

高強度開孔補強金物を用いた大開孔 RC 造基礎梁の実験的研究

Experimental Study on Reinforced Concrete Foundation Beams with a Large Web Opening using High Strength Opening Reinforcement Hardware

村上 秀夫*¹ 森 誠司*¹
Hideo Murakami Seiji Mori

要旨

鉄筋コンクリート造の梁に貫通孔を設ける場合の開孔径は、梁せいの 1/3 以下とすることが望ましいとされている。このため、人通孔を有する鉄筋コンクリート造の基礎梁の梁せいは、構造計算から定まる断面寸法ではなく、人通孔の孔径から決まる場合があり、土工事や躯体工事のコストアップに繋がっている。本研究では、高強度の既製開孔補強金物を用いて開孔部を補強し、開孔径が梁せいの 1/2.5 となる人通孔梁試験体の曲げせん断実験を実施した。その結果、開孔径が梁せいに対して大きくなる場合の開孔部せん断終局強度は、開孔上下部分を閉鎖形の開孔上下補強筋で補強し、開孔補強金物の降伏強度をコンクリート強度の関数で制限を与えることによって、実験値が修正広沢式を用いて安全側に評価できることを示した。

キーワード：鉄筋コンクリート 基礎梁 貫通孔 開孔補強金物 せん断強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の基礎梁には、設備配管の保守・点検を行うために人通孔が設けられる。一般に、人通孔の孔径は 600mm～750mm とされており、容易に人や機材が通れるような大きさにする必要がある。一方、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説では、梁に貫通孔を設ける場合の開孔径は、梁せいの 1/3 以下とすることが望ましいとしている¹⁾。このため、人通孔を有する基礎梁の梁せいは、構造計算から定まる断面寸法ではなく、人通孔の孔径から決まる場合があり、現行の規定を緩和することができれば、コストダウンや環境負荷の軽減に結びつけることができる。

既報²⁾の研究では、開孔部の補強に普通強度の既製開孔補強金物を用いた実験を行った。そして、梁せいに対する開孔径の割合を 1/2.5 (=0.4) と大きくした場合の開孔部のせん断性能について報告した。

本研究では、高強度の既製開孔補強金物を用いて、開孔部補強筋比や開孔位置などが開孔部のせん断性能に及ぼす影響について調べた。なお、本報告は、2023 年度日本建築学会大会で発表した論文^{3)～5)}を加筆修正したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

図 1 に開孔部の補強方法を示す。開孔部の補強は、孔際補強筋、開孔補強金物、開孔上下補強筋および水平補強筋

から構成される。孔際補強筋は、開孔周囲の補強に有効な範囲(C 区間)に配置するあばら筋であり、開孔部の左右に密に配筋される。開孔補強金物は、高強度鉄筋を用いた梁貫通孔せん断補強材であり、加工形状は、内リング筋を四角形、外リング筋を八角形とした閉鎖形の形状である。開孔上下補強筋は、梁主筋を拘束して座屈を抑えることを目的としたものであり、その加工形状は閉鎖形とした。水平補強筋は、開孔上下補強筋を配筋するために開孔部の上下に 2 本ずつ配置される鉄筋であり、水平補強筋の長さは、開孔径の 3 倍とした。

