

形鋼ジベルを用いた鋼板・コンクリート合成床版に関する実験的研究

Experimental Studies on Steel-concrete Composite Deck with Shaped Beam Dowels

森忠彦*、藤井康盛**、松井繁之***、大西弘志****

Tadahiko MORI, Yasumori FUJII, Shigeyuki MATSUI and Hiroshi ONISHI

*工修 新日本製鉄株式会社 建材事業部 建材開発技術部 マネジャー (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

** 新日本製鉄株式会社 建材事業部 建材開発技術部 マネジャー (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

*** 工博 大阪大学大学院 教授 工学部土木工学科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

****工修 大阪大学大学院 助手 工学部土木工学科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Steel-concrete composite decks are economical and strong against the traffic loading. In this study the composite deck consisting of shaped steel with holes, bottom plates, reinforced bars and concrete are focused on. In order to study the static behavior and the fatigue durability against the heavy traffic, some kinds of tests are conducted. In this paper the static test using a beam specimen and the wheel running test using a deck specimen are introduced. From static test result it is confirmed that ultimate strength is three times as large as the design load and shaped steel and concrete work together under ultimate loading. From wheel running test it is found that deformation of the specimen and strain of the bottom plate are keeping small through the test and shaped steel has no crack at the welding detail. Because the bottom plates work as the lower reinforced bar, the specimen without lower reinforced bar has good durability against the heavy traffic.

key words : steel-concrete composite deck, shaped steel, wheel running test, fatigue durability

1. まえがき

近年、鋼少数主桁橋の普及に伴い、耐久性に優れた長支間対応型の床版が不可欠となってきている。様々な現場条件での施工性や建設コストの縮減と耐久性向上の要請に応える新形式床版として、型枠支保工兼用の底鋼板を構造本体利用化した合成床版の開発が活発に進められており、その疲労耐久性についても実験的検証を中心に多くの研究がなされている¹⁾。著者らは、疲労耐久性、経済性により優れる床版として、ウェブに開口を有する形鋼(H形鋼、I形鋼)と底鋼板を一体化した鋼製パネルに現場で上配力筋を設置し、コンクリートを充填することにより合成構造として機能する合成床版に着目した(図1)。

本床版は、形鋼ウェブに開口を設けることによりコンクリートとの一体化を図ると同時に、形鋼部材の高い剛性により、架設時の安定性を向上できる利点を有する。鋼とコンクリートとを合成させる目的で用いる孔明け鋼板ジベルは、通常、コンクリート割裂および割裂後の耐荷力保持のため孔の直交方向に配筋する。本合成床版では、下側の孔については底鋼板が、上側の孔については形鋼上フランジと上配力筋がこの役割を果たすと考え下配力筋を省

略する構造を採用した。

本床版に対して、部材の静的試験、溶接部の疲労試験、多点移動載荷試験、輪荷重走行試験などの一連の性能評価試験を実施した。本論文では合成部材の耐荷力確認を目的とした静的試験、疲労耐久性確認を目的とした輪荷重走行試験を中心に、試験結果および解析結果との比較、解体調査結果を報告する。

