

論文 円形開口を有するプレストレストコンクリート梁の構造性能に関する研究

月成 真隆*1・丸田 誠*2・田嶋 和樹*3・長沼 一洋*3

要旨：本研究では、開口位置、せん断スパン比がプレストレストコンクリート有孔梁のせん断強度に及ぼす影響を把握することを目的とした。まず、既往の実験を対象とした解析を行い、解析は実験を再現できたことから、開口の位置、せん断スパン比をパラメータとした解析を実施し、せん断強度についての検討を行った。その結果、開口位置が変化してもせん断強度は変わらないこと、せん断スパン比を変えた試験体も修正広沢式に軸力項を加えた式で安全に評価できることがわかった。さらに、長期荷重時の開口部ひび割れ性状についても検討を行い、開口位置が梁端から 0.5D の場合でも顕著なひび割れは生じないことを確認した。

キーワード：有限要素法、せん断強度、開口位置、せん断スパン比、長期荷重

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RC)造梁では数多くの有孔梁の実験が行われ、C区間内(図-1 参照)のあばら筋(以下、孔隙補強筋)、開口周辺の斜め筋および既製のユニット型開口強金物(以下、開口補強筋)が開口部のせん断強度に有効であることが分かっている¹⁾が、一方で、プレストレストコンクリート(以下、PC)造梁では円形開口を対象とした斜め筋や既製の開口補強筋を使用した実験例は少なく、PC 規準²⁾では、主に矩形開口を対象とし、上下を梁と見立てた設計式が提示されている。

しかし、近年、既製の開口補強筋を使用した実験が行われ、RC で用いられる修正広沢式に軸力項を追加した式でせん断強度が評価できるとの報告がある^{3)~5)}。しかし、開口位置、せん断スパン比の影響に関しては十分検討されていない。また、PC 梁はロングスパンとなることが多く、梁端部の長期荷重によるせん断力も大きくなるため、開口位置の違いがひび割れ性状に及ぼす影響を確認することも重要である。

そこで本研究では、既往の実験³⁾を対象とした解析により、その有効性を確認した上で、①開口位置が変化した場合の PC 有孔梁のせん断強度、②せん断スパン比 M/Qd が変化した場合の PC 有孔梁のせん断強度、③開口位置を変化させた場合の長期荷重時のひび割れ性状の 3 点に関して解析により確認することを目的とした。

2. 解析対象の実験概要

岩見らの実験³⁾を対象に解析を行う。実験は試験体 No.1~No.7 の 7 体が行われた。表-1 に試験体一覧、図-1 に試験体詳細を示す(網掛けは試験体 No.1 に対してパラメータが変わっている部分を表す)。試験体は実物の

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						
コンクリート設計強度(N/mm ²)	27			36	60	27	
開口径(mm)	167(1/3D)						
開口数	1					3	
主筋(上下)	3-D16(SD345)						
せん断補強筋	2-S6@50(SD785級)						
孔隙補強筋	2-D6(4組)	2-S6(4組)		2-D6(4組)			
開口補強筋	2-S6(SD785級)	なし		2-S6(SD785級)			
PC鋼棒	2-φ32(B種1号)						
プレストレスレベル(N/mm ²)	2.7			5.4			2.7

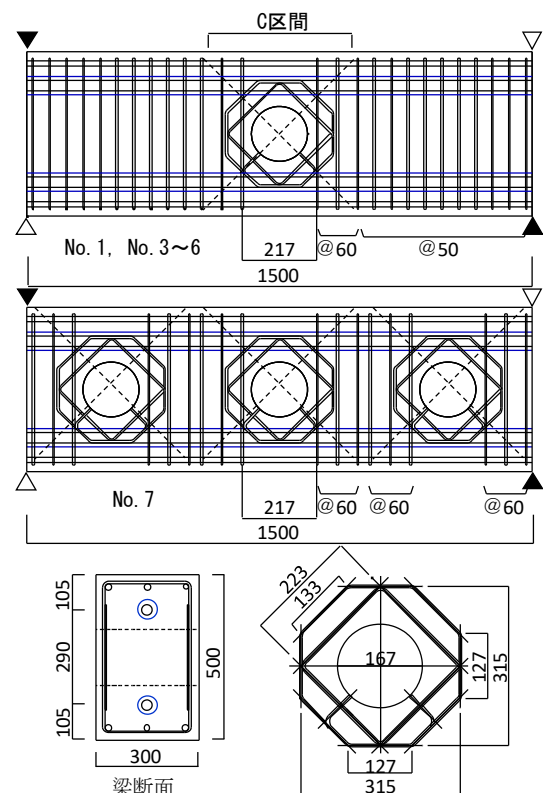


図-1 試験体詳細(寸法単位 mm)

