

論文 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

高津 比呂人*1・木村 秀樹*2・宮内 靖昌*3

要旨：直径が梁せいの 1/2.5 の円形開口を有する RC 梁に一定軸力を導入してせん断加力を実施した。開口周辺の補強方法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の 2 種類とした。実験の結果、軸力を導入した際、開口中心を通り材軸と平行な軸上にひび割れが発生するが、そのひび割れの幅は微小であり、最大耐力への影響もほとんど無いことを確認した。また、最大耐力は市販の開口補強金物を用い開口が 1 つの場合・開口が 2 つの場合（開口間隔 = 梁せい）、斜め補強筋を用い開口が 1 つの場合のいずれも、既往の設計式で評価できること、軸力（プレストレス）の効果を勘案した評価式で推定できることを確認した。
 キーワード：有開口梁，せん断耐力，開口補強金物，斜め補強筋，プレストレス

1. はじめに

大きなスパンが必要とされる事務所ビル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）造とすることがある。通常事務所ビルでは、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。

筆者らは、これまでに斜め筋を 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、直径 D/3（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²⁾。本報告では、更に設備配置の自由度を高めるため、開口の直径を D/2.5 に拡大した PC 梁を模擬した部材の加力実験について報告する。

2. 実験概要

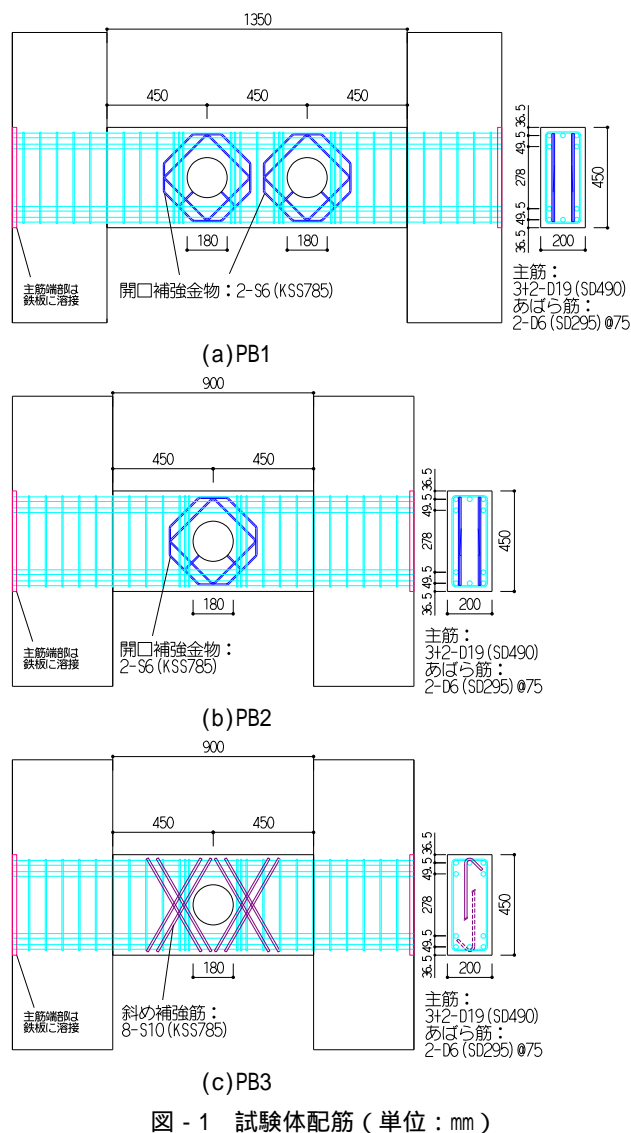
2.1 試験体概要

試験体一覧を表 - 1 に、試験体の配筋を図 - 1 に示す。

表 - 1 試験体一覧

試験体	梁断面	スパン	開口数	開口補強方法
PB1	200mm	1350mm	2- 180mm	開口補強金物
PB2	450mm	900mm	1- 180mm	
PB3	450mm			斜め補強筋

