

# 論文 半円シアコネクタの直接せん断実験

上中 宏二郎<sup>\*1</sup>・東山 浩士<sup>\*2</sup>・石川 敏之<sup>\*3</sup>・岡本 亮二<sup>\*4</sup>

**要旨:** 鋼・コンクリート合成床版(以下, 合成床版とする)は, 従来ずれ止めとしてスタッドジベルを用いることが一般的である。合成床版のずれ止めとして, 鋼管を半分に切断し切断面を底鋼板に溶接すると, 半円形状のずれ止めを比較的簡単に作製することが可能である。また, 鋼管内部が空洞となるため軽量化をもたらせうると考えられる。そこで, 本研究では半円シアコネクタの付着せん断特性の把握を目的とした押抜きせん断実験を行った。得られた結果より, 半円シアコネクタの直接せん断強度は, 鋼管径の影響を考慮し整理した結果, 径厚比に大きく影響することを実験的に確認した。

**キーワード:** 半円シアコネクタ, 鋼・コンクリート軽量合成床版, 押抜き試験, 直接せん断, 径厚比

## 1. 緒言

鋼・コンクリート合成床版(以下, 合成床版とする)は, 高耐久性, ならびに高耐荷性等の特長を有する優れた構造形式である。また, 引張部材を兼務する底鋼板が型枠となり, 工期の短縮などの利点があり, 現在まで様々な形式の合成床版の開発・提案がなされ, 実用化に至っている。

上述の特長を有する合成床版の厚さは, 従来の RC 床版のそれと比して薄くなる。しかしながら, 鋼桁の重量に対する床版の重量の軽減は小さく, 自重が必然的に重くなる。したがって, 地震時の慣性力が増加するため, 下部工への負担が増加することが問題となる。

このような背景のもと, 著者らはこれまで合成床版の軽量化を目的とした次の実験的検討を行った。まず, みぞ形鋼を底鋼板に溶接し, コンクリートを打設した合成床版を提案した<sup>2)</sup>。すなわちこの合成床版は, みぞ形鋼内部が空洞となるために, 合成床版に軽量化をもたらせるものである。つづいて, 上述の床版の二次元部材に着目し, せん断スパン比を実験変数としたはりの曲げせん断実験<sup>3)</sup>を行った。さらに, 橋軸直角方向に配置したみぞ形鋼の付着せん断特性に着目した実験的検討<sup>4)</sup>を行った。得られた結果より, 前者では, 得られたせん断強度は従来の RC はり理論で概ね算定できること, 後者では, みぞ形鋼はスタッドと比較して十分にシアコネクタとしての機能を有していたこと, ならびに押抜きせん断強度はみぞ形鋼のウェブ幅と厚さの比( $t/B$ )に影響することを確認した。さらに, みぞ形鋼の付着せん断強度式を提案し, 既報<sup>5)</sup>で行われたものと比較を行い, 算定式の妥当性を確認した。

そこで, 本研究では既報<sup>4)</sup>に引き続き, 軽量化をもたらせうる鋼管断面を二等分に切断したずれ止め(以下,

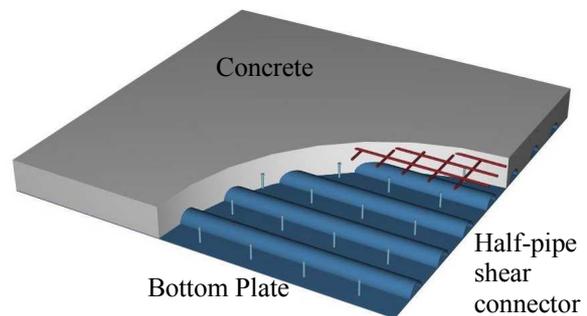


図-1 半円シアコネクタ(HPS)を用いた合成床版のイメージ図

半円シアコネクタ, Half-pipe shear connector, HPS とする)を, 底鋼板に溶接した合成床版(図-1 参照)の鋼とコンクリート界面の付着せん断特性を把握することを目的とする。具体的には, HPS を H 形鋼フランジ部に溶接し, コンクリートを打設した合計 6 体の押抜きせん断実験を行い考察を加えた。なお, 実験変数は鋼管径  $D$ , ならびに鋼管厚  $t$  である。最後に, 直接せん断力が作用する半円シアコネクタの応力状態について言及した。

