

## II-1 鋼桁 および合成桁の疲勞とその対策

大阪大学 前田 幸雄

鋼桁として背の高い薄肉プレートガーダー、合成桁としてプレストレスしない連続合成桁を対象として、構造疲勞と材料疲勞の相関を論じ、更に疲勞きれつ発生に対する対策を探討したものである。

### 1. 薄肉プレートガーダーの曲げ疲勞

厚肉で背の低い溶接ガーダーの疲勞強さは小型試験片による材料疲勞によつてかなり十分に評価できることが Gurney らによつて確かめられている。

薄肉で背の高い溶接ガーダーの構造疲勞は材料疲勞のみによつて評価できない場合のあることが Munse, Stallmeyer, Yen, Toprac, 前田らによつて明かにされてきた。薄肉ガーダーのパネルの疲勞きれつ発生のパターンはパネルに働く荷重作用によつて異なるが、ここでは曲げパネルについて論ずる。

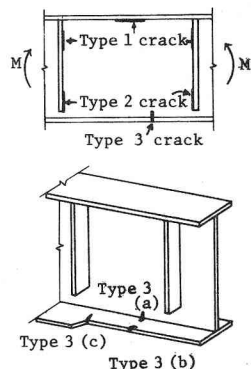


図-1. 曲げパネルの疲勞きれつのパターン

#### (1) きれつのパターン

曲げパネルに生ずるきれつのパターンは図-1の1型, 2型, 3型に分類できることが上記研究者らによつて明かにされている。3型きれつは引張フランジに生ずるもので、厚肉で背の低い桁においても観察されるものである。図-2は3型きれつの中の一つの代表例を示したものである。材料疲勞によつて評価が可能である。

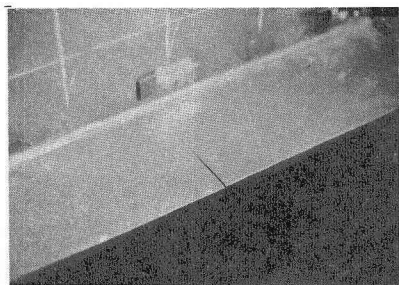


図-2. 3型きれつの伝播

2型きれつはウェブと垂直補剛材のすみ肉溶接部に、且つ曲げ引張応力域に発生する。主としてこの部分の断面急変による応力集中に起因し、進行速度が早く、引張フランジに向つて成長し、遂には引張フランジに進入して断面の破断をきたす。2型きれつはハイブリッドガーダーのパネルが曲げを受ける場合に、最も支配的なきれつであることが前田・川井らによつて明かにされている。図-3はハイブリッド桁の実験中に観察されたものである。

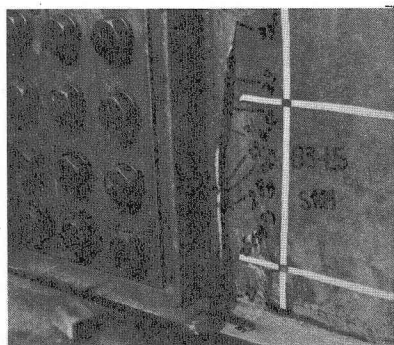


図-3. 2型きれつの伝播

1型きれつは初期タワミを持つウェブ板が曲げ圧縮とらけで面外変形と繰返し荷重に、ウェブの周辺境界部に生ずる2次曲げが原因となつて、ウェブと圧縮フランジ、又はウェブと垂直補剛材のすみ肉溶接の余盛ウェブ側止端に発生する。最初片面に生じたこのきれつは、繰返し数の増加と共に、ウェブ厚を貫ぬいて反対側に進行すると共に、又溶接線にそつて伝播する性質を有する。

このきれつはウェブ細長比200以上の単一鋼種ガーダー曲げパネルに特有のものであるが、ハイブリッド構成断面のパネルにも発生の可能性がある。図-4はガーダーの試験パネルに発生した5箇所の1型きれつ、又図-5はこの種きれつの拡大写真である。かかる構造疲勞は面外変形の繰返し作用と、溶接止端の局部的材料疲勞の双方から論ずる必要がある。

