

波形鋼板ウェブ PC 橋の実物大模型試験体を用いた静的載荷・疲労試験

阿田 芳久*1・落合 勝*2・溝江 慶久*3・町田 文孝*4

1. まえがき

近年、プレストレストコンクリート（以下、PC）橋の耐久性向上および経済性・施工性の観点から、全外ケーブル構造や鋼・コンクリート複合構造が注目を集めている。とりわけ、波形鋼板ウェブ PC 橋は、上下コンクリート床版に効果的にプレストレスを導入できることや、従来の PC 箱桁橋と比較して桁自重を 20%程度低減できることなど、合理的な構造形式としてその地位を確立している^{1), 2)}。

一方、このような複合構造を採用する場合、鋼・コンクリートの接合部の形式が重要となる。波形鋼板ウェブ PC 橋の波形鋼板とコンクリート床版の接合部に、ずれ止めを設置したフランジを設けた場合、波形鋼板のアコーディオン効果がフランジにより拘束されるために、波形鋼板ウェブとフランジとの首溶接部近傍が複雑な応力性状を示すことなどが考えられる。また、波形鋼板ウェブ PC 橋は通常の PC 箱桁橋に比べ、一般的に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。

そこで、フランジを有する波形鋼板ウェブ PC 橋を対象として、写真-1, 2 に示す実物大の梁・箱試験体を用いた静的載荷試験および疲労試験を実施した。梁試験体では全体挙動、フランジを含めた波形鋼板部の応力性状、ウェブとフランジとの首溶接部付近の疲労耐久性について検討を行い、箱試験体については断面の変形挙動、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。

また、本試験において採用した継手構造に関する試験結果、および改善構造の提案については文献³⁾を参照された。

2. 静的載荷試験

2.1 試験概要

使用した各部材の諸元を表-1 に、梁試験体および箱試験体の一般図を図-1, 2 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、ほぼ実物大相当のものを用意した。波形鋼板ウェブと上下床版との接合

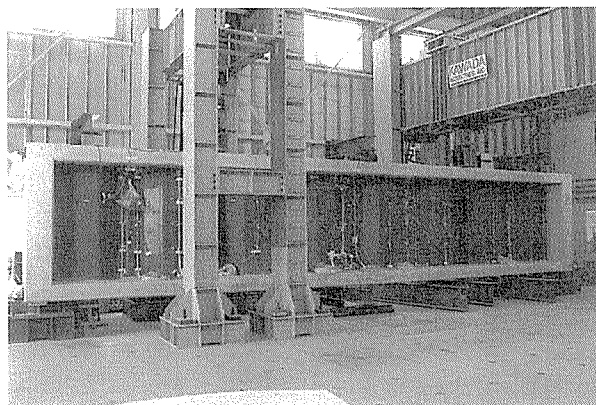


写真-1 梁試験体

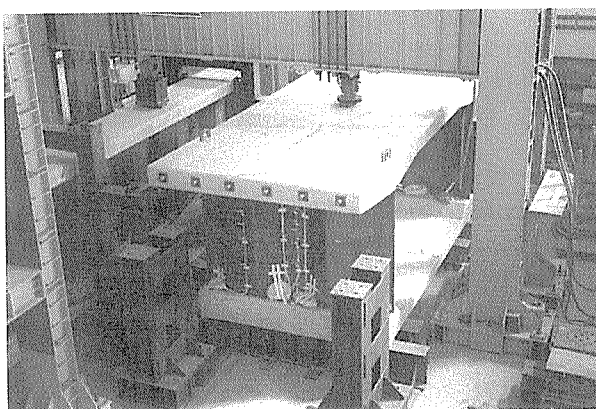


写真-2 箱試験体

には D13 の U 字筋を溶接したアングルジベルをフランジに取り付ける形式を採用し、その配置間隔は梁試験体および箱試験体ともに 260 mm ~ 300 mm 程度である。梁試験体の波形鋼板ウェブには、(a) 1 面の重ねせ、(b) 2 面の重ねせ・スカラップあり、(c) 2 面の重ねせ・スカラップなし、(d) 突合せ・裏当て金付きの 4 種類の継手を設け⁴⁾、箱試験体の波形鋼板ウェブには 2 面せん断の重ね継手を、(a) スカラップなし、(b) スカラップありの 2 種類の継手を設けた。

表-1 使用部材の諸元

コンクリート	$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$
鉄筋	SD 345
PC鋼材	1S 21.8 S (SWPR 19 L)
波形鋼板ウェブ	$t = 9 \text{ mm}$ (SM 490 YB)
フランジ	$t = 16 \text{ mm}$ (SM 490 A)
ジベル	L-150×150×15×250 (SS 400)

