

(38) 回転せん断力を受けるスタッドの 疲労耐久性の向上に関する研究

吉田 賢二¹・東山 浩士²・稲本 晃士³・松井 繁之⁴・街道 浩⁵

¹正会員 川田工業株式会社 鋼構造事業部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19)

E-mail: kenji.yoshida@kawada.co.jp

²正会員 近畿大学 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

E-mail: h-hirosi@civileng.kindai.ac.jp

³非会員 日本スタッドウエルディング株式会社 (〒529-1422 東近江市五個荘小幡町474)

E-mail: inamoto@nsw-j.com

⁴名誉会員 大阪大学名誉教授, 大阪工業大学 (〒614-8289 八幡市美濃山一ノ谷4)

E-mail: s-matsui@rsh.oit.ac.jp

⁵正会員 川田工業株式会社 鋼構造事業部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19)

E-mail: hiroshi.kaido@kawada.co.jp

ロビンソン型合成床版は底鋼板、スタッド、横リブの鋼部材にコンクリートを打設した合成床版で、高耐久性を保持している。合成床版上に輪荷重を往復走行させる疲労試験を行うと、スタッドには回転せん断力が繰返し作用し、底鋼板に溶接されたスタッドが疲労破断する。そのため、この疲労現象が設計寿命中に発生しないように疲労設計がなされてきた。本研究では、輪荷重走行時にスタッドに作用する回転せん断力を回転せん断疲労試験機により再現し、疲労試験により従来スタッドと比較して高寿命が達成できるスタッドの溶接方法を開発し、疲労耐久性の向上度を評価している。加えて、3次元モデルを用いたFEM解析により、スタッド周辺の応力性状と底鋼板上に配置された横リブの効果についても言及する。

Key Words : steel-concrete composite deck, headed stud, fatigue strength, improved welding ferrule, fem analysis

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と称す）の代表的な一種である図-1に示すロビンソン型合成床版は、底鋼板、頭付きスタッド（以下、スタッドと称す）、横リブおよびコンクリートから成る構造を有している。このような合成床版を開発するために、これまで数多くの研究がなされてきた^{1)~5)}。写真-1は松井ら^{2)~4)}が実施した輪荷重走行試験によるロビンソン型合成床版のスタッドの破断状況を示す。これらの研究から、合成床版のスタッドの疲労寿命は、スタッドの標準的な押抜きせん断疲労寿命よりも大きく低下する結果となった。スタッドが想定した寿命より早く破断してしまう原因として、スタッドに作用するせん断方向が一定ではなく、作用方向が回転するせん断力（以下、回転せん断力と称す）が繰返し作用することにあると、既往の研究によって明らかにされている^{2) 3) 5)}。松井ら⁴⁾は、合成床版特有のスタッドの疲労寿命を明らかにするため、独自に考案した回転せん断疲労試験機を用いて、回転せん断力を受けるス

タッドの疲労試験を実施し、回転せん断力を受けるスタッドの疲労強度は押抜きせん断疲労強度よりも低下することを明らかにしている。この研究結果を基に、合成床版に適用するスタッドのせん断疲労設計法が基準化された⁶⁾。

その後、スタッドの溶接止端部の形状を改善することにより、溶接止端部における応力集中を緩和し、疲労強度を向上させるための研究が行われてきた。平城ら⁷⁾は、スタッド溶接部の疲労強度を向上させるために、溶接止

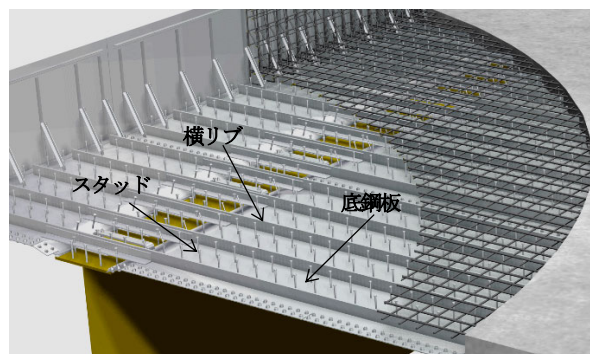


図-1 ロビンソン型合成床版の概念図

端部の形状が滑らかに仕上がるフェルールの形状や溶接時に発生する高温ガスの噴出位置について研究を行っている。

著者らは、平城ら⁷⁾が考案したフェールの形状をさらに改良し、主に合成床版に適用することを目的に改良型フェールを用いたスタッド（以下、改良型スタッドと称す）の回転せん断疲労強度に関する改善研究を行ってきた⁸⁾。その結果、従来型フェールを用いたスタッド（以下、従来型スタッドと称す）に比べて、改良型スタッドの回転せん断疲労寿命は、**図-2**に示すように約3倍程度向上することが分かり、合成床版のさらなる長寿命化が期待できる結果を得た⁹⁾。この要因として、**表-1**に示す改良型フェールを用いたスタッドの余盛り部の直径および高さが増大し、スタッド溶接部に生じる応力が低減したことによるものである。

