

## 論文 角形鋼管のずれ止め性能に関する実験的検討

朱 暁旭\*1・滝本 和志\*1・大久保 宣人\*2・東山 浩士\*3

**要旨**：鋼コンクリート合成床版の軽量化を図るために、軽量コンクリートと角形鋼管を用いることを検討している。提案する構造は、同じ床版厚さの鋼コンクリート合成床版に比べて、単位面積当たりの質量を 15% 程度低減できる。本研究では、軽量化を図るために底鋼板上に配置する角形鋼管のずれ止めとしての性能を把握する目的で、押抜きせん断試験を実施した。静的および疲労試験の結果、角形鋼管はずれ止めとして十分なせん断耐力と疲労強度を有していることを明らかにした。

**キーワード**：プレキャスト合成床版, 角形鋼管, 軽量コンクリート, 押抜きせん断試験

### 1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化が顕在化してきているが、高速道路においても、経過年数の増加とともに床版の劣化が進んでいることが報告<sup>1),2)</sup>されている。東・中・西日本高速道路 3 会社の統計データ<sup>3)</sup>によると、2015 年度末に供用から 30 年以上経過した橋梁延長は全体の約 4 割に達し、大規模更新計画で床版取替が予定されている橋梁延長は約 224km となっている。

鋼板とコンクリートを組み合わせた鋼コンクリート合成床版（以下、合成床版）は、剛性が大きく高い耐荷力を有しており、底鋼板により型枠・支保工を省略できることから、長支間床版としての採用事例が増えてきている。また、プレキャスト合成床版の開発<sup>4)</sup>により、床版取替工事にも適用され始めている。高速道路の床版取替工事は、施工時間や施工空間といった制約条件の他に、下部構造の耐震性能確保や新旧床版の一体化の観点から、取替床版の厚さや重量にも制約を受ける場合がある。

下部構造の負担低減と長支間化のニーズに対応するため、軽量コンクリートを用いた合成床版の軽量化の検討<sup>5)</sup>が行われている。また、軽量コンクリートを用いた各種ずれ止め（馬蹄形ジベル、孔あき鋼板ジベル、頭付きスタッド）の押抜きせん断試験の結果<sup>6),7)</sup>より、孔あき鋼板ジベルの場合は、軽量コンクリートの静的最大せん断耐力が普通コンクリートよりも小さくなるが、検討した全てのずれ止めタイプにおいて、疲労強度特性には差異が見られなかったことが報告されている。

溝形鋼や鋼管の半分を底鋼板に溶接し、床版内部に中空部を設けることで合成床版の軽量化を図るという実験的な検討<sup>8),9),10),11)</sup>も行われている。

本研究で提案する角形鋼管を用いた合成床版のイメージ図を図-1 に示す。橋軸直角方向に角形鋼管を配置し、底鋼板に溶接することで床版断面に 10% 程度の中空部を

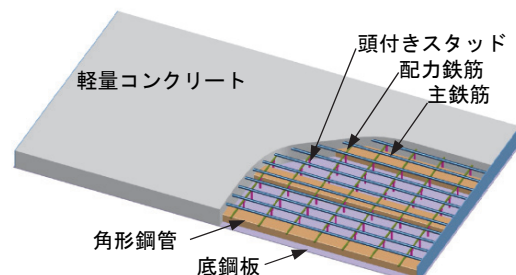


図-1 軽量合成床版のイメージ

設けることができる。角形鋼管には、軽量化だけでなく、底鋼板の補剛とずれ止めとしての機能も期待することができることから、ここでは、角形鋼管のずれ止め性能について、押抜きせん断試験により検討することとした。

押抜きせん断試験の標準的な試験方法として、頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）<sup>12)</sup>（以下、標準試験方法案）が提案されている。本研究では、この標準試験方法案を参考に、角形鋼管のせん断耐力と疲労強度を把握するために、静的押抜きせん断試験と押抜きせん断疲労試験を行った。