## 2. HPS を配置した合成床版

### 2.1 概要

図-1 に HPS を用いた合成床版の概念図を示す。ここで, 図-1 に示す合成床版は, 底鋼板, 半円鋼管, スタッド, 補強鉄筋ならびにコンクリートから構成されている。底鋼板は型枠としてだけではなく, 架設時に作用する自重に対して抵抗する特徴を有している。底鋼板とコンクリートのずれに対して, 橋軸方向は HPS とスタッドが, 橋軸直角方向にはスタッドが抵抗する構造形式となっている。

### 2.2 重量比較

<sup>\*1</sup>神戸市立工業高等専門学校 都市工学科准教授 博(工) (正会員)

<sup>\*2</sup>近畿大学理工学部 社会環境工学科講師 博(工) (正会員)

<sup>\*3</sup>名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻助教 博(工)

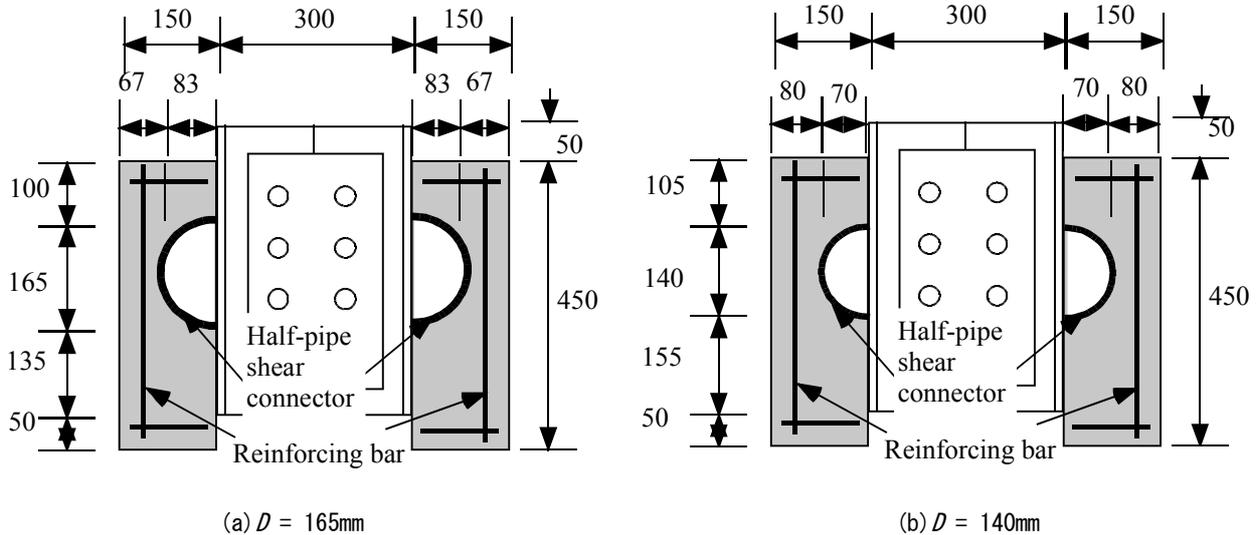
<sup>\*4</sup>神戸市立工業高等専門学校専攻科 都市工学専攻

表－１ 重量計算結果一覧

	ロビンソン型	形鋼タイプ	トラスジベルタイプ	みぞ型鋼床版 <sup>4)</sup>	本床版
床版厚(mm)	260	260	260	260	260
底鋼板厚(mm)	8.0	6または8	6.0	6.0	6.0
重量(kN/m <sup>2</sup> )	7.00	7.40	7.08	6.33	6.08
重量比	1.15	1.22	1.16	1.04	1.00

