

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 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（以下、RC 造）の梁に貫通孔を設ける場合の孔径は、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 RC 造基礎梁の梁せいは、構造計算から定まる断面寸法ではなく、人通孔の孔径から定まる場合があり、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、既製の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 1/3 を超え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強度は、開孔上下部分を閉鎖形の開孔上下補強筋で補強することにより、修正広沢式による開孔部のせん断強度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、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、既製の開孔補強金物を用い、梁せいに対する開孔径の割合を大きくした場合の開孔部のせん断性状について検討した。そして、開孔径の大きさや開孔周囲の補強筋が開孔部のせん断強度に及ぼす影響について調べた。なお、本報告は、2017 年度日本建築学会大会で発表した論文^{2), 3), 4)}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、梁貫通孔せん断補強材であり、加工形状は、内リング筋が四角形、外リング筋が八角形となっている。水平補強筋は、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 2.5 倍とした。開孔上下補強筋は、最外縁主筋と水平補強筋との間を補強するために配筋し、その加工形状は閉鎖形とした。

表 1 に試験体一覧、図 2 に開孔部配筋図を示す。試験体は、縮尺 1/2 の基礎梁であり、梁断面寸法（ $b \times D$ ）は 300mm×750mm、梁内法スパン長さ（ L_0 ）は 2250mm（内法スパン比： $L_0/D=3.0$ ）とした。開孔は部材中央部に 1 個設け、開孔補強金物に使用した鉄筋の種類は SD345 である。

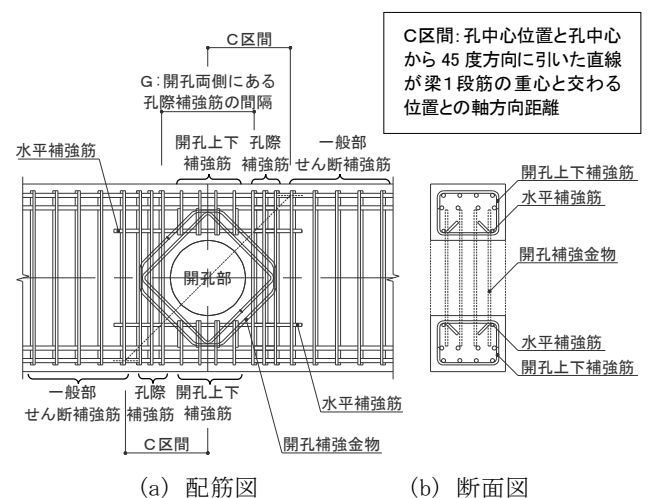


図 1 開孔部の補強方法

*1 技術研究所

表 1 試験体一覧

試験体	梁部材寸法 b×D×L ₀ mm	コンクリートの目標強度 F _c N/mm ²	梁主筋	開孔部								
				一般部せん断補強筋	開孔径 H mm	孔際補強筋	開孔補強金物	開孔部補強筋比 ρ _{wo}	開孔上下補強筋			
No.1	300 × 750 × 2250 (L ₀ /D=3.0)	36	上:8-D16 下:8-D16 σ _v =980級 [熱処理] (ρ _v =0.78%)	4-D10@90 [SD345] (ρ _w =1.06%)	250 (H=D/3.0)	4-D10 3組 [SD345] (ρ _{ws} =0.86%)	D10 4枚 [SD345] (ρ _{wd} =0.82%)	1.68%	2-D10 2組 [SD345] (ρ _o =0.30%)			
No.2					300 (H=D/2.5)				2-D10 2組 [SD345] (ρ _o =0.26%)			
No.3									2-D10 4組 [SD345] (ρ _o =0.51%)			
No.4		21			36				350 (H=D/2.14)	D10 2枚 [SD345] (ρ _{wd} =0.41%)	1.27%	2-D10 5組 [SD345] (ρ _o =0.57%)
No.5		36								350 (H=D/2.14)		
No.8												

