

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について

Characteristics of shear forces working on shear studs in steel plate-concrete composite deck

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。近年, 長支間化や連続合成げた橋への適用に関する種々の研究が行われ, 鋼2主げた橋, 鋼少数主げた橋, 鋼開断面箱げた橋などに合成床版が積極的に採用されるに至っている。

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の橋軸直角方向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^{1), 2), 3)}。

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^{4), 5)}, 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⁶⁾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^{7), 8)}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⁹⁾が有効であ

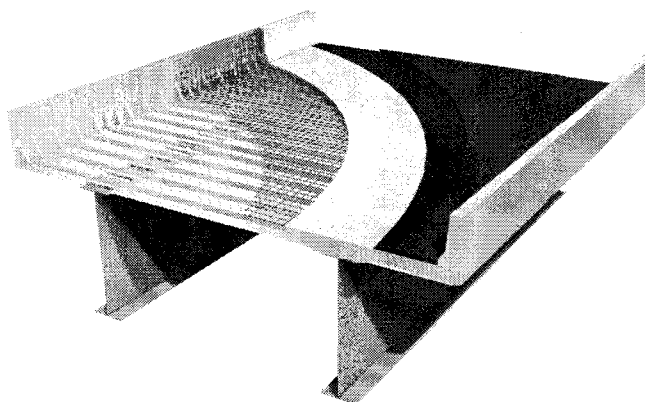


図-1 ロビンソン型合成床版の概念図

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6)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⁹⁾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。また、道路橋示方書に示される床版支持げたの不等沈下によって生じる床版の付加曲げモーメントも考慮している。

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 $\phi 16\text{mm} \times 120\text{mm}$ 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 37.6N/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 3.68N/mm^2 である。

3. 3次元有限要素解析

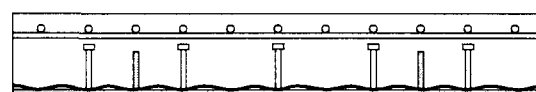
対象とする試験体の細部まで忠実に再現した3次元F E解析における各部位のモデル化や解析方法について以下に述べる。なお、3次元F E解析は、汎用解析コードMSC.Marc¹⁰⁾を使用した弾性解析である。

3.1 全断面有効モデル

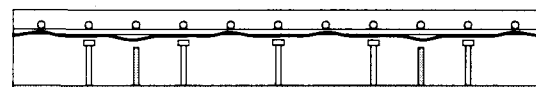
コンクリートの全断面が有効であるモデル（以下、全断面有効モデルと略す）の要素分割は図-4に示す通りである。このモデルの要素構成の概念図を図-5に示す。合成床版のコンクリートはソリッド要素、下鋼板および横リブはシェル要素、スタッドおよび鉄筋ははり要素としている。

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ける付着力および摩擦力を無視するとともに、反復増分計算の過程において接触の判定¹⁰⁾を行うことによって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、実際の形状が部分的に凹凸があることから、接触・非接触現象を考慮せず節点において並進

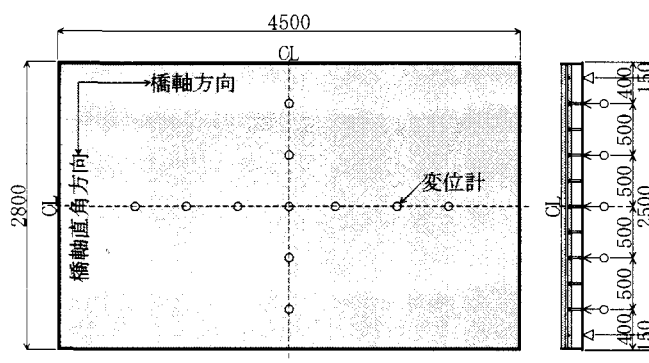


(a)スタッドの損傷

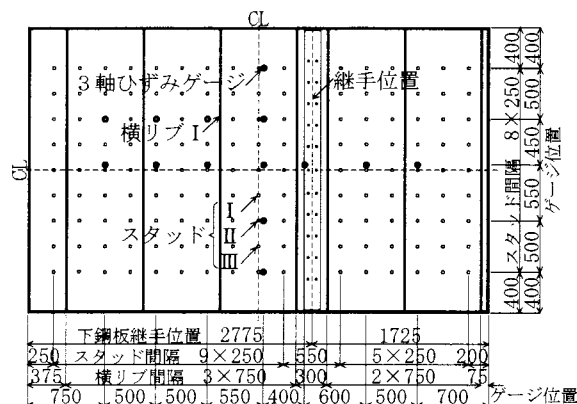


(b)コンクリート内部の損傷

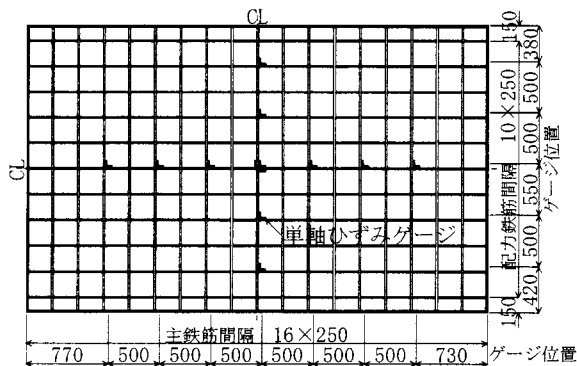
図-2 ロビンソン型合成床版の損傷形態



(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

変位を共有するものとした。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、添接板や高力ボルトをモデル化せず下鋼板を連続させた。