表－２ 供試体一覧

No.	Tag.	半円鋼管				$f'_c$ (MPa)
		直径	鋼管厚	$D/t$	$t/D$	
		$D$ (mm)	$t$ (mm)			
1	P165-45	165.2	4.5	36.7	0.0272	30.9
2	P165-50	165.2	5.0	33.0	0.0303	30.9
3	P165-60	165.2	6.0	27.5	0.0363	32.4
4	P140-40	139.8	4.0	35.0	0.0286	28.4
5	P140-45	139.8	4.5	31.1	0.0322	28.4
6	P140-60	139.8	6.0	23.3	0.0429	28.4



図－２ 供試体(奥行き幅300mm)

HPSを有する合成床版の重量が、従来のものと比較してどの程度軽量化されるかを定量的に把握する事を目的に、既報<sup>2)</sup>と同様の床版支間長6.0m、張出し長2.0m、床版厚260mm(底鋼板厚6mmを含む)、鋼管配置間隔300mm、HPSの直径165mm、鋼管厚6mmとして鋼構造物設計指針 Part B<sup>6)</sup>ならびに道路橋示方書<sup>7)</sup>に準拠した許容応力度設計法に基づく試設計を行った。なお、底鋼板の材質はSM400、コンクリートの設計基準強度 $f_{ck}$ 'は30MPa、HPSの間に溶接するスタッドの直径( $\phi$ )と間隔はそれぞれ16mm、300mmとした。

上記手法によって得られた1m<sup>2</sup>当たりの重量の計算結果を表－1に示す。また、参考として代表的な合成床版を列記している。さらに、最下段には、本研究で対象とした半円鋼管を配置した合成床版とそれぞれの合成床版との重量比を記述している。同表より、本研究で対象と

する合成床版は従来のものと比較して最大20%程度軽量化されることが分かった。

### 3. 実験方法

#### 3.1. 供試体の概要

供試体一覧を表－2に示す。供試体名は、HPSの直径 $D$ 、ならびに鋼管厚 $t$ から成り立っている。供試体はB300×H400のH形鋼(SS400相当)をウェブ中心で切断し、それらのフランジ部分に $D165\text{mm}$ (公称165.2mm)ならびに $D140\text{mm}$ (公称139.8mm)の鋼管断面を半分に切断したものをすみ肉溶接し製作した(図－2(a),(b)参照)。また、鋼管はJIS規格のものを用いており、径厚比 $D/t$ の範囲は23~37である。

