

論文 開口補強金物を用いたプレストレストコンクリート有孔梁のせん断性状確認実験

岩見 遼平*1・重松 謙佑*2・新石 雅文*3・丸田 誠*4

要旨:本研究では円形開口を有する PC 造梁に対して既製の開口補強筋を用いた場合のせん断耐力を検討するための実験を行った。実験変数は既製開口補強筋の有無, 孔際補強筋の強度, プレストレス力, コンクリート強度, 開口数とした。実験結果より, 開口補強筋は損傷抑制に有効であること, 孔際補強筋やコンクリートの強度が大きい方がせん断耐力が高くなること, プレストレス力が高い方がせん断耐力が高くなること分かった。RC 規準⁷⁾に示されている修正広沢式にプレストレストの効果を加算した計算値は結果を安全側に評価し, 実験値/計算値の平均は約 1.22 であった。

キーワード: 有孔梁, プレストレストコンクリート, せん断耐力, 開口補強筋

1. はじめに

一般に建築物では設備配管・配線を梁下に設けると, その分階高が上がり不経済であるため, 階高を上げずに済むよう梁に開口を設けて設備動線とすることがある。しかし, 構造計算を行う段階では開口個数・位置が確定されていない場合が多く, 工事着工後に変更となるケースも少なくない。鉄筋コンクリート(以下 RC)造の梁では数多くの有孔梁の実験が行われ, 開口際の肋筋(以下, 孔際補強筋), 開口周辺の斜め筋あるいは既製の開口補強金物(以下, 開口補強筋)が開口部せん断強度に有効であることが分かっている¹⁾。一方でプレストレストコンクリート(以下 PC)造では矩形開口を有する梁の実験に基づき, PC 規準²⁾, PC 建協指針³⁾では主に矩形開口を対象とした設計式が示されている。これらの指針において円形開口は正方形開口に置換され, 開口上下の弦材について応力検討および補強設計が行われており, 円形開口を対象とした斜め補強筋や既製の開口補強筋を考慮した設計式はなく, 実験も多くない⁴⁾⁵⁾。

そこで本研究では円形開口を有する PC 造梁を対象として, 開口周辺のひび割れやせん断耐力に影響すると思われる開口補強筋の有無, 孔際補強筋の強度, プレストレス力, コンクリート強度をパラメータとしたせん断実験を行った。また, RC 有孔梁で用いられている設計式を準用してせん断耐力を検討した。本論では, 各実験変数の比較, ひび割れ発生強度や最大強度を中心に示す。

2. 試験体

図 - 1 に試験体詳細, 表 - 1 に試験体一覧を示す。試験体は断面 300mm × 500mm, 長さ 1500mm の梁で, 両側

に加力スタブを有している。試験体 No.1 はコンクリート強度を 27N/mm² とし, 梁部中央に梁せいの 1/3 の直径の円形開口を設けており, 梁主筋は上下 3-D16(スタブ内に定着している), せん断補強筋は 2-S6@50, 孔際補強筋は 2-D6 を図中に示す C の範囲に片側 2 組ずつ, PC 鋼棒は 2- 32, 開口には図 - 1 中に示す形状の開口補強筋(S6)を 2 枚配筋している。PC 鋼棒によるプレストレス導入力 P_e は PC 鋼棒の降伏耐力を P_y として, $P_e=0.25P_y$ とした(表 - 1 では P_e/P_y を PC 有効率として示している)。試験体は No.1 を標準として, No.2 は No.1 に対して開口補強

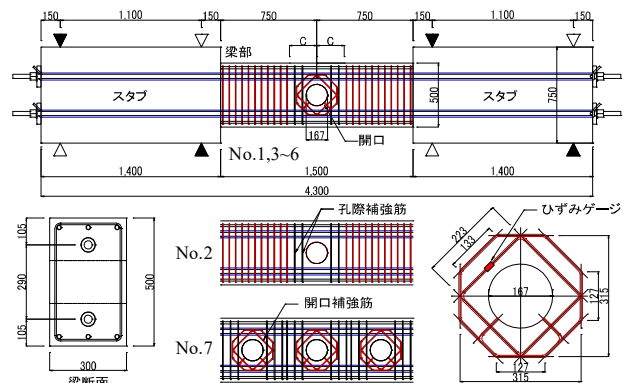


図 - 1 試験体詳細(寸法単位 mm)

