

既製開孔補強製品を用いた大開孔を有する基礎梁の曲げせん断実験

Shear Behavior of Reinforced Concrete Foundation Beams with a Large Web Opening using Opening Reinforcement Hardware

五十嵐治人*1

概 要

鉄筋コンクリート(以下、RC)造の梁に設備開孔等、円形開孔を設ける場合、その直径は梁せいの1/3以下としなければならない。このため、基礎梁に人通孔を設ける場合、直径は最低でも600mmであるため、梁せいは1,800mm以上必要となる。しかしながら、構造的にはこれほどの断面が必要でない場合が少なくない。これについて、基礎梁の断面の省力化が可能となれば、躯体量は勿論、掘削量も低減でき、コストダウン、工期短縮、環境負荷低減につながる事が期待できる。

本研究は、開孔径が梁せいの1/2.5の場合について実験的にその性状を確認した結果について報告する。

key words: 鉄筋コンクリート、基礎梁、貫通孔、構造性能確認実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の基礎梁には、設備配管の保守・点検を行うために人通孔を設けることが多い。人通孔は、一般的には人や機械が容易に通れるように、径を600mm以上とする必要がある。一方、RC規準¹⁾では、梁に貫通孔を設ける場合の孔径は、梁せいの1/3以下とすることが望ましいとされている。このため、人通孔を有する基礎梁は、構造計算からではなく、人通孔の孔径から梁せいが決まる場合があり、土工事や躯体工事のコストアップになっている。

本実験では、既製の開孔補強金物を用いて、梁せいに対する開孔径の割合を大きくした場合の開孔部せん断耐力について実験的に確認し、開孔径の大きさや開孔周囲補強筋が開孔部せん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に開孔部の補強方法を示す。開孔部周囲は孔際補強筋、開孔補強金物、開孔上下補強筋、水平補強筋による補強した。孔際補強筋は、開孔周囲の補強に有効な範囲(C区間)に配置するせん断補強筋であり、開孔部の左右に密に配筋した。開孔補強金物は、梁貫通孔せん断補強材であり、内リング筋を四角形、外リング筋を八角形とした閉鎖形の形状である。水平補強筋は、開孔部の上下に水平に配筋する鉄筋であり、長さは開孔径の2.5倍とした。今回の実験では全ての試験体で上下2本

ずつ配筋した。開孔上下補強筋は、最外縁主筋と水平補強筋との間を補強するために配筋し、その加工形状は閉鎖形とした。

表-1に試験体一覧、図-2に開孔部配筋図を示す。試験体は、縮尺1/2の基礎梁であり、梁断面寸法($b \times D$)は300mm \times 750mm、梁内法スパン長さ(L_0)は2,250mm(内法スパン比: $L_0/D=3.0$)とした。開孔は部材中央部に1個設け、開孔部の補強には、既製の開孔補強金物を用いた。実験因子は、コンクリート強度($Fc21, Fc36$)、開孔径(250mm, 300mm, 350mm)、開孔補強金物の枚数(2枚, 4枚)、開孔上下補強筋比(0.28%, 0.54%)とし、合計6体の試験体を計画した。いずれの試験体も、開孔部のせん断破壊が先行するように計画し、梁曲げ降伏を避けるために、梁主筋には降伏点強度が980N/mm²級の熱処理品を用いた。

