

(昭和 35 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

脆性破壊の伝播におよぼす溶接残留応力の影響

正員 木原 博* 正員 楠田 忠雄**
 正員 飯田 國廣** 正員 前田 豊生***
 正員 松岡 忠博***

Effect of Residual Stresses on the Behavior of Brittle Fracture Propagation

By Hiroshi Kihara, *Member* Tadao Kusuda, *Member*
 Kunihiro Iida, *Member* Toyoo Maeda, *Member*
 Tadahiro Matsuoka, *Member*

Summary

In the tests on brittle fracture of longitudinally welded wide plate specimens or welded spherical containers it was frequently observed that the propagating brittle crack in the direction oblique to the weld line changed its direction when the brittle crack approached to the welded joint, or the brittle crack initiated from the weld flaw was branched off and arrested by the base metal. The similar phenomenon was also observed in the brittle fracture of welded structures in a service condition.

Consequently it may be considered that the residual stresses due to welding affect considerably the propagation of brittle fracture as in the case of initiation of brittle fracture. In order to study these effects of residual stresses on brittle fracture propagation, especially on the direction of propagation, the tests were conducted by using several types of welded plate specimens having an unsymmetrically placed longitudinal joint, adjacent two joints parallel to each other, or a diagonally placed oblique joint. The test specimen with a trapezoidally impressed artificial notch was fractured by applying impact under the temperature lower than the arresting temperature.

The principal stresses in the welded specimens were measured in order to analyse the direction of brittle fracture.

It may be concluded from the test results that the brittle crack propagates in the direction perpendicular to that of the maximum tensile stress resulting from the residual stresses due to welding and the applied stress, and the direction of brittle crack becomes unstable in the compression region of the resultant stress field.

1. ま え が き

大型の溶接縦接手試験片や球型容器を低応力で脆性破壊させた際、接手につけた切欠から発生した亀裂がある距離進展して停止したり、伝播して来た亀裂が接手を通過した後2つに分岐して停止したり、あるいはまた接手に向つて斜めに進展して来た亀裂が接手部で進行方向を変えたりする現象はこれまで著者等が行なつた実験^{1), 2), 3)}、研究にもしばしば現われたし、また実際に脆性破壊を生じた溶接構造物にもこのような例を見ることができ

る。
 溶接による残留応力は脆性破壊の発生に大きな影響をおよぼすが、一方伝播においても残留応力が大きな影響をおよぼしていることは上述の例からも明らかである。さて溶接接手を中心とする 150 mm 程度の範囲には引

原稿受付 昭和 35 年 6 月 20 日

* 東京大学

** 運輸技術研究所溶接部

*** 石川島重工業株式会社技術研究所

張残留応力が存在し、したがって接手間隔の短いいわゆる近接接手では単接手に比べて比較的広い引張残留応力場が生じるため、近接接手は脆性破壊の伝播を促進すると考えられ接手が近接するのは好ましくないとされて来た。しかしながら近接の度合によつてはかえつて接手の間に深い圧縮残留応力場が生じ、これが逆に低応力の下で接手と直角方向に伝播する脆性破壊を阻止するように働く可能性も考えられる。

一方最近の高張力鋼の研究の進展に伴ない溶着金属あるいは熱影響部の切欠靱性が母材よりも低いことが問題とされ、若し脆性破壊がこの部分を伝播するような場合には、母材部よりも悪い伝播特性を示すのではないかと危惧されている。しかしながら接手と斜め方向に伝播して来た脆性亀裂が残留応力によって以後の伝播方向を変えられることは上述のように経験的に明らかであり、したがって斜め方向から接手附近に到達した亀裂が熱影響部あるいは溶着金属に沿って伝播しないことが明らかとなれば溶着金属の切欠靱性はまた別の観点から論ぜられることとなる。

さて均一な応力場における脆性破壊の伝播に関してはこれまで数多くの論文が発表され最近では吉識, 金沢⁽⁴⁾, および秋田, 池田⁽⁵⁾等の論文があるが亀裂伝播におよぼす残留応力の影響を論じたものとしては木原, 安藤⁽⁶⁾, の論文があるのみである。

本報告においては接手部および接手から離れた部分の溶接による残留応力が脆性破壊の伝播に及ぼす影響をおよぼすかを明らかにするため上述の見地から以下に述べるような実験研究を行なった。

2. 試験片の製作

試験片系列は縦接手（符号 KOW）、近接手（符号 K5W、K15W、K25W）、および斜接手（符号 N15W、N30W、N60W）に別れ、前2者によつて接手と直角に、また後者によつて接手とある傾斜角で伝播して来る脆

性亀裂の伝播特性におよぼす残留応力の影響を調べた。試験片寸法の詳細は第1図の通りであり、近接接手試験片の接手間隔は3条件、斜接手試験片の接手中心線と切欠方向とのなす角度 θ は3条件変えた。

第2図に示す開先を準備し、適正条件で表裏各1層のユニオ

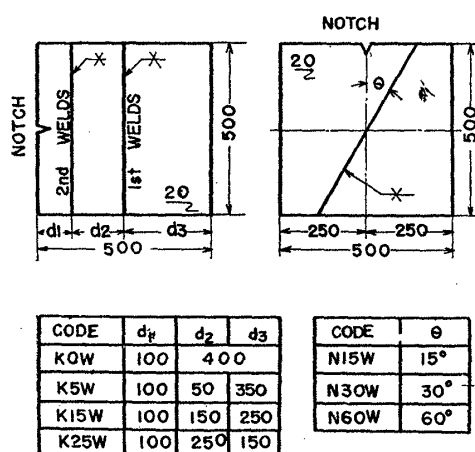


Fig. 1 Codes and Dimensions of Specimens

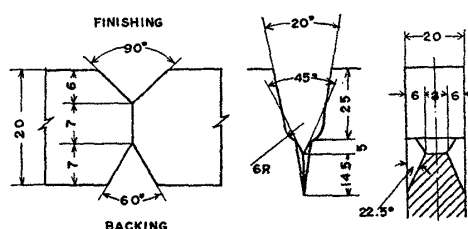


Fig.2 Details of Joint Preparation and Trapezoidal Press Notch

Table 1 Chemical Composition and Mechanical Properties

Chemical Composition of Base Metal (%)

