論文 高強度せん断補強筋を有するプレキャストプレストレストコンクリ ート梁のせん断斜張力破壊に関する研究

李 在満^{*1}·谷 昌典^{*2}·坂下 雅信^{*3}·河野 進^{*4}

要旨:降伏強度 785MPa 級高強度せん断補強筋を有するプレキャストプレストレストコンクリート梁のせん 断破壊耐力評価において、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」(71.2a)式の 適用性を検討するために、PC 圧着梁試験体に、地震時の挙動を想定した逆対称曲げ変形を与える載荷実験を 行った。その結果、PC 規準のせん断破壊耐力評価式の計算精度には、せん断破壊形式によって、差が存在す ることが分かった。また、既往の実験結果に基づき、コンクリート圧縮強度及び有効プレストレスを関数と してせん断斜張力破壊する PC 部材のせん断破壊耐力式を提案した。

キーワード:プレストレストコンクリート,高強度せん断補強筋,せん断斜張力破壊

1. はじめに

1.1 研究背景

工場もしくは現場で製作された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(以下, PCaPC)構造は高い施工性 のみならず,プレストレス力による復元性,地震後の小 さい残留変形などの高い施工性能及び構造性能から,集 合住宅,倉庫,競技場など数多くの構造物に適用されて いる。

PCaPC 構造の性能は、100MPa を超える高強度コンク リートや 500MPa を超える高強度せん断補強筋などの高 強度高性能材料を使用することで向上し、より汎用性の 高い次世代型構造となる。

しかし,これまで行われてきた PCaPC 部材に関する実験的研究中,せん断性状を調べた実験の試験体数は約50体と多くない。これらの試験体では,圧縮強度が60MPa程度のコンクリートが用いられ,また,せん断補強筋には SD490までの鋼材が用いられている^{1)~3)}。

本研究は圧縮強度 60MPa のコンクリート,785MPa 級 高強度せん断補強筋,及びマルチストランドを用いた PCaPC 梁部材のせん断破壊耐力評価を目的とし,PC 圧 着梁試験体に,地震時の挙動を想定した逆対称曲げ変形 を与える載荷実験を行った結果について報告する。さら に,プレストレストコンクリート(以下,PC)部材のせん 断破壊耐力の評価において,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)」(以下, PC 規準)に示されているせん断破壊耐力式の適用性に関 する検証を,せん断破壊形式(せん断引張破壊,せん断圧 縮破壊,及びせん断斜張力破壊)別に行う。また,せん断

*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)
*2 神戸大学 工学研究科建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)
*3 京都大学 工学研究科建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)
*4 京都大学 工学研究科建築学専攻 准教授 Ph.D. (正会員)

斜張力破壊するプレストレストコンクリート部材のせん 断破壊耐力を評価する方法を提案し,その精度を検証す る。

1.2 PC 部材のせん断破壊耐力評価の現状と問題点

(1) PC 規準せん断破壊耐力式

PC部材のせん断破壊耐力評価式として,PC規準には 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1999)」に示 されている短期許容せん断強度式にプレストレスの効果 を加算した(71.1)式と,塑性理論の下界定理に基づいたト ラス機構とアーチ機構それぞれが負担するせん断力の和 である(71.2a)式の2つが示されている。

PC 規準(71.1)式

$$V_u = \{\alpha(f_s + 0.1\sigma'_g) + 0.5f_{wv}(p_w - 0.002)\}bj$$
(1)

 $f_s = 7.5 + (1.5/100)F_c$, $\alpha = 4/\{L/(2 \cdot dr) + 1\}$, 1<2
(2) PC 規準(71.2a)式

$$V_u = bj_t p_w f_{wv} + bD(vF_c - 2p_w f_{wv}) \tan\theta/2$$
⁽²⁾

 $\tan\theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D, \quad v = \alpha L_r \left(1 + \sigma'_g / F_c \right)$

$$\alpha = \sqrt{60/F_c} \quad (\alpha \le 1), \quad L_r = L/4D \quad (L_r \le 1)$$