表 - 1 試験体一覧

試験体名	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
梁断面(mm)	300×500						
コンクリート強度(N/mm ²)	27				36	60	27
開口径(mm)	167(1/3D)						
開口数							3
主筋(上下)	3-D16(SD345)						
せん断補強筋	2-S6@50(KSS785)						
孔際補強筋	2-D6 (4組)	2-S6(4組)		2-D6(4組)			
開口補強筋	2-S6(KSS785)	なし		2-S6(KSS785)			
PC鋼棒	2-φ32(B種1号)						
PC有効率	0.25				0.5	0.25	

*1 (株)建研 東京支店技術部 (正会員)

*2 オリエンタル白石(株) 東京支店 PC 建築グループ (非会員)

*3 (株)ピーエス三菱 技術本部技術部建築技術グループ (正会員)

*4 静岡理科大学 理工学部 建築学科教授 工博 (正会員)

筋の無い試験体, No.3 は No.1 に対して孔際補強筋を高強度にした試験体, No.4 は No.1 に対して P_e を 2 倍にした試験体, No.5,6 は No.1 に対してそれぞれコンクリート強度を 36N/mm^2 , 60N/mm^2 とした試験体, No.7 は No.1 に対して開口数を 3 つ(間隔は梁せいと同じ)としている。実験により確認する項目は(1)開口補強筋の効果(No.1,2), (2)孔際補強筋の効果(No.1,3), (3)プレストレスレベルの影響(No.1,4), (4)コンクリート強度の影響(No.1,5,6), (5)開口数の影響(No.1,7), である。全ての試験体は梁一般部のせん断耐力を開口部の 1.3 倍とし, 開口部せん断破壊が先行するように計画した。

試験体はまず梁のコンクリートを打設し, その後 10 日程度で加力スタブを打設した。プレストレスの導入は梁打設から 22~24 日で行い 翌日にシーす内にグラウトを充填した。プレストレス力は実験開始時までのロスを 8~10%程度見込み, 導入力の管理は試験体計画のジャッキホースに圧力計を取り付け, 荷重を測定するとともに, PC 鋼棒にひずみゲージを貼り付け, 材料試験結果のヤング係数から PC 鋼棒の張力を求めて, 両者がほぼ対応していることを確認しながら行った。

プレストレス導入から載荷までの材齢は 17~21 日で, ひずみゲージ測定値より計算したプレストレス導入時からのプレストレスロスは 1~12%であった。

表 - 2 に各種鋼材の材料試験結果 表 - 3 にコンクリートおよび PC グラウトの強度試験結果を示す。

3. 加力・計測方法

図 - 2 に載荷装置を示す。試験体は口型のフレーム内に設置し, スタブ外側の反力ジャッキを用いてピン支持とした。載荷はスタブ内側の加力ジャッキによって梁部に逆対称曲げモーメントを与えた。載荷は変形角制御とし, 部材角 $R = \pm 1.25 \times 10^{-3} (1/800)\text{rad.}$ で 1 サイクル, $\pm 2.5 \times 10^{-3} (1/400)$, $\pm 5 \times 10^{-3} (1/200)$, $\pm 10 \times 10^{-3} (1/100)$, $\pm 20 \times 10^{-3} (1/50)$, $\pm 30 \times 10^{-3} (1/33)\text{rad.}$ で 2 サイクルずつの正負交番繰返し載荷とした。加力途中でせん断破壊した場合は, 次のサイクルの目標部材角まで載荷して終了とした。計測は, 梁の相対変形, 鋼材ひずみ, ひび割れ幅(クラックスケールにより測定), 曲率, 開口部せん断変形とした。

4. 実験結果

4.1 破壊性状・Q-R 関係

図 - 3 に各試験体の正荷重時せん断力 Q-部材角 R 関係を示す。図中にはせん断ひび割れが生じた点 (), 孔際補強筋が初めて降伏した点 () を併記した。孔際補強筋の降伏ひずみは, 材料試験の 0.2%耐力時のひずみとした。図右上に試験体の最終時の写真を示した。

写真 - 1 に試験体 No.1 のせん断破壊時($10 \times 10^{-3}\text{rad.}$)の

表 - 2 鋼材材料諸元

径	使用部位	鋼種	降伏点 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	引張強さ N/mm ²
D16	主筋	SD345	380	197	570
S6	一般部筋	KSS785	910	186	1120
	開口補強筋				
D6	孔際補強筋	SD295A	399	185	542
φ32	PC鋼棒	B種1号	1001	201	1127

