

## 論文・報告

# 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と実橋への適用

Improvement of Fatigue Durability of Headed Studs in Steel-Concrete Composite Decks under Rotating Shear Force

吉田 賢二\*1  
Kenji YOSHIDA

早川 清\*2  
Kiyoshi Hayakawa

大成 隆\*3  
Takashi ONARU

中尾 祐一郎\*4  
Yuichiro NAKAO

水野 浩\*5  
Hiroshi MIZUNO

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、スタッド溶接部の疲労耐久性の向上を3次元弾性FEM解析により検証を行っている。さらに、疲労耐久性が向上したスタッドを実橋に適用した事例を紹介する。

キーワード：鋼・コンクリート合成床版、頭付きスタッド、疲労強度、改良型フェルール、FEM解析

## 1. はじめに

代表的な鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と称す）の一種である図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<sup>1)~5)</sup>。写真1は松井ら<sup>2)~4)</sup>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<sup>2), 3), 5)</sup>。松井ら<sup>4)</sup>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標準化

された<sup>6)</sup>。

著者らは、平城ら<sup>7)</sup>が考案したフェールの形状をさらに改良し、主に合成床版や主桁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<sup>8)~10)</sup>。具体的には、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、スタッド溶接部の疲労強度を向上させるために、溶接止端部の形状が滑らかに仕上がるフェールを開発している。

本論文では、改良型フェールの開発、改良型スタッドの疲労耐久性の向上、さらに、実橋に適用した事例を紹介する。

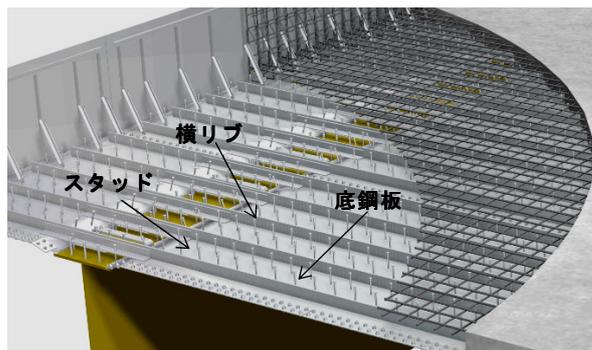


図1 ロビンソン型合成床版の概念図

\*1 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部技術部大阪技術課 係長

\*2 川田工業㈱北陸事業部富山工場 次長

\*3 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部四国工場生産技術課

\*4 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部工事部東京工事課 係長

\*5 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部技術部大阪技術課 主幹

## 2. 改良型フェルールの開発

写真2に示すように、従来型フェール（以下、従来型と称す）は、鋼板と接触するフェール下縁に放射状の切欠き溝が設けられ、スタッド溶接時に発生する高温ガスをこの溝から噴出させる。このため、鋼板側の溶接止端の一部に鋼板との未融合の溶接バリ状のものが残る。また、この溶接形状を起因とする応力集中のために疲労強度の低下および疲労データのバラツキが大きい。このため、鋼板側の溶接止端の一部に鋼板との未融合の溶接バリ状のものが残らず、応力集中による疲労強度の低下を防ぐために、高温ガスがフェールの上側へ抜けるように改良型フェール（以下、改良型と称す）を開発した。ここで、フェール上縁にある4箇所突起は、スタッド軸部とフェールの中心を合わせるためのガイドとなり、高温ガスの噴出箇所のスペースを確保するものである。スタッド溶接部の外観を観察すると、溶接止端部は滑らかに仕上がっており、マクロ断面を比較しても鋼板への溶け込み量が多く、応力集中緩和のために余盛りに傾斜がついたものとなっていることがわかる。

また、フェール内側下縁に写真2に示すような小さな段差を設け、鋼板側溶接形状もスムーズになるようにした。マクロ断面の写真でこの改良がなされていることが認められる。従来型および改良型のスタッド溶接部の余盛りの外径および高さを比較するため、各々30体を製作した計測結果の平均値を表1に示す。計測結果のバラツキは従来型および改良型とも同程度であり、余盛りの外径および高さ寸法を比較すると、外径で13%程度、高さで14%程度の寸法アップとなった。

## 3. 回転せん断疲労試験

スタッド溶接部の疲労耐久性の向上を確認するため、回転せん断力を受けるスタッドの疲労試験を実施した。

### (1) 試験体概要

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 $\phi 16\text{mm}$ 、高さ120mm（材質SS400相当）である。スタッドを直径 $\phi 350\text{mm}$ 、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、荷重荷重部の载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。