供試体には、文献8)に記載されている補強筋を配置し、H形鋼フランジにグリスを塗布して摩擦の影響を除去し

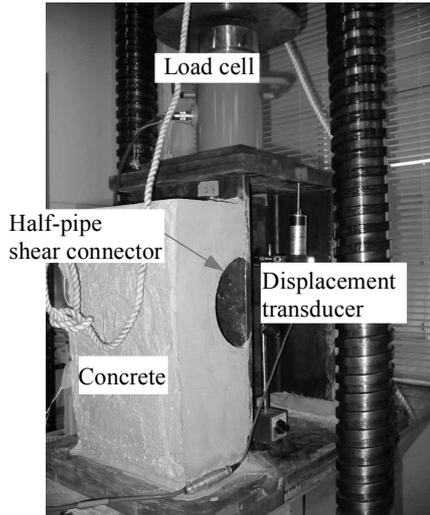


写真-1 载荷状態

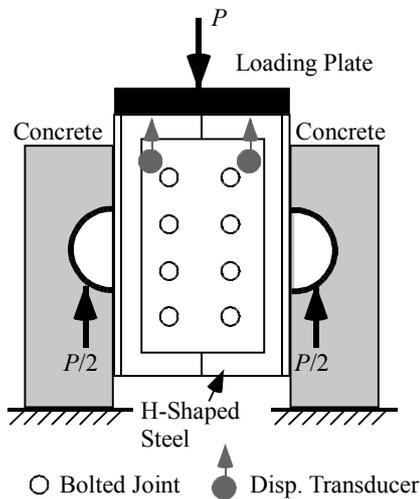


図-3 载荷方法

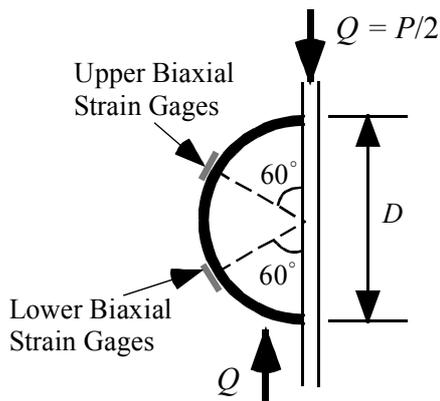


図-4 ひずみゲージ貼付位置

た後、コンクリートを打設した。養生後、切断されたH形鋼ウェブを2枚の添接板を用いて高力ボルトで摩擦接合し、静かに载荷台に設置後、セメントペーストでコンクリート底部を固定し、セメントペーストが硬化後H形鋼を押し抜くことにより、HPSに直接せん断力を作用さ

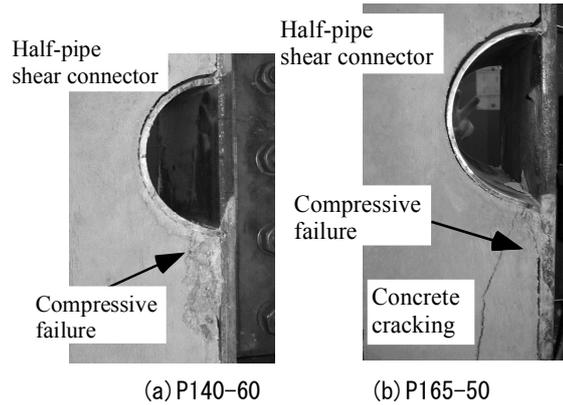


写真-2 HPS 近辺のコンクリートの破壊

せた。なお、载荷状態と载荷方法を写真-1、図-3にそれぞれ示す。

### 3.2 測定項目

供試体上部に2台の変位計を配置して、鋼とコンクリートとの相対変位を測定した。また、HPS表面のy軸から60°の点(Upper)、ならびに120°の点(Lower、図-4参照)に二軸ひずみゲージを貼付し、鋼管の周方向ならびに軸方向のひずみを測定した。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 破壊形式

得られた破壊形式の一例を写真-2に示す。全供試体の破壊形式には特に顕著な差異は見られなかったもののP140-60(写真-2(a))では、HPS下側のコンクリートが脆性的に破壊した。また、D165-50(写真-2(b))ではコンクリートの圧縮破壊とそれに伴う縦ひび割れも観察された。さらに、本実験での $f'_c$ は30MPa程度であるが、HPSは径厚比( $D/t$ )の大きさに関係なく、顕著な変形は観察されなかった。なお、HPS下側以外のコンクリートのひび割れは見られず、せん断補強筋が十分に配置された効果であると考えられる。

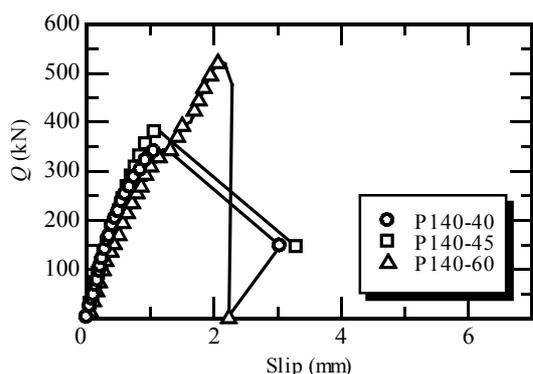
### 4.2 変形特性

図-5に作用せん断力 $Q(=P/2)$ と相対ずれ $\delta$ の関係を示す。ここで、図-5(a)は $D=140\text{mm}$ 、(b)は $D=165\text{mm}$ のものをそれぞれ示す。

