

(4) 波形鋼板のウェブ溶接継手部の応力性状と疲労耐久性について

川田工業 (株)	技術研究室	○溝江慶久
川田工業 (株)	技術研究室	町田文孝
オリエンタル建設 (株)	技術部	正会員 辻村 隆
オリエンタル建設 (株)	技術部	正会員 落合 勝

1. はじめに

波形鋼板ウェブ PC 橋に用いられる波形ウェブ鋼板は、橋軸方向の剛性が極めて小さく、軸方向力をほとんど伝達しない。よって、それらを接合する場合、設計上、せん断力の伝達のみ考慮すれば良いと考えられている<sup>1)</sup>。また、張り出し架設により施工される波形鋼板ウェブ PC 橋では、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必要とする。このようなことから、フランスのドール橋では、すみ肉溶接による重ね継手が採用されているが、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>2)</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、国内においてはこれまで鋼橋の主部材の接合に用いられたことはない。

そこで、波形鋼板ウェブの接合に溶接接合を用いる場合を想定し、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について、実物大の梁試験体を用いた静的荷重試験および立体 FEM 解析を実施して、発生応力性状に関する比較検討を行った。さらに、継手の疲労耐久性を確認するため、溶接継手部をモデル化した小型試験体による疲労試験および静的荷重試験に用いた実物大の梁試験体による疲労試験を実施した。

2. 静的荷重試験

2.1. 概要

試験体には、板厚 9mm の波形鋼板ウェブを用い、図-1 に示す4種類の継手形式を採用した。図-2 に試験に用いた実物大梁試験体を示す。なお、継手の溶接施工は、実橋に即して立向きで実施した。

