

論文 大貫通孔を有する RC 基礎梁の貫通孔位置が構造性能に及ぼす影響

佐藤 弘都*1・鈴木 卓*2・深津 尚人*3・田口 孝*4

要旨: 本研究では、RC 基礎梁の構造性能に及ぼす貫通孔位置の影響の把握を目的として静的載荷実験を実施した。最大耐力を発揮したサイクルにおいてシアスパン中央およびスタブ側に貫通孔のある試験体では孔の載荷点側のせん断ひび割れおよび孔上側の接線ひび割れの拡幅が、載荷点側に貫通孔のある試験体では孔下側の接線ひび割れ拡幅が認められた。また、孔上部では載荷点側の貫通孔端から孔際補強筋まで、孔下部では孔の載荷点側に高い最小主ひずみが確認された。既往文献を基に貫通孔斜め上下部分を梁とみなしてトラスアーチ理論を適用させた耐力評価法は本論に示す試験体の最大耐力を概ね評価可能である。

キーワード: 静的載荷実験, 片持ち梁, 貫通孔補強筋, 曲げモーメント, 主ひずみ, せん断強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート造基礎梁には、設備点検などのために人の通れる直径 600mm 程度の貫通孔が設けられる。文献 1)では、貫通孔は孔径を梁せいの 1/3 以下とし、スパンの中央に設けることが推奨されている。そのため、低層建物では前述した貫通孔径と梁せいの比（以下、貫通孔比）の規定により過剰な梁せいを有する基礎梁となる場合が存在する。

近年では貫通孔比 1/3 以上の大貫通孔を有する基礎梁の開発研究が進められている^{2),3)}。これらの研究では、逆対称曲げモーメント分布の中央に貫通孔を配置したものがほとんどである。しかし、実際の設計では、計画の都合などにより梁スパン中央に貫通孔を設けられない場合がある。

筆者らはシアスパン中央に大貫通孔を有する基礎梁の構造性能の把握を目的として貫通孔径を変数とした静的載荷実験を実施し、貫通孔比が 1/2.3~1/2 と大きくなるにつれて最大耐力および変形性能が急激に低下する傾向を示した⁴⁾。一方、文献 5)において貫通孔位置の違いにより耐力に差が生じる結果が報告されているものの、このような研究事例は少ない。

本研究では、大貫通孔を有する RC 基礎梁において貫通孔位置が構造性能に及ぼす影響の把握を目的として静的載荷実験を実施した。本論では損傷状況、復元力特性、鉄筋の応力状態および終局強度評価の結果を示す。

2. 静的載荷実験

2.1 試験体

試験体は実大の約 1/3 スケールのもので 4 体である。図 1 に試験体形状および貫通孔位置を、表 1 に試験体

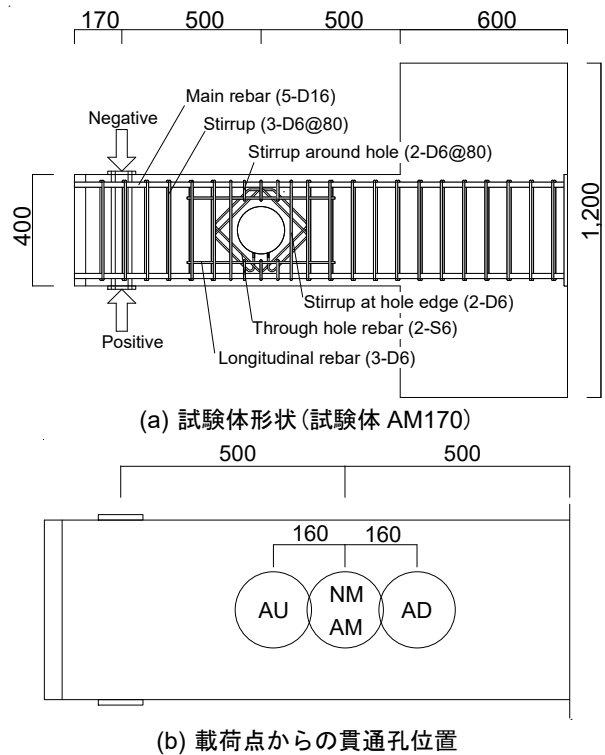


図 1 試験体形状および貫通孔位置

表 1 試験体一覧

試験体名	NM170	AM170	AU170	AD170
幅×せい (mm)	250×400			
シアスパン比	2.75 ($h = 1,000(\text{mm})$)			
貫通孔径 (mm)	170 ($H/D = 1/2.3$)			
載荷点からの貫通孔位置 (mm)	500		340	660
主筋	5-D16, $p_{t1} = 1.09(\%)$			
あばら筋	4-D6@80, $p_{w1} = 0.63(\%)$			
孔際補強筋	2-D6, $p_s = 0.15(\%)$			
弦材あばら筋	2-D6@60, $p_{w2} = 0.45(\%)$			
貫通孔補強筋	-	2-S6, $p_r = 0.22(\%)$		
水平筋	3-D6, $p_{t2} = 0.45(\%)$			

