

# 鋼床版Uリブと横桁の合成接合方法に関する 実物大梁モデルを用いた実験的研究

Experimental study on composite joints of U-ribs and cross beam in steel deck  
by real scale beam model

森忠彦\*, 櫻井信彰\*\*, 室井進次\*\*\*, 藤田泰\*\*\*\*

Tadahiko Mori, Nobuaki Sakurai, Shinji Muroi and Yasushi Fujita

\* 新日本製鐵 鋼構造研究開発センター 主任研究員 (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

\*\* 新日本製鐵 鉄構海洋事業部 設計部 マネジャー (〒229-1131 神奈川県相模原市西橋本 5-9-1)

\*\*\* 新日本製鐵 鉄構海洋事業部 建設・技術部 グループリーダー (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

\*\*\*\* 新日本製鐵 鉄構海洋事業部 建設・技術部 部長 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

An experimental study is carried out in order to confirm the static and fatigue behavior of a new orthotropic steel deck. The new deck has composite connections with studs and mortar grout in the U-ribs which are directly connected to cross beams. The test specimen is real scale two-span-U-rib model. From the test result, static and fatigue behaviors of joints, U-rib and studs in the new deck system are made clear. Further the adaptability of the bridge construction is discussed.

Key words: orthotropic steel deck, composite connection, experiment, U-rib

## 1. 緒言

長大橋、都市内高架橋で鋼床版は軽量化の点では優れているものの、多数の鋼部材を溶接により組み立てた構造を有するため、合成床版、PC 床版などの他の床版形式と比較すると相対的にコストが高くなっている。

筆者らは、多電極溶接ラインを有効活用することにより製作コストの低減が可能なUリブを用いた新形式の鋼床版を提案してきた(図1)。提案鋼床版は、従来の鋼床版構造において製作コストアップの要因となる縦リブと横桁(横リブ)との接合部に改良を加えたものである。具体的にはUリブを横桁に直接設置し、その交差部をスタッドと充填コンクリートにより固定する<sup>1), 2)</sup>(図2)。この形式の採用により、従来の複雑な横リブを省略し、製作コスト低減と疲労強度向上を狙いとしている。

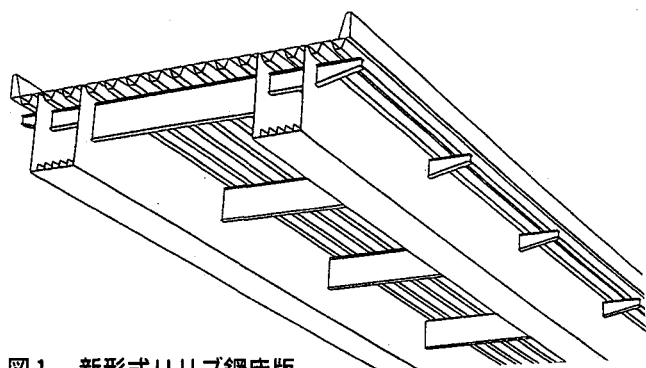


図1 新形式Uリブ鋼床版

現在までに実施した部分モデル静的試験により、合成接合部の圧縮強度、曲げ強度が実用上十分高いこと、回転角を与えた場合の挙動を実験的に確認した<sup>1)</sup>。

本論文では、前回の試験を一步推し進めた梁状の実物大試験体による静的試験および疲労試験の結果について述べる。接合部の構造は、今までに得られた知見および製作性、施工性を考慮し、実用上最も有望と判断されるスタッド+コンクリート充填形式を前提として試験を実施した。静的試験では梁状試験体各部位の発生応力度を明らかにする。その上で疲労試験を実施し、応力集中が予想されるスタッド部を中心にその疲労強度を確認する。さらに、実橋への適用性に関する考察を加える。

(なお、本論文は文献 2)で発表済みの試験結果の一部に新たな知見として3.1, 5章を追加して再構成した。)

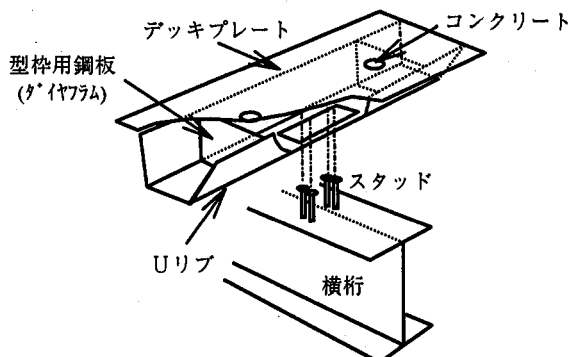


図2 縦リブ-横桁交差部の新接合構造

## 2. 試験体の種類と載荷方法

載荷試験は、図3に示す実物大試験体1体を用いて実施した。この試験体はデッキプレートおよびUリブ3本にて構成され、剛な横桁を想定したH型部材の上に設置する。設置後、Uリブー横桁交差部のデッキプレート側開口部からモルタルを充填することにより、横桁上フランジにあらかじめ溶植したスタッドを介して、Uリブと横桁とを合成構造的に結合する。

試験体を構成するデッキプレートは長さ 7000mm×幅 1920mm×板厚 12mm、Uリブは上幅 320mm×高さ 260mm×板厚 6mm で材質はいずれも SS400 である。スタッドは JIS 規格 (JIS B 1198) に基づく径 19mm×長さ 150mm のものを使用した。充填材は普通コンクリートに膨張材を混和したものをを使用した。

試験体 Uリブは間隔 3.0m で横桁に支持される。通常の鋼床版では横リブ間隔 2.5m が一般的であるが、安全側での照査および今後の Uリブ大型化による縦リブ支間の増大等を考慮し、縦リブ支間を 3.0m とした。また、今回の試験では横桁のたわみ、横桁上フランジの首振りの影響等は無視し、橋軸方向の挙動のみに着目した。したがって、横桁を想定した架台は反力床に固定、接合部直下の架台ウェブには垂直補剛材を溶接した。