*1 Yoshihisa ATA: オリエンタル建設(株) 第二技術部

*2 Masaru OCHIAI: オリエンタル建設(株) 第二技術部

*3 Yoshihisa MIZOE: 川田工業(株) 技術開発本部 技術研究室

*4 Fumitaka MACHIDA: 川田工業(株) 技術開発本部 技術研究室

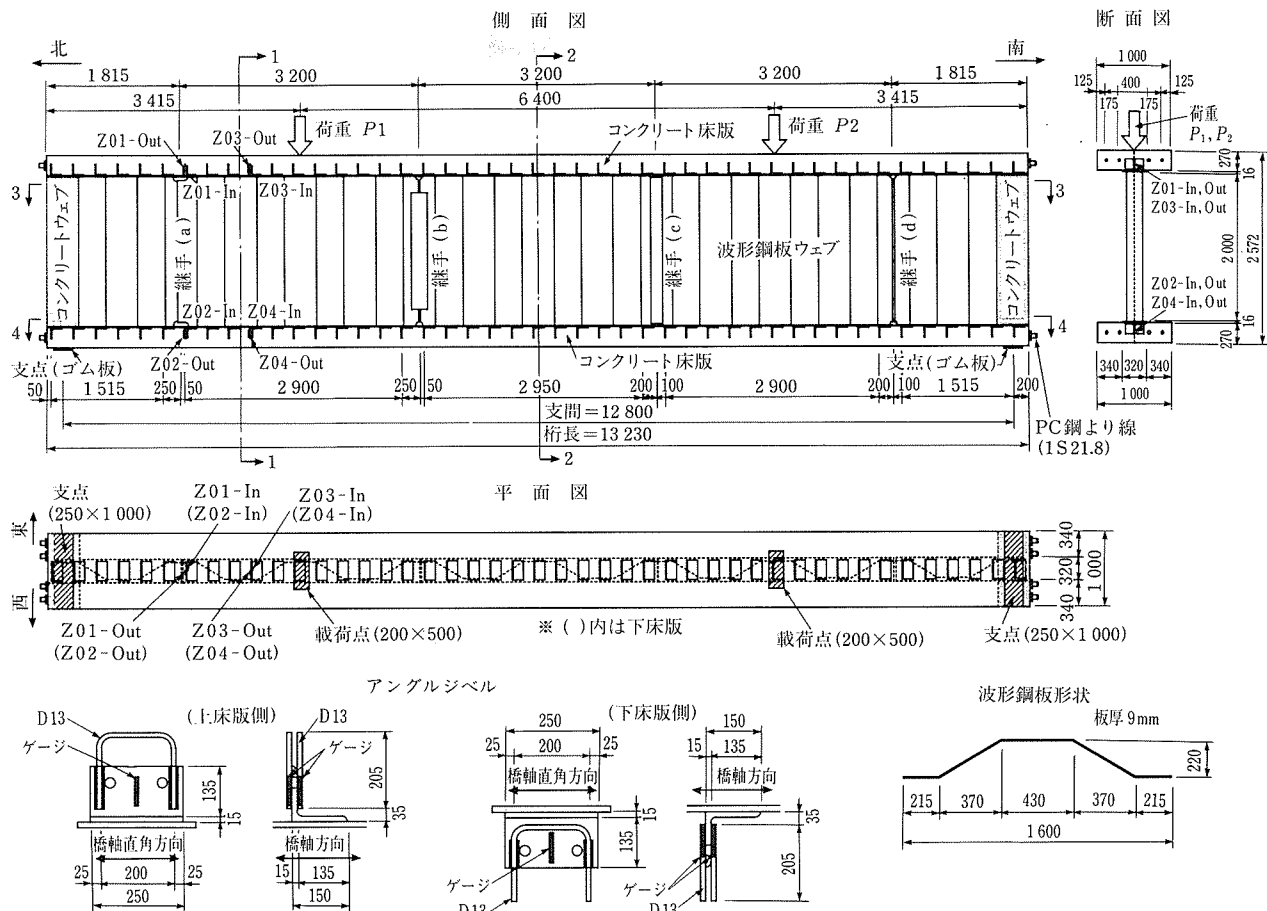


図-1 梁試験体一般図

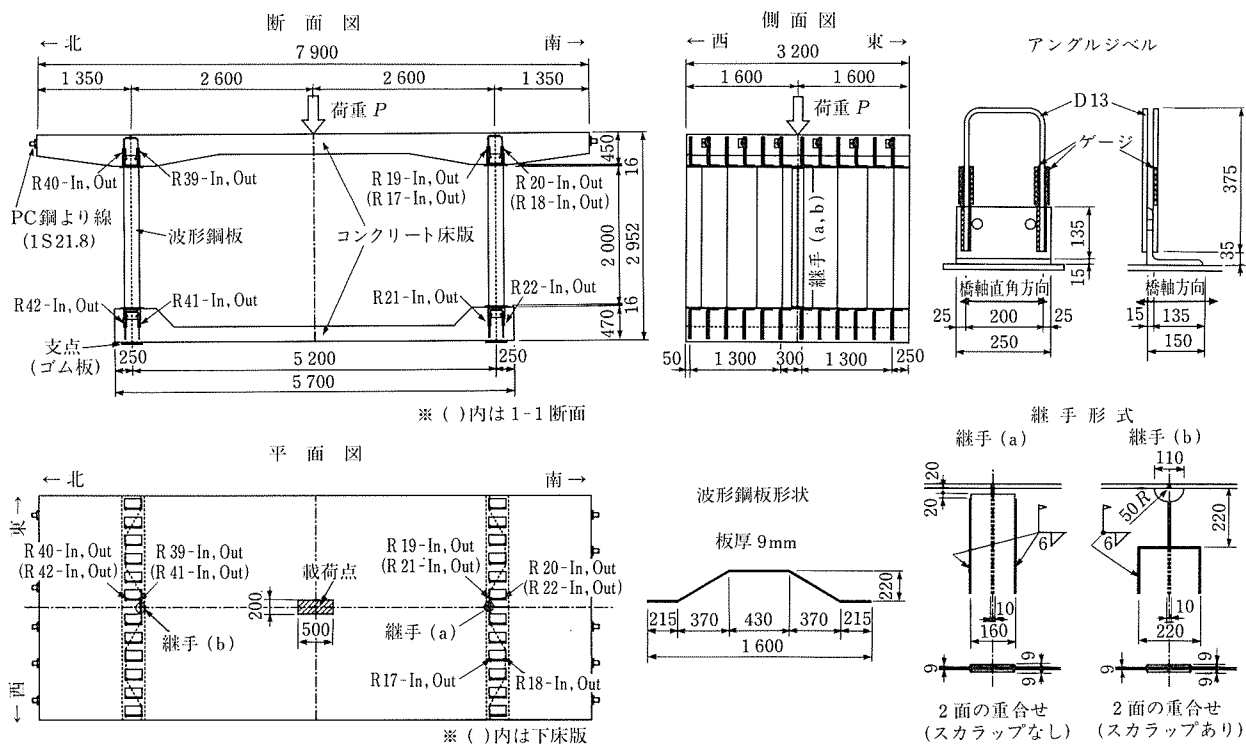


図-2 箱試験体一般図

また、これらの継手は実橋に即して立向き上進溶接により行った。

梁試験体において、載荷荷重値などの各種条件を設定するにあたり、支間90m相当のモデル橋梁を想定した。モデル橋梁に関する活荷重作用時の平面骨組解析を行い、算出された断面力をウェブあたりの応力に換算し、せん断応力と曲げ応力の比率が等しくなるように上下床版厚を設定した。また、この解析結果から求めたせん断応力の卓越している断面のせん断応力振幅と、静的載荷試験で得られた継手(a)に生じる主応力の実測値が等しくなるように、載荷荷重値(708.5kN)を設定した。さらに、上下床版にそれぞれ4本ずつ配置したPC鋼材には、モデル橋梁の支間中央部付近の死荷重作用時における応力状態を再現できるだけのプレストレス量(合計2980.0kN)を導入した。応力特性の比較のために、コンクリート部材をソリッド要素、鋼部材をシェル要素とする立体FEM解析⁴⁾を行った。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、載荷に2台の油圧ジャッキを用い、図-3に示すような載荷ステップで荷重を与えた。

箱試験体については、モデル橋梁に関する全橋モデルの立体FEM解析と試験体に関する立体FEM解析⁴⁾を行い、その結果から、モデル橋梁に衝撃係数を考慮した大型車が2車線同時に載荷された際に生じるフランジの首振り角(0.0256度)を試験体で再現できる荷重(94.7kN)を設定した。試験では、油圧サーボ試験機を使用し、図-4に示す載荷ステップで、輪荷重相当荷重を上床版中央に載荷した(写真-2)。なお、モデル橋梁の変形モードに可能な限り近づけるために、波形鋼板ウェブの最外縁には垂直リブを設置した。

2.2 試験結果

梁試験体のプレストレス導入時および静的載荷時の支間

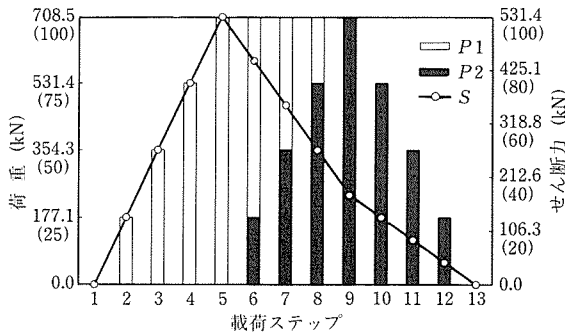


図-3 載荷ステップ (梁試験体)

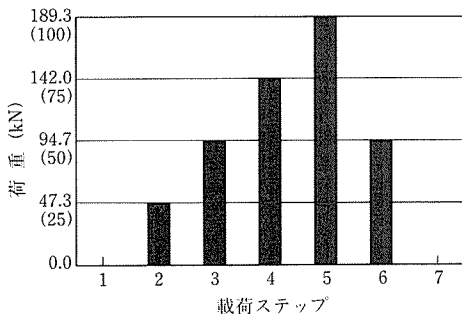


図-4 載荷ステップ (箱試験体)