*1 高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻 (学生会員)

*2 高知工科大学 システム工学群 准教授・博士 (工学) (正会員)

*3 矢作建設工業 (株) エンジニアリングセンター (正会員)

*4 矢作建設工業 (株) エンジニアリングセンター 博士 (工学) (正会員)

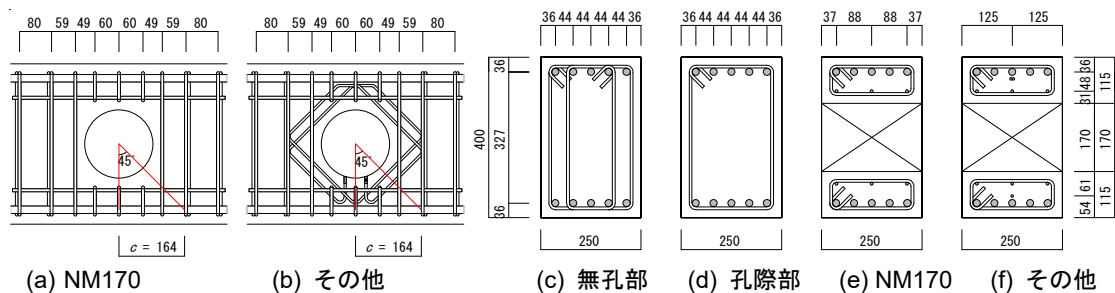


図-2 貫通孔付近および断面の配筋詳細

表-2 コンクリートの材料特性

		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時 ひずみ (μ)
NM170	梁	34.5	32.1	2,050
	スタブ	28.8	30.1	1,650
AM170	梁	34.3	31.4	2,100
	スタブ	29.0	29.7	1,970
AU170	梁	35.4	32.3	2,030
	スタブ	33.9	30.8	1,970
AD170	梁	36.1	31.3	1,990
	梁補修	32.8	30.2	2,110
	スタブ	33.1	30.9	2,060

表-3 鉄筋の材料特性

径	材種	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D6	SD295	343	522	178
S6	KSS785	931	1,161	174
D16	785相当	799	1,019	208

表-4 許容せん断力の計算結果 (単位: kN)

試験体	NM170	AM170	AU170	AD170
長期	22	22	23	22
短期	22	41	41	40

一覧を、図-2 に試験体の貫通孔付近および断面の配筋詳細を示す。表-1 には配筋状況とともに引張鉄筋比あるいは補強筋比を示している。梁断面 $b \times D$ は $250 \times 400\text{mm}$ 、貫通孔径 H は 170mm ($H/D = 1/2.3$) とし、全試験体共通である。本論では貫通孔上下投影位置を弦材と呼称する。実験変数は貫通孔位置および貫通孔補強筋の有無である。貫通孔位置はシアスパン中央を基準として、載荷点側とスタブ側にそれぞれ 160mm 移動させた。試験体 AM170, AU170 および AD170 では、貫通孔周囲に 2-S6(KSS785) を配しているのに対して、試験体 NM170 では貫通孔補強筋を配していない。

表-2 にコンクリートの材料特性を、表-3 に鉄筋の材料特性を示す。なお、試験体 AD170 は打設時に貫通孔まわりに充填不良が確認された。そのため充填できていなかった部分に、同等の強度 (表-2 参照) のコンクリートを用いて補修を行っている。

2.2 載荷方法

図-3 に載荷装置を、表-4 に許容せん断力の計算結果を示す。試験体は PC 鋼棒によりスタブを載荷フレームに固定した。実験では載荷フレームに取り付けた 2 台

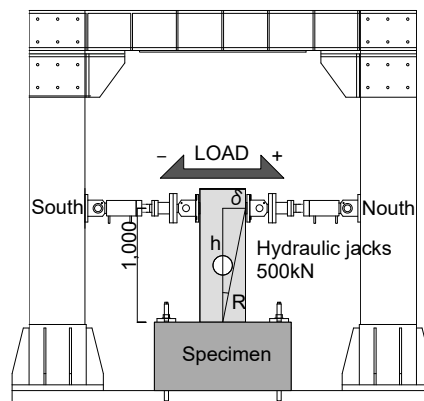


図-3 載荷装置

の水平ジャッキ (押し: 各 500kN) によって水平力を作用させた。水平力は文献 6) を参考に長期および短期の許容せん断力 (式(1), (2)) による荷重制御と載荷点の水平変位 δ をスタブ上端から載荷点までの高さ ($h = 1,000\text{mm}$) で除した変形角 R による変位制御である。式中の記号は文献 1), 6) を参照されたい。