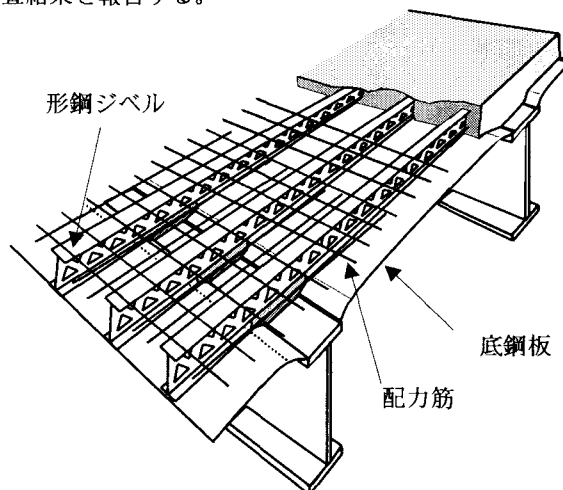


図1 合成床版概要

2. 部分モデルによる静的耐荷力試験

2.1 試験の概要

本合成床版は前述の通り、鋼部材（形鋼、底鋼板）と上配力筋、コンクリートとで構成される。底鋼板はコンクリート打設時の型枠機能だけでなく、強度部材としての効果を発揮するため、下配力筋の代替として橋軸方向の力を伝達する。形鋼の配置ピッチは、例えば、底鋼板を構造部材として考慮しないI形鋼格子床版では、輪荷重が形鋼間のコンクリートに集中的に作用するのを避けるため250mm以下に抑えている²⁾。本床版では形鋼間のコンクリートは、底鋼板、形鋼上フランジ、上配力筋とで補強されるため、形鋼ピッチを広げてもせん断破壊強度を確保することができると考えられる。このように、本合成床版では、下配力筋を省略し、形鋼ピッチを従来よりも広げることを想定しているが、このとき、鋼部材とコンクリートの一体化が十分に確保されることを確認しておく必要がある。

以上を踏まえ、鋼部材とコンクリートとの合成効果を確認することを目的として、部分モデルによる静的耐荷力試験を実施した。

想定支間 6m の実物大合成床版から橋軸直角方向に梁状に取り出した試験体 1 体を用いた（図 2）。試験体は、主部材として I 形鋼（I-200, SS400）2 本、底鋼板（幅 800mm×長さ 7200mm×板厚 $t=6.0\text{mm}$, SS400）1 枚、上配力筋（D16×長さ 740mm, SD295）2 4 本およびコンクリート（ $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ ）で構成される。主部材 I 形鋼の間隔は 500mm とした。

荷重は 5000kN 曲げ圧縮試験機を用いて行った。曲げ性能の評価に着目するため道路橋示方書の T 荷重を想定した 4 点曲げ荷重とした（写真 1）。車両進行を想定した方向に 500×200mm の載荷板 2 枚を中心間隔 1.75m で設置し載荷した。弾性域で 3 回繰り返し載荷した後、漸増載荷を実施した。

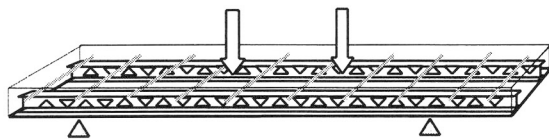


図 2 試験概要

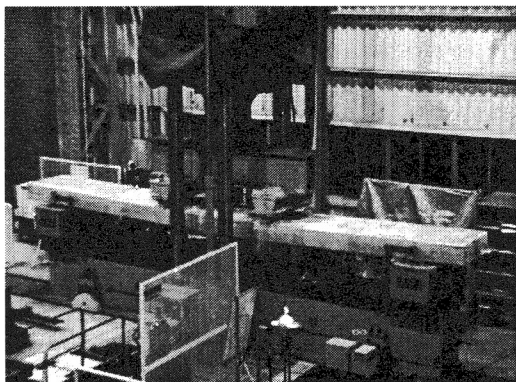


写真 1 載荷状況

2.2 試験結果と考察

試験体中央部の荷重-変位関係を図 3 に示す。図中に示す設計荷重とは、想定支間 6m の床版を設計する場合の設計曲げモーメントと同等のモーメントが中央部のモーメント一定区間に発生するときの荷重（70kN）を意味する。試験体は、設計荷重の 3 倍程度（図中①）まで弾性挙動を示し、最大荷重（図中②）は 413kN で 5 倍以上の値を示した。載荷が進むに連れ、試験体には曲げひび割れが発生し、最大荷重に達した直後、中央部上面コンクリートが圧壊し耐力が低下した。

図 4 に断面内ひずみ分布を中立軸の計算値と合わせて示した。なお、図中の①、②はそれぞれ図 3 に対応した載荷点を示す。図 4 より弾性範囲内（①）では、断面内の上面コンクリート、I 形鋼圧縮縁、底鋼板引張縁のひずみ分布は直線状に分布しており、中立軸の位置も計算値とほぼ一致し、平面保持が成立している。その後、最大耐力に達した時点（②）で底鋼板の歪みが増大し、上面コンクリートの圧壊に至る。なお、試験体両端部において、鋼部材とコンクリートとのずれ量を計測したが、ずれは全く確認されなかった。

