

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

建築本部

設計部

稲生雅史

概要：建築物の基礎梁には設備配管孔とともに人通孔を設けることが多いが、既往の設計規準・指針類の開孔間隔規定を適用すると、人通孔周囲の開孔配置は著しく制限される。そこで本研究では、鉄筋コンクリート基礎梁の開孔配置の自由度を向上させることを目的として、大開孔の両側に中開孔を近接させた RC 梁試験体の曲げせん断実験を行い、せん断性状について評価した。その結果、大開孔と中開孔で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により、せん断強度を安全側に評価できることを示した。

Key Words：鉄筋コンクリート、基礎梁、有孔梁、近接開孔、せん断強度

1. はじめに

建築物の基礎梁には設備配管孔とともに人通孔を設けることが多い。同一の梁に複数の開孔を設ける場合、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（日本建築学会，2010 年，RC 規準と略す）¹⁾では「中心間隔は孔径の 3 倍以上とすることが望ましい」とされており、人通孔のように径が大きい開孔を設けると周囲の開孔配置が著しく制限され、しばしば設備配管位置の制約を受ける。

本研究では、鉄筋コンクリート基礎梁の開孔配置の自由度を向上させることを目的として、大開孔（人通孔）の両側に中開孔（設備配管孔）を開孔径平均の 2 倍の中心間隔に近接させた RC 梁試験体の曲げせん断実験を行い、せん断性状について評価する。なお、本研究は青木あすなる建設、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る共同研究であり、本稿は本研究に関する既発表文献^{2)~5)}を引用したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧、図-1 に試験体 No.1 および No.3 の配筋図を示す。試験体数は 6 体で、梁両端部にスタブを有する形状とし、縮尺約 1/3 の梁部分に大開孔 1 つと中開孔 2 つ、合計 3 つの開孔を配置した。開孔周囲の補強には既製品の補強金物を使用した。補強金物は開孔中心から 45 度方向に対し、補強筋 2 本が交わるように構成されている。各試験体の説明を以下に示す。

No.1：開孔中心間隔を 562.5mm(隣合う開孔径平均の 3 倍)とした試験体。水平補強筋 2-D6 を各開孔の上下に個別配置した。開孔部上下補強筋はコ形の鉄筋を梁両側面から挿込んだ形状とし、水平補強筋に結束して梁型を組んだ。開孔間補強筋は C 区間(開孔心より 45 度方向に引いた直線が最外主筋心と交わる位置との距離)内の本数が大開孔で 12-D6、中開孔で 8-D6 となるようにした。



稲生雅史

表-1 試験体一覧

試験体	中心 間隔	大開孔 補強金物	中開孔 補強金物	開孔間 補強筋	水平 補強筋	備考
No.1	562.5 mm	2-S6-4 枚	2-S8-2 枚	4-D6-4 組 2-D6-2 組	2-D6(個別)	No.1 の水平補強筋は開孔ごとに個別配置
No.2	375 mm			4-D6-5 組	2-D6(連続)	No.6 は中開孔を梁上端側に 125mm 偏心 以下、共通事項 梁幅：300mm，梁せい：750mm， 内法スパン長さ：2,250mm， 大開孔直径：250mm， 中開孔直径：125mm， 梁主筋：上下ともに 8-D16(pt=0.77%)， 一般部あばら筋：4-D6@70(pw=0.6%)
No.3		7-D10 (連続)				
No.4				なし		
No.5				2-S6-4 枚	4-D6-1 組 2-D6-1 組	
No.6				4-D6-5 組		

