

鋼・コンクリート合成床版の張出し部のスタッドに作用するせん断力の性状

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

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

Hiroshi KAIDO, Hiroichi TASAKA, Yoshihiro TACHIBANA, 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)

** 工修 川田工業(株)橋梁事業部四国技術部 (〒764-8520 香川県仲多度郡多度津町西港町 17)

*** 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, which consists of the steel-plate, 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. As the fatigue damage is due to shear forces working on the studs, it is important to investigate characteristics of the shear forces. The authors have already estimated the shear forces in the simply supported part of the composite deck. In this paper, the shear forces characteristics in the overhanging part were evaluated by three-dimensional finite element analyses.

Key Words: steel plate-concrete composite deck, overhanging part, 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, 張出し部, スタッド, 疲労損傷, 3次元有限要素解析

1. はじめに

ロビンソン型の鋼・コンクリート合成床版(以下, 合成床版と略す)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。

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¹⁾, 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²⁾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^{3), 4)}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²⁾が有効である。

著者らは, 上記の損傷形態のうちスタッドの疲労損傷に着目し, これまでに床版の単純支持部に関してスタッドに作用するせん断力の性状を有限要素解析(以下, FE解析と略す)により確認した⁵⁾。

本研究は, 床版の張出し部に関して, 単純支持部と同様にコンクリート・鋼板・スタッド・鉄筋などについて細部まで忠実に表現した3次元モデルを用いたFE解析を実

施し, 床版張出し部のスタッドに作用するせん断力の大きさや作用方向などの性状について検討を加えるものである。

2. 解析の対象とする試験体

本研究の対象は, 写真-1に示す床版張出し部の輪荷重走行試験⁶⁾のために製作した試験体とした。この試験体は, 図-1に示すように2本の主げた上に床版を固定したものであり, 橋軸方向の端部に横げたを設け, 床版と横げたの間に間詰材を挿入し床版を支持している。主げたと床版は

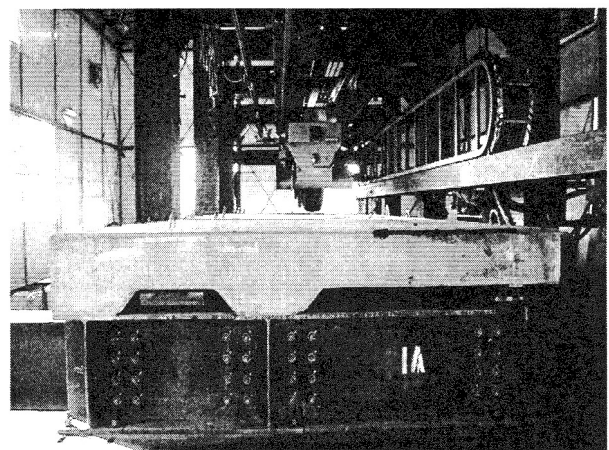


写真-1 張出し部の輪荷重走行試験の試験体

ハンチを介して結合しており、主げた上フランジ上にはスタッドを配置している。

試験体の構造諸元および鉄筋配置を表-1に示す。試験体の主鉄筋方向は車輪走行方向に直角としており、主げたの間隔が0.8m、横げたの間隔が2.9m、張出し部の全長が1.3m、外主げたG2から輪荷重走行位置までの距離が0.8mである。試験体は道路橋示方書⁷⁾に示される張出し部のT荷重に対する支間長を0.725mとして設計した実物大の模型であり、地覆ないし壁高欄の幅およびこれらの縁端からT荷重載荷位置までの距離などを加えた張出し部の全長が1.5m程度の床版に相当する。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。

輪荷重走行試験における載荷荷重は98kNから157kN、総走行回数は26.6万回である⁹⁾。

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.Marc⁹⁾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-2に示す通りである。このモデルの要素構成の概念図を図-3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。また、主げたはシェル要素でモデル化し、上フランジと床版のコンクリートはスタッドを設けず剛結合している。

