

波形鋼板ウェブの現場溶接継手構造の研究

溝江 慶久*1・町田 文孝*2・辻村 隆*3・落合 勝*4

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、製作時や輸送時の制限から、2～3波長のブロックに分割され、現場にて接合される。国内においてこれまでに採用された接合方式は、添接板を用いない1面重合せの高力ボルト接合¹⁾、箱桁内側に溶接されたフランジどうしの高力ボルト接合²⁾、鋼橋において一般的に用いられている突合せ溶接接合³⁾の3種類であり、静的載荷試験およびせん断座屈試験^{4)～6)}を実施して、継手部のせん断伝達性能およびせん断座屈耐力について検証がなされた。

一方、フランスのドール橋⁷⁾においては、

- ① 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ことから、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よいと考えられている²⁾こと
- ② 張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に、許容されるボルト拡大孔により架設誤差を吸収し、また突合せ接合とした場合に、継手の品質を確保しながら、架設誤差を吸収するには多くの労力を必要とすることなどの理由から、すみ肉溶接による重ね継手が採用されている。しかし、本継手構造は、日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」⁸⁾(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。

以上のようなことから、波形ウェブ鋼板の現場継手としては、架設誤差の吸収が容易で、かつ継手性能に優れた溶接継手構造を採用することが主要な課題と考えられる。

そこで、本研究では、架設誤差を吸収可能と思われる4種類の溶接継手構造について、実物大の試験体を用いた静的載荷試験と線形の立体FEM解析を実施して、面内曲げ・せん断作用時の発生応力の違いを比較した。また、同試験体を用いた繰返し回数1000万回の疲労試験を実施して、現場溶接接合部の疲労耐久性について確認した。

さらに、これらの検討成果を踏まえ、1面の重合せ継手について、改善構造を提案し、発生応力の低減効果について述べた。また、箱断面をモデル化したFEM解析を実施して、面外曲げ作用時の発生応力について、上記4種類の継手構造の結果とともに示した。

2. 静的載荷試験

2.1 概要

実物大試験体を図-1に、各部材の諸元を表-1に示す。試験体には、図-2に示す板厚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、上下コンクリート床版との連結には、フランジ上に配した

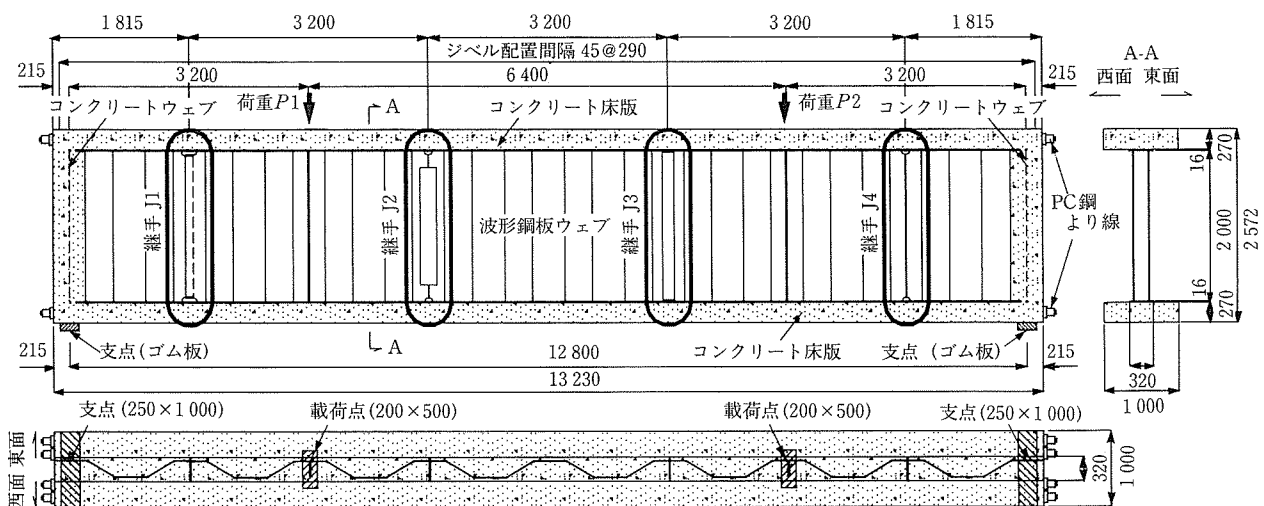


図-1 実物大試験体

*1 Yoshihisa MIZOE: 川田工業(株) 技術開発本部 技術研究室
 *2 Fumitaka MACHIDA: 川田工業(株) 技術開発本部 技術研究室
 *3 Takashi TSUJIMURA: オリエンタル建設(株) 技術部
 *4 Masaru OCHIAI: オリエンタル建設(株) 技術部

表-1 各部材の諸元

床版コンクリート	$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$
波形ウェブ鋼板	$t = 9 \text{ mm}$ (SM490 YB)
フランジ鋼板	$t = 16 \text{ mm}$ (SM490 A)
アングルジベル	L-150×150×15×250
PC鋼材	1S21.8S (SWPR19L)