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。

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。

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、床版断面において引張領域のコンクリートが抵抗しないものと仮定し、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

解析モデルの支持条件については、図-3(a)に示すように橋軸方向に平行な端辺は単純支持とし、橋軸直角方向に

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 ²	30
下鋼板	板厚	mm	9
	断面	mm	100×16
横リブ	橋軸方向間隔	mm	750
	寸法	mm	φ16×120
スタッド	橋軸方向間隔	mm	250
	橋軸直角方向間隔	mm	250
主鉄筋 (橋軸直角方向)	呼び	mm	D19
	間隔	mm	250
配力鉄筋 (橋軸方向)	呼び	mm	D16
	間隔	mm	250

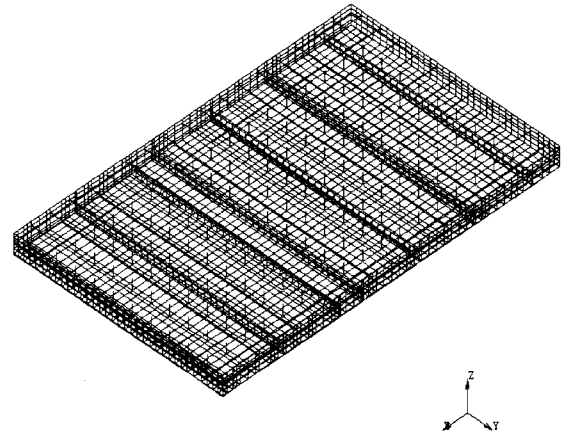


図-4 全断面有効モデルの要素分割

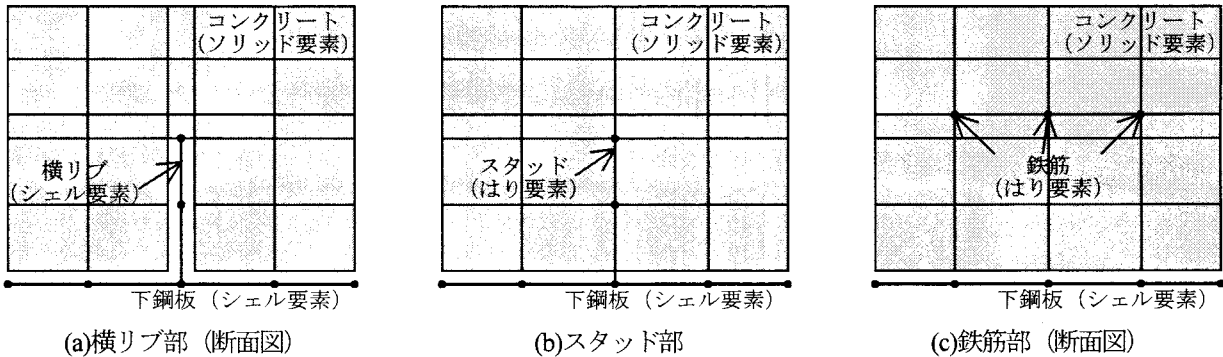


図-5 全断面有効モデルの概念図

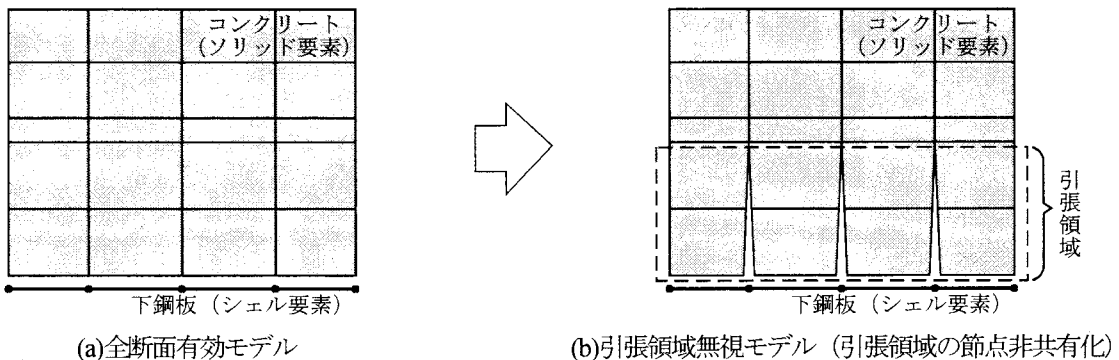


図-6 引張領域無視モデルの概念図

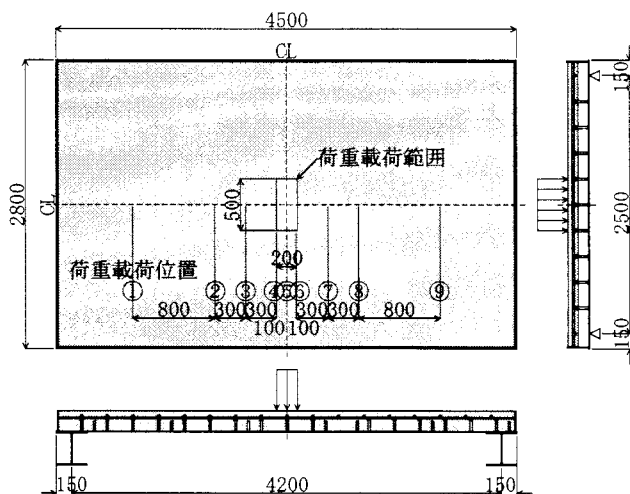


図-7 荷重載荷位置および荷重載荷範囲

平行な端辺は、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の位置に載荷した。また、荷重は載荷ブロックの大きさである橋軸直角方向 500mm×橋軸方向 200mm の範囲に 98kN を等分布載荷した。

4. 解析方法の妥当性の検証

上記の3次元F E解析に関して、解析方法の妥当性を検証するために、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。

4.1 たわみの比較

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。載荷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、載荷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、床版断面における引張領域においてひびわれの発生が多く、引張力に対する抵抗力が小さいためと考えられる。

