

(昭和 40 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

溶接構造物に発生する脆性破壊の研究 (第 1 報)

— 広幅継手試験について —

正員 秋 田 好 雄*

正員 矢 田 敏 夫*

On Brittle Fracture Initiation characteristic to Welded Structures (Report No.1)

— Transversely Welded Wide Plate Test —

By Yoshio Akita, *Member*Toshio Yada, *Member*

Summary

The present authors have investigated on brittle fracture initiation in welded structures, using 600mm wide, transversely butt-welded plates of 80 kg/mm² class high tensile steels.

They found that brittle cracks initiated at fusion zone of one surface, and immediately propagated through the heat-affected zone. Fracture stresses, in some cases, were lower than yield stress of the base metal.

Such brittle fracture, occurring along the brittle zone of welded joint at low stress level, was considered to be a characteristic phenomenon to welded structures; it could hardly be reproduced in any of the existing testing methods.

1 緒 言

80 kg/mm² 程度の高張力鋼の溶接部は、硬化部と軟化部を生じ、材質的に不連続となつている。そしてボンド部近傍の脆性は母材あるいは溶着金属よりもかなり低下する。

しかし従来の研究によれば、このような脆化部から亀裂が発生したとしても、圧縮の残留応力が存在する場合は、亀裂は脆化部に沿つて広範囲に伝播する前に、母材部に入つて停止する^{1),2)}。このような考えから、現在までの脆性破壊の研究のほとんど大部分は母材に関するものであつた。

しかし実際の溶接構造物においては、残留応力の分布は複雑であり、広範囲に引張残留応力が存在する場合がある。そして特に、ボンド部近傍の脆化が大きく、さらに溶接残留応力、溶接変形などによる応力集中が重畳されるような場合は、低応力レベルで、亀裂が脆化部の板表面より内部に向かつて発生し、板厚を貫通して広範囲に脆性破壊をする。このような溶接構造物に特有の脆性破壊の発生は、従来の小型継手試験片では再現できず、ある程度板幅が広く、そして実際の構造物と同様な継手をもつ試験板によつて実験を行なわなければならない。

著者らは、板幅 600 mm の人工ノッチをつけない広幅横継手試験板を用いて、脆性破壊の研究を行なつてきた。そして溶接の脆化部において発生する脆性破壊の原因と、それを防止する対策をかなり明確にすることができた。この報告は第 1 報として、広幅継手試験の実験結果と、2, 3 の考察を行なつたものである。

