

## 軽量コンクリート2種を使用した床版に用いる頭付きスタッドの疲労強度特性

(株) IHIインフラ建設 正会員 ○小林 崇  
 日本スタッドウェルディング(株) 馬場 敏  
 大阪工業大学大学院 石原 涼澄  
 大阪工業大学 正会員 博(工) 大山 理

### 1. はじめに

わが国では橋梁のストック数が膨大になり、供用期間が50年に達する橋梁数も増加している。これらの橋梁では老朽化が進んでおり、各道路管理機関ではRC床版の劣化に対して床版取替えなど大規模更新・修繕が計画、実施されている。床版取替えでは、工事期間の短縮などからプレキャスト床版が多く用いられるが、現行の活荷重への対応や幅員拡張などの機能向上による死荷重の増加、これによる既設の鋼主桁や下部工の負担応力の増加を抑制するため、新たに架設される床版には軽量化が求められる。これに対して筆者らは、粗骨材および細骨材に軽量骨材を使用する軽量コンクリート2種（以下、軽量2種）を用いたプレキャストPC床版（以下、軽量2種床版）を開発し<sup>1)</sup>、床版自重の軽減を図っている。

プレキャストPC床版を用いた床版取替えでは、床版と鋼桁の接合には頭付きスタッド（以下、スタッド）が多く用いられているが、工場製作時に橋軸直角方向プレストレスの導入に用いるプレテンションPC鋼材とスタッド用孔の干渉が問題となる場合がある。特に、合成桁ではスタッドの配置本数が多いため、道路橋示方書<sup>2)</sup>で標準とされるJIS B1198に規定される材質SS400相当のスタッドに対して高強度なSM570相当のスタッド（以下、高強度スタッド）の使用により本数を削減する場合がある。これに対して筆者らは、同等の圧縮強度を有する普通コンクリート（以下、普通コン）に比べて静弾性係数や引張強度、せん断強度の小さい軽量2種を用いたプレキャスト床版に用いた場合の高強度スタッドの性能、その適用性を静的押抜き載荷試験により確認している<sup>3)</sup>。

本稿は、軽量2種床版と鋼桁の接合に用いる高強度スタッドの疲労強度特性の確認を目的として行った繰返し押抜き載荷試験について報告するものである。

### 2. 試験体の種類と形状

プレキャストPC床版への適用にあたり軽量2種に求めた性能は、設計基準強度 $50\text{N/mm}^2$ （一般的なプレキャストPC床版に用いられる普通コンと同等）、単位重量 $16.5\text{kN/m}^3$ 以下（普通コン $23.0\text{kN/m}^3$ を30%程度軽減）であり、このときの静弾性係数は、同等の圧縮強度を有する普通コンの60%程度、引張強度が65%程度、せん断強度が85%程度となることを確認している<sup>4)</sup>。本試験は、床版コンクリートに軽量2種およびこれと同等の圧縮強度を有する普通コンを用いた試験体の比較により、コンクリートの種類が高強度スタッドの疲労特性に及ぼす影響を確認するものとした。試験体の形状は「頭付スタッドの押抜き試験方法（案）」（日本鋼構造協会）<sup>5)</sup>に準拠し、H形鋼とその両側に床版を模したコンクリートブロックを、版下モルタル厚を30mmとしてH形鋼の片側に各2本配置

