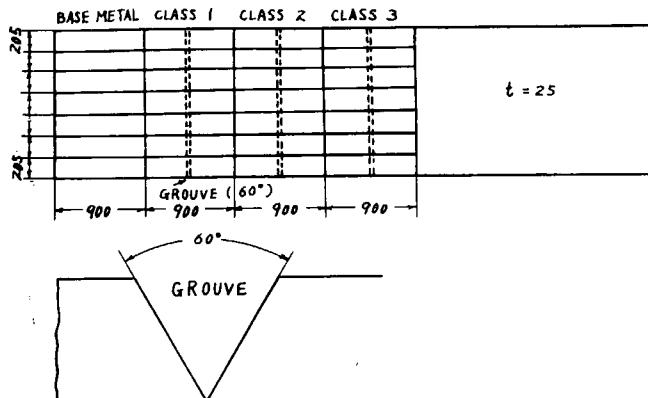


Fig. 2-25 Base Metal for Welded Specimens.

(c) 溶接棒: B-17, 5φ

(d) 溶接条件: 溶接電流 $220 \sim 250$ Amp.

定盤の上に Fig. 2-26 に示すように固定し逆歪を与えて溶接した。層数は次の溶接欠陥の作り方に述べる。

(e) 欠陥を作るためとつた方法:

欠陥は人工気孔とした。無欠陥のものの溶接方法は Fig. 2-27 に示す通りであり、JIS 2 級および 3 級欠陥は Fig. 2-28 に示す如く開先を半分程盛つてから平に仕上げ 2ϕ のドリル孔を 5 又は 9 個明け、その上にビードを盛つて作成した。

(f) 疲労試験片:

上述の溶接片を Fig. 2-29 の形状の疲労試験片に仕上げた。この試験片では溶接片表面を完全に仕上げてある。

(2) 放射線検査

溶接しビードを仕上げた試験片を次の条件で撮影した。

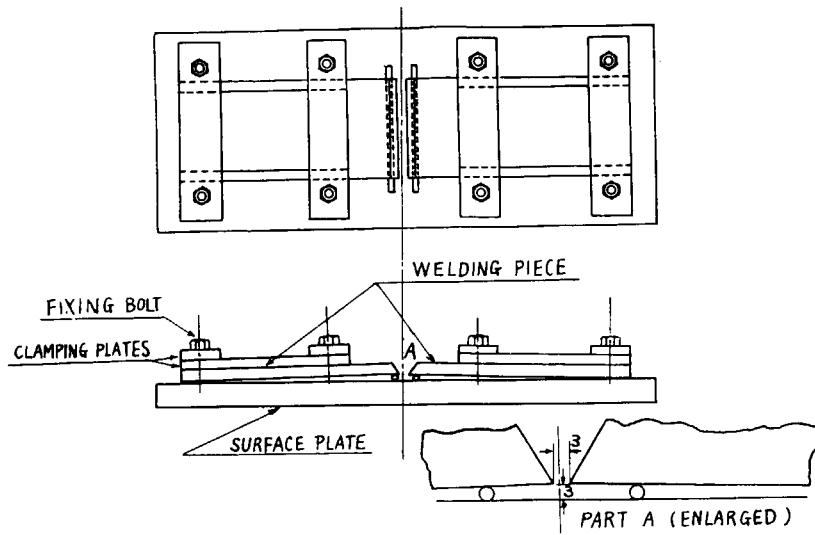


Fig. 2-26 Welding Fixtures for Fatigue Specimen.

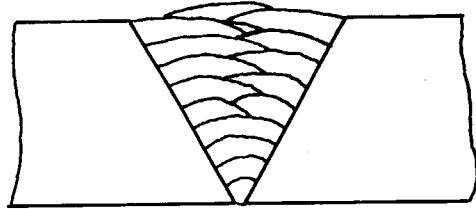


Fig. 2-27 Passes of Perfect Weld Specimen.

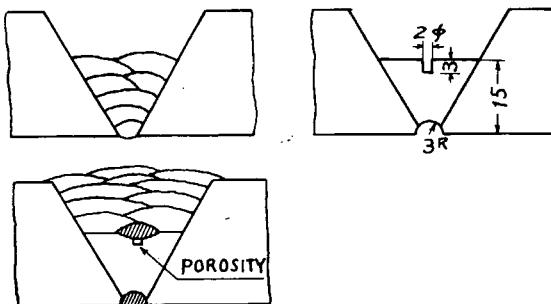


Fig. 2-28 Passes of Weld to Produce Artificial Porosity.

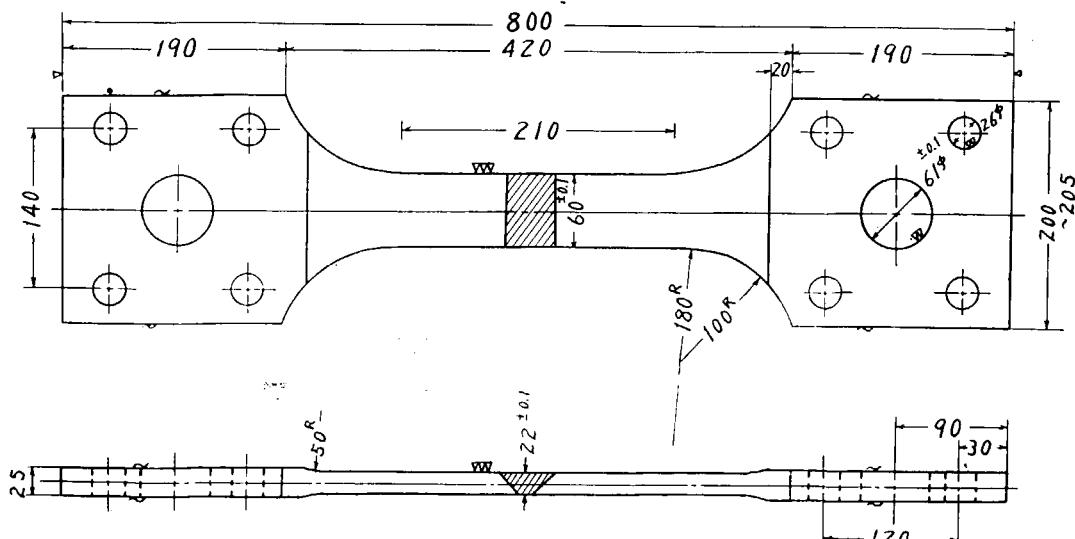


Fig. 2-29 Fatigue Test Specimen of Welded Joint.

(a) フィルム: 富士 #400

(b) 増感紙: マツダ I.D. 融光増感紙

撮影フィルムの例を Fig. 2·30 a より Fig. 2·30 c に示す。

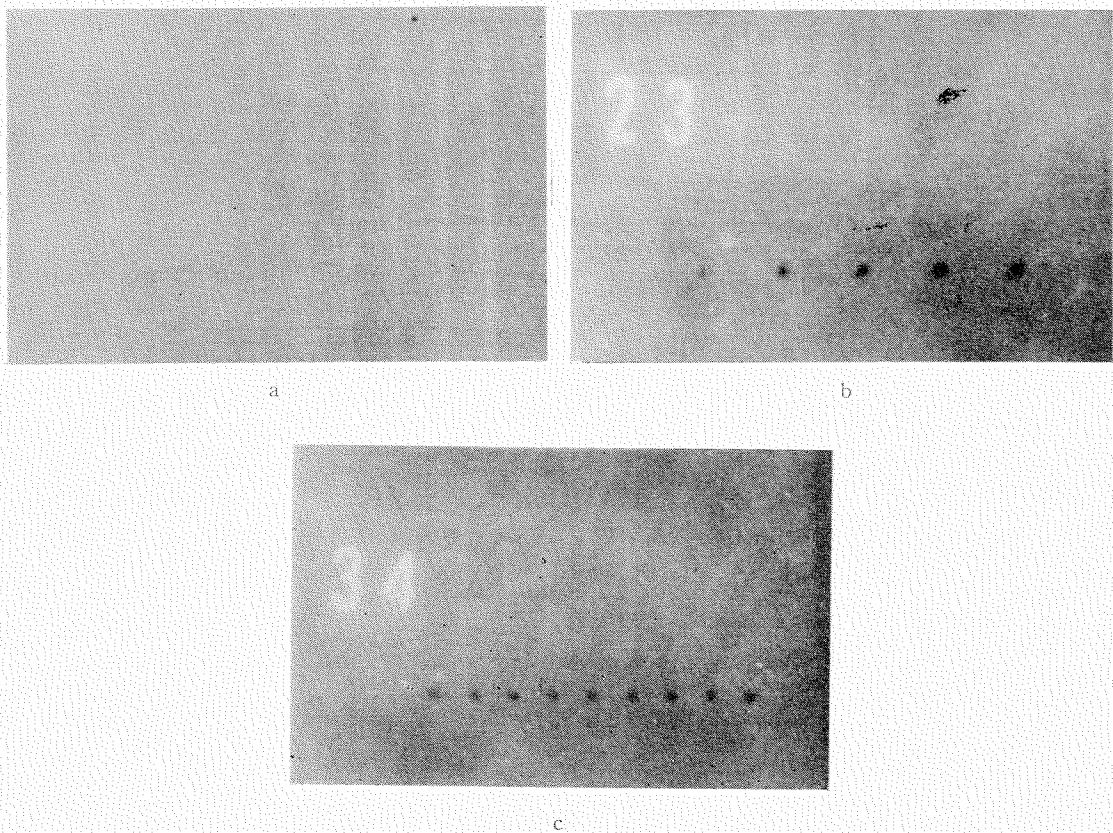


Fig. 2·30 Typical Radiographs of Fatigue Test Specimens, (a~c)

(3) 疲労試験

(a) 使用疲労試験機: 三菱製油圧式 50 t 引張疲労試験機

(b) 試験速度: 600 r.p.m.

(c) 荷重の種類: 片振引張, 下限応力 0

3·2 実験結果

(1) 疲労試験の結果

疲労試験の結果は Table 2·6 に示す通りである。

これを図示すれば Fig. 2·31 に示すようになる。

この場合は試験片は人工欠陥でバラツキが少く、実験点は同一 S-N 曲線に乗るようである。これら試験片の疲労試験後の破断面写真の代表的なものを Fig. 2·32 に示す。