本試験より、下配力筋省略、主部材ピッチ拡張を図っても鋼部材とコンクリートとは合成効果を発揮し、終局状態に至るまで十分な一体挙動を示すことを確認できた。

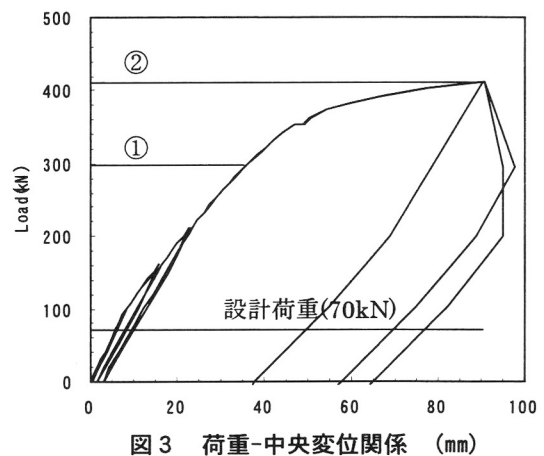


図 3 荷重-中央変位関係 (mm)

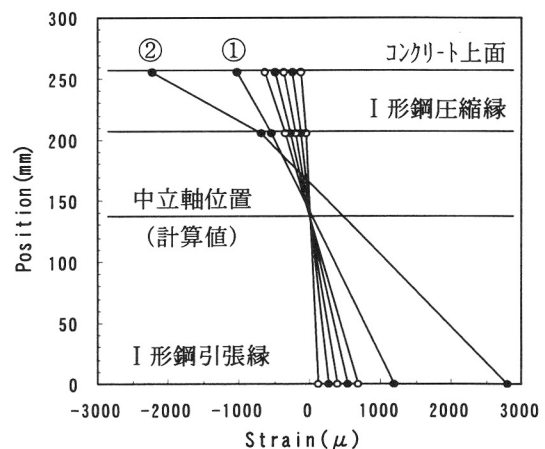


図 4 断面内ひずみ分布 (中央部)

3. 隅肉溶接部の疲労試験

3.1 試験の概要

本床版において鋼構造としての疲労亀裂発生が予想される部位は、形鋼下フランジと底鋼板との隅肉溶接部(非仕上げ)である。特に、隅肉溶接は溶接線直角方向の力の伝達を考慮しない継手であるので、疲労耐久性照査にあたっては、この方向に力が作用する場合の疲労強度を把握しておく必要があると考えられるため、車両走行下の疲労耐久性確認に先立ち、H形鋼(Cut-H200*100, SM490)フランジと底鋼板(幅 80*長さ 800*板厚 6mm)を隅肉溶接(脚長 6mm)した部分モデルを用いて疲労試験を行った(図5)。試験は 1000kN 疲労試験機を用い、応力振幅 80,120,150,170,200MPa の 5 水準で引張側片振り载荷とした。

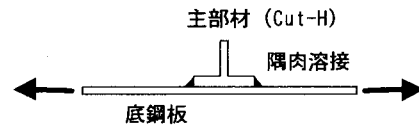


図5 試験概要

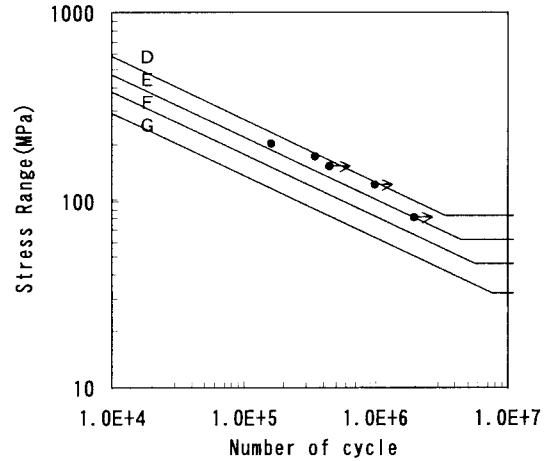


図6 試験結果

3.2 試験結果

図6に試験結果をプロットした。応力振幅 200,170MPa ではそれぞれ 16.4 万回、36.1 万回の時点で溶接止端部より疲労亀裂が発生した。応力振幅 150,120,80MPa ではそれぞれ 45.3 万回、99.4 万回、200 万回まで繰り返し载荷したが疲労亀裂は発生しなかった。図中には JSSC 疲労等級 D~G の S-N 曲線³⁾を併せて示したが、試験結果は E 等級を満足することが分かる。したがって、本床版の構造として用いられる H 形鋼と鋼板の隅肉溶接ディテール(非仕上げ)は E 等級相当の疲労強度を有すると言える。