### 2. 試験体の概要

#### 2.1 使用材料

表-1 に軽量コンクリートの配合を示す。膨張材と収縮低減剤を併用することとした。水結合材比は 30%、細骨材率は 40%、単位水量は 150kg/m<sup>3</sup> とした。細骨材は山砂と砕砂を 6:4 の割合で混合した。人工軽量粗骨材は製品工場で十分に吸水させて調和水を取り込まないように処理した。膨張材は単位セメント量の内割りで 10kg/m<sup>3</sup>、収縮低減剤は単位水量の内割りで 8kg/m<sup>3</sup> を用いた。

軽量コンクリートの材料試験結果を表-2 に示す。コンクリート圧縮強度は静的試験時が 58.4N/mm<sup>2</sup>、疲労試験

\*1 清水建設（株） 技術研究所 博（工）（正会員）

\*2 日本ファブテック（株） 技術本部 博（工）

\*3 近畿大学 理工学部 社会環境工学科 教授 博（工）（正会員）

表-1 軽量コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	膨張材 EX	収縮 低減剤 SR	混和剤	
											SP	AE
15	21±2	30	5.0±1.5%	40	142	490	673	508	10	8	5.0	0.03

表-2 軽量コンクリートの材料試験結果

名称	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
静的試験	40	58.4	22.7
疲労試験	90	67.2	24.5
	166	67.0	25.6

表-3 角形鋼管の寸法と材料試験結果

寸法		降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
A×B	t			
150×75	3.2	386.4	460.0	210.0

開始時が 67.2 N/mm<sup>2</sup>、終了時が 67.0 N/mm<sup>2</sup>であった。角形鋼管の寸法と材料試験の結果を表-3 に示す。降伏強度は 0.2%ひずみ時の値とした。

## 2.2 試験体

試験体はすべて同一の仕様とした。試験体数は、静的試験体 (SP1~SP3) 3 体、疲労試験体 (FP80~FP50) 5 体とした。疲労試験体名の数字は疲労試験で载荷した荷重振幅の静的耐力に対する比率 (%) である。試験体の形状寸法を図-2 に示す。試験体は、フランジ(幅 420mm、高さ 400mm、厚さ 22mm) に角形鋼管(幅 150mm、高さ 75mm、長さ 400mm、厚さ 3.2mm) を溶接し、そこにコンクリートブロック(幅 500mm、高さ 400mm、厚さ 174mm) を打設した T 形鋼 2 つを添接板と高力ボルトで結合したものとした。フランジと角形鋼管の溶接は、溶接変形抑制の目的で、中央 200mm の範囲とした。角形鋼管内部にコンクリートが入らないように、端部は発泡スチロールで蓋をした。コンクリートと接するフランジ面にグリース等の剥離剤は塗布していない。

