

研究展望

溶接部疲労の現状と研究

FATIGUE CRACKINGS AND THEIR RESEARCHES OF WELDED STRUCTURES

明石重雄*

By Shigeo AKASHI

1. 序 説

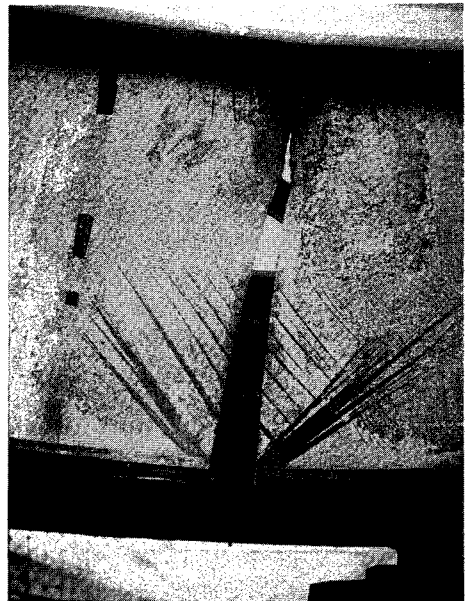
アーク溶接がロシアで発明されたのは19世紀末であり、それ以来種々の改良が加えられて、1920年代にはヨーロッパ各地で構造物への利用の道が拓かれた。わが国でも昭和の初年から造船、橋梁などを軸にして溶接化の胎動が始まっている。

しかし当初は、素材の接合方法として重ね継ぎという観念から脱却することがなかなかできず、突合せ溶接は技術的に可能となっても、なおしばらくの間、重要な構造継手への使用を禁止されていた。現存する構造物では、田端跨線橋（昭和10年）に当時の添板すみ肉溶接継手の典型をみることができる。

突合せ溶接は、収縮変形が大きいため収縮われを発生しやすく危険である、という思想が支配的であり、したがって1930～40年代では、拘束継手における収縮と亀裂が溶接応用面での主要な研究テーマとなっていたように思われる。またこの時代には、橋梁ではベルギーのHasselt橋やドイツのRüdersdorf橋（ともに1938年）に、船舶ではアメリカのリバティ船（戦時標準船）に溶接継手からの瞬間的な破壊事故が発生して、鋼材のじん性に対する関心が芽生えた。しかし、これらが溶接部の脆化と応力集中という認識のもとに、材料力学的に取り上げられ、国際的研究テーマとなったのは、第二次大戦の終結した1945年以降のことである。

わが国の橋梁界では、1948年に国鉄技術研究所と横河橋梁とがスパン12.9mの溶接プレートガーダーを設計、製作して、同長のリベット桁と比較試験した実験研

究¹⁾がある。この実験は、溶接桁の静的強度がリベット桁に劣らないことを確認し、構造物溶接化の1ステップとなった、と一般には伝えられている。しかし、古記録と写真を調べてみると、溶接桁にはフランジをスパン中央で突合せ溶接したA桁と、旧来の添板溶接したB桁の2本があって、A桁は上フランジの座屈で崩壊しているのに対し、B桁は図一に示すように下フランジの添板継手から見事に脆性破壊しており、旧来の継手工法の誤りとそれによる脆性破壊の可能性を実証した貴重な研究であったことがわかる。



図一 下フランジの添板継手から脆性破断した溶接桁

* 正会員 工博 横河橋梁製作所（〒108 港区芝浦 4-4-44）

元来、接合部への溶接の利用という点では、船舶、貯槽、ボイラーなどが最大の恩恵を被る分野であり、それらはまた、溶接継手に対する負荷条件や施工条件にも厳しいものがあるから、溶接技術の開発、あるいは疲労や脆性破壊などの継手挙動の研究に関しては、造船学会が常に先導的役割を果たしてきた。

橋梁を初めとする土木構造物の場合は、そのような意味では多少甘さがあることは否めないが、1960年代頃からの長大化の動向に伴って、高強度材への需要が高まった結果、調質高張力鋼の利用に関する研究で特色を發揮し、鋼材、溶接材料の品質向上や自動溶接工法の発達に貢献した。

いずれにせよ、構造物の溶接は土木、建築、造船などの分野で共通の問題を抱えているわけで、これらの分野を横断する溶接学・協会の活動が情報交換を促進して、技術の発展に寄与した点を見逃すことはできない。