表 1 に試験体一覧、表 2 に開孔位置と開孔径、図 2 に試験体の特性(No. 11～No. 16)を示す。試験体は、縮尺 1/2～

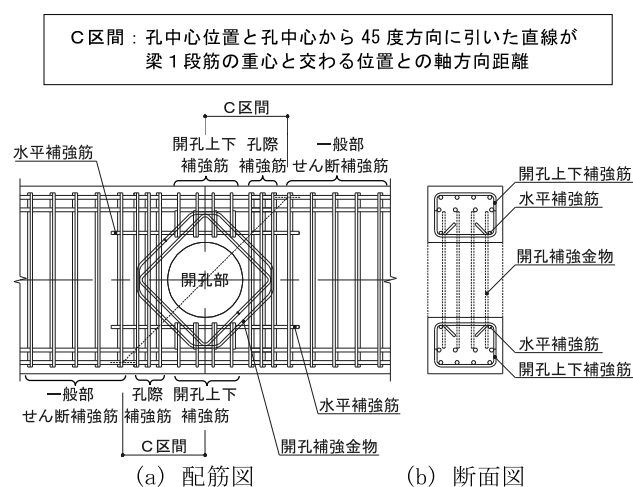


図 1 開孔部の補強方法

*1 技術研究所

表 1 試験体一覧

試験体	梁部材 寸法 $b \times D \times L_o$ mm	コンクリートの 目標強度 F_c N/mm^2	梁主筋	一般部	開孔部（大開孔）						小開孔	
				せん断 補強筋	開孔 位置	開孔径 H_o mm	開孔部補強筋			開孔上下 補強筋	開孔径 H_1 mm	
							孔際 補強筋	開孔 補強金物	p_{wo} = $p_{ws}+p_{wd}$			
No.10	$300 \times 750 \times 2250$ ($L_o/D=3.0$)	30	上: 8-D16 下: 8-D16 $\sigma_y=980$ 級 [熱処理] ($p_t=0.78\%$)	4-D10 [SD295] @90 ($p_w=1.06\%$)	部材 中央	250 ($H_o=D/3$)	6-D10 [SD295] ($p_{ws}=0.43\%$)	S10 2枚 [KSS785-K] ($p_{wd}=0.41\%$)	0.84%	2-D10 2組 ($p_{oe}=0.38\%$)	なし	
No.11						6-D10 [SD295] ($p_{ws}=0.43\%$)	S10 2枚 [KSS785-K] ($p_{wd}=0.41\%$)	0.84%	2-D10 2組 ($p_{oe}=0.32\%$)	なし		
No.12							S10 3枚 [KSS785-K] ($p_{wd}=0.61\%$)	1.04%				
No.13							S10 2枚 [KSS785-K] ($p_{wd}=0.41\%$)	1.06%				
No.14						9-D10 [SD295] ($p_{ws}=0.65\%$)	S10 3枚 [KSS785-K] 0.61%	1.26%			2-D10 4組 ($p_{oe}=0.63\%$)	
No.15											部材 端部	2-D10 2組 ($p_{oe}=0.32\%$)
No.16												125 (D/6)
No.17						部材 端部	2-D10 2組 ($p_{oe}=0.32\%$)					
No.18							部材 端部	2-D10 2組 ($p_{oe}=0.32\%$)				
No.19								125 (D/6)				

(備考) 水平補強筋
試験体No.10($H_o=250\text{mm}$)／2-D13(SD295)、長さ: $2.5 \times H_o=625\text{mm}$
試験体No.11～19($H_o=300\text{mm}$)／2-D13(SD295)、長さ: $3.0 \times H_o=900\text{mm}$

小開孔の補強 (試験体No.19)
孔際補強筋／3-D10(2組)、 $p_{ws}=0.43\%$
開孔補強金物／S10(3枚)、 $p_{wd}=0.61\%$

■引張鉄筋比
 $p_t = \frac{a_t}{b \cdot d}$

■孔際補強筋比
 $p_{ws} = \frac{a_s}{b \cdot C}$

■開孔補強金物比
 $p_{wd} = \frac{n_d \cdot a_d \cdot \sqrt{2}}{b \cdot C}$

■開孔部補強筋比
 $p_{wo} = p_{ws} + p_{wd}$

■開孔上下補強筋比
 $p_{oe} = \frac{a_o}{b \cdot H_o}$

a_t : 引張鉄筋の断面積(mm²)
 a_s : C区間に配筋される孔際補強筋の断面積(mm²)
 a_d : C区間に対応する開孔補強金物の計算用断面積(mm²)
 n_d : 開孔補強金物の枚数
 a_o : 開孔上下補強筋の断面積(mm²)
 b : 梁幅(mm)
 d : 梁の有効せい(mm)
 C : C区間の長さ(mm)
 H_o : 開孔径(mm)

表 2 開孔位置と開孔径

試験体	開孔位置と開孔径	備考
No.10		開孔径の影響 試験体No.11に対して計画 孔芯: 部材中央 孔径: $H_o=D/3=250\text{mm}$
No.11 ～ No.16		開孔部補強筋比、コンクリート強度の影響 基準試験体は、No.14 孔芯: 部材中央 孔径: $H_o=D/2.5=300\text{mm}$
No.17		開孔上下補強筋比の影響 試験体No.14に対して計画
No.18		開孔位置の影響 試験体No.14に対して計画 孔縁: 梁端から0.9D=675mm 孔径: $H_o=D/2.5=300\text{mm}$
No.19		隣接する小開孔の影響 試験体No.18に対して計画 小開孔径: $H1=D/6=125\text{mm}$ 開孔間隔: $1.5(H_o+H1)=637.5\text{mm}$

