

中開孔が近接した大開孔を有する RC 造基礎梁の実験的研究

Experimental Study on RC Footing Beams with Great Web Openings that Normal Web Openings Approached

村上 秀夫*1
Hideo Murakami

要旨

RC 造基礎梁には、人通孔（大開孔）とともに複数の設備配管孔（中開孔）が設けられることが多いが、梁貫通孔の間隔に関する一般的な構造規定により、貫通孔の設置範囲が大幅に制限されてきた。そこで、基礎梁の貫通孔配置の自由度を向上させるため、本研究では、2つの中開孔を大開孔に近接させた梁試験体の曲げせん断実験を実施して、せん断性状について評価した。その結果、大開孔と中開孔に挟まれた領域のせん断補強を十分に行えば、中開孔が近接した大開孔を有する基礎梁においても、既往の有孔梁のせん断強度式を用いて安全側にせん断強度を評価できることを示した。

キーワード：基礎梁 有孔梁 近接開孔 せん断強度

1. はじめに

RC 造建物の基礎梁には、人通孔（大開孔）とともに、電気や上下水等の設備配管を通すための複数の設備配管孔（中開孔）が設けられることが多い。その際、開孔の中心間隔は、隣接する開孔径の平均の3倍以上とすることが望ましいとされている¹⁾。しかしながら、一般に基礎梁は梁せいが大きいと、柱際のヒンジ領域を避けると開孔の設置可能な範囲が狭く、複数貫通孔を設ける必要がある場合には、配管計画が困難となる。

本研究は、基礎梁における貫通孔配置の自由度を向上させるために、開孔の間隔を緩和できるようにする（隣接する開孔径の平均の2倍程度にする）ことを目的とし、2つの中開孔を大開孔に近接させた梁試験体の曲げせん断実験

を実施した。そして、開孔が近接する RC 造基礎梁のせん断性状について評価した。なお、本報告は、2014 年度日本建築学会大会で発表した論文²⁾を加筆修正したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、梁両端部にスタブを有する形状とし、約 1/3 縮尺の基礎梁には、人通孔を模擬した大開孔 1つと設備用貫通孔を模擬した中開孔 2つの合計 3つの開孔を配置した。梁断面は $b \times D = 300 \times 750\text{mm}$ 、梁内法長さは $L = 2,250\text{mm}$ 、せん断スパン比は $a/D = 1.5$ ($a = L/2$) である。大開孔の直径は $250\text{mm} (= D/3)$ 、中開孔の直径は $125\text{mm} (= D/6)$ とした。

表 1 に試験体一覧、図 1 に試験体の配筋図を示す。試験

表 1 試験体一覧

試験体	開孔中心間距離	大開孔 $\phi 250$		中開孔 $\phi 125$		大開孔上下 (梁型補強)	■ 共通事項 梁断面： $b \times D = 300 \times 750\text{mm}$ 梁内法寸法： $L = 2,250\text{mm}$ 梁主筋： 上下共 8-D16 (熱処理品) 引張鉄筋比： $p_t = 0.77\%$ せん断補強筋： 4-D6@70 (SD295A) せん断補強筋比： $p_w = 0.60\%$ 孔際補強筋比： $p_s = a_s / (b \cdot c)$ 補強金物の補強筋比： $p_d = \sqrt{2} a_d / (b \cdot c)$ a_s ： 孔際補強筋の断面積 a_d ： 補強金物の断面積 c ： C区間距離 = 335mm 隣接する 2孔の直径平均値： $H = (250 + 125) / 2 = 187.5\text{mm}$
		孔際補強筋	補強金物	孔際補強筋	補強金物		
No. 1	562.5mm (3H)			4-D6 × 1組 + 2-D6 × 2組 $p_s = 0.25\%$		水平補強筋 2-D6	
No. 2	375mm (2H)	4-D6 × 3組 $p_s = 0.38\%$	2-S6 × 4枚 $p_d = 0.36\%$	4-D6 × 2組 $p_s = 0.25\%$	2-S8 × 2枚 $p_d = 0.28\%$	上下補強筋 2-D6 × 2組	
No. 3						なし	
No. 4		4-D6 × 1組 $p_s = 0.13\%$	2-S6 × 4枚 $p_d = 0.36\%$	4-D6 × 2組 $p_s = 0.25\%$	上下補強筋 2-D6 × 6組		
No. 5						4-D6 × 3組 $p_s = 0.38\%$	
No. 6	※No. 6 中開孔が上に125mm偏心						

