

溶接継手の板厚方向の継手性能に関する基礎的研究

笹戸 松二*・林 健治*

Basic Study on Joint Performance in Thickness Direction of Welded Joints

Matsuji SASADO and Kenji HAYASHI

Basic research on the joint performance in the through-thickness direction of welded joints is seldom found, although those practical applications to the assessment of lammellar tearing susceptibility have been rather extensively studied. The present report therefore aims at examining tensile and fatigue properties in the through-thickness direction of the structural steel, SS41, with 40mm in thickness as the fundamental data for the study of the joint performance in that direction, and investigating both properties in that direction of welded joints.

Key words: welded joint/joint performance/thickness direction/fatigue

1. 緒 言

近年、溶接構造物の大型化に伴い、板厚は増大し、複雑な構造の溶接継手を採用するケースが多くなっている。橋梁における箱型断面トラス部材やプレート・ガーダーの横桁取付け部の材片集成及び海洋構造物、压力容器等の分岐部や管部に広く用いられている貫通板継手、T継手及び角継手がその例である。これらの継手では、板厚方向に大きな拘束力を受け、ラメラテアと呼ばれる層状の溶接割れが発生し易く、また、板厚方向の耐疲労性能が要求されることもあるので、構造安全上、溶接部の板厚方向の破壊特性を把握することは重要な課題である。

海洋構造物では、特に、波による動的荷重が作用し、厚板が多用されているトラス格点部に溶接が集中し、また、海水による腐食のために切欠きが生じ易く、補修も困難であるなど疲労破壊の危険性が高い¹⁾ので、溶接部の板厚方向の疲労特性を明らかにする必要がある。

以上の観点から、溶接部の板厚方向の破壊特性に関する研究が活発に行なわれているが、ラメラテアなどのような溶接割れの発生要因、割れ機構及び伝播挙動などに着目した感受性評価に関する研究が多く^{2)~4)}、板厚方向の継手性能^{5)~7)}、特に、疲労特性を明らかにしたものは少ない。これは、溶接継手の板厚方向の性能評価を行な

う上で基礎となる実験方法が確立されていないためである。

本研究では、板厚方向に直接、応力が作用するような鋼構造溶接部をモデル化した十字すみ肉溶接継手を対象として、板厚方向の継手性能を評価する実験方法の一例を示し、この方法によって得られた結果から板厚方向の継手性能を明らかにすることを目的とするものである。

2. 実験概要

2.1 供試材

供試材には板厚40mmのSS41-Z35鋼板を用いた。その化学成分を表-1に示す。なお、本研究では板厚方向の継手性能を明らかにすることを目的としているので、ラメラテアなどの溶接割れが発生しないように溶接施工時に特別の注意を払った。

Table 1 Chemical composition of material used (%)

C	Si	Mn	P	S
0.09	0.19	1.06	0.016	0.005

2.2 素材の試験片

素材の板厚方向（以下ではZ方向と呼ぶことにする）の引張・疲労特性を実験的に検討し、Z方向と圧延方向（L方向）及び圧延直角方向（C方向）の両特性の差異を明らかにするために、日本溶接協会規格 WES-1106を

原稿受付 昭和60年4月6日

*長岡技術科学大学建設系

参考にして、3方向の引張・疲労試験片を製作した。

試験片の形状と寸法は図-1に示す通りであり、引張・疲労試験片を、また、3方向を共に同一とした。Z方向試験片の製作には、特に、図-2に示す採取方法を用いた。このとき、つかみ材の溶接には溶接部の熱影響を小さくするために摩擦溶接を施した。

