

鋼床版Uリブと横梁の合成接合方法に関する基礎的実験

Fundamental experiments on composite joints of U-ribs
and transverse beam of orthotropic steel deck

中村俊一*、森忠彦**、藤田泰***、長井正嗣****

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

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

*** 新日本製鐵 橋梁構造部 計画室長 (〒100-71 東京都千代田区大手町 2-6-3)

**** 工博 長岡技術科学大学 教授 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

A new type of steel orthotropic deck with U-ribs is proposed. Transverse ribs are eliminated and U-ribs are directly connected to transverse beams. Three types of connection are studied: composite connection with stud and mortar grout, composite connection with slab anchor and mortar grout, and bolted connection with high tension bolts. It is found from experiments that composite connections with stud and slab anchor have sufficient strength against vertical loads, negative bending moments and rotation, whereas bolted connection without mortar grout is not suitable because of large deformation of U-rib web.

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

1. 緒言

鋼橋で一般的に用いられているUリブ鋼床版は、製作に要する溶接量が多く、詳細構造も複雑であるため、製作コストは他の鋼部材より相対的に高いと言われている。しかし、近年、多電極溶接の導入によりデッキプレートとUリブの溶接は自動化が進み、従来よりかなり製作が容易になっている。したがって、詳細構造を単純化・合理化することにより、鋼床版の低コスト化が可能となると考えられる^{1) 2)}。

筆者らは、横リブとUリブの交差点に着目し、横リブを省略し、Uリブを直接横梁で支持する図-1に示す新しい形式の鋼床版を開発中である。従来構造では、横リブに複雑なスカーラップを設け、しかも手溶接に頼らざるを得ないが、この新形式構造ではほとんど自動溶接で対処できる。しかし、この形式ではUリブと横梁の結合をどのように行うかがポイントとなるが、なるべく溶接を少なくできる接合方法を採用した。すなわち、図-1に示す3種類の接合方法タイプ、横梁上に設置されたスタッドによりUリブと横梁をモルタルで接合するタイプ、横梁上に設置されたスラブ止めにより両者をモルタルで接合するタイプ、高力ボルトにより両者を接合するタイプである。本論文では、これら接合方法に関する基礎的な実験を行い、その挙動を明らかにするとともに、それぞれの適用性について考察を加える。

2. 試験体の種類と試験方法

2.1 試験体の種類

試験体は、図-2に示すように、長さ3.0mとし、中央部に支持桁との接合部を設けた。接合の種類に応じて、3体作成した。すなわち、スタッドを用いた試験体(モデルA)、スラブ止めを用いた試験体(モデルB)、高力ボルトを用いた試験体(モデルC)である。Uリブは、上幅320mm、高さ260mm、板厚6mm、材質SS400とした。近年、従来より厚めのデッキプレートを使用することが着目されているため、ここではデッキプレート厚を16mm、材質をSS400とした。これに応じて、縦リブ支間は4m、隣接するUリブ間隔は45cmと想定した。

モデルAでは、接合部Uリブの下フランジに開口部を設け、支持横梁に溶接した4本の頭付きスタッドと無収縮モルタルで結合した。スタッドジベルは、径19mm、長さ150mmとした。モルタルは、Uリブ内の500mm区間に充填した。無収縮モルタルの強度は、材令5.6日で約50N/mm²であった。Uリブ内の型枠は木製とし、鋼板には接着剤でセットした。

モデルBでは、接合部Uリブの下フランジに開口部を設け、支持横梁に溶接した1本のスラブ止めと無収縮モルタルで結合した。スラブ止めは径13mm、材質SR235とした。