試験では、車両が走行する際のせん断力の変化を想定する目的で、荷重に2台の油圧ジャッキを用い、

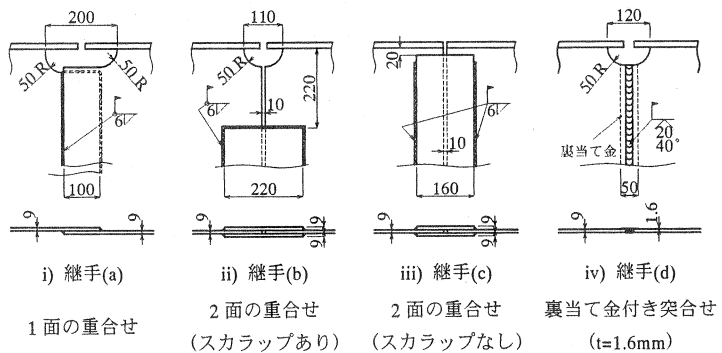


図-1 継手形式

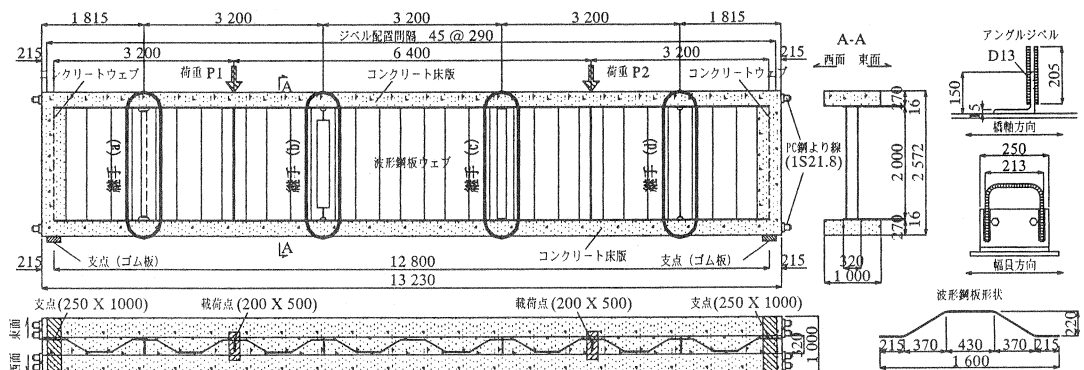


図-2 実物大梁試験体

図-3 に示すような荷重ステップで荷重を与えた。なお、梁理論から求められる各継手位置の平均せん断応力と曲げ応力の比  $\tau/\sigma$  は、本荷重ステップでは図-4 のようになる。図中の破線はスパン 90m 程度の実橋梁において、設計活荷重作用時に曲げ応力が最大となる断面での  $\tau/\sigma$  であるが、本試験体は荷重 P1 のみが作用する際の継手(b)と荷重 P2 のみが作用する際の継手(c)の  $\tau/\sigma$  が、実橋での値と一致するように設計した。

着目部位は以下の3箇所とし、それぞれの着目溶接部止端から5mm離れた位置にゲージ長1mmの単軸および3軸のひずみゲージを貼付して、発生応力を測定した。

- ① 現場溶接継手部のウェブ高中央部 (以下、ウェブ中央部)
- ② 現場溶接継手部の上下縁局部 (以下、継手局部)
- ③ スカラップ部まわし溶接部ウェブ側(以下、スカラップ局部)

2.2. 試験結果

図-5, 6 に、最大荷重 Pmax を 100kN とした場合の荷重ステップ5, 9におけるウェブ接合部西面(図-2 参照)のウェブ中央部と上下フランジ近傍の主応力分布を示す。なお、図中の点線と括弧内数値は直応力を示している。ウェブ中央部では、主応力方向は水平に対して約 45°

であり、最大、最小主応力の絶対値がほぼ等しいことから、せん断応力が卓越していることがわかる。また、添接板を有する継手(b), (c)の継手局部の主応力は、溶接線の法線方向にある。さらに、継手(a), (b), (d)のスカラップ周りの主応力はスカラップ縁の接線方向にある。これは、スカラップによりせん断応力と曲げ応力の複雑な応力場が生じたためと考えられる。

一方、荷重点間にある継手(b), (c)の主応力は、車両の走行を想定した本荷重ステップにより正負に交番している。そこで、各継手に生じる応力範囲を比較するため、荷重ステップ5および9の測定結果を用いて図-7のように整理した。図中の測定応力範囲は、図-5, 6中の□印内測定値から求めた「ステップ5応力」、