1/2.5 の鉄筋コンクリート造基礎梁であり、梁の部材寸法 ($b \times D \times L_o$) は $300\text{mm} \times 750\text{mm} \times 2250\text{mm}$ (梁の内法スパン比: $L_o/D=3.0$)、梁の主筋には上下ともに 8-D16 (引張鉄筋比: $p_t=0.78\%$) の鉄筋を配置した。実験因子は、コンクリート強度 [Fc21、Fc30、Fc42]、開孔径 [250mm、300mm]、開孔部補強筋比 (= 孔際補強筋比 [0.43%、0.65%] + 開孔補強金物比 [0.41%、0.61%])、開孔上下補強筋比 [0.32%、0.63%]、開孔位置 [部材中央、部材端部 (孔縁は梁端から $0.9 \cdot D$)] および開孔に隣接する小開孔の有無 (小開孔径は $125\text{mm} [=D/6]$ 、開

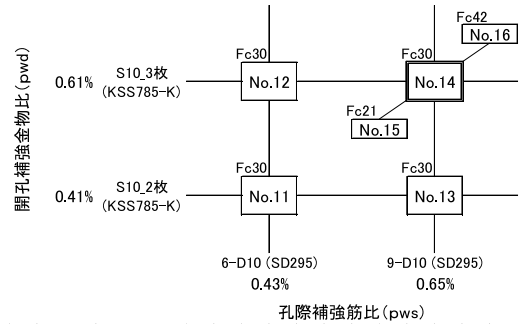


図 2 試験体の特性 (No. 11～No. 16)

孔間隔は両開孔径の平均値の 3 倍) とし、合計 10 体の試験体を計画した。いずれの試験体も、開孔部のせん断破壊が先行するように計画し、梁曲げ降伏を避けるために、梁主筋には降伏強度が 980N/mm^2 級の熱処理品を用いた。

図 3 に開孔部配筋図を示す。開孔補強金物は、あばら筋の内側に 2 枚以上配置した。孔際補強筋は、1 組目と 2 組目、3 組目と 4 組目をそれぞれ束ね鉄筋にして組み立てた。開孔上下補強筋は、この間隔を梁主筋径の 8 倍以下⁶⁾ となるようにした。

2.2 使用材料

表 3 に鉄筋引張試験結果、表 4 にコンクリート試験結果を示す。コンクリートの粗骨材は、最大寸法が 13mm の 6 号碎石を使用した。

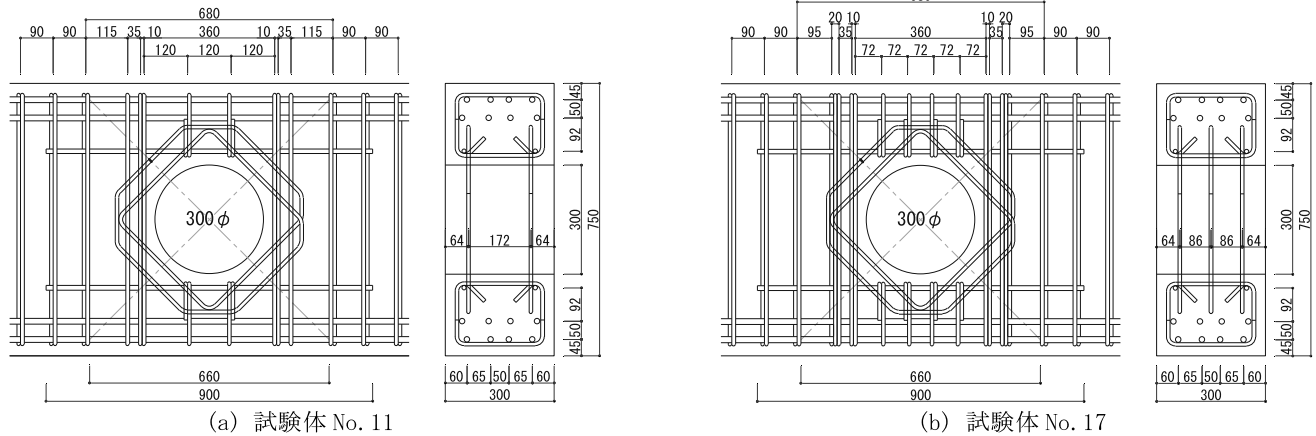


図3 開孔部配筋図

表3 鉄筋引張試験結果

使用箇所	種別	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	伸び率 %
梁主筋	D16 [980級]	1036	1137	5.9
水平補強筋	D13 [SD295]	345	504	23.0
せん断補強筋 孔際補強筋 開孔上下補強筋	D10 [SD295]	375	522	18.9
開孔補強金物	S10 [KSS785-K]	904	1140	9.0