4.2 ひずみの比較

試験体中央における下鋼板の橋軸方向に関する弾性ひずみの変化を図-10に示す。橋軸方向の弾性ひずみの測

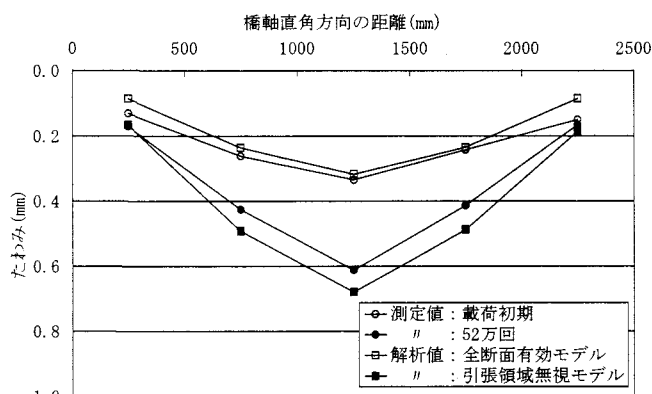


図-8 橋軸直角方向のたわみ分布の比較

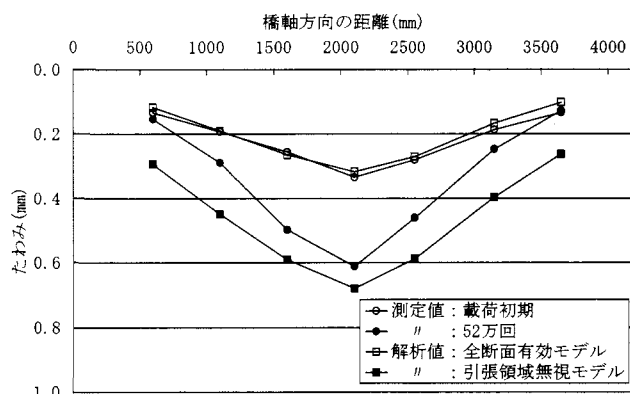


図-9 橋軸方向のたわみ分布の比較

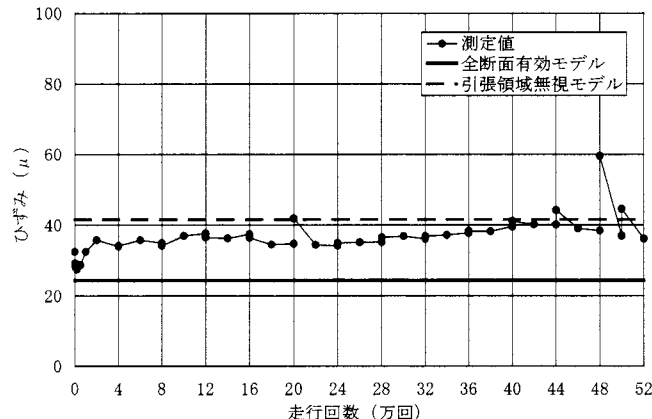


図-10 下鋼板の橋軸方向ひずみの比較

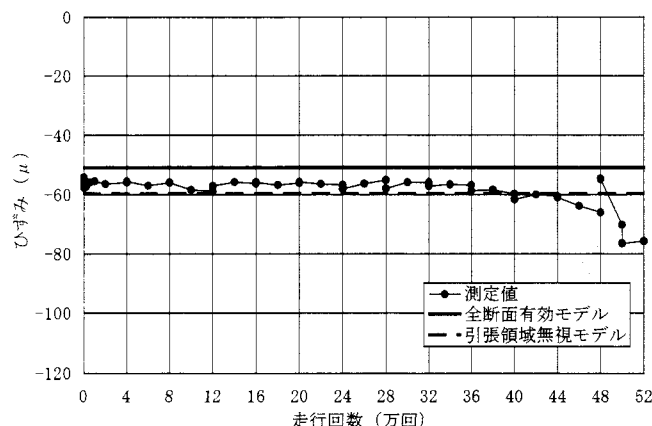


図-11 主鉄筋の橋軸直角方向ひずみの比較

定値は、載荷初期において全断面有効モデルの解析値よりもやや大きく、その後徐々に増加しはじめ、最終的には引張領域無視モデルの解析値に近い値を示す。

一方、試験体中央における主鉄筋の橋軸直角方向に関する弾性ひずみの変化を図-11に示す。主鉄筋の弾性ひずみの測定値は、載荷初期において全断面有効モデルの解析値よりもやや小さく、その後徐々に減少しはじめ、最終的には引張領域無視モデルの解析値に近い値を示す。

以上の結果から、前述したモデル化を適用した3次元F E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。

5. スタッドに作用するせん断力の性状

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と考えられる。ここでは、スタッドに作用するせん断力の性状を3次元F E解析により把握する。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。また、図-12

