

# 波形鋼板ウェブPC箱桁橋の力学的挙動 および疲労耐久性に関する研究

Structural Behavior and Fatigue Durability for PC Bridges with Corrugated Steel Webs

溝江 慶久  
Yoshihisa MIZOE

川田工業(株)技術開発本部技術研究室

町田 文孝  
Fumitaka MACHIDA

川田工業(株)技術開発本部技術研究室主幹

越後 滋  
Shigeru ECHIGO

川田工業(株)技術開発本部長

勝俣 盛  
Mori KATSUMATA

川田工業(株)技術開発本部技術開発室

吉岡 昭彦  
Akihiko YOSHIOKA

川田工業(株)橋梁事業部市場開発室

現在、波形鋼板ウェブPC橋では、波形鋼板と床版の合成方法や波形鋼板の接合方法などが主要な課題となっている。波形鋼板と床版の合成方法については、鋼フランジ上に配されたアングル形鋼をずれ止めとして使用する方式が検討されているが、この場合、鋼部材上下縁部での曲げひずみが及ぼすウェブ-フランジすみ肉溶接部への影響が懸念される。

また、張り出し架設により施工される本形式では、ウェブ鋼板の継手形式をボルト接合とした場合、許容されるボルト拡大孔により架設誤差を吸収するには多くの労力を要する。そのため、波形鋼板の接合方法には、架設誤差の吸収が容易で、かつ継手性能が優れる溶接継手方式を選出する必要がある。

本文は、FEM解析および実物大の試験体を用いた静的載荷試験、疲労試験を実施して、これらの課題に取り組んだ成果について報告するものである。

キーワード：波形鋼板ウェブ、アコーディオン効果、現場溶接継手、面外曲げ、疲労耐久性

## 1. はじめに

波形鋼板ウェブと上下コンクリート床版との合成方法について、国内ではこれまで、貫通孔を設けたウェブ鋼板を床版内に埋め込む接合方式、鋼フランジ上に配したスタッドによる接合方式、鋼フランジ上に配した孔あき鋼板による接合方式の3種が採用されてきたが、現在では、フランスのドール橋<sup>1)</sup>で使用された鋼フランジ上に配したアングル形鋼による接合方式が検討され、実用化される方向にある<sup>2)</sup>。しかし、本接合方式のようにウェブ上下縁部に鋼フランジが取り付けられると、ウェブのアコーディオン効果が鋼フランジにより拘束され、ウェブ冷間曲げ加工位置のウェブ-フランジすみ肉溶接部において応力集中することが予想される。

一方、波形ウェブ鋼板は接合の際、せん断力の伝達のみ考慮すれば良いとされている<sup>3)</sup>。また、張り出し架設により施工される本構造形式では、ウェブ鋼板の継手形式をボルト接合とした場合、許容されるボルト拡大孔により架設誤差を吸収するには多くの労力を要する。そのため、ドール橋では、すみ肉溶接による重ね継手が採用されたが、本継手形式は、日本鋼構造協会の『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』<sup>4)</sup>(以下、JSSC)において、疲労上最も弱い強度等級に分類されており、国内の鋼橋ではこれまで主部材の接合に用いられたことはない。

さらに、本構造形式では、ウェブに薄い鋼部材を用いるため、通常のPC箱桁橋に比べ、ウェブの横方向剛性が小さく、コンクリート上床版のたわみ変形に伴いウェブと上下床版の接合部に作用する首振りが大きくなり、ウェブ-フランジすみ肉溶接部やウェブ現場溶接継手部に大きな局部応力が発生する恐れがある。

このようなことから、面内曲げ挙動および面外曲げ挙動に着目して、FEM解析および実物大試験体を用いた静的載荷試験、疲労試験を実施し、波形鋼板ウェブPC橋の全体挙動、ウェブ-フランジすみ肉溶接部およびウェブ現場継手溶接部の疲労耐久性について検討を行った。なお、試験体においては、ずれ止めにアングルジベルを採用し、ウェブ鋼板の接合に、架設誤差の吸収が可能と思われる4種類の溶接継手構造を採用した。

## 2. 静的載荷試験の概要

図1に実物大梁試験体と箱試験体を示す。試験体には、板厚9mmの波形ウェブ鋼板を用い、上下縁に板厚16mmの鋼フランジを取り付けた。また、本研究で検討したウェブ鋼板の継手形式は図2に示す4種類である。梁試験体にはJ1~J4の4継手、箱試験体にはJ2, J3の2継手を設けたが、これらの継手は実橋に即して立向き上進溶接により施工した。