Uリブー横桁交差部は Uリブ 1 本につき 3 ヲ所の合計 9 ヲ所存在する。交差部は図4に示すように Uリブ毎に 1 種類ずつ計 3 種類 (A, B, C) の構造を採用した。リブ A は、スタッド 4 本および開口部 ( $\phi 100$ ) 2 個を有する。

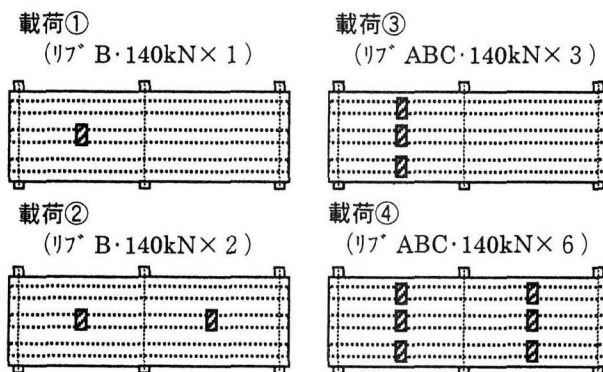


図5 載荷パターン

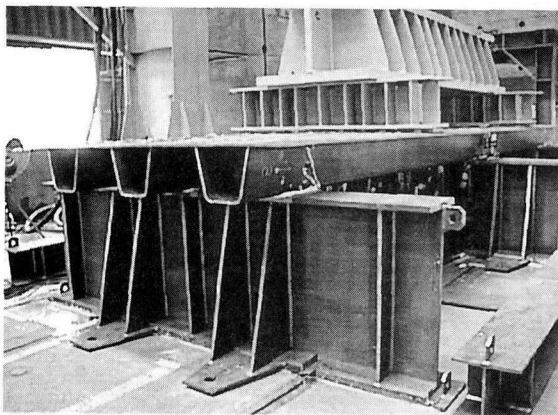


写真1 載荷状況

リブBはスタッド4本、開口部(300×150mm)1個で構成される。リブBは施工性を考慮し、開口部を大きくしたが、その断面欠損分を補う目的で PL-400×60×16 を開口部両側に隅肉溶接した。リブCはスタッド2本、開口部( $\phi 100$ )2個で構成される。いずれの接合部も充填区間は 500mm とした。モルタル充填用の型枠として Uリブ内部に予め 16mm 厚の鋼板(サヤワム)をシール溶接した。

第1ステップとして、図5に示す4種類の載荷パターンで静的載荷試験を実施した。載荷板はB活荷重1輪を想定した 500×200mm の載荷面積を有し、100kN×1.4(衝撃)=140kN を各載荷板に載荷した。載荷①、②ではリブBの発生応力度、変位、および隣接するリブとの荷重分担特性把握を主な目的とした。載荷③、④ではリブA、Cの接合部に着目し、本数が異なる場合のスタッドの発生応力度の把握を行うこととした。

第2ステップとして、静的試験終了後、定點疲労試験を実施した。載荷パターン①の状態で荷重振幅 140kN×200 万回の繰り返し載荷を実施した。さらに荷重を 1.5 倍、2 倍に増加させた上で 30 万回、50 万回実施し、発生応力度、変位の変動を把握した。

上記載荷試験では、荷重、ひずみ、変位のデータを計測した。荷重はロードセルの値を計測し、ひずみは主としてスタッド、接合部付近の Uリブおよびデッキプレートにひずみゲージを貼付し計測した。スタッド溶接部からの疲労亀裂発生が予想されたため、各スタッド基部に 2 枚ずつ 1 軸ゲージを貼付しひずみを計測した。また、充填したモルタルの疲労に対しても懸念されたが、直接的にデータを取得するのは困難だったため、接合部直近および縦リブ支間中央部の変位を計測し、その変化を観察することにより間接的に評価することとした。

なお、今回の一連の試験は 2000kN 構造物疲労試験機を用いて実施した。写真1に載荷状況を示す。

## 3. 静的試験結果および考察

### 3-1. 接合部の挙動

載荷①、②における中間支点(横桁 C)上のリブ B 接合部の鋼部材に発生する橋軸方向の応力を図6に示す。

リブBの接合部に設けた補剛材は、鋼のみの断面として、コンクリート充填用孔による断面欠損がない場合と同等の断面剛性を有するように設計されているが、図6から載荷①、②ともに補剛材にはほとんど応力が発生していないことが分かる。断面設計の仮定では充填コンクリートの効果は無視し、鋼部材のみの断面として設計したため、中立軸が補剛材よりも下方に位置していた。実際には、充填コンクリートと鋼部材は、付着およびダイアフラム型枠の拘束により、ある程度合成されていると考えられ、そのため中立軸が補剛材の位置まで上方に移動したと推定される。また、デッキプレート、Uリブウェブに発生する応力は 40Mpa 以下と小さいこと、およびコン