表 - 3 コンクリート材料諸元

試験体	位置	圧縮強度 N/mm ²
No.1~4,7	梁	24.8
No.5	梁	37.2
No.6	梁	61.7
No.1~4,7	PCグラウト	92.3
No.5,6	PCグラウト	86.9

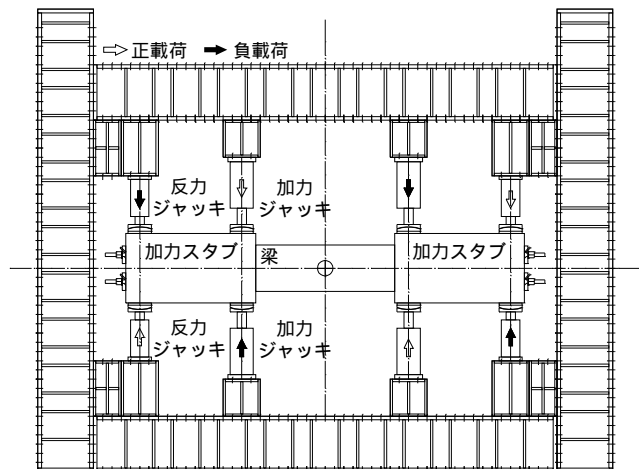


図 - 2 載荷装置

ピーク時のひび割れを示す。ひび割れは全ての試験体で共通して曲げひび割れ, 開口中心から斜め 45 度方向のせん断ひび割れ(以下, 斜め 45 度ひび割れ), 開口 45 度位置からの接線方向ひび割れ(以下, 接線方向ひび割れ)の順番で発生した。最終時には接線方向ひび割れが梁の上下端に達し, ひび割れ幅が増大し, 荷重の急落とともに開口部がせん断破壊した。試験体 No.6 以外の試験体はいずれも部材角 $5 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}\text{rad.}$ のサイクルでせん断破壊を生じた。梁のコンクリート強度を 60N/mm^2 とした試験体 No.6 は部材角 $5 \times 10^{-3}\text{rad.}$ のサイクルにおいて大きく剛性が低下したが, その後も耐力が上がり続け, $30 \times 10^{-3}\text{rad.}$ のサイクルにおいてせん断破壊した。

また, 全ての試験体において, 孔際補強筋は降伏したが, 開口補強筋は降伏に至らなかった。試験体 No.6 は破壊時にはかぶりコンクリートの剥落, 主筋の湾曲, 孔際補強筋の破断が確認された。

4.2 各実験変数に関する考察

図 - 4 に実験変数ごとの(a)Q-R 関係の包絡線, (b)各サイクルピーク時の孔際補強筋のひずみ, (c)各サイクルピーク時の開口補強筋のひずみの比較を示す。実験変数(1)開口補強筋の効果の比較においてのみ(c)各サイクルピ