多くの技術史の例に漏れず、溶接構造の発展も、「問題の発生と解決」によって綴られる。溶接の使用が本格化した1950年代以降の主要な研究開発テーマを、大体年代順に従って掲げてみたのが表一である。

表一 溶接研究テーマの推移

研究テーマ	問題点
a) 溶接の収縮変形	定量化、制御方法
b) 溶接品質と強度	静的強度、疲労、脆性破壊、非破壊試験方法
c) 溶接われ	50キロ鋼 70~80キロ鋼 } の溶接性
d) 高能率自動溶接工法	全姿勢施工、ロボット化
e) 溶接継手のじん性	破壊力学的評価
f) 溶接構造の局部応力、ひずみ集中	安全性評価の再考
g) 疲労クラックの挙動	疲労寿命の予測

こここのところ土木学会の年次大会における溶接関連の研究発表が大変多く、最近3年間の発表数をみても、56年度20件、57年度22件、58年度24件となっているが、その中では溶接継手の疲労に関するものが、それぞれ15件、16件、19件と圧倒的に多い。これは、従来鉄道橋特有の問題とされていた疲労現象が、道路橋にも発現し始めたことと、最盛期に入った本四架橋工事で、鉄道併用橋の疲労設計がクローズアップされたこと、とが関心を呼んだためであろう。

疲労クラックの問題は、前表のうちのe)、f)項とも関連が深く、高齢化しつつある鋼構造の安全性の見地から今後なお活発な研究の期待されるItemである。アメリカにおいては、近年橋梁構造の荒廃が大きな社会問題に発展しており、このような事態を背景にして、破壊事故の解析を取り扱った論文が多く、また1982年には

ASCEのCommittee on Fatigue and Fracture Reliabilityにより疲労の信頼性評価に関する広範なState-of-the-Art Review²⁾が提示されている。

以上のような情況から、本論では最も新しい話題である溶接疲労の諸問題を中心にして研究活動を展望する。

2. 道路橋溶接部の損傷

ここ数年来、事件という少し大きくなるが、道路橋の溶接部にきわめて衝撃的なクラック現象が相次いで発見され、実務者を困惑させている。これはわが国に限ったことではなく、ヨーロッパやアメリカでも事情は同じようであり、特に報道のフランクなアメリカの場合は、以前から種々のタイプのクラック発生事故が学術誌などに紹介されてきた。ところで海外の事故例の中には、一見して稚拙な設計あるいは粗雑な施工が原因とみられるものがあつたために、このような現象は品質管理態勢の問題であると簡単に片付けられてきたきらいがある。品質管理は過去の経験を基盤にしてクライテリアを設定するものであるから、初回事故にはたとえつまらないことにみえても、それなりの価値を認めなければならない。

元来、道路橋は変動する活荷重の比率が小さいから疲労は起こり得ない、とする古典的な思想があり、リベットから溶接構造への転換に際しても、鉄道橋と道路橋とでは溶接継手のディテールや仕上げ程度などの品質にグレードを設けることが当然と考えられてきた。セパン橋のクラック発生が報じられて、道路橋でも鋼床板などの床構造について輪荷重による変動応力を考慮すべきことが提唱されるようになったのは最近のことである。

わが国の道路橋の疲労クラックは、このような状況の中である日偶然の機会に発見され、あたかもそれが引き金になったかのように相次いで多くの橋梁に発現している。

実橋あるいは文献において著者の目に触れたクラック発生例を図一に示した。鉄道橋の疲労クラックの多くが疲労設計の対象外の部位に発生しているのと同様に、道路橋でも一次応力の繰返しとはまったく無縁な、というか、通常的设计作業において応力照査を行わなかった箇所にクラック発生のみられることを重視しなければならない。そしてクラックのあるものは、圧縮力が支配的であるはずの部位に発生していることも注目に値する。

疲労クラックは、塑性ひずみの繰返しによって発生する。ていねいに削り仕上げた平滑材の疲労限が、ほぼ母材の比例限に近いのは、そのような応力のもとでも塑性ひずみを生ずるところがないからである。これに対しノッチのある材料、たとえば前面すみ肉溶接継手の疲労強度が母材よりはるかに低く、150 MPa以下程度しかないのは、すみ肉溶接のトウに公称応力(一般部応力)

