

# 鋼・コンクリート合成床版のスタッドに作用するせん断力の性状と 横リブおよびコンクリート版厚の影響

Characteristics of shear forces working on shear studs in steel plate-concrete composite deck  
and influences of stiffening strips of steel plate and thickness of concrete on it

街道 浩\*, 渡辺 滉\*\*, 橋 吉宏\*\*\*, 田坂裕一\*\*\*\*, 松井繁之\*\*\*\*\*, 堀川都志雄\*\*\*\*\*

Hiroshi KAIDO, Hiroshi WATANABE, Yoshihiro TACHIBANA, Hiroichi TASAKA, Shigeyuki MATSUI, Toshio HORIKAWA

\* 工修 川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

\*\* 川田工業(株)大阪支社長 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

\*\*\* 博士(工学) 川田工業(株)橋梁事業部東京技術部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

\*\*\*\* 工修 川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

\*\*\*\*\* 工博 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*\*\* 工博 大阪工業大学教授, 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

The authors have developed a steel-plate concrete composite deck. The composite deck consists of steel-plates, upper re-bars and concrete. The steel plate is stiffened with steel strips and shear studs are welded on the upper surface of the steel plate. The predominant fatigue damage mode of the composite deck was detected as the shear-off failure of studs. To prevent the fatigue damage from the composite deck, the fatigue design of the studs should be carried out. As the fatigue damage is due to shear forces working on the studs, it is important to investigate magnitude and characteristics of the shear forces. In this paper, three-dimensional finite element analyses of the composite deck were conducted to examine characteristics of the shear forces. Furthermore, influences of the stiffening strips of the steel plate and thickness of concrete on the shear forces were discussed.

*Key Words: steel plate-concrete composite deck, shear stud, fatigue damage, three-dimensional finite element analysis*

キーワード: 鋼・コンクリート合成床版, スタッド, 疲労損傷, 3次元有限要素解析

## 1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版(以下、合成床版と略す)は、鋼製型枠としてのけた下空間の安全性の確保、プレファブ化による現場工期の短縮、床版厚の低減による死荷重の軽減、高い耐荷力および疲労耐久性などの特徴を有する床版形式である。このような合成床版のうち、図-1に示すロビンソン型の合成床版は、鋼板とコンクリートを鋼板に溶接したスタッドにより接合し、鋼板のコンクリート打設時の変形を低減するために鋼板に横リブを溶接した合成床版である。著者らは、ロビンソン型の合成床版を対象として、多岐にわたる性能確認試験を実施し、合成床版の挙動の把握、設計手法の確立および実橋への適用を実施してきた<sup>1,2)</sup>。

ロビンソン型の合成床版の損傷形態は、これまでの研究により図-2(a)のように①鋼板とコンクリートを合成するスタッドが疲労損傷し鋼板とコンクリートが分離して別々に挙動する状況<sup>3)</sup>、図-2(b)のように②コンクリート内部のスタッドや上側鉄筋などを起点として水平にひびわれが発生しコンクリートが上下に分離して別々に挙動

する状況<sup>4)</sup>が指摘されている。このうち、スタッドの疲労損傷を防ぐためには、作用するせん断力を制限する疲労設計<sup>5,6)</sup>が必要である。一方、コンクリート内部の分離を防ぐためには、スタッドを上側鉄筋位置まで高くし、コンクリートの圧縮領域に十分に定着させること<sup>4)</sup>が有効である。

本研究は、上記の損傷形態のうちスタッドの疲労損傷に着目し、スタッドに作用するせん断力の性状を把握することを目的としている。具体的には、合成床版の細部まで忠

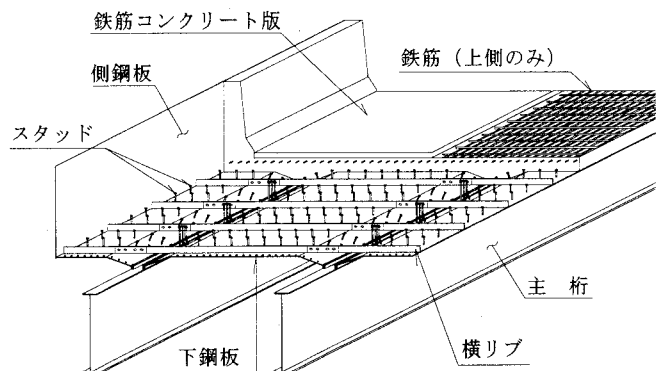


図-1 ロビンソン型合成床版の概念図

実に再現した3次元有限要素解析（以下、3次元F E解析と略す）を実施し、スタッドに作用するせん断力の大きさや作用方向を把握する。さらに、鋼板に溶接した横リブおよびコンクリート版厚がスタッドのせん断力へ与える影響についても検討を行うものである。