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 静岡理工科大学 理工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

1/2 縮尺の断面 $300\text{mm} \times 500\text{mm}$ 、長さ 1500mm の梁で、両側に加力スタブ ($F_c = 60\text{N/mm}^2$) を有している。試験体 No.1 はコンクリート強度を 27N/mm^2 とし、梁中央部に開口径 167mm ($D/3$, D : 梁せい) の単開口を設け、孔際補強筋は図-1 中に示す c 区間に片側 2 組ずつ、開口補強筋は開口部に 2 組配筋されている。また、PC 鋼棒の緊張荷重は 205kN/本 とし、一般部の軸力比 $\eta = 0.1$ となるよう計画されている。グラウトは PC 鋼棒の緊張後にシース内に充填されている。試験体 No.2~No.7 は試験体 No.1 を基準とし、それぞれ開口補強筋、孔際補強筋、プレストレスレベル、コンクリート強度、開口数を変化させた試験体である。

表-2 にコンクリートおよびグラウトの、表-3 に各種鋼材の材料強度を示す。

加力方法は、ロ型の鉄骨フレーム³⁾の中に試験体を設置し、ジャッキにより逆対称曲げモーメントを与え、部材角 $R = 1.25 \sim 20.0 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ を原則に正負繰り返し载荷が行われた。

3.解析方法

図-2 に試験体 No.1 の解析モデルを示す。試験体の対称性を考慮して、梁幅方向を半分にした 1/2 モデルとした。梁部分とスタブ、載荷板を六面体要素で、鉄筋を線材要素でモデル化した。スタブと載荷板については弾性体とし、グラウト及びシースは考慮せず PC 鋼棒のみを線材要素でモデル化した。主筋および PC 鋼棒とコンクリート間の付着滑りは、接合要素により考慮している。

PC 鋼棒のプレストレスは、PC 鋼棒を表現する線材要素の定着位置の節点をスタブと結合し、その後 PC 鋼棒に初期応力として緊張力に対応する引張応力を与えることで導入した。また、PC 鋼棒に緊張力を加えた後、PC 鋼棒とコンクリート間の付着を考慮した。これは、試験体製作では、PC 鋼棒の緊張後にグラウトを充填しており、それを模擬した。その他の開口補強筋、孔際補強筋、あばら筋については、線材要素の節点をコンクリートの節点と共有させ完全付着とした。材料構成則は文献 5) と同様とし、ひび割れ幅の計算には文献 6) による手法を用いた。

4. 解析結果

4.1 荷重 Q—変形角 R 関係

図-3 に各試験体のせん断力—部材変形角関係を示す。併せて、図中に孔際補強筋が初めて降伏した点 (○)、開口部せん断ひび割れが発生した点 (□) を示す。初めて降伏したのが負側であった場合は、次に正側で降伏した点も示し、せん断ひび割れは、開口部横の 1 要素に初めてひび割れが入った時点で発生したものとする。

表-2 コンクリートの材料強度

試験体	位置	目標強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
No.1~4,7	梁	27	24.8	27.1
No.5	梁	36	37.2	29.7
No.6	梁	60	61.7	34.9
No.1~4,7	PCグラウト	—	92.3	—
No.5,6	PCグラウト	—	86.9	—

表-3 鋼材の材料強度

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	一般部肋筋	SD785級	910	186	1120
	孔際補強筋				
D6	開口補強金物	SD295A	399	185	542
φ32	PC鋼棒	B種1号	1001	201	1127

