論文 開孔補強筋を用いた PC 有孔梁のせん断強度に関する研究

月成 真隆*1・丸田 誠*2・渡邊 一弘*3・長沼 一洋*4

要旨:本研究では2体の開孔を有するプレストレストコンクリート造梁の曲げせん断実験及びその実験を対象とした非線形有限要素解析を行った。実験から開孔の補強筋量を増やすこと、コンクリート強度を高くすることで開孔部のせん断強度が上昇することが分かった。解析は実験を良好に再現できたことから開孔補強筋の形状、有無をパラメータとしたパラメトリック解析も実施し、せん断強度について検討を行った。その結果、鉄筋コンクリート有孔梁で用いられているせん断強度式に、プレストレス分の軸力項を加えた式で十分安全に評価できることが分かった。

キーワード:開孔補強筋、プレストレストコンクリート、有限要素法、非線形解析

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区間内のあばら筋(以下,孔際補強筋), 開孔周辺の斜め筋および既製のユニット型開孔補強金物 (以下,開孔補強筋)が開孔部のせん断強度に有効である ことが分かっている¹⁾。

一方,プレストレストコンクリート(以下,PC)造梁で は開孔(円形開口)を対象とした斜め筋や既製の開孔補強 金物を使用した実験例,解析例は少なく²⁾³,PC規準⁴⁾ では,主に矩形開口を対象とした上下を梁と見立てた設 計式が提示されている。

本研究では、筆者らが昨年行った実験²⁾より、開孔部の補強筋量の増加1体、開孔補強筋の形状を変更しコンクリート強度等を増加させた1体、計2体のPC有孔梁の実験と有限要素法(FEM)による非線形解析を行い、せん断強度に関する検討を行うこととした。

2.実験概要

2.1 試験体

表-1に試験体一覧,図-1に試験体配筋図を示す。試 験体は実物の約1/2縮尺断面を有するK03,K04の2体 とした。コンクリートの設計基準強度FcをK03は27(N/ md),K04は36(N/md)とし,2体ともに文献2)の試験体 K01,K02に対して開孔補強筋量を1.6倍,孔際補強筋量 を2.3倍にした試験体である。文献2)と同様に,中央部 に開孔径D/3(D:梁せい)167mm径の単開孔を有する試験 体とし,孔際補強筋は補強量,強度ともに共通とした。 開孔部の補強には,それぞれ斜め補強筋,既製金物に見 かけの定着長さを大きくするために両端部フック付き鉄 筋をスポット溶接した開孔補強筋を用いた。スタブのコ

*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(株)ピーエス三菱 技術本部技術部部長 工学修士 (正会員) *4 日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

ンクリート強度は共通で Fc=60(N/md), PC 鋼棒の降伏強 度に対するプレストレス導入量の割合(以下, PC 有効率) を 0.343 とした。 φ 32 の太径 PC 鋼棒とし曲げ強度の増 大を図ったため、比較的低強度のコンクリートの圧壊が



表-1 試験体一覧

試験体名	断面	スパン	コンクリート		筋 PC鋼棒	60. 4 7. 04. 44	開孔補強筋		孔際補強筋		
	(mm)	(mm)	(N/mm ²)	土肋		一般部肋肋	鋼種	p _d	鋼種	ps	PC有効率
K03	200 × 500	1500	27	4-D19	1- <i>ф</i> 32	4-S8	2-S8	0.23%	2-D10	0.46%	0.242
K04	300 ~ 300	1300	36	SD345	C種1号	SD785級	SD785級	0.45%	SD295	0.40%	0.343

先行しないよう有効率を抑えた。

試験体はまず梁のコンクリートを打設し、その後17日 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26日で行い、翌日にシース内にグラウトを充填し た。グラウトの圧縮強度は86.9(N/md)である。コンクリ ートの材料試験結果を表-2,鋼材の材料試験結果を表-3に示す。試験体には最大径15mmの砕石を使用した。 2.2加力方法

図-2 に示すロ型の鉄骨フレーム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、正負 繰り返し載荷を行った。制御は変位制御とし、部材角 R=1.25×10⁻³[rad.]で1サイクル、部材角 R=2.5,5.0,10,20× 10⁻³[rad.]で各2サイクルずつ加力を行う計画とした。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 材角まで加力して終了とした。