2 広幅継手試験

2.1 実験方法

供試材として A, B 2 種の 80 キロ級高張力鋼を用いた。その化学成分と機械的性質は第 1 報に示すとおりである。

原稿受付 昭和 39 年 12 月 20 日

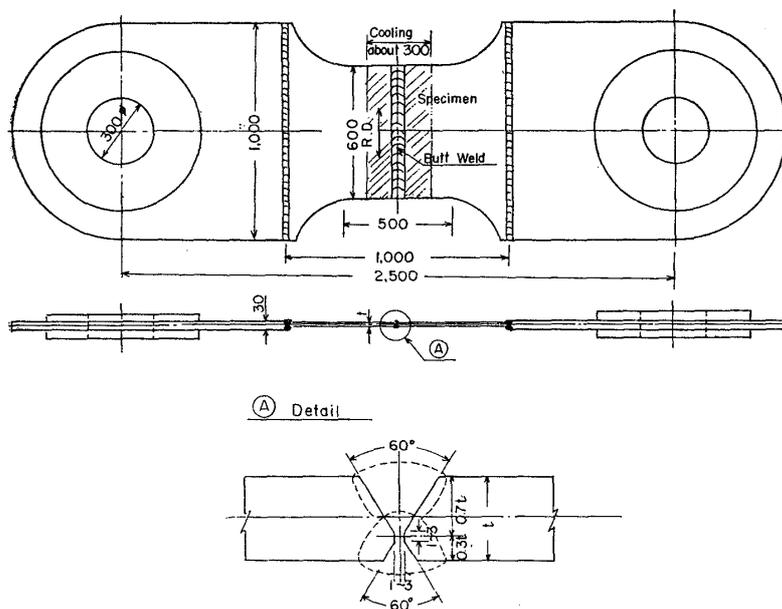
* 石川島播磨重工業株式会社

第1表 供試材の化学成分および機械的性質

Kind of Steels	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	B
HT-80 A	0.15	0.20	0.85	0.019	0.008	—	1.05	0.48	—	0.30	—
HT-80 B	0.14	0.29	0.82	0.010	0.013	1.10	0.55	0.43	0.06	0.28	0.003

Kind of Steels	Plate Thick mm	Y P kg/mm ²	T S. kg/mm ²	Elong. % (GL=200)	V-Notch Charpy	
					Tr s °C	E-40 kg/cm ²
HT-80 A	22	74.0	81.5	21.5	-62	7.6
HT-80 B	21	81.7	86.3	28.1 (GL=50)	-50	4.9

* C-direction



第1図 広幅継手試験板

試験板は第1図に示すように、板幅 600 mm、長さ 1,000 mm (平行部 500 mm) の横継手試験板であり、人工的切欠はつけていない。

開先形状は非対称X型とし、溶接棒は 80 キロ級高張力鋼用溶接棒を用いた。予熱温度および層間温度は 120~150°C とし、溶接入熱 (=電流 (アンペア) × 電圧 (ボルト) × 60 / 溶接速度 (cm/分)) を 25,000 ジュール/cm と 45,000 ジュール/cm の 2 条件とした。前者は下向溶接で一般に行なわれている条件であり、後者はとくに入熱の大きい場合である。溶接は片面の溶接完了後、裏面からアークエアガウジングした後溶接を行なった。

一部の試験板は応力除去焼鈍を行ない、As weld 試験板と比較した。

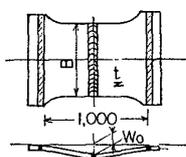
試験板は中央部約 300 mm に冷却槽をとりつけ、一様に冷却した。本実験の試験温度は A-10 試験板以外はすべて -40°C とした。

試験機は容量 1200°C トンのテストリグを使用した。

第2表 実験結果

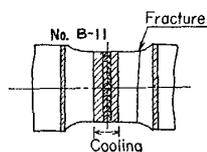
Kind of Steels	NO.	Size of Test Plate L ^{mm} x B ^{mm}	Welding Heat Input Joule/cm	Initial Deformation Wo, mm	Heat Treatment	Testing Temp °C	Fracture Stress kg/mm ²	Cleavage Percentage %
A	A-10	22 x 600	25,000	1	As Weld	-30	84.5	70
	A-11	" x 600	"	5	"	-40	70.5	90
	A-12	" x 600	"	10	S. R. (580°C x 2hr)	"	83.0	85
	A-21	" x 500	45,000	1	As Weld	"	65.6	80
	A-22	" x 550	"	6	S. R. (580°C x 2hr)	"	88.7	80
B	B-11	21 x 600	25,000	16	As Weld	"	81.4 ⁽³⁾ (Base Metal)	—
	B-21	" x 600	45,000	5	"	"	76.7	80

Note: (1)



(2) Heat Input (Joule/cm) = $\frac{\text{Volt} \times \text{Amp.} \times 60}{\text{Speed (cm/min.)}}$

(3)