## 2. 解析の対象とする試験体

3次元F E解析の対象を、文献4)において報告している輪荷重走行試験のために製作した試験体とした。この試験体は、荷重条件を道路橋示方書<sup>7)</sup>に規定されるB活荷重とし、1方向当たりの大型車の計画交通量を2,000台/日以上とする床版支間3.0mの連続版として設計されている。

試験体の詳細図と構造諸元は、それぞれ図-3および表-1に示すように、幅2.8m、長さ4.5m、床版支間2.5m、コンクリート版厚200mm、下鋼板厚9mmであり、横リブ寸法は100mm×16mm、横リブ間隔は750mm、スタッド寸法はφ16mm×120mmとしている。また、コンクリートには、設計基準強度が $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートを採用している。なお、輪荷重の走行範囲内に継手が位置するように、試験体の中心から橋軸方向に525mm離れた位置に下鋼板の継手を設けた。

なお、コンクリートの材料特性については、試験体と同一の条件のもとで養生を行ったコンクリート供試体の材料試験を実施しており、圧縮強度の平均値は $37.6\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数の平均値は $E=2.88 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比の平均値は $\nu=0.199$ 、引張強度の平均値は $3.68\text{N/mm}^2$ である。

## 3. 3次元有限要素解析

対象とする試験体の細部まで忠実に再現した3次元F E解析における各部位のモデル化や解析方法について以下に述べる。

### 3.1 全断面有効モデル

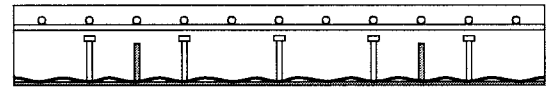
コンクリートの全断面が有効であるモデル（以下、全断面有効モデルと略す）の要素分割は図-4に示す通りである。このモデルの要素構成の概念図を図-5に示す。合成床版のコンクリートはソリッド要素、下鋼板および横リブはシェル要素、スタッドおよび鉄筋ははり要素としている。

なお、3次元F E解析において、コンクリートと平面で接触している下鋼板および横リブについては、コンクリートとの界面において両者の付着によるせん断力を無視し、部材に垂直な方向についての接触・非接触現象を考慮している。一方、スタッドおよび鉄筋とコンクリートとの界面についてはこれを考慮せず節点において剛結合とした。また、継手部については輪荷重走行試験における開閉量の測定値が非常に小さいことからモデル化していない。

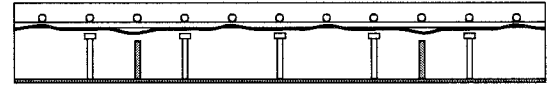
コンクリート版厚および下鋼板厚、横リブ、スタッド、鉄筋などの形状寸法については表-1に示す値を採用した。また、コンクリートの材料定数は、材料試験結果からヤング係数を $E=2.88 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比を $\nu=0.199$ とし

た。一方、鋼材の材料定数については、ヤング係数を $E=2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比を $\nu=0.3$ とした。