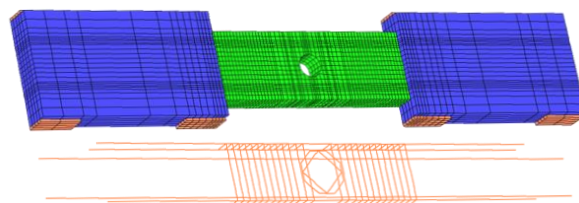


図-2 解析モデル

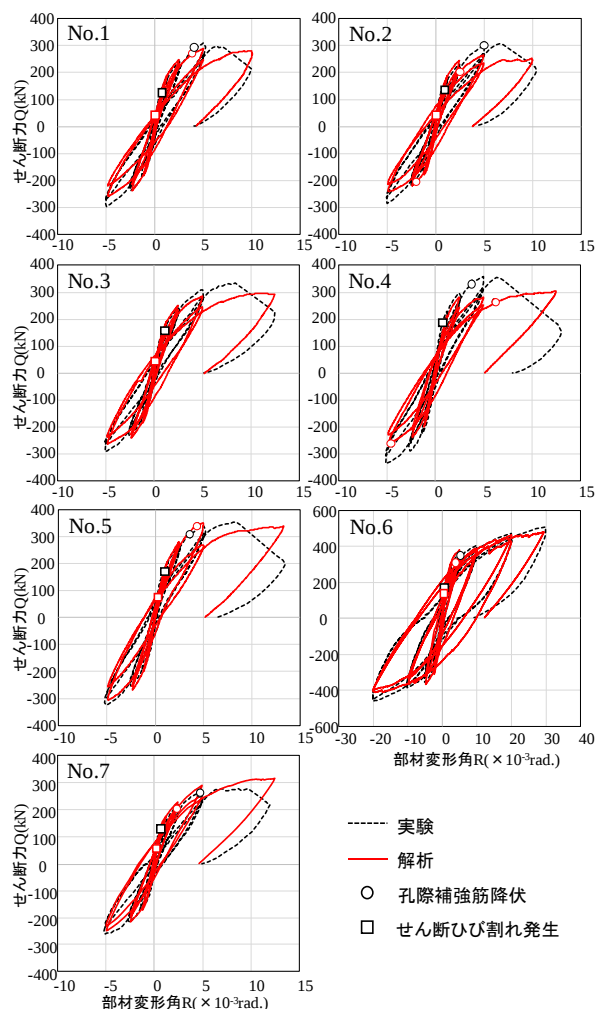


図-3 せん断力—部材変形角関係

試験体 No.1 のせん断力-部材変形角関係は、 $R=5.0 \times 10^{-3}$ [rad.]のサイクルまで実験結果と良好に対応している。また、孔際補強筋の降伏も実験と同様に解析でも $R=5.0 \times 10^{-3}$ [rad.]のサイクルの最大耐力付近で起きていることも確認できる。実験でせん断破壊した $R=10.0 \times 10^{-3}$ [rad.]のサイクルでは、解析では実験のように急激な耐力低下は見られず、 $R=2.5 \times 10^{-3}$ [rad.]付近から実験に比べて徐々に剛性を落とし、前サイクルの最大耐力付近で横ばいとなる結果となった。他の試験体についても概ね同様の結果となった。以上を鑑み、解析は、実験の傾向および最大耐力を概ね良好に模擬できたといえる。

4.2 破壊状況

試験体 No.1 の実験と解析のひび割れの最終状況を比較する。実験の最終状態 ($R=10.0 \times 10^{-3}$ [rad.]) を写真-1 に示す。また、解析における $R=10.0 \times 10^{-3}$ [rad.]のピークの時のひび割れ状況を図-4 に示す。なお、図中の黒い領域はひび割れ幅の大きい部分を示す。

実験では、開口接線方向のひび割れが大きく開くのが特徴的であったが、解析でも、 $R=10.0 \times 10^{-3}$ [rad.]のサイクルにおいて、接線方向のひび割れや圧壊が進展する様子が確認でき、接線方向の破壊状況を解析でも再現することができた。

4.3 開口部せん断ひび割れ

図-3 から解析は実験とは異なり、早い段階で開口部せん断ひび割れが発生していることが確認できる。この原因としては、実験が目視での発見なのに対して、解析では1要素が引張応力に達した時点を開口部せん断ひび割れ発生とみなしていることによる。そこで、表-4 に試験体 No.1～No.7 の実験と解析のせん断ひび割れ発生時のせん断力、解析で発生した初期ひび割れ幅、1/800 ピーク時の解析と実験のひび割れ幅を示し比較する。