## (2) Z型きれつの疲労特性

圧縮フランジにSM58, 引張フランジにHT80, ウェブにSS41, 補剛材にSM50を用いた支間8.0mの完全非対称ハイブリッドガーダーの試験体にて, ウェブ細長比 $\beta=400, 300, 200$ , 水平補剛材の剛比 $\gamma/\gamma^*=$ 夫々1と7, 1と6, 0と5とした場合, 試験パネルに繰返し曲げモーメントと作用させて疲労試験を行なった<sup>1)</sup>。その結果次のような事が明かにされた。

1)  $\beta=93\sim 295$ , 水平補剛材のない試験パネルを扱った

Topracの実験<sup>2)</sup>では, 1型きれつが支配的であったが, 前田の実験では, 1型きれつ発生前にZ型きれつが支配的なことが分った。但し $\beta=413$ ,  $\gamma/\gamma^*=1.0$ の時には1型も発生し, 又 $\beta=310$ ,  $\gamma/\gamma^*=1.0$ の時には3型も発生した。このことから, ハイブリッドガーダーでは1型きれつ発生の可能性もあるが,  $\gamma/\gamma^*$ の適当な選定によつて, むしろZ型が早期に発生すると考えることができる。

2) SS41材をウェブにもつハイブリッド桁では応力全振幅で表わして200万回疲労強さは平均値で $1270 \text{ kg/cm}^2$ であった。又Topracの実験ではA36材のウェブを用いて $1290 \text{ kg/cm}^2$ であった。

3) 図-6と7は各々試験桁のウェブ材SS41および之と同等のSM41Bと母材としたリブ十字前面すみ肉溶接継ぎの疲労試験と本桁試験の結果を比較したものである。図-6から分るように,

桁の応力比 $R$ は0.2~0.5と一定してないが,  $R=0$ の継ぎの結果とかなりよく一致している。図-7では桁の試験結果は $R=0$ と

0.5のリブ十字前面すみ肉溶接継ぎの試験結果の中間値を示している。かかる事実から, 垂直補剛材をもつハイブリッド桁の構造疲労強さはバラツキを考慮すれば, ウェブ材と母材とあるリブ十字前面すみ肉溶接継ぎの材料疲労強さで十分推定できることが判る。 $R$ とは最小応力/最大応力と表わす。

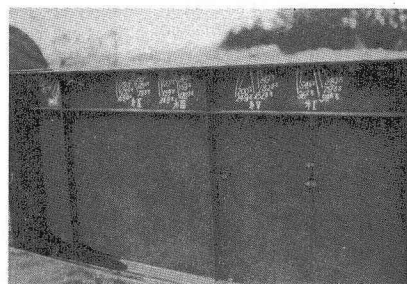
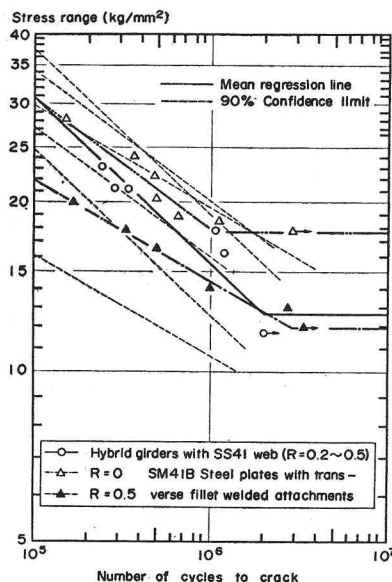