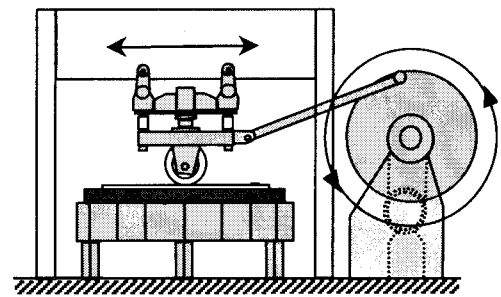


図7 輪荷重走行試験機

4. 床版モデルによる輪荷重走行試験

4.1 試験の概要

車両走行下における疲労耐久性の確認を目的として、輪荷重走行試験を実施した。輪荷重走行試験は、大阪大学所有の輪荷重走行試験機(図7)を用いて実施した。本試験は形鋼ジベルと底鋼板との隅肉溶接部の疲労損傷、形鋼ジベルとコンクリートとのずれ止め性能、形鋼ピッチ拡大および下配力筋省略に伴う疲労耐久性への影響を着目点とした。

試験体の形状を図8に示した。試験体寸法は、幅 2.5m、長さ 3.0m、床版支間 2.2m、コンクリート版厚 200mm、底鋼板厚 6.0mm で、床版支間は 2.2m とした。主部材として高さ 150mm の H 形鋼(H-150*75*5*7)を 400mm ピッチで配置し、主部材間には補強筋 D16 を設置した。主部材直角方向には上配力筋 D13 を 250mm ピッチで配置した。なお、本床版では、下側の孔に対して底鋼板がコンクリート割裂および割裂後の耐荷力保持機能を果たすと考え下配力筋を省略する構造を採用した。鋼部材の材質は SS400、コンクリートの設計基準強度 σ_{ck} は 30N/mm^2 である。H 形鋼と底鋼板とは連続隅肉溶接で接合する。H 形鋼ウェブにはコンクリートとの合成效果向上を目的として、上下 2 段に $\phi 45$ の開口を 125mm ピッチで千鳥に設けた。

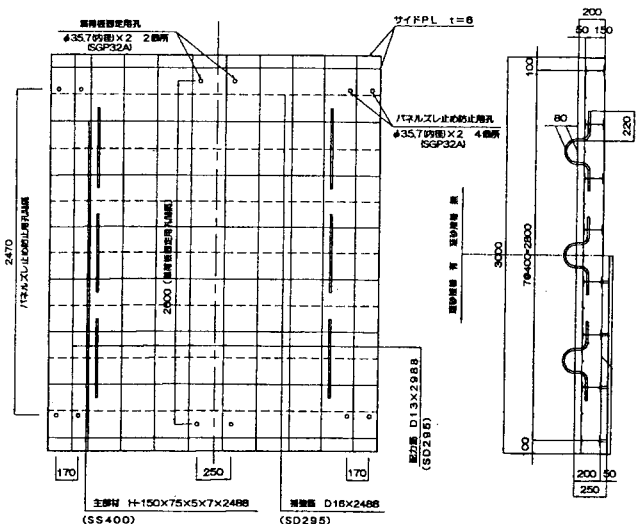
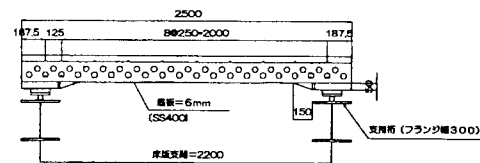


図8 試験体 (単位: mm)

また、形鋼とコンクリートとの付着特性向上を図る目的で、片側4本のH形鋼上フランジに珪砂を塗布し、その効果を検証することとした。底鋼板および主部材に珪砂を塗布した場合に合成効果が向上するとの報告⁴⁾があるが、主部材上フランジのみに塗布し、形鋼の圧縮部とコンクリートとの一体性を向上させることができれば、床版の疲労耐久性を向上できると考えられる。珪砂は粒径1mmの5号珪砂を使用し、エポキシ樹脂により形鋼上フランジに接着させた。

なお、コンクリート材料は設計基準強度(7日強度) $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の早強コンクリートを使用した。材料試験の結果、7日目に 21N/mm^2 の強度しか発現しなかった。ただし、3週目以降に 31N/mm^2 の一定強度に推移したため、コンクリートの打ち直しはせず、試験を実行することとした。

試験体の支持条件は、橋軸方向2辺単純支持、橋軸直角方向2辺弾性支持とした。載荷方法は、図9に示す通り $147\text{kN}\times 35$ 万回往復→ $176\text{kN}\times 15$ 万回往復→ $206\text{kN}\times 20$ 万回往復の合計70万回往復とした。

