

有開口 PC 梁の開口部せん断耐力に関する研究

高津 比呂人*1・木村 秀樹*2・丹野 吉雄*3・渡邊 史夫*4

Use of diagonal reinforcement around web openings in prestressed concrete beams was investigated experimentally. In comparison with prestressed concrete beams without diagonal reinforcement around web openings, test results showed that similar beams provided with diagonal reinforcement around web openings had higher shear strength and proved the effectiveness of such arrangement of reinforcement.

Furthermore, as recommended in the design guidelines of AIJ, disregarding the existing prestressing steel and ducts in the assessment of the shear strength of such beams resulted in an adequate safety margin. In addition, using formula prescribed by AIJ in their basic safety guidelines that are based on the lower bound theory of plasticity, the shear strength of tested prestressed beams with openings was accurately estimated.

Key words : PC Beam, Web Openings, Diagonal Reinforcing, Shear Strength

1. はじめに

大きなスパンが必要とされる事務所建築等を鉄筋コンクリート（以下、RC）系構造で構築する場合、その大梁はプレストレストコンクリート（以下、PC）造とすることが考えられる。通常事務所建築では、空調などの設備配管は天井裏に設けられるが、大梁下にその配管を通すと、配管の分だけ天井高を下げなければならない。その場合、居室の天井高を確保するためには、階高を大きくとる必要があり不経済となる。そのため、実際には梁に設備配管のための開口（貫通孔）が設けられることが多く、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¹⁾（以下、PC 規準）でも開口部設計法が定められている。

しかしながら、PC 規準で定められている開口部補強法では、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（図 - 1）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。

そこで本報告では、有開口 RC 梁の開口補強において広く用いられている開口補強金物（以下、開口補強筋）を

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に実施した実験について報告する。また、斜め筋による補強効果を見込んだ開口部せん断耐力式について検討した結果について併せて報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体配筋図を図 - 2 に、試験体一覧を表 - 1 に示す。試験体は断面 $275 \times 470 \text{ mm}$ の PC 梁試験体 6 体であり、目標コンクリート圧縮強度 (60 N/mm^2)・引張鉄筋の鉄筋比 (1.2%)・せん断スパン比 (3.86) を共通因子とした。パラメータはあばら筋・開口部補強筋量・開口数・プレストレスの大きさとした。なお、いずれの試験体においても、開口の大きさは 157 mm ($D/3$) とし、一つ目の開口の中心は梁固定端から $0.5 D$ の位置に配置した。

試験体は、開口部せん断破壊が先行するように、PC 規準¹⁾による曲げ終局強度 M_B （式 (1)）時のせん断力 Q_{mb} が日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説²⁾（以下、RC 規準）に準じた有開口 RC 梁の開口部せん断耐力³⁾ Q_{ou} （式 (2)）ここでは PC 鋼材の存在およびシース管による断面欠損を無視）を上回るように設計した。

$$M_B = \{1 - 0.5(q + q_s)\} p b d^2 f_{py} + \left\{ \frac{d_s}{d} - 0.5(q + q_s) \right\} p_s b d^2 f_{sy} \quad (1)$$

$$Q_{mb} = M_B / L$$

ここで、

q : PC 鋼材鉄筋係数 ($= p \cdot f_{py} / F_c$)

q_s : 引張鉄筋の鉄筋係数 ($= p_s \cdot f_{sy} / F_c$)

p : PC 鋼材鉄筋比 ($= A_p / (b \cdot d)$)

p_s : 引張鉄筋の鉄筋比 ($= A_s / (b \cdot d)$)

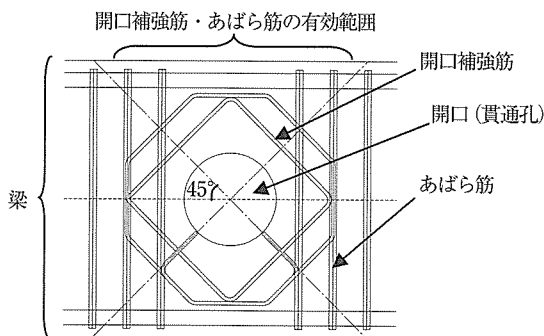


図 - 1 RC 梁の開口補強

*1 Hiroto TAKATSU : (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 研究員

*2 Hideki KIMURA : (株) 竹中工務店 技術研究所

*3 Yoshio TANNO : (株) 竹中工務店 設計本部

*4 Fumio WATANABE : 京都大学 名誉教授

A_p : PC 鋼材断面積 [mm²]
 A_s : 引張鉄筋断面積 [mm²]
 f_{py} : PC 鋼材の降伏点強度 [N/mm²]
 f_{sy} : 引張鉄筋の降伏点強度 [N/mm²]
 F_c : コンクリート圧縮強度 [N/mm²]
 b : 梁幅 [mm]
 d : 断面圧縮縁から PC 鋼材位置までの距離 [mm]

d_s : 断面圧縮縁から引張鉄筋位置までの距離 [mm]
 L : 梁端から加力点までのスパン [mm]

$$Q_{ou} = \left\{ \frac{0.053P_i^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q \cdot d_s) + 0.12} \left(1 - \frac{1.61H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{P_w \cdot w \cdot \sigma_y} \right\} b \cdot j \quad (2)$$