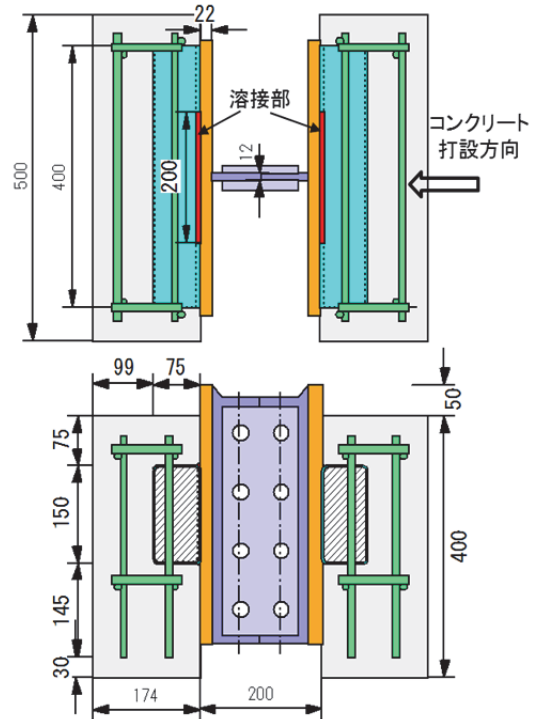


図-2 押抜き試験体の形状寸法

## 3. 試験方法

### 3.1 静的試験

静的な押抜きせん断試験の実施状況を写真-1 に示す。試験機ベッドとコンクリートブロックの間は石膏を用いて不陸調整を行い、溝形鋼と PC 鋼棒 (φ23) で開き止めを設置した。

载荷方法は、一方向 (押し込みのみ) の漸増繰返し载荷とした。除荷は、荷重が 50kN、100kN、150kN、200kN、250kN、鉛直ずれが 0.25mm、0.5mm、0.75mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm、3.0mm、4.5mm、6.0mm、8.0mm、10mm の時に行うことを基準とした。鉛直ずれ変位が 10mm に達した時点で開き止めを外し、荷重がほぼ 0 になるころまで载荷を行った。

### 3.2 疲労試験

疲労試験は、1MN 高速疲労試験機を用いて実施した。試験体の設置や開き止めは静的試験と同様とした。下限荷重を 10kN とし、荷重振幅を静的試験で得られた押抜きせん断耐力の 50%~80% の範囲で、圧縮側の片振り (sin 波) として、繰返し载荷を行った。ここでは、最大振幅が 4mm に達した時点を疲労破壊と定義し、破壊判定時のデータ計測を行い、試験を終了することとした。

### 3.3 計測項目

計測項目は、静的試験と疲労試験で同一とし、载荷荷重、フランジとコンクリートブロックの相対変位 (ずれ変位)、角形鋼管および PC 鋼棒のひずみを計測した。

角形鋼管 1 本に作用するせん断力は、载荷荷重を角形

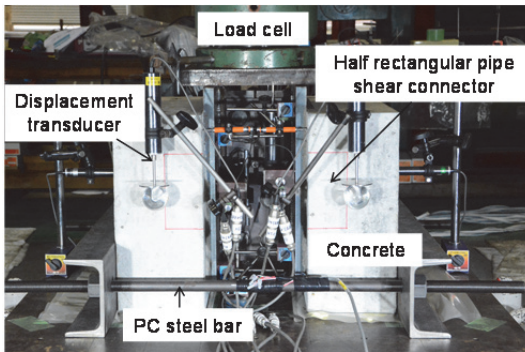


写真-1 載荷状況

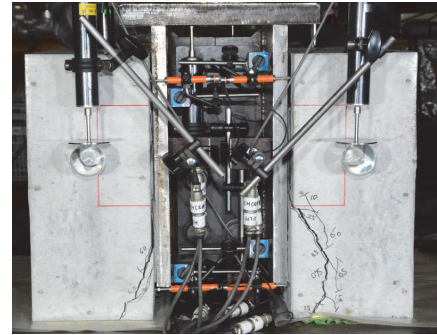


写真-2 静的試験におけるコンクリートの破壊状況

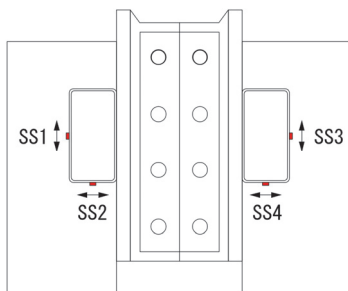


図-3 角形鋼管ひずみの測定位置

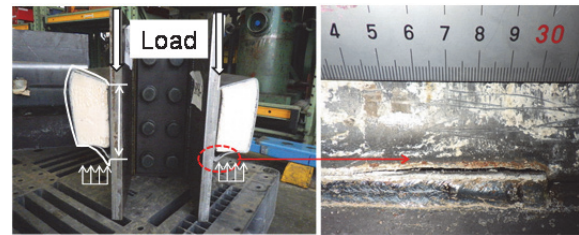


写真-3 静的試験における角形鋼管の破壊状況

鋼管の本数（2本）で除して求めた。ずれ変位は、左右表裏4点の平均値とした。角形鋼管のひずみは、図-3に示すように角形鋼管側面と下面中央で計測した。疲労試験における計測は、繰返し回数が1万、5万、10万、30万、50万、80万、100万回に達した時点で行った。100万回以降は適宜計測を行った。