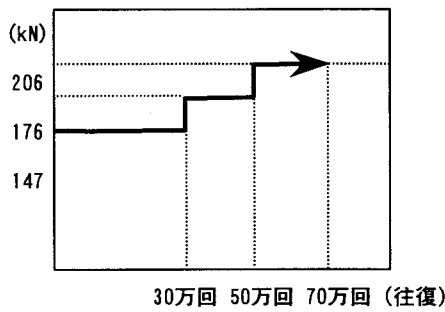


図9 載荷パターン

4.2 試験結果

(1)変位の推移

図10に床版中央の総たわみ、残留たわみ、活荷重たわみの推移を示す。載荷荷重の増大に伴い総たわみは増加する。活荷重たわみは荷重の増加ほぼ比例した値で増加するが、同一荷重範囲では載荷が進んでもほぼ一定の値で推移し大きな変動はなく安定していることが分かる。残留たわみは漸増傾向にあるが、70万回往復載荷終了時点においても床版支間の1/2000以下の小さい値である。

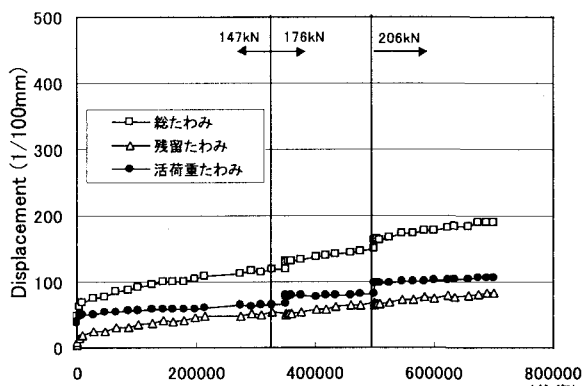


図10 鉛直たわみの推移 (床版中央)

(2)ひずみの推移

図11、図12に床版中央(形鋼間隔)および隅肉溶接部裏側の底鋼板の活荷重ひずみの推移を示した。図11より床版中央には、 147kN 載荷時で橋軸直角方向には 75μ のひずみが発生しているのに対して、橋軸方向には約70%の 53μ のひずみが発生している。底鋼板が荷重分散に有効に機能しているため、橋軸方向にも力が伝達されていると考えられる。いずれの方向の値も70万回往復終了時点でも応力換算で 20MPa 程度の値である。図12に示す溶接部裏側では、橋軸方向に対する橋軸直角方向の発生ひずみの割合が大きく、床版中央と比較して異方性が発現している。これはH形鋼が近傍にあるため橋軸直角方向の剛性が部分的に大きくなっていることによると考えられる。両方向とも載荷が進行しても発生ひずみの変動は小さく、70万回往復後の発生ひずみは橋軸直角方向で 160μ (応力値 32MPa)、橋軸方向で 95μ (応力値 19MPa)程度で疲労損傷には至らないレベルである。

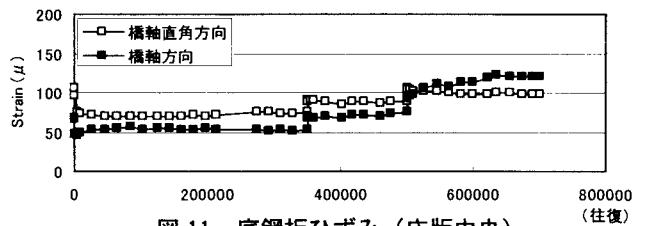


図11 底鋼板ひずみ (床版中央)

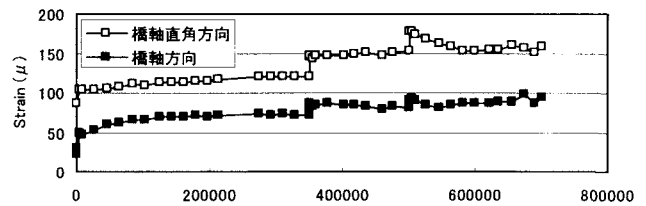


図12 底鋼板ひずみ (隅肉溶接部裏側)

