

(5) 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

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

1. はじめに

波形鋼板ウェブPC橋は、通常のPC箱桁に比べ、一般的にウェブの横方向剛性が小さい。そのため、上床版に横締めプレストレスを導入する場合や活荷重を受ける場合、上床版に生じるたわみ変形が大きくなることが懸念される。上床版にたわみ変形が生じると、波形鋼板ウェブと上下床版の接合部は首振りの作用を受け、ウェブの接合部近傍やずれ止めに大きな局部応力が生じると考えられる¹⁾。

また、波形鋼板は製作・運搬・施工の制限等により、橋軸方向に分割されて現場に搬入されることが多い。それらの接合には現場継手が設けられるが、継手の形式によっては波形鋼板ウェブの横方向剛性が高まる場合がある。そのため、継手部近傍においては一般部と比べて首振りにより強く拘束されることとなり、局部的に過大な応力が生じる可能性がある。

そこで、フランジプレートに有する波形鋼板ウェブPC橋を対象とした箱桁試験体を用いて静的載荷試験および疲労試験を実施し、断面の変形挙動、面外曲げ作用下での首溶接部やずれ止めに関する応力性状および疲労耐久性について検討を行った²⁾。

2. 試験概要

2.1 試験体の概要

試験体一般図を図-1に示す。試験体は、残留応力や製作性によるスケール効果を排除するために、ほぼ実物大相当の大型箱断面のものを用意した。試験体を使用した波形鋼板ウェブは厚さ9mm(SM490YB)、フ

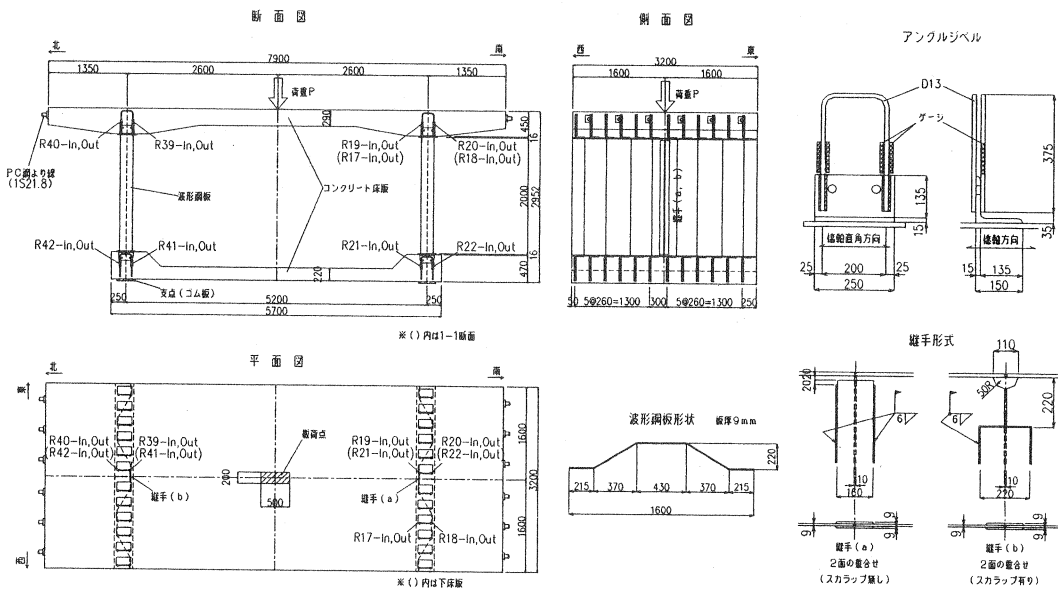


図-1 箱型試験体一般図

ランジプレートは厚さ 16mm (SM490A) であり、そのフランジプレートに、D13 のU字筋を両面に溶接したアングルジベルを介して上下床版と接合させている。上床版にはアングルジベルを約 260mm、横締め PC 鋼材 (SWPR19L, 1S21.8S) を約 520mm でそれぞれ設置し、下床版にはアングルジベルのみを約 260mm 間隔で設置した。波形鋼板ウェブの橋軸方向中央位置に 2 面せん断の重ね継手を設けており、一方のウェブはスカラップ無し [継手(a)], もう一方のウェブはスカラップ有り [継手(b)] とした。なお、実橋の変形モードに可能な限り近づけるため、波形鋼板ウェブの最外縁に垂直リブを設けている。

