

大貫通孔の上下弦材が非対称となる RC 基礎梁の構造性能に関する研究

静的載荷実験
最大主ひずみ

貫通孔補強筋
ひび割れ幅

スラブ
せん断終局強度

東村 匠馬*
指導教員 鈴木 卓

1. はじめに

鉄筋コンクリート造（以下、RC造）の基礎梁には、設備点検のために人通孔として直径600mm程度の大貫通孔が設けられる。この貫通孔は孔径と梁せい比（以下、貫通孔比）を1/3以下とし、スパン中央かつ梁せい中央付近に設けることが推奨されている。そのため、低層建物の基礎梁せいは貫通孔比の推奨値により決定される場合がある。近年、貫通孔比1/3以上の基礎梁の開発研究が進められているものの²⁾、そのほとんどがスパン中央に貫通孔を配置した試験体を対象としている。しかし、実際の設計では設備計画などによりスパン中央に貫通孔を設けられない場合も想定される。

以上を背景として、文献3)および4)では、貫通孔比1/3以上の大貫通孔をシアスパン中央に設けた基礎梁の構造性能の把握を目的とした静的載荷実験が実施された。その結果、貫通孔比の増加および孔位置のシアスパン中央からスタブ側への移動に伴い最大耐力が低下する傾向が示された。一方で孔位置を梁せい方向に移動させた場合や梁にスラブを取り付けた場合については未検討であり、これらが梁の構造性能に与える影響については不明瞭である。

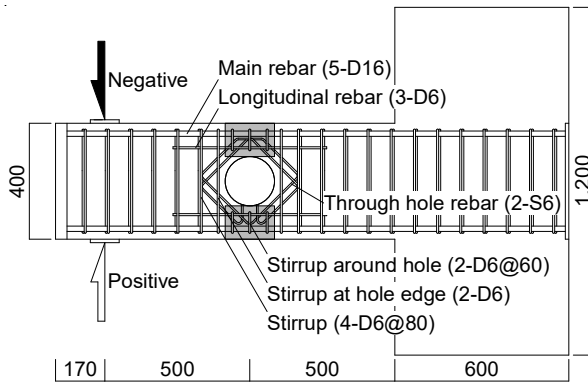
本研究では、貫通孔の上下弦材が非対称となる基礎梁の構造性能の把握を目的とした静的載荷実験を実施した。本論では、実験計画を示すと同時に、試験体の履歴特性、破壊性状、せん断ひび割れ幅、補強筋の応力状況および終局強度評価の結果を示す。

2. 静的載荷実験

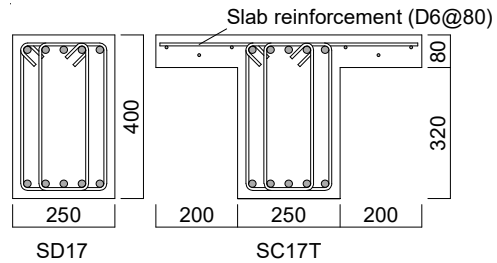
2.1 試験体

図1に試験体形状を、図2に試験体の貫通孔周囲および断面の配筋詳細を、表1に試験体一覧を、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。試験体は実大の約1/3スケールであり、文献4)で検討された試験体SC17（旧名AM170）に新たな2体を加えた計3体を検討対象とした。試験体SC17の配筋および鉄筋の材料特性などの詳細は文献4)を参照されたい。なお本論では、当該文献に従い貫通孔上下投影位置（図1の塗りつぶし位置）を弦材と呼称する。