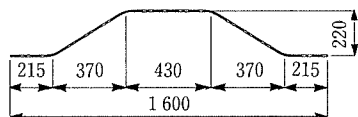


図-2 波形ウェブ鋼板

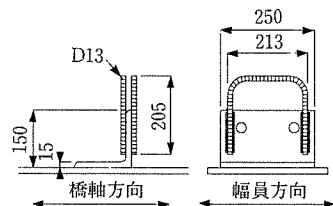


図-3 アングルジベル

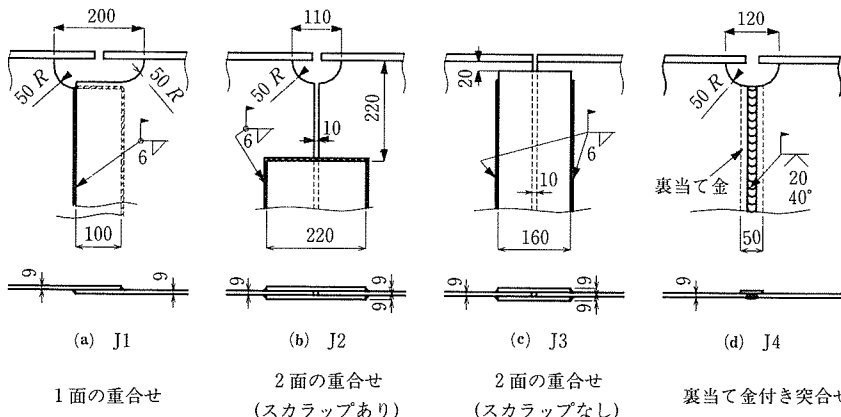


図-4 ウェブ鋼板の継手構造

図-3のアングルジベルによる接合方式を用いた。

本研究で検討したウェブ鋼板の継手構造は図-4に示す4種類である。

J1, J2, J4では、ウェブフランジの溶接とそのまわし溶接の施工性ならびにウェブ継手溶接の施工性にも配慮し、50Rのスカラップを設けた。また、溶接継手の疲労耐久性は、溶接姿勢などの作業環境に大きな影響を受けるため、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。写真-1に試験体の概観を示す。

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、載荷に2台の油圧ジャッキを用い、図-5に示すような載荷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 τ/σ は、本載荷ステップでは図-6のようになる。図中の破線はスパン約90mの実橋において、設計活荷重作用時に曲げ応力が最大となる断面での τ/σ であるが、本試験体は荷重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 τ/σ が、実橋での値と一致するように設計した。

着目部は、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、ウェブ西面(図-1)の表面応力を測定した。

2.2 試験結果

図-7, 8に、最大荷重 P_{max} を100kNとした場合の載荷ステップ5, 9におけるウェブ現場接合部西面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。これより、ウェブ中央部では、主応力方向は水平に対して約45度方向であり、かつ最大、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分かる。また、添接板を有するJ2, J3の継手局部の主応力方向は、溶接線の法

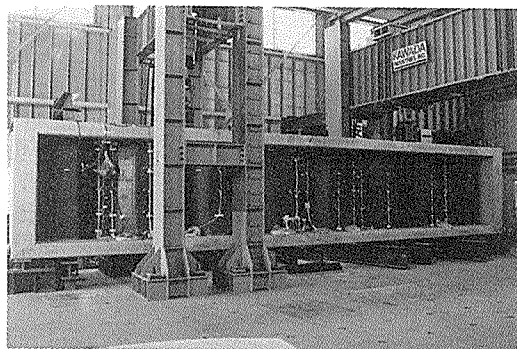


写真-1 実物大試験体の概観

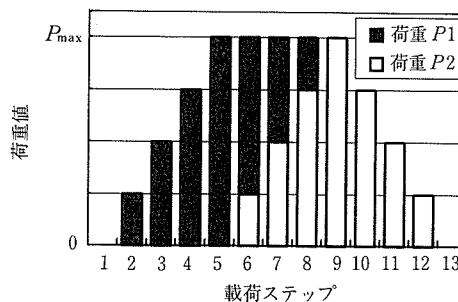


図-5 静的載荷試験時載荷ステップ

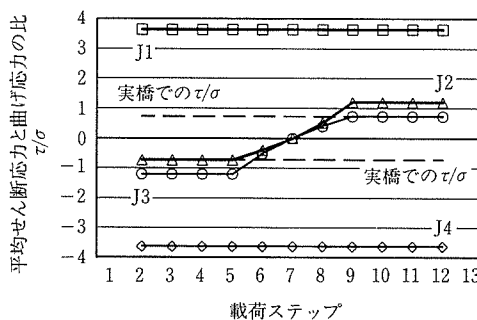


図-6 平均せん断応力と曲げ応力の比

線方向である。さらに、J1, J2, J4のスカラップ周りの主応力方向は、スカラップ縁の接線方向である。

一方、載荷点間にあるJ2, J3の主応力は、車両の走行を想定した本載荷ステップにより正負に交番している。そこで、各継手の応力範囲を比較するため、載荷ステップ5および9の測定結果を用いて図-9のように整理した。図中