2.2 実験結果

実験結果を第2表に、また各試験板の破断位置および破面のスケッチを第2図に示した。これらの実験において観察された主な点は次のとおりである。

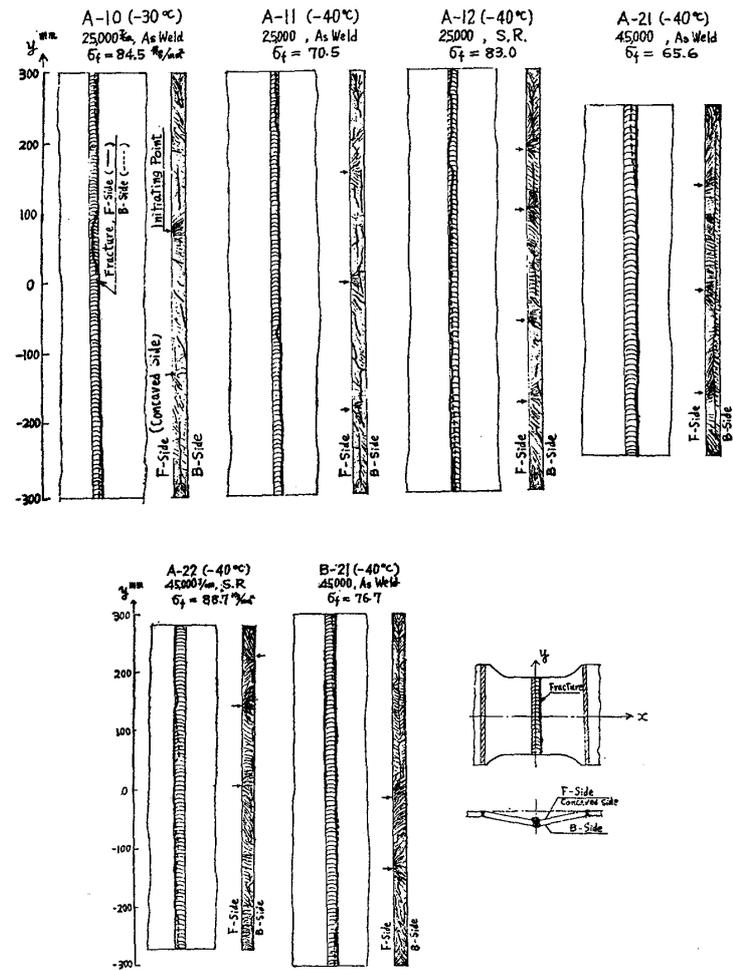
HT-80 A は入熱 25,000 ジュール/cm の通常の溶接条件を用いても、 -40°C の温度では 70 kg/mm^2 程度の低い応力レベルで脆性破壊を生じた。ただし -30°C では破断応力は 84.8 kg/mm^2 であつた。一方 HT-80 B は大きな溶接変形があつたにもかかわらず、 81 kg/mm^2 以上の強度を示した。45,000 ジュール/cm の入熱の高い条件では、A, B 鋼板とも破壊応力は低下し、前者は約 65 kg/mm^2 、後者は約 77 kg/mm^2 であり、いずれも母材の降伏点よりは低い。

亀裂は板表面の融合線（ボンド）の観点から同時に板厚内部に向かって発生し、脆化部を貫通して一時に破断した。亀裂の発生した面は溶接変形によって凹入していた面であることから、初期変形部に生ずる曲げ応力が亀裂の発生に一つの影響をおよぼすことがわかる。

破面は 80~90% の脆性破面を示した。10~20% に相当する shear lip は主として、広幅試験板の板端から各 50~100mm の範囲にみられた。

応力除去焼鈍を行なつた A-12, A-22 試験板は、溶接変形が比較的大きかつたにもかかわらず、As Weld 試験板のように低応力破壊は生ぜず、そして伸びも大きかつた。すなわち As Weld 試験板の母材部の長手方向の伸びは 0~0.2% 程度であつたのに対し、A-12 試験板は 0.7%、A-22 試験板は 4.5% の伸びを示した。亀裂はボンド部表面から発生しているが、As Weld 試験板とは異なり、溶着金属を貫通して破断した部分が多い。

つぎに小型継手試験片と比較する次のような差異を示す。一般に小型継手試験片では、同一の溶接条件でも、広幅試験板のように低応力レベルで脆化部から破断することはほとんどない。例えば入熱 45,000 ジュール/cm で溶接した HT-80 A の小型試験片の -40°C における実験結果によれば、1, 2 の例外はあるが、ボンド部で破断した場合でも、破断応力は $90\sim 93\text{ kg/mm}^2$ の高応力であつた。