$$L Q_{AO} = bj \alpha f_s \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) \quad (1)$$

$$S Q_{AO} = bj \left\{ \frac{2}{3} \alpha f_s \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.5 w f_t (p_s - 0.002) \right\} \quad (2)$$

加力プログラムは長期許容せん断力を 1 サイクル、短期許容せん断力、 $1/200$, $1/133$, $1/100$, $1/67$, $1/50$, $1/40\text{rad}$ を 2 サイクルずつである。

3. 実験結果

3.1 破壊性状および履歴特性

図-4 に $R = 1/67\text{rad}$ の正載荷 1 サイクル目ピーク時の試験体表面の最大主ひずみ分布を示す。ひずみは 3D デジタル画像相関法システム ARAMIS により算定した。ここで、ファセットサイズおよびポイント距離は 21pixel と 10pixel とした。図-5 にせん断力-変形角関係を示す。同図には、各鉄筋の降伏点および最大耐力点を示すとともに、4 章に示す終局強度評価の結果を併せて示した。

全試験体ともにせん断力 40kN 付近で貫通孔から斜め 45 度方向のひび割れの発生が確認され、 $1/100\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて貫通孔接線方向のひび割れ幅 (以下、接線ひび割れ) の拡幅に伴い最大耐力が記録された。シ