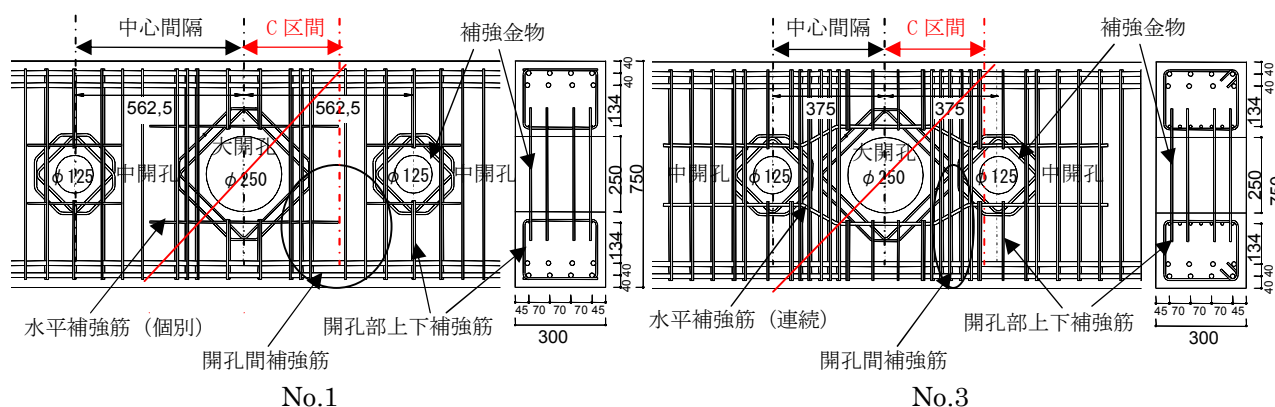


図-1 試験体配筋図

No.2：開孔中心間隔を 375mm(隣合う開孔径平均の 2 倍)とした試験体。開孔間補強筋本数は No.1 と同量の 20-D6 とした。水平補強筋は No.1 と同量の 2-D6 とするが、折曲げ加工により連続した形状とした。開孔部上下補強筋は No.1 と同様にコ形筋を組合せた形状とした。

No.3：No.2 に対して、水平補強筋の本数を 7-D10 とした試験体。開孔部上下補強筋の形状は閉鎖形とした。

No.4：No.3 に対して、大開孔の補強金物を除いた試験体。

No.5：No.3 に対して、開孔間補強筋本数を 6 本とした試験体。

No.6：No.3 に対して、中開孔を梁上端側に 125mm 偏心させた試験体。

いずれの試験体も大開孔部のせん断破壊が先行するように計画した。

表-2 に使用材料の特性を示す。梁主筋は D16 を使用し、曲げ降伏しないように熱処理を施した。開孔間補強筋、開孔部上下補強筋および一般部あばら筋は D6，水平補強筋は No.1，2 では D6，No.3~6 では D10 を使用した。いずれの鋼種も SD295 である。補強金物は KSS785 で大開孔に S6，中開孔に S8 を使用した。

表-2 使用材料の特性

鉄筋	降伏点	ヤング 係数	コンク リート	圧縮 強度	ヤング 係数
D16	995*	182,000	No.1, 2	30.8	27,600
D6	381	168,000	No.3, 4	32.0	28,800
D10	380	179,000	No.5, 6	33.7	28,800
S6	891*	177,000	*は 0.2%オフセット法による 単位：N/mm ²		
S8	922*	180,000			

2.2 実験方法

写真-1 に加力装置を示す。試験体は縦置きとし、梁部分に逆対称曲げモーメントが作用するように正負交番繰返しの漸増載荷を行った。基本加力計画を図-2 に示す。載荷履歴は部材角で制御し、1/1000rad を1回、1/400, 1/200rad, 大開孔部の短期許容せん断力 Q_{AOS} 相当時を各2回、1/100, 1/67, 1/50rad を各1回の繰返し載荷とした。