中央断面における軸方向ひずみを図-5, 6に示す。ここで、図-6中の計算値とは、上下コンクリート床版のみを抵

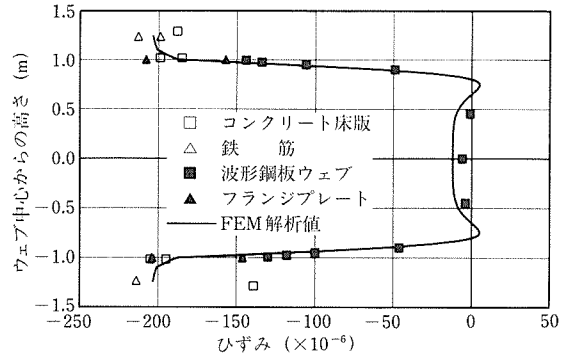
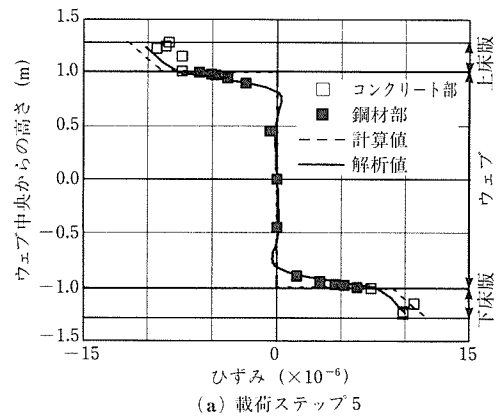
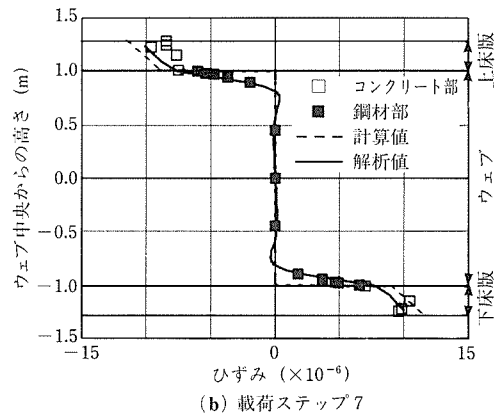


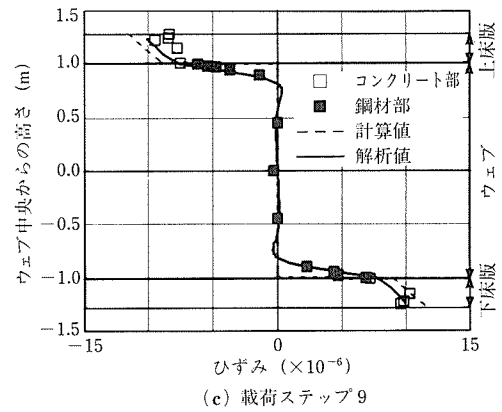
図-5 軸方向ひずみ (プレストレス導入時)



(a) 載荷ステップ5



(b) 載荷ステップ7



(c) 載荷ステップ9

図-6 軸方向ひずみ (載荷時)

抗断面とし、平面保持の仮定に従って算出した値である。プレストレス導入時、静的載荷時ともに、波形鋼板ウェブ中央部にはほとんど軸方向ひずみが発生せず、アコーディオン効果が確認された。ただし、ウェブフランジの首溶

接部近傍に大きなひずみを生じており、FEM解析と同様に、フランジにより軸方向ひずみが拘束されることが分かる。また、プレストレス導入時の波形鋼板ウェブに生じる面外の変形を図-7に示す。ここで、ウェブの波形は、

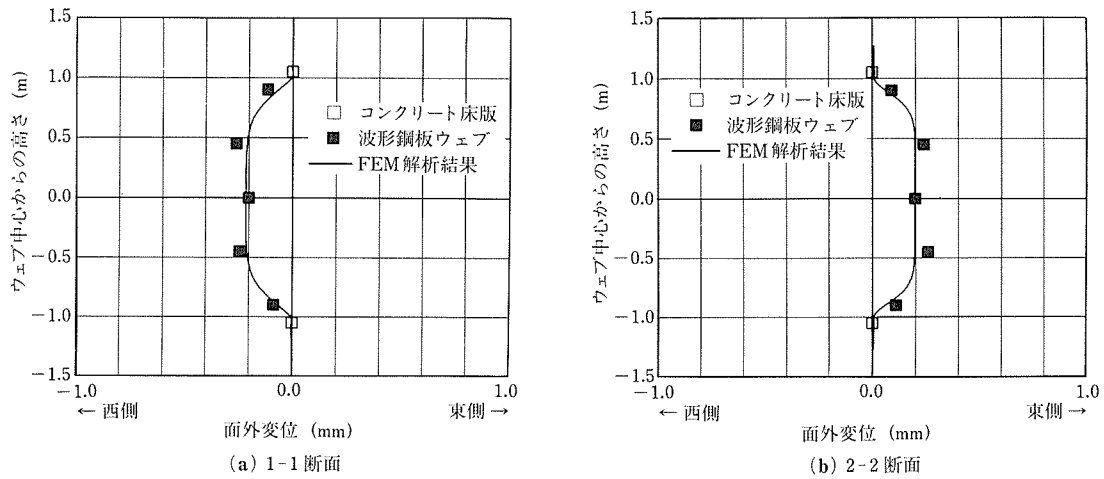


図-7 面外変形 (プレストレス導入時)