以下に示す3次元F E解析は、解析コード MSC.Marc<sup>8)</sup>

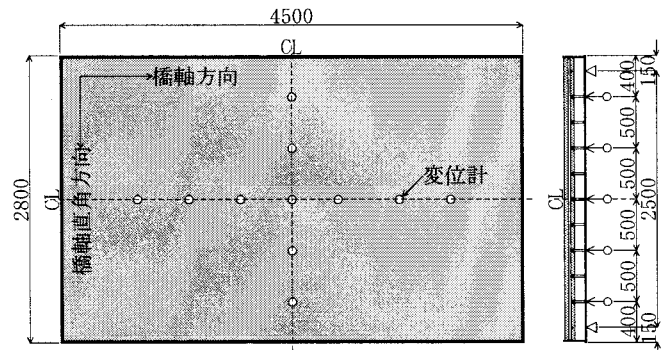


(a)スタッドの損傷

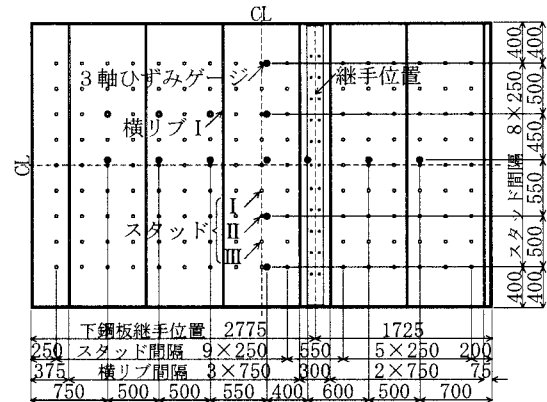


(b)コンクリート内部の損傷

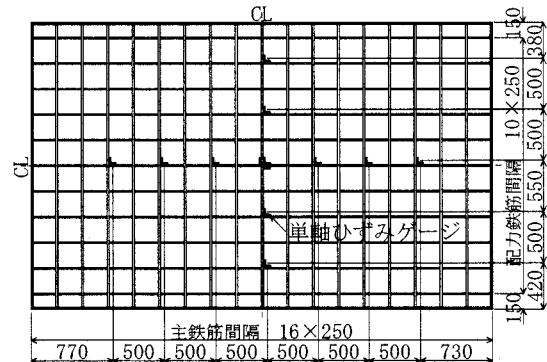
図-2 ロビンソン型合成床版の損傷形態



(a)変位計の配置



(b)下鋼板のひずみゲージ配置



(c)鉄筋のひずみゲージ配置

図-3 試験体詳細図および測定位置図

を使用した弾性解析であり、全断面有効モデルに関する節点数は約 18,100、要素数は約 16,000 である。

mm の範囲に 98kN を等分布载荷した。

### 3.2 引張領域無視モデル

コンクリートの引張領域において、橋軸方向および橋軸直角方向にひびわれが発生し、抵抗断面として有効に働かない状態を近似的に解析できるコンクリートの引張領域を無視したモデル（以下、引張領域無視モデルと略す）を導入した。引張領域無視モデルの概念図は図-6 に示すように、床版断面における力のつり合いから求めた、コンクリートの下端から 80mm の引張領域に位置するソリッド要素に関して、隣接するソリッド要素の節点をお互いに共有しないように設定し、隣接するソリッド要素に節点力を伝達しないモデルを作成した。なお、節点の非共有化は、走行試験において荷重载荷が十分に行われたことを想定し、試験体の全領域に施している。

スタッドを表すはり要素については、コンクリートの圧縮領域に位置するソリッド要素のみに結合するものとした。また、下鋼板および横リブとコンクリートとの接触・非接触については、全断面有効モデルと同様の扱いとした。

### 3.3 支持条件および荷重条件

図-3(a)に示す橋軸方向の支持条件は、支持架台上の鉛直方向の変位を拘束した。一方、橋軸直角方向の支持条件は、支持横ばりを考慮して横ばりの中心位置に横ばりと等価な曲げ剛性を有するはり要素を配置した。

なお、荷重については、図-7 に示すように輪荷重走行範囲内の①～⑨の位置に载荷した。また、荷重は载荷ブロックの大きさである橋軸直角方向 500mm×橋軸方向 200

### 4. 解析方法の妥当性の検証

上記の 3 次元 FE 解析に関して、解析方法の妥当性を検

表-1 試験体の構造諸元

		単位	構造諸元
コンクリート	版厚	mm	200
	設計基準強度	N/mm <sup>2</sup>	30
下鋼板	板厚	mm	9
	断面	mm	100×16
横リブ	橋軸方向間隔	〃	750
	寸法	mm	φ16×120
スタッド	橋軸方向間隔	〃	250
	橋軸直角方向間隔	〃	250
	呼び	—	D19
主鉄筋 (橋軸直角方向)	間隔	mm	250
	呼び	—	D16
配力鉄筋 (橋軸方向)	間隔	mm	250
	呼び	—	D16