表-2 スタッド I に作用するせん断力 (引張領域無視モデル)

試験体の中心から 荷重中心までの距離	番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	mm	-1,500	-700	-400	-100	0	100	400	700	1,500
橋軸直角方向のせん断力 S_y	kN	0.245	0.608	0.824	1.128	1.158	1.118	0.795	0.618	0.275
橋軸方向のせん断力 S_x	"	0.235	0.697	0.628	0.304	0.003	-0.314	-0.716	-0.667	-0.196
合成せん断力 S_c	"	0.340	0.925	1.036	1.168	1.158	1.162	1.070	0.909	0.338
合成せん断力の作用方向 θ	deg	46.2	41.1	52.7	74.9	89.9	105.7	132.0	137.2	125.5
合成せん断応力度 τ_c *	N/mm ²	1.7	4.6	5.2	5.8	5.8	5.8	5.3	4.5	1.7

*合成せん断応力度は衝撃の影響を含まない値を示す。

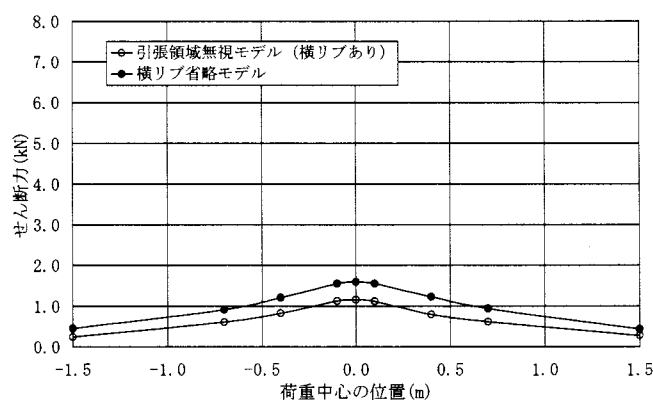


図-12 スタッド I に作用する橋軸直角方向のせん断力 (引張領域無視モデルおよび横リブ省略モデル)

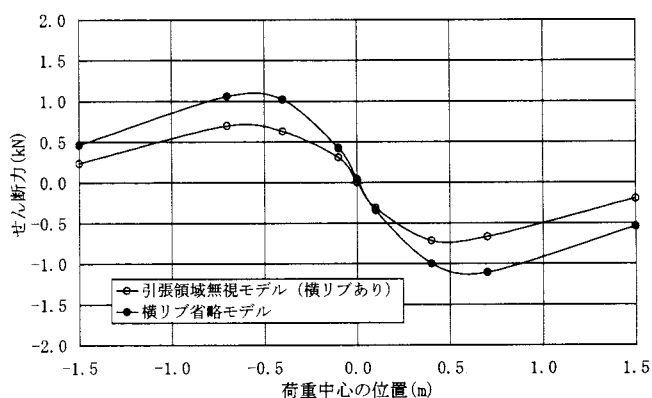
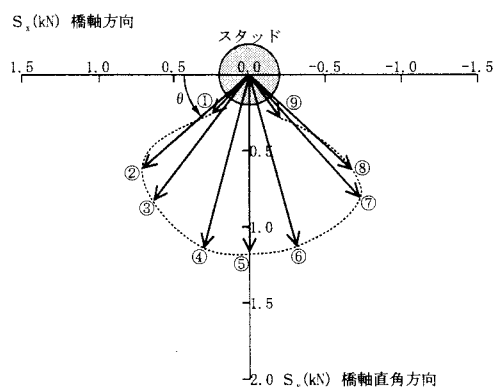
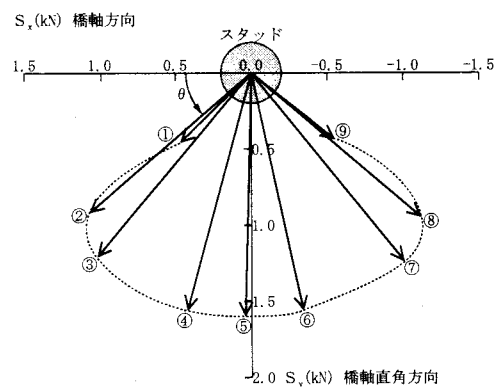