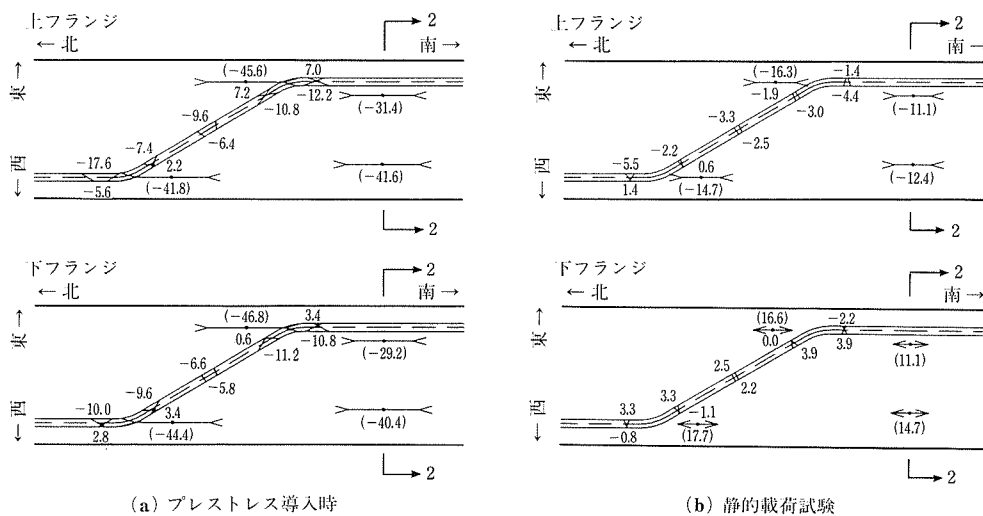
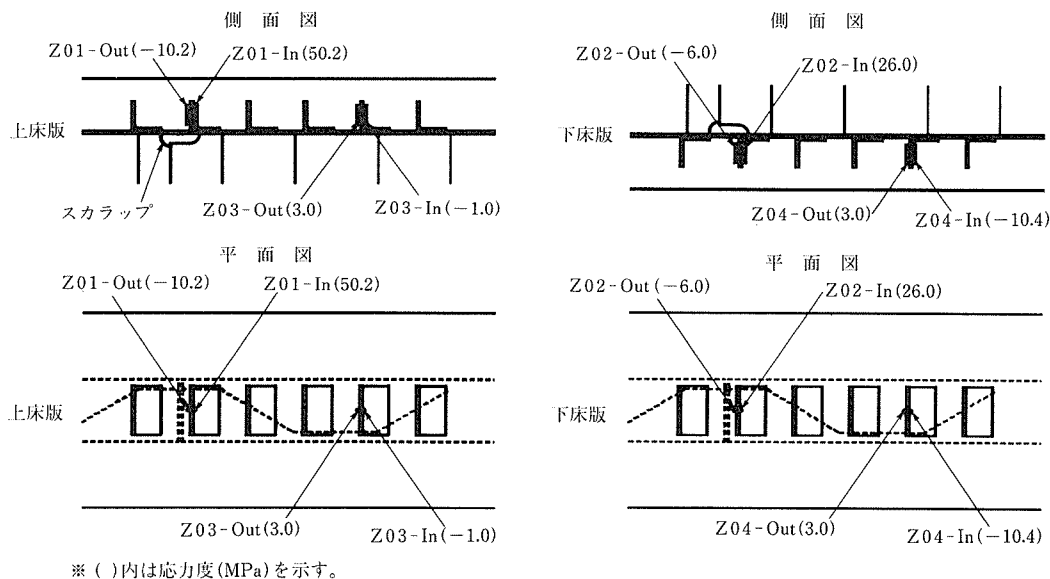


図-8 ウェブフランジ近傍応力度



※ ()内は応力度 (MPa) を示す。

図-9 アンゲルの応力度 (プレストレス導入時)

1-1 断面および2-2 断面でそれぞれ西側，東側に凸形状である。これによると，実測値はFEM解析値と同様に，ウェブはフランジ近傍を除き凸側へ変形した。このことは，ウェブの面外変形がウェブの波位置と関連していることを示しており，その変形は，横方向曲げ作用時の最大変形の60%程度であった。また，波形鋼板ウェブと上下床版との接合部近傍においては，面外の変形が拘束されており，フランジ部に首振りを生じるものと思われる。

そこで，波形鋼板ウェブと上下床版との接合部近傍に着目し，支間中央断面付近のフランジと波形鋼板ウェブに生じた軸方向の応力度を図-8に示す。ここで，矢印および()内の数値はフランジに生じる軸方向応力を示し，波形鋼板ウェブの表裏に示す数値はフランジ近傍ウェブのパネル方向の応力度を示す。まず，フランジに発生した応力度に着目すると，2-2 断面において，ウェブに近い位置での応力度は，一般部と比較して，プレストレス導入時で25%~28%程度，載荷時で10%~25%程度小さい。一方，斜ウェブ近傍のフランジに生じた応力度は，一般部と比較して，プレストレス導入時で9%程度，載荷時で20%程度大きい。また，ウェブの応力は，とくに曲げ加工部において表裏で大きな応力差が見られた。これらのことから，フランジ部に首振りを生じたことが確認され，ウェブが波形状であることにより複雑な応力性状となることが分かる。

次に，フランジに取り付けたアングルジベルのプレスト

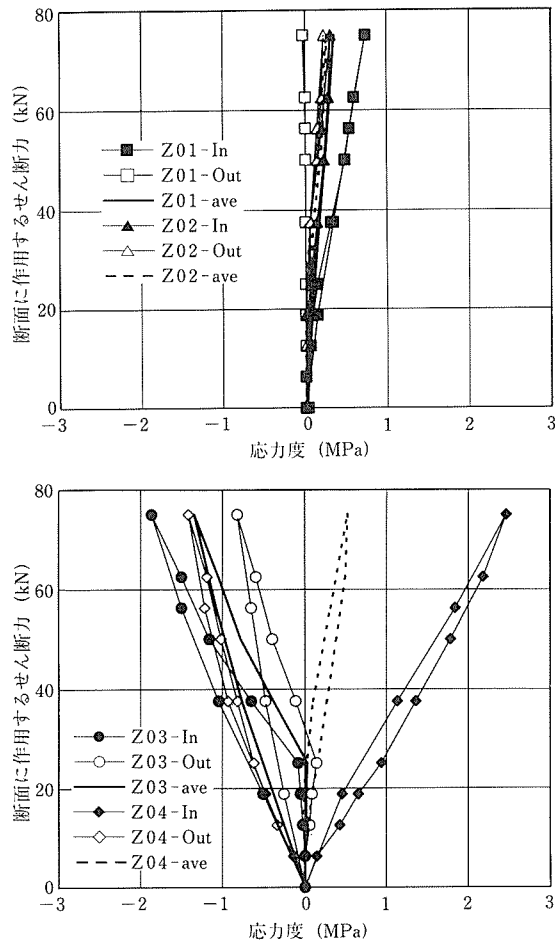


図-10 アングルの応力度 (載荷時)

レス導入時に生じた応力度を図-9に示す。これによると，Z01, Z02はZ03, Z04と比較して発生応力が大きい。これは，継手近傍に位置するZ01, Z02が，スカラップの影響を受けるためと思われる。また，各アングルとも表裏で応力度が交番しており，曲げを生じたことが分かる。また，同一断面に位置するアングルにおいて，上下床版側で発生応力が異なるが，これは，U字筋の取付け方向が上下床版側で逆向きであることが影響するものと考えられる。また，静的載荷時に生じた応力度と図-3に示す載荷ステップごとに断面に生じたせん断力との関係を図-10に示す。これによると，アングルに生じた応力度は載荷ステップごとの作用せん断力の変化に対して，ほぼ線形を保つことから，アングルジベルがずれ止めとして有効に作用したものと考えられる。

次に，荷重載荷ステップ5, 7, 9における鉛直変位を図-11に示す。ここで示す実測値は，FEM解析値との比較検討のために，載荷荷重を図-3の()内に示すように単位荷重100kNに換算した値である。せん断変形を考慮しない場合の計算値は実測値の60%程度で，せん断変形を考慮する場合の計算値は実測値とおおむね一致した。このことから，本試験に用いたような等桁高，単純支持の波形鋼板ウェブ橋においては，せん断変形を考慮する必要があることが示された。また，FEM解析値は実測値の80%程度であったが，解析モデルではコンクリート床版とフランジブ

