

# 論文 K型開口補強筋により補強した有孔基礎梁のせん断強度に関する解析的研究

石岡 拓\*1・和泉 信之\*2

**要旨:** 本論文は、K型開口補強筋により補強した有孔梁試験体を対象とした有限要素解析により、有孔梁のせん断伝達に関して考察することを目的としている。既往の実験結果を対象とした解析においては、ひび割れ発生状況やK型補強筋降伏荷重と最大耐力を適切に評価できた。各種開口補強筋の補強量を変数とした解析結果から、その影響を考察した。解析結果として、開口部あばら筋を配筋しない場合には上下弦材の破壊で最大耐力が決定し、開口部あばら筋量の増大による耐力上昇が頭打ちになることが確認できた。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 有孔梁, 開口補強, せん断終局強度, 有限要素解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造基礎梁に人通りを設けるために、開口径Hと梁せいDの比(H/D)が1/3を超える開口(以下、大開口という)を設けることを可能とする開口補強工法の開発が進められている(例えば1)~5)。これらの工法を用いることにより基礎梁の梁せいを低く抑えることができ、掘削土量の低減など環境負荷の低減にも寄与することができる。

これらの工法では孔周囲のせん断終局強度の算定に既往の実験式<sup>6)</sup>や理論式<sup>7)</sup>を準用している例が多く見られるが、式の適用範囲外であることや大開口周囲の応力伝達のメカニズムには不明な点も多く、その設計には慎重さが求められる。大開口を有する梁の開口補強筋に注目した研究として小林による研究<sup>8), 9)</sup>が挙げられ、大開口を補強する開口補強筋に特有な役割や効果に関して徐々に明らかになってきている。しかし、大開口周囲のせん断伝達メカニズムや各開口補強筋の効果を解析的に検討した研究は少ない。

本論文では筆者らが実施した2種類の加力方法を用いた有孔梁実験を対象として有限要素解析を実施し、その結果から有孔梁のせん断伝達に関して考察することを目的とする。本解析は既往論文<sup>10)</sup>の解析をもとにパラメトリックな解析を追加したものである。

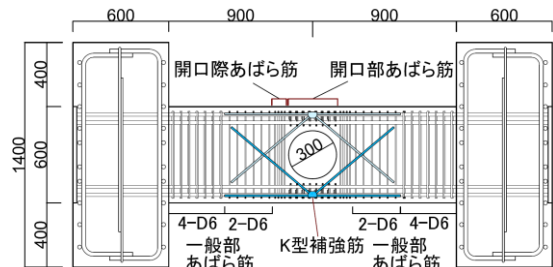
## 2. 解析対象実験の概要

### 2.1 試験体概要

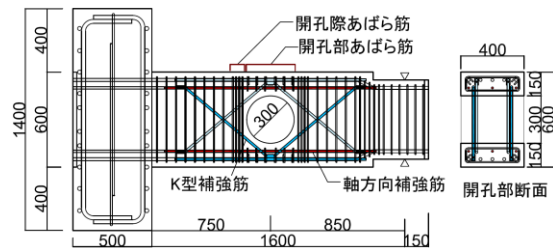
解析対象試験体一覧を表-1に、試験体形状および配筋を図-1に示す。実験の加力方法は2種類であり、端部の拘束条件を両端固定とした試験体を4体、一端固定、他端ピン支持とした試験体を2体実験した。前者は開口がスパン中央にある場合を想定しており、後者は開口が

表-1 解析対象試験体一覧

試験体名	RCB01	RCB02	RCB03	RCB04	RCB05	RCB07
$\sigma_B$	36.9	39.9	41.4	41.0	35.6	33.1
梁断面	B×D = 400×600			B×D = 400×600		
開口径	H = 300 (=D/2)			H = 300 (=D/2)		
開口芯位置	端部から 1.50D (=900mm)			端部から 1.25D (=750mm)		
せん断スパン比	1.50			2.67		
梁主筋	$P_t$ (%)	4+4-D19 (SD345)	4+2-D22 (SD490)	5-D19 (SD390)	5+2-D19 (SD685)	
	$=a_t/bd$	1.09	1.09	0.85	0.94	
開口部補強筋	K型	なし	2-D13 (4台2組)	3-D13 (6台3組)	なし	2-D13 (4台2組)
	$P_{rel}$ (%)	0	0.222	0.383	0.577	0
	開口際	2-D6@20 (4組)		4-D6@20 (4組)	2-D6@20 (4組)	
	$P_{rel}$ (%)	0.284	0.274	0.549	0.268	
軸方向補強筋	開口部	2-D6@40	2-D6@30	4-D6@30	2-D6@55	2-D6@80
	$P_{rel}$ (%)	0.400	0.530	1.070	0.291	0.200
一般部	軸方向補強筋	- (梁主筋)		2-D16 (SD295A)	3-D13 (SD295A)	3-D19 (SD685)
	(端部)	2-D6@50	2-D6@35	4-D6@35	2-D6@60	2-D6@50
破壊形式	端部	4-D6@50		4-D6@35	2-D6@60	2-D6@50
	破壊形式	開口部せん断			開口部せん断	
加力時拘束条件	両端固定			一端固定、他端ピン		



