脆性亀裂の停止現象についての考察

正員 小 倉 信 和*

A Study on the Ductile Arrest of Brittle Cracks

By Nobukazu Ogura

Summary

In the crack propagation test where a crack was started by driving a wedge into a specimen with a pressed and aged notch, arrested cracks of several inches long were observed in many specimens having uniform stress and uniform temperature. And these phenomena may not be explained by the generally accepted Griffith theory of unstable fracture.

When a crack is stopped, it usually extends several inches farther at mid-thickness than it does on the surface of the plate, and the shear lips on both surface seems to prevent the opening of the crack faces and reduce the energy supply at the tip of the crack. The resistance force against deformation of shear lips having various widths are measured by static tension test using the shear lips tension test specimens which are taken from the original tested specimens with arrested cracks. Considering this force will resist opening of the crack faces, it was superposed to the applied tensile stress which open the crack faces, and the rate of energy release at the tip of the submerged crack is calculated following Irwin's method.

The results of calculation reveal that the rate of energy release decrease with the increase of crack length and are reduced to sufficiently low value when the crack is arrested. The idea proposed in this paper on the influence of shear lips to crack propagation was duly justified by the measurement of the dynamic strain contours using electric resistance strain gauges located adjacent to the crack path.

1 緒 言

歪時効処理を施したプレス切欠付試験片による脆性亀裂伝播試験方法については昨秋報告した¹⁾。その試験片形状は Fig.1 に示すごときものであり、その底部にプレス切欠を圧入加工した U 型切欠に楔を打撃により打込み脆性亀裂を発生、伝播させるものである。この方法によれば一様温度分布を持つ試験片を使用して十分な温度及び応力範囲において安定して脆性亀裂を発生、伝播させることができ、脆性亀裂を発生させることの困難な調質高張力鋼に対しても軟鋼と全く同様な方法によって試験を行なうことができている。

この試験に際してはその特性から加えられている応力が高く一様温度分布を持つ試験片において、脆性亀裂がかなりの距離伝播して後停止するという現象が多数経験されており、これは従来エネルギーの釣合条件を考慮した方法によつては、説明が困難なものである。

本論文はこのような条件における脆性亀裂の停止現象を脆性破面の鋼板表面部に発生する Shear lip の影響を考慮して説明することを試みたものであつて、脆性亀裂の伝播に際して Shear lip を変形破断させるのに必要とされる力を逆に脆性亀裂の開口を妨げる力として取扱い、脆性亀裂の停止時には亀裂先端部における歪エネルギー解放率は、十分低い値に押えられる事実を明らかにしたものである。Shear lip が示すこのような効果の定量的取扱いは Shear lip 引張試験の結果を基礎として行なつており、また伝播時の亀裂先端部の歪パルスの模様を動的に計測することにより Shear lip はかなりの時間にわたつて亀裂の開口を妨げる力として作用する事実を確認することができている。

* 運輸技術研究所 溶接部

ふりかえつて亀裂が停止したままの状態での試験片をみると、亀裂全長が 100mm 程度の場合 Shear lip が完全に破断し試験片表面まで口を開いている距離は切欠底部よりせいぜい 10 ないし 20 mm 程度のものであつて、そのほとんどは Submerged crack となつており、試験片表面の凹入により内部を亀裂が進展していることを知り得る状態であつた。これらの現象は Shear lip が脆性亀裂の伝播あるいは停止現象に対して大きな影響を与えていることを示すものであり、いま Shear lip を変形破断させるのに必要とされるエネルギーを考えてみると亀裂長さの伸長につれて増加してゆく性質を持つものと考えられ、亀裂の停止した際には、その巾の次第に増加してゆくという傾向の示されていることを考えれば、Shear lip の生長条件が脆性亀裂の停止あるいは伝播条件を左右する大きな因子となりうることが考えられたのである。

