

論文 大孔径貫通孔を有する RC 基礎梁の開孔補強に関する実験的研究

松浦 恒久*1・平野 慶一*2・村田 鉄雄*3・古谷 祐希*4

要旨：開孔直径が梁せいの 1/2 程度の有孔梁の開孔補強工法の開発を行った。開孔直径，開孔補強筋の種類，開孔数，開孔位置の違いによる有孔梁試験体 6 体について加力実験を行い，構造性能およびせん断耐力について検討した。開孔直径が梁せいの 1/3 を超える大開孔においても斜め補強筋または斜め補強筋と貫通孔補強金物を併用した試験体のせん断耐力は既往のせん断耐力式で評価できること，大開孔に平均開孔直径の 2.5 倍の間隔で近接する小開孔が大開孔のせん断耐力に及ぼす影響は小さいこと，および大開孔の開孔位置がせん断耐力に及ぼす影響は小さいことを実験により示した。

キーワード：鉄筋コンクリート構造，有孔梁，開孔補強，せん断強度

1. はじめに

基礎梁には，人通用あるいは設備用として円形の貫通孔（以下，開孔）が設けられることが多い。その中で人通孔は一般には梁スパン中央付近に設けられ，直径は 600mm 程度の大開孔となる。開孔の直径は慣用的に梁せいの 1/3 以下に制限されているために，一般的な直径 600mm の開孔を設ける場合，設計から決定される梁せいに関わらず開孔直径の 3 倍の 1800mm 以上の梁せいを設定しなければならないのが実状である。

基礎梁せいを小さくすることにより，型枠・コンクリートの材料費の低減に加えて基礎の掘削土量の低減にも繋がり，コストダウンが期待できる。加えて，建設時の CO₂ 排出削減にもつなげることができると，考えられることより，開孔直径 H が梁せい D の 1/2 以下の開孔を設けられること，および斜め補強筋と貫通孔補強金物の併用が可能な補強工法の開発を行った。

本工法における開孔補強方法の概要を図-1 に示す。開孔を開孔の左右に 4 本 1 組で 45° 方向に配筋した斜め補強筋，閉鎖型の貫通孔補強金物，軸方向補強筋，開孔際あばら筋および開孔の上下部分に配筋された開孔部あばら筋により補強している。なお，C 区間は開孔周囲の

補強筋の有効な範囲で，開孔中心と開孔中心から 45° 方向に引いた直線が引張鉄筋重心と交わる位置との距離である。

本研究では，開孔直径 H が梁せい D の 1/2 以下となる有孔梁試験体を用いて，補強方法，開孔直径，開孔数および開孔位置を要因とした加力実験により，補強工法の妥当性およびせん断強度における開孔直径，開孔間隔，開孔位置の影響を確認することを目的とした。

2. 実験計画

2.1 試験体概要

試験体の一覧を表-1 に，試験体形状，配筋詳細を図-2 に示す。試験体は開孔直径，開孔補強筋の種類，開孔数および開孔位置の違いによる全 6 体とした。梁の断面および梁内法長さ L は全試験体共通で梁幅 B=350mm，梁せい D=750mm，内法長さ L=2250mm で，せん断スパン比は 1.5 とした。開孔直径 H は No.21~No.23 では 311mm (= D/2.4)，No.24~No.26 では 375mm (= D/2.0) とした。試験体の縮尺は 1/2~1/1.6 である。梁主筋は D22 (SD490)，あばら筋，開孔部あばら筋，斜め補強筋

表-1 試験体一覧

試験体	21	22	23	24	25	26	
主筋	7-D22(SD490) pt=1.12(%)						
一般部 肋筋	D6@65 pw=0.278(%)						
開孔	位置	中央					両端部
	直径(mm)	311	311	311	375	375+156	375
	個数	1	1	1	1	1+2	2
開孔際あばら筋	配筋	2-D6 x 4	2-D6 x 4	2-D6 x 4	2-D6 x 3	2-D6 x 3	2-D6 x 3
斜め補強筋	pws(%)	0.229	0.229	0.229	0.172	0.172	0.172
	配筋	5-D10	3-D10	2-D6	5-D10	5-D10	5-D10
貫通孔補強金物	pwd(%)	0.456	0.274	0.081	0.456	0.456	0.456
	配筋	—	2-D10	2-D10x 2	—	—	—
補強筋量	pwc(%)	—	0.183	0.365	—	—	—
	置換率	—	0.40	0.82	—	—	—
補強筋量	∑ pw(%)	0.686	0.686	0.675	0.628	0.628	0.628