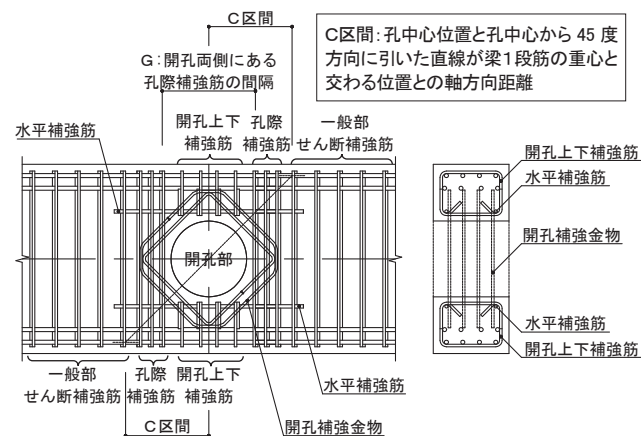


図-1 開孔部の補強方法

*1 Haruhito IGARASHI

表-1 試験体一覧

試験体	共通事項	コンクリート Fc	開孔径 / 梁せい	開孔補強金物	開孔上下補強筋
No. 1	梁幅 b=300 梁せい D=750mm	36	1/3	D10 4枚 ($p_{wd}=0.82\%$)	2-D10 2組 ($p_o=0.30\%$)
No. 2	内法スパン $L_o=2250\text{mm}$		1/2.5		D10 2枚 ($p_{wd}=0.41\%$)
No. 3	主筋 ($p_t=0.78\%$) 上端下端 4/4-D16	21		2-D10 4組 ($p_o=0.51\%$)	
No. 4	一般部せん断補強筋 ($p_w=1.06\%$) 4-D10@90				
No. 5	孔際補強筋 ($p_{ws}=0.86\%$) 4-D10 3組	36	1/2.14	D10 4枚 ($p_{wd}=0.82\%$)	2-D10 5組 ($p_o=0.57\%$)

■ 孔際補強筋比: $p_{ws} = \frac{a_s}{b \cdot C}$
 ■ 開孔補強金物比: $p_{wd} = \frac{n_d \cdot a_d \cdot \sqrt{2}}{b \cdot C}$
 ■ 開孔部補強筋比: $p_{wo} = p_{ws} + p_{wd}$
 ■ 開孔上下補強筋比: $p_o = \frac{a_o}{b \cdot G}$

a_s : C区間に配筋される孔際補強筋の全断面積
 a_d : C区間に対応する開孔補強金物の計算用断面積
 n_d : 開孔補強金物の枚数
 a_o : 開孔上下補強筋の全断面積
 b : 梁幅、
 C : C区間長さ
 G : 開孔両側にある孔際補強筋の間隔

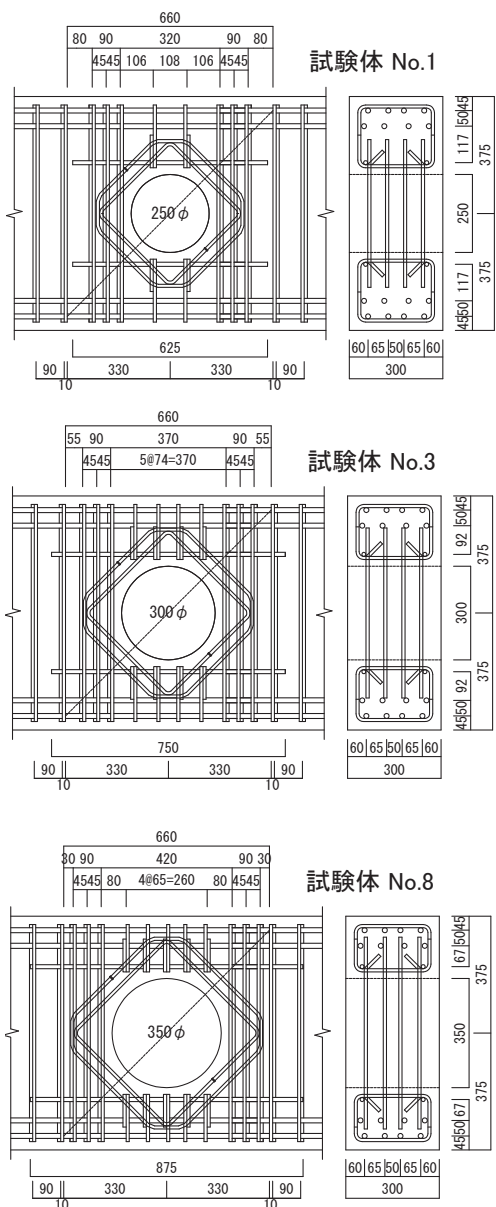


図-2 開孔部配筋図

2.2 使用材料

表-2 に鉄筋引張試験結果、表-3 にコンクリート試験結果を示す。コンクリートは、目標強度が実験時のコンクリート圧縮強度となるように調合計画し、粗骨材の最大寸法は13mmの6号碎石を使用した。

