

複数開口を有する PC 梁の設計法 その2 実験による設計法の適合性の検討

日本大学工学部 学生会員 ○小西 智貴
同 正会員 工学博士 浜原 正行
(株)ピーエス三菱 正会員 博士(工学) 福井 剛

1. はじめに

本稿は、前報(その1)で提案した設計手法を用い、束材のせい・スターラップ断面積を要因として想定破壊部位を束材・母材とした4体のPC梁試験体の概要、実験概要および実験結果について報告するものである。

2. 試験体概要

試験体は、束材のせいと束材スターラップの総断面積を要因とした矩形開口を有する4体のPC梁である。

表-1に試験体概要を、図-1に試験体詳細を示す。表-1中の想定破壊部位は3.3節の検討結果を掲載した。

3. 試験体の設計

3.1 設計方針

開口部弦材の終局強度は文献(1)の手法を用い、母材の曲げ終局強度を上回るように設計した。束材は、せいを200と250の2種類とし、それぞれに前報(その1)で提案した手法を用い、束材スターラップ量によって母材・束材破壊するものとした。破壊部位の推定に、コンクリート圧縮強度を設計強度40N/mm²とし、鋼材は、束材の検討には規格降伏強度を、母材曲げ終局強度の算定では1.15×規格降伏強度を用いた。

3.2 母材曲げ終局強度

母材曲げ終局強度は下式で算定した。

$$Q_{mu} = \left\{ T_{py} \cdot d_p + T_{ry} \cdot d_r - (T_{py} + T_{ry})^2 / (2 \cdot b \cdot F_c) \right\} / a$$

$$= \left\{ 567.9 \times 375 + 157.9 \times 415 - \frac{(567.9 + 157.9)^2}{(2 \times 200 \times 0.04)} \right\} / 1800 = 134.6 \text{ kN}$$

ここに、 T_{py} =PC鋼材の降伏荷重=1.15×930×531/1000=567.9kN

T_{ry} =主筋の降伏荷重=1.15×345×398/1000=157.9kN

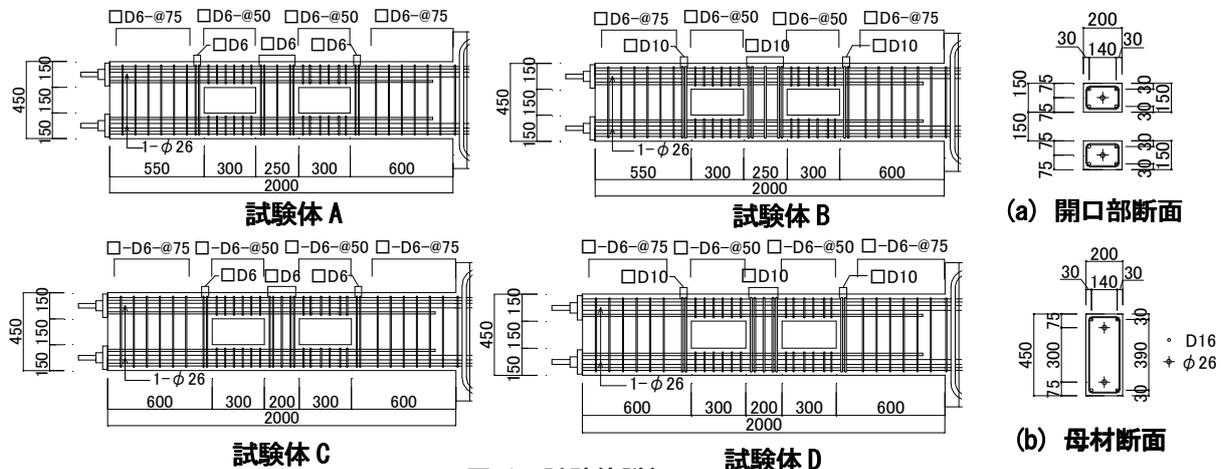


表-1 試験体概要

試験体名	束材せい X_0 (mm)	束材スターラップ 材種:SD295		想定破壊部位
		配筋	a_{wg} (mm ²)	
A	250	5-□D6	320	束材
B	250	5-□D10	713	母材
C	200	5-□D6	320	束材
D	200	5-□D10	713	母材