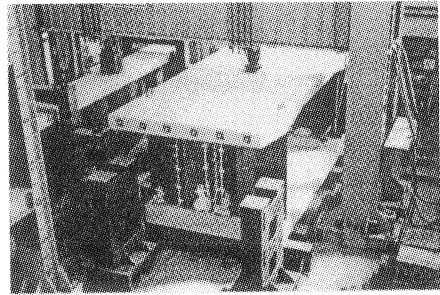


写真-1 荷重試験状況

2. 2 試験方法

(1) 横締め緊張時

横締め鋼材の緊張は左右交互に 1 本ずつ、片引きで行った。計測は、フランジプレートに生じる首振り作用や継手の形式により生じる差異に着目し、ウェブのフランジプレート近傍の応力状態や、アングルジベルに生じる応力状態について測定を行なった。

(2) 静的荷重試験

静的荷重試験は、油圧サーボ試験機を使用し図-2 に示す荷重ステップで、輪荷重相当荷重を上床版中央に荷重した(写真-1 参照)。横締め緊張時と同様に、ウェブのフランジプレート近傍の応力状態や、アングルジベルに生じる応力状態を測定し、さらに、全体変形挙動を確認するため、上下床版の鉛直変位およびウェブの水平変位を測定した。なお、荷重荷重を設定するに当たり、事前に全橋モデルと試験体モデルの FEM 解析を行った。その結果、支間 90m 相当の実橋モデルにおいて、衝撃係数を考慮した大型車が 2 車線同時に荷重された際に生じるフランジの首振り角(0.256°)を試験体で再現できる荷重は 94.7kN となった。

(3) 疲労試験

荷重方法は、図-3 に示すような正弦波で荷重を行った。繰返し回数は、1000 万回とし、途中約 50 万回の繰返し回数ごとに、静的荷重実験を実施した。計測は、アングルジベルのU字筋やウェブ-フランジプレートの接合部近傍およびウェブ継手近傍について行なった。

なお、疲労試験における荷重振幅値(189.3kN)は、実橋モデルにおける FEM 解析により得られる首振り角を、試験体モデルで再現する際の荷重の 2 倍の値であり、試験体に生じる首振り角度も 2 倍となる。このため、図-4 に示すように、この荷重振幅値で 1000 万回の繰返し荷重を行

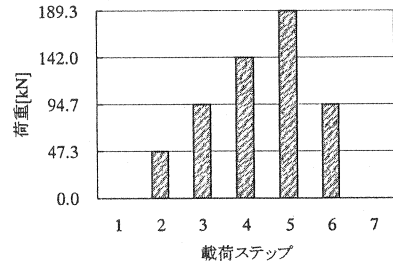


図-2 荷重荷重方法 (静的荷重)

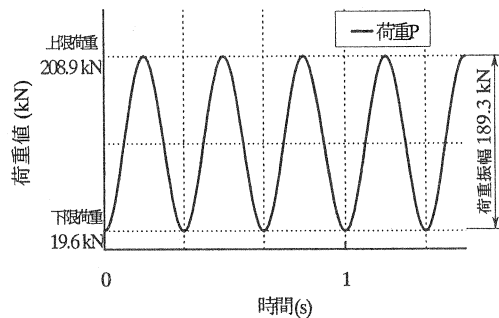


図-3 荷重荷重方法 (繰返し荷重)

