

論文 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に及ぼす開孔間の補強筋量および内法スパン比の影響

平田 延明*1・五十嵐 治人*2・村上 秀夫*3・和泉 信之*4

要旨: 鉄筋コンクリート造の基礎梁において、人通孔に近接して設備配管等のための貫通孔を設けることを想定し、中開孔が近接した大開孔を有する有孔梁のせん断性状を把握することを目的とした、曲げせん断実験を実施した。主な実験因子は開孔間の補強筋量、コンクリート強度、内法スパン比、梁せいである。実験結果から、破壊形式は2種類に大別され、どちらの場合でも既往の有孔梁のせん断強度式により安全側に評価できることを示した。また、孔周囲あばら筋や開孔部上下補強筋は、開孔補強として有効であることを示した。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 基礎梁, 人通孔, 有孔梁, 近接開孔, せん断強度

1. はじめに

基礎梁には人通孔や設備配管用の貫通孔など、複数の開孔が設けられる。日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(以下、RC規準と表す)では、梁に複数の貫通孔を設ける場合、隣接する2孔の開孔中心間隔(以下、開孔間隔と表す)は直径の3倍以上とすることが推奨される¹⁾。しかしながら、多数の開孔が設けられる基礎梁においては、開孔間隔の確保が困難である場合も少なくない。

こうした状況をふまえ筆者らは、人通孔に設備配管用の貫通孔が近接することを想定し、中開孔が近接した大開孔の補強方法を検討してきた。既報²⁾では、(1)大開孔と中開孔の開孔間隔を、両者の直径平均値の2倍とした場合でも、既往の評価式により開孔部のせん断強度を安全側に評価できること、(2)中開孔が近接する大開孔の補強として、開孔間に配筋される補強筋、開孔上下に配筋される補強筋が有効であることなどを示した。

今回新たに、開孔間の補強筋量、内法スパン比およびコンクリート強度等の影響について確認するための実験を実施した。本稿ではその概要を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は実大の約1/3縮尺の鉄筋コンクリート造基礎梁5体で、主な実験因子は、開孔間に配筋される補強筋量、コンクリート強度、内法スパン比(Lo/D)、大開孔の開孔径と梁せいの比(H/D)である。表-1に試験体一覧を示す。

大開孔の直径は250mm、中開孔は125mmであり、大開孔をスパン中央、中開孔をその左右に設ける。開孔間隔は両者の直径平均値の2倍(375mm)とした。開孔部の補強として、各開孔とも既製の補強金物、開孔部上下補強筋、孔周囲あばら筋を配筋する。孔周囲あばら筋とは、各開孔のC区間に配筋されるあばら筋を示す。大開孔の

表-1 試験体一覧

試験体	梁断面 b×D×Lo (Lo/D)	開孔径		Fc	大開孔		中開孔		開孔間の補強筋量	水平補強筋	共通事項
		大開孔 (H/D)	小開孔 (H/D)		孔周囲あばら筋	補強金物	孔周囲あばら筋	補強金物			
No.11	300×750 ×2250 (3.0)	250 (1/3)	125 (1/6)	30	4-D6 5組 (SD295A)	S6 4枚 (KSS785) pwd=0.36%	4-D6 4組 (SD295A)	S8 2枚 (KSS785) pwd=0.28%	4-D6 5組	2-D6 (SD295A)	・梁主筋:上下とも8-D16(熱処理品) ・引張鉄筋比:pt=0.77%(No.15のみ0.56%) ・開孔の中心間隔:375mm ・一般部せん断補強筋:4-D6@70(SD295A) ・一般部せん断補強筋比:pw=0.60% ・開孔部上下補強筋 大開孔:2-D6 2組 中開孔:2-D6 1組
No.12				21	4-D6 3組 (SD295A) pws=0.38%		4-D6 3組 (SD295A) pws=0.38%		4-D6 3組		
No.13				30	4-D6 5組 (SD295A) pws=0.63%		4-D6 4組 (SD295A) pws=0.50%		4-D6 5組		
No.14				30	4-D6 5組 (SD295A) pws=0.63%		4-D6 4組 (SD295A) pws=0.50%		4-D6 5組		
No.15	300×1000 ×1800 (1.8)	250 (1/4)	125 (1/8)	30	4-D6 5組 (SD295A) pws=0.46%	S6 4枚 (KSS785) pwd=0.26%	4-D6 5組 (SD295A) pws=0.46%	S8 2枚 (KSS785) pwd=0.20%	4-D6 5組	2-D10 (SD295A)	