各試験体のせん断ひび割れ時せん断力を比較すると平均で 3.1 倍実験値の方が高くなっている。しかし、解析でのひび割れ発生時のひび割れ幅は 0.005mm 以下となっており、非常に微細であることが分かる。実験でのひび割れ発生時の目視のひび割れ観察での判断は、クラックスケールの最小幅 0.04mm 程度か、それより少し小さい程度で、0.005mm は判断できないと考えられる。このことを考慮し、最初のサイクルである 1/800 ピーク時で解析と実験を比較すると、概ね良好な対応をしていることが確認できた。なお、試験体 No.4 については、実験でプレストレス導入時に開口部横から水平方向のひび割れが発生していたため、解析での評価は省略した。

以上より、解析では実験よりも早期の段階で1要素にせん断ひび割れが発生するものの、それらは目視できないほどの微細なひび割れでせん断性状への影響は小さいと考えられ、ひび割れの進展、幅についても 1/800 ピー

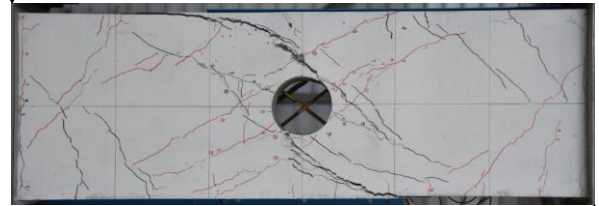


写真-1 最終破壊状況

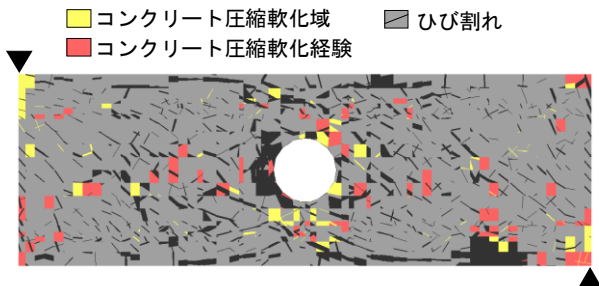


図-4 ひび割れ状況

表-4 ひび割れ幅

試験体	せん断ひび割れ時せん断力(kN)		開口部せん断ひび割れ幅(mm)			
	実験値	解析値	実験/解析	解析発生	解析ピーク	実験ピーク
No.1	121.3	31.8	3.81	0.003	0.07	0.08
No.2	131.8	31.8	4.14	0.003	0.10	0.20
No.3	165.1	31.8	5.19	0.003	0.08	0.10
No.5	171.2	75.3	2.27	0.004	0.05	0.08
No.6	170.6	144.5	1.18	0.005	0.02	0.04
No.7	126.1	62.6	2.01	0.003	0.11	0.10

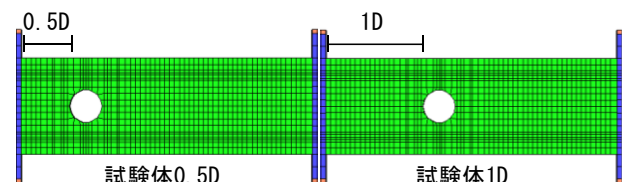


図-5 解析モデル

ク時の解析と実験比較から解析でひび割れ幅も、概ね模擬できることが確認できた。

5. 開口位置に関するパラメトリックスタディ

5.1 解析概要

実験では、スパン中央に開口のある試験体が用いられた。しかし、実務ではスパン中央ではなく梁端部に開口を設ける場合も多い。そこで、これから試験体 No.1 に対して開口位置を変化させたパラメトリックスタディを行い、開口位置がせん断強度へ及ぼす影響の把握を試みる。

試験体 No.1 の開口位置は梁端部から内法スパンで 1.66D となっている。そこで新たに開口位置が梁端部から 0.5D, 1D の位置となる仮想試験体 0.5D, 1D の2体で解析検討を行う。仮想試験体 0.5D, 1D の解析モデルを図-5 に示す。なお、6 章に示す解析も含めて材料定数は、試験体 No.1 のものを準用する。