(a) RCB01~4 試験体



(b) RCB05, RCB07 試験体

図-1 試験体形状および配筋

\*1 千葉大学大学院 工学研究科 博士後期課程 修士(工学) (戸田建設株式会社) (正会員)

\*2 千葉大学大学院 工学研究科 教授 博士(工学) (フェロー会員)

材端側に寄った場合を想定している。

本工法の開口補強筋は3種類あり、K型補強筋は材軸に沿った2本の鉄筋(=軸方向筋)と材軸からある角度をもって斜めに伸びた2本の鉄筋(=斜め筋)を鋼板に溶接して一体化した補強筋である。開口際あばら筋は開口周囲のあばら筋のうち、開口中心より45°方向に引いた直線が引張鉄筋重心と交わる位置から開口中心までの範囲に配置されたあばら筋である。開口部あばら筋は開口の上下部分(以下、弦材という)で梁主筋と軸方向筋を巻くあばら筋である。

試験体はすべて開口部せん断破壊先行型で設計した1/2縮小模型であり、実験変数は開口補強筋量とし、K型補強筋の有無による影響を中心に確認した。試験体断面、開口径は全試験体共通であり、梁幅B=400mm、梁せいD=600mm、開口径H=300mm(=D/2)とした。

試験体で使用したコンクリートと鉄筋、鋼板の材料試験結果を表-2に示す。コンクリートの粗骨材は最大径13mmとして、試験体の縮尺に合わせた。コンクリートの圧縮強度は実験時で33.1~41.4N/mm<sup>2</sup>であった。

実験における加力状況を写真-1に、加力スケジュールを図-2にそれぞれ示す。

## 2.2 実験結果

実験における荷重変形関係を図-3に示す。開口補強筋量により最大耐力に違いはあるが、いずれの試験体においても以下の破壊過程を辿った。載荷初期に開口部の中心から45度方向に斜めひび割れが発生し、K型補強筋を有する試験体ではK型補強筋の斜め筋が引張降伏した。その後、開口部の接線方向と主筋沿いにひび割れが発生し、それが大きく拡幅して最大耐力に至った。

RCBO5, RCBO7試験体は、RCBO1~RCBO4試験体と異なり弦材部分に曲げモーメントが作用するため、開口部の斜めひび割れに先行して弦材を横切るように曲げひび割れが発生した。

表-2 材料試験結果

(a) RCBO1~RCBO4 試験体

コンクリート	割線剛性 ( $\times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
RCBO1	31.1	36.9	3.05
RCBO2	31.1	39.9	3.15
RCBO3	32.7	41.4	3.08
RCBO4	31.4	41.0	2.87

鉄筋・鋼板	使用箇所	ヤング係数 ( $\times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D6	あばら筋	182	371	511
D10	K型補強筋(RCBO2)	194	401	546
D13	K型補強筋(RCBO3,4)	183	389	548
D16	軸方向補強筋(RCBO4)	192	384	530
D19	梁主筋(RCBO1,2)	192	396	583
D22	梁主筋(RCBO3,4)	190	539	710
PL19	K型補強筋(RCBO2)	197	403	545
PL22	K型補強筋(RCBO3,4)	204	399	569

(b) RCBO5, RCBO7 試験体

コンクリート	割線剛性 ( $\times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
RCBO5	27.0	35.6	2.51
RCBO7	28.2	33.1	2.45

鉄筋・鋼板	使用箇所	ヤング係数 ( $\times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D6	あばら筋	185	396	514
D13	軸方向補強筋(RCBO5)	190	339	481
D13	K型補強筋(RCBO7)	187	381	540
D16	梁主筋(RCBO5)	194	399	571
D19	梁主筋(RCBO5)	191	455	628
D19	梁主筋(RCBO7), 軸方向補強筋(RCBO7)	195	722	906
PL22	K型補強筋(RCBO7)	-	401	521