#### 4. 試験結果および考察

##### 4.1 静的試験結果

###### (1) 破壊状況

3体の試験体の破壊状況はほぼ同様で、角形鋼管下側のコンクリートの圧縮破壊であった。ずれ変位が0.25mmを越えると、フランジと角形鋼管下側の溶接部から斜め下方にひび割れが発生した。ずれ変位の増加に伴いひび割れ幅が拡大していった。ずれ変位が5mmを越えた時点で、フランジとコンクリートブロックの間の隙間がはっきり確認できるようになった。ずれ変位が10mmに達した後に、PC鋼棒を外して再載荷したところ、コンクリートブロックがハの字に変形して終局に至った。

SP1試験体の試験終了時とコンクリート除去後の状況を写真-2, 3に示す。ずれ変位が30mmを越えるまで載荷したため、角形鋼管は大きく変形しており、角形鋼管下側の溶接止端部に長さ約60mmのき裂が観察された。ほとんどの試験体において貫通したき裂は見られなかったが、SP3試験体右下側の溶接止端部の角形鋼管が全面（200mm）破断した。図-4に角形鋼管のひずみとせん断力の関係を示す。試験全域において、角形鋼管下面側に

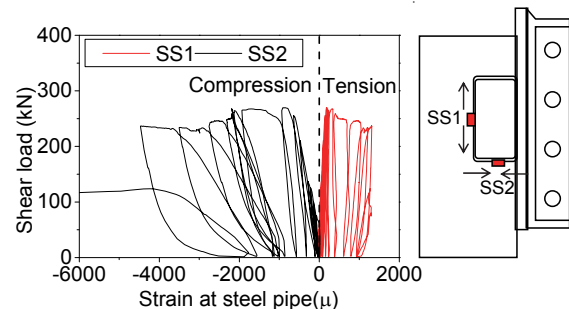


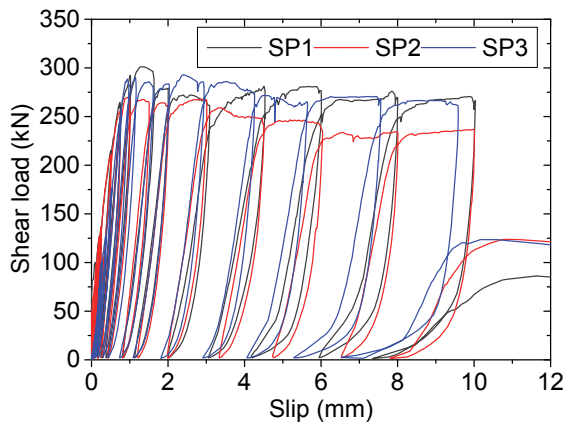
図-4 角形鋼管のひずみ挙動

は圧縮力が、側面側には引張力が作用していたことがわかる。

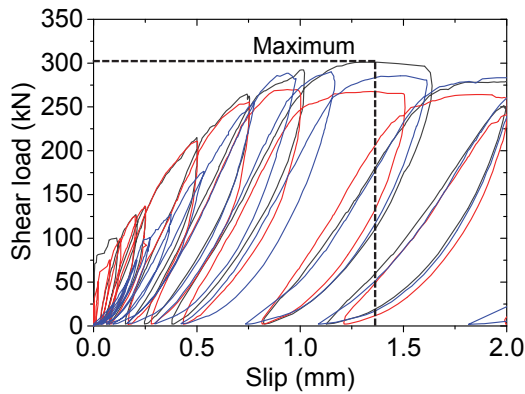
###### (2) せん断力-ずれ変位関係

図-5に各試験体のせん断力とずれ変位の関係を示す。ずれ変位2mmまでの拡大図も合わせて示す。ずれ変位が1mm付近までは、ずれ変位の増加に比例してせん断力が増加していったが、ずれ変位が1.0mm~1.5mmでせん断力がピークに達した後は、ずれ変位が増加しても荷重増加は見られず、徐々に荷重が低下していった。開き止め用のPC鋼棒を外した後のせん断力は、ずれ変位10mm時点のせん断力の半分にも達しなかったことから、ずれ変位が10mmに達するまでの時点で、破壊に至っていたものと考えられる。

PC鋼棒に作用した引張力を図-6に示す。ずれ変位の増加に伴い、PC鋼棒に作用する引張力も増加しているが、試験体ごとにかなりばらつきが見られる。最大せん断力を示したずれ変位1.0mm~1.5mmまでに作用した引張力は、最大で25kN程度であった。