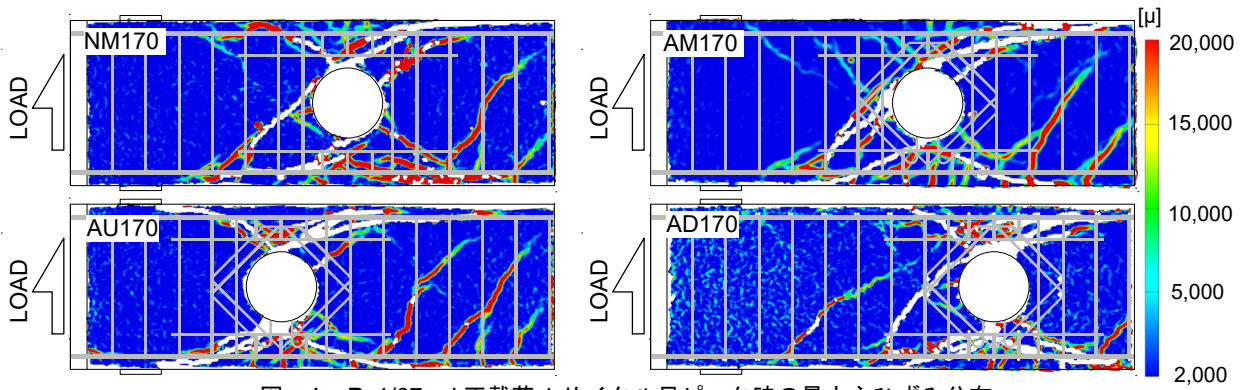


図-4 R=1/67rad 正荷重 1 サイクル目ピーク時の最大主ひずみ分布

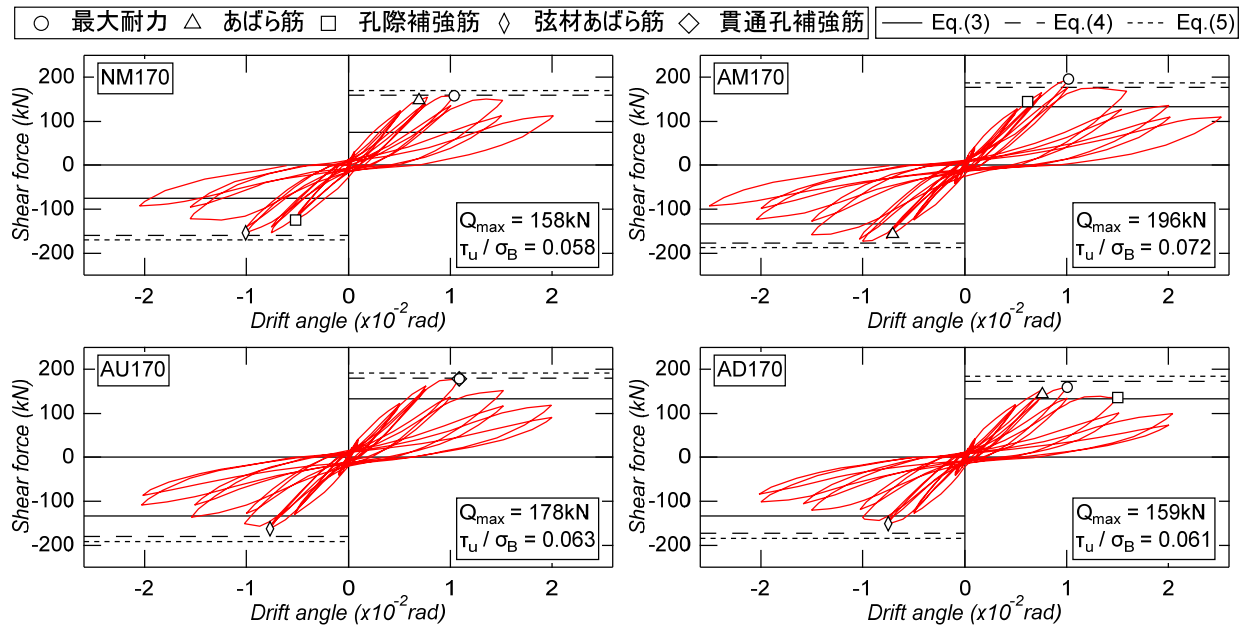


図-5 せん断力-変形角関係

アスパン中央に貫通孔のある試験体 NM170 および AM170 では、1/100rad のサイクルにおいて貫通孔左側のせん断ひび割れおよび貫通孔上側の接線ひび割れの拡幅が確認された。スタブ側に貫通孔のある試験体 AD170 では、打設不良により貫通孔まわりをコンクリートで補修を行っているが、試験体 AM170 と比べて貫通孔周囲のひび割れ性状に大きな差異はみられなかった。荷重点側に貫通孔のある試験体 AU170 では、荷重板から貫通孔下部に伸びる接線ひび割れの拡幅が認められるが、貫通孔左側ではそれ以外のひび割れはほとんど認められなかった。このことから当該試験体では、片持ち型としたことによる荷重板と貫通孔の距離が近いことが損傷状況の違いに起因したものと判断され、今後の課題とする。また、全試験体ともに最大耐力までに貫通孔周囲に配された鉄筋の降伏も認められたことから、全試験体の破壊モードはせん断破壊と判断された。

最大耐力を梁幅 b および応力中心間距離 j で除して算出したせん断応力度 ($\tau_u = Q_{max}/bj$) をコンクリート強度で除した値 (τ_u / σ_B) で比較すると、試験体 AM170 の最

大耐力は貫通孔補強筋のない試験体 NM170 のものと比べて 24% 高い。貫通孔位置の異なる試験体をみると、試験体 AM170 の最大耐力は貫通孔を荷重点側にずらした試験体 AU170 のものと比べて 14% 高い。これは、前述したように貫通孔と荷重板の距離が近いことで他の試験体と破壊性状が異なるためと考えられる。試験体 AM170 の最大耐力は AD170 のものと比べて 18% 高い。

3.2 せん断補強筋の応力分布

図-6 に各試験体の $R=1/200$, $1/133$ および $1/100$ rad の正荷重 1 サイクル目ピーク時におけるあばら筋および孔際補強筋の応力分布を示す。応力は履歴特性をバイリニア型と仮定してひずみゲージの計測値から算出した。ひずみゲージは補強筋のせい方向中央に貼付けた。同図では横軸の 0 を荷重点とし、貫通孔位置を縦の実線で、補強筋の有効範囲 c (図-2 参照) を赤線で、鉄筋の降伏強度を点線で示している。