C	Si	Mn	P	S	Mn/C
0.24	0.02	0.40	0.040	0.026	1.7

Mechanical Properties (kg/mm²)

Base Metal			Deposite Metal		
σ_Y	σ_u	Elong	σ_Y	σ_u	Elong
26.1	45.2	28.7%	33.1	52.2	21.8%

Impact Value kg-m/cm^2

	V-Notch	U-Notch	Press V-Notch
E_0	1.2	7.6	0.48
E_{20}	3.6	9.8	1.2
E_{-20}	0.89	1.9	—

ンメルト溶接を行なつた。この際近接接手試験片は条件を揃えるため図のように接手を溶接する順序を一定とした。なお残留応力を計測した試験片は溶接前 645~670°C, 1 時間の応力除去焼鈍を行なつた。

脆性破壊試験片に加工したプレス切欠の詳細は第 2 図の通りで, As Weld 試験片は溶接前 3 方向に 5 mm 深さのプレスをを行なつた後 250°C, 1 時間の時効を行ない, また溶接後応力除去焼鈍した試験片 (N15 WR-1, N30 WR-1, N60 WR-1) は焼鈍後プレス切欠を加工して時効を行なつた。

試験片の母材は脆性破壊試験用として特に試作した板厚 20 mm の脆性材でその化学成分, 切欠靱性, および JIS 2 号丸棒試験片 (6.25 mm ϕ , GL=50 mm) による溶着金属と母材の機械的性質は第 1 表の通りである。

3. 試験方法

3-1 脆性破壊試験

切欠方向と平行の端面をチャックに溶接し容量 600 ton の荷重装置により一定の引張応力に保つて, 気圧式衝撃装置により切欠に楔を打ち込み脆性亀裂を発生させた。なおチャックを含め荷重装置のピン間隔は約 2,000 mm とした。また 1 部の試験片 (第 2 表中荷重零のもの) は 500 mm 角のまま切欠と反対の端面中央部を支持し, 切欠に衝撃を与えた。

試験時の温度は切欠を含む中心線上の表裏 6 点で熱電対を用いて測定し温度が均一となるよう注意した。

Table 2 Test Results

Type of Joint	Code of Specimen	Test Temperature °C	Applied Mean Stress kg/mm ²	Impact Energy kg-m	Remark
Unsymmetric Longitudinal Butt Joint	KOW-1	-31.8	0	20	Not Initiated
	KOW-2 ⁽¹⁾	-58.0	0	30	Crack started after 2nd Impact
		-63.0	0	40	
	KOW-3 ⁽¹⁾	-59.5	0	40	
	KOW-4	-43.5	12.1	20	
	KOW-5	-49.7	3.0	20	Completely fractured after 2nd Impact
		-57.2	3.0	40	
	KOW-6 ⁽¹⁾	-51.4	1.0	40	
Adjacent Longitudinal Butt Joint	K 5 W-1	-58.0	0	50	Not Initiated
		-59.0	0	50	
	K 5 W-2	-61.8	3.0	40	
		-61.0	4.1	40	
	K 15 W-1 ⁽¹⁾	-59.9	0	40	Crack started after 2nd Impact
		-58.2	0	50	
	K 15 W-2 ⁽¹⁾	-59.2	3.0	40	
	K 25 W-1 ⁽¹⁾	-60.0	0	50	
		-54.3	3.0	40	
Oblique Butt Joint	N 15 W-1	-54.0	12.1	20	
	N 15 W-2	-50.5	6.1	20	
	N 15 WR-1 ⁽²⁾	-50.5	6.1	20	Stress Annealed
	N 30 W-1	-49.5	8.9	—	Crack started without Impact
	N 30 W-2	-40.7	5.7	—	Crack started without Impact
	N 30 W-3	-50.5	0	20	Completely fractured after 3rd Impact
		-50.0	0	30	
		-50.0	0	40	
	N 30 WR-1 ⁽²⁾	-51.4	6.1	20	Stress Annealed
	N 60 W-1 ⁽¹⁾	-40.2	6.1	20	
	N 60 W-2	-48.9	4.6	—	Crack started without Impact
	N 60 WR-1 ⁽²⁾	-39.2	6.1	20	Stress Annealed

Note: (1) Started brittle crack was arrested in the specimen.

(2) Stress annealed at 900°C for 1 hour.