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⁸⁾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変位を共有するものとした。

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⁶⁾からヤング係数を $E=2.59 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比を $\nu=0.201$ 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18,000、要素数は約16,400である。

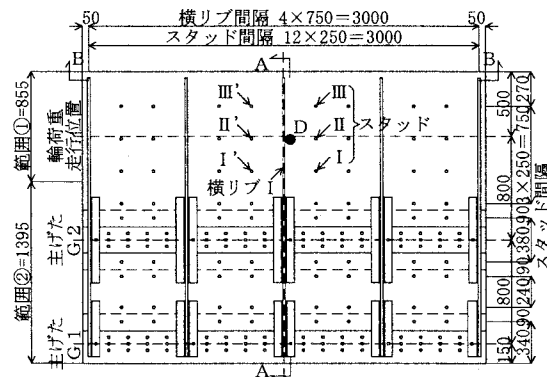
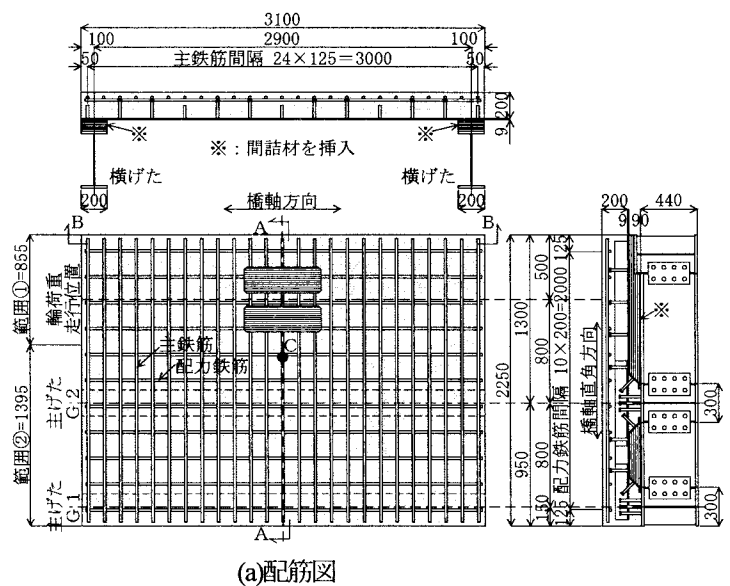


図-1 試験体の詳細図

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	φ16×140
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	-	D19
	間隔	mm	125
配力鉄筋 (橋軸方向)	呼び	-	D16
	間隔	mm	200

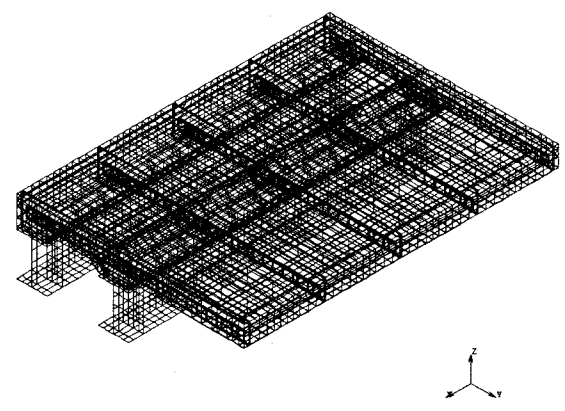


図-2 全断面有効モデルの要素分割

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。

対象とした試験体の曲げモーメント分布は、著者らの検討⁶⁾により図-1に示す範囲①については橋軸方向・橋軸直角方向ともに正の曲げモーメントが発生し、範囲②については橋軸方向・橋軸直角方向ともに負の曲げモーメントが支配的である。