「ステップ5応力-ステップ9応力」、

「ステップ9応力」の内の最大値であ

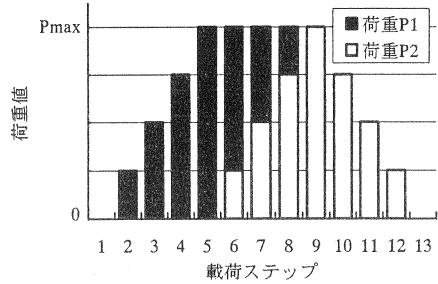


図-3 静的荷重試験時荷重ステップ

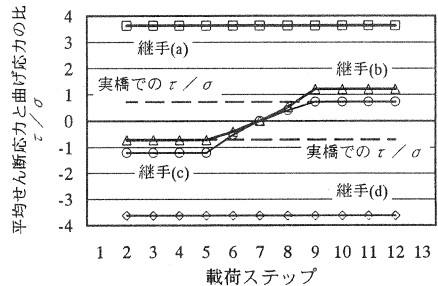


図-4 平均せん断応力と曲げ応力の比

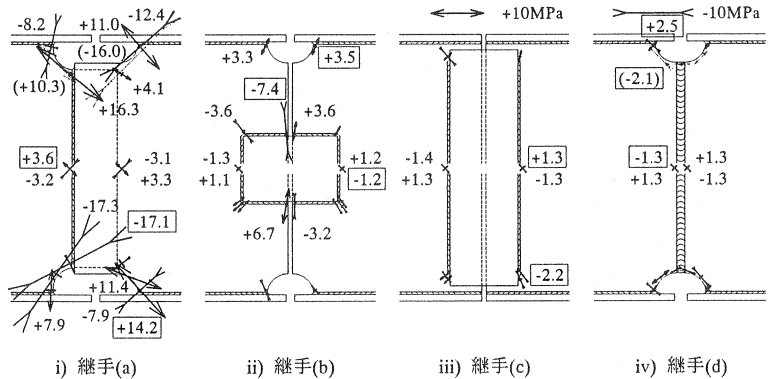


図-5 荷重ステップ5 (P1=100kN, P2=0kN) 時の主応力分布

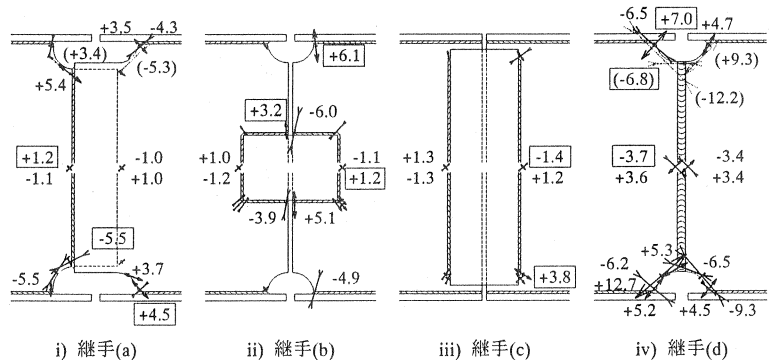


図-6 荷重ステップ9 (P1=0kN, P2=100kN) 時の主応力分布

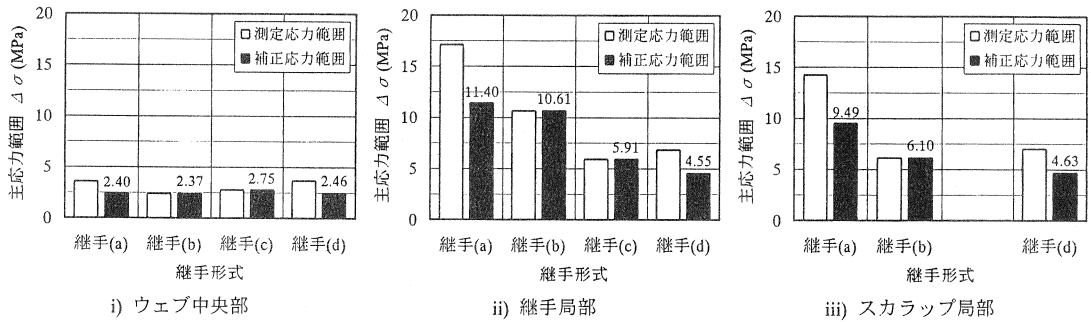


図-7 静的載荷試験結果から推定した主応力範囲

る。なお、図-4 に示したように、本試験では各継手位置の平均せん断応力と曲げ応力の比が異なるため、単純に測定応力範囲を用いて各継手形式を比較することは難しい。そこで、本試験結果ではせん断ひずみに対して曲げひずみの割合が小さかった<sup>3)</sup>ことから、簡易的に平均せん断応力範囲の違いのみに着目し、平均せん断応力範囲が各継手で同一になるように線形補正した「補正応力範囲」を用いて各継手における発生応力範囲を比較することとした。

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、差異はなく、梁理論から求められる継手(b), (c)の平均せん断応力範囲 2.78MPa とほぼ一致する。また、継手局部に着目すると、継手(a), (b)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、継手(c), (d)では約 2 倍となっている。さらに、スカラップ局部における主応力範囲は、ウェブ中央部に比べ、継手(a)では約 4 倍、継手(b), (d)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。

### 3. 有限要素法解析

#### 3.1. 概要

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、汎用構造解析プログラム MSC / NASTRAN for Windows (Ver.4.0)を用い、立体 FEM 解析を行った。