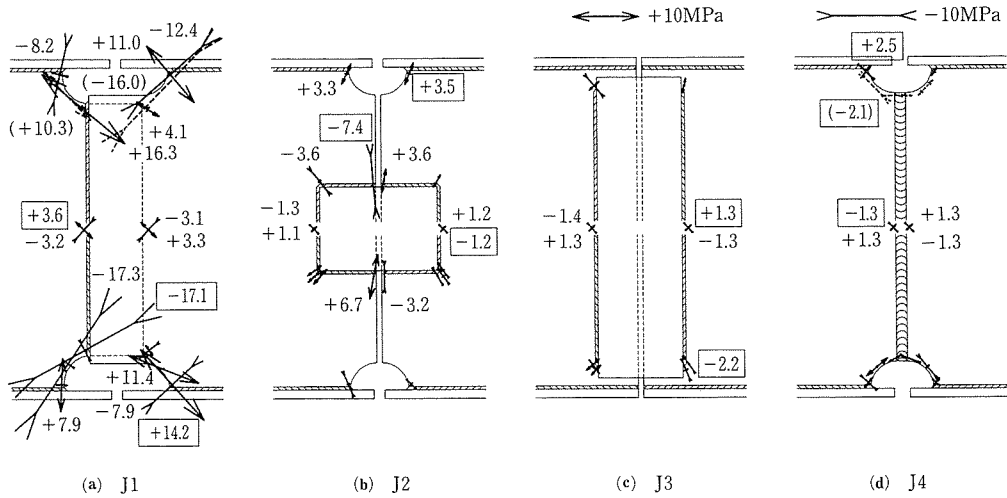


図-7 荷重ステップ5 ($P_1=100\text{ kN}$, $P_2=0\text{ kN}$) 時の主応力分布

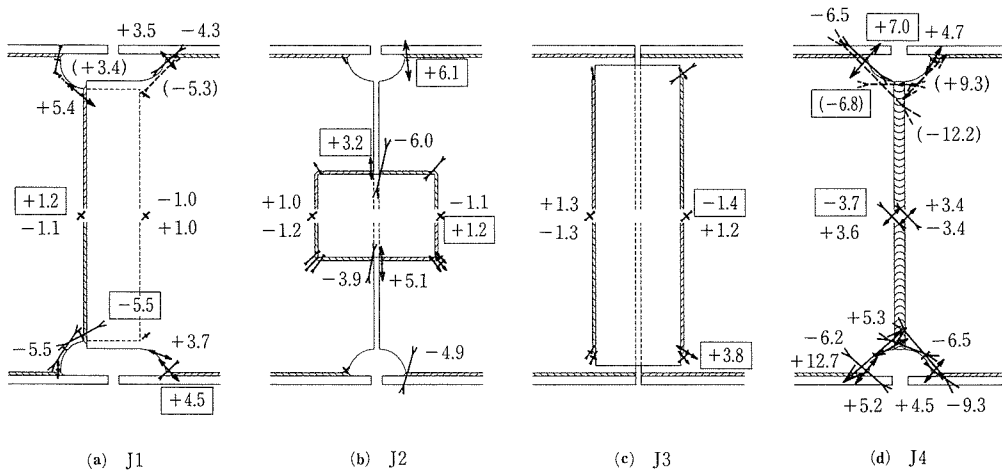


図-8 荷重ステップ9 ($P_1=0\text{ kN}$, $P_2=100\text{ kN}$) 時の主応力分布

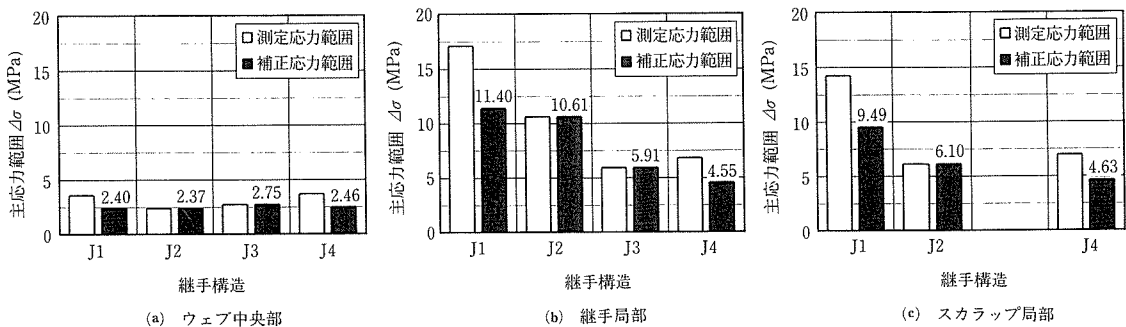


図-9 静的荷重試験結果から推定した主応力範囲

の測定応力範囲は、図-7、8中の□で囲んだ測定値から求めた①|ステップ5応力|、②|ステップ5応力-ステップ9応力|、③|ステップ9応力|のうちの最大値である。なお、図-6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⁹⁾ことから、簡易的に平均せん断応力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2.5 MPa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2.78 MPa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。

3. FEM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、線形の立体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-10のようにモデル化した。表-2に解析に用いた材料定数を示す。各継手は、実物大試験体の継手J2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-11のように要素分割した。着目位置の要素サイズは約10 mm×10 mmである。なお、継手J1, J2, 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。また、荷重は500 mm×200 mmの範囲に等分布で与え、最大荷重 P_{max} を100 kNとして解析した。

3.2 解析結果

図-12に、図-11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、西面の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-9に示した静的載荷試験結果と同様、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分かる。なお、図-12(b)の継手局部について、J2, J3, J4の解析結果が図-9(b)の補正応力範囲とほぼ一致したのに対し、J1は解析値の方が大きい値を示した。これは、主応力範囲が最大となった着目位置が、J2, J3, J4

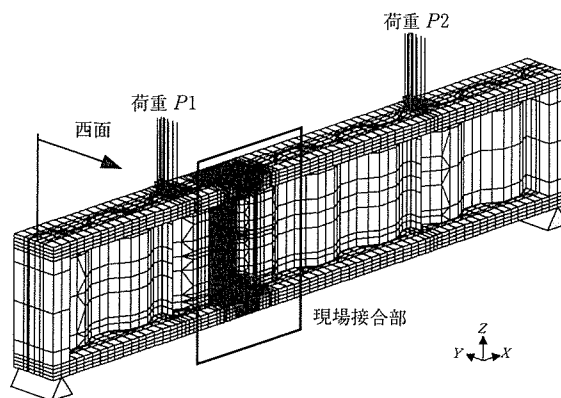


図-10 解析モデル

表-2 解析に用いた材料定数

	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
コンクリート	25.0	0.15
鋼	205.8	0.3