(3)中立軸位置の変化

図13に床版中央部のH形鋼(珪砂あり)の上フランジおよび下フランジ裏面に位置する底鋼板の橋軸直角方向に貼付した1軸ゲージのひずみ値(147kN 換算値)を示す。図には全断面有効断面、引張コンクリート無視断面、鋼部材断面の計算上の中立軸位置(点線)も併せて示した。

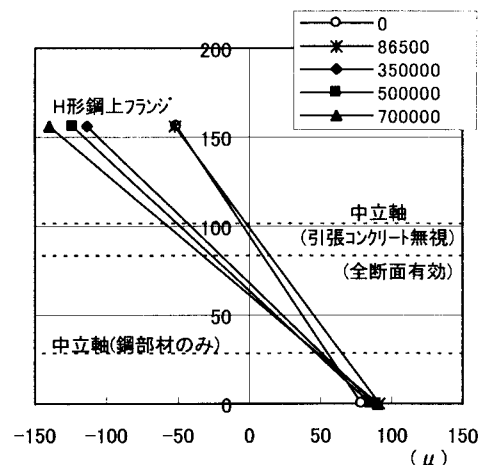


図13 鋼部材ひずみ分布 (橋軸直角方向)

図 13 によると、荷重初期の中立軸は全断面有効を仮定した計算上の中立軸よりもやや上側にある。8.6 万回時点で底鋼板側のひずみが若干増え、中立軸位置は引張コンクリート無視を仮定した計算上の中立軸に近づく。35 万回以降は H 形鋼上フランジのひずみが増加し、中立軸は全断面有効を仮定した計算上の中立軸よりも下側に移行する。今回の試験体は、コンクリート強度が小さめであったことにより、局所的に損傷を受けた可能性があり、その結果、鋼部材の負担が増加したと考えられる。

(4) H 形鋼の挙動

図 14 に試験体中央の H 形鋼ウェブに鉛直方向に貼付した 1 軸ゲージのひずみ変動の状況を示す。このひずみゲージは、車両走行に伴う H 形鋼の首振り現象の有無を調べることを目的として 1 軸ゲージを表裏に貼付し、ひずみの変動を動的計測した。動的ひずみは 0.01 ピッチで 5 秒間計測したが、輪荷重はその間に 2.3 往復する。図 14 には荷重開始時点(a)および 50 万回往復時点(b)の計測結果を示した。荷重開始の時点ではひずみの変動は小さいが、50 万回の時点では変動が顕著で、表裏のひずみの発生傾向が逆転していることが確認できる。なお、このひずみ変動は 1 万回往復時点から現れ始めた。また、H 形鋼の端部にも同様の計測を実施したが、ひずみの変動は確認できなかった。これより、コンクリート中に埋設された H 形鋼の支間中央部は、車両走行に伴い橋軸方向に曲げが発生するような挙動を示していると言える。

(5) 試験体の状況

試験体は最大 206kN の荷重を含む合計 70 万回往復終了後も急激な変位、ひずみの変化は認められず、破壊には至らなかった。ただし、図 15 に試験終了後の試験体の状況を示すように、試験体上面にひび割れ発生が認められた。ひび割れは H 形鋼上フランジに沿って発生している。図 13 において試験体中央の最も長いひび割れは、35 万回往復時点(176kN)に試験体端部から発生し、その後、試験体中央に向かって徐々に進展した。このひび割れは珪砂を塗布した側の H 形鋼に沿って発生した。珪砂を塗布していない側(図中の上半分)は荷重点直下のみひび割れ発生が認められた。ひび割れ幅はいずれも 0.04mm 以下で、すぐに破壊につながるものではないと考えられる。これらのひび割れは、コンクリート強度が比較的小さかったこと、上配力筋ピッチが大きめであったことなどが影響していると考えられる。したがって、コンクリート強度を十分に確保し、上配力筋ピッチを小さくすることにより、これらのひび割れ発生を防ぐことができると考えられる。

試験終了後、試験体を切断し、溶接部にカラーチェックを実施したが、疲労亀裂は発見されなかった(写真 2)。

以上より、本床版はコンクリートの損傷が若干進展した可能性はあるが、疲労耐久性の低下は認められなかった。鋼部材がコンクリートの損傷を補うように荷重を負担するため、疲労耐久性の低下を防ぐことができると考えられる。