5.2 セン断力—部材変形角関係

試験体 No.1, 0.5D, 1D のせん断力—部材変形角関係を図-6, 0.5D と 1D の最終破壊状況を図-7 に示す。図-6 より 1D は No.1 に対して若干耐力が高くなっているが, 0.5D, 1D 共に No.1 と概ね同様のせん断耐力となっていることが確認できる。また, 図-7 よりひび割れ状況には多少の違いはあるものの, コンクリートの圧壊が開口周辺に集中しており, 最終破壊状況についても No.1 とほぼ同様であることが確認できる。

5.3 開口部せん断強度

試験体 No.1, 0.5D, 1D の計 3 体の計算値, 解析値の開口部せん断強度を一覧にして表-5 に示す。せん断強度の計算式には, RC 規準⁷⁾に示されている修正広沢式 (以下に示す (1) 式) に RC 部材のせん断終局強度で用いられる, 軸力によるせん断強度の上昇分 $0.1 \cdot \sigma_0 \cdot b \cdot j$ (σ_0 : 軸応力度, b : 部材幅, j : 応力中心間距離)⁷⁾に基づいて, プレストレスによるせん断強度の上昇分を $0.1 \cdot \sigma_g \cdot b \cdot j$ (σ_g : プレストレスによる軸応力度) とし, (1) 式にこの軸力項を追加した式 (以下に示す (2) 式) による評価を試みる。

$$Q_{su0} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t^{0.23} \cdot (\sigma_B + 18)}{(M/Q \cdot d) + 0.12} \cdot \left(1 - \frac{1.61 \cdot H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{\Sigma p_s \cdot \sigma_{sy}} \right\} \cdot b \cdot j \quad (1)$$

$$Q_{su1} = Q_{su0} + 0.1 \cdot \sigma_g \cdot b \cdot j \quad (2)$$

ここで, p_t : 引張鉄筋比 [%], 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], p_s : 孔周囲の鉄筋比 [%], σ_{sy} : 孔周囲鉄筋の降伏応力度 [N/mm²], b : 梁幅 [mm], j : 鉄筋応力中心間距離 [mm] である。

解析値と (2) 式の計算値の比較をすると, 計算値に対する実験値の比は平均 1.17 となった。これによって, 開口位置がスパン中央だけでなく 0.5D まで端部に寄せた試験体においても軸力を考慮した修正広沢式により安全側に比較できることが分かった。

6. セン断スパン比に関するパラメトリックスタディ

6.1 解析概要

実験では, 加力装置の制約もあり, セン断スパン比 1.62 限定でセン断実験が行われた。そこで, セン断スパン比がセン断強度へ及ぼす影響の把握するために, 試験体 No.1 に対してセン断スパン比をパラメータとした解析によるパラメトリックスタディを実施する。

試験体 No.1 のスパン 1500mm でセン断スパン比は 1.62 である。そこで新たにセン断スパン比 M/Qd が 1, 1.5, 2, 2.5, 3 の仮想試験体 $M/Qd=1, 1.5, 2, 2.5, 3$ をモデ

