

鉄筋コンクリート造有孔基礎梁のせん断応力状態に関する解析的研究

有孔梁	せん断力	FEM 解析	1240135	廣野 真成*
材料モデル	履歴特性	せん断伝達	指導教員	鈴木 卓

1. はじめに

基礎梁には、設備点検などのために人の通れる直径 600mm 程度の大貫通孔が必要である。鉄筋コンクリート（以下、RC）構造計算規準では、貫通孔径は梁せいの 1/3 以下とし、スパン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みられる。

近年、貫通孔の直径を梁せいの 1/3 以上とすることを目的とした研究が行われてきた（文献 2),3)）。しかし、このような研究では、逆対称曲げモーメント分布の試験体に対して貫通孔を中央付近に配置したものが多く、曲げモーメントの影響を受ける位置に貫通孔を設けた場合の検討事例は不十分である。

そこで、本研究はシアスパンの中央に大貫通孔を有する RC 造基礎梁の構造性能の把握を目的として貫通孔比の異なる試験体の静的荷重実験を実施した。その結果、せん断破壊型となった試験体の最大耐力は既往の終局強度評価の計算結果を大幅に上回った。終局強度評価法の改善のためには、有限要素法（以下、FEM）解析を用いたせん断応力状態の把握が必要である。

本研究では、前述した試験体のせん断応力状態の把握を目的とした FEM 解析を実施した。本論では、解析と実験の履歴特性および鉄筋の応力推移の比較から解析モデルの妥当性を示す。併せて、試験体内部のせん断応力状態の検討結果を述べる。

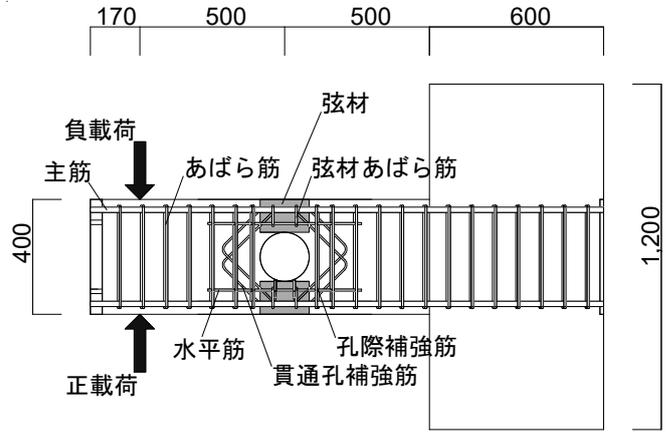
2. 解析対象試験体

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付近の寸法詳細を、表 1 に試験体一覧を示す。

本論では、貫通孔上下投影位置を弦材と呼称する（図 1 (a)のハッチ位置参照）。実験変数は貫通孔径 H および弦材あばら筋比である。貫通孔径は 130mm ($H/D = 0.33$)、170mm ($H/D = 0.43$) および 200mm ($H/D = 0.50$) であり、試験体名の数値と一致させた。試験体 170M の弦材あばら筋比 p_w (0.95%) は他の試験体 (0.32%) の 3 倍である。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。