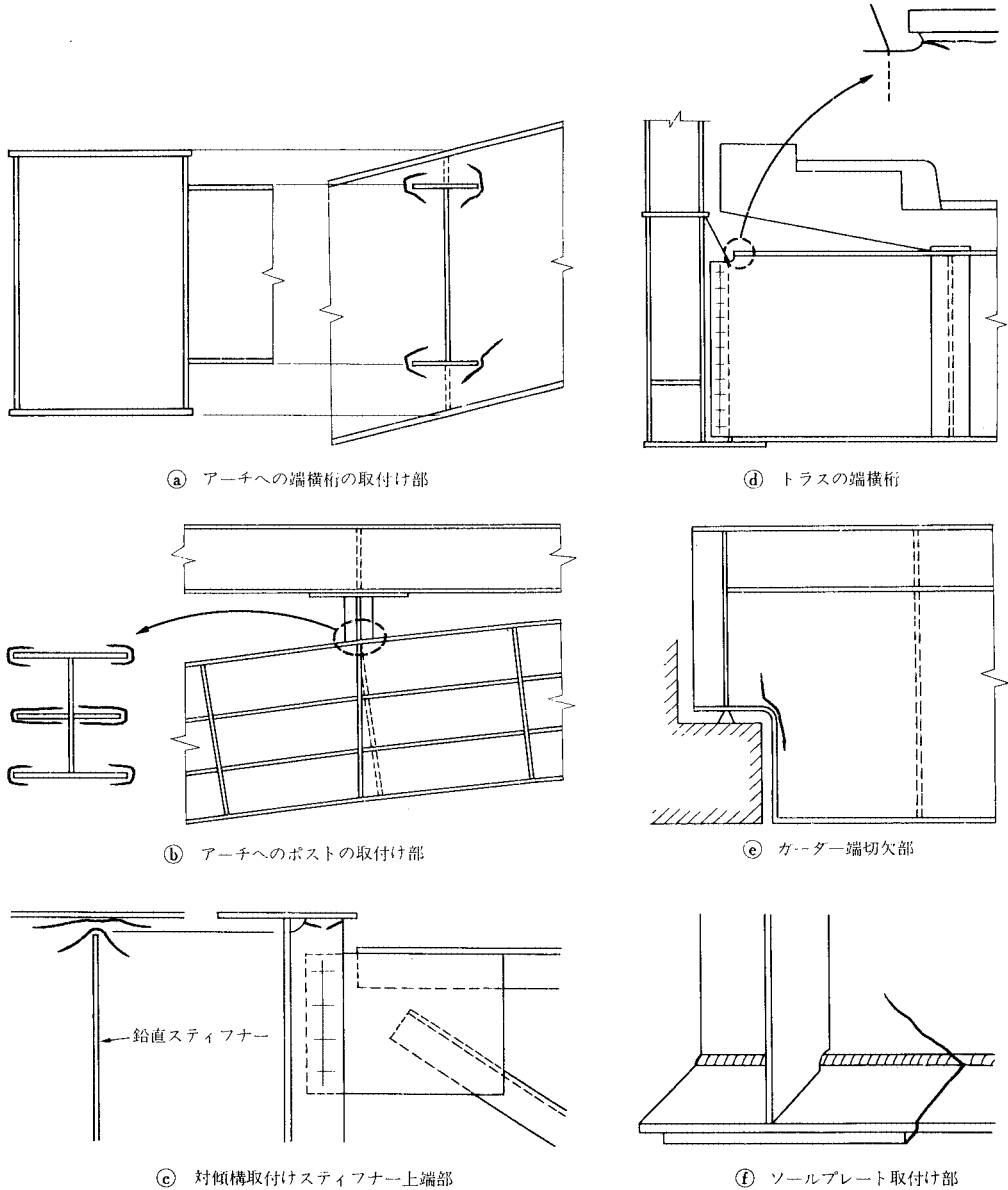


図-2 道路橋のクラック発生例

の数倍の応力集中があつて、局部的に塑性ひずみを生じているためである。

母材部の応力が精度よく算出できる場合には、設計上の変動応力範囲を継手の許容応力範囲内にとればよく、これが従来の疲労設計である。しかし、図-2に掲げた諸例についてみると、溶接継手に近い母材の応力、すなわち疲労設計のペースとなる公称応力がまったくわかっていない。