ここで、 V_u : せん断破壊耐力、 f_s : コンクリートせん断強 度、 σ'_g : 平均軸圧縮応力(=($N+P_e$)/bD)、N: 軸力、 P_e : 有 効プレストレス力、 f_{wy} : せん断補強筋降伏強度 ($f_{wy}\leq 295$ MPa)、 p_w : せん断補強筋比($0.002\leq p_w\leq 0.012$)、b: 部材幅、j: 応力中心間距離、 d_r : 圧縮縁から引張鉄筋ま での距離、 j_i : 圧縮鉄筋と引張鉄筋間距離、 F_c : コンクリ ート圧縮強度、v: コンクリート強度有効係数($1\geq v\geq 0.65$)、 L: 部材長さ, D: 部材せいである。

(2) PC 規準のせん断破壊耐力式の問題点

PC 規準のせん断破壊耐力式には、せん断補強筋の降伏 強度 *f*_wに 295MPa という上限値が定められている。

また, (71.2a)式の場合,トラス機構のせい j_t を軸筋間 距離と定めているが, PCaPC 部材の場合,普通鉄筋は, 部材端目地部で連続していないため, j_t として普通鉄筋 間距離をとることには疑問がある。

また,(71.2a)式はせん断ひび割れの発生によって,せん断補強筋のひずみが増加し始め,終局時にはせん断補 強筋が降伏して,最大耐力に到達するせん断引張破壊を 想定しているため,異なる形式(例えば,せん断圧縮破壊 やせん断斜張力破壊など)で破壊する試験体のせん断破 壊耐力評価にはその適用性に対する検証が必要である。

上記を踏まえて本研究では、高強度せん断補強筋を有 する PCaPC 部材のせん断破壊耐力評価に対する(71.2a) 式の適合性及び高強度せん断補強筋がせん断破壊形式に 及ぼす影響を実験的に検討する。さらには、せん断斜張 力破壊する PC 部材のせん断破壊耐力評価を既往の実験 結果を用いて行う。

2. 実験概要

2.1 試験体設計

本研究では、PCaPC 圧着梁部材のせん断性状及び変形 性能の把握が目的であるため、規格材料強度に基づいて、 総4体中、3体が曲げ降伏に先行してせん断破壊するよ うに試験体を設計した。**表**-1はせん断破壊耐力計算値 Q_{su} と曲げ耐力 M_u 時せん断力計算値 Q_f を示す。試験体の せん断破壊耐力 Q_{su} は、PC 規準の(71.2a)式に以下の仮定 を適用して算定した。

- ・トラスせい j_t を PC 鋼材間距離(=400mm)とする。
- ・せん断補強筋の降伏強度に対する上限値を無視し規格
 降伏強度を用いる。

試験体	a/D	p_w (%)	Q_{su} (kN)	Q_f (kN)	Q_{su}/Q_f
S-10-L10	1.0	0.10	893	1307	0.68
S-10-L21	1.0	0.21	957	1307	0.73
S-15-L00	15	0.00	817	954	0.96
S-15-L10	1.5	0.10	892	034	1.04

表-1 実験設定値及び耐力計算値

a/D: せん断スパン比、*p*_w: せん断補強筋比

試験体の設計に使用したコンクリート目標強度は 60MPa である。せん断補強筋には規格降伏強度 785MPa(実降伏強度 f_y =1006MPa(0.2%オフセット値),降 伏ひずみ ε_y =0.70%,弾性係数 E_s =2.02×10⁵MPa)の S6 を, PC 鋼材には7本より φ 12.7 の PC 鋼より線 12 本(実降伏 強度 f_y =1763MPa(0.2% オフセット値),弾性係数 $E_s=1.95 \times 10^5 \text{MPa}$)を1組として試験体1体当たり2組ずつ 使用した。