本研究は、**図-2**に示した回転せん断疲労試験結果に対して3次元弾性FEM解析により、スタッド周辺の応力性状の検証を行った結果ならびに、合成床版に配置された横リブのスタッドに与える効果について、新しく回転せん断試験にて定性的に検証した結果について述べる。

2. 改良型フェールの概要

従来型フェールと改良型フェールの形状、外観およびマクロ断面の比較を**写真-2**に示す。従来型フェールでは、スタッドの溶接時に発生する高温ガスが下端の溝から外側へ噴出されるため、溶接止端部には鋼板と未融合のバリ状のものが残り、応力集中による疲労寿命の低下やばらつきの原因となっている。そこで、改良型フェールは、フェールの内側下縁に段差を設け、さらに高温ガスがフェールの上側へ噴き抜けるように改良し、従来型フェールの課題を改善した。平城ら⁷⁾が改良したフェールとの違いは、熔融金属がフェールの内側下縁に溜まりやすくなるように段差を設けたことである。外観およびマクロ断面を比較すると、改良型スタッドの溶接止端部は滑らかに仕上がっており、応力集中の緩和が期待できる。また、鋼板へのスタッドの溶着面積も大きくなることが特徴である。

3. 回転せん断試験方法

(1) 試験体

試験体の形状および構造諸元を**図-3**、**表-2**に示す。使用したスタッドの寸法は、合成床版に適用されている直径φ16mm、高さ120mm（材質SS400相当）である。ス



写真-1 スタッド破断状況

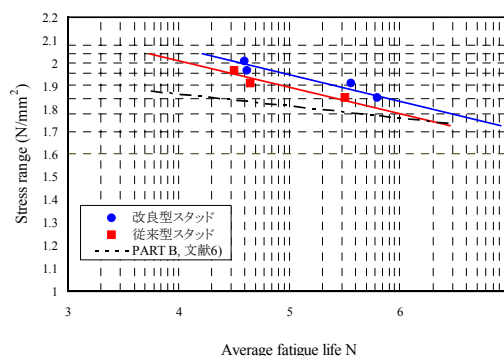


図-2 回転せん断疲労試験結果

表-1 余盛り寸法の比較

	余盛り外径D		余盛り高さh	
従来型	平均値 (mm)	21.39	平均値 (mm)	5.40
改良型	平均値 (mm)	24.11	平均値 (mm)	6.13

図解は、スタッドの溶接部を示す断面図である。Dは余盛りの外径、hは余盛りの高さを示している。

	従来型	改良型
フェール		
外観		
マクロ断面		

写真-2 フェールおよびスタッド溶接部の比較

タッドを直径 $\phi 350\text{mm}$ 、板厚 9mm の円形鋼板（材質SS400）の中心より 24mm 偏心した位置に溶接した。溶接したスタッドは、従来型スタッドおよび改良型スタッドの2種類である。回転する試験体に水平荷重を与える際に、荷重載荷部の載荷ローラーによるコンクリート表面の磨耗対策および型枠兼用として、スタッドの回りに直径 $\phi 232\text{mm}$ 、高さ 150mm 、板厚 15mm の鋼製の円筒型枠（材質SS400）を設置し、コンクリートを充填した。なお、コンクリートと接触する円形鋼板上面は黒皮のままとした。

コンクリートの配合を表-3に示す。コンクリートの呼び強度は $f_c'=27\text{N/mm}^2$ とした。養生28日で $f_c'=27.1\text{N/mm}^2$ 、試験開始時の養生55日で $f_c'=32.7\text{N/mm}^2$ の圧縮強度を確保している。ここで、合成床版の一般的なコンクリートの呼び強度 $f_c'=30\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートを採用しなかった理由は、これまでの試験練りの実績により、 $f_c'=27\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートにおける材料試験結果が 30N/mm^2 程度であることを考慮し、後述する3次元弾性FEM解析における材料物性による誤差を小さくするためにコンクリートの呼び強度を下げることにした。

また、本試験では、横リブを配置した効果を確認するため、写真-3に示した横リブを配置した試験体を製作している。配置した横リブの構造諸元は、板幅 90mm 、高さ 90mm 、板厚 12mm （材質SS400）である。円筒型枠と横リブとの隙間に緩衝材として発泡スチロールを設置している。