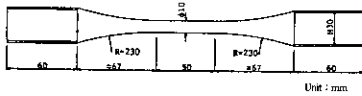


Fig. 1 Tensile and fatigue test specimen of base metal

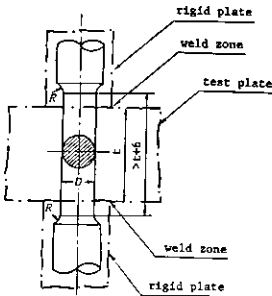


Fig. 2 Extraction through-thickness test specimen

2.3 溶接継手試験体

(a) 予備実験 溶接継手では、はさみ板（試験体）につかみ板を溶接した十字すみ肉溶接継手を採用し、はさみ板内の応力状態が実構造物溶接部のZ方向における応力状態と近似的に等しくなるようなはさみ板の板幅（有効幅）を決定するために、図-3に示す引張試験体を製作した。その際、有効幅は溶接部の形状に依存するの

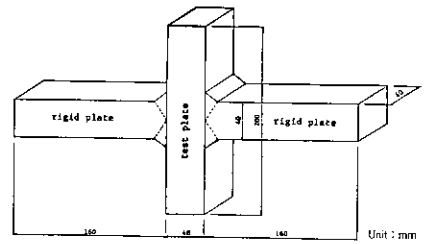


Fig. 3 Preliminary test specimen of welded joints

で、その形状を統一してはさみ板側の脚長を10mm、つかみ板側の脚長を13mmとした不等脚の完全溶込みすみ肉溶接を採用した。

上記の試験体を用いて引張試験を行なった結果を図-4に示す。同図は各荷重段階（ $\alpha = \sigma / \sigma_Y$ ； σ は負荷応力、 σ_Y はZ方向の降伏応力を表す）におけるはさみ板内のひずみ分布を調べたものであり、実験結果を実線で、有限要素解析の結果を●印で示している。各荷重段階において両者の結果はほぼ一致し、点A、A'近傍でひずみが零となっている。従って、はさみ板の有効幅として90mm以上採れば十分である。そこで、安全を期して有効幅を120mmとした（板厚の3倍）。なお、溶接部の形状が異なった場合でも有限要素解析を実施することにより十分な精度で有効幅を求めることができる。

(b) 継手試験体 Z方向の継手性能に及ぼす溶接法の影響を定性的に検討するために、よく使用されている被覆アーク溶接及びサブマージアーク溶接により継手を組み立て、はさみ板まで切削加工した試験体（それぞれMT, MFとST, SF）を製作した。また、被覆アーク溶接により上述の有効幅を有する試験体（ET, EF）を製作

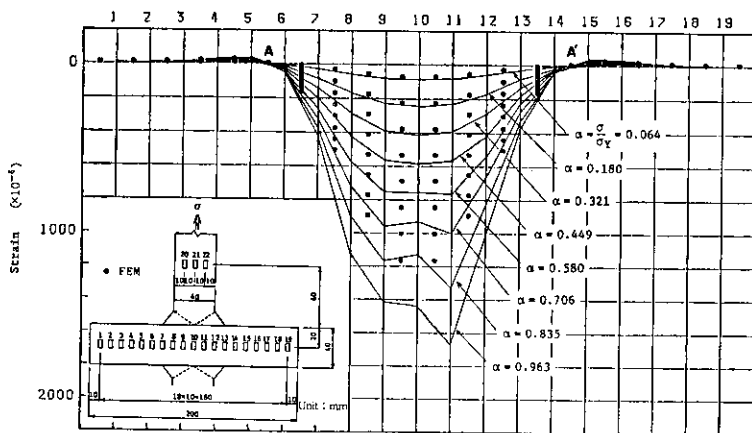


Fig. 4 Strain distribution in test plate

し、Z方向の応力状態が継手性能に及ぼす影響をMT, MFとの比較から検討した。ここで、記号の第一文字M, S, Eは各条件の試験体名を、第二文字のT, Fはそれぞれ引張及び疲労を意味する。

引張試験体と疲労試験体の形状と寸法は図-5に示すように同一とした。ここで、つかみ板とははさみ板は共金とした。なお、試験体を製作する際の開先形状及び溶接条件をそれぞれ図-6、表-2に示す。