写真-1 加力装置

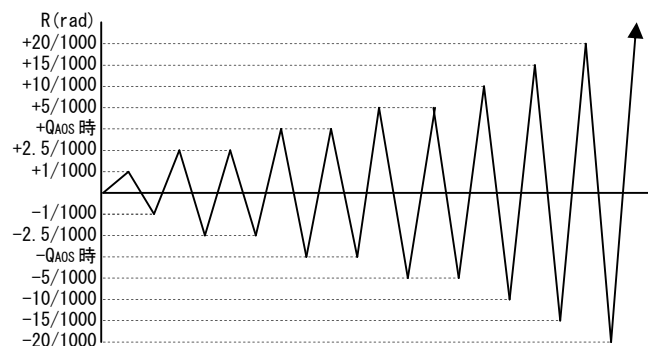


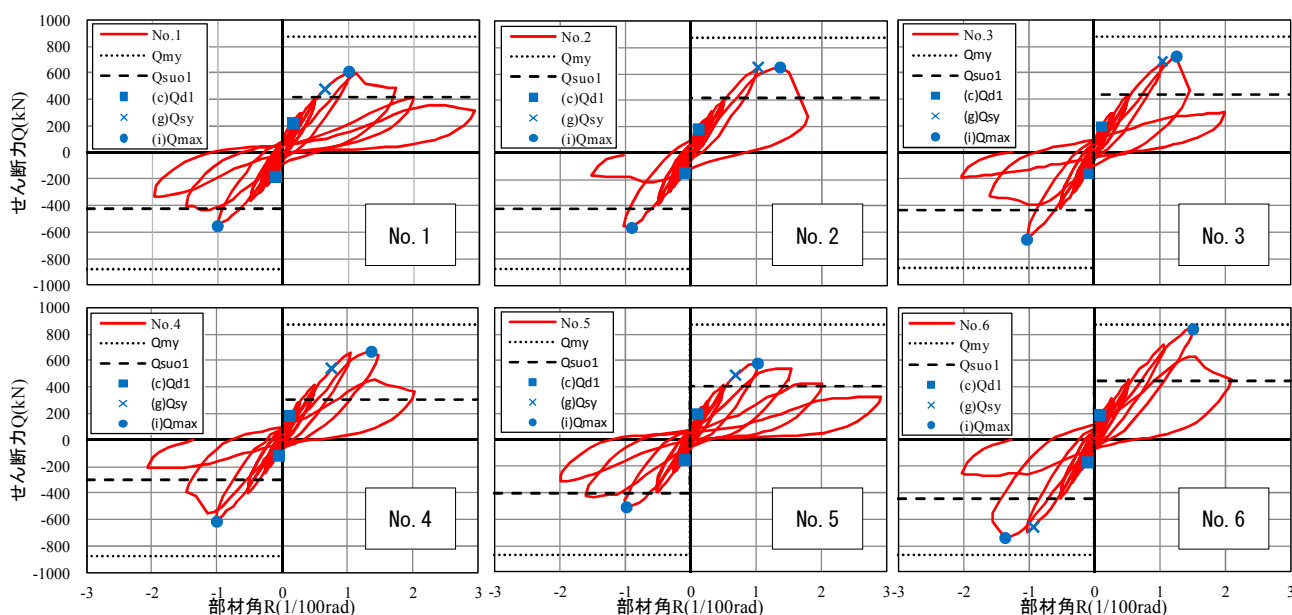
図-2 基本加力計画

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係と破壊状況

図-3 にせん断力 Q —部材角 R 関係、写真-2 に破壊状況、表-3 に実験結果一覧を示す。図-3 中の Q_{my} は RC 規準(解 8.21)式による曲げ降伏時せん断力, Q_{suo1} は 4.1 節の式(1)による大開孔部せん断強度計算値, Q_{d1} は大開孔部せん断ひび割れ発生, Q_{sy} は開孔間補強筋降伏, Q_{max} は最大耐力を示す。 $R=1/100rad$ までの状況は概ね同様であり、 $R=1/1000rad$ の繰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、 $R=1/400rad$ の繰返しで一般部にせん断ひび割れ、 $R=1/200rad$ の繰返しで開孔間と大開孔上下部にひび割れが発生し、 $R=1/100rad$ の繰返しでは大開孔側の開孔間補強筋と開孔部上下補強筋が降伏した。 $R=1/100rad$ 以後においては、試験体 No.1, 5 では開孔間の損傷が卓越しているのに対し、他の試験体では大開孔部の上下部分の損傷が大きく、最大耐力後に急激な耐力低下も見られた。