(2) 試験方法

本試験に使用した回転せん断疲労試験機を写真-4に示す。本試験機は、4本の水平ばねによる弾性力を利用して、ロータリーアクチュエータにより回転テーブルを360度回転させることによって、回転せん断力をスタッドに作用させる構造となっている。試験体は円形鋼板の中心から 24mm ずらしたスタッドが回転テーブル中心に位置するようにボルトにより固定されており、回転テーブルが360度回転したときの水平ばねの最大伸縮量は 48mm となるようになっている。具体的には、図-4に示すように試験体を180度回転させて説明できる。スタッド位置を試験体の回転中心とすると、0度であるSTEP-①ではセットしたばねの縮み量が最大値である 48mm となり、スタッドの水平せん断力が最大の状態を示す。さらに60度（STEP-②）、120度（STEP-③）と回転させて、180度（STEP-④）まで回転させると、ばねの縮み量は 0mm となり、スタッドに水平せん断力が発生しない状態となる。よって、試験体の回転によりばねの伸縮量を変化させ、試験体に与える回転せん断力を変化させることが可能となる。

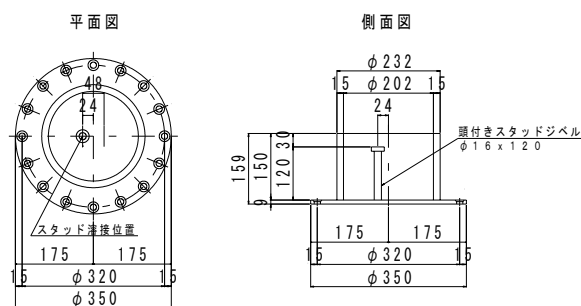


図-3 回転せん断疲労試験体図

表-2 試験体の構造諸元

		単位	構造諸元
コンクリート	版厚	mm	150
	呼び強度	N/mm^2	27
円形鋼板	直径	mm	350
	板厚	mm	9
スタッド	寸法	mm	$\phi 16 \times 120$
円筒型枠	直径	mm	232
	高さ	mm	150
	板厚	mm	15

表-3 コンクリートの配合

(a) 配合の設計条件

コンクリートの種類	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	水セメント比	細骨材率
普通	27N/mm^2	8cm	20mm	53.6%	44.3%

(b) 配合表

単位量 kg/m^3						
セメント	水	細骨材①	細骨材②	粗骨材①	粗骨材②	AE減水剤
315	167	487	323	719	310	3.150



写真-3 コンクリート打設前の横リブありの試験体

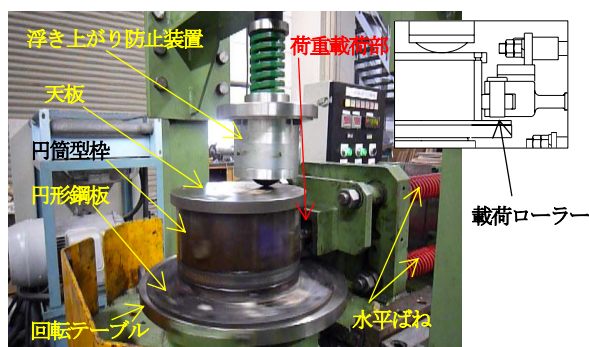


写真-4 回転せん断疲労試験状況

本試験では、一例を表-4に示すようにSTEP-①～STEP-⑰の順序で試験体を回転させて、ばね水平力により試験体に連続変動载荷を行っている。なお、スタッドのせん断応力範囲が 70N/mm^2 となるばね定数を持つばねを装着した場合としている。ばねで与えた水平力によって発生する試験体の円形鋼板下面の応力を、3次元弾性FEM解析と比較するために、図-5に示すように円形鋼板下面にスタッド中心より十字方向にひずみゲージを貼付し、表-4の回転角度順にひずみを計測を行った。スタッド中心より回転角度が 0° および 180° の方向に配置したひずみゲージをCH-2からCH-7とし、それに直交する方向のひずみゲージをCH-8からCH-13とする。

4. 3次元弾性FEM解析

(1) FEM解析モデルの概要

3次元弾性FEM解析の基本となるモデルは、図-6に示すとおりである。コンクリート、スタッド、スタッド溶接部、円形鋼板、円筒型枠、天板はソリッド要素としている。なお、円形鋼板、スタッド、円筒型枠、天板とコンクリートとの界面および円筒型枠と円形鋼板との界面については、両者のせん断力による付着を無視し、部材に垂直および水平な方向についての接触・非接触条件を考慮しているが、摩擦力に対する抵抗は無視している。また、円形鋼板と回転テーブルおよび円筒型枠と天板の界面については、ボルト結合としている。