a) 全体図



b) ずれ変位 0~2.0mm 範囲の拡大図

図-5 せん断力とずれ変位の関係

### (3) せん断耐力

表-4 に静的試験で得られたせん断耐力の一覧を示す。3 体の平均値は 288.0kN である。角形鋼管がどれくらいの頭付きスタッド本数に相当するかを把握<sup>10)</sup>するため、頭付きスタッドの設計せん断耐力の計算式<sup>13)</sup>を用いて、頭付きスタッドのせん断耐力を算出した。

$$V_{ssud} = (31A_{ss}\sqrt{(h_{ss}/d_{ss})f'_{cd}} + 10000)/\gamma_b \quad (1)$$

$$V_{ssud} = A_{ss}f_{ssud}/\gamma_b \quad (2)$$

ここに、

$V_{ssud}$  : 頭付きスタッドの設計せん断耐力 (N)

$A_{ss}$  : 頭付きスタッドの断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$d_{ss}$  : 頭付きスタッドの軸径 (mm)

$h_{ss}$  : 頭付きスタッドの高さ (mm)

$f_{ssud}$  : 頭付きスタッドの設計引張強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\gamma_b$  : 部材係数 (1.0 とする)

ここで、頭付きスタッドの引張強度は  $400\text{N}/\text{mm}^2$ 、高さは  $100\text{mm}$  で一定とした。また、コンクリート強度は静的試験時の  $58.4\text{N}/\text{mm}^2$  を用いた。この場合、頭付きスタッド 1 本当たりのせん断耐力は、式 (2) で決まること

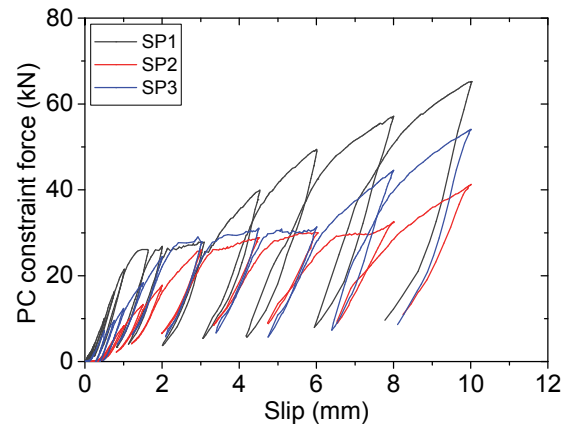


図-6 開き止め用の PC 鋼棒の引張力

表-4 せん断耐力の実験値

試験体	SP1	SP2	SP3	平均値
$V_{max}$ (kN)	301.1	269.7	293.1	288.0

表-5 等価スタッド本数

呼び名	$\phi 16$	$\phi 19$	$\phi 22$
等価本数 (本)	8.0	5.6	4.2

(1m 当たり)