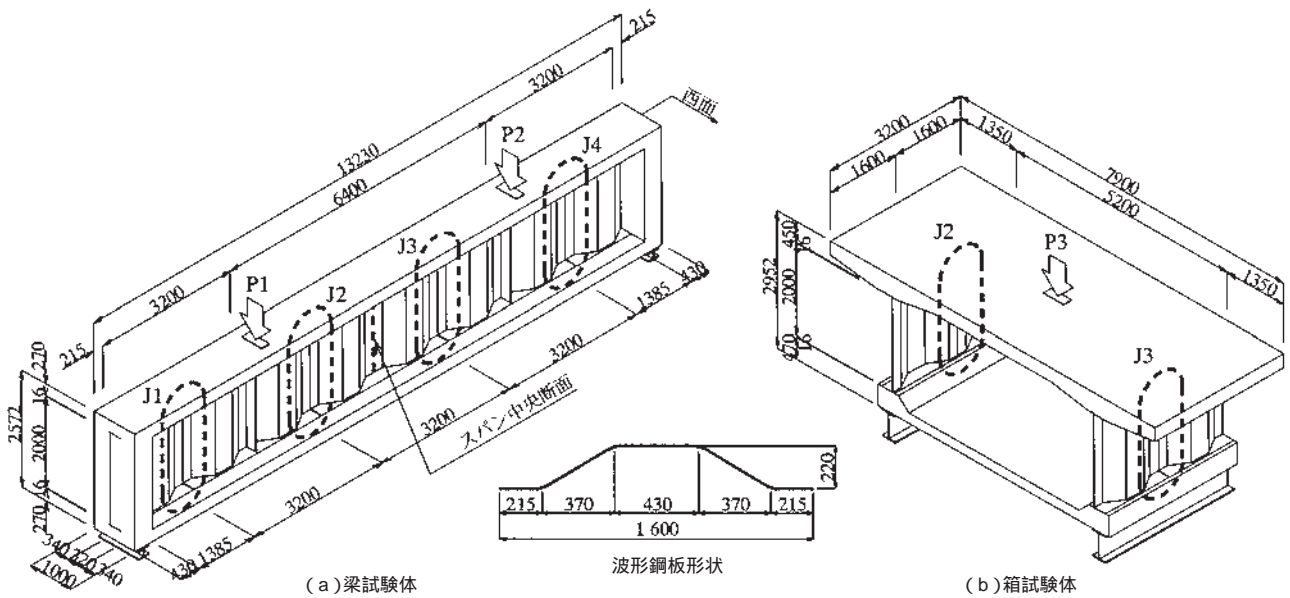


図1 実物大試験体

### (1) 梁試験体を用いた面内曲げ試験

試験では、車両が走行する際のせん断力の変化を想定し、2台の油圧ジャッキを用いて、図3(a)に示す荷重ステップで荷重を与えた。試験体は、荷重P1のみが作用する際の継手J2と荷重P2のみが作用する際の継手J3の平均せん断応力と曲げ応力の比  $\tau/\sigma$  が、スパン約90mの実橋における  $\tau/\sigma$  と一致するように設計した<sup>9)</sup>。

### (2) 箱試験体を用いた面外曲げ試験

荷重位置は上床版中央とし、図3(b)に示す荷重ステップで荷重を与えた。なお、試験体の断面は、スパン約90mの実橋において、設計活荷重載荷時に曲げ応力が最大となる位置の断面にほぼ等しい。

## 3. FEM解析の概要

各試験体の全体挙動やウェブ現場接合部の応力性状を把握する目的で、線形の立体FEM解析を行った。図4に示すように、解析では、鋼部材をシェル要素、コンクリート部材をソリッド要素とし、フランジと上下床版の接合は剛結合とした。

### (1) 梁試験体モデル

解析を行うにあたり、全体挙動を把握するためのモデルと図4(a)に示すウェブ現場接合部の応力性状を把握するためのモデルを作成した。図4(a)のモデルでは、同一の作用応力下における各継手の応力特性を比較するため、実物大梁試験体の継手J2設置位置に相当する図中の四角で