本論では試験体SC17を基準試験体とする。孔位置を梁せい中央から梁下側に25mm移動させた試験体をSD17とす



(a) 全体形状（基準試験体 SC17）



(b) 梁断面（無孔部）

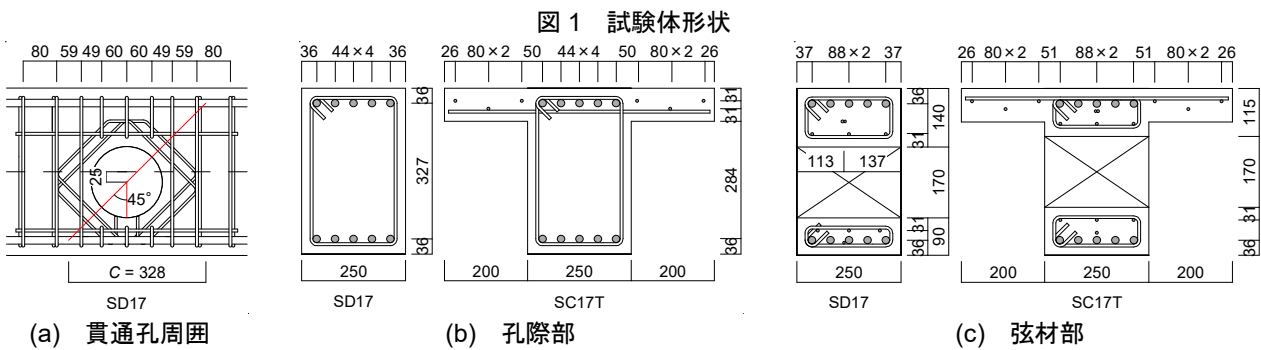


図1 試験体形状

図2 貫通孔周囲および断面の配筋詳細

表 1 試験体一覧

試験体		SC17	SD17	SC17T
シアスパン比		2.75 ($h = 1,000$ (mm))		
断面	幅×せい (mm)	250×400		
	主筋	5-D16, $p_{t1} = 1.09$ (%)		
	あばら筋	4-D6@80, $p_{w1} = 0.63$ (%)		
貫通孔	径 (mm)	170 (貫通孔比 = 1/2.3)		
	梁せい中央からの距離 (mm)	0	25	0
弦材	水平筋	3-D6, $p_{t2} = 0.45$ (%)		
	あばら筋	2-D6@60, $p_{w2} = 0.45$ (%)		
孔周囲の補強筋	孔際	2-D6, $p_s = 0.15$ (%)		
	貫通孔	2-S6, $p_r = 0.22$ (%)		
スラブ	厚 (mm)	-		80
	縦筋・横筋	-		D6@80
許容せん断力	長期 (kN)	22	21	21
	短期 (kN)	51	68	49

表 2 コンクリートの材料特性

試験体	SC17	SD17	SC17T
圧縮強度 (N/mm ²)	34.3	28.5	28.6

表 3 鉄筋の材料特性

試験体	径	材種	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SD17	D6	SD295	439	549	230
SC17T	S6	KSS785	1,043	1,207	187
	D16	785相当	822	1,031	208

る。協力幅 200mm で厚さ 80mm のスラブを梁両側に取り付けた試験体を SC17T とする。試験体 SD17 および SC17T は上部弦材の断面積が下部弦材のものに比べて大きい試験体である。

2.2 荷重方法

図 3 に荷重装置を示す。試験体は PC 鋼棒によりスタブを荷重フレームに固定した。実験では荷重フレームに取り付けた 2 台の水平ジャッキ (押しのみ: 各 500kN) により水平力を作用させた。荷重は文献 3) および 4) に従い、長期および短期の許容せん断力 (表 1 の最下段の値) による荷重制御と荷重点の水平変位 δ をシアスパン長 h ($= 1,000$ mm) で除した変形角 R による変位制御とした。許容せん断力の算出方法は文献 1) を参照されたい。

荷重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, $R=1/200, 1/133, 1/100, 1/67, 1/50, 1/40$ rad を 2 サイクルずつとした。