3.実験結果

3.1 破壊性状,荷重 Q-変形角 R 関係

図-3にK03, K04のQ-R 関係を示す。

K03 は、R=1.25×10⁻³[rad.]のサイクルにおいて梁端部 に曲げひび割れ、および開孔中心から斜め 45 度方向に 進展するせん断ひび割れ(以下,45 度ひび割れ)が生じた。 R=2.5×10⁻³[rad.]のサイクルでは、45 度ひび割れが進展し、 また、開孔の接線方向に進展するひび割れ(以下,接線ひ び割れ)が生じた。R=5.0×10⁻³[rad.]のサイクルにおいて 接線ひび割れが梁の上下端に達し、その後、R=10.0×10⁻³ [rad.]の正のサイクルにおいて接線ひび割れ徐々に広が っていき、このサイクルの最大荷重付近において孔際補 強筋が降伏し、R=6.7×10⁻³[rad.]付近で開孔部せん断破 壊が生じて荷重が急激に低下した。

K04 は、R=1.25×10⁻³[rad.]のサイクルにおいて梁端部 に曲げひび割れ、および 45 度ひび割れが生じた。R=2.5 ×10⁻³[rad.]のサイクルでは、45 度ひび割れが進展し、ま た、接線ひび割れが生じた。R=5.0×10⁻³[rad.]のサイクル において接線ひび割れが梁の上下端に達し、このサイク ルの最大耐力付近において孔際補強筋の降伏が確認され た。その後、R=10.0×10⁻³[rad.]の正のサイクルにおいて接 線ひび割れが徐々に広がっていき、R=6.7×10⁻³[rad.]付 近で開孔部せん断破壊が生じて荷重が急激に低下した。

3.2 開孔周囲補強筋のひずみ性状

開孔周囲の補強筋のひずみ性状を検討する。ここで開 孔周囲補強筋とは,開孔補強筋と孔際補強筋とする。K03,

表-2 コンクリートの力学特性

使用材料							
試験体名	使用部位	σ _в (N/mm)	ヤング係数 (kN/mn [®])				
K03	梁	29.4	29.3				
K04	梁	40.3	31.5				
全試験体	PCグラウト	85.8	-				
全試験体	スタブ	66	_				

表-3 鋼材の力学特性

使用材料								
汉	使用部位	細話	降伏点	ヤング係数	引張強さ			
1±	医田即臣	到叫个里	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²			
D19	主筋	SD345	392	180	604			
	一般部あばら筋				1157			
S8	斜め補強筋	SD785級	997	196				
	既製金物							
D10	孔際補強筋	SD295	369	192	527			
S10	楕円形金物	SD785級	933	188	1111			
φ 32	PC鋼棒	C種1号	1182	198	1289			



K04の開孔補強筋のせん断力-ひずみ関係を図-4, 孔際 補強筋のせん断力-ひずみ関係を図-5に示す。

K03, K04の開孔補強筋は,高強度(SD785級)である ため,A点,B点ともに降伏ひずみに達しなかったが, K03のひずみは線形範囲を超える4000µ近くまで達して いて,有効に作用していることが分かる。K04では,ひ ずみは最大1500µ程度でK03と比較して小さい値とな ったが,せん断力を負担していることが分かった。

一方, 孔際補強筋は開孔補強筋よりも降伏点が低い (SD295) ため, K03 は C 点, K04 は C 点, D 点の 2 か 所とも降伏していることが確認された。このことから, 孔際補強筋も有効に作用していることが分かった。

3.3 昨年度試験体との比較

図-6に昨年行った実験²⁾の試験体(K01, K02)と今回の試験体の Q-R 関係の包絡線の比較を示す。

K03 は K01 に対して,開孔補強筋量を 1.6 倍,孔際補 強筋量を 2.3 倍にした試験体であり,図-6 から,補強量 を増加させたことでせん断強度が上昇したことが確認で きた。

また,K04はK02に対して,開孔補強筋量を1.6倍, 孔際補強筋量を2.3倍にし,コンクリート強度も高くした(Fc27→36)試験体である。そのためK04はK03に比べて大きくせん断強度が上昇したことが確認できた。開 孔補強筋形状も若干異なるため参考図となる。

4.解析概要

解析対象は、今回実験を行った2体の試験体K03,K04 と、新規金物の影響を把握するために、K04に対して両 端部フック付き鉄筋をなしとした既製金物を開孔補強筋 とした仮想解析試験体K05、開孔補強筋のせん断強度へ の影響を把握するために、K03に対して開孔補強筋をな しとした仮想解析試験体K06,K04に対して開孔補強筋 をなしとした仮想解析試験体K07を加えた合計5体とし て、それぞれ解析を行う。