図-3は、建築の箱断面柱にはりフランジを溶接したモデルの引張試験例³⁾であるが、ボックス内ダイアフラ

ムの剛性が足りないと、スキンプレートが外側に湾曲するため引張フランジは溶接継手に近づくほど両サイドに激しいひずみ集中を起こすことを示している。この構造は終局的に両サイドの溶接止端(スキンプレート側)からクラックを生ずるが、スキンプレート側止端には図示の測定点よりさらに高い曲げひずみの存在することが容易に推測される。

前出図-2における③、⑥のケースは、裏面補剛材の欠除によって図-3の実験例より曲げひずみの集中は厳しくなるであろう。そして、④の場合は面外引張りによ

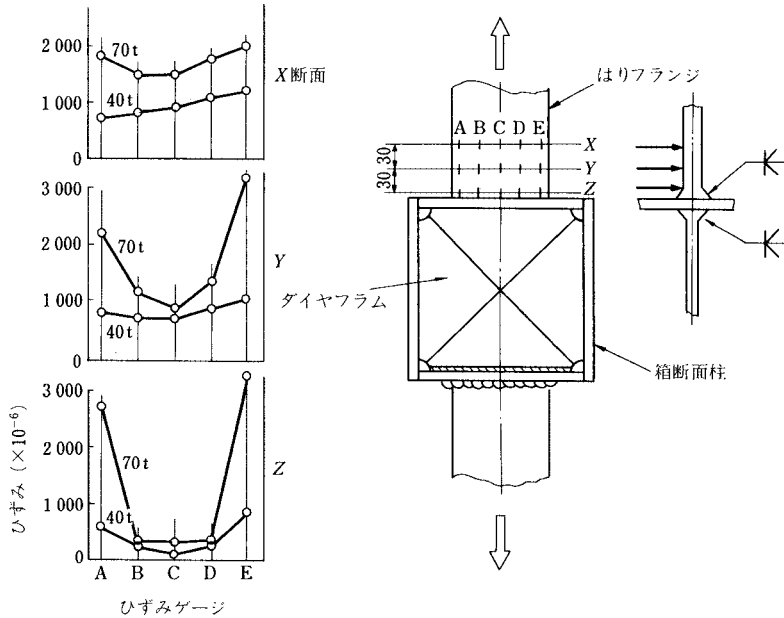


図-3 柱-はり継手モデルの引張試験

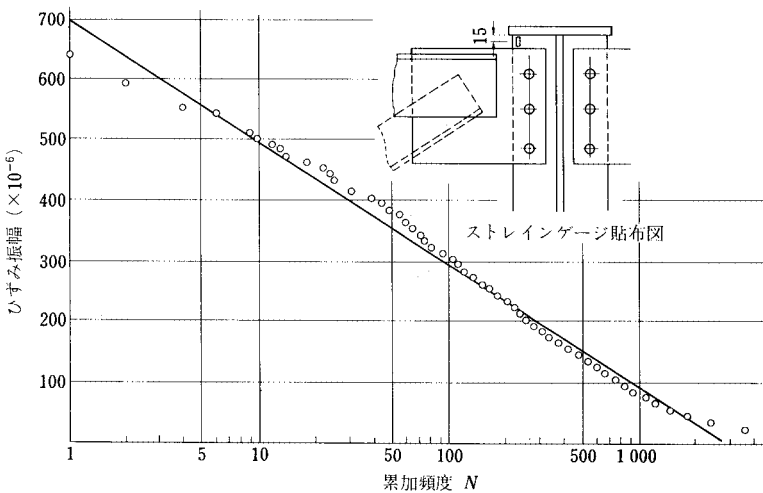


図-4 スティフナー上端におけるひずみ振幅の累加頻度 (早朝4時間)

り溶接トウ部から、⑥の場合は面外圧縮によりすみ肉溶接ルートから疲労クラックが発生しているのである。

最近、海洋構造物における Pipe Node 部の破壊安全性を検証する手法として、クラック発生点(通常溶接トウ部)のごく近傍にクラック発生以前に生じていた局部ひずみ(Hot Spot Strain)を取り上げて疲労設計に応用する研究が進んでいる。ここでいう H.S.S. はモデルによる実測あるいは FEM 計算によって求めるのであるが、このような局部ひずみと疲労強度との関係がわかれば、継手の形状寸法を問わず 1 本の $\epsilon-N$ 曲線に