となり、 $\phi 16$ 、 $\phi 19$ 、 $\phi 22$  の頭付きスタッド 1 本当たりのせん断耐力は、それぞれ 80.4、113.6、152.0kN となる。この値から求めた角形鋼管の等価スタッド本数を表-5 に示す。これは、長さ 1m の角形鋼管が、 $\phi 16$  頭付きスタッドを 1m 当たり 8 本配置した場合と同等のずれ止め性能を有していることを示しており、角形鋼管はずれ止めとして十分に機能していると考えられる。ただし、角形鋼管は橋軸直角方向に配置するため、橋軸方向のみのずれ止め機能しか持たない。このため、橋軸直角方向のずれ止め機能は、頭付きスタッドが負担することとなる。また、底鋼板とコンクリートを上下に分離しようとする力に対しても、頭付きスタッドの配置は不可欠である。

## 4.2 疲労試験

### (1) 破壊状況

疲労試験に用いた 5 体の試験体のうち、FP-50 試験体は 500 万回繰返し载荷しても破壊しなかったため、途中で载荷を打ち切った。破壊に至った 4 体の破壊状況はほぼ同様で、溶接部近傍の角形鋼管の疲労破断であった。ここでは、FP-70 試験体の結果を示す。コンクリートと角形鋼管の破壊状況を写真-4、5 に示す。静的試験に比べてコンクリートブロックの損傷は軽微であった。これは、最大振幅 4mm を破壊と見なしているためと考えられる。一方、角形鋼管下側とフランジ溶接部近傍では、



写真-4 疲労試験におけるコンクリートの破壊状況

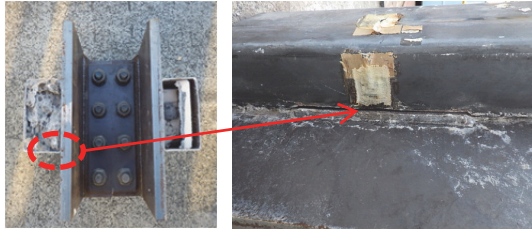


写真-5 疲労試験における角形鋼管の破壊状況

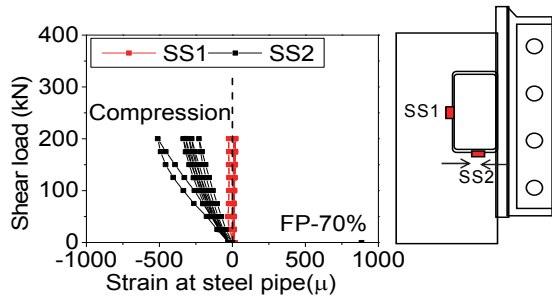


図-7 疲労試験における角形鋼管ひずみとせん断力の関係

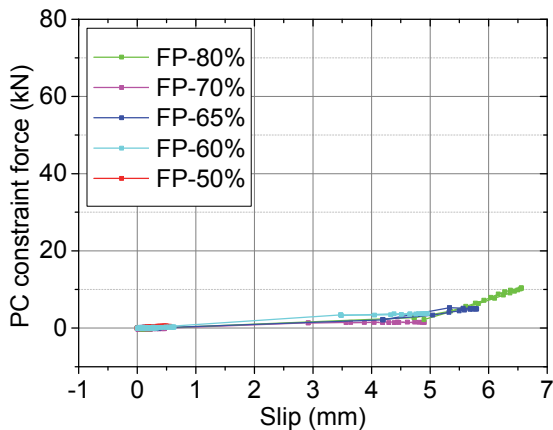


図-8 開き止め用の PC 鋼棒の引張力

溶接止端部にき裂や破断が多数見られた。図-7 に破壊判定時の角形鋼管のひずみとせん断力の関係を示す。静的試験と同じように角形鋼管の下面は圧縮されたが、変形が小さいため、角形鋼管の側面にはほとんどひずみが発生しなかった。開き止め用の PC 鋼棒の引張力を図-8 に示す。破壊に至るまで、PC 鋼棒には、ほとんど引張力が作用していないことがわかる。