梁断面は幅 200mm × せい 450mm とし、内法スパンは開口が二つの PB1 では 1350mm、開口が一つの PB2、PB3 では 900mm とした。開口の直径は、試験体の梁せいの 1/2.5



*1 (株)竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 研究員 工修 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 マネージャー 工博 (正会員)

*3 (株)竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 主席研究員 博(工) (正会員)

の 180mm とし、開口周辺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³⁾の 2 種類とした。開口が二つの PB1 では開口間隔を梁せいと等しい 450mm とした。なお、ここで用いた開口補強金物の適用範囲は、開口径が梁せいの 1/3 以下、開口中心間隔は開口径の 3 倍以上と定められており、本試験体はその適用範囲⁴⁾から外れている。また、斜め補強筋は両端 135°フックで梁主筋に結合されている。

なお、本研究は有開口 PC 梁の開口部せん断耐力を確認することを目的としているが、試験体寸法の制約から、内部に PC 鋼材を配置してプレストレス力を与えるのではなく、外部ジャッキにより軸力を与えることで PC 梁の応力状態を模擬した(実大の梁であれば PC 鋼材は問題なく配置することが可能)。このため、変形が大きくなる場合や正負繰り返し載荷を行う場合には PC 梁の応力状態と大きく異なってくるのが考えられる。今回は実際の PC 梁試験体を製作するための予備実験と位置付け、導入可能なプレストレス力の把握および軸力の存在が有開口 PC 梁のせん断力に及ぼす影響を把握するために行った。

試験時のコンクリートおよび鉄筋の材料強度を表 - 2 に示す。

表 - 2 コンクリート、鉄筋の材料強度

	σ_b [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]
コンクリート	74.7	3.59×10^4	4.2
	σ_y [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]
梁主筋 (D19)	524.4	1.95×10^5	693.9
あばら筋 (D6)	357.6	1.93×10^5	509.2
開口補強金物 (S6)	964.3	1.91×10^5	1198.6
斜め補強筋 (S10)	1007.9	1.93×10^5	1129.2

σ_b : 100mm × 200mm シリンダー圧縮強度, E_c : コンクリートの係数, σ_t : 割裂引張強度, σ_y : 降伏強度, E_s : 鉄筋のヤング係数, σ_u : 引張強さ

2.2 加力

加力は、建研式加力装置(図 - 2)にて行った。まず、有開口梁にプレストレスを導入した際の性状を確認する

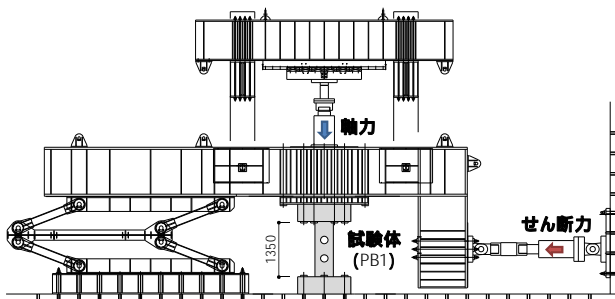


図 - 2 加力装置図

ため、開口部での軸力比 $\alpha_h (=N/(B \cdot (D-H) \cdot \sigma_b))$ (N : 導入軸力[N], B : 梁幅[mm], H : 開口直径[mm]) を 0.4 になるまで段階的に鉛直ジャッキにて軸力を導入した後に、開口部での軸力比 α_h をプレストレス定着完了時を想定した 0.25 (中実部での軸力比 0.15) まで下げた(軸力導入実験)。