試験体によって破壊位置は異なるが、曲げ降伏時せん断力 Q_{my} には達していない、大開孔部せん断強度計算値 Q_{suo1} が上回っていること、および最大耐力以後のせん断力ゼロ付近でスリップ性状が見られることから、いずれの試験体も大開孔部でせん断破壊したものと判断した。

図-3 せん断力 Q —部材角 R 関係

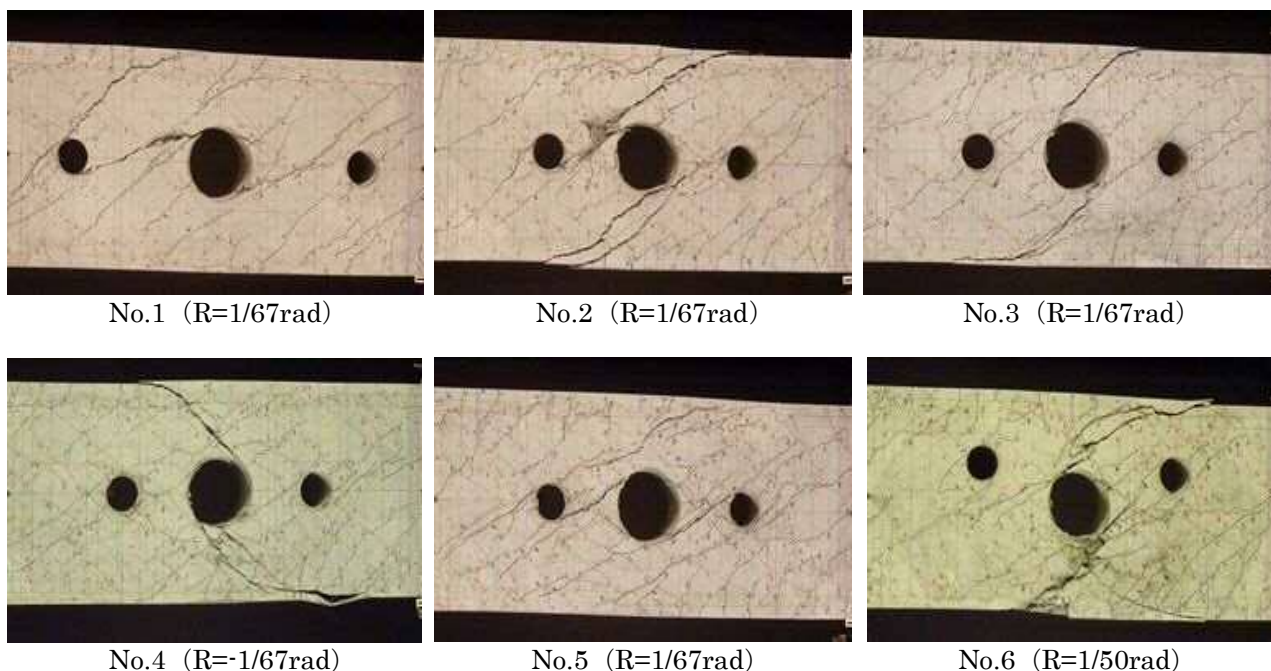
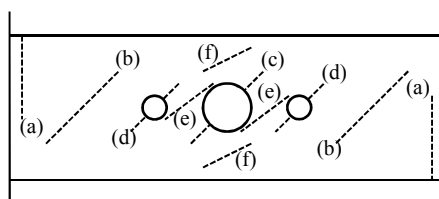