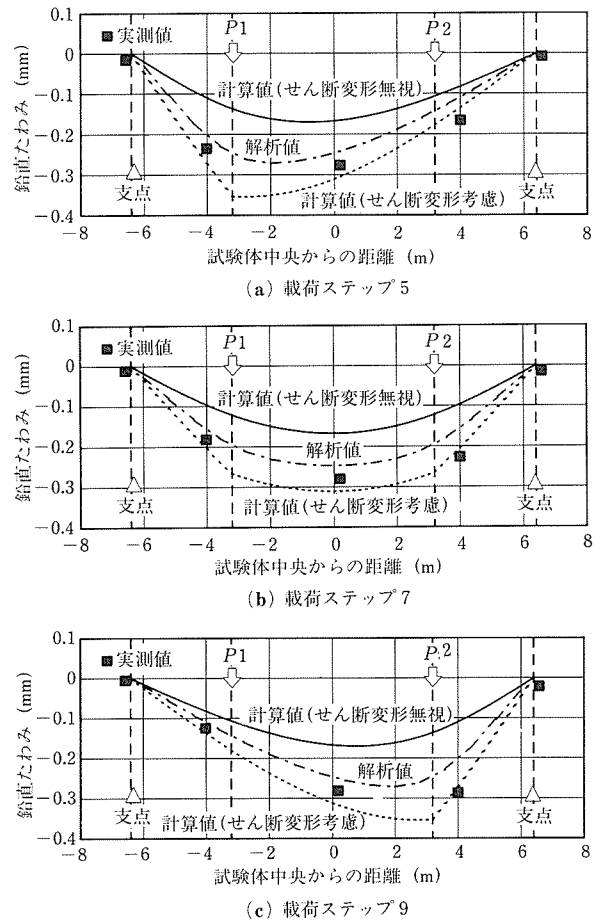


図-11 鉛直変位

レートと完全結合としたことや、フランジプレートの不連続性を評価していないことが主な要因であると考えられる。また、支間中央断面におけるせん断ひずみの桁高方向分布を、載荷荷重を同様に単位荷重 100 kN に換算して図-12 に示す。通常、せん断力は波形鋼板のみが受けもつと仮定して設計されるが、弾性域においては上下床版もせん断力を分担するため、全せん断力の 80% 程度を波形鋼板ウェブが受けもつ結果となった。

箱試験体の静的載荷時の中央断面における上下床版の鉛直変位およびウェブの面外変形を図-13 に示す。なお、実測値に関しては、載荷荷重を図-4 の () 内に示す単位荷重 100 kN としてまとめた。これによると、実測値は、上床版中央の変位がやや大きいものの、解析値とおおむね一致した。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)側は大きくなった。これは、製作時に

施工誤差を生じ、箱全体がゆがんだ変形を起こしたものと考えられる。

箱試験体に関する各継手上部の主応力分布を図-14、15 に示す。横締め緊張時においては、継手(a)、(b)ともに主応力は圧縮が卓越しており、その向きはほぼ鉛直であった。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の集中が見られた。静的載荷時においても、継手(a)、(b)ともに主応力は圧縮が卓越しており、向きはほぼ鉛直であった。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を生じることが分かる。そこで、図-16 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 () 内：面外曲げ応力、矢印：応力測定の向き)。これにより、ウェブフランジの首溶接部に着目すると、面外曲げ応力は、継手(a)の平均 6.4 MPa に対し、継手(b)は 9.0 MPa と 40% ほど大きな応力を生じた。同様に、膜応力に関しても、継手(b)はスカラップにより荷重を受ける断面積が減少するため、継手(a)と比較して約 40% 応力が大きく生じた。以上より、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。

また、同図において、継手(a)の立向き溶接止端部と継手(b)の水平溶接部を比較すると、膜応力は両継手とも平均約 18.8 MPa となっており、ほぼ等しい。しかし、面外曲げ応力は、継手(a)が平均 5.6 MPa であるのに対し、継手(b)が平均 2.9 MPa であり、約半分であった。これは、上述した首溶接部と同様、添接板の長さの違いが原因であると考えられ

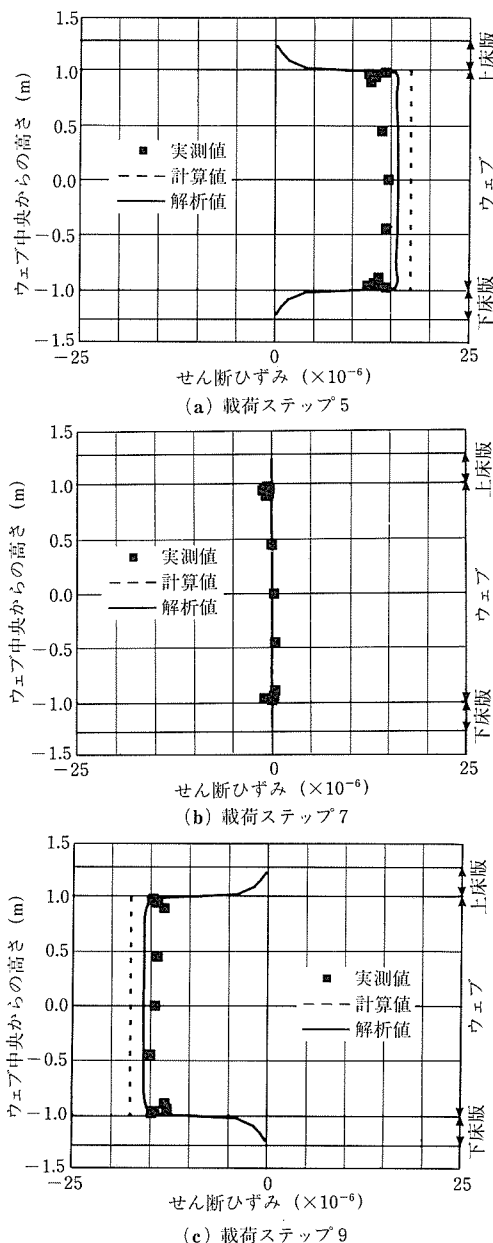


図-12 せん断ひずみ

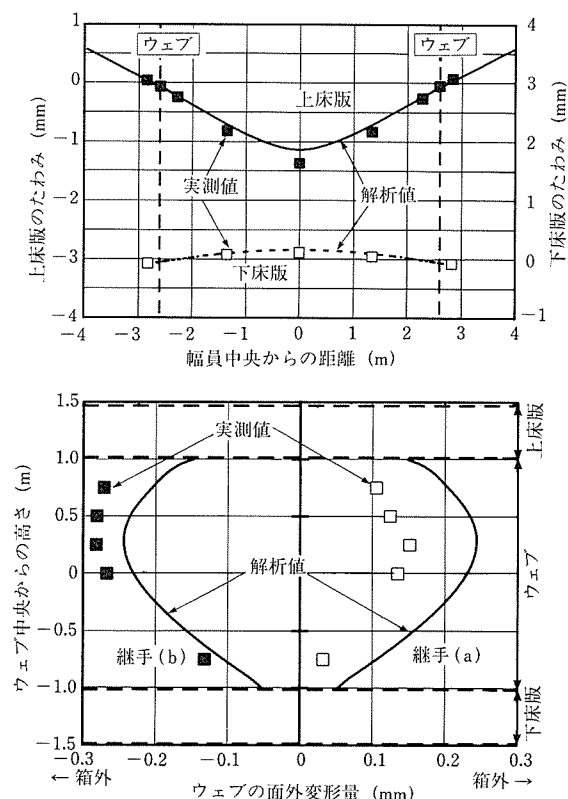


図-13 変形

る。つまり、継手(b)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るのに対し、継手(a)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するためであると推測される。よって、ウェブ現場継手部の面外曲げ応