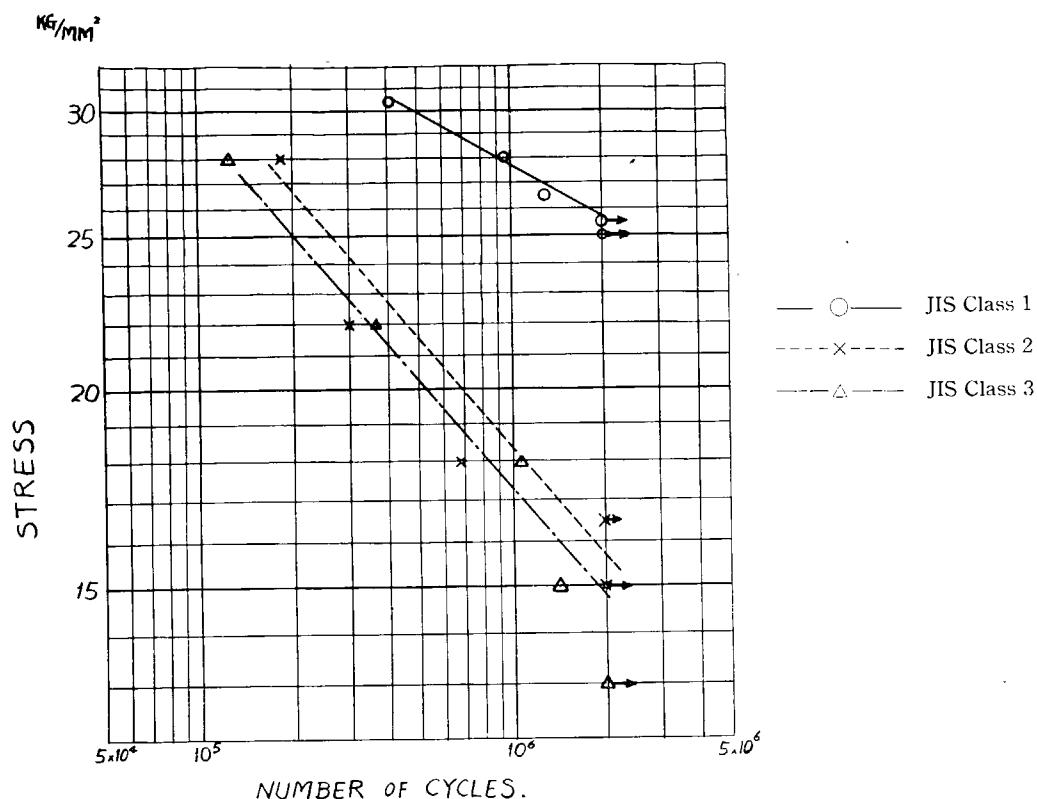
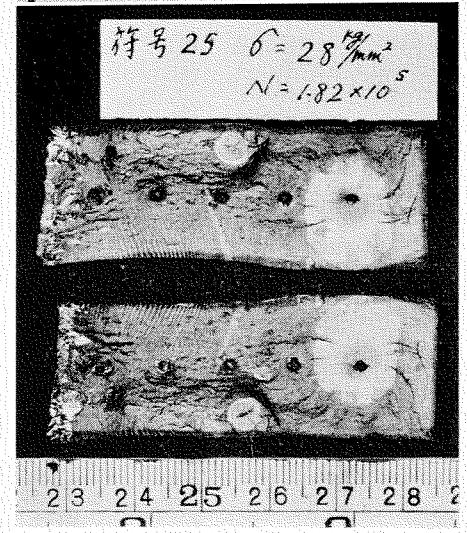
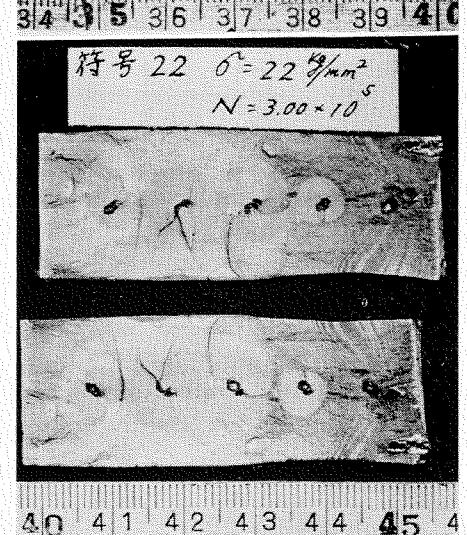
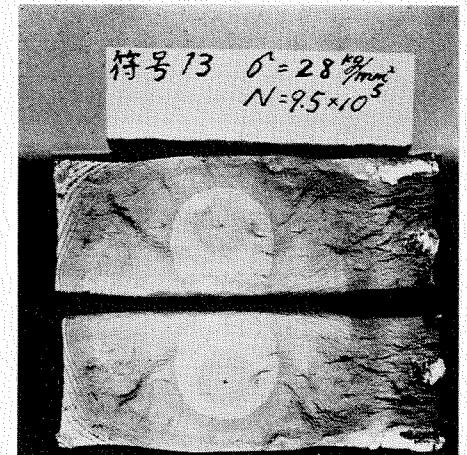
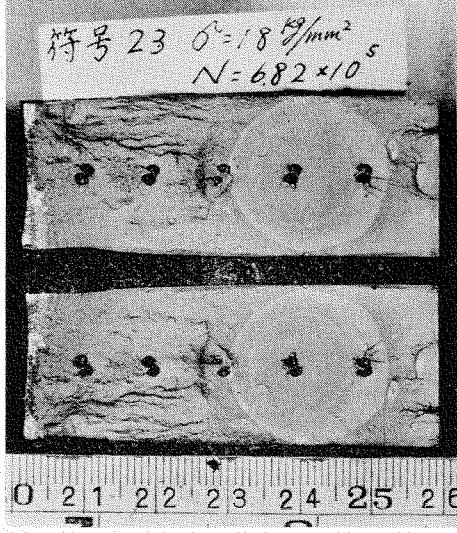
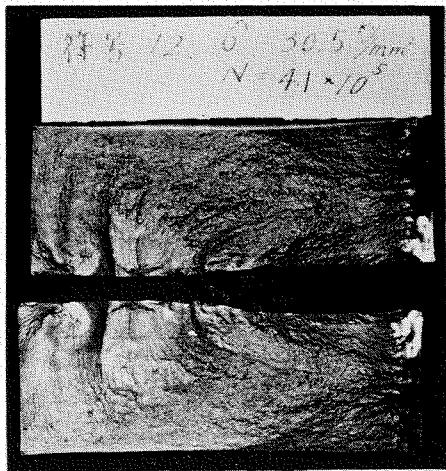


Fig. 2-31 S-N Diagram of Fatigue Tests of Welded Joints.

Table 2-6

JIS 級	試験片番号	繰返応力 kg/mm ²	繰返回数	切断の有無
1	11	25.0	2.0×10^6	切断せず
	12	30.5	4.1×10^5	切断(溶接)
	13	28.0	9.5 "	"
	14	26.5	1.36×10^6	"
	15	25.5	2.0 "	切断せず
2	21	16.5	2.0 "	切断せず
	22	22.0	3.0×10^5	切断(溶接)
	23	18.0	6.82 "	"
	24	15.0	2.0×10^6	切断せず
	25	28.0	1.82×10^5	切断(溶接)
3	31	28.0	1.25×10^5	"
	32	18.0	1.09×10^6	"
	33	15.0	1.41 "	"
	34	22.0	3.64×10^5	"
	35	13.0	2.0×10^6	切断せず



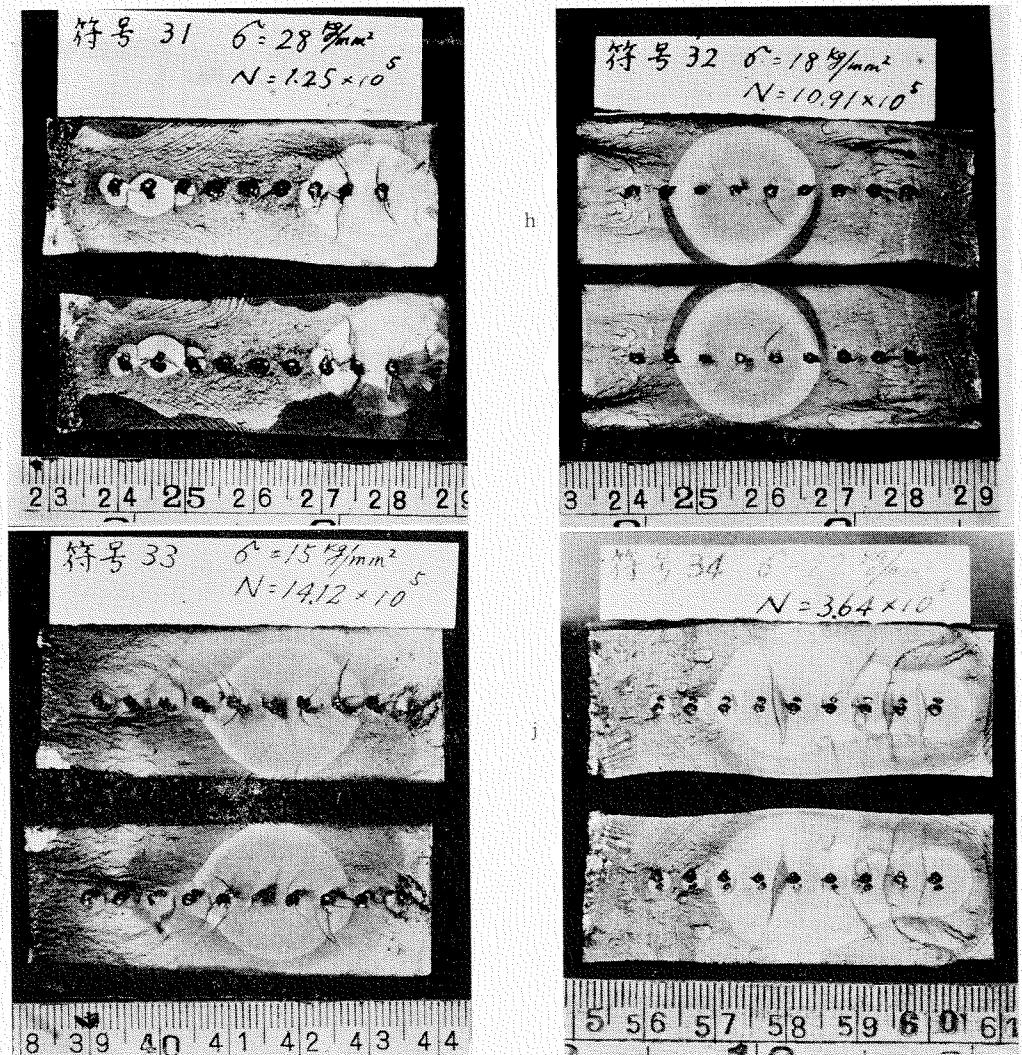


Fig. 2-32 Photographs of Failed Surface of Fatigue Test Specimen (a~j).

3・3 実験結果の考察

(1) 疲労試験片の破面の状況

この疲労試験片破面は § 1, 1・4 に述べたのと同じく白点が認められる。又、白点が必ず試験片の一边に到達していることが認められる。換言すれば亀裂は内部の気孔より発達するが、亀裂が材料の内部にある間は面は粗くなく、又その破面は白いが、亀裂が材料の周辺に到達し、口が開くと、面の白さが失はれる。これが口を開くことによる水素ガスの脱出によるものか、口を開くことによる塑性変形の増大によるものかはにわかには断定はできないが、破面の粗さは白点の外が内に比べて急に粗くなつている訳でもないから、後者よりも前者が主原因ではないかと考えられる。しかし更に詳しくは研究の要がある。

又、応力の大なる場合と小なる場合は亀裂開始点は 1 個の欠陥であるが、中程度の応力では数個の

欠陥が亀裂開始点となつてゐる。

(3) JIS 級と疲労強度

疲労強度の関係は Fig. 2・33 に示す如くで、2, 3 級の低下は特に著しい。これを Fig. 2・10 に比較すると JIS の級の下限に近い所にある。これは、これら欠陥が人工欠陥であつて同一平面上に並んでいる最悪の条件にあること、および欠陥が球形でなく円筒形であり、しかも応力のと方向同軸の軸とが垂直で応力集中効果が大であることに起因するものと考えられる。

(3) 欠陥率と疲労強度

欠陥率と疲労強度の関係は Fig. 2・23 の △ で示されている。これで見ると平均曲線の下側にあるが、特に厚さ 10mm 前後の継手と異なることはないようである。

(4) 板厚の影響

この実験結果によれば板厚が大となつても欠陥が疲労強度に及ぼす影響の主因子は絶対的大さか相対的寸法かは不明である。今の所 JIS の判定法で差支えないようであるが詳しく述べて研究を要する。

§ 4. 総括

各種欠陥を有する仕上げした溶接突合せ継手の片振引張疲労試験を行つた結果、次の事が見出された。

- (1) 欠陥と疲労強度の間に一定の関係があり、僅かの欠陥により急激に疲労強度が低下する。
- (2) JIS の級付は僅かの欠陥の部分を細く分類しているので疲労強度の減小の傾向を示している。
- (3) IIW の級付も疲労強度の減小を示すが疲労強度を表示せしめる分類法としては JIS に比し粗い。
- (4) 応力に垂直な面間距離 5 mm 以上の欠陥は相互影響しないようであるから、JIS の $50 \times 10 \text{ mm}^2$ の欠陥数を数える仕方は再検討の余地がある。

この疲労試験は仕上した試験片の片振引張に限られたが、ビードを仕上しない場合および両振はあるいは圧縮又は部分引張についても実験の必要があるものと考えられる。

文 献

- 1) 非破壊検査法研究会編、工業X線写真、p. 150
- 2) O. Masi & A. Erra: Lesame radiographic delle saldature: una completa valutazione dei difetti in termini di resistenza statica ed a fatica, Metallurgia Italiana, 45, No. 8, 273/283, 1953 (訳文: 非破壊検査、4巻3号30頁)

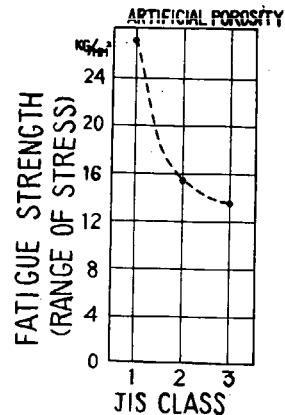


Fig. 2・33 Relationship between Fatigue Strength (at 2×10^6 Cycles) and JIS Classes.