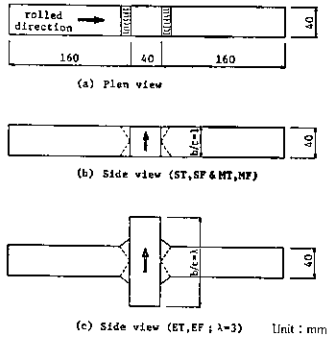


Fig. 5 Tensile and fatigue test specimen of welded joints

2.4 実験方法

(a) 実験項目 実験項目及び各試験体番号を表-3に示す。なお、素材と溶接継手については、適宜、サルファプリント及びマクロ組織試験を実施した。

Table 3 Test series

Specimen		Tension Test	Fatigue Test
Base metal	roll(L) direction	LT-1~3	LF-1~7
	right angle(C) direction	CT-1~3	CF-1~7
	thickness(Z) direction	ZT-1~3	ZF-1~7
Welded joint	submerged arc welding b/t=1	ST-1~3	SF-1~7
	manual arc welding b/t=1	MT-1~3	MF-1~7
	manual arc welding b/t=3	ET-1~3	EF-1~7

(b) 引張試験 素材と継手の引張特性、すなわち、全伸び、一様伸び、降伏点、引張強度及び応力-ひずみ曲線を求めた。なお、継手については最大荷重時の伸びを一様伸びとした。

(c) 疲労試験 载荷は完全片振り引張りで行ない、繰返し速度を10Hzとし、繰返し数200万回を基準とした。繰返し数としては破断までの繰返し数 N_f を用いた。

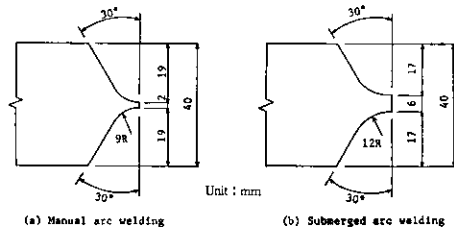


Fig. 6 Groove shapes

Table 2 Welding condition

Mark	Welding Materials	Build-up Sequence	Welding Condition				
			Pass	Current A	Voltage V	Speed cm/min	Heat Input kJ/cm
PT	LB-26 4.0mm 5.0mm	A 15p 15p	4.0mm	190	26	15-20	14.8-19.8
			5.0mm	260	26	15-20	20.3-27.0
			6.0mm	320	26	15-20	25.0-33.0
ST SF	US-36 4.0mm 5.0mm	A 7p 7p	4.0mm	190	26	15-20	14.8-19.8
			5.0mm	260	26	15-20	20.3-27.0
			6.0mm	320	26	15-20	25.0-33.0
MT MF	LB-26 4.0mm 5.0mm	A 12p 10p	4.0mm	190	26	15-20	14.8-19.8
			5.0mm	260	26	15-20	20.3-27.0
			6.0mm	320	26	15-20	25.0-33.0
ET EF	LB-26 4.0mm 5.0mm	A 10p 10p	4.0mm	190	26	15-20	14.8-19.8
			5.0mm	260	26	15-20	20.3-27.0
			6.0mm	320	26	15-20	25.0-33.0

Remark: * ① 4.0mm, ② 5.0mm, ③ 6.0mm

素材の引張試験及び疲労試験は5ton油圧サーボ疲労試験機により行った。また、継手の引張試験及び疲労試験はそれぞれ100ton電子管式万能試験機及び60ton疲労試験機により実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 素材のZ方向の諸特性

(a) サルファプリント及びマクロ組織 素材(Z-L面)及びZ方向試験片のサルファプリントの結果を図-7の(a), (b)に示す。素材では板厚中央部に、Z方向試験片では試験片中央、軸直角方向にサルファバンドが存在する。図-8の(a), (b)に素材及びL, Z方向試験片のマクロ組織を示す。サルファプリントの結果と同様に、板厚中央部に層状の介在物の偏析が認められる。