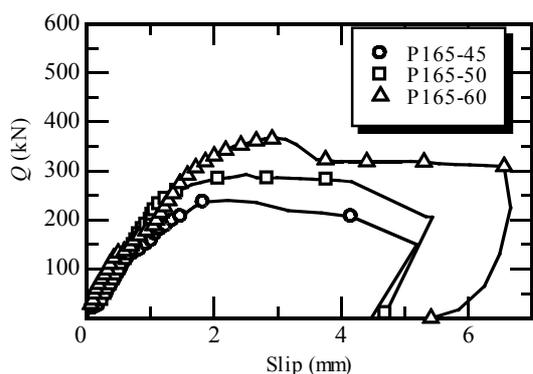
$D=140\text{mm}$ の供試体では、最大せん断力到達まで、ずれ剛性がほぼ一定の挙動を示しており、ずれが2mmまでに終局に至っている。すなわちこれはブロックジベルなどの剛なずれ止め<sup>9)</sup>の範疇に属すると考えられる。一方、図-5(b)は(a)と比してずれ剛性はやや低く、変形が進行するとともに、ずれ剛性が低下し、スタッドに類似した柔なずれ止め<sup>9)</sup>の挙動を示していることがわかる。さらに、当然のことながら、径が等しい供試体のもので比較すると、鋼材料と断面積の比が小さい、言い換えれば、径厚比が大きいほど変形の剛性が低下していることも分

表-3 実験結果

Tag	$P_u$ (kN)	$Q_u$ (kN)	$A(=BD/2)$ (mm <sup>2</sup> )	$\tau_{u1}$ (MPa)	$\tau_{u2}$ (MPa)	$\tau_{u1}/f'_c$	$\tau_{u2}/f'_c$
1 P165-45	480.2	240.1	24780	19.4	9.7	0.63	0.31
2 P165-50	585.1	292.5		23.6	11.8	0.76	0.38
3 P165-60	733.0	366.5		29.6	14.8	0.91	0.46
4 P140-40	688.9	344.5	20970	32.9	16.4	1.16	0.58
5 P140-45	772.2	386.1		36.8	18.4	1.30	0.65
6 P140-60	1047.6	523.8		50.0	25.0	1.76	0.88



(a)  $D=140\text{mm}$  供試体



(b)  $D = 165\text{mm}$  供試体

図-5 変形特性

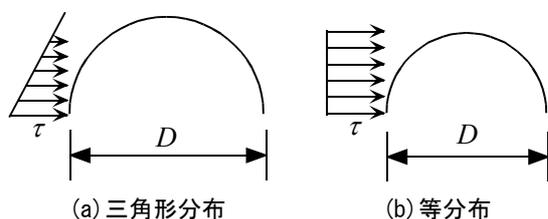


図-6 作用応力状態

かる。

### 4.3 直接せん断強度

#### (1) 概要

表-3に実験結果一覧を示す。表内 $P_u$ 、 $Q_u$ は最大荷重せん断強度( $P_u/2$ )であり、 $A$ はHPSの投影面積であり、幅 $B$ と半径 $r(=D/2)$ の積である。一般にスタッドのような柔なジベルの作用せん断応力状態は曲線分布とされてい

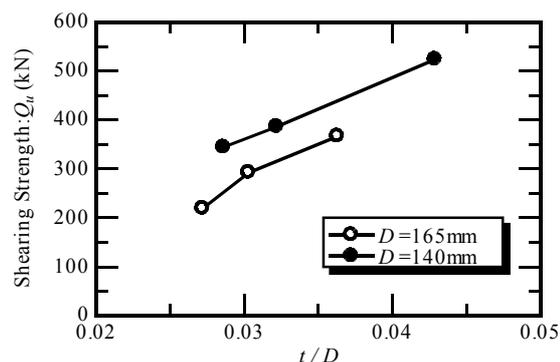


図-7 せん断強度と逆径厚比

る<sup>9)</sup>。ここでは簡略化するため、図-6に示すようにHPSに作用するコンクリートのせん断応力分布について柔な挙動を示す場合には、三角形分布、剛な挙動を示す場合には、長方形分布<sup>9)</sup>と仮定すると、前者の実験せん断強度 $\tau_{u1}$ 、ならびに後者の $\tau_{u2}$ は式(1)の通りとなる。