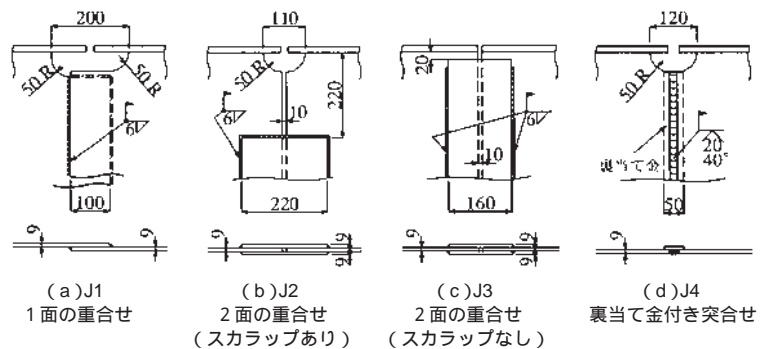


図2 ウェブ鋼板の継手形式

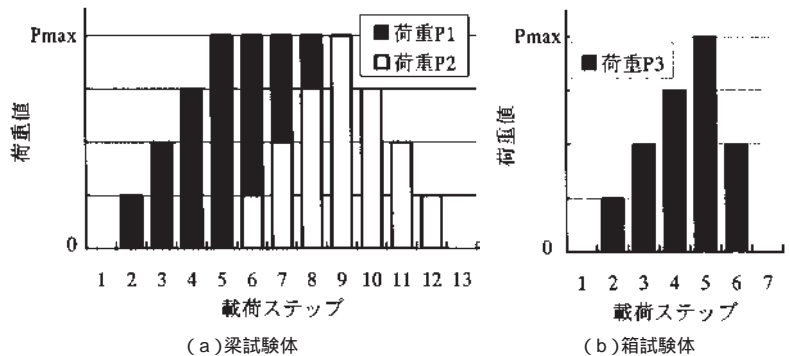


図3 静的荷重試験時荷重ステップ

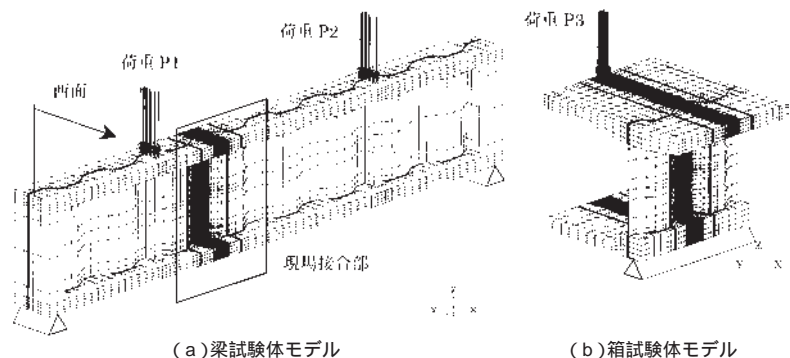


図4 FEM解析モデル

囲んだ位置に、各継手を詳細にモデル化している<sup>5)</sup>。着目位置の要素サイズは約10×10mmであり、継手J1～J3のすみ肉溶接部は剛体要素を用いてモデル化し、継手J4の突合せ溶接部はモデル化しなかった。

一方、全体挙動を把握するためのモデルでは、スパン中央部を細分化し、継手部は設けなかった。

## (2) 箱試験体モデル

試験体の变形挙動を把握する目的で、継手部を設けないモデルを作成し、図4(b)に示すように、対称性を考慮した片側断面モデルとした。

## 4. 静的荷重試験結果とFEM解析結果の比較

### (1) 梁試験体

#### a) 全体挙動

図5, 6に最大荷重 $P_{max}$ を100kNとした場合の荷重ステップ5および等曲げ状態の荷重ステップ7におけるたわみ分布とスパン中央断面でのひずみ分布を示す。たわみは、いずれの荷重ステップにおいても、FEM解析結果とほぼ一致した。また、梁理論から求められる計算値は、せん断変形を考慮した方が一致した。

一方、図5(b), 6(b)より、曲げひずみは上下縁部でのみ生じており、フランジを有する波形鋼板ウェブであっても、ウェブ中央部付近ではアコーディオン効果が発揮されることがわかる。しかし、上下フランジ部では、フランジがウェブのアコーディオン効果を拘束することにより、コンクリート断面のみ有効とした梁理論値の約70%の曲げひずみが生じており、応力集中が予想されるウェブ冷間曲げ加工位置のウェブ-フランジすみ肉溶接部の

疲労耐久性を確認しておく必要があると考えられた。

また、図5(c), 6(c)より、ウェブに生じるせん断ひずみは高さ方向にほぼ一定に分布し、ウェブがせん断力を一様に負担すると仮定した梁理論値の約80%であった。

#### b) ウェブ現場接合部

着目部は現場溶接継手部のウェブ高中央部(以下、ウェブ中央部)、現場溶接継手部の上下縁局部(以下、継手局部)、スカラップのまわし溶接部ウェブ側(以下、スカラップ局部)の3カ所とし、それぞれの着目溶接止端部から5mm離れた位置で発生応力を測定した。