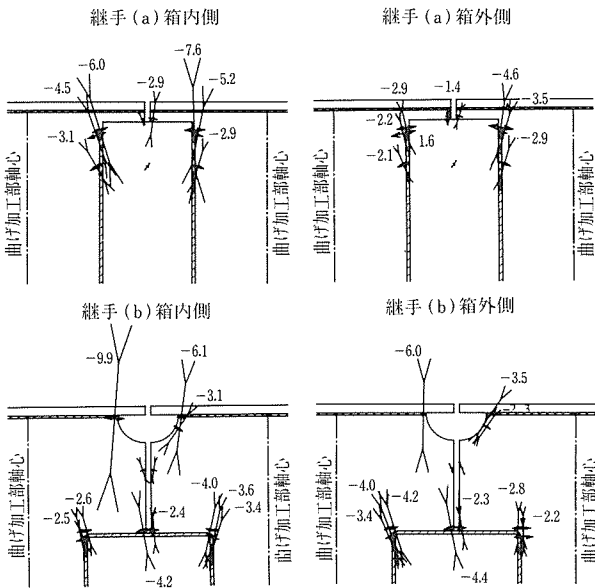


図-14 主応力分布 (横締め緊張時)

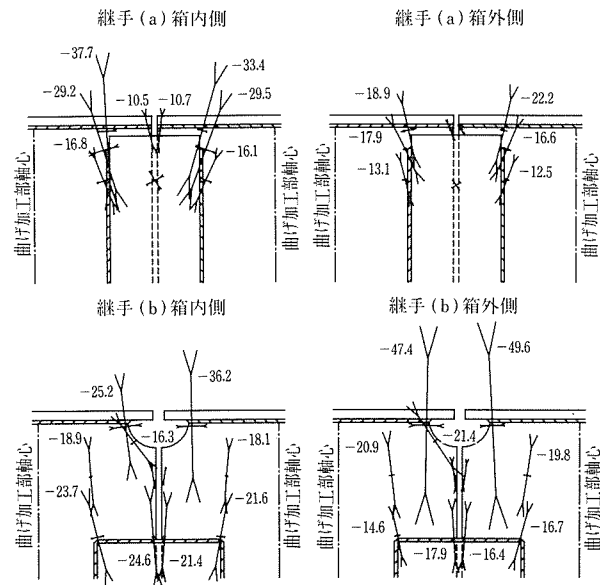


図-15 主応力分布 (載荷時)

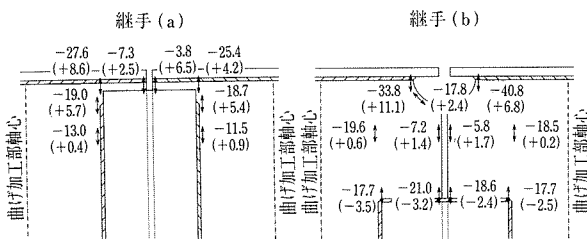
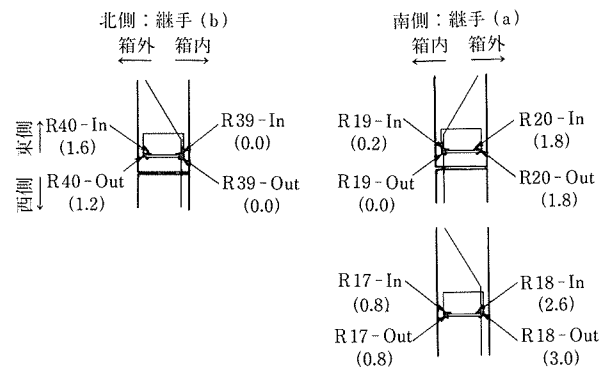


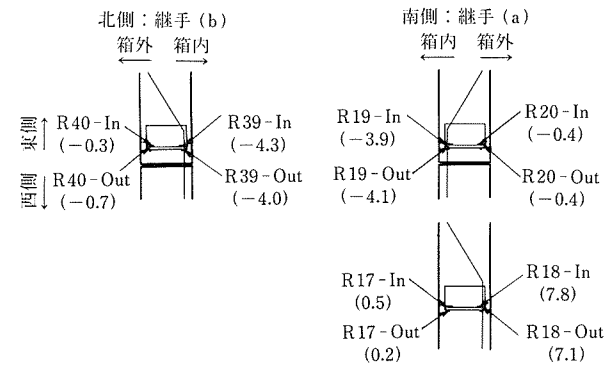
図-16 膜応力および面外曲げ応力

力を低減するには、首溶接部の場合とは逆に、添接板を短くし、フランジとの間に広い自由縁を設けることが有効であると考えられる。以上より、現場継手のディテールを決定する際には、これらの兼ね合いを考慮しながらFEM解析などによる詳細な検討を実施する必要があるものと考えられる。

次に、アングルジベルのU字筋に生じた応力を図-17に示す。なお、図中のIn・Outの表記はアングルに溶接したU字筋の箱内側面と箱外側面を意味する。横締め緊張時においては、各U字筋とも引張力が作用した。これは、ウェブ上に生じるPC鋼材の腹圧力によってウェブが押し下げられる際、上床版内のアングルジベルに取り付けたU字筋が抵抗し、引張力を生じたものと考えられる。また、箱の内側・外側で比較した場合、箱外側のU字筋の方により大きな引張応力が生じることが確認された。これは、上床版のたわみ変形に伴い、フランジに首振りが生じた影響と考えられる。さらに、継手(a)側に着目すると、波形鋼板ウェブが箱外側に位置する場合の方が、U字筋に生じる応力が大きいことが分かった。このことから、波形鋼板ウェブが箱外側に位置する断面は、フランジの首振りがより強く拘束されると考えられる。静的載荷時においては、ウェブが箱内側に位置する断面でU字筋に圧縮応力を生じ、さらにウェブ側のU字筋により大きな応力を生じた。これは、鉛直下向きの荷重に対してウェブが抵抗すること、フランジが首振りを生じることを示す。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、さらにウェブ側のU字筋により大きな応力を生じた。これは、箱内側に位置しているウェブが支点となつて、張出し床版側の上床版を持ち上げる作用が生じたものと



(a) 横締め鋼材緊張時



(b) 載荷時

図-17 U字筋応力度

考えられる。その際、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を生じた。

3. 疲労試験

3.1 試験概要

実応力作用下における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。梁試験体には2台の油圧サーボ型疲労試験機を使用し、図-18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、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発生するせん断応力振幅の約2倍の振幅が試験体の継手(a), (d)に生じるように設定した。その結果、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^{5), 6)}。箱試験体についても同様に、図-19に示すような荷重振幅で繰返し回数1000万回の疲労試験を実施した。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も2倍となる。途中約50万回の繰返し回数ごとに静的載荷試験を行い、アングルジベルおよびU字筋の応力を測定した。この荷重振幅値で1000万回の繰返し載荷を行うことにより、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⁴⁾。

3.2 試験結果

梁試験体に関する1000万回繰返し載荷に対して得られたアングルの疲労特性を図-20に示す。これによると、Z03-In, Z04-Inの応力度が増加し続ける傾向を示した。これは、繰返し載荷の影響を受けて付着が切れた可能性が考えられる。また、箱試験体に関して得られたアングルジベルのU字筋に関する疲労特性を図-21に示す。U字筋に関し

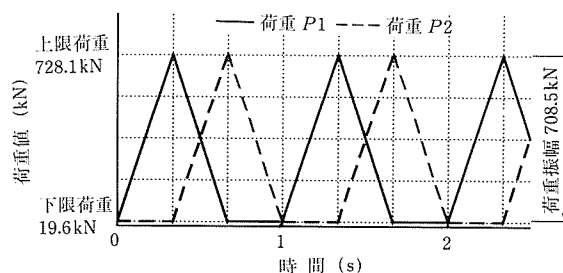


図-18 疲労試験時載荷波形(梁試験体)