第3編 実船における溶接欠陥と事故との関係調査

第1章 実船建造におけるX線検査結果の調査

§1. 本邦造船所の溶接部分の調査

本邦における新船建造中の溶接工事について、X線検査結果の整理保存が良好になつた最近3年間程の資料を調査した。調査対象は本研究部会参加の造船所11事業場であるから、本邦における代表的造船所の実際溶接と考えてよい。

調査内容は主としてJIS Z-2341による溶接部検査結果、換言すれば溶接成績をJISの級別で表現することと、欠陥の種類によつてその出現頻度、欠陥と級別との関係等とした。

Fig. 3-1は欠陥検査を行つている抜取率を推定するための総トンとX線写真枚数との関係である。これからみてX線検査の行われている溶接部分の長さは全溶接長に比して非常に少いことがわかる。

図中において総トンに対する枚数の大小の比が甚だ開きが大きいが、一事業所毎における総トンと枚数との相関性は割合に画然としており、枚数比の大きい船は溶接工程管理の思想を強く含んだX線検査を行い、枚数比の小さい船は検査官提出分のみを撮影している船である。

本調査においてその検査個所は殆どが強度上重要部分でかつ溶接工事上欠陥の出現しやすい箇所を多く選んで検査している。即ち指定部分の抜取という例が大部分である。

従つて溶接工においても検査を受ける確率の大きい個所と小さい個所もほぼ推定がつく場合が多く、調査票にも「幾分か推定出来る」という例が半数ほどある。

以下各調査における成績は手直し修理を実施する前の成績である。

(a) 自動溶接の検査成績

自動溶接の検査は主として欠陥の出現し易いその始点と終点とに施され中途部分は省かれるのが通常である。品質管理を行うに容易で信頼がおけるから船毎の調査では自動溶接部分の検査を行つてい

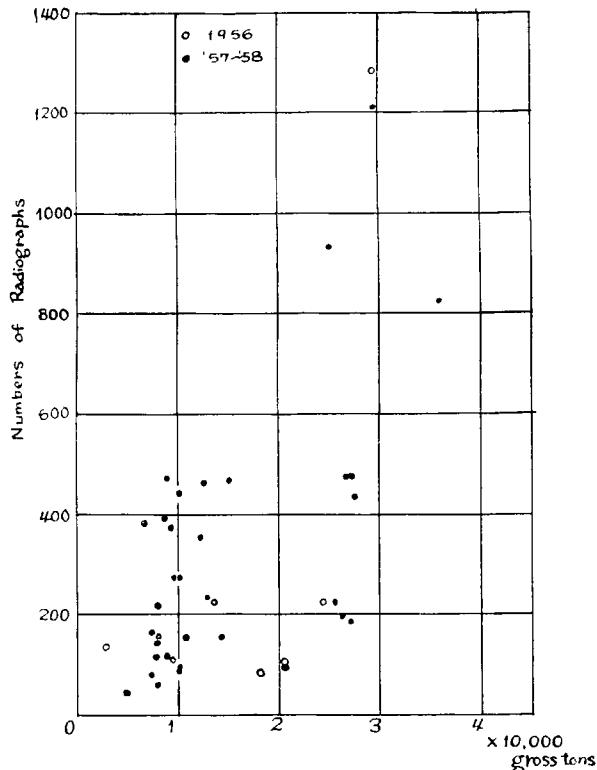


Fig. 3-1 総トンと検査枚数

Table 3-1 自動溶接成績

場所	級別	主部(中央 1/2 L)						従部(前後 1/4 L)						
		1	2	3	4	5	6	計	1	2	3	4	5	計
上甲板	%	74.7	9.3	4.8	2.6	3.2	5.4		61.4	14.1	8.8	2.9	3.4	9.6
	枚	965	120	61	33	43	69	1291	292	67	41	14	46	476
船側	%	68.2	12.7	6.2	4.2	3.0	5.7		80	8	4	2	0	6
	枚	711	132	65	44	31	59	1041	40	4	2	1	0	3
船底	%	68.9	12.1	6.9	2.8	3.0	6.3		70.3	10.4	6.3	5.2	2.1	5.7
	枚	1125	198	113	45	48	103	1632	135	20	12	10	4	11
その他	%	90.8	2.5	2.5	1.7	2.5	0							
	枚	109	3	3	2	3	0	120						
合計	枚	2910	453	242	123	125	231	4084	467	91	55	25	20	60
														718

総計	級別	1	2	3	4	5	6	計
	枚	3377	544	297	148	145	291	4802
	%	70.3	11.7	6.1	3.0	2.9	6.0	100

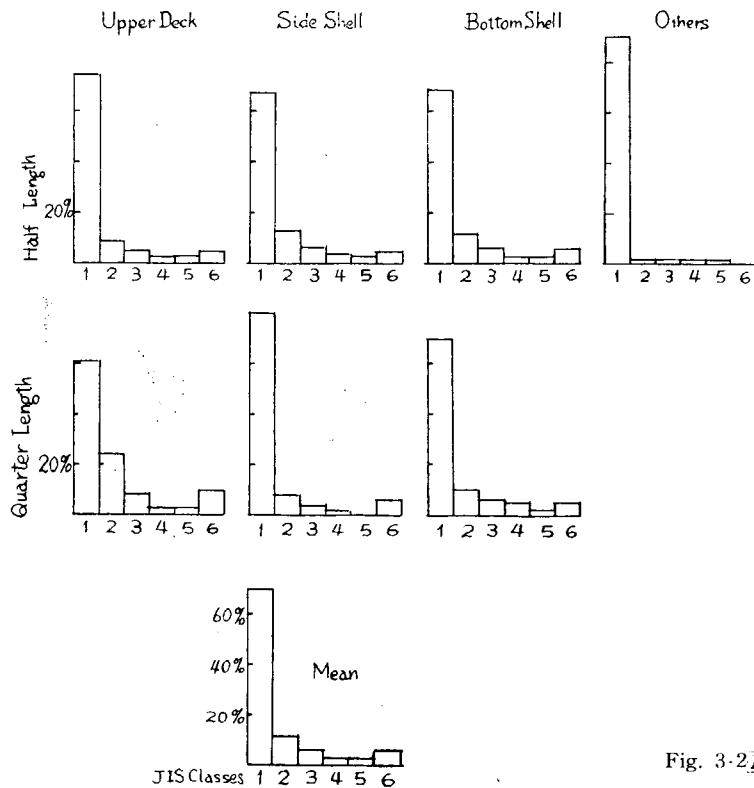


Fig. 3-2 自動溶接成績

Submerged Arc Weld

ない船もある。

調査結果は Table 3・1 の如くでこれを棒グラフで Fig. 3・2 に示す。

自動溶接の性質上船体内の位置如何にかかわらず全部一様の分布を示している。これは各事業所毎についてもほぼ一様な成績である。

(b) 手溶接成績

工場内手溶接部分について調査した成績は第 3・2 表の通りである。

Table 3・2 地上手溶接成績

枚 数	57	116	102	83	44	17	419
%	13.6	27.8	24.4	19.6	10.5	4.1	100

事業所によつては検査を現場溶接終了後に検査していくて分離して計数することが出来ないところも多く、まして場所毎に分離集計するには数が少いので一括した。

後の現場溶接成績に比してむしろ成績の落ちているのは枚数の少い為の統計的偏差と事業所の少い偏りとによるものであろう。

手溶接成績は現場手溶接として表にした Table 3・3 によつて推察することが出来る。これを棒グラフにしたもののが Fig. 3・3 である。

Table 3・3 現場手溶接成績

級 別	主 部 (中央 1/2 L)							従 部 (前後 1/4 L)						
	1	2	3	4	5	6	計	1	2	3	4	5	6	計
場 所	%	23.0	27.4	27.1	13.2	5.4	3.9	18.1	24.7	25.6	16.9	10.2	5.5	
	枚	1150	1369	1356	659	270	194	4998	253	345	358	222	142	76 1396
上 甲 板	%	32.9	24.2	20.2	8.5	6.4	7.8	21.1	28.7	22.0	12.6	9.3	6.3	
	枚	1274	938	781	324	247	303	3867	173	235	180	103	76	52 819
船 側	%	31.2	25.4	23.4	10.2	5.5	4.3	22.9	24.0	22.4	14.1	12.2	4.4	
	枚	1607	1306	1200	526	281	219	5139	324	339	316	199	172	67 1412
船 底	%	27.5	8.3	25.6	13.6	21.5	3.5							
	枚	87	26	81	43	68	11	316						
合 計	枚	4118	3639	3418	1552	866	727	14320	750	919	854	524	390	190 3627

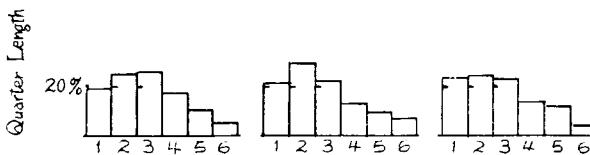
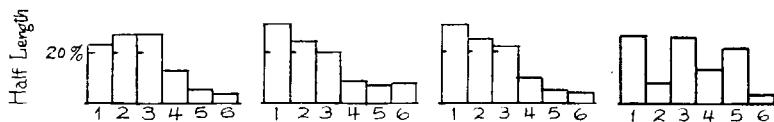
	級	1	2	3	4	5	6	計
総 計	%	27.1	25.4	23.7	11.5	7.1	5.1	
	枚	4868	4558	4272	2076	1256	917	17947

他の成績は第 3 回調査分 39 隻から算出したが現場手溶接分だけは第 2 回調査 51 隻分を加えて 90 隻分から算出したものである。

(c) 板厚に対する級別分布

JIS Z-2341 は板厚に対して透過度計および欠陥計算欄に考慮が加えられているが、これが妥当で

Upper Deck Side Shell Bottom Shell Others



Manual Weld (in Field)

Fig. 3-3 現場手溶接成績

Table 3-4 現場手溶接成績 (板厚)

級 別		1	2	3	4	5	6	計
15 mm 以下	%	31.2	16.3	35.4	6.4	4.3	1.4	
	枚	51	23	50	9	6	2	141
15~25	%	38.5	20.7	18.7	9.3	3.9	4.9	
	枚	1506	811	731	364	308	194	3914
25~35	%	24.1	23.8	22.7	13.7	8.2	7.5	
	枚	466	462	437	257	159	146	1927
35 以上	%	9.4	24.7	37.2	21.1	5.4	2.2	
	枚	157	415	627	355	91	36	1681

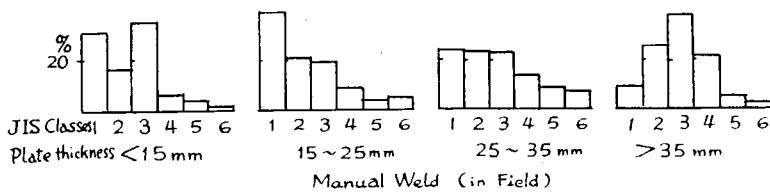


Fig. 3-4 現場手溶接板厚別成績

あるか否かは別として、表面的に計数した成績を Table 3・4 および Fig. 3・4 とする。

15 mm 以下の構は枚数が少ないので偏りが大きいが 15 mm 以上の分については厚い板程 JIS 表示の成績は芳しくない。

現実において JIS 級別表示が現在のままでは厚い板程成績が悪いと表示されるおそれがあるので強度と欠陥度との関係を十分に考慮した表示方法乃至板厚を考慮した仕様書の出現が要求される。