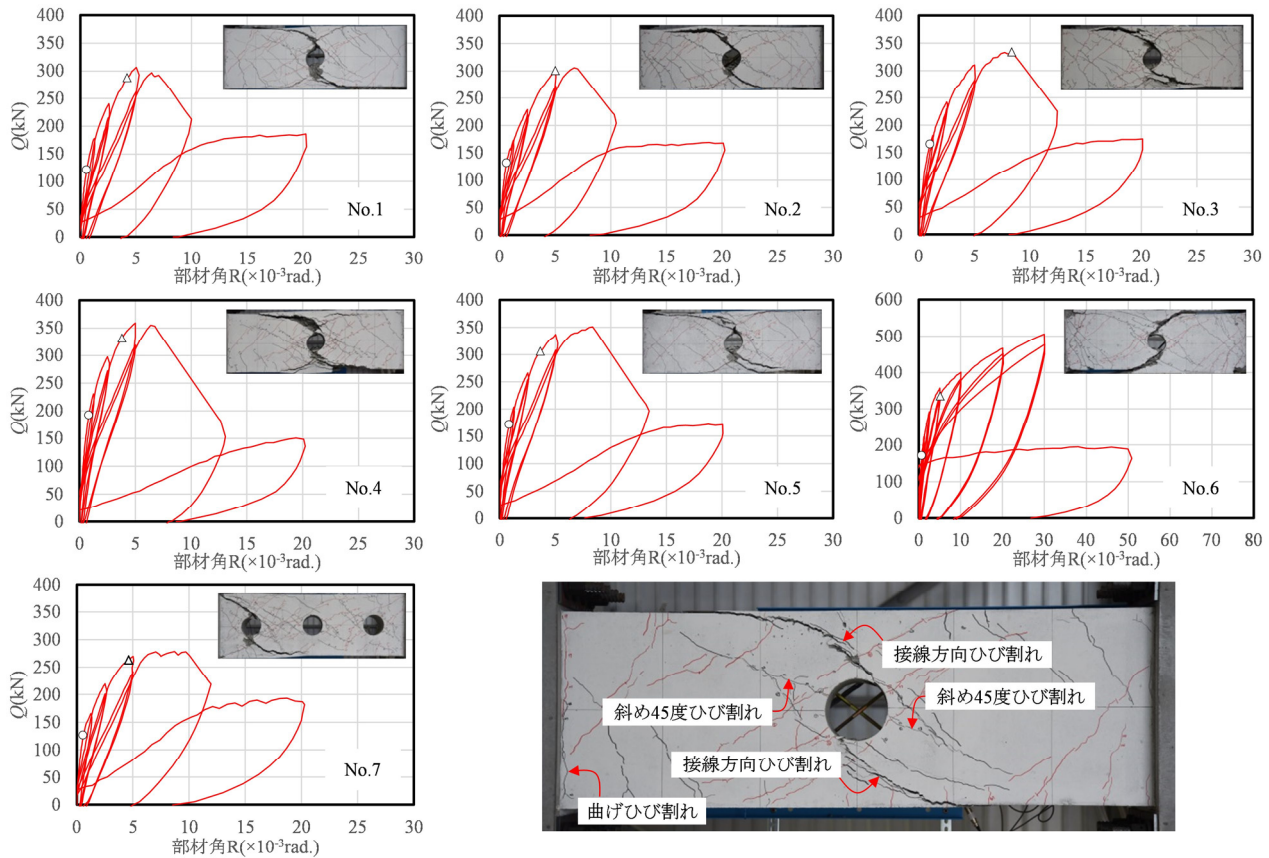


図-3 Q-R関係

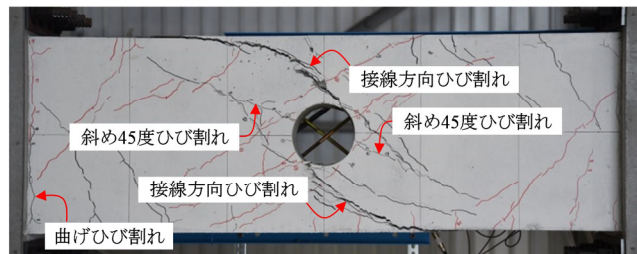


写真-1 開孔部ひび割れ (No. 1)

ーク時および除荷時のひび割れ幅を示す。孔際補強筋のひずみは開口左側1本目のものを、開口補強筋のひずみは図-1中に示す位置のひずみを用いた。なお、試験体No.7はせん断破壊した開口に関する補強筋の値を示す。図中には各補強筋の降伏ひずみを併記する。また、ひび割れ幅は前述の斜め45度ひび割れを用いており、0.04mm以下のひび割れは0mmとしてプロットしている。

(1) 開口補強筋の効果

試験体No.1とNo.2を比較すると、Q-R関係の包絡線における剛性・最大耐力や孔際補強筋の降伏時期に有為な差は見られない。一方、斜め45度ひび割れの各サイクルピーク時のひび割れ幅を見ると、試験体No.2がNo.1に対してピーク時、除荷時ともひび割れ幅が大きく、 5×10^{-3} rad.時には約2倍になっている。これより、今回試験体で用いた補強量の範囲では開口補強筋によるせん断耐力の差は出なかったが、開口補強筋を配筋することによってひび割れ幅を抑制する効果があることが分かった。

(2) 孔際補強筋の効果

試験体No.1とNo.3のQ-R関係の包絡線を比較すると、剛性は変わらないがNo.3は 10×10^{-3} rad.のサイクルにおいても前サイクルの最大荷重を更新し、No.1よりせん断耐力が高い。また、開口補強筋のひずみには差が見られないが、孔際補強筋はNo.1では 20×10^{-3} rad.のサイクルで降伏に至っているのに対して、No.3では高強度鉄筋を