引張領域無視モデルの概念図は図-4に示すとおりである。範囲①の正曲げモーメント区間は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90mmの引張領域に位置するソリッド要素に関して、一方、範囲②の負曲げモーメント区間はコンクリートの上端から170mm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、スタッドを表すはり要素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、鉄筋を表すはり要素は引張領域においても連続するものとした。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-1に示す主げたの橋軸方向の両端部において、下フランジの幅300mm・長さ300mmの範囲の並進変位をすべて拘束した。また、

図-1に示す横桁のウェブ位置の鉛直変位を試験体の全幅員にわたり拘束した。

一方、荷重については、図-1に示す輪荷重走行位置上の各箇所へ載荷した。荷重の載荷方法は、道路橋示方書⁷⁾に示されるT荷重の載荷面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FE解析に関して、解析方法の妥当性を検証するために、荷重を試験体の中央に載荷した場合における輪荷重走行試験の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、試験体中央である図-1のA-A断面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-5に示す。載荷初期の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、載荷終了時の測定値は、引張領域無視モデルの解析値の75%程度であり、両者の分布形状はほぼ等しい。

一方、張出し部の先端である図-1のB-B断面における試験体の橋軸方向の弾性たわみ分布の測定値と解析値を図-6に示す。載荷初期の測定値は全断面有効モデルの解析値におおむね等しい。また、載荷終了時の測定値は中央における値がやや小さいものの、引張領域無視モデルの解析値と比較的近い分布形状を示す。