写真-2 破壊状況

表-3 実験結果一覧

試験体	曲げ	斜めひび割れ					鉄筋降伏		最大耐力
	(a)Q _{cr}	(b)Q _{sc}	(c)Q _{d1}	(d)Q _{d2}	(e)Q _{rl}	(f)Q _{tb}	(g)Q _{sy}	(h)Q _{wy}	
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_{rl}: 大開孔左右部ひび割れ (f)Q_{tb}: 大開孔上下部ひび割れ
 (g)Q_{sy}: 開孔間補強筋降伏 (h)Q_{wy}: 開孔上下部補強筋降伏 (i)Q_{max}: 最大耐力

3.2 最大耐力の比較

表-3 で示した最大耐力 Q_{max} について、実験因子ごとに比較する。試験体 No.1, 2 では開孔が近接した No.2 の方が高くなった。これは開孔間補強筋量が同量で、開孔間隔が狭まり、大開孔の C 区間内の補強筋量が増加したことによる影響と考えられる。試験体 No.2, 3 では開孔部上下補強筋と水平補強筋が多い No.3 の方が高くなった。補強筋量が異なる試験体 No.3~5 について見ると、補強金物よりも開孔間補強筋の補強量による耐力への影響が大きい。試験体 No.3, 6 では中開孔が偏心している No.6 の方が高く、開孔間コンクリートの圧縮ストラット形成状況の相違が影響したと考えられる。

3.3 鉄筋のひずみ性状

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達しておらず、試験体の最大耐力が曲げ降伏時せん断力 Q_{my} に達していないことと整合する。

図-4に大開孔周囲の補強筋に貼り付けたひずみゲージ位置を示す。大開孔周囲の補強筋は開孔間補強筋(S)、補強金物(D)、開孔部上下補強筋(W)、水平補強筋(H)で構成されている。図-5にこれらの補強筋のせん断力 Q —無次元化ひずみ関係を示す。横軸の無次元化ひずみは、各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 で無次元化した値である。無次元化ひずみが 1.0 以上になるということは降伏ひずみに達したことを意味する。各補強筋ともに複数のひずみゲージを貼り付けており、そのなかで最大耐力時にひずみが一番大きい箇所を図示した。なお、図中の▼印は最大耐力 Q_{max} を示す。各補強筋のひずみ性状の説明を以下に示す。

・開孔間補強筋

いずれの試験体も、開孔間補強筋のひずみはせん断力の増加とともに徐々に増加し、最大耐力に到達する前に降伏している。開孔間の補強筋比が小さい No.1 と No.5 は、他の試験体と比較して大きなひずみになっており、開孔間の損傷が卓越したことに対応している。

・補強金物

いずれの試験体の補強金物も降伏ひずみに達しておらず、無次元化ひずみは最大でも 0.5 程度である。開孔間補強筋が異なる No.3 と No.5 を比較しても、大きな差は見られなかった。

・開孔部上下補強筋

開孔部上下補強筋は最大耐力時に全試験体で降伏している。開孔間の損傷が卓越している No.1 および No.5 は最大耐力時付近で降伏ひずみに達している。一方、大開孔部の上下部分の損傷が大きい他の試験体は、早期からひずみが増加し、最大耐力に到達する以前に降伏している。

・水平補強筋

いずれの試験体の水平補強筋も最大耐力時には降伏ひずみに達していない。No.2 の水平補強筋は 2-D6 で他より補強量が少なく、最大耐力後に降伏した。一方、No.3～6 の水平補強筋は 7-D10 であり、最大耐力後も降伏ひずみに達していない。また、大開孔に補強金物がない No.4 の水平補強筋のひずみは No.3～No.6 の試験体の中では若干大きい値となった。