(a) RCBO1~RCBO4 試験体 (b) RCBO5, 7 試験体

写真-1 加力状況

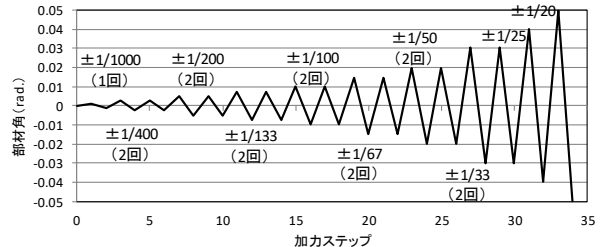


図-2 加力スケジュール

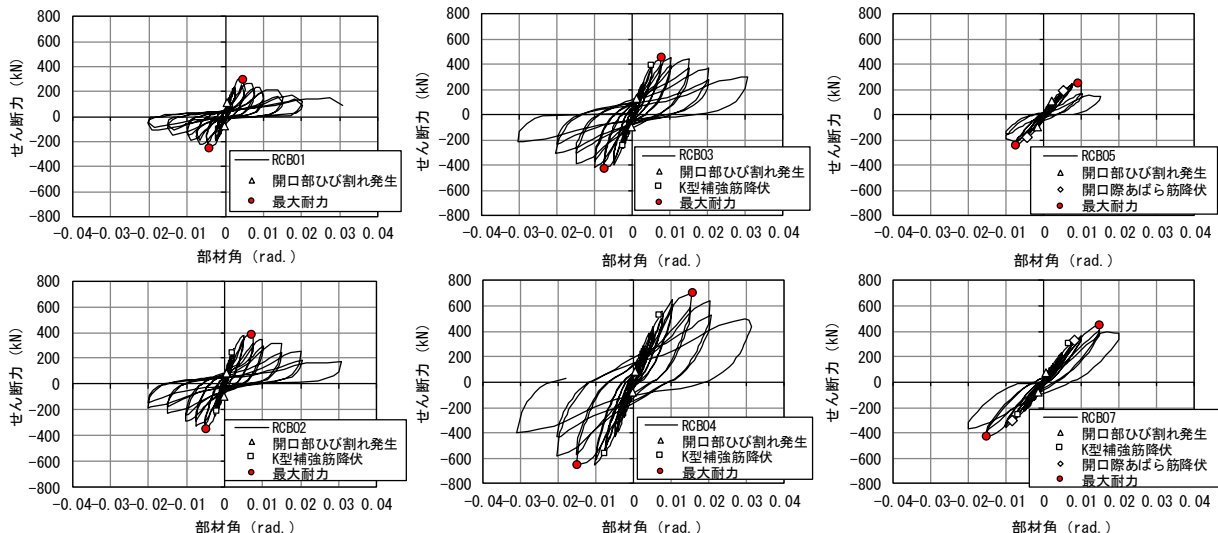


図-3 荷重変形関係(実験値)

### 3. 有限要素解析

#### 3.1 解析モデル概要

2章で示した有孔梁試験体を対象に汎用有限要素解析プログラム DIANA10.1 を用いて2次元非線形有限要素解析を実施した。解析モデル形状を図-4 に示す。コンクリート要素は8節点平面応力要素、鉄筋は埋込み鉄筋要素としてモデル化した。梁主筋および軸方向筋においてはコンクリート要素との間に界面要素を配置して付着を考慮した。各種開口補強筋については、事前解析で界面要素による付着モデルの影響が見られなかったため、一般的な埋込み鉄筋要素で仮定される完全付着のままとした。

使用した材料モデルを図-5 に示す。コンクリートは全ひずみ固定ひび割れモデルとして圧縮側は放物線モデル、引張側は収束性の改善を目的として、ひび割れ後の引張軟化を考慮しない脆性的なモデルとした。急激な剛性変化を避けるために軟化勾配を線形として終局引張ひずみ  $\epsilon_u$  をひび割れ発生ひずみ  $\epsilon_t$  の 1.2 倍とした。破壊エネルギー  $G_c$  は既往の研究<sup>11)</sup>に従って算出した。ひび割れ後のせん断剛性は事前解析結果と実験結果の比較から Al-Mahaidi モデル<sup>12)</sup>を 1/2 に低減して用いた。鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性 bilinear 型とした。梁主筋および軸方向筋とコンクリートの付着すべり関係は CEB/FIP Model Code 1990<sup>13)</sup>を適用し、梁主筋および軸方向筋が横補強筋で拘束されているため、各係数は拘束されて付着が良好な場合のものを用いた。加力は単調載荷とした。