試験体の支点条件は、円形鋼板と回転テーブルのボルト結合部が支点となり、円形鋼板と回転テーブルの隙間は、試験条件と同様に 3mm 程度確保している。理由は、円形鋼板下面にひずみゲージを貼付するスペースを確保することと、荷重载荷時の円形鋼板の面外変形を回転テーブルにより拘束しないためである。

さらに、コンクリート版厚および円形鋼板、円筒型枠、天板の板厚などの形状寸法については、表-2に示す試験体の構造諸元を採用した。また、コンクリートの材料定数は、ヤング率を $E=2.86 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比を $\nu=0.195$ とした。一方、鋼材の材料定数については、ヤング率を $E=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比を $\nu=0.3$ とした。また、本研究では合成床版内に配置される横リブの有無による効果および従来型スタッドと改良型スタッドの溶接部の違いを比較するために、図-7に示す横リブなしおよび横リブありの2種類のモデルに対し、表-1の余盛り寸法を考慮している。横リブありモデルの場合では、円筒型枠と横リブとの隙間にはダミー材を配置し、ヤング率を $E=0\text{N/mm}^2$ とすることで、試験体に作用する横リブ設置方向の水平荷重が、円筒型枠内に充填されたコンクリ

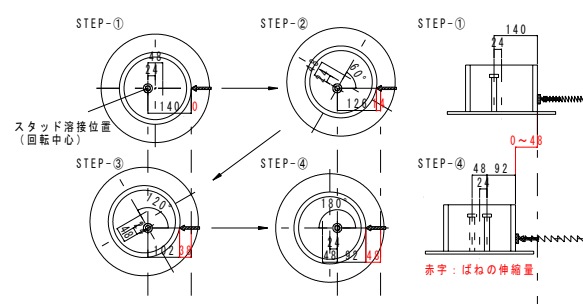


図-4 回転せん断力の荷重载荷ステップ

表-4 回転角度に対するばね水平力

STEP No.	回転角度 (度)	ばねの縮み量 δ (mm)	ばねの変位量 δ' (mm)	ばね定数(4本) K (N/mm)	ばね水平力 P (kN)
STEP-①	0	48	0	294	14.11
STEP-②	30	44	4	294	12.94
STEP-③	45	40	8	294	11.76
STEP-④	60	34	14	294	10.00
STEP-⑤	90	21	27	294	6.17
STEP-⑥	120	10	38	294	2.94
STEP-⑦	135	6	42	294	1.76
STEP-⑧	150	3	45	294	0.88
STEP-⑨	180	0	48	294	0.00
STEP-⑩	210	3	45	294	0.88
STEP-⑪	225	6	42	294	1.76
STEP-⑫	240	10	38	294	2.94
STEP-⑬	270	21	27	294	6.17
STEP-⑭	300	34	14	294	10.00
STEP-⑮	315	40	8	294	11.76
STEP-⑯	330	44	4	294	12.94
STEP-⑰	360	48	0	294	14.11

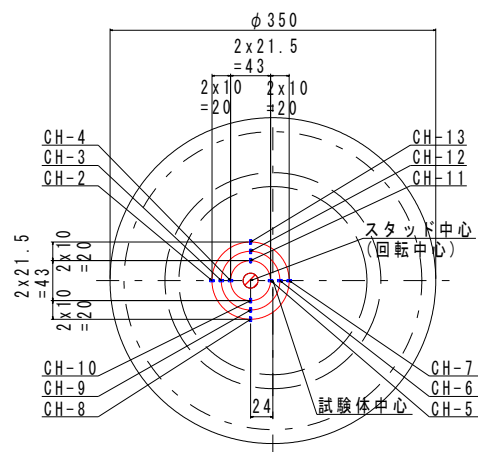


図-5 円形鋼板下面に配置したひずみゲージ

ートを介して、直接、横リブに伝達させないようにしている。これは、試験体に与える最大の回転せん断力について、横リブなしモデルとの差異をなくすためである。

(2) FEM解析値と計測値の比較

横リブの有無による解析値と計測値の比較を行った。浮き上がり防止装置により押さえ力を与えた状態で、各回転角度でのばね水平力による円形鋼板下面のひずみを計測する場合、コンクリートと円筒型枠およびコンクリ

