

圧縮力と新旧コンクリート界面の角度がせん断伝達機構に与える影響

ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 正会員 工修 ○福田 圭祐  
 西日本旅客鉄道(株) 正会員 工修 湯浅 康史  
 神戸大学大学院 正会員 博(工) 森川 英典

Abstract : The author et al. proposed the original anchorage system of the external cable strengthening method for railway PC-I girder with narrow distance between adjacent main girders. To calculate load-carrying capacity of the anchorage, it is significant to evaluate shear transfer strength. However the influence of shear transfer strength is not clear enough, when the compressive force and the construction joint are not perpendicular. Therefore, this paper shows evaluation of shear transfer behavior using loading tests with specimens in which compressive force and the construction joint are not perpendicular. As a result, it was confirmed that composite shear force that add vertical shear force and horizontal shear force of specimens roughly accorded with design capacity based on the standard specifications for concrete published by JSCE.

Key words : construction joint, shear transfer strength, external cable, anchorage,

1. はじめに

PCI形桁に外ケーブル補強を行う場合には、定着体は主桁ウェブ側にコンクリートなどにより設ける方法が一般に用いられ、ウェブを貫通したPC鋼棒の緊張力により定着される。しかし、鉄道橋における多主PCI形桁は主桁間隔が狭く、従来構造の定着体を設けることが困難である。そこで、著者らは、主桁間隔の狭い多主PCI形桁に外ケーブル補強を適用するために、図-1に示すような桁間定着方式の開発を推進している<sup>1)</sup>。桁間定着方式は、主桁間にコンクリート製の定着体を構築し、鉛直方向のPC鋼材の緊張力によって、下フランジハンチ面における新旧コンクリートの界面（以下、新旧界面）の摩擦抵抗力により、外ケーブル緊張力に抵抗することを意図している。桁間定着方式の耐荷性能を評価するにあたり、摩擦抵抗面である下フランジハンチ面の新旧界面のせん断伝達機構を検証することが重要と考えられる。

既報<sup>2)</sup>において、新旧界面に圧縮力が垂直に作用する場合のせん断伝達機構について検討するために、図-2に示す新旧界面に圧縮力が垂直に作用する供試体（以下、Aシリーズ）を用いて、二面せん断実験を実施し、界面の圧縮応力、コンクリート強度、界面処理の有無がせん断伝達機構に与える影響を検討した。しかし、図-1に示す桁間定着方式では、下フランジハンチ面における新旧界面とPC鋼材との角度が垂直ではなく、圧縮力と新旧界面が角度を有する場合にせん断伝達機構に与え