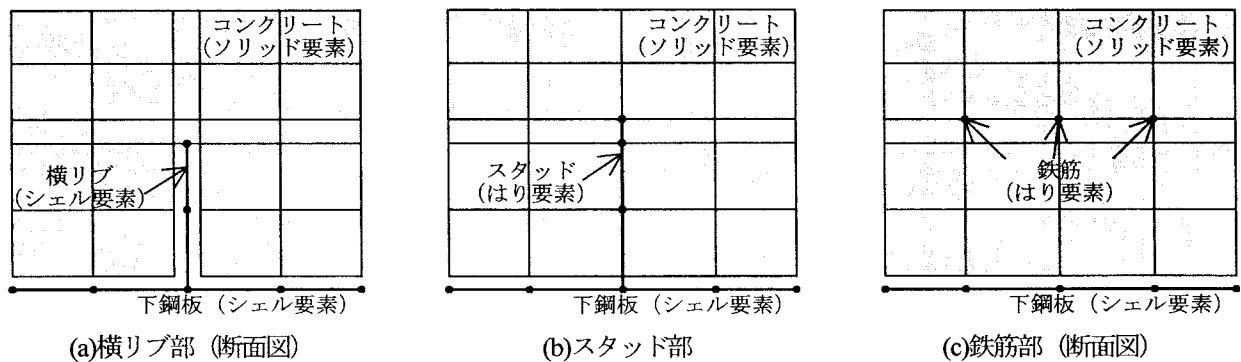


図-3 全断面有効モデルの概念図

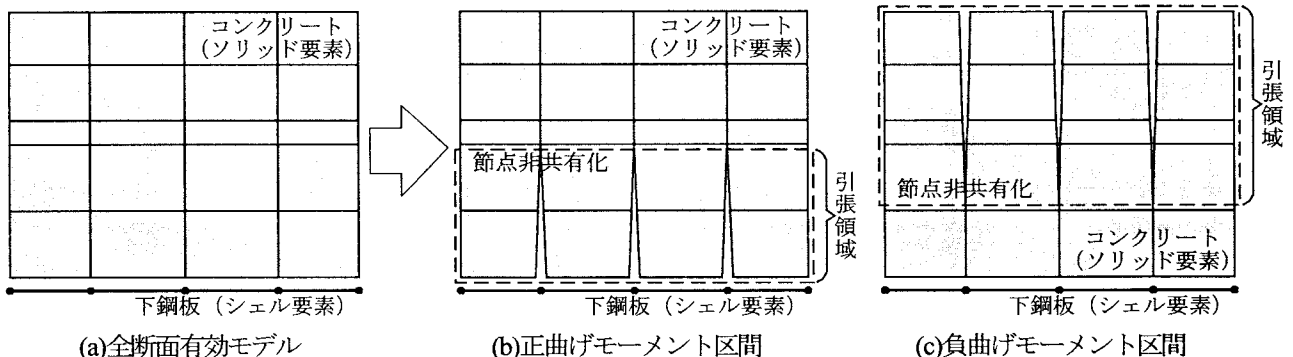


図-4 引張領域無視モデルの概念図（引張領域の節点非共有化）

4.2 ひずみの比較

張出し部の主げたに近い図-1のC点における試験体の主鉄筋の橋軸直角方向に関する弾性ひずみの変化を図-7に示す。橋軸直角方向の弾性ひずみの測定値は、荷重初期において全断面有効モデルの解析値に等しく、その後徐々に増加しはじめ、荷重終了時において引張領域無視モデルの解析値の85%程度である。

一方、輪荷重走行位置の直下である図-1のD点における試験体の下鋼板の橋軸直角方向に関する弾性ひずみの変化を図-8に示す。下鋼板の弾性ひずみの測定値は、荷重初期において全断面有効モデルの解析値にほぼ一致し、荷重終了時において引張領域無視モデルの解析値の75%程度である。

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、上述の3次元F E解析により張出し部のスタッドに作用するせん断力の性状を把握する。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。

5.1 スタッドIに作用するせん断力

図-1(b)に示す試験体中央のスタッドI・II・IIIに着目すると、橋軸直角方向のせん断力の大きさはスタッドI > II > IIIの順に減少する。一方、橋軸方向のせん断力の大きさは、スタッドI < II < IIIの順に増加し、両者を比較すると橋軸方向のせん断力が卓越する。以下に橋軸直角方向のせん断力が最大となるスタッドIと橋軸方向のせん断力が最大となるスタッドIIIの解析結果を示す。

スタッドIは輪荷重走行位置上において荷重荷重範囲の主げた側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-9、図-10に示す。なお、図中に付記するスタッドIは、図-1(b)に示すように試験体の橋軸直角方向の中心線に関してスタッドIと対称の位置にあるスタッドを示す。

橋軸直角方向のせん断力は、スタッドIの直上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0.636kNである。また、橋軸方向のせん断力は、スタッド位置に関して作用方向が交替する性状を示しており、せん断力の最大値は1.045kN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-11に示す。図-11中の番号は表-2の荷重荷重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

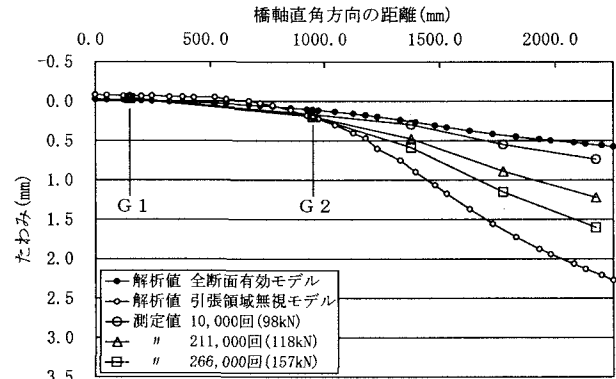


図-5 橋軸直角方向のたわみ分布の比較 (A-A断面)

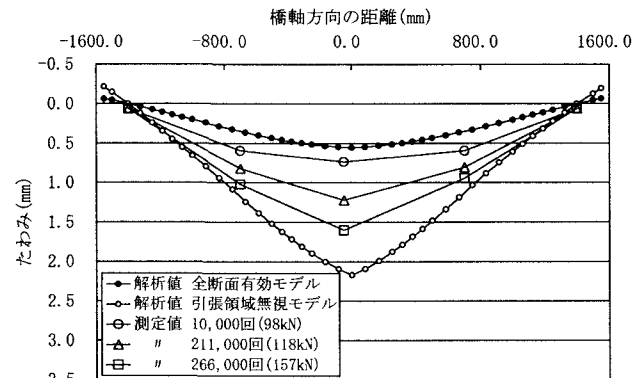


図-6 橋軸方向のたわみ分布の比較 (B-B断面)