3-2 残留応力測定

縦接手、および近接手試験片は各1枚ずつ、ロソジおよびトランスの残留応力の接手に直角方向の分布を測定した。このため板の中心を通り接手と直交する線上に約28点の測定点を選び、各点の表裏面に短標点2軸ロゼット歪計 ($GL=4\text{mm}, 5\text{mm}$; ポリエステル) を貼付した後、バンドソーにより歪計を含む幅約30mmのストリップを切り出して応力解放を行なった。バンドソーによる切断は温度上昇をほとんど伴わずしたが従来に比べて良好な測定結果を得た。

斜接手における亀裂の伝播路に関する考察を行なうため $\theta=30^\circ$ の試験片について接手および母材部の主応力の測定を行なった。測定点数は第7図に示す通り54点で、各点の表裏面に1.6mmφのボールを60°の等角ロゼットに打ち込んだ。歪測定にはコンタクトメーター (測定精度1/1,000mm) を使用し $G.L$ は20mmとした。ロゼットを含む部分を応力解放するために切り出す小片の寸法については予備実験を行ない、($G.L.+8$)mmまでは測定精度に影響のないことを確認したが、今回は切断の都合上ロゼット部を40mm×40mm角に切り出して応力解放を行なった。

4. 試験結果

4-1 縦接手試験片

脆性破壊試験結果を第2表に総括した。

外荷重がない場合切欠から発生した脆性破壊が衝撃エネルギーおよび残留応力による解放歪エネルギーによってどの程度伝播するかを見出すため、切欠に衝撃だけを加えた。KOW-1は -31.8°C で20kg-mの衝撃を加えたが亀裂を発生しなかつた。そこでKOW-2をさらに低温に冷却し30kg-m、40kg-mと2回の衝撃を行なったところ2回目に初めて亀裂が発生して伝播し、左端面から210mm附近で第3-1図のように分岐し、さらに進んでから停止した。再現性を調べるためKOW-3の試験を行なったところKOW-2とほとんど同じ位置で停止した。次に試験機により 0.1kg/mm^2 の応力に保持し、同じような温度でKOW-3と同一の衝撃エネルギー

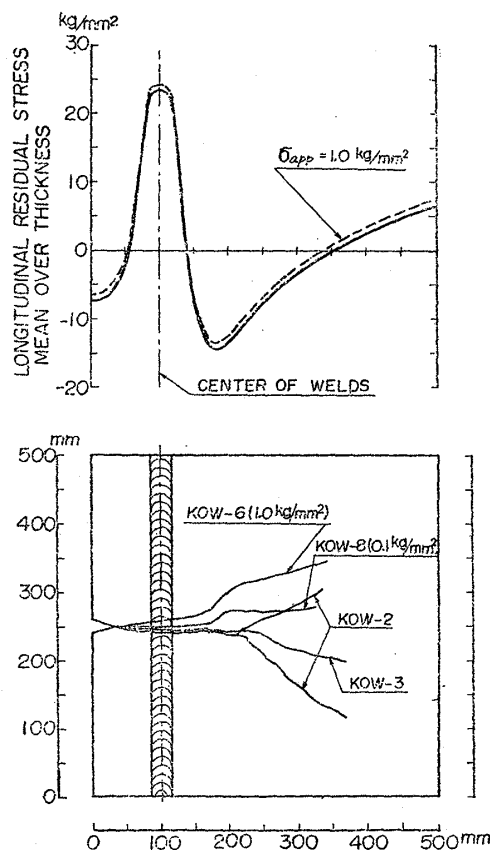


Fig. 3-1 Crack Paths and Longitudinal Residual Stresses in KOW-2, KOW-3, KOW-6 and KOW-8 Specimens

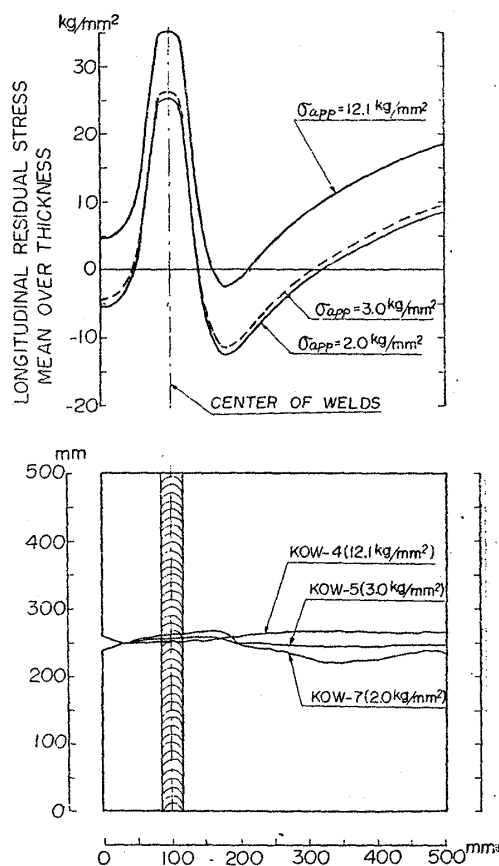


Fig. 3-2 Crack Paths and Longitudinal Residual Stresses in KOW-7, KOW-5 and KOW-4 Specimens

を与えた(KOW-8)。同様に KOW-6 は応力を 1 kg/mm^2 に保つて試験した。これらの試験片における亀裂の伝播長さは KOW-3 より若干短い、亀裂はやはり端面から 170 mm 程度で大きく曲げられている。亀裂の伝播路のスケッチと対応させてロンジの残留応力の分布曲線を上に示した。亀裂の伝播方向に直角なロンジの残留応力は切欠部で圧縮応力、接手を過ぎて再び圧縮応力となり、端面では引張応力となつている。引張応力のある領域が狭いのは試験片の寸法効果によるものと考えられる。

さて上下の図を対応させると伝播路が曲げられたり、KOW-2 の亀裂が2つに分岐した部分には、ほとんど最低の圧縮残留応力が存在していたことがわかる。

第 3-2 図には衝撃エネルギーを 40 kg-m 一定とし(KOW-4を除く)外力を変えた場合の試験結果を示してある。溶接接手に外力を加えた場合の残留応力の変化についてはさきに実験研究⁽⁷⁾を行なつたが、その結果によれば Fig. 3-2 程度の外力が加わつた際の残留応力の分布曲線は大略同図のように考えて差し支えない。この場合でもやはり残留応力と外力とが重畳した応力分布曲線の最低応力値附近で破壊の伝播方向が曲つている。以上の試験結果から本試験片では亀裂伝播停止の限界応力は約 1 kg/mm^2 であることがわかる。