表-2 鉄筋引張試験結果

種類	降伏点 N/mm ²	降伏 ひずみ μ	ヤング	
			率 N/mm ²	
梁主筋	D16	987	5208	190
	D16a	1058	5687	186
水平補強筋	D13	370	2010	184
その他	D10	375	2090	179

*梁主筋の降伏点は0.2%オフセット耐力
 *D16 は試験体 No.1~No.5、D16a は No.8
 *その他: せん断補強筋、孔際補強筋、開孔補強金物、開孔上下補強筋

表-3 コンクリート試験結果

試験体	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²
No. 1	37.8	2.65
No. 2	38.6	2.66
No. 3	40.1	2.71
No. 4	23.7	2.21
No. 5	36.0	2.60
No. 8	33.7	2.41

2.3 荷重方法

図-3 に加力装置図を示す。加力は、建研式加力装置を用いて行い、鉛直方向に取り付けられた2台のアクチュエータにより実験中上下スタブが常に平行かつ軸力が試験体に作用しないように制御し、試験体内法スパン中央位置に取り付けられた水平力用のアクチュエータにより正負交番の繰り返し漸増荷重を行った。

図-4 に載荷履歴を示す。載荷は部材角 ($R = \delta / L_0$, δ : 上下スタブ間の相対変位, L_0 : 梁の内法スパン長さ) で制御し、 $R=1/800, 1/600, 1/400, 1/200$ rad. で各 2 回、 $R=1/133$ rad. で 1 回繰返した後、正載荷方向での押切り加力とした。