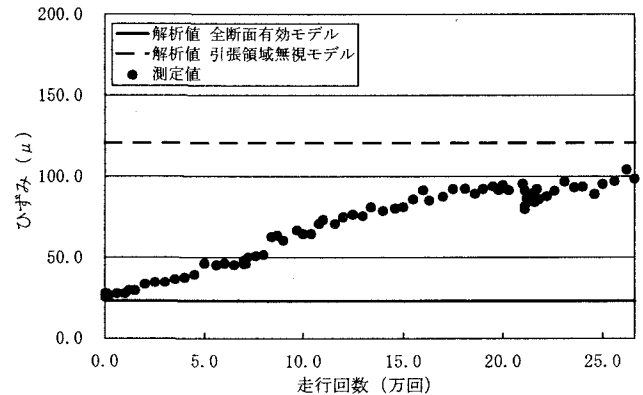


図-7 主鉄筋のひずみ (C点)

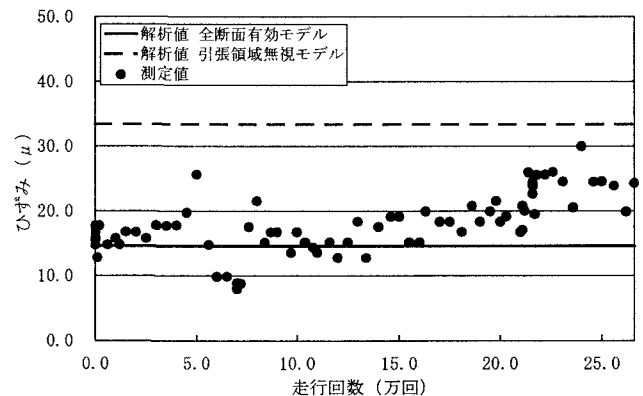


図-8 下鋼板の橋軸直角方向ひずみ (D点)

表一2 スタッド I に作用するせん断力

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	-1,000	-750	-500	-250	0	250	500	750	1,000
橋軸直角方向のせん断力 S_y	kN	0.065	0.088	0.226	0.361	0.586	0.636	0.460	0.277	0.150
橋軸方向のせん断力 S_x	"	0.228	0.342	0.529	0.799	1.045	0.048	-0.551	-0.842	-0.507
合成せん断力 S_c	"	0.237	0.353	0.575	0.877	1.198	0.638	0.718	0.886	0.529
合成せん断力の作用方向 θ	deg	15.9	14.4	23.1	24.3	29.3	85.7	140.1	161.8	163.5

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1.198kNである。また、合成せん断力の作用角度 θ の変化量は149.1°である。床版の単純支持部における荷重載荷範囲の上げた側縁端の解析結果⁵⁾と比較すると、橋軸方向のせん断力が卓越しており、合成せん断力の大きさは同じであるものの、作用角度の変化量は1.6倍となる。

5.2 スタッドⅢに作用するせん断力

スタッドⅢは張出し部の先端付近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一3、図一12、図一13に示す。なお、図中に付記するスタッドⅢは、図一1(b)に示すように試験体の橋軸直角方向の中心線に関してスタッドⅢと対称の位置にあるスタッドを示す。

橋軸直角方向のせん断力は±0.2kN以下の範囲に留まるが、橋軸方向のせん断力は大きく交番し、最大値は2.670kN、最小値は-1.624kNであり、せん断力の振幅は4.294kNとなる。また、合成せん断力の作用角度の変化量は約180°である。

式(1)に示すようにせん断力の振幅に道路橋示方書⁷⁾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振幅は29.7N/mm²であり、文献3)ならびに4)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/mm²の60%程度となる。この結果と床版の単純支持部の解析結果⁵⁾と比較すると、張出し部のせん断力応力振幅は2.3倍となっている。