図-4. 1型きれつの発生位置

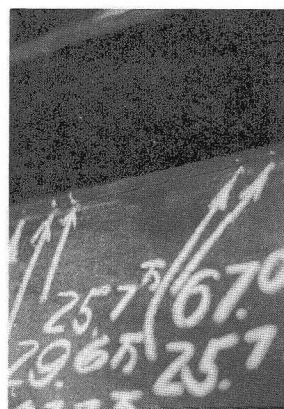


図-5. 1型きれつの伝播

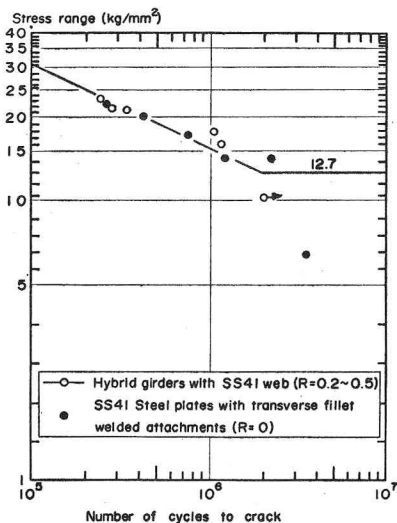


図-6. SS41の材料疲労との比較

図-7. SM41Bの材料疲労との比較

### (3) 2型きれつ発生に対する対策

1) 短かい垂直補剛材を用いることによつて2型きれつの発生をおくることが可能であるが、垂直補剛材を低応力域でとめてしまうことは、ウェブの面外変形に対する拘束効果を減少させ、1型きれつ発生の可能性を増す他、静的耐荷力をも低下させる恐れが生ずる。この意味でハイブリッド桁の疲勞を2型きれつの発生でおさえるのが安全である。

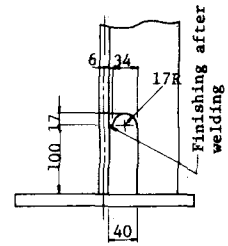


図-8. 垂直補剛材下端の構造の一例

2) 2型きれつは垂直補剛材のようにウェブ引張側に溶接された材の周辺に生ずる応力集中に起因するものであるから、設計の際、ウェブ引張側の細部に充分な配慮が必要である。図-8は垂直補剛材の端部処理の一例である。

3) 今回の実験では引張フランジ縁の最大応力ときれつ発生迄の繰返数との間に相関性が明らかでなかったが、今後更に高い平均応力における実験資料が蓄う迄は応力全振幅のみでなく、最大応力の規定を設けておくのがよい。本実験結果からは引張フランジ最大応力制限値として繰返数200万回、50万回、10万回に夫々21, 31, 49  $\text{kg}/\text{mm}^2$  と提案できる。但しウェブ材の  $\sigma_y = 24 \text{ kg}/\text{mm}^2$  である。

### (4) 1型きれつの疲勞特性

1型きれつは荷重の繰返しによるウェブ面外タワミ変形の繰返しに起因することが明かにされてきた。ウェブの面外タワミはウェブの細長比と初期タワミに大きく支配される。ウェブの細長比  $\beta$  が200以下では初期タワミも小さく、200万回又はそれ以上の繰返数でも疲勞きれつが生じないが、 $\beta$  が200以上の場合には初期タワミも大きく、いくつかの試験桁では200万以下でも疲勞きれつが生じている。アメリカでは降伏点  $\sigma_y = 23.2 \sim 31.6 \text{ kg}/\text{mm}^2$  鋼材の1型疲勞について検討を加えた結果、AASHTOの荷重設計法では、1型きれつの防止に着目して、70キロ級高張力鋼にも適用できるウェブ細長比  $\beta$  の制限値として、垂直補剛材をもつ対称断面には  $\beta \leq 9,680\sqrt{\sigma_y}$ 、又垂直・水平両補剛材をもち、水平補剛材を圧縮フランジの内側から  $b/5$  の位置に設けた対称断面には、 $\beta \leq 19,360\sqrt{\sigma_y}$  と提案している。ここで  $\sigma_y$  はウェブ材の降伏点 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )。わが国の鋼材にあてはめると、SS41, SM50, SM50Y, SM58 に対して、垂直補剛材のみの場合には夫々、200, 170, 160, 140 と、又垂直・水平両補剛材の場合には夫々、400, 340, 320, 280 と与える。又補剛材の剛度、特に水平補剛材の剛度を最小剛比  $\gamma^*$  の何倍にとつたならば、静的終局強度を増加させると共に、ウェブのタワミ変形とおさえて、1型きれつの発生を防止し、又はおくらせるかという問題については、定性的には明かにされているが、初期タワミの大きさと分布がモデル化し難いことから計算式が提案されていない。