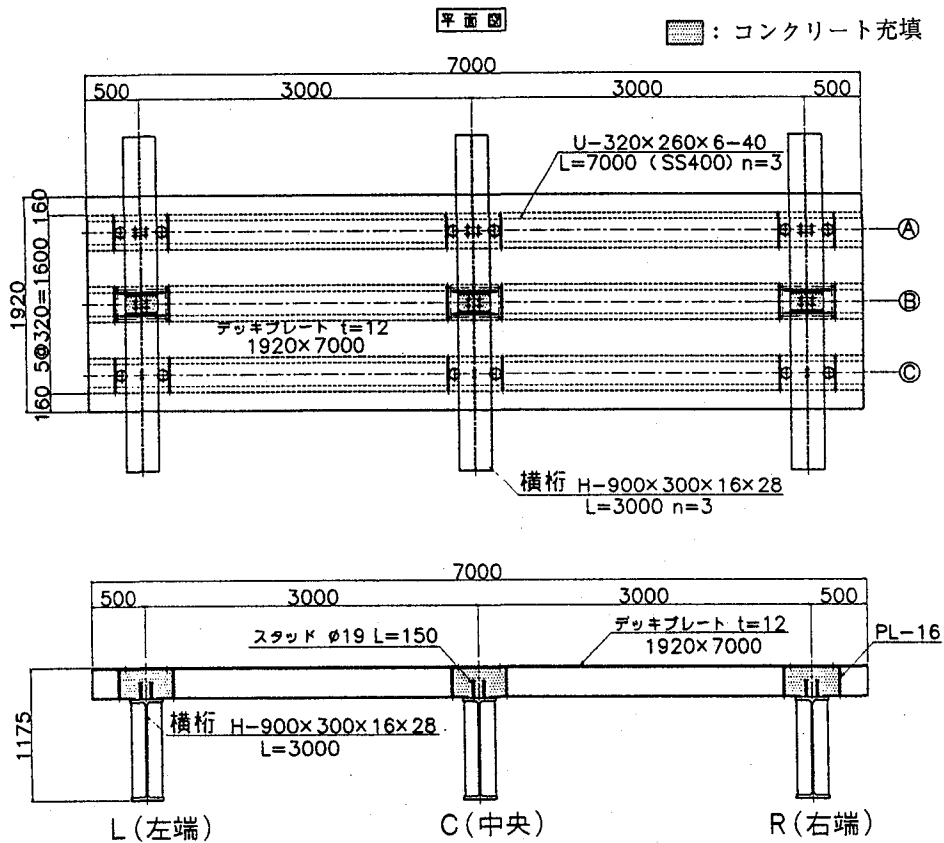


図3 試験体 (単位: mm)

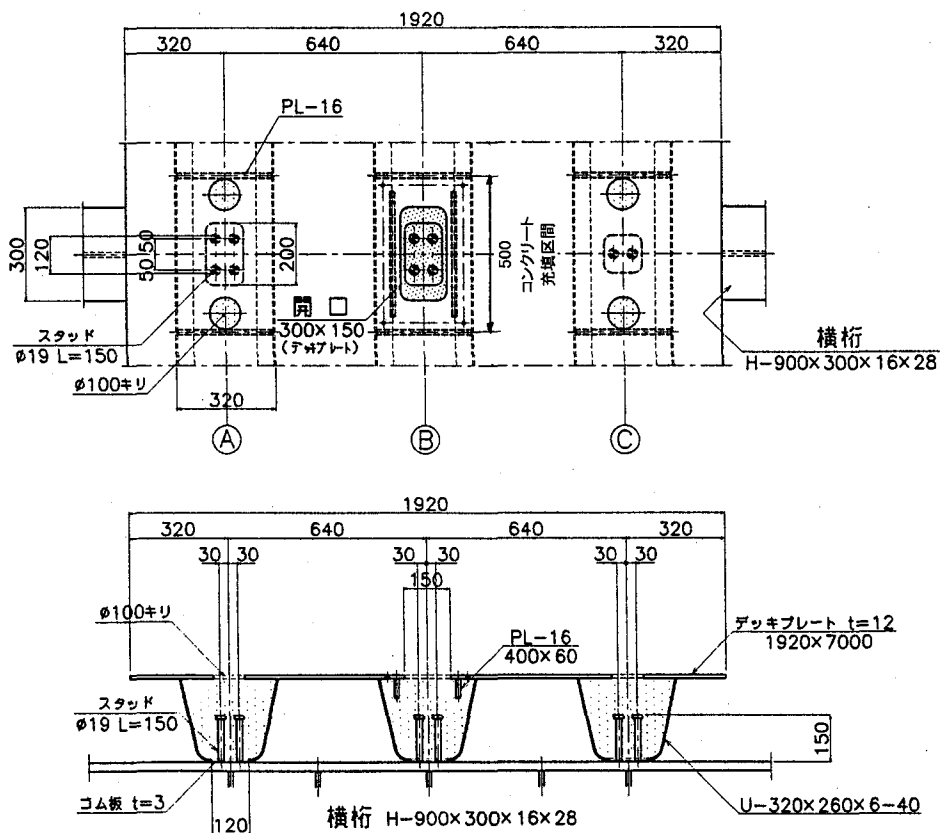


図4 接合部詳細図 (単位: mm)

クリート充填により鋼部材の座屈は防止できることを考慮すると、断面欠損を補うための補剛を特に設ける必要はないと考えられる。

荷重①、②の荷重直下において、各Uリブに発生する橋軸方向発生応力度、鉛直変位を図7および図8に示す。

図7、8より、リブA、Cの発生応力度、鉛直変位は、いずれもリブBの値よりかなり小さくなっている。これは、あるUリブ上に荷重が搭載された場合、その影響は、隣接するリブにはほとんど及ばず、荷重の分担が小さいことを表していると言える。

また、発生応力度、鉛直変位ともに荷重①の方が②より大きくなっている。試験体を2径間の連続梁と単純に仮定して曲げモーメントを計算すると荷重①は荷重②の約1.2倍の値を示すことから、試験結果の傾向は妥当なものであると言える。したがって、試験体の挙動としては連続梁に近い挙動をしていると考えられ、接合部もピン支持に近い挙動を示していると予想される。

なお、今回の試験体は横桁のたわみを拘束しているが、今後は実橋を想定して、横桁のたわみを考慮した場合の荷重分担特性についても明らかにしておく必要があると考えている。