次に、開口部での軸力比 $\alpha_h = 0.25$ を保持しながらせん断力の加力を行った(せん断加力実験)。加力は一方向繰り返し載荷で行い、開口部ひび割れ発生荷重計算値 Q_c ⁵⁾(式(1))と無開口梁の長期許容せん断力 Q_{al} ⁶⁾(式(2))到達後にそれぞれ 1 回除荷した後、試験体の破壊まで荷重を漸増させた。

$$Q_c = \frac{0.085 \cdot k_c (50 + \sigma_b)}{M/(Q \cdot d) + 1.7} \left(1 - 1.65 \frac{H}{D}\right) B \cdot j \quad (1)$$

$$Q_{al} = B \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s \quad (2)$$

ここで、

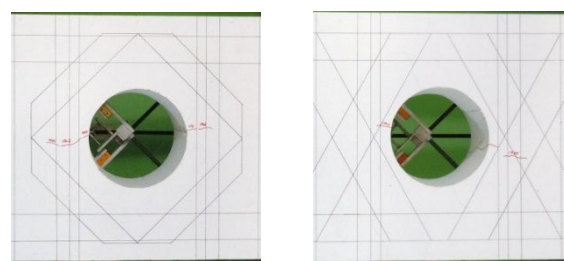
k_c : 断面寸法による補正係数(ここでは 0.72), $M/(Q \cdot d)$: せん断スパン比(ただし, $1 \leq M/(Q \cdot d) \leq 3$), d : 梁有効せい[mm], j : 梁の応力中心間距離(=7d/8)[mm], α : せん断スパン比による割増係数(=4/(M/(Q \cdot d)+1))(ただし, $1 \leq \alpha \leq 2$), f_s : コンクリートの長期許容せん断応力度(=min($\sigma_b/30, 0.49 + \sigma_b/100$))

3. 実験結果

3.1 軸力導入実験

有開口梁に軸力(プレストレス)を導入すると、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。本研究では、軸力導入時のひび割れ発生状況、および発生したひび割れが最終破壊に及ぼす影響を確認するため、 $\alpha_h = 0.4$ の過大な軸力を与えた。

軸力導入後の PB2 および PB3 のひび割れ状況を写真 - 1 に示す(ひび割れをマジックでトレースした)。試験体表面ならびに開口内部に、開口中心を通り材軸と平行な軸上に微細なひび割れが発生した。各試験体のひび割れ発生時の軸力比 $\alpha_h = 0.4$ 時最大ひび割れ幅・定着完了時($\alpha_h = 0.25$)最大ひび割れ幅を表 - 3 に示す。なお、ひび割れ幅はクラックスケール(分解能 0.03mm)により計



(a) PB2 (開口補強金物) (b) PB3 (斜め補強筋)

写真 - 1 $\alpha_h = 0.4$ 時ひび割れ状況

表 - 3 ひび割れ発生時の軸力比とひび割れ幅一覧

	ひび割れ発生時 h	$h=0.4$ 時	定着完了時
		最大ひび割れ幅	最大ひび割れ幅
PB1	0.299	0.03mm	0.03mm
PB2	0.173	0.04mm	0.04mm
PB3	0.298	0.03mm	0.03mm

測した。ひび割れ発生時の開口部軸力比は 0.17~0.30 とばらつき、補強筋種類・開口数の影響は確認できなかったが、 $h=0.4$ 時のひび割れ幅は最大で 0.04mm と非常に小さな値であった。ただし、定着完了を想定した $h=0.25$ に軸力を下げてもひび割れ幅は変わらなかった。

以上の結果から、有開口梁にプレストレスを導入する際、ひび割れを全く発生させないようにするためには、開口部軸力比を 0.15 程度に抑える必要があるといえる。

3.2 せん断加力実験

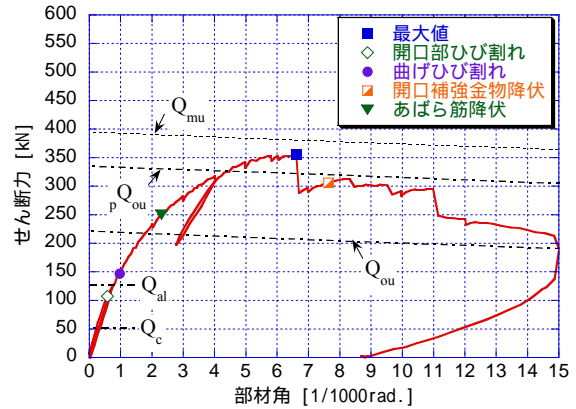
軸力導入実験の後、 $h=0.25$ を保持したまま一方せん断加力を行った。せん断力 (Q) - 部材角 (R) 関係を図 - 3 に示す。図中には、 Q_c 、 Q_{al} の値と、梁両端曲げ終局強度⁷⁾時のせん断力 Q_{mu} 、式 (3) による RC 有開口梁の開口部せん断強度 Q_{ou} ⁶⁾ および、式 (4) による筆者らが提案した軸力 (プレストレス) のせん断耐力への寄与を考慮した有開口梁のせん断強度 pQ_{ou} ²⁾ を併記した。