3. 実験結果

3.1 履歴特性および破壊性状

図 4 に各試験体の履歴特性を示す。同図縦軸は試験体ごとのコンクリート強度の違いによる影響を除去するために、せん断力を梁幅、応力中心間距離 (有効せいの 7/8 倍) およびコンクリート強度で無次元化した値 (以下、無次元化せん断力) とした。試験体 SC17T の梁幅および応力中心間距離は試験体 SC17 のものと同値としている。同図には、基準試験体 SC17 の履歴特性⁴⁾ および 4 章に示すせん断終局強度 (式(1), (2)) の計算値を示す。図 5 に各試験体が概ね最大

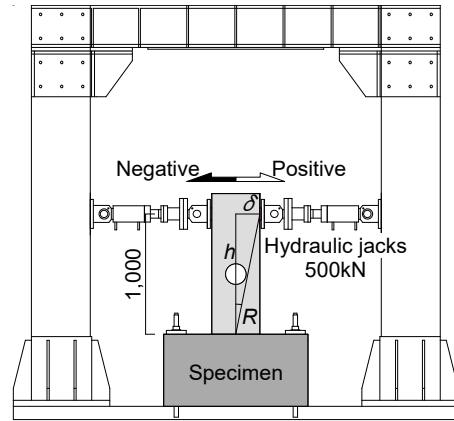


図 3 荷重装置

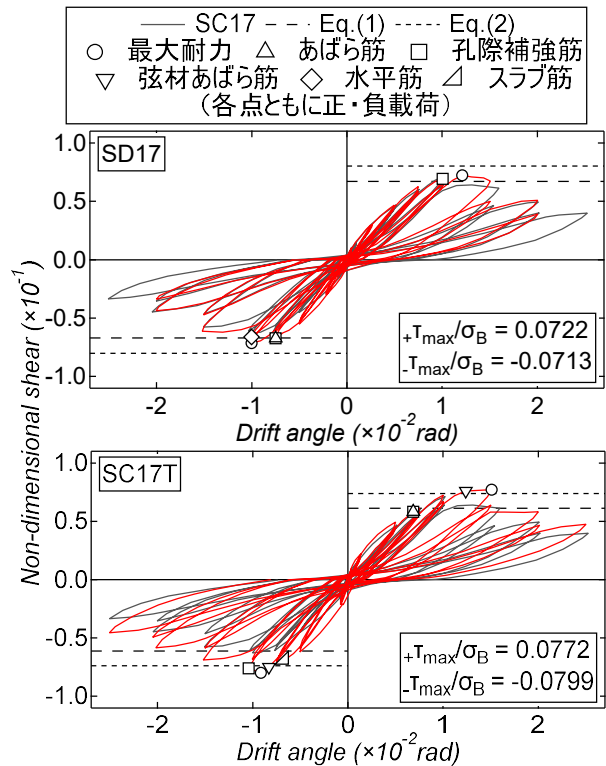


図 4 履歴特性

耐力に達した $R=1/100$ rad の 1 サイクル目ピーク時における試験体表面の最大主ひずみ分布および鉄筋の降伏状況を示す。同図では、降伏した補強筋を黒色で示している。降伏の判定には同図(c)に示す鉄筋に貼付けたひずみゲージの計測値を用いた。最大主ひずみはデジタル画像関連法システム ARAMIS により算定し、ファセットサイズは 21pixel, ポイント間距離は 10pixel とした。

全試験体ともに最大耐力を記録したサイクルにおいて後述の図 6 に示す圧縮側弦材に生じた貫通孔接線方向のひび割れ (以下、接線ひび割れ) の拡幅が確認された。最大耐力までに貫通孔周囲に配された補強筋の降伏もみられたことから、全試験体の破壊モードはせん断破壊と判断された。

