

## 高強度軽量プレキャストPC床版に高強度スタッドを適用した接合部の疲労強度特性

ピーシー橋梁(株) 正会員 工修 ○澤 大輔  
 日本スタッドウェルディング(株) 池尾良一  
 摂南大学大学院 湯室貴章  
 摂南大学 工博 平城弘一

### 1. はじめに

現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>では、ずれ止めとして JIS B 1198 に規定された材質 SS400 の頭付きスタッドジベル (以下、スタッド) が一般的に用いられており、許容応力度設計法に基づき設計されている。この SS400 スタッドで設計した鋼少数主桁橋や鋼橋の床版取換え工事において、プレキャストプレストレストコンクリート床版 (以下、プレキャストPC床版) を採用する場合、支点付近はせん断力が大きくなるためスタッドを多数必要となり、横締め鋼材とスタッド孔との干渉問題が生じる。こうしたことから、筆者らは、プレキャストPC床版の適用範囲の拡大による合理化と省力化を目指し、SM570 相当材の高強度スタッドを用いた接合構造の開発を進めてきた。また、既設道路橋床版の取換え工事において、取換え後の鋼主桁ならびに下部工の応力軽減や機材の小型化によるコスト縮減を目的とした人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート床版への適用も検討してきた。軽量コンクリートを用いる場合にはせん断耐荷力が低下するとの報告もあるが、筆者らは静的な押抜き試験を実施し、軽量コンクリートをプレキャスト化することで普通コンクリートを用いたものと同等の耐荷力が発揮できることを明らかにしてきた<sup>2)</sup>。さらに、スタッドのかぶり (縁端距離) が小さい 30mm の場合に対して、せん断耐荷力を向上させるためにスパイラル筋を用いた補強方法を提案し、スタッドの軸引張強度相当まで最大せん断耐荷力を引き出すことができることを示した<sup>2), 3)</sup>。

しかしながら、これまで軽量コンクリートを用いたプレキャストPC床版 (以下、軽量PCa床版) に高強度スタッドを適用した場合の疲労強度に関する研究はなされていない。また、PCa床版を用いた合成桁は、変動する活荷重の占める割合が大きくなり、限界状態設計法に移行するなかで疲労限界状態設計照査において高強度スタッドの疲労強度特性を把握することが必要となる。そこで本研究では、軽量PCa床版に高強度スタッドを適用した接合部の疲労強度 (S-N 曲線) とスタッドの引張強度が疲労強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、押抜き疲労試験 (以下、疲労試験) 結果を既往の研究とともに再整理した。あわせて、筆者らが提案しているスパイラル筋を用いた補強方法の疲労強度特性への効果についても検討を行った。

### 2. 試験要領

#### 2.1 供試体

供試体一覧を表-1に、供試体形状を図-1に示す。実験パラメータは、載荷方法の違いとスパイラル筋の有無の2つとした。供試体は載荷方法によって「疲労試験」(8体)と「静的試験」(4体)の2つに大別でき、それぞれをスパイラル筋で補

表-1 供試体諸元

シリーズ	供試体名 <sup>※1</sup>	載荷方法	せん断応力度範囲 <sup>※2</sup> $\Delta \tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	スパイラル筋 有無
FN	FN150	疲労	150	無
	FN210		210	
	FN230		230	
	FN250		250	
FS	FS190		190	有 ( $\phi 3.2$ )
	FS210		210	
	FS230		230	
	FS250		250	
SN	SN-1	静的 (単調載荷)		無
	SN-2			
SS	SS-1			有 ( $\phi 3.2$ )
	SS-2			

※1 供試体名のつけ方: ■▲●

- : 載荷方法 (疲労 Fatigue, 静的 Static)
- ▲: スパイラル筋の有無 (無: Nothing, 有: Stud)
- : 疲労試験の場合は、せん断応力差 (N/mm<sup>2</sup>)  
静的試験の場合は、供試体番号 (1, 2)