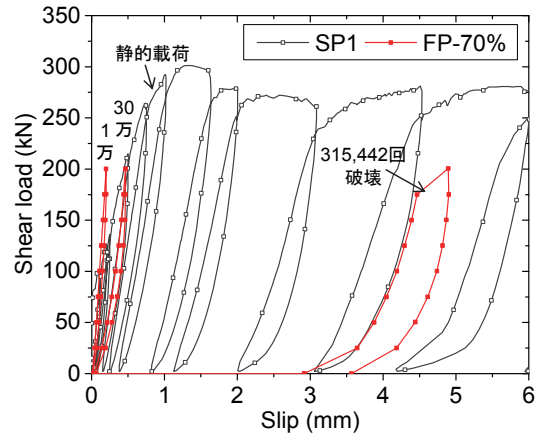


図-9 ずれ変位とせん断力の関係

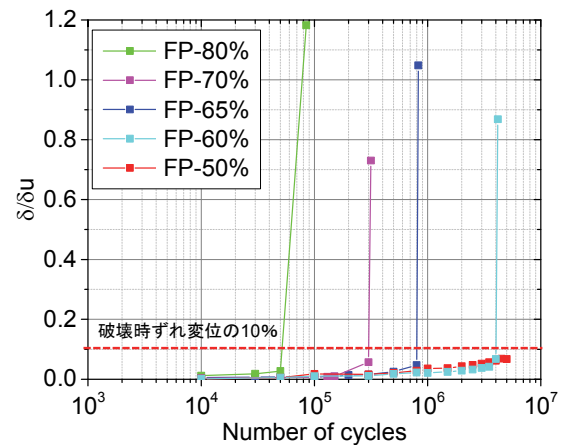


図-10 繰り返し回数と残留変位の関係

### (2) ずれ変位

図-9 に FP-70 試験体の繰返し回数 1 万回、30 万回および破壊時のずれ変位とせん断力の関係を示す。30 万回までは 0.5mm 程度のずれ変位であったのが、315,442 回では 5mm 近くまでずれ変位が増加しており、破壊の直前でずれ変位が急増している。図-10 に各試験体の繰返し回数と残留変位の関係を示す。図の縦軸は、残留変位  $\delta$  を疲労破壊の判定基準変位 ( $\delta_{it}=4\text{mm}$ ) で正規化したものである。この図からも破壊直前にずれ変位が急激に増加していることがわかる。

### (3) 疲労強度

表-6 に疲労試験結果一覧を、図-11 に S-N 関係を示す。疲労強度特性の評価を、せん断耐力に対するせん断力振幅の比 ( $R/V_{\max}$ ) で行う。せん断力振幅は、荷重振幅を角形鋼管の本数 (2 本) で除して求めた。比較のため、頭付きスタッドの S-N 関係<sup>7),14)</sup>も合わせて示す。図-11 より、角形鋼管の疲労強度は頭付きスタッドの疲労強度を上回っており、角形鋼管はずれ止めとして、十分な疲労強度を有しているといえる。

表-6 疲労試験結果

試験体	せん断力振幅 R (kN)	R/V <sub>max</sub> V <sub>max</sub> =288.0kN	破壊回数 N
FP-80	230.0	0.80	84,682
FP-70	200.0	0.69	315,442
FP-65	185.0	0.64	826,160
FP-60	175.0	0.61	4,168,159
FP-50*	145.0	0.50	5,000,000 以上