用いているため降伏しなかった。これより、孔際補強筋を高強度にするとせん断耐力が上昇することが分かった。

(3) プレストレスレベルの影響

試験体No.1とNo.4のQ-R関係の包絡線を比較すると、No.4はNo.1に比べてひび割れ発生後の剛性が高く、最大耐力が高い。No.1とNo.4の孔際補強筋および開口補強筋は同配筋であり、ひずみの推移には違いが見られない。これより、プレストレスレベルが大きいほどせん断耐力が上昇することが分かった。

(4) コンクリート強度の影響

試験体No.1とNo.5とNo.6のQ-R関係の包絡線を比較すると、コンクリート強度が高いほど剛性およびせん断耐力が高く、特にNo.6はNo.1, No.5の耐力を大幅に上回り、せん断破壊時の部材角も約3倍であった。孔際補強筋および開口補強筋のひずみを見ると、No.1, No.5はほぼ同様の結果を示しているが、No.6はNo.1, No.5に対して孔際補強筋降伏時の部材角が大きく、開口補強筋は 20×10^{-3} rad.からせん断破壊するまでひずみが増加していない。これより、コンクリート強度が高いほど剛性およびせん断耐力が高くなるが、開口補強筋の最大ひずみは降伏ひずみの50%未満で差異はなく、せん断耐力の違いはコンクリートの応力負担分によると考えられる。

(5) 開口数の影響

試験体No.1とNo.7を比較すると、No.7はNo.1に比

べて剛性低下が大きく、最大耐力もわずかに低くなっている。これは、No.7では3つの開口全てにおいてせん断ひび割れが生じているため剛性低下が早期に生じ、破壊箇所が曲げモーメントの影響を受ける梁端の開口であっ