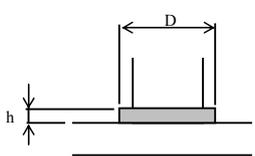
コンクリートの配合を表3に示す。コンクリートの呼



写真1 スタッド破断状況

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 |



|       | 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

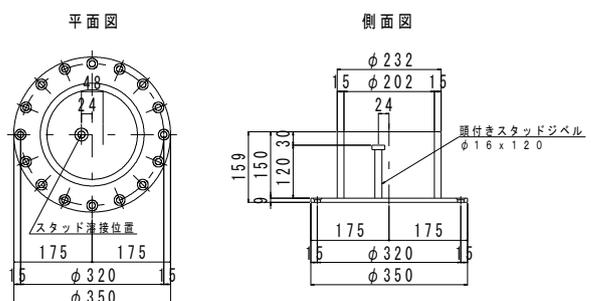


図3 回転せん断疲労試験体図

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 <sup>2</sup> | 27      |
| 円形鋼板   | 直径   | mm                | 350     |
|        | 板厚   | mm                | 9       |
| スタッド   | 寸法   | mm                | φ16×120 |
| 円筒型枠   | 直径   | mm                | 232     |
|        | 高さ   | mm                | 150     |
|        | 板厚   | mm                | 15      |

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  $30\text{N/mm}^2$  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。

(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 48 mm 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。

(3) 試験結果

本試験による従来型と改良型を比較した S-N 曲線を図 5 に示す。データのバラツキは多少あるものの、概ね S-N 曲線上にプロットされている。応力振幅範囲 70, 81 N/mm<sup>2</sup> では従来型と比較し改良型の疲労寿命は、3 倍程度向上している。しかし、応力振幅範囲 92N/mm<sup>2</sup> から

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 <sup>2</sup> | 8cm  | 20mm     | 53.6%  | 44.3% |

(b) 配合表

| 単位量 kg/m <sup>3</sup> |     |      |      |      |      |       |
|-----------------------|-----|------|------|------|------|-------|
| 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 |

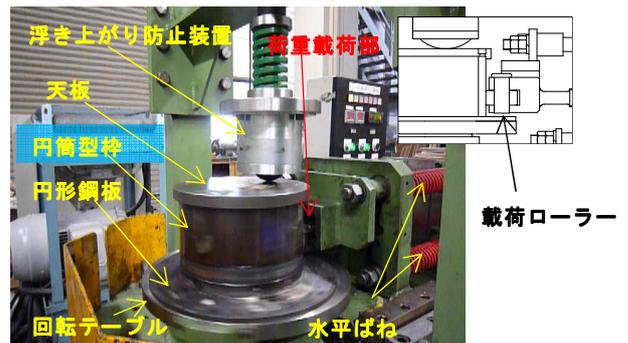


写真 4 回転せん断疲労試験機状況

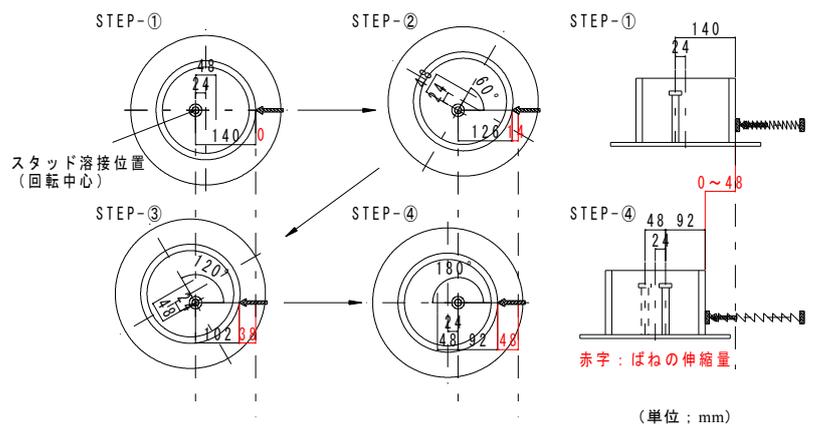


図 4 回転せん断力の荷重載荷図

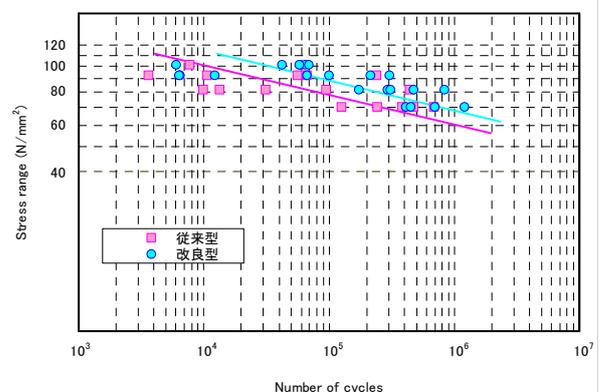


図 5 回転せん断疲労試験結果

101N/mm<sup>2</sup> では、改良型の実験データの一部に、従来型程度の低い疲労寿命のものが生じた。この要因としては、載荷荷重が非常に大きいため、円筒型枠内にあるスタッ