表－1 試験体種類

| シリーズ | 試験<br>種類 | 載荷<br>方法  | 供試体名  | コンクリート<br>種類 | 範囲※ <sup>1</sup> |                                          |
|------|----------|-----------|-------|--------------|------------------|------------------------------------------|
|      |          |           |       |              | 荷重<br>(kN)       | 応力※ <sup>2</sup><br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
| SN   | 静的<br>試験 | 漸増<br>載荷  | SN-1  | 普通コン         | —                | —                                        |
|      |          |           | SN-2  |              |                  |                                          |
|      |          |           | SN-3  |              |                  |                                          |
| SL   |          |           | SL-1  | 軽量 2 種       | —                | —                                        |
|      |          |           | SL-2  |              |                  |                                          |
|      |          |           | SL-3  |              |                  |                                          |
| FN   | 疲労<br>試験 | 繰返し<br>載荷 | FN260 | 普通コン         | 260              | 171                                      |
|      |          |           | FN240 |              | 240              | 158                                      |
|      |          |           | FN220 |              | 220              | 145                                      |
|      |          |           | FN200 |              | 200              | 132                                      |
|      |          |           | FN170 |              | 170              | 112                                      |
| FL   |          |           | FL360 | 軽量 2 種       | 360              | 237                                      |
|      |          |           | FL290 |              | 290              | 191                                      |
|      |          |           | FL260 |              | 260              | 171                                      |
|      |          |           | FL220 |              | 220              | 145                                      |
|      |          |           | FL160 |              | 160              | 105                                      |

※1 SN,SL シリーズの結果を元に設定

※2 スタッドに作用するせん断応力

した軸径22mm、高さ150mmの高強度スタッドを介して一体化して形成した。プレキャストPC床版架設時にスタッド用孔には、一般的に膨張コンクリートまたは無収縮モルタルが充填される。本試験では日々取替えなどの急速施工を想定し、版下、スタッド用孔とも充填材として超速硬型の無収縮モルタルを使用するものとし、実施工と同様となるよう切断したH型鋼上にコンクリートブロックを配置し、版下モルタルとスタッド用孔に一括で流し込んだ。試験体の種類を表-1に、試験体の形状を図-1に、使用した高強度スタッドの力学特性を表-2に、コンクリートおよびモルタルの材料試験結果を表-3にそれぞれ示す。繰返し載荷試験（FN, FLシリーズ）は、普通コンおよび軽量2種各5体の試験体に対して異なる振幅で行うものとし、その振幅は3体の静的載荷試験（SN, SLシリーズ）の結果をもとに設定した。

3. 試験結果

3. 1 静的押抜き載荷試験

繰返し押抜き載荷試験の実施に先立ち、静的押抜き載荷試験（SN, SLシリーズ）によりスタッドの静的強度を確認した。試験は、試験体のH形鋼に載荷することにより行うものとし、H形鋼とコンクリートブロックの相対ずれが4mmとなるまでは想定される最大荷重の1/20程度となる40kNごと荷重を増加させながら載荷と除荷を繰り返す漸増載荷を、相対ずれが4mmを超えて以降は破壊に至るまで単調載荷を行った。

載荷試験の結果を表-4に、高強度スタッドを用いた試験体の作用せん断力と相対ずれの関係を図-2に示す。

3. 2 繰返し押抜き載荷試験

繰返し押抜き試験は、静的押抜き載荷試験と同様に試験体のH形鋼に載荷するものとし、サーボジャッキにより2～4Hzの速度で載荷を行った。載荷荷重をスタッドの断面積で除して求めるせん断応力の範囲をFN, FLそれぞれ5段階とし、静的押抜き載荷試験の結果をもとに、複合構造標準示方書<sup>6)</sup>に示されるスタッドの設計疲労せん断耐力式の傾きを参考に、最大せん断耐力に対する割合や同じ応力範囲でのFN, FLの比較、繰返し回数の多いデータの取得ができるよう先に実施した繰返し押抜き試験の結果を見ながらその都度設定した。最終的な応力範囲は、FNシリーズが112, 132, 145, 158, 171N/mm<sup>2</sup>、FLシリーズが105, 145, 171, 191, 237N/mm<sup>2</sup>である。なお、載荷荷重は、除荷時のバタつきを抑えるため下限値を50kNとしており、上限値は表-1に示す荷重振幅に50kNを加えた値である。また、繰返し載荷は1本目のスタッド