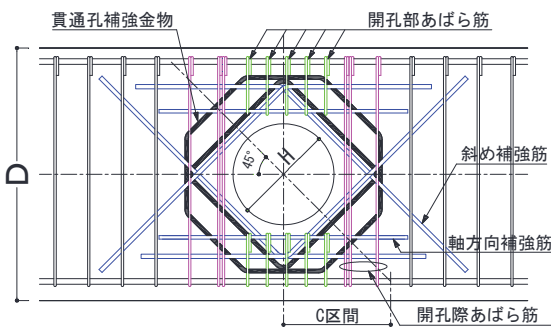


図-1 補強方法の概要

*1 (株) 安藤・間 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 西武建設 (株) 設計部

*3 東亜建設工業 (株) 設計部

*4 (株) 安藤・間 技術研究所 修士 (工学)

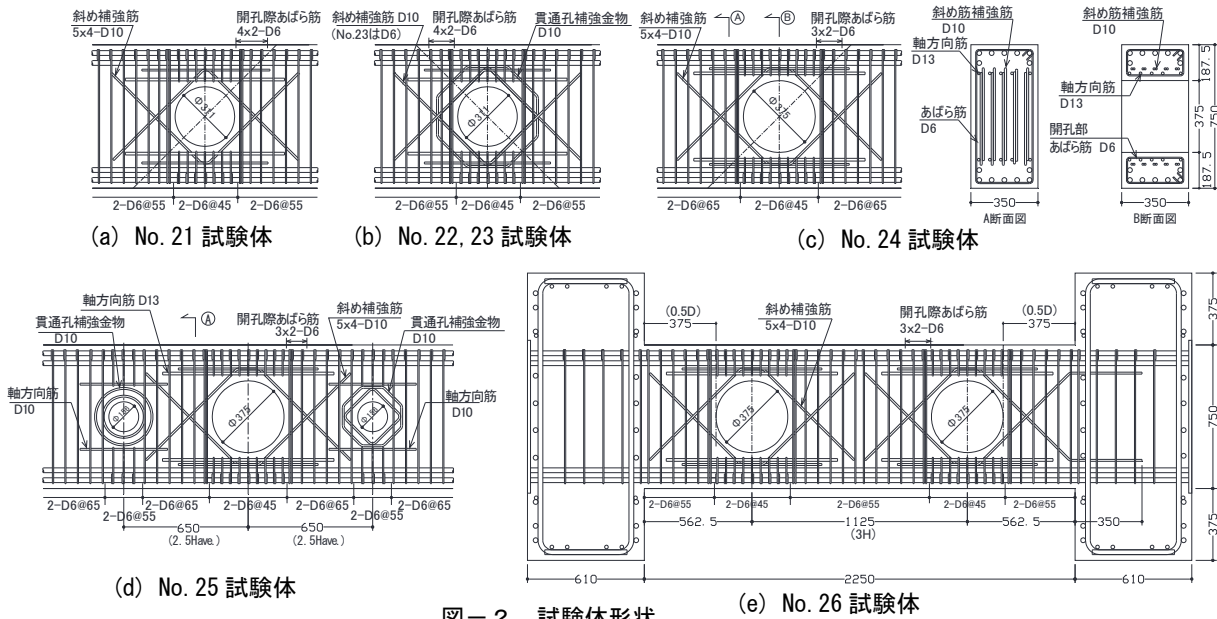


図-2 試験体形状

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート			(b) 鉄筋					
試験体	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($10^4 N/mm^2$)	呼び名	使用部位	規格	ヤング係数 ($10^5 N/mm^2$)	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
No.21	36.7	2.95	D22	梁主筋	SD490	1.76	517	692
No.22	39.7	3.01	D13	軸方向筋	SD295A	1.84	342	487
No.23	37.6	2.81	D10	斜め筋補強筋・軸補強筋	SD295A	1.97	378	521
No.24	38.6	3.08	D10	多角形補強金物	SD295A	1.81	377	525
No.25	41.3	2.76	D10	円形補強金物	SD295A	1.83	355	514
No.26	38.9	2.78	D6	あばら筋	SD295A	1.98	454※	568

※：0.2%オフセット耐力

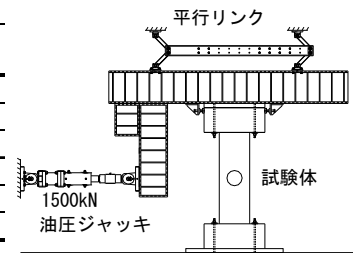


図-3 加力装置概要

および貫通孔補強金物はSD295Aを使用した。

No.21は開孔直径がD/2.4の開孔を斜め補強筋のみで補強し、せん断破壊先行を想定した標準試験体である。No.22～No.23は開孔直径がD/2.4の開孔を有し、No.21と開孔部の補強筋量は同一であるが、開孔部の補強に斜め補強筋と貫通孔補強金物を併用した試験体で、開孔際あばら筋を除く開孔部の補強筋量に対する貫通孔補強金物の鉄筋量の比（以下、置換率）を0.4、0.82とした。