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

$$= \frac{4.294 \cdot (1+0.389)}{\pi \cdot (16/2)^2}$$

$$= 29.7$$

ここに、 τ_0 : スタッドに作用するせん断応力振幅 (N/mm²)

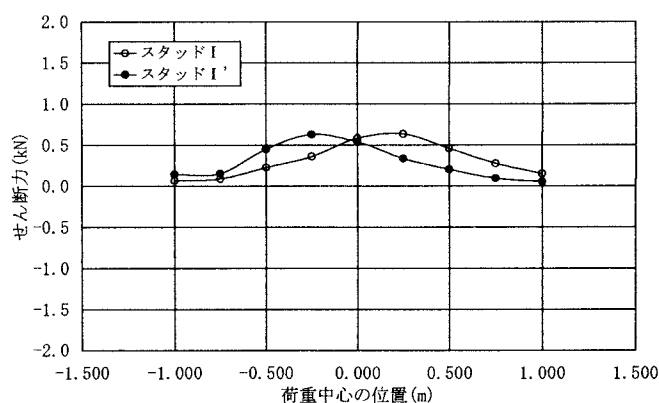
S_a : スタッドに作用するせん断力の振幅 (kN)

A_s : スタッドの断面積(mm²)

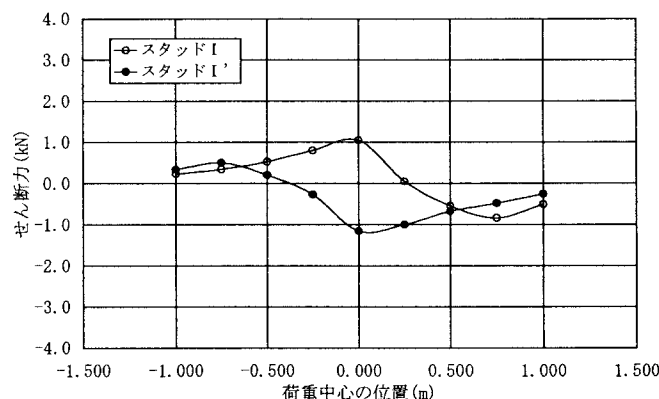
i : 衝撃係数

5.3 横リブに作用するせん断応力度

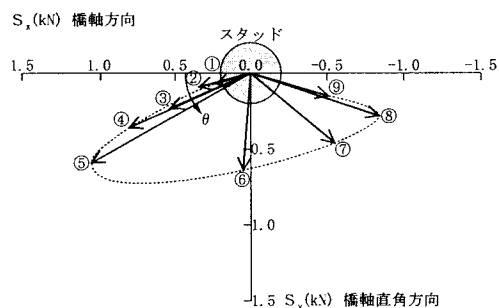
一方、横リブについては、荷重の載荷位置を試験体の中



図一9 スタッド I に作用する橋軸直角方向のせん断力



図一10 スタッド I に作用する橋軸方向のせん断力



図一11 スタッド I に作用する合成せん断力の作用角度
 中央とした場合において、図一1(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一14に示す。せん断応力度の最大値は10N/mm²程度と小さいものの、床版の単純支持部の解析結果⁵⁾と比較すると約3倍の値になっている。

表-3 スタッドⅢに作用するせん断力

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	-1,000	-750	-500	-250	0	250	500	750	1,000
橋軸直角方向のせん断力 S_y	kN	0.059	0.061	0.144	0.140	0.009	-0.190	-0.085	-0.006	0.033
橋軸方向のせん断力 S_x	"	0.985	1.556	2.031	2.531	2.670	0.788	-0.737	-1.624	-1.083
合成せん断力 S_c	"	0.987	1.557	2.036	2.535	2.670	0.811	0.742	1.624	1.084
合成せん断力の作用方向 θ	deg	3.4	2.2	4.1	3.2	0.2	-13.6	-173.4	-179.8	178.3