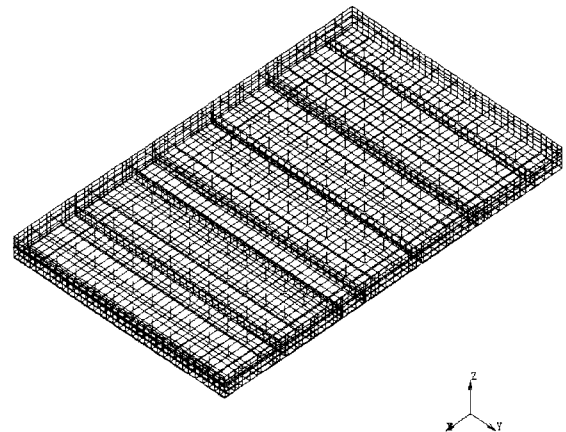


図-4 全断面有効モデルの要素分割

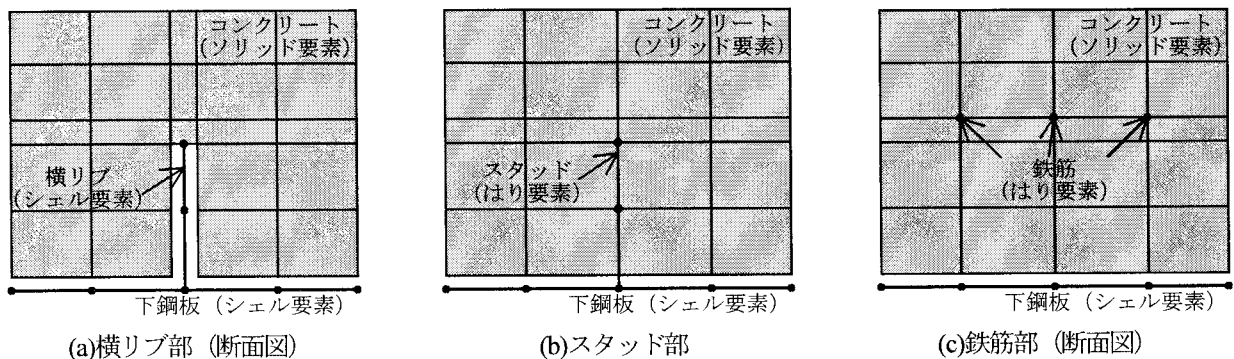


図-5 全断面有効モデルの概念図

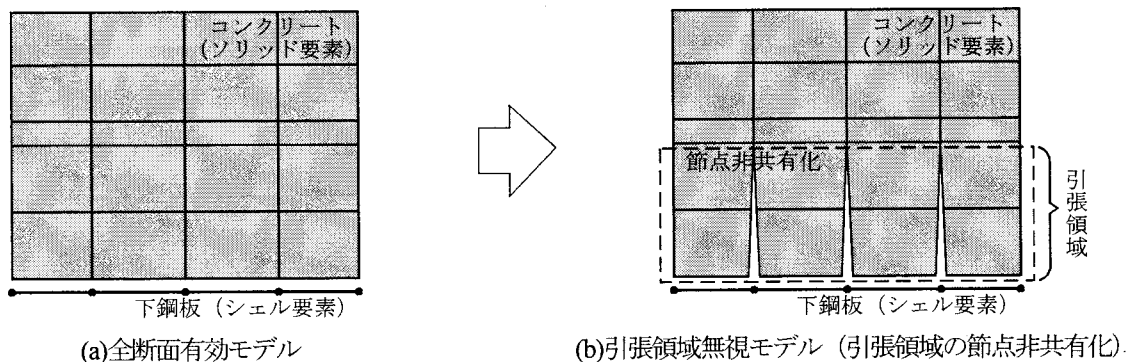


図-6 引張領域無視モデルの概念図

証するために、輪荷重走行試験における測定値と解析値の比較を行う。なお、図中には、全断面有効モデルおよび引張領域無視モデルの解析値を同時に示す。また、図中の測定値についてはすべて98kNに換算した値である。

まず、試験体の中央における橋軸直角方向の弾性たわみ分布の測定値および解析値を図-8に示す。荷重初期における測定値は全断面有効モデルの解析値にほぼ一致している。また、最終段階の走行回数52万回における測定値は、引張領域無視モデルの解析値の90%程度であり、両者の分布形状はほぼ等しい。

一方、試験体の中央における橋軸方向の弾性たわみ分布の測定値と解析値を図-9に示す。橋軸直角方向と同様に、荷重初期における測定値は全断面有効モデルの解析値にほぼ一致している。また、走行回数52万回における測定値と引張領域無視モデルの解析値は比較的近い分布形状を示すが、両者を比較すると測定値は端部において小さく中央部において大きい傾向を示す。これは、輪荷重の走行範囲に位置する中央部の方がひびわれの発生が多いためと考えられる。

以上の結果から、前述したモデル化を適用した3次元FEM解析により、試験体の挙動が精度よく表現できるものと判断した。また、各部位のひずみについても、測定値と解析値がよく一致すること<sup>4)</sup>を確認している。