ウェブのタワミの繰返し作用は、すみ肉溶接止端に2次曲げ応力を発生させ、この応力が止端の疲勞強さといえる場合にきれつが発生する。前回の実験の一例を示すと図-9

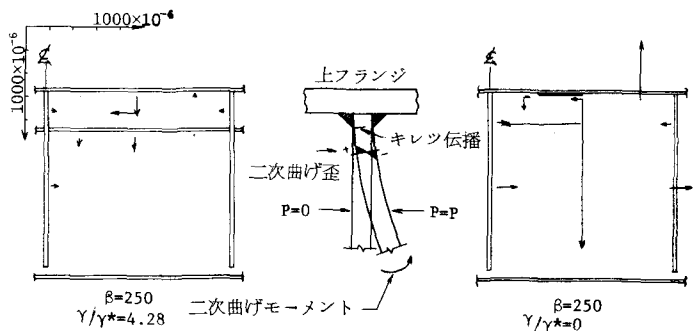


図-9. 1型きれつの発生とウェブ周辺の2次曲げ

のようである。従つてウェブの細長

比を制限して、初期タワミの大きさとタワミ振幅をおさえる外に、二次曲げ応力  $\sigma_b$  の振幅を制限する必要がある。大型試験機については Stallmeyer, Yen, 前田らの実験報告があるが、之と評価すべき材料疲労、すなわち、すみ肉溶接部に溶接線に直角方向に面外曲げが作用する場合の局部的止端疲労強さの資料が殆んどない。最近の研究では眞谷・今村、前田・中西の研究があるにすぎない。

1) 溶接線に直角な曲げをうけるすみ肉溶接継ぎの疲労実験(前田・中西<sup>3)</sup>)

試験体はパネルの圧縮フランジ、水平補剛材、ウェブをモデル化した小形板形式のもので、図-10に示したように、T型とI型断面の2種類を用いた。使用鋼材はウェブにはSS41、フランジにはSS41, SM50A, SM58, HT80の4種類である。フランジの寸法は32×400×200と32×400×150、ウェブは10×400×500、支承用丸棒はφ40×400mm、脚長は6, 9, 15mmである。T型試験体はウェブ板の一边を固定、対辺単純支持、相対2辺を自由にしたもの、I型はウェブ板の一边を固定、対辺と固定一可動、相対2辺を自由にしたもので、溶接線に平行な集中線荷重とウェブスパン中央附近に繰返し載荷し、溶接止端の疲労きれつ発生と伝播の観察、および種々の歪み測定を行なった。きれつは曲げモーメントが最大となる引張側の溶接線の中央附近の止端に発生して、ウェブ両端に向つて溶接線に沿つて伝播すると共に、ウェブ裏側の圧縮側にも伝播した。この挙動は大型ガーダーの1型きれつの観察結果をよく説明している。その一例を示すと図-11、図-12 のようである。

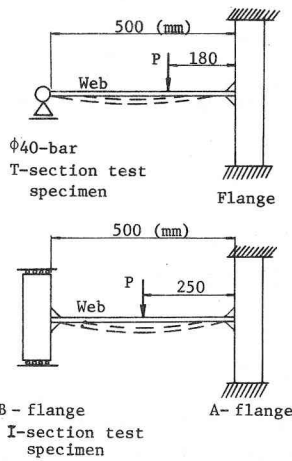


図-10. 板形式疲労試験体

2) 実験結果——特に構造疲労と材料疲労の相関

きれつ発生箇所である溶接止端の歪み測定が困難であるので、FEM解析による板の曲げ歪み計算値と止端近傍の測定値から止端部の曲げ歪み値を求めた。きれつ発生時の曲げ歪み振幅とその時の繰返数の関係とS-N線図に類似の形で表わすと図-13のようである。この図には Ostapenko<sup>4)</sup> と前田の大型機における1型きれつの測定結果も同時に示してある。溶接部余盛を削減仕上げた場合には、疲労強さは約30%近く向上することが分ったが、これらの点を除くと本実験では18.2kg/mm<sup>2</sup>、大型試験機では16.8kg/mm<sup>2</sup> という