たことから No.1 に比べて若干せん断耐力が低くなっていると考えられる。孔際補強筋および開口補強筋のひずみはNo.1とNo.7で大きな差は見られなかった。

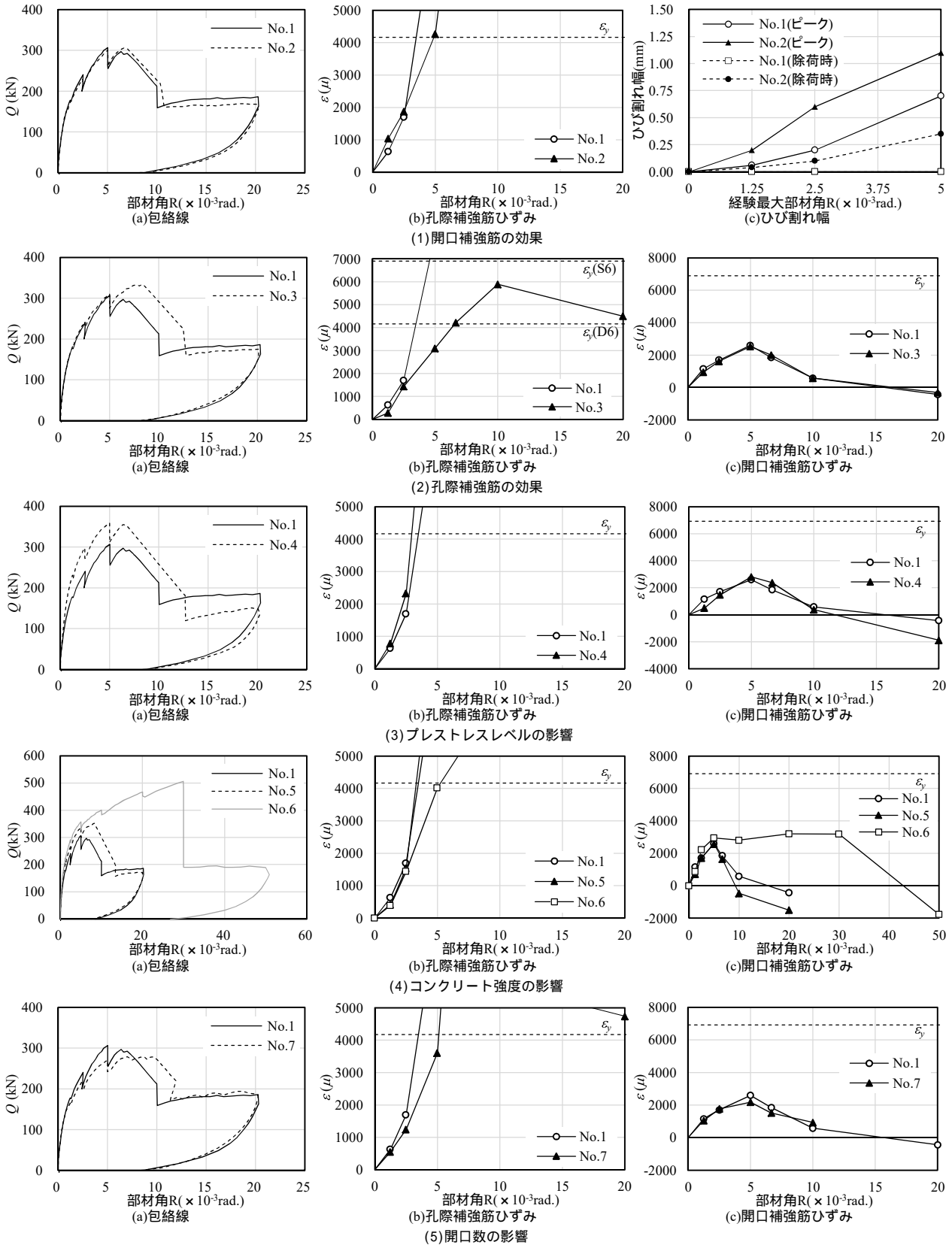


図 - 4 各試験体変数の比較

表4 - 実験結果一覧

試験体名	破壊モード	せん断ひび割れ荷重					せん断耐力				
		実験値	津村式	津村式 (軸力考慮)	Q_{cr}/Q_{SC0}	Q_{cr}/Q_{SC1}	実験値	修正広沢式	修正広沢式 (軸力考慮)	Q_{max}/Q_{SU0}	Q_{max}/Q_{SU1}
		Q_{cr} [kN]	Q_{SC0} [kN]	Q_{SC1} [kN]			Q_{max} [kN]	Q_{SU0} [kN]	Q_{SU1} [kN]		
No.1	S	121.3	107.7	145.3	1.13	0.83	306.8	214	263	1.43	1.17
No.2	S	131.8	107.7	148.2	1.22	0.89	305.9	153	205	2.00	1.49
No.3	S	165.1	107.7	148.5	1.53	1.11	334.1	220	273	1.52	1.22
No.4	S	192.1	107.7	189.3	1.78	1.01	359.3	214	320	1.68	1.12
No.5	S	171.2	125.6	169.6	1.36	1.01	351.6	268	325	1.31	1.08
No.6	S	170.6	160.8	204.3	1.06	0.84	506.0	302	359	1.68	1.41
No.7	S	126.1	107.7	146.5	1.17	0.86	278.8	214	264	1.30	1.06

5. 実験値と計算値の比較

表 - 4 に実験結果一覧を示す。表中にはせん断ひび割れ発生荷重とせん断耐力およびそれぞれの計算値，計算値に対する実験値の割合を示している。

5.1 せん断ひび割れ発生荷重と計算値の比較

せん断ひび割れ発生荷重について実験値と計算値の比較を行う。計算値には以下に示す津村ら⁶⁾によって提案された RC 造有孔梁のせん断ひび割れ強度式に実験値の不合格率を 5%とする係数 0.77 を乗じた式(1)を用いた。

$$Q_{SC0} = \frac{0.085 \cdot k_c \cdot (50 + \sigma_B)}{(M/Q \cdot d) + 0.17} \cdot \left(1 - 1.65 \cdot \frac{H}{D}\right) \cdot b \cdot j \times 0.77 \quad (1)$$

$k_c = 0.72$ ($D \geq 400$ より)

σ_B : コンクリート強度 [N/mm²]

M : 最大曲げモーメント [kNm]

Q : 最大せん断力 [kN]

d : 引張鉄筋有効せい [m]

H : 開口径 [mm]

D : 梁せい [mm]

b : 梁幅 [mm]

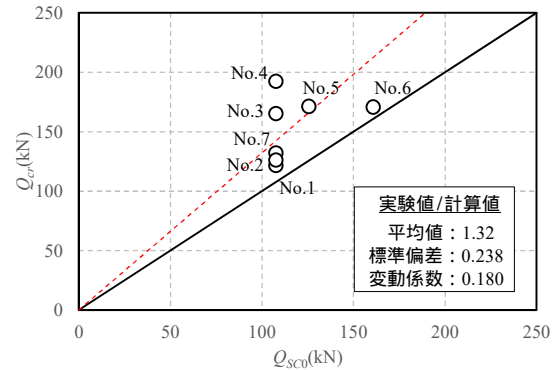
j : 鉄筋応力中心間距離 [mm]