なお、曲げ耐力 M_uは ACI 応力ブロックと平面保持仮



定を用いて算定した。

2.2 試験体詳細

試験体の全体図及び梁断面図を図-1 及び2 にそれぞ れ示す。試験体は集合住宅の梁を想定し、1/2 スケール とした。梁部材断面は 300×600mm である。いずれの試 験体も20mm厚さの高強度無収縮モルタル目地を介して、 梁部分と断面 800×1300mm,高さ 800mm のスタブを圧着 接合した。

実験パラメータはせん断スパン比a/Dとせん断補強筋 比 p_w の2種類である。表-2及び3に各試験体に使用し た材料の特性値及び載荷直前での有効プレストレス力 P_e と有効プレストレス比 $\eta_{pe}(=P_e/bDF_c)$ をそれぞれ示す。

表-2 コンクリート,目地モルタル, 及び PC グラウト材料特性

	F_c (MPa)	ε_{c} (%)	E_c (GPa)
コンクリート	65.2	0.25	36.8
目地モルタル	63.9	0.33	23.8
PC グラウト	53.9	-	14.8

 F_c : 圧縮強度, ε_c : 圧縮強度時ひずみ, E_c : 1/3 F_c 割線 弾性係数

衣一3 有効ノレストレスリ							
	S-10-L10	S-10-L21	S-15-L00	S-15-L10			
$P_{e}(10^{3} \text{kN})$	2.65	2.58	2.64	2.64			
η_{pe}	0.226	0.219	0.225	0.225			

 P_e : 有効プレストレス力, η_{pe} : 有効プレストレス比

2.3 載荷方法

載荷装置を図-3 に示す。載荷はL字型鉄骨載荷フレ ームに接続した2000kN水平ジャッキ2本と8000kN鉛直 ジャッキ2本により行った。

鉛直ジャッキで上下スタブが水平に保たれるように 制御しながら,水平ジャッキによってせん断力を載荷し た。載荷は部材回転角 *R* で制御し,*R* が 0.1%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1.0%, それぞれにおいて,正負 2 回の繰 り返し載荷を行った。上部スタブが南方向(図中の右方 向)へ移動する場合を正方向としている。



3. 実験結果

3.1 破壊性状及び破壊モード

実験結果一覧及びせん断力一部材角関係をそれぞれ表 -4 及び図-4 に示す。表-4 中には最大耐力時試験体中 央部せん断補強筋ひずみ ε_{ws}及び応力 f_{ws}も併せて示す。 本研究では,せん断破壊形式を,せん断引張破壊(ST), せん断圧縮破壊(SC),せん断斜張力破壊(DT)と分類した。 各破壊形式の定義は以下の通りである。

・せん断引張破壊(ST): せん断ひび割れ発生によって, せん断補強筋のひずみが増加し始め,終局時にはせん断 補強筋が降伏して,最大耐力に到達する。

・せん断圧縮破壊(SC): せん断ひび割れ発生後, せん断 補強筋のひずみが増加し始めるが, 終局時にせん断補強 筋が降伏することなく, 圧縮側コンクリートの圧壊によ って最大耐力を示す。

・せん断斜張力破壊(DT): せん断ひび割れが部材の両端 圧縮域を結ぶ対角線上に生じ,このひび割れの発生と同 時に耐力は急激に低下する。

表-4 実験結果-覧

試験体	破壊モード	Q_{exp} (kN)	$\begin{array}{c} R_{exp} \\ (\%) \end{array}$	$arepsilon_{ws}\ (\mu)$	f_{ws} (MPa)	
S-10-L10	DT	1006	0.58	2066	417	
S-10-L21	ST	1054	0.47	4819	973	
S-15-L00	DT	803	0.38	-	-	
S-15-L10	DT	884	0.75	36	7.2	
					1 1	

 Q_{exp} :最大せん断力実験値, R_{exp} : Q_{exp} 時の部材変形 角

曲げひび割れ(もしくは、目地部での離間)が発生した 点を○で、せん断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、せん断補強筋が降伏した点を ◇で、PC 鋼材が降伏した点を□で、それぞれ図-4 中に 示す。