*1 (株)長谷工コーポレーション 技術研究所 (正会員)

*2 (株)銭高組 技術本部 技術研究所

*3 (株)鴻池組 技術研究所 (正会員)

*4 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻教授 博(工) (正会員)

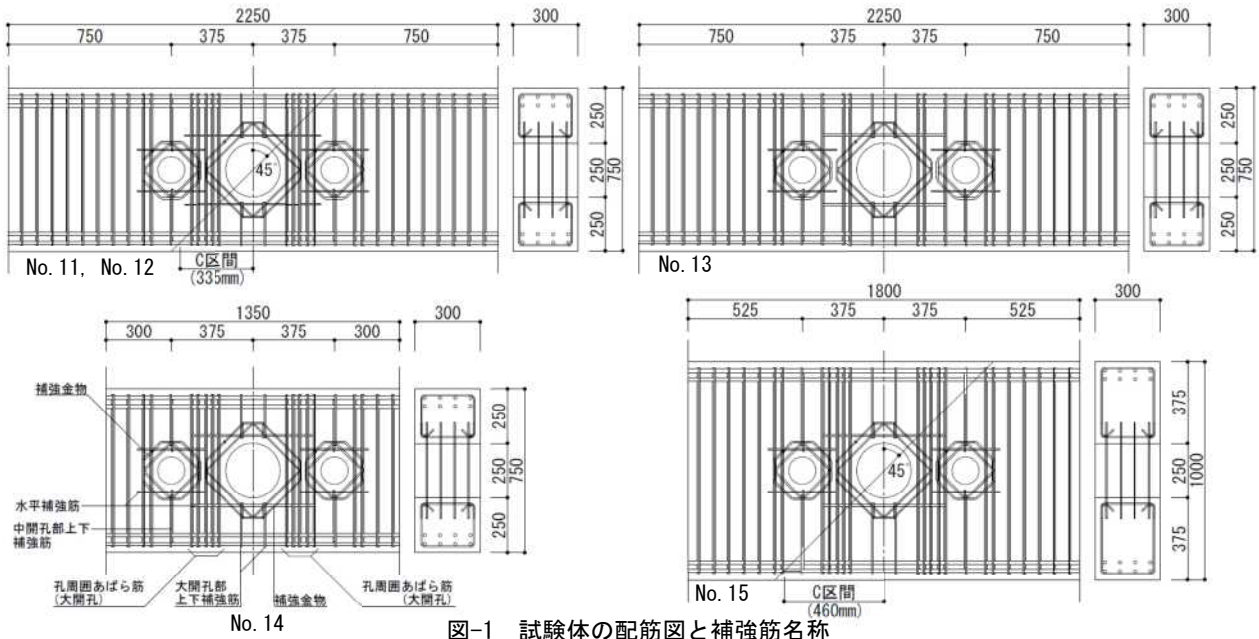


図-1 試験体の配筋図と補強筋名称

表-2 材料試験結果

試験体	目標強度 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	割裂強度 N/mm ²
No.11	30	28.7	27.2	2.62
No.12	21	19.7	24.7	1.70
No.13	30	31.0	27.3	2.57
No.14		29.5	26.9	2.51
No.15		31.7	28.1	2.70

種別	使用部位	降伏強度*1 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	破断伸び %
D16(熱処理品)	梁主筋	995	1038	7.8
D6(SD295A)	せん断補強筋*2	380	516	14.5
D10(SD295A)	水平補強筋	377	517	15.0
S6(KSS785)	補強金物	936	1166	10.8
S8(KSS785)	補強金物	986	1146	8.3

*1: D6, S6, S8は0.2%オフセット法による

*2: No.11のみ水平補強筋もD6

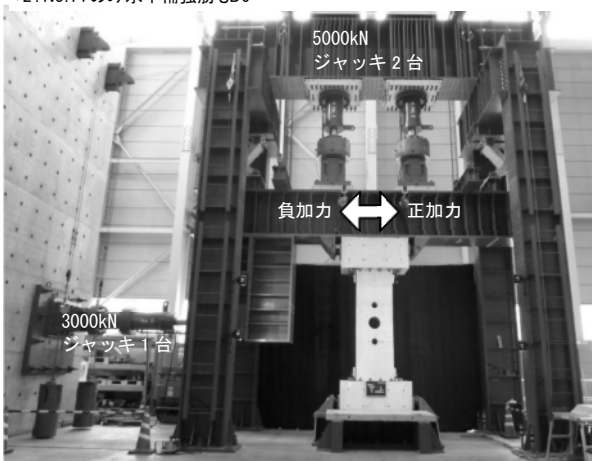


写真-1 载荷装置全景

C区間はNo.11~14は335mm, No.15のみ460mmである。図-1に試験体の配筋図と補強筋の名称を示す。なお、C区間とは、開孔中心より45度方向に引いた直線が最外縁の鉄筋芯と交わる位置と、開孔中心との水平距離である。