#### 3.2 解析結果

解析により得られた荷重変形関係を実験結果と比較して図-6 に示す。解析値は実験値に比べて最大耐力以降の耐力低下が小さいものの、実験結果における開口補

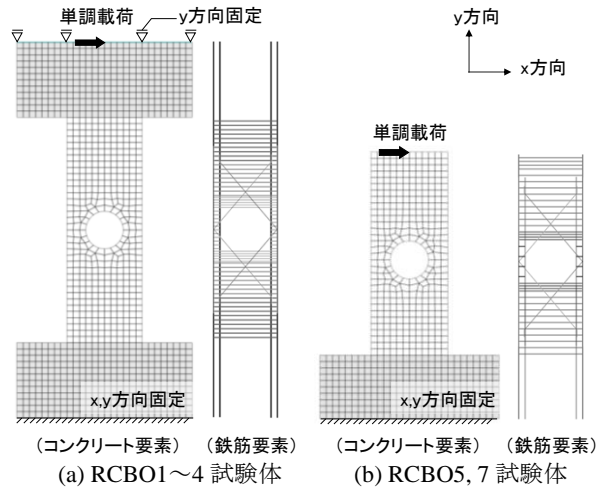


図-4 解析モデル形状

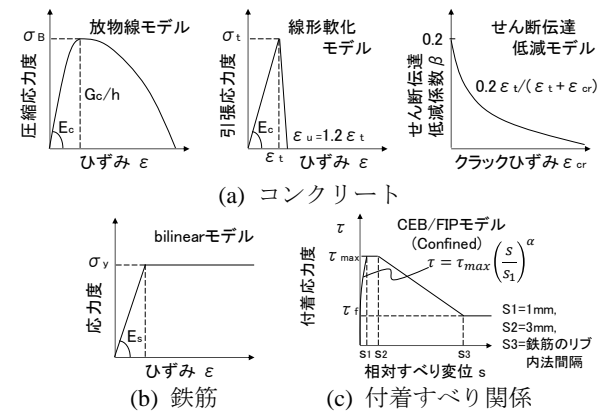
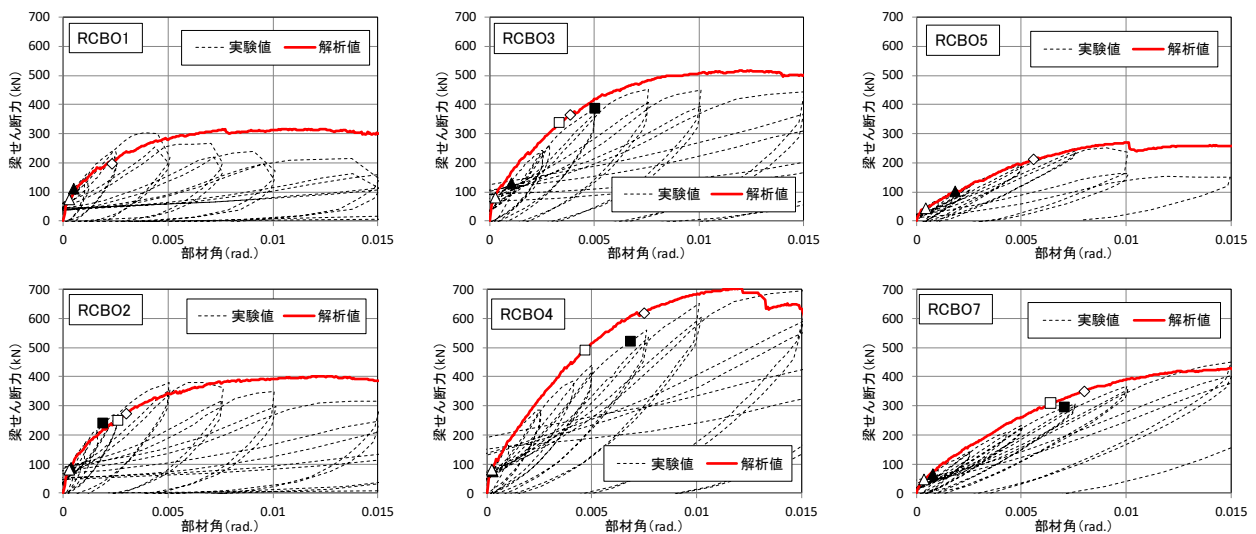