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、図-8 のようにモデル化した。各継手は、実物大試験体の継手(b)設置位置に相当する図中の四角で囲んだ位置にモデル化し、図-9 のように要素分割した。着目位置の要素サイズは約 10×10mm である。なお、継手(a)~(c)のすみ肉溶接部は剛体要素を用いてモデル化し、継手(d)の突合せ溶接部はモデル化しなかった。また、荷重は 500×200mm の範囲に等分布で与え、最大荷重 Pmax を 100kN として解析した。

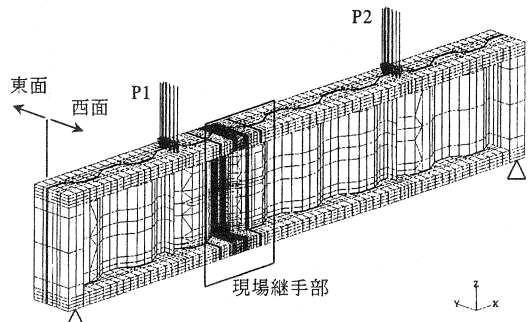


図-8 解析モデル

#### 3.2. 解析結果

図-10 に、図-9 中の○印内に黒く示した要素の解析結果を示す。これら要素は、各着目部で最も大きな主応力範囲が生じた要素である。これより、図-7 に示した静的載荷試験結果と同様、ウェブ中央部について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、スカラップ局部については、継手(a), (b)で大きな主応力範囲となっていることがわかる。

そこで、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、面内膜応力および面外曲げ応力を算出し、応力範囲として整理した結果を図-11 に示す。ここで、継手局部に関しては、継手(a), (c), (d)は橋軸方向直応力から求め、継手(b)は鉛直方向直応力から求めた。また、スカラップ局部に関しては、すべて接線方向の直応力から求めた。これより、継手(a)に関しては、継手局部、スカラップ局部ともに極めて大きな面外曲げ応力範囲が作用しており、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