(備考) D16とS10の降伏強度は、0.2%オフセット値とした

表4 コンクリート試験結果

試験体	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²	ポアソン比
No.10	37.1	2.47	30.3	0.209
No.11	37.9	2.42	28.7	0.188
No.12	36.2	2.33	28.0	0.184
No.13	37.8	2.25	28.7	0.196
No.14	38.2	2.64	26.5	0.179
No.15	27.2	2.03	25.9	0.191
No.16	51.4	3.29	30.9	0.202
No.17	38.9	2.77	27.7	0.189
No.18	36.9	2.57	26.5	0.207
No.19	37.7	2.74	27.4	0.212

2.3 載荷方法

図4に加力装置図を示す。加力は、建研式加力装置を用い、試験体に逆対称モーメントが生じるようにした。加力実験は、試験体内法スパン中央の開孔位置高さの主ジャッキ高さに125mmのずれがあるため、試験体頂部の副ジャッキに補正せん断力を作用させ、試験体上下スタブが常に平行となるようにした。

図5に加力スケジュールを示す。加力の制御は、部材角(R)による制御とした正負交番の繰り返し漸増載荷を行い、 $R=1/800, 1/600, 1/400, 1/200\text{rad}$ で各2回、 $R=1/133\text{rad}$ で1回繰り返した後、正載荷方向での押し切り加力とした。

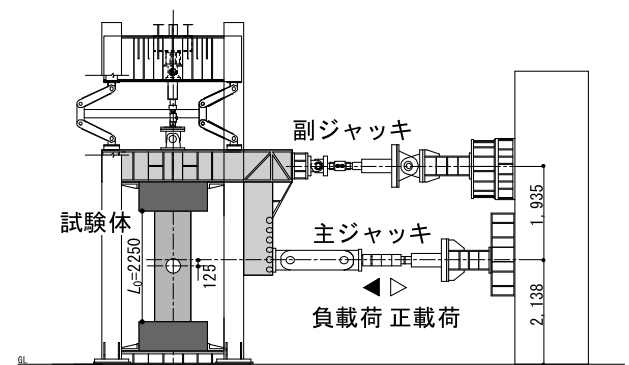


図4 加力装置図

3. 実験結果

3.1 破壊経過

図6にせん断力(Q)－部材角(R)関係、写真1に最終破壊状況を示す。全試験体とも、 $R=1/800\text{rad}$ の繰り返し載荷において梁端部に曲げひび割れが発生した後、開孔中心から45度方向のひび割れが発生した。 $R=1/400\text{rad}$ の繰り返し載荷では、一般部にせん断ひび割れと開孔外縁に孔際接線ひび割れが発生し、以後の繰り返し載荷において、孔際接線ひび割れの拡大・伸張が顕著となり、開孔部がせん断破壊

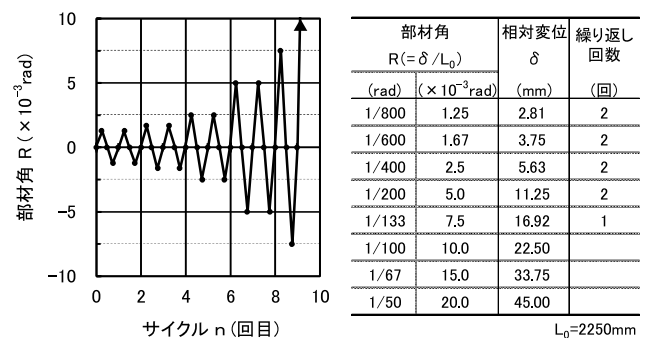


図5 加力スケジュール

壊した。なお、試験体 No. 13 は、 $R=-1/133\text{rad}$ の加力で開孔部がせん断破壊し、最大耐力は直前の $R=+1/133\text{rad}$ におけるピーク値となった。試験体 No. 16 では、加力装置の関係上、最大耐力を確認する最終の押し切り加力は、負荷荷方向で実施した。梁端近くに開孔部を設けた試験体 No. 18 と試験体 No. 19 は、部材中央に開孔部がある試験体と同様、孔接線ひび割れの拡大・伸展が顕著となり、最終的には開孔部がせん断破壊した。ここで、小開孔が隣接する試験体 No. 19 では、小開孔には大きな損傷は生じなかった。