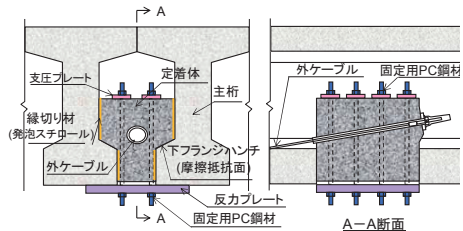


図-1 桁間定着方式の適用イメージ

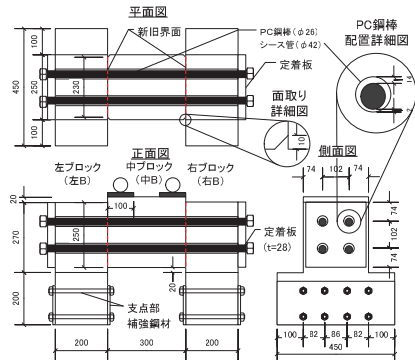


図-2 Aシリーズ供試体の形状<sup>2)</sup>

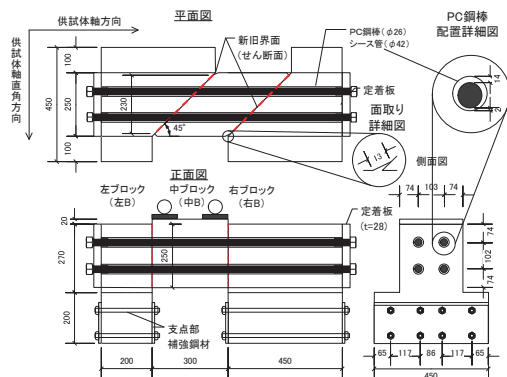


図-3 Bシリーズ供試体の形状

表-1 Bシリーズ供試体の種類

供試体 No.	新旧界面角度 (°)	PC 鋼棒 目標導入 緊張力 (kN)	コンクリート 目標圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )		界面 処理
			左右 B	中 B	
1	45	262	40		有
2		1049			

表-2 鋼材の材料特性

鋼材	呼び名	記号	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
PC 鋼棒	φ 26	SBPR930/1180	1217	1322
鉄筋	D10	SD345	384	563
	D6	SD345	378	558

表-3 コンクリートの配合

目標 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	水セメント W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )							
						水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		混和剤	
								川砂 S1	砕砂 S2	砕石 G1	砕石 G2	高性能 減水剤	AE 剤
40	20	12.0	4.5	47.0	48.0	160	340	429	434	477	477	1.77	0.051

る影響については 十分に明らかになっていない。

そこで、本稿では、圧縮力と新旧界面が角度を有する場合にせん断伝達機構に与える影響の基礎的検討として、定着体の橋軸直角方向の拘束条件は考慮せず、図-2に示したAシリーズから新旧界面の角度を変化させた供試体を別途作製して、二面せん断実験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の形状と種類

本実験では、既設PCI形桁下フランジハンチ面の角度を参考にし、図-3に示すように新旧界面とPC鋼棒の角度を45°とした供試体(以下、Bシリーズ)を2体作製した。なお、上述のようにBシリーズは橋軸直角方向の拘束条件は考慮せず、供試体軸直角方向の拘束は与えないものとした。そして、Aシリーズと同様に、水平方向のPC鋼棒の緊張により、新旧界面に圧縮力を作用させた後、載荷試験機の鉛直荷重を作用させた。

Bシリーズの供試体種類を表-1に示す。試験要因はPC鋼棒の導入緊張力とした。Aシリーズの界面垂直応力は、1~30N/mm<sup>2</sup>の範囲で設定しており、Aシリーズにて5N/mm<sup>2</sup>および20N/mm<sup>2</sup>の界面垂直圧縮応力を作用させるのに必要なPC鋼棒緊張力と同じ緊張力をBシリーズにそれぞれ導入した。なお、Bシリーズのコンクリート強度は、Aシリーズの一部の供試体と同様に、既設PC桁を想定して、40N/mm<sup>2</sup>とした。また、2体とも界面処理を施した。

### 2.2 供試体製作

Bシリーズは、Aシリーズと同様に、検討対象領域である下フランジハンチ面の新旧界面を模擬するために、まず既設コンクリートを模した左右ブロックを打設し、新旧界面にショットブラスト(噴射:アルミナ70kg/m<sup>2</sup>)による界面処理を行った。そして、実橋の既設コンクリートの状況を想定して界面での新旧コンクリートの過度の付着を抑止するため、2週間以上の期間を明け、新コンクリートを模した中ブロックを打設した。その後、載荷試験前に所定のPC鋼棒緊張力を導入した。供試体に用いた鋼材の材料物性を表-2に、コンクリートの配合を表-3にそれぞれ示す。

### 2.3 載荷試験方法

Bシリーズの載荷試験には、Aシリーズと同様にコンピュータ計測制御式の鉛直載荷試験機を用いた。載荷速度は、PC鋼棒緊張力が相対的に大きい供試体No.2は荷重制御方式により1kN/sとしたが、PC鋼棒緊張力が相対的に小さい供試体No.1は0.3kN/sとした。また、供試体No.1はポストピーク挙動を捉えることができる可能性があると考え、載荷途中で載荷速度0.01mm/sの変位制御方式に切り替えた。供試体の損傷は100kNごとに目視にて確認した。また、新旧界面に鉄筋等を配置していないことから、滑動は急激に生じると予想され、滑動量が概ね10mmに達した場合はその段階で載荷を終了することとした。載荷試験は供試体No.2, No.1の順に実施した。