図-13 スタッド I に作用する橋軸方向のせん断力 (引張領域無視モデルおよび横リブ省略モデル)



(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-14 スタッド I に作用する合成せん断力の作用角度

～17 については、比較のために後述する横リブ省略モデルの結果を併記している。

5.1 スタッドⅠに作用するせん断力

スタッドⅠは図-3(b)に示すように、図-7 の各荷重載荷位置のうち試験体中央に荷重を載荷する⑤の場合において、荷重載荷範囲の橋軸直角方向の縁端に位置するスタッドである。このスタッドⅠの基部に関して、橋軸直角方向および橋軸方向に作用するせん断力の解析値を表-2、図-12、図-13 に示す。なお、表中の番号は図-7 に示す荷重載荷位置の番号に対応している。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1.158kN 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±0.7kN 程度である。

次に、合成せん断力の大きさと作用角度を表-2 および図-14(a)に示す。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、橋軸方向のせん断力の影響が大きいことから、荷重の載荷位置を試験体の中央から-100mm とした④の場合に発生しており、その値は1.168kN である。また、合成せん断力の作用角度 θ の変化量は 96.1° である。文献4)では、この作用角度の変化量が 90° 程度であることを図示しており、荷重載荷範囲の縁端に位置するスタッドⅠについては、この報告と一致する値となっている。

5.2 スタッドⅢに作用するせん断力

スタッドⅢは図-3(b)に示すように、試験体中央に荷重を載荷する⑤の場合において荷重載荷範囲の橋軸直角方向の縁端から 500mm に位置するスタッドである。このスタッドⅢの基部に関して、橋軸直角方向および橋軸方向に作用するせん断力の解析値を表-3、図-15、図-16 に示す。橋軸直角方向のせん断力の最大値は1.844kN であり、すべてのスタッドのうちで最大となっている。また、橋軸方向のせん断力の最大値は±0.3kN 程度である。

次に、合成せん断力の大きさと作用角度を表-3 および図-17(a)に示す。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。合成せん断力に関しても、スタッドⅢがすべてのスタッドのうちで最大となっている。また、合成せん断力の作用角度 θ の変化量については、橋軸直角方向のせん断力が卓越していることから 22.1° と小さい。荷重載荷範囲からやや離れたせん断力が最大となるスタッドⅢでは、作用角度 θ の変化量は文献4)の報告の $1/3$ 以下の値となっている。

5.3 横リブに作用するせん断応力度

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-18 に示す。せん断応力度の

表-3 スタッドⅢに作用するせん断力 (引張領域無視モデル)

試験体の中心から 荷重中心までの距離	番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	mm	-1,500	-700	-400	-100	0	100	400	700	1,500
橋軸直角方向のせん断力 S_y	kN	0.638	1.383	1.658	1.825	1.844	1.825	1.609	1.383	0.716
橋軸方向のせん断力 S_x	"	0.098	0.284	0.196	0.069	0.010	-0.078	-0.245	-0.255	-0.020
合成せん断力 S_c	"	0.645	1.412	1.669	1.826	1.844	1.826	1.627	1.407	0.716
合成せん断力の作用方向 θ	deg	81.3	78.4	83.3	87.8	89.7	92.5	98.7	100.4	91.6
合成せん断応力度 τ_c *	N/mm ²	3.2	7.0	8.3	9.1	9.2	9.1	8.1	7.0	3.6

*合成せん断応力度は衝撃の影響を含まない値を示す。

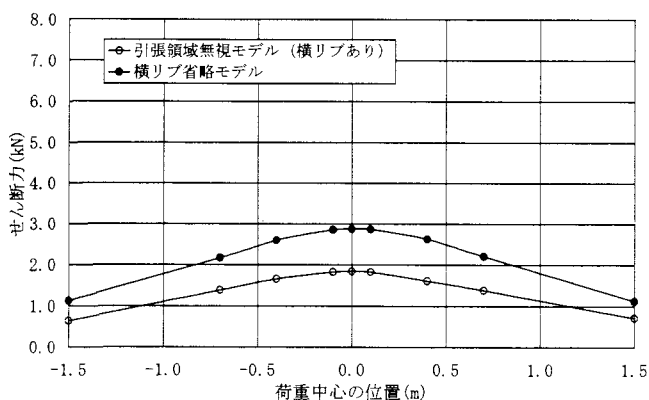


図-15 スタッドⅢに作用する橋軸直角方向のせん断力 (引張領域無視モデルおよび横リブ省略モデル)