3. FEM 解析

図 2 に試験体 170F を例とした解析モデルの要素分割を示す。解析には、市販の非線形コンクリート構造解析



(a) 試験体形状

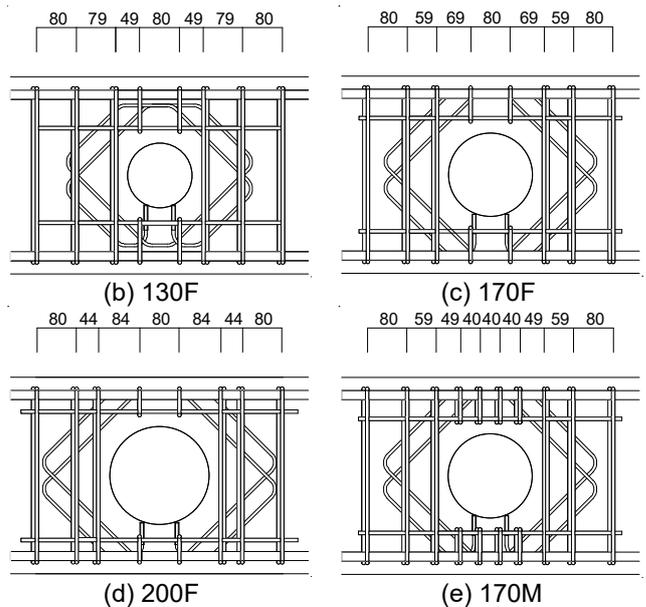


図 1 試験体形状および貫通孔付近の寸法詳細

表 1 試験体一覧

試験体名	130F	170F	200F	170M	
躯体	幅×せい (mm)	250×400			
	シアスパン比	2.75 ($h = 1,000$ mm)			
	貫通孔径 (mm)	130	170	200	170
	貫通孔比 (H/D)	0.33	0.43	0.50	0.43
主筋	5-D16, 1.09 (%)				
あばら筋	4-D6@80, 0.63 (%)				
孔際補強筋	4-D6, 0.31 (%)				
弦材あばら筋	2-D6@80, 0.32 (%)			3-D6@40, 0.95 (%)	
貫通孔補強筋	4-S6, 0.44 (%)				
水平筋	3-D6, 0.46 (%)				

表2 コンクリートの材料特性

試験体	130F	170F	200F	170M
圧縮強度 (N/mm ²)	29.6	30.0	30.3	30.1

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	412	532	218
S6	KSS785	1,006	1,204	187
D16	785相当	806	1,017	214

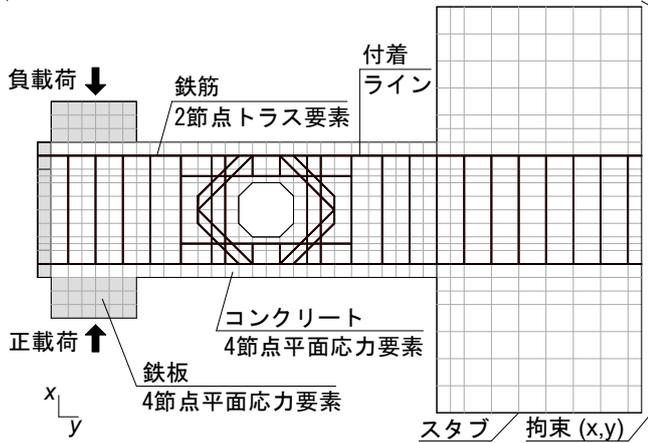
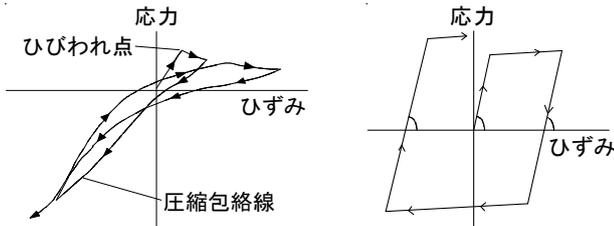


図2 試験体 170F の要素分割



(a) コンクリートの履歴特性 (b) 鉄筋の履歴特性

図3 材料モデル

ソフトウェア「FINAL」を使用した。解析は2次元モデルである。要素分割は40mm幅を基本とし、貫通孔付近の要素分割は貫通孔補強筋の配筋位置を基に決定した。

コンクリートは4節点平面応力要素に置換し、鉄筋は2節点トラス要素に置換した。コンクリートおよび鉄筋の要素間にはライン要素を定義した。スタブ右端における節点のすべての自由度を拘束した。