No.24～No.26は開孔直径がD/2の開孔を有し、開孔部補強筋量は同一である。No.24はスパン中央部に単開孔を有している。No.25は中央部に開孔直径がD/2の開孔とその左右に開孔直径がD/5の小開孔を平均開孔直径の2.5倍の距離に配置している。なお、日本建築学会「RC規準」¹⁾では開孔間隔は平均開孔直径の3倍以上とすることが推奨されている。小開孔の補強には左右で異なる形状の貫通孔補強金物を使用した。左側は円形を二重にした円形補強金物で、右側は多角形を二重にした多角形補強金物を用いた。No.26は梁端部から0.5Dの位置に開孔直径がD/2の開孔を両端に有している。なお、開孔間隔は平均開孔直径の3倍である。

表-2にコンクリートと鉄筋材料の試験結果を示す。コンクリートは最大寸法13mmの粗骨材を用いた普通

コンクリートとした。

2.2 加力方法

荷重は、図-3に示す建研式加力装置により逆対称モーメントが作用するように梁にせん断力を加えて正負交番繰り返して荷重を行った。荷重の制御はスタブ間の相対変位 δ を内法スパンLで除した部材角 $R = \delta/L$ で行った。荷重履歴は、部材角 $R = \pm 1/1000\text{rad}$ で1回、 $R = 2.5, 5, 7.5, 10 \times 10^{-3}\text{rad}$ で各2回繰り返した後に $R = \pm 15, \pm 20, +30 \times 10^{-3}\text{rad}$ の荷重を基本とし、試験体の破壊状況により、繰り返し回数を変更した。計測項目は、荷重、変位、および主要位置での鉄筋ひずみとした。

3. 実験結果

3.1 破壊状況と荷重変形関係

図-4に各試験体のせん断力-部材角関係を、図-5に最大耐力時のひび割れ状況を示す。

開孔直径HがD/2.4の試験体No.21～No.23では、加力初期において梁端部の曲げひび割れが発生し、次に開孔の横に45°方向のせん断ひび割れが発生した。その後開孔の上下から接線方向にせん断ひび割れが発生し始め、経過とともに進展した。

開孔部の補強筋の降伏状況についてみると、No.21は

斜め補強筋、開孔際あばら筋の順で降伏ひずみに達した。正側加力時には開孔部あばら筋は降伏には至らなかったが、負側加力では最大耐力直前に開孔部あばら筋が降伏ひずみに達した。貫通孔補強金物を併用した No.22, No.23 では貫通孔補強金物が降伏ひずみに達し、その後斜め補強筋、開孔際あばら筋が降伏ひずみに達した。

いずれの試験体も $R=1/100\text{rad}$ 程度で最大耐力を示し、その後、開孔上下部および開孔横の接線方向のせん断ひび割れの拡幅により耐力が大きく低下した。

開孔直径 H が $D/2$ の試験体 No.24~No.26 では、いずれの試験体も加力初期において梁端部の曲げひび割れが発生し、その後開孔横に 45° 方向のせん断ひび割れが発生した。更に加力を進めると No.24 は開孔上下に接線方向のせん断ひび割れが発生し始め、経過とともに拡幅した。その後、斜め補強筋、開孔部あばら筋の順で引張降伏ひずみに達し、 $R=1/200\text{rad}$ で最大耐力となった。

No.25 は $R=1/500\text{rad}$ 程度で中央の大開孔の上下部およ

び左右の小開孔に接線方向のせん断ひび割れが発生し、荷重の増加とともに大開孔ならびに左右の小開孔の周辺にひび割れが増加した。ひび割れ幅の拡大は中央の大開孔周辺に集中していた。その後、大開孔を補強する斜め補強筋、開孔際あばら筋、開孔部あばら筋の順で引張降伏ひずみに達し、 $R=6.41/1000\text{rad}$ で最大耐力となった。

材端部に開孔を有する No.26 は、 $R=1/400\text{rad}$ 程度で開孔の上下から接線方向にせん断ひび割れが発生し始め、経過とともに進展した。その後、斜め補強筋および開孔部あばら筋が引張降伏ひずみに達し、 $R=6.1/1000\text{rad}$ で最大耐力となった。