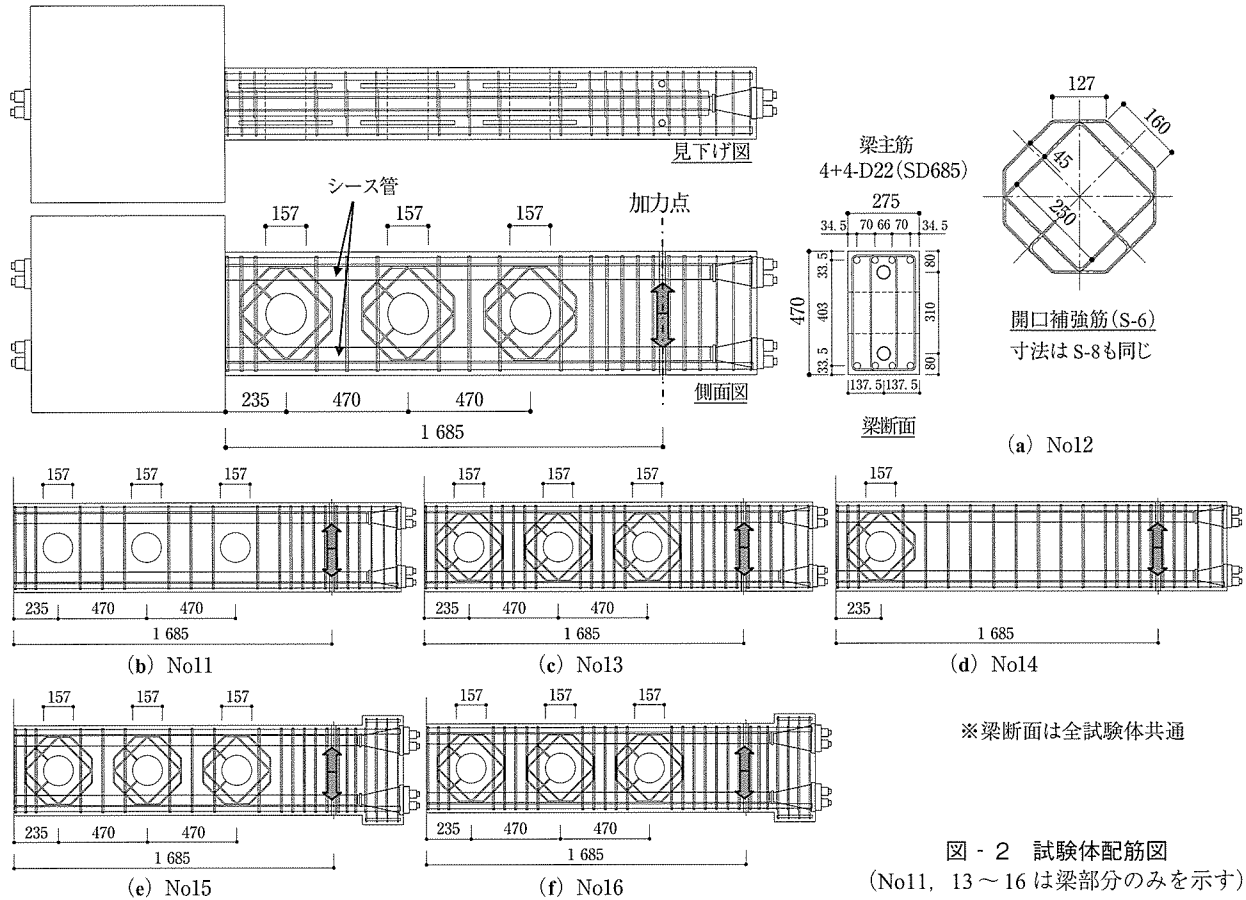


図 - 2 試験体配筋図
 (No.11, 13~16 は梁部分のみを示す)

表 - 1 試験体一覧

試験体	開口数	PC 鋼材		あばら筋		開口補強筋		
		本数	鋼材種	ピッチ [mm]	あばら筋比	鋼材種	種類	鋼材種
No.11	3	上下とも	SWPR7BL	4-D6@117.5	0.004	SD295	-	-
No.12				4-S6@58.75	0.008		2-S6	KSS785
No.13				2-φ12.7	0.004		2-S8	
No.14	1	上下とも	SWPR7BL	4-D6@117.5	0.004	SD295	2-S6	KSS785
No.15	4-φ15.2			0.004	2-S6			
No.16	4-φ15.2			0.008	2-S8			

表 - 2 実験時プレストレス一覧

試験体	P [kN]	σ'_g [N/mm ²]	σ'_{og} [N/mm ²]
No.11	403	3.1	4.7
No.12	421	3.3	4.9
No.13	395	3.1	4.6
No.14	397	3.1	4.6
No.15	1104	8.5	12.8
No.16	1152	8.9	13.4

表 - 3 コンクリート材料特性

	σ_B [N/mm ²]	$E_c (\times 10^4)$ [N/mm ²]	σ_{st} [N/mm ²]
コンクリート	61.6	3.46	4.15
グラウト	51.2	1.38	1.11

σ_B : 円柱供試体圧縮強度 (コンクリート : $\phi 100 \times 200$ mm, グラウト : $\phi 50 \times 100$ mm), E_c : 静弾性係数, σ_{st} : 割裂引張強度

表 - 4 鉄筋材料特性

	σ_y [N/mm ²]	$E_s (\times 10^4)$ [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]
D22 (USD685)	711.8	1.94	904.6
D6 (SD295)	358.1	1.98	536.6
S6 (KSS785)	982.0	1.95	1214.8
S8 (KSS785)	1021.7	2.01	1191.8
φ12.7 (SWPR7BL)	1796.6	2.14	1888.0
φ15.2 (SWPR7BL)	1861.4	2.04	1925.6

σ_y : 降伏強度, E_s : 弾性係数, σ_t : 引張強度

表 - 5 計算値一覧

試験体	Q_{mb} [kN]	Q_{ou} [kN]	Q_{mb}/Q_{ou}
No.11	330.4	123.6	0.37
No.12		211.7	0.64
No.13		318.0	0.96
No.14	444.6	220.3	0.67
No.15		211.7	0.48
No.16		318.0	0.72

P : プレストレス力
 σ'_g : 長方形断面で計算したプレストレス
 σ'_{og} : 開口部断面で計算したプレストレス

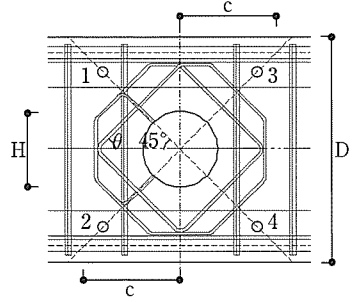


図 - 3 開口補強の有効な c 範囲

ここで、

$$P_{w,s} \sigma_y = P_d \cdot a \sigma_y + P_s \cdot s \sigma_y$$

$P_d \cdot a \sigma_y$: 図 - 3 の片側 c の範囲内にある開口補強筋の補強筋比および降伏点強度 [N/mm²] ($P_d = a_{wd} (\sin \theta + \cos \theta) / (b \cdot c)$)

a_{wd} : 開口補強筋の断面積 [mm²]

θ : 開口補強筋が梁材軸となす角度

c : 補強筋の有効な範囲 (図 - 3 に示す長さ) [mm]