全試験体ともに、せん断ひび割れの発生位置付近において高い応力の発生が確認された。貫通孔左側をみると、試験体 AU170 を除く試験体では荷重点から貫通孔にか

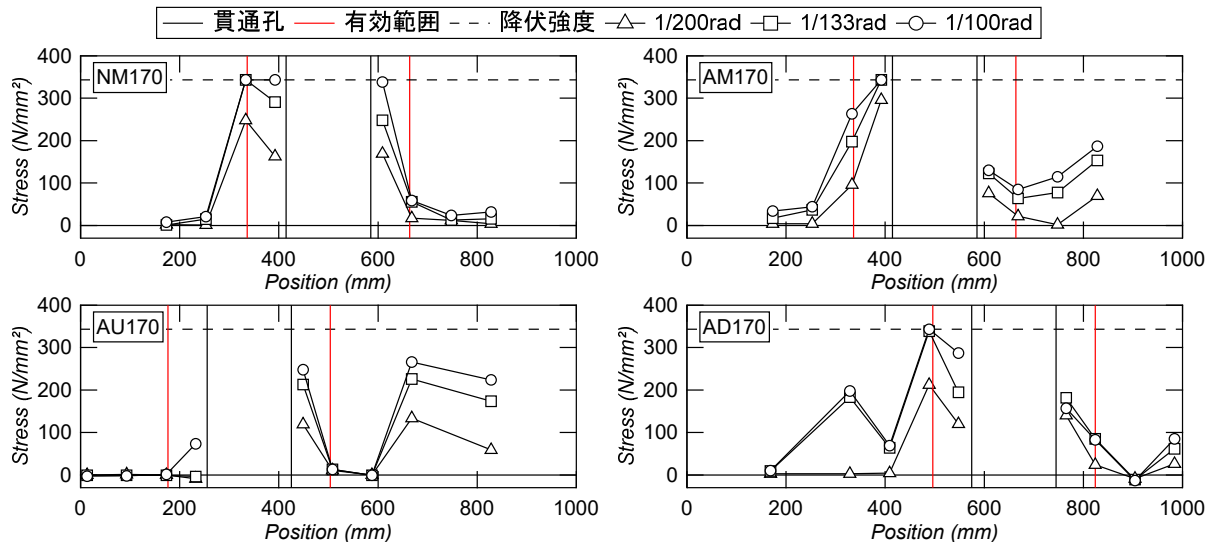


図-6 あばら筋および孔際補強筋の応力分布

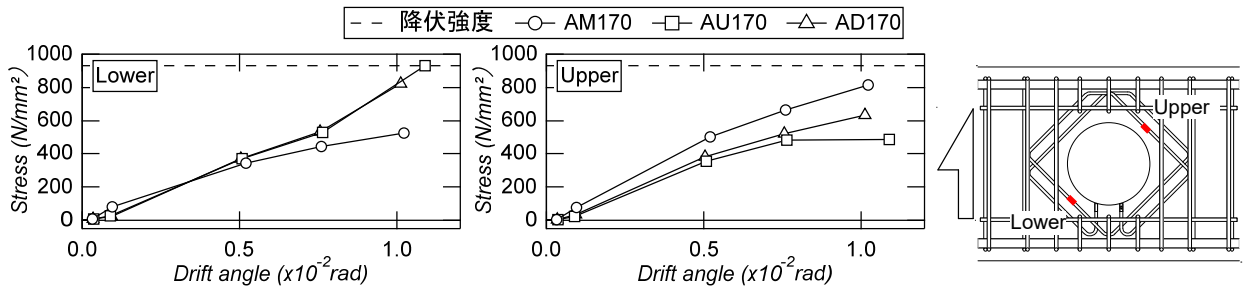


図-7 貫通孔補強筋応力推移

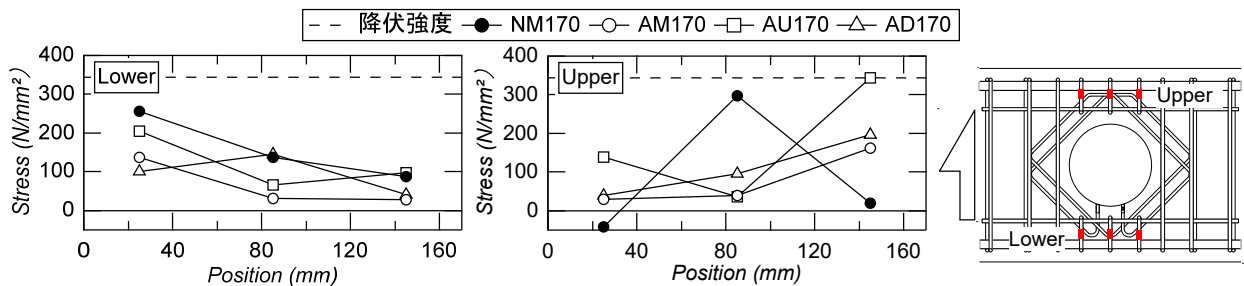


図-8 $R=1/100rad$ 正載荷 1 サイクル目ピーク時の弦材あばら筋の応力分布

けての応力増加が確認されたのに対して、貫通孔を載荷点側にずらした試験体 AU170 では応力増加はほとんどみられなかった。すなわち、当該試験体では、載荷点から貫通孔上部にかけての圧縮応力伝達が他の試験体に比べて小さかったものと考えられる。