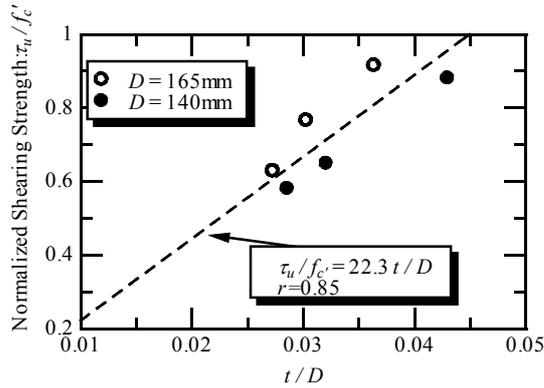
$$\tau_{u1} = \frac{4Q_u}{BD}, \quad \tau_{u2} = \frac{2Q_u}{BD} \quad (1a,b)$$

ここで、 $B$ は部材幅( $=300\text{mm}$ )、 $D$ は鋼管の直径、 $Q_u$ はせん断強度( $P_u/2$ )をそれぞれ示している。なお、実験せん断強度の分布形状は、台形分布なども考えられるが本論文では上記二分布について考察する。

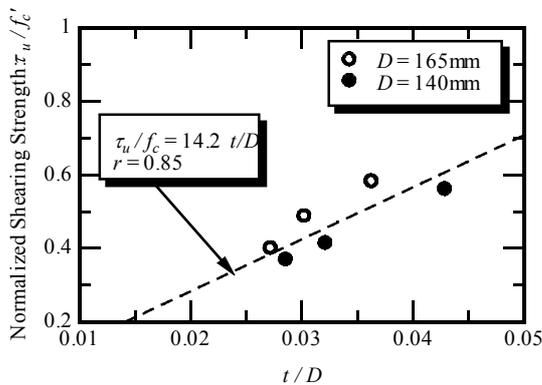
#### (2) せん断強度と逆径厚比

図-7にせん断強度 $Q_u$ と径厚比の逆数 $t/D$ (以下、逆径厚比とする)の関係を示す。 $D=140\text{mm}$ ならびに $D=165\text{mm}$ を比較すると、後者の方が支圧面積 $A$ が大きいにも関わらず、前者がせん断強度を上回った。これは、4.2変形性能で示したように、 $D=165\text{mm}$ 供試体の方が、 $D=140\text{mm}$ 供試体よりも柔な変形挙動を示すため、すなわち作用せん断応力の分布形状が異なるためであると考えられる。したがって、 $D=165\text{mm}$ の実験せん断強度は三角形分布と仮定した表-3の第6列目の $\tau_{u1}$ を、 $D=140\text{mm}$ のそれは、長方形分布と仮定した同表の第7列目の $\tau_{u2}$ を実験せん断強度( $\tau_u$ )とする。

つぎに、無次元化した実験せん断強度( $\tau_u/f'_c$ )と逆径厚比( $t/D$ )の関係を図-8に示す。ここで、図-8(a)は半円



(a) 投影面積による実験せん断強度



(b) 表面積による実験せん断強度

図-8 定式化したせん断強度と逆径厚比

鋼管の投影面積による実験せん断強度、(b)はその表面積( $\pi DB/4$ )により求めたものである。両者とも無次元化された実験せん断強度( $\tau_u/f'_c$ )と逆径厚比( $t/D$ )の間には相関関係を見ることができる。したがって、実験せん断強度  $\tau_u/f'_c$  と  $t/D$  を最小二乗法により、以下の関係が得られる。

$$\frac{\tau_u}{f'_c} = 22.0 \frac{t}{D}, \quad \frac{\tau_u}{f'_c} = 14.0 \frac{t}{D} \quad (2a,b)$$

ただし、 $0.02 < t/D < 0.05$  である。式(2)と実験値の相関係数は0.84となり、 $\tau_u/f'_c$ は $t/D$ を用いて良好に表せることが分かった。