いずれの試験体も最大耐力以降は開孔の上下部から接線方向に生じたせん断ひび割れが急激に拡幅し、耐力が低下した。最終的には開孔上下部でせん断破壊した。なお、No.25 において、小開孔周辺の損傷は軽微で貫通孔補強金物は降伏には至っていない。また、No.26 は右側の開孔に損傷が集中し、せん断破壊した。

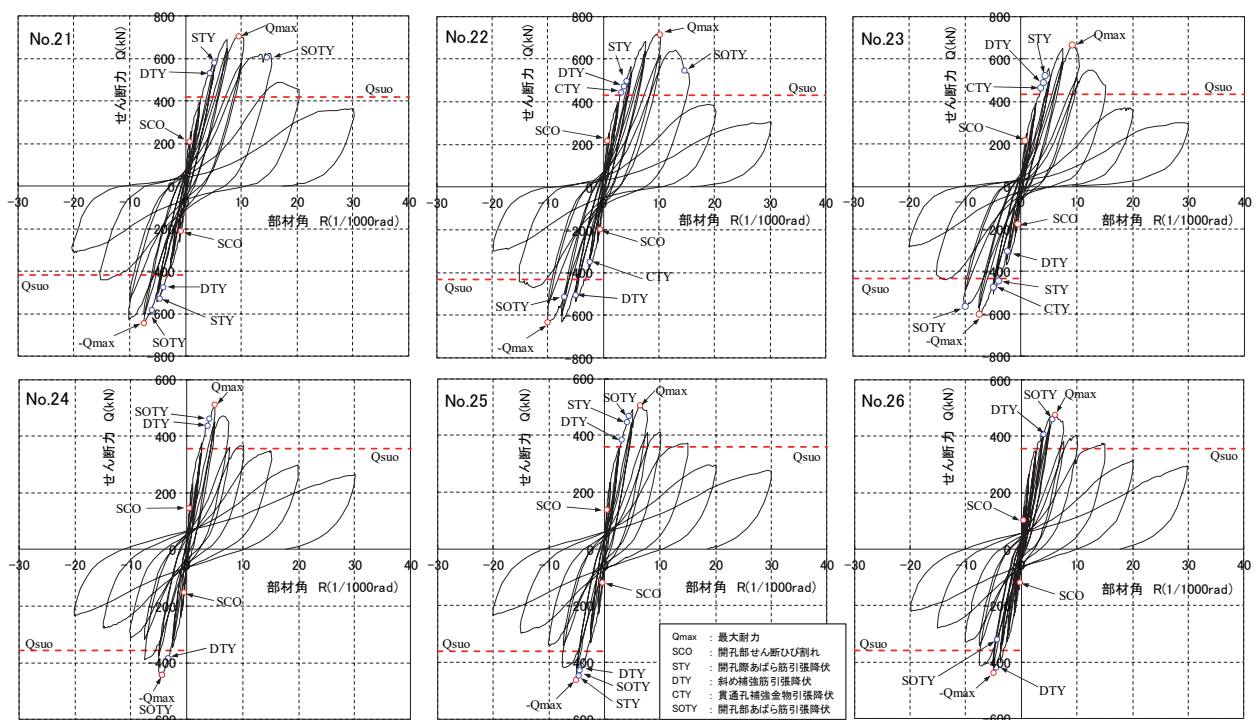


図-4 荷重変形関係

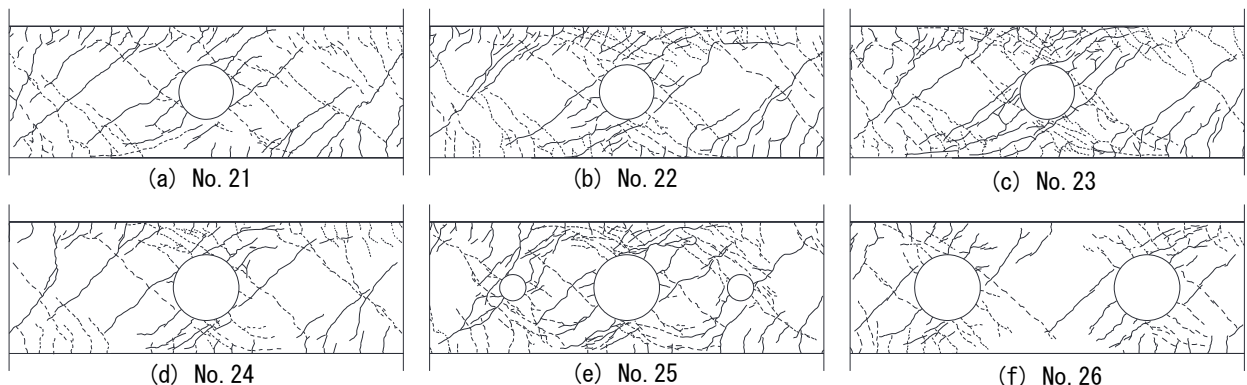


図-5 最大耐力時のひび割れ発生状況 (正側加力: 実線, 負側加力: 破線)