貫通孔右側をみると、貫通孔補強筋のない試験体 NM170 のみ孔際補強筋の降伏が確認された。その他の試験体 AM170, AU170 および AD170 では $300N/mm^2$ を超える応力は確認されなかった。

3.3 貫通孔補強筋の応力推移

図-7 に $R=1/100rad$ までの正載荷 1 サイクル目ピーク時における引張側の貫通孔補強筋の応力推移を示す。応力は 3.2 節と同様の手法により算定した。貫通孔位置に拘わらず変形角増大に伴い応力上昇が確認された。試験

体 AM170 の応力推移は試験体 AU170 および AD170 のものと比べて下弦材側では若干低く、上弦材側では若干高くなるものの、全体的な応力推移に大きな差はみられなかった。

3.4 弦材あばら筋の応力分布

図-8 に $R=1/100rad$ の正載荷 1 サイクル目ピーク時の弦材あばら筋の応力分布を示す。応力は 3.2 節と同様の手法により算定した。同図の横軸は貫通孔の直径であり、鉄筋の降伏強度を点線で示している。下弦材では、貫通孔がスタブ側にある試験体 AD170 を除いて載荷点側からスタブ側にかけて応力の減少傾向が確認された。貫通孔がスタブ側にある試験体 AD170 では、3 本ある弦材あばら筋のうち、中央の鉄筋に最も大きな応力がみられた。しかし、その後の変形角においても弦材あばら筋の降伏

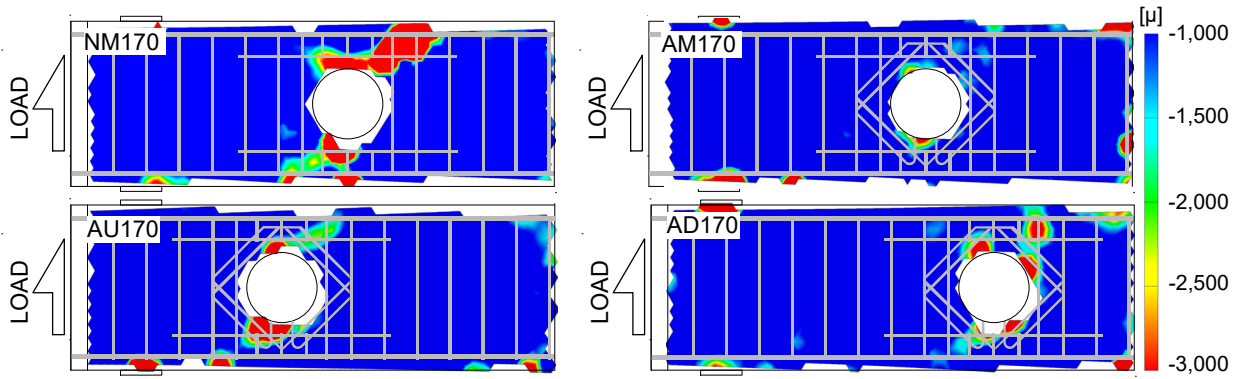


図-9 R=1/100rad 正載荷 1 サイクル目ピーク時の最小主ひずみ

は認められなかった。上弦材では、貫通孔補強筋のない試験体 NM170 を除いて載荷点側からスタブ側にかけて応力の増加傾向が確認された。このサイクルでは、貫通孔を載荷点側にずらした試験体 AU170 のみスタブ側の弦材あばら筋の降伏が確認された。これは接線ひび割れの拡幅位置と対応している。また、試験体 NM170 では、中央の鉄筋に最も大きな応力がみられた。

3.5 最小主ひずみ分布

図-9 に最大耐力を記録した $R=1/100\text{rad}$ の正載荷 1 サイクル目ピーク時における試験体表面の最小主ひずみ分布を示す。最小主ひずみは 3.1 節と同様に ARAMIS により算定した。ファセットサイズおよびポイント距離はともに 50pixel とした。

試験体 AM170 を除いて貫通孔上部では、載荷側の貫通孔端と反対側の孔際補強筋位置に高いひずみの発生が確認された。貫通孔補強筋のない試験体 NM170 では孔際補強筋の隣のあばら筋位置まで高いひずみが確認された。貫通孔下部では、試験体 AM170 を除く試験体で貫通孔の左下に高いひずみの発生が確認された。試験体 AM170 では、最大耐力を記録した $R=1/100\text{rad}$ の正載荷 1 サイクル目までに接線ひび割れの拡幅および耐力低下がみられなかったことから、他の試験体に比べて高いひずみがみられなかったと判断される。