※2 図-2 参照

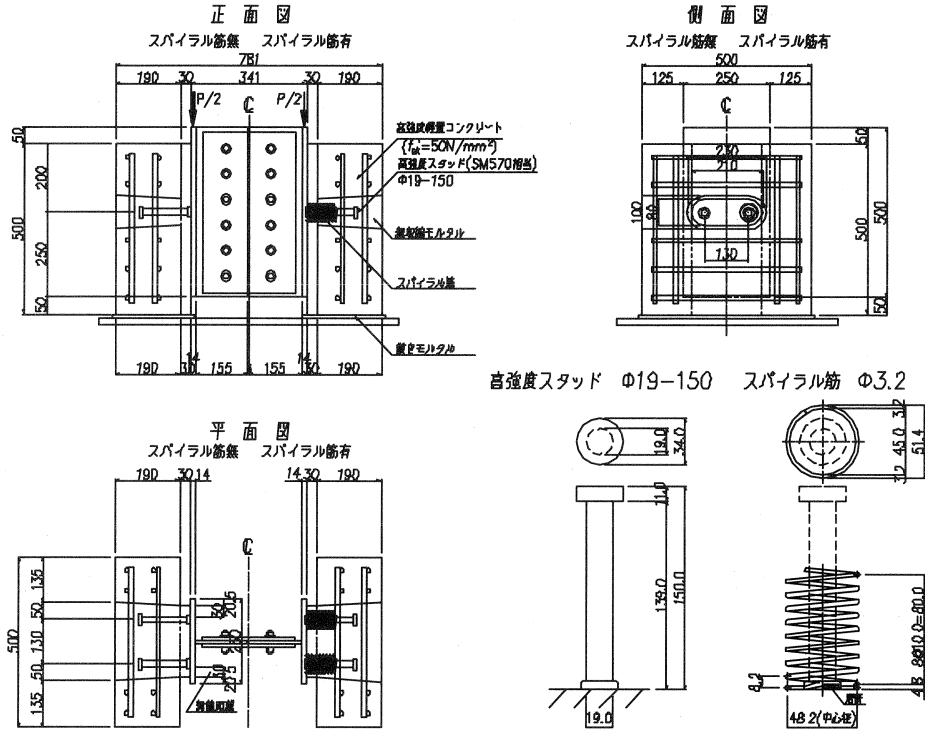


図 - 1 供試体

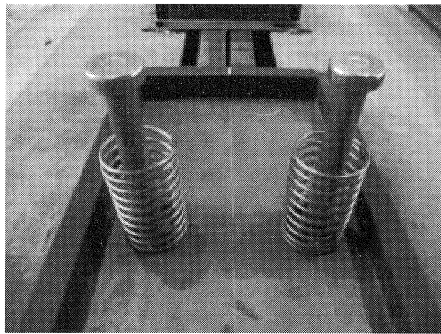


写真 - 1 スパイラル筋による補強

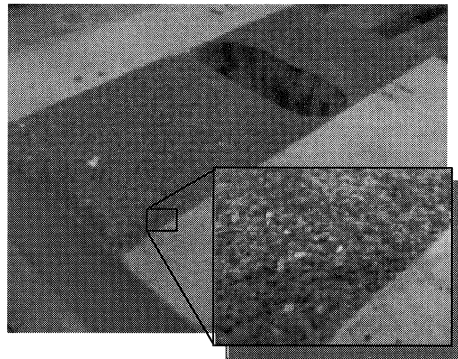


写真 - 2 プレキャスト版の洗出し状況

強したもの (写真 - 1) としていないものの 2 つに分けられる。

供試体は、実構造の高強度軽量プレキャスト PC 床版と主桁との接合部を想定し、それに相当するプレキャスト版をあらかじめ製作し、水平にセットされたプレキャスト版のスタッド孔へ上からモルタルを後打ちして鋼部材 (H形鋼) と一体化した。なお、プレキャスト版には、写真 - 2 に示すようにあらかじめ洗出しを行った。

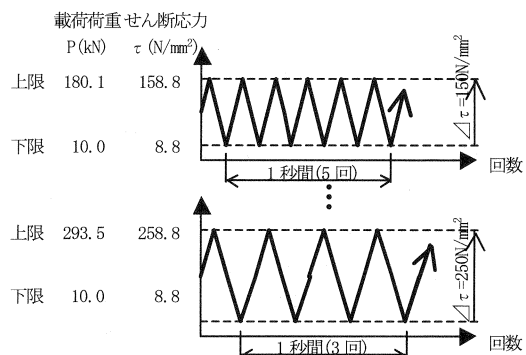


図 - 2 疲労試験の荷重要領

スタッド形状は、JIS B 1198 と同じ形状の直径 19mm 高さ 150mm とし、全て材質 SM570 相当の高強度材を用いた。スタッド配置は、載荷試験機の制限から片側に 2 本ずつ配置した。また、スタッドの縁端距離は 30mm とした。ここで、縁端距離とは、無収縮モルタル部におけるスタッド根元のかぶり厚さのことを示す(図 - 1)。