(注 1) 本論文においては脆性亀裂の破面についての用語を便宜上以下のごとく区別する。

脆性破面：脆性亀裂の伝播に際して発生する破面の総称。

結晶状破面：肉眼的にみてキラキラとした光沢を放つ微細な平坦面が集合してできている破面。

劈開破面：結晶状破面を顕微鏡的に観察した際劈開破壊を起している破面。

3 従来の脆性亀裂停止現象の説明および Shear lip の評価

本論文は脆性亀裂の停止現象を Shear lip の影響を考慮することによつて説明することを試みたものであるが、このような特殊な取扱いにおいて独断に陥ることを避けるため、Shear lip は過去においてどのように考えられ、また脆性亀裂の伝播あるいは停止現象と関連してどのように取扱われていたかを調べてみた。以下にこの結果を要約する。

Shear lip は旧くから実際構造物における脆性破壊事故の調査に当つて損傷を起こした鋼板がその温度においてどの程度に脆い状態にあつたかを知る一つの尺度として取扱われていたようであり、たとえば Puzak 等²⁾は実際に脆性破壊を起こした鋼板にみられる Shear lip の巾は最大 0.5mm 程度であつて、これ以上の巾の Shear lip が発生するような状態では鋼板はかなりの延性を持つこととなり、実際の構造物における応力条件のもとでは脆性亀裂が発生し得なくなるのであろうという考察を行なつている。

また Boyd³⁾ は Tipper あるいはその他多くの研究者による報告を参照し、停止した脆性亀裂の先端部付近 Submerged crack となつている部分に対する考察を加えており、鋼板表面近くに残される Shear lip (Boyd はこれを border と呼んでいる) は単純引張試験の破面の同じ位置に見られる傾斜部と同質のものであつて、亀裂の先端が鋼板表面に近づいた際の応力と歪の条件から Shear lip が発生するという Parker 等の説明を引用し考察を加えている。

結晶状破面の塑性表面エネルギーという概念を導入し Griffith 理論を延性材料の脆性破壊に拡張した研究者の一人である Orowan により、その実験に際して脆性亀裂の停止した現象が Shear lip の生長条件と関連して説明されている点は興味深い。Orowan⁴⁾ は脆性亀裂の伝播には多軸応力と速度効果の両者が重要な役割を果たすものと考えており、温度が低く加えられている外力が高い状態で早い亀裂速度が得られれば速度効果により 3 軸応力度 0 の鋼板表面部まで結晶状破面となるが、温度が高く外力が低い場合、亀裂伝播速度は減少し亀裂先端部の歪速度も低下して 3 軸応力 0 の鋼板表面部においては劈開破面を作ることができず、このため試験片表面部に残された部分が Shear lip となり、そして鋼板両表面部より次第にその巾を拡大してきた Shear lip が終に連絡した際に脆性亀裂は停止すると説明している。

上記の Orowan による説明が行われたのとほとんど同時に Feely⁵⁾ 等により ESSO 試験結果の検討に際して Shear lip を極めて重要視した脆性亀裂伝播現象の説明が行なわれている。Feely 等はある温度において応力がある値以上であれば脆性亀裂は伝播し得るが、応力がその値以下では亀裂長さとは無関係に亀裂の伝播し得なくなる限界の応力が存在することを前提として種々の考察を行なつており、この条件に必要な亀裂長さとは無関係な歪エネルギー解放率を与えるものとし Shear lip の効果が考えられた。この際は Shear lip 脆性亀裂の開口を妨げる作用をなすものとして取扱われており、この影響により歪エネルギーの解放される範囲は亀裂長さとは無関係に亀裂面よりある距離以内に限られることとなる、すなわち歪エネルギー解放率は一定となるであろうという定性的な考察が行なわれている。

Wells⁶⁾⁷⁾ は脆性亀裂の発生、伝播、停止の諸問題について多くの実験的研究を行つてきており Shear lip を直接対象とした考察は行なっていないが、溶接残留応力を含む鋼板および亀裂の発生に楔力を使用する ESSO 試験における伝播現象に対して検討を加え、亀裂の進展に伴う歪エネルギー解放率の変化を求めている。そして