$P_s \cdot s \sigma_y$: 図 - 3 の片側 c の範囲内にあるあばら筋の補強筋比および降伏点強度 [N/mm²]

P_t : 引張鉄筋比 (= $A_s / (b \cdot d_s)$)

$M / (Q \cdot d_s)$: セン断スパン比 ($1 \leq M / (Q \cdot d_s) \leq 3$)

H : 開口径 [mm]

D : 梁せい [mm]

j : 梁の応力中心間距離 (= $7d_s/8$) [mm]

試験体は、梁とスタブの部分を一体でコンクリート打設し、コンクリート圧縮強度が 20 N/mm² 以上であることを確認した後、あらかじめ試験体内に設置していたシース管内に PC 鋼より線を挿入し所定の荷重までプレストレスを導入した。その後、シース管内にセメントグラウト (水セメント比 45%) を充てんした。実験時の各試験体のプレストレスの一覧を表 - 2 に示す。

2.2 加力・計測

加力は 500 kN ジャッキを用い、片持ち梁形式で梁先端に正負繰返し荷重を与えることにより行った。加力の制御は変位制御で行い、部材角 $R = \pm 1, 2, 3.3, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40/1000$ rad. で各 2 サイクルの変位漸増載荷とした。計測項目は、加力点の変形・開口部せん断変形 (図 - 3 中、1 - 4 間および 2 - 3 間にそれぞれ対角に設置した変位計の相対変位により算出)・梁主筋、PC 鋼材、せん断補強筋および開口補強筋のひずみとした。

2.3 材料特性

試験時の各材料強度を表 - 3, 4 に示す。表に示す材料強度を用いて (1), (2) 式で計算した各試験体の曲げ終局強度時のせん断力 Q_{mb} および開口部せん断耐力 Q_{ov} を表 - 5 に示す。

3. 実験結果

3.1 プレストレス導入によるひび割れ

有開口梁にプレストレスを導入する場合、開口周辺に応力集中がおこる。とくに開口中心を通り材軸と平行な軸上には割裂応力が発生するため⁴⁾、プレストレス導入によりひび割れが発生することが考えられる。本実験でもとくにプレストレス力の大きな No15, No16 試験体においては、上記割裂応力が発生する部位でひび割れの発生が確認された。しかしながら、そのひび割れ幅はいずれもクラックスケールで検出できない非常に微細なひび割れ (0.03 mm 未満) であった。

3.2 破壊性状およびせん断力 - 部材角関係

(1) No11 (開口数 3・PC 鋼材上下とも 2- ϕ 12.7・あばら筋比 0.4% (SD295)・開口補強筋なし)

せん断力 - 部材角関係を図 - 4 (a) に示す。図中には、

表 - 5 に示した曲げ終局強度時のせん断力 Q_{mb} および開口部せん断耐力 Q_{ov} の計算値を示した (以下, No12~No16 も同じ)。

梁せん断力 $Q = 54$ kN において梁端側の開口にひび割れが発生した後、 $Q = 59$ kN で梁端部に曲げひび割れが発生した。その後部材角 $R = 20/1000$ rad. で最大耐力に達した後、梁端から 2 番目と 3 番目の開口から進展した斜めひび割れがつながって、せん断破壊した。(破壊モード: 開口間東材のせん断破壊) 破壊の進行状況を写真 - 1 (a), (b) に示す。

(2) No12 (開口数 3・PC 鋼材上下とも 2- ϕ 12.7・あばら筋比 0.4% (SD295)・開口補強筋 2-S6)

せん断力 - 部材角関係を図 - 4 (b) に示す。梁せん断力 $Q = 57$ kN において梁端側の開口にひび割れが発生するとともに梁端部に曲げひび割れが発生した。その後、 $R = 14.5/1000$ rad. で引張側梁主筋が降伏した。梁主筋降伏後も耐力は上昇し続けたが、 $R = 30/1000$ rad. で最大耐力に達した後、 $R = -30/1000$ rad. に向かう負加力中に梁端部の開口に沿った斜めひび割れが梁端から 2 番目のひび割れとつながって拡大し、せん断破壊した。(破壊モード: 梁曲げ降伏後の開口間東材のせん断破壊) 梁曲げ降伏が先行したため、開口補強筋のせん断耐力への寄与分を直接評価することはできないが、開口補強筋のない No11 と比べて、70 kN (1.27 倍) 以上最大耐力が上昇した。これは、開口補強筋によって、開口の左上から右下に向かって生じる圧縮ストラット (写真 - 1 (c) 中の矢印) に生じるひび割れの進展が抑えられたためと考えることができる。このことから、開口部補強筋は有開口 PC 梁の補強にも有効であるといえる。破壊の進行状況を写真 - 1 (c), (d) に示す。No11 と比較すると、全体的に斜めひび割れの勾配が急になる傾向が見られた。

(3) No13 (開口数 3・PC 鋼材上下とも 2- ϕ 12.7・あばら筋比 0.8% (KSS785)・開口補強筋 2-S8)

せん断力 - 部材角関係を図 - 4 (c) に示す。梁せん断力 $Q = 54$ kN において梁端側の開口にひび割れが発生するとともに梁端部に曲げひび割れが発生した。その後、 $R = 15.2/1000$ rad. で引張側梁主筋が降伏した後、No12 試験体と同様に耐力は上昇し続けた。 $R = 40/1000$ rad. で最大耐力に達した後、 $R = -40/1000$ rad. に向かう負加力中に梁端部の開口に沿った斜めひび割れが拡大してせん断破壊した。(破壊モード: 梁曲げ降伏後の開口上下部せん断破壊) No12 試験体よりも開口補強筋量および開口部あばら筋量が大きいこと、せん断破壊時の部材角が大きくなったと考えられる。またこの結果から、梁端部から 0.5 D の位置に開口があっても、開口補強筋および開口部あばら筋により十分補強されていれば、 $R = 40/1000$ rad. の大きな変形まで耐力を保持しつづけることが可能だといえる。破壊の進行状況を写真 - 1 (e), (f) に示す。No12 と斜めひび割れの勾配に明確な差は見られない。

(4) No14 (開口数 1・PC 鋼材上下とも 2- ϕ 12.7・あばら筋比 0.4% (SD295)・開口補強筋 2-S6)