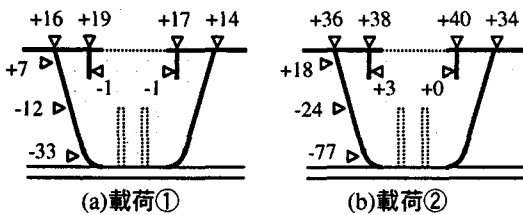


図6 接合部発生応力度 (リブB・橋軸方向)  
(単位: MPa)

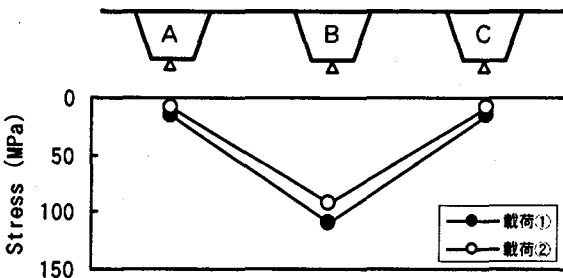


図7 Uリブ支間中央部発生応力度 (橋軸方向)

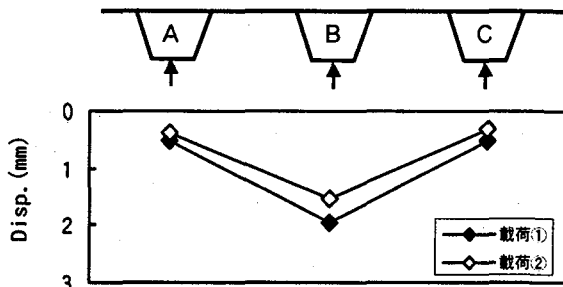


図8 Uリブ支間中央部鉛直変位

荷重①、②におけるリブBのコンクリート充填部付近の発生応力分布を図9に示す。実験では接合部Uリブウェブに3軸ゲージを貼付しており、図9には3軸ゲージのひずみから換算した主応力、主方向をプロットした。

中央支点上の発生応力度は荷重①より②の方が大きく、この部位には荷重②の場合により大きな曲げモーメントおよびせん断力が作用していることを表している。また、最大発生応力度は②の場合でも70MPa以下である。

発生応力度の分布をみると、Uリブウェブの下方に行くに従い、水平方向(橋軸方向)の圧縮作用力が鉛直方向の圧縮作用力よりも卓越していることが分かる。この傾向は全作用力がより大きな荷重②の場合の方が顕著である。これは、作用力の鉛直方向成分は充填コンクリートが、水平方向成分はUリブウェブが主に負担しているためであると推定される。

また、当初、コンクリート充填区間端部で断面剛性が急変するために極端な応力集中が発生すると予想されたが、試験結果を見る限りでは、断面剛性の急変による応力集中の変化はそれほど大きなものではない。しかし、ダイアフラム型枠の仕様や取付け方法、コンクリート充填区間の長さによっては、大きな応力集中が発生することも予想されるので、応力集中の発生が起こりにくいディテールについて今後検討が必要であると考えられる。

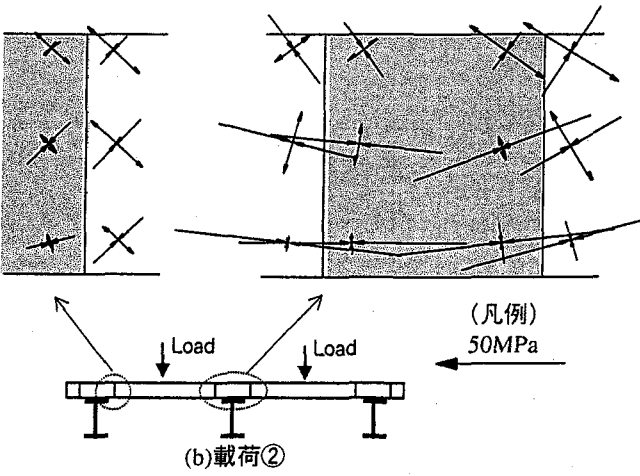
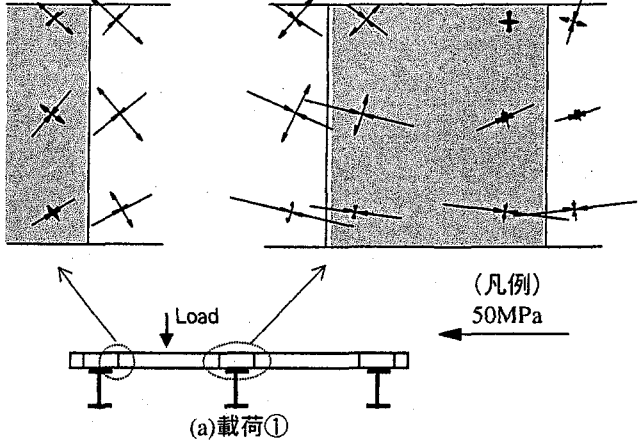


図9 接合部付近の発生応力度 (リブB)

3-2. 接合部スタッドの挙動

図 10 に載荷①、②におけるリブB接合部のスタッドの発生応力度を示す。各接合部において、スタッドは2×2=4本ずつ溶接されているが、図では縦リブ直角方向の2本のスタッドに発生する応力度の平均値を示した。また、発生応力度を曲げ成分および軸力成分に分解し、曲げは時計周りを正、軸力は引張方向を正として示した。

なお、実際の橋梁においては横桁のたわみ、横桁上フランジの首振り等が発生するため、スタッドに作用する力の方向は一方向のみではない。本試験はまずは橋軸方向に配置された縦リブの変形に伴うスタッドの挙動にのみ着目したので、発生応力度を図 10 に示すように分解し評価することとした。