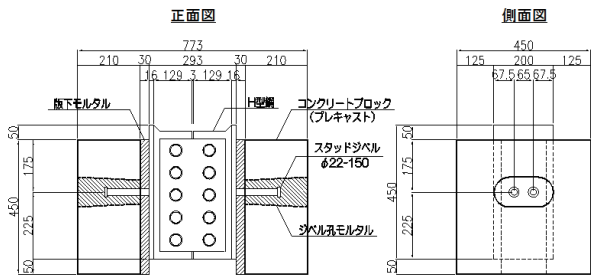


図-1 試験体概要（単位：mm）

表-2 高強度スタッドの力学特性

| 材質       | 軸径 (mm) | 降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 伸び (%) |
|----------|---------|---------------------------|---------------------------|--------|
| SM570 相当 | 22      | 563                       | 636                       | 19     |

表-3 材料試験結果

| 試験体種類    |      | 単位重量 (g/cm <sup>3</sup> ) | 強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |      | 静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) |
|----------|------|---------------------------|-------------------------|------|-----------------------------|
|          |      |                           | 圧縮                      | 引張   |                             |
| SN<br>FN | 普通コン | 2.38                      | 61.0                    | 3.14 | 40.3                        |
|          | モルタル | 2.17                      | 64.1                    | 5.90 | 26.5                        |
| SL<br>FL | 軽量2種 | 1.62                      | 62.1                    | 2.28 | 20.4                        |
|          | モルタル | 2.15                      | 67.8                    | 5.37 | 25.3                        |

表-4 試験結果（3体の平均値）

| 試験体種類 | 最大荷重 (kN) | 最大せん断耐力 (kN/本) | 最大ずれ量 (mm) | ずれ定数 (kN/mm) | 降伏せん断耐力 (kN/本) |
|-------|-----------|----------------|------------|--------------|----------------|
| SN    | 759.0     | 189.8          | 6.9        | 321.6        | 113.9          |
| SL    | 726.8     | 181.7          | 4.7        | 374.7        | 108.4          |

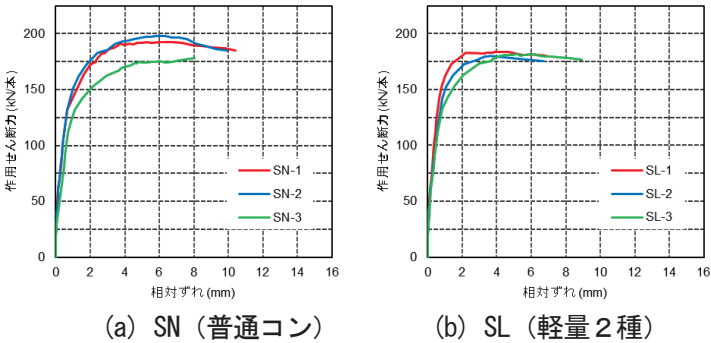


図-2 作用せん断力と相対ずれの関係



図－３ 試験体概要

が破断するまで行うものとしたが、载荷回数1000万回を超えてもスタッドの破断に至らない場合は、疲労試験を終了し、静的载荷により残存耐力を確認するものとした。繰返し载荷試験の状況を図－３に示す。

表－５に各試験体の破壊時の繰返し载荷回数と破壊形態を示す。FN240は床版コンクリート、FL360は版下モルタルの破壊により、FL160は1000万回の繰返し载荷で破壊に至らず試験を終了したが、これ以外の試験体はスタッドの破断により試験を終了した。なお、繰返し载荷後のFN160は静的载荷により389.9kNで片側のスタッドが破断、片側が床版コンクリートで破壊した。

図－４に応力範囲と繰返し载荷回数の関係を示す。ここで、軽量2種を用いたFLシリーズにおいて破壊に至らなかったFL160の結果は除外している。軽量2種を用いたFLシリーズの近似曲線の傾きは、普通コンを用いたFNシリーズに対して若干小さい値となったが、試験方法自体のバラつき、試験体数を考慮すると応力範囲と繰返し载荷回数の関係は概ね同等であり、静的な強度特性と同様にプレキャスト床版に用いるコンクリートの種類が高強度スタッドの疲労強度特性に与える影響はなかったものと判断できる。