せん断力 - 部材角関係を図 - 4 (d) に示す。梁せん断

力 $Q = 53 \text{ kN}$ において梁端側の開口にひび割れ発生後、 $Q = 57 \text{ kN}$ で梁端部に曲げひび割れが発生した。その後、 $R = 16.1/1\ 000\text{rad.}$ で引張側梁主筋降伏後、耐力は上昇したが、 $R = 30/1\ 000\text{rad.}$ に向かう正加力中に、他の試験体と同様に梁端部の開口に沿った斜めひび割れが拡大してせん断破壊した。(破壊モード：梁曲げ降伏後の開口上下部せん断破壊) 開口補強筋量および開口部あばら筋量が等しい No12 試験体よりも最終破壊時の部材角が小さくなった。破壊の進行状況を写真 - 1 (g), (h) に示す。

(5) No15 (開口数3・PC鋼材上下とも4- $\phi 15.2$ ・あばら筋比0.4% (SD295)・開口補強筋2-S6)

せん断力-部材角関係を図 - 4 (e) に示す。No11~No14 に比べプレストレスが大きいので、曲げひび割れ発生時

の梁せん断力 Q は 126 kN と大きくなった。同荷重で、梁端側の開口でひび割れの発生を確認した。 $R = 15/1\ 000\text{rad.}$ での2回目の载荷において、梁端部の開口に沿った斜めひび割れが梁端から2番目のひび割れとつながって拡大してせん断破壊した。(破壊モード：開口間束材のせん断破壊) 破壊の進行状況を写真 - 1 (i), (j) に示す。

(6) No16 (開口数3・PC鋼材上下とも4- $\phi 15.2$ ・あばら筋比0.8% (KSS785)・開口補強筋2-S8)

せん断力-部材角関係を図 - 4 (f) に示す。曲げひび割れ発生時の梁せん断力 Q は 129 kN と No15 とほぼ同程度の荷重であったが、梁端側の開口部ひび割れ発生時の梁せん断力 Q は 96 kN と No15 と比較してやや小さい値となった。ここで発生したひび割れは、プレストレス導入時に確

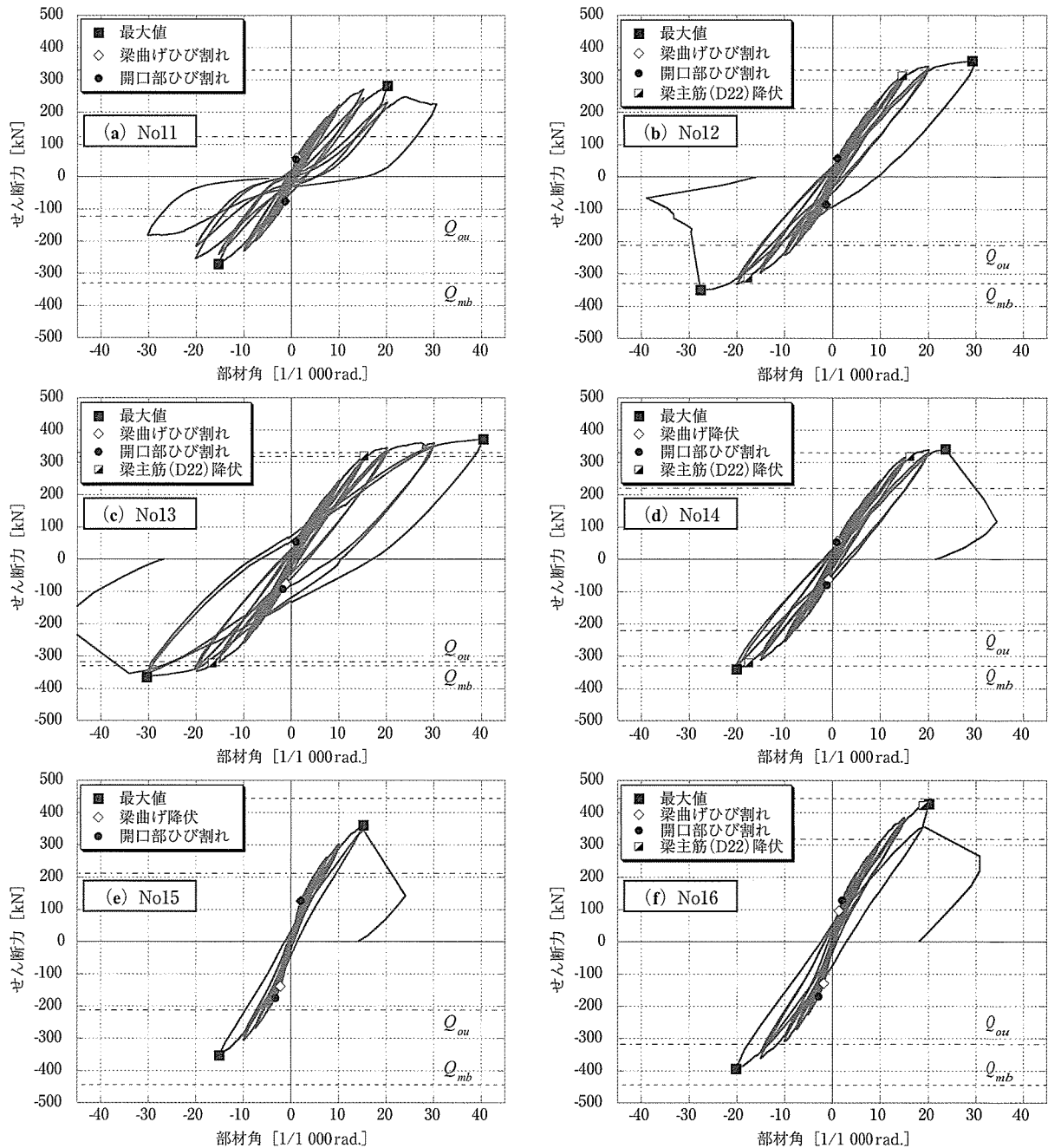
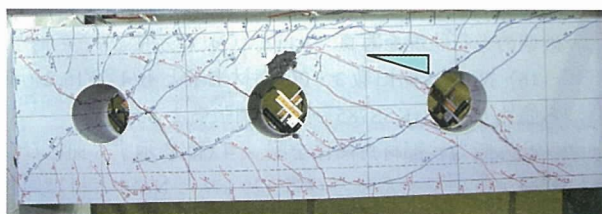