$$Q_{ou} = \left\{ \frac{0.053 \cdot P_t^{0.23} (\sigma_B + 18)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{P_w \cdot w \sigma_y} \right\} B \cdot j \quad (3)$$

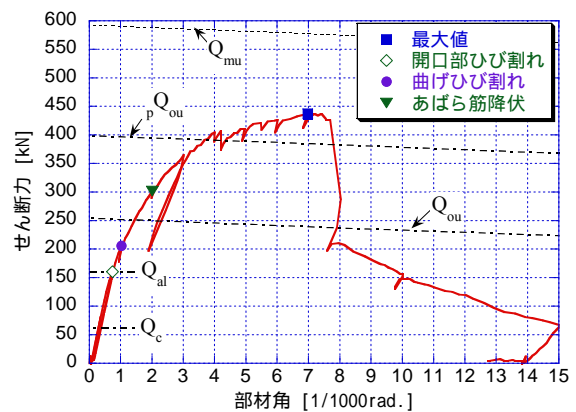
$$pQ_{ou} = B \cdot j \cdot \alpha \cdot 0.1 \sigma'_g + Q_{ou} \quad (4)$$

ここで、
 P_t : 引張鉄筋比 (= $A_s / (b \cdot d) \times 100$) [%], A_s : 引張鉄筋断面積 [mm^2], $P_w \cdot w \sigma_y = P_d \cdot d_y + P_s \cdot s_y$, $P_d \cdot d_y$: 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強度 [N/mm^2] ($P_d = a_{wd} (\sin \theta + \cos \theta) / (B \cdot c)$), a_{wd} : 開口補強筋の断面積 [mm^2], 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 [mm] (図 - 4), $P_s \cdot s_y$: 片側 c の範囲内にあるあばら筋の補強筋比および降伏強度 [N/mm^2] (表 - 4), σ'_g : 長方形断面(中実断面)で計算した軸心力度 [N/mm^2] ただし、 $P_w \cdot w \sigma_y$ 20 N/mm^2 かつ $P_s \cdot s_y$ 9.8 N/mm^2 $w \sigma_y, s_y$ 25 B とする⁴⁾。

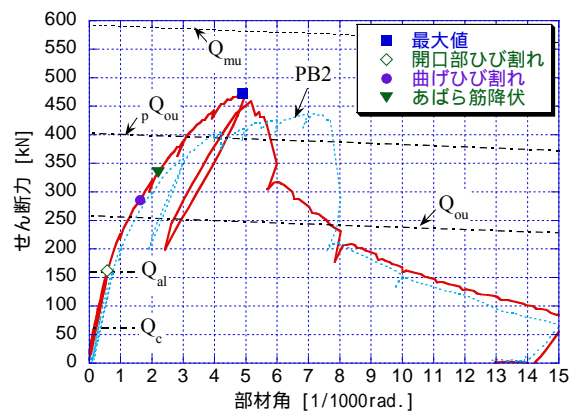
いずれの試験体も、梁主筋の降伏が見られなかったこと、梁両端曲げ終局強度を超えなかったこと、後述の写真 - 2 に示すひび割れ発生状況 (開口を起点とする斜めひび割れの拡大) から、破壊モードは開口部せん断破壊であったと判定できる。また、開口部ひび割れ発生荷重計算値 Q_c と無開口梁の長期許容せん断力 Q_{al} の繰り返し載荷では残留変形がほとんど無いことも確認できた。