3.2 包絡線の比較

図-6 にせん断力-部材角関係の正加力時の包絡線の比較を示す。図-6 (a)により、開孔直径が D/2.4 において補強形式の違いによる最大耐力時の部材角に差はなく概ね $R=1/100\text{rad}$ であった。貫通孔補強金物の補強筋量を増した No.23 は、斜め補強筋のみの No.21 よりも最大耐力は小さくなった。最大荷重に達した後の耐力低下は、貫通孔補強金物を併用した試験体の方が、斜め補強筋のみの試験体に比べて、若干、耐力低下の度合いが大きい。

図-6 (b) より、単開孔の No.24 と複数開孔の No.25 を比較すると、最大耐力および最大耐力時の部材角はほぼ一致しており、大開孔($H=D/2$)に小開孔($H=D/5$)を平均直径の 2.5 倍以上離して配置する場合には、大開孔のせん断耐力に及ぼす近接する小開孔の影響は小さいと考えられる。中央単開孔の No.24 と両材端開孔の No.26 とで開孔位置の影響について検討を行う。最大耐力は若干 No.26 が小さくなっているが、最大耐力時の部材角はほぼ一致している。梁端から $0.5D$ (375)mm の位置に大開孔を配置した場合でもせん断耐力に及ぼす影響は小さく、中央部の単開孔と同等のせん断強度を有すると考えられる。加えて大開孔を開孔直径の 3 倍の開孔間隔で配置した場合においては、大開孔のせん断耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.3 開孔部せん断変形角

図-7 に開孔部付近のせん断変形角を示す。開孔部付近のせん断変形角は図中に示した対角方向の軸変形を用いて次式により求めた。

$$\gamma = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \times \frac{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}}{L_1 \times L_2} \quad (1)$$

最大耐力に達した部材角は開孔直径が D/2.4 の試験体 No.21~No.23 は $R=1/100\text{rad}$ 程度で、開孔直径が D/2 の試験体 No.24~No.26 は $R=6/1000\text{rad}$ 程度である。図-7 によると最大耐力以降にせん断変形角 γ が増加しており、開孔上下部の斜めひび割れが拡幅し、損傷が著しくなったこと一致している。

No.21~No.23 のせん断変形角を比較するとほぼ一致しており、補強量が等しい場合は補強形式による差はないと推測される。同様に No.24~No.26 のせん断変形角を比較するとほぼ一致しており、大開孔($H=D/2$)に小開孔($H=D/5$)を平均直径の 2.5 倍以上離して配置する場合の小開孔の影響および開孔位置の影響は観察されなかった。

3.4 開孔部補強筋のひずみ

(1) 貫通孔補強金物

図-8 に開孔直径が D/2.4 の試験体 No.21~No.23 における斜め補強筋と貫通孔補強金物のひずみとせん断力の関係を示す。斜め補強筋、貫通孔補強金物の降伏ひずみ

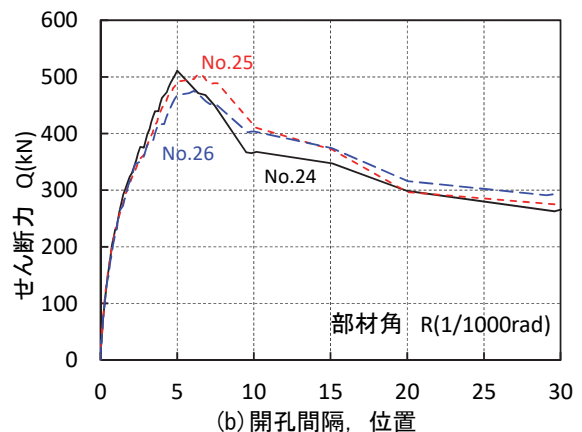
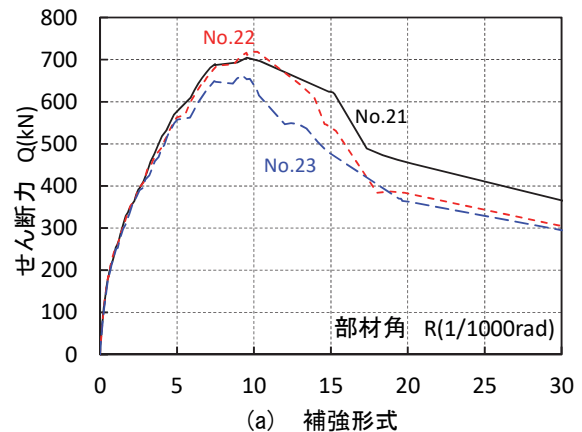