2. 2 載荷要領

荷重Pは、図 - 1 に示すようにH形鋼フランジの上側から載荷した。変位は、スタッド位置(全 4 箇所)における鋼部材とプレキャスト版との相対変位を計測し、それらの平均値を用いて評価した。

静的試験では、荷重制御により 10kN ピッチで単調載荷し、降伏レベル(変位が 2 mm程度)に達したところから、変位制御に切り替えて 0.2 mmピッチで計測を行った。

疲労試験では、表 - 1 に示すようにせん断応力範囲を 4 段階に変化させ、荷重レベルに合わせて 3.0Hz~5.0Hz の速度で 1 本目のスタッドが破断するまで繰返載荷した。ただし、載荷回数 1000 万回を超えても破断しない場合は、疲労試験を停止し、静的試験により残存耐荷力を求めることとした。また、載荷荷重は図 - 2 に示すように除荷時のバツキを抑えるため下限を 10kN と設定し、それぞれのせん断応力範囲に合わせ片側振幅載荷した。なお、静的試験・疲労試験とも載荷中にH形鋼とプレキャスト版とが開くことを防ぐため、プレキャスト版の上・下端からそれぞれ約 80mm の上下 2 箇所 bolts とひのき材の開止めを設置した。

3. 試験結果および考察

表 - 2 に材料試験ならびにスタッドの静的試験と疲労試験の結果一覧を示す。疲労試験のコンクリートおよびモルタルの材料試験は、試験開始時と終了時に行い、表中にはその平均値を示している。また、スタッ

表 - 2 結果一覧

シリーズ	供試体名	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_m'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_m$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_{st}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$Q_y$ (kN/本)	$\delta_y$ (mm)	$Q_{max}$ (kN/本)	$\delta_{max}$ (mm)	$K_{st}$ (kN/mm)	$\Delta \tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	N (万回)	
FN	FN150	58.6	24.4	67.2	29.7	633	(93.1)	(0.573)	(148.8)	(7.06)	(249.4)	150	1000	
	FN210	57.4	23.6	73.7	30.7		—	—	—	—	—	—	210	18
	FN230	62.1	24.4	73.1	30.4		—	—	—	—	—	—	230	249
	FN250	65.8	24.2	68.8	30.1		—	—	—	—	—	—	250	350
FS	FS190	63.7	25.1	74.3	31.1		—	—	—	—	—	—	190	245
	FS210	64.2	25.2	71.9	31.0		—	—	—	—	—	—	210	120
	FS230	64.2	25.1	76.2	30.5		—	—	—	—	—	—	230	12
	FS250	70.6	25.5	75.4	30.2		—	—	—	—	—	—	250	5
SN	SN-1	60.5	24.6	63.7	29.3		85.6	0.522	145.0	2.96	266.0	—	—	—
	SN-2						79.1	0.517	141.0	3.78	249.5	—	—	
	Avg.						82.4	0.520	143.0	3.37	257.8	—	—	
SS	SS-1	63.2	24.1	65.3	29.3		91.5	0.640	166.3	5.56	208.0	—	—	—
	SS-2						93.4	0.560	179.5	4.27	259.4	—	—	
	Avg.						92.5	0.600	172.9	4.92	233.7	—	—	
SS/SN	—	1.04	0.98	1.03	1.00		—	1.12	1.15	1.21	1.46	0.91	—	—

供試体 FN150 の ( ) 内の数字は、疲労試験 1000 万回載荷後の残存耐荷力

《記号》  $f_c'$  : コンクリートの圧縮強度,  $E_c$  : コンクリートのヤング係数,  $f_m'$  : モルタルの圧縮強度,  $E_m$  : モルタルのヤング係数  
 $f_{st}$  : スタッドの破断強度,  $Q_y$  : 降伏せん断耐荷力,  $\delta_y$  :  $Q_y$  時の変位量,  $Q_{max}$  : 最大せん断耐荷力,  $\delta_{max}$  :  $Q_{max}$  時の変位量  
 $K_{st}$  : すれ定数,  $\Delta \tau$  : せん断応力範囲, N : 載荷回数

《参考値》 スタッドの 4 号試験片引張試験結果

0.2%耐力 : 574N/mm<sup>2</sup>, 引張強度 : 674N/mm<sup>2</sup>, ヤング係数 : 196kN/mm<sup>2</sup>, 伸び : 25.6%

スパイラル筋(9号試験片引張試験結果)

引張強度 : 612N/mm<sup>2</sup>

H形鋼 (1A号試験片引張試験結果)