(a)PB1



(b)PB2



(c)PB3

図 - 3 せん断力 - 部材角関係

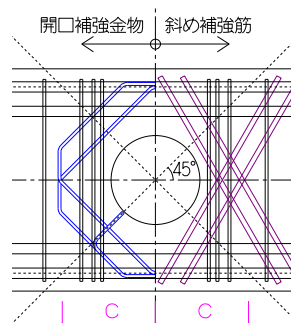


図 - 4 補強筋の有効な c の範囲

表 - 4 P_d, P_s の値

	PB1, PB2	PB3
P_d [%]	0.48	0.51
P_s [%]	0.51	0.51
[$^\circ$]	45	60

実験結果一覧を表 - 5 に示す。全試験体の最大せん断力は RC 有開口梁の開口部せん断強度 Q_{ou} および軸力の効果を考慮した開口部せん断強度 ${}_pQ_{ou}$ を上回る結果となった。実験で得られた最大耐力に対して、RC 有開口梁の開口部せん断強度 Q_{ou} はかなり安全側の値であるのに対して、文献 2) で提案した軸力の効果を考慮した提案式 ${}_pQ_{ou}$ は実験値を適切にかつ安全側に評価することができている。以上より、D/2.5 開口についても文献 2) で提案した式で評価できることを確認できた。

開口部ひび割れ発生強度の実験値は計算値 Q_c を上回った。また、無開口梁の長期許容せん断力 Q_{al} 時にはひび割れが発生したものの、各試験体の最大ひび割れ幅は 0.04mm 以下であったため、長期荷重下で使用上支障となるひび割れは生じないと判断することができる。

開口が 2 つの PB1 は開口が 1 つの試験体に比べ、最大耐力発揮後の耐力低下が小さくなる傾向が見られた。また、開口が 1 つで開口補強金物で補強した PB2 と斜め補強筋で補強した PB3 を比較すると、ともに最大耐力発揮後の耐力低下は大きいですが、PB2 は最大耐力到達前にせん断力 - 変形角関係の勾配が緩やかになり、荷重を保持したまま変形が進んだ後に $R=7/1000rad.$ で最大耐力に到達したのに対し、PB3 はほとんど剛性低下せずに最大耐力に到達したため、最大耐力時の変形は $R=5/1000rad.$ と小さくなった。また、図 - 3(c) に示した PB3 の Q-R 関係と、図に併記した PB2 の Q-R 関係を比較すると、PB3 の方が初期剛性も若干高いことがわかる。

全試験体であれば筋の降伏は確認されたが、開口補強金物の降伏は PB1 のみ（最大耐力発揮後）であり、PB2 の開口補強金物、PB3 の斜め補強筋は降伏ひずみに達しなかった。

写真 - 2 に最大耐力到達直後のひび割れ発生状況を示す。

表 - 5 実験結果一覧

	PB1	PB2	PB3
${}_eQ_c$ [kN]	107.4	160.3	161.8
$R_{{}_eQ_c}$ [/1000rad.]	0.6	0.7	0.6
Q_c [kN]	52.0	62.4	62.4
Q_{al} [kN]	126.6	160.4	160.4
${}_eQ_c/Q_c$	2.07	2.57	2.59
${}_eQ_{max}$ [kN]	356.0	436.9	472.2
$R_{{}_eQ_{max}}$ [/1000rad.]	6.6	7.0	4.9
Q_{ou} [kN]	207.8	239.9	248.6
${}_eQ_{max}/Q_{ou}$	1.71	1.82	1.90
${}_pQ_{ou}$ [kN]	321.6	384.1	392.7
${}_eQ_{max}/{}_pQ_{ou}$	1.11	1.14	1.20

${}_eQ_c$: 開口部ひび割れ発生強度実験値, $R_{{}_eQ_c}$: ${}_eQ_c$ 時部材角, ${}_eQ_{max}$: 最大耐力実験値, $R_{{}_eQ_{max}}$: ${}_eQ_{max}$ 時部材角