(b) 引張特性 Z方向試験片はすべて板厚中央部の層状の介在物の存在する箇所から破断したが、L, C方向試験片は必ずしも中央部から破断しなかった。破断面は3方向共にカップアンドコーン型であった。

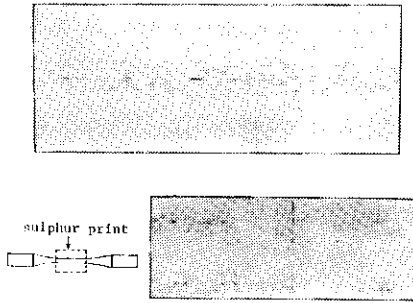


Fig. 7 Sulphur print of base metal

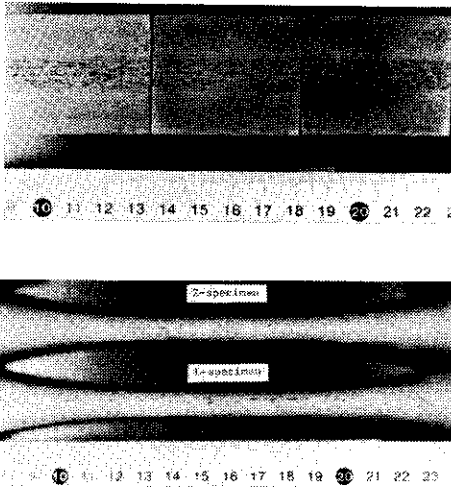


Fig. 8 Macro-structure of base metal

素材の3方向の機械的性質を表-4に示す。Z方向はL, C方向と比較して降伏点 σ_Y が高く、一様伸び ϵ_u と全伸び ϵ_{total} が低くなっている。これは図-9に示す公称応力-公称ひずみ曲線においても同様な結果となっている。従って、Z方向の変形能力はL, C方向に比べて劣り、塑性設計法では、Z方向に直接、応力が作用する場合には注意しなければならない。

図-9より破断までに解放されるエネルギー(靱性)を考えた場合、公称応力-公称ひずみ曲線で与えられる見かけの靱性はZ方向の値が他の方向の値より小さく、真応力-真ひずみ曲線で与えられる材料の真の破壊抵抗を表わす靱性値は3方向共にほぼ等しい。

(c) 疲労特性 引張試験の結果と同様にZ方向試験片ではすべて中央部で、他の方向の試験片では中央部の

Table 4 Mechanical properties of base metal

Mark	σ_Y kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	ϵ_u %	ϵ_{total} %	q %	ϵ_{max}
TL	28.5	43.8	28.3	43.8	76.0	1.43
TC	26.2	43.5	28.4	43.5	76.3	1.44
TZ	29.2	43.8	11.1	29.2	76.9	1.47

remark) σ_Y : Yield point, σ_u : Ultimate strength
 ϵ_u : Uniform elongation, q: Reduction of area
 ϵ_{total} : Total elongation, ϵ_{max} : Maximum true strain