No.11は基準試験体であり、既報²⁾の試験体No.2とは水平補強筋の形状が異なる。No.2においては、水平補強筋は折曲・連続して配置したが、No.11では直筋により各開孔に個別に配筋した。

No.12は、No.11のコンクリート強度 F_c30 を、 F_c21 とした。No.13は、No.11の開孔間に配筋される補強筋4-D6(5組)を4-D6(3組)とした。No.14は、No.11の内法スパン比($L_o/D=3.0$)を、 $L_o/D=1.8$ としたものである。また、No.15は、開孔径および開孔間隔は、No.11~14と同一で、梁せいを $D=1000\text{mm}$ 、内法スパンを $L_o=1800\text{mm}$ とした。内法スパン比はNo.14と同一の $L_o/D=1.8$ で、大開孔の開孔径と梁せいの比(H/D)は、 $H/D=1/4$ である。

試験体に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を、表-2に示す。各試験体とも、開孔部でせん断破壊させるため、梁主筋には降伏強度 980N/mm^2 級の熱処理品を使用した。また、一般部のせん断耐力は、荒川mean式³⁾により算出し、No.11において4章に示す修正広沢式⁴⁾による開孔部のせん断耐力の1.3倍程度となるように、補強筋量を定めた。

2.2 実験方法

実験には写真-1に示す建研式逆対称加力装置を用い、部材角(以下、 R と表す) $R=1/1000\text{rad}$ を1回、 $R=1/400$ 、 $1/200\text{rad}$ 、および大開孔の短期許容せん断力相当の荷重を各2回、 $R=1/100$ 、 $1/67$ 、 $1/50$ 、 $1/33\text{rad}$ を各1回ずつ、正負繰り返し加力を行った。なお、短期許容せん断力はRC規準22条の(解22.2)式により算定した。