図-5 材料モデル

強筋量の増加による耐力上昇や加力条件の影響による剛性の違いが表現されている。各種荷重値の比較を表-3 に示す。開口部せん断ひび割れ発生荷重は実験値よりも解析値のほうが小さく、特に RCBO5 試験体で顕著であった。K 型補強筋降伏荷重と最大耐力に関しては解析値



※凡例 (実験値: 黒塗り、解析値: 白抜き) △, ▲: 開口部せん断ひび割れ発生, ◇: 開口際あばら筋降伏, □, ■: K型補強筋降伏

図-6 荷重変形関係(解析値と実験値の比較)

表-3 各種荷重値の比較

		RCB01	RCB02	RCB03	RCB04	RCB05	RCB07
開口部 せん断 ひび割れ	実験値 (kN)	112.3	86.6	130.0	75.9	102.9	66.7
	解析値 (kN)	75.3	81.7	81.3	79.9	42.8	46.6
	解析/実験	0.67	0.94	0.62	1.05	0.42	0.70
K型 補強筋 降伏	実験値 (kN)	-	238.8	385.9	521.2	-	294.5
	解析値 (kN)	-	249.4	336.5	490.6	-	306.3
	解析/実験		1.04	0.87	0.94		1.04
最大 耐力	実験値 (kN)	301.0	380.5	452.8	697.8	250.1	448.8
	解析値 (kN)	316.6	401.8	516.6	704.3	269.2	428.7
	解析/実験	1.05	1.06	1.14	1.01	1.08	0.96

と実験値は比較的良好に対応しており、±15%以内の精度であった。

ひび割れ発生状況の解析結果として RCB03 試験体における最大耐力時のクラックひずみを図-7 に示す。クラックひずみとはコンクリート要素において全ひずみから弾性ひずみを差し引いたひずみである。本解析モデルでは分散ひび割れモデルを用いているため、開口周囲でひび割れが局所化せず分散する傾向があるが、開口から斜め方向にひび割れが発生し、梁主筋沿いに進展している状況が再現できている。

#### 4. パラメトリック解析

##### 4.1 K型補強筋の効果

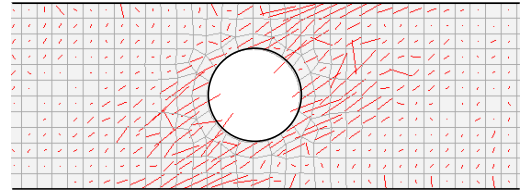
K型補強筋の効果を検査によって確認するために、前章のK型補強筋を有する解析モデルからK型補強筋を省いた解析モデルを作成して、両解析結果を比較した。K型補強筋の有無が荷重変形関係に与える影響に関して図-8 に示す。K型補強筋を省いた解析モデルでは、開口部せん断ひび割れ発生後の剛性が低下し、最大耐力も大きく低下した。

著者らの検討<sup>10)</sup>によると、K型補強筋の効果は日本建築学会「靱性保証型指針」<sup>7)</sup>における斜め筋のせん断強度式である(1)式で評価でき、有孔梁のトラス・アーチ作用によるせん断強度とは独立に評価できるとしている。

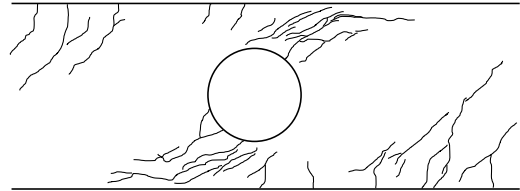
$$V_u = A_x \sigma_{xy} \sin \theta_x \quad (1)$$

そのためK型補強筋の有無による解析結果の差をK型補強筋の負担せん断力による耐力上昇と考え、(1)式による計算値と比較して図-9 に示す。図中にはK型補強筋量  $p_{wd}$  を併記した。

K型補強筋量が多い RCB04 試験体の解析結果では、(1)式による負担せん断力以上に耐力が上昇しており、計算値は解析値を過小評価した。また、RCB07 試験体ではよく対応していたが、K型補強筋量が同等である RCB03 試験体では若干の過小評価となった。過小評価となった2体は他2体と比較して開口部あばら筋を多く配筋して