0.2%耐力 : 326N/mm<sup>2</sup>, 引張強度 : 469N/mm<sup>2</sup>, ヤング係数 : 194kN/mm<sup>2</sup>, 伸び : 30.5%

下の破断強度  $f_{st}$  は、H形鋼材を想定した SS400 材の鋼板にスタッドを溶接した状態での引張強度試験値である。この実体材料引張試験ではスタッド軸部で破断しており、溶接部で破壊しないことを確認した。押抜き供試体の溶接部に対しても、目視によりスタッドとH形鋼との間に変状が無いことを確認した。

せん断耐荷挙動の評価方法は、頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)<sup>4)</sup>に従い、途中の挙動に関わらず荷重が最大となった時のスタッド1本あたりのせん断力を「最大せん断耐荷力:  $Q_{max}$ 」、荷重-変位関係における最大せん断耐荷力の1/3 荷重点の初期割線剛性(「ずれ定数:  $K_{st}$ 」)を0.2 mmオフセットし、オフセットした線が荷重-変位関係と交差したせん断力を「降伏せん断耐荷力:  $Q_y$ 」と定義した。

### 3. 1 静的試験

図-2にSNシリーズとSSシリーズの荷重-変位曲線を示す。図中には、目安として道路橋示方書<sup>1)</sup>による設計値  $Q_d$ 、第二名神高速道路貝川橋で高強度スタッドを採用する際に解析と実験から得られた降伏せん断耐荷力の実験式ならびに設計提案式<sup>5)</sup>による値 ( $Q_y$  と  $Q_d$ )、そして溶接した状態でのスタッドの軸引張強度  $P_u (=f_{st} \cdot A_s)$  を併記する。ここで、 $f_{st}$  はスタッドの破断強度、 $A_s$  はスタッド軸部の断面積である。現行の道路橋示方書では疲労の照査を省略できることになっているため、疲労の照査を別途行う諸外国の代表的な設計規準(例えば、BS5400, ASSHOT) に対して許容せん断力  $Q_d$  が低く設定されていることがこの図からわかる。また、表-2の下端にSNシリーズに対するSSシリーズの比を示す。スタッドを片側に2本配置した今回の試験結果では、スパイラル筋で補強した場合、 $Q_y$  が1.12倍、 $Q_{max}$  が1.21倍という結果になった。スタッドの破壊形式は、多くの場合スタッドの余盛部を残し余盛部上側でスタッド軸部がせん断された状態となった。

### 3. 2 疲労試験

#### (1) 既往の研究

スタッドの疲労強度に関する研究は、これまで国内外で多数実施されてきた。しかしながら、統一した試験方法が無かったため、疲労試験は2面せん断試験と1面せん断試験の2種類の供試体を用いて行われてきた。そこで、平城<sup>6)</sup>は、これらの疲労試験データを収集、整理し、試験方法の違いが試験結果に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。そして、主に行われていた2面せん断試験による疲労試験データを抽出し、重回帰分析によってスタッドの疲労強度に対する合理的な疲労強度評価式として、縦軸に静的強度に対するせん断力範囲を取った式[1]を提案している。

$$R/Q_u = 1.28 \cdot N^{-0.105} \tag{1}$$

ここに、 $R$ : せん断力範囲 (N)

$Q_u$ : スタッドの静的強度 (静的試験における最大せん断耐荷力の実測データの中央値) (N)

$$Q_u = 31.3 A_s \sqrt{(h/d_s) f_c'} + 9800 \tag{2}$$

$A_s$ : スタッドの断面積 (mm<sup>2</sup>)

$h$ : スタッドの全高 (mm)

$d_s$ : スタッドの軸部直径 (mm)

$f_c'$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

なお、平城の式(式[1])は場所打ちコンクリートのみを対象にしており、スタッドの引張強度 406N/mm<sup>2</sup> ~ 620N/mm<sup>2</sup> のものを集計して導き出されている。従来の評価方法・設計規準が基本的にスタッドが受けるせん断応力範囲のみの関数で評価されていたのに対し、平城の式では疲労強度に与える影響の大きいコンクリートの圧縮強度やスタッドの高さ等の影響が含まれたものとなっている。