最大耐力時における各種補強筋のひずみレベルについて、孔際補強筋(SD295)と開孔上下補強筋(SD295)は、降伏もしくは降伏の 80%以上であった。開孔補強金物(KSS785-K)においては、降伏の 30~50%であった。なお、水平補強筋(SD295)は、降伏の 30%程度であり、最大耐力後に降伏した試験体が見られた。

3.2 各種実験因子の影響

図 7 に正載荷時におけるせん断力(Q)一部材角(R)関係の包絡線の比較を示す。ここで、試験体 No. 16 は、最大耐力を確認した負荷荷側の包絡線を反転して示した。

3.2.1 開孔径の影響

開孔径(H_0)の大きさだけが異なる場合(No. 10 と No. 11)、包絡線の剛性と最大耐力は、開孔径が大きくなると低くなる傾向が見られた。

3.2.2 開孔部補強筋比の影響

開孔部補強筋比($p_{wo}=p_{ws}+p_{wd}$)だけが異なる場合(No. 11 ~No. 14)、 $R=+1/133\text{rad}$ までは包絡線の剛性に大差は見られなかった。

3.2.3 コンクリート強度の影響

コンクリートの圧縮強度(σ_B)だけが異なる場合(No. 14 ~No. 16)、包絡線の剛性と最大耐力は、コンクリート強度の増大に伴い高くなる傾向が見られた。

3.2.4 開孔上下補強筋比の影響

開孔上下補強筋比(p_{oe})だけが異なる場合(No. 14 と No. 17)、包絡線の剛性や最大耐力には大差がなく、開孔上下補強筋比を 2 倍にしたことによる効果は見られなかった。

3.2.5 開孔位置の影響

開孔の位置だけが異なる場合(No. 14 と No. 18)、包絡線の剛性や最大耐力には大差がなく、大開孔の位置が梁端に近いことが構造的な弱点になっていないことが確認された。

3.2.6 開孔に隣接する小開孔の影響

開孔に隣接する小開孔の有無を比較した場合(No. 18 と No. 19)、水平方向の開孔間距離を両開孔径の平均値の 3 倍とすることで、大開孔の挙動に対する小開孔の存在が影響しないことが確認された。