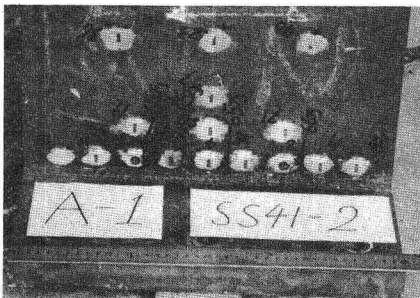


図-11. 溶接線にそつたきれつの伝播

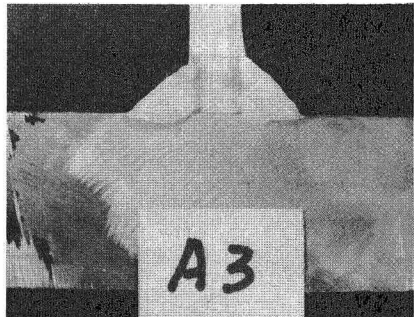


図-12. 断面におけるきれつの伝播

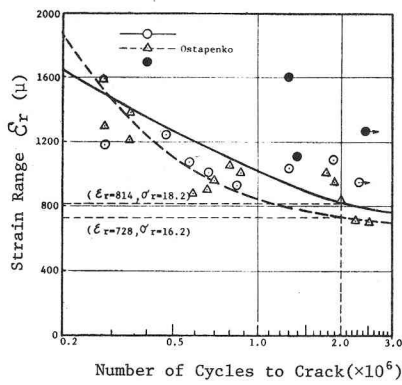


図-13. 1型きれつ発生時のε-N線図

200万回疲勞強さを得ている。桁試験体の二次曲げ応力はウェブのタワミ測定値から差分法によつて計算したものであつて、タワミ測定精度が板形式小型試験体の歪み測定精度より劣ることと考えると、二次曲げ応力の振幅は凡そ  $16 \sim 18 \text{ Kg/mm}^2$  が200万回疲勞強さと考えてもよい。同時に二次曲げ応力で表わした疲勞強さはこのような小型試験体によつて実用上十分に推定できると思われる。

### 3) 実際のプレートガーダーへの適用

1型きれつが発生がウェブの初期変形に起因する面外変形によるもので、しかも、この面外変形がウェブに作用する直応力又は膜応力と非線形関係にあることから、図-13に求めた局所歪み(応力)で整理された結果のみでは実橋の設計に適用できない。ウェブ圧縮パネルの最大変形量と疲勞強さとの関係で整理してみると図-14が得られる。この図では縦軸として、ウェブの面外タワミの全振幅  $\delta_r$  とウェブの板厚  $t_w$  との比、又は  $\delta_r$  とサブパネルの高さ  $h$  との比とつて、 $\delta_r$  と1型きれつ発生迄の繰返数との関係と示したものである。また

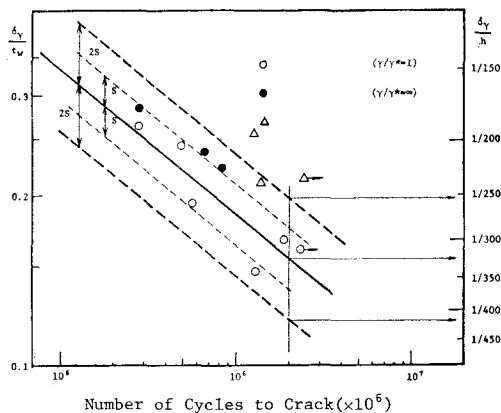


図-14 ウェブ面外タワミと疲勞強さの関係

$\delta_r/h = \delta_r^*/\beta = (\delta_r/t_w)/(h/t_w)$  なる関係がある。この図から任意のウェブ細長比  $\beta$  に対する活荷重による面外変形量の判限値が求まる。例えば200万回の繰返数に対する  $\delta_r/h$  は凡そ  $1/300$  と読み取ることができ、ウェブ圧縮パネルの細長比が50であれば、活荷重による面外変形量とウェブ厚の  $1/6$  位におさえる必要があることを示している。又図-14に示した実線と破線は溶接部と機械仕上げしたものを除いて、T型、I型の別なく最小二乗法による回帰分析した平均値、およびバラツキの上下限と示すと考えられる標準偏差の2倍の範囲を示している。図から分るように、T型とI型の結果は明確な差を示していないが、補剛剛度が無限大の場合とモデル化したI型が最小剛比の補剛材とモデル化したT型と比較して、若干疲勞強さが高く、バラツキの上限近くにあることが分る。このことは桁試験の結果とよく説明しているといえよう。実際のガーダーではモデル試験体とウェブの境界条件と異にし、変形量と繰返数の関係は図-13に示した局所応力(歪み)と繰返数ほどの相関性を示すかは疑問として残るが、一応の参考に役立つと考えることができよう。