図 10 より、いずれのスタッドにも曲げおよび軸力が作用していることが分かる。

図 10(a)では横桁L(左端)とC(中央)の中間部に載荷板があり、横桁LおよびC上のスタッドには載荷板に向かう方向の曲げが発生している。また、軸力は載荷板に近い方のスタッドには圧縮、遠い方には引張が発生している。軸力の大きさはほぼ同等であるが、曲げの大きさは横桁L上のスタッドに約2倍発生している。横桁R(右端)上のスタッドの発生応力度は、曲げ、軸力ともに他よりも小さい値を示している。

図 10(b)では2点載荷の状態にあり、この場合、両端の横桁L、R上のスタッドはいずれも載荷板に向かう方向に曲げが発生し、載荷板に近い方のスタッドには圧縮、遠い方のスタッドには引張が発生している。中央の横桁C上のスタッドも載荷板に向かう方向に曲げが発生しているが、左右のスタッドで曲げの向きが異なるのが特徴的である。また、横桁L、R上のスタッドは曲げが卓越しているのに対し、横桁C上のスタッドは圧縮が卓越していることが分かる。

なお、ひずみゲージの計測値から換算される発生応力

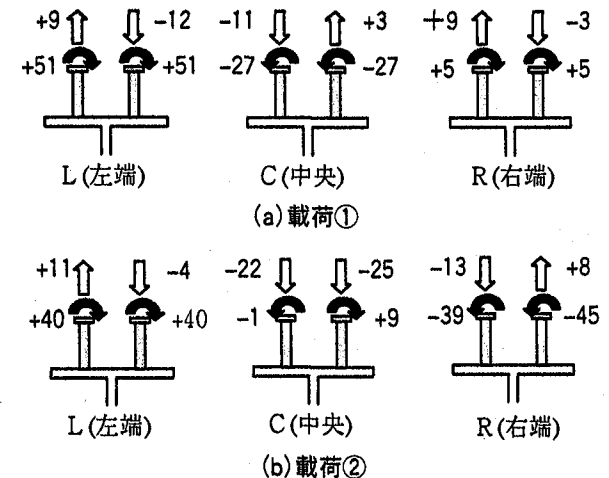


図 10 スタッドの発生応力度 (リブB) (単位: MPa)

度の最大値は、引張+60Mpa、圧縮-66Mpa (スタッド引張降伏応力度の 25%程度) で、いずれも載荷①の場合の横桁L上のスタッドに発生した。

図 11 に載荷④におけるリブA、C接合部のスタッドの発生応力度を示した。

リブBの場合と同様、リブA、Bのスタッドにも曲げおよび軸方向力が作用していることが分かる。

リブAでは、両側の横桁L、R上のスタッドには載荷板に向かう方向に曲げが発生し、外側のスタッドには内側と比較して大きな引張が作用している。横桁C上では曲げよりも軸方向圧縮力が卓越している。

リブCでは各横桁上にはスタッドが2本ずつ溶接されている。発生応力の傾向は他のリブの場合と同様である。横桁C上では卓越した圧縮力が作用し、一方、両側のスタッドには曲げおよび引張力が作用している。

横桁L、R上のスタッドの軸方向力の傾向から、スタッドには、それ自身に作用する局所的な曲げモーメント以外に、軸方向力の偶力による曲げモーメントが作用していると考えられる。この曲げモーメントの中心は、横桁ウェブ直上ではなく、載荷点に近い側の上フランジ端部付近にあると推定される。

また、リブA、Cのスタッドの発生応力度の比較より、スタッド1本当たりの発生応力度はほぼ同等であるといえる。すなわち、スタッド1本に作用する力は配置したスタッドの本数に関わらずほぼ一定であると言える。接合部ではスタッド以外に、デッキプレート、Uリブ、充填モルタルが作用力を分担しているが、スタッドの本数に応じて、スタッド以外の部材が分担する作用力が変化するのではないかと予想される。橋軸方向の挙動のみに着目した場合、接合部のスタッド本数の決定は作用力よりも製作方法その他の要因で決定した方が合理的であると推定される。

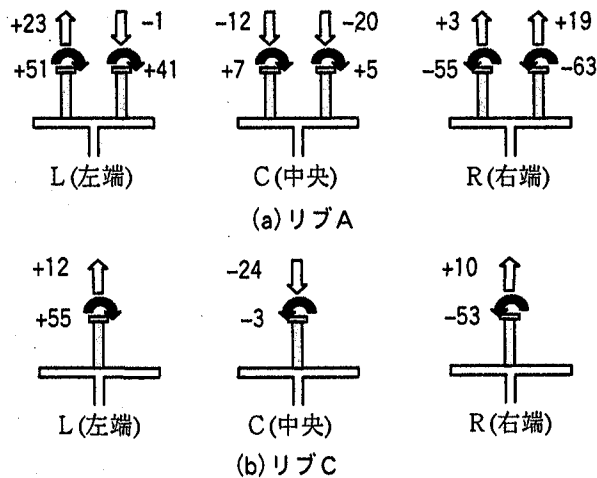


図 11 スタッドの発生応力度 (載荷④) (単位: MPa)

4. 疲労試験結果および考察

静的試験より接合部スタッドをはじめとした各部位の発生応力状況が把握できた。スタッド以外の部位については文献 3) により疲労強度の推定がある程度可能である。一方、スタッドについては、本来せん断力伝達のために使用される部材であるため、本構造のように軸力および曲げが同時に作用する場合の疲労強度に関する規定はない。最近の少主桁橋梁に関する検討の中で、長支間のコンクリート系床版と主桁との接合にスタッドを用いる場合、せん断力以外に軸方向力が作用する現象について研究が進められている<sup>4)</sup>。しかし、このような作用下でのスタッドの疲労現象に関する研究は少ない<sup>5)</sup>。

本論文では、静的試験に引き続き同一の実物大梁モデルを用いて、接合部スタッドをはじめとした溶接部位の疲労強度を確認するため定点疲労試験を実施した。なお、床版の疲労現象の解明にあたっては、通常は縦リブ・横