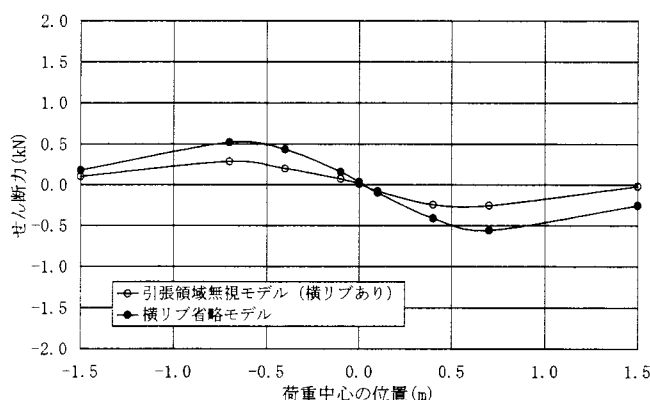


図-16 スタッドⅢに作用する橋軸方向のせん断力 (引張領域無視モデルおよび横リブ省略モデル)

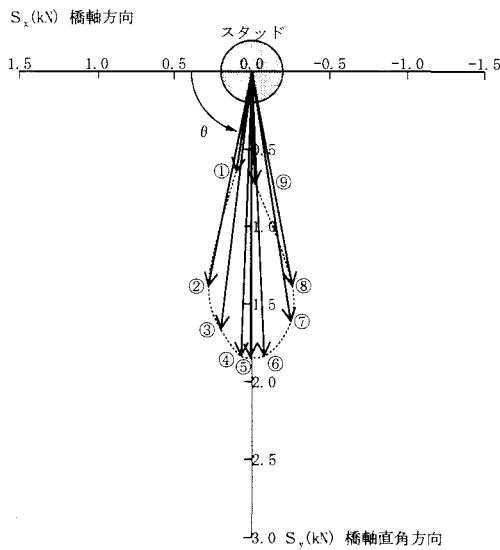
最大値は試験体の中央で発生しており、その値は 2.7N/mm^2 程度と非常に小さい。

6. スタッドのせん断力への横リブの影響

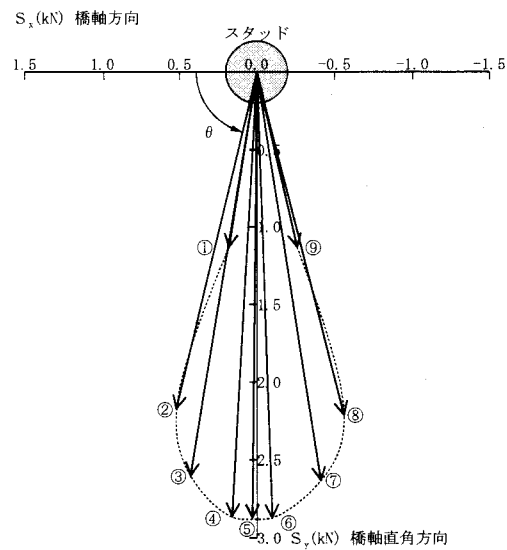
鋼板上に溶接した横リブは、鋼板のコンクリート打設時の変形を低減するために設けたものである。しかしながら、横リブはスタッド間に位置することから、スタッドに作用するせん断力の性状に大きな影響を与えることが推察される。このため、引張領域無視モデルから横リブを省略したモデル（以下、横リブ省略モデルと略す）の解析を行い、上述した横リブを有する引張領域無視モデルとの比較を行う。

6.1 スタッドⅠに作用するせん断力

スタッドⅠ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-12 および図-13 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 1.589kN 、橋軸方向のせん断力については最大値が $\pm 1.1\text{kN}$ 程度となる。また、合成せん断力の大きさと作用角度を図-14(b)に示す。合成せん断力の最大値は 1.606kN であり、合成せん断力の作用角度 θ の変化量は 100.6° である。



(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-17 スタッドⅢに作用する合成せん断力の作用角度

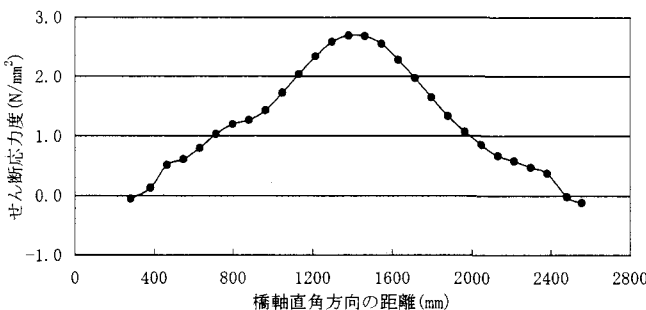


図-18 横リブⅠに作用するせん断応力度

6.2 スタッドⅢに作用するせん断力

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-15 および図-16 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 $\pm 0.5\text{kN}$ 程度となる。また、合成せん断力の大きさと作用角度を図-17(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 θ の変化量は 27.7° である。