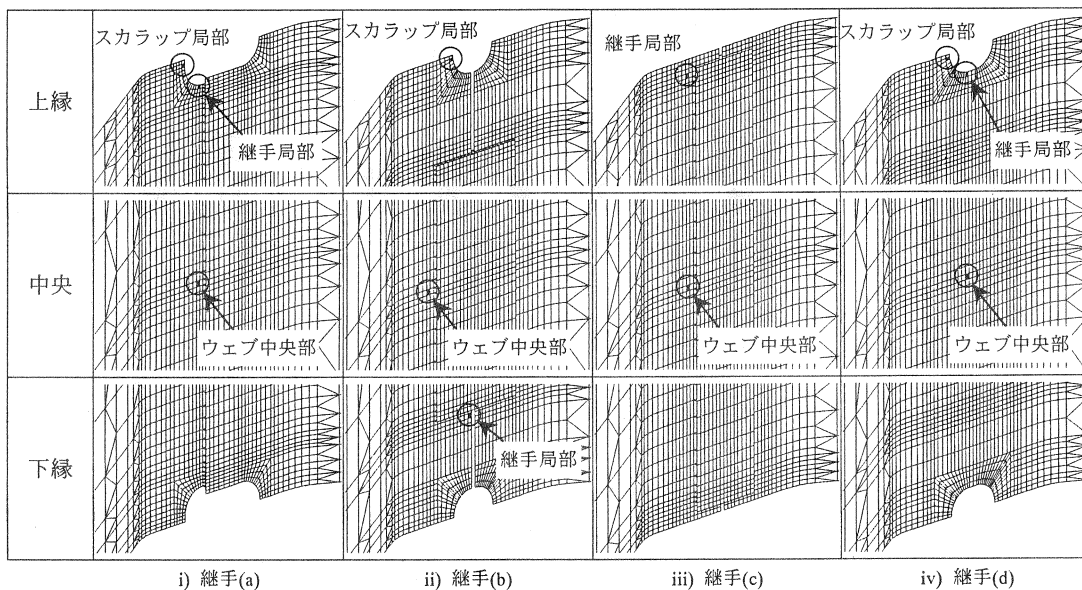


図-9 現場溶接継手部の要素分割

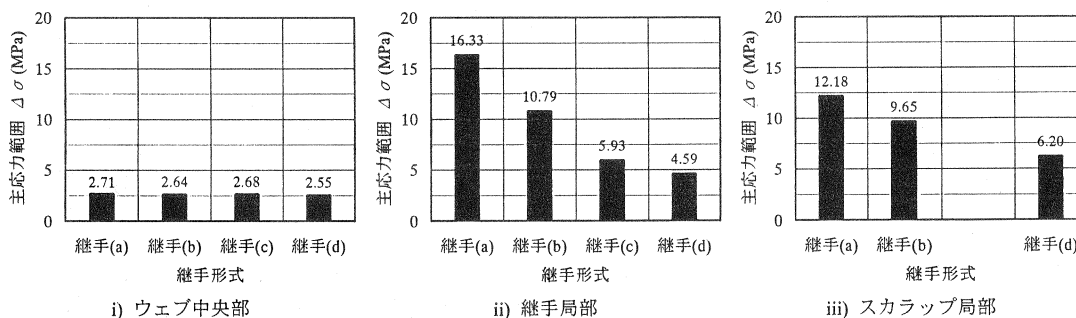


図-10 解析結果から推定した主応力範囲

た、継手(b)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。

#### 4. 小型試験体を用いた疲労試験

##### 4.1. 概要

実物大試験で採用した1面および2面の重合せ継手の基本的な疲労

耐久性を確認するため、図-12の小型試験体を用いた疲労試験を実施した。試験体は、実施工に基づいて立向き溶接により製作された高さ3m×長さ1mのパネルから切り出した。試験では、油圧サーボ型疲労試験機を使用し、載荷波形を正弦波、周波数を10Hz、下限荷重を1.0kNとした。なお、試験時の応力比は0.006~0.028である。

##### 4.2. 試験結果

図-13に試験結果を示す。公称応力範囲は溶接線から35mm離れた位置の表裏面に貼付した単軸のひずみ

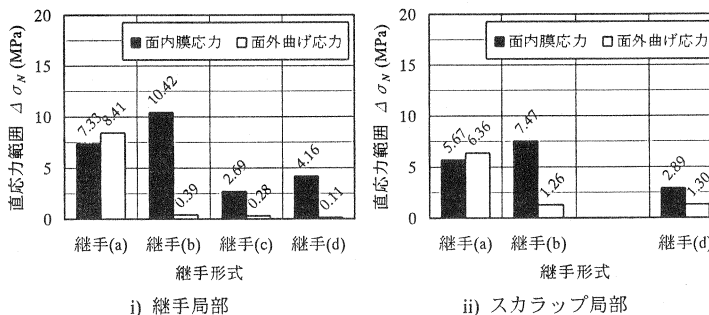


図-11 面内膜応力範囲および面外曲げ応力範囲

ゲージから求めた。1面重ねせ継手の Type-1 は、軸の偏心に伴う板曲げにより、JSSC の重ねせ継手の疲労強度等級 (H 等級) を満足しなかったものの、溶接線が2倍となる Type-2 は F 等級を満足する結果となった。これは、Type-2 試験体の溶接部に生じる応力が、Type-1 試験体に比べ、理論上半減すること、および軸が偏心していないことに起因するものと考えられる。