図－５にスタッドの静的強度に対する応力範囲と繰返し载荷回数の関係を示す。ここでは、松井らが提案した<sup>7)</sup>、引張強度406～620N/mm<sup>2</sup>のスタッドを用いた場所打ち床版に対して行われた2面せん断による既往の実験結果をもとに重回帰分析を行って求められたスタッドの疲労強度評価式(1)を示している。

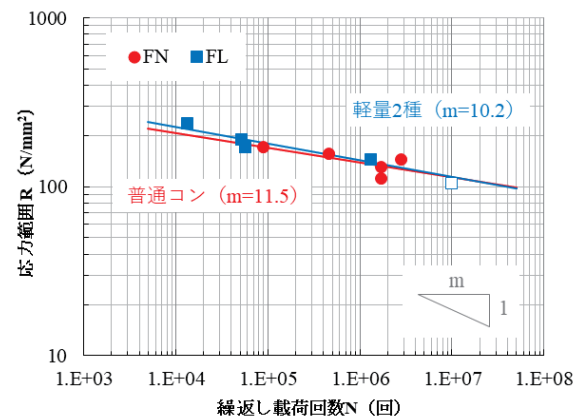
$$\text{疲労強度評価式 } R/Q_u = 1.28 N^{-0.105} \quad (1)$$

ここに、 $R$ ：応力範囲 (N/mm<sup>2</sup>)， $Q_u$ ：スタッドの静的強度の試験値 (N/mm<sup>2</sup>)， $N$ ：繰返し载荷回数(回)

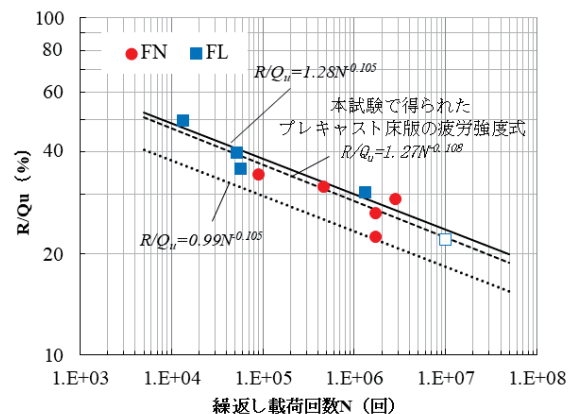
本試験で得られたプレキャスト床版の疲労強度は、式(1)と概ね一致しており、床版の形式によるスタッドの静的強度に対する応力範囲と繰返し载荷回数の関係への影響は確認されなかった。

表－５ 試験結果

| シリーズ | 試験体種類 | 振幅         |                            | 繰返し<br>载荷回数<br>(千回) | 破壊形態     |
|------|-------|------------|----------------------------|---------------------|----------|
|      |       | 荷重<br>(kN) | 応力<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |                     |          |
| FN   | FN260 | 260        | 171                        | 89.7                | スタッド破断   |
|      | FN240 | 240        | 158                        | 462.6               | コンクリート破損 |
|      | FN220 | 220        | 145                        | 2,808.8             | スタッド破断   |
|      | FN200 | 200        | 132                        | 1,700.8             | スタッド破断   |
|      | FN170 | 170        | 112                        | 1,719.3             | スタッド破断   |
| FS   | FL360 | 360        | 237                        | 13.2                | モルタル割裂   |
|      | FL290 | 290        | 191                        | 51.9                | スタッド破断   |
|      | FL260 | 260        | 171                        | 56.4                | スタッド破断   |
|      | FL220 | 220        | 145                        | 1,304.1             | スタッド破断   |
|      | FL160 | 160        | 105                        | 10,000.0            | (未破壊)    |