【共通因子】(mm) $b=200, D=450, a=1800, ho=150$
 $d_p=420, d_r=375$ 有効緊張力 $\Sigma P_e=600\text{kN}$
 上端筋下端筋とも:2-D16(材種SD345)
 開口部軸方向補強筋: 2-D16(材種SD345)
 PC鋼材:上端,下端に1-φ26(材種:B種1号)
 母材スターラップ:□D6-@75(材種:SD295)
 開口部弦材スターラップ:□D6-@50(材種:SD295)

【記号】 b =梁幅, D =梁の全せい, ho =開口高さ
 a =載荷点から支点側のスラブ前面までの距離
 a_{wg} =開口部束材のスターラップの総断面積
 d_r =主筋の有効せい, d_p =PC鋼材の有効せい

図-1 試験体詳細

3.3 開口部束材の検討

束材に対する検討は、(その1)の手法を用いた。これは、束材スターラップの断面積 a_{wg} が母材曲げ降伏に必要な断面積 $a_{wg}(req)$ を上回っていれば、束材破壊が回避できるとしたものである。

試験体 A, B の束材破壊が回避できる束材スターラップの総断面積 $a_{wg}(req)$ は、以下のように求まる。

$$a_{wg}(req) = \frac{b \cdot F_c}{\sigma_{yw}} \cdot \left[\frac{X_o}{2} - \sqrt{\left(\frac{X_o}{2}\right)^2 - \frac{Q_{mu} \cdot X \cdot h_o}{j_o \cdot b \cdot F_c}} \right] = \frac{200 \cdot 40}{295} \cdot \left[\frac{250}{2} - \sqrt{\left(\frac{250}{2}\right)^2 - \frac{134600 \cdot 550 \cdot 150}{300 \cdot 200 \cdot 40}} \right] = 484.2 \text{ mm}^2$$

ここに、 Q_{mu} =母材の曲げ終局強度、 X =開口部中心間距離、 j_o =上弦材の重心から下弦材の重心までの距離

試験体 A は、 $a_{wg} = 320 \text{ mm}^2 < a_{wg}(req)$ となっており、理論的には束材のせん断破壊が先行する。これに対して、試験体 B は $a_{wg} = 713 \text{ mm}^2 > a_{wg}(req)$ であり、理論的には母材曲げ破壊が先行する。

試験体 C, D についても同様な検討を行うと、母材曲げ降伏に必要な束材のスターラップ総断面積は、 $a_{wg}(req) = 636.8 \text{ mm}^2$ となり、試験体 C は $a_{wg} = 320 \text{ mm}^2 < a_{wg}(req) = 636.8 \text{ mm}^2$ で、理論的には束材のせん断破壊が先行する。一方、試験体 D では、 $a_{wg} = 713 \text{ mm}^2$ であり、理論的には母材の曲げ破壊が束材の破壊に先行する。

4. 実験概要

4.1 載荷方法

載荷は、図-2 に示すような片持梁形式とし、自由端側を 200kN 串型ジャッキによって加力した。試験体の先端部には、振れ止め用の鉄骨治具を設置し、試験体の面外変形を拘束した。試験体の変位 δ は載荷点位置の鉛直変位を測定し、部材角 R は、これを載荷点からスタブフェイスまでの距離 a で除した下式で評価した。

$$R = \delta / a$$

載荷ルールは、表-2 に示す変位振幅で各サイクルで正負二回ずつ載荷した。

表-2 載荷ルール

サイクル 振幅	1	2	3	4	5	6
R(%)	0.2	0.5	1	2	3	4
δ (mm)	3.6	9	18	36	54	72

4.2 材料試験結果

表-3 にコンクリートの調合表を示す。表-4 に試験体 A~D のコンクリートの材料試験結果を、表-5 に鉄筋と PC 鋼棒の材料試験結果を示す。

表-3 コンクリートの調合表

F_c (N/mm ²)	W/C (%)	単位重量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
40	46	162	353	787	1012	2.47

[記号] W: 水 C: セメント S: 細骨材 G: 粗骨材
 F_c : 設計強度

表-4 コンクリートの材料試験結果

項目	A, B, C	D	記号
σ_B (N/mm ²)	39.1	39.6	σ_B =圧縮強度
E (kN/mm ²)	23.3	24.5	σ_f =割裂強度
σ_f (N/mm ²)	3.08	3.20	E =ヤング係数

