

高強度あばら筋を用いた PCaPC 梁のせん断耐力評価に関する研究

京都大学工学研究科 正会員 ○李 在満  
 神戸大学工学研究科 正会員 谷 昌典  
 京都大学工学研究科 正会員 西山 峰広

1. はじめに

プレキャスト部材を、プレストレスによって圧着接合するプレキャストプレストレストコンクリート構造 (以下、PCaPC 構造) は、その高い施工性と構造性能から、数多くの建築物に適用されている。PCaPC 建築物では施工の点から、短スパン梁も PCaPC とされることが多く、せん断に対する検討が必要である。せん断補強筋は過密配筋を避けるため、高強度化が進んでいる。しかし、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」(以下、PC 規準)のせん断耐力式では、せん断補強筋の降伏点強度に  $295\text{N/mm}^2$  という上限値を設けているため、高強度せん断補強筋を有効に利用できない。

本研究では、設計目標強度  $60\text{N/mm}^2$  のコンクリートと、規格降伏点強度  $785\text{N/mm}^2$  の高強度せん断補強筋を用いて製作した PCaPC 圧着梁部材に対する静的載荷実験に基づいて、高強度せん断補強筋を用いた PCaPC 梁部材のせん断耐力評価を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験では、PCaPC 圧着梁部材のせん断性状の把握が主目的であるため、規格材料強度に基づいて、曲げ降伏に先行してせん断破壊が発生するように試験体を設計した。図-1 に示すように試験体のせん断力  $Q$ —部材変形角  $R$  関係曲線を求め、この曲線上で曲げ降伏点に到達する以前にせん断強度に達するように設計した。せん断強度の算定には日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針」せん断強度式 (以下、靱性指針式) を用いた。

実験変数は 1) せん断スパン比、2) せん断補強筋量・配筋形式とした。表-1 に試験体諸元を、図-2 及び図-3 に試験体の配筋詳細及び試験区間断面を示す。試験体断面は  $300\text{mm} \times 400\text{mm}$  の長方形で、試験区間長さ  $L$  は、 $800\text{mm}$ 、 $1200\text{mm}$ 、及び  $1600\text{mm}$  である。梁部分とスタブ部分をそれぞれ別々に打設し、厚さ  $20\text{mm}$  の高強度無収縮モルタルを介して、2 組の PC 鋼材を用いてポストテンションにより一体化した。PC 鋼材には SEEE 工法 F 型ケーブルを使用した。なお、導入緊張力の関係で、 $\phi 12.7\text{PC}$  鋼より線 7 本で構成される F130 の F 型ケーブルにおいて、より線 1 本を切断して使用した ( $7\text{S}12.7 \rightarrow 6\text{S}12.7$ )。PC 鋼材の被り厚は  $100\text{mm}$  とし、PC シースには SF-1065 (内径  $65\text{mm}$ ) を使用した。軸方向普通鉄筋には、D10 異形鉄筋 (SD295A) を、せん断補強筋には溶接閉鎖型 S6 高強度丸鋼 (KSS785) を使用した。せん断補強筋の折り曲げ直径は  $24\text{mm}$  ( $=4d$ ) とし、中子筋は  $180$  度フックで定着した。軸方向組立筋及びせん断補強筋の被り厚は、それぞれ  $33\text{mm}$  及び  $20\text{mm}$  とした。