モデルCでは、接合部Uリブの下フランジと支持梁の

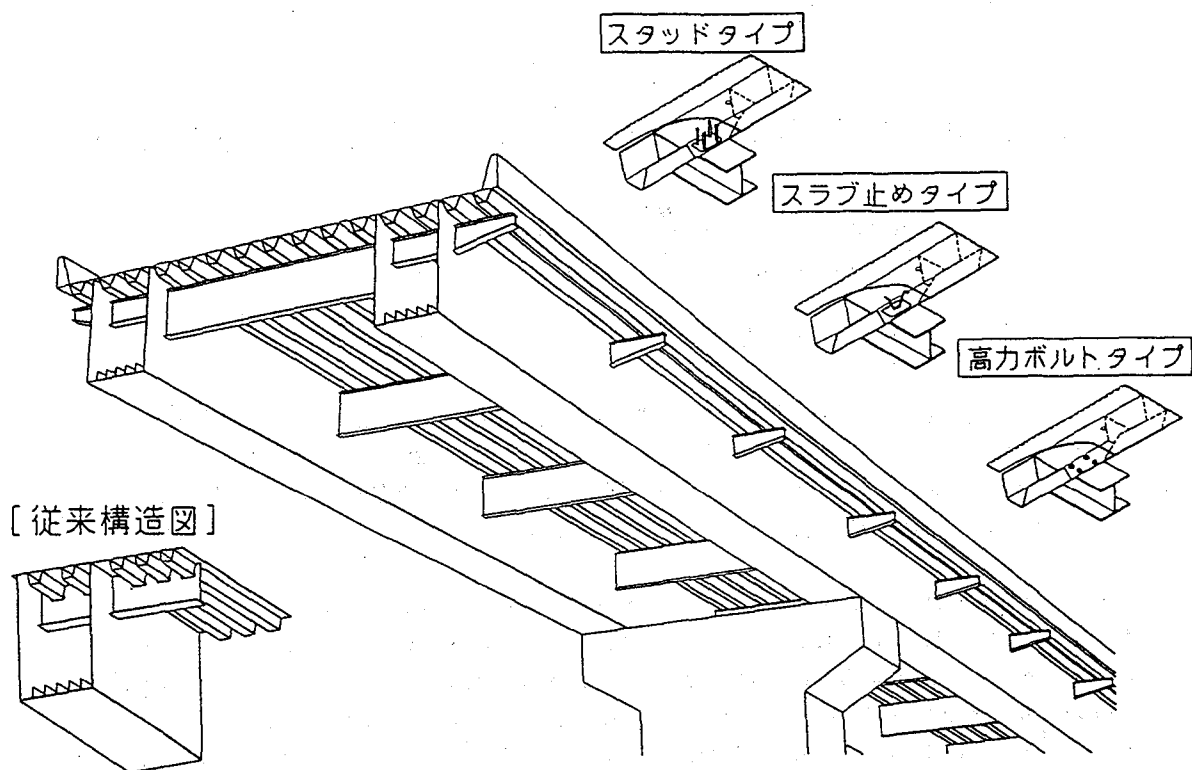


図-1 新形式Uリブ鋼床版

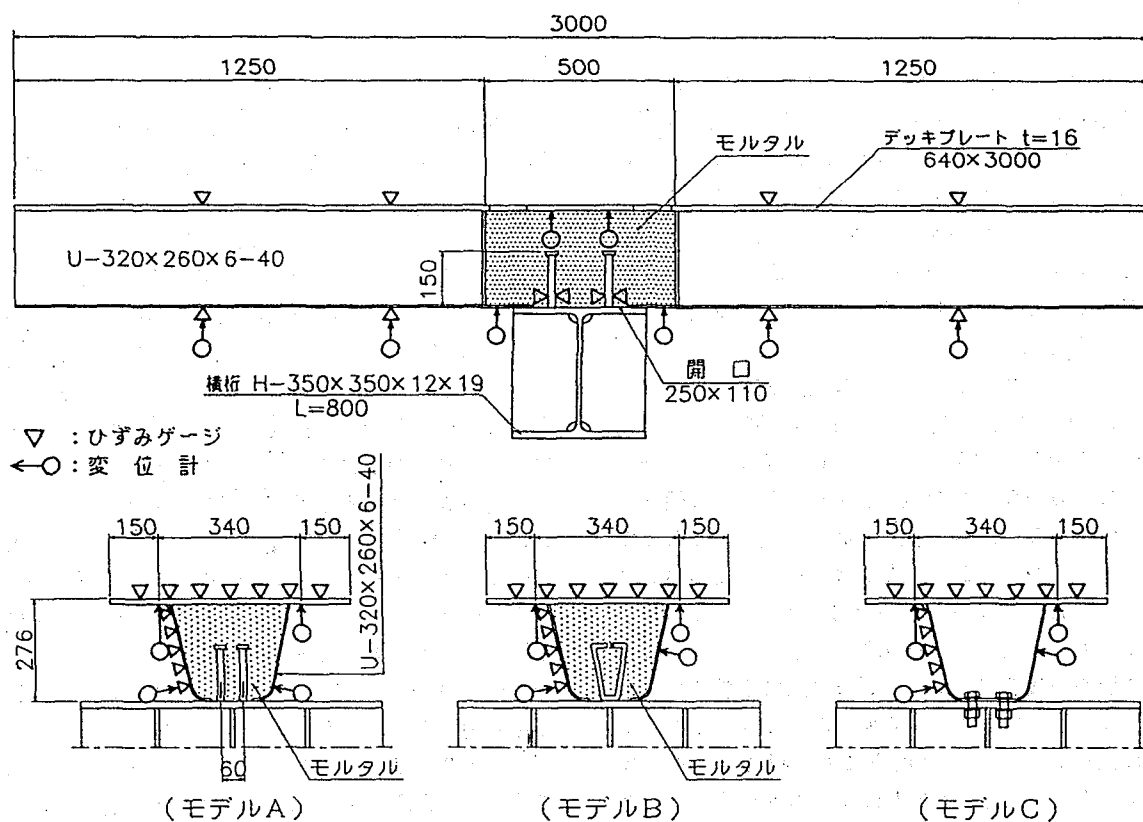


図-2 試験体 [単位: mm]

上フランジを4本の高力ボルト M22(F10T)で結合した。この方式は基本的には高力ボルトのみで結合可能であるため、モルタルは充填しなかった。なお、ボルトは鋼床版製作時にUリブ内にセットしておき、横梁上に開口したボルト孔に挿入した後、下側からナット締めした。