桁交差部のせん断力の反転を考慮した位相差载荷試験あるいは輪荷重走行試験を実施する必要があるが、本研究は、あくまで今後の版レベルの疲労試験に参考となる基礎データを得ることを目的としたので、静的試験と同一の梁レベル試験体を用いて、定点での疲労試験を実施することとした。载荷位置は図 5 の载荷①とし、荷重 140kN で 200 万回繰り返し载荷した後、荷重 210kN (140kN×1.5) で 30 万回 (200 万回～230 万回)、さらに荷重 280kN (140kN×2.0) で 50 万回 (230 万回～280 万回) 繰り返し载荷した。

疲労試験結果として、図 7、図 8 にリブ B の接合部スタッドの発生応力度の変動を、図 9 にリブ B 支間中央部の鉛直変位の変動をプロットした。

図 12、図 13 よりリブ B 接合部スタッドの応力に関しては、横桁 L (左端) 上のスタッドに若干の応力変動が見られるものの、それ以外の部位には変動はほとんどない

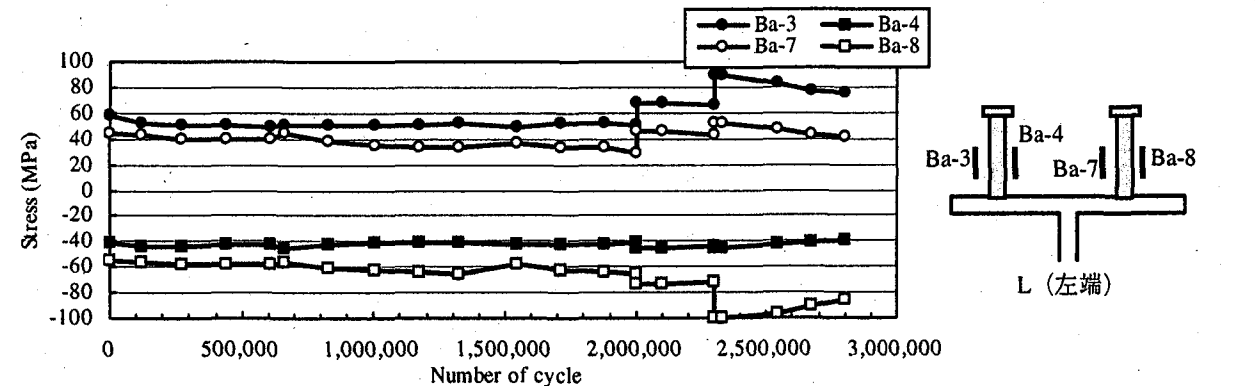


図 12 疲労試験結果 (リブ B・端部支点上スタッドの発生応力度)

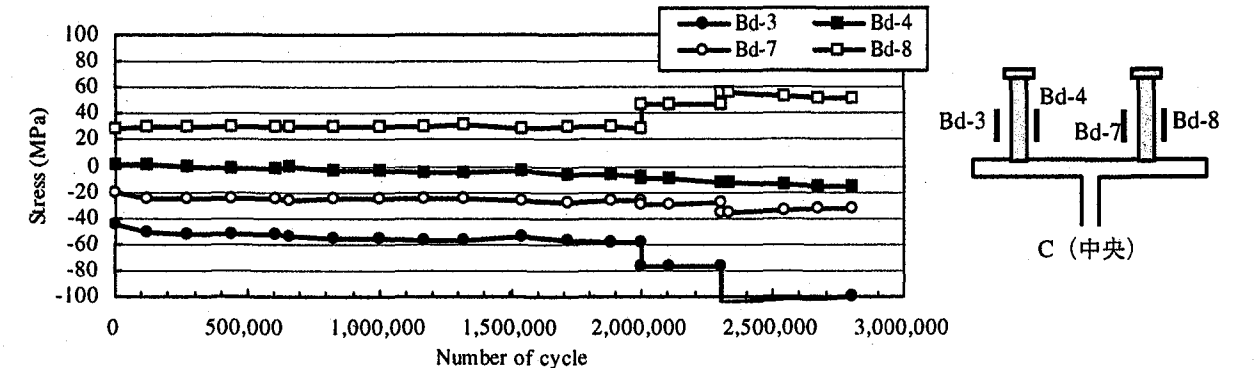


図 13 疲労試験結果 (リブ B・中間支点上スタッドの発生応力度)

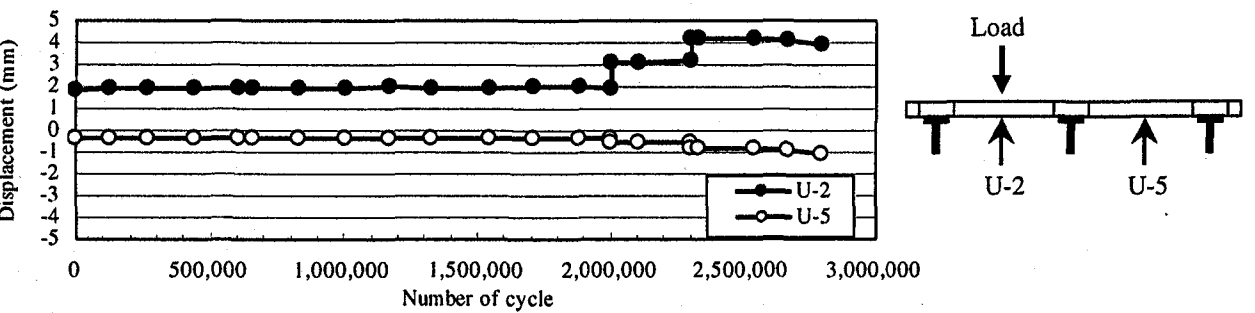


図 14 疲労試験結果 (リブ B 支間中央部の変位)