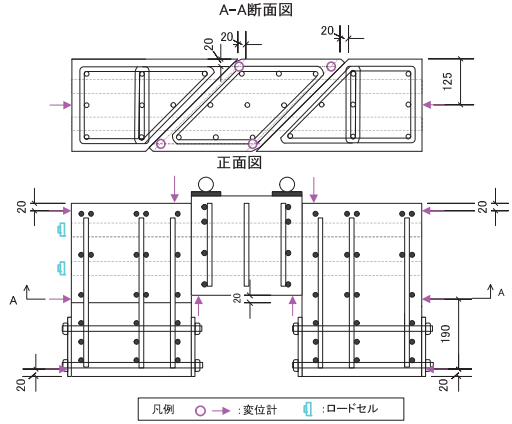


図-4 Bシリーズ計測項目

載荷試験時の計測項目は変位、PC鋼棒張力とし、変位計、ロードセルの設置位置を図-4に示す。

### 3. 二面せん断実験結果

#### 3.1 破壊性状と滑動荷重

Bシリーズの載荷試験結果とコンクリートの材料試験結果を合わせて表-4に示す。新旧界面の角度を垂直としたAシリーズは、主に、載荷荷重値が最大に達した後、鉛直方向への急激な滑動を生じる破壊状況であった。一方、Bシリーズの供試体No.2は、同じPC鋼棒緊張力を導入したAシリーズの供試体(載荷荷重の最大値1763kN)に比べて、非常に小さい載荷荷重(263kN)で写真-1に示すように水平方向への変位を伴い破壊した。小さい載荷荷重値で破壊に至った要因としては、図-5に示すようにプレストレスの水平分力が界面水平方向のせん断力に寄与し、界面水平方向にズレが生じたと推察される。

そこで、その後に載荷試験を実施した供試体No.1は、図-6に示す溝形鋼とM12ボルトを用いた拘束治具により、供試体軸直角方向を拘束し、界面水平方向のズレに伴う軸方向の短縮が生じないように

表-4 載荷試験結果

供試体 No.	PC 鋼棒 目標 導入 緊張力 (kN)	PC 鋼棒 載荷前 導入 緊張力 (N/mm <sup>2</sup> )	載荷 荷重の 最大値 V <sub>exp</sub> (kN)	滑動 性状	滑動以外の損傷 および発生荷重	コンクリート材料試験結果					
						左右 B			中 B		
						圧縮 強度 f <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	弾性 係数 E <sub>c</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	引張 強度 f <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮 強度 f <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	弾性 係数 E <sub>c</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	引張 強度 f <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
1	262	263	640	急激	中 B 曲げひび割れ <sup>※1</sup> :600kN	46.3	33.9	3.60	46.1	34.7	3.68
2	1049	1012	263	急激	損傷なし	53.0	34.9	3.76	49.3	36.1	3.42



写真-1 水平ずれ変位(供試体 No. 2)

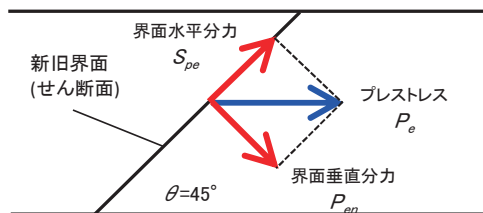


図-5 新旧界面に作用する分力の模式図

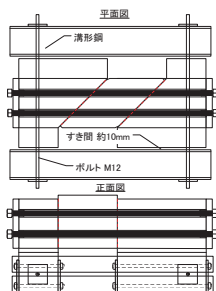


図-6 拘束治具 (供試体 No.1 載荷時)