表-5 鋼材の材料試験結果

種別	使用部位	σ_y	E	σ_{max}
D16 (SD345)	主筋	398	189	548
D10 (SD295)	スターラップ	370	191	500
D6 (SD295)	スターラップ	342	207	478
$\phi 26$ (B種1)	緊張材	1054	205	1132

[記号] σ_y : 降伏点 (N/mm²) E : ヤング係数 (kN/mm²)
 σ_{max} : 引張強度 (N/mm²)

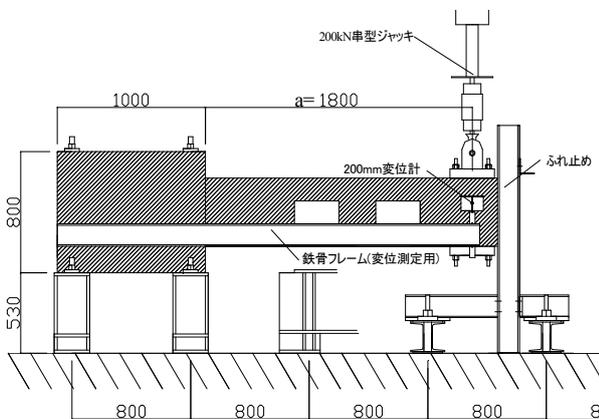


図-2 実験装置

5. 実験結果

5.1 破壊過程

図-3 に各試験体の開口部束材の最終破壊状況を写真で示す。図-4 に各試験体の最終破壊状況を示す。各試験体の破壊過程は以下に示すとおりである。

試験体 A, C 部材角 0.2% で試験体付け根の上下端に曲げひび割れが発生, 0.5% (荷重 A, C 共に 84kN) で開口部束材にせん断ひび割れが発生, 部材各 1% (荷重 A:116kN, C:119kN) で開口部束材のせん断劣化が顕著となり隅角部が圧壊した。その後, 部材角 2% で試験体付け根の上端, 下端が圧壊した。図-4 に示すように, 束材はせん断破壊したが, 弦材のせん断余裕度を 2 倍以上に設定したため, 開口部での破壊とならず, 母材破壊により耐力低下に至った。

試験体 B, D 部材角 0.2% で試験体付け根の上下端に曲げひび割れが, 0.5% (荷重 B, D 共に 89kN) で開口部束材にせん断ひび割れが発生。部材角 1% (荷重 B:127kN, D:130kN) で付け根下端が, 2% で上端が圧壊した。その後は, この圧壊が進行し, 開口部束材と弦材のせん断劣化は見られなかった。以上より, **試験体 B, D** の破壊モードは, 母材曲げ破壊であるといえる。

5.2 最大荷重

表-6 に最大荷重の実験値と計算値, および実験値/計算値の一覧を示す。なお, 最大荷重の計算値 Q_{mu} は, 材料試験結果から得られた強度を用いて下式によって算定した。

$$Q_{mu} = \{T_{py} \cdot d_p + T_{ry} \cdot d_r - (T_{py} + T_{ry}) \cdot a\} / (2 \cdot b \cdot \sigma_B) \cdot (1/a)$$

ここに, T_{py} =PC 鋼材の降伏荷重, T_{ry} =主筋の降伏荷重
 a =載荷点から支点側のスタブ 前面までの距離

表-6 より, 実験値/計算値は 1.009~1.034 の範囲にあり, 計算精度は比較的良好であることが分かる。

表-6 最大荷重の実験値と計算値の一覧

試験体名	実験値 (kN)			計算値 (kN) Q_{mi}	Q_{max}/Q_{mu}
	正	負	平均 Q_{max}		
A	129.6	143.3	136.5	135.2	1.009
B	133.0	141.3	137.2	135.2	1.014
C	132.3	142.3	137.3	135.2	1.015
D	135.7	144.6	140.2	135.2	1.034