以上より、開孔間補強筋と開孔部上下補強筋は最大耐力および破壊状況に影響を及ぼしていると考えられる。

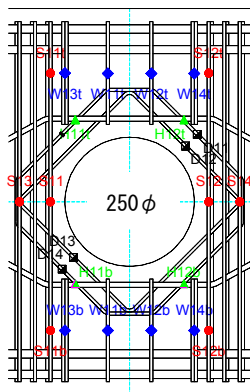


図-4 ひずみゲージ位置

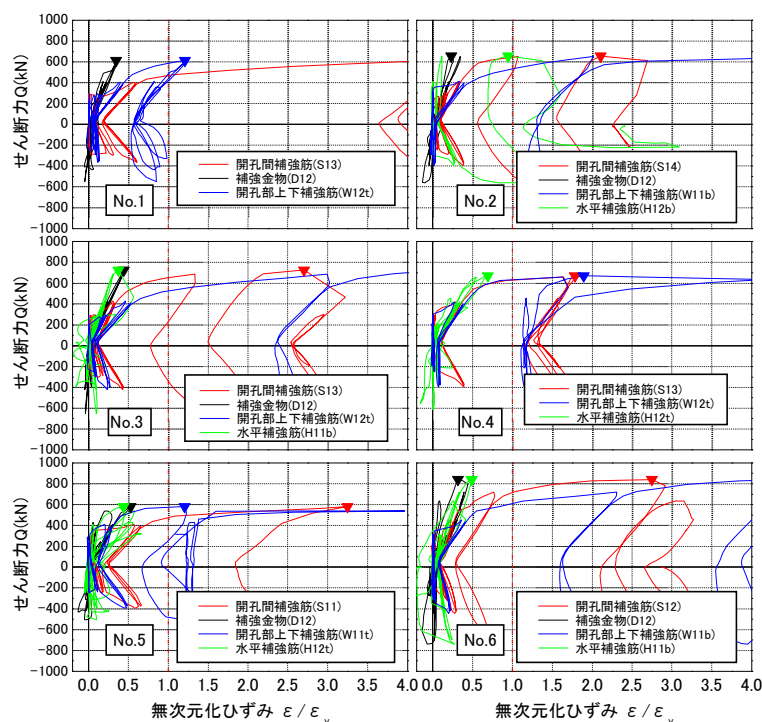


図-5 せん断力 Q —無次元化ひずみ関係

3.4 大開孔周囲のひび割れ幅

検討対象とするひび割れは大開孔の C 区間内に発生，進展した，せん断ひび割れおよび曲げせん断ひび割れとする．ひび割れ幅はクラックスケールにより目視計測した値とする．

図-6 に大開孔周囲のひび割れ幅の推移を示す．横軸の p_{wo} は補強金物の補強筋比 p_{wd} と 4 章で説明する孔周囲あばら筋比 p_{ws1} の合計補強筋比，図中の 1/400(1)および 1/200(1)rad は各部材角の 1 回目のサイクル時を示す．ひび割れ幅は部材角の増大とともに大きくなっているが， p_{wo} が大きいほど，ひび割れ幅の拡幅が小さい傾向にある．大開孔に補強金物がない No.4 および中開孔が偏心配置された No.6 においては 1/200rad で 0.3mm を超えるひび割れ幅となった．