(d) 欠陥の出現頻度と級別

以上級別によつて成績を分類したが、この成績の原因となつた出現欠陥を分類すると Table 3・5 の如くなる。

Table 3・5 欠陥出現率

種類		級	1	2	3	4	5	6	合計
4951 枚	自動溶接	無欠陥	67.5						67.5
	プローホール		2.4	8.1	4.4	1.4	1.0	0.9	18.2
	バイブル			1.0	0.9	0.8	0.6	1.0	4.3
	スラグ			2.0	1.5	0.6	0.5	0.6	5.0
	溶込不良			0.1	0.1	0.6	0.9	3.0	4.6
	融合不良							0.1	0.1
8623 枚	ワレ	其他		0.1	0.1			0.1	0.3
	現場手溶接	無欠陥	24.5						24.5
	プローホール		1.3	13.2	15.8	4.9	1.5	0.3	37.0
	バイブル			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
	スラグ		0.4	7.5	11.5	6.4	4.5	2.0	32.2
	溶込不良			0.1	0.3	0.5	0.4	1.5	2.7
8623 枚	融合不良			0.2	0.5	0.4	0.9	0.9	3.0
	ワレ	其他						0.1	0.2

各級合計の % が Fig. 3・1, 3・3 に一致しないのは細部の記載がないものも Table 3・1, 3・3 に加算したからである。

これをグラフにしたもののが Fig. 3・5, 3・6 である。自動溶接の欠陥の大部分は気泡で手溶接の欠陥の大部分は気泡とスラグ捲込みとである。

§2. 総括

自動溶接による施工は品質のバラツキが少く欠陥も少くて信頼もおけるが手溶接においては気泡およびスラグ捲込みが検査枚数の約 1/3 つつ合計において 70% 出現する。この結果 4 級以下 26% を越え 5 級以下でも 13% を越している。

工事完成の為には不合格個所の手直しが加えられているが、なお検査個所は全溶接長に比して僅かの長さであることを考へると、手直しそのものは無意味に近いのであつて、溶接部の品質向上を計る一方もし 5 級ないしは 6 級の中に十分強度上使用出来るものがあるならばそのまま使用したいと考える。すなわち強度上許されるならば 6 級 (JIS では級外の意味) を更に有級の幾段階かにわけて強度上許されるものを拾上げたい。即ち合理的な欠陥度を使用したいと考える。

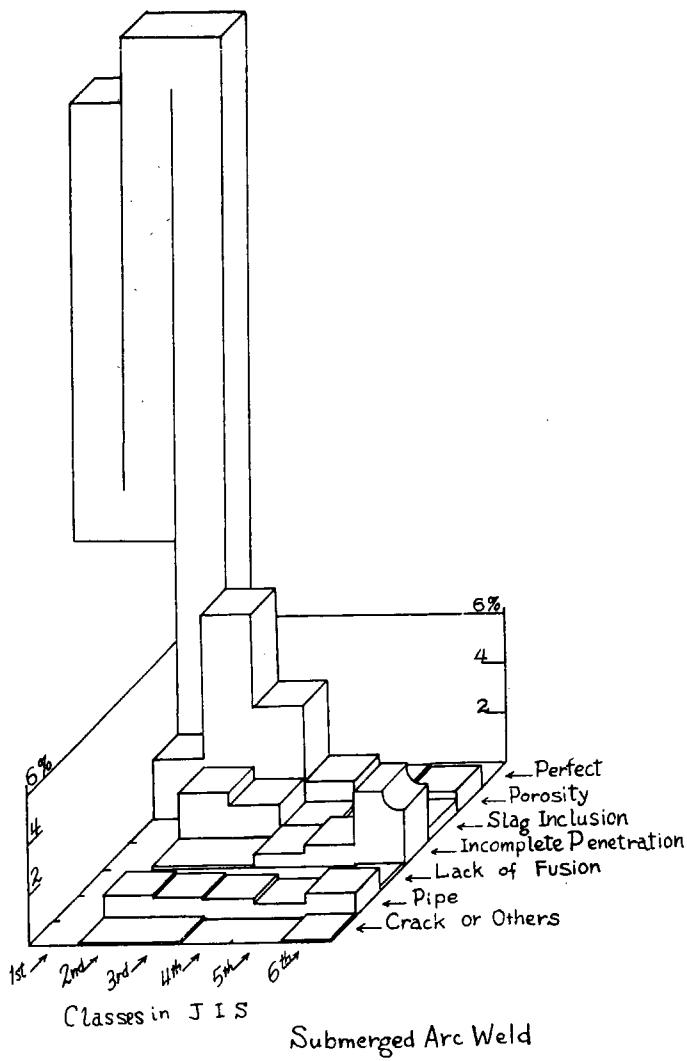


Fig. 3·5 自動溶接欠陥級分布

§ 3. 外国造船所の溶接部分の調査

外国において建造された船の調査については、入渠中の修理時に船主あるいはその代理者の了解を得てX線検査を行うものである以上、実施も甚だ困難で集計例も多く集め得なかつた。かつ近年X線検査の普及してからの実例を集め得なかつたことは残念である。従つてこの集めた例は外国の例というよりはX線検査普及前の溶接船実例といふべきであろう。

集計結果はいずれも JIS 5級若くは6級でその90%を占めるものである。

JIS 6級ははなはだ範囲広く（正しくは6級でなく級外といふべきである）一概には言えないが、また実際に溶接不良による海難事故もあり造船の溶接は5級6級でよいと断言は出来ないにしても、5級および6級から出来た船が長年無事稼動していることだけは注目してよい。

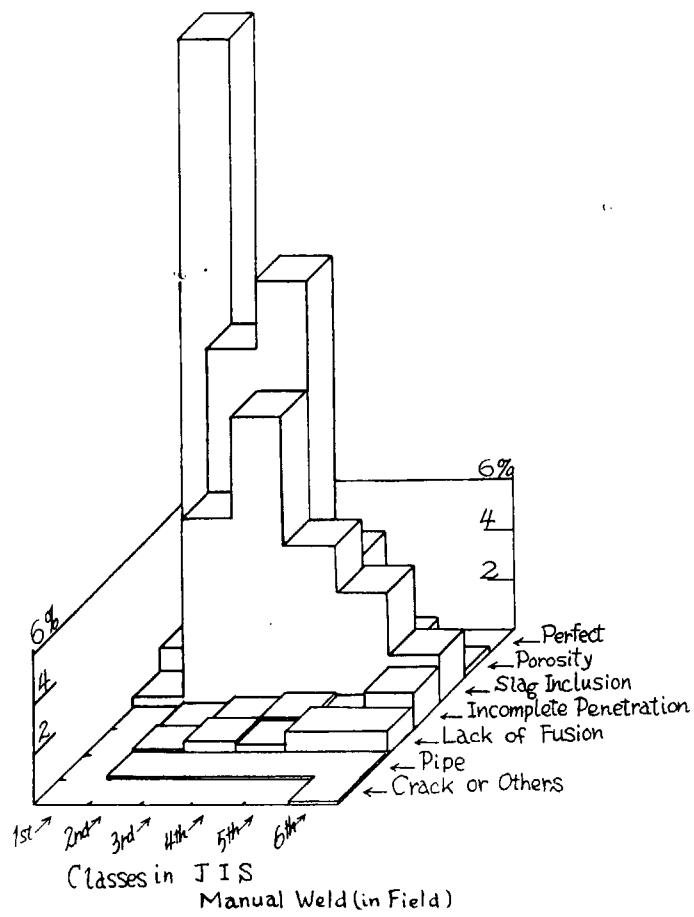
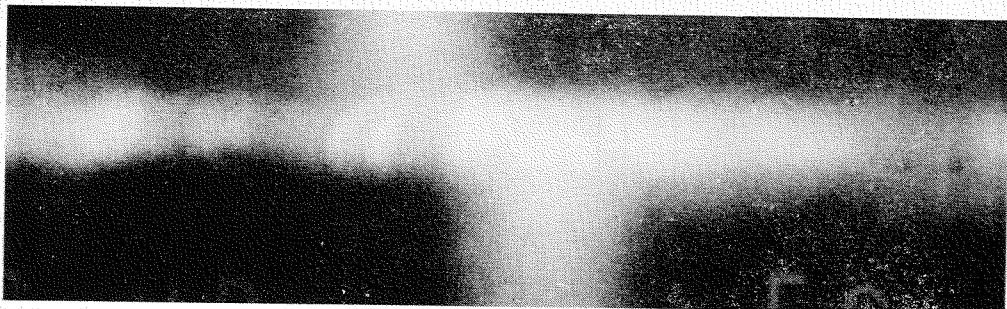


Fig. 3-6 現場自動溶接欠陥級分布

以下集めた例の中代表的な船をかかげる。代表的という意味は抜取率を公平に配置して比較的各部にわたつて撮影し得たものという意味である。

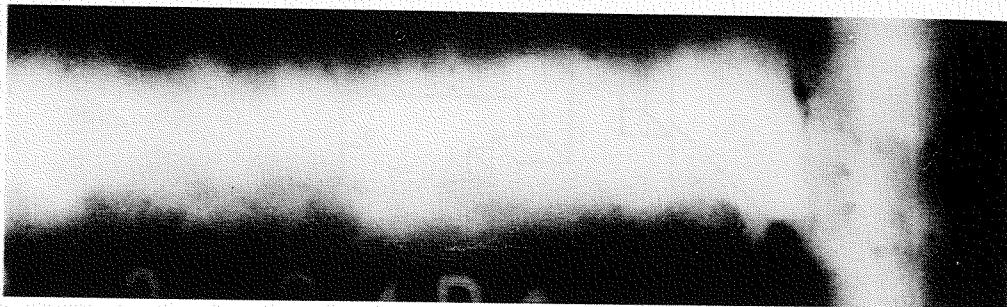
尚比較の為に日本非破壊検査協会選定の標準浮舟から各級の例を Photo. 3-1~3-6 に示した。