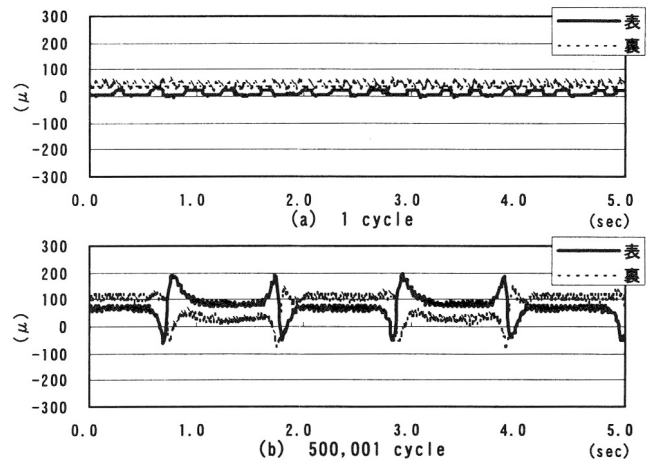


図 14 H 形鋼ウェブの動的ひずみ

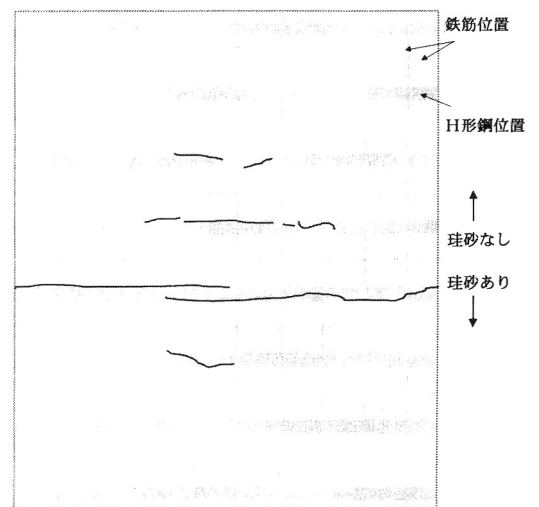


図 15 試験体上面ひび割れ状況

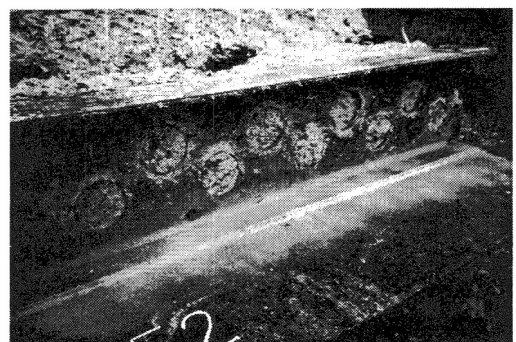


写真 2 隅肉溶接部(解体後)

4. 3 FEM 解析結果との比較による挙動の考察

試験結果の傾向を把握するため FEM 解析を実施し、比較した。FEM 解析は、試験体を直交異方性版としてシェル要素でモデル化した⁵⁾。

図 16 に荷重回数毎の荷重-床版中央たわみの関係および初期荷重時の FEM 解析結果を、図 17 に活荷重たわみ分布(橋軸方向)の試験結果および初期荷重時の FEM 解析結果を示した。

図 16 には初期荷重時において、全断面有効を仮定し、

ヤング係数比 n を 7,10,15 の 3 種類に変化した場合の FEM 解析結果を示したが、 $n=10$ の場合に試験結果とほぼ一致していることが分かる。載荷が進むに連れてたわみは増加するが、図 16 から分かるように、荷重-変位関係を示す勾配は徐々に小さくなる。

図 17 には全断面有効を仮定し、 $n=10$ の場合の橋軸直角方向のたわみ分布を示したが、初期載荷時の試験結果とほぼ一致する。初期載荷以降の解析においては、通常、引張コンクリート無視を仮定して計算を実施する場合が多く、本試験体についても同様に計算したが、8.6 万回程度の比較的早い段階で、試験結果が解析結果を上回った。これは、前述の図 13 で示した通り、8.6 万回以降に鋼部材の負担が増加しており、通常の解析で仮定する挙動を示していないことが理由として挙げられる。

本試験ではたわみの変化は微増傾向にあるもののその絶対値は小さい。たわみが微増傾向にある理由として、コンクリート強度の影響、構造簡素化の影響、載荷板の大きさの影響が挙げられる。コンクリート強度の影響に関しては、今回の試験体に用いた早強コンクリートは、7 日強度が設計基準強度($\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$)に到達しなかった。その後、3 週強度は設計強度を満たしているものの、初期の発現強度が小さいコンクリートであったことが、コンクリートの劣化を早めた一因と推定される。また、今回の試験体