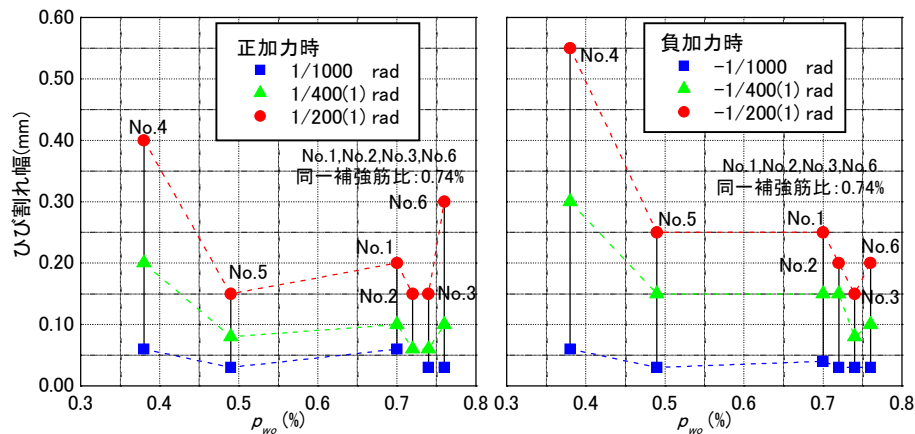


図-6 大開孔周囲のひび割れ幅の推移

4. せん断強度

4.1 実験値と計算値の比較

式(1)にせん断強度式を示す．式(1)は単開孔梁のせん断終局強度式である RC 規準(解 22.3)式について，補強金物の降伏強度 $d\sigma_y$ および孔周囲あばら筋の降伏強度 $s\sigma_y$ をコンクリート強度 σ_B の関数で制限した式である．

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

ただし， $\sigma_B \leq 27$ の時， $d\sigma_y, s\sigma_y \leq 20\sigma_B$

$27 < \sigma_B \leq 36$ の時， $d\sigma_y, s\sigma_y \leq 40\sigma_B - 540$

$36 < \sigma_B$ の時， $d\sigma_y, s\sigma_y \leq 25\sigma_B$

ここで， b : 梁幅(mm)
 D : 梁せい(mm)
 d : 有効せい(mm)
 j : 応力中心間距離(mm)

$M/(Q \cdot d)$: せん断スパン比

p_t : 引張鉄筋比(%)

H : 開孔径(mm)

σ_B : コンクリート圧縮強度(N/mm²)

p_{wd} : 補強金物の補強筋比

p_{ws} : 補強金物の降伏強度(N/mm²)

$d\sigma_y$: 孔周囲あばら筋比

$s\sigma_y$: 孔周囲あばら筋の降伏強度(N/mm²)

表-4 に最大耐力実験値と大開孔部のせん断強度計算値、図-7 に実験値と計算値の比較を示す。ここで、No.1 を除く近接開孔試験体の孔周囲あばら筋比 p_{ws} は、開孔間補強筋を大開孔側と中開孔側に分別する p_{ws1} 、図-1 の C 区間内の開孔間補強筋比による p_{ws2} の 2 通りについて求め、それぞれ計算値 Q_{suo1} および Q_{suo2} を算定した。計算値に対する実験値の比は Q_{max}/Q_{suo1} で 1.43~2.21, Q_{max}/Q_{suo2} で 1.40~1.87 となり、いずれも実験値が計算値を上回り、安全側の耐力評価となった。

表-4 最大耐力実験値と大開孔部のせん断強度計算値

試験体	実験値 Q _{max} (kN)	大開孔部補強筋比			計算値		実験値／計算値	
		p _{wd} (%)	p _{ws1} (%)	p _{ws2} (%)	Q _{suo1} (kN)	Q _{suo2} (kN)	$\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{suo1}}}$	$\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{suo2}}}$
No.1	615	0.36	0.38	0.38	421	421	1.46	1.46
No.2	655			421	456	1.55	1.44	
No.3	727			0.63	431	465	1.69	1.56
No.4	671	0.00	304		358	2.21	1.87	
No.5	581	0.36	0.13	0.19	406	416	1.43	1.40
No.6	841		0.38	0.63	444	478	1.90	1.76