表-2~表-6 は本実験で用いたコンクリート、目地モルタル、PC グラウト、鉄筋および PC 鋼材の材料

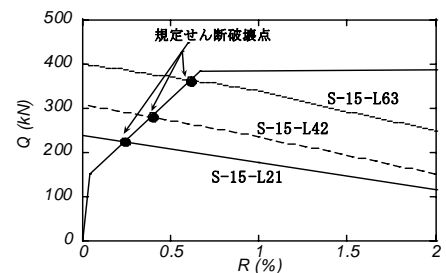
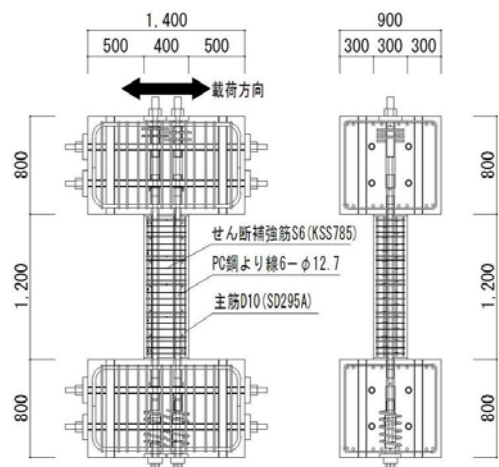


図-1 設計せん断耐力 (a/D=1.5 の場合)

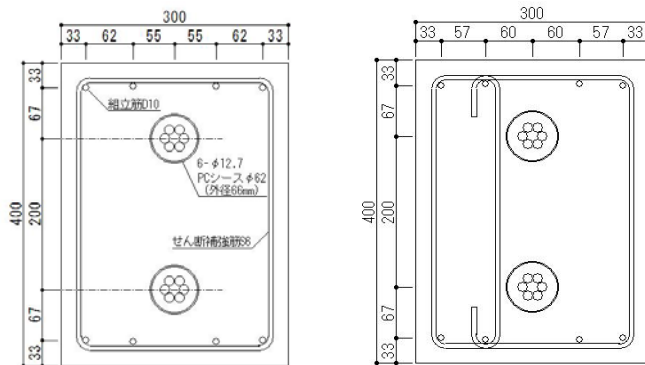


(a) 西側立面図 (b) 南側立面図

図-2 試験体全体図 (a=600mm)

表-1 試験体諸元

試験体名	a (mm)	せん断補強筋	
		配筋	pw (%)
S-10-L42	400	2-S6@50	0.42
S-10-L63	(a/D=1.0)	3-S6@50	0.63
S-15-L21	600 (a/D=1.5)	2-S6@100	0.21
S-15-L42		2-S6@50	0.42
S-15-L63		3-S6@50	0.63
S-20-L21	800 (a/D=2.0)	2-S6@100	0.21
S-20-L42		2-S6@50	0.42



ここで、b：部材幅、D：部材せい、a：せん断スパン、pw：せん断補強筋比である。  
 (a) 2-S6 断面 (中子筋なし) (b) 3-S6 断面 (中子筋あり)

図-3 試験体断面

試験結果を示す。表-6 の降伏荷重と引張荷重は φ12.7PC 鋼より線 7 本の材料試験結果から得られたデータを 6 本に換算したものである。

表-2 コンクリートの材料特性

試験体	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
S-10-L42, S-10-L63	57.3	-	28.9
S-15-L21, S-15-L42, S-15-L63	62.3	3.26	30.0
S-20-L21, S-20-L42	55.9	3.89	28.1

表-4 PC グラウトの材料特性

試験体	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
S-10-L42, S-10-L63	55.9	3.20	15.2
S-15-L21, S-15-L42, S-15-L63	68.8	3.93	15.2
S-20-L21, S-20-L42	67.7	2.21	15.0

表-3 目地モルタルの材料特性

試験体名	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
S-10-L42, S-10-L63	75.1	4.35	24.0
S-15-L21, S-15-L42, S-15-L63	82.1	4.14	25.8
S-20-L21, S-20-L42	83.4	3.14	30.8

表-5 鉄筋の材料特性

呼び名	鋼材種別	降伏強度 (MPa)	降伏強度時ひずみ (%)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
S6	KSS785	984.2 0.2%オフセット	-	1165	194.4
D10	SD295A	360.9	0.20	510	178.3

表-6 PC 鋼材の材料特性

呼び名	鋼材種別	降伏荷重 (6本) 0.2%オフセット (kN)	引張荷重 (6本) (kN)	伸び (%)	弾性係数 (GPa)
6S12.7	SWPR7BL	1069	1188	6.0	186