Foreign Tanker



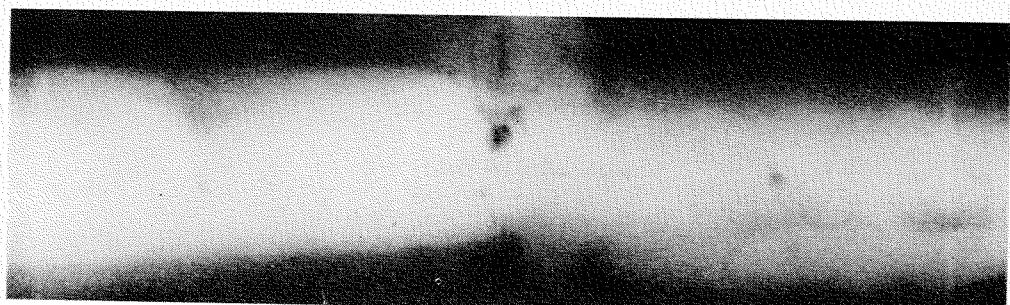
上甲板、撮影総数中の良好な例、2級、ブローホール

Upper deck



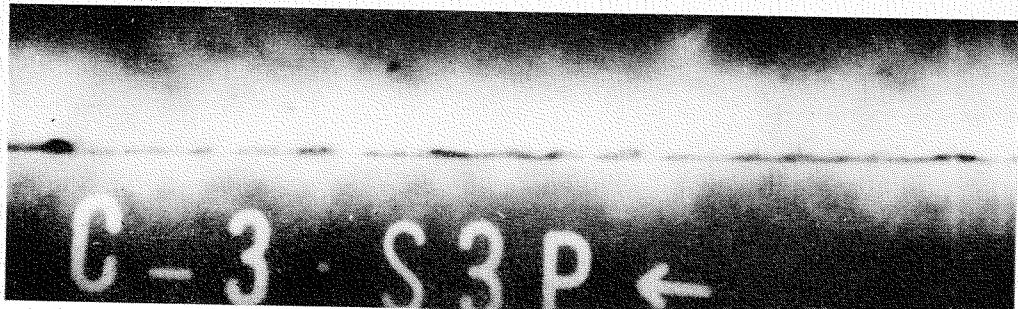
船底と船側との角の外板、6級、継手部分スラグ

Bilge strake



上甲板、6級、大量のスラグ存在、割れ

Upper deck



上甲板と船側との肩部外板、6級、溶込不足

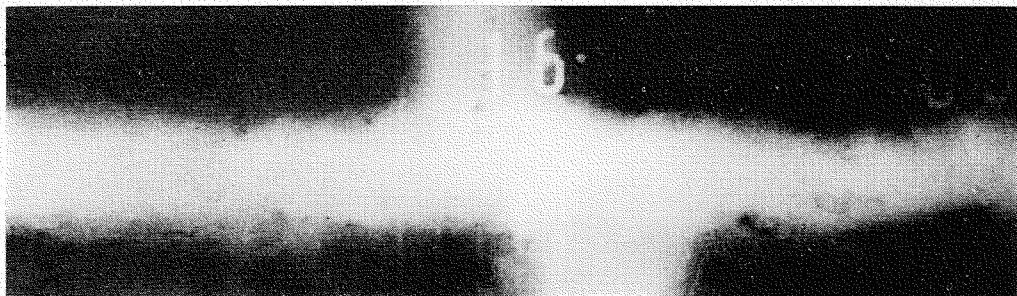
Sheer strake

船籍：外国、その他不明

修理船入渠検査撮影枚数13枚の中1級1枚、2級2枚、4級1枚、5級2枚、6級7枚で特徴として割れ、大スラグ塊、溶込不足等の悪質欠陥が多い。

Photo. 3-1

Foreign Cargo Ship



上甲板，6級，スラグ，割れ

Upper deck



船底，6級，スラグ

Bottom shell



船底，6級，スラグ

Bottom shell



上甲板，6級，外觀からも推定出来る程の溶接不十分

Upper deck

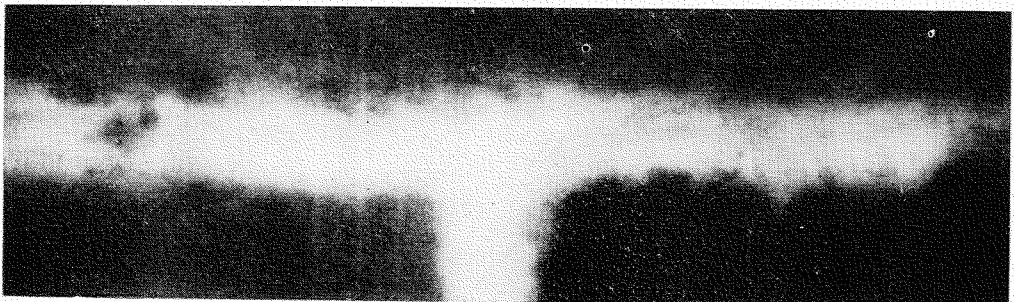
船種 貨物船，船籍 外国 8000 DW ton

建造所 外国，建造年 1945

撮影枚数 16 枚全部が6級，スラグ溶込み，溶込不足，割れによるものが多い。

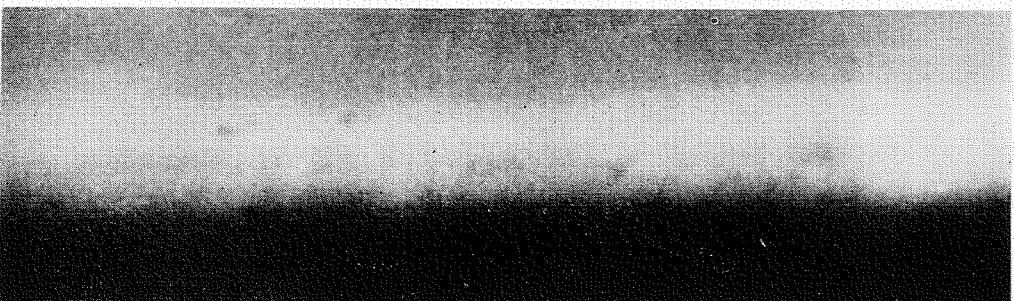
Photo. 3-2

Foreign Tanker



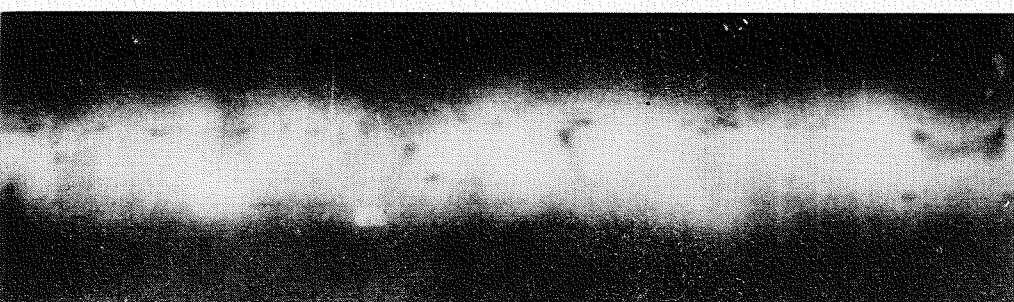
船底外板, 6 級, ブローホール, スラグ, 融合不良

Bottom shell



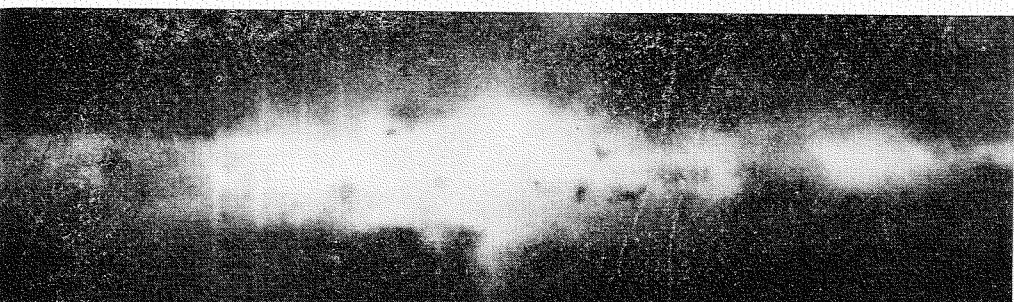
船側, 6 級, 溶込不良, 融合不良, スラグ

Side shell



船側, 6 級, 融合不良, スラグ

Side shell



船底外板, 6 級, ブローホール, スラグ

Bottom shell

船種 油槽船, 船籍 外国, 約 10000 G ton

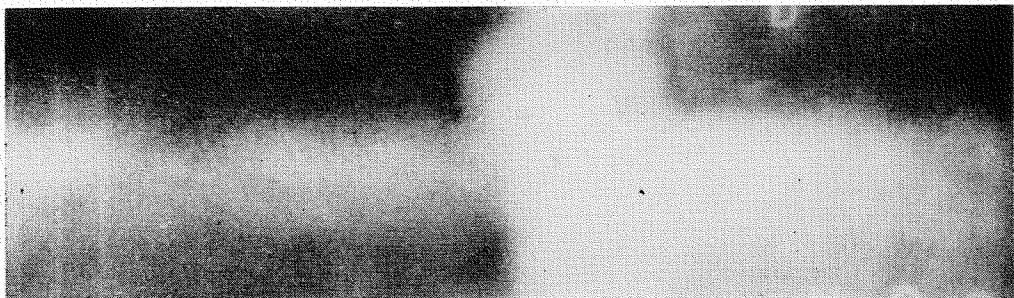
建造所 外国, 建造年 1954

撮影枚数 船側 7 枚, 全部ブローホール, スラグおよび融合不良で 6 級

船底 8 枚, 全部同上 6 級

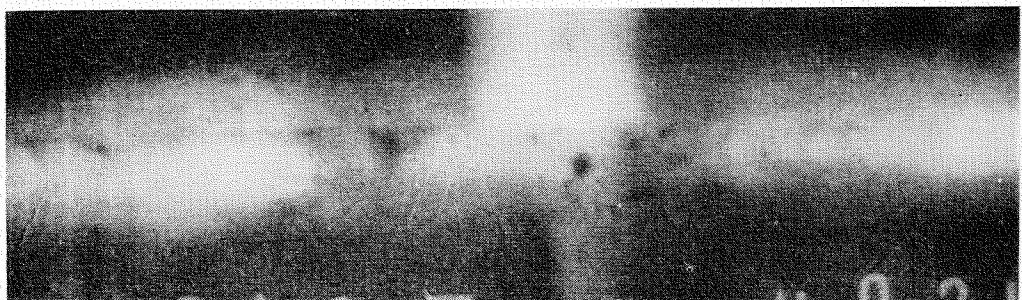
Photo. 3-3

Foreign Tanker



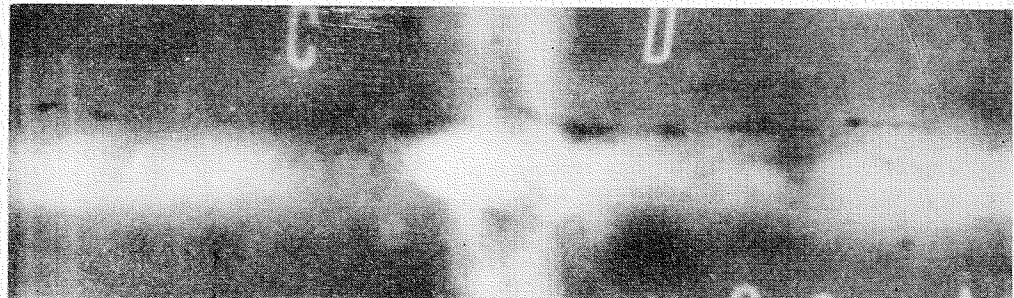
上甲板（ハッチ近く）6級、スラグ、プローホール

Upper deck



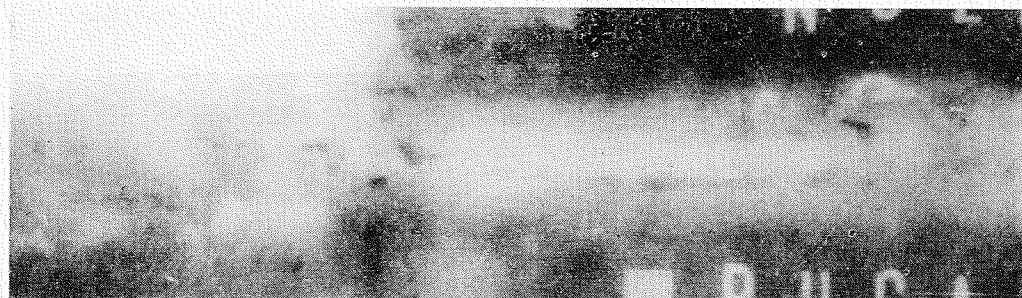
上甲板、6級、割れ、スラグ、溶込不足、プローホール

Upper deck



上甲板、6級、割れ、スラグ、プローホール、溶込不足

Upper deck



上甲板、6級、割れ、スラグ、プローホール、溶込不良

Upper deck

船種 油槽船、船籍 外国、建造所 外国、建造年 1945

撮影枚数 10枚、上甲板近傍全部6級

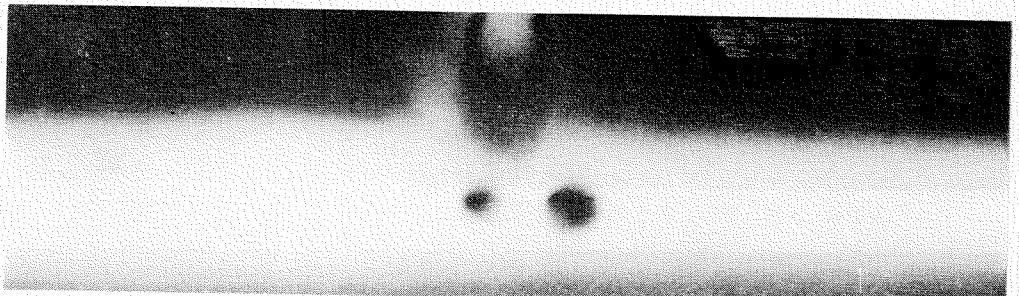
Photo. 3-4

Foreign Ship



上甲板, 6級, プローホール, スラグ, 溶込不良

Upper deck



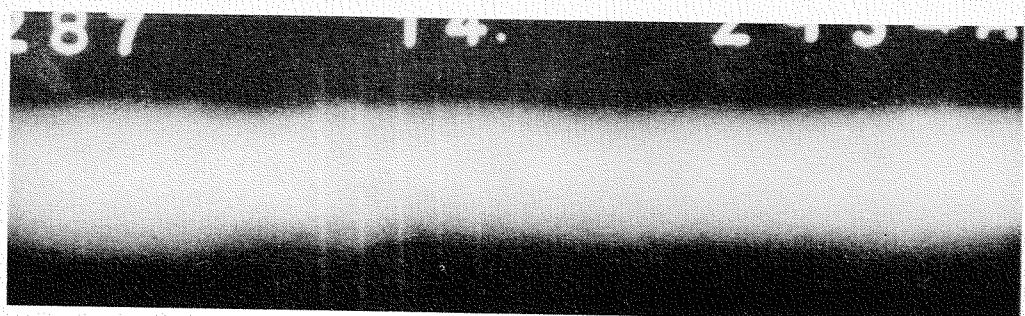
下甲板, 6級, プローホール, スラグ, 溶込不良

Lower deck

船籍: 外国, その他不明

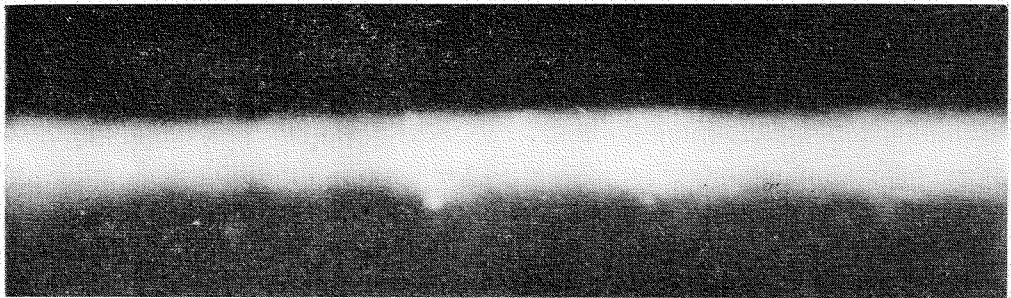
検査枚数 14 枚の中 5 級 1 枚, 6 級 13 枚, 溶込不良の多いことが目立ち大部分にスラグ捲込みがあった。
自動溶接を採用しているから比較的近年建造と見られる。

Photo. 3-5

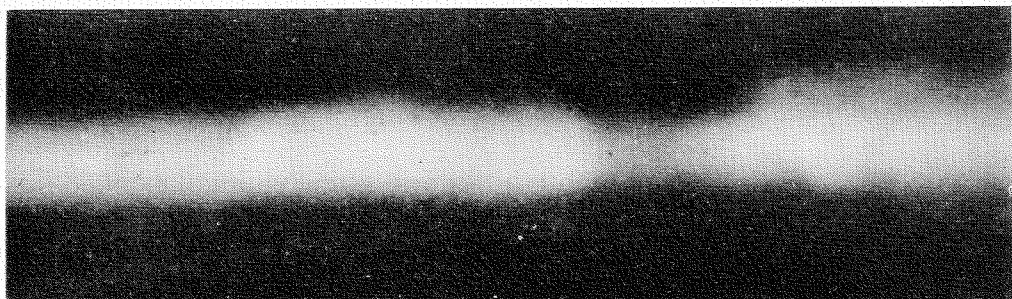