第2図 破断状況

3 考 察

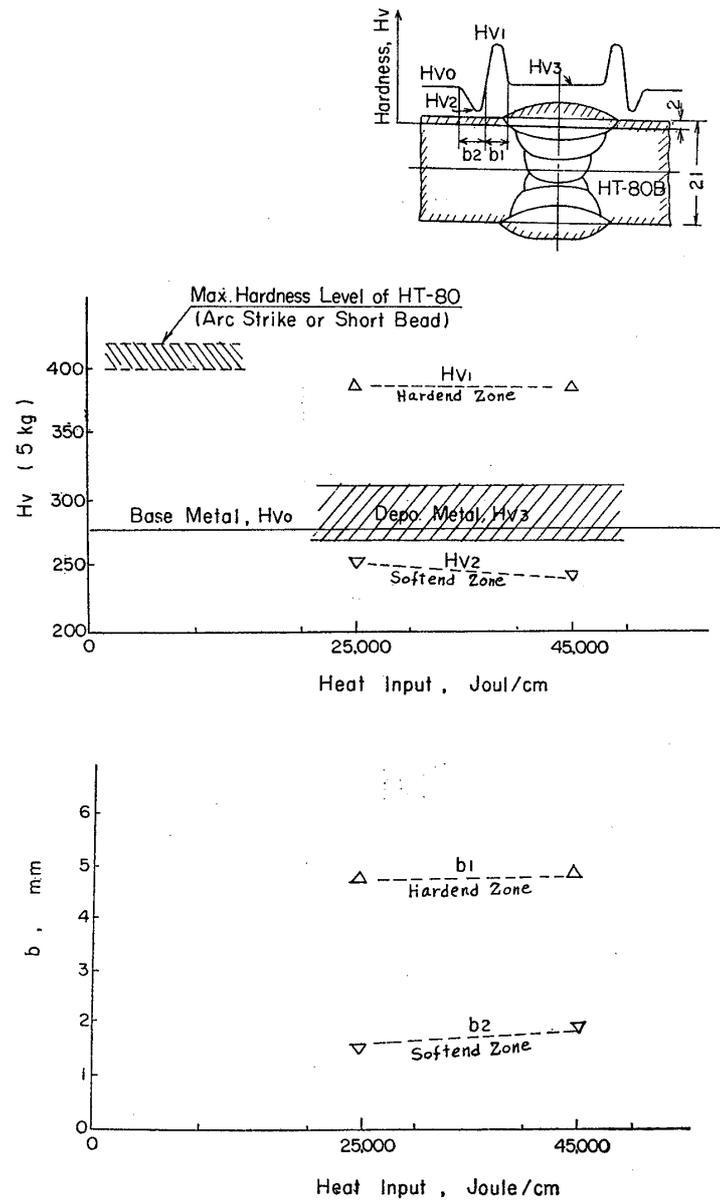
広幅継手試験板における低応力破壊に影響をおよぼす主な要因について、2, 3の考察を行なう。

(1) 溶接入熱と溶接熱影響部の脆化

第3図は 80 キロ HT の溶接部近傍の硬化部と軟化部の硬度測定例である。手溶接継手の硬度はかなりのバラツキをもつものであるが、一般的に言つて、入熱 25,000 ジュール/cm よりも 45,000 ジュール/cm の方が軟化の程度がやや大きい。

第4図はボンド部近傍の各位置におけるシャルピ破面遷移温度を示した。これからボンド部の遷移温度は、母材よりもかなり大きく上昇することがわかる。そして広幅試験結果にあらわれた HT-80 A, HT-80 B の材質の差、溶接入熱の影響が、シャルピ試験結果に明瞭に示されている。