脆性破面より発生する温度波の計測および試験片の大きさを順次変化させた切欠曲げ試験の結果から結晶状破面の最小塑性表面エネルギーを求め、歪エネルギー解放率との関係から脆性亀裂停止現象の説明を行なった。この考え方は脆性亀裂の伝播または、停止現象の説明に現在最も広く採用されている方法であつて、Boyd による脆性亀裂伝播現象の考察⁸⁾ また我国においては、木原外⁹⁾ 金沢外¹⁰⁾ により同様の考え方に基づいた取扱いが行なわれている。

わが国においては秋田外¹¹⁾ による ESSO 試験脆性亀裂の伝播現象の理論的考察に際して Shear lip が考慮されており、この際 Shear lip は亀裂先端部に付加的にある半径の塑性域を与えるものと置換えて取扱われている。また脆性亀裂停止現象を理論的に取扱つた例としては二重引張試験結果の検討に際して吉識外¹¹⁾¹²⁾ により滑りと微小亀裂の発生を基本として行なつた理論的考察、および Forscher の relaxation center の概念および亀裂の mode の変化という新しい概念を導入した脆性亀裂の停止現象の理論的考察が示されているがこれらは主として結晶状破面の塑性表面エネルギーの挙動に理論的考察を加えたものであり、今後 Shear lip の影響とともに併せて塑性表面エネルギーの変化を検討する際に参考とすべき多くの成果が含まれているといふことができる。

なお最近の Wells の報告¹⁴⁾ によれば温度勾配付 Robertson 試験の脆性亀裂停止温度の決定に際して Shear lip の巾を基準とする判定方法が採用されているようである。Robertson が温度勾配付試験においてどのような Shear lip の条件を基準としているか、また脆性亀裂の伝播および停止現象と関連して Shear lip をどのように考えているかという点は極めて興味深いが残念ながら直接これらの点を知る文献を入手することはできていない。また米国における NRL 爆破試験に際してはその結果の判定にしばしば発生した Shear lip の巾が基準として採用されており、たとえば Rieppel¹⁵⁾ が行なつた防弾鋼板の試験に際しては温度に対する Shear lip の巾の変化の模様も計測されている。

以上現在までに示されている Shear lip の取扱方法および脆性亀裂の停止現象についての説明を検討したが、その結果より見ると Saear lip の発生条件については、Boyd, Orowan, Feely 等によつて、かなり詳細な検討が加えられている。また脆性亀裂の停止現象については解放される歪エネルギーと塑性表面エネルギーとの釣合条件による方法が最も広く行なわれているが、この方法は加えられている外力が低く通常の計算方法により求められる歪エネルギー解放率が低い値を示す場合にのみ限られていると言える。これらの停止現象は Robertson¹⁶⁾ の表現を借れば critical stress arrest といふことができるもので、加えられている外力が高く ductile arrest に相当する停止現象の説明は温度勾配の存在する場合を除きほとんど行われていない。本論文は等温分布の試験片に発生した後者の停止現象を対象として取扱つたものであり、critical stress arrest に相当する停止現象に対しては、それを目的とする実験も行なつておらず、全く触れていないものである。

4 Shear lip が脆性亀裂の伝播現象に及ぼす影響についての検討

第2章において述べたごとく、脆性亀裂の停止した試験片の外観およびその破面を詳細に観察した結果、脆性

Fig.3 Features of Propagating Brittle Crack

亀裂の伝播および停止条件には Shear lip の発生条件が大きな影響を及ぼしていることが考えられ、これを考慮することによつて単に歪エネルギー解放率と結晶状破面の塑性表面エネルギーを比較するという方法によつては説明することのできぬ高応力場における長い亀裂の停止現象の説明の行い得ることが考えられた。

Shear lip が脆性亀裂の伝播あるいは停止現象に及ぼす影響についてはまず Shear lip を一種の表面エネルギーとして取扱う方法を検討したが、Shear lip を変形破断させるのに要するエネルギーを知るためには Shear lip を伴う亀裂全体の開口形状を求めねばならぬという困難が付随し、また亀裂開口形状は Griffith クラックと同様なものとするあるいは Shear lip を変形破断させるのに必要とされるエネルギーを亀裂先端部に集中したものとする等の簡易的な取扱い方法についても検討を加えたが、これらによつては実際の試験結果と対比して定量的に Shear lip の影響を取扱うためには多くの困難を伴うこ