4-2 近接接手試験片

接手中心線の間隔が 50 mm の近接接手試験片 K5W-1 は応力零、 -58°C で 50 kg-m の衝撃を2回与えたが亀裂を発生しなかつた。そこで試験片を変え 3.0 kg/mm^2 の応力に保ち 40 kg-m の衝撃を加えたがやはり亀裂は発生しなかつたので、さらに応力を上げ 4.1 kg/mm^2 で再び 40 kg-m の衝撃を与えたところ第 4-1 図のように切欠側の接手の直前からゆるやかに彎曲して接手を横ぎりほぼ直進して完全に破断した。この場合もやはり圧縮残留応力の最低な部分でわずかではあるが亀裂が曲げられている。

接手間隔を 150 mm とした K15W-1 試験片は 500 mm 角のままで切欠に衝撃を加えた。第2回目の衝撃により亀裂は第 4-2 図のように伝播し2本目の接手を越えてから停止した。左端面から 140 mm 程度で大きく曲つたのは深い圧縮残留応力のためであり、また2番目の接手に入る直前で再び接手と直角方向に曲つたのは接手

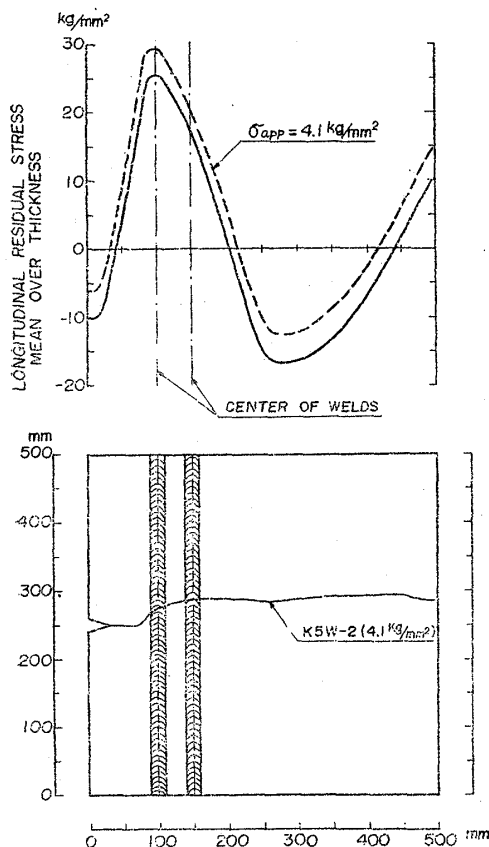


Fig. 4-1 Crack Path and Longitudinal Residual Stresses in K5W-2 Specimen

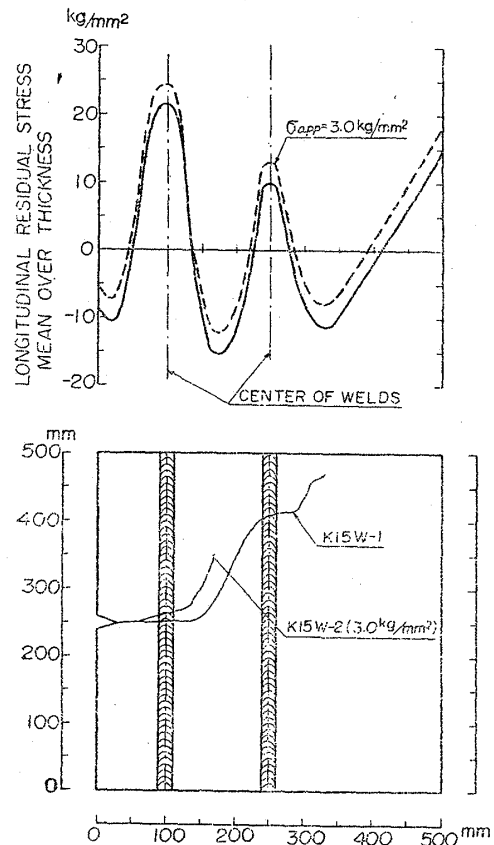


Fig. 4-2 Crack Paths and Longitudinal Residual Stresses in K15W-1 and K15W-2 Specimens

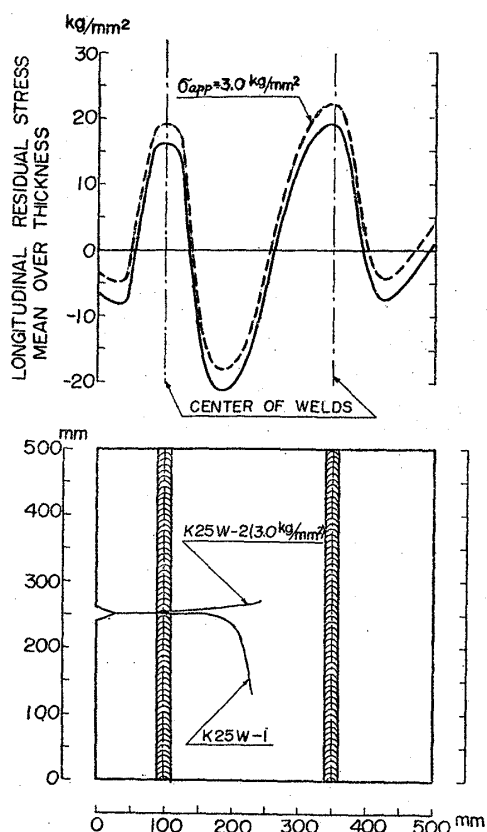


Fig. 4-3 Crack Paths and Longitudinal Residual Stresses in K25W-1 and K25W-2 Specimens