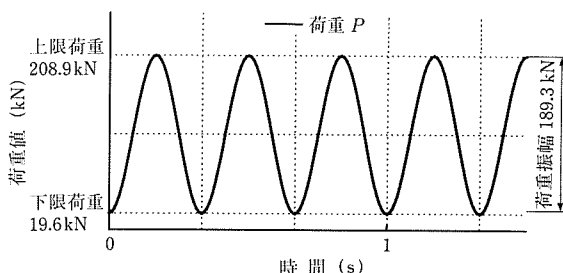


図-19 疲労試験時載荷波形(箱試験体)

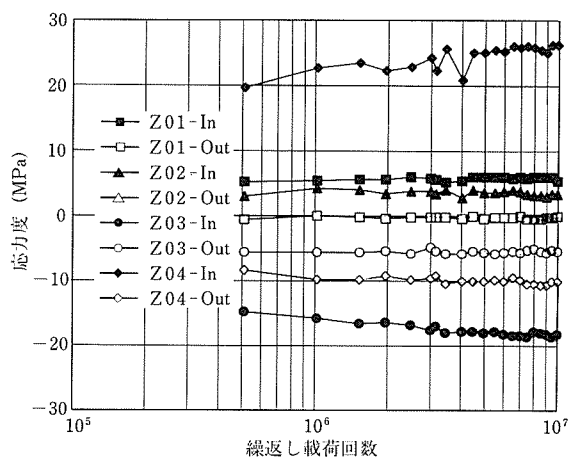


図-20 アングルの疲労特性

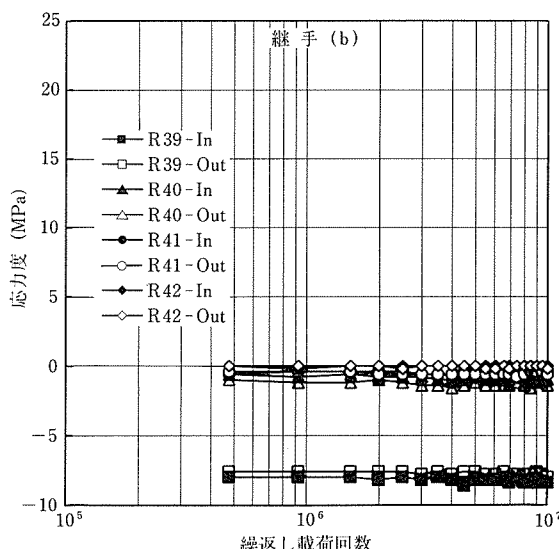
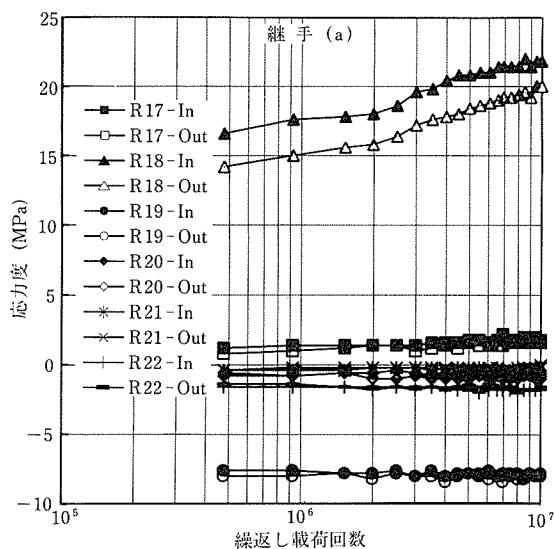


図-21 U字筋の疲労特性

でも、とくにR18-In・Outのように、応力度が増え続けるものがあり、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、U字筋を溶接したアングルジベルにより首振りモーメントを伝達する構造は、本試験で設定した疲労照査条件を十分満足するものではあるが、大型車の走行量が増えた場合などには、アングルジベルの付着性状の向上、たとえば、U字筋のサイズアップや、アングルジベルに縞鋼板を採用するなどの対策が必要であると思われる。

次に、梁試験体のウェーブフランジの首溶接部近傍に関する疲労検討位置を図-22に、比較対象とする疲労強度等級⁷⁾を表-2にそれぞれ示し、疲労試験結果を図-23に示す。軸方向応力のウェブ側以外は、公称応力を定義することができなかったため、疲労損傷が生じる場合の局部応力として定義されるホットスポット応力を用いて疲労照査を行った。ここで、ホットスポット応力とは、溶接止端形状による局部的な応力集中を含まず、構造的な要因による応力の乱れを考慮した溶接止端部での応力を示し、複雑な構造の継手で公称応力を定義できない場合などの疲労照査において用いられるものである。図-23における縦軸の応力範囲 $\Delta\sigma$ は、静的載荷試験時の載荷ステップ5における直応力をプロットしたものである。(a)の軸方向力に関しては、作用する応力範囲が小さく、照査に用いたJSSCのD等級(ウェブ側)およびE等級(フランジ側)をそれぞれ下回る結果を得たが、いずれの検討位置においても破壊に至らず、本試験で設定した疲労照査条件を十分満足するものである。また、(b)、(c)の鉛直応力については、照査に用いたJSSCのF等級(止端破壊)およびH等級(ルート破壊)をそれぞれ下回った。疲労耐久性に問題はないが、冷間曲げ部に関しては、打ち切り限界に対して余裕がないため、大型車の走行台数が増えた場合などには注意を要する。また、箱試験体のウェーブフランジの首溶接部近傍およびウェブ継手局部に関する検討位置を図-24に、比較対象とする疲労強度等級を表-3にそれぞれ示し、疲労試験結果を図-25に示す。検討位置は、ともに公称応力を定義することができなかったため、ホットスポット応力を用いて疲労照査を

行った。縦軸である応力範囲 $\Delta\sigma$ は、疲労試験開始前の静的載荷試験結果により、各着目点に生じる応力度の最大値と最小値の差をプロットした。これらによると、1000万回の繰返し載荷終了時において、疲労設計曲線の応力範囲を