とがわかつた。

このため Shear lip を亀裂表面に分布して働く力として取扱う方法を検討することとしたが、亀裂面に分布荷重が働く際の亀裂の開口形状あるいは歪エネルギー解放率は増淵¹⁷⁾によりフーリエ級数を使用して求める方法が示されている。はじめはこの方法によることを検討したが、最近金沢他¹⁰⁾により我が国に紹介され、その応用例も示されている Irwin の方法によれば、このような条件における亀裂先端部の歪エネルギー解放率はより容易に求めることができるので、本論文においてもこの方法を踏襲し Shear lip の存在が、歪エネルギー解放率に及ぼす影響を検討することとした。

伝播しつつある脆性亀裂は Fig. 3 に模型的に示したごとく (1) 先端部付近で結晶状破面の拡大しつつある部分 (2) Shear lip の変形、破断 (Shear lip 部分の延性破壊現象) が進行しつつある部分 (3) Shear lip も破断し完全に開口した部分の3つの部分に分けて考えることができる。そしてこの②の範囲における各位置はいずれも結晶状破面部の開口量 v (Fig. 4) が次第に拡大してゆき終には Shear lip が破断するという過程をたどる筈であつて、この際開口量 v に対応した Shear lip を変形させるための力が必要とされる。開口量 v と Shear lip を変形させるための力 P_s との関係は静的には Shear lip 引張試験の結果から推定することができ、その結果の一例を Fig. 4 に示した。Shear lip 引張試験は Fig. 5 に示す如く亀裂の停止した試験片より小型の引張試験片を採取し静的引張試験を実施して、種々の巾を持つ Shear lip を変形破断させるために必要とされる力の特性を調べたものである。

Fig. 4 に示した Shear lip 引張試験片の伸 (≒開口量) 一荷重曲線は亀裂の発生部付近から採取された試験片についてはこのような良好な曲線を得ることができない。これはこのような位置においては亀裂が停止した際 Shear lip はすでにかんりの変形を受けてしまつていることによるのであつて、この理由および Fig. 4 に示したごとく理想的に近い状態で行なわれた Shear lip 引張試験片はいずれも最大荷重付近の荷重において大きな伸を示すという特長を利用し、以後の取扱においては Shear

Fig. 6 Strength of Shear Lips Tension Test Specimen

Fig. 7 Resistance Stress of Shear Lips to Crack Opening

Fig. 4 Resistance Force of Shear Lips to Deformation

Fig. 5 Crack Arrested Specimen Showing Location and Dimensions of Shear Lips Tension Test Specimen

lip を変形されるための力は一定とし、Shear lip 引張試験により求められた最大荷重のみを問題とするという近似を行なつている。Shear lip 引張試験の結果求められた最大荷重と破断後測定した Shear lip 巾の関係を Fig. 6 に示す。

問題を2次限的に取扱うため Shear lip を変形させるための力を板厚全体にわたり一様に働いている応力 σ_s (Fig. 7) におきかえて考えれ

Fig. 8 Effective Stress for Crack Opening

ば, Shear lip を伴う亀裂は Fig.8 に示すごとく亀裂面に分布して働く応力のもとで伝播しているものと考えることができる。同図の σ は一様な引張応力を亀裂面に作用する亀裂を押広げようとする応力と考えたものであり, Shear lip の応力 σ_s は亀裂の開口を妨げようとして働く抵抗力の如き性質を持つ力と考えられるから, それらの差分の斜線をほどこした応力が実際に亀裂開口に有効に働いている応力, すなわち亀裂先端部の歪エネルギー解放率を与えるものということになる。