4. 終局強度評価

開口せん断強度は文献 1) を基に式(3)により算出した。貫通孔補強筋の影響は文献 3) を参考に式中波括弧内第 2 項において考慮した。計算には 2.1 節に示す材料特性の値を使用した。なお、試験体 AD170 の計算には強度の低い補修に用いたコンクリートの圧縮強度を使用した。

$$Q_{su1} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p (\sigma_B + 18)}{M/(Qd) + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_r \sigma_{ry} + p_s \sigma_{sy}} \right\} bj \quad (3)$$

ここで、 k_p : 鉄筋による補正係数 ($=0.82p_l^{0.23}$)、 p_l : 引張鉄筋比、 k_u : 寸法による補正係数 ($= (160/d)^{0.37}$)⁷⁾、 σ_B : コンクリート強度、 $M/(Qd)$: シアスパン比、 p_r : 貫通孔補

強筋比、 σ_{ry} : 貫通孔補強筋の降伏点、 p_s : 孔際補強筋比、 σ_{sy} : 孔際補強筋の降伏点、 j : 応力中心間距離である。

文献 8) に従い図-10(a) に示す孔の斜め上下部を切り取った梁 (以下、部分梁) に対してトラスアーチ理論を用いて部分梁のせん断強度を算出した。

$$Q_{su2} = 2b \left[\frac{d' p_o \sigma_{oy} \cot \phi}{+ \left\{ v_0 \sigma_B - (1 + \cot^2 \phi) p_o \sigma_{oy} \right\} \frac{D'}{2} \tan \theta} \right] \quad (4)$$

ここで、 d' : 部分梁の有効せい ($= D' - d_c$)、 d_c : かぶり厚、 $p_o \sigma_{oy}$: 開孔部ひび割れを横切る補強筋量、 ϕ : 部分梁のトラス角度、 v_0 : コンクリート強度の有効係数、 D' : 部分梁せい ($= (D - H) / 2$)、 θ : 部分梁のアーチ角度 ($\tan \theta = \frac{\sqrt{L^2 + D'^2} - L}{D'}$)、 L : 部分梁のスパンである。

一方で図-9 に示すとおり、高い最小主ひずみの発生している貫通孔上下においてせん断力を負担しているものと考えられる。図-10(b) に 3.5 節の最小主ひずみの結果をもとに修正した部分梁を示す。本論では、高い最小主ひずみのみられた貫通孔上部の載荷側の貫通孔端から孔際補強筋の隣のあばら筋までを上部分梁のスパンとした。貫通孔下部では、貫通孔左下に高いひずみがみられたため、下部分梁のスパンは貫通孔の中心から孔際補強筋の隣のあばら筋までとした。

$$Q_{su3} = \sum \left[\frac{d' p_o \sigma_{oy} \cot \phi}{+ \left\{ v_0 \sigma_B - (1 + \cot^2 \phi) p_o \sigma_{oy} \right\} \frac{D'}{2} \tan \theta} \right] \quad (5)$$

表-5 に計算結果および実験結果の一覧を示す。同表には筆者らが以前に行った貫通孔径を $1/3D \sim 1/2D$ まで拡大させた有孔基礎梁の実験結果⁴⁾も一緒に示す。試験体名の数値は貫通孔径を示している。ここでは、実験の最大耐力および終局強度計算値の比を強度比と呼称する。

開口せん断強度 Q_{su1} をみると、強度比は 0.90~2.11 の範囲にあり、強度比平均は 1.39 となった。貫通孔補強筋のない試験体 NM170 の強度比は 2.11 なり、貫通孔補強筋のある試験体 AM170 の強度比は 1.46 であった。このことから、 Q_{su1} では貫通孔補強筋の効果を大きく見積もっていると考えられる。一方、部分梁のせん断強度 Q_{su2}

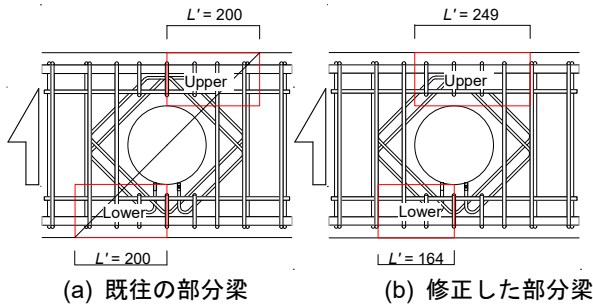


図-10 部分梁の定義

表-5 計算結果および実験結果の一覧 (単位: kN)

