

## 有開口プレテンション梁の曲げせん断実験

(株)竹中工務店 正会員 工修 ○高津比呂人  
 (株)竹中工務店 工博 木村 秀樹

### 1. はじめに

日本建築学会プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説<sup>1)</sup> (以下, PC規準) では梁に開口を設ける際の設計法が定められているが, PC規準で定められている開口部補強法では, 鉄筋コンクリート (以下, RC) 梁の開口補強には有効であるとされている開口周囲の斜め筋による補強の効果を見込むことができない設計体系となっているのが現状である。一方, 筆者らはこれまでに斜め筋をプレストレストコンクリート (以下, PC) 梁の開口部補強に用いた際の補強効果を把握するため, 直径D/3およびD/2.5 (D: 梁せい) の円形開口を有するPC梁実験を行い, 斜め筋が有効であることを確認してきた<sup>2,3)</sup>。本報では, 斜め筋で開口部を補強することにより開口部せん断破壊を防止した有開口長スパン梁の, 長期荷重+地震荷重下の性状を確認するための曲げせん断実験を実施したのでこれを報告する。

### 2. 実験概要

#### 2. 1 試験体

試験体の配筋を図-1に示す。通常, プレキャスト (以下, PCa) 梁を柱とプレストレスにより圧着接合する場合, 梁端を貫通するのはPC鋼材のみとなる。PC鋼材はRC梁の主筋より断面の中心に近い位置に配置されるため, その曲げ耐力はRC梁よりも小さくなる場合がある。また, PC梁は原点指向性が高い一方, 履歴吸収エネルギーはRC梁よりも小さくなる。そこで本実験では, 試験体の中央部をプレテンションPCaPC部材, 端部をPCaRC部材とし, 通常のRC梁部材と同等の曲げ耐力と履歴吸収エネルギー性能を付与することを意図した。梁断面は240mm×500mm, 中央のPCaPC部材長が3000mm, 端部PCaRC部材の部材長がそれぞれ980mm, 接合部には20mmの目地を設け, PCaPC梁部材の主筋とPCaRC部材の主筋はスリーブ継手で接合した。PCaRC部材の接合面にはコッターを設けた。中央PCaPC部材には既往の実験<sup>3)</sup>でせん断耐力が確認できた直径208mm (D/2.4) の開口を6ヶ所 (開口間隔1D), 端部PCaRC部材には慣例に従い<sup>4)</sup>直径165mm (D/3) の開口をそれぞれ2ヶ所 (開口間隔1D) 設けた。開口周囲の補強は, 市販の開口補強金物を用いたものと斜め補強筋による補強<sup>5)</sup>の2種類とした。中央部材のプレストレスト力は, φ15.2mmインデント付の7本よりPC鋼より線を下端に4本, 上端に2本配置してプレテン

表-1 材料試験結果 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

	$\sigma_y$	$E_s$	$\sigma_t$
PC鋼より線φ15.2	1854.1*	$2.23 \times 10^5$	1917.6
主筋D19	528.3	$1.91 \times 10^5$	725.0
補強筋D6	328.5	$1.89 \times 10^5$	497.4
開口補強金物S6	978.7*	$1.88 \times 10^5$	1204.2
斜め補強筋S10	1033.5*	$1.96 \times 10^5$	1193.9
	$\sigma_B$	$E_c$	$\sigma_{ct}$
コンクリート	110.7	$4.62 \times 10^4$	3.55
目地モルタル	128.8	-	-

$\sigma_y$ : 鉄筋降伏強度 (\*は 0.2%オフセット値),  $E_s$ ・ $E_c$ : 鉄筋・コンクリートヤング係数,  $\sigma_t$ : 鉄筋引張強さ,  $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度,  $\sigma_{ct}$ : コンクリート割裂引張強度