梁下側に貫通孔のある試験体 SD17 およびスラブ付きの試験体 SC17T では、1/133rad まで正荷重の剛性は負荷荷の

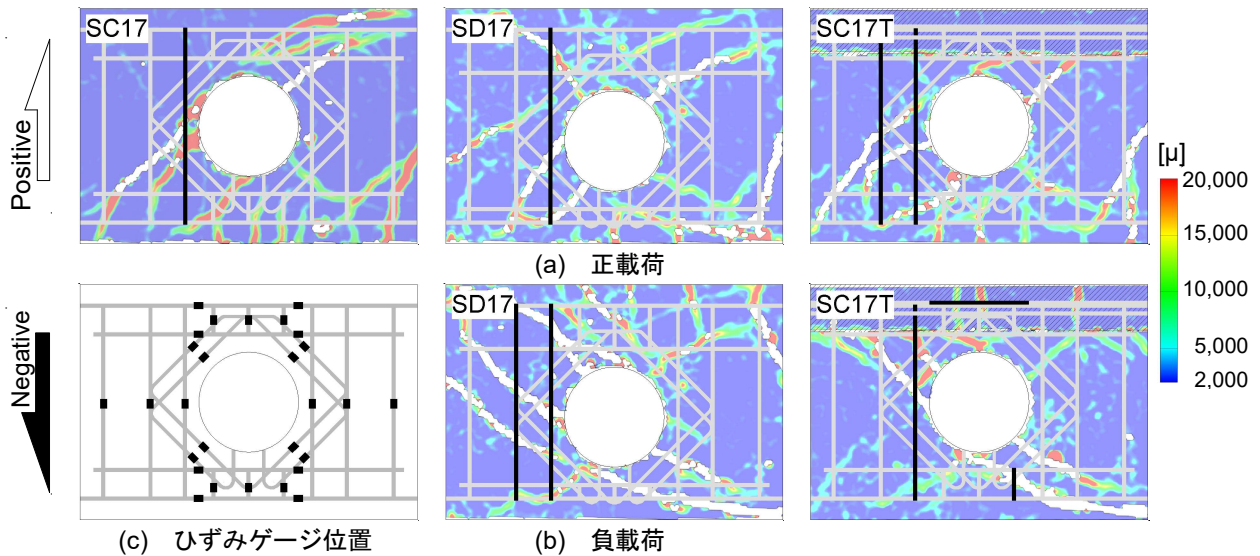


図5 R=1/100radの1サイクル目ピーク時における最大主ひずみ分布および鉄筋の降伏状況

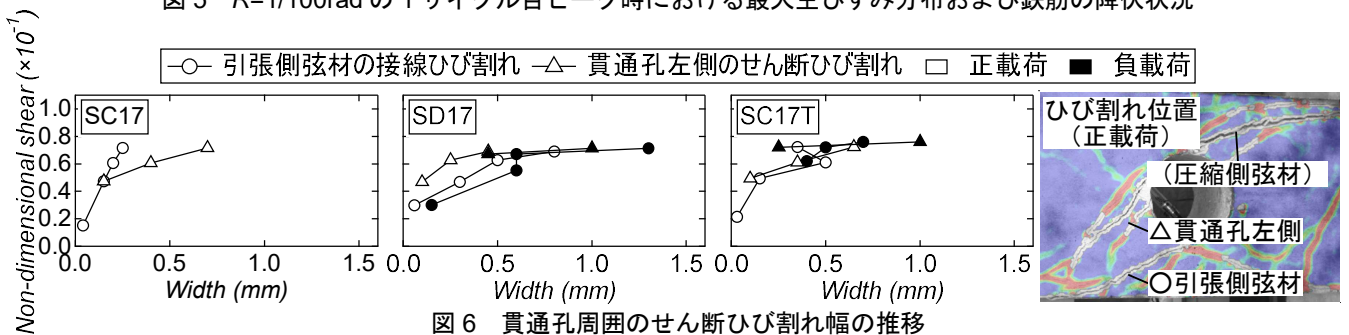


図6 貫通孔周囲のせん断ひび割れ幅の推移

ものと比べて低かった。しかし、1/133radの負荷荷に生じた圧縮側弦材の接線ひび割れに伴う剛性低下により、1/100radでは正・負荷荷のせん断耐力は同程度の値となった。