*1 技術研究所

体は、No.1 から No.6 の 6 体であり、いずれも大開孔部のせん断破壊が先行するように、梁主筋は熱処理で製作した高強度材 8-D16 (980N/mm² 級、 $p_t=0.77\%$) を使用した。主な実験因子は、開孔間隔と大開孔周囲の補強筋量と補強方法 (図 1 の配筋例で示す孔際補強筋、補強金物、水平補強筋、開孔部上下補強筋) である。大開孔周囲の補強を中心にして各試験体の概要を以下に記す。なお、表 1 に示す孔際補強筋の補強筋比は、大開孔用と中開孔用に分別して取り扱うことにした。すなわち、図 1 の試験体 No.3 で C 区間 (開孔周囲の補強筋の有効な範囲) を示す斜め 45 度の線は 5 組の孔際補強筋と交差するが、大開孔用として 3 組、中開孔用として 2 組が有効であるとして、それぞれの補強筋比を算定している。

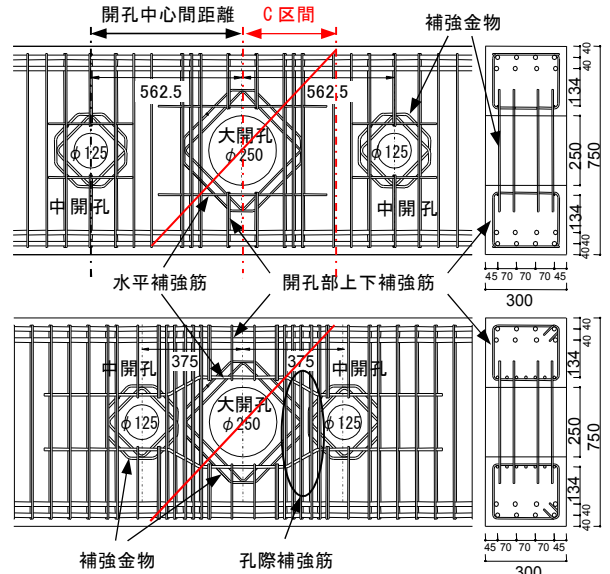


図 1 配筋図 (上: 試験体 No.1, 下: 試験体 No.3)

- No.1: 開孔の中心間距離は、隣り合う孔径平均の 3 倍とした。そして、各々の開孔の上下部分は、水平補強筋 (2-D6) を配し、コ形の開孔部上下補強筋で梁型を組んだ。
- No.2: No.1 に対して、開孔の中心間距離を孔径平均の 2 倍にして近接させた。大開孔と中開孔の間に配した孔際補強筋の総量は、試験体 No.1 と同じである。水平補強筋 (2-D6) は、折り曲げ加工し、3 つの開孔の上下を連続的に配した。
- No.3: No.2 に対して、水平補強筋を 7-D10 に増やし、閉鎖型の開孔部上下補強筋で梁型を組んだ。
- No.4: No.3 に対して、大開孔部の補強金物だけを無くした。
- No.5: No.3 に対して、大開孔と中開孔の間に配した孔際補強筋の総量を約 1/3 に減らした。
- No.6: No.3 に対して、2 つの中開孔を 125mm 梁上部に配置させた。

試験体に使用したコンクリートと鉄筋の特性をまとめて表 2 に示す。

表 2 使用材料の特性

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	鉄筋	使用部位	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (kN/mm ²)
No.1 No.2	30.8	27.6	D16	梁主筋	995	5462	182
			D6	せん断補強筋	381	4261	168
No.3 No.4	32.0	28.8	D10	水平補強筋	380	2129	179
			S6	補強金物	891	7038	177
No.5 No.6	33.7	28.8	S8			922	7111

* D6, S6, S8 は、0.2%オフセット法による



写真 1 加力装置

2.2 実験方法

写真 1 に加力装置を示す。加力は、建研方式の加力装置を用いて行い、梁部分に逆対称曲げモーメントが作用するようにジャッキを制御しながら、変位制御によりせん断力を与えた。