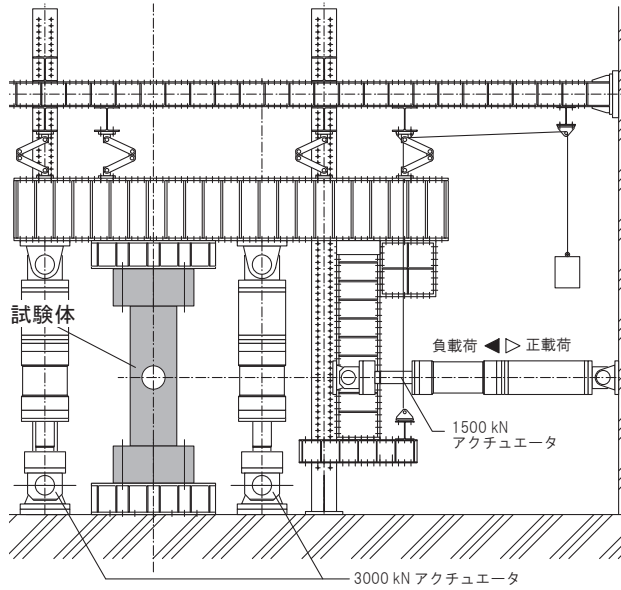


図-3 加力装置図

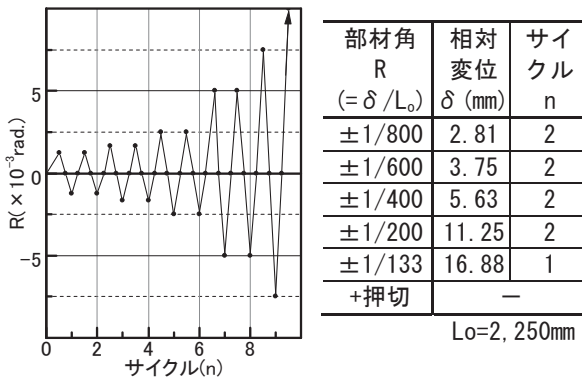


図-4 加力サイクル

3. 実験結果

3.1 破壊性状

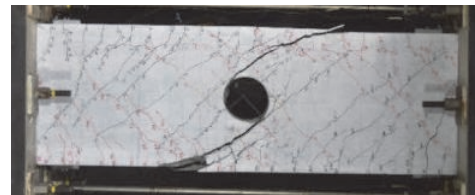
各試験体の最終破壊状況例を写真-1 に示す。各試験体とも部材角 $R=1/800$ の載荷において梁端部に曲げひび割れが発生した後、開孔中心から 45 度方向のひび割れが発生した。 $R=1/400$ の載荷において梁端部にせん断ひび割れ、 $R=1/200$ の載荷において開孔に接するひび割れが発生した。その後の載荷により、45 度方向ひび割れ、接線ひび割れの拡大・伸張が顕著となり、曲げ降伏する前に最大耐力に達した。最終破壊性状は開孔部のせん断破壊であった。

孔径の最も大きな No. 8 ($H/D=1/2.14$) では、梁端部に曲げひび割れが発生する前に 45 度方向ひび割れより材軸に対して角度の大きなひび割れが開孔廻りに発生し、開孔径の大きさによる影響が見られた。

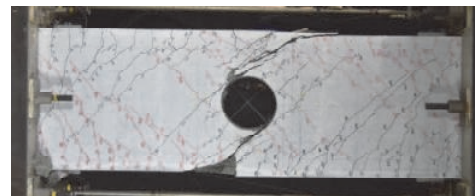
3.2 主筋、および補強筋の挙動

開孔径が最も小さい No. 1 の最大耐力は学会式による曲げ耐力の計算値を越え、危険断面位置における主筋の最大引張ひずみは 8800μ 、応力度 1010N/mm^2 程度であったが、その他の試験体の最大引張ひずみ 4800μ 程度であり、ほぼ弾性的な挙動を示した。

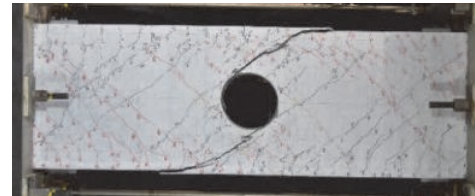
開孔補強金物は、開孔部補強筋比の最も小さい No. 5 および No. 8 で $R=1/200$ 、No. 2、No. 3 で $R=1/133$ の載荷時に降伏した。また、No. 1、No. 2、No. 3 の孔際補強筋、開孔上下補強筋は最大耐力発現前に降伏したが、コンクリート強度の最も低い No. 4 では開孔補強金物だけが降伏した。No. 5、No. 8 の孔際補強筋は最大耐力発現前に降伏したが、開孔上下補強筋は降伏ひずみに達しなかった。



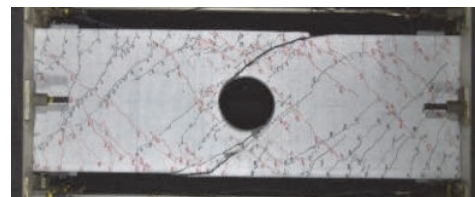
No.1
 $H/D=1/3$
 F_c36
 $\rho_{wo}=1.68\%$



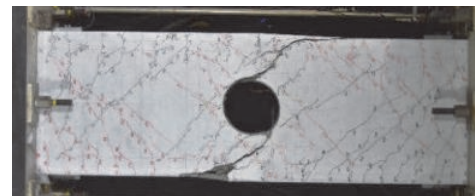
No.2
 $H/D=1/2.5$
 F_c36
 $\rho_{wo}=1.68\%$



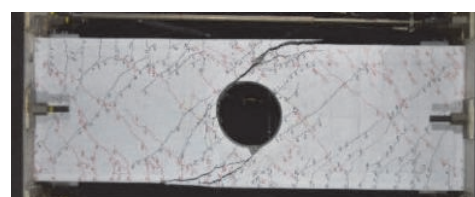
No.3
 $H/D=1/2.5$
 F_c36
 $\rho_{wo}=1.68\%$