■ 孔際補強筋比:

$$\rho_{ws} = \frac{a_s}{b \cdot C}$$

■ 開孔補強金物比:

$$\rho_{wd} = \frac{n_d \cdot a_d \cdot \sqrt{2}}{b \cdot C}$$

■ 開孔部補強筋比:

$$\rho_w = \rho_{ws} + \rho_{wd}$$

■ 開孔上下補強筋比:

$$\rho_o = \frac{a_o}{b \cdot G}$$

a_s: C区間に配筋される孔際補強筋の全断面積
 a_d: C区間に対応する開孔補強金物の計算用断面積
 n_d: 開孔補強金物の枚数
 a_o: 開孔上下補強筋の全断面積
 b: 梁幅、C: C区間の長さ
 G: 開孔両側にある孔際補強筋の間隔

共通事項: 水平補強筋 上下共:2-D13[SD345]、水平補強筋の長さ 2.5・H

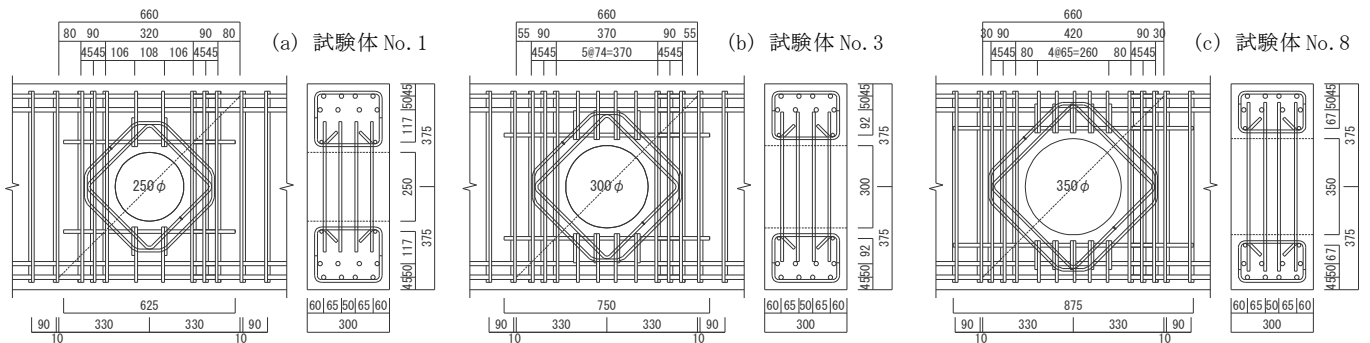


図 2 開孔部配筋図

実験因子は、コンクリート強度 (F_c21, F_c36)、開孔径 (250mm, 300mm, 350mm)、開孔補強金物の枚数 (2 枚, 4 枚)、開孔上下補強筋比 (0.28%, 0.54%) とし、合計 6 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、梁主筋には降伏点強度が 980N/mm²級の熱処理品を用いた。

2.2 使用材料

表 2 に鉄筋引張試験結果、表 3 にコンクリート試験結果を示す。コンクリートは、実験時のコンクリート圧縮強度が目標強度となるように調合計画し、粗骨材の最大寸法は 13mm の 6 号碎石を使用した。

2.3 載荷方法

図 3 に加力装置図を示す。加力は、建研方式の加力装置を用いて行った。鉛直方向に取り付けられた 2 台のアクチュエータは、実験中、上下スタブが常に平行かつ軸力が試

表 2 鉄筋引張試験結果

種類	降伏点 N/mm ²	降伏ひずみ μ	ヤング係数 kN/mm ²	
梁主筋	D16	987	5208	190
	D16*	1058	5687	186
水平補強筋	D13	370	2010	184
せん断補強筋 孔際補強筋 開孔補強金物 開孔上下補強筋	D10	375	2090	179

D16の降伏点は、0.2%オフセット耐力
 ※印の鉄筋は、試験体No.8に使用

表 3 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
No.1	37.8	2.65
No.2	38.6	2.66
No.3	40.1	2.71
No.4	23.7	2.21
No.5	36.0	2.60
No.8	33.7	2.41