材料構成則は文献4)に示す有開口RC梁と同じものを用いた。コンクリートの応力-ひずみ構成則は等価一軸ひずみに基づく直交異方性体により表現した。平面応力下の圧縮破壊条件は Kupfer-Gerstle の提案に従った。応力度-ひずみ関係の上昇域は修正 Ahmad 式を、圧縮強度到達後の軟化域は Nakamura らのモデルを用いた。引張側はひび割れ発生まで線形とし、ひび割れ後のテンションステイフニング特性は出雲らのモデル ($c=0.4$) を採用した。履歴モデルは繰返しによる軟化挙動を考慮した曲線モデル⁹⁾とした(図3(a))。ひび割れ後のせん断伝達特性は長沼の提案モデルによって与えた。

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、履

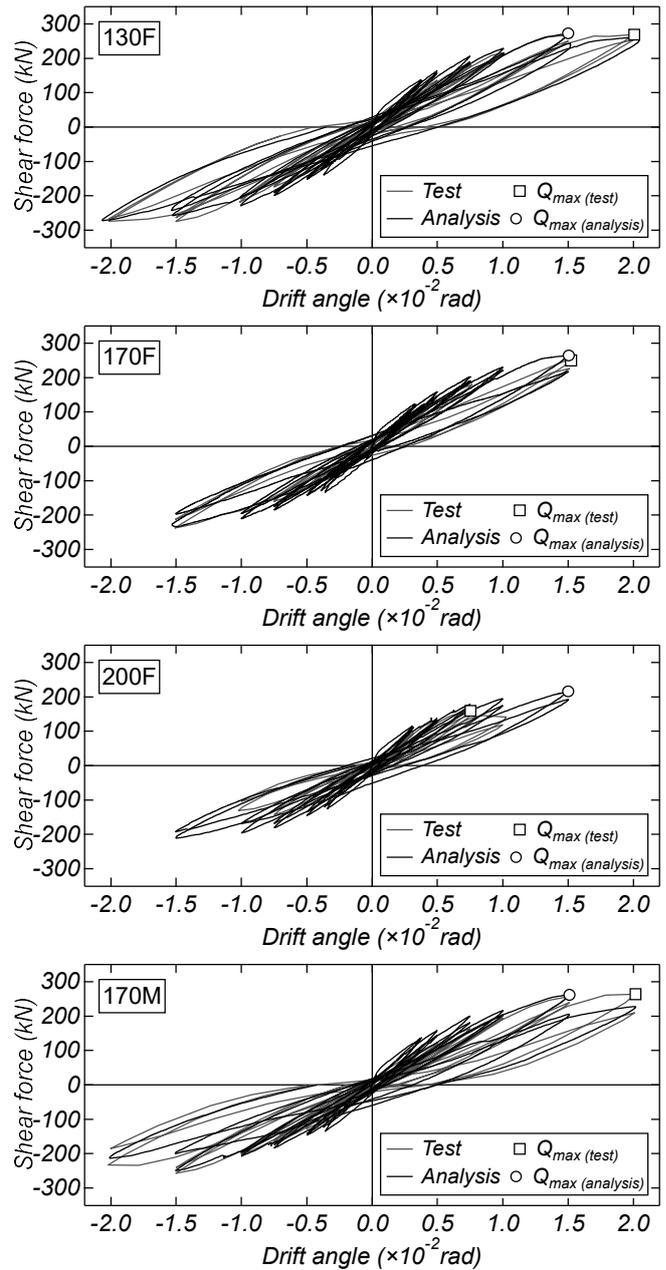


図4 実験および解析のせん断力-変形角関係の比較

歴特性は等方硬化則を仮定した(図3(b))。鉄筋とコンクリートの付着応力度-すべり関係は Naganuma らのモデルを用いた。最大付着応力とその時のすべり量は CEB/FIP Model Code 1990⁶⁾により算定した。

解析における加力は加力位置に実験と同様の強制変位を与えた。ただし、試験体 170F では、実験において加力していない 1.0×10^{-2} rad のサイクルの加力も実施した。