開口が 2 つで開口補強金物で補強した PB1 は最大耐力時に開口間の斜めひび割れが繋がり拡大した様子が確認された。開口が 1 つで開口補強金物で補強した PB2 は、開口上部と梁端上縁を結ぶひび割れが拡大したことがわかる。一方、開口が 1 つで斜め補強筋で補強した PB3 は、開口上部から伸びたひび割れは梁端ではなく、やや梁の中心側に入ったことがわかる。これは、斜め補強筋と梁主筋の結合位置（図中 の位置）に大きな定着力が働いているため、開口の左右を結ぶ圧縮ストラットの傾きが大きくなったことが一因であると推察される。

本実験では、軸力導入実験で発生したひび割れに起因するひび割れが、せん断加力実験の最大耐力時に拡大する様子が確認できなかったことから、有開口梁に軸力（プレストレス）導入時に発生する開口周囲の微細なひび割れは、その部材の耐震性能にほとんど影響しないと考えてよいといえる。

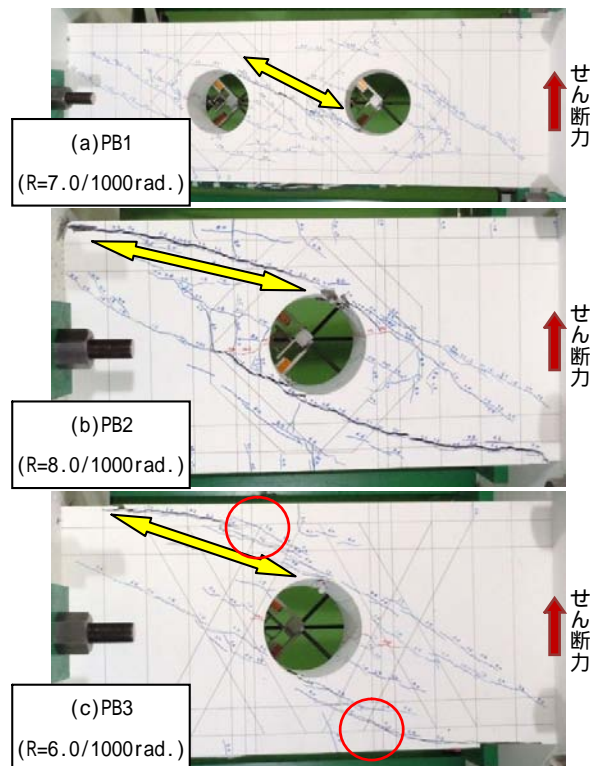


写真 - 2 最大耐力直後のひび割れ発生状況

3.3 補強筋の負担するせん断力

開口が 1 つの PB2 と PB3 について、開口中心を通る 45 度破壊面（図 - 5）において、補強筋ひずみの計測値より、コンクリート・あばら筋・開口補強金物もしくは斜め補強筋が負担する鉛直せん断力の推移を算出した⁸⁾。実際に発生したひび割れの角度は 45 度より小さいが、せん断耐力式の算定において補強筋の有効な範囲を、開口中心を通る 45 度破壊面で定めているので、ここではそれに倣い、開口補強金物と斜め補強筋の効果を相対比較す