試験体 SD17 における正・負荷荷の最大耐力と基準試験体 SC17 の最大耐力 ($\tau_{max}/\sigma_B = 0.0716$)⁴⁾ に大きな差はみられなかった。一方で試験体 SC17T の正・負荷荷の最大耐力に大きな差はみられなかったものの、試験体 SC17 の最大耐力と比べて1割ほど高い結果となった。

3.2 貫通孔周囲のせん断ひび割れ幅の推移

図6にR=1/100radまでの1サイクル目ピーク時における貫通孔周囲のせん断ひび割れ幅の推移を示す。同図縦軸は図4と同様に無次元化せん断力とした。ひび割れ幅の計測にはクラックスケールを用いた。

基準試験体 SC17 およびスラブ付きの試験体 SC17T の正・負荷荷では、貫通孔左側に生じたせん断ひび割れが最も拡幅した。一方で梁下側に貫通孔のある試験体 SD17 では、引張側弦材に生じた接線ひび割れの拡幅が顕著にみられた。

試験体 SD17 の負荷荷に生じた引張側弦材の接線ひび割れは無次元化せん断力 0.06 程度まで正荷荷のものに比べて拡幅が認められた。しかし、前節に示したように当該試験体では、無次元化せん断力 0.06 程度となる 1/133rad まで負荷荷の剛性は正荷荷のものに比べて高かった。これは、負荷荷において貫通孔左側のせん断ひび割れの発生が正荷荷のものに比べて遅いことに対応するものと考えられる。一方で

試験体 SC17T では、正荷荷に生じた両ひび割れは負荷荷のものに比べて拡幅しており、前節に示した剛性の傾向と対応している。

3.3 貫通孔補強筋の応力推移

図7にR=1/100radまでの正・負荷荷1サイクル目ピーク時における引張側に配された貫通孔補強筋の応力推移を示す。応力の値は鉄筋の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。

負荷荷における試験体 SC17 および SD17 の左上を除き、各試験体ともに変形角の増加に伴う応力増加がみられるものの、補強筋の降伏は認められなかった。一方で負荷荷における試験体 SC17 の左上では、1/133rad から 1/100rad にかけて、試験体 SD17 の左上では、1/200rad から 1/133rad にかけて応力低下がみられた。これらは、当該箇所とは異なる右下(圧縮側弦材)の接線ひび割れ発生に起因するものである。

貫通孔左側における 1/100rad の正・負荷荷の応力は右側のものと比べて低くなる傾向が認められた。図5に示したように全試験体において左側の孔際補強筋の降伏が認められたことから、本論に示す試験体では貫通孔の左右において貫通孔補強筋および孔際補強筋の応力負担状況が異なるものと考えられる。

正荷荷における試験体 SD17 および SC17T の右上では、1/200rad 以降の応力は試験体 SC17 のものと比べて低い。一方で負荷荷における試験体 SC17T の右下では、試験体のせ