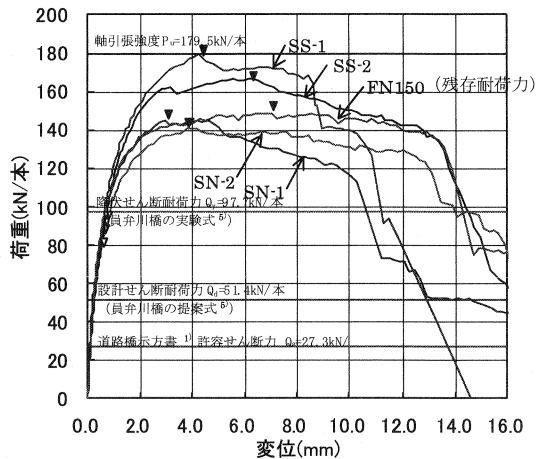


図-2 静的試験の荷重-変位曲線

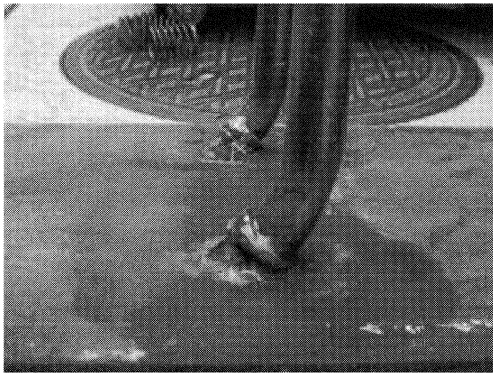


写真-3 スタッド損傷状況 (例: FS210)

(2) 高強度スタッドの疲労強度

疲労試験は、1本目のスタッドが破断して耐力を失ったところまで行った。試験後にスタッド損傷状況を調査するため、スタッドを掘り起こすと、静的試験では余盛部上側のスタッド軸部でせん断破壊したのに対して、疲労試験では既往の研究に見られるSS400材と同様、多くの供試体でスタッド溶接部の余盛部下側の止端部から初期亀裂が生じ(写真-3)、やがてその亀裂が溶接部内を進展して疲労破壊に至ったと推測できる。これは、疲労試験時には繰返载荷によって、溶接部の応力集中によって亀裂が生じるため、SS400材と同じ破壊形式になっているものと考えられる。また、SS400材に比べて疲労強度が増大した要因としては、スタッド(SM570相当材)とH形鋼(SS400材)の溶接部の硬度が高くなっているためと考えられる。

次に、既往の研究結果とともに本研究で得られた疲労試験結果を考察する。図-4はせん断応力範囲 $\Delta\tau$ を縦軸に、図-5はスタッドの静的強度

(式[2])に対するせん断力範囲を縦軸に取ったものである。今回行った試験結果は、軽量コンクリートを用いたプレキャスト版との組合せを対象にしているため、静的試験結果SN, SSシリーズの最大せん断耐力 $Q_{max}$ に対するせん断力範囲として評価している。さらに、スタッドの強度が疲労強度に及ぼす影響を調べるため、スタッドの引張強度を $50\text{N/mm}^2$ 単位に分け、それぞれ疲労設計曲線の傾き $m$ を示した。なお、今回行ったスパイラル筋無の結果は両図において高い疲労強度を有していることが確認できるが、バラツキが大きかったため今後データ収集を行うこととし、ここでは定性的な考察にとどめることとする。

まず、図-4に着目すると、今回の試験結果は既往の研究に比べ高い疲労耐荷性能を有していることがわかる。これは、既往の研究の近似式付近にスタッドの引張強度が $600\text{N/mm}^2$ 以上の結果(□印)があることから、軽量コンクリートを用いた材料的な影響とプレキャスト化による構造的な影響、補強効果が考えられる。つまり、要因として、軽量コンクリートのずれ定数が普通コンクリートのものより小さく、スタッド根元部