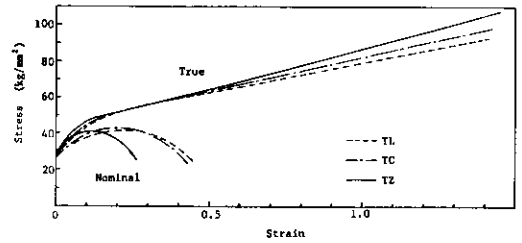


Fig. 9 Stress-strain curves of base metal

ほかチャック部に近い側で疲労破壊した。また、Z方向試験片では図-10に示すように介在物を起点として貝殻模様を呈し、疲労破壊するものが数体見られた。



Fig. 10 Fracture surface of test specimen in Z direction

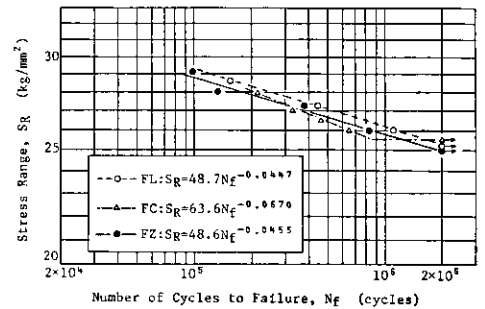


Fig. 11 S-N curves of base metal

次に、応力範囲 S_R と破断までの繰返し数 N_f の関係を図-11に示す。Z方向試験片では、介在物が破壊位置を規定しているにもかかわらず、200万回疲労強度は他の方向と同程度で 25kg/mm^2 となった。従って、今回の試験片のように平滑材の疲労強度に限定すれば、3方向共に同等な疲労強度を有する。

3.2 溶接継手のZ方向の継手性能

(a) 溶接部のサルファプリント及びマクロ組織 図-12に溶接部のサルファプリントを示す。いずれもはさみ板及びつかみ板の中央部に層状のサルファ分布が認められる。図-13に溶接部のマクロエッチを示す。サルファプリントの結果と同様な箇所に介在物が認められる。

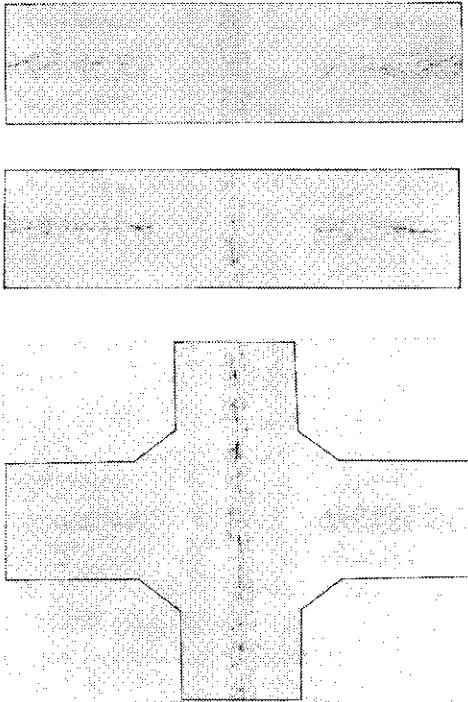


Fig. 12 Sulphur print of welded joints

(b) 溶接部の硬さ分布 引張試験体の中、各1体について溶接部の硬さ分布を調べた。その結果を図-14に示す。ここに、実線は板厚中央の硬さ分布（測定点1～33）を、破線は板表面から板厚中央へ5mmの位置の硬さ分布（34～66）を表わす。また、試験荷重として10kgを用いた。なお、MTはETと同じ方法で製作した後、切削加工によりはさみ板の両側をつかみ板まで切落した試験体であるので、本質的には両者の硬さ分布は一致する。

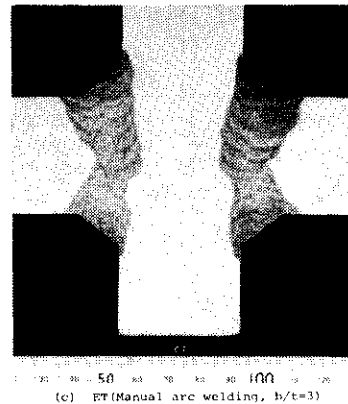
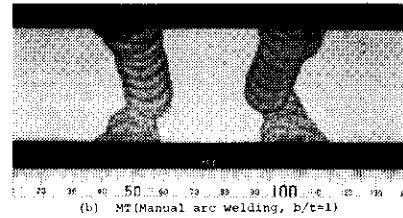