ド溶接部近傍のコンクリートが圧壊し、スタッド溶接部には回転せん断力だけでなく、曲げ引張力も作用したためと考えられる。

本試験におけるスタッド溶接部の破断状況を写真5に示す。破壊状況は、スタッド軸部側の溶接余盛りより疲労き裂が進展していたことを確認していることから、スタッド溶接部の応力集中が溶接部の上端側にあると考えられる。

#### 4. FEM 解析による検証

##### (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、荷重載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。

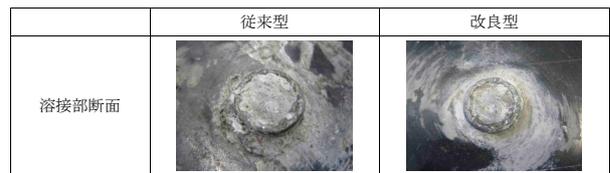


写真5 スタッド溶接部の破断状況

さらに、コンクリート版厚および円形鋼板、円筒型枠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。

##### (2) 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溶接部に発生する最大せん断力が作用する回転角度が0度および最小せん断力が作用する180度における応力分図を図7および図8に示す。スタッド溶接部の疲労破断する箇所は、応力集中が大きい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、 $45.5 \text{ N/mm}^2$  から  $3.4 \text{ N/mm}^2$  に変化し、 $42.1 \text{ N/mm}^2$  の応力振幅であった。一方、改良型スタッドの場合、 $41.0 \text{ N/mm}^2$  から  $3.4 \text{ N/mm}^2$  に変化し、 $37.6 \text{ N/mm}^2$  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