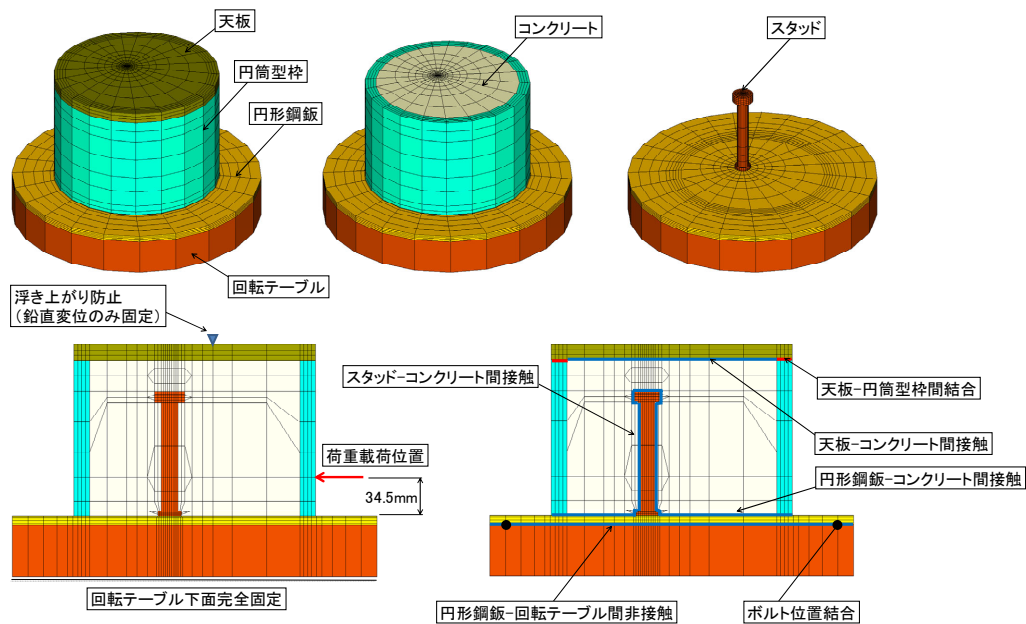


図-6 回転せん断疲労試験FEM解析モデル

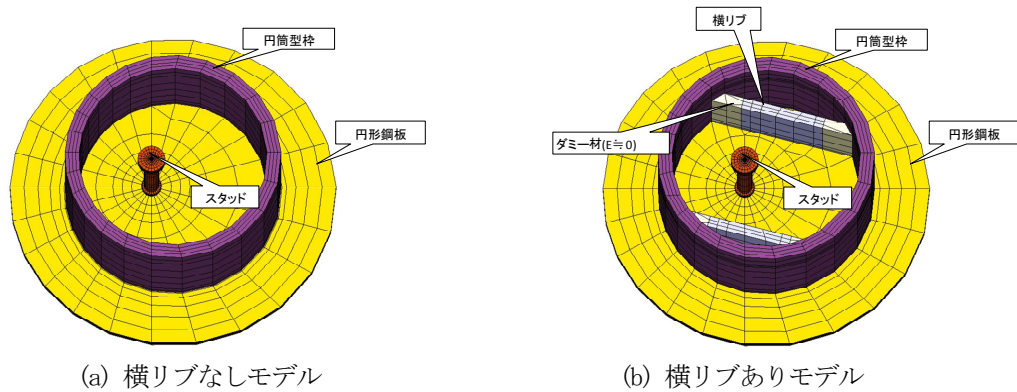


図-7 横リブなしおよび横リブありのFEM解析モデルの比較

ートと円形鋼板の接触条件が複雑に変化するため、解析条件を試験状態に一致させて比較することができなかった。そこで、ばね水平力が0kNとなる回転角度（180度）を基準に、各回転角度間の応力変動について解析値と計測値を比較することにした。なお、計測値は改良型スタッドの試験体で計測したものである。

横リブなしの場合におけるCH-3およびCH-6の応力変動を図-8 および図-9 に示す。CH-3およびCH-6は、回転中心（スタッド中心）よりそれぞれ31.5mm離れた対称位置にある。CH-3の計測値は、回転角度が45度付近において円形鋼板下面の応力が引張領域から圧縮領域に変化しているが、解析値では90度付近において引張領域から圧縮領域に変化している。一方、CH-6の計測値は、回転角度が15度から140度付近の範囲において円形鋼板下面の応力が圧縮領域であったが、解析値では50度から120度付近の範囲において圧縮領域であった。解析値と計測値の誤差は、試験開始時の円形鋼板上面とコンクリートの界面には付着があるが、解析条件では付着を考慮していないためと考えられる。

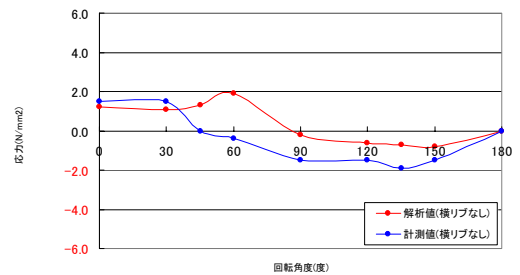


図-8 横リブなしの解析値と計測値の比較(CH-3)