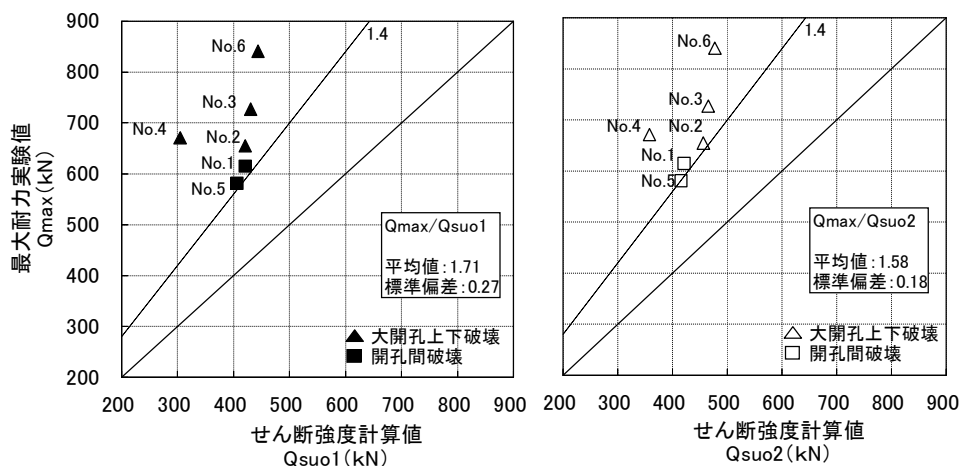


図-7 実験値と計算値の比較

4.2 実験因子ごとの比較

表-4 で示した実験値と計算値について、実験因子ごとに比較する。計算値は孔周囲あばら筋比を C 区間内の開孔間補強筋比とする場合 (p_{ws2} , Q_{suo2}) について見る。

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比は同程度であり、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。実験値は No.3 の方が高く、(1)式にこれらの補強筋による効果が考慮されていないため、計算値はほぼ同じであり、計算値に対する実験値の比は No.3 の方が大きくなった。

試験体 No.4 は No.3 に対して補強金物がない試験体である。No.4 の方が実験値、計算値ともに低い、実験値に比べて計算値の低下が大きいため、計算値に対する実験値の比は No.4 の方が大きくなった。

試験体 No.5 は No.3 に対して孔周囲あばら筋比が小さい試験体である。No.5 の方が実験値、計算値ともに低い、計算値に比べて実験値の低下が大きいため、計算値に対する実験値の比は No.5 の方が小さくなった。

試験体 No.6 は No.3 に対して中開孔が梁上部に偏心した試験体である。No.6 の方が実験値は高く、補強金物の補強筋比および孔周囲あばら筋比が変わらないため、計算値はほぼ同じであり、計算値に対する実験値の比は No.6 の方が大きくなった。

5. まとめ

中開孔を大開孔に近接させた RC 梁試験体の曲げせん断実験を行い、せん断性状について評価した。本実験の範囲内では、以下の知見が得られた。

- ・破壊位置は開孔間と開孔上下の 2 種類が見られた。
- ・開孔間補強筋と開孔部上下補強筋は最大耐力および破壊状況に影響を及ぼしていると考えられる。
- ・補強金物に開孔部せん断ひび割れ幅の抑制効果が見られた。
- ・開孔間のせん断補強を十分に行えば、既往の単開孔梁のせん断強度式により実験値に対して安全側に耐力評価できる。

謝辞

本研究の御指導を賜りました和泉信之教授（千葉大学大学院），ならびに共同研究者各位に厚く御礼申し上げます。

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
- 2) 濱田真，五十嵐治人，村上秀夫，和泉信之：中開孔が近接した大開孔を有する RC 基礎梁のせん断性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.133-138，2014 年 7 月
- 3) 五十嵐治人，細矢博，濱田真，猪飼吉宏，江頭寛，岩倉知行，和泉信之：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) 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，構造Ⅳ，pp.223-224，2014 年 9 月
- 4) 山下勝司，波田雅也，村上秀夫，森和久，平田延明，稲生雅史，和泉信之：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 2) 実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，構造Ⅳ，pp.225-226，2014 年 9 月
- 5) 近藤祐輔，波田雅也，山下勝司，細矢博，村上秀夫，平田延明，和泉信之：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 3) 鉄筋のひずみとひび割れ幅，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，構造Ⅳ，pp.227-228，2014 年 9 月