Fig.9 Calculated K Values and Strain Energy Release Rates for Specimen B-2

Fig.10 Calculated K Values and Strain Energy Release Rates for Specimen A-9

以上の考え方に従って実際に Shear lip 引張試験片を採取したものと試験片について歪エネルギー解放率を求めた結果が Fig.9 および Fig.10 であり, Fig.9 は突起部に切欠を加工した試験片, Fig.10 は直線縁切欠をに切込んだ形の試験片についてのものである。これらの図において上部に示した棒グラフは前述の引張応力 σ_a から Shear lip の応力 σ_s を差引いた脆性亀裂の開口に有効に働く応力を示しており, また同図左側には失印をもつて脆裂発生用の打撃力の位置と大きさを示しているが, この 500 kg/mm という値は動的計測の結果より推定された約 10 TON の楔力を板厚 20mm に等しく分布させたものである。K value および歪エネルギー解放率を示す下段の図において種々の記号を付した各曲線はそれぞれ以下のものである。

- K_σ Shear lip の存在を考慮せず, 外的引張応力 σ のみによる K value
- K_i 楔力による K value
- $K_\sigma - K_s$ 上部の棒グラフより計算した亀裂の伝播に有効な応力についての K value
- $\left(\frac{du}{dc}\right)_\sigma$ K_σ より計算される外的引張応力のみによる歪エネルギー解放率
- $\left(\frac{du}{dc}\right)_{\sigma+i}$ Shear lip の存在を考慮せぬ場合の σ および楔力による歪エネルギー解放率
- $\left(\frac{du}{dc}\right)$ Shear lip の存在および楔力を考慮した際の歪エネルギー解放率

これらの値はいずれも亀裂先端が各棒グラフ右端に達した際について計算を行なっており, この際の亀裂先端部の形状は矩形のものとしており, 近似的には Fig.3 ②の領域の先端についての値とみなすことができる。実際の亀裂先端はさらに先行した半楕円または抛物線に近い形状を持つものと考えられるが, このような条件を取扱うのは困難であるから, 実際の亀裂の条件を近似値的に代表するものと考えて, 上記の如き亀裂について計算を行なった。

Fig.9 および Fig.10 の結果よりみれば Shear lip の影響は極めて大きいものであつて, これを無視した場合と比較すれば明瞭な相違を示し, 亀裂長さの拡大につれて逆に歪エネルギー解放率は減少してゆくという結果が示されている。Fig.10 においては図の縦軸のとり方から Shear lip の存在を無視した際の $\left(\frac{du}{dc}\right)_{\sigma+i}$ 曲線のかなりの部を示すことができているが, Wells⁷⁾ が ESSO 試験結果の検討に際して計算を行なっているも

のは、この曲線に相当するものであつて、本試験の如く高い応力のもとで長い亀裂が停止したという現象については Wells の行なつた方法によつては全く説明することができぬと言えよう。

上記は Shear lip 引張試験片を採取した試験片についての計算結果であるが、亀裂の停止した、または完全に破断した試験片の破面についても発生している Shear lip の巾を計測し、これと Fig.6 の Shear lip 巾と強さの関係をを用いて同様の方法により亀裂伝播時の歪エネルギー解放率の変化を計算することができる。この方法による計算結果を Fig.11 および Fig.12 に示しており、Fig.11 は亀裂の停止した試験片、Fig.12 は破断した試験片についてのものである。これらの図の最上段は実測した Shear lip の巾、中段はこれと Fig.6 とより求めた σ_s および亀裂伝播に有効に働く応力 $\sigma - \sigma_s$ 、下段がこれをもととした計算結果である。

Fig.11 Calculated K Values and Strain Energy Release Rates for Specimen B-3

Fig.12 Calculated K Values and Strain Energy Release Rates for Specimen B-1

以上 Shear lip の影響を考慮した計算の結果の数例を示したが、これによれば亀裂停止時の歪エネルギー解放率はいずれも 1 kg-mm/mm^2 程度あるいは、それ以下の低い値に押えられており、この値は Orowan により求められた結晶状破面の塑性表面エネルギーの2倍程度、Wells により求められている値と比較すればほぼ等しいかあるいはそれ以下の値といふことができる。Fig.12 に示した完全に亀裂が伝播し破断した際の結果と比較して考えれば、脆性亀裂の伝播停止は亀裂長さが 40 ないし 80mm 程度に達した際 Shear lip の効果が歪エネルギー解放率を上昇させようとする外力の影響に優越して、以後さらに Shear lip の巾が増加してゆき得る否かにより決定されるものと考えられる。