3. 実験結果

3.1 荷重—変形関係と破壊経過

図-2に各試験体の荷重—部材角関係を示す。図中には

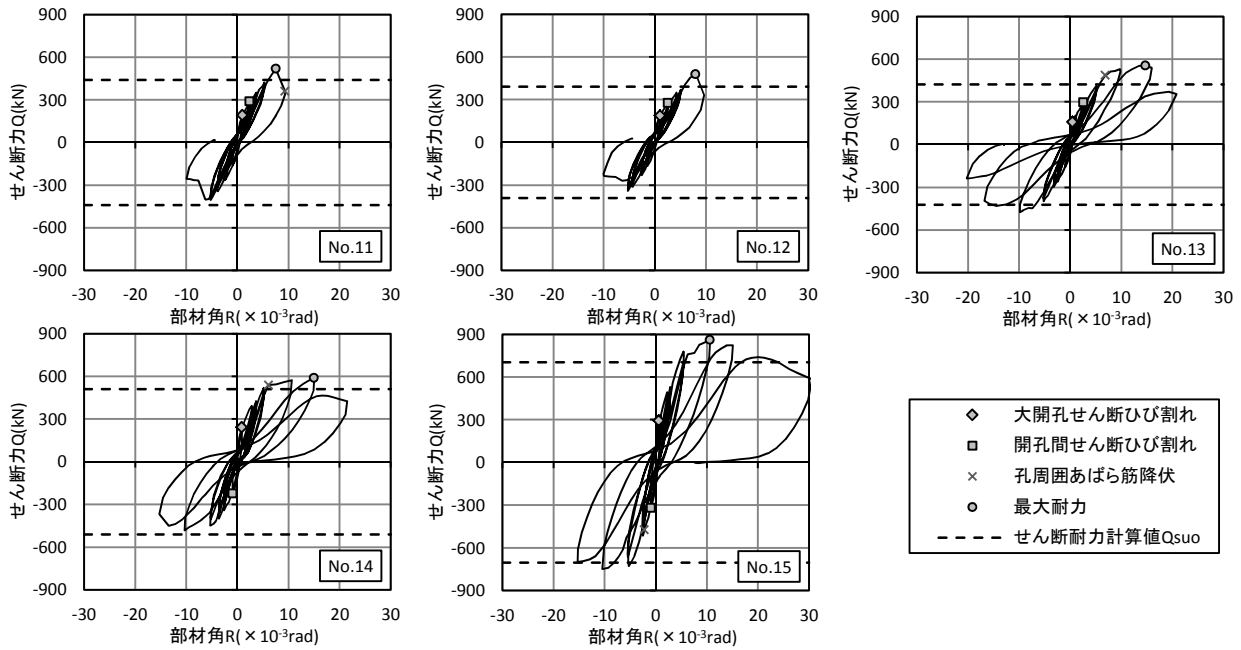


図-2 荷重—部材角関係

表-3 主な実験経過とひび割れ模式図

試験体	せん断ひび割れ						補強筋降伏				最大耐力	
	(a)大開孔		(b)開孔間		(c)大開孔上下		孔周囲あばら筋		大開孔部上下補強筋		荷重 kN	部材角 $\times 10^{-3}$ rad
	荷重 kN	部材角 $\times 10^{-3}$ rad	荷重 kN	部材角 $\times 10^{-3}$ rad	荷重 kN	部材角 $\times 10^{-3}$ rad	荷重 kN	部材角 $\times 10^{-3}$ rad	荷重 kN	部材角 $\times 10^{-3}$ rad		
No.11	190	1.0	287	2.4	287	2.4	359	9.3	481	6.7	517	7.5
No.12	186	1.0	274	2.6	274	2.6	-	-	478	8.0	478	8.0
No.13	157	0.5	294	2.6	294	2.6	485	6.9	516	8.8	553	14.7
No.14	241	0.9	-224	-0.9	393	2.8	539	6.1	-437	-4.7	588	15.0
No.15	292	0.6	-322	-0.9	-473	-2.2	727	4.8	770	7.5	861	10.6

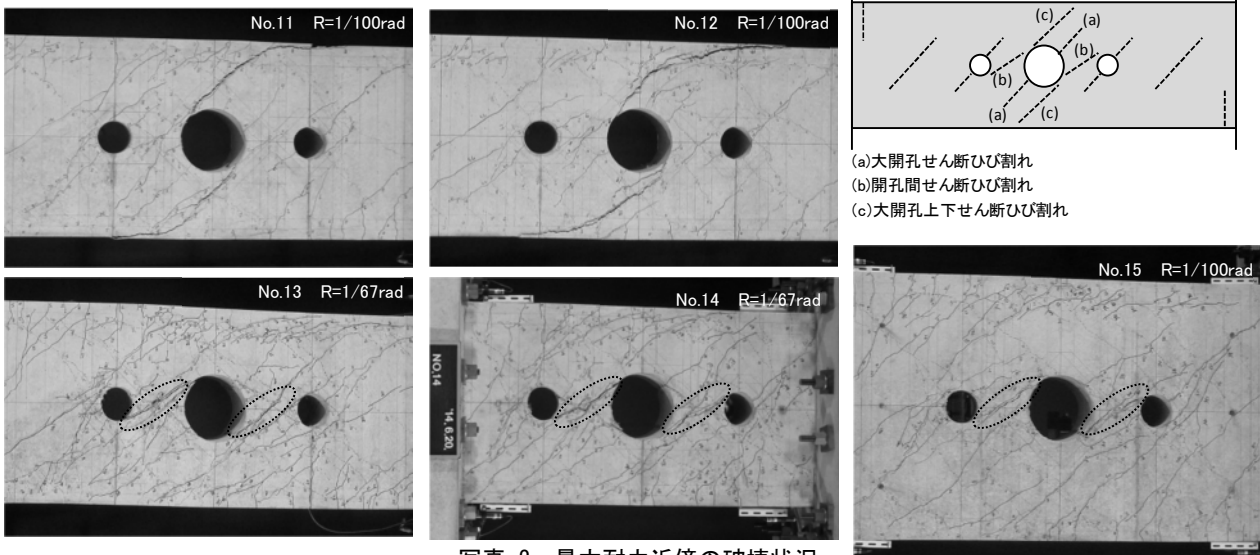


写真-2 最大耐力近傍の破壊状況

4章で述べる大開孔のせん断耐力計算値を破線で示す。また、写真-2に最大耐力時近傍の破壊状況、表-3に主な実験経過とひび割れ模式図を示す。なお、写真-2ではNo.13～No.15の破壊性状を判断する根拠とした開孔間のせん断ひび割れを点線で囲んで示す。