験体に作用しないように制御し、試験体内法スパン中央位置に取り付けられた水平力用のアクチュエータによりせん断力を与えた。

図4に加力スケジュールを示す。加力の制御は、部材角 ($R = \delta / L_0$, δ : 上下スタブ間の相対変位, L_0 : 梁の内法スパン長さ) 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。

3. 実験結果

3.1 破壊経過

図5にせん断力-部材角関係、写真1に最終破壊状況を示す。全試験体とも、 $R=1/800\text{rad}$ の繰り返しで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。そして、 $R=1/400\text{rad}$ の繰り返しで梁端部に曲げせん断ひび割れが、 $R=1/200\text{rad}$ の繰り返しで孔接線ひび割れが発生した。その後は、45度方向ひび割れと孔接線ひび割れが伸展・拡大し、開孔部がせん断破壊した。なお、開孔径の最も大きな試験体 No.8 ($H=350\text{mm}$) では、梁端部に発生する曲げひび割れが観察される前に、開孔中心から45度方向のひび割れとは角度の異なるひび割れが開孔周囲に発生し、開孔径の大きさによる影響が見られた。

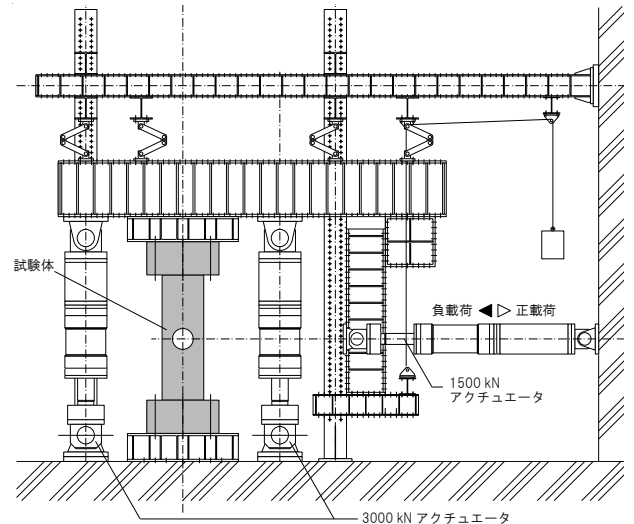


図3 加力装置図

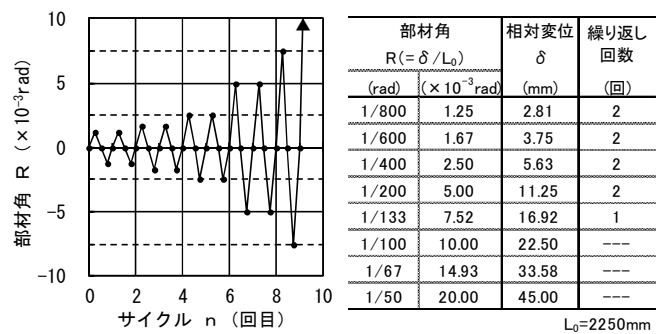
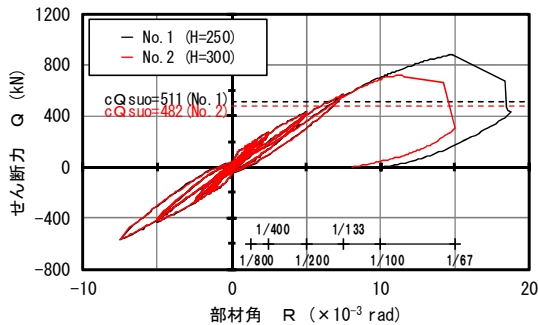
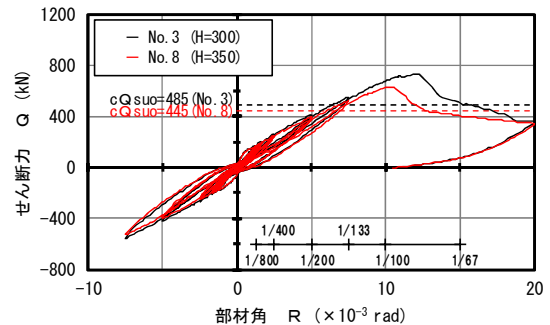