4. 解析結果

4.1 せん断力-変形角関係

図4に各試験体の実験および解析のせん断力-変形角関係の比較を示す。実験における最大耐力点を□で、解析における最大耐力点を○で示す。

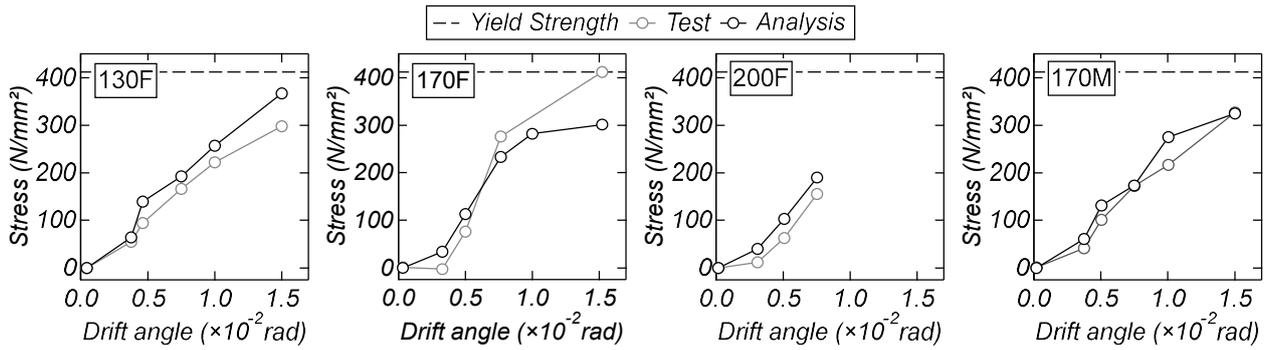


図5 孔際補強筋の応力推移

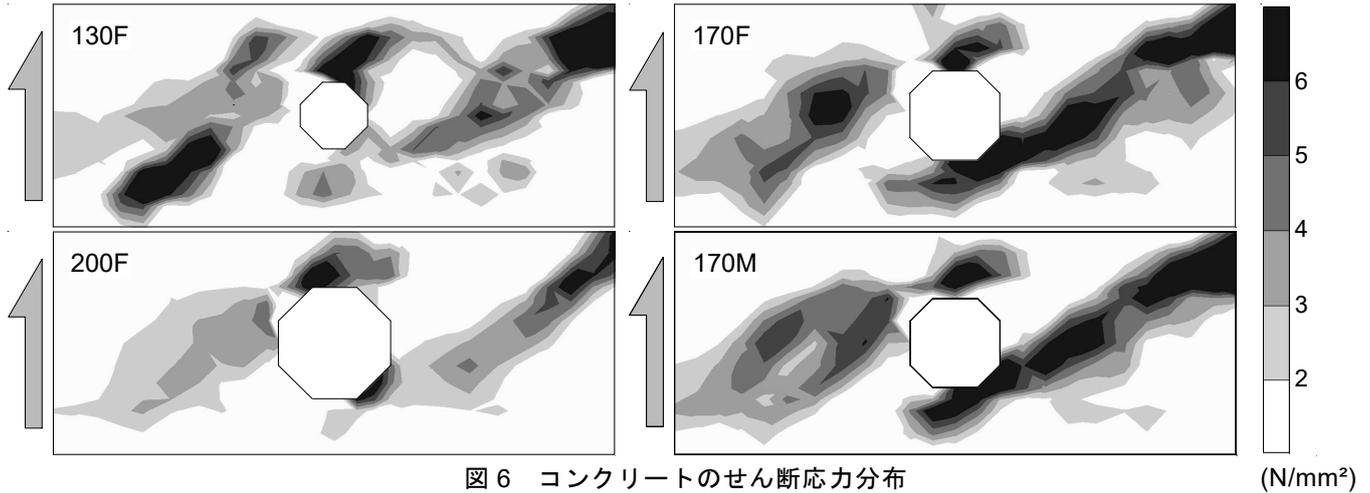


図6 コンクリートのせん断応力分布

(N/mm²)