(2) 初期変形の影響



第3図 溶接入熱と硬化部および軟化部

第5図は荷重を加えたときの、溶接線上の歪の変化を測定した例である。これから溶接による凹入変形部には曲げ応力を生ずるため、歪はかなり大きくなることがわかる。とくに塑性域に入ると歪は大きくなり、そして、広幅板の中央部の歪の方が、端部よりも次第に大きくなる。これは試験板の自由端の影響と溶接残留応力が影響していると思われる。

初期変形としては、仮付け時の板の目違いなども考慮しなければならない。このような初期変形が構造物の強度におよぼす影響については、次報にて報告する。

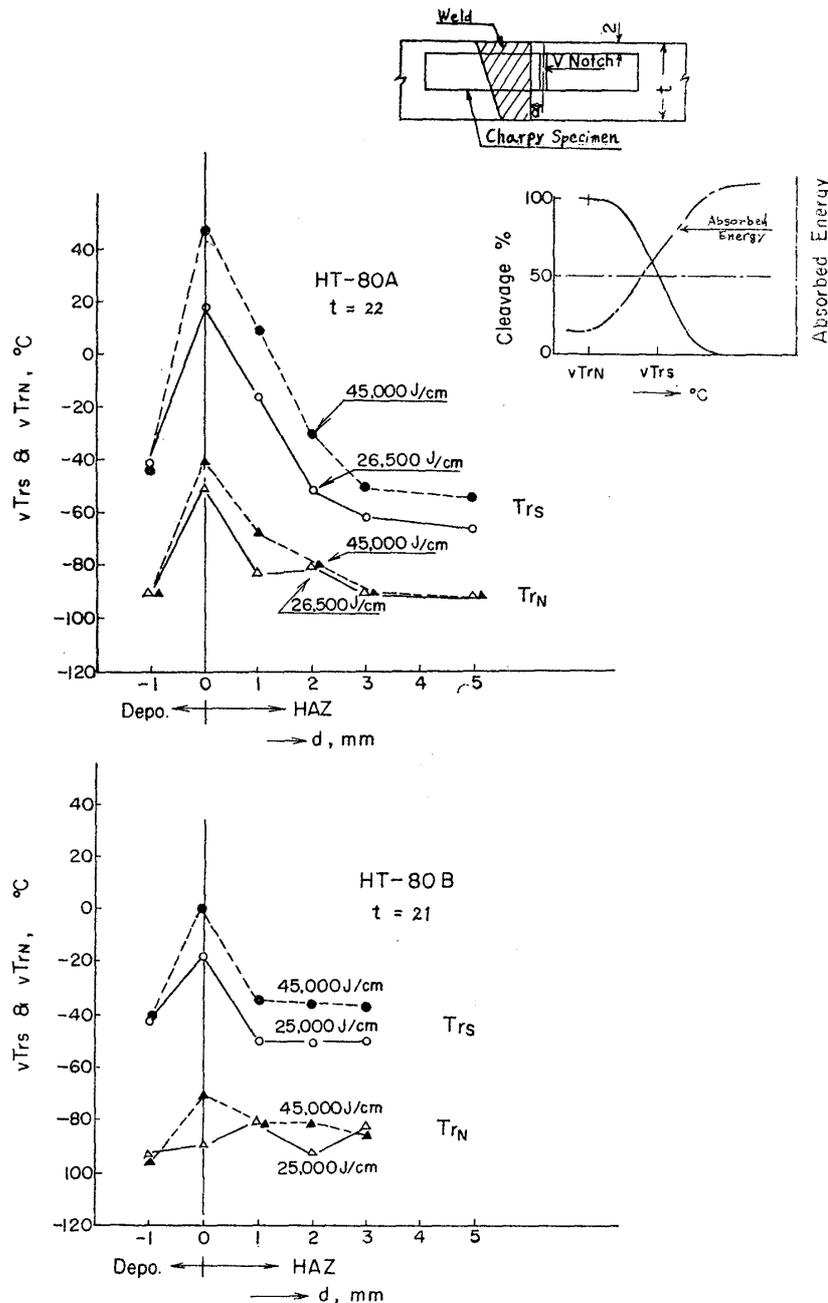
(3) 応力除去焼鈍の影響

本実験結果によれば、応力除去焼鈍は有効であることがわかった。応力除去焼鈍の効果として、材質の改善と残留応力の減少が考えられる。

第6図は焼鈍温度と硬化部、軟化部の硬度変化の関係を示したものであり、550~600°Cで焼鈍を行なえば最高硬度は340HV程度にまで減少する。

また残留応力に関しては第7図に示すように、80キロHTの突合せ継手の溶接残留応力は約60kg/mm²であるが、580°Cで焼鈍を行なえば20kg/mm²以下にまで減少する。