図7に、荷重ステップ5, 9の測定結果を用いて整理した西面(図1参照)での主応力範囲を示す。なお、縦軸の主応力範囲は、平均せん断応力範囲が各継手で同一になるように、測定結果を線形補正している<sup>9)</sup>。これより、ウェブ中央部での主応力範囲は、いずれの継手においても2.5MPa前後であり、梁理論から求められる $J2, J3$ の平均せん断応力範囲2.78MPaとほぼ一致した。また、継手局部では、 $J1, J2$ の主応力範囲が、ウェブ中央部に比べ約5倍であるのに対し、 $J3, J4$ では約2倍であった。さらに、スカラップ局部での主応力範囲は、ウェブ中央部に比べ、 $J1$ で約4倍、 $J2, J4$ では約2倍となっており、スカラップ幅の広い方が大きくなった。

解析結果を図8に示す。静的荷重試験結果と同様、ウェブ中央部では継手形式による差異はほとんど見られないが、継手局部、スカラップ局部では、 $J1, J2$ の主応力範囲が、 $J3, J4$ に比べ大きくなっていることがわかる。

さらに、これら局部応力の発生要因を確認するため、ウェブ表裏面の直応力値から、面内膜応力と面外曲げ応

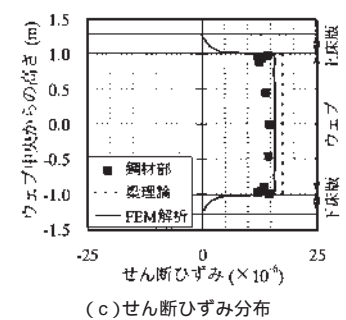
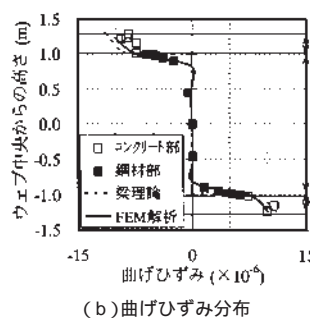
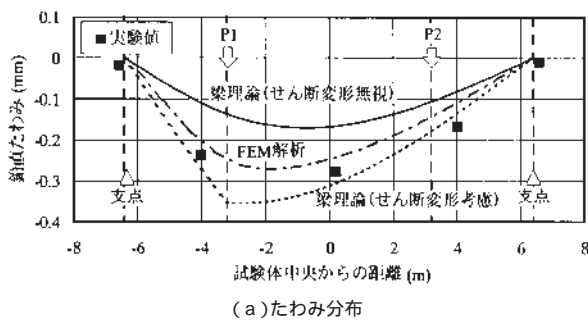


図5 荷重ステップ5 ( $P_1=100\text{kN}, P_2=0\text{kN}$ )における梁試験体のたわみ分布とスパン中央断面でのひずみ分布

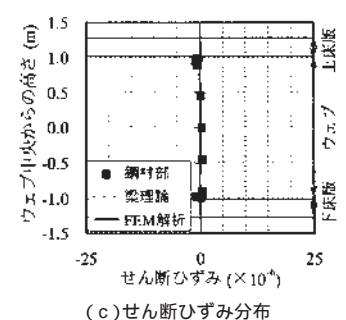
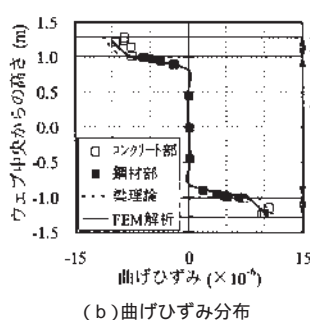
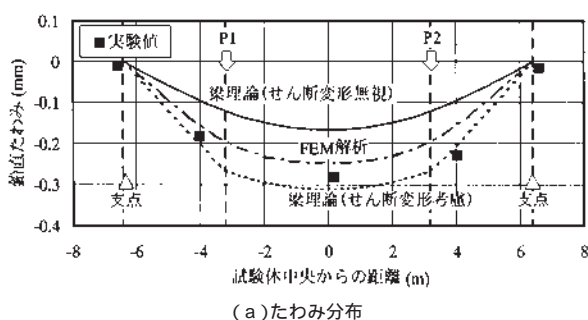