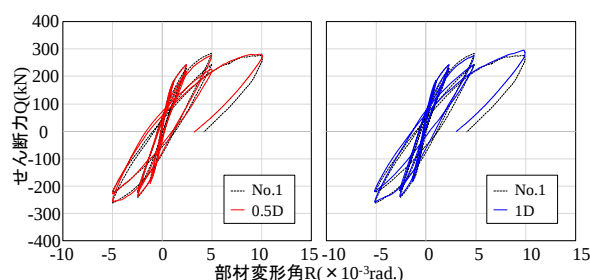


図-6 セン断力—部材変形角関係

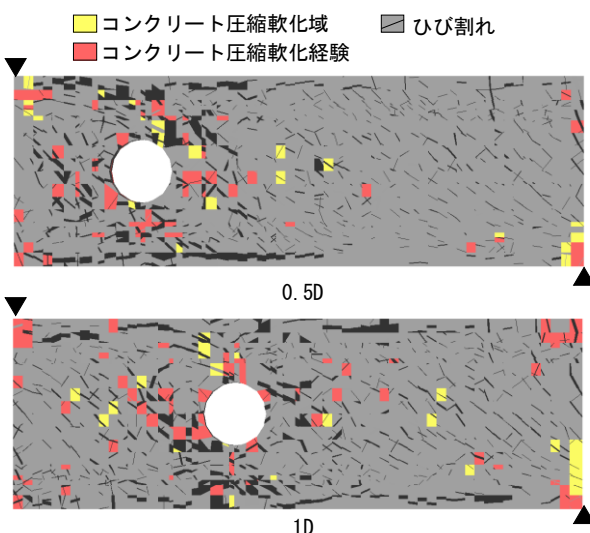


図-7 最終破壊状況

表-5 最大耐力

試験体名	せん断耐力		
	解析値	修正広沢式 軸力考慮	Qmax/Qsu1
	Qmax (kN)	Qsu1 (kN)	
0.5D	284.4	247.6	1.15
1D	299.2	247.6	1.21
No.1(1.66D)	286.8	247.6	1.16

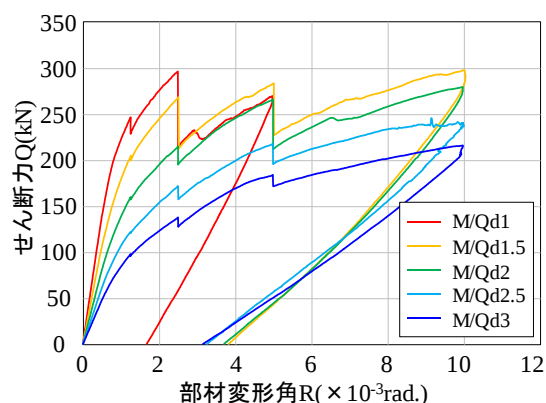


図-8 セン断力—部材変形角関係

ル化し解析を行う。

6.2 解析結果

図-8 に各試験体のせん断力—部材変形角関係の包絡線の第1象限, 図-9 に各試験体の最終破壊状況を示す。

図-8 よりせん断スパン比が大きくなるほど、剛性と耐力が落ちていく傾向が確認できた。また、図-9 からは $M/Qd=1$, 1.5 , 2 の 3 体はせん断破壊しているが、 $M/Qd=2.5$, 3 の 2 体は曲げ破壊していることが確認できる。

6.3 開口部せん断強度

試験体 No.1, $M/Qd=1\sim3$ の計 6 体の計算値、解析値の開口部せん断強度を一覧にして表-6 に示す。せん断強度の計算式には、5 章で用いた (2) 式による評価を試みる。

図-10 に解析値と (2) 式の計算値の比率を示す。せん断破壊をした $M/Qd=1$, 1.5 , 2 , No.1 の 4 体の解析値と (2) 式の計算値の比較をすると、計算値に対する実験値の比は平均 1.14 となった。このことより、せん断スパン比を変化させた試験体においても軸力を考慮した修正広沢式を用いて安全側に評価できることが分かった。また、 $M/Qd=2.5$, 3 の 2 体は曲げ破壊しており、正確なせん断強度ではないが $M/Qd=2.5$ は計算値を上回り、 $M/Qd=3$ もほぼ計算値と同様となった。

7. 長期荷重時における開口位置の検討

6 章まででは、開口位置が変化やせん断スパン比に対してせん断強度の検討を解析的に示した。PC 梁はロングスパンであることが多く、長期荷重時のせん断力は端部に近づくにつれ大きくなることが懸念されている。実設計では、短期のせん断強度のみならず、長期荷重時の開口部におけるせん断ひび割れの検討が必要となる。しかし、試験体のサイズから実験での検討は難しいため、実大の梁サイズのモデルを構築し解析による検討を行う。

7.1 モデル概要

図-11 に解析用試験体の詳細を示す。断面 $600\text{mm}\times 1200\text{mm}$ 、長さ 14000mm の梁で、コンクリート強度は 30N/mm^2 とする。開口径 $D/3$ (D : 梁せい) 400mm 径の開口を梁両端に設ける。PC 規準では²⁾ 梁端から $2D$ 以上離れた位置にしか開口を設けることはできない。そこで、ここでは開口位置は梁端から $0.5D$, $1D$, $1.5D$, $2D$ 離れた試験体 L- $0.5D$, L- $1D$, L- $1.5D$, L- $2D$ の 4 体を構築し検討する。