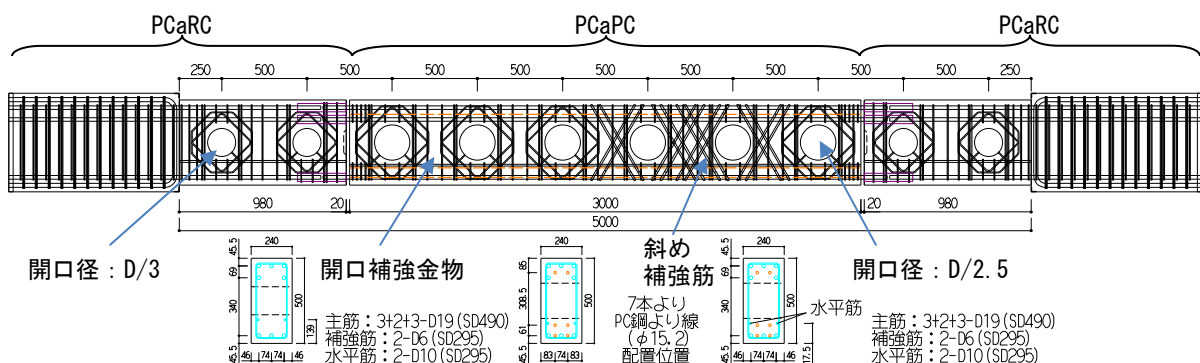


図-1 試験体配筋 (単位: mm)

ション方式により導入した。試験時の鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を表-1に示す。

### 2.2 プレストレス導入力

PC鋼材のひずみ分布を図-2に示す。図より緊張力の伝達長は215mm (14φ) ~ 450mm (30φ)の間にあると考えられる。また、PCaPC梁部分中央のひずみゲージの値の推移を図-3に示す。試験体中央部分のリリース直前のひずみ値に対する実験開始時 (リリースから41日後) のひずみ値の割合は、平均で0.915であった。

実験時の梁中央部での縁応力度をPC鋼材の計測ひずみから換算した結果、中実部 (開口のない部分) ・上縁が3.3N/mm<sup>2</sup>, 中実部 ・下縁が10.5N/mm<sup>2</sup>, 開口部 ・上縁が7.9N/mm<sup>2</sup>, 開口部 ・下縁が15.6N/mm<sup>2</sup>であった。

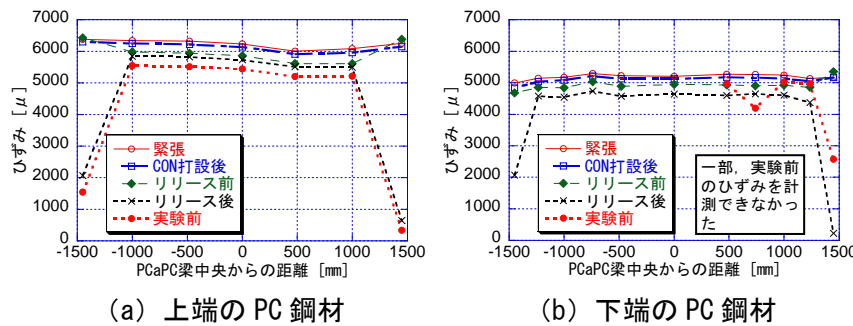


図-2 PC鋼材のひずみ分布

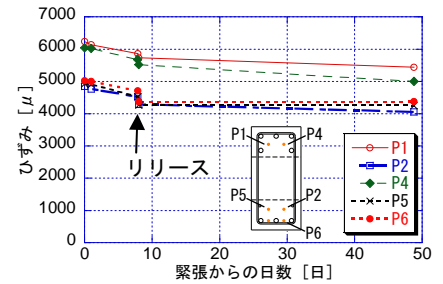


図-3 PC鋼材 (PCaPC梁中央部) のひずみの推移

### 2.3 加力

加力装置を図-4に示す。実験は2つのステップで実施した。まず、長期荷重時性能確認実験として、中央下端のプレストレス荷重がキャンセルされる荷重まで加力を実施 (図-5 (a)) し、そのときのひび割れ状況を確認した。次に長期荷重を一定 (中央下端のプレストレス荷重がキャンセルされる荷重) に保ったまま、地震時を想定した逆対称曲げモーメントを漸増载荷 (図-5 (b)) した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 長期荷重載荷実験

長期荷重載荷実験では、梁端に曲げひび割れが発生すると同時にPCaRC梁部分の開口部に斜めひび割れが発生した。その後PCaPC梁部分の開口部にも斜めひび割れが、PCaRC梁に近い側から順次発生した。ピーク時 (図-5 (a)) 中のP=144kN, V=348kN) の中央たわみは8.2mm, PCaRC梁部分の最大ひび割れ幅は0.25mm, PCaPC梁部分の最大ひび割れ幅は0.08mmであった。長期荷重載荷実験ピーク時のひび割れ発