図 - 4 せん断力-部材角関係

○ 論文 ○

認したひび割れから離れた位置に発生したものであり、プレストレス導入により発生した微細なひび割れが影響したか否かについて不明確である。 $R = 18.9/1\ 000\text{rad.}$ で引張側梁主筋の降伏が確認された後、 $R = 20/1\ 000\text{rad.}$ での2回

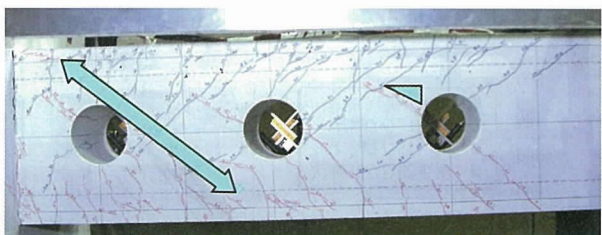
目の載荷において、梁端部の開口に沿った斜めひび割れが拡大してせん断破壊した。(破壊モード：開口上下部せん断破壊) 梁主筋の降伏が見られたものの、計算曲げ耐力を超えていないことからここではせん断破壊と判定した。破



(a) No11 ($R = -15/1\ 000\text{ rad.}$ ピーク時)



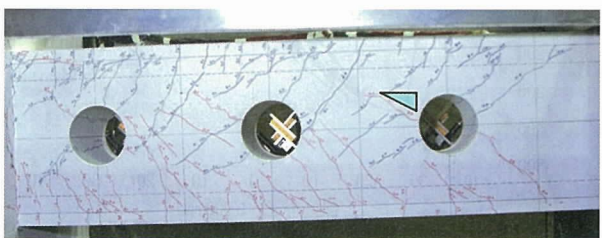
(b) No11 (実験終了時)



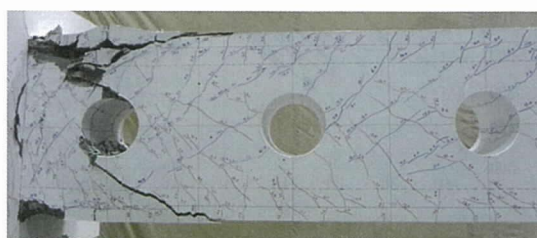
(c) No12 ($R = -15/1\ 000\text{ rad.}$ ピーク時)



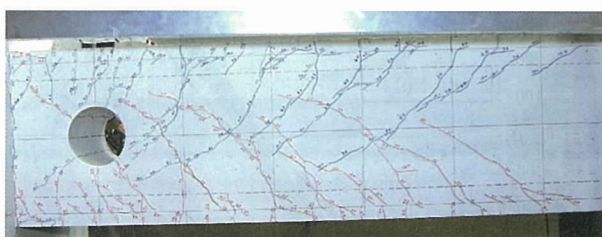
(d) No12 (実験終了時)



(e) No13 ($R = -15/1\ 000\text{ rad.}$ ピーク時)



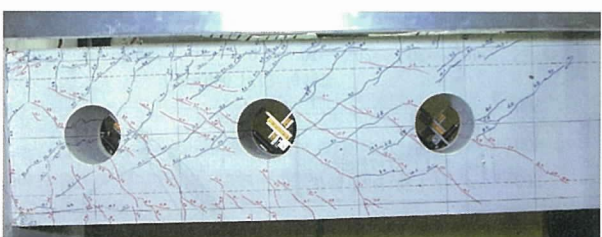
(f) No13 (実験終了時)



(g) No14 ($R = -15/1\ 000\text{ rad.}$ ピーク時)



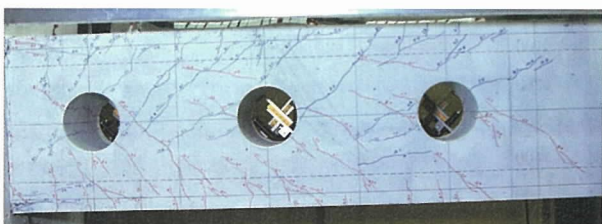
(h) No14 (実験終了時)



(i) No15 ($R = -15/1\ 000\text{ rad.}$ ピーク時)



(j) No15 (実験終了時)



(k) No16 ($R = -15/1\ 000\text{ rad.}$ ピーク時)



(l) No16 (実験終了時)

写真 - 1 各試験体の破壊の進行状況

壊の進行状況を写真 - 1 (k), (l) に示す。

3.3 包絡線の比較

No11~No16 試験体のせん断力 - 部材角関係の正側包絡線を図 - 5 に示す。

剛性はNo11がNo12, 13, 14よりもやや低く、プレストレスの大きいNo15とNo16は逆にやや高い結果となった。プレストレスが大きい試験体では、曲げひび割れ発生荷重が大きくなった(弾性範囲が広がった)ことが影響していると考えられる。また、No11の剛性が小さくなったのは、開口補強量が小さいため、とくに開口周辺の損傷が早期の段階から卓越したためと考えることができる。

プレストレス力がほぼ同じで、開口部補強量が異なるNo12とNo13を比較すると、補強量の多いNo13の方が1.3倍以上の大きな変形能力を有していたことが分かる。

3.4 開口補強筋および開口部あばら筋のひずみ分布

図 - 6 に梁端部にもっとも近い開口位置の開口補強筋と開口部あばら筋のひずみ分布を示す。図では、各試験体の

正加力時のせん断力 50 kN 毎および最大耐力時の計測ひずみを示している。

開口補強筋ひずみ (1PI, 1PO) は、No12, 13, 14ではせん断力が 100 kN を超えたあたりから、No15, 16では 150 kN を超えたあたりからひずみが生じていることが分かる。このことから、開口補強筋は比較的早期の段階から有効に働いていたといえる。また、せん断力が大きくなるにしたがって開口に近い側のひずみが外側よりも大きくなる傾向が見られた。いずれの開口補強筋も最大耐力時でも降伏ひずみを超えることはなかった。

一方、開口部あばら筋ひずみ (SCO, SDO, SEO (図 - 3 に示す c 区間の範囲外)) について、No11, 12, 15, 16では開口補強筋と同様に開口に近い側のひずみが大きくなる傾向が見られたが、No13ではSCOよりもSDOのひずみが大きい結果となった。詳細は今後ひび割れデータとともに検討する必要があるが、開口部せん断ひび割れが開口補強筋により抑えられ、開口の無い部分の曲げせん断ひび割