である。図中に試験片符号および加えた外応力を入れてある。試験片はほとんど同一と見なし得る温度で行なわれ、加えた衝撃エネルギーは等しい。応力除去焼鈍した N15WR-1 の亀裂は直進しているのに As Weld の亀裂は切欠から直ちに曲り始め、接手からかなり離れて伝播している。

$\theta = 30^\circ$ の試験結果を第 5-2 図に示す。外力を加えないで試験した N30W-3 の亀裂は接手から相当離れた場所を伝播している。 $\theta = 60^\circ$ の結果は第 5-3 図の通りである。第 5 図全体を通じ焼鈍した試験片の亀裂は接手に関係なく直進し、As Weld では外力の高い程その伝播路が中心に寄せられているが、いずれもかなり曲つて伝播していることがわかる。

破断した試験片の写真の 1 例を第 6 図に示す。

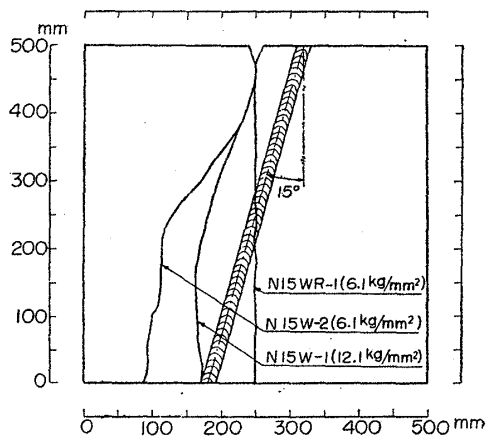


Fig. 5-1 Crack Paths in N15W-1, N15W-2 and N15WR-1 Specimens

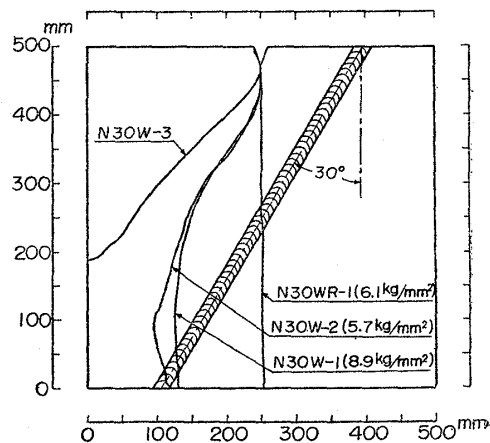


Fig. 5-2 Crack Paths in N30W-1, N30W-2 and N30W-3 Specimens

の引張残留応力の影響を受けたものと考えられる。同じ温度で 3.0 kg/mm^2 の応力に保ち衝撃を与えた K15W-2 の亀裂は接手途中で停止した。

さらに接手間隔を 250 mm に広げた K25W 試験片においては第 4-3 図のような伝播を行なつた。

さて KOW 試験片では外応力 1.0 kg/mm^2 で亀裂は停止し、 2.0 kg/mm^2 で完全に破断したのに、K25W-2 試験片では試験温度がほとんど同じで、しかも衝撃エネルギーが同一であるのに、 3.0 kg/mm^2 の応力でなお亀裂は接手間で停止した。この理由を明らかにするためには、これら各試験片の残留応力分布がそれぞれ異なるため種々の要因を考えなければならないが、接手間の深い圧縮残留応力がその主な要因となつていると考えて差し支えないであろう。

4-3 斜接手試験片

第 2 表に総括してあるように切欠と接手中心線とのなす角度を 3 条件変え、接手に向つて斜に伝播して来た亀裂の進展方向におよぼす残留応力の影響を調べた。各試験系列とも外力を一定に保ち切欠に衝撃を加えて脆性亀裂を発生させた。As Weld 試験片のほかに 3 条件の 1 枚ずつを溶接後 900°C 、1 時間の応力除去焼鈍を行ない (試験片符号 NWR) 残留応力を完全に除いてから破壊実験を行なつた。また外力の影響を明らかにするため $\theta = 30^\circ$ の N30W-3 試験片は 500 mm 角のままで外力をかけないで衝撃を加えた。

第 5-1 図は $\theta = 15^\circ$ の各試験片の亀裂伝播経路を重ねたものである。図中に試験片符号および加えた外応力を入れてある。試験片はほとんど同一と見なし得る温度で行なわれ、加えた衝撃エネルギーは等しい。応力除去焼鈍した N15WR-1 の亀裂は直進しているのに As Weld の亀裂は切欠から直ちに曲り始め、接手からかなり離れて伝播している。

$\theta = 30^\circ$ の試験結果を第 5-2 図に示す。外力を加えないで試験した N30W-3 の亀裂は接手から相当離れた場所を伝播している。 $\theta = 60^\circ$ の結果は第 5-3 図の通りである。第 5 図全体を通じ焼鈍した試験片の亀裂は接手に関係なく直進し、As Weld では外力の高い程その伝播路が中心に寄せられているが、いずれもかなり曲つて伝播していることがわかる。