と言える。図 14 の鉛直変位の変動も 200 万回まではほとんど変動が認められない。前述の横桁 L (左端) 上のスタッドの若干の変動については、鉛直変位がほとんど変化していないことから、構造上問題となる変動ではないと考えられる。同様に荷重を 1.5 倍した 200 万回～230 万回の載荷においても接合部スタッドの発生応力度、鉛直変位はほとんど変化が認められないと言える。

荷重を 2.0 倍にした 230 万回～280 万回の載荷において、230 万回時点と 280 万回時点の発生応力度を比較すると、発生応力の絶対値が約 10% 程度低下していることが分かる。変位は若干変動しているもののその変動は小さいため、スタッド溶接部に疲労亀裂などの構造上問題となる損傷は発生していないと考えられる。スタッドとその周辺部コンクリートとの付着切れなどの若干の変化が発生した可能性はあると推定される。

280 万回の繰り返し載荷後、載荷位置を図 5 の②に設定し、荷重 280kN で 30 万回、さらに荷重 560kN (280kN × 2.0) で 30 万回の載荷を実施した。一連の試験終了後、接合部を解体し、目視およびカラーチェックにより損傷状態を観察した。写真 2、3 に横桁 L (左端) 上の接合部の解体後の状況を示す。スタッド周辺部のコンクリートおよびスタッド溶接部は健全な状態で、疲労亀裂などの損傷は全く認められなかった。

定点疲労試験結果だけから疲労強度を論じることではできないが、試験結果を見る限りでは、最大 90MPa 程度の比較的大きい応力がスタッドに発生していても損傷の発生がないことから、本接合形式はある程度の疲労強度は有していると推定される。

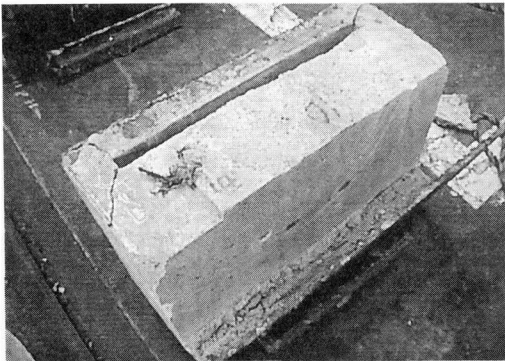


写真 2 疲労試験後の充填コンクリートの状況

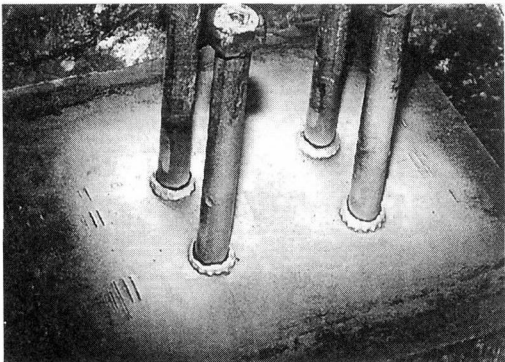


写真 3 疲労試験後のスタッドの状況

なお、実橋への適用時の疲労強度に対しては、今後、移動荷重を再現した疲労試験を実施し、その試験結果から評価する必要があると考えられる。

5. 実橋への適用性に関する考察

前述の実物大梁モデルによる実験的研究においては、橋軸方向のみに着目して、提案鋼床版の性能を確認した。実橋への適用にあたっては、横桁の変形も考慮した版としての性能を確認する必要がある。特に、本鋼床版はUリブと横桁とは交差部で合成構造的に結合されているため、通常の版とは異なった挙動を示す可能性がある。本章では、橋軸直角方向の挙動に着目して 3 次元 FEM 解析を実施し、横桁とUリブの合成作用について検証したので以下にその概要と解析結果から得られた知見を述べる。

解析にあたっては、今後の大型Uリブの適用を想定し、大型Uリブ (U-450\*330\*8) 8 本から構成される幅員 7.25 m、横桁間隔 5 m、デッキプレート厚 19 mm の鋼床版箱桁を対象とした。

解析ツールとして、汎用性有限要素解析プログラム MARC (K6.2) を用い、橋軸方向を対称軸とした鋼床版 1/2 対象モデルにより解析を行った。解析モデルの概要を図 15 に示す。解析モデルは、デッキプレートおよびUリブはシェル要素、充填コンクリートはソリッド要素、スタッドは梁要素でモデル化した。接合部の鋼床版、コンクリートおよびスタッドは解析上は一体とし、コンクリート充填孔等の開口部はモデル化していない。また、横桁上フランジと鋼床版とはスタッドのみで連結された状態をモデル化した。

境界条件は、主桁と鋼床版の接合部は単純支持 (Z 変位および X 回転固定)、中央部橋軸方向対称線は X 変位のみ固定、橋軸直角方向の相対する 2 辺は Z 変位のみを固定した。

載荷は中央部の横桁に着目し、載荷面積 500mm × 200mm の B 活荷重 140kN (衝撃含む) を橋軸直角方向に満載した。

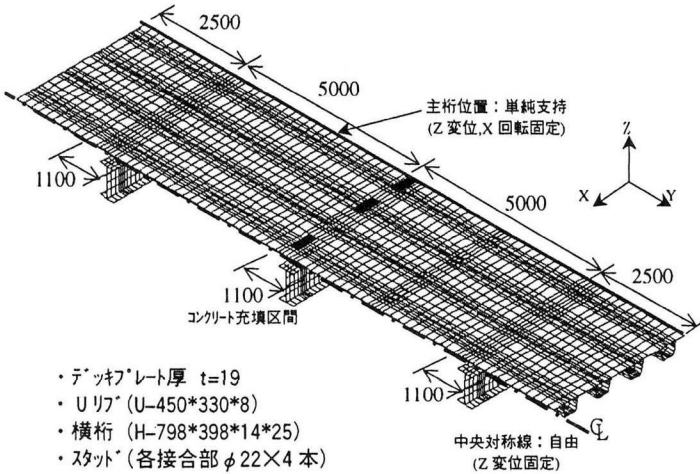


図 15 FEM 解析モデル概要 (単位: mm)