図 - 5(a) にせん断ひび割れ発生荷重の実験値と式(1)による計算値の比較を示す。実験値/計算値は平均で約 1.32 となり，式(1)は実験結果を安全側に評価している。しかしながら，プレストレスレベルの高い試験体 No.4 の実験値/計算値は他の試験体より大きく 1.78 となっていることから，式(1)にプレストレスによる影響を考慮して PC 梁の開口部せん断ひび割れ荷重を評価することが可能であると考えられる。PC 規準において終局せん断耐力に対するプレストレス力の寄与は平均プレストレス力の 1/10 と示されている。これに倣って，本検討においては下記の津村式にプレストレス力を累加し 0.77 を乗じた式(2)を用いた評価を試みる。

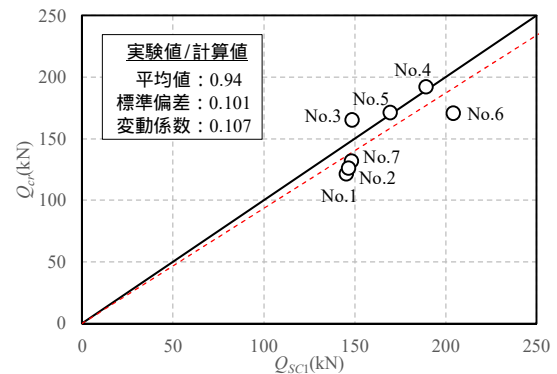
$$Q_{SC1} = \left\{ \frac{0.085 \cdot k_c \cdot (50 + \sigma_B)}{(M/Q \cdot d) + 0.17} \cdot \left(1 - 1.65 \cdot \frac{H}{D}\right) + 0.1 \cdot \alpha \cdot \sigma_g \right\} \cdot b \cdot j \times 0.77 \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{4}{M/Qd + 1} \quad 1 \leq \alpha \leq 2$$

σ_g : 矩形断面で計算した平均プレストレス力 [N/mm²]



(a) 実験値-津村式比較



(b) 実験値-津村式(プレストレス考慮)比較

図 - 5 せん断ひび割れ荷重の実験値と計算値の比較

図 - 5(b) に実験値と式(2)による計算値の比較を示す。図より，実験値/計算値は平均で 0.94 と実験結果を若干危険側に評価する結果となっているが，式(1)と比べてプレストレス力を累加した式(2)の方が全体のばらつきが少なく精度の良い評価ができています。プレストレスを考慮する際の諸係数については今後の検討課題としたい。

5.2 最大耐力と計算値の比較

せん断耐力について実験値と計算値の比較を行う。せん断耐力の計算値には RC 規準⁷⁾に示されている修正広沢式(以下に示す式(3))を用いた。

$$Q_{SU0} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t^{0.23} \cdot (\sigma_B + 18)}{(M/Q \cdot d) + 0.12} \left(1 - \frac{1.61 \cdot H}{D}\right) + 0.85 \cdot \sqrt{\sum p_s \cdot \sigma_{sy}} \right\} \cdot b \cdot j \quad (3)$$

p_t : 引張鉄筋比

p_s : 孔周囲の鉄筋比

σ_{sy} : 孔周囲鉄筋の降伏応力度 [N/mm²]

本実験において用いた試験体の耐力計算においては孔際補強筋および開口補強筋を孔周囲鉄筋として算定した。式(3)において、開口補強筋は斜め部分が有効として、1枚当たり鉄筋4本分の断面積に2倍を考慮してせん断耐力を算定した。開口補強筋および孔際補強筋の補強強度 σ_{sy} は下記の応力を上限とした。

$$\begin{aligned} \sigma_B & 36\text{N/mm}^2 & \sigma_{sy} & = \min(25\sigma_B, \sigma_y) \\ \sigma_B & 27\text{N/mm}^2 & \sigma_{sy} & = \min(20\sigma_B, \sigma_y) \\ 27\text{N/mm}^2 & \sigma_B & 36\text{N/mm}^2 & \text{直線補完} \end{aligned}$$