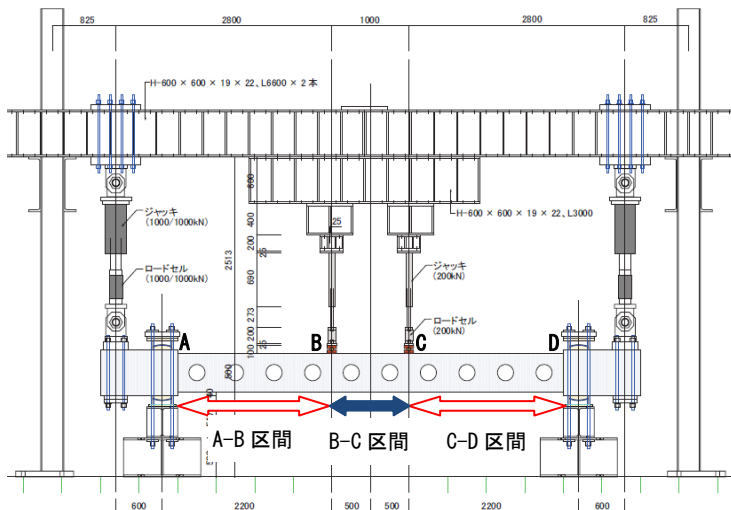
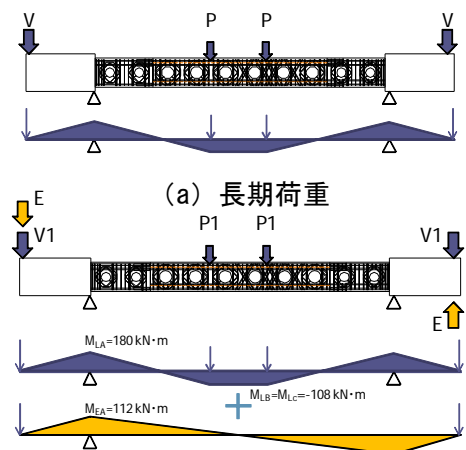


図-4 加力装置



(b) 長期荷重+地震荷重

図-5 モーメント図

生状況を写真-1に示す。等曲げ区間(図-4に示すB-C区間)にはひび割れが発生しなかった。

中央たわみと、中央の2つのジャッキ荷重の平均値との関係を図-6に示す。図には、端部が中実断面かつ弾性体と仮定して算定した中央たわみと中央のジャッキ荷重との関係および開口部ひび割れ発生荷重の実験値と計算値<sup>3)</sup>を併せて示した。図より、初期の剛性は一致していること、曲げひび割れ発生荷重およびPCaRC梁部分の開口部ひび割れ発生荷重の実験値は計算値を下回っていることがわかる。一方で、PCaPC梁部分の開口部ひび割れ発生荷重の実験値は計算値を大きく上回っていることが確認できた。

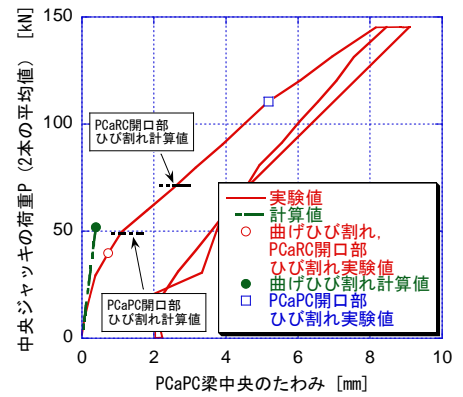


図-6 荷重-中央たわみ関係



写真-1 長期荷重時ひび割れ発生状況

### 3. 2 長期荷重+地震荷重載荷実験

長期荷重+地震荷重載荷実験では、3.1節に示したピーク時の長期荷重を維持したまま、梁に逆対称曲げモーメントを加力した。図-4に示すA-B~C-Dの各区間のせん断力と部材角の関係を図-7に示す。また、A端およびD端の梁端の曲率とせん断力との関係を図-8に示す。図には梁端曲げ終局強度計算値に相当するせん断力を一点鎖線で示した。図-7の各区間のせん断力と部材角の関係は、地震荷重載荷開始点を始点として描画しているため、A-B区間では+144kN、B-C区間では0kN、C-D区間では-144kNが基点となる。