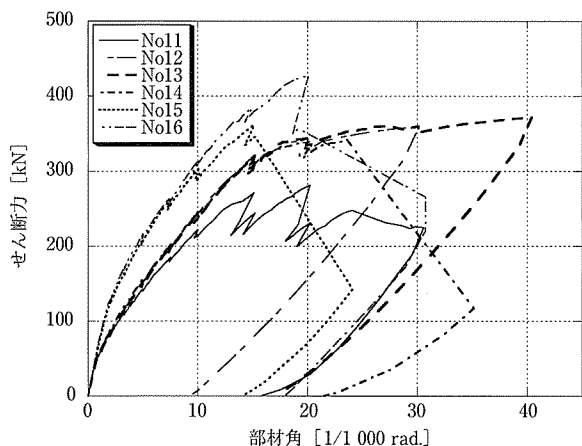


図 - 5 包絡線の比較

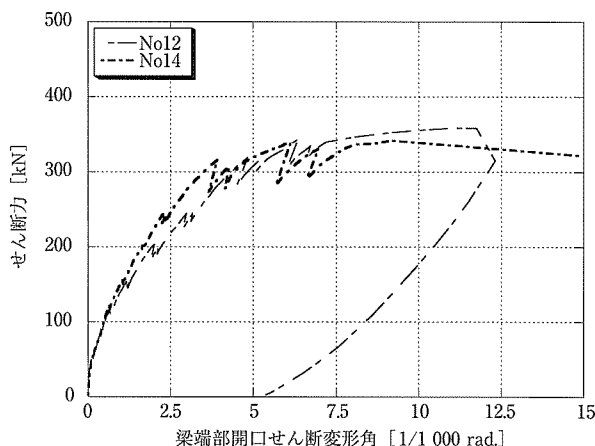


図 - 7 No12, No14 梁端部開口せん断変形角包絡線の比較

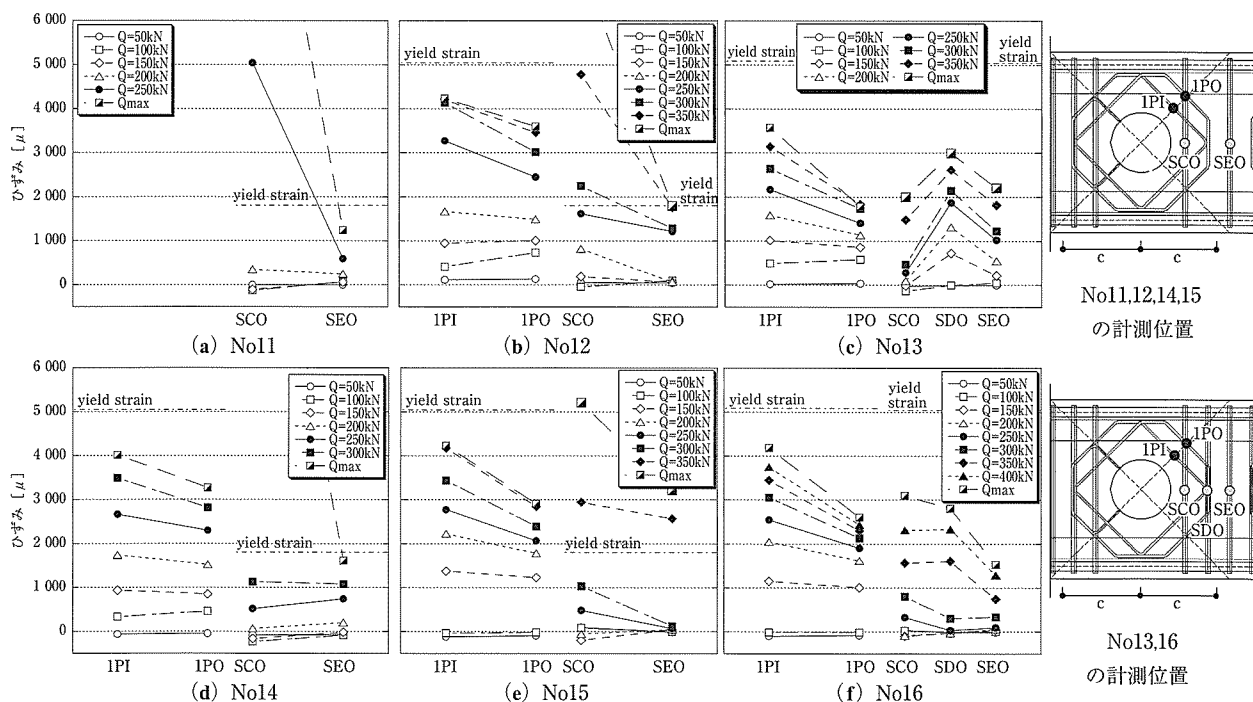


図 - 6 開口補強筋および開口部あばら筋のひずみ

れが卓越した可能性が考えられる。普通強度鉄筋 (SD295) のあばら筋はすべて最大耐力時に降伏ひずみを超えたが、高強度あばら筋 (KSS785) のあばら筋は降伏ひずみを超えなかった。

同じ配筋・同じプレストレスの No12 と比べ、変形性能が小さい No14 では、No12 よりも同じせん断耐力での開口部あばら筋のひずみが小さくなる傾向が見られた。No12 では、3つの開口部にひび割れが分散し、比較的緩やかに破壊が進行したため、コンクリートが負担していたせん断耐力が徐々にあばら筋に移行したのに対して、No14 では応力状態の厳しい梁端の1つの開口部に損傷が集中してコンクリートが脆性的に破壊したため、変形性能に差が生じたと考えられる。図 - 7 に示す No12, No14 試験体のせん断耐力と梁端部開口せん断変形角の関係の正側包絡線の比較においても、同じせん断耐力における開口部せん断変形角は No14 の方が小さく、最大耐力直前に大きく増加するという結果が得られた。

4. せん断耐力の評価

4.1 RC 規準計算値との比較

実験で得られた正負側それぞれ最大耐力と最大耐力時の部材角、RC 規準計算値 (式 (2)) の一覧を表 - 6 に示す。また、最大耐力 (正負どちらかでひび割れが拡大し耐力が低下すると、逆に加力した際には本来もつせん断耐力には達しないと考えられるため、ここでは正負のうち大きい方の値を最大耐力と定義した) と RC 規準計算値を比較したものを図 - 8 に示す。