6.3 せん断力への横リブの影響

横リブを有する引張領域無視モデルと横リブ省略モデルの結果の比較から、せん断力が最大となるスタッドⅢに関しては、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、横リブ省略モデルのスタッドⅢのせん断力に関して、式(1)に示すように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^2 であり、図-19 に示す文献 7)ならびに 8) 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

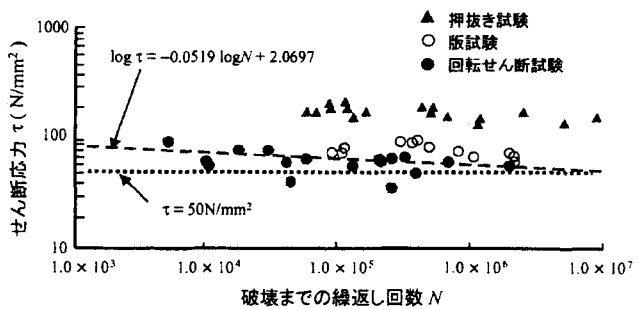


図-19 スタッドの疲労強度⁸⁾

である 50N/mm^2 を大きく下回っている。

$$\tau_0 = \frac{S_c \cdot (1+i)}{A_s} \quad (1)$$

$$= \frac{2.874 \cdot (1+0.381)}{\pi \cdot (16/2)^2}$$

$$= 19.8$$

ここに、 τ_0 : スタッドに作用するせん断応力度 (N/mm^2)
 S_c : スタッドに作用する最大合成せん断力 (kN)
 A_s : スタッドの断面積 (mm^2)
 i : 衝撃係数

7. スタッドのせん断力へのコンクリート版厚の影響

文献 4) および 5) 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、土木学会 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物⁷⁾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、コンクリート版厚が 200mm の解析結果との比較を行う。

7.1 横リブがある場合の比較

まず、横リブを有する場合に関してコンクリート版厚の影響を検討する。コンクリート版厚が 150mm のモデルについては、鋼板厚を 9mm 、横リブ寸法を $75\text{mm} \times 16\text{mm}$ 、スタッド径を $\phi 16\text{mm}$ 、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。これは、コンクリート版厚が 200mm のモデルに対して、版厚と横リブの高さおよびスタッドの長さとの比率を一定にするとともに、横リブの厚さとスタッドの径を同一としたものである。

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、せん断力が最大であるスタッドⅢの橋軸直角方向と橋軸方向のせん断力をそれぞれ図-20 および図-21 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 4.434kN 、橋軸方向のせん断力の最大値は $\pm 0.5\text{kN}$ 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、橋軸直角方向と橋軸方向のせん断力の大

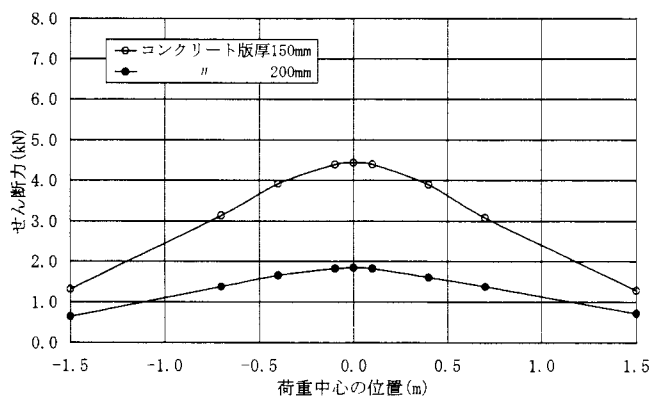


図-20 スタッドⅢに作用する橋軸直角方向のせん断力 (横リブがある場合)

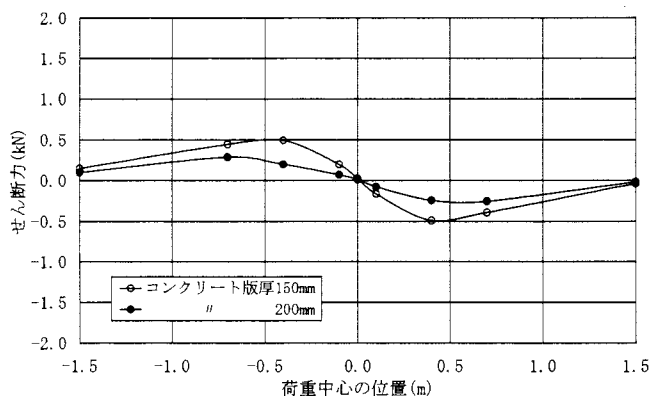


図-21 スタッドⅢに作用する橋軸方向のせん断力 (横リブがある場合)