	実験	計算			強度比 (実験/計算)		
	Q_{max}	Q_{su1}	Q_{su2}	Q_{su3}	Q_{su1}	Q_{su2}	Q_{su3}
130F	277	197	257	267	1.41	1.08	1.04
170F	250	185	202	206	1.35	1.24	1.21
200F	159	176	152	162	0.90	1.04	0.98
170M	264	185	209	240	1.43	1.26	1.10
NM170	158	75	159	170	2.11	0.99	0.93
AM170	196	134	177	188	1.46	1.11	1.04
AU170	178	135	180	191	1.32	0.99	0.93
AD170	159	134	173	184	1.19	0.92	0.87
平均	-	-	-	-	1.39	1.08	1.01
標準偏差	-	-	-	-	0.32	0.11	0.10

をみると、強度比は0.92~1.26の範囲にあり、強度比平均は1.08、標準偏差0.11となった。部分梁のスパンを修正したせん断強度 Q_{su3} の強度比は0.87~1.21の範囲であり、強度比平均は1.01、標準偏差0.10となり、評価精度の向上が認められた。修正した部分梁のせん断強度は実験の接線ひび割れを横切る鉄筋の応力状況およびコンクリートのひずみ発生状況を反映させていることが評価精度の向上の要因と考えられる。しかし、スタブ側に貫通孔のある試験体 AD170 の強度比は0.87となった。当該試験体の貫通孔位置に作用する曲げモーメントは、他の試験体のものと比べて高いことなどが一因と考えられ、今後の検討課題としたい。

5. まとめ

本研究では、大貫通孔を有するRC基礎梁の構造性能に及ぼす貫通孔位置の影響の把握のための静的荷重実験を実施した。本論より得られた知見を以下に示す。

- 1) 最大耐力を発揮した1/100radのサイクルにおいて、シアスパン中央およびスタブ側に貫通孔のある試験体では孔左側のせん断ひび割れおよび孔上側の接線ひび割れの拡幅が確認された。載荷点側に貫通孔のある試験体では孔下側の接線ひび割れの拡幅が確認された。
- 2) 貫通孔補強筋のある試験体では、スタブ側に貫通孔のある試験体の最大耐力は他の試験体と比べて低かった。また、載荷点側に貫通孔のある試験体の最大耐力はシアスパン中央に貫通孔のある試験体のものと比べて低くなり、損傷状況の差の影響が認め

られた。

- 3) シアスパン中央およびスタブ側に貫通孔がある試験体では、孔左側のせん断補強筋に高い引張応力が認められた。載荷点側に貫通孔がある試験体では、孔右側のせん断補強筋に高い応力が確認された。
- 4) 貫通孔位置に拘わらず、載荷サイクル増大に伴う貫通孔補強筋の引張応力の増加傾向に大きな差は確認されなかった。
- 5) 貫通孔上部では載荷点側の孔端と反対側の孔際補強筋位置に、貫通孔下部では孔の左下に高い最小主ひずみの発生が認められた。
- 6) 文献8)をもとに貫通孔斜め上下部を梁とみなしてトラスアーチ理論を適用させた耐力評価法は本論に示す試験体の最大耐力を概ね評価可能であった。

謝辞

本研究は高知工科大学・長岡紗那氏、矢作建設工業株式会社・伊藤花恋氏の協力を受けた。丸井産業株式会社から貫通孔補強筋を提供していただいた。

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，2024
- 2) 石岡拓，清水隆，和泉信之：大口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，Vol. 34，No.2，pp.205-210，2012.7
- 3) 田口孝，深津尚人，井上啓，福迫浩一：RC造基礎梁における大貫通孔補強工法の実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40，No.2，pp.157-162，2018.7
- 4) 佐藤弘都，鈴木卓，深津尚人，田口孝：シアスパン中央に大貫通孔を有するRC造基礎梁の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol. 46，No.2，pp.289-294，2024.6
- 5) 渋市克彦，杉本訓祥，増田安彦：FEM解析を用いた有開口RC梁の構造性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No.2，pp.199-204，2012.6
- 6) 西村康志郎：RC有孔梁の許容せん断力とひび割れ幅に関する考察，日本建築学会大会学術梗概集（近畿），構造IV，pp.289-290，2023.9
- 7) 寺井雅和，福原実苗，南宏一：鉄筋コンクリート部材のせん断抵抗に見られる寸法効果に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），Vol. C2，pp.129-130，2010.9
- 8) 平瀬智樹，日比野陽，篠原保仁，林静雄：RC造有孔梁のせん断伝達機構に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No.2，pp.259-264，2011.7