(a) 解析結果 (クラックひずみ)



(b) 実験結果

図-7 ひび割れ発生状況 (RCB03 試験体, 最大耐力時)

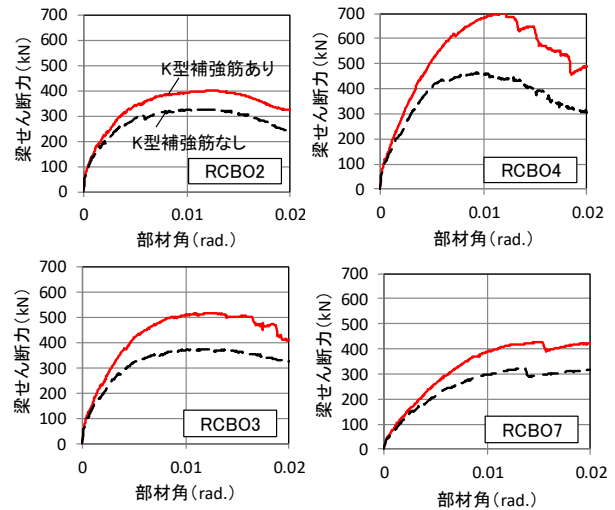


図-8 K型補強筋の有無による影響

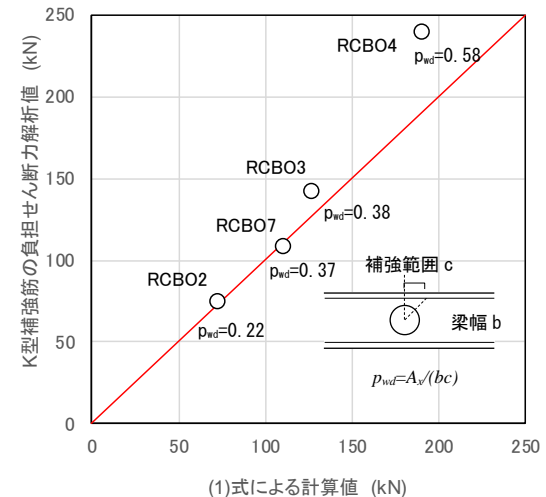


図-9 K型補強筋の負担せん断力

表-4 解析変数

開口部 あばら筋量	$p_{ws}(\%)$	0, 0.4, 0.8, 1.2
開口部 あばら筋量	$p_{wo}(\%)$	0, 0.4, 0.8, 1.2

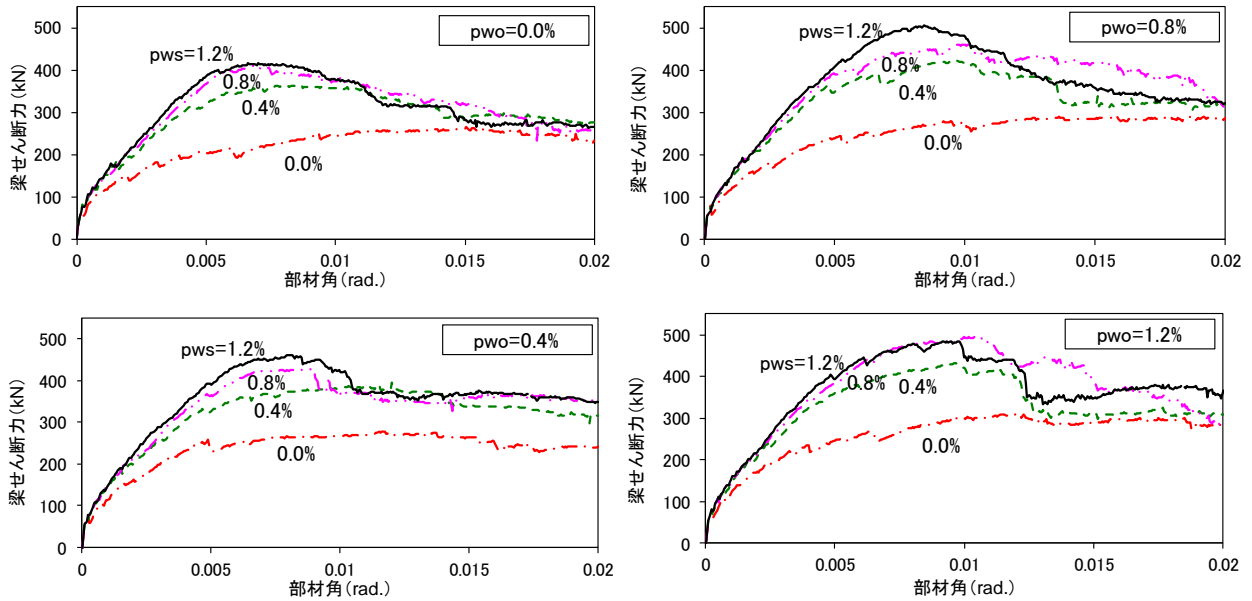


図-10 パラメトリック解析による荷重変形関係

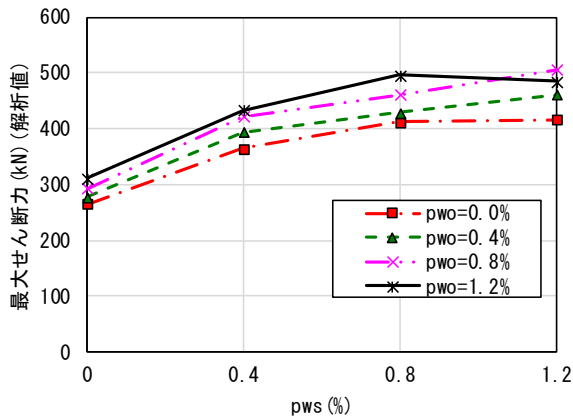


図-11 最大せん断力ー開口際あばら筋量関係

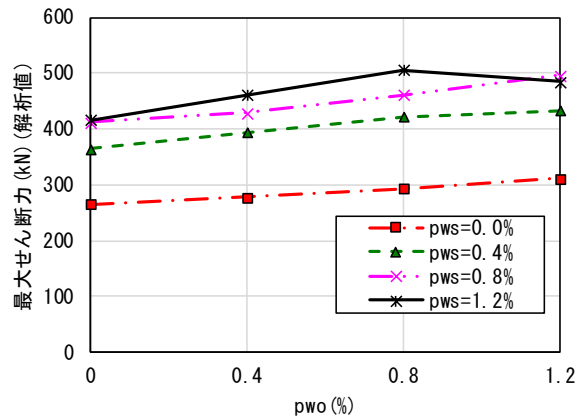


図-12 最大せん断力ー開口部あばら筋量関係