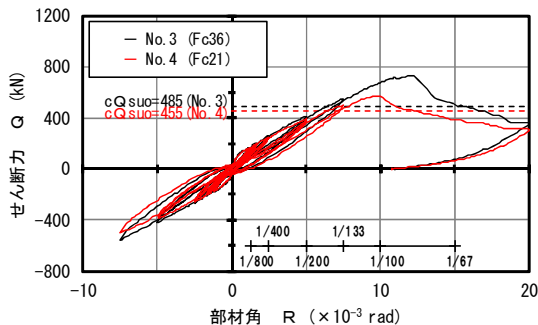
図4 加力スケジュール



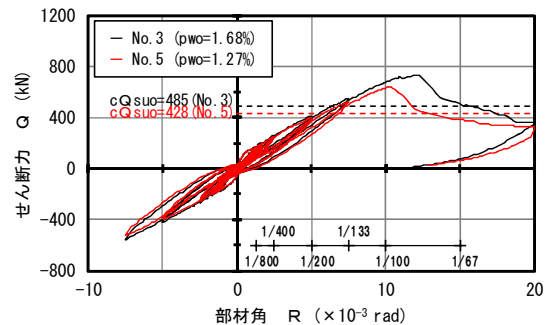
(a) 開孔径の違い (No. 1 と No. 2)



(b) 開孔径の違い (No. 3 と No. 8)



(c) コンクリート強度の違い (No. 3 と No. 4)



(d) 開孔部補強筋比の違い (No. 3 と No. 5)

図5 せん断力(Q)-部材角(R)関係



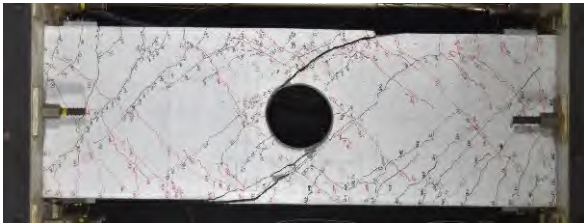
(a) 試験体 No. 1 (H=250、Fc36、pwo=1.68%、po=0.30%)



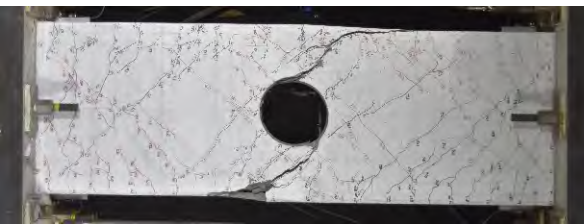
(b) 試験体 No. 2 (H=300、Fc36、pwo=1.68%、po=0.26%)



(c) 試験体 No. 3 (H=300、Fc36、pwo=1.68%、po=0.51%)



(d) 試験体 No. 4 (H=300、Fc21、pwo=1.68%、po=0.51%)



(e) 試験体 No. 5 (H=300、Fc36、pwo=1.27%、po=0.51%)



(f) 試験体 No. 8 (H=350、Fc36、pwo=1.68%、po=0.57%)

写真1 最終破壊状況

3.2 主筋および補強筋の挙動

開孔径が最も小さい試験体 No. 1 の最大耐力は、略算式による梁の曲げ終局強度の計算値を越え、危険断面位置における主筋の最大引張ひずみは 8800 μ (材料試験結果による応力-ひずみ関係から得られる応力度は 1010N/mm²) 程度であった。一方、他の試験体の最大引張ひずみについては、4800 μ 程度であり、ほぼ弾性的な挙動を示した。

開孔補強金物のひずみは、試験体 No. 5 と試験体 No. 8 は R=1/200rad の繰り返し時に、試験体 No. 2 と試験体 No. 3 では R=1/133rad の繰り返し時に、試験体 No. 1 と試験体 No. 4 は最大耐力発現前に降伏ひずみに達した。孔際補強筋のひずみは、試験体 No. 4 を除く試験体が、最大耐力発現前に降伏ひずみに達した。開孔上下補強筋のひずみについては、試験体 No. 1～試験体 No. 3 が、最大耐力発現前に降伏ひずみに達した。