このような Shear lip の生長条件と比較すれば本論文における考察および計算の方法は実際に発生した Shear lip の巾あるいは、その分布を前提として行つたものであつて、Shear lip の発生条件またはその巾を左右する因子がどのようなものであるかという点についての興味は今後の問題として残されていることとなる。

5 動的計測の結果示された Shear lip の効果

前章においては破面に発生した Shear lip を脆性亀裂の開口を妨げる力として取扱う方法を検討したが、これらは問題を全く静的なものとして取扱つたものであつて亀裂発生用の楔力の時間的変化、亀裂速度、亀裂近傍の歪変化等を知る目的から動的計測を実施した。動的計測は亀裂伝播予定線から 20 mm 離れた位置に電気抵抗線歪計を貼付し、亀裂伝播時における変化をブラウン管オシロスコープを使用して計測したものであるが、この際 Shear lip が亀裂伝播時の歪パルスに極めて興味深い影響を与えるものであることがわかり、前章の考察に

採用した Shear lip は亀裂開口を妨げる効果を示すものであるという事実を裏付することができた。

Fig. 13 Strain Trace Showing Typical Effect of Shear Lips

Fig. 14 Typical Strain Trace by Hall et al.

Fig. 15 Effect of Shear Lips on Strain Gauges and their Records

Fig. 15 に示したごとく Shear lip を伴ないながら伝播する亀裂に対して、 a ないし e の各位置に貼られていた歪計を考えれば、歪計 a においては加えられている応力に近い歪量、 b においては亀裂先端部の応力集中に対応する高い歪量、 c, d の歪計においては Shear lip を変形させるのに必要とされる力による歪量、 e において始めて0に近い歪量が計測される筈である。今歪計を固定し例えば a の位置を考えて亀裂が伝播してくる条件を考えれば、この歪計は b ないし e の各歪計と同様な状態に順次におかれていくことになり、 c および d の歪計に相当するある時間 Shear lip の応力 σ_s の変化を計測することとなる。

Fig. 16 ないし Fig. 20 に計測された歪パルスの数例を示した。これらの計測における単掃引回路の作動は切欠底部に接する位置に亀裂速度計測線を貼り、この断線による電機的信号を利用している。Fig. 16 における歪計①は亀裂伝播時における楔力の変化を知る目的で同図に示す位置に貼付したものであつて、この歪計により得られた歪パルスは楔力は亀裂の発生した瞬間に最高値を示し、亀裂の伝播につれて次第に低い値を示してゆき、亀裂が約 250 mm 試験片はぼ中央に達した際は始り0になるという事実を示している。この間の時間的間隔は写真上部に示されている時間信号と比較すれば約 0.5 m sec であり、亀裂発時に作用した楔力の最高値は静的に楔を圧入した際に同様の位置に貼られた歪計の変化より推定すれば約 10 ton 程度のものである。

Fig. 16 Strain Records of Specimen B-13

Fig. 17 Strain Records of Specimen B-24-(1)

Fig. 18 Strain Record of Specimen B-24-(2)

Fig. 19 Strain Record of Specimen B-26

同図において切欠底部より 150 mm および 250 mm の位置に貼られた歪計②および③は Shear lip の影響を明瞭に示しており、歪計②についてみれば、その肩の部分の高さは約 11 kg/mm^2 の Shear lip の応力に相当するものであつて、この位置に発生した Shear lip の巾が片側 0.8 mm であることを考えると、静的に求めた Shear lip 引張試験の結果から計算される約 7.5 kg/mm^2 の値と比較すればかなり高い値が計測されている。またこの歪計により示された肩の部分の時間的間隔はその際の亀裂速度より亀裂先端部が約 180 mm 先に進んだ際はじめて Shear lip が完全に破断したことを示しており、この長さの Submerged crack ができていたことになる。