各試験体のせん断破壊直前及びせん断破壊後のひび 割れ状態を図-5に示す。

(1) 破壊性状

図-4 に示すように,いずれの試験体も *R*=0.1~0.25% 前後で,曲げひび割れ,もしくは目地部での離間(○)が 発生した。

せん断ひび割れ(●)は、S-10-L10 及び S-10-L21 では R=0.25%サイクルで、S-15-L00 では R=0.5%サイクルで、 S-15-L10 では R=0.75%サイクルで、それぞれ発生した。

せん断補強筋の降伏(◇)については、いずれの試験体 も最大せん断力時にせん断補強筋のひずみが降伏ひずみ (ε_{wy}=0.70%)に到達しなかった。S-10-L21以外の試験体で は最大耐力時,試験体両端圧縮域を結ぶ対角線上のせん 断ひび割れが生じ,耐力低下するとともにせん断補強筋 のひずみが増加し始めた。S-10-L21は、±0.25%サイクル で、せん断ひび割れが発生した後、-0.75%の1回目で降



伏ひずみに到達した。その後,+0.75%の2回目で急激な 耐力の低下が発生した。

いずれの試験体でも PC 鋼材は降伏しなかった。

(2) 破壊モード及び形式

上記の破壊性状やせん断補強筋のひずみなどから破 壊形式を以下のように判定した。

- ・S-10-L10, S-15-L00, 及びS-15-L10 はせん断斜張力破 壊(DT)
- ・S-10-L21 はせん断引張破壊(ST)

3.2 せん断破壊耐力評価

(1) PC 規準せん断破壊耐力式の適合性

高強度せん断補強筋を用いた PCaPC 部材に対する PC 規準(71.2a)式の適合性を検討するために, せん断破壊耐 力計算値 Q_{sul} とせん断破壊耐力実験値 Q_{eep} との比較を表 -5 に示す。せん断破壊耐力 Q_{sul} の算定の際, PC 規準の (71.2a)式に以下の仮定を適用した。

・せん断補強筋の降伏強度に対する上限値を無視し、実

表-5 せん断耐力実験値及び計算値の比較

試験体	破壊 モード	Q _{exp} (kN)	Q _{sul} (kN)	Q _{su2} (kN)	Q_{exp}/Q_{sul}	Qexp/Qsu2
S-10-L10	DT	1006	982	900	1.024	1.091
S-10-L21	ST	1054	1064	900	0.991	1.171
S-15-L00	DT	803	839	839	0.957	0.957
S-15-L10	DT	884	935	839	0.947	1.054

DT: せん断斜張力破壊, ST: せん断引張破壊

降伏強度(*f_{wy}=1006MPa(0.2%オフセット値*))を適用する。 ・トラスせい*i*,を PC 鋼材間距離(*i*=400mm)とする。

表中にはアーチ機構のみによるせん断破壊耐力計算 値 Q_{su2} も併せて示す。表-5から分かるように,せん断 破壊耐力計算値 Q_{su1} はいずれの試験体でもほぼ±20%の 範囲でせん断破壊耐力実験値を評価できた。せん断破壊 形式別に比較すると,せん断引張破壊(ST)した S-10-L21 の場合は, Q_{exp}/Q_{su1} が 0.991,せん断斜張力破壊(DT)した 試験体の場合は、 Q_{exp}/Q_{su1} が 0.947~1.024であった。せん 断斜張力破壊の場合,せん断ひび割れが部材の両端圧縮 域を結ぶ対角線上に生じ,通常,このひび割れの発生と 同時に耐力が低下するため,せん断補強筋のせん断破壊 耐力負担分が少ない。これは,せん断斜張力破壊(DT)す る PC 部材のせん断破壊耐力を評価するためには,コン クリートのせん断破壊耐力負担分のみで評価することが 妥当であることを示唆する。