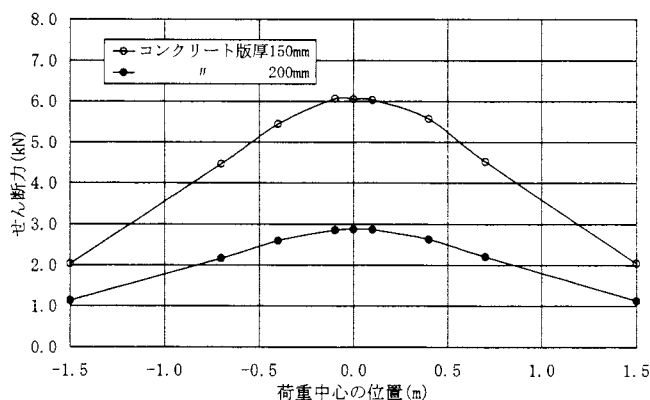


図-22 スタッドⅢに作用する橋軸直角方向のせん断力 (横リブがない場合)

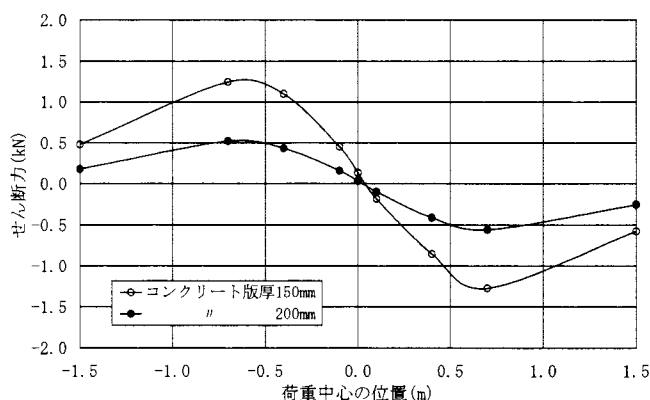


図-23 スタッドⅢに作用する橋軸方向のせん断力 (横リブがない場合)

きさがそれぞれ2.4倍および1.7倍に増加している。

7.2 横リブがない場合の比較

次に、横リブを省略した場合に関してコンクリート版厚の影響を検討する。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、横リブを有する場合と同様にスタッドⅢの橋軸直角方向と橋軸方向のせん断力をそれぞれ図-22 および図-23 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、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。

7.3 せん断力へのコンクリート版厚の影響

上記の結果のうち各解析モデルにおけるスタッドⅢに作用する最大せん断力を表-4に示す。また、コンクリート版厚が200mmの横リブを有する引張領域無視モデルの最大せん断力を基準とした場合の比率も併記する。これらの結果から、コンクリート版厚を50mm低減することによって、スタッドⅢに作用するせん断力はおおむね2倍になることが明らかになった。

なお、コンクリート版厚が150mmの横リブ省略モデルのスタッドⅢに関する合成せん断力の最大値は6.053kNである。式(1)により算出したせん断応力度は 41.6N/mm^2 であり、スタッドの疲労強度 50N/mm^2 を2割程度下回っている。これは、文献5)における「 $\phi 16\text{mm}$ のスタッドを用い、コンクリート厚を15cm以上にした場合には、スタッドの疲労破断数は極端に減少し、疲労耐久性が向上した。」という記述と符合するものである。

8. 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次元FEM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。

表-4 解析モデルごとの最大せん断力

			コンクリート版厚200mm		コンクリート版厚150mm	
			横リブあり	横リブなし	横リブあり	横リブなし
橋軸直角方向	最大せん断力	kN	1.844	2.874	4.434	6.053
	比率	—	1.0	1.6	2.4	3.3
橋軸方向	最大せん断力	kN	0.284	0.559	0.491	1.275
	比率	—	1.0	2.0	1.7	4.5

- 3) 合成せん断力の作用方向の変化量は、荷重範囲の縁端のスタッドにおいては 100° 程度、せん断力が最大となるスタッドにおいては 30° 程度である。
- 4) 鋼板に溶接した横リブの効果により、スタ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。
- 5) 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ドの合成せん断力の最大値は約2倍となるが、せん断応力度はスタッドの疲労強度を2割程度下回った。

最後に、今後の課題として、上述のスタッドⅠのように比較的小さいせん断力がスタッドをこねくり回すように作用する場合と、スタッドⅢのように大きいせん断力がおおむね一定方向に作用する場合のうち、どちらがスタッドの疲労耐久性に大きく影響するかについての検討が必要であると考えられる。

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, 堀川都志雄: 床版張出し部の輪荷重走行試験および曲げモーメント性状について, 構造工学論文集 Vol.48A, 土木学会, pp.1429-1439, 2002.
- 3) 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.
- 4) 松井繁之, 佐々木洋, 福本誘士, 梶川靖治: 走行荷重下における鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.34A, 土木学会, pp.409-420, 1988.
- 5) 松井繁之, 文 兌景, 福本誘士: 鋼板・コンクリート合成床版中のスタ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.
- 6) 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.

- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，丸善，2002.
- 10) 日本エムエスシー：MSC.Marc 2003 日本語オンラインマニュアル，2003.

(2004年9月17日受付)