## 2.2 プレストレス力

本実験では、荷重直前の有効プレストレス力  $P_e$  が PC ストランドの規格降伏荷重 1872kN (PC 鋼より線 6 本×2 組) の 0.7 倍となるように、導入時目標緊張力を 2 組合計で 1480kN とした。各試験体の荷重直前の有効プレストレス力  $P_e$  は 1093~1419kN であり、プレストレス比  $P_e/(bDf_c)$  は 0.146~0.212 となった。ここで  $f_c$  は材料試験値である。

## 2.3 荷重

図-4 に示す荷重装置を用いて正負繰り返し逆対称曲げを加えた。柱頭側スタブと柱脚側スタブが平行に保たれるように 2 本の 8000kN 鉛直ジャッキを制御しながら、2 本の 2000kN 水平ジャッキによりせん断力を加えた。荷重は部材変形角で制御し、部材変形角が 0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、2.0%、4.0%、6.0%において、それぞれ正負 2 回の繰り返し荷重を行った。なお、制御に用いた部材変形角は、上下スタブ中心位置間の相対水平変位を梁全長で除して求めた。

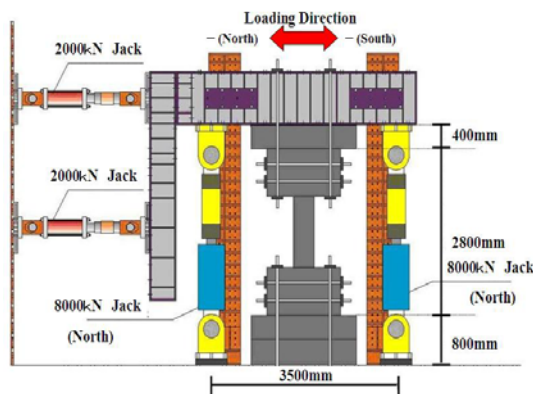


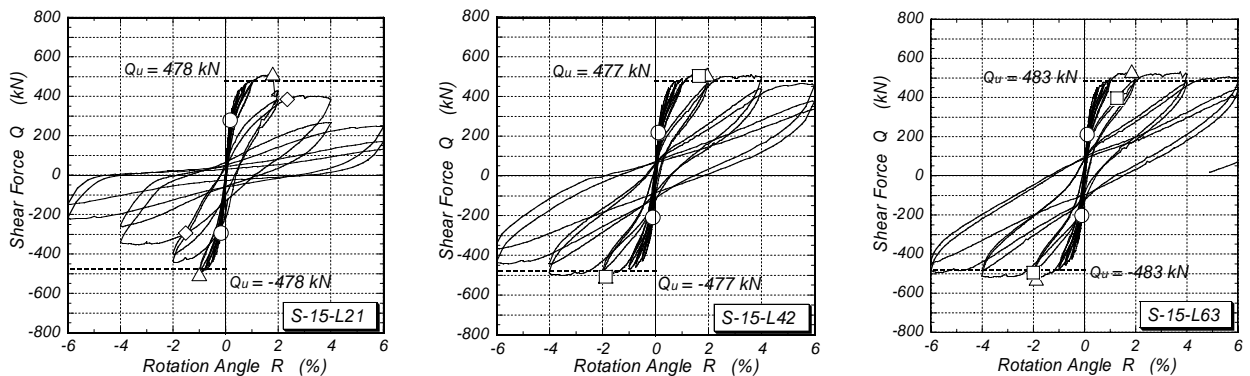
図-4 荷重装置

### 3. 実験結果

#### 3.1 せん断力一部材変形角関係

図-5 にせん断力一部材変形角 (-6%~+6%) 関係を示す。図中に示すせん断力  $Q$  には、鉛直ジャッキの傾きにより生じる鉛直荷重の水平成分を考慮している。曲げひび割れが発生した点を○で、最大せん断力を示した点を△で、PC 鋼材が引張降伏した点を□で、せん断補強筋が降伏した点を◇でそれぞれ図中に示す。また、図中に ACI コンクリート応力ブロックを用い、平面保持仮定に基づいて精算した曲げ耐力計算値  $Q_u$  も併せて示す。