しかし, 表-5 に示すように, せん断補強筋の負担分 も考慮した PC 規準(71.2a)式はせん断斜張力破壊(DT)し た試験体のせん断破壊耐力を精度良く評価している。こ れは,本研究でせん断斜張力破壊(DT)した試験体の場合, 斜張力ひび割れが発生するまで, せん断ひび割れによる 損傷が大きくなかったためと推察される。PC 規準(71.2a) 式はせん断引張破壊のように、せん断ひび割れが多数発 生し、コンクリートストラットの圧縮強度が低下する場



合を想定しているため、現行 PC 規準(71.2a)式のコンク リート有効係数vは、せん断斜張力破壊(DT)のように損 傷が少ない場合は、実際のコンクリートストラットの圧 縮強度を過少評価する恐れがある。

図-6 は、PC 部材のせん断破壊耐力に関する既往の実 験結果^{1)-3), 5)-11)}から、せん断破壊した 54 体を対象とし て、最大せん断力 Q_{exp} の曲げ耐力時せん断力計算値 Q_f に対する比(Q_{exp}/Q_f)とせん断破壊耐力計算値 Q_{sul} の Q_f に 対する比(Q_{uul}/Q_f)の関係を示す。ここで、 Q_f は、ACI コ ンクリート応力ブロックと平面保持仮定を用いて算定し た。図-6 に示すようにせん断破壊耐力計算値 Q_{sul} はせ ん断破壊した試験体のせん断破壊耐力を精度よく評価す るが、せん断破壊形式別に比較してみると、せん断圧縮 破壊(SC、 Δ)した試験体は、平均が 1.021、変動係数が 0.080 と、最も精度が良い評価となっているのに対して、 せん断斜張力破壊(DT、〇)及びせん断引張破壊(ST、□) した試験体は、平均及び変動係数がそれぞれ 1.064 と 0.124 及び 1.054 と 0.162 など,破壊形式別に計算精度の 差が存在することが分かる。

(2) 実験変数が破壊形式に及ぼす影響

図-7 は、実験変数(せん断スパン比 a/D, せん断補強 筋降伏強度 f_{nyn} , せん断補強筋比 p_{nv})とせん断破壊形式と の関係をプロットしたものである。同様な実験変数を有 する全試験体数 n_T に対する各せん断破壊形式(DT, SC, 及び ST)別にせん断破壊した試験体数 n の比 n/n_T を縦軸 に、各実験変数を横軸に取った。図中の括弧内の数値は n_T を示す。図-7(a)から分かるように、a/Dの増加に伴い、 せん断圧縮破壊(SC, Δ)した試験体数が増加する傾向が 見られる。また、図-7(b)及び(c)から分かるように、 f_{ny} が増加するほど、 p_{nv} が減少するほど、せん断斜張力破壊 (DT, \bigcirc)した試験体数が増加する。これは、同様な $p_{nf_{ny}}$ を適用する場合、 p_{nv} が減少し、せん断斜張力破壊(DT, \bigcirc)する可能性が高いことを意味する。

(3) せん断斜張力破壊する PC 梁のせん断耐力評価

せん断斜張力破壊した PC 部材のせん断破壊耐力評価 法を提案し、計算精度を検証する。

図-8 は、せん断斜張力破壊耐力に影響すると考えら れるパラメータ(コンクリート圧縮強度 F_c 及び有効プレ ストレス $\sigma_o(=P_c/bD)$)とせん断斜張力破壊した試験体の最 大せん断応力 $\tau_{exp}(=Q_{exp}/bD)$ との関係を示す。図-8 中に は、プロットした結果に対して、最小二乗法によって近 似した式も併せて示す。図中の黒塗りは本実験の試験体 を表す。図-8 から分かるように、 $\tau_{exp} \ge F_c$ 及び σ_o との



間には、正の相関が見られる。 F_c 及び σ_o を独立変数とし、 τ_{exp} を従属変数として重回帰分析を行うと、次のような近 似式が得られる。

$$\tau_{\exp} = 0.037F_c + 0.07\sigma_o - 1.45 \tag{3}$$

図-9 は、本研究及び既往の実験結果から、せん断斜 張力破壊した試験体 24 体を対象として、最大せん断力 Q_{exp} の曲げ耐力時せん断力計算値 Q_f に対する比(Q_{exp}/Q_f) と、式(3)によるせん断破壊耐力計算値 $Q_c(=\tau_c bD)$ の Q_f に 対する比(Q_c/Q_f)の関係を示す。図-9 に示すように、式(3) はせん断斜張力破壊する試験体の実験値を精度良く評価 している。しかし、不合格率が 0.54 であり、設計式とす るためには下限値に対して式を誘導する必要がある。