図-7 に各試験体の解析モデルを示す。要素分割は図 -7 に示すように、試験体の対称性を考慮して、梁幅方 向を半分にした 1/2 モデルとしている。そのため境界面 においては y 方向の水平変位を拘束している。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 ル化している。梁とスタブの境界部の節点は共有させて いる。主筋および PC 鋼棒-コンクリート間の付着滑りは、 接合要素を挿入することにより考慮している。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。試験体製作には、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。その他の開孔補 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 3) と同様のものを使用した。材料強度は, K06 は K03 と, K05,07 は K04 と同様とした。

5.解析結果

5.1 荷重 Q-変形角 R 関係

K03, K04 の実験と解析の Q-R 関係の比較を図-8 に 示す。

K03, K04 両者の解析結果は, R=5.0×10⁻³[rad.]のサイ クルまで実験結果と良好に対応している。実験でせん断 破壊した R=10.0×10⁻³[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, 徐々に剛性を落 とし実験と同様の最大耐力付近で横ばいとなる結果とな った。実験のようなせん断破壊による耐力低下について は今後の課題であるが, 両者ともに解析で実験の傾向お よび最大耐力を良好に模擬できている。

5.2 Q-R 関係の比較

図-9 に開孔補強筋形状に違いがある K04 と K05,開 孔補強筋の有無に違いがある K03 と K06, K04 と K07 の Q-R 関係の比較を示す。

K04 と K05 の比較より, K04 は最終サイクルにおいて K05 よりも若干耐力は上昇しているが,両端部フック付き鉄筋による差異は少なかった。

K03 と K06, K04 と K07 の比較より,それぞれ開孔補 強筋による耐力の上昇が確認できた。開孔補強筋がない 場合に比べて, K03 は約 8%, K04 は約 14%耐力が上昇 している。また,開孔補強筋のない K06, K07 が最終サ イクルにおいて K03, K04 に対して大きく剛性を落とし ていることから,開孔補強筋によって開孔部の損傷が抑 制されていることも分かる。

5.3 開孔周囲補強筋のひずみ性状

実験と同様に解析でも開孔補強筋と孔際補強筋のひず み性状を検討する。図-10にK03,K04の開孔補強筋(A 点)のせん断力-ひずみ関係,図-11に孔際補強筋(C点) のせん断力-ひずみ関係を示す。

開孔補強筋のひずみは, K03, K04 ともに, 解析では弾 性範囲内にあり,実験結果と良好に対応している。孔際 補強筋のひずみは, K03, K04 ともに, 解析では実験と異 なるサイクルではあるが, C 点は降伏ひずみに達してい ることが確認できる。解析では孔際補強筋に徐々に残留 ひずみが出ているが,その原因として孔際補強筋を完全 付着にしてコンクリートと節点を共有させており,実験 よりも付着が大きい事が影響している可能性が考えられ る。

解析での孔際補強筋のひずみは、実験と若干異なって いるが,解析では実験の傾向を概ね捉えることができた。 5.4 最終破壊状況の比較

実験と解析の最終状況の比較を,ひび割れ性状を中心 に K03 について行う。実験と解析の最終破壊状況(最大 耐力時)を図-12 に示す。

実験では、せん断破壊する際に接線ひび割れが大きく



開くのが特徴的であったが,解析でも R=10.0×10⁻³[rad.] のサイクルで接線方向のひび割れや圧壊が進展した様子

が確認でき,接線方向の破壊状況が解析でも再現できた。

6.実験値,解析値,計算値の比較

開孔部せん断ひび割れ強度と開孔部せん断強度について昨年行った実験及び解析(K00, K01, K02)²⁾も含め実験値,解析値と計算値の比較を行う。また,開孔部せん断強度についてはK00, K03~K07の解析値と計算値についても比較を行う。

6.1 せん断ひび割れ荷重の比較

表-4 にせん断ひび割れ発生荷重の実験値,計算値を 示す。計算式には,津村らによって提案され津村式⁵⁾(以 下に示す(1)式)を用いた。

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

ここで, k_c = 0.72(D ≥ 400より), の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:開孔径[mm], D:梁せい [mm], b:梁幅[mm], j:鉄筋応力中心間距離[mm]である。

図-13 に実験値と(1)式の計算値の比較を示す。計算値に対する実験値の比率は平均2.04となり、(1)式は 実験結果を大きく安全側に評価する結果となった。この 結果から、開孔部せん断ひび割れ強度にはプレストレス 力が寄与していると考え、プレストレスによるせん断ひ び割れ強度の上昇を考える。