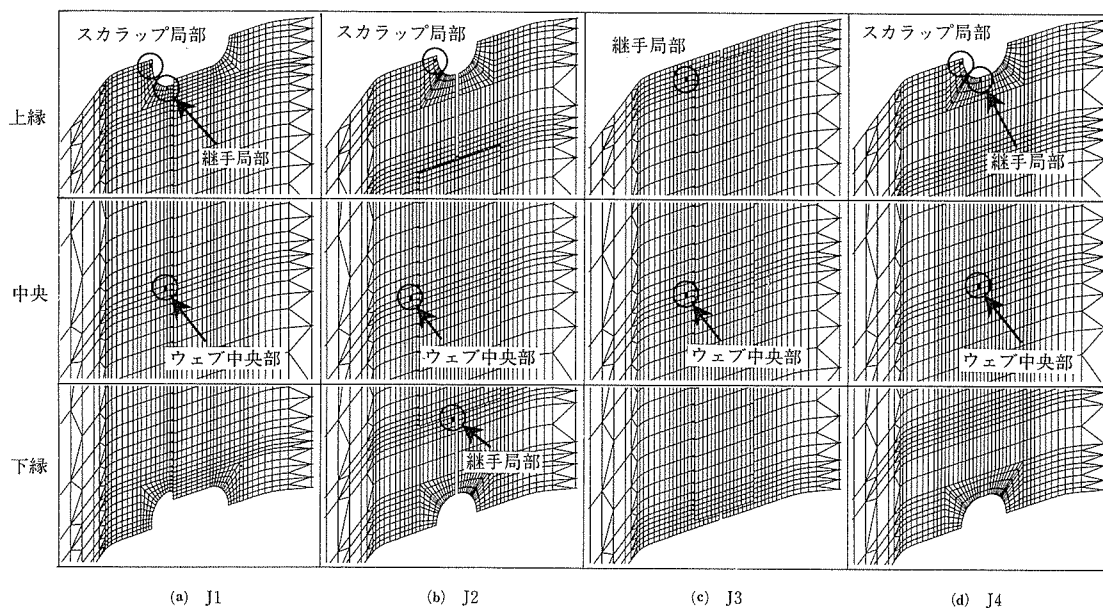


図-11 現場溶接接合部の要素分割

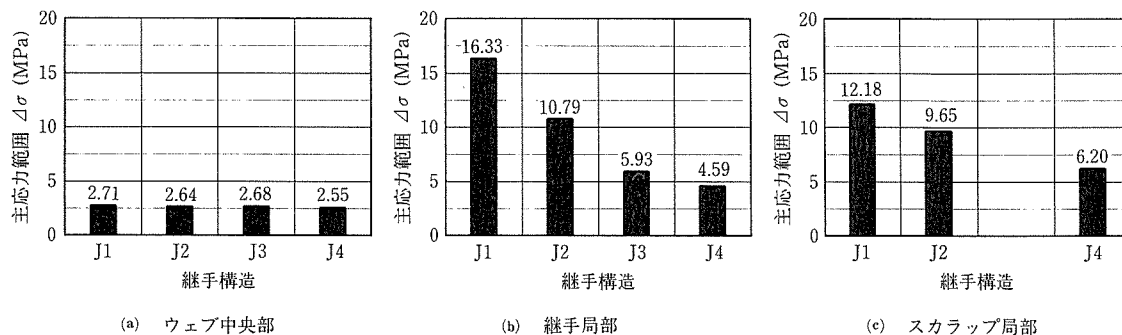


図-12 解析結果から推定した主応力範囲

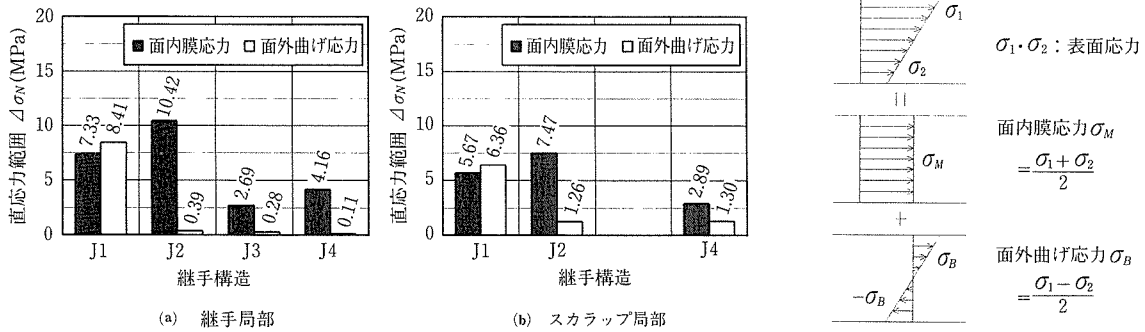


図-13 面内膜応力範囲および面外曲げ応力範囲

では試験時、解析時ともに載荷点側であったのに対し、J1では試験時に反載荷点側、解析時に載荷点側と異なる位置であったために、せん断および曲げによる力の流れが異なったことによるものと考えられる。