図-6 包絡線の比較

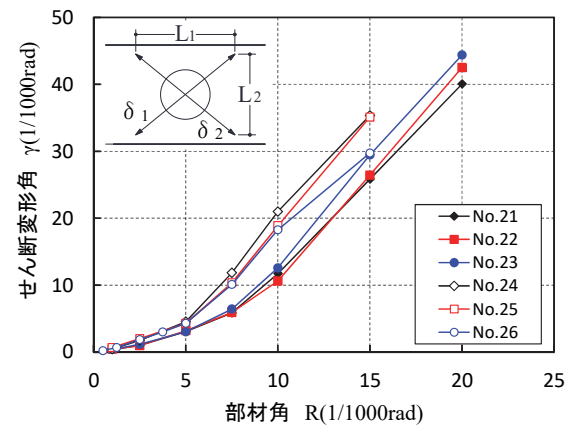


図-7 せん断変形角

は、それぞれ 1939μ 、 2087μ である。

斜め補強筋はいずれの試験体も最大耐力に達する前に引張降伏していることが確認できる。貫通孔補強金物は、貫通孔補強金物の置換率が小さい No.22 は最大耐力付近で降伏ひずみに達し、その後、ひずみは増加している。一方、置換率が大きい No.23 では No.22 と同様に最大耐力付近で降伏ひずみに達しているものの、貫通孔補強金物を構成する 2 本の鉄筋のうち 1 本はその後のひずみの増加は見られなかった。

(2) 開孔部あばら筋

図-9 に開孔直径が D/2 の試験体 No.24~No.26 にお

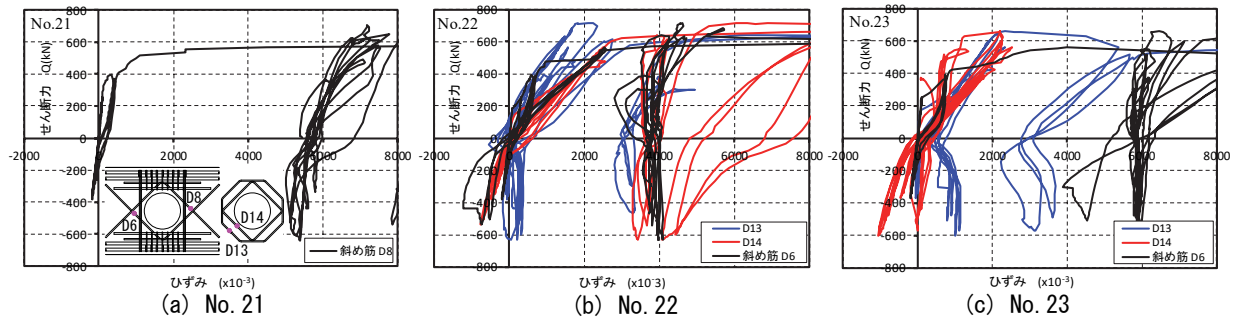


図-8 斜め補強筋、貫通孔補強金物ひずみ

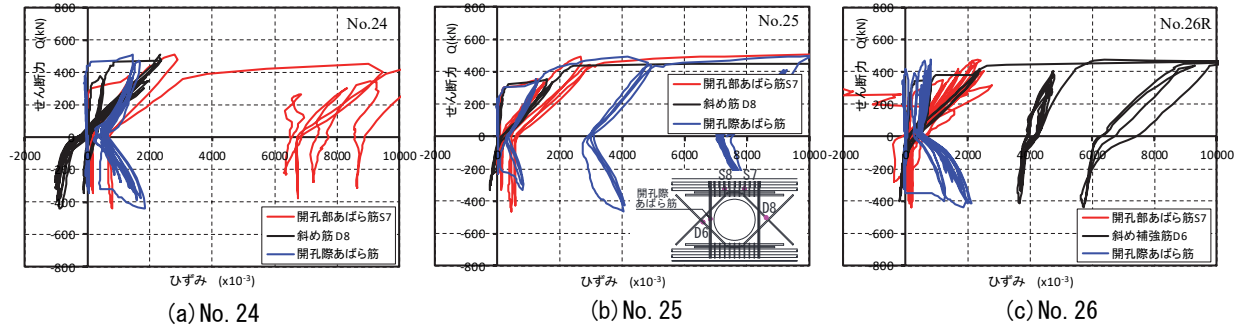


図-9 斜め補強筋、開孔部あばら筋および開孔際あばら筋ひずみ

る斜め補強筋、開孔部あばら筋および開孔際あばら筋のひずみとせん断力の関係を示す。なお、開孔を2つ有するNo.26については、破壊した側の補強筋のひずみを示す。斜め補強筋の降伏ひずみは $\epsilon_y=1939\mu$ 、開孔部あばら筋、開孔際あばら筋の降伏ひずみは $\epsilon_y=2291\mu$ である。