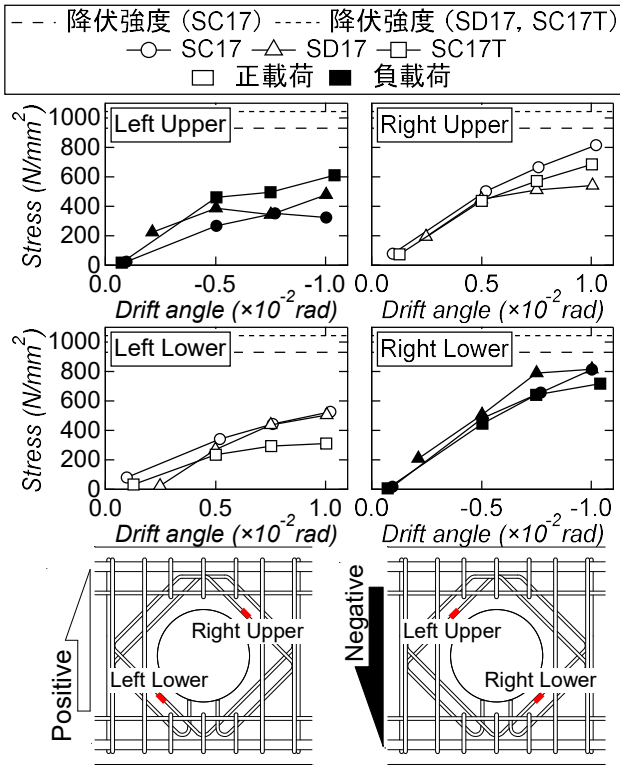


図7 貫通孔補強筋の応力推移

ん断力低下に伴い 1/100rad の応力は他の試験体のものと比べて低い結果となった。

4. 終局強度評価

表4に実験の最大耐力およびせん断終局強度の計算値の一覧を示す。ここで、最大耐力および計算値の比を強度比と呼称する。せん断終局強度は2つの手法により算出した。1つ目の手法として文献1)に示される式(1)により算定した。

$$Q_{su1} = \left\{ \frac{0.092k_u'k_p(\sigma_B+18)}{M/(Qd)+0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) \right\} b_j \quad (1)$$

$$+ 0.85 \sqrt{p_r \sigma_{ry} + p_s \sigma_{wy}}$$

2つ目の手法として文献5)に示される式(2)により算定した。当該手法は孔の斜め上下部を切り取った梁に対してトラスアーチ理論を適用したものである。

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

両式中の記号は文献1)および5)を参照されたい。

本論に示す試験体において、 Q_{su1} の強度比平均は1.2程度、 Q_{su2} の強度比平均は1.0程度となった。梁下側に貫通孔のある試験体SD17では、 Q_{su2} の強度比が0.9程度となり、 Q_{su2} の計算値は最大耐力を上回った。

梁せい中央に貫通孔のある試験体SC17およびSC17Tにおいて、式(1)では孔際補強筋および貫通孔補強筋のみ、式

表4 最大耐力および計算値の一覧 (単位: kN)

試験体		計算			強度比 (実験/計算)	
		Q_{max}	Q_{su1}	Q_{su2}	Q_{su1}	Q_{su2}
SC17	正	196	134	177	1.46	1.11
	負	173			1.29	0.98
SD17	正	164	152	182	1.08	0.90
	負	162			1.06	0.89
SC17T	正	176	140	169	1.26	1.04
	負	182			1.30	1.08

(2)ではそこに弦材あばら筋を加えた鉄筋の降伏強度が使用されている。しかし、図5に示したように試験体SC17Tの正載荷では、孔際補強筋の隣に配されたあばら筋にも降伏が確認され、当該補強筋も最大耐力に寄与している可能性を示した。また、図7に示したように貫通孔補強筋の降伏は確認されなかった。以上のことから、補強筋の降伏状況と最大耐力の対応の解明は今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究では、貫通孔の上下弦材が非対称となる基礎梁の構造性能の把握を目的とした静的載荷実験を実施した。本論より得られた知見を以下に示す。

- 1) 上下弦材が非対称な試験体の正・負載荷における最大耐力に顕著な差は認められなかった。
- 2) 上下弦材が非対称な試験体では、引張側弦材の断面積が大きい場合の剛性が圧縮側弦材の断面積が大きい場合のものに比べて高く、それに伴う損傷状況および補強筋の応力に差異がみられた。
- 3) 文献1)および5)に示される終局強度評価法は、本論に示す試験体のせん断補強筋および貫通孔補強筋の降伏状況と対応していない可能性を示した。

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) 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
- 3) 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
- 4) 佐藤弘都，鈴木卓，深津尚人，田口孝：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，コンクリート工学年次論文集，Vol. 47，No. 2，pp. 325-330，2025.6
- 5) 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実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 2，pp. 259-264，2011.7