## 5. スタッドに作用するせん断力および横リブの影響

前述したようにロビンソン型の合成床版の場合、下鋼板とコンクリートを結合するスタッドの疲労損傷は、合成床版自体の疲労耐久性に大きな影響を及ぼす要因の一つである。ここでは、スタッドに作用するせん断力の性状を3次元FEM解析により把握するとともに、スタッドのせん断力に及ぼす横リブの影響についても検討を行う。なお、以降に示す検討は、スタッドに作用するせん断力が大きい引張領域無視モデルを用いて行ったものである。

### 5.1 スタッドに作用するせん断力の性状

スタッドの基部に作用するせん断力が最大となる図-3(b)に示すスタッドⅢに関して、橋軸直角方向と橋軸方向に作用するせん断力の解析値をそれぞれ図-10および図-11に示す。橋軸直角方向のせん断力は、試験体の中央に荷重を載荷した場合において最大となっており、せん断力の最大値は1.844kNである。また、橋軸方向のせん断力は、試験体の橋軸方向の中心に関して点対称に分布し、作用方向が交番する性状を示している。せん断力の最大値は±0.3kN程度である。

次に、橋軸直角方向と橋軸方向のせん断力を合成した合成せん断力の性状について考察する。スタッドⅢに関して、合成せん断力の大きさと作用角度を図-12(a)に示す。なお、図中の番号は図-7に示す荷重載荷位置の番号に対応している。合成せん断力の最大値は荷重の載荷位置を試験体の中央とした場合に発生しており、その値は1.844kNである。また、合成せん断力の作用角度 $\theta$ の変化量は22.1°程度で

ある。

一方、横リブについては、荷重の載荷位置を試験体の中央とした場合において、図-3(b)に示す横リブⅠのせん断応力度が最大となる。この横リブの基部における板厚方向のせん断応力度の分布を図-13に示す。せん断応力度の最大値は試験体の中央で発生しており、その値は2.7N/mm<sup>2</sup>程度と非常に小さい。