さらに、図-12(b)、(c)の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-13に示す。ここで、継手局部に関しては、J1、J3、J4は橋軸方向直応力から求め、J2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、J1に関しては、継手局部、スカラップ局部ともに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。

4. 疲労試験

4.1 概要

実応力作用下におけるウェブ現場溶接接合部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708.5 kNの荷重振幅を与えた。荷重振幅値は、静的載荷試験結果と、スパン約90 m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台の大型車が同時載荷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、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⁹⁾。

4.2 試験結果

93万回の繰返し載荷終了後、継手 J1 上側スカラップ部の載荷点側まわし溶接止端部に全長21 mmの疲労亀裂を発生した。写真-2に1000万回の繰返し載荷終了後に撮影した疲労亀裂(全長58 mm)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

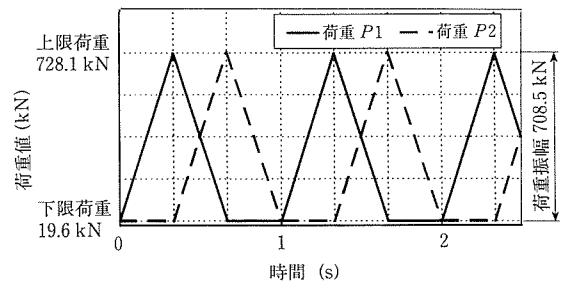


図-14 疲労試験時載荷波形

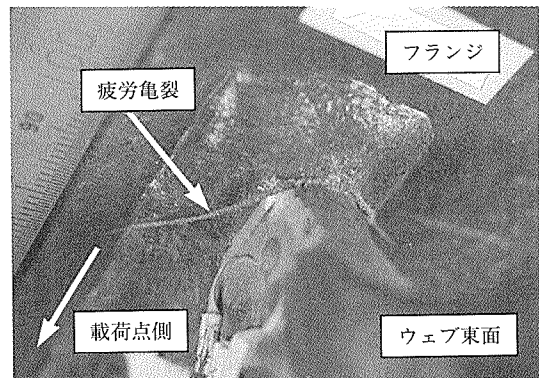
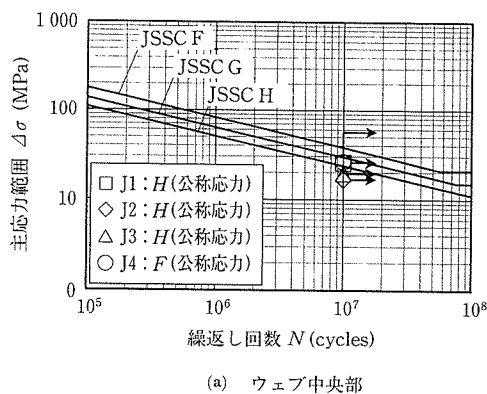


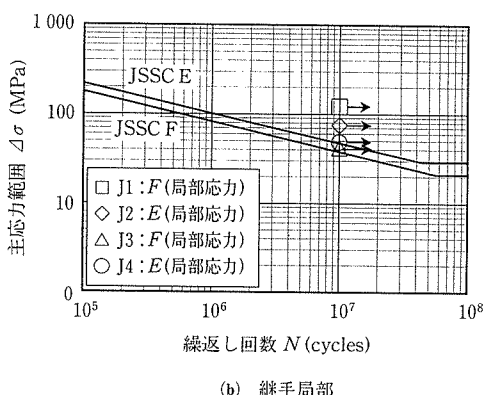
写真-2 継手 J1 上スカラップ部に発生した疲労亀裂

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。この疲労亀裂は図-7(a)に示したスカラップ局部でのウェブとフランジを切り離すような引張応力によって生じたものと予想され、亀裂が主応力に対して直交方向に伸展することを考慮すれば、亀裂発生の原因として妥当であると考えられる。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-13(b)から分かるように、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る。

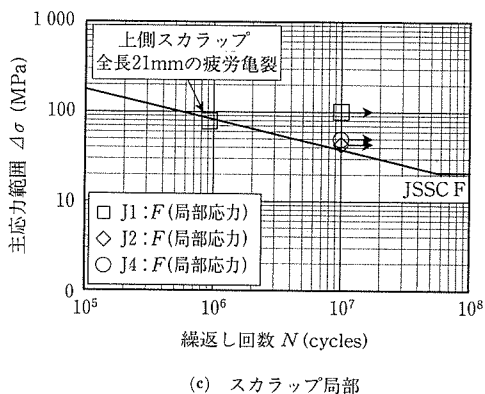
図-15に、図-7、8に□で囲んだ位置での試験結果を示す。縦軸には、最大荷重 P_{max} を708.5 kNとした静的載荷試験時の測定結果を示した。図-15(a)のウェブ中央部に関しては、作用する主応力範囲が小さく、安全照査のために用いたJSSCのH等級(重合せ継手)およびF等級(裏当て金付き突合せ継手)をそれぞれ下回り、本試験で設定した疲労照査条件に対しては、安全性の確認ができた。ただし、比較したそれぞれの疲労強度曲線の打ち切り限界に対して、あまり余裕がないため、大型車台数が増えたり、発生



(a) ウェブ中央部



(b) 継手局部



(c) スカラップ局部

図 - 15 疲労試験結果

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。

また、図 - 15 (b)の継手局部に関しては、それぞれ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）、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 - 15 (c)のスカラップ局部に関し、J2、J4はF等級を上回ったが、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ことが分かる。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、本継手構造を採用する場合には、まず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