よって疲労設計を行うことができる。

この手法は、Pipe Node のような曲面部分に限らず、板構造や骨組構造などについても、たとえば図-2 中の◎対傾構とスティフナーとの取合い部のような公称一次応力の取扱いのできない箇所への適用も可能であり、今後の疲労設計の一つの方向を示すものとして期待される。局部ひずみを推定するための計算モデルや、 $\epsilon-N$ 設計曲線を確認するためには多くの実験データと応力解析の積み重ねが必要であり、その意味で、先に例示したようなクラック発生例の一つ一つを大切に扱わなければならない。

実構造において疲労クラックの発生原因を解析し、あるいは疲労寿命を予測する際に、上述のような荷重-局部ひずみの関係以外に载荷頻度の推定が重要な位置を占めることはいうまでもない。図-2 に示したスティフナー上端のクラックについて、著者らの行った実験的解析の要約を次に紹介する。

- 1) 健全なスティフナーの上端部に対して静的、動的のひずみ測定を実施(図-4 のひずみゲージによる)

静的 20t トラック 載荷による実測ひずみのピーク値： $-270 \mu, +170 \mu$
 12 時間の交通荷重による動的ひずみのピーク値： $-470 \mu, +170 \mu$

- 2) rainflow 法により、ひずみ振幅-累加頻度線図の作成(図-4 は大型車交通量の多い時間帯の代表値)
- 3) 過去の交通量統計値より、全供用期間中のひずみ振幅-累加頻度の推定
- 4) 十字隅肉溶接継手の基本疲労強度線図

$$\log \sigma_r = -0.18 \log N + 1.98$$

を用い、3) のひずみ振幅履歴からマイナー則によ

る累積被害を計算する。

5) この場合の累積被害は $\sum \frac{n}{N} = 3.2 > 1$ となり、したがって当該部のクラック発生は当然の帰結ということになる。

なお、この解析における重要な知見として次の諸点を挙げる事ができる。

- a) 床板のたわみにより主桁の倒れが生じ、対傾構の断面ではその拘束により上フランジ近傍の首振り現象を起こす。
- b) 疲労クラックは主として板の面内曲げ、面外曲げによって発生するものと考えられる。
- c) 20 t以上の超重量車の走行頻度が約10回/hあり、これは累積疲労被害の数10%を占めることになる。

また解析にあたっては、時間帯別の交通量、大型車と一般車の比率、年間交通量などの統計資料を有効に利用することができたが、今後の橋梁のメンテナンスを効率的に行うために、そのような資料のデータバンク化が推進されるべきであろう。

3. 大型実験による研究と知見

本州四国連絡橋への鉄道併用橋の採用にあたって、公団では400 t大型疲労試験機を設置して1976年からトラス構造物の繰返し荷重試験を実施してきた。この試験は主として応力状態の複雑な格点構造を対象に行われたのであるが、その結果、格点部よりむしろ一般部のボックス断面の角継手に思わぬ弱点のあることが露呈した。すなわち、角継手の部分溶込みグループ溶接のルートに存在する微小な不連続から比較的早期に疲労クラックが発生し、これが全体の寿命を支配するというものである。

箱断面を形成する場合に、部分溶込みグループ溶接は従来広く行われている慣用的な接合方法であり、またこのような部分溶込み溶接において、ルート部に若干の不連続を生ずることは不可避であって、同時にそのような不連続は強度上さして重要な意味をもたないものと考えられてきたので、上記の試験結果はきわめて深刻に受けとめられた。

ここでの深刻さには、2つの重大な意味のあることをわれわれは認識しなければならない。その1は、いうまでもなく従来十分安全であるとみなされていた通常品質の部分溶込み溶接が、ある条件のもとでは不良品であったという品質評価の誤りである。そしてその2は、そのような誤った評価をもたらした試験方法への疑問である。すなわち、在来の疲労試験は幅10 cm程度のクーポン試験片に溶接継手をシミュレートした形で行われておりその限りにおいては、部分溶込み溶接は多少のルー

ト欠陥を含む場合も十分に高い疲労強度を有することが知られている。

したがって、この溶接が箱断面の構成要素となった場合に著しく強度の低下を招いた事実は、大型試験あるいは実大試験でなければ破壊現象の本当のシミュレーションはできないのではないか、換言すれば、従来の行き方に方法論の誤りがあったのではないかという問題を提起したことになる。その後、三木らの精力的な実験研究があり、軸方向部分溶込み溶接の疲労挙動がしだいに解明されつつあるが、その過程で、大型組立部材の疲労強度を低下させる重要因子として溶接残留応力の影響がクローズアップされた。