図 2 に加力スケジュールを示す。加力の制御は、部材角による制御とした正負交番繰り返しの漸増载荷を行い、 $R=1/1000\text{rad}$ で 1 回、 $R=2.5/1000\text{rad}$, $5/1000\text{rad}$, 大開孔部の短期許容せん断力 (Q_{A0S}) 時では各 2 回、 $R=10/1000\text{rad}$, $15/1000\text{rad}$, $20/1000\text{rad}$ では各 1 回の繰り返し载荷とした。

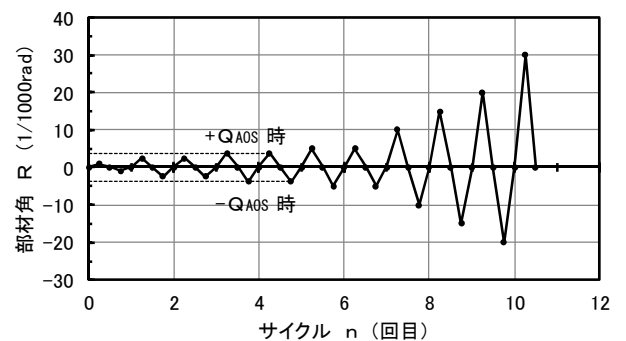


図 2 加力スケジュール

3. 実験結果

3.1 破壊経過と荷重変形関係

図3に各試験体のせん断力 Q —部材角 R 関係、写真2に破壊状況(破壊部位が明確になった部材角時)、表3に実験結果一覧をひび割れ発生位置の模式図とともに示す。ここで、図3中には、RC規準の曲げ略算式¹⁾による曲げ降伏時せん断力計算値(Q_{su01})および後述する大開孔のせん断耐力計算値(Q_{su01})を合わせて示す。

全試験体とも、 $R=1/1000\text{rad}$ の繰り返しで梁端部に曲げひび割れが発生し、大開孔と中開孔の孔際にせん断ひび割れが観察された。そして、 $R=2.5/1000\text{rad}$ の繰り返しでは一般部にせん断ひび割れが、 $R=5/1000\text{rad}$ の繰り返しにおいては開孔間と大開孔上下部分にせん断ひび割れが発生し、

$R=10/1000\text{rad}$ の繰り返しでは大開孔側の孔際補強筋と開孔部上下補強筋が降伏した。ひび割れの発生順については、開孔間隔、開孔周囲の補強筋量や中開孔の上部配置による影響はなかった。以後、試験体No.1,5は、開孔間の損傷が卓越し、開孔間がせん断破壊した。一方、試験体No.2,3,4,6は、大開孔の上下部分がせん断破壊し、急激な耐力低下が見られた。

試験体No.1,2を比較すると、最大耐力は開孔間隔の狭い試験体No.2の方が高くなった。これは、狭くなった開孔間部分が大開孔のC区領域内に存在し、この領域内に大開孔側の孔際補強筋と中開孔側の孔際補強筋が集約されて配筋していることによると考えられる。試験体No.2,3では、開孔上下部分を強固に梁型補強した試験体No.3の方が高くなった。大開孔周囲の補強筋比が異なる試験体No.3,4,5