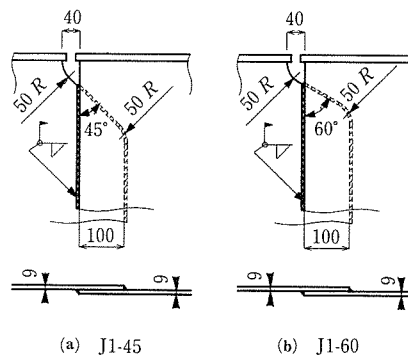


図 - 16 1面重ねせ継手の改善構造

考えられた。

本継手構造の亀裂発生には面外曲げ応力の関与が多分に予想されるため、単純に公称応力範囲を用いて疲労設計を行うことは難しい。よって、さまざまな作用応力下での詳細なFEM解析を実施し、局部応力に対する補正係数を把握しておくとともに、面外曲げの影響が大きい本橋梁形式にとっての最適な継手構造ディテールを選定しておく必要があると考えられた。

5. FEM解析による改善継手構造の検討

以上の検討結果から、1面の重ねせ継手は、ウェブ中央部では、その他の検討継手と同等のせん断伝達機能を果たすものの、ウェブ軸心が偏心することにより、継手局部およびスカラップ局部に大きな面外曲げを生じることが分かった。また、疲労試験においても、板の表裏で伸展方向の異なる疲労亀裂が比較的早期に発生した。

よって、1面の重ねせ継手の適用にあたっては、面外曲げに対する拘束力を高めるような構造改良が必要と考えられる。そこで、ここでは、図 - 16 に示す改善構造を提案する。これらの継手は、図 - 4 (a)の水平溶接部を斜めにする事で継手コーナー部に発生する応力を緩和するとともに、スカラップ幅を狭くし、断面欠損率を小さくすることで、面内膜応力を低減させ、さらに局部曲げに対する拘束力を高める効果があるものと予想される。

5.1 面内曲げ・せん断に対する検討

まず、上述したFEM解析と同様、図 - 10の解析モデル内に図 - 17のように要素分割した現場接合部を適用し、面内曲げ・せん断に対する検討を行った。

図 - 18 に、解析より得られた各着目部（図 - 17）のウェブ西面での主応力範囲を図 - 12の継手J1の結果と併せて示す。なお、スカラップ局部については、西面で卓越したピーク値が見られなかったことから、東面で得られた結果を示した。これより、ウェブ中央部については、図 - 12 (a)と同様、継手構造による差異は見られなかった。また、継手局部およびスカラップ局部の主応力範囲は、J1に比べ、ほぼ半減している。この応力低減による疲労強度改善の効果としては、疲労強度曲線の傾きを3とすると、5倍以上の疲労寿命が期待される。

一方、継手局部およびスカラップ局部の表裏の直応力値

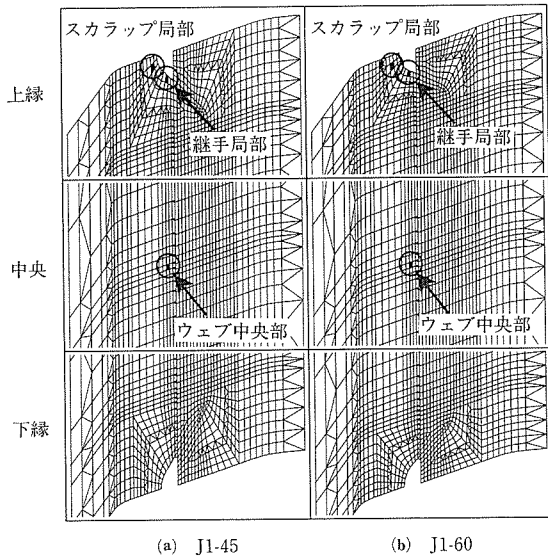


図-17 J1-45, J1-60の要素分割

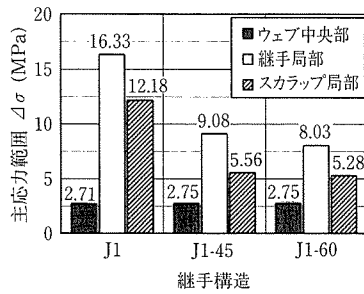
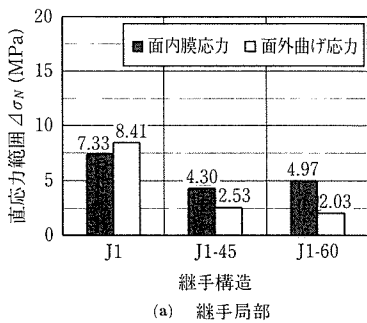
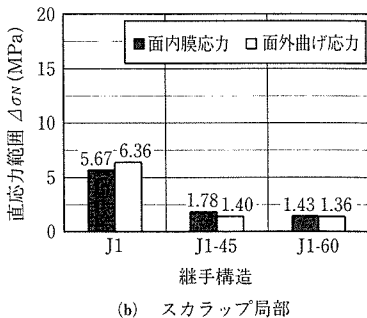


図-18 J1-45, J1-60の主応力範囲



(a) 継手局部



(b) スカラップ局部

図-19 J1-45, J1-60の面内膜応力範囲および面外曲げ応力範囲

から面内膜応力、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-19に示す。なお、継手局部については、立向き溶接に直交した方向の直応力から求め、スカラップ局部については、スカラップ縁に沿った方向の直応

力から求めた。図-19(a)より、継手局部に関しては、J1に比べ、面内膜応力が約60%、面外曲げ応力が約30%に低減した。また、スカラップ局部に関しては、面内膜応力、面外曲げ応力ともに20%~30%に応力が低減しており、ウェブフランジすみ肉溶接部に直交する方向の応力がかなり小さくなった。