(4) その他の要因



第4図 熱影響部のシャルビ破面遷移温度

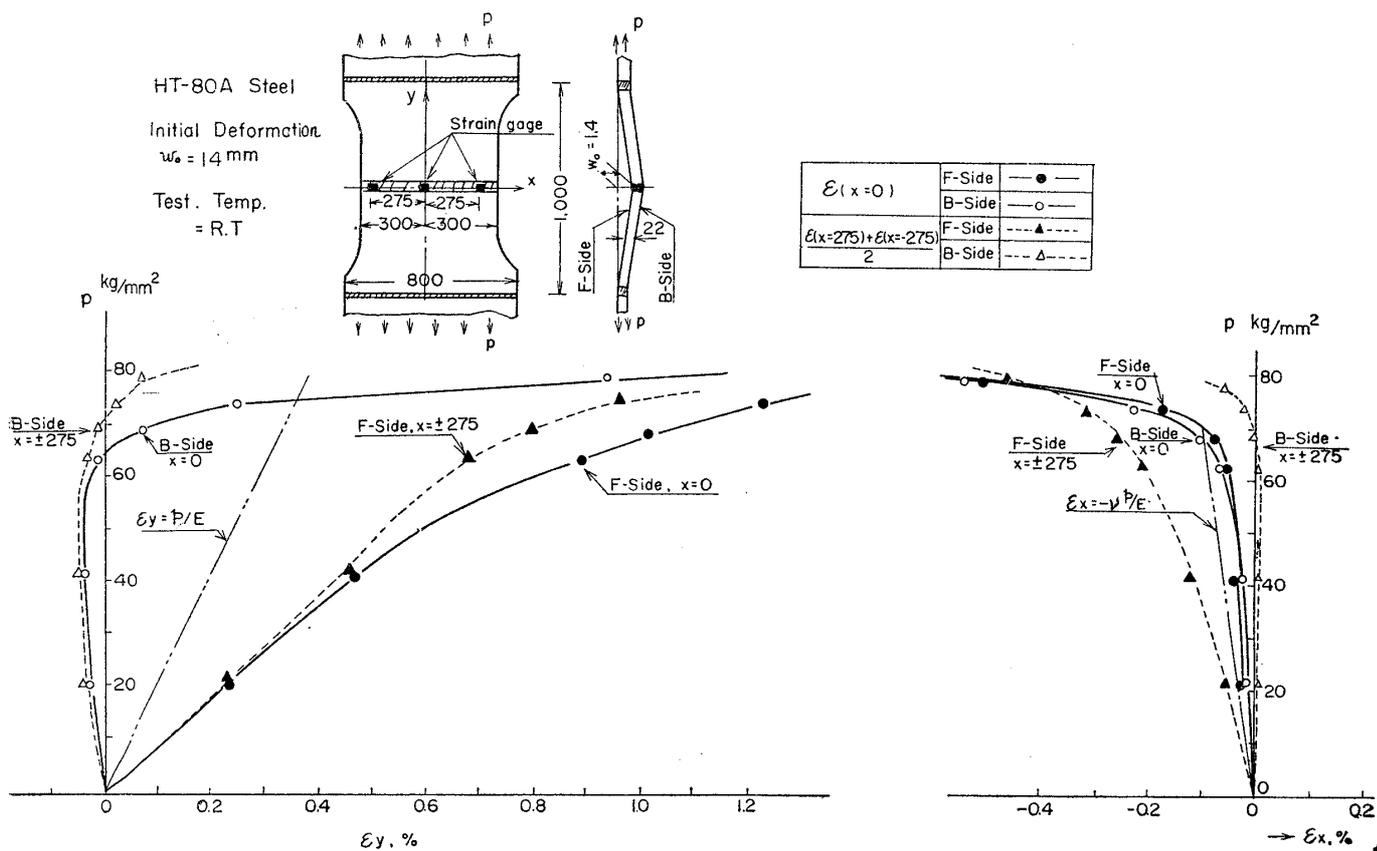
広幅継手試験板の低応力破壊の現象を考える場合、前述の要因の外に、軟化部、硬化部の材質的不連続性の問題、ボンド部の形状、余盛形状などによる応力集中についても考慮しなければならない。