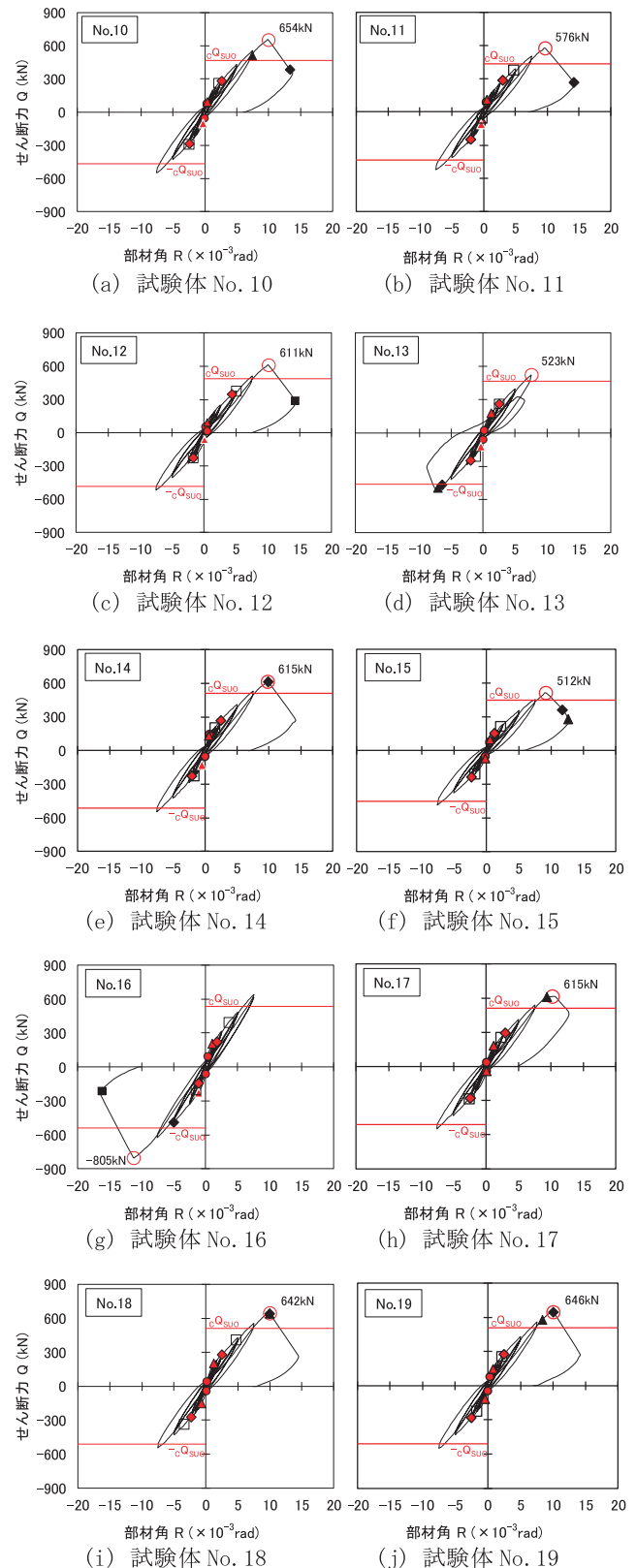


図 6 せん断力(Q)一部材角(R)関係

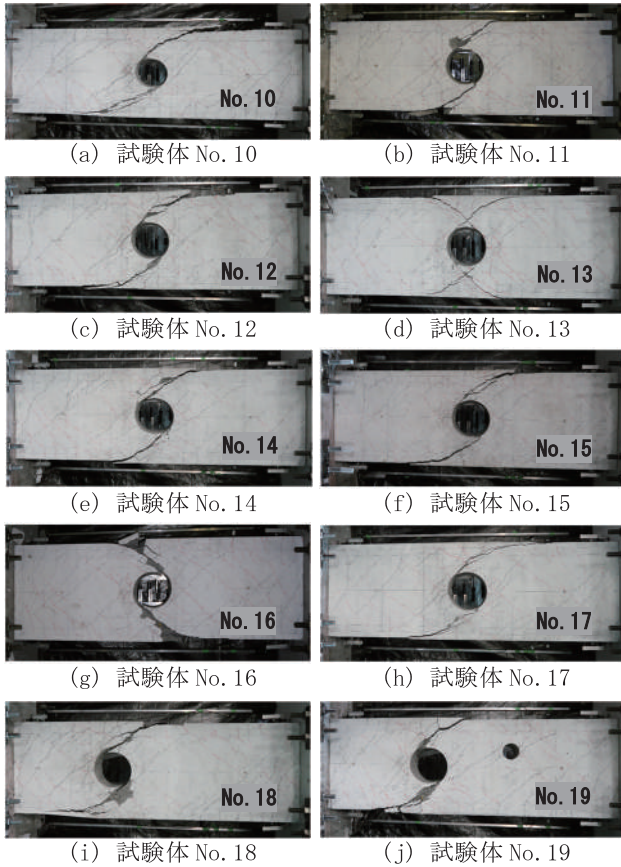


写真1 最終破壊状況

4. 開孔部のせん断終局強度

表5に開孔部せん断終局強度の計算値と実験値、図8に実験値と計算値の比較を示す。ここで、計算値は、(1)式に示す修正広沢式^{1),7)}を用いて算出し、開孔補強金物の降伏強度はコンクリート強度の関数でもって制限を与えた⁸⁾。

$$cQ_{suo} = \left\{ \frac{0.092 \cdot k_u \cdot k_p \cdot (\sigma_B + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_{ws} \cdot s\sigma_y + p_{wd} \cdot d\sigma_y} \right\} b \cdot j \quad (1)$$

k_u : 断面寸法による補正係数 (=0.72)

k_p : 引張鉄筋比による補正係数 (=2.36 · $p_t^{0.23}$)

b : 梁幅 (mm)、 j : 応力中心間距離 (= (7/8) · d)

D : 梁せい (mm)、 d : 梁の有効せい (mm)

H : 開孔径 (mm)、 $M/(Q \cdot d)$: せん断スパン比

p_{ws} : 孔際補強筋比、 p_{wd} : 開孔補強金物比

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

$s\sigma_y$: 孔際補強筋の降伏強度 (N/mm²)

$d\sigma_y$: 開孔補強金物の降伏強度 (N/mm²)