破断した試験片の写真の 1 例を第 6 図に示す。

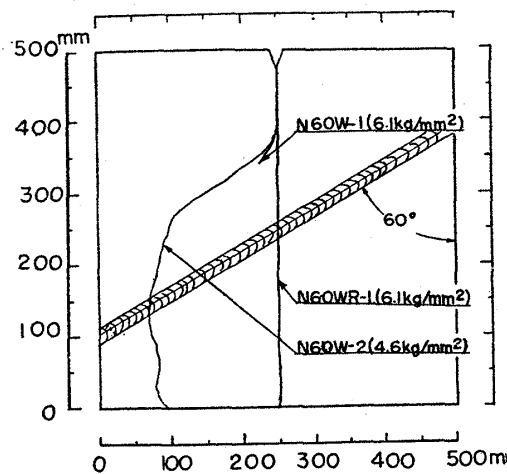


Fig. 5-3 Crack Paths in N60 W-1, N60 W-2 and K60 WR-1 Specimens

As Weld の斜接手試験片における亀裂が曲つて伝播した理由を明らかにするため、 $\theta=30^\circ$ の試験片の主応力を測定した。測定結果は第 7-1 図以下に示す通りである。本試験片の左あるいは右端面に切欠を付けたのが N30 W 試験片であり、一方上あるいは下の端面に切欠を付けたのが N60 W

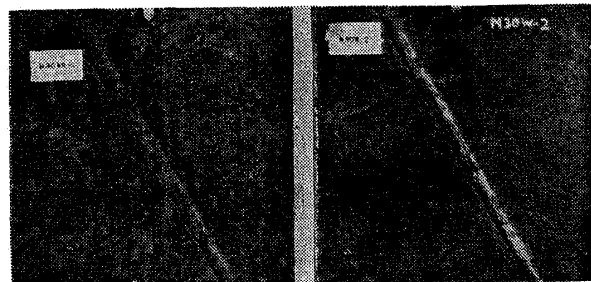


Fig. 6 Crack Paths in As-Welded (N30 W-2) and Stress Annealed (N30 WR-1) Oblique Specimens

試験片となっている。
N30 W, N60 W 試験片の切欠から試験片中央に到る亀裂伝播路は第 5 図からわかるように N30 W-3 を除いてほとんど同一である。そこでこの伝播路上の各点の主応力を測定するため第 7 図左下ののように測定点を配置した。また試験片全体の主応力分布の概要を知るため試験片上半分は等間隔に測定点を配した。第 7 図において実線外向きの矢印は引張主応力の、また点線内向きの矢印は圧縮主応力の方向と大きさを示し、矢印の傍の数字は応力の値をあらわしている。

第 7-1 図は外力のない As Weld の状態での応力線図である。

図中の太い曲線は衝撃エネルギーだけで伝播した N30 W-3 の伝播路を示している。この線に沿った各点の最大引張応力は伝播方向とほとんど直交している。応力の値は割に低く $3\sim 4\text{kg/mm}^2$ 程度である。

切欠先端の近傍には集中応力、および楔の打ち込みによる動的応力等が生じ、実際の場合はこの図と違ったものとなるが、切欠先端附近の主応力方向は切欠方向からかなり傾いていて、切欠から発生した亀裂が接手に向う

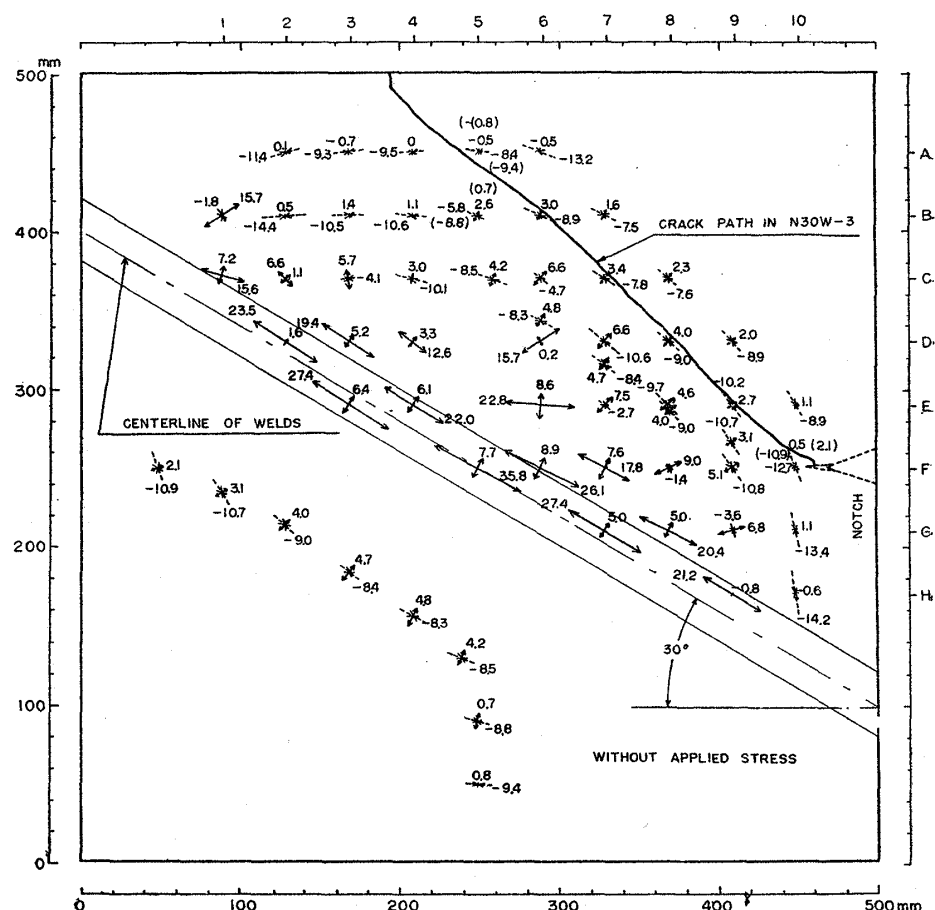


Fig. 7-1 Residual Stress Field and Crack Path Without Applied Stress; Outward Arrows indicate Tension Stresses and Inward Arrows Compression Stresses