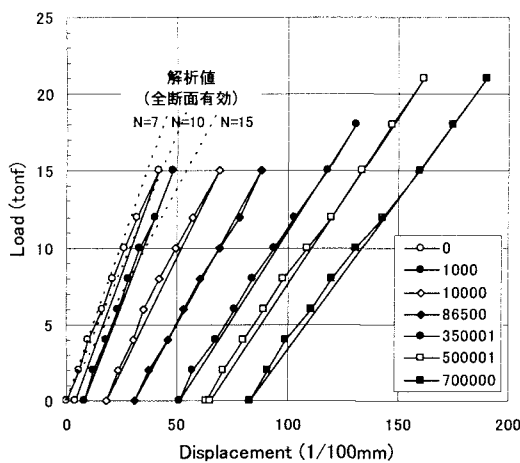


図 16 鉛直たわみの変化 (橋軸直角方向)

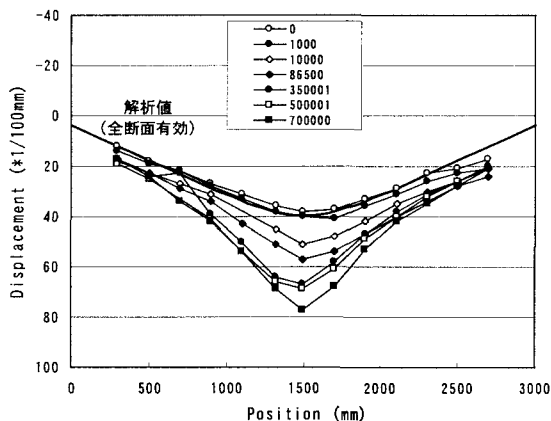


図 17 鉛直たわみ分布 (橋軸方向)

は構造をできる限り簡素化し、疲労耐久性が確保できる範囲で最も厳しい仕様を採用したことも、劣化の進行に影響していると考えられる。さらに、試験体の H 形鋼ピッチは、道路橋示方書で規定されている輪荷重接地面積 $200 \times 500\text{mm}$ を想定して 400mm に決定したが、試験で用いた載荷板寸法は $120 \times 300\text{mm}$ と小さく、形鋼間のコンクリートの押し抜きせん断に対する抵抗力の低下につながった可能性がある。以上の劣化進行は、コンクリート強度の適切な管理、上配力筋ピッチ、コンクリート純かぶりの適切な設定により防止することが可能である。なお、実際の構造では、パネル間継手部に継手筋を挿入するため、内部ひび割れの防止効果が期待でき、疲労耐久性向上に寄与すると考えられる。

5. まとめ

形鋼ジベル、底鋼板、コンクリートとで構成される合成床版に着目した性能確認試験を実施し、下記の知見を得た。

①部分モデルによる静的耐荷力試験の結果、下配力筋省略、主部材ピッチ拡張を図っても鋼部材とコンクリートとは合成効果を発揮し、静的な終局状態に至るまで十分な一体挙動を示すことができる。

②H 形鋼と底鋼板の隅肉溶接(非仕上げ)が溶接線直交方向に引張力を受けることを想定し、部分モデルによる疲労試験を実施した結果、JSSC 規定で E 等級相当の疲労強度を有することが分かった。

③最大 206kN の載荷を含む合計 70 万回往復の輪荷重走行試験を実施した結果、載荷終了後も床版のたわみ、底鋼板のひずみには急激な変化は認められず、下配力筋省略、主部材ピッチ拡張を図っても疲労耐久性の低下にはつながらないことが分かった。

④床版の劣化を防止するためには、コンクリート強度の適切な管理、上配力筋ピッチ、コンクリート純かぶりの適切な設定が必要である。

【参考文献】

- 1)阿部,久保,高木,竹内: 各種合成床版の構造と適用例, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1998.11.
- 2)土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 平成 9 年版.
- 3)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.
- 4)松井,石橋,久保: FRP 永久型枠を用いた RC 床版の静的強度・疲労耐久性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, 1994.3.
- 5)大田,森,高木,松井: 鋼少数主桁に適用する I 形鋼格子床版の設計法に関する考察, 橋梁と基礎, Vol.31, No.2, pp.35-44, 1997.2.