おり、過小評価はその影響と考えられるが詳細な検討は今後の課題としたい。

#### 4.2 開口際あばら筋と開口部あばら筋の効果

開口際あばら筋と開口部あばら筋の効果を確認するために、両補強筋を変数としたパラメトリック解析を実施した。K型補強筋を省いたRCB03試験体の解析モデルを基本として、開口際あばら筋と開口部あばら筋の補強筋量を変化させた。解析変数を表-4に示す。パラメトリック解析で得られた荷重変形関係を開口部あばら筋量ごとに図-10に示す。

開口際あばら筋量の増大とともに剛性および最大せん断力は上昇するが、最大せん断力を経験する部材角が小さくなり、それ以降の耐力低下が大きくなる傾向がある。開口部あばら筋量を増やすことにより耐力低下は若干緩やかになる。

各解析結果の最大せん断力と開口際あばら筋量との関係を図-11に、最大せん断力と開口部あばら筋量との関係を図-12にそれぞれ示す。

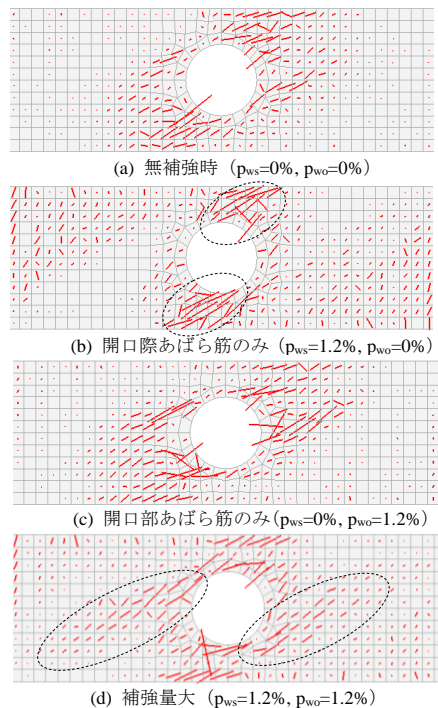


図-13 最大耐力時ひび割れ発生状況(クラックひずみ)