RC 規準⁶では RC 柱のせん断終局強度の評価におい て、軸力によるせん断強度の上昇を $0.1 \cdot \sigma_0 \cdot b \cdot j$ (σ_0 :軸応 力度、b:部材幅、j:応力中心間距離)で与える方法が 示されているが、せん断ひび割れ強度に対する軸力の効 果は定量的には示されていない。そこで本研究ではプレ ストレスによるせん断ひび割れ強度の上昇分をせん断終 局強度と同様に $0.1 \cdot \sigma_g \cdot b \cdot j_r$ (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。

$$Q_{sc1} = Q_{su0} + 0.1 \cdot \sigma_a \cdot b \cdot j_r \tag{2}$$

ここで、 σ_s : プレストレスによる軸応力度[N/mm²]である。 図-14 に実験値と(2) 式の計算値の比較を示す。プレストレスによるせん断ひび割れ強度の上昇分を0.1・ $\sigma_g \cdot b \cdot j_r$ で考慮した場合,計算値に対する実験値の比率は平均 1.30 となり、津村式に軸力項を追加することで良好に評価することができた。

6.2 開孔部せん断強度

実験値,計算値,解析値の開孔部せん断強度を一覧に して表-4に示す。せん断強度の計算式には,RC規準⁶⁾ に示されている修正広沢式(以下に示す(3)式)を用いた。

$$Q_{su0} = \left\{ \frac{0.053 \cdot pt^{0.23} \cdot (\sigma_B + 18)}{(M/Q \cdot d) + 0.12} \cdot \left(1 - \frac{1.61 \cdot H}{D}\right) + 0.85 \sqrt{\Sigma p_s \cdot \sigma_{sy}} \right\} \cdot b \cdot j \quad (3)$$

ここで、 p_i :引張鉄筋比、 p_s :孔周囲の鉄筋比、 σ_{sy} :孔周囲鉄



試験体名	せん断ひび割れ荷重					せん断耐力				
	ひび割れ荷重	津村式	津村式 軸力考慮		Qcr/Qsc1	最大強度	修正広沢式	修正広沢式 軸力考慮		Qmax/Qsu1
	Qcr	Qsc0	Qsc1			Qmax	Qsu0	Qsu1	Qillax/ Qsuu	
	(kN)	(kN)	(kN)			(kN)	(kN)	(kN)		
K00(解析)	-	-	-	-	-	263.8	152.7	187.1	1.73	1.41
K01	138.0	77.3	115.1	1.79	1.20	323.5	192.4	230.1	1.68	1.41
K02	137.6	77.3	114.3	1.78	1.20	304.6	220.7	257.7	1.38	1.18
K03	207.2	78.6	132.2	2.64	1.57	407.8	256.8	310.3	1.59	1.31
K04	176.0	89.4	143.7	1.97	1.22	494.0	348.2	402.5	1.42	1.23
K05(解析)	-	-	-	-	-	489.5	348.2	402.5	1.41	1.22
K06(解析)	-	-	-	_	_	379.5	208.7	262.2	1.82	1.45
K07(解析)	-	-	-	-	-	431.0	226.2	280.5	1.91	1.54

表-4 強度一覧

筋の降伏応力度[N/mm²]である。

図-15 に実験値と(3)式の計算値の比較を示す。計算値に対する実験値の比率は平均1.55となり,(3)式は 実験結果を大きく安全側に評価する結果となった。ここで,前節と同様に,プレストレスによるせん断強度の上 昇分を考慮し,(3)に軸力項を追加した式(以下に示す(4) 式)による評価を試みる。

$$Q_{su1} = Q_{su0} + 0.1 \cdot \sigma_g \cdot b \cdot j \tag{4}$$

図-16 に実験値と(4)式の計算値の比較を示す。計 算値に対する実験値の比率は平均1.30となり,修正広沢 式に軸力分を付加した式で良好に評価することができた。

7.まとめ

本研究により以下の結論を得た。

- (1) 開孔の補強筋量の増加やコンクリート強度の上昇 によって、せん断強度が上昇することが確認できた。
- (2) 解析は実験結果を良好にシミュレートできた。終局 時の接線方向のひび割れや圧壊も再現できた。
- (3)本実験の試験体のせん断ひび割れ強度は、既往の津村式に軸力項を追加した式により安全側で良好に評価できることが分かった。
- (4) 本実験の試験体のせん断強度は、RC 規準の修正広 沢式に軸力項を付加した式により安全側で良好に 評価できることが分かった。

謝辞

本研究は科学研究費盤研究(C)(課題番号:18K04445 研究代表者:丸田誠)の助成を受けました。ここに感謝 の意を表します。

参考文献

- 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
- 月成 真隆, 丸田 誠, 渡邊 一弘, 長沼 一洋: 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

- 3) 月成 真隆,長沼 一洋,丸田 誠:開口補強孔金物を 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,プレストレストコンクリート工学会,第28 回シンポジウム論文集,pp.203-208, 2019
- 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
- 5) 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
- 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