図6 荷重ステップ7 ( $P_1=50\text{kN}, P_2=50\text{kN}$ )における梁試験体のたわみ分布とスパン中央断面でのひずみ分布

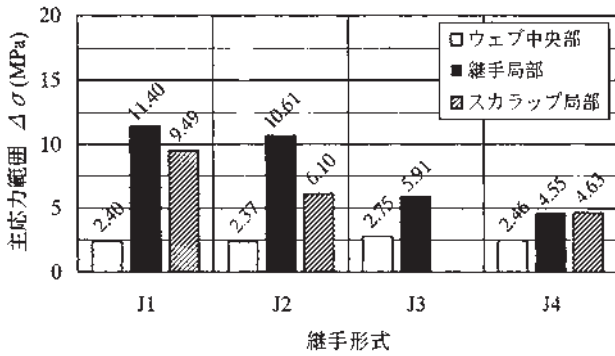


図7 静的荷荷試験結果から推定した梁試験体ウェブ現場接合部の主応力範囲

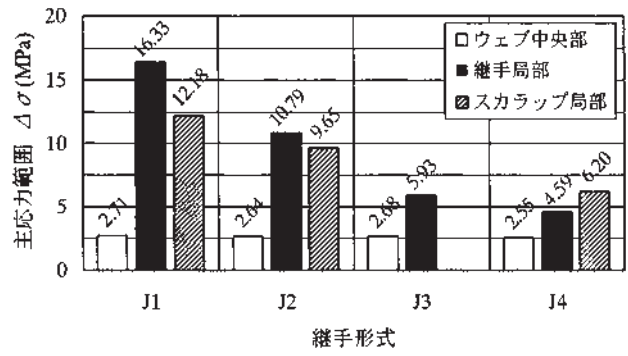


図8 FEM解析結果から推定した梁試験体ウェブ現場接合部の主応力範囲

力を算出した結果を図9に示す。これより、J1に関しては、継手局部、スカラップ局部ともに作用する面外曲げ応力範囲が大きく、ウェブ軸心の偏心が大きな局部応力の発生原因と考えられる。また、J2については、面内膜応力範囲が他の継手に比べ大きくなっており、ウェブ端間の隙間も含めたフランジと添接板間のウェブ開口部の広さが局部応力の増大に繋がったものと考えられる。

## (2) 箱試験体

### a) 変形挙動

最大荷重  $P_{max}$  を100kNとした場合の中央断面における上下床版の鉛直変位分布を図10(a)に、ウェブの面外変位分布を図10(b)に示す。図10(a)より、実験値は、床版とフランジの連結を剛結合としたFEM解析結果とよく一致しており、

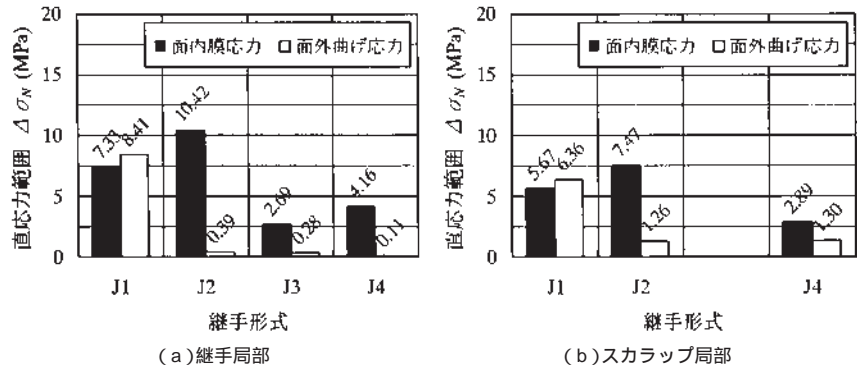


図9 梁試験体ウェブ現場接合部の面内膜応力範囲および面外曲げ応力範囲

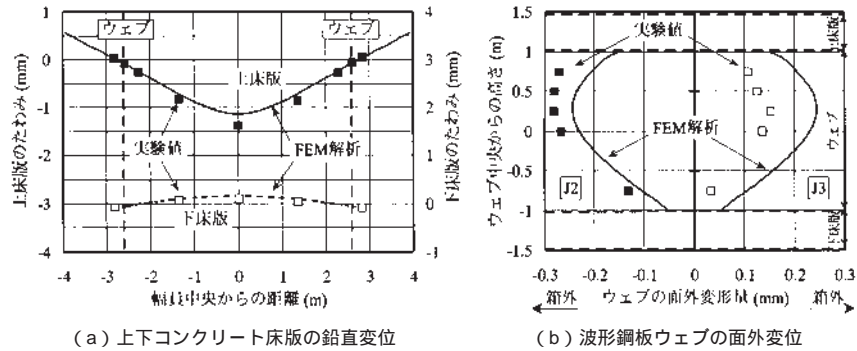


図10 箱試験体中央断面でのたわみ変形

り、試験体がアングルジベルの合成作用により、箱断面として変形していることがわかる。一方、図10(b)より、両ウェブの結果を平均した面外変位量は解析値とほぼ一致したものの、J2側に水平変位した結果となった。この要因としては、試験体製作時の箱断面の形状誤差が考えられる。また、上フランジの首振りについて、ウェブ直上と箱断面外の2点の測定結果から算出したたわみ角は  $0.027^\circ$  であり、FEM解析の結果と一致した。