(5) 広幅継手試験の意義

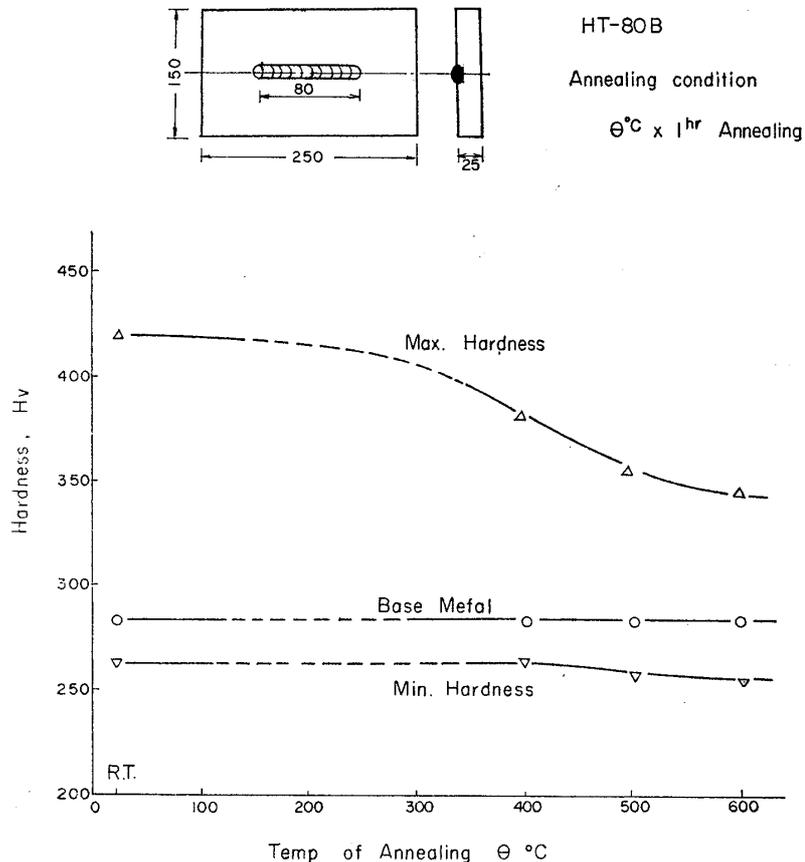
実験結果から、広幅継手試験板における低応力脆性破壊の発生機構は次のようであると考えられる。調質鋼の溶接部は軟化部と硬化部を生じ材質的に不連続となり、そしてボンド部近傍の靱性は母材よりもかなり低下する。これに外力が働くと、部分的に多軸応力状態となる。そして広幅試験板のように、溶接残留応力が存在し、さらに溶接変形などによる応力集中が重畳されるような場合は、欠陥が存在しなくても、低応力レベルで脆化部から亀裂が発生すると考えられる。

このような溶接構造物に特有の低応力脆性破壊は、本実験におけるように広幅継手試験板を用いれば極めてよく再現させることができるが、従来の小型試験片によつて再現させることはできない。