各試験体共通して、 $R=1/1000$ radのサイクルで、梁両端部に曲げひび割れが生じた後、大開孔および中開孔に

せん断ひび割れが生じた。次に、 $Lo/D=1.8$ としたNo.14～15は $R=1/1000$ rad、その他の試験体は $R=1/400$ radのサイクルで、開孔間にせん断ひび割れが生じた。その後、大開孔部上下にせん断ひび割れが発生した。

No.11, No.12においては、 $R=1/133$ rad付近で大開孔部上下のせん断ひび割れが拡大し、耐力が急落した。No.13は、No.11の最大耐力と同程度の荷重時(部材角

R=1/133rad程度)に、開孔間のせん断ひび割れが拡大した。最終的にはこのひび割れが進展し、大開孔下部のせん断ひび割れまで一体となって破壊した。No.14~15においても、R=1/200rad程度で開孔間のせん断ひび割れが拡大し、No.13と同様の破壊を生じた。なお、No.13とNo.15では、上端主筋に沿って付着割裂によるひび割れも見られた。

大開孔部の孔周囲あばら筋は、No.13~15ではR=1/200~1/133rad, No.11は最大耐力直後のR=1/100rad時に降伏した。また、開孔部上下補強筋は、No.11~12では最大耐力とほぼ同時に、No.13~15ではR=1/200radまたは1/100radのサイクルで降伏した。

以上より、No.11とNo.12については大開孔上下で、No.13~15は開孔間で、せん断破壊したと考えられる。

3.2 包絡線の比較

図-3に各試験体の正加力時について、せん断応力度一部材角関係の包絡線を示す。なお、せん断応力度は $\tau = Q/(bj)$ (b : 梁幅, j : 応力中心間距離)とした。