2.2 試験方法

実験はUリブと横梁を一体化した試験体を架台に固定し、500ton 圧縮試験機により載荷した。

載荷パターンは、図-3 に示す3 ケースとした。

ケース1では、接合部の直上に200kNまで鉛直載荷した。載荷幅は20cmとした。このケースは、接合部の圧縮強度およびUリブとモルタルの荷重分担を調べることを目的とした。

ケース2では、試験体の両端を150kNないし200kNまで2点鉛直載荷した。このケースは、接合部の負曲げモーメントに対する強度を調べることを目的とした。

ケース3では、試験体の片端のみに終局状態に至るまで鉛直載荷した。このケースは、回転角に対する接合部の強度および終局状態を把握することを目的とした。ケース3載荷時の状況を写真-1に示す。なお、ケース1およびケース2の試験では、部材は弾性範囲内での挙動にとどまっているため、これらがケース3の試験結果に影響を及ぼすとは考えられない。

実験時の計測項目は、荷重、鉛直変位（4箇所）、デッキプレートのひずみ（3軸ゲージ、15箇所）、Uリブウェブのひずみ（3軸ゲージ、15箇所）、Uリブの面外変形量（2箇所）、スタッドの軸ひずみ（1軸ゲージ、1本あたり2箇所）とした。これらの計測位置は図-2 および図-5 に示した。なお、スタッドの軸ひずみは下から30mmの位置に貼付した。

3. 試験結果

3.1 載荷ケース1

載荷ケース1の場合の鉛直載荷荷重と支幹部鉛直変位の関係を図-4 に示す。鉛直変位は図-5 に示す4つの変位計(D1~D4)の平均である。これより、モデルCの鉛直変位がモデルAおよびBに比較して極めて大きくUリ

ブ内部に充填されたモルタルが鉛直荷重に対して有効に抵抗していることがわかる。

モデルAで用いられたスタッドのひずみ挙動を図-6に示す。なお、ひずみゲージ番号は図-5に示してある。鉛直載荷荷重はUリブとモルタルで分担され、さらにモルタルからスタッドに荷重分担されると考えられる。また、本図より200kN載荷した状態のスタッドのひずみ値は約150 μ であり、これがスタッド軸方向断面に均等に作用していると仮定すれば、スタッド4本にかかった荷重は約34kNと推定される。

モデルA,B,Cの支点上Uリブのウェブの鉛直方向ひずみを図-7に、Uリブウェブ面外変形を図-8に示す。面外変形の計測位置D11は下面から40mmの位置に、D12はデッキ面から120mmの位置にセットした。外側にはらみだす向きを正とした。両図より、モデルCのひずみレベルおよび面外変形量は荷重とともに増大し、その値はモデルA,Bとはワンオーダーの違いがあり、非常に大きな変形が生じていることがわかる。モデルA,Bのひずみおよび面外変形量はモデルCに比べて小さいが、その挙動は複雑である。すなわち、荷重の増加に応じて当初は増加するが、ある荷重になる減少に転じ、さらに荷重を上げると再び増加している。これは、内部に充填されたモルタルの影響であると考えられる。当初は鋼部材とモルタ

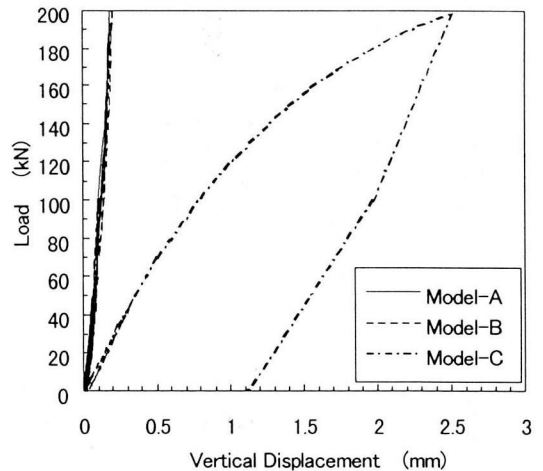


図-4 圧縮力と支幹部鉛直変位の関係
(載荷ケース1)