### 4) 1型きれつ発生に対する対策

図-14に示したような活荷重載荷時のウェブ面外変形範囲と設計において予測することは極めて困難である。これは、かかる変形量が未知である初期タワミ量と関係している為である。しかし最大初期タワミ  $\delta_0$  と載荷時の変形量  $\delta_r$ 、曲げ圧縮応力  $\sigma_c$  の関係が  $\delta_r/h = f(\sigma_c, \delta_0/h, \gamma/\gamma^*)$  の形で表わることができれば、図-14の資料と用いて初期タワミを判限することによつて、この種きれつの防止又は発生をおくらせることができよう。それでは現在のところAASHTO規定のウェブ細長比判限規定が設計上便利な提案であると思う。

## 2. プレストレスしない連続合成桁の疲勞

スタッド型がれ止めを用いた合成桁が正の曲げモーメントを受ける場合の疲労挙動は押抜き試験による材料疲労によって評価できる。一般に桁試験の結果が高い疲労強さを示し、Fisherら<sup>5)</sup>によると、桁試験のバラツキの下限が押抜き試験結果のバラツキの上限と等なる、と報告されている。この両者の差は、スタッド疲労きれつ発生の測定法、スタッドに働くせん断力の把握の仕方、研究者によって試験体寸法などが不統一な為と考えられる。最近、プレストレスない連続合成桁橋が架設されるようになったが、中肉支束近傍の負モーメント域の疲労特性について構造疲労と材料疲労の相関を論じた論文は極めて少ない。前田・梶川の研究を紹介して考察を加える。

#### (1) 負モーメントと受ける合成桁の疲労試験<sup>6)</sup>

支間5.0m、単純支持の合成桁に負モーメントの繰返しを与える11体の桁試験を行なった結果、疲労きれつは図-15, 16, 17に示したように、スタッド溶植部根元から発生し、荷重の繰返しと共に引張フランジ全巾に進行し、遂にはウエブ板の中に伝播する形式のものである。正モーメント域に於て、ボンド部にそつてクレーター状に発生するスタッドのせん断疲労きれつとは異なったものである。実験結果をスタッド基部に働くせん断応力とフランジの引張応力の組合せによる主応力の振幅で整理するとバラツキの少ないS-N線図が得られることが分った。

#### (2) スタッドと溶植した引張鋼板の疲労試験<sup>7)</sup>

上記の桁試験結果を評価する為、スタッドと溶植した鋼板に引張と作用させた材料疲労試験を行なった。試験片にはSS41鋼板を用い、スタッドと溶植しない鋼板、スタッドと溶植した後で、切りとつて仕上げた鋼板、スタッドと溶植したままの鋼板を夫々、A, B, Cシリーズと名づけて単純繰返し引張力を鋼板に加える。更に鋼板に溶植したスタッドの周辺をコンクリートブロックで包み、鋼板に加えられる引張力と同位相で、コンクリートブロックと介してスタッドにせん断力と加えるものをDシリーズと名付け、図-18に示した特別の装置で繰返し引張-せん断載荷を行なった。Dシリーズはスタッドに働く平均せん断応力の大きさによって3種類に分類した。