Fig. 13 Macro-structure of welded joints

MTとETの硬さ分布を比較すると、若下の差異はあるものの、ビッカース硬さ試験の精度等を考慮すると、ほぼ等しいものと見なして差し支えない。MTとSTの場合を比較すると、表層の熱影響部の硬さはMTの方が高いが、他の部分では硬さの程度に著しい差異は認められない。

(c) 継手の引張特性 ST, MT, ET共に破断位置はすべて母材側であり、破断面はすべてカップアンドコン型であった。

引張試験より得られた継手の降伏応力 σ_y 、引張強度 σ_u 及び最大荷重時の伸び δ を表-5に示す。各試験体共にNo.3の試験体（サルファプリント等を実施するために、試験体を150mmの長さに切断し、試験前につかみ部を溶接したことにより熱影響を受け、数値が他のものと若干異っている）を除けば、強度及び伸びは同程度であり、素材のL方向の値と比較すると、継手の強度は素材の強度にはほぼ等しいが、変形能力は素材より著しく小

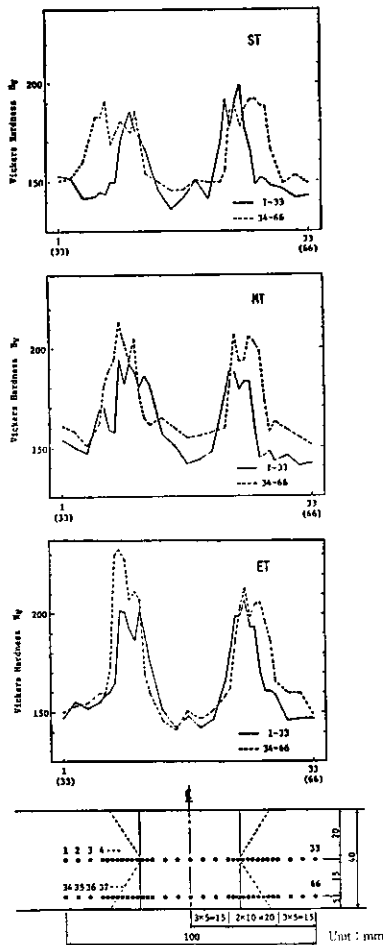


Fig. 14 Distribution of the vickers hardness

さくなっている。この原因として、はさみ板のZ方向の変形能力が小さいこと及び溶接熱による材質の硬化の2点が挙げられる。

はさみ板のZ方向の変形能力が継手の変形能力に大きな影響を与えるものと考え、NTとETの変形能力に差を生じるはずであるが、表-5から明らかに実際に両者に差異は認められない。従って、本研究の範囲内では継手の変形能力に影響を及ぼす主因は溶接熱による材質の硬化である。

(d) 継手の疲労特性 破断箇所はSFとMFではつかみ板側の溶接熱影響部であり、EFではつかみ板側の溶接止端部であった。

各試験体のS-N線図を図-15に示す。200万回疲労強度はSFでは24.2kg/mm²、MFでは23.0kg/mm²、EFでは15.0kg/mm²である。素材のL方向の疲労強度と比較

Table 5 Tensile testing results of welded joints

Mark	σ_Y kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	δ %
ST-1	27.3	42.1	7.6
ST-2	27.8	41.9	7.6
ST-3	30.6	45.0	11.3
MT-1	27.8	42.0	7.8
MT-2	27.8	42.0	7.6
MT-3	30.3	44.8	11.3
ET-1	27.8	41.5	7.2
ET-2	27.5	41.3	7.8
ET-3	29.4	45.0	7.1