4. まとめ

高強度せん断補強筋を用いた PCaPC 梁に対する逆対 称曲げ載荷実験を行い,既往の実験結果との比較及び検 討を通じて以下の結論を得た。

・本実験で、S-10-L10、S-15-L00、及びS-15-L10がせん
 断斜張力破壊、S-10-L21がせん断引張破壊した。

・実験変数とせん断破壊形式との関係を検討した結果, せん断スパン比 a/Dが小さいほど,せん断補強筋降伏強 度 f_{wy} が高いほど(もしくは,せん断補強筋比 p_w が小さい ほど),せん断斜張力破壊が増加する傾向が見られた。 ・せん断斜張力破壊する PC 部材のせん断破壊耐力を評 価するため,コンクリート圧縮強度 F_c 及び有効プレスト レス σ_o を変数とする近似式を得た。

謝辞

本研究の一部は文部科学省 科学研究費(研究代表者 京都大学 河野進 准教授),国土交通省 住宅・建築関 連先導技術開発助成事業(研究代表者 京都大学 西山 峰広 教授)によるものである。また,株式会社ピーエス 三菱,高周波熱錬株式会社,住友電エスチールワイヤー 株式会社,共英製綱株式会社,住倉鋼材株式会社から多 大な協力を頂きました。また,研究全般を通して,京都 大学・西山峰広教授の多大な尽力がありました。ここに 謝意を表します。

参考文献

湯浅哲廣、大多賀健一、浜原正行:プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究、日本建築学会学術講演梗概集(北)

陸), C-2, pp.993~994, 2002

- 2) 湯浅哲廣,小川哲郎,鎌倉正史,福井剛,内田龍一郎,浜原正行:プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), C-2, pp.965~966,2000
- 3) 湯浅哲廣,大多賀健一,福井剛,浜原正行:プレキャ ストプレストレストコンクリート部材のせん断性 状に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演 梗概集(関東), C-2, pp.955~956, 2001
- 4) 尹元奎, 浜原正行,本岡順二朗:プレキャスト・プレストレストコンクリート柱の復元力特性に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 480号, pp.151~160, 1996
- 5) 斉藤篤,小川哲郎,飯田誠次郎,福井剛,末次宏光, 崎山和孝,浜原正行:プレキャスト・プレストレス トコンクリート部材のせん断性状に関する実験的 研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), C-2, pp.1077~1082, 1999
- 6) 浜原正行,永澤敏弥,福井剛,末次宏光:プレストレストコンクリート梁のせん断性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海),C, pp.1023~1028,1994
- 福井剛,大熊晃,浜原正行,末次宏光:プレストレ ストコンクリート梁のせん断耐力と靭性に関する 実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(近 畿), C-2, pp.877~880, 1996
- 福井剛,浜原正行,大熊晃,末次宏光:プレストレ ストコンクリート梁のせん断性状に及ぼすプレス トレスの影響,日本建築学会大会学術講演梗概集(関 東), C-2, pp.847~852, 1997
- 9) 若松慎哉, 滝澤一孝, 高木仁之, 白石一郎: プレス トレストコンクリート梁のせん断特性に関する研 究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), C-2, pp.1039~1044, 1998
- 10) 松崎育弘,平山明,小林淳彦,坂井正美:アンボン ド工法を用いたプレストレスト鉄筋コンクリート 部材のせん断耐力及び変形性能に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), C, pp.1683~1684, 1984
- 李在満,谷昌典,山本惇也,仲輝,坂下雅信,河野 進,西山峰広: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, C-2, pp.837~842, 2009