### 5.2 スタッドのせん断力に及ぼす横リブの影響

鋼板上に溶接した横リブは、鋼板のコンクリート打設時の変形を低減するために設けたものである。しかしながら、

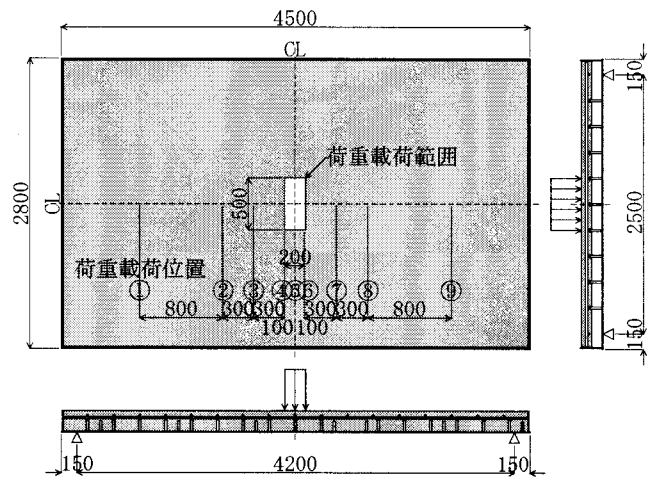


図-7 荷重載荷位置および荷重載荷範囲

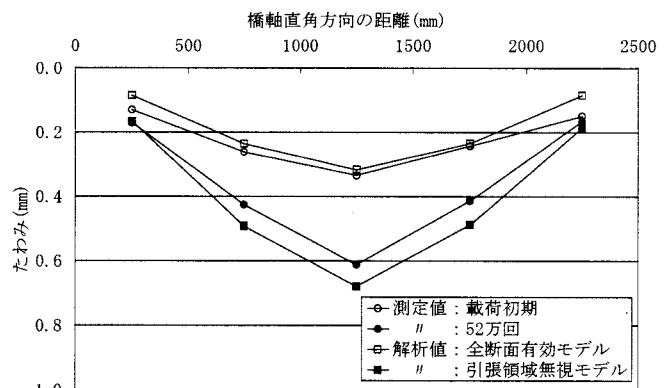


図-8 橋軸直角方向のたわみ分布の比較

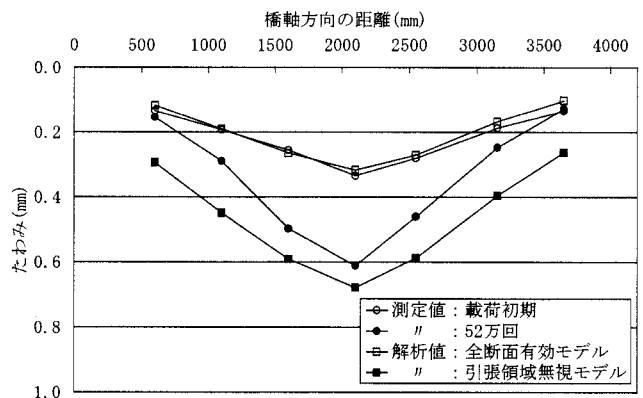


図-9 橋軸方向のたわみ分布の比較

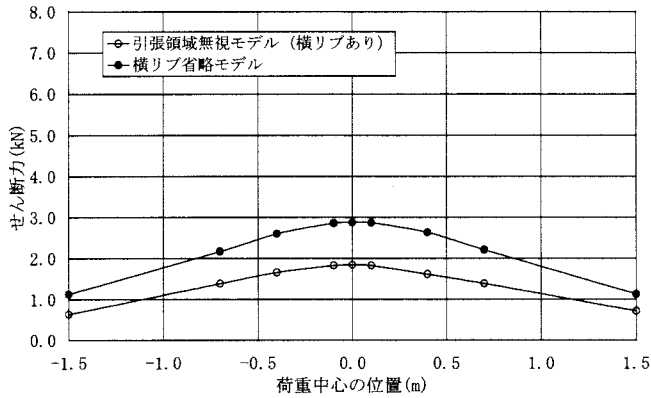


図-10 スタッドⅢに作用する橋軸直角方向のせん断力 (引張領域無視モデルおよび横リブ省略モデル)

横リブはスタッド間に位置することから、スタッドに作用するせん断力の性状に影響を与えることが推察される。このため、引張領域無視モデルから横リブを省略したモデル（以下、横リブ省略モデルと略す）の解析を行い、横リブを有する引張領域無視モデルとの比較を行う。

スタッドⅢに関して、横リブ省略モデルの橋軸直角方向と橋軸方向に作用するせん断力の解析値をそれぞれ図-10 および図-11 に併記する。橋軸直角方向のせん断力については最大値が2.874kN、橋軸方向のせん断力については最大値が±0.5kN程度となる。また、合成せん断力の大きさと作用角度を図-12(b)に示す。合成せん断力の最大値は2.874kNであり、合成せん断力の作用角度 $\theta$ の変化量は27.7°程度である。

これらと横リブを有する引張領域無視モデルの結果との比較から、横リブの効果により橋軸直角方向と橋軸方向のせん断力の大きさがそれぞれ4割および5割程度低減され、合成せん断力の大きさと作用角度の変化量がそれぞれ4割および3割程度低減されることが明らかになった。

なお、スタッドに作用するせん断力が比較的大きい横リブ省略モデルに関して、せん断力に道路橋示方書に示される衝撃係数を考慮しスタッドの断面積で除したせん断応力度は19.8N/mm<sup>2</sup>であり、図-14に示す文献5)ならびに6)に示されるロビンソン型合成床版のスタッドの疲労強度である50N/mm<sup>2</sup>を大きく下回っている。

## 6. スタッドのせん断力へのコンクリート版厚の影響

文献3)では、コンクリート版厚が比較的薄い120mmおよび150mmのロビンソン型合成床版の試験体を用いた輪荷重走行試験においてスタッドが破断したと報告している。このため、ここではコンクリートの版厚がスタッドに作用するせん断力に与える影響に関して検討を行う。なお、文献5)では、ロビンソン型合成床版のコンクリートの最小版厚を150mmと規定している。このため、コンクリート版厚を150mmとした解析モデルを作成し、コンクリート