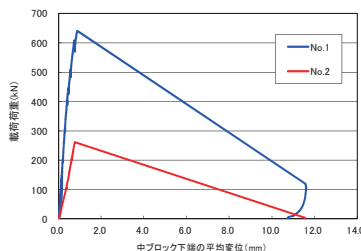


図-7 荷重—中ブロック鉛直方向変位関係

配慮して実験を行った。なお、ボルトのナットは手締めで固定した。供試体No.1の載荷荷重の最大値は、供試体No.2に比べて、大きかった。

次に、図-7に各供試体の荷重と中ブロック鉛直方向変位の関係を示す。変位は中ブロック下端に設置した4つの変位計の平均値を用いた。載荷初期の傾きに注目すると、供試体No.1に比べて、供試体No.2の傾きが小さくなっている。なお、初回の滑動量は、供試体No.1とNo.2で有意な差は確認できなかった。

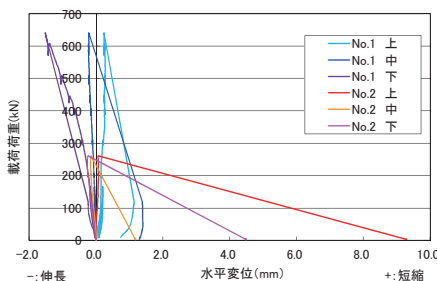


図-8 荷重—水平変位関係

また、図-8に荷重と軸方向水平変位の関係を示す。

図-8中の水平変位は、左右の水平変位を合計して算出した供試体の水平短縮量を示している。供試体No.1とNo.2ともに、載荷荷重の増加に応じて、上側が短縮方向に、下側が伸長方向に変位する傾向が見られる。これは、供試体の曲げの影響と考えられる。また、供試体No.1とNo.2ともに最大荷重に達した後、中段や下段に関しても短縮方向に変位している。特に、供試体No.2が短縮方向への変位が大きい傾向にあり、これは供試体No.1と異なり、拘束治具を用いず、界面水平方向のズレに伴う軸方向の短縮を抑制していないことに加え、供試体No.1に比べて、プレストレスが大きいことに伴い、界面水平方向の分力が大きく作用していたためと考えられる。

### 3.2 PC 鋼棒張力の変化

図-9にPC鋼棒張力変化量と載荷荷重の関係を示す。PC鋼棒の張力は上側と下側のPC鋼棒に区分し、2本の平均値を用いた。上述のように、載荷荷重の増加に応じて、供試体の曲げの影響により、上側のPC鋼棒の張力が低下し、下側のPC鋼棒の張力が増加する傾向が見られる。また、供試体No.1では、ある荷重段階から上側と下側のPC鋼棒ともに張力が増加する方向に変化する挙動が確認できる。これは、拘束治具により、界面水平方向のズレに伴う軸方向の短縮を抑制していたことに加えて、新旧界面の微細な凹凸を乗り越えるときに新旧界面が開く現象(例えば<sup>3)</sup>)によって、PC鋼棒の定着間距離が増大したためと考えられる。

一方、供試体No.2は載荷荷重の最大値付近から上側と下側のPC鋼棒ともに張力が低下する方向に変化している。これは、界面の水平方向への微小な滑動が生じ、その影響によって供試体が軸方向に短縮したためと考えられる。

次に、滑動直前のPC鋼棒張力と載荷前のPC鋼棒張力の比を図-10に示す。ここでのPC鋼棒張力は、曲げによる張力変化の影響を低減するために、4本のPC鋼棒張力の合計値を用いた。