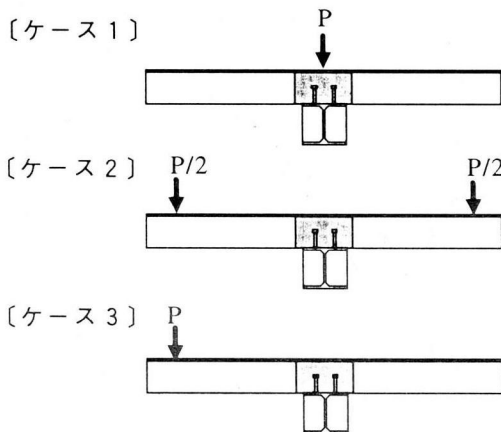


図-3 載荷パターン

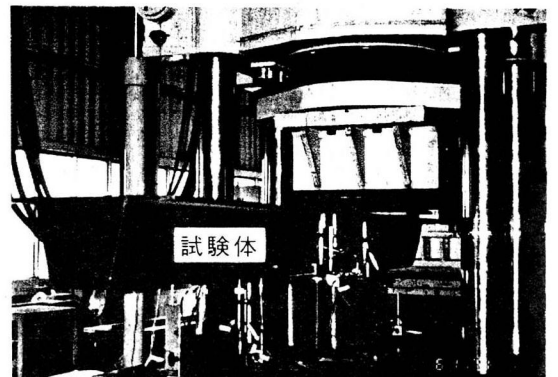


写真-1 実験状況

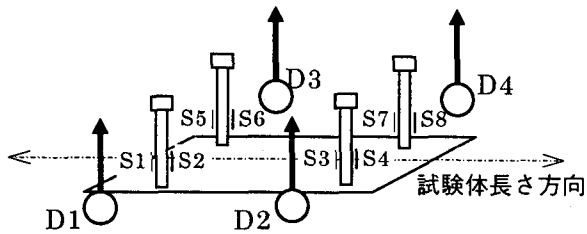


図-5 鉛直変位計(D1-D4)および
スタッドのひずみゲージ(S1-S8)

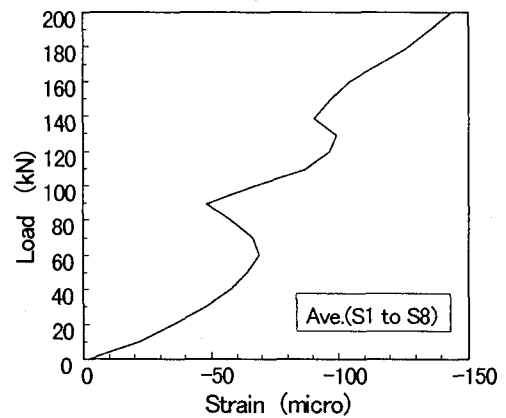


図-6 スタッドジベルのひずみ
(ケース1、モデルA)

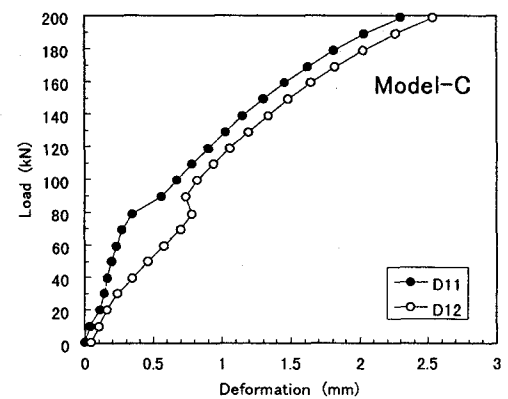
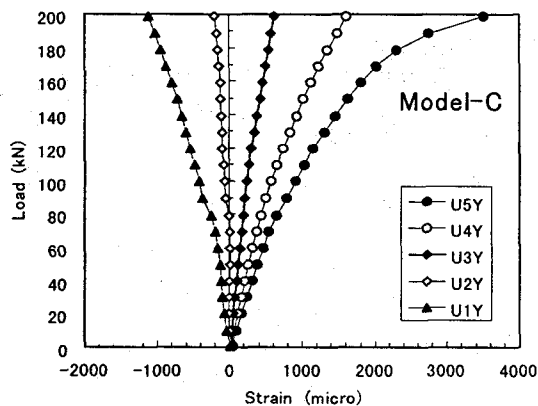
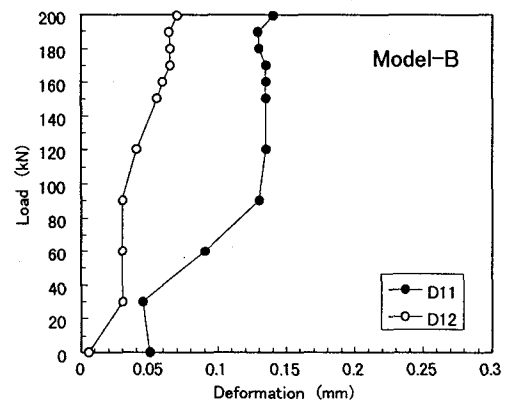
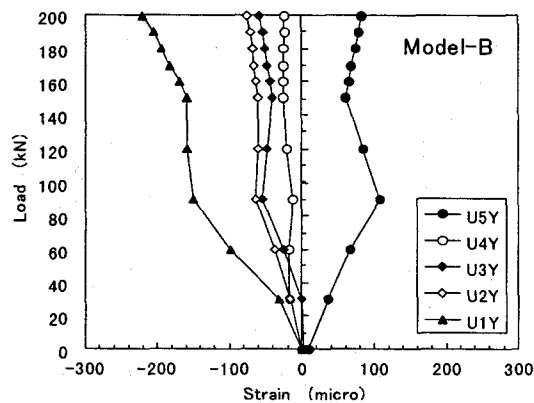
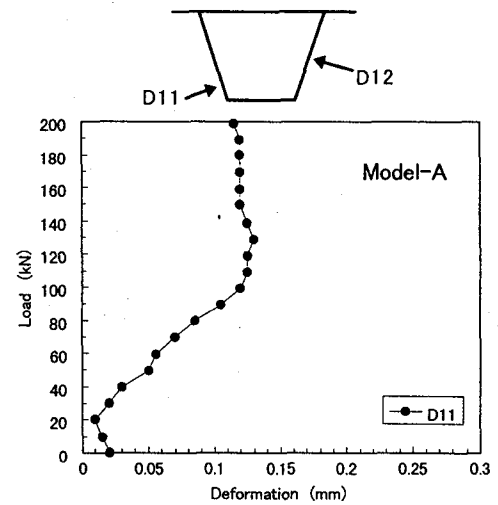
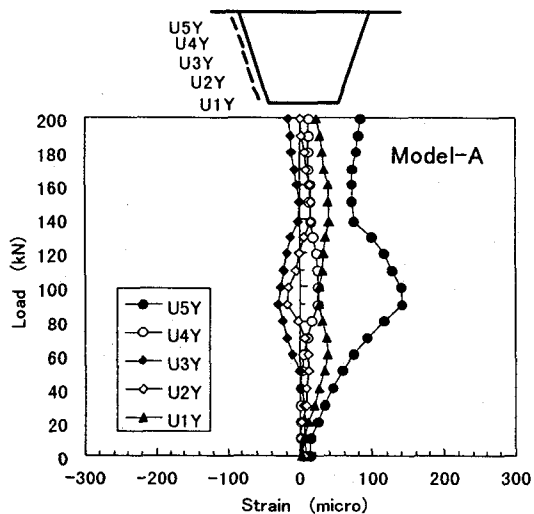