あばら筋は図-11 中に示すように 100mm ピッチ、開口補強筋は開口部に 2 組配筋した。また、PC 鋼より線の緊張荷重は、実験の No.1 と同様に、梁一般部の軸力比 $\eta=0.1$ となるよう計画した。柱は断面 $1000\text{mm}\times 850\text{mm}$ 、梁芯から 4000mm の長さとし、スラブの曲げ有効梁幅は 3600mm とする。表-7 にコンクリートの、表-8 に各種鋼材の材料強度を示す。

7.2 解析モデル

図-12 に解析モデルを示す。実際にはあばら筋による

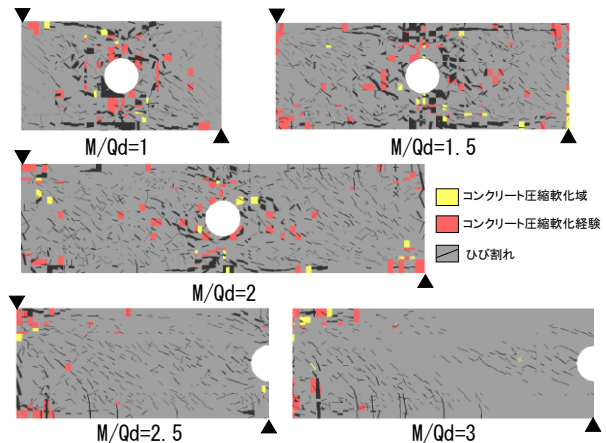


図-9 最終破壊状況

表-6 最大耐力

試験体名	せん断耐力			
	解析値	修正広沢式 軸力考慮	$Q_{\max}/Q_{su1}$	破壊モード
	$Q_{\max}$ (kN)	Q_{su1} (kN)		
$M/Qd=1$	295.4	281.2	1.05	せん断
$M/Qd=1.5$	297.4	252.1	1.18	せん断
No.1	286.8	247.6	1.16	せん断
$M/Qd=2$	279.3	236.8	1.18	せん断
$M/Qd=2.5$	245.3	227.3	1.08	曲げ
$M/Qd=3$	215.0	220.8	0.97	曲げ

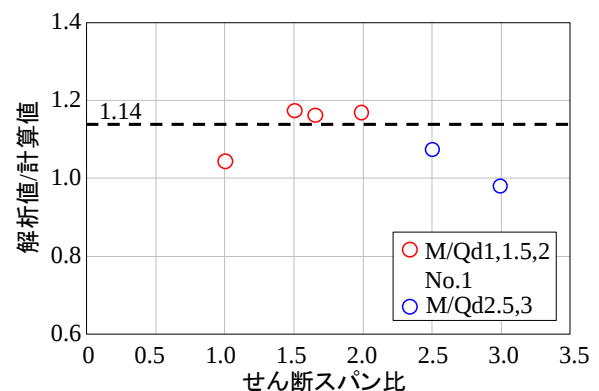


図-10 解析値と計算値の比率

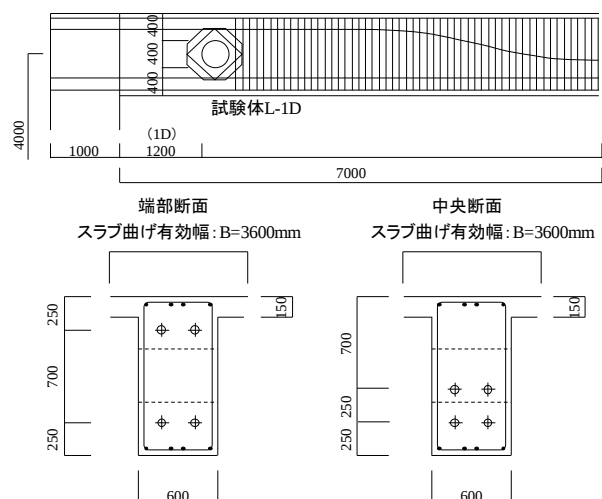


図-11 解析用試験体詳細 (寸法 mm)

コンクリートの拘束効果はあるものの、梁幅方向に大きな拘束応力は生じないものとみなし、解析は2次元で行い、試験体の対称性を考慮して、梁長さ方向を半分にした1/2モデルとした。梁と柱を四辺形要素で、鉄筋を線材要素でモデル化した。PC鋼材やその他あばら筋等のモデル化や付着すべり、プレストレスの加え方、材料構成則については3章ものと同様とした。また、柱脚は完全固定とした。