試験体 200F を除いた試験体の最大耐力および履歴形状の解析結果は実験結果を精度よく再現できている。一方で試験体 200F の解析結果では、 $1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の載荷サイクルにおける耐力低下が再現されていないものの、それ以前のサイクルまでの最大耐力および履歴ループ形状の解析結果は実験結果を精度よく再現できている。

4.2 孔際補強筋の応力推移

図5に実験および解析結果の各正載荷1サイクル目ピーク時における孔際補強筋の応力推移を示す。実験の孔際補強筋の応力は孔際補強筋の中央に貼り付けたひずみゲージから得られた値を用いて履歴特性をバイリニア型に仮定して算定した。解析の孔際補強筋の応力は実験におけるひずみ計測位置に該当する鉄筋要素の値である。

試験体 130F, 200F および 170M において解析の応力推移は実験のものと精度よく対応している。一方の試験体 170F の解析の応力は $0.75 \times 10^{-2} \text{rad}$ から実験のものと比べて低い。しかし、試験体 170F の解析は $0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ における急激な応力増加が認められ、実験と解析の傾向は一致している。

以上の解析結果から、解析モデルは当該梁の最大耐力、履歴特性および孔際補強筋の応力推移を概ね再現したものと判断される。

5. せん断応力状態

5.1 コンクリートのせん断応力分布

図6に各試験体において耐力のほぼ上限に達した変形

角 (200F : $0.75 \times 10^{-2} \text{rad}$, その他 : $1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$) の正載荷1サイクル目ピーク時のコンクリートのせん断応力分布を示す。

全試験体ともに梁左下の加力点付近から上部弦材にかけておよび下部弦材からスタブとなる梁右上にかけて高いせん断応力の発生が認められることから、当該2区間でせん断伝達機構を形成しているものと判断される。また、試験体 130F では上部弦材から貫通孔右側にかけて若干のせん断応力の発生が認められる。しかし、貫通孔左側と右側のせん断伝達機構は概ね別々に形成されていることから、孔際補強筋および貫通孔補強筋の引張力を介して貫通孔左右にせん断伝達機構が形成されているものと推測される。

貫通孔比の異なる試験体 130F, 170F および 200F に着目すると、貫通孔比の増加に伴い貫通孔左側の応力レベルの低下が認められものの、上部弦材の応力レベルに顕著な差はみられなかった。一方で試験体 170F の貫通孔右側および下部弦材の応力レベルは試験体 130F および 200F のものと比べて高い。これは、試験体 130F では前述した上部弦材からのせん断伝達の影響、試験体 200F ではせん断力が低いことに起因するものと判断される。また、弦材あばら筋比の異なる試験体 170M および試験体 170F では、せん断応力発生状況に大きな差異はみられなかった。