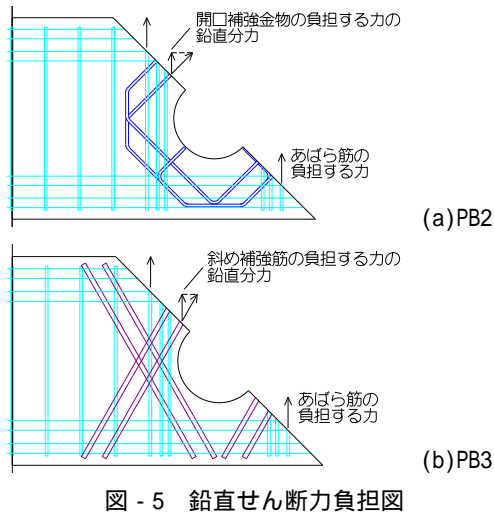


図 - 5 鉛直せん断力負担図

ることとした。

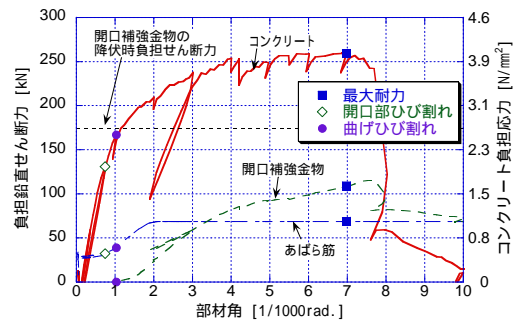
算出にあたって、鉄筋は完全弾塑性を仮定し、ヤング係数と降伏強度は表 - 2 の値を用いた。ひずみを計測していない補強筋等は開口中心に対して点对称であると仮定して計測値のあるひずみの値を用いた。またコンクリートの負担する鉛直せん断力は、図 - 3 の縦軸のせん断力からあばら筋と開口補強金物等の負担せん断力を差し引いて求めた。各要素の負担した鉛直せん断力の推移を図 - 6 に、図 - 7 には全せん断力に占める各要素のせん断力負担割合の推移を示す。図 - 6 の右側の縦軸は、45°破壊面に垂直に作用しているコンクリートが負担する引張応力を表している。また、図 - 6 中の点線は、開口補強金物および斜め補強筋が降伏耐力に達したときに負担する鉛直せん断力の計算値を示す。

図 - 6 より、開口補強金物を使った PB2 に比べ、斜め補強筋を使った PB3 では、斜め補強筋の負担するせん断力が大きく、コンクリートの負担するせん断力が小さくなるという結果であった。45°破壊面に垂直に作用しているコンクリートの引張応力は、PB2 では材料試験で得られた割裂引張強度に近い 4.0N/mm^2 程度であったのに対して、PB3 では最大耐力時で 3.0N/mm^2 程度とやや小さい値であったことがわかる。

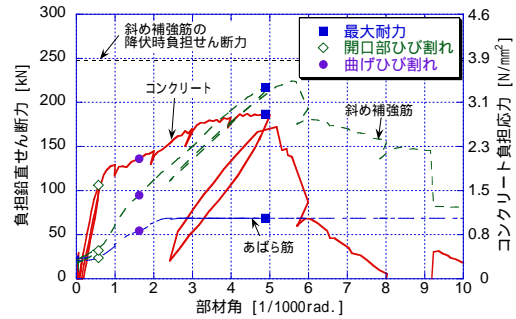
PB2 では曲げひび割れが発生してから初めて開口補強筋が鉛直せん断力を負担し始めたのに対して、PB3 では加力初期の段階より、斜め筋補強筋がせん断力を負担している。このことが、図 - 3(c) に示した PB2 と PB3 の初期剛性の差に影響したものと考えられる。

また、PB2 では最大耐力時に、開口補強金物が降伏耐力に達したときに負担する鉛直せん断力の計算値の 6 割程度しか実験ではせん断力を負担していないのに対して、PB3 の斜め補強筋では計算値の 9 割弱まで負担していることが確認された。これは、開口補強金物と斜め補強筋の定着力の差に起因すると考えることができる。つまり、

斜め補強筋は梁主筋に結合されているため十分な定着力を有しているのに対し、開口補強金物は開口上下および両脇の縦筋・横筋でコンクリートに定着されているため、斜め補強筋に比べると定着力が小さいと考えられる。一方で、斜め補強筋では梁主筋との緊結部分（写真 - 2(c) の位置）にひび割れが発生すると定着力を失ってしまうので、コンクリートが負担するせん断力が十分に発揮