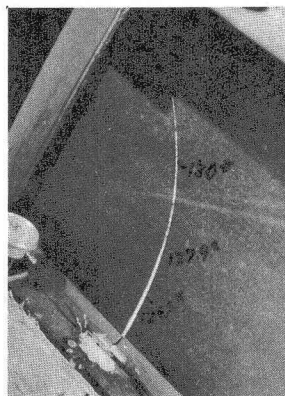


図-17. ウエブへのきれつの伝播

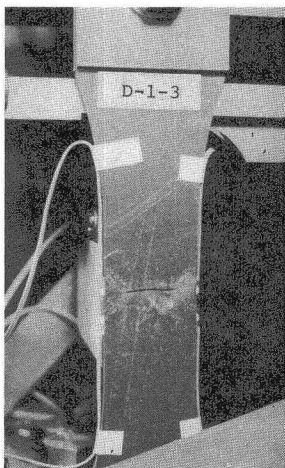


図-19. D試験体のきれつ

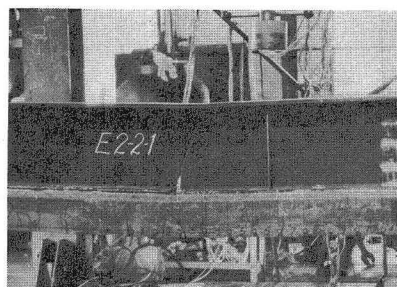


図-15. 合成桁の疲労試験

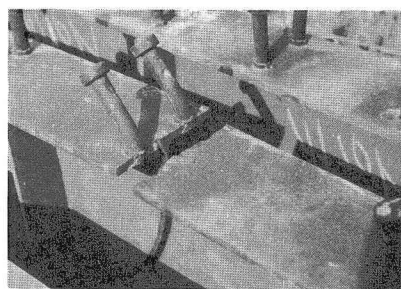


図-16. 引張フランジへのきれつの伝播

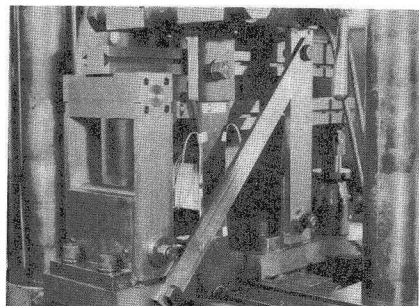


図-18. 引張せん断の同時載荷

Dシリーズ試験体鋼板のきれつの一例を図-19に示した。Dシリーズ試験体の疲労破壊は桁の引張フランジの破壊の観察結果と良く説明している。その代表的な破断面を示すと図-20(a)のようである。スタッドに作用するせん断力の存在の厚に、溶けこみ線にそつてきれつが伝播したことを示す凹み状水平のせまい領域の存在を示している。他方、せん断力の働かないCシリーズの試験体の破断面は図-20(b)に示したように、板面にはほぼ直角にきれつが伝播し、比較的平坦な破断面と表わしている。之等の試験結果と直引張応力振幅で表わしたS-N線図にまるとめると図-21に示した結果が得られる。せん断応力が増加するに従つて、各繰返寿命において板の疲労強さが次第に減少して行く状態が顯著である。

### (3) 構造疲労と材料疲労の相関

図-22に示した応力モデル図において、 $\sigma_y$ の影響は小さいので、 $\sigma_x$ と $\tau_{xy}$ のみの組合わせからなる主応力の振幅で桁試験の結果を表わし、同時に引張板試験についで、図-21のC, D-1, D-2の結果と主応力理論で整理して、両試験と共にS-N線図で示すと、図-22が得られる。