図-7 Uリブウェブのひずみ (ケース1)

図-8 Uリブウェブ面外変形 (ケース1)

ルにわずかな隙間があるため主に鋼部材のみが荷重を受け持つが、ある程度の荷重になり鋼部材とモルタルが密着するとモルタルが作用し始め、さらに荷重を上げるとモルタルが降伏域に入り再度鋼部材が荷重を受け持つようになるのではないかと推定できる。また、デッキプレートに近い上部ではいずれも引張りひずみが発生しているが、これはウェブとモルタルの付着が切れ、ウェブが外側にはらみだしているためと考えられる。一方、Uリブの底面に近くなるにつれて、圧縮ひずみが支配的となる。しかし、モデルAの圧縮ひずみの大きさはモデルBより小さく、スタッド形式の方がより剛な柱部材となっていると推定できる。面外変形に関しては、200kN 載荷した状態でモデルCではウェブの中央および下端付近とも 2mm 以上はらみだしているが、モデルA,B ではいずれも 0.15mm 以内であり非常に小さかった。なお、モデルAのD12の面外変形量は実験の都合上計測できなかった。

3.2 載荷ケース 2

載荷ケース 2 の場合の鉛直載荷荷重と支点部鉛直変位の関係を図-9 に示す。図-4 の載荷ケース 1 と同様、モデルCはモデルAおよびBに比較して鉛直変位が極めて大きく、実用上問題があると考えられる。

図-10 はモデルAのスタッドのひずみの変化を示している。ひずみゲージの番号は図-5 を参照されたい。1本のスタッドの両側に貼られたひずみゲージの値が異なることにより、スタッドには曲げモーメントが作用していることがわかる。また、左側のスタッドが圧縮ひずみ、右側のスタッドが引張りひずみになっているのは、試験体の左右でアンバランスに載荷されたためと推定される。

図-11 は、モデルA,B に関する載荷荷重とデッキプレート上面に貼付されたA4のゲージのリブ方向のひずみ、およびウェブ下面から 40mm の位置に貼付されたU1のゲージのリブ方向ひずみを示している。いずれも、引張りひずみが生じている。負の曲げモーメントが作用しているためデッキプレート上面は引張りひずみになっていることは理解できる。しかし、ウェブ下側については曲げモーメントのみの影響であれば圧縮ひずみになるべきであるが、おそらくウェブの面外方向のはらみだしやUリブ下面開口部による二次応力などの影響により引張りひずみが発生したと推察される。モデルA,Bのひずみ増加はほぼ同様の傾向を示している。

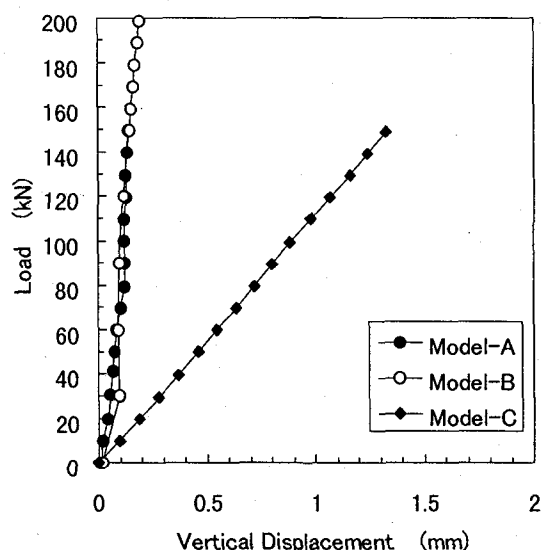


図-9 荷重-鉛直変位関係
(ケース 2、変位計 D1~D4 の平均値)