Fig. 17 および 18 は同一試験片において計測された歪パルスを示したものであるが亀裂発生直後の亀裂速度および歪パルス形状の変化を調べるため亀裂底部より 25 mm の近接した間隔に歪計を貼付してあり試験片は完全に破断している。また Fig. 20 は全く同様に歪計を貼付し亀裂は停止した際の試験片についての計測結果である。これらより歪パルスの最高値を歪計位置を亀裂先端部が通過した瞬間とみなして亀裂速度を求めると Fig. 21 に示すごとくなる。同図には他の試験片より求めた亀裂速度も合せて記入しているが、亀裂が停止した試験片より計測された亀裂速度が完全に破断した試験片の場合と比較して差異を示すという傾向はほとんど示されていない。亀裂発生直後の計測値は操置の作動遅れの点で問題があるが、室温における試験においては亀裂発生部付近において高速に達した亀裂速度が急激に減速してゆき、一定値に近づく傾向が示されている。

Fig. 17 及び 18 の結果よりみると歪パルスに Shear lip の影響を示す肩の部分が明瞭に現われるのは亀裂長さが 100 mm 程度以上に達してからであつて、それ以前の段階においてはゆるやかな傾斜を持った裾のごとき形状のものとして Shear lip の影響が計測されている。この試験片における歪計⑤により計測され Shear lip の影響は極めて顕著なもので、その時間的間隔よりみるとこの際の Submerged crack の長さは 300 mm 以上に達しており、この長さは試験片有効巾 470 mm の約 2/3 に相当するものである。

ゆるやかな傾向をもつて Shear lip の効果が計測された際はその最高値をとり、動的に計測された Shear lip

Fig. 20 Strain Record of specimen B-24

Fig. 21 Measured Velocity of Crack. Applied Stress is 15 kg/mm^2

の応力と静的に行なつた Shear lip 引張試験の結果とを比較すれば、亀裂底部より 25mm の位置に貼られた歪計①によつては動的計測における場合が 15% および 20% 低い値、歪計②によつては 18% 低い値およびほぼ一致した値、歪計③④⑤によつては逆に 40, 45, 20% 高い値が計測されている。

Fig. 21 は Shear lip の発生せぬ場合の歪パルスの形状を確認するため -20°C で試験を行なつた結果であつて、切欠底部により 50mm の位置に貼られた歪計によつては予想したごとく最高値より急激に 0 に降下してゆく歪パルスが計測されたが、210mm の位置に貼つた歪計の歪パルスには、Shear lip の影響とはかなり模様の異なる直線的な裾の部分が見られている。このような試験条件においては歪パルスの最高値は極めて高く、亀裂面より 20mm 離れた位置に貼られた歪計②によつてすでに 23×10^{-4} という高い最高歪の値が計測されており、亀裂先端部付近の応力集中および塑性域の範囲はともに極めて大きくこの位置に多数の微小亀裂が発生したことが考えられる。そしてこれらの微小亀裂が連絡し、大きな亀裂に拡大するためにはかなりの力が必要とされ、この過程が歪計②の歪パルス裾の部分として計測されたものであろう。そしてこの考察によつて -20°C の試験片に見られた破面が極めて荒れた凹凸の激しい外観のものであつたという事実も理解することができる。

なおこの -20°C の試験において計測された亀裂速度は Fig. 23 に併せ記しているが、室温付近の試験による結果とはかなり異なり、試験片位置による変化はほとんど認められず一様に近い高い速度が計測されている。

以上述べた動的計測の結果から脆性亀裂の伝播または停止現象に関連して興味深い多くの事実を、特に Shear lip が脆性亀裂の開口を妨げる力として作用する挙動を亀裂伝播時の歪パルスに及ぼす影響として知ることができた。しかしながら動的計算の結果より、Shear lip の歪パルスの形状に及ぼす影響は亀裂長さによつて異なること、また静的および動的に求められた Shear lip の応力にかなりの差が見られることなど今後さらに検討を行なわねばならぬ諸点も示されたと言うことができ、より詳細な動的計測を実施することにより、これらの問題を明らかにしてゆきたいと考えている。