溶接構造において、残留応力と破壊現象との関連は、常に古くて新しい問題として研究者の関心をひいてきたが、今また新たに、調質高張力鋼組立部材の疲労寿命への関与を問われることになったわけである。残留応力の影響評価は、往時の定性的な類推から発展し、近年は破壊力学的手法の導入によってかなり定量的な検討が加えられるようになってきている。

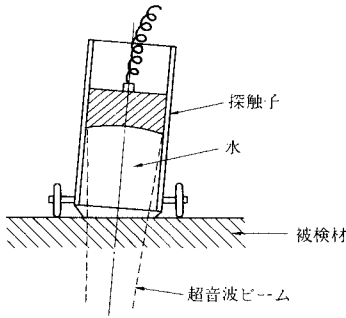
平面ひずみ状態での脆性破壊においては、応力拡大係数 K を用いた解析が有用であり、その際残留応力は K_{res} として外力による K_0 に加算して、その合計 $K_0 + K_{res}$ を材料の破壊じん性値 K_c と比較することが行われる。疲労クラックの伝播は、微小な脆性破壊の連続ととらえられることから、Parisは疲労亀裂の進展速度 da/dN と応力拡大係数 K の変動範囲 ΔK との間に

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

なる関係のあることを示した。今日、この方法により多くの疲労亀裂の実験解析が行われており、溶接残留応力がどのように進展速度に影響するかも研究されている。

三木ら⁴⁾は、残留応力の存在によってしきい値 ΔK_{th} が低下する(より小荷重で亀裂の進展が始まる)ことを実験的に示しており、一方、仁瓶ら⁵⁾は、残留応力場を亀裂が進展するとき、応力の再配分によって生ずる ΔK_{res} を導入して、簡単なモデルで残留応力の亀裂進展に及ぼす影響を定量的に示した。しかし、残留応力場で亀裂伝播の限界である ΔK_{th} が低下する現象が、それによって解明されたとはいえず、むしろ、一般に ΔK_{th} と目されている範囲でも実際には疲労亀裂はわずかずつ伝播しており、その速度に残留応力が関与していると考えられるべきではないかと思われる。

ΔK_{th} 付近の現象は非常に微妙な問題であり、今後の精密な研究を待つて明らかにされることと思うが、著者ら⁶⁾は、よりマクロ的な見地から残留応力除去による疲労強度の改善方法を研究し、箱断面角継手に対する低温応力除去処理が確実に疲労強度を向上させることを実証した。これについては、微小なブローホールを検出精度、



図—5 水浸用焦点型探触子

表—2 本四併用橋角継手の疲労設計
(土木学会誌 1983年 Vol. 68, No. 6)

部材分類	作用応力範囲 許容応力範囲	ブローホールの 許容寸法
特 A	$0.7 \leq \frac{\sigma_r}{\sigma_{fa}}$	$\phi \leq 1.5 \text{ mm}$
A	$0.5 \leq \frac{\sigma_r}{\sigma_{fa}} < 0.7$	$\phi \leq 3.0 \text{ mm}$
B	$\frac{\sigma_r}{\sigma_{fa}} < 0.5$	$\phi \leq 6.0 \text{ mm}$

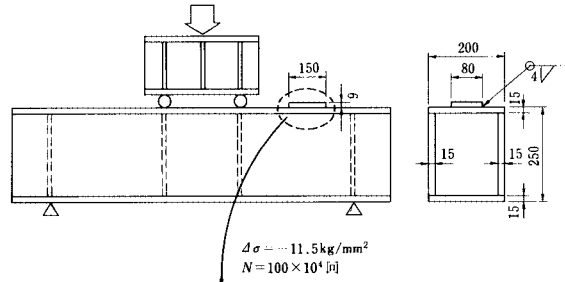
表—3 箱断面部材の曲げ疲労試験におけるブローホール
からの亀裂発生率

ブローホールの大きさ	$1.5 < \phi \leq 3 \text{ mm}$	$\phi \leq 1.5$
引張側の発生率	48%	16%
圧縮側の発生率	28%	0