### b) ウェブ現場接合部

着目部はウェブと上フランジのすみ肉溶接部のウェブ端（以下、首溶接部）、現場溶接継手部の上縁局部（以下、継手局部）の2カ所とし、それぞれの着目溶接止端部から5mm離れた位置で発生応力を測定した<sup>6)</sup>。図11に、ウェブ表裏の鉛直方向直応力を面内膜応力と面外曲げ応力に分けて整理した結果を示す。首溶接部に着目

すると、面外曲げ応力は、J2がまわし溶接部近傍で平均9.0MPaであるのに対し、J3ではウェブ現場溶接線延長上で平均6.4MPaとなっており、約30%小さい。これは、添接板の長さの違いにより、ウェブ端での面外変形に対する拘束の程度が異なることに起因したものと考えられる。また、面内膜応力を比較すると、J2ではスカラップによって荷重を受ける断面積が減少していることから、J3よりも約40%応力が大きくなっている。よって、継手位置における首溶接部での発生応力を低減するには、製作性を考慮しながら、なるべくスカラップ幅を狭くし、添接板を長くすることが有効であると考えられる。

また、同図において、J2の水平溶接部とJ3の立向き溶接止端部を比較すると、面内膜応力は両継手とも約19MPaとなっており、ほぼ等しい。しかし、面外曲げ応力は、J2が平均2.8MPaであるのに対し、J3が平均5.6MPa



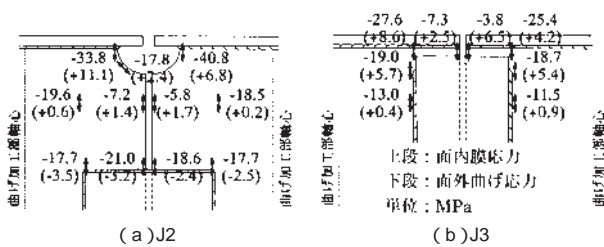


図11 箱試験体現場接合部の面内膜応力および面外曲げ応力

であり、約2倍となっている。これは、J2では、水平溶接部がフランジ下面から220mmとかなり離れた位置にあり、広い自由縁によって面外曲げが緩和されているのに対して、J3では、溶接止端部がフランジ下面にかなり近い位置にあり、フランジから伝達された面外曲げがほとんど緩和されずに作用しているためであると推測される。しかし実橋梁においては、梁試験時の面内曲げおよび箱試験時の面外曲げが連成した応力状態となる。よって、図7の梁試験から得られた継手局部に関する結果では、J2の主応力範囲がJ3の約2倍となっていたことから、継手局部に関して、首溶接部と同様、なるべく添接板を長くすることが有効であると考えられる。

## 5. 実物大試験体の疲労試験

実応力作用下における各溶接部の疲労耐久性を確認するため、静的荷重試験終了後、繰返し回数1000万回の疲労試験を実施した。

### (1) 梁試験体

試験には2台の油圧サーボ型疲労試験機を使用し、静的荷重試験時の荷重ステップを連続させた三角波形で708.5kNの荷重振幅を与えた。荷重振幅値は、静的荷重試験結果と、スパン約90m程度の実橋を対象とした平面骨組解析結果から、実橋において衝撃係数を考慮した2台の大型車が同時荷重した際にウェブに生じるせん断応力振幅の約2倍の振幅が、試験体の継手J1, J4に生じる

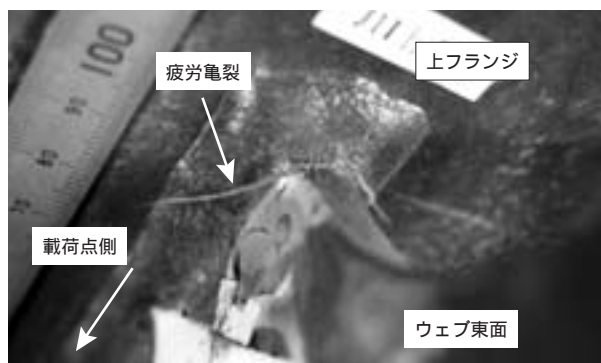


写真1 継手J1上スカラップ部に発生した疲労亀裂

ように設定した。結果として、本試験により確認した疲労耐久性は、継手J1, J4については1車線あたりの日大型車交通量が約3300台、J2, J3については約1000台である対象橋梁の100年寿命に相当する。