4. 開孔部のせん断強度

4.1 実験値と計算値の比較

図 6 に最大耐力の実験値と開孔部せん断強度の計算値との比較を示す。ここで、計算値は、修正広沢式 (式(1)) を用いて算出した。

$$cQ_{suo} = \left\{ \frac{0.053p_t^{0.23}(\sigma_B + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_{ws} \cdot s\sigma_y + p_{wd} \cdot d\sigma_y} \right\} b \cdot j \quad (1)$$

b : 梁幅 (mm), D : 梁せい (mm), d : 有効せい (mm)
 j : 応力中心間距離 (mm), $M/(Q \cdot d)$: せん断スパン比
 p_t : 引張鉄筋比 (%), H : 開孔径(mm)
 p_{ws} : 孔際補強筋比, p_{wd} : 開孔補強金物の補強筋比
 σ_B : コンクリート圧縮強度 (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)

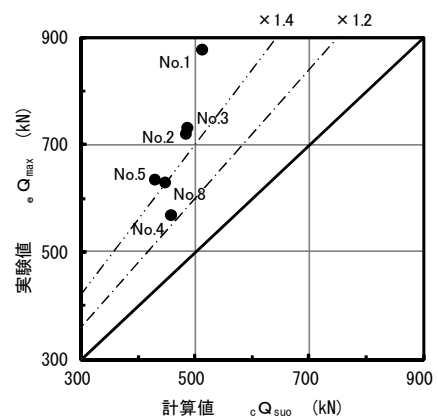


図6 実験値と計算値との比較

同図より、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 1.25~1.72 となった。ここで、修正広沢式には、開孔上下補強筋による効果が考慮されていない。このため、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強度は、開孔上下部分を閉鎖形の開孔上下補強筋で補強することにより、実験結果を安全側に評価できたと考えられる。

4.2 各種実験因子の影響

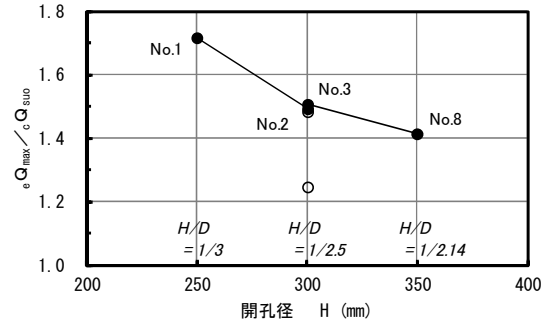
写真 2 に $R=1/133rad$ 時（各試験体のせん断力が、 cQ_{suo} を超えた時の変形角）における開孔周囲のひび割れ状況、表 4 に修正広沢式（式(1)）から求まる開孔部せん断強度の計算値と最大耐力の実験値を示す。また、図 7 には計算値に対する実験値の比率（ eQ_{max}/cQ_{suo} ）と各種実験因子（開孔径、コンクリート強度、開孔部補強筋比および開孔上下補強筋比）との関係を示す。ここで、図 7 中に示した実線は、直接比較できる試験体を結んでいる。

4.2.1 開孔径の影響

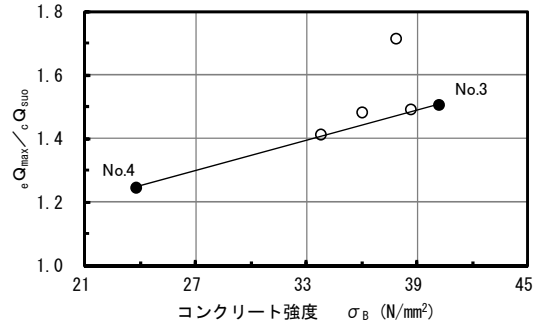
開孔径（H）の大きさだけが異なる場合（No.1 と No.2, No.3 と No.8）、 $R=1/133rad$ 時における開孔周囲のひび割れ状況は、開孔径が大きくなると開孔周囲のひび割れが多く発生している。また、最大耐力の実験値は、開孔径が大きくなると小さくなる傾向が見られた。修正広沢式から求まる計算値に対する実験値の比率については、試験体 No.1（ $H=250mm$ ）が 1.72、試験体 No.2（ $H=300mm$ ）が 1.49、試験体 No.3（ $H=300mm$ ）が 1.51、試験体 No.8（ $H=350mm$ ）が 1.42 となり、梁せいに対する開孔径の割合（H/D）が高くなると小さくなる傾向が認められる。