No.4
 $H/D=1/2.5$
 F_c21
 $\rho_{wo}=1.68\%$



No.5
 $H/D=1/2.5$
 F_c36
 $\rho_{wo}=1.27\%$



No.8
 $H/D=1/2.14$
 F_c36
 $\rho_{wo}=1.68\%$

写真-1 最終破壊状況例

3.3 最大耐力

各試験体の最大耐力の実験値(eQ_{max})と修正広沢式による終局せん断耐力計算値(cQ_{SUO})、および実験値/計算値を表-4に示す。各試験体の概要を備考に併せて示す。終局せん断耐力 cQ_{SUO} の算定式を式(1)に示す。式中の記号は表-1、および表-4の下に示す。

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

いずれの試験体とも実験値/計算値(以下、余裕度)は1.25以上であった。余裕度は、H/Dが他の試験体よりも小さいNo.1が最も大きく、 σ_B が最も低いNo.4が最も小さかった。

4. 実験結果の考察

実験結果の考察として、①開孔径/梁せい(以下、H/D)の影響(No.1, No.3, No.8)、②コンクリート強度(以下、 σ_B)の影響(No.3, No.4)、③開孔部補強筋比(以下、 p_{wo})の影響(No.3, No.5)、及び④開孔上下補強筋比(以下、 p_o)の影響(No.2, No.3)に関する考察の結果を以下に示す。

4.1 開孔径/梁せい(H/D)の影響

H/Dの違いによるせん断力(以下、Q)-変形角(以下、R)関係の包絡線の比較した結果を図-5に示す。図中、表-4に示す各試験体の cQ_{SUO} の値を併せて示す。No.1, No.3, No.8はこの他、コンクリート強度、開孔上下補強筋比が若干異なる。横軸にH/D、縦軸に eQ_{max}/cQ_{SUO} を示した結果を図-6に示す。No.1, No.3, No.8は直線で結び、他の試験体の値も併せて示す。また、各試験体でせん断力が cQ_{SUO} を超えた変形角である $R=7.5/1000$ 時の開孔周囲のひび割れ状況を写真-2のa)~c)に示す。これらより以下のことが言える。

- eQ_{max} に達した時のRは、およそNo.1が15/1000、No.3が12.5/1000、No.8が10/1000であった。
- 同様にH/Dが大きくなるほど eQ_{max}/cQ_{SUO} は小さくなった。しかし、H/D=1/2.14のNo.8でも1.4程度であった。
- $R=7.5/1000$ 時の、 cQ_{SUO} に対するQの比率は、No.1:1.11倍、No.3:1.13倍、No.8:1.17倍とほぼ等しいが、写真-1を見ると、開孔周囲はH/Dが大きいほどひび割れが多かった。

4.2 コンクリート強度(σ_B)の影響

σ_B の違いによるQ-R関係の包絡線の比較した結果を図-7に示す。図中、各試験体の cQ_{SUO} の値を併せて示す。

表-4 最大耐力の実験値と計算値

試験体	計算値 cQ_{SUO} kN	実験値 eQ_{SUO} kN	実/計 $\frac{eQ_{SUO}}{cQ_{SUO}}$	備考
No.1	511	878	1.72	No.2に対してHが小さい
No.2	482	720	1.49	No.3に対して p_o が小さい
No.3	485	732	1.51	prototype
No.4	455	569	1.25	No.3に対して σ_B が低い
No.5	428	636	1.49	No.3に対して p_{wd} が低い
No.8	445	631	1.42	No.3に対してHが大きい