図より、PC 鋼材の存在を無視した RC 規準計算値によって、PC 梁の開口部せん断耐力は安全側に評価できることが分かる。また、せん断破壊した試験体 No11, 15, 16 に

表 - 6 実験結果一覧

試験体	正側		負側		Q_{ou} [kN]
	Q_{max} [kN]	R_{Qmax} [1/1000rad.]	Q_{max} [kN]	R_{Qmax} [1/1000rad.]	
No11	281.5	20.2	-270.9	-15.4	123.6
No12	358.7	29.2	-349.4	-27.7	211.7
No13	371.9	40.4	-364.8	-30.4	318.0
No14	341.8	23.6	-339.8	-20.1	220.3
No15	361.6	15.1	-352.8	-15.1	211.7
No16	427.6	20.1	-394.2	-20.2	318.0

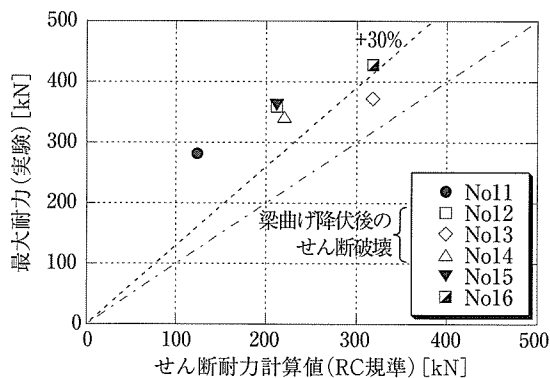


図 - 8 最大耐力と RC 規準計算値の比較

ついては余裕度が 30 % 以上あることも確認できた。

一方、プレストレスのせん断耐力への寄与については、開口のない部材に対して、日本建築学会プレストレス鉄筋コンクリート (Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説⁵⁾ で長方形断面で計算した平均プレストレスの 1/10 がコンクリートに加算されるという考え方を採用している。その方法に倣って有開口 PC 梁のせん断耐力 pQ_{ou} を誘導すると以下の式となる。

$$pQ_{ou} = \alpha \cdot 0.1 \sigma_g^j \cdot b \cdot j + Q_{ou} \quad (3)$$

ここで、

$$\alpha : 4/(M/(Q \cdot d_s) + 1) \quad \text{ただし } (1 \leq \alpha \leq 2)$$

最大耐力と式 (3) による有開口 PC 梁のせん断耐力計算値を比較したものを図 - 9 に示す。いずれも実験値が計算値を上回っており、本実験の範囲内ではプレストレスのせん断耐力への寄与を見込んでも安全側に評価できることを確認した。

以上より、実験では開口補強筋および高強度開口部あばら筋は降伏していないものの、材料降伏強度を用いて算出した式 (2) を用いて PC 梁の開口部せん断設計を行うことは実務上問題ないといえる。また、本実験で採用したプレストレスやせん断スパン比の範囲では、式 (3) により開口部せん断設計を行うことも可能である。ただし、式 (3) を用いる場合には、余裕度を大きくとる必要がある。

4.2 靱性保証型指針計算値との比較

4.1 節に示した RC 規準計算値 (式 (2)) は、広範囲な RC 実験資料に基づき提案された式であり、有開口 PC 梁に対する適用性を考えた場合、さらに実験データを蓄積して比較検討を十分に行うことが必要である。

一方、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・同解説⁶⁾ (以下、靱性保証型指針) においては、有開口 RC 梁のせん断耐力を塑性理論の下界定理に基づいたトラス・アーチ両機構の和として評価しようとする試みがなされており、ここではその計算値と実験値の比較を行う。靱性保証型指針において、斜め筋により補強した有開口梁のせん断耐力は式 (4) で与えられている。式 (4) はあばら筋により補強された有開口梁 (図 - 10) のせん断強度と斜め筋 (開口補強筋) の降伏耐力の材軸に垂直な成分の和で表される。

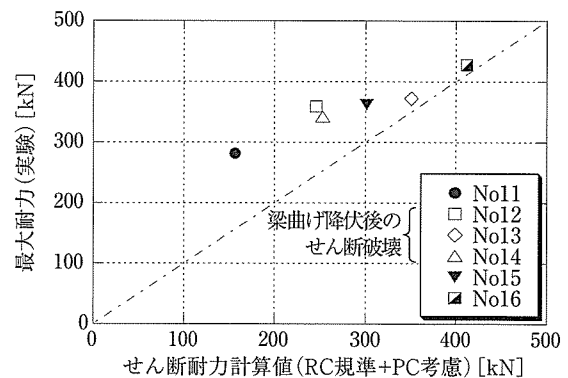


図 - 9 最大耐力と有開口 PC 梁せん断耐力との比較

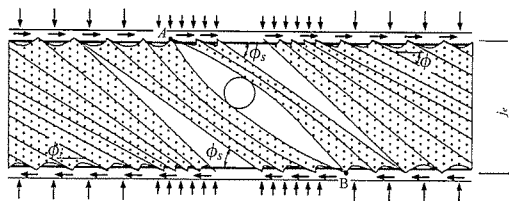


図 - 10 あばら筋のみで補強された有開口梁のトラス作用⁶⁾ (ϕ : トラス機構の角度, ϕ_s : 開口上下でのコンクリート圧縮応力の傾き)

$$Q_{out} = Q_{n1} + Q_x \quad (4)$$

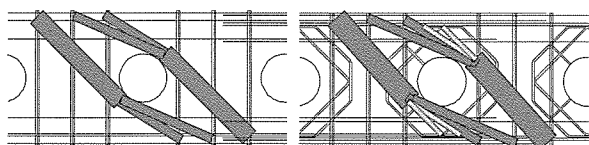
$$Q_{n1} = \begin{cases} 2b_e j_e P_{ws} \sigma_y \\ \{p_{ws} \sigma_y + \lambda (1-2\gamma) v F_c\} / 3 \cdot b_e j_e \text{ の最小値} \\ \lambda (0.5-\gamma) b_e j_e v F_c \end{cases}$$

$$Q_x = A_{x1} \sigma_y \sin \theta_x$$

ここで、

- b_e : 断面の有効幅 [mm]
- j_e : 断面の有効せい [mm]
- p_{ws} : 開口の両側のあばら筋比
- λ : トラス機構の有効係数
- γ : 有効せいに対する開口径の比 ($= H/j_e$)
- v : コンクリート圧縮強度の有効係数
- A_{x1} : 引張側の斜め筋の断面積 [mm²]
- θ_x : 斜め筋が材軸となす角度