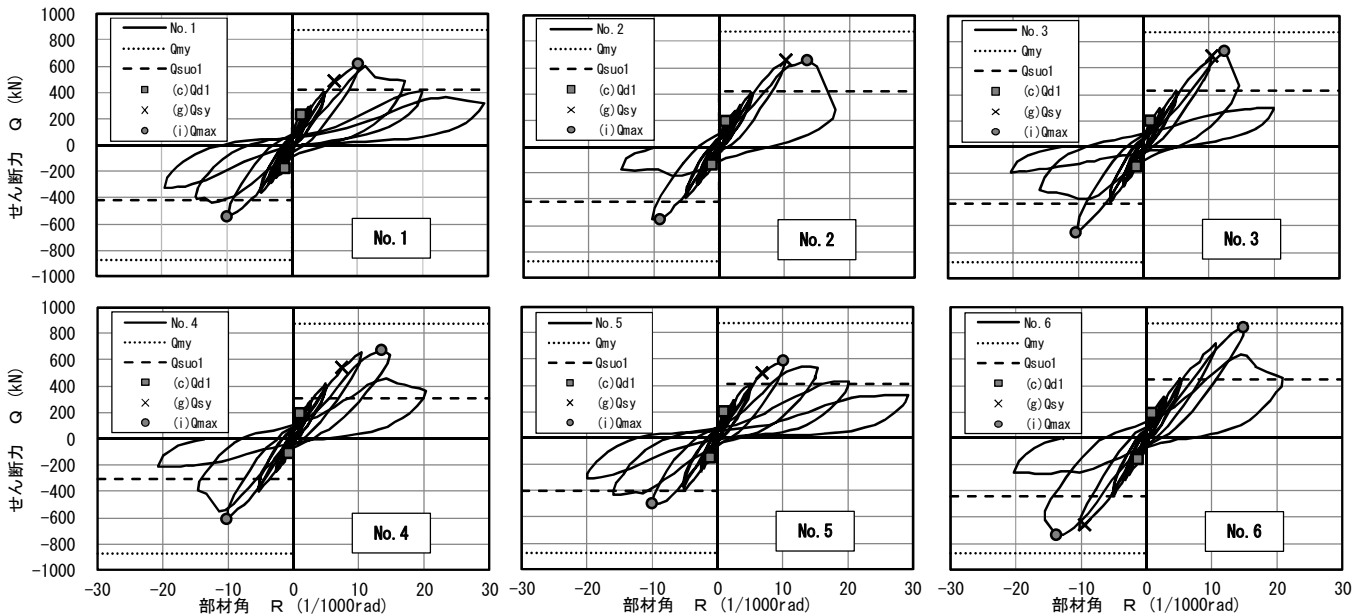


図3 せん断力(Q)—部材角(R)関係

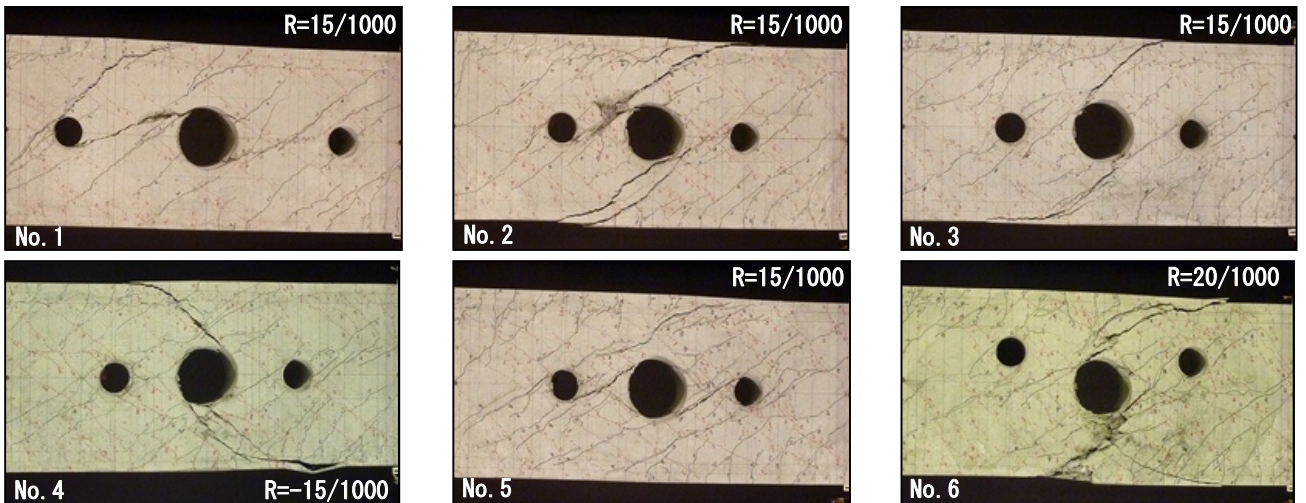


写真2 破壊状況

では、補強金物よりも開孔間に存在する補強筋の方が最大耐力に与える影響が大きくなった。中開孔位置が異なる試験体 No. 3, 6 では、中開孔を梁上部に配置した試験体 No. 6の方が高くなった。これは、中開孔が偏心して配置されることにより、開孔間のコンクリートの圧縮ストラットの形成状況が異なるためと考えられる。