FP-50\*は破壊していない

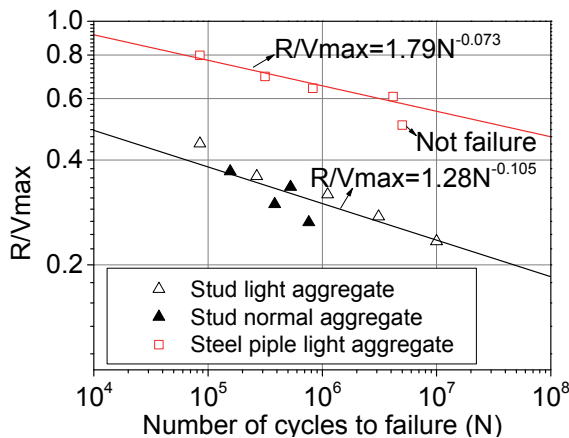


図-11 ずれ止めのS-N曲線<sup>7),14)</sup>

## 5. まとめ

本研究では、角形鋼管のずれ止め性能を把握するために、角形鋼管と軽量コンクリートの組み合わせによる押抜きせん断試験を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 静的試験における破壊形式は、角形鋼管下側のコンクリートの圧縮破壊であった。角形鋼管下側の溶接部にき裂が発生したが、貫通したものはなかった。
- (2) 疲労試験における破壊形式は、溶接部近傍の角形鋼管母材の疲労破断であった。静的試験に比べると、コンクリートブロックの損傷は軽微であった。
- (3) 疲労試験におけるずれ範囲は、破壊直前に急激に増加する。
- (4) 角形鋼管の疲労強度は頭付きスタッドの疲労強度を上回っており、角形鋼管はずれ止めとして、十分な疲労強度を有している。

**謝辞：**疲労試験の実施におきましては、大阪工業大学の 大山理教授にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省，床版の損傷事例：  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3\\_1\\_4.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_4.pdf) (閲覧日：2017年12月20日)
- 2) 国土交通省，コンクリート橋（上部構造）の損傷事例：[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3\\_1\\_2.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_2.pdf) (閲覧日：2017年12月20日)
- 3) 東・中・西日本高速道路の更新計画について  
<http://www.e-nexco.co.jp/koushin/pdfs/150116.pdf>  
(閲覧日：2017年12月20日)
- 4) 光田剛史，木原通太郎，山田秀美，竜頭実，水野浩，原考志：西名阪自動車道 御幸大橋（下り線）床版取替えⅡ期工事，橋梁と基礎，pp.15-21，2011.9
- 5) 舟橋 政司，熊野 拓志，上村 明弘，松林 卓：高性能軽量コンクリートの合成床版橋への適用性に関する検討，第8回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム
- 6) 鈴木喜弥，阿部久義，橘吉宏，児島哲朗，平城弘一：軽量骨材コンクリートを用いたジベル押抜きせん断試験，土木学会第58回学術講演会，2003年9月
- 7) 児島哲朗，鈴木喜弥，阿部久義，藤原良憲，橘吉宏，平城弘一：軽量骨材コンクリートを用いたジベル押抜きせん断疲労試験，土木学会第59回学術講演会，2004年9月
- 8) 園田恵一郎，堀川都志雄，宏瀬清泰：鋼型枠補強コンクリート合成床版の静的強度，第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集，1981年
- 9) 東山浩士，上中宏二郎，石川敏之，有馬博人：軽量化した鋼・コンクリート合成部材のせん断耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1333-1338，2007
- 10) 上中宏二郎，東山浩士，石川敏之，杉本義博：みぞ形鋼とコンクリートの付着せん断強度，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1339-1344，2007
- 11) 上中宏二郎，東山浩士，石川敏之，岡本亮二：半円シアコネクタの直接せん断実験，コンクリート工学論文集，Vol.31，No.2，pp.1117-1122，2009
- 12) 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
- 13) 複合構造標準示方書（2014年制定，土木学会）「設計編」
- 14) 松井繁之，平城弘一：限界状態設計法のための頭付きスタッドの静的・疲労強度に関する評価式，第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1989