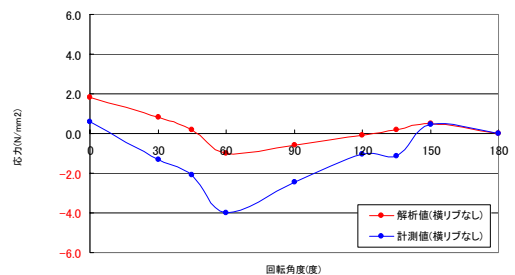


図-9 横リブなしの解析値と計測値の比較(CH-6)

次に、横リブありの場合におけるCH-3およびCH-6の応力変動を図-10 および図-11 に示す。CH-3の計測値は回転角度が135度から180度付近の範囲において僅かに圧縮領域であり、60度付近において引張領域の応力変動の最大を示す。解析値では90度から180度付近の範囲において圧縮領域であり、0度から60度付近の範囲での引張領域における応力変動が一定した状態を示す。一方、CH-6の計測値は回転角度が90度および150度付近において圧縮領域および引張領域の応力変動の最大を示す。解析値では回転角度が30度、60度付近において引張領域および圧縮領域の応力変動の最大を示す。応力変動が 2.0N/mm^2 以下の非常に小さい範囲であるが、解析値と計測値の誤差は、前述の円形鋼板とコンクリートとの付着による影響と考えられる。

なお、横リブの有無による解析値あるいは計測値の比較をすると、横リブありの応力変動の推移は、横リブなしの半分程度となっている。このような状況は、横リブありの試験体ではスタッドの疲労破壊が全く起こらなかったことと相関が高い。ただし、試験体でのスタッドと横リブの配置関係は実床版での配置と大きく異なっているので、実験結果から定量的に実橋での寿命の伸びまでは説明できない。

(3) FEM解析による従来型スタッドと改良型スタッドの比較

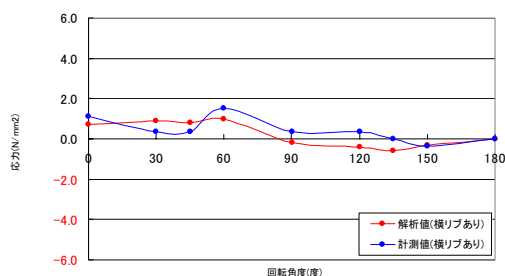


図-10 横リブありの解析値と計測値の比較(CH-3)

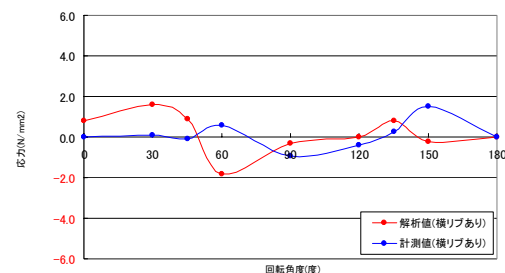
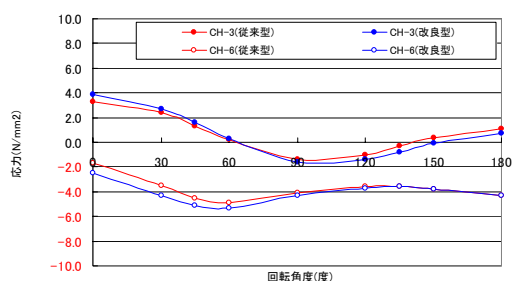
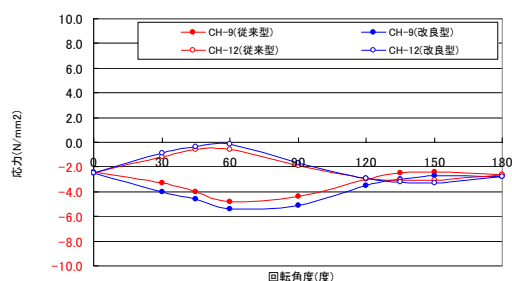


図-11 横リブありの解析値と計測値の比較(CH-6)

横リブの有無による従来型スタッドと改良型スタッドのスタッド周辺における円形鋼板下面の応力について比較を行った。なお、前述のように応力変動の比較ではなく、FEM解析によって得られた値をそのまま使用している。