両梁端とも長期荷重による正曲げモーメントが大きいため、地震荷重を受けても常に上端引張となり、負曲げを受けない。そのため、梁端曲率も正側のみで履歴を描いているが、主筋(1段筋および2段筋)降伏後、梁端曲げ終局強度計算値に相当するせん断力188.5kNを超えて十分な靱性を発揮して

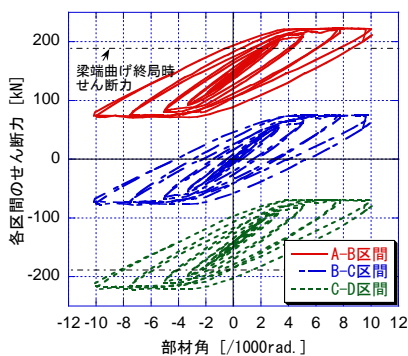
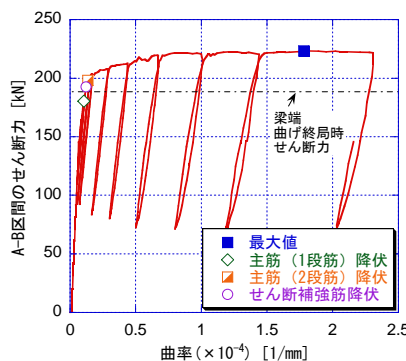
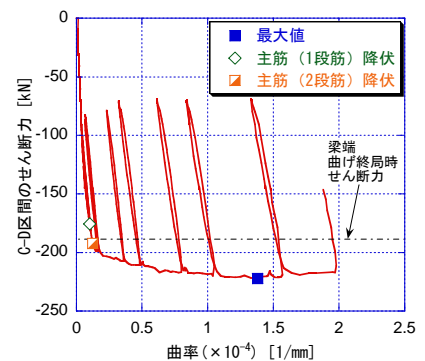


図-7 各区間のせん断力と部材角の関係



(a) A端



(b) D端

図-8 せん断力と梁端曲率の関係

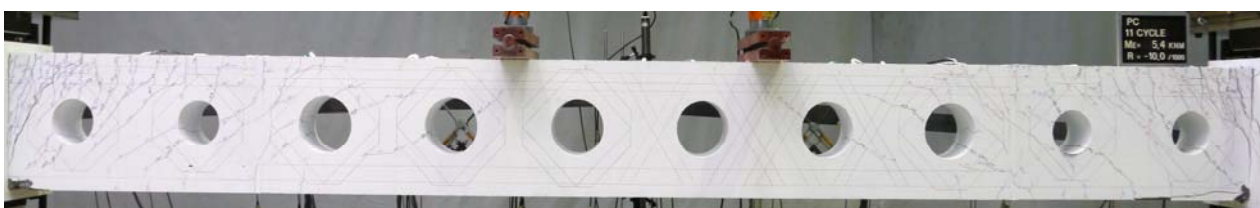


写真-2 部材角-10/1000rad. 時ひび割れ発生状況

いたことがわかる。加力の進行につれ、開口部に斜めひび割れが発生したが、等曲げ区間 (B-C区間) にはほとんどひび割れが発生しなかった。梁端上端のひび割れが拡大し、梁端下端に圧壊が生じたため、部材角±10/1000rad. の繰り返し載荷を終えた後、加力を終了した。開口部分でのせん断破壊は生じなかった。残留ひび割れ幅はPCaRC梁部分の最も大きいところで4.0mmであったのに対し、PCaPC梁部分では最大でも0.25mm程度であった。写真-2に部材角-10/1000rad. 時のひび割れ発生状況を示す。

せん断力とせん断補強筋ひずみの関係を図-9に示す。図にはひずみ計測位置を併せて示した。PCaRC梁部分のせん断補強筋 (S1~S5) には一部降伏が見られた。一方、PCaPC梁部分のせん断補強筋 (S9~S18) は、開口の上部も含めて降伏は見られなかった。開口補強金物 (D1~D8) や斜め筋 (D9~D12) は、PCaRC梁部分でややひずみが大きくなったものがあったが弾性範囲に留まり、PCaPC部分ではほとんどひずみ変動しない結果となり、開口補強金物と斜め筋の差も見られなかった。また、紙面からは割愛したが、PC鋼材のひずみ変動もほとんど無かった。