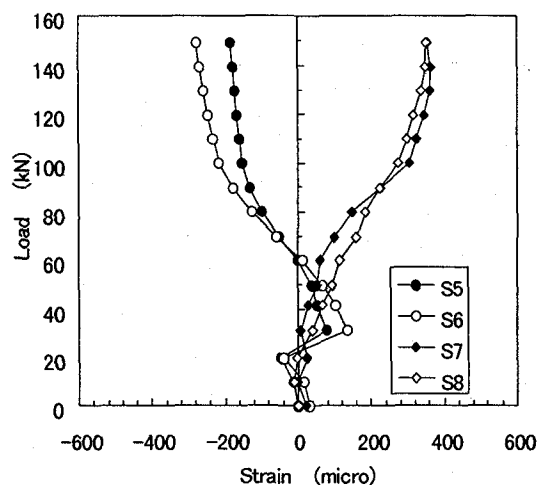
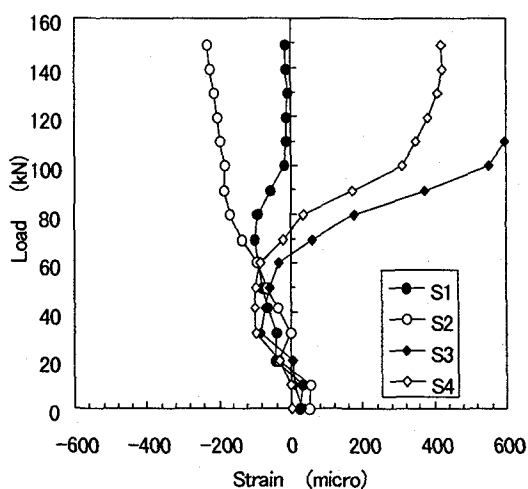


図-10 スタッドジベルのひずみ
(ケース 2、モデルA)

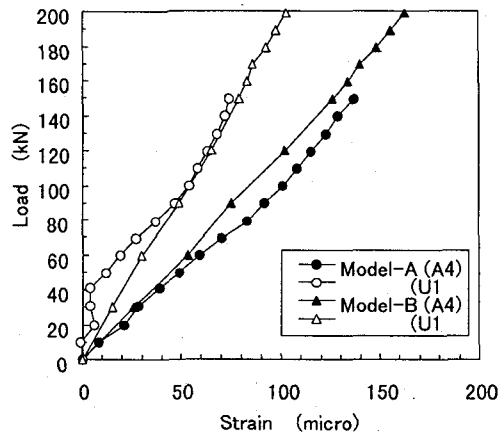
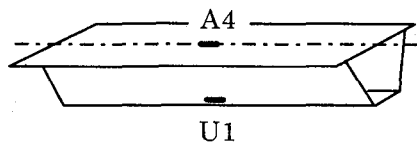


図-11 デッキプレート上面およびウェブ下端のひずみ
(ケース2、モデルA、B)

3.3 荷重ケース3

荷重ケース3における、鉛直荷重と試験体の支点部の回転角との関係を図-12に示す。回転支点は横梁中心とした。モデルA、B、Cとも、荷重側と反対側の回転角の絶対値はほぼ同じである。モデルAの終局荷重付近では、荷重を上げるにしがたい変形が大きくなり、荷重90kNで試験を中止した。これはスタッドが塑性変形したためであり、スタッドが引き抜けるような極端な破壊形態は生じなかった。モデルBでは、モデルAに比べて非常に小さい荷重で回転を生じ、荷重13kNで変形が大きくなり実験を終了した。終局状態でもスラブ止めが引き抜けるあるいは破断することにはなかった。回転の支点は架台端部と推定された。モデルCでは荷重15kNあたりから変位が非線形的に増加し始め、回転が大きくなるにつれUリブのウェブおよび下フランジが塑性変形した。高力ボルトは最終状態まで健全であり、終局状態は架台端部との接触位置のUリブが局部座屈したことによる。

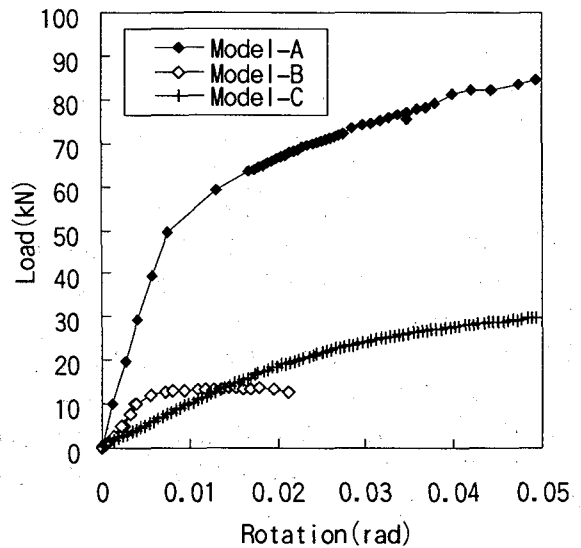
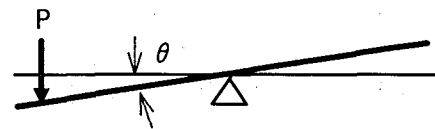