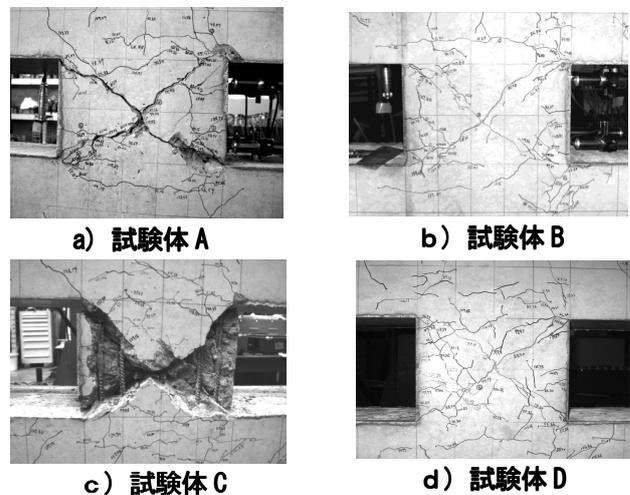


図-3 開口部束材の写真

5.3 荷重一部材角関係

図-5 に荷重 P と部材角 R の関係を示す。いずれの試験体もエネルギー吸収能力に富んだ履歴性状を示し, 開口間隔と束材内スターラップの総断面積が荷重と部材角関係に及ぼす影響は見られない。

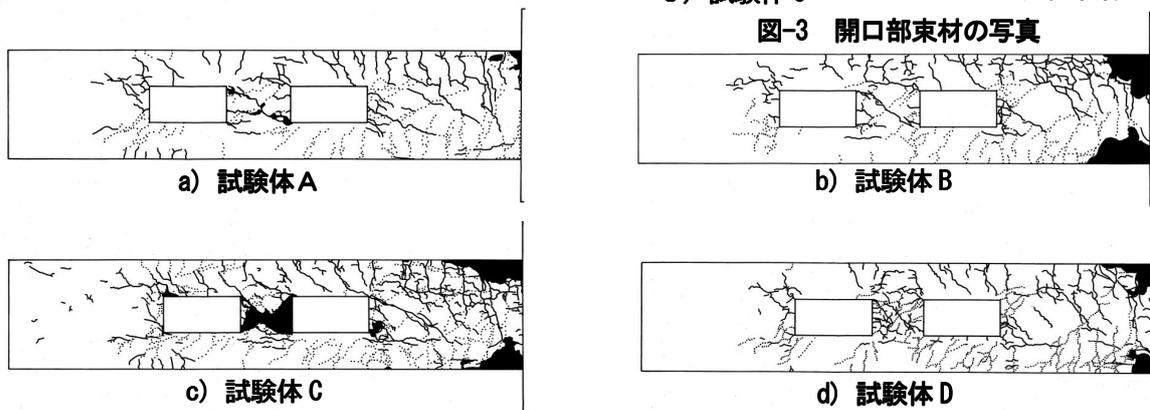


図-4 最終破壊状況

5.4 開口部束材のひび割れ幅

図-6で試験体C, Dの部材角Rと束材の対角線方向ひび割れの最大幅 W_{max} の関係を示した。部材角0.5%までは、正側、負側載荷時とも0.2mm以内だが、1%以降では、試験体Cのひび割れが顕著となっている。

5.5 束材内スターラップのひずみ

図-7は荷重と束材内のスターラップひずみの関係を示したものである。試験体A, Cは降伏ひずみを大きく上回っているが、B, Dは降伏に達していない。この結果は、図-3, 図-6によく対応しているといえる。

6. まとめ

前報(その1)に示した束材破壊を回避するための設計法による推定破壊モードは、実験結果によく適合したが、束材破壊が先行した試験体でも、開口部弦材のせん断余裕度を2倍以上に設定したため開口部での耐力低下は起こらず最終的には母材で破壊した。

【参考文献】 (1) 浜原ほか：プレストレストコンクリート有孔梁の終局強度設計法，日本建築学会構造系論文報告集, No.442, pp.133-139, 1992, 12 (2)