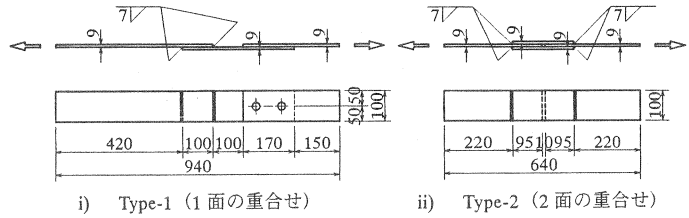


図-12 小型疲労試験体

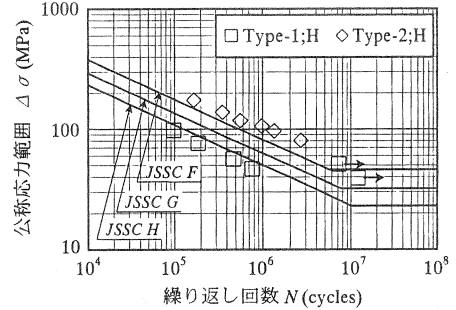


図-13 小型疲労試験結果

## 5. 実物大試験体を用いた疲労試験

### 5.1. 概要

実応力作用下における継手の疲労耐久性を確認するため、静的載荷試験終了後、繰返し回数 1000 万回の疲労試験を実施した。試験には 2 台の油圧サーボ型疲労試験機を使用し、図-14 に示すように、静的載荷試験時の載荷ステップを連続化させた載荷波形で最大 708.5kN の荷重振幅を与えた。荷重振幅値は、静的載荷試験結果と、スパン 90m 程度の実橋を対象とした平面骨組解析結果から決定した。結果として、本疲労試験により確認した疲労耐久性は、継手(a), (d)については 1 車線あたりの日大型車交通量が約 3300 台、継手(b), (c)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<sup>3)</sup>。

### 5.2. 試験結果

93 万回の繰返し載荷終了後、継手(a)上側スカラップ部の載荷点側まわし溶接部に全長 21mm の疲労亀裂を発見した。写真-1 に 1000 万回の繰返し載荷終了後に撮影した疲労亀裂 (全長 58mm) を示す。亀裂はまわし溶接部のウェブ側止端部から発生し、フランジに到達するまで一定速度で伸展した。フランジ到達後、しばらく伸展は止まったものの、その後再び試験終了まで緩やかな速度で伸展した。一方、ウェブ表裏面の伸展方向には若干の差異があった。これは図-11ii)からわかるように、ウェブ軸心の偏心に伴う面外曲げ応力によるものと考えられる。

図-15 に、図-5, 6 に□印で示した位置の試験結果を示す。図-15i)のウェブ中央部に関しては、作用する主応力範囲が小さく、安全照査のために用いた JSSC の H 等級 (重ねせ継手) および F 等級 (裏当て金付き突合せ継手) をそれぞれ下回っており、本試験で設定した日大型車交通量および疲労寿命に対しては、安全性の確認ができたと言える。また図-15ii)の継手局部に関しては、作用する主応力範囲が大きかったものの、局部応力を用いた検討において、荷重伝達型および荷重非伝達型に用いられる疲労設計曲線 E および F 等級をそれぞれ満足した。さらに図-15iii)のスカラップ局部に関しては、局部応力を用いた検討において、荷重伝達

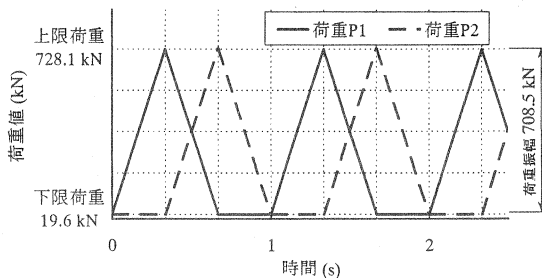


図-14 実物大疲労試験載荷波形

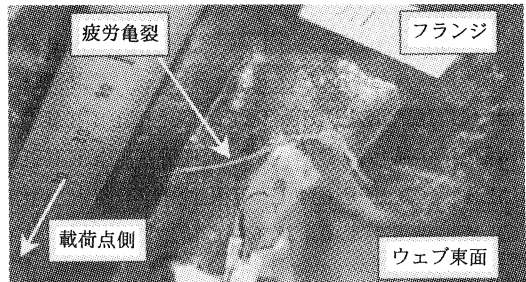


写真-1 継手(a)上スカラップ部に発生した疲労亀裂

型に用いられるF等級を満足したが、疲労亀裂の生じた継手(a)については、同継手の他所と比較すると、亀裂の発生がかなり早期であったことがわかる。よって、今回の亀裂発生要因としては、継手形式による応力集中だけではなく、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注意が必要であると考えられた。