### (3) 等価スタッド本数

本項では、投影面積による実験せん断強度(式(2))により算出されるHPSの実験せん断強度( $\tau_u$ )が、どれくらいのスタッド本数に相当するかを把握することを目的としている。まず、HPSと等価なスタッド本数を求めるために、スタッドの終局強度を、式(3)に示すFisherの終局強度式( $Q_u$ )<sup>10)</sup>を用いて算出した。すなわち、

$$Q_u = 0.5 A_s \sqrt{E_c f'_c} \quad (3)$$

表-4 等価スタッド本数

Tag	D16	D19	D22
P165-45	8.1	5.7	4.3
P165-50	9.0	6.4	4.7
P165-60	10.8	7.6	5.7
P140-40	14.3	10.2	7.6
P140-45	16.1	11.4	8.5
P140-60	21.5	15.2	11.4

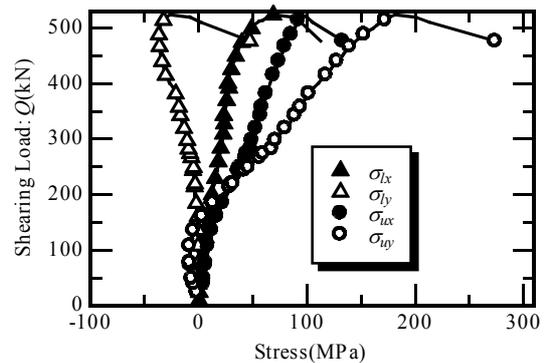


図-9 HPSの応力(P140-60)

ここで、 $A_s$ :スタッドの断面積であり、 $E_c$ :コンクリートのヤング係数、および $f'_c$ :圧縮強度はそれぞれ28GPa、30MPaを用いている<sup>11)</sup>。

表-4には式(3)より求めた1m当たりのD16、D19、D22の等価スタッド本数を示している。同表より、例えばP140-40では1mあたりD19のスタッド10本に相当しており、HPSはずれ止めとして十分に機能しているものと考えられる。ただし、HPSは、みぞ形鋼をシアコネクタとして用いた場合<sup>9)</sup>と同様に、部材軸直角方向に抵抗しないため、実際には底鋼板とコンクリートを上下に剥離する力に抵抗させるためにスタッドの配置は必要不可欠である。

### 4.4 半円鋼管表面の応力

ここでは、HPSの $y$ 軸から $60^\circ$ の上部の二軸ひずみゲージ(図-4内 Upper Biaxial Strain Gage)、 $y$ 軸から半時計回り $120^\circ$ の下部に貼付した二軸ひずみゲージ(図-4内 Lower Biaxial Strain Gage)より、応力の計算を行う。鋼管の肉厚は鋼管径に比べて薄いので、鋼管内に発生する応力は平面応力状態と考え、以下の通りである。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{pmatrix} = \frac{E_s}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_y$ はHPSの周方向(載荷軸)応力、 $\sigma_x$ はHPSの軸方向応力、 $\nu$ はポアソン比(=0.3)、 $E_s$ は鋼のヤング係数(200GPa)をそれぞれ示す。

図-9に典型例として、コンクリートの破壊が見られ

た P140-60 の作用せん断力  $Q$  と式(4)から得られた応力を示す。ただし、 $\sigma_{ix}$ 、 $\sigma_{iy}$  は HPS の  $y$  軸から  $60^\circ$  の点(Upper)、 $\sigma_{lx}$ 、 $\sigma_{ly}$  は  $y$  から  $120^\circ$  の点(Lower)の水平ならびに鉛直方向(軸方向)の応力である。同図より、 $Q = 100$  kN 周辺までは、それぞれの応力に差異が見られないが、それを越え、変形が進行すると HPS 下部の鉛直方向応力( $\sigma_y$ )は圧縮方向へ、上部のそれ( $\sigma_{iy}$ )は引張方向へ作用し、破壊と同時に  $\sigma_{iy}$  は急激に引張方向に増加している。これは、下部(Lower)はコンクリートからの直接せん断力を受けているため圧縮方向に作用し、それにより上部が引張を受けたものと考えられる。なお、水平方向(HPS の軸方向)応力は、上下ともほぼ同様の挙動を示していることが分かる。なお、D165mm シリーズでは、HPS にコンクリート圧縮破壊が見られた側の破壊と同時に、著しくひずみが増加するため、ひずみの計測が不可能であったことを付記する。