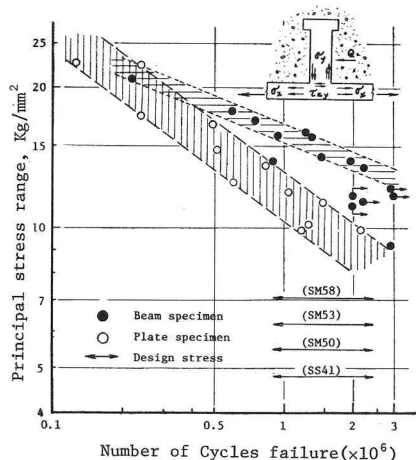


図-22. 主応力振幅で表わした桁試験と板試験結果

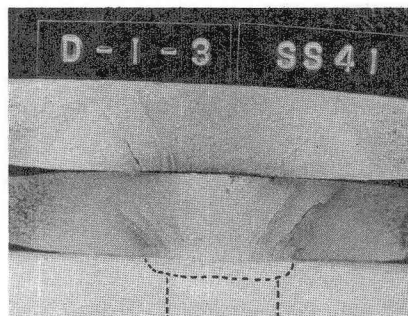


図-20(a). D試験体の破断面

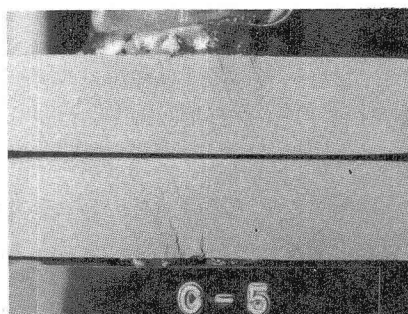


図-20(b). C試験体破断面

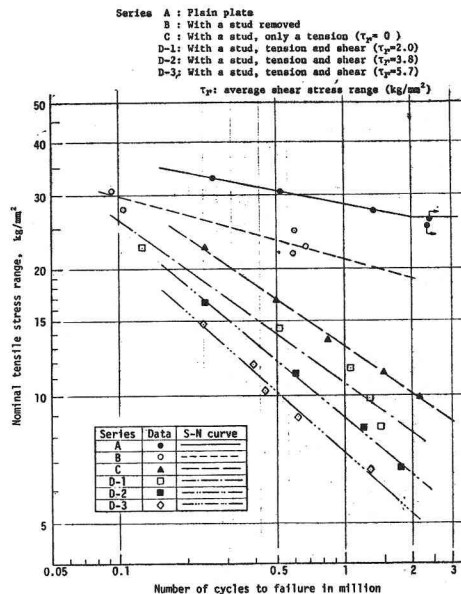


図-21. 直引張応力で表わした板試験体のS-N線図

板試験のバラツキ範囲は桁試験のそれよりも大きい。Dシリーズではせん断力載荷の板中心面に対する偏心作用などが影響している。又桁試験のバラツキの範囲は板試験のそれよりも上方に位置してゐて、両者の差は20万回位から繰返数の増加と共に増加している。桁試験では引張フランジの応力は

床版中の軸方向鉄筋や隣接スタッドに再分配されることなどからきれつの伝播速度もおそく、従つて疲労寿命も長くなる。之に反して板試験では直接引張力とせん断力の作用と最もきびしい形でうけて、且つ応力の再分配が全く期待できない。更に、現在着者達が研究中である断続形式連続合成桁のように、合成作用の完全・不完全も亦、桁試験の結果に影響してくる。材料疲労のみでは構造疲労、従つて、実際の桁の挙動と完全に説明するには到つてないが、構造疲労解析に一つの大切な指標となえていゝといえよう。

#### (4) 疲労きれつに対する対策

今、スパン30~62mの実橋の設計資料から作用設計活荷重による平均せん断応力振幅とフランジの平均引張応力振幅から、各種鋼材を用いた場合の平均設計主応力振幅と計算すると、図-22に示した4本の応力レベル線が得られる。図-22の桁試験も板試験も共にSS41鋼材と板だったが、別に行なつたSM58 についての板試験のC,Dシリーズ<sup>2)</sup>は、一般にSS41材の結果よりやや上方に位置することが分つてゐる。設計応力レベルは何れもSS41鋼材の板試験結果の200万回疲労強さの十分下方にあるので、現在の道路橋の荷重体系の下では、使用鋼材のいかんにかかわらず、連続合成桁の中間支梁附近の上フランジが疲労破壊をおこす恐れはないと考えられる。又、スタッドの化学成分と機械的性質、および形状寸法は近くJIS化される見込みである。しかし、一般にスタッドの溶植には気泡や切欠きの存在の可能性が少なくなく、きれつ発生の引き金になり易いので溶植作業には十分注意が必要である。特にSM58以上の高張力鋼引張フランジにスタッドを溶植する場合には、切欠き感受性の高いことや、熱影響部の硬度上昇が懸念される故に、予熱などの方法を講じて良好な継ぎが得られるようにすべきである。又、スタッド根元には応力集中がおこり易いので、桁の中間支梁の垂直補剛材の直上などではスタッドを溶植しないように構造上の配慮が望ましい。

#### あとがき

実際の構造物の挙動には種々な要素が不確定に影響し合つており、その疲労挙動の研究に當つて、数多くの実物大試験を行なうことが望ましいが、経費・時間設備上の難かしい問題が多く、又互りに関連し合う影響因子から明確な、且つ決定的因子を抜き出すことが困難な場合が多い。その為にはできるだけ実物に近い構造モデルによる実験を行ない、更にその評価の爲に小型の材料疲労実験を行なうことが必要であるが、両モデルの相関性と十分検討して、材料疲労の結果と構造疲労評価という形でいかに設計に適用するかが今後の大切な研究課題と考える。

#### 参 考 文 献

- 1) 前田・川井：溶接学会誌，43巻，7号，昭.49.7.
- 2) A.A.Toprac and M.Natarajan：Proc.ASCE, Vol.97, ST4, 1971.
- 3) 前田・中西：昭.50年度，土木学会，関西支部年次学術講演会概要集I-49. 昭.50.
- 4) S.Parsanejad and A.Ostapenko：WRC, No.156, Nov. 1970.
- 5) R.G.Slutter and J.W.Fisher：AISC, Bull.No.5, 1967.
- 6) 前田・梶川：Proc.16th Japan Nat. Congress for Br. and Struct. Eng., Dec.1970.
- 7) 前田・梶川：Prel.Rept. 9th Congress, IABSE, 1972.