## 6. おわりに

本検討結果をまとめると以下のようなになる。

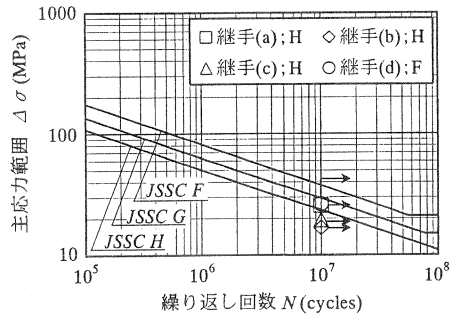
- ① 静的載荷試験の結果、ウェブ中央部に作用する主応力範囲は、各継手ともほぼ同程度であった。また、継手局部に作用する主応力範囲は、ウェブ中央部に比べ、継手(a)、(b)で約5倍、継手(b)、(d)で約2倍であった。さらに、スカラップ局部に作用する主応力範囲は、ウェブ中央部に比べ、継手(a)で約4倍、継手(b)、(d)で約2倍であり、スカラップ幅の広い方が大きくなった。
- ② FEM解析の結果、継手(a)で局部応力が大きくなるのは、ウェブ軸心が偏心していることにより、非常に大きな面外曲げ応力が作用するためであることがわかった。また継手(b)については、膜応力範囲が他の継手に比べ大きくなっており、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。
- ③ 小型試験体を用いた疲労試験の結果、1面重合せ継手のType-1はH等級を満足していないものの、溶接線が2倍となるType-2はF等級を満足していた。
- ④ 実物大試験体を用いた疲労試験の結果、継手(a)上側スカラップ部載荷点側まわし溶接部に疲労亀裂が発生した。大きな面外曲げが発生する部位でもあり、止端仕上げを施すなど疲労耐久性を向上させる対策が必要である。また、その他の部位には疲労亀裂は発生しなかった。

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-16の改善形式について検討を進めている。FEM解析結果から、この継手形式は、継手(a)と比較すると、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。

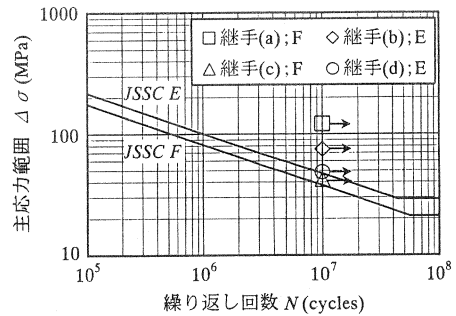
なお、本研究を実施するにあたり、早稲田大学・依田照彦教授には数々の有益なご指導をいただき、ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

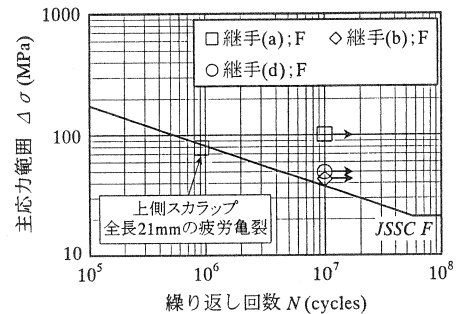
- 1) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブPC橋 計画マニュアル(案)，1998.12.
- 2) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.4.
- 3) 阿田芳久，町田文孝，溝江慶久，落合勝：波形鋼板ウェブPC橋の梁試験体を用いた静的載荷・疲労試験，第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2000.10.



i) ウェブ中央部



ii) 継手局部



iii) スカラップ局部

図-15 実物大疲労試験結果

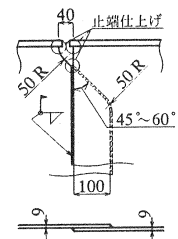


図-16 1面重合せ継手の改善形式