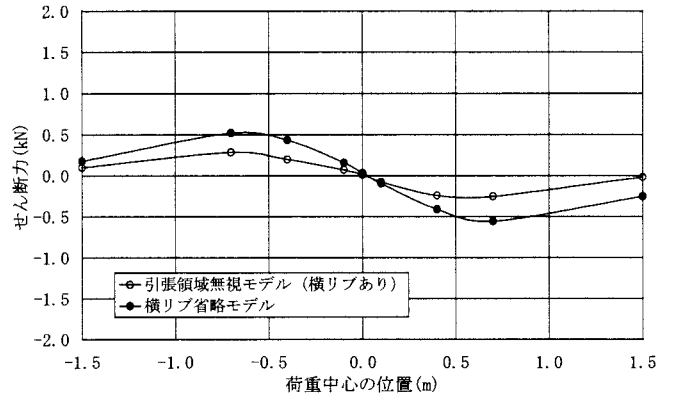
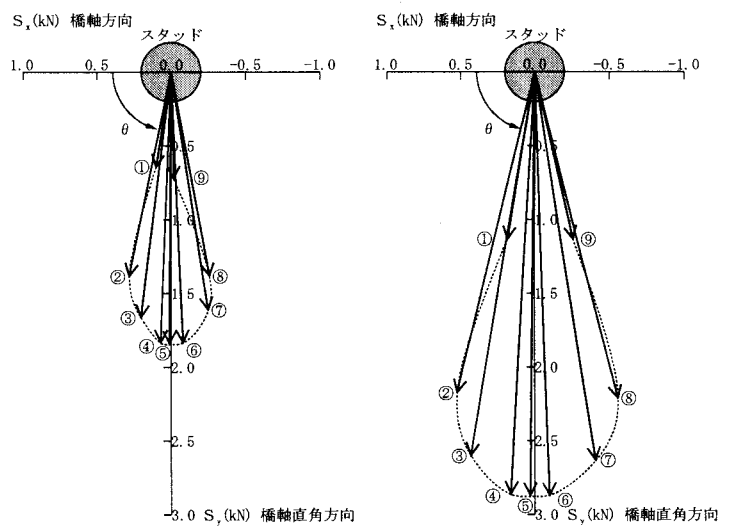


図-11 スタッドⅢに作用する橋軸方向のせん断力 (引張領域無視モデルおよび横リブ省略モデル)



(a)引張領域無視モデル (横リブがある場合) (b)横リブ省略モデル (横リブがない場合)

図-12 スタッドⅢに作用する合成せん断力の作用角度

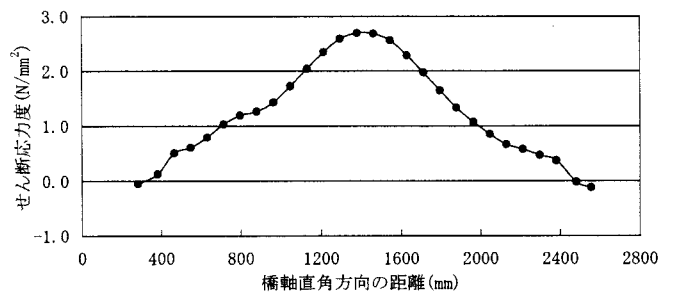


図-13 横リブⅠに作用するせん断力度

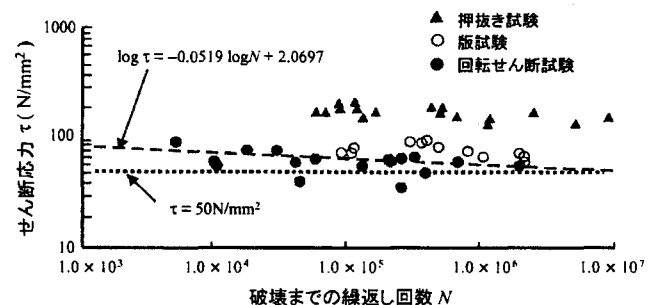


図-14 スタッドの疲労強度<sup>9)</sup>

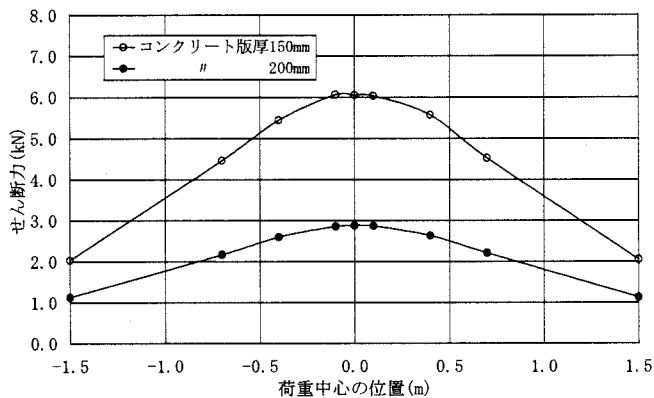


図-15 スタッッドⅢに作用する橋軸直角方向のせん断力  
(コンクリート版厚200mmと150mmの比較)

版厚が200mmの解析結果との比較を行う。ただし、横リブの影響を除くために、ここで検討を行うコンクリート版厚が200mmおよび150mmの解析モデルは、横リブを省略したコンクリート引張領域無視モデルとした。なお、コンクリート版厚が150mmのモデルについては、鋼板厚を9mm、スタッド径をφ16mm、スタッド長を90mm、コンクリートの引張領域を下端から50mmとした。