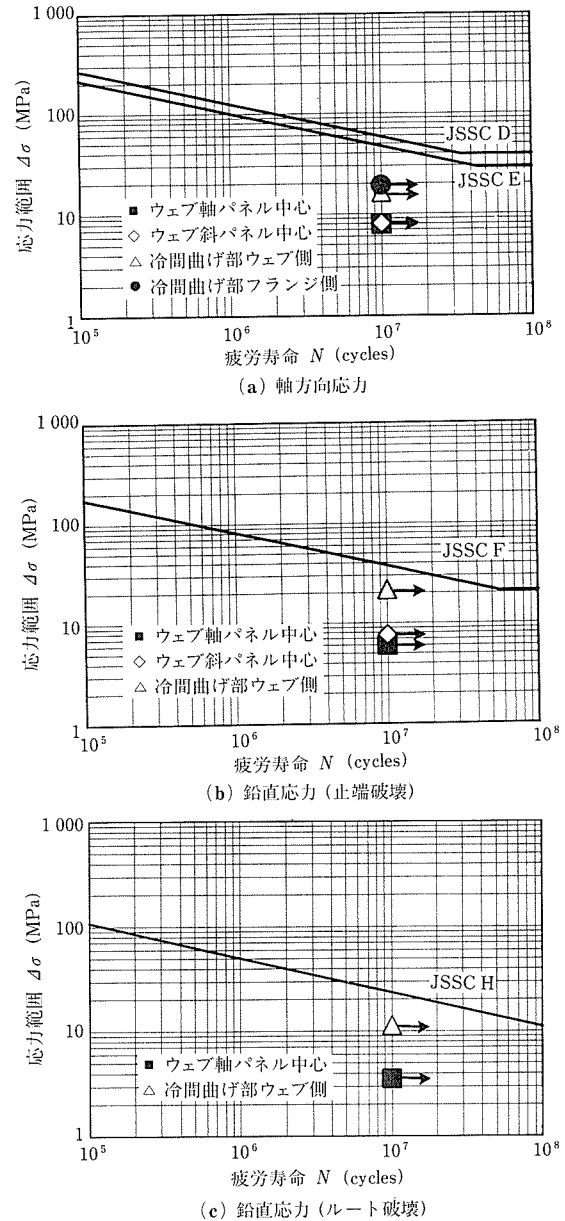


図-23 疲労試験結果(梁試験体)

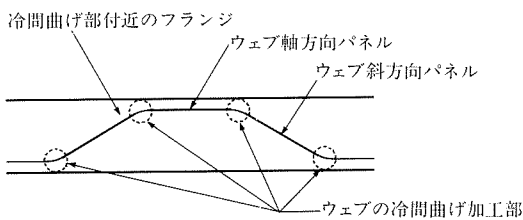


図-22 疲労検討位置(梁試験体)

表-2 疲労強度等級(梁試験体)

疲労検討位置		疲労強度等級(JSSC)	備考
軸方向応力	ウェブ側	D	公称応力の縦方向すみ肉溶接
	フランジ側	E	非仕上げで荷重非伝達型のホットスポット応力
鉛直応力	止端破壊	F	非仕上げで荷重伝達型のホットスポット応力
	ルート破壊	H	荷重伝達型のホットスポット応力

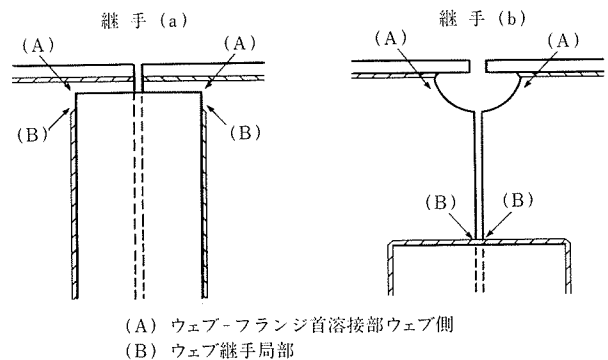


図-24 疲労検討位置(箱試験体)

表-3 疲労強度等級 (箱試験体)

疲労検討位置	疲労強度等級 (JSSC)	備考
ウェーブフランジ首溶接部 ウェブ側	F	非仕上げで荷重伝達型のホットスポット応力
ウェブ継手局部	E	非仕上げで荷重非伝達型のホットスポット応力

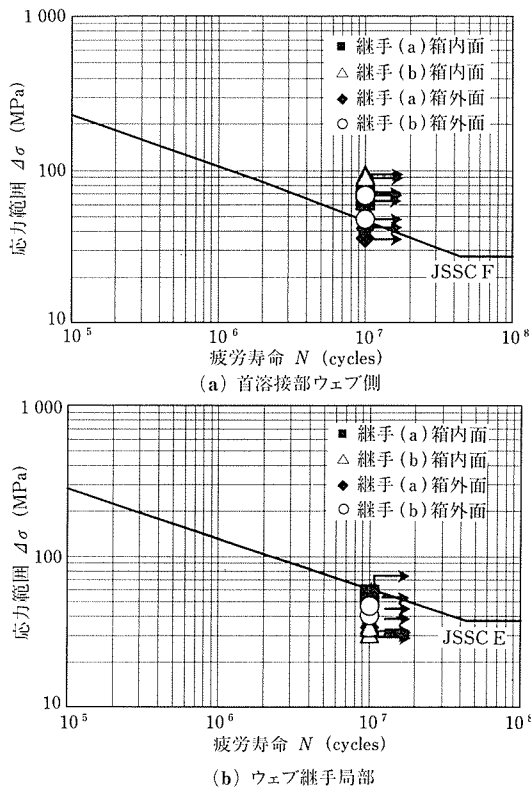


図-25 疲労試験結果 (箱試験体)

下回る箇所があるものの、いずれの検討位置においても破壊には至らなかった。このことから、本試験で設定した疲労照査条件を十分満足するものである。なお、スカラップの有無が疲労耐久性に与える影響は明確には見られなかった。

4. まとめ

本試験の範囲で得られた結果をまとめると以下のようになる。

4.1 梁試験体に関して

- ① 波形鋼板ウェブとフランジの首溶接部には、横方向の曲げが作用する場合だけでなく、軸力が作用することによっても首振りを生じる。
- ② アンゲルジベルに生じる応力度は、作用せん断力の変化に対し線形を保つことから、アンゲルジベルがずれ止めとして有効に作用していることが確認された。
- ③ 波形鋼板ウェブPC橋のたわみ変形は、せん断変形の影響を大きく受けることが確認された。
- ④ 波形鋼板ウェブが負担するせん断力は全体の80%程度であり、桁高方向に一樣に受けもつ。
- ⑤ アンゲルジベルに関して、荷重を繰返し載荷することによってアンゲルの応力度が増大したことから、ア

ンゲルジベルに溶接したU字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。

- ⑥ 1000万回の繰返し載荷試験終了時において、ウェーブフランジ首溶接部に異常は見られず、疲労耐久性が確認された。ただし、冷間曲げ部は、疲労耐久性上注意を要する箇所であると思われる。

4.2 箱試験体に関して

- ① 首振りに抵抗する部材であるアンゲルジベルのU字筋は、波形鋼板ウェブの位置による影響を受け、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は、発生応力の向きや大きさが異なる。
- ② 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。
- ③ ウェブ現場継手部の面外曲げ応力を低減するには、首溶接部の場合とは逆に、添接板を短くし、フランジとの間に広い自由縁を設けることが有効である。
- ④ 波形鋼板ウェブの上下縁に設けたフランジに取り付けたアンゲルジベルに関して、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た。この要因は、今後検討する余地が残されているが、アンゲルジベルに溶接したU字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。
- ⑤ 1000万回の繰返し載荷試験終了時において、ウェーブフランジ首溶接部、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。ただし、冷間曲げ部は、疲労耐久性上注意を要する箇所であると思われる。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、依田彦彦 早稲田大学教授には数々の有益なご指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

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) 角谷：今後のPC橋の将来展望－波形鋼板ウェブPC橋への展開－，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，特別講演，pp.7～15，2000.10
- 3) 溝江，町田，辻村，落合：波形鋼板ウェブの現場溶接継手構造の研究，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.2，pp.132～140，2001
- 4) 溝江，町田，辻村，落合：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，pp.17～22，2000.10
- 5) 落合，溝江，町田，辻村：波形鋼板ウェブPC箱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
- 6) 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
- 7) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.4

【2001年2月16日受付】