93万回の繰返し荷重終了後、継手J1上側スカラップ部の荷点側まわし溶接止端部に全長21mmの疲労亀裂を発見した。写真1に疲労試験終了後に撮影した疲労亀裂(全長58mm)を示す。ウェブ表裏面での亀裂の伸展方向には若干の差異があり、ウェブ軸心の偏心に伴う面外曲げによるものと考えられた。

スパン中央断面におけるウェブ-フランジすみ肉溶接部の試験結果を図12に、ウェブ現場接合部の試験結果を図13に示す。図12(a)より、ウェブ-フランジすみ肉溶接部の橋軸方向応力については、発生応力が小さく、JSSCのD等級(縦方向溶接)やE等級(局部応力を用いた荷重非伝達型十字溶接継手の止端破壊に対する検討に用いられる)をそれぞれ下回る結果となった。また、図

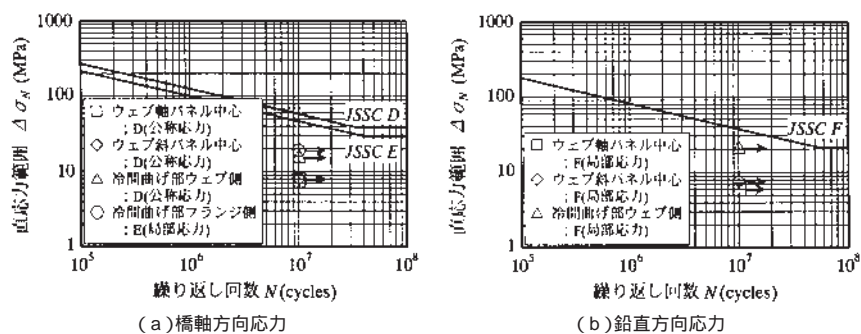


図12 梁試験体疲労試験結果(ウェブ-フランジすみ肉溶接部)

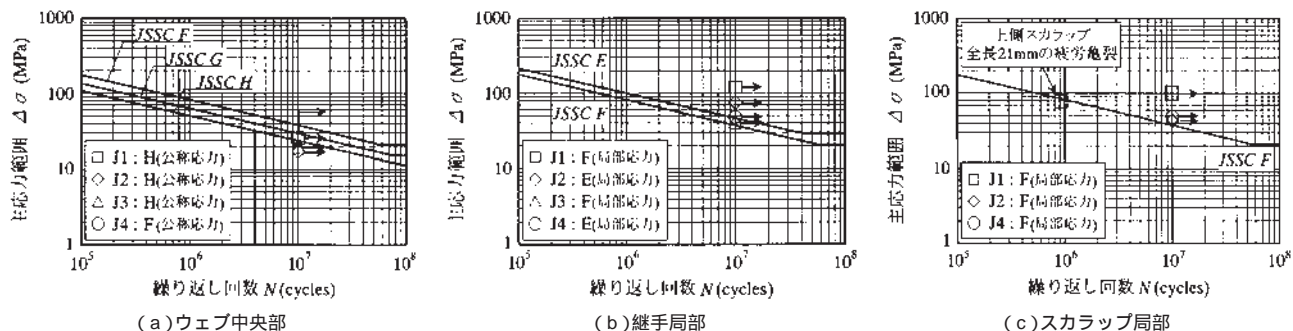


図13 梁試験体疲労試験結果(ウェブ現場接合部)

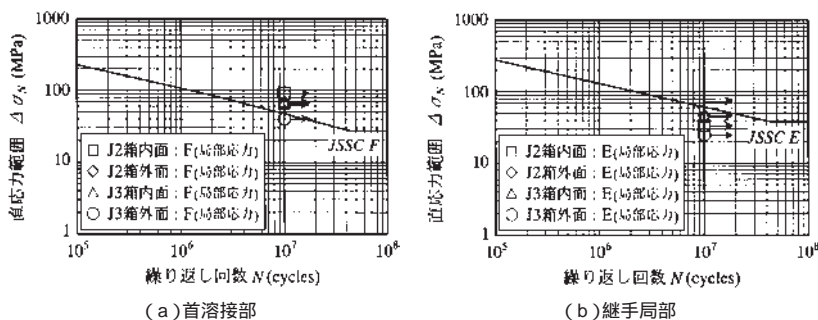


図14 箱試験体疲労試験結果(ウェブ現場接合部)