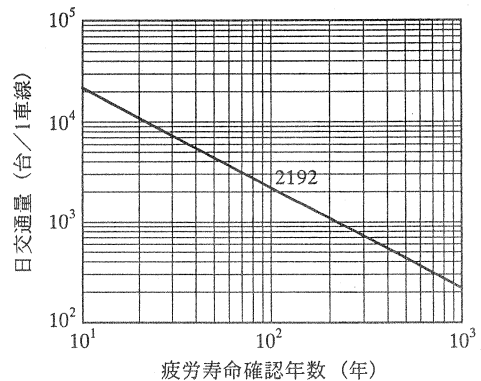


図-4 疲労寿命確認年数

なうことにより照査する1車線あたりの日大型車交通量は、約2200台であり、対象橋梁の100年寿命に相当する。

また、試験体の立体FEM解析に用いたモデルを図-5に示す。解析モデルは、対称性を考慮した立体の片側断面モデルとし、コンクリート部材にソリッド要素、鋼部材にシェル要素を用い、MSC/NASTRAN for Windows (Ver.4.0) により解析を行った。載荷荷重は250×200mmの範囲に等分布で与え、最大荷重を100kN/1Bridgeとした。

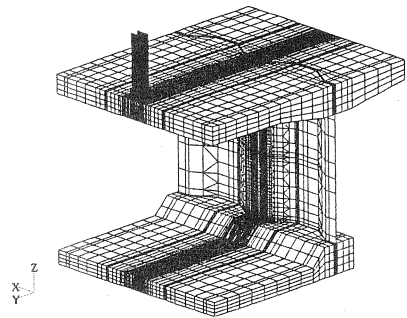


図-5 FEM 解析モデル図

3. 試験結果および考察

3.1 横締め鋼材緊張時の検討

(1) 継手近傍の応力性状

図-6に横締め緊張時の各継手上部の主応力分布を示す。継手(a)、(b)ともに主応力は圧縮が卓越しており、ほぼ鉛直方向を向いている。継手(a)においては、添接板の鉛直方向溶接部に応力が集中しており、継手(b)においては、スカラップ周辺のフランジプレート付近に応力が集中している。

(2) アングルジベルの応力性状

図-7に横締め緊張時のU字筋に発生した応力を示す。なお、図中の in・out はアングルの内側・外側に溶接した鉄筋を意味する。横締めPC鋼材をウェブ上で曲げ上げているため、腹圧力が鉛直下向きに働きウェブを押し下げようとする。その際に、上床版内のアングルジベルに取り付けたU字筋が抵抗するために、引張力が生じている。箱の内側・外側で比較した場合、箱外側のU字筋の方が大きな引張応力が生じているが、これはフランジプレートが上床版のたわみ変形にともなう首振り作用による影響と考えられる。また、継手(a)側に関して、波形鋼板ウェブの位置に着目すると、ウェブが箱外側に位置している場合の方が、U字筋に大きな応力が発生している。このことから、フランジプレートの首振りを拘束する作用が、ウェブが箱外側に位置している場合の方がフランジプレートの首振りの影響を大きく受けると考えられる。また、スカラップの有無による継手別に比較すると、スカラップの無い継手(a)の方がやや大きな応力を生じているが、大きな差異は見られず、発生応力が小さいこともあり、本試験範囲ではその違いを論じることはできなかった。

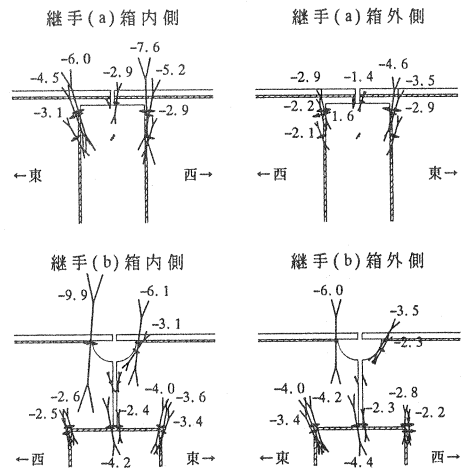


図-6 各継手の主応力分布 [MPa]

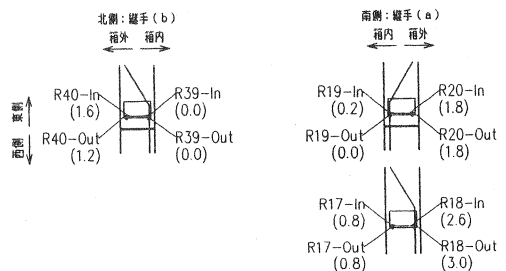


図-7 U字筋に生じる応力度 [MPa]