1 級

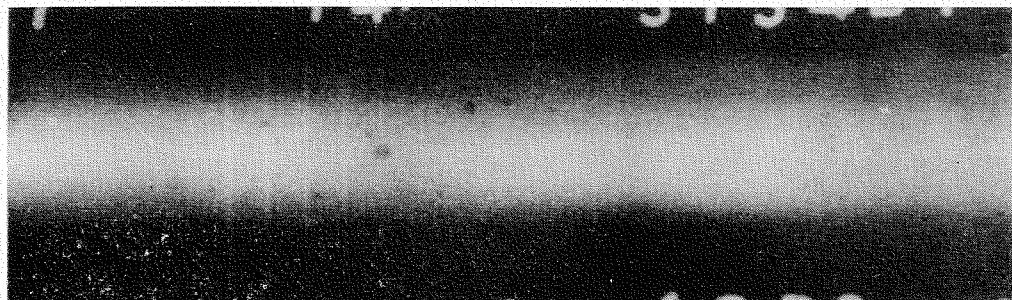
Photo. 3-6 JIS Z-2341 による等級 (板厚 10~20 mm)



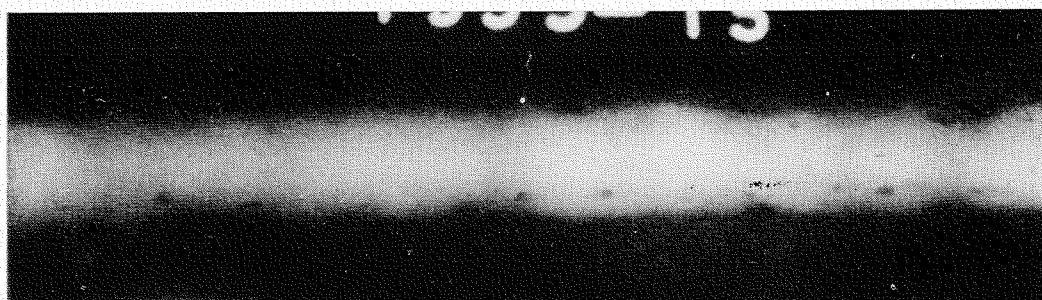
2 級



3 級



4 級



5 級

Photo. 3-6 JIS Z-2341 による等級 (板厚 10~20 mm) (前頁に続く)

第2章 実物試験における溶接部分欠陥の強度に対する影響

実船の損傷に対する溶接部欠陥の影響の調査は余程の機会に恵まれぬ限り出来なく、本研究実施期間中は遂にその実例は求められなかつた。従つて最も簡単な構造物として円筒形の溶接構造物の爆破試験における溶接部の欠陥とその破断状況との関係を考案してみることにした。本爆発実験は本研究委員の一部¹⁾が行つたものである。

第1編、第2編に述べた実験に用いた試験片はすべて余盛を削除し、破断箇所はすべて溶接部であるように仕上げたものである。しかし実物は余盛があり、溶接ビードを囲んで母材があるなど構造物は非常に複雑である。従つて前編の結果から直ちに構造物の強度を推定することは困難であることが予想される。いま Fig. 3-7 のような大型の円筒形試験片の爆発試験によつて得た結果から、溶接部欠陥が強度に及ぼす状況を検討してみることにした。

試験方法

爆発試験は大きなエネルギーを衝撃的に試験片に加えるのであるが、爆発エネルギーを有効に利用するため試験片と爆薬との距離を小さくすればよいが、一方爆薬を直接試験片において爆発させると裏面に局部的な剥離破壊を生じて通常の脆性破壊とは異つた爆発特有の現象を呈する。このような特殊な現象を避け、通常の脆性破壊をさせるために試験片に水を充満し、試験片中央に爆薬を装填する方法を採つた。これにより爆発エネルギーは有効に利用され、また衝撃速度も減じて所要の破壊を行うことができた。

1回に発火する薬量は 10 g から 500 g まで変えたが、使用薬量を変えても圧力波の分布状態が相似となるようにするため装填火薬形状を相似円筒とした。

薬量は始め小薬量から出発し、試験片の受けた歪によつてその都度決定し、数回の爆発を繰返した後破壊する方法を採つた。

§1. 破壊状況と溶接部欠陥との関係

数多くの試験円筒を使用し、爆発実験を行つたが、その破壊において亀裂の発生はどのような点から発しているか、また亀裂発生箇所は欠陥とどのような関係を有するかを検討してみた。

本実験に用いた試験円筒は約 90 本程であるがその一部の 47 本について調査した。それによれば円周接手を横断して円筒の母線に沿う亀裂が殆んど大部分を占めていたがその亀裂の発生の仕方に次のような型がみられた。すなわち

1) 東大(木原)、運輸技術研究所、川崎重工業株式会社の共同研究による。

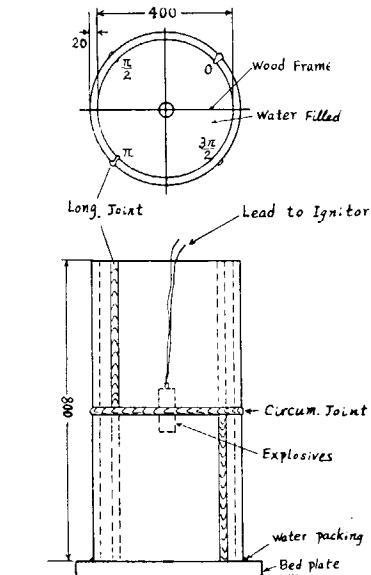
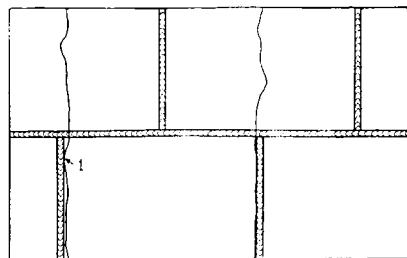
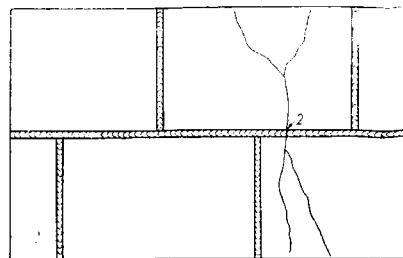


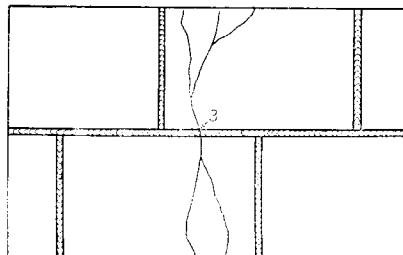
Fig. 3-7 爆発試験片
Explosion test specimen



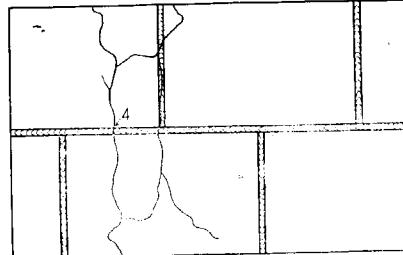
1



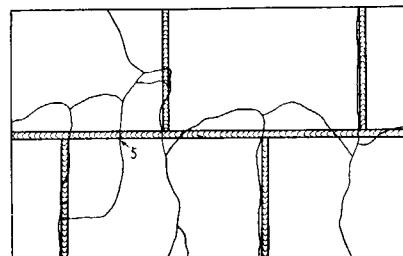
2



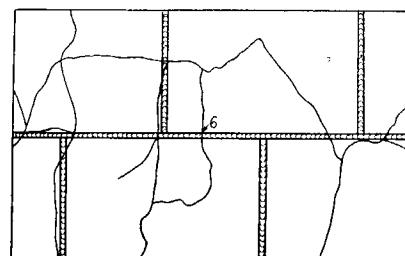
3



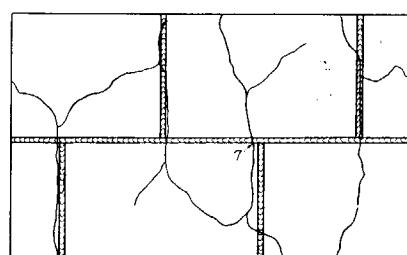
4



5



6



7

(図中の数字のついている箇所は次頁 Photo. 3・8 の写真番号に対応している。)

Fig. 3・8

- (1) 縦接手のビードと母材との接合部に沿うて亀裂が発生し縦接手ビードに沿うて進行し円周接手ビードを横断して割れているもの。(Photo. 3・7)
- (2) 円周接手ビードの表面に亀裂が発生し円周接手に直角に進行して割れているもの。
- (3) 縦接手ビードに近いアーチストライクの点に亀裂が発して縦接手に平行に亀裂が進行して割れるもの。