12(b)の鉛直方向応力についても、同様にF等級(局部応力を用いた荷重伝達型十字溶接継手の止端破壊に対する検討に用いられる)を下回った。よって、この部位に関しては、本試験で設定した疲労照査条件に対しては、安全性の確認ができた。さらに、図13(a)のウェブ中央部に関しても、安全照査のために用いたH等級(重合せ継手)およびF等級(裏当て金付き突合せ継手)をそれぞれ下回り、本試験で設定した疲労照査条件に対しては、安全性が確認できた。

また、図13(b)の継手局部に関しては、それぞれE等級(荷重非伝達型)、F等級(荷重伝達型)を上回る結果となったが、疲労亀裂は発生しなかった。さらに、図13(c)のスカラップ局部に関し、J2、J4はF等級(荷重伝達型)を上回ったが、疲労亀裂の発生はなかった。疲労亀裂の生じた継手J1については、同継手の他所と比較すると、作用した主応力範囲が同等であったにもかかわらず、亀裂の発生がかなり早期であった。よって、今回の亀裂発生については、溶接止端形状による影響も予想されるので、本継手形式を採用する場合には、仕上げを施すなどの止端形状に対する対策が必要であると考えられた。

## (2) 箱試験体

試験には油圧サーボ型疲労試験機を使用し、189.3kNの荷重振幅を正弦波で与えた。荷重振幅値は、図4(b)のモデルによるFEM解析結果と、スパン約90mの実橋をモデル化したFEM解析結果から、実橋において衝撃係数を考慮した2台の大型車が同時載荷した際に生じる首振り角の2倍の首振り角が試験体に生じるように設定した。結果として、本疲労試験により確認した疲労耐久性は、1車線あたりの日大型車交通量が約200台である対象橋梁の100年寿命に相当する<sup>6)</sup>。

図14に、ウェブ現場接合部の試験結果を示す。なお、比較する疲労強度曲線は、着目する応力が全て圧縮であったため、平均応力に関する1.3倍の割り増しを行っている。図14(a)の首溶接部に関し、J2の箱内外面、J3の箱内面ではF等級(荷重伝達型)を上回る結果となったが、疲労亀裂は発生しなかった。また、J3の箱外面ではF等級を下回り、本試験で設定した疲労照査条件に対しては、

安全性の確認ができた。さらに、図14(b)の継手局部に関しても、J2、J3ともにE等級(荷重非伝達型)を下回り、設定した疲労照査条件での安全性の確認ができた。

ただし、梁試験におけるウェブ冷間曲げ部やウェブ中央部、箱試験におけるJ2の継手局部やJ3の首溶接部、継手局部に関しては、比較したそれぞれの疲労強度曲線の打ち切り限界に対して、あまり余裕がないため、大型車台数が増えたり、

発生応力に占める活荷重の割合が大きくなるなどの場合には注意が必要となる。

## 6. おわりに

以上の検討成果を踏まえ、現在、1面の重合せ継手に関し、図15の改善形式について検討を進めている。上記梁試験体モデルのFEM解析結果から、本継手形式は、J1に比べ、発生応力が約60%に低減され、寿命としては約5倍に改善されることがわかっている。今後、面外曲げに対する改善効果についても併せて検討していく予定である。

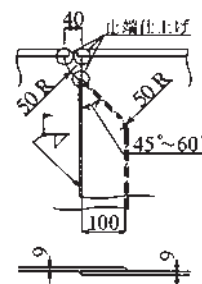


図15 1面重合せ継手の改善形式

なお、本研究はオリエンタル建設(株)と共同で行ったものであり、実施にあたって、早稲田大学・依田照彦教授には数々の有益なご指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) J.Combault, J.D.Lebon, G.Pei: Box-Girders Using Corrugated Steel Webs and Balanced Cantilever Construction, FIP Symposium '93 Kyoto, pp.417-424, 1993.10.
- 2) 鹿野・新井: 波形鋼板ウェブ端の設計・施工 - 日沿道勝手川橋 -, EXTEC, Vol.14, No.53, pp.56-58, 2000.6.
- 3) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会: 波形鋼板ウェブPC橋 計画マニュアル(案), 1998.12.
- 4) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.
- 5) 溝江・町田・落合・辻村: 波形鋼板のウェブ溶接継手部の応力性状と疲労耐久性, 第10回PCの発展に関するシンポジウム, pp.17-22, 2000.10.
- 6) 落合・町田・溝江・辻村: 波形鋼板ウェブPC箱桁断面の横方向曲げに関する静的載荷・疲労試験, 第10回PCの発展に関するシンポジウム, pp.23-28, 2000.10.
- 7) 阿田・町田・溝江・落合: 波形鋼板ウェブPC橋の梁試験体を用いた静的載荷・疲労試験, 第10回PCの発展に関するシンポジウム, pp.11-16, 2000.10.