図-10より、供試体No.1は、滑動直前の張力と載荷前の初期張

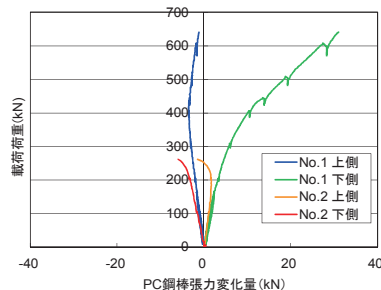


図-9 PC 鋼棒張力変化量

力の比は1.2程度となっており、上述のように界面での開口の影響により、PC鋼材張力の合計値が増加したと考えられる。

一方、供試体No.2では、滑動直前の張力と載荷前の初期張力の比は1以下となっている。これは、上述のように界面の水平方向への微小な滑動が生じ、供試体が軸方向に短縮したことによって、PC鋼材張力の合計値が減少したと考えられる。また、供試体No.2は、PC鋼棒の張力が減少したことによって、低い荷重段階で破壊に至った可能性が考えられる。

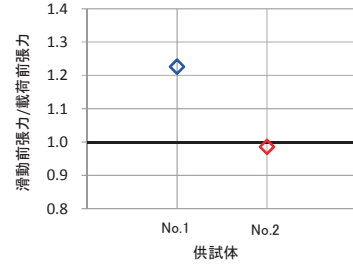


図-10 PC 鋼棒張力比

### 3.3 新旧界面に作用する合成せん断力

Bシリーズにおいては、破壊時に界面水平方向のズレを生じていたことから、図-5に示したようにPC鋼棒の緊張により、界面水平方向の分力によるせん断力が作用していたと推察される。また、これに加えて、界面には載荷荷重による鉛直方向のせん断力が作用していたと考えられる。そこで、式(1)に示すように界面に界面水平方向の分力と載荷荷重をベクトル加算した合成せん断力が作用していると仮定して、両供試体の滑動直前の合成せん断力を算出した。なお、PC鋼棒のプレストレスには各供試体における滑動前の4本のPC鋼棒張力の合計値を用いた。

$$S_{max} = \sqrt{S_v^2 + S_{pe}^2} \quad (1)$$

ここに、 $S_{max}$ ：合成せん断力、 $S_v$ ：載荷による鉛直方向せん断力、 $S_{pe}$ ：界面水平方向分力

そして、Aシリーズにおいて、界面垂直応力が  $10\text{N/mm}^2$  までの範囲の実験値を精度よく評価していた、式(2)に示すコンクリート標準示方書のせん断伝達耐力評価式<sup>4)</sup>(以下、示方書式)を用いて、載荷荷重の最大値および滑動前の合成せん断力とそれぞれ比較を行った。なお、式(2)中の界面に作用する垂直圧縮応力の算出には、合成せん断力と同様に滑動前の4本のPC鋼棒張力の合計値を用いた。また、新旧界面(せん断面)の断面積  $A_c$  は、図-3に示した新旧界面の断面積(赤線部)からシース( $\Phi 42\text{mm}$ )の4本分の断面積を差し引いた値とした。

$$V_c = \mu \times (f'_c)^b \times (\sigma_{nd})^{1-b} \times A_c \quad (2)$$

ここに  $V_c$ ：新旧界面の設計せん断伝達耐力(kN)  $\mu$ ：新旧界面の摩擦係数=0.45

$f'_c$ ：コンクリートの圧縮強度(材料試験の平均値)=48.7 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{nd}$ ：新旧界面に作用する垂直圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

(安全に評価するため通常圧縮応力に乗じる 1/2 は乗じてない)

$A_c$ ：新旧界面(せん断面)の断面積=73480mm<sup>2</sup>

$b$ ：面性状を表す係数=0.5(界面処理有)

両供試体の滑動前の合成せん断力と示方書式による耐力の算出結果を表-5に示す。また、実験値と示方書式との比較を図-11に示す。供試体 No.1 と No.2 の載荷荷重の最大値はともに、示方書式に比べて、小さくなっている。特に、供試体 No.2 の方が両者の乖離が大きく、示方書式の約 18%となっている。この要因としては、供試体 No.2 では、供試体 No.1 に比べて、プレストレスが大きく、それゆえ相対的に大きな界面水平方向のせん断力が作用しており、載荷荷重のみでは界面に作用しているすべてのせん断力を過小評価しているためと考えられる。一方、合成せん断力は、供試体 No.1 と No.2 とともに、示方書式とほぼ一致しており、供試体 No.2 においても、両者の差は 1%以下となっている。