中央部に開孔を有するNo.24, No.25は、斜め補強筋、開孔部あばら筋とも同様なひずみの増加を示し、最大耐力付近で降伏ひずみに達していることが確認できる。両材端に開孔を有するNo.26についても斜め補強筋、開孔部あばら筋とも同様なひずみの増加を示し、最大耐力付近で斜め補強筋は降伏していることが確認できる。開孔部あばら筋も最大耐力時には降伏ひずみを超えるひずみが生じていることが認できる。その後、正側加力では開孔部あばら筋のひずみの増加は少ないが、負側加力では測定点S8のひずみが大きく増加した。

開孔際あばら筋についてみると単開孔とみなせるNo.24, No.26については降伏には至っていないが、大開孔に近接する開孔を有するNo.25については降伏している。

4. せん断強度の評価

提案工法による開孔のせん断強度を「RC規準」¹⁾の式(2)で評価する。式(2)は開孔直径比による低減係数を乗じたコンクリート強度に関する項と開孔周囲の補強筋強度の項との累加したものである。

しかしながら、開孔直径が $H=D/2$ のNo.24~No.26の試験体の破壊状況は、斜め補強筋と開孔部あばら筋は降伏したが、単開孔とみなせる試験体の開孔際あばら筋は

降伏には至っていない。このような破壊状況では式(2)の適用は難しいと考えられる。このため、開孔直径が $D/2$ の試験体については破壊状況に即した強度算定式を検討する必要がある。日本建築学会「靱性保証型設計指針」²⁾では、水平補強筋と孔の上下部を開孔部あばら筋により補強を行った場合のトラス機構によるせん断強度式として式(4)が記載されている。また、開孔の両脇のあばら筋よりも外側に定着した場合の斜め補強筋については、引張側ではその性能を十分に発揮できると考えて、斜め補強筋の効果を式(5)として評価し、式(4)に累加できるとしておりせん断強度は式(6)となる。

$$Q_{suo} = \left[\frac{0.092 \cdot k_u \cdot k_p (\sigma_B + 18)}{M/Qd + 0.12} (1 - 1.61 \frac{H}{D}) \right] B_j \quad (2)$$

$$+ 0.85 \sqrt{p_s \cdot s} \sigma_y$$

$$p_s \cdot s \sigma_y = p_{ws} \cdot w_s \sigma_y + p_{wd} \cdot w_d \sigma_y + p_{wc} \cdot w_c \sigma_y \quad (3)$$

$$V_1 = 2b_e \cdot j_{es} \cdot p_{wo} \cdot w_o \sigma_y \cdot \cot \phi_s \quad (4)$$

$$V_2 = A_x \cdot w_d \sigma_{wy} \cdot \sin \theta_x \quad (5)$$

$$V_u = V_1 + V_2 \quad (6)$$

ここで、 p_{ws} 、 p_{wd} 、 p_{wc} 、 p_{wo} 、 $w_s \sigma_y$ 、 $w_d \sigma_y$ 、 $w_c \sigma_y$ 、 $w_o \sigma_y$ はそれぞれ図-1中のC区間内の開孔際あばら筋比、斜め補強筋比、貫通孔補強金物の鉄筋比、開孔部あばら筋および開孔際あばら筋、斜め補強筋、貫通孔補強金物、開孔部あばら筋の強度である。 A_x は引張側の斜め補強筋の断面積、 k_u は有効せいに関する係数で0.72とした。その他の記号は文献1)、2)による。