5.2 弦材の負担せん断力の推移

図7に各正載荷1サイクル目ピーク時における上部お

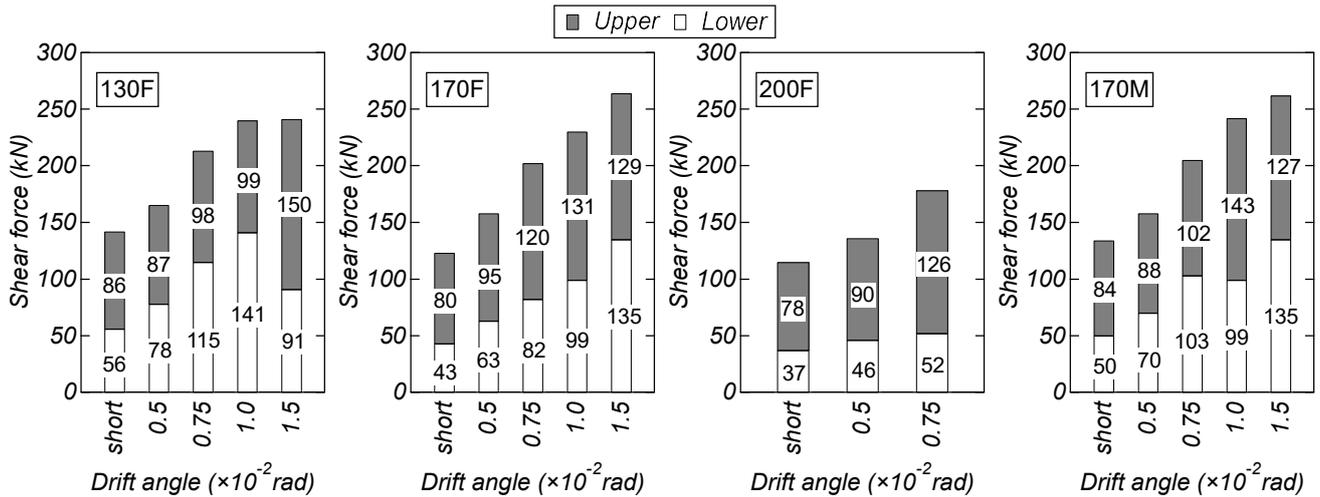


図7 負担せん断力の推移

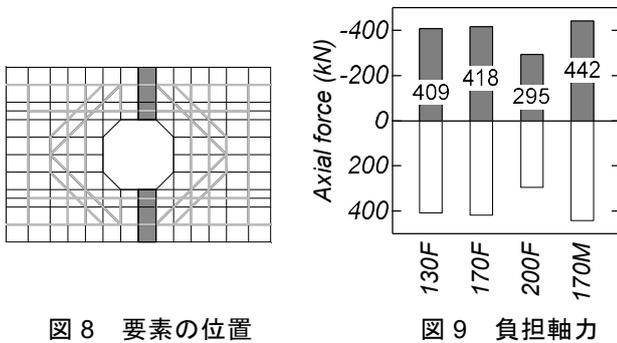


図8 要素の位置

図9 負担軸力

および下部弦材の負担せん断力の推移を、図8に応力を抽出した要素位置を示す。

貫通孔比の異なる試験体に着目すると、試験体 130F の曲げ降伏の確認された 1.5×10^{-2} rad を除いて貫通孔比の増加に伴い上部弦材の負担の減少および下部弦材の負担の増加が認められた。また、せん断破壊型である試験体 170F および 200F では、ほぼ最大耐力に達した変形角 (200F : 0.75×10^{-2} rad, その他 : 1.5×10^{-2} rad) において上部弦材に同程度のせん断力の負担が認められた。一方で弦材あばら筋比の異なる試験体 170M および 170F では、上部および下部弦材の負担せん断力に大きな差異はみられない。また、図9に示す上部および下部弦材における負担軸力においても両試験体の上部および下部弦材の負担軸力に大きな差異はみられない。このことから、せん断応力状態に及ぼす弦材あばら筋比の影響は小さいものと判断された。

6. まとめ

本論より得られた知見を以下に示す。

- 1) 本論に示した解析モデルは各試験体の実験の最大耐力までのせん断力-変形角関係および孔際補強筋の応力推移状況を再現できた。

- 2) 孔際補強筋および貫通孔補強筋の引張力を介して貫通孔左右にせん断伝達機構が形成された。
- 3) 貫通孔比の増加に伴い上部弦材の負担せん断力の減少および下部弦材の負担せん断力の増加が認められた。
- 4) 弦材あばら筋比の異なる試験体では、コンクリートのせん断応力分布および上下弦材の負担せん断力推移に大きな差は認められず、せん断応力状態に及ぼす弦材あばら筋比の影響は小さいものと判断された。

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，2018
- 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. 157-162, 2018.7
- 3) 高津比呂人，南谷知輝，三谷貴志：斜め補強筋を用いて補強した大開口貫通孔を有する RC 造基礎梁に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 88 巻，第 809 号，1186-1196, 2023 年 7 月
- 4) 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, 2012.6
- 5) 長沼一洋，大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp. 135-142, 2000.10
- 6) CEB: CEB/FIP Model Code 1990, First Draft, Bulletin d'Information, NO. 195, Mar. 1990