補修溶接の功罪などを考慮した工学的評価が待たれている。

部分溶込み溶接におけるルート部の微小不連続が疲労強度低下の要因と認定された時点で、当然非破壊試験による欠陥検出の可能性が論議された。この件に関しては現在超音波探傷方法の研究開発が進み、ある程度実用段階に達している。微小欠陥の検出精度を高めるために、①元来発散型であった超音波ビームを図—5に示すような探触子によって探傷位置に収束させる技術、②センサー探触子を用いた溶接ルート微い装置や、自動スキヤニングとコンピュータ画像処理技術、などの開発された点が大きな貢献であるといえよう。

このような特殊な探傷技術の開発を待って、必要な疲労強度に対応する細密な品質規定(表—2)が設けられることになったが、ブローホールの大きさを0.5 mmの精度でグレード分けする点で、現在、なお十分な信頼性が保証されたとはいいがたい。難しい補修溶接をすべきか否かの判定にかかわる問題だけに、なお一層の精度向上への研究が期待される。



図—6 曲げ疲労試験における圧縮部のクラック

以上のほかに、最近の大型疲労実験で得られた知見として触れておきたい問題に、圧縮部の疲労クラックの発生がある。曲げ疲労試験において圧縮縁に疲労クラックの発生することはすでに種々報じられており、また前述の道路橋の損傷にも圧縮部の発生例がみられるから、特に新しい問題ではないが、ここで若干の注意を喚起すべき現象として次の二点がある。

- 1) 箱断面角継手のブローホールからのクラック発生率は引張側より圧縮側の方がかなり低い(表—3)。
- 2) 圧縮縁へのアタッチメント(添付プレート)溶接部には、 $\sigma_r = -110 \text{ MPa}$ 、 $N = 2 \times 10^6$ 回程度で確実に疲労クラックが発生しており、従来の十字継手の引張疲労データよりむしろ低強度である。また図—6にみられるように、付近に別の溶接線が存在すると、かなり広範にクラックが伝播する。

これらの現象からみると、圧縮部も溶接残留応力の存在により引張応力の繰返しとなり、亀裂の発生は応力範囲だけに支配される、また圧縮側の亀裂はある程度以上進展しないから引張側より安全である、という従来の主張にはやや疑問があるように思われる。同じ前面隅肉溶接でもリブ十字タイプより添板タイプの方が弱いのかということも今まで論議の対象になっていない。今後の研究に委ねられる問題点であろう。

4. あとがき

溶接構造の破壊を支配する三要素、座屈、疲労、脆性破壊はそれぞれ奥行の深い研究分野であるが、本文では

それらのうち最近特に話題にのぼることの多い疲労クラッキングについて、現状と問題点を概観した。しかし、元来ばらつきの大きい溶接現象と、同じく何らかの統計処理を必要とする疲労現象との組合せのためか、まことにとりとめない論評になってしまった。

疲労解析に破壊力学の手法が導入されてから、解析は日増しにミクロ的になってきており、それらはシンプルな試験体に対してはかなりよい実測との一致を示しているのであるが、実構造の破壊現象に関して十分有用であるとはいえない。ミクロ的解析とともに、それをマクロ的な問題の把握に結びつける研究が必要と思われる。そのようなことを特にシニカルに扱ったつもりはないが、2章と3章との対比で今後の研究のあり方を著者なりに模索してみた。大方のご批判を仰ぎたい。

参 考 文 献

- 1) 横河橋梁五十年史
- 2) Fatigue Reliability : By The Committee on Fatigue and Fracture, Reliability of the Committee on Structural Safety and Reliability of the Structural Division, J. ST. Div. ASCE ST 1, 1982.
- 3) 有田・植草・明石：ボックス柱-I形梁接合部に関する実験的考察, 横河橋梁技報, No. 6, 1976.
- 4) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Takena, K. : Influence of Residual Welding Stress on Fatigue Crack Growth Rate, Proc. of JSCE, No. 330, 1983-2.
- 5) 仁瓶・尾野・恒成：溶接残留応力を考慮した疲労亀裂伝播寿命の推定に関する研究, 日本造船学会論文集, Vol. 152, 1983年1月.
- 6) 名取・深沢・明石：トラス弦材角継手部の残留応力低減方法, 土木学会第38回年次学術講演会概要集, I-154, 1983年.

(1984. 7. 30・受付)