5.2 面外曲げに対する検討

波形鋼板ウェブPC橋は、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い。そのため、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（以下、首溶接部）やウェブ現場溶接接合部に大きな局部応力が発生する恐れがある。

そこで、図-20に示す箱断面¹⁰⁾をモデル化した図-21の片断面モデルを用いて、面外曲げ作用時にウェブ現場溶接接合部に生じる応力性状を解析により検討した。図-20の断面は、スパン約90mの実橋を対象とした平面骨組解析において、設計活荷重載荷時に鋼フランジの曲げ応力が最大となった位置の断面にほぼ等しい。なお、解析時の要素特性および材料定数は面内曲げ・せん断に関する図-10の

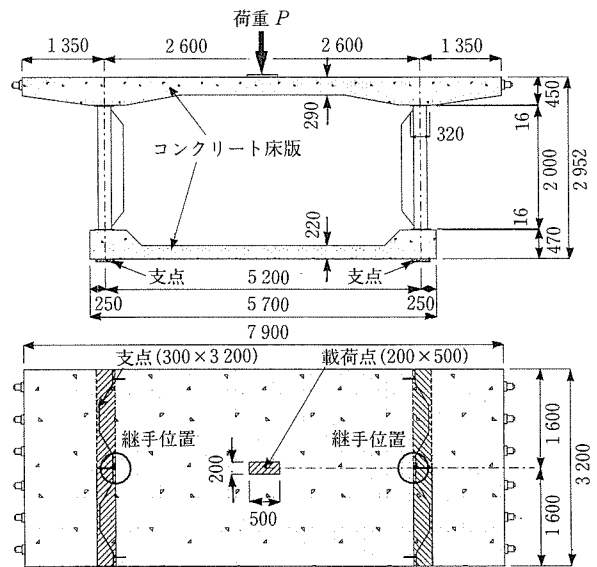


図-20 箱断面形状

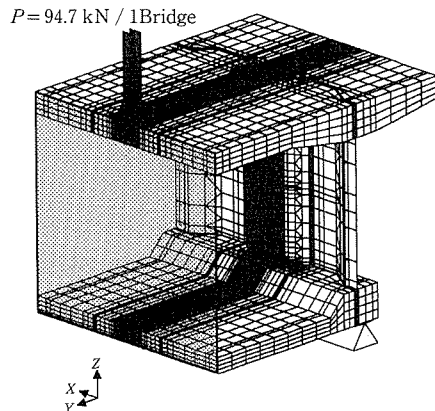


図-21 箱断面解析モデル

モデルと同様とした。

一方、荷重位置は、コンクリート上床版の中央部1点とし、94.7kNの荷重値を与えた。この荷重値は、事前に行ったスパン約90mの実橋モデルのFEM解析において、大型車2台が同時荷重された際に生じる首振り角が本モデルにおいて生じるように設定した。

解析の結果、ウェブに生じる応力は、箱内側に位置するウェブでは圧縮、箱外側に位置するウェブでは引張りとなることが分かった。よって、箱内側に設置した本モデルのウェブ現場接合部では、最小主応力が卓越し、その主応力の方向はほぼ鉛直となっていた。図-22に、継手局部および首溶接部の箱内面での最小主応力のピーク値を示す。これより、継手局部に関しては、継手J3、J1-45、J1-60で応力が高くなっており、スカラップ部のみモデル化したJ4に比べ、約2.5倍の応力値となっていた。これは、添接板や重合せ部がウェブ上縁に近く、首振りによる局部曲げの作用を強く受けたためと考えられる。ただし、J1に関しては、重合せ部がウェブ上縁に近いにもかかわらず、応力はかなり小さくなっている。これは、スカラップ幅が重合せ長よりも広いため、首振りによりスカラップ端部から伝達された応力が直接継手局部に作用することなく、ウェブ全体に伝達されたためと考えられる。なお、添接板の位置がウェブ上縁からかなり離れているJ2および添接部をモデル化しなかったJ4については、ウェブ上縁での剛性が小さいために、面外曲げが緩和され、応力が小さくなったものと考えられる。

一方、首溶接部については、スカラップ幅の広いJ1で応力は最も大きくなっており、スカラップを設けず、添接板をウェブ上縁まで長くしたJ3の約2倍となったが、他の継

手に関しては、ほぼ等しい応力値となった。

図-22で着目した要素の表裏の主応力値から求めた面内膜応力と面外曲げ応力を図-23に示す。これより、継手局部に関しては、J1-45、J1-60の面外曲げ応力が、他の継手構造に比べ大きくなった。これは、着目部が斜め溶接線のスカラップ側端部であり、ウェブの面外剛性が変化する位置であったためと考えられる。また、J1-45とJ1-60を比較すると、斜め溶接線の角度の緩いJ1-60の方が面外曲げが1割ほど大きくなっており、首溶接線に近い角度の方が強い局部曲げを受ける結果となった。

さらに、首溶接部に関しては、1面の重合せであるJ1、J1-45、J1-60で若干面外曲げが大きくなっているものの、面外曲げに比べ、面内膜応力が卓越しており、スカラップ幅が狭く、断面欠損が少ないJ3、J1-45、J1-60が有効であると考えられた。