3.2 鉄筋のひずみ性状

3.2.1 梁主筋のひずみ

梁主筋のひずみは、全試験体ともゲージ貼付位置では降伏ひずみには到達していない。このことから、図3の荷重変形関係で示したように、最大耐力が曲げ降伏時せん断力計算値 (Q_{my}) には達していないことと整合している。

3.2.2 補強筋のひずみ

補強筋のひずみは、図4に示すように、大開孔周辺の補強筋に貼り付けたひずみゲージで検討を行った。大開孔周囲の補強筋は、孔際補強筋 (S筋)、補強金物 (D筋)、水平補強筋 (H筋)、開孔部上下補強筋 (W筋) である。これらの補強筋の効き具合を比較するために、各ひずみ (ϵ) を降伏ひずみ (ϵ_y) で無次元化した。この無次元化した値を横軸にせん断力を縦軸にした関係を図5に示す。各補強筋ともに複数のひずみゲージを貼り付けているが、その中でも、最大耐力時にひずみが一番大きい箇所を採用して図示した。なお、図中の (●) は最大耐力時の値を示し、無次元化した値 (ϵ / ϵ_y) が 1.0 を超えたものは、降伏ひずみに到達したことを意味する。

表3 実験結果一覧

試験体	曲げひび割れ		斜めひび割れ				補強筋降伏		最大耐力
	(a) Q_{cr}	(b) Q_{sc}	(c) Q_{d1}	(d) Q_{d2}	(e) Q_{r1}	(f) Q_{tb}	(g) Q_{sy}	(h) Q_{wy}	(i) Q_{max}
No. 1	140	291	228	291	286	295	478	615	615
No. 2	160	271	185	271	314	314	651	543	655
No. 3	121	293	198	293	363	278	686	561	727
No. 4	113	392	187	187	421	368	542	658	671
No. 5	147	243	199	199	404	411	489	581	581
No. 6	175	274	193	205	454	395	-660	635	841

(単位: kN)

(a) Q_{cr} : 曲げひび割れ (b) Q_{sc} : 一般部せん断ひび割れ
 (c) Q_{d1} : 大開孔せん断ひび割れ (d) Q_{d2} : 中開孔せん断ひび割れ
 (e) Q_{r1} : 大開孔左部ひび割れ (f) Q_{tb} : 大開孔上下部ひび割れ
 (g) Q_{sy} : 孔際補強筋降伏 (h) Q_{wy} : 開孔部上下補強筋降伏
 (i) Q_{max} : 最大耐力