まず、初期剛性については、Lo/D=3.0としたNo.11~

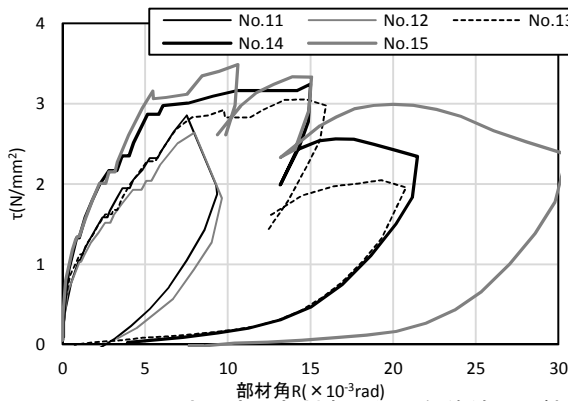


図-3 せん断応力度一部材角関係 包絡線の比較

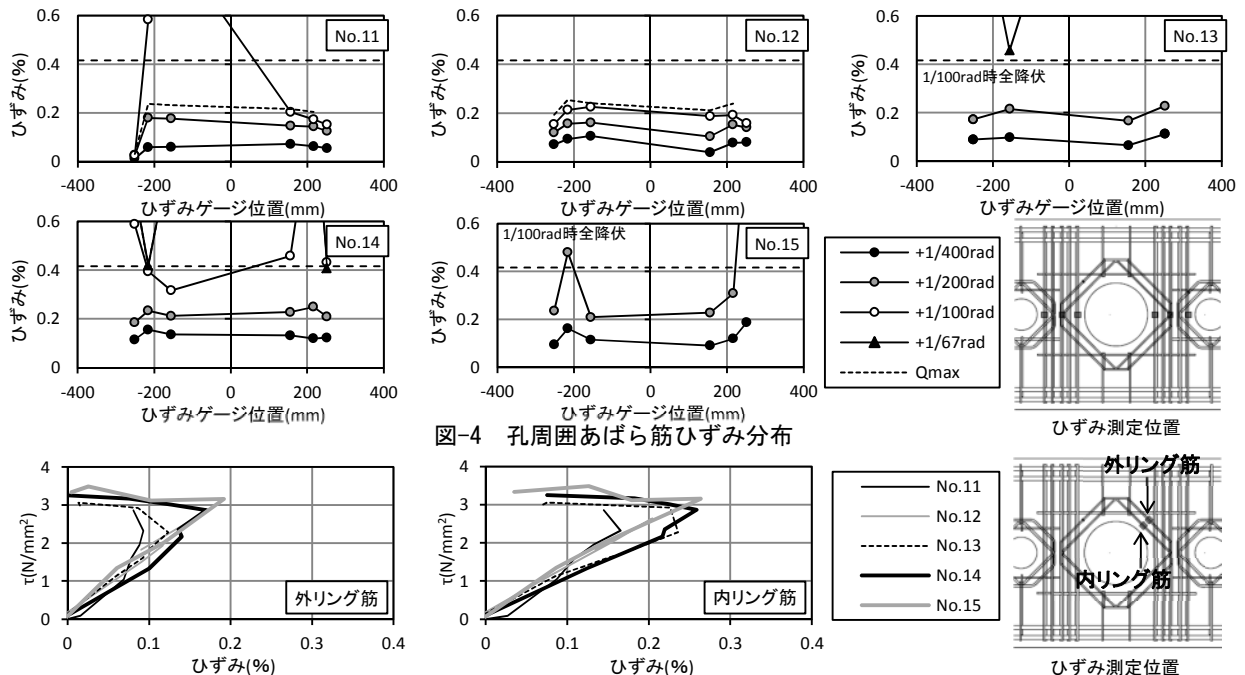


図-4 孔周囲あばら筋ひずみ分布

図-5 補強金物 せん断応力度—ひずみ関係

13よりも、Lo/D=1.8のNo.14~15の方が高くなっている。次に、大開孔上下でせん断破壊したNo.11~12は最大耐力以降、耐力が急落したのに対して、開孔間でせん断破壊したNo.13~15は耐力低下が緩やかであった。開孔間でせん断破壊した各試験体は、開孔間のせん断ひび割れ拡大により開孔間の補強筋が降伏した後、このひび割れが大開孔上下部まで進展し、開孔部上下補強筋も降伏した。これにより、耐力が急落しなかったと考えられる。

また、Lo/D=1.8のNo.14とNo.15を比較すると、梁せいに対する大開孔径の比H/D=1/4としたNo.15は、H/D=1/3のNo.14に対して、最大せん断応力度は約7%増加した。

3.3 鉄筋のひずみ性状

(1) 孔周囲あばら筋

図-4に、大開孔部の孔周囲あばら筋のひずみ分布を示す。図中には破線で降伏ひずみを示す。No.11~12については、最大耐力時のひずみ分布も点線で示す。孔周囲あばら筋のひずみ分布は、破壊形式により差異が見られた。開孔部上下でせん断破壊したNo.11~12においては、最大耐力時まで孔周囲あばら筋は降伏しなかった。開孔間でせん断破壊したNo.13~15においては、部材角R=1/200~1/100radで概ね降伏ひずみに達した。No.13は、No.11より開孔間の補強筋を40%減じており、ひずみが増加したと考えられる。No.14~15は、内法スパン比が小さいことにより、応力分布が変化し、また同一変形時のせん断応力度が大きいため、ひずみが増加したと推察される。

なお、No.11~12においても、最大耐力時には孔周囲あばら筋のひずみは0.2%程度まで達しており、破壊形式

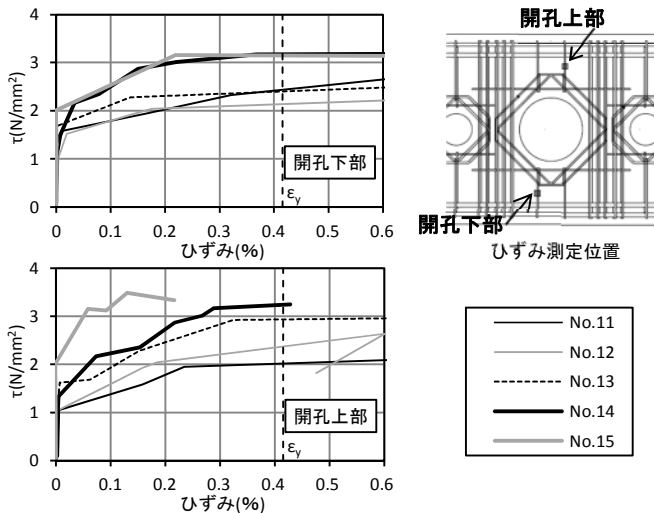


図-6 開孔部上下補強筋 せん断応力度—ひずみ関係

に関わらず、孔周囲あばら筋は開孔補強として有効と考えられる。

(2) 補強金物

図-5に、各サイクルピーク時の補強金物のひずみ推移を示す。縦軸にせん断応力度(τ)、横軸にひずみを示す。図中にひずみ測定位置も示す。

各試験体とも概ね同様の傾向を示した。 $\tau=2.5\sim 3.0\text{N/mm}^2$ 程度までは、せん断応力度の増加とともにひずみが増加し、その後、徐々にひずみが減少した。各試験体とも小変形時には開孔部せん断ひび割れが卓越するため、せん断応力度に応じて補強金物のひずみが増加し、部材角 $R=1/200\sim 1/100\text{rad}$ 以降は開孔部せん断ひび割れよりも開孔間または開孔上下せん断ひび割れが卓越するため、ひずみが減少に転じたと考えられる。