図-12 荷重-支点回転角関係
(ケース3)

モデルAに用いられたスタッドのひずみと荷重の関係を図-13に示す。ひずみゲージの番号は図-5を参照されたい。1本のスタッドの両側のひずみが異なることから、スタッドには軸力と曲げモーメントが作用していることがわかる。さらに、当初荷重側のスタッドの両側は引張りと圧縮ひずみだったが、60kN付近で反転し始め、最終的には両側とも引っ張りひずみになった。これは、当初荷重側のスタッド付近にあった回転中心が、支持横梁の角部に移行したためと考えられる。荷重反対側はスタッド両側のひずみとも引っ張りであり、当初より引き抜きが卓越している。終局付近ではすべてのスタッドが塑性領域になっており、変形が増大していることがわかる。

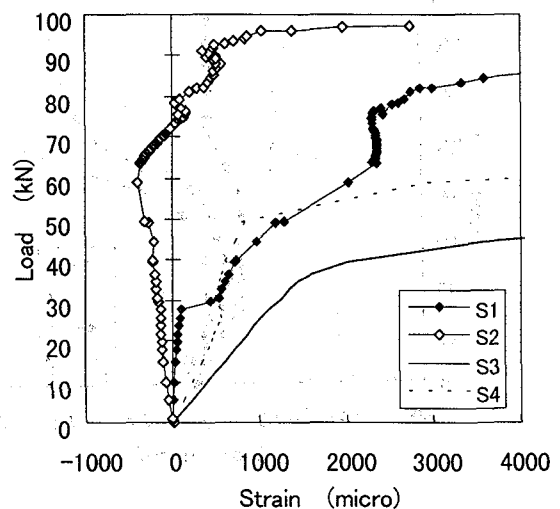


図-13 スタッドジベルのひずみ
(ケース3、モデルA)

4. 考察

実際の橋梁設計条件との関連をふまえ、前章で述べた実験結果について以下に考察する。ここでは、前述したように縦リブ支間を 4.0m の鋼床版を想定している。

載荷ケース 1 では、車輪が接合部直上に載る場合の強度確認を目的としており、B 活荷重の輪荷重 10tf に衝撃係数 0.4 を考慮した 14tf (137kN) が設計最大荷重である。図-7 に示した U リブのウェブの計測結果より、モデル A, B では鉛直ひずみはすべて 150 μ 以下であり、面外方向の変形があり応力状態は必ずしも単純ではないが、応力度は 31 N/mm² 程度と推定され許容応力度以内であると思われる。ただし、荷重が大きくなると充填モルタルと U リブに付着が切れることやモルタルが塑性域に入ることなどが予想されるため、これらをどのように設計に反映させるかが今後の課題である。一方、モデル C では変形が大きく、ひずみ値も許容値を大きく超過しており実用上問題がある。ケース 1 に関する他の実験値からも、モデル A, B に用いられた部分的に充填したモルタルが、支点上補剛材の役割を果たしていることが理解できる。

載荷ケース 2 は、支点上の負の曲げモーメントが作用する場合の検討である。支点の両側に輪荷重が載った時に、この負曲げモーメントは最大になり、B 活荷重を想定すると、縦リブ一本あたりの設計最大曲げモーメントは約 70kN $\cdot$ m となる。実験時の載荷位置は支点より 1m であるため、両側の合計載荷荷重 $P=140$ kN に相当する。図-11 に示したモデル A, B に関する載荷荷重とデッキプレート上面およびウェブ下端のひずみの計測結果により、モデル A, B では $P=150$ kN に対して、発生ひずみはデッキプレート上面で約 120 μ およびウェブ下端で約 75 μ である。ケース 1 と同様に応力状態は単純ではないが、応力度はそれぞれ 25 N/mm² および 15 N/mm² 程度と推定され、許容応力度を十分下回っている。

載荷ケース 3 は回転角に対する抵抗の検討である。設計上の最大回転角は縦リブ中央部に輪荷重が載ったときであり、B 活荷重を想定すると 0.0042rad と推定される。図-12 より、この回転角が生じる載荷荷重は、モデル

A, B, C のそれぞれについて、30kN, 10kN, 4.5kN であることが読みとれる。したがって、モデル A はかなりの回転剛性を有しておりセミリジッド結合と言えるが、モデル B, C はモーメントをほとんど伝達しないピン構造と考えられる。モデル A では 60kN 付近でモルタルと横梁の間に隙間を確認したが、設計回転角付近では全く異常はなかった。モデル B では設計回転角を生じさせる荷重に近い 13kN 付近でモルタルと横梁の間に隙間が確認された。モデル C はボルトそのものの強度は十分であるが、U リブおよび横梁の上フランジの局部座屈強度によって変形が生じた。