図－４ 応力範囲と繰返し载荷回数の関係



図－５ スタッドの静的強度に対する応力範囲と繰返し载荷回数の関係

図－5では、松井らが提案する平均値から標準偏差の2倍を安全側にシフトさせた設計のためのスタッドの疲労強度式(2)を合わせて示している。本式は、複合構造標準示方書に示されるスタッドの設計疲労せん断耐力の算定式と同じ式であり、適用範囲はスタッドの直径が13～22mm、高さが60～150mm、引張強度が402～549N/mm<sup>2</sup>およびコンクリートの設計基準強度が20～55N/mm<sup>2</sup>である。

$$\text{設計疲労強度式 } R/Q_u = 0.99 N^{-0.105} \quad (2)$$

今回の試験の結果はすべて式(2)の上側にあり、プレキャスト床版に用いるスタッドにおいても同程度の安全率が確保できる可能性が示された。ただし、式(2)による設計疲労せん断耐力の算定では、スタッド1本の設計せん断耐力は式(3)により算出される。

$$\text{スタッドの設計せん断耐力式 } Q_u = 31A_{ss}\sqrt{(h_{ss}/d_{ss})f'_{cd}} + 10000 \quad (3)$$

ここに、 $A_{ss}$ ：スタッドの断面積(mm<sup>2</sup>)、 $h_{ss}$ ：スタッドの全高(mm)、 $d_{ss}$ ：スタッドの軸径(mm)、 $f'_{cd}$ ：コンクリートの設計圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

なお、式(3)は場所打ち床版に用いるスタッドの設計せん断耐力式であり、算出値はプレキャスト床版に用いるスタッドのせん断耐力に対して大きい値となる。プレキャスト床版に用いるスタッドの設計疲労せん断耐力の算定に式(2)を用いる場合には、スタッド1本あたりの設計せん断耐力の低下を考慮する必要がある。

#### 4. まとめ

プレキャストPC床版と鋼桁の接合に用いる高強度スタッドの疲労強度特性に床版コンクリートの種類が与える影響の確認を目的として行った繰返し押抜き載荷試験により得られた知見を以下に示す。

- ・普通コンと軽量2種を使用したプレキャスト床版の応力範囲と繰返し載荷回数の関係は同等であり、プレキャスト床版において床版コンクリートの種類は、床版と鋼桁の接合に用いる高強度スタッドの疲労強度特性に影響を及ぼさない。
- ・プレキャスト床版に用いたスタッドの静的強度に対する応力範囲と繰返し載荷回数の関係は、場所打ち床版に用いた場合と同等である。
- ・プレキャスト床版に用いるスタッドの疲労せん断耐力の算定にあたっては、スタッド1本あたりの設計せん断耐力の低下を考慮する必要がある。

#### 謝辞

本研究では、試験の実施および結果の考察にあたり大阪工業大学特任講師の今川雄亮様にご意見、ご協力頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 小林崇・中村定明・郷保英之・松井繁之：軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の疲労耐久性，プレストレストコンクリート工学会，第26回シンポジウム論文集，pp. 563-568，2017. 10.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017. 11.
- 3) 小林崇・中村定明・馬場敏・大山理：軽量コンクリート2種を使用した床版に用いる頭付きスタッドのせん断耐力，プレストレストコンクリート工学会，第27回シンポジウム論文集，pp. 395-400，2018. 11.
- 4) 小林崇・中村定明・石川寛範：低含水状態の軽量骨材を使用したコンクリートの材料特性，土木学会第72回年次学術講演会，V-617，pp. 1233-1234，2017. 9.
- 5) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状，JSSCテクニカルレポートNo. 35，1996. 11.
- 6) 土木学会：複合構造標準示方書〔原則編・設計編〕，2015. 5.
- 7) 松井繁之・平城弘一・福本秀士：頭付きスタッドの強度評価式の誘導－疲労強度評価式－，土木学会，構造工学論文集，Vol. 35A，1989. 3.