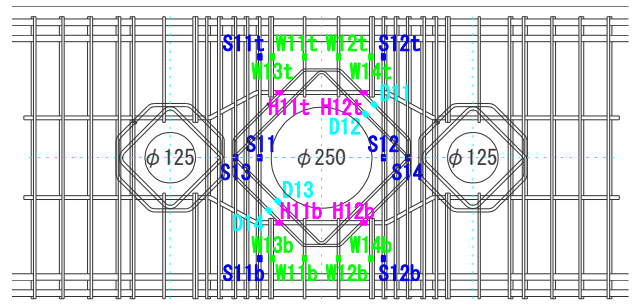


図4 大開孔周囲のゲージ貼付位置

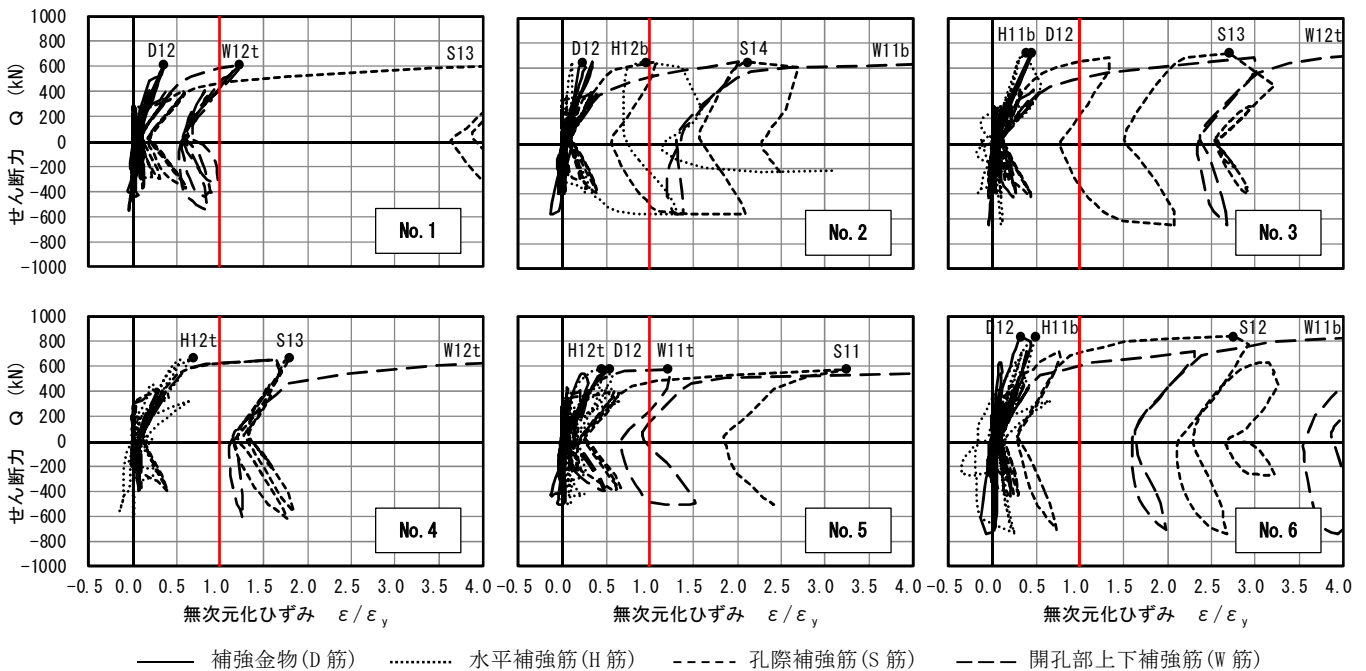


図5 せん断力 (Q) - 無次元化ひずみ (ϵ / ϵ_y) 関係

(1) 孔際補強筋 (S 筋)

孔際補強筋は、全試験体ともに徐々にひずみの値が増加し、最大耐力に到達する前に降伏している。開孔間隔が狭い場合、孔際補強筋の補強筋比が小さい試験体 No.5 は、他の試験体と比較して大きなひずみとなっており、最終破壊状況が大開孔と中開孔の開孔間の破壊であることに対応している。

(2) 補強金物 (D 筋)

補強金物は、高強度鉄筋 (785N/mm² 級) であり、降伏に至っていない。また、降伏ひずみで無次元化した値は、最大でも 0.5 程度である。孔際補強筋の補強筋比が異なる試験体 No.3 と No.5 を比較すると、無次元化したひずみの値には大きな差がないことがわかった。

(3) 開孔部上下補強筋 (W 筋)

開孔部上下補強筋は、最大耐力時に全試験体ともに降伏しており、開孔間で破壊をした試験体 No.1 と No.5 は、最大耐力時付近で降伏に達した。一方、他の試験体は、最大耐力に到達する以前に降伏しており、この補強筋は効果が高いと言える。これら 4 体の試験体の最終破壊状況は、開孔部上下の破壊となっている。

(4) 水平補強筋 (H 筋)

折り曲げ加工された水平補強筋を 3 つの開孔の上下に連続して配した場合、水平補強筋を 7-D10 とした試験体 No.3 ~6 の水平補強筋は未降伏であり、その中でも、補強金物のない試験体 No.4 の水平補強筋のひずみが若干大きくなった。一方、水平補強筋を 2-D6 にした試験体 No.2 では、最大耐力後に降伏している。

以上より、孔際補強筋と開孔部上下補強筋がせん断強度および最終破壊状況に影響があると考えられる。

3.3 大開孔周囲のひび割れ幅

大開孔の影響範囲 (C 区間の範囲) に発生し進展したせん断ひび割れを検討対象として、ひび割れ幅をクラックスケールで計測した。

所定部材角ピーク時 (1 回目) の最大ひび割れ幅を縦軸に、孔周囲の補強筋比 (p_s+p_d) を横軸にしたひび割れ幅の推移を図 6 に示す。ひび割れ幅は、部材角の増大とともに大きくなり、孔周囲の補強筋比が大きい試験体ほど、ひび割れ幅の拡幅が小さくなる傾向が見られた。