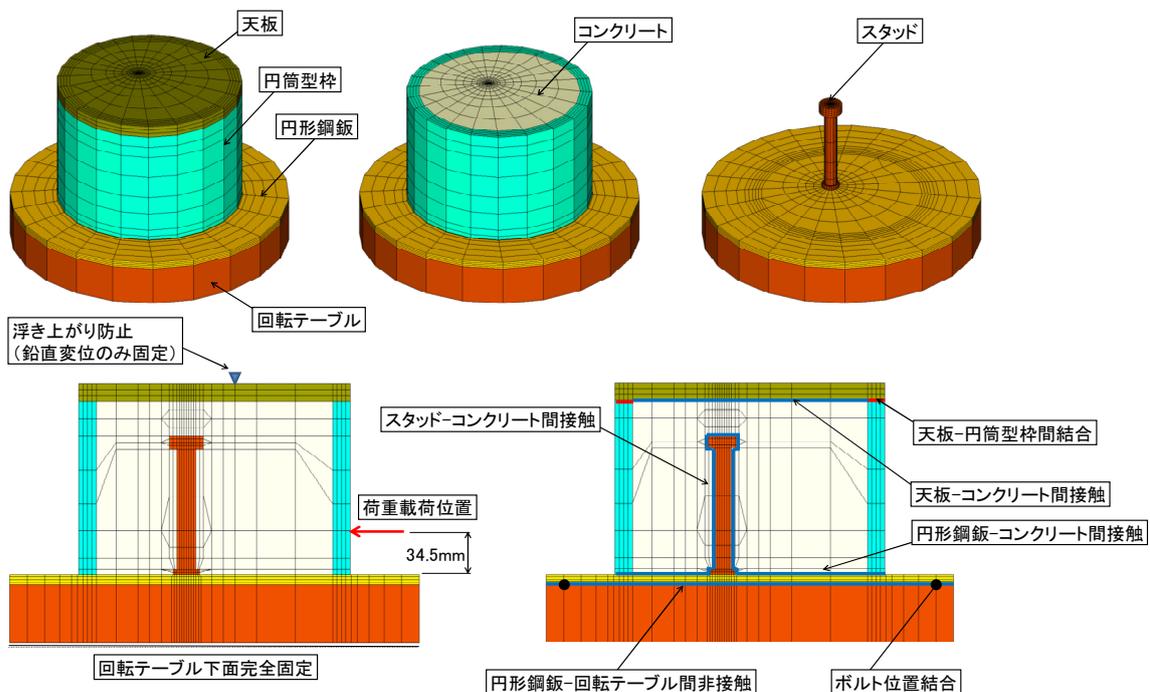


図6 回転せん断疲労試験 FEM解析モデル

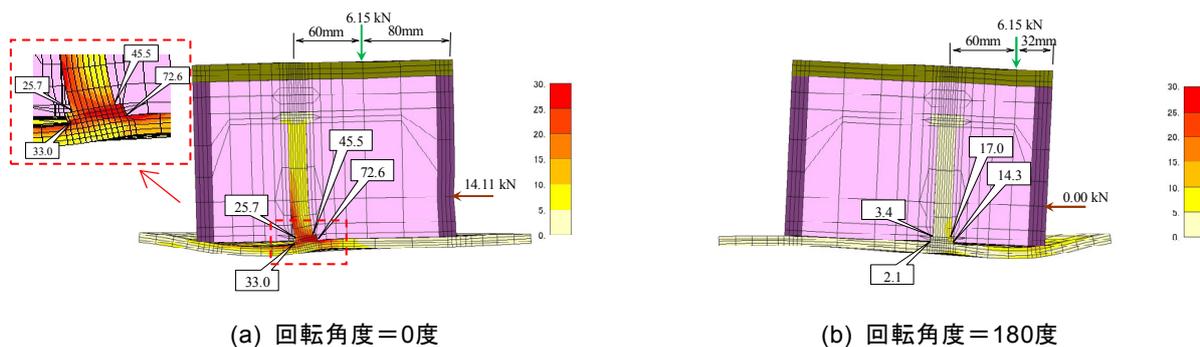


図7 従来型スタッドのスタッド溶接の応力分布

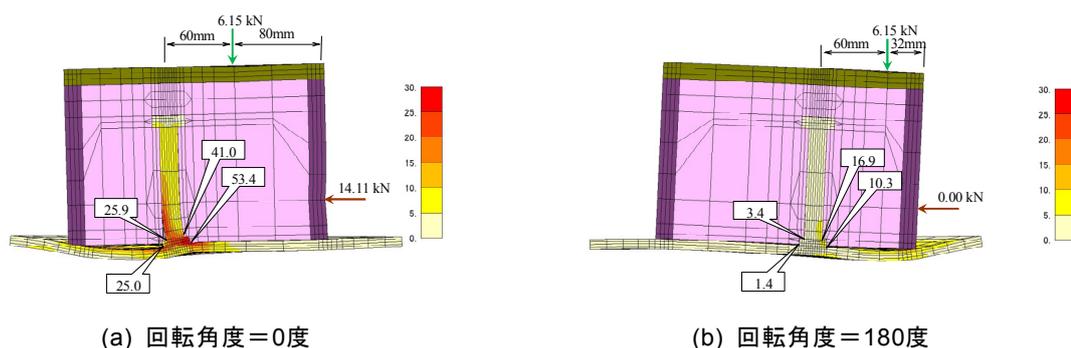


図8 改良型スタッドのスタッド溶接の応力分布

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 倍程度 (図 5 の S-N 曲線より, 傾き = 8.5) となり, 3 章で述べた実験結果の疲労寿命の伸びと概ね符合する。

以上の試験結果および FEM 解析による検証により, 改良型スタッドの疲労耐久性の向上を確認できた。

### 5. 実橋への適用

国土交通省 北首都国道事務所殿発注の圏央道幸手地区高架橋上部その 3 工事において, 改良型スタッドを適用した。施工状況を写真 6, 7 に示す。走行車両の衝撃を受ける主桁端部は損傷しやすい箇所であり, この箇所で使用されるスタッドは, 床版を主桁に固定する重要な部材であることから, 改良型スタッドを適用することで疲労耐久性の向上に配慮している。

今後は, 大量生産によるコストダウンを検討し, 合成床版への適用に向けて研究を継続する。

### 6. 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) 改良型を用いたスタッド溶接による溶接止端部は, 従来型にあった溶接バリが無くなり, 非常に滑らかな止端仕上げとなっている。
- 2) 回転せん断疲労試験の結果により, 改良型は従来型に比べて疲労寿命が約 3 倍程度に向上していることを確認できた。



写真 6 主桁上フランジのスタッド配置状況



写真 7 スタッド溶接部の外観

3) 3次元弾性 FEM 解析により、スタッド溶接部の応力集中を確認し、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おり、スタッド溶接部の破壊寿命が概算で約 2.5 倍程度となり、試験結果と符合する。

10) 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スタッドの疲労耐久性の向上に関する研究, 第10回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.38-1-38-8, 2013.

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、松井繁之名誉教授（大阪大学）、東山浩士准教授（近畿大学）、稲本晃司氏（日本スタッドウェルディング）との共同研究として行っており、試験の計画から実施、試験結果の取り纏めにあたり、多大なるご助力を得たことをここに記し、感謝を表す次第である。さらに、圏央道幸手地区高架橋上部その 3 工事に改良型スタッドを適用するにあたり、国土交通省北首都国道事務所の皆様方ならびに多数の関係各位に、多大なご協力を賜り厚く御礼申し上げます。

#### 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, 福本昉士, 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, 福本昉士 : 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.