6 結 語

プレス切欠付試験による脆性亀裂の伝播試験において等温度分布の領域において数多くの亀裂が停止するという例が見られ、この現象を説明するため Shear lip の存在が亀裂の伝播または停止現象に及ぼす影響を検討した。発生した Shear lip 部分が、さらに変形、破断するに至る過程で必要とされる力を逆に亀裂内面に分布して、その開口を妨げる作用する力として取扱い、これが亀裂先端部の歪エネルギー解放率に及ぼす影響を調べたが、この結果亀裂の停止時には亀裂先端部の歪エネルギー解放率は極めて低い値に押えられている事実を知ることができた。Shear lip の示すこのような効果は、動的計測の結果においても計測されており、Shear lip の存在は歪パルスの最高値を著しく低い値に押えるとともに、Shear lip を変形破断させるに必要とされる力は歪パルスがその最高値から 0 に下降する過程において肩状の平坦部を作るという現象によつて示されている。

本論文の取扱いには発生した Shear lip の巾の分布を前提として、それが脆性亀裂の伝播現象に及ぼす影響を検討したものであるが Shear lip の発生条件を左右する原因はどのようなものであるかという問題などさらに検討を要する多くの点が残されている。しかしながら従来の方法によつては説明することの困難であつた等温度分布一様外力の場において一度発生し伝播を開始した脆性亀裂が再び停止するという現象を Shear lip の影響を考慮することにより説明することができたといつて良いであろう。

7 謝 辞

本研究の内容及びその細部は造船協会電気溶接研究委員会第 6 分科会に資料として順次提出し審議を受けており数多くの助言を賜つたことに対し同分科会吉識主査をはじめとする各委員に対し心から謝意を表する。本研究の実施に当つては東大木原教授、石川島播磨重工前田氏より数多くの点で御指導御配慮をいただいております。また、歪エネルギー解放率の計算は、東大金沢教授により紹介されその応用例も示された Irwin の方法にならつて行なつたものである。動的計測は運研構造部秋田部長の御厚意により同部石山技官の指導のもとに実施できたものであつて、ここに御指導御協力を御願ひした各位に対し深く感謝の意を表させていただきます。

参 考 文 献

- 1) 木原, 小倉, 前田, 松岡, 造船協会論文集第 108 号. 昭和 35 年 12 月 p.395.
- 2) Puzak, Eschbacher, Pellini, Welding J. Dec. 1952. Vol. 31, No. 12. p. 561 S.

- 3) Boyd, Engineering Jan. 16, 1953. p.65.
 - 4) Felbeck, Orowan, Welding J. Nov. 1955. p.570 S.
 - 5) Feely, Northup, Kleppe, Gensamer, Welding J. Dec.1955. Vol.34. No.12. p.596 S.
 - 6) Wells, TINA July 1956. Vol.48. No.3. p.296.
 - 7) Wells, NRL Report 4705. March 9, 1956.
 - 8) Boyd, TINA July 1957. Vol.99. No.3. Part II. p.349.
 - 9) 日本造船研究協会報告 第 27 号 昭和 34 年 11 月 p.3.
 - 10) 金沢, 大庭, 町田, 昭和 35 年 5 月 造船協会春季講演会において発表
 - 11) 秋田, 池田, 造船協会論文集 第 107 号 昭和 35 年 7 月 p.287
 - 12) 吉識, 金沢, 造船協会論文集 第 102 号 昭和 33 年 2 月. P.39
 - 13) 吉識, 金沢, 板垣, 造船協会論文集 第 106 号 昭和 35 年 1 月 p.207.
 - 14) Wells, BWRA Report B 7/4/60.
 - 15) Rieppel, Welding. J. July 1960. Vol.39, No.7. p.309 S.
 - 16) Robertson, J. of Iron and Steel Institute Dec. 1953. p.361.
 - 17) 増淵, 運研報告 第 8 卷 第 12 号 Vol.8. No.12.
 - 18) Rolfe, Lynam, Hall, IIW Documment IX-259-59.
-