3.2 静的載荷試験

(1) 全体変形

静的載荷試験時の中央断面における上床版と下床版の鉛直変位を図-8、波形鋼板ウェブの面外変形を図-9にFEM解析値と併せて示す。なお、載荷荷重を100kNとした実験値および解析値を示している。

これによると、鉛直変位の実測値は、上床版中央の変位がやや大きいものの、解析値と概ね一致している。一方、ウェブの面外変形は、解析値と比較して継手(a)側は小さく、継手(b)側は大きくなっている。これは、製作時における施工誤差により、箱全体が歪んだ変形を起こしたことが原因であると考えられる。

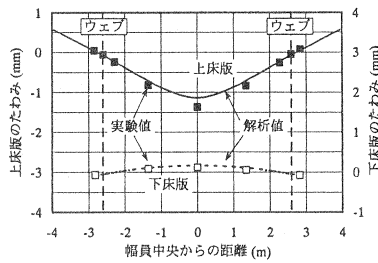


図-8 上下床版の鉛直変位

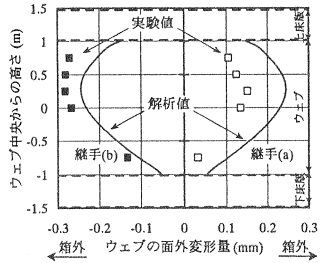


図-9 ウェブの面外変形

(2) 継手近傍の応力性状

図-10 に各継手上部の主応力分布を示す。主応力は全ての測定点で圧縮力が発生しており、ウェブの曲げ加工部上の1点を除き、ほぼ鉛直方向を向いている。また、両継手ともに表裏で応力差を生じており、ウェブの面外変形に伴う板曲げが生じている。そこで、図-11 に示すように、ウェブ表裏の鉛直方向力を膜応力と面外曲げ応力に分けて整理した(上段：膜応力、下段括弧内：面外曲げ応力)。これにより、ウェブとフランジプレートとの首溶接部に着目すると、面外曲げ応力は、継手(a)の平均 6.1MPa に対し、継手(b)は 8.5MPa と 40%ほど大きな応力が生じている。同様に、膜応力に関しても、継手(b)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ため、継手(a)と比較して約 40%応力が大きくなっている。この様なことから、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、なるべくスカラップ幅を小さくし、添接板を長くすることが有効であると考えられる。

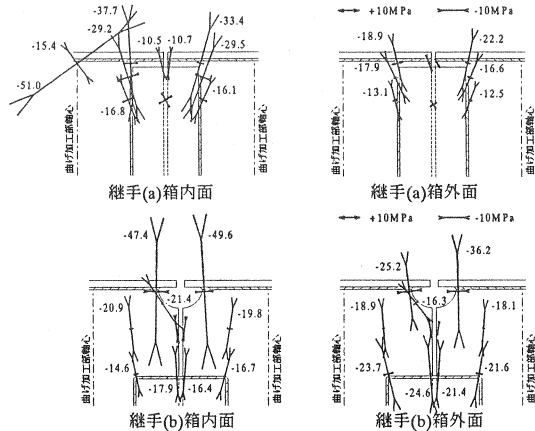


図-10 各継手の主応力分布 [MPa]

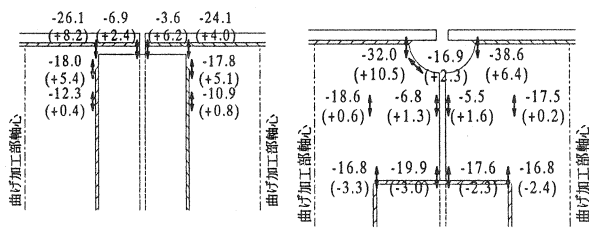


図-11 膜応力および面外曲げ応力 [MPa]