ただし、文献6)では、斜め筋は開口両脇のあばら筋よりも外側に定着したものを対象としており、今回使用した既製品である開口補強筋は対象外となっている。しかしここでは、補強筋が開口の上下部分で定着されていると考え⁷⁾、図 - 11 に示すストラットを想定した。たとえば、開口部左上から右下に向かうストラットは、開口補強筋がない場合、開口部右側の補強筋に向かって2つに分かれる。それに対して開口補強筋がある場合には、開口補強筋に向かう



(a) 開口補強筋がない場合 (b) 開口補強筋がある場合

図 - 11 想定される開口周辺のストラット

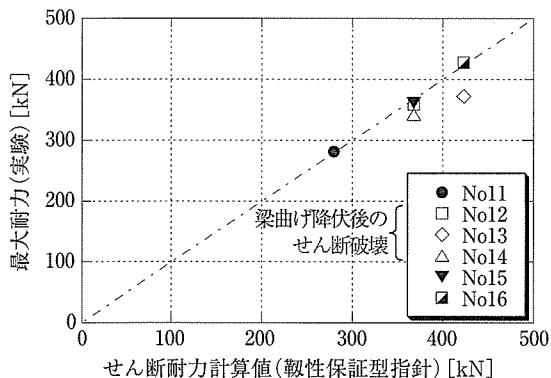


図 - 12 最大耐力と靱性保証型指針計算値との比較

ストラットも形成されるため、開口部左上から右下に向かうストラットの幅が増え、わずかではあるがその勾配も立つ。このことは、3.2節で示した開口補強筋のないNo11と開口補強筋のあるNo12の実験で観測されたひび割れ発生角度の差および最大耐力の差と一致する。

よって、開口両脇のあばら筋よりも外側に定着されていない斜め筋は適用範囲外ではあるが、ここでは式(4)を準用して検討を進めることとした。

式(4)による計算値と実験値の比較を図-12に示す。なおここでは、すべて降伏ヒンジを計画しない梁部材と仮定して耐力を算定しており、コンクリート圧縮強度の有効係数は $v = 0.7 - F_c/200$ として算出した。

図より、せん断破壊したNo11, 15, 16試験体については、実験値と計算値がほぼ一致していることが確認できる。一方、梁曲げ降伏後にせん断破壊したNo12, 13, 14試験体は実験値を下回る結果となった。しかしながら梁曲げ降伏後のせん断強度は、繰返し塑性変形によりコンクリートの有効圧縮強度の低下等が生じるため、梁主筋が降伏しない梁のせん断強度よりも低下することを勘案すると、妥当な結果であるといえる。

5. ま と め

開口周囲に斜め筋による補強を施した有開口PC梁の実験を実施し、以下の知見を得た。

- ・開口補強筋により補強した有開口PC梁のせん断耐力は、補強の無い有開口PC梁と比較して耐力が大きく上昇した。RC梁で広く用いられている開口補強筋による補強は有開口PC梁の開口部補強にも有効である。
- ・梁端部0.5Dの位置に開口を配置しても、適切に開口補強を行えば、十分なじん性能を確保することが可能である。
- ・有開口PC梁の開口部せん断耐力は、PC鋼材の存在を無視したRC規準計算値(式(2))で安全側の評価ができる。また、本実験の範囲内においては、プレストレスのせん断耐力への寄与を考慮した式(3)でも安全側の評価となる。
- ・塑性理論の下界定理に基づいた靱性保証型指針式(式(4))で有開口PC梁の開口部せん断耐力は精度良く評価できる可能性がある。

今後更なる実験データを蓄積し、評価式の精度を上げる必要がある。とくに、靱性保証型指針式のコンクリート圧縮強度の有効係数にプレストレス(軸応力)の効果を取り入れることを検討する必要があると考えられる。

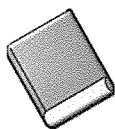
参 考 文 献

- 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) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999
- 3) 宮内靖昌, 高津比呂人, 毛井崇博, 三村麻里: 斜め補強筋を用いて大口径貫通孔を補強した基礎梁の力学性状と構造設計法, GBRC, Vol.31, No.4, pp.16-23, 2006
- 4) 六車照, 下伊豆隆三: PC有孔ばりに関する研究 - 曲げスパンに円孔を有する場合 -, セメント技術年報 XVI, pp.389-396, 1962

- 5) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説，1986
6) 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・同解説，1999

- 7) 坂田弘安，市之瀬敏勝，神谷典良：斜筋補強された RC 有孔梁のせん断強度解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.601-606，1995

【2010年3月9日受付】

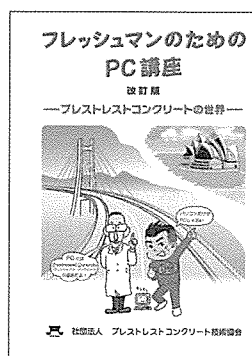


図書案内

フレッシュマンのための PC 講座・改訂版 — プレストレストコンクリートの世界 —

大変ご好評をいただいております「フレッシュマンのための PC 講座」も平成 9 年に第一版が発刊されてから約 10 年が経過いたしました。

その間に、基準値・規格値をはじめとした技術基準が従来単位系から SI 単位系に移行しました。また、プレストレストコンクリート構造物においても、複合構造等の新しい構造物が誕生しています。そこで、これらの項目を新しく見直して、改訂版を発刊することにいたしました。これからの技術者を育てるためには、大変有意義な図書であると確信しておりますので、是非有効利用されることをお勧めいたします。



主な改訂項目

- ・従来単位系から SI 単位系に変更しました。
- ・PC を利用した構造物の紹介に、最近の新しい構造物を盛り込みました。

発刊日：2007年3月

定価：3,600円/送料400円/冊

会員特価：3,000円/送料400円/冊

体裁：A4判，140頁

申込先：社団法人プレストレストコンクリート技術協会