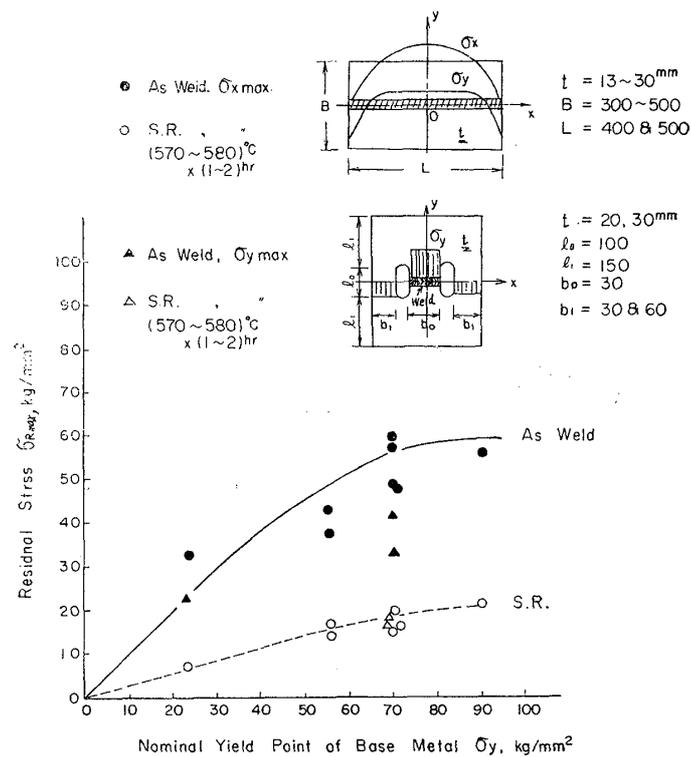
なおこのような溶接熱影響部における低応力破壊の現象に関しては、W. S. Pellini ら³⁾の報告がある。



第5図 初期変形をもつ広幅継手試験板の荷重—歪曲線



第6図 焼鈍による硬化部および軟化部の変化



第7図 応力除去焼鈍による各種鋼板の溶接残留応力の減少

4 結 論

(1) 広幅継手試験の結果、80 キロ級の高張力鋼は、溶接の脆化部において脆性破壊を生じ、破壊応力は母材の降伏点よりもかなり低い場合があることを確認した。

このような溶接構造物に特有の低応力脆性破壊の発生は、一般の小型継手試験片によつても、また従来の大型脆性破壊試験法によつても再現させることは困難である。

(2) 溶接入熱が大きいほど、ボンド部近傍の脆化は大きく、破壊応力は低下する。亀裂は板表面のボンド部から内部に向かって発生し、脆化部を貫通して破断する。

このような低応力破壊の原因は、溶接により軟化部、硬化部を生じて材質的に不連続となり、そして脆化した部分に、溶接残留応力、初期変形などによる応力集中が重畳されるためと考える。

(3) したがつて調質鋼を用いる溶接構造物は、使用条件に適合した靱性が得られるような溶接条件を選定し、とくに、大きな拘束状態で溶接を行なわないこと、また初期変形量は許容限界以下におさえることなど、設計、施工上の注意が必要である。

本研究に関して、造船協会電気溶接研究委員会第6分科会金沢委員長はじめ各委員から有益なご助言、ご討論をいただいた。

また研究の実施に当つては、中村技術研究所長、前田主任研究員をはじめ、多数の方々のご指導、ご協力をいただいた。心から謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- (1) H. Kihara, T. Kanazawa, "Japan Welding Engineering Society WES Evaluation Criterion of Structural Steels for Low Temperature Application," IIW IX Report (1964)
- (2) H. Kihara, Y. Akita, & K. Ikeda, "Brittle Fracture Work in Japan, Including Evaluation of Ductility for Steels and Deposited Metals in Wide Plate and Industrial Steels," IIW IX Report (1963)
- (3) W. S. Pellini, P. P. Puzak, "Practical Considerations in Applying Laboratory Fracture Test Criteria to the Fracture-Safe Design of Pressure Vessels," NRL Report 6030 (1963), p. 22~32