(3) アングルジベルの応力性状

図-12 に静的載荷時にアングルジベルのU字筋に発生した応力を示す。これによると、アングルジベルのU字筋に生じる応力性状は、フランジプレートの首振りおよび波形鋼板ウェブの波形状の影響を受けることが分かる。ウェブが箱内側に位置する断面においては、U字筋に圧縮応力を生じており、さらにウェブ側のU字筋により大きな応力を生じている。これは、鉛直下向きの荷重に対してウェブが抵抗していることと、フランジプレートが首振りを生じていることを示している。また、ウェブが箱外側に位置する断面においてはU字筋に引張応力を生じており、さらにウェブ側のU字筋により大きな応力を生じている。これは、箱内側に位置しているウェブが支点となって、上床版を張出床版側に持ち上げる作用が生じていると考えられる。その際、

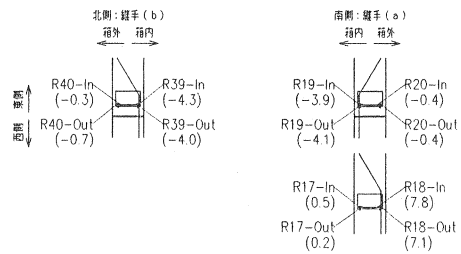


図-12 U字筋に生じる応力度 [MPa]

ウェブに変位を拘束されるために外側のU字筋により大きな引張応力が生じている。なお、継手の種類、特にスカラップの有無が面外方向の曲げに与える影響に関しては、ここでは明確な違いは見られなかった。

3. 3 疲労試験

(1) アングルジベル

図-13 は、波形鋼板と上下床版を接合する部材であるアングルジベルのU字筋に関する疲労特性を示している。この図によると、特に R18-In, Out の応力度が増加しつづけており、繰返し载荷の影響を受けて付着が切れた可能性があるものと思われる。このことから、アングルジベルを溶接したU字鉄筋により首振りモーメントを伝達する構造は、疲労耐久性上注意を要するものといえる。

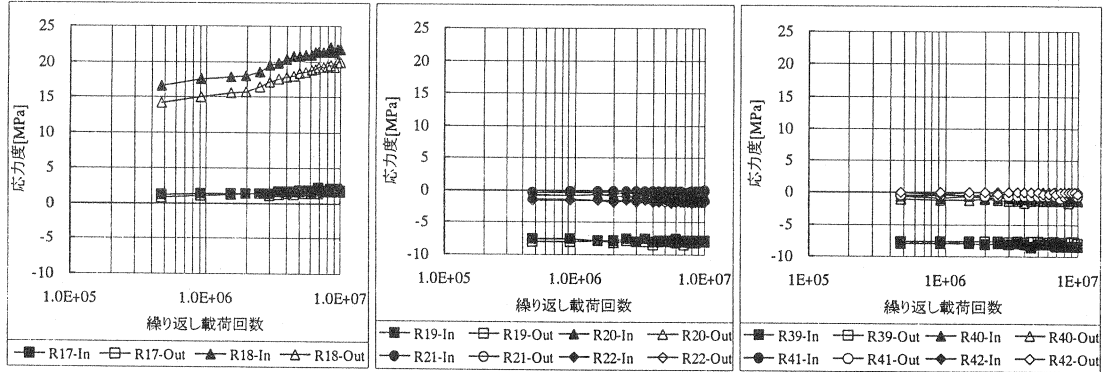


図-13 U字筋に生じる応力度(载荷ステップ5)

(2) ウェブ・フランジプレート溶接部およびウェブ継手局部

図-14 に継手部の疲労検討位置を示し、図-15, 16 にその検討位置におけるウェブとフランジプレートの疲労寿命を示す。繰返し载荷を開始する前に、静的载荷試験を行い、各着目点に生じる応力度の最大値と最小値の差を応力範囲 $\Delta\sigma$ にプロットしている。また、図中で各部の比較対象とする強度等級は、次の考え方にに基づき決定した。