6. 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、合成床版の張出し部に関して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することを目的としたものである。

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) 橋軸直角方向のせん断力は主げた側のスタッドほど大きく、橋軸方向のせん断力は張出し部先端のスタッドほど大きい。
- 3) 張出し部の先端付近のスタッドに作用する橋軸方向のせん断力の振幅は4.3kNと大きく、合成せん断力の作用角度の変化量は約180°である。
- 4) スタッドのせん断応力振幅は29.7N/mm²であり、疲労強度である50N/mm²の60%程度、単純支持部での最大値の2倍以上となる。

参考文献

- 1) 松井繁之, 文 允景, 福本秀士: 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 街道 浩, 渡辺 滉, 橋 吉宏, 田坂裕一, 松井繁之, 堀川都志雄: 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, 構造工学論文集 Vol.51A, 土木学会, pp.1531-1540, 2005.
- 6) 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.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II鋼橋編, 丸善, 2002.

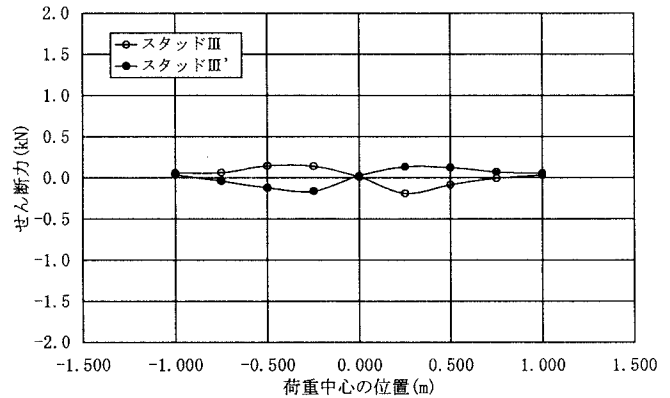


図-12 スタッドⅢに作用する橋軸直角方向のせん断力

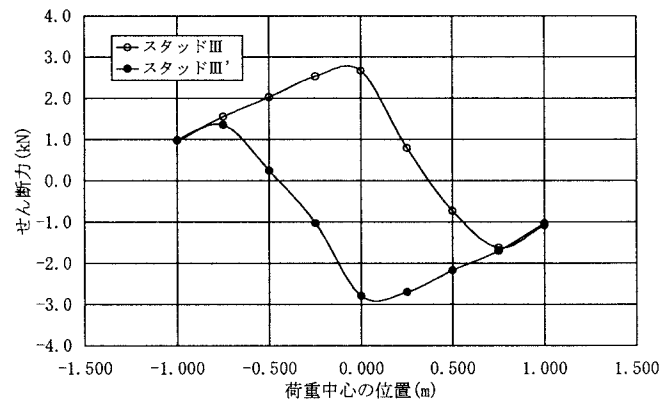


図-13 スタッドⅢに作用する橋軸方向のせん断力

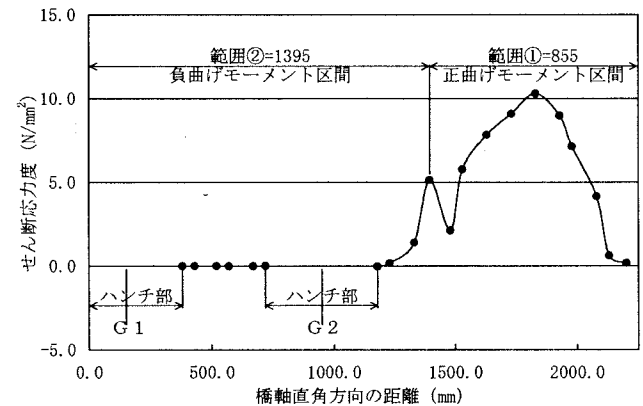


図-14 横リブIに作用するせん断応力度

- 8) 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.

(2006年3月31日受付)