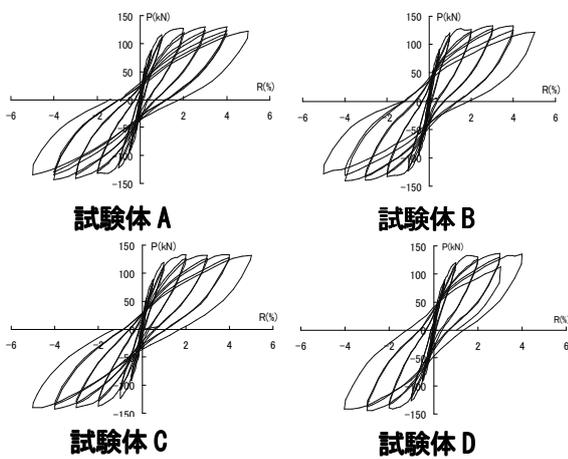


図-5 荷重一部材角関係

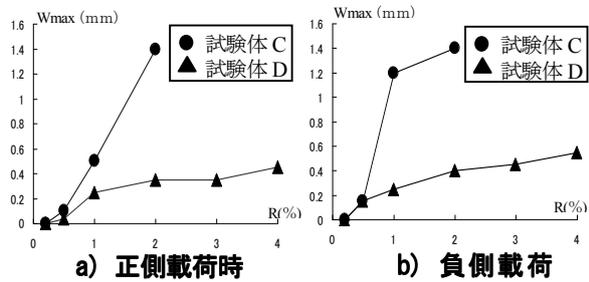


図-6 試験体C, Dの部材角と束材のひび割れ幅

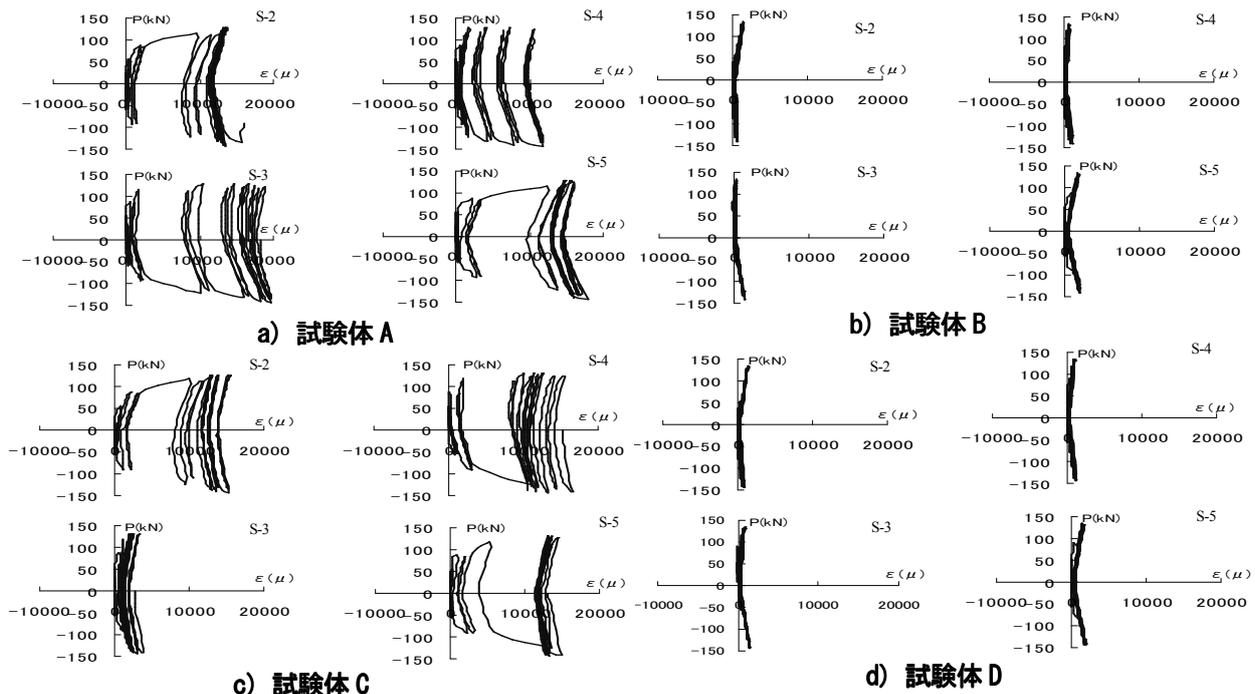
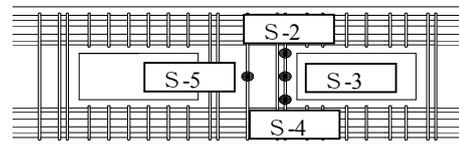


図-7 荷重と束材スターラップのひずみ