以上のことから、スカラップ幅の広いJ1、J2、J4では、スカラップ部で応力が高くなったものの、継手局部での応力集中が緩和される結果となった。また、スカラップがなく、添接板が首溶接部に近いJ3やスカラップ幅が狭く、重合せ部が首溶接部に近いJ1-45、J1-60では、断面欠損が少ないため、スカラップ部での応力が小さいものの、ウェブ上縁での面外剛性が高いため、継手局部で応力が高くなる結果となった。疲労設計を行ううえでは、首溶接部は、荷重伝達型の溶接継手に属し、荷重非伝達型の継手局部(J1-45、J1-60については荷重伝達型)よりも厳しい照査をする必要がある。よって、面外曲げに対しては、ウェブ上縁の面外剛性が高いJ3、J1-45、J1-60の方が有効であると考えられる。

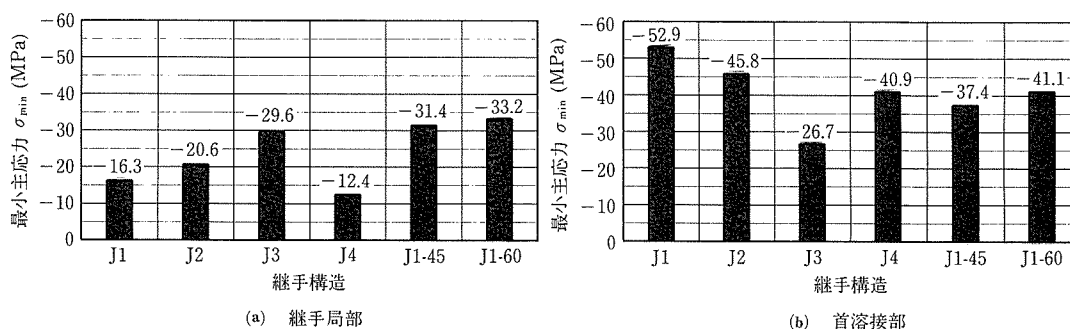


図-22 箱内面での最小主応力

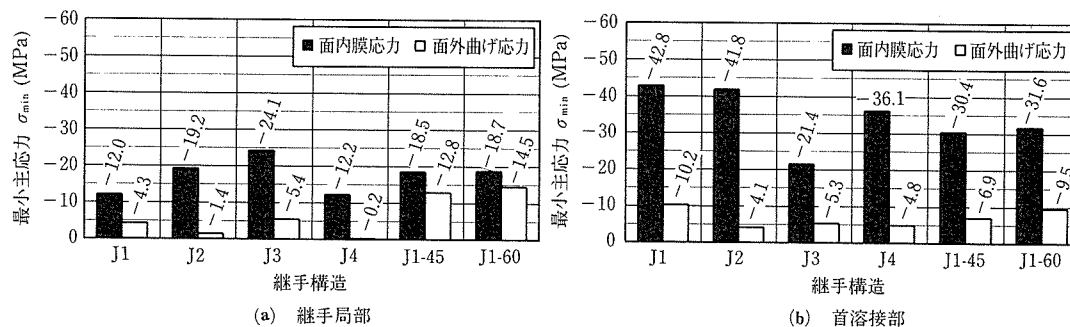


図-23 面外曲げ作用時の面内膜応力および面外曲げ応力

6. おわりに

本検討結果をまとめると以下ようになる。

- ① 実物大試験体を用いた静的載荷試験の結果、ウェブ現場溶接継手部の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が、継手 J1, J2 の局部応力は J3, J4 に比べ大きくなった。
- ② 実物大試験体をモデル化したFEM解析の結果、継手 J1 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、大きな面外曲げ応力が作用するためであることが分かった。また継手 J2 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 実物大試験体を用いた疲労試験の結果、継手 J1 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、その他の部位での疲労亀裂の発生はなかった。
- ④ 1面の重合せ継手に関し、改善構造を提案して、面内曲げ・せん断に対する検討を行った結果、提案した改善構造では、1面重合せの既往の検討継手に対し、主応力範囲がほぼ半減し、5倍以上の疲労寿命増加が期待された。

- ⑤ 面外曲げに対する検討の結果、面外曲げに対しては、スカラップ幅を狭くし、かつウェブ上縁での面外剛性を高くすることが有効であると考えられた。

なお、本研究の実施にあたり、依田照彦 早稲田大学 教授には数々の有益なご指導をいただき、ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 加藤(照), 芦塚, 加藤(卓), 日高: 本谷橋(波形鋼板ウェブPC箱桁橋)の設計について, 第7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論文集, pp.747~752, 1997.10
- 2) 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
- 3) 近藤, 小林, 清水, 服部: 波形鋼板ウェブPC箱桁橋新開橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol.28, No.9, pp.13~20, 1994.9
- 4) 山口(恒), 山口(隆), 池田: 波形鋼板ウェブを有する複合PC構造のせん断挙動について, 第5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論文集, pp.339~344, 1995.10
- 5) 上平, 柳下, 蛭名, 園田: ウェブに波形鋼板を有するPC箱桁橋の鋼板の継手方法に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.9, No.2, pp.9~17, 1998.7
- 6) 水口, 芦塚, 依田, 佐藤, 桜田, 日高: 本谷橋の模型実験と実橋載荷実験, 橋梁と基礎, Vol.32, No.10, pp.25~34, 1998.10
- 7) Combault, Lebon, Pei: Box-Girders Using Corrugated Steel Webs and Balanced Cantilever Construction, FIP Symposium '93 Kyoto, pp.417~424, 1993.10
- 8) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4
- 9) 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論文集, pp.11~16, 2000.10
- 10) 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論文集, pp.23~28, 2000.10

【2000年10月16日受付】