remark) δ : Total elongation at maximum load

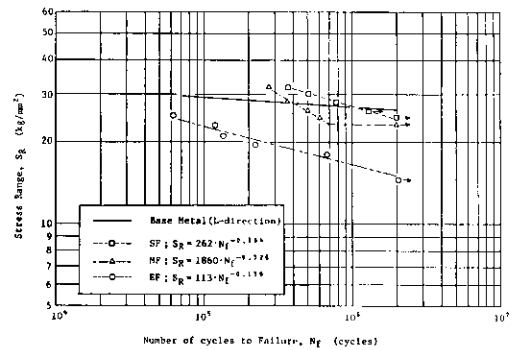


Fig. 15 S-N curves of welded joints

すると、継手は素材よりも同線図の勾配が急であり、応力履歴の影響を受けやすい。

実構造物の継手とZ方向の応力状態が同じであると考えられるEFでは、つかみ板側の溶接止端部の応力集中(前述の有限要素解析の結果では止端部の応力集中率は1.9となった)により同部で疲労破壊し、その疲労強度が素材よりも非常に低い値となった。そこで、止端部の応力集中を取り除き、Z方向の応力状態を厳しくしたものがMFであり、はさみ板側の板厚中央付近で破壊破壊するのでと推測されたが、結果的には、つかみ板側の熱影響部で疲労破壊し、その疲労強度はEFより高く、素材の値に近づいた。更に、溶接法を被覆アーク溶接からサブマージアーク溶接に変えた場合にはどのようなかを調べたものがSFであり、同様につかみ板側の熱影響部で疲労破壊し、疲労強度はMFより若干高く、より素材の値に近いものとなった。なお、SFとMFとの疲労強度に差異をもたらした要因は、つかみ板側の熱影

響部における材質硬化の違いが考えられる。

4. 結 言

本研究では、板厚方向に直接、応力が作用するような鋼構造溶接部をモデル化した、SS 41—Z35鋼板を用いた十字すみ肉溶接継手を対象として、板厚方向の継手性能を評価する実験方法の一例を示し、素材及び継手の板厚方向の破壊特性を調べるために引張試験及び疲労試験等を実施した。

その結果を要約すると次の通りである。

(1) 素材では板厚方向中央部に層状の介在物が偏析し、これが板厚方向試験片の破断位置を規定し、変形能力を著しく低下させる。継手では溶接熱影響部の硬化により変形能力は素材の板厚方向の変形能力よりさらに低いものとなっている。

(2) 平滑材の疲労強度に限定すれば、素材の板厚方向、圧延方向及び圧延直角方向の疲労強度はほぼ同じである。はさみ板内に溶接割れ等が存在しない本継手の場合には、はさみ板の板厚方向の諸特性が継手の疲労特性に影響を及ぼさず問題となることはない。

本研究は、溶接継手の板厚方向の破壊特性に関する研

究の一例を示したにすぎず、他の鋼材を使用した場合、介在物内に切欠きを有する場合、他の溶接法及び継手を採用した場合などでは今回の結果とは異なることが予想されるので、今後の課題としたい。

最後に、本研究にご協力頂いた方々、特に、本学建設系高野一男技官に対して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会技術委員会“海洋構造物の格点部の構造・材料・工作に関する工作の立場からみた二・三の考察” JSSC, Vol. 17, No. 186, 1981
- 2) 金沢, 山戸, 井上, 橋本“ラメラテアの発生要因について” 溶接学会誌, Vol. 45, No. 2, 1976
- 3) 稲垣“鋼構造物のラメラテアに関する現状と課題” 溶接学会誌, Vol. 47, No. 1, 1978
- 4) 日本溶接協会 IL 委員会“耐ラメラテア鋼材の特性とその評価方法” IL-85, 1981
- 5) 青木, 岡本, 木山, 桑山, 佐藤“連続鋳造スラブによって製作された SM 50 厚鋼板の板厚方向引張特性について” JSSC, Vol. 10, No. 97, 1974
- 6) 権藤, 佐藤, 日吉, 横原“鋼板内部欠陥と板厚方向引張特性との関係” 日本鉄鋼協会第72回講演大会講演論文集(Ⅱ), 185, 1966
- 7) 日本鋼構造協会技術委員会“ラミネーションの鋼構造部材の強度におよぼす影響” JSSC, Vol. 4, No. 30, 1968