したがって、圧縮力と新旧界面が角度を有する場合のせん断伝達耐力を求める場合は、新旧界面に

表-5 滑動前の合成せん断力と示方書式の耐力算出結果

供試体 No.	滑動前 プレストレス $P_e$ (kN)	界面垂直 方向分力 $P_{en}$ (kN)	界面 垂直応力 $\sigma_{nd}$ (N/mm <sup>2</sup> )	発生せん断力			示方書式 による せん断伝達耐力 $V_c$ (kN)
				界面水平 方向分力 $S_{pe}$ (kN)	鉛直方向 せん断力 (載荷荷重最大値) $S_v$ (kN)	合成 せん断力 $S_{max}$ (kN)	
1	322.8	228.3	3.11	228.3	319.9	393.0	406.9
2	997.6	705.4	9.60	705.4	131.4	717.5	715.0

作用するプレストレスの水平分力の影響を考慮する必要があると考えられる。特に、プレストレスが大きいほど、水平分力の影響は大きくなると推察される。また、実験値と示方書式との比較結果より、圧縮力と界面が角度を有する場合でも界面垂直応力が10N/mm<sup>2</sup>以下までの範囲では、示方書式によって界面に作用する水平分力を考慮した合成せん断力に対する耐力を評価できる可能性が推察される。

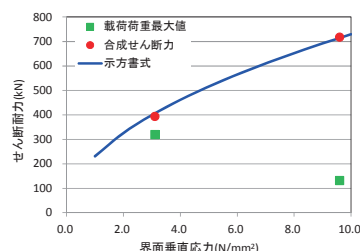


図-11 実験値と評価式との比較

#### 4. まとめ

圧縮力と新旧界面が角度を有する場合にせん断伝達機構に与える影響を検証することを目的とし、二面せん断実験を実施した。得られた知見を以下のとおりである。

- ・圧縮力と新旧界面が角度を有する場合のせん断伝達耐力を評価する場合は、新旧界面に作用するプレストレス力の水平分力の影響を考慮した合成せん断力にて評価する必要があると考えられ、特に、プレストレス力が大きいほど、水平分力の影響は大きくなると推察された。
- ・コンクリート標準示方書のせん断伝達耐力式に基づく計算値は、界面垂直応力が10N/mm<sup>2</sup>以下までの範囲において、新旧界面に作用するプレストレス力の水平分力を考慮した合成せん断力に対する耐力を精度よく評価していた。

#### 5. おわりに

本実験では、定着体の橋軸直角方向の拘束条件は考慮しなかったが、実橋梁に桁間定着方式を適用した場合、定着体の橋軸直角方向のズレは主桁により拘束される可能性が考えられる。今後は、定着体の拘束条件も考慮して、検討を進めていく予定である。

本実験に実施するにあたり、株式会社ピーエス三菱に多大なご協力を賜りました。深く感謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、「持続可能な鉄道コンクリート構造物に関する検討委員会」((公社)日本材料学会)の委員各位より多数のご助言を賜りました。各位に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 湯浅, 木戸, 藪田, 森川: 主桁間隔の狭いPCI形桁における外ケーブルの桁間定着に関する実験的検討, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.311-316, 2013.10.
- 2) 湯浅, 濱田, 河村, 森川: 新旧コンクリート界面のせん断伝達機構に関する実験的検討, 第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.35-40, 2014.10.
- 3) 李, Teng Boon, 前川: せん断変形を伴うコンクリート破壊域の軟化特性と構成式, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻 第2号, pp.103-108, 1987.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2012.3.