解析結果を図 16 に示す。図には横桁上の各断面(A～E)における横桁およびデッキプレートの橋軸直角方向の発生応力度を示した。

図 16 から明らかなように、デッキプレートには応力がほとんど発生しておらず、各断面の横桁とデッキプレートの間には平面保持が成り立っていないことが分かる。本構造のような断続的な結合状態ではせん断力が十分に伝達されないと推定される。ただし、横桁の中立軸は上フランジに比較的近い位置にあることから、接合部はある程度の力を分担していると考えられる。

接合部でせん断が伝達されない場合、横桁の負担が大きくなり、通常よりも横桁サイズが大きくなる可能性がある。本構造では製作コスト低減のためH形鋼を使用しているが、H形鋼のサイズはある程度限定されるため、合成作用を期待した設計で応力に余裕がある場合は、非合成で設計した場合でも同サイズのH形鋼を使用できる可能性もある。その場合は非合成構造として設計してもコストアップには繋がらない。

また、合成効果を期待しないのであれば、大型Uリブを採用してUリブ間隔を大きくした場合でも、設計上は問題ないと推定される。

また、スタッド本数の設計においては、3-2 で述べた橋軸方向に着目したスタッドの挙動と同様、作用力(せん断力)以外の要因で決定した方が合理的な設計に繋がる可能性があると言える。

## 6. 結言

本論文ではUリブと横桁とを改良した新型鋼床版に対して実施した載荷試験(静的、疲労)および3次元 FEM 解析について述べた。得られた知見を以下にまとめる。

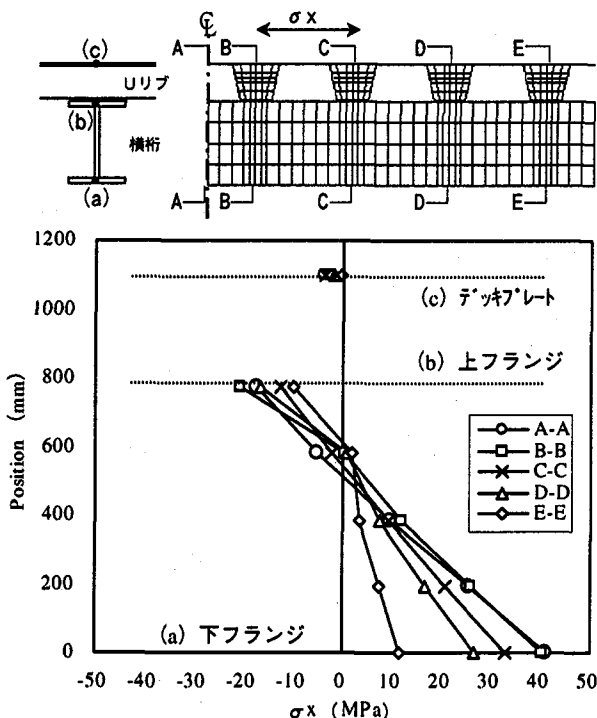


図 16 横桁-デッキプレート発生応力度 (橋軸直角方向)

(なお、(2)は文献2)で発表済みであるが、(1)、(3)、(4)は今回得られた新たな知見である。)

(1) 提案鋼床版においては、あるUリブ上に荷重が搭載された場合、その影響は、隣接するリブにはほとんど及ばず、荷重の分担は小さい。

(2) 接合部付近の発生応力度の分布より、Uリブウェブの下方に行くに従い、水平方向(橋軸方向)の圧縮作用力が鉛直方向の圧縮作用力よりも卓越する。これは、作用力の鉛直方向成分は充填コンクリートが、水平方向成分はUリブウェブが主に負担しているためであると推定される。

(3) 縦リブ支間中央部にB活荷重を想定した載荷を行った場合、接合部のスタッドには曲げおよび軸力が同時に作用する。橋軸方向の挙動のみに着目した場合、接合部のスタッド本数の決定は作用力よりも製作方法その他の要因で決定した方が合理的である。

(4) 横桁に着目した3次元 FEM 解析結果より、本構造のような断続的な結合状態では、デッキプレートには橋軸直角方向の応力がほとんど発生せず、横桁とデッキプレート間に平面保持が成り立たない可能性があることが分かった。

今後、実橋への適用を想定して、横桁のたわみ、横桁上フランジの首振り考慮した実物大パネルによる載荷試験を実施し、鋼床版全体としての力の流れを明確にしたいと考えている。それと並行して接合部の力学的メカニズム解明および疲労照査法について検討する予定である。さらに車両の通行を再現した疲労試験により、本提案鋼床版の疲労強度を最終的に評価する計画である。

最後に今回の研究実行にあたり貴重な助言を下された東海大学中村俊一教授に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 中村, 森, 藤田, 長井: 鋼床版Uリブと横桁の合成接合方法に関する基礎的実験, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1153-1160, 1997.3.
- 2) Mori, T., Sakurai, N. et al.: Static and fatigue behavior of a new steel deck system with composite joints, Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering '98, vol.3, pp.1767-1778, 1998.7.
- 3) (社)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.
- 4) 川口, 大垣, 八部, 長井: 連続合成2主桁橋のずれ止め設計に関する一考察, 鋼構造論文集, Vol.4, No.15, pp.81-91, 1997.9.
- 5) 大倉, 井上, 福本, 山田: プレートガーダー橋の横桁連結部の疲労実験, 構造工学論文集, Vol.38.A, pp.989-998, 1992.3.

(1998年9月18日受付)