横リブの影響の場合と同様に、図-3(b)に示すスタッッドⅢに関するコンクリート版厚が200mmのモデルと150mmのモデルの解析結果について、橋軸直角方向と橋軸方向のせん断力をそれぞれ図-15および図-16に示す。コンクリート版厚が150mmのモデルに関しては、橋軸直角方向のせん断力の最大値は6.053kN、橋軸方向のせん断力の最大値は±1.3kN程度である。これらとコンクリート版厚が200mmのモデルの結果を比較すると、コンクリート版厚を50mm低減することによって橋軸直角方向と橋軸方向のせん断力の大きさがそれぞれ2.1倍および2.3倍に増加している。

なお、コンクリート版厚が150mmのモデルのスタッッドⅢに関する合成せん断力の最大値は6.053kNである。せん断力に衝撃係数を考慮しスタッッドの断面積で除したせん断応力度は41.6N/mm<sup>2</sup>であり、スタッッドの疲労強度50N/mm<sup>2</sup>の8割に達している。

## 7. まとめ

本研究は、ロビンソン型合成床版の損傷形態のうち、スタッッドの疲労損傷に着目し、スタッッドに作用するせん断力の性状を把握することを目的としたものである。具体的には、合成床版の細部まで忠実に再現した3次元有限要素解析を実施し、スタッッドに作用するせん断力の大きさや作用方向を把握した。さらに、鋼板に溶接した横リブやコンクリート版厚がスタッッドのせん断力へ与える影響についても検討を行った。

本研究において、得られた結果は以下の通りである。

- 1) 解析の対象とした試験体の細部までモデル化した3次

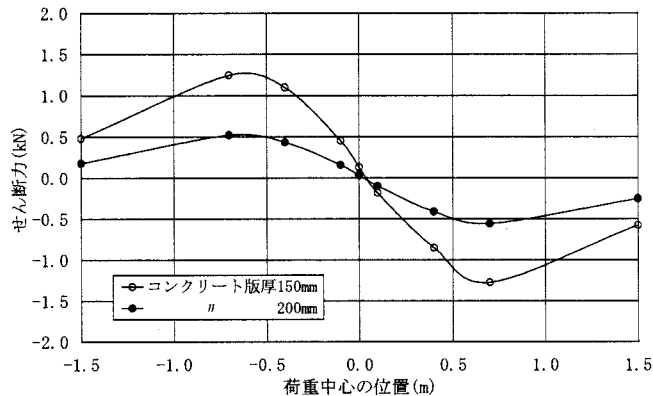


図-16 スタッッドⅢに作用する橋軸方向のせん断力  
(コンクリート版厚200mmと150mmの比較)

元FE解析を実施し、輪荷重走行試験の測定結果との比較を通して解析方法の妥当性を確認した。

- 2) スタッッドの橋軸直角方向に関するせん断力の最大値は1.8kN、橋軸方向に関するせん断力の最大値は±0.3kN程度、合成せん断力の最大値は1.8kNである。
- 3) 鋼板に溶接した横リブの効果により、スタッッドの合成せん断力の最大値は約4割、作用角度の変化量は約3割低減する。
- 4) コンクリート版厚を最小版厚の150mmとすると、200mmのものに比較してスタッッドの合成せん断力の最大値は約2倍となり、せん断応力度はスタッッドの疲労強度の8割に達する。

## 参考文献

- 1) 渡辺 滉, 街道 浩, 水口和之, 村松竹司, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版の開発と実橋への適用について, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.213-218, 1998.
- 2) 街道 浩, 渡辺 滉, 橋 吉宏, 松井繁之, 栗田章光: 鋼・コンクリート合成床版を適用したプレストレスしない連続合成げたの中間支点部の静的載荷試験, 構造工学論文集 Vol.49A, 土木学会, pp.1115-1126, 2003.
- 3) 松井繁之, 文 兌景, 福本啓士: 鋼板・コンクリート合成床版中のスタッッドの疲労破壊性状について, 構造工学論文集, Vol.39A, 土木学会, pp.1303-1311, 1993.
- 4) 街道 浩, 渡辺 滉, 橋 吉宏, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価, 構造工学論文集 Vol.50A, 土木学会, pp.1119-1130, 2004.
- 5) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 平成9年版, 丸善, 1997.
- 6) 土木学会: 構造工学シリーズ11 複合構造物の性能照査指針(案), 丸善, 2002.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 丸善, 2002.
- 8) 日本エムエスシー: MSC.Marc 2001 日本語オンラインマニュアル, 2001.