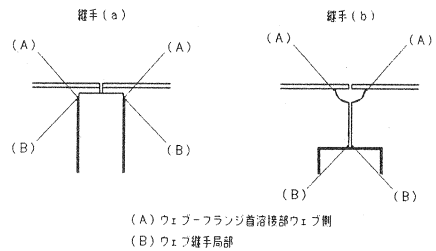


図-14 疲労検討位置

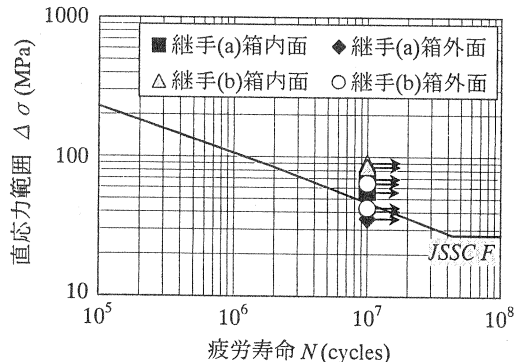


図-15 首溶接部ウェブ側

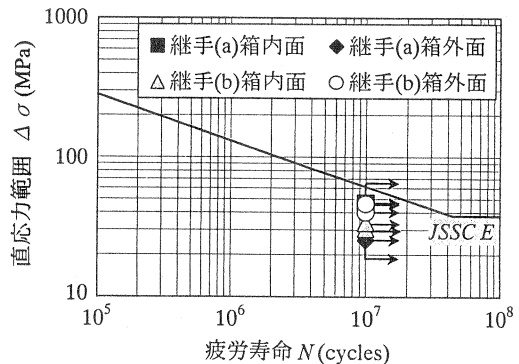


図-16 ウェブ継手局部

- ①ウェブフランジプレート首溶接部ウェブ側：荷重伝達型で非仕上げのホットスポット応力 (JSSCF)
- ②ウェブ継手局部：荷重非伝達で非仕上げのホットスポット応力 (JSSCE)

両者とも公称応力で整理することが難しいため、このようにホットスポット応力として整理した。

これによると、1000万回の繰返し载荷終了時において、疲労設計曲線の応力範囲を下回る個所があるものの、いずれの検討位置においても破壊には至っていない。つまり、各個所とも1000万回繰返し载荷における疲労耐久性を十分有していると思われる。また、スカラップの有無が疲労耐久性に与える影響もほとんど見られない。

4. まとめ

本試験では、実物大の波形鋼板ウェブ PC 箱桁の試験体を用いて、横締めプレストレスを導入する場合や、上床版中央部に鉛直下向きの荷重を載荷する場合の、面外の曲げを受ける際の各部における性状を明らかにしようとした。特に波形鋼板ウェブに設置したフランジプレートに首振り作用が生じることに着目し、その際のウェブフランジプレートの首溶接部近傍、アングルジベルの応力性状、継手形式による影響等について検討し、次のような結果を得た。

- (1) 波形鋼板ウェブの継手部は応力が集中しやすく、その傾向は、添接板の溶接部やスカラップ周辺において顕著である。また、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、なるべくスカラップ幅を小さくし、添接板を長くすることが有効であると考えられる。
- (2) フランジプレートの首振りに抵抗する部材であるアングルジベルのU字筋は、波形鋼板ウェブの位置による影響を受けることが分かった。ウェブが箱内側に位置する場合と箱外側に位置する場合とで、発生応力の向きや大きさが異なる。また、スカラップの有無が面外方向の曲げに与える影響に関しては、明確な違いを見つかることはできなかった。
- (3) 波形鋼板ウェブの上下縁に設けたフランジプレートに取りつけたアングルジベルに関して、荷重を繰返し載荷することによってU字筋の応力度が増大している。この要因は、今後検討する余地が残されているが、アングルジベルに溶接したU字鉄筋により首振りモーメントを伝達する構造は、疲労耐久性上注意を要するものと思われる。
- (4) 1000万回の繰返し載荷後に、ウェブフランジプレート首溶接部とウェブ継手局部に異常は見られず、疲労耐久性が確認された。また、スカラップの有無が疲労耐久性に与える影響は小さいことが分かった。

なお、本試験を実施するにあたり、早稲田大学の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, 町田, 溝江ほか：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, 2000.10.
- 4) 溝江, 町田, 辻村ほか：波形鋼板ウェブ溶接継手部の応力性状と疲労耐久性について, 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, 2000.10.
- 5) 吉岡, 溝江, 町田ほか：面外曲げを受ける波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋の力学的挙動, 第55回土木学会年次学術講演会概要集, 2000.9.