開口際あばら筋および開口部あばら筋の増大とともに最大せん断力は増大するが、開口際あばら筋による寄与の方が大きかった。開口部あばら筋量  $p_{wo}$  が 0% と 1.2% の場合には開口際あばら筋量  $p_{ws}$  が 0.8% 以上で頭打ちとなっており、最大せん断力は開口際あばら筋の降伏で決定していない。

代表的なひび割れ発生状況として、最大耐力時のクラックひずみを図-13 に示す。無補強時には開口周囲全体にひび割れが発生しているが、開口際あばら筋のみ配筋した場合には上下弦材部分にひび割れが集中し、開口部あばら筋のみ配筋した場合には開口の左右にひび割れが進展する。クラックひずみを横切っているあばら筋は最大耐力時にほぼ降伏強度に達しているため、クラックひずみが集中している付近ではひび割れ幅が拡大し、せん断破壊に至っていると考えられる。 $p_{wo}=0\%$  の場合に開口際あばら筋量が増大しても最大せん断力が頭打ちになるのは、上下弦材の破壊 (b) 図の破線部) で耐力が決定しているためである。一方で  $p_{wo}=1.2\%$  の場合に最大せん断力が頭打ちになるのは、開口周囲の補強が十分であり、開口部以外の一般部でせん断破壊 ((d) 図の破線部) が生じて耐力が決定しているためである。

## 5. まとめ

K 型補強筋により開口補強された有孔梁試験体を対象とした有限要素解析により、以下の結論が得られた。

- 1) 実験結果を対象とした解析において、解析で得られた荷重変形関係は開口補強筋量の増加による耐力上昇や加力条件の影響による剛性の違いを表現できていた。K 型補強筋降伏荷重と最大耐力に関しては解析値と実験値は  $\pm 15\%$  以内の精度で対応した。
- 2) K 型補強筋を省略した解析モデルでは、K 型補強筋を配筋した解析モデルと比較して開口部せん断ひび割れ発生後の剛性が低下し、最大耐力も大きく低下した。既往式による K 型補強筋の負担せん断力の計算値は開口部あばら筋を多く配筋した試験体における解析結果を過小評価した。
- 3) 開口際あばら筋と開口部あばら筋の補強量を変数とした解析結果から、開口際あばら筋および開口部あばら筋の増大とともに最大せん断力は増大し、特に開口際あばら筋量による寄与が大きい。開口部あばら筋を配筋しない場合には上下弦材の破壊で最大耐力が決定し、開口際あばら筋量の増大による耐力上昇が頭打ちになること、開口際あばら筋および開口部あばら筋を十分に配筋することにより、開口部せ

ん断破壊が防止されて開口のない一般部におけるせん断破壊に移行することが解析的に確認できた。

## 参考文献

- 1) 石岡拓, 清水隆, 和泉信之: 大径貫通孔を有する梁部材の開口補強工法の開発, コンクリート工学年次論文集, pp.205-210, Vol.34, No.2, 2012
- 2) 三村麻里, 麻生直木, 毛井崇博, 宮内靖昌, 高津比呂人: 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.207-210, 2007
- 3) 基礎梁開口補強研究会: エコ基礎梁工法, 建築技術 8 月号, p.95, 2011
- 4) 平田延明, 中岡章郎: 大貫通孔を有する鉄筋コンクリート造梁のせん断性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.241-242, 2012
- 5) 有馬義人, 高森直樹, 佐々木聡, 森貴久, 長濱温子: 三角形せん断補強筋を用いた基礎梁の大径貫通孔補強方法(その 1), (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.451-454, 2015
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.355-358, 2010
- 7) 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, pp.169-175, 2010
- 8) 小李克己: RC 造大開孔梁のせん断終局強度に対する開口周囲補強筋の役割について(その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.111-112, 2016
- 9) K. Kobayashi: Shear Capacity Evaluation of RC Footing Beams with Large Web-opening for Maintenance Based on Stress Transfer Mechanism, 16WCEE, 2017
- 10) 石岡拓, 清水隆, 和泉信之: K 型開口補強筋を有する有孔基礎梁における孔周囲のせん断耐力, 構造工学論文集, Vol.63B, pp.455-462, 2017
- 11) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, seminar on post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999
- 12) Al-Mahaidi, R. S. H. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members. Tech. Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1979.
- 13) CEB/FIP Model Code 1990, First Draft, Bulletin d'Information, No.195, CEB, Mar. , 1990