表-3、図-10に「RC規準」¹⁾による式(2)、および「靱性保証型設計指針」²⁾による式(6)と実験値との比較

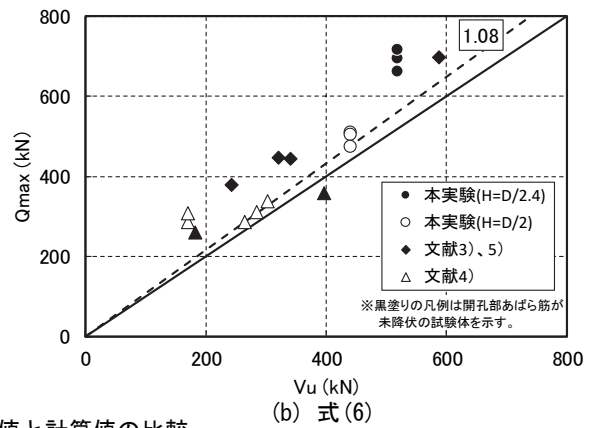
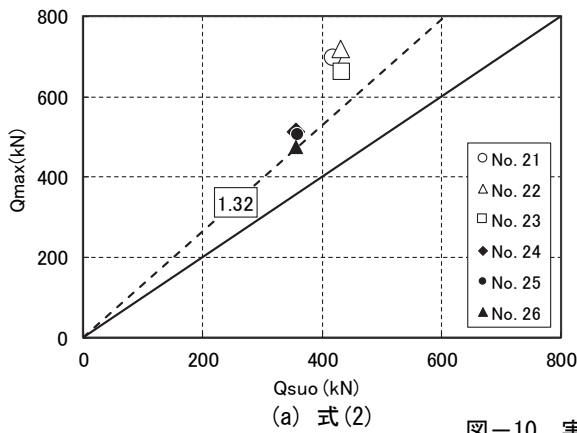


図-10 実験値と計算値の比較

表-3 実験値と計算値の比較

試験体	実験値 Qmax [kN]	計算値		Qmax 式(2)	Qmax 式(6)
		式(2) [kN]	式(6) [kN]		
No. 21	696.1	418.8	517.2	1.66	1.35
No. 22	718.6	432.8	517.1	1.66	1.39
No. 23	662.4	433.5	518.5	1.53	1.28
No. 24	511.2	357.3	439.2	1.43	1.16
No. 25	505.2	360.8	439.2	1.40	1.15
No. 26	475.3	357.7	439.2	1.32	1.08

を示した。なお、貫通孔補強金物を併用した No.22, No.23 に式(6)を適用するにあたり、引張側の斜め補強筋の断面積 A_s に貫通孔補強金物の断面積も含めた。図-10 (b) には開孔直径が $D/2$ かつ斜め補強筋を有している既往の実験結果も併記している。

表-3 によれば、計算値に対する正加力時実験値との比の下限値は、「RC 規準」¹⁾ の式(2)で 1.32 倍、「靱性保証型設計指針」²⁾ の式(6)では 1.08 倍となっており、試験体の破壊状況に基づいた式(6)の方が、精度良く実験結果を評価できる。なお、開孔直径が $D/2$ の試験体のせん断耐力としては開孔部あばら筋の降伏および開孔上下部のせん断ひび割れの進展により、耐力が低下したため試験体の破壊状況を考慮して式(6)を用いるのが妥当であるが、想定される破壊形式が 2 つあるためせん断耐力の評価としては、式(2)と式(6)の小さい値を用いる。本実験の場合、せん断耐力は式(2)で決まるため、既往のせん断耐力式で開孔直径が $D/2$ の試験体についてもせん断耐力を安全側に評価できることが明らかになった。

5. まとめ

開孔直径が梁せいの $1/2.4 \sim 1/2$ の貫通孔を有する梁の開孔補強に関する実験を行い、せん断耐力、開孔間隔、

開孔位置の影響について本実験の範囲で検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 開孔直径が梁せいの $1/2$ の試験体のせん断耐力についても、式(2)の既往のせん断耐力式で評価できる。
- 2) 開孔部を斜め補強筋で補強した大開孔 ($H/D=1/2$) に小開孔 ($H/D=1/5$ 以下) を平開孔均直径の 2.5 倍の間隔で配置する場合、および大開孔同士を開孔直径の 3 倍の開孔間隔で配置した場合、大開孔のせん断耐力に及ぼす近接する開孔の影響は小さいと考えられる。
- 3) 梁端から $0.5D$ (375mm) の位置に大開孔を配置した場合でも、せん断耐力に及ぼす開孔位置の影響は小さく、中央部の単開孔と同等のせん断強度を有する。

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. 355-364, 2010.2
- 2) 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, 1999.8
- 3) 三好雅人ほか：大孔径貫通孔を有する梁部材の開孔補強工法の開発 その 1 実験概要と破壊状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造 IV-23083, pp. 213-214, 2012.9
- 4) 有馬義人他 4 名：三角形せん断補強筋を用いた基礎梁の大孔径貫通孔補強方法 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造 IV-23226, pp. 451-452, 2015.9
- 5) 三好雅人ほか：大孔径貫通孔を有する梁部材の開孔補強工法の開発: その 3 追加実験概要と破壊状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造 IV-23235, pp. 469-470, 2015.9