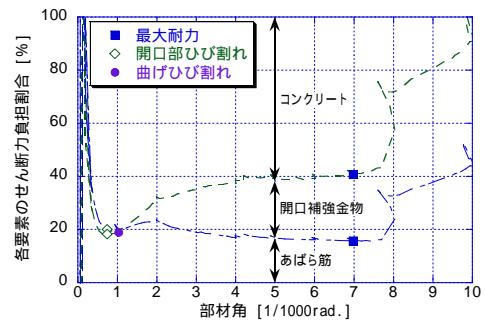


(a)PB2

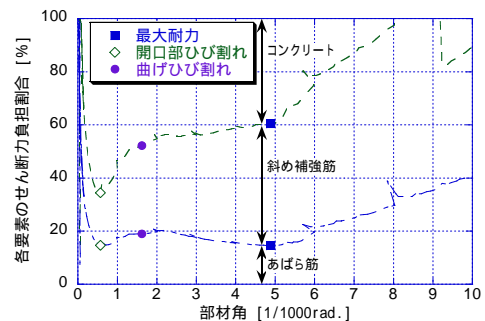


(b)PB3

図 - 6 各要素の鉛直せん断力負担推移



(a)PB2



(b)PB3

図 - 7 各要素の鉛直せん断力負担割合の推移

されないまま、開口補強金物を使用した PB2 よりも小さい変形で最大耐力に達したと考えることができる。

図 - 7 より、あばら筋のせん断力負担は、PB2・PB3 ともに開口部ひび割れ発生時に全せん断力の約 20% となっており、その後最大耐力到達までほぼ 20% で一定値のまま推移していたことがわかる。一方、PB2 の開口補強筋は、曲げひび割れ発生後徐々に負担割合が上昇し、最大耐力時に全体の 20% の負担割合となったのに対して、PB3 の斜め補強筋は開口部ひび割れ発生時にすでに 20% を負担しており、その後負担割合が急激に増えて最大耐力時にはその負担割合が約 40% となっていた。両試験体とも最大耐力後にはコンクリートの負担するせん断力が急激に低下した。

4. まとめ

直径が梁せい d の 1/2.5 の円形開口を有する RC 梁に PC 梁を模擬して一定軸力を導入した上で、せん断加力を実施した結果以下の知見を得た。

- (1) 有開口梁に軸力を導入すると開口中心を通り材軸と平行な軸上にひび割れが発生する。ひび割れを発生させないためには開口部での軸力比を 0.15 程度に抑える必要があると考えられる。ただし、開口部の軸力比が 0.4 程度になっても、発生するひび割れの幅は微小であり、最大耐力への影響もほとんど無いことがわかった。
- (2) せん断加力実験において長期許容せん断力時のひび割れ幅は 0.04mm 以下であり、長期荷重時に使用上支障となるひび割れは生じないといえる。
- (3) せん断加力実験における最大耐力は、市販の開口補強金物を用い開口が 1 つの場合・開口が 2 つの場合（開口間隔 = 梁せい）、斜め補強筋を用い開口が 1 つの場合のいずれも、既往の設計式で評価できること、軸力（プレストレス）の効果を勘案した評価式で推定できることを確認した。なお、文献 2)、9) において開口補強金物が降伏していない試験体が式(3)で安全側に評価できることが確認されているため、ここでも開口補強金物および斜め補強筋の降伏強度を用いて評価することとした。

- (4) 補強筋の負担するせん断力について、斜め補強筋は梁主筋に結合されているため最大耐力時に降伏強度の 9 割程度まで効果的にせん断力を負担していたのに対し、開口補強金物を用いた場合、斜め補強筋に比べるとその定着力が小さいため最大耐力時のせん断力負担は降伏強度の 6 割程度であった。

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) 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
- 4) コーリョー建販株式会社：ダイヤレン NS 技術マニュアル，2008
- 5) 津村浩三，遠藤利根穂，清水泰，能瀬泰延：斜めワイヤーメッシュで補強した鉄筋コンクリート造有孔梁の多数回繰り返し水平加力実験（その 7）孔部剪断ひびわれ強度の推定，日本建築学会学術講演梗概集，構造 II，pp.501-502，1985
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書，2007
- 8) 藤井栄，細川隆，前田剛，近藤吾郎：鉄筋コンクリート有孔梁の付着・せん断破壊，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.337-342，1998
- 9) 村上秀夫，片岡隆広，横山浩明，松谷輝雄，太田勤，中野克彦，松崎育弘：高強度材料を用いた RC 有孔梁のせん断性状に関する実験研究（その 2 実験結果及び検討），日本建築学会学術講演梗概集，C-2，pp.927-928，1999