## 5. まとめ

本研究は、合成床版の軽量化をもたらしかつ、比較的製作が容易な鋼管の中心を切断した半円鋼管(半円シアコネクタ, HPS)のずれ止めとしての使用を提案し、そしてその直接せん断特性の把握を目的とした押抜きせん断実験を行い、HPS の(逆)径厚比を実験変数とした直接せん断特性について検討したものである。結論づけられる事項を列記すると以下の通りである。

- (1) HPS を底鋼板に溶接することにより、従来の合成床版と比較して、最大 20%程度の軽量化が可能であることを示した。
- (2) 得られた破壊形式は、HPS 下部のコンクリートが圧縮破壊するものであった。また、HPS 下部から底部へのひび割れも観察された。
- (3) HPS の変形特性は  $D=165$ mm の供試体では、変形が進行しながら最大せん断力へ到達する柔な挙動を示した。一方、 $D=140$ mm では、最大せん断力までずれ剛性の変化がほぼ見られない剛な挙動を示した。
- (4) 得られた作用せん断強度( $Q_u$ )と逆径厚比( $t/D$ )の関係は、コンクリート作用面積が小さい  $D=140$ mm の供試体が、 $D=160$ mm のものよりも大きな値となった。これは、上記(3)で示したように、HPS の変形特性が異なるためであると考えられた。
- (5) 上記(3)、(4)より、 $D=140$ mm 供試体では長方形分布、 $D=165$ mm 供試体では三角形と仮定し定式化した実験せん断強度( $\tau_u/f_c'$ )と逆径厚比  $t/D$  には良好な相関関係が見られた。したがって、 $t/D$  を変数とした HPS の直接せん断強度式を提案した。
- (6) 上記(5)にて求められた HPS の直接せん断強度式を、既往のスタッドの終局強度式を用いて等価スタッド

本数を算出したところ、HPS がずれ止めとしての強度を十分に保持していたことを示した。

- (7) HPS に貼付した二軸ひずみゲージより、弾性理論に基づく応力計算を行ったところ、HPS 下部の軸方向応力は直接せん断力により圧縮側へ、上部のそれは引張方向に作用していることを確認した。

**謝辞：** 載荷実験の実施に当たっては、神戸市立工業高等専門学校専攻科都市工学専攻に在籍された杉本義博君(現阪神高速技術(株))、神戸市立工業高等専門学校専攻科・都市工学専攻・清水優君、ならびに同都市工学科 5 年生の学生諸君にご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：デザインデータブック，pp. 78-82, 2006. 4.
- 2) 東山浩士, 上中宏二郎, 石川敏之, 有馬博人：軽量化した鋼・コンクリート合成床版の提案とはり試験体による基礎的実験，平成 18 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，I-70, 2006. 5.
- 3) 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，日本コンクリート工学協会，Vol. 29, No. 3, pp. 1333-1338, 2007. 6.
- 4) 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，日本コンクリート工学協会，Vol. 29, No. 3, pp. 1339-1344, 2007. 6.
- 5) 横田弘, 清宮理：鋼・コンクリート合成部材での形鋼によるずれ止めの耐荷力，港湾技研資料，運輸省港湾技術研究所，No. 595, pp. 3-24, 1987. 9.
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 Part B, 鋼構造シリーズ，1997. 9.
- 7) 日本道路橋協会：道路橋示方書・同解説 II, 鋼橋編，2002. 3.
- 8) 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.
- 9) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン，pp.86-96, 1989. 3.
- 10) Ollgaard, J. G. and Fisher, J. W.: Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, AISC Engineering Journal, Vol. 27, No. 8, pp. 55-64, Apr., 1971.
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002. 3.