(3) 開孔部上下補強筋

図-6に、各サイクルピーク時の開孔部上下補強筋のひずみ推移とひずみ測定位置を示す。図中破線は降伏ひずみを表す。測定位置は、正加力時における大開孔上下のせん断ひび割れが、開孔部上下補強筋と交差する位置近傍である。

各試験体とも、せん断応力度が $\tau=1.5\sim 2.0\text{N/mm}^2$ 程度以降(部材角 $R=1/400\sim 1/200\text{rad}$)、ひずみが増加し、最大耐力時には概ね降伏ひずみを上回った。また、降伏しなかった部位(No.15の大開孔上部)においても、ひずみは0.2%程度に達した。これらのことから、開孔部上下補強筋も開孔補強として有効と考えられる。なお、No.15の大開孔上部においては、主筋に沿った付着割裂によるひび割れが卓越し、せん断ひび割れが伸展しなかったことが、開孔部上下補強筋が降伏しなかったことの一因と考えられる。

3.4. せん断ひび割れ幅

図-7には、RC規準の(解22.2)式による短期許容せん断力(以下、短期荷重と表す)後、除荷時(荷重0時)

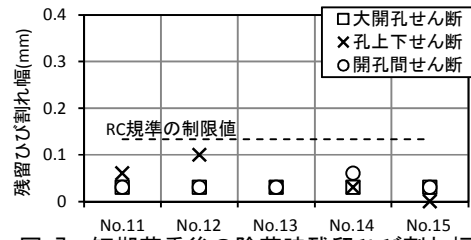


図-7 短期荷重後の除荷時残留ひび割れ幅

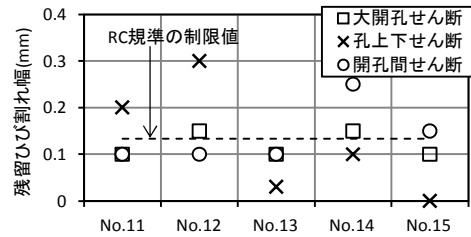


図-8 短期荷重後の長期許容せん断力時残留ひび割れ幅

の残留ひび割れ幅を示す。また図-8には、短期荷重後にRC規準の(解22.1)式による大開孔の長期許容せん断力に相当する荷重まで除荷した時(以下、長期許容せん断力時と表す)の残留ひび割れ幅を示す。対象としたひび割れは、大開孔、大開孔部上下、および開孔間の各せん断ひび割れであり、それぞれの最大値を抽出した。なお、両図中には、RC規準6条解説に示されるひび割れ幅の制限値(0.4mm)を破線で示す。ただし、試験体縮尺が約1/3スケールであることから、 $0.4 \times (1/3) = 0.133\text{mm}$ としている。

図-7より、短期荷重後の除荷時残留ひび割れ幅は、いずれもRC規準の制限値以下にとどまった。また、図-8より、短期荷重後の長期許容せん断力時残留ひび割れ幅については、大開孔せん断ひび割れはRC規準の制限値程度であったが、大開孔上下および開孔間の各せん断ひび割れの一部は制限値を上回った。これらのことから、本実験の範囲内では、中開孔が近接した大開孔を有するRC基礎梁における大開孔せん断ひび割れは、短期荷重に対してRC規準の(解22.2)式により設計することで、概ね損傷制御が可能と考えられる。また、大開孔上下および開孔間等、破壊形式を決定するひび割れの損傷制御のためには、長期許容せん断力は長期荷重時の応力に対して十分な余裕を持たせる必要があると言える。

4. 大開孔部のせん断耐力

表-4に各試験体の最大耐力実験値、大開孔のせん断耐力(Q_{suo})および一般部の付着割裂耐力(V_{bu})計算値を示す。表中には既報²⁾のNo.2についても示す。No.2とは水平補強筋の形状のみ異なる。大開孔のせん断耐力は、(1)式により算定した。(1)式は、修正広沢式⁴⁾に、補強金物および孔周囲あばら筋の降伏強度($d\sigma_y$ および $s\sigma_y$)をコンクリート強度(σ_B)の関数として制限を設けたものである。また、一般部付着割裂耐力は、文献5)の付着