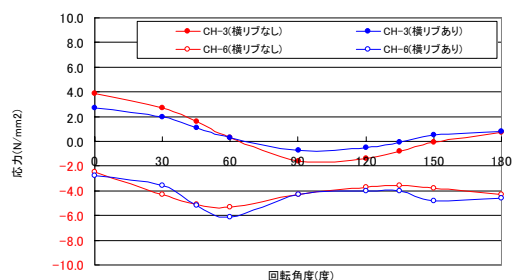


(a) CH-3およびCH-6

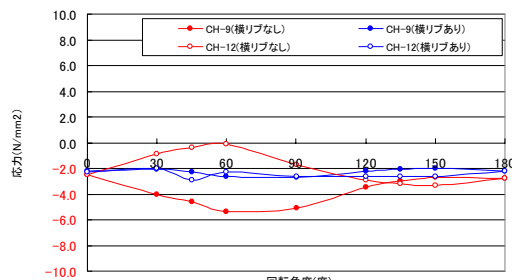


(b) CH-9およびCH-12

図-12 横リブなしの場合の解析値の比較



(a) CH-3およびCH-6



(b) CH-9およびCH-12

図-13 横リブありの場合の解析値の比較

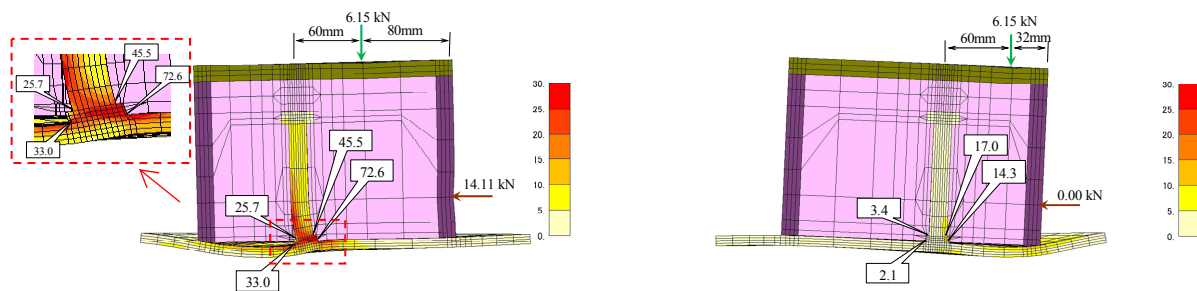
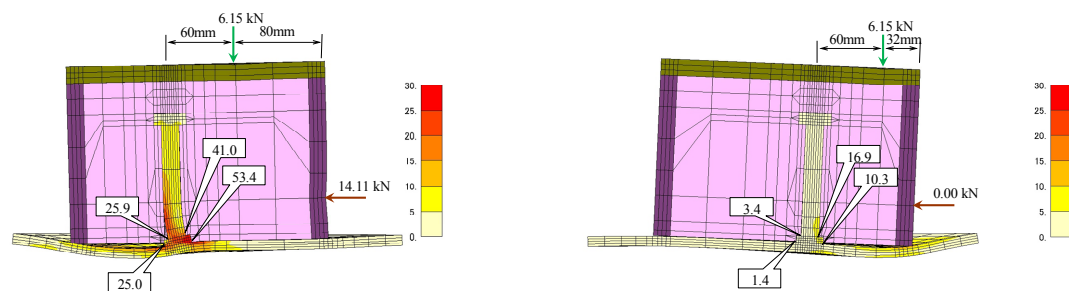


図-14 従来型スタッドのスタッド溶接の応力分布



(a) 回転角度=0度

(b) 回転角度=180度

図-15 改良型スタッドのスタッド溶接の応力分布

a) 横リブなしの従来型および改良型スタッドの比較

従来型スタッドと改良型スタッドの横リブなしの場合における各回転角度での円形鋼板下面の応力分布の比較を図-12に示す。CH-3は回転角度が60度および150度付近において、圧縮領域と引張領域が交番しており、CH-6は全角度範囲において圧縮領域を示し、従来型および改良型スタッドの引張応力および圧縮応力は同程度である。CH-3およびCH-6ともに円形鋼板下面の応力振幅は、CH-3の場合で回転角度が0度から90度の範囲、CH-6の場合で0度から60度の範囲において最大を示し、従来型スタッドに対して改良型スタッドの応力振幅は約20%程度上昇していた。これは、スタッド溶接部の余盛り形状が改良型スタッドの方が大きいこと、スタッド溶接部の剛性が高いことが要因であると考えられる。ただし、CH-3の応力は交番するとともに振幅も大きい、CH-6では全角度範囲において圧縮領域で変動している。また、CH-9およびCH-12も全角度範囲において圧縮領域で変動している。

b) 改良型スタッドの横リブ有無の比較

改良型スタッドの横リブ有無における各回転角度での円形鋼板下面の応力分布の比較を図-13に示す。CH-3は横リブ有無に関わらず、回転角度が60度および150度付近において、引張領域から圧縮領域に変化しており、横リブありの応力振幅は横リブなしの60%程度に減少し、スタッドが疲労破壊しなかったことと符合する。CH-9およびCH-12は全角度範囲において圧縮領域で変動している。