ただし、 $d\sigma_y = \min [785, \max (20 \cdot \sigma_B, 40 \cdot \sigma_B - 540)]$

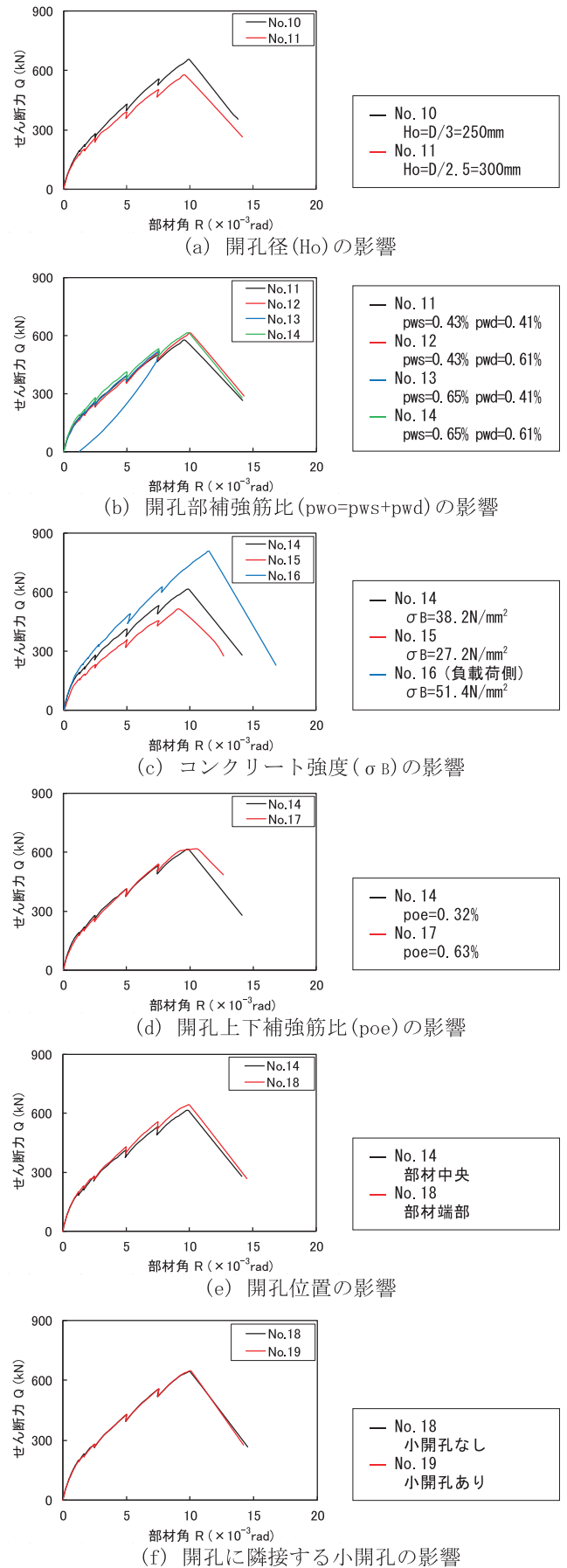


図7 包絡線の比較

表 5 開孔部せん断終局強度の計算値と実験値

試験体	開孔部せん断終局強度			比較できる実験因子							
	計算値	実験値	実験値 ／計算値	開孔径 Ho mm	開孔部補強筋			コンクリート 圧縮強度 σ_B N/mm ²	開孔 上下 補強筋 poe %	開孔 位置	小開孔 の有無
	cQsuo	eQmax	eQmax ／cQsuo		孔隙 補強筋 pws %	開孔 補強金物 pwd %	pwo =pws+pwd %				
	kN	kN									
No.10	465	654	1.41	250	—	—	—	—	—	—	—
No.11	434	576	1.33	300	0.43	0.41	0.84	—	—	—	—
No.12	485	611	1.26	—	0.43	0.61	1.04	—	—	—	—
No.13	461	523	1.13	—	0.65	0.41	1.06	—	—	—	—
No.14	511	615	1.20	—	0.65	0.61	1.26	38.2	0.32	中央	—
No.15	447	512	1.15	—	—	—	—	27.2	—	—	—
No.16	535	805	1.50	—	—	—	—	51.4	—	—	—
No.17	511	615	1.20	—	—	—	—	—	0.63	—	—
No.18	509	642	1.26	—	—	—	—	—	—	端部	無
No.19	509	646	1.27	—	—	—	—	—	—	—	有