ためには相当高い値の圧縮主応力方向と直交しなければならない。切欠先端から接手に向う主応力線と直交する主応力は値は低い引張応力であり、したがって切欠から出た亀裂は図のように最大引張応力と直交するように曲げられて伝播したものと考えられる。

さて残留応力場に外力による応力が重畳すると外力の影響を受けて主応力の方向並びに大きさが変化する。すなわち残留応力による主応力を σ_1, σ_2 , 外力と残留応力との重畳により生じた主応力を σ_p, σ_q とし, 外力による均一応力を σ_{app} , σ_{app} と前の主応力 σ_1 とのなす角を φ , σ_{app} と新しい主応力 σ_p とのなす角を θ とすると, $\sigma_p, \sigma_q, \theta$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_{p,q} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{app}}{2} \pm \sqrt{\left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi + \sigma_{app}}{2} \right\}^2 + \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\varphi}{2} \right\}^2} \quad (1)$$

$$\tan 2\theta = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\varphi}{(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi + \sigma_{app}} \quad (2)$$

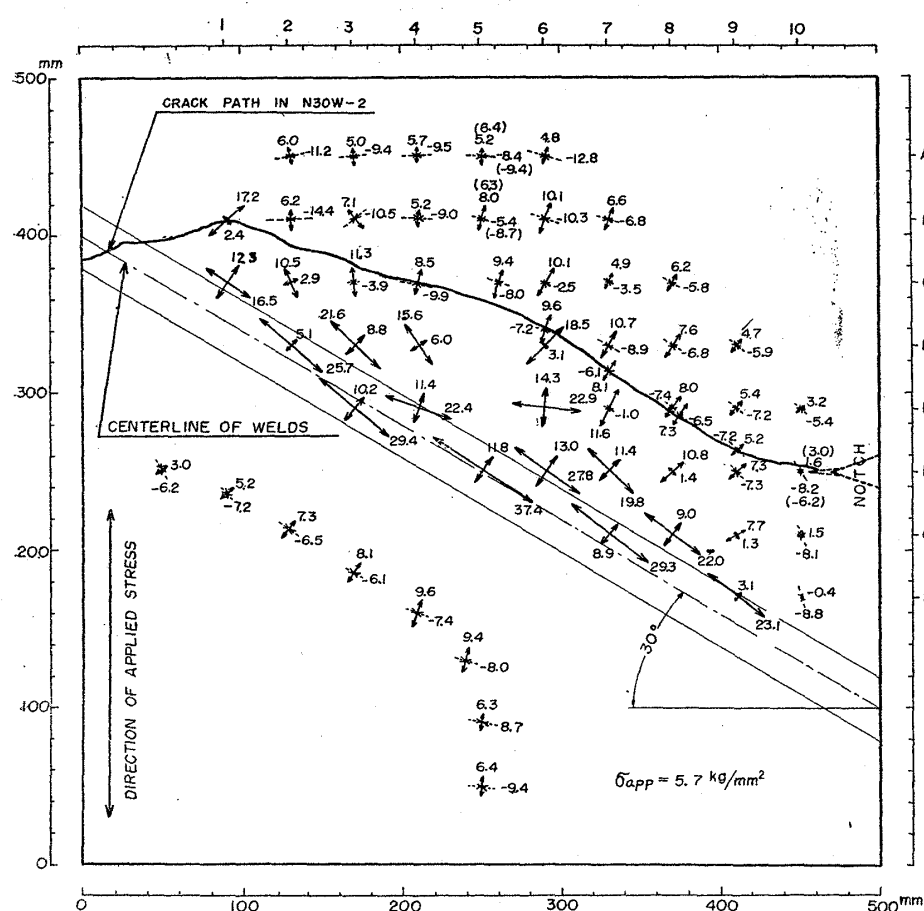


Fig.7-2 Residual Stress Field and Crack Path under The Applied Stress $\sigma_{app}=5.7 \text{ kg/mm}^2$; Outward Arrows indicate Tension Stresses and Inward Arrows Compression Stresses

5. 実験結果の考察並びに結論

以上のように残留応力場またはこれと外力による応力とが重畳した応力場を伝播する亀裂の進展方向は大局的には最初に存在していた応力によって顕著な影響を受け、圧縮残留応力は亀裂進展の安定性を妨げ、進展を阻止するように働くことが実験的に明らかとなった。

脆性破壊が伝播する際には亀裂先端に局部的な応力の再配分を生じ、また寸法効果、材質、温度、伝播距離のほかに伝播する領域に存在していた応力によっても伝播速度が変化することがこれまで報告されている。したがって上述のような応力場を伝播する脆性破壊の進展方向に関する安定性、停止条件等をさらに明確にするためには複雑な応力場を伝播する亀裂の先端の応力集中、応力再配分、伝播速度の変化その他を明らかにし、亀裂進展に

第7-2図は上式により N30 W 試験片に外応力 5.7 kg/mm^2 が加えられた場合の新しい主応力を計算した結果である。応力 5.7 kg/mm^2 で破断した N30 W-2 試験片の亀裂を図中に示す。また N30 W-1 は外力 8.9 kg/mm^2 で破断したが、同様にして計算すると第7-3図のようになる。いずれの場合も第7-1図と同様に亀裂伝播路は最大引張応力とほとんど直交している。ただし亀裂が相当程度伝播して端面に近づくと応力の再配分および端面の影響などを受けて必ずしも直交しなくなる。第7図と第5-3図とを対応させると N60W についても以上と同じことが云える。