(4) スタッド溶接部に発生する最大せん断力と最小せん断力作用時の主応力

従来型スタッドおよび改良型スタッドの回転角度が0度および180度におけるスタッド溶接部の応力分布図を図-14および図-15に示す。スタッド溶接部の疲労破断する箇所は、スタッド溶接部の上端側にあり、その位置でのスタッド溶接部の主応力の応力振幅を確認した。従来型スタッドの場合、45.5N/mm²から3.4N/mm²に変化し、42.1N/mm²の応力振幅であった。一方、改良型スタッドの場合、41.0N/mm²から3.4N/mm²に変化し、37.6N/mm²の応力振幅であり、従来型スタッドに比べ、改良型スタッドは約10%程度の応力振幅が低減されている。これより、従来型スタッドと改良型スタッドの回転せん断力によるスタッド溶接部の破壊寿命の伸びを概算すると約2.5倍（図-2のS-N曲線より、傾き=8.5）となり、図-2の説明で述べた実験での寿命の伸びと符合する。

5. まとめ

本研究において、得られた結果は以下の通りである。

- (1) 解析値と計測値について、横リブなしの場合は、円形鋼板とコンクリートとの接触条件の整合性の確認は必要であるが、応力変動の傾向は概ね一致している。また、横リブありの場合は、横リブによる円形鋼板の変形に対する拘束効果が高く、応力振幅は小さくなった。

- (2) FEM解析による従来型および改良型スタッドの比較では、改良型スタッドの応力振幅は、CH-3およびCH-6での応力振幅は20%程度上昇していたが、スタッド溶接部の余盛り形状が改良型スタッドの方が大きいため、スタッド溶接部の剛性が高いことが要因であると考えられる。
- (3) FEM解析による横リブ有無の比較では、横リブありの応力振幅は、CH-3では60%程度に減少しており、横リブありの場合にはスタッドの疲労破断は全く発生しなかったことを裏付けることとなった。
- (3) スタッド溶接部のスタッド幹側溶接止端部での発生応力については、従来型スタッドに比べて改良型スタッドの応力振幅が約10%程度低減されており、実験によるスタッド溶接部の疲労寿命の伸びがほぼ説明できる。スタッド溶接余盛りの寸法の増大が疲労寿命の向上に寄与していると考えられる。

参考文献

- 1) 松井繁之, 岡本安弘, 前田幸雄, 渡辺 滉: 鋼・コンクリート合成床版におけるスタッドの設計に関する基礎的研究, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.1, pp.99-105, 1986.
- 2) 松井繁之, 佐々木洋, 福本秀士, 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, pp.409-420, 1988.
- 3) 文 兌景: 鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性と疲労設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1992.
- 4) 松井繁之, 文 兌景, 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, pp.1303-1311, 1993.
- 5) 街道浩, 松井繁之: 鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のスタッドの疲労強度評価, 土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.765-777, 2008.
- 6) 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.
- 7) 平城弘一, 松井繁之: 頭付きスタッドの疲労強度に及ぼすスタッド余盛り形状の影響, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.501-512, 1988.
- 8) 吉田賢二, 稲本晃士, 松井繁之, 東山浩士, 街道 浩: 鋼・コンクリート合成床版に適用する高耐久性スタッドの開発, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.908-916, 2012.
- 9) 吉田賢二, 東山浩士, 稲本晃士, 松井繁之, 街道 浩: 回転せん断力を受ける高耐久頭付きスタッドのS-N 曲線, 材料 Vol.62, No.10, pp.612-626, 2013.

IMPROVEMENT OF FATIGUE DURABILITY OF STUD IN COMPOSITE DECK SUBJECTED TO ROTATING SHEAR FORCE DUE TO RUNNING WHEEL

Kenji YOSHIDA, Hiroshi HIGASHIYAMA, Koji INAMOTO,
Shigeyuki MATSUI, and Hiroshi KAIDO

Robinson type composite deck in which concrete and base steel plate are connected by headed studs is a typical and major one among composite decks in Japan. As the fatigue durability of the composite deck mainly depends on the fatigue strength of studs, the authors have developed an improved welding ferrule for the stud. The ferrule has upper grooves to spout out shield gas at welding and has a closed skirt to store melted metal and to make the welded bead shape of the stud smooth. In this paper, rotating shear force fatigue tests were carried out to certify the effect of improved welding ferrule. Also, the effect of placing stiffening plates on the bottom steel plate with some intervals was discussed in relating to extension of fatigue life of the studs. Consequently, the authors have confirmed its superior durability over the conventional studs through FEM analysis.