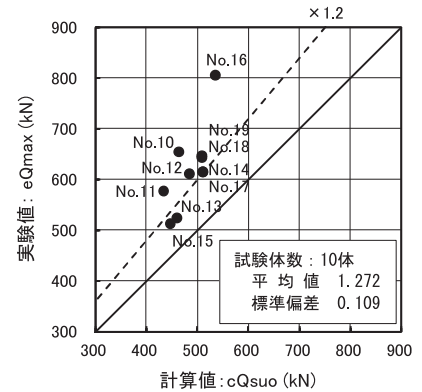


図 8 実験値と計算値の比較

図 8 より実験値は、修正広沢式による計算値を大きく上回り、計算値に対する実験値の比率は 1.13～1.50(平均値: 1.272、標準偏差: 0.109)となった。これより、梁せいに対する開孔径の割合を 1/2.5 とした場合の開孔部せん断終局強度は、既往の研究⁹⁾にも示されているように、開孔上下部分に閉鎖形の開孔上下補強筋を配置し、開孔補強金物の降伏強度をコンクリート強度の関数で制限を与えることにより、実験値は (1) 式に示す修正広沢式によって安全側に評価することができた。

5. まとめ

高強度の既製開孔補強金物を用いて開孔部を補強した人通孔梁試験体の曲げせん断実験を実施し、開孔径が梁せいの 1/2.5 (=0.4) となる場合のせん断性能について調べた。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 開孔径が大きくなると、最大耐力の実験値は低くなる傾向が見られた。
- (2) コンクリートの圧縮強度が高くなると、最大耐力の実験値は高くなる傾向が見られた。
- (3) 開孔上下補強筋比を 2 倍にしても、包絡線の剛性や最大耐力の実験値には大差が見られなかった。
- (4) 大開孔の位置が梁端に近いことが構造的な弱点になっていないことが確認された。
- (5) 大開孔の挙動に対する小開孔の存在は、水平方向の開孔間距離を両開孔径の平均値の 3 倍とすることで、影響しないことが確認された。
- (6) 開孔部のせん断終局強度は、開孔上下部分に閉鎖形の開孔上下補強筋を配置し、開孔補強金物の降伏強度をコンクリート強度の関数で制限を与えることにより、実験値は修正広沢式によって安全側に評価することができた。

謝辞

本研究は、民間企業 5 社(株式会社鴻池組、鹿島建設株式会社、清水建設株式会社、株式会社銭高組、コーリョー建販株式会社)の共同によって行われました。また、加力実験に際しては、大阪工業大学馬場研究室の皆様にご協力をいただきました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp. 393-402、2018. 12
- 2) 村上秀夫、森 誠司：開孔補強金物を用いた大開孔 RC 造基礎梁の実験的研究、鴻池組技術研究報告 2018、pp. 69-74、2018. 7
- 3) 岡安隆史、村上秀夫、金本清臣、五十嵐治人、三原竜生、馬場 望：高強度開孔補強金物を用いた大開孔 RC 基礎梁のせん断性状に関する実験的研究 (その 1 実験概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 IV、pp. 243-244、2023. 9
- 4) 五十嵐治人、岡安隆史、山野辺宏治、木村 匠、森 誠司、三原竜生：高強度開孔補強金物を用いた大開孔 RC 基礎梁のせん断性状に関する実験的研究 (その 2 開孔径と補強筋比の影響)、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 IV、pp. 245-246、2023. 9
- 5) 村上秀夫、岡安隆史、岡田浩一、諸星玲子、相羽均修、三原竜生：高強度開孔補強金物を用いた大開孔 RC 基礎梁のせん断性状に関する実験的研究 (その 3 コンクリート強度と孔位置の影響)、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 IV、pp. 247-248、2023. 9
- 6) 広沢雅也：鉄筋コンクリート構造物のねばり、コンクリートジャーナル Vol. 12 No. 7、pp. 83-87、1974. 7
- 7) 広沢雅也、清水 泰：鉄筋コンクリート造有孔ばりのせん断強度とじん性 (その 1) 有孔ばりについての既往の研究成果、建築技術 No. 331、pp. 93-101、1979. 3
- 8) コーリョー建販：ダイヤレン NS 技術マニュアル、2022. 3
- 9) 村上秀夫、岩倉知行、小杉雅男、太田 勤、杉山智昭、松崎育弘：高強度開孔補強金物を用いた大口径 RC 基礎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 構造 IV、pp. 227-228、2007. 8