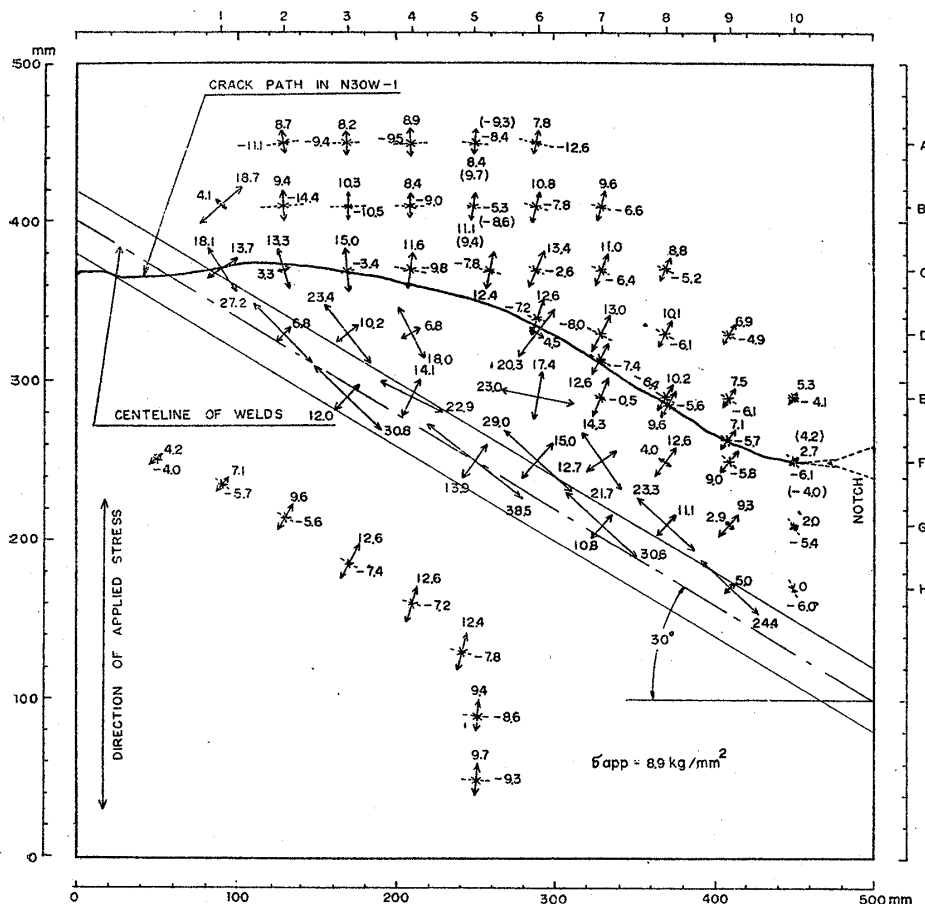


Fig.7-3 Residual Stress Field and Crack Path under The Applied Stress $\sigma_{app}=8.9\text{ kg/mm}^2$; Outward Arrows indicate Tension Stresses and Inward Arrows Compression Stresses

伴なつて解放される歪エネルギー解放率等を求めなければならない。これらの点に関してはなお今後研究を続ける予定である。

本研究から得た主な結論を列記すると次の通りである。

1. 脆性破壊が伝播する際の進展方向に関する安定性は亀裂の先方に存在していた応力場の影響を顕著に受け、引張応力と直交する場合には安定であり、圧縮応力場では不安定となる。
2. 圧縮応力場は脆性破壊を阻止するように働く。
3. 脆性破壊は亀裂前方の応力場の最大引張応力と直交する方向に進展する傾向にある。

あ と が き

本研究の1部は日本造船研究協会第39研究部会の研究計画に属し、委員各位より有益な討論をいただいた。また同協会は本研究の発表に関する許可を与えられた。実験の中荷重を要する脆性破壊試験は八幡製鉄株式会社が新たに製作した600 TONの引張試験機を借用して行なつた。試験片とチャックの溶接に関しては日本鋼管株式会社鶴見造船所の竹内 晃、成田罔郎、中田充則の諸氏より御配慮をいただいた。また縦接手、近接接手試験片の残留応力測定は東京大学船舶工学科の安藤 寛、大根幸雄氏の卒業論文として行なわれたものであり、これら諸氏より多大の協力を受けた。ここにこれらの各位並びに機関に対して深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) "Initiation and Propagation of Brittle Fracture in Welded Steel Plate", by H. Kihara, T. Yoshida and H. Ōba; I. I. W. Doc. X-217-59.
- (2) "Effect of Stress Relieving on Brittle Fracture Strength of Welded Steel Plate", by H. Kihara, K. Masubuchi, K. Iida and H. Ōba; I. I. W. Doc. X-218-59.
- (3) "Effect of Welding Residual Stress on Brittle Fracture Strength of Welded Spherical Container", by H. Kihara, K. Masubuchi and H. Ishi; I. I. W. Doc. X-220-59.
- (4) "Considerations on the Critical-Stress for the Maintenance of Propagation of Brittle Fracture in Mild Steel", by M. Yoshiki, T. Kanazawa and H. Itagaki, 造船協会論文集 No.106.
- (5) "脆性破壊に関する研究" 第4報, 池田, 造船協会論文集, No.106.
- (6) "溶接残留応力が脆性破壊におよぼす影響の研究" 木原, 安藤, 造船協会論文集 No.106.
- (7) "Initiation and Propagation of Brittle Fracture in Residual Stress Field", by H. Kihara, T. Kusuda and K. Iida, I. I. W. Doc. X-219-59.