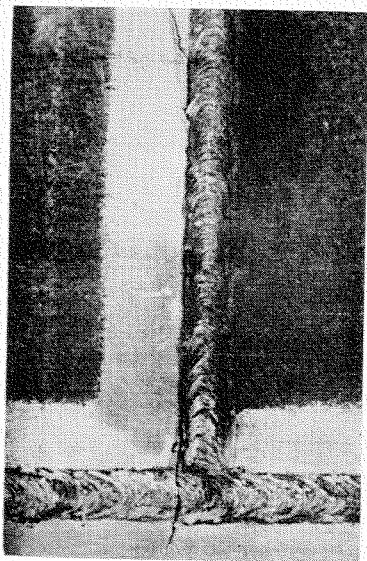


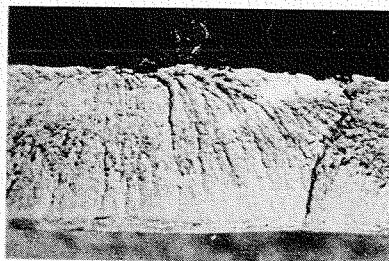
Photo. 3-7 破損状況

などが見られる。Fig. 3-8 はその典型的ものを示した、またその亀裂の発生の原因となるものを調べた所次のような点が挙げられる。

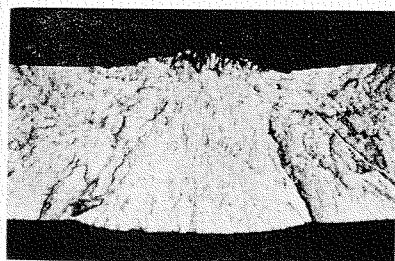
- (1) 溶接ビードに存在するプローホール、フラックスなどで特に表面に存在するものが亀裂発生点となつてゐる。
- (2) アンダーカット、特に継接手のアンダーカットがそれに沿う亀裂の発生点となつてゐる。またその部分にプローホールなどと重なると亀裂発生点となることが多い。
- (3) 溶接棒取換部のビードの継目
- (4) 最終層のデンドライト組織
- (5) アークストライク
- (6) ビードの形状的特異性

すなわちX線写真上で欠陥として見なさない余盛りの形状、溶着金属の凝固に関する粒界折出、融着の不完全なども亀裂の発生点となる。また溶接中不用意につけるアークストライクがその発生点となつてゐる場合もある。Photo. 3-8 はそれら亀裂の発生点の破断面の状況を示す。

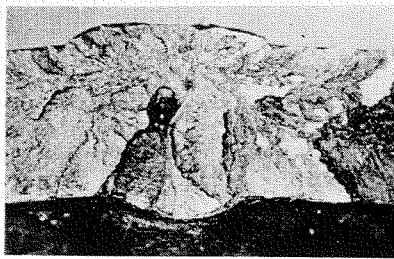
また爆発を繰返している際、或る回数で割れが発生していても、それが次回の爆発の際必ずしもそこから亀裂が進行するとは限らなく、別の箇所から発生することもある。この原因に関しては不明である。



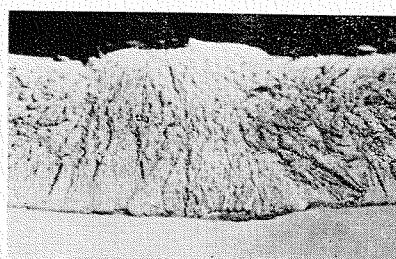
1. アンダーカット



2. ビードのデンドライト組織

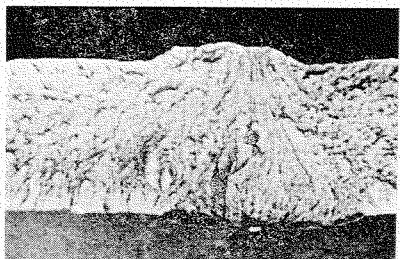


3. スラグ

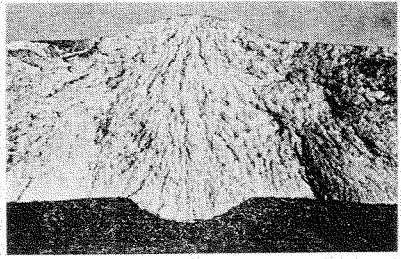


4. ビード表面

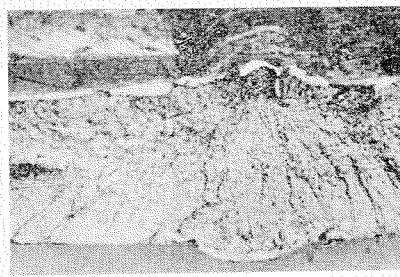
Photo. 3-8 典型的な破壊発生箇所 Typical start points of crack



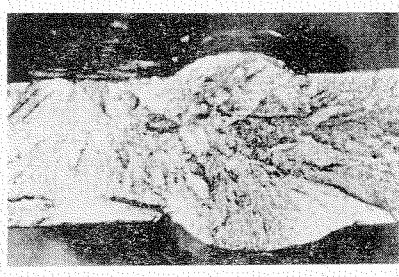
5. ピード表面、スラグ



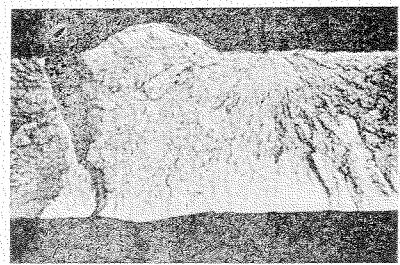
6. ピード下面



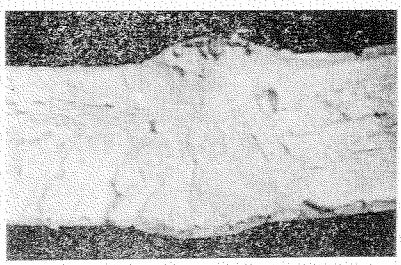
7. パイプ



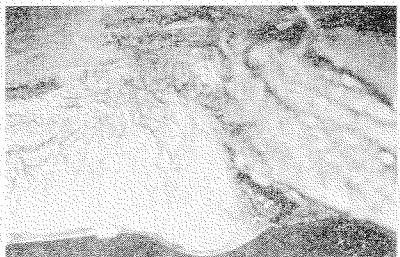
8. アークストライク



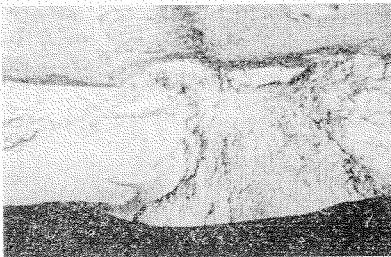
9.



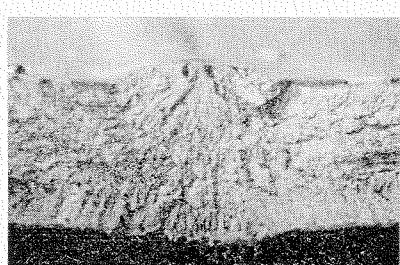
10. ピード下面近くのスラグ



11. 溶接棒取換部



12. アンダーカット部のプローボール



13. ピード表面近くのプローボール

Photo. 3-8 典型的な破壊発生箇所 (前頁に続く)

Typical start points of crack

以上のような実験では縫接手の破損に対しては外力は溶接部を引き離すように作用するがその力は円筒の中心と端部では相当異なる。また円周接手の方は溶接ビードをその長手の方向に引張る力が働くがそのビードは左右から母材に挟まれており、第1編の試験片の場合と予程異なる。従つて前に述べたような簡単な事情はない。今破損状況を調べて次の結果を得た。

Table 3-6

A.	母線に沿う亀裂線 104 本 (47 個の試験円筒中にあらわされたもの)	
B.	縫接手の近傍で縫ビードに沿う亀裂線	71 本
C.	縫接手とは無関係に円周接手を横断して母線に平行に進んだ亀裂線	33 本
D.	C の 33 本の円周接手を横断する箇所の X 線透過写真による JIS 判定は次の通り	
JIS	1 級の箇所	16 カ所 (内亀裂発生点がビード以外にあるもの 12)
2	"	3 "
3	"	4 "
4	"	2 "
5	"	3 "
6	"	5 "
E.	C の 33 本の亀裂の発生点	
円周接手のビード頂点	21	
アンダーカット部分	7	
アーチストライク	5	

すなわち以上のことから言へば円周接手が亀裂の発生点となつた場合その箇所は JIS 等級と明瞭な関係は見られなかつた。例へば大きい溶込不足が存在してゐる場所もあつたがそこからは破損していなかつた。

縫接手の場合はビードの中心を亀裂が走つてゐるのは非常に少なく、殆んどビードと母材の接合部を通つており、その亀裂発生点は、アンダーカット及びアーチストライクである。

これは余盛のため第1編の実験と異なる結果を來しているとも考えられる。

以上のごとく構造物の破壊は試験片におけるごとく単純ではない。しかしこの実験では破壊に要したエネルギーも衝撃力の大きさも絶対的な数値は求めないので強度に対する量的な影響は求められない。従つてもう少し実物に近い試験の結果が望ましい。

第4編 判定規準作成に対する原則

緒 言

第1編、第2編では溶接部に含まれた欠陥の機械強度に及ぼす影響を考察した。この試験は溶着内部に存在する欠陥以外に強度に影響を及ぼすと考えられる因子をすべて除いた試験片を使用している。第3編は新造船の溶接部の抜取検査において欠陥の種類とその数の出現率を手直しする前の結果から統計的に求め、更に実物の破損に近い爆発試験から欠陥と破壊の関係を調査した。

以上のような実験と調査から溶接部の判定規準を確立し、船体その他構造物に対する検査結果の合格、不合格に対する科学的な判定の基礎を求めることが本研究の目的である。

欠陥と機械的強度の相関性は一応完全でないが求められた。この研究結果からすべての溶接構造物に対する判定規準を得ることが果して妥当であるか否かを検討し、更に実物試験との相関性を考察し、且つ溶接技術の現状と過去の船舶における検査結果と使用年数及びその破損状況などを考慮に入れて実際の判定規準を作るべきである。今ここに本研究結果の結果によつて他日判定規準作成委員会が結成され審議される場合の資料に呈したい。

第1章 欠陥度の定義及び強度上からの判定規準作製 に対する原則

欠陥の強度に対する影響を論ずる際、欠陥度をいかなる量的な表現をするかが影響度を数的に求めるためには是非必要なことである。JIS Z 2341 ではこの欠陥度を欠陥の数によって表現している。しかし JIS 規格によれば長さ 12 mm 以上の欠陥を数的に示す方法の規定がなく、また径 2 mm 以下ならば如何に小さくとも大きくとも同じ欠陥数に数える。また平面的な投影像の大きさのみによつて欠陥数を示し、深さについては何の規定もない。しかも JIS によれば欠陥度の或る程度大きい部分は全部 6 級として分類をしていない。また 2 mm 以上の大きな欠陥に対する係数も強度との相関性において妥当であるか否かなど非常に多くの問題を残している。従つて JIS 規定によつて欠陥度を定義することは再検討する必要がある。本研究では JIS 規格ですべて 6 級に含まれる部分も幾つかの欠陥度を分けて研究する必要があるので、断面積に対する欠陥面積の百分率を欠陥度に取つて強度との関係を求めた実験が多い。ここにこの欠陥度と強度との関係を前編の結果から引用して規格作製への原則を導入する。

先づ静的引張強度および静的曲げ強度と欠陥度の関係 第1編から引用すれば Fig. 4・1, 4・2 のごとくである。これによれば欠陥度が 3% 程まで変化がない。Fig. 4・3 衝撃曲げ試験の際の吸収エネルギーと欠陥度の関係を示す。Fig. 4・4 は衝撃引張試験における同様な関係を示す。また第2編から疲労試験で繰返し回数 2×10^6 で破壊する応力の範囲に換算した結果を示したのが Fig. 4・5 である。以

上の 5 つの結果はすべて試験片の公称断面積で除した値を縦軸に取つてあり、有効断面積で除したものではない。従つて欠陥度 100% ではすべて強度零となるべき値のものである。