図-6(a)に実験値と式(3)による計算値の比較を示す。図より、実験値/計算値は平均で約1.56となり、大きく安全側に評価している。ここで前節と同様に既往のRC梁の評価式にプレストレスの効果を累加した以下に示す式(4)による評価を試みる。

$$Q_{SU1} = Q_{SU0} + 0.1 \cdot \alpha \cdot \sigma_g \quad (4)$$

図-6(b)に実験値と式(4)による計算値の比較を示す。図より、実験値/計算値は1.06~1.49となり、すべての試験体において実験値を安全側に評価することができており、平均値は1.22であった。また、式(3)を用いた場合に比べて標準偏差および変動係数が小さいことからプレストレスを考慮すると精度よく評価できることが分かる。

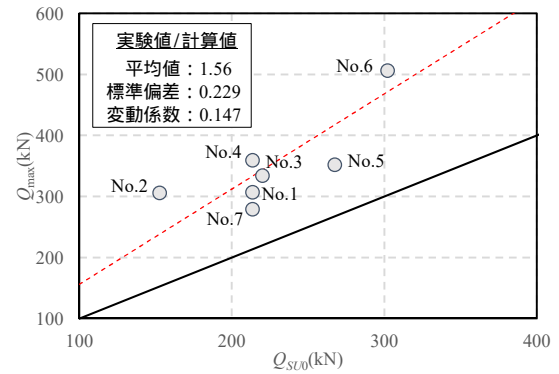
以上の検討より、円形開口を有するPC梁のせん断ひび割れ強度およびせん断耐力の評価においてプレストレスを既往の評価式に累加して算定を行うことによって実験値と計算値が良く対応することが分かった。

6. まとめ

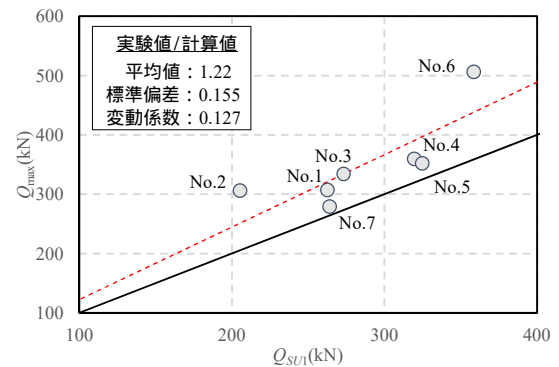
以下に本研究で得られた知見を列挙する。

- ・開口補強筋は開口部周辺のひび割れ幅の抑制に有効であった。
- ・本実験における試験体の補強量の範囲では開口補強筋のせん断耐力に対する顕著な補強効果が表れなかった。
- ・孔際補強筋を高強度にすることでせん断耐力が高くなった。
- ・プレストレスレベルが大きいほどせん断ひび割れ発生荷重およびせん断耐力が高くなった。
- ・コンクリート強度が高いほどせん断耐力は高くなった。
- ・開口数による破壊モードの変化は見られなかったが、本試験体では端部開口が曲げモーメントの影響を受けているためわずかに耐力が単開口に比し低かった。
- ・せん断ひび割れ発生荷重は既往の津村式にプレストレスの効果を累加した評価式で傾向を精度よくとらえることができた。
- ・せん断耐力は修正広沢式にプレストレスの効果を累加した式で全ての試験体を安全側により精度よく評価でき、実験値/計算値は平均して約1.22であった。

謝辞



(a)実験値-修正広沢式比較



(b)実験値-修正広沢式(プレストレス考慮)比較

図-6 せん断耐力の実験値と計算値の比較

本研究における試験体の開口補強筋および各せん断補強筋はコーリョー建販株式会社様よりご提供いただきました。また、実験実施に際して日本大学長沼研究室にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上秀夫,向井貢,松崎育弘 ほか:高強度開口補強金物を用いたRC有孔梁のせん断性状に関する実験研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸),pp.689~690,2002.8
- 2) 日本建築学会:プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説,日本建築学会,1998.11
- 3) プレストレス・コンクリート建設業協会:プレストレスコンクリート有孔梁設計施工指針,2012.6
- 4) 丸田 誠,高津 比呂人,Trinh Van Hoa:アンボンドPC有孔梁の耐震性状に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.37, No.2,pp.403~408,2015
- 5) 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,プレストレスコンクリート,Vol.52, No.4,pp.78~86,2010
- 6) 津村 浩三,遠藤 利根穂,清水 泰,能瀬 泰延:斜めワイヤ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くり返し水平加力実験(その7)孔部せん断ひびわれ強度の推定,日本建築学会大会学術講演梗概集(東海),pp.501~502,1985.10
- 7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説,日本建築学会,2018