試験体 No.3 と補強金物がない試験体 No.4 と比較すると、No.4 のひび割れ幅が大きく、補強金物が開孔周囲のひび割れ幅の抑制に寄与していると考えられる。また、負加力時のひび割れ幅が正加力時よりも大きくなっているが、試験体 No.4 を除き、±2.5/1000rad 時までは 0.15mm 以下であった。±5/1000rad 時のひび割れ幅については、補強金物

のない試験体 No.4 と中開孔が上部に偏心して配置された試験体 No.6 の 2 体が 0.3mm を超えていた。

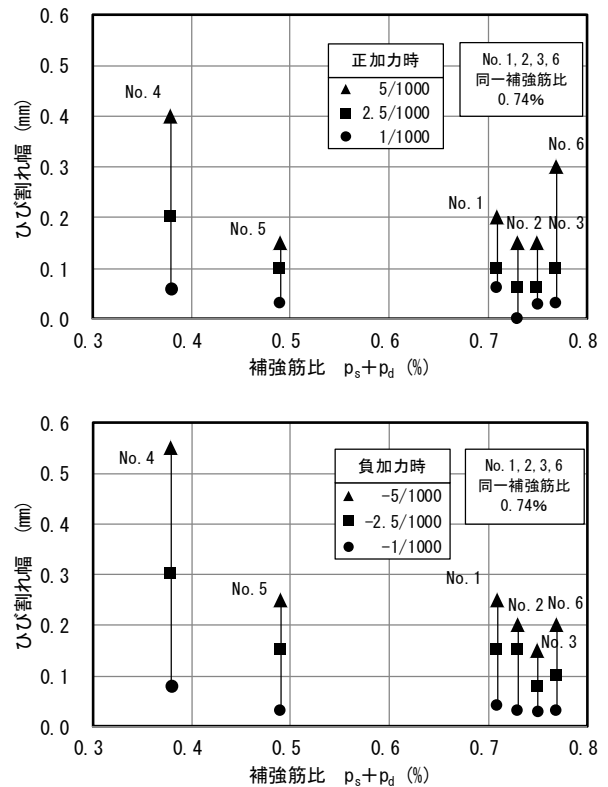


図 6 大開孔周囲のひび割れ幅推移 (ピーク時)

4. 開孔部のせん断強度

4.1 実験値と計算値の比較

表 4 に最大耐力実験値と大開孔の開孔部せん断強度計算値を、図 7 に実験値と計算値の比較を示す。算定式は式 (1) を用い、修正広沢式による単独孔の開孔部せん断強度式¹⁾を他の開孔が近接する場合にも適用できるとして準用した。

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

ただし、 $\sigma_B \leq 27$ の時、 $d \sigma_y, s \sigma_y \leq 20 \cdot \sigma_B$
 $27 < \sigma_B \leq 36$ の時、 $d \sigma_y, s \sigma_y \leq 40 \cdot \sigma_B - 540$
 $36 < \sigma_B$ の時、 $d \sigma_y, s \sigma_y \leq 25 \cdot \sigma_B$

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·d): せん断スパン比
 p_t: 引張鉄筋比 (%), H: 開孔径 (大開孔の径) (mm)
 p_d: 補強金物の補強筋比, p_s: 孔際補強筋比
 σ_B: コンクリート圧縮強度 (N/mm²)
 dσ_y: 補強金物の降伏強度 (N/mm²)
 sσ_y: 孔際補強筋の降伏強度 (N/mm²)

開孔中心間距離を双方の開孔径平均の3倍とした試験体 No.1 は、計算値に対する実験値の割合が1.46となり、実験結果を安全側に評価している。開孔中心間距離を双方の開孔径平均の2倍とした試験体については、2.1節にも記述したように、開孔間の補強筋が双方の開孔のC区間領域内に存在している。このため、開孔間の補強筋を大開孔側の孔際補強筋と中開孔側の孔際補強筋とに分別して算定した。その結果、実験値は計算値を上回り、計算値に対する実験値の割合 (Q_{max}/Q_{suo1}) は1.43~2.21となった。また、開孔間の補強筋を分別しない場合についても計算すると、計算値に対する実験値の割合 (Q_{max}/Q_{suo2}) は1.40~1.87となり、計算値は実験値を安全側に評価している。