いずれの試験体も、最大耐力  $Q_{exp}$  が曲げ耐力計算値  $Q_u$  を上回った。曲げにより最大耐力が決まった試験体 5 体 (S-10-L63、S-15-L42、S-15-L63、S-20-L21、及び S-20-L42) について、 $Q_{exp}/Q_u$  の平均は 1.085、変動係数は 0.018 となった。



○ : 曲げひび割れ点   △ : 最大せん断力点   □ : PC 鋼材引張降伏点   ◇ : せん断補強筋降伏点

図-5 せん断力一部材変形角関係

#### 3.2 破壊性状

図-6 には各試験体の  $R=4\%$  時のひび割れを示す。

S-10-L42 は、 $R=-0.25\%$  への載荷途中でせん断ひび割れが発生したが、耐力は上昇し続け、 $R=\pm 2.0\%$  でのサイクル途中で最大耐力に到達した。最大耐力に到達直後、耐力は大きく低下し始めた。破壊モードはせん断破壊と判断される。

S-10-L63 は、 $R=-0.25\%$  への載荷途中でせん断ひび割れが発生したが、耐力は上昇し続け、 $R=2.0\%$  から  $R=4.0\%$  へ向かう載荷途中の  $R=2.7\%$  で PC 鋼材の降伏と同時に最大耐力に到達した。PC 鋼材降伏後  $R=4.0\%$  の 1 回目までは最大耐力に近い耐力をほぼ保持したが、2 回目のサイクルから耐力が大きく低下し始め、 $R=6.0\%$  に達すると耐力が約 20% 低下した。せん断補強筋は降伏しなかった。破壊モードは曲げ降伏後せん断破壊と判断される。

S-15-L21 は、 $R=1.8\%$  で最大耐力に到達すると同時にせん断ひび割れが発生して耐力が約 100kN 低下

した。その後、変形の進行に伴って顕著な耐力低下が見られ、 $R=4.0\%$ でのサイクル途中でせん断補強筋が降伏した。破壊モードはせん断破壊と判断される。

S-15-L42 では、 $R=1.0\%$ 時のサイクル途中でせん断ひび割れが発生したが、耐力の低下は無く、 $R=2.0\%$ 時のサイクル途中で PC 鋼材が降伏し、これが最大耐力となった。その後、変形が進むにつれ徐々に耐力は低下したが大きな低下は見られなかった。破壊モードは、曲げ破壊と考えられる。

S-15-L63 では、 $R=2.0\%$ 時のサイクル 1 回目の  $R=1.5\%$ でせん断ひび割れが発生し、 $R=1.8\%$ で最大耐力に達した後、2 回目に PC 鋼材が降伏した。破壊モードは、曲げ破壊と考えられる。

S-20-L21 は  $R=0.5\%$ 前後で両端部にてコンクリートの圧壊が始まった。 $R=1.8\%$ 付近で最大耐力に到達し、PC 鋼材が降伏した。その後、 $R=3.8\%$ で曲げひび割れが斜めに進展したせん断ひび割れが発生して耐力が大幅に低下した。破壊モードは曲げ降伏後せん断破壊と判断される。

S-20-L42 は、最大耐力に到達するまでは S-20-L21 とほぼ同じ挙動を示した。しかし、 $R=\pm 6.0\%$ まで、せん断ひび割れの発生は見られなかった。破壊モードは、曲げ破壊と考えられる。