表 4 実験値と開孔部せん断強度の計算値

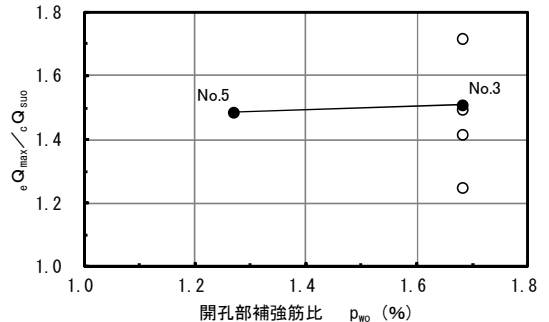
試験体	計算値 cQ_{suo} kN	実験値 eQ_{max} kN	実験値/計算値 eQ_{max}/cQ_{suo}	比較できる実験因子			
				H mm	F_c N/mm ²	pwo %	po %
No.1	511	878	1.72	250			
No.2	482	720	1.49	300			0.26
No.3	485	732	1.51	300	36	1.68	0.51
No.4	455	569	1.25		21		
No.5	428	636	1.49			1.27	
No.8	445	631	1.42	350			



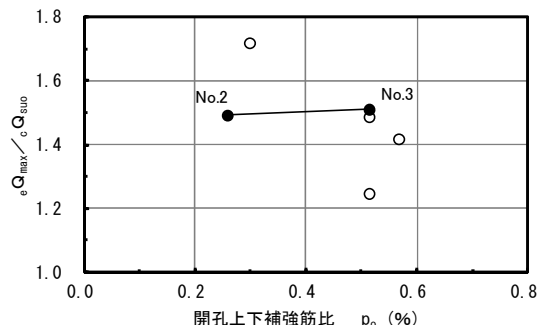
(a) 開孔径



(b) コンクリート強度

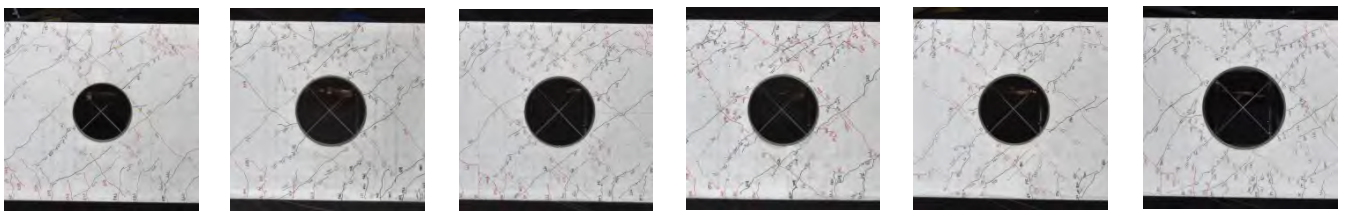


(c) 開孔部補強筋比



(d) 開孔上下補強筋比

図 7 eQ_{max}/cQ_{suo} と各種実験因子との関係



(a) 試験体 No.1 (b) 試験体 No.2 (c) 試験体 No.3 (d) 試験体 No.4 (e) 試験体 No.5 (f) 試験体 No.8

写真 2 開孔周囲のひび割れ状況（ $R=1/133rad$ 時）

4.2.2 コンクリート強度の影響

コンクリート強度 (σ_B) だけが異なる場合 (No. 3 と No. 4)、 $R=1/133\text{rad}$ 時における開孔周囲のひび割れ状況は、コンクリート強度が低くなると開孔周囲のひび割れが多く発生している。また、最大耐力の実験値は、コンクリート強度が低くなると小さくなる傾向が見られた。修正広沢式から求まる計算値に対する実験値の比率については、試験体 No. 3 ($\sigma_B=40.1\text{N/mm}^2$) が 1.51、試験体 No. 4 ($\sigma_B=23.7\text{N/mm}^2$) が 1.25 となり、コンクリート強度が低くなると小さくなる傾向が認められる。