解析の手順としては、まず、躯体荷重を梁に与え、次にプレストレスを導入する。そして最後に、積載荷重を載荷する。躯体荷重と積載荷重は等分布荷重で加え、躯体荷重は実PC梁を参考に、 $w=38.2\text{kN/m}$ 、積載荷重は 25.2kN/m とする。

7.3 解析結果

図-13に積載荷重を載荷した後の試験体 L-0.5D のひび割れ図を開口部周辺のみ抽出し示す。

積載荷重により、L-1D～2D は、開口部にせん断ひび割れは発生しなかったが、L-0.5D のみ、開口部横の1要素にせん断ひび割れが発生した。

しかし、L-0.5D にひび割れが発生したものの、4章3節で述べたように、これは非常に微細なひび割れであり、積載荷重をかけた後に、さらに等分布荷重を加えた場合でも、ひび割れは大きく進展することはなかった。そのため、L-0.5D に発生したひび割れは、梁のせん断強度への影響は概ね小さいと考えられる。

8.まとめ

本解析研究により、以下の結論を得た。

- (1) 解析は実験結果を良好に模擬できた。開口部のせん断ひび割れについても解析で、十分に模擬できていることを確認した。
- (2) 開口位置を変化させ、スタブ端から0.5Dまで近づけた解析から、開口位置によるせん断強度の変化は見られなかった。
- (3) せん断スパン比を変化させた解析においても、軸力を考慮した修正広沢式でせん断強度を安全側に評価できることが分かった。
- (4) 長期荷重時の開口部のせん断性状の検討を行い、梁端から1Dまでは開口部にせん断ひび割れは発生しないことが分かった。0.5Dの場合でも発生するひび割れは微小で、梁のせん断強度に影響を及ぼさない程度だと考えられた。

謝辞

研究の遂行にあたり、株式会社ピーエス三菱、オリエンタル白石株式会社、株式会社建研、コーリョー建販株式会社の4社より貴重な実験データを提供して頂きました。ここに感謝の意を表します。

表-7 コンクリートの材料特性

使用部位	$\sigma_B(\text{N/mm}^2)$	ヤング係数(kN/mm^2)
梁	30	24.4
柱	30	24.4

表-8 鋼材の材料特性

径	使用部位	鋼種	降伏点(N/mm^2)	ヤング係数(kN/mm^2)
D25	主筋	SD345	345	205
D13	あばら筋	SD295A	295	205
7-SWPR7BLΦ12.7	開口補強金物	PC鋼より線	1000	205
		B種1号		

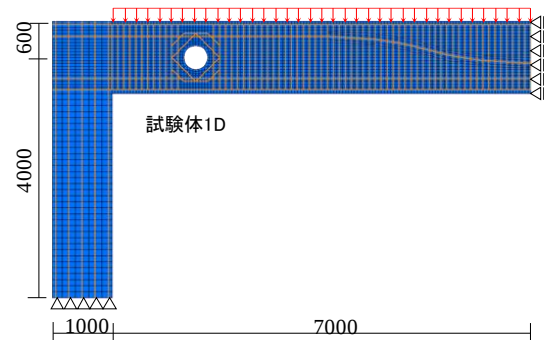


図-12 解析モデル

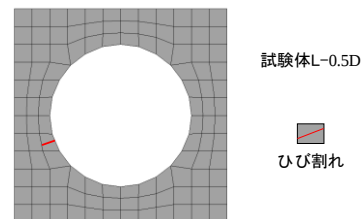


図-13 長期荷重時の開口部の状態

参考文献

- 村上 秀夫 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
- 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，日本建築学会，1998
 - 2) 岩見 遼平 ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.487-492，2019
 - 3) 多久和 大海 ほか：プレストレストコンクリート有孔梁のせん断強度に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，pp.379-384，2020
 - 月成 真隆 ほか：プレストレストコンクリート有孔梁のせん断強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.169-174，2019
 - 4) 佐藤裕一 ほか：分散ひび割れモデルによる鉄筋コンクリートのひび割れ幅の予測，構造工学論文集，Vol.61B，pp.111-123，2015.3
 - 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010