鋼床版は直接輪荷重を受け、しかも活荷重応力の占める割合が大きく、疲労の検討が不可欠である。従来構造の鋼床版の疲労は、縦リブと横リブの交差部に集中しているが³⁾、新形式では横リブを省略しているため疲労発生の可能性は少ないと推定される。しかし、図-7 で示されるように、横梁直上の U リブのウェブ上部とデッキプレート間に引張り応力が生じており、これが繰り返し発生する点には注意を要する。ただし、設計活荷重が作用した場合でも引張りひずみは 150 μ であり、応力振幅は 31 N/mm² 程度と推定され疲労強度はほぼ確保できると考えられる。なお、前述したようにモルタル充填用の型枠は木製とし、鋼板に接着剤で取り付けることが可能であるため、この部分が疲労上問題になる可能性は小さい。また、縦リブの回転によりスタッドおよびスラブ止めには繰り返しの曲げ応力が作用するため、これについても今後検討が必要である。

モデル A, B については試験後に試験体を解体し、モルタルの状況を観察した。写真-2 がその状況である。支持横梁の角部が始点とする斜めせん断ひびわれが発生していたが、全体がばらばらには碎けてはいなかった。また、写真-3 にスタッドの最終状況を示すが、スタッド本体に塑性変形は見られるものの溶接部は健全であった。

U リブ内のモルタル充填部と非充填部の境界は剛性の急変点となるが、今回の実験によっては亀裂などの外観の変状はみられなかった。

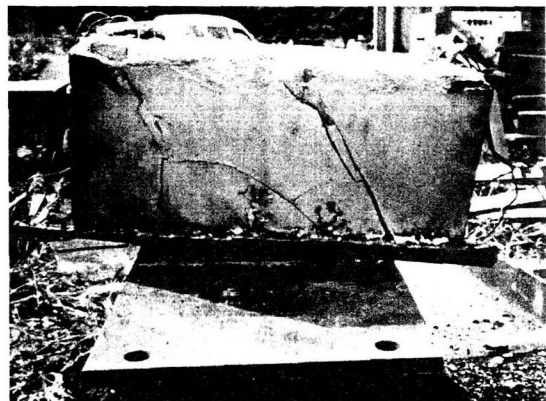


写真-2 終局時のモルタルの状況
(モデルA)

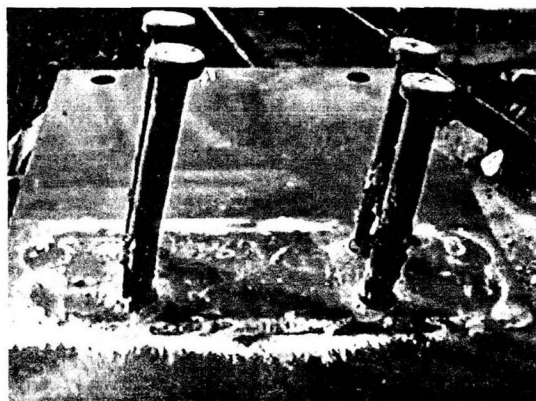


写真-3 終局時のスタッドの状況
(モデルA)

5. 結言

横リブを省略し、Uリブを直接横桁で支持する新しい形式の鋼床版に着目し、3種類の接合方法に関する実験を実施した。本実験で得られた知見を以下にまとめる。

1) Uリブを横梁に溶接された頭付きスタッドとモルタルで結合する方式では、支点上に設計荷重が直接載荷された場合、負の設計曲げモーメントが作用する場合、設計回転角が作用する場合のいずれも応力および剛性面は問題はなかった。さらに、終局時はねばりのある破壊形態であり、耐力も十分であり、実用化できると思われた。しかし、デッキプレートとUリブの溶接部およびスタッドの溶接部についての疲労強度を今後確認する必要がある。

2) Uリブを横梁に溶接されたスラブ止めとモルタルで結合する方式では、支点上に設計荷重が直接載荷された場合、負の設計曲げモーメントが作用する場合については、応力および剛性面は問題はなかった。また、設計回転角は十分吸収できるが、回転剛性は乏しく完全ピン結合とみなされた。実用化も可能性があるが、デッキプレートとUリブの溶接部およびスラブ止めの溶接部についての疲労強度は今後確認する必要がある。

3) Uリブを横梁上フランジと高力ボルトで結合する方式では、支点上に載荷された場合の変形が大きく、Uリブウェブは許容応力度も越える。実用化にあたっては、モデルA,B同様、モルタル充填により鉛直荷重に対する強度を高める必要がある。

今後は、スタッドまたはスラブ止め方式については、スタッド溶接部の疲労強度、横梁が弾性変形したときの影響、実橋でのモルタル注入方法などの検討を、高力ボルト方式については、モルタル充填の効果、ボルト挿入方法などの検討を続ける予定である。鋼橋に関しては、構造の合理化・簡易化、建設費の削減などが社会的な要請となっている。本論文がこれらの課題に多少なりとも役立てば光栄である。最後に、最終的に論文をまとめるにあたり査読者の方のご指摘が参考になった。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤田, 能勢他: 都市内高架鋼構造物の開発, 新日鐵技報, No. 356, 1995.
- 2) 森, 中村, 藤田, 長井: 横桁上垂直補剛材を省略した CT 形鋼を用いた鋼床版に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 43A, 1997.3.
- 3) 土木学会: 鋼構造シリーズ 4, 鋼床版の疲労, 1990.

(1996 年 9 月 6 日受付)