表-2に実験値と計算値の比較を示す。PC規準<sup>1)</sup>の開口部せん断耐力計算値は実験結果をかなり過小評価している。これは、現行のPC規準の計算値が開口上下の弦材のせん断耐力の和として評価されており、本試験体程度のせん断補強筋量では耐力があまり見込めないからである。本実験の範囲では、筆者らの提案した式<sup>2,3)</sup>により開口部でせん断破壊しないように設計しておけば、開口部でのせん断破壊を防止できることが確認された。また、参考に浜原らの提案式<sup>6)</sup>による開口部せん断耐力計算値および一般部 (無開口部) のせん断耐力計算値<sup>1)</sup>を示す。浜原らの提案式でも安全側評価となることが確認できるが、一般部のせん断耐力に比べ大きい値となっている。

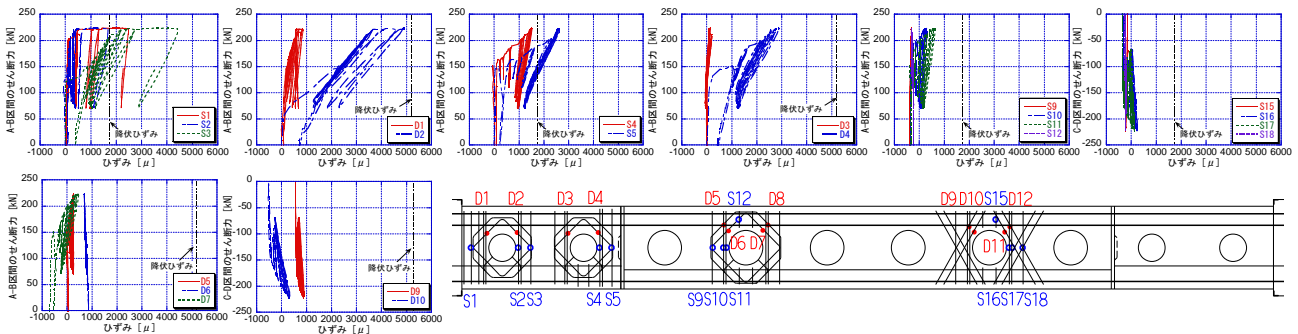


図-9 せん断力と補強筋ひずみの関係およびひずみ計測位置 (D8, D11, D12 は計測不能)

表-2 実験値と計算値の比較 (単位: kN)

	最大せん断力 (実験値)	開口部せん断耐力(計算値)				一般部せん断耐力 (PCaPC部計算値 <sup>1)</sup> )
		PCaRC部 <sup>3)</sup>	PCaPC部(金物) <sup>2,3)</sup>	PCaPC部(斜め筋) <sup>2,3)</sup>	PCaPC部 <sup>1)</sup>	
A-B区間	223.3	267.9	238.5(300.0)	246.5(300.8)	48.5	1015.1(554.5)
B-C区間	-78.1	-	244.8(310.2)	253.3(318.7)		
C-D区間	-222.1	267.9	238.5(300.0)	246.5(300.8)		

※PCaPC部 (金物) および PCaPC部 (斜め筋) の括弧内の数値はプレストレスによるせん断耐力の上昇を見込んだ場合、PCaPC部 (浜原式) の括弧内の数値はコンクリート強度を 60N/mm<sup>2</sup> で頭打ちとした場合、一般部せん断耐力は PC 規準<sup>1)</sup> の 71.1 式の計算値で括弧内は 71.2 式の計算値

4. まとめ

提案した開口部せん断補強法で補強することにより、開口部でのせん断破壊を防止し、曲げ降伏形となる有開口長スパン梁部材が実現できることを実験により確認した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，1998
- 2) 高津比呂人，木村秀樹，丹野吉雄，渡邊史夫：有開口PC 梁の開口部せん断耐力に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.52，No.4，pp.78-86，2010
- 3) 高津比呂人，木村秀樹，宮内靖昌：軸力を導入した有開口梁のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.34，No.2，pp.187-192，2012
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010
- 5) 宮内靖昌，毛井崇博，高津比呂人，麻生直木，三村麻里：斜め筋を用いて大開口を補強したRC 有孔梁の力学性状に関する研究 その1・その2，日本建築学会学術講演梗概集，構造IV，pp.207-210，2007
- 6) 浜原正行，浜戸昇，蔵田富雄，嶋口靖彦：プレストレストコンクリート有孔梁の終局強度設計法の提案，プレストレストコンクリート，Vol.54，No.5，pp.44-50，2012