表4 実験値と大開孔の開孔部せん断強度計算値

試験体	実験値 (kN)	計算値						実/計	
		(a) 分別する場合				(b) 分別しない場合		(a)	(b)
		P_d (%)	P_{s1} (%)	Q_{suo1} (kN)	P_d (%)	P_{s2} (%)	Q_{suo2} (kN)	$\frac{Q_{max}}{Q_{suo1}}$	$\frac{Q_{max}}{Q_{suo2}}$
No.1	615	0.36	0.38	421	0.36	0.38	421	1.46	1.46
No.2	655	0.36	0.38	421	0.36	0.63	456	1.55	1.44
No.3	727	0.36	0.38	431	0.36	0.63	465	1.69	1.56
No.4	671	0.00	0.38	304	0.00	0.63	358	2.21	1.87
No.5	581	0.36	0.13	406	0.36	0.19	416	1.43	1.40
No.6	841	0.36	0.38	444	0.36	0.63	478	1.90	1.76

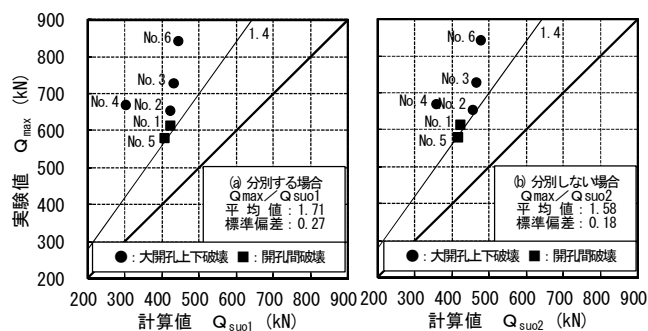


図7 実験値と計算値の比較

4.2 実験因子の影響

実験因子に対して、実験値と計算値の関係について検討する。ここでは、計算値は、開孔間の補強筋を分別しない場合 (P_{s2} 、 Q_{suo2}) に着目する。

試験体 No.2 は、No.1 に対して開孔が近接した試験体である。開孔が近接しても、計算値に対する実験値の割合は同程度であり、単開孔の梁と同様に計算値は実験値を安全側に評価している。

試験体 No.3 は、No.2 に対して開孔部上下補強筋と水平補強筋が多い試験体である。計算式にはこの補強効果が入っていないため、試験体 No.3 は No.2 に比べて計算値に対

する実験値の割合が大きくなっている。

試験体 No.4 は、No.3 に対して補強金物が無い試験体である。最大耐力は、No.3 と比べて小さくなるが、計算値に対しては、かなり安全側の評価を与えている。

試験体 No.5 は、No.3 に対して孔際補強筋が少ない試験体である。最大耐力は、No.3 と比べて小さくなるが、計算値は実験値を安全側に評価している。

試験体 No.6 は、No.3 に対して中開孔の配置が梁上部に偏心した試験体であるが、この場合も計算値は実験値を安全側に評価することを確認できた。

5. まとめ

中開孔を大開孔に近接させた梁試験体の曲げせん断実験により、RC 基礎梁のせん断性状について評価した。本実験の範囲内であるが、下記の知見が得られた。

- (1) 破壊形式は、開孔間のせん断破壊と大開孔上下部分のせん断破壊に区別された。
- (2) 孔際補強筋と開孔部上下補強筋は降伏しており、せん断強度の増大に有効に寄与した。
- (3) 補強金物は、開孔周囲のひび割れ幅の抑制に効果が見られた。
- (4) 大開孔の開孔部せん断強度は、修正広沢式による単独孔の開孔部せん断強度式を準用することにより、安全側に評価することができる。

謝辞

本研究は、民間企業12社(青木あすなる建設、浅沼組、奥村組、熊谷組、鴻池組、銭高組、東亜建設工業、飛鳥建設、長谷工コーポレーション、ピーエス三菱、三井住友建設、コーリョー建販)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へ深く感謝いたしますとともに、様々なご指導およびご教示を戴きました千葉大学大学院の和泉信之教授・博士(工学)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.74-77, pp.354-364、2010年版
- 2) 五十嵐治人、山下勝司、近藤祐輔ほか：中開孔が近接した大開孔を有するRC基礎梁の実験的研究(その1)~(その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV、pp.223-228、2014.9
- 3) コーリョー建販：ダイヤレンNS技術マニュアル、pp.18-21、2014.2