以上の結果より無欠陥の場合を 100 とし、欠陥度によつて強度の低下する割合を示せば Fig. 4·6 (a) のごとくで、疲労、衝撃に対する強度は欠陥度が大きくなるに従い急に低下し、次第にその変化が小となる。しかし実際溶接構造物で問題になる欠陥度は 10% 以下である。従つて 10% 以下を詳細に示したのが Fig. 4·6 (b) である。

JIS Z-2341 の欠陥数と上に述べた欠陥度の % との対応は一義的に定められない。例えば JIS 規

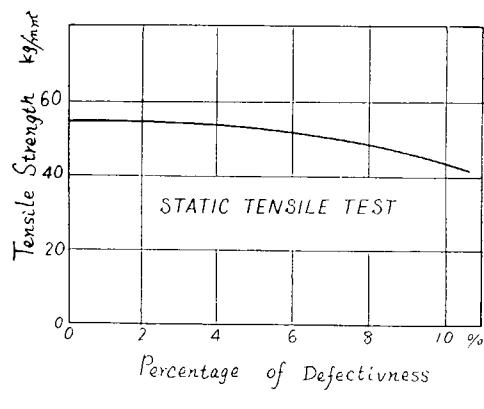
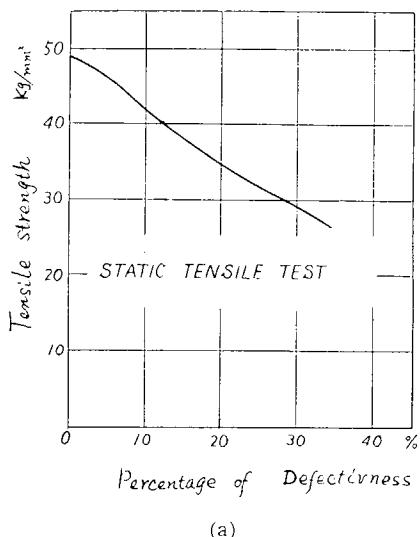


Fig. 4·1 溶接部欠陥の静的引張強度に及ぼす影響

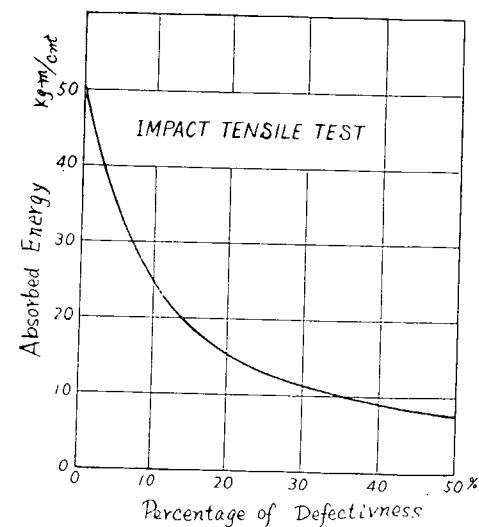
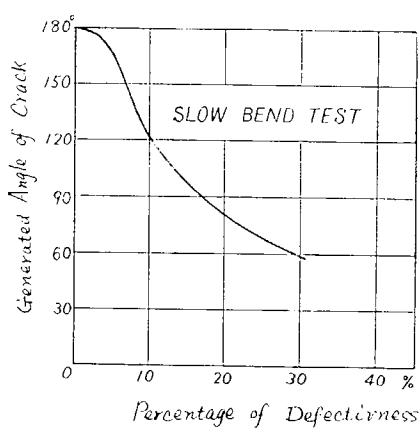


Fig. 4·2 溶接部欠陥の曲げ強度に対する影響

Fig. 4·3 溶接部欠陥の衝撃引張試験の際の吸収エネルギーの及ぼす影響

格では径 2 mm 以下の欠陥はすべて 1 つとして数える。従つて如何なる小さい欠陥も大きい欠陥も同等である。このことは不合理な点もあるため日本非破壊検査協会では板厚の 3% 以下の欠陥は欠陥と算定しないことにしている。今この取扱いを採用し、また O. Masi の欠陥度のごとく溶接ビード中に最も欠陥の多い部分を囲み 10 mm 幅の帯を考え、その内部の欠陥をすべてビードを切る板に直角な面に投影して、その欠陥の占める面積の断面全面積に対する百分率で欠陥度を示すとすれば JIS Z 2341 の各級を厚さ 15 mm について欠陥がプローホールのみとして計算してみれば次の表のごとくなる。

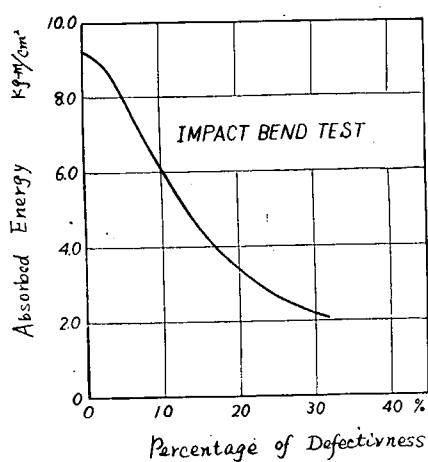


Fig. 4-4 溶接部欠陥の曲げ衝撃エネルギーに及ぼす影響

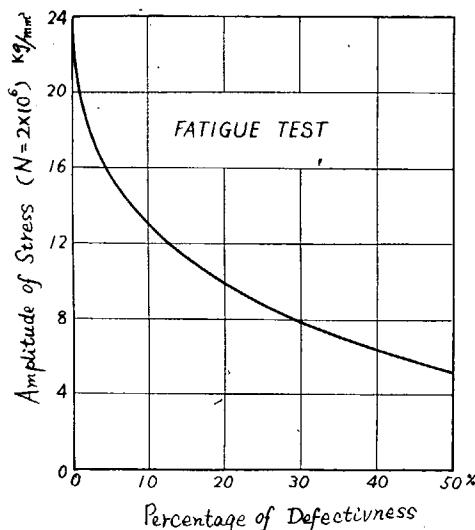
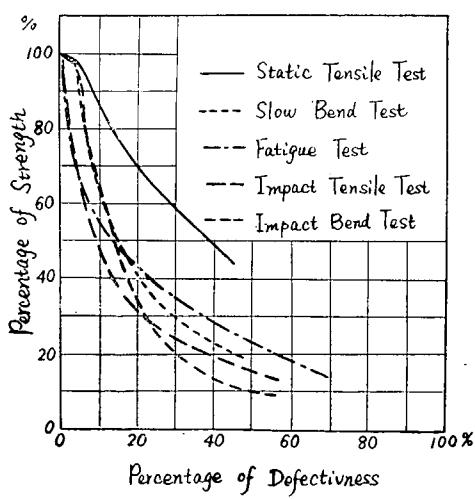
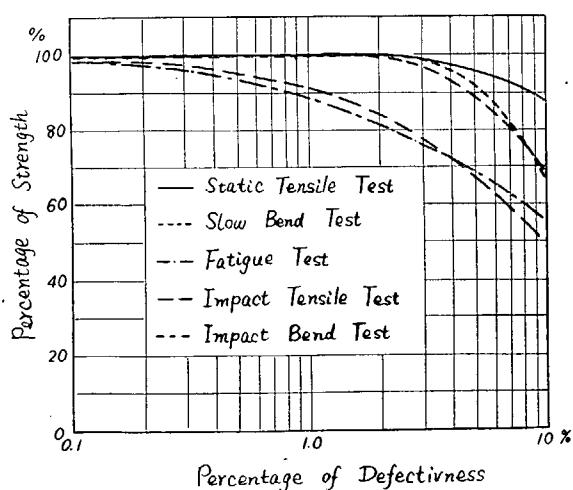


Fig. 4-5 溶接部欠陥の疲労強度に及ぼす影響



(a)



(b)

Fig. 4-6 各種荷重に対する溶接部欠陥度と強度との関係

Table 4·1 JIS 等級を欠陥度 (%) に換算した値 (厚さ 15 mm のとき)

JIS 等級		1	2	3	4	5
プローホールの径	0.45 mm	0 %	0.043%	0.11%	0.19%	0.34%
	1.0	0.11	0.41	0.83	1.42	2.6
	2.0	0.42	1.67	3.34	6.3	10.5

この値は厚さによつても異なるものであり、スラグ等の場合はまた異つたものになる。

以上の表の値を Fig. 4·6 (b) と比較してみると JIS 等級は 小さいプローホールに対し非常に厳しい等級であることが解る。仮に厚さ 15 mm の熔接部にだけに限つて考えると、JIS の最も悪い限界をもう少し下げ、次のような新たな等級を定めたとすれば、それに対応した強度の低下率は概略 Table 4·2 のごとくなる。

Table 4·2

等 級	欠 陥 度 (%)	強 度 の 低 下 率 (%)		
		静 的 引 张	静 的 曲 げ	衝撃及び疲労
1	1	0	0	10
2	2	0	0	20
3	4	3	5	30
4	7	8	20	40
5	10	12	30	50
6	10 以上	12 以上	30 以上	50 以上

第 1 編、第 2 編に示すごとく、Fig. 4·6 の曲線は平均値から求めたものであり、誤差範囲も相当大きい。従つて Table 4·2 はその様子を示したにすぎない。

なお衝撃曲げ試験においては、同じ欠陥でもその位置によつて破壊に要する吸収エネルギーが異なり、荷重の種類によつて様子が異なる。従つて若し判定規準を作り等級を定めるならば、構造物に加へる荷重の種類によつて適応する判定規準を変るべきである。

本研究は割れ（アンダーカット）に対する実験データーが少ないので明瞭なことは不明であるが、溶込み不足については断面積減少から来る欠陥度で整理して特に不都合はないようである。しかし割れと同じく応力集中し、亀裂の伝播する可能性を考えれば溶込み不足も鋭いものは割れと同様に取扱うべきかもしれぬ。

第 2 章 溶接技術の水準並びに実物試験より結果する 判定規準作製に対する原則

以上は試験片についての実験からの結論であるが、実際問題としては規準を作る場合、溶接技術の水準に対しても考慮する必要があると思われる。すなわち、例えば仮に Table 4·2 のような規準を決めても現在の水準で達し得ないものであれば、その技術の低さを償う他の方法も講ずる必要があるであろうし、また水準が非常に高ければ Fig. 4·6 の曲線は実験のバラツキの最も厳しい方のものを取

り、規準を定めるべきであろう。しかし事実は第3編の統計を通覧するにJISの3級を合否の境界とするには少しく水準が低すぎるようにも思われるし、また荷重に対する以外はその必要もないようと思はれる。

実際の構造物の強度は爆発試験において論究したように、試験片で実験するような単純なものでないことを述べた。すなわち我々が今まで欠陥として取扱つていないものも亀裂発生点となつてゐる。もしそれがX線フィルム上で発見できるものであればそのようなものも欠陥として見なすべきであろうし、またX線フィルム上で発見できぬものであれば、他に発見する方法も研究すべきであろう。従つてこの点を明かにするためにもつと詳しい実験と研究を必要とする。また実物は母材と溶接ビードの複合であり、この状況によつても許容され得る欠陥の度に差があり得ることであり、これらの結果も含めた研究結果によつて判定規準も定めるべきであると思はれる。しかしX線フィルム上に現われている欠陥のみによつて論ずる場合は第1、2編の結果はその判定規準に大きい発言力を得えるものと信ずる。

なお抜取検査方法も以上の結論から導入され、科学的な検査方法と判定法が確立されるものと思う。

総 括

以上を要約すれば欠陥度の定義の再検討、本研究で未だ明らかにされていない部分の研究推進並びに実物試験におけるより詳細な研究を進めて後、各荷重別に分類して完全な判定規準を定めるべきである。

昭和33年3月25日 印刷
昭和33年3月30日 発行

日本造船研究協会報告 第21号

発行人 出 潤 張
発行所 社団法人日本造船研究協会
東京都中央区京橋1ノ2
セントラルビル5階
電話 (28) 1409

印刷所 創 文 社
東京都荒川区尾久町3ノ2154
電話 (80) 3692