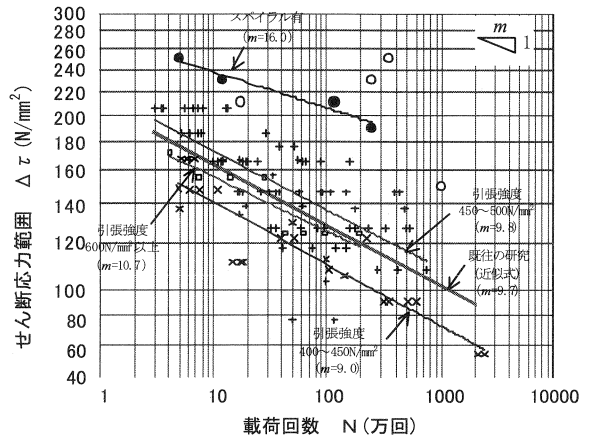


図-4 せん断応力範囲で整理されたS-N関係

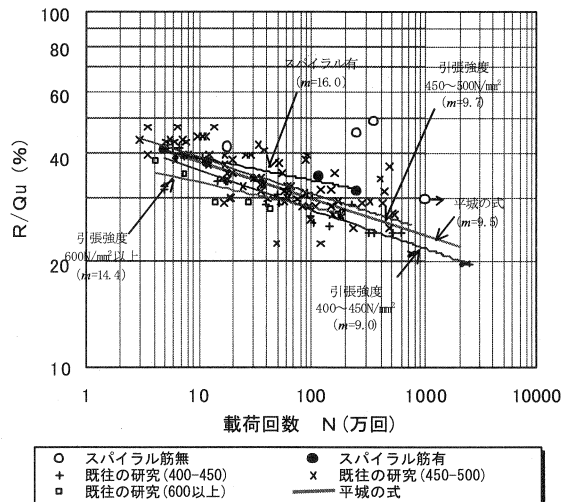


図-5 静的強度に対するせん断力範囲で整理されたR/Qu-N関係

の応力集中を緩和させること、さらには、スタッド周辺の無収縮モルタルがプレキャスト版のスタッド孔内で拘束されていること、そしてスパイラル筋の補強効果が発揮されたためと考えられる。また、スパイラル筋で補強したスタッドは、疲労強度に着目すると既往の研究(近似式)に対して約1.4~1.6倍、載荷回数に着目すると100倍程度の疲労強度特性を有することが明らかとなった。

次に図-5に着目すると、本試験結果は、既往の研究に比べ静的強度が高いため図-4よりも既往の研究結果に近づき、平城の式を用いることで安全側に評価することができる。また、この図で特に注目すべきところは疲労設計曲線の傾き  $m$  である。今回の試験結果の傾きは  $m=16.0$  となり、既往の研究でスタッドの引張強度  $600\text{N}/\text{mm}^2$  以上の値が近似式より若干下側に位置しているものの  $m=14.4$  と、スタッドの引張強度  $500\text{N}/\text{mm}^2$  以下のもの ( $m=9.0\sim 9.7$ ) に比べ、傾きが緩やかになっている。つまり、スタッドを高強度化することにより、高サイクル領域において高い疲労強度を発揮し、長期耐久性に優位になると言える。

#### 4. 結論

本研究では、軽量PCa床版と高強度スタッドを組み合わせた接合部の押抜き試験(静的、疲労)を行うとともに、スタッドの引張強度に着目し疲労強度に関する既往の研究の再整理を行った。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- ① 軽量PCa床版と高強度スタッドを組み合わせた接合部の耐疲労性は、既往の研究に比べて高い疲労強度特性を有することを示した。
- ② スパイラル筋で補強したことにより、既往の研究の近似式との比較において疲労強度に着目すれば約1.4~1.6倍、一方、疲労寿命に着目すれば約100倍の耐疲労性を有することが明らかとなった。
- ③ スタッドの引張強度が  $600\text{N}/\text{mm}^2$  の高強度スタッドは、疲労設計曲線の傾き  $m$  が緩やかになり、高サイクル領域において高い疲労強度を発揮し、長期耐久性に優位になる。
- ④ 軽量PCa床版と高強度スタッドを組み合わせた接合部の疲労強度(スパイラル筋有)は、式〔1〕を用いることで安全側に評価することができる。

#### 謝辞

本実験を進めるにあたり、供試体製作において日本メサライト工業(株)溝淵信彦氏、住友大阪セメント(株)小野博文氏にはご協力頂きました。また、実験の際には摂南大学の窪敏次君(当時4年生)はじめ平城研究室の学生の方々には多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，pp.331-340，丸善，2002.3
- 2) 澤大輔・池尾良一・中村定明・平城弘一：高強度スタッドを軽量プレキャストPC床版に適用した場合のせん断耐荷挙動，構造工学論文集，Vol.51AⅢ，pp.1501-1508，2005.3
- 3) 中村定明・澤大輔・池尾良一・平城弘一：頭付きスタッドのせん断耐荷力に及ぼす縁端距離の影響とスパイラル筋の補強効果，構造工学論文集，Vol.50AⅢ，pp.1159-1164，2004.3
- 4) (社)日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)および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
- 5) 水口和之・小松秀樹・松野進・小野辺良一・倉田幸宏：プレキャストPC床版用のスタッドの強度特性に関する解析的検討-員弁川橋-，土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(A) Vol.54，pp.310-311，1999
- 6) 平城弘一：頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，1990.2