破壊の影響を考慮したせん断信頼強度である。

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

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 $d \sigma_y, s \sigma_y \leq 25 \sigma_B$

(1)式による計算値に対する実験値の比（以下、実験値／計算値と表す）は、No.11～15では1.15～1.31であった。限られた試験体数ではあるが、実験値／計算値は、文献6)などに示される既往試験体における値と同程度と言える。一方、No.2においては、実験値／計算値は1.43と、やや過小評価となった。形状によっては水平補強筋も大開孔の耐力に寄与し得ることを示唆しているが、その定量的評価は今後の課題である。なお、No.2も含めて、(1)式では破壊形式の判別はできなかった。

また、最大耐力実験値は付着割裂耐力には達しておらず、最大耐力は開孔部のせん断耐力で決まったと考えられる。ただし、3.1節に述べた通り No.13 と No.15 には付着割裂によるひび割れも見られ、これらの試験体の最大耐力以降の性状には、付着割裂破壊の影響もあったと考えられる。

最後に、No.11 と No.13 について述べる。No.11 と No.13 は開孔間に配筋される補強筋量のみ異なる。No.13 は No.11 より補強筋量が少ないが、最大耐力は No.11 を上回った。3章に詳述したとおり、No.11 は開孔部上下のせん断ひび割れの拡大とともに開孔部上下補強筋が降伏し、開孔間の補強筋は未降伏の状態で大耐力となった。

一方、No.13 は開孔間の補強筋量を減じたため、開孔間のせん断ひび割れ拡大が先行した。このひび割れが開孔部上下にまで進展するのに伴い、開孔間の補強筋および開孔部上下補強筋が順に降伏し、最大耐力に達した。このため、最大耐力は No.11 を上回り、また、耐力の急落も生じなかったと考えられる。

No.11 と No.13 の比較より、中開孔が近接した大開孔については、大開孔上下と開孔間の耐力の大小関係により、耐力や破壊形式が決まると考えられる。しかしなが

表-4 最大耐力実験値と計算値の比較

試験体	実験結果		計算値		実験値/計算値	
	最大耐力 Qmax (kN)	破壊 形式	大開孔 Qsuo (kN)	付着 Vbu (kN)	Qmax	Qmax
					/Qsuo	/Vbu
No.11	517	上下	441	935	1.17	0.55
No.12	478	上下	391	798	1.22	0.60
No.13	553	孔間	423	966	1.31	0.57
No.14	588	孔間	511	961	1.15	0.61
No.15	861	孔間	704	1367	1.22	0.63
No.2	655	上下	456	964	1.43	0.68

ら、それぞれの耐力の評価方法、および破壊形式の判別については、今後の課題である。

5. まとめ

中開孔が近接した大開孔を有する鉄筋コンクリート造基礎梁の曲げせん断実験を実施した。本研究の結論は、以下にまとめられる。

- (1) 中開孔が近接した大開孔の破壊形式は、開孔上下破壊と開孔間破壊の2種類に大別される。本実験の範囲内では、開孔間の補強筋量および内法スパン比が、破壊形式に影響を及ぼすと言える。
- (2) 孔周囲あばら筋、開孔部上下補強筋は開孔補強として有効である。孔周囲あばら筋のひずみ性状は、破壊形式により差異が見られた。開孔部上下補強筋や補強金物は、破壊形式によらず、概ね同等の性状を示した。
- (3) 短期荷重後の長期許容せん断力時残留ひび割れ幅は、RC規準の制限値を上回る部位も見られた。
- (4) 破壊形式によらず、開孔部のせん断耐力は、修正広沢式で安全側に評価できた。
- (5) 開孔部のせん断耐力および破壊形式は、開孔上下と開孔間の耐力の大小関係により決まると考えられるが、それぞれの耐力評価および破壊形式の判別については、今後の課題である。

謝辞

本研究は民間企業12社（青木あすなろ建設、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）で実施した成果の一部をまとめたものである。関係各位に謝意を表す。

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.354-364、2010年版
- 2) 濱田真ほか：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、2014.7
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2007年度版 建築物の構造関係技術基準解説書、p.624、2007.8
- 4) 村上秀夫ほか：高強度開口補強金物を用いたRC有孔梁のせん断性状に関する実験研究、日本建築学会大会梗概集C-2、pp.237-238、2002.8
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・解説、p.177、1999.8
- 6) 菊川春三ほか：高強度開口補強筋を用いたRC有孔梁の終局せん断強度に関する調査研究(その1)、(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2、pp.189-192、2004.8