4.2.3 開孔部補強筋比の影響

開孔部補強筋比 (p_{wo}) だけが異なる場合 (No. 3 と No. 5)、 $R=1/133\text{rad}$ 時における開孔周囲のひび割れ状況には、顕著な差は見られなかった。最大耐力の実験値は、開孔部補強筋比が低くなると小さくなる傾向が見られるが、修正広沢式から求まる計算値に対する実験値の比率については、試験体 No. 3 ($p_{wo}=1.68\%$) が 1.51、試験体 No. 5 ($p_{wo}=1.27\%$) が 1.49 となり、開孔部補強筋比の相違による影響は認められない。

4.2.4 開孔上下補強筋比の影響

開孔上下補強筋比 (p_o) だけが異なる場合 (No. 2 と No. 3)、 $R=1/133\text{rad}$ 時における開孔周囲のひび割れ状況には、顕著な差は見られなかった。また、最大耐力の実験値については大差が見られず、開孔上下補強筋比の相違による影響は見られなかった。なお、修正広沢式から求まる計算値に対する実験値の比率は、試験体 No. 2 ($p_o=0.26\%$) が 1.49、試験体 No. 3 ($p_o=0.51\%$) が 1.51 となった。

5. まとめ

開孔径が梁せいの $1/3$ を超える場合のせん断性能を調べるために、既製の開孔補強金物を用いて開孔部を補強した人通孔梁の曲げせん断実験を実施した。そして、開孔上下部分を閉鎖形の開孔上下補強筋で補強した場合、開孔径の大きさや開孔周囲の補強筋が開孔部のせん断強度に及ぼす影響について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) $R=1/133\text{rad}$ 時 (各試験体のせん断力が、 cQ_{suo} を超えた時の変形角) における開孔周囲のひび割れ状況は、

開孔径の大きさやコンクリート強度の相違によって、差が見られた。

- (2) 開孔部のせん断強度は、開孔径の大きさ、コンクリート強度、開孔部補強筋比の影響を受ける。
- (3) 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強度は、閉鎖形の開孔上下補強筋を配置することにより、修正広沢式による開孔部のせん断強度式を用いて安全側に評価することができる。
- (4) 梁せいに対する開孔径の割合が高くなると、修正広沢式から求まる計算値に対する実験値の比率は、小さくなる傾向が見られた。
- (5) コンクリート強度が低くなると、修正広沢式から求まる計算値に対する実験値の比率は、小さくなる傾向が見られた。
- (6) 開孔上下補強筋比の相違が最大耐力に及ぼす影響については、大差は見られなかった。

謝辞

本研究は、民間企業 5 社 (鴻池組、清水建設、錢高組、東急建設、コーリョー建販) の共同によって行われました。研究に当たってご尽力戴きました各社委員の皆様に深く感謝いたします。

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. 354-355、2010. 2
- 2) 村上秀夫、木村 匠、金本清臣、五十嵐治人、白都 滋、岩倉知行：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. 25-26、2017. 8
- 3) 白都 滋、佐藤良介、山野辺宏治、森 誠司、五十嵐治人、岩倉知行：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 実験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV、pp. 27-28、2017. 8
- 4) 五十嵐治人、白都 滋、村上秀夫、小澤潤治、山野辺宏治、岩倉知行：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 実験結果の考察)、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV、pp. 29-30、2017. 8
- 5) コーリョー建販：ダイヤレン技術マニュアル、1997. 4