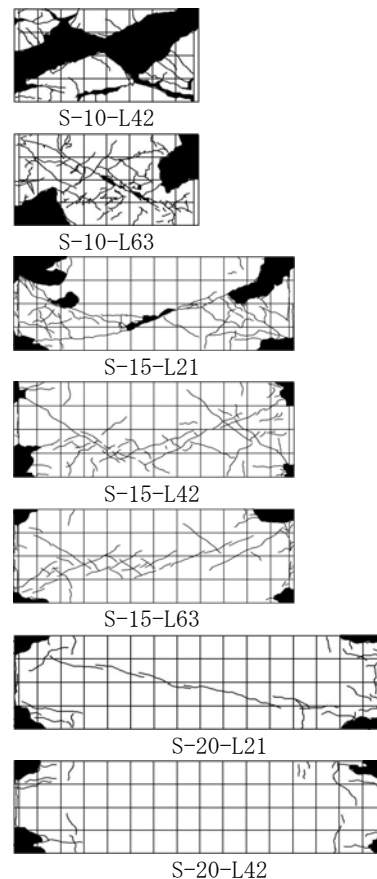


図-6 R=4%における破壊状況

### 3.3 せん断強度

試験体の設計に適用した靱性指針式及び PC 規準のせん断耐力評価式(71.2 式)の評価精度を検討するため、計算結果と実験結果との比較を行う。

靱性指針による計算値を  $Q_{su1}$ 、PC 規準による計算値を  $Q_{su2}$  とする。ただし、靱性指針及び PC 規準において、トラス有効せい  $j_r$  は PC 鋼材間距離 200mm とし、PC 規準のせん断補強筋強度上限値 ( $295\text{N/mm}^2$ ) は無視した。

表-8 実験結果及び計算結果の比較

試験体	破壊モード	$Q_{exp}$ (kN)		$Q_{su}$ (kN)		$Q_{exp}/Q_{su}$	
		正側	負側	$Q_{su1}$ ( $R_p=0$ )	$Q_{su2}$	$Q_{exp}/Q_{su1}$	$Q_{exp}/Q_{su2}$
S-10-L42	S	706	-659	279	659	2.45	1.04
S-10-L63	FS	722	-762	382	725	1.94	1.02
S-15-L21	S	516	-503	251	620	2.03	0.82
S-15-L42	F	512	-508	328	704	1.55	0.72
S-15-L63	F	536	-525	426	788	1.25	0.67
S-20-L21	FS	386	-387	245	507	1.58	0.76
S-20-L42	F	386	-386	321	600	1.20	0.64

\* S:せん断破壊 FS:曲げ降伏後せん断破壊 F:曲げ破壊

表-8 に示すように、せん断破壊した試験体(S-10-L42、S-15-L21)について、靱性指針では ( $Q_{exp}/Q_{su1}$ ) が 2.03~2.45 となり、せん断耐力を過小評価した。一方、PC 規準では ( $Q_{exp}/Q_{su2}$ ) が 0.82~1.04 となり、靱性指針に比べて、精度良い評価となっている。これは、PC 規準では考慮されているプレストレス力によるコンクリート圧縮強度有効係数の上昇、及び靱性指針では考慮している有効断面によるものである。

### 4. まとめ

高強度あばら筋を用いた PCaPC 梁のせん断耐力評価の結果、得られた知見を以下に示す。

- ・トラス有効せい  $j_r$  を PC 鋼材間距離とした靱性指針式によるせん断耐力の計算値は実験値を下回った。
- ・ $j_r$  を PC 鋼材間距離とし、せん断補強筋強度上限値を無視した PC 規準の 71.2 式によるせん断耐力の計算値は実験値を靱性指針に比べて、精度良く評価した。

【謝辞】

本研究の一部は文部科学省 科学研究費(課題番号・20246090, 20360252, 20760372), 国土交通省 住宅・建築関連先端技術開発助成事業(研究代表者 西山峰広)によるものである。また、株式会社ピーエス三菱, 高周波熱練株式会社, 住友電工スチールワイヤー株式会社, 共英製鋼株式会社, 住倉鋼材株式会社から多大な協力を頂きました。ここに謝意を表します。