d: 有効せいで、全試験体とも680mmとした。
j: 応力中心間距離で、全試験体とも0.875dとした。

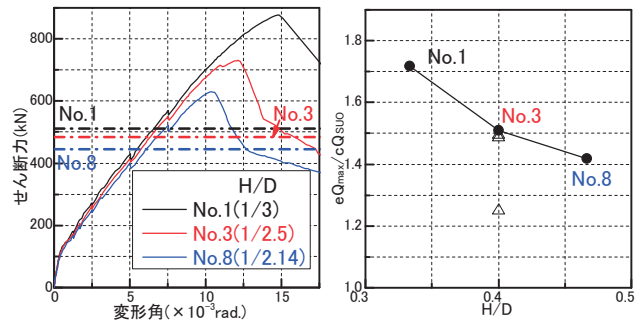


図-5 包絡線の比較 図-6 H/D - eQ_{max}/cQ_{SUO} 関係

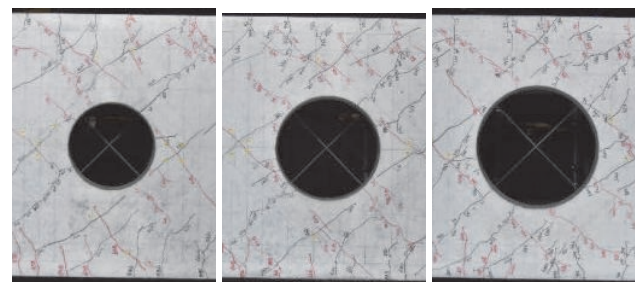


写真-2 R=7.5/1000 時開孔周囲の状況

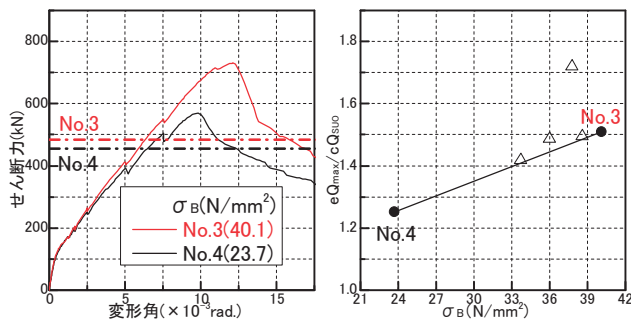


図-7 包絡線の比較 図-8 $\sigma_B - eQ_{max}/cQ_{SUO}$ 関係

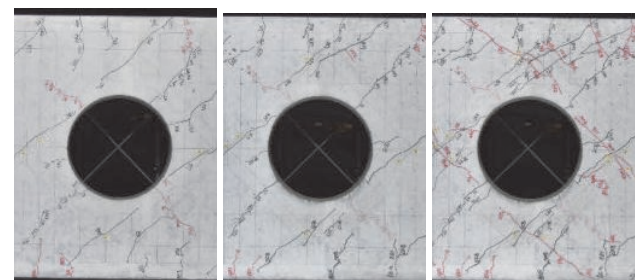


写真-3 開孔周囲の状況

横軸に σ_B 、縦軸に eQ_{max}/cQ_{SU0} を示した結果を図-8 に示す。No. 3、No. 4 を直線でも結び、他の試験体の値も併せて示す。また、 Q がほぼ等しい $R=5/1000$ 時の開孔周囲のひび割れ状況を写真-3 の a)、b) に示す。No. 4 の $R=7.5/1000$ 時の状況を写真-3 の c) に示す。これらより以下のことが言える。

- σ_B と eQ_{max}/cQ_{SU0} の関係は、 H/D の小さい No. 1 を除くと、ほぼ直線関係にあった。
- せん断力が cQ_{SU0} に達する前後のひび割れ性状について、 $R=5/1000$ 時は No. 3、No. 4 とほぼ同様の性状を示した。 $R=7.5/1000$ 時は、No. 4 は開孔上、左右部で No. 3 よりもひび割れが多かった。

4.3 開孔部補強筋比 (p_{wo}) の影響

p_{wo} の違いによる $Q-R$ 関係の包絡線の比較した結果を図-9 に示す。図中、各試験体の cQ_{SU0} の値を併せて示す。横軸に p_{wo} 、縦軸に eQ_{max}/cQ_{SU0} を示した結果を図-10 に示す。No. 3、No. 5 を直線で結び、他の試験体の値も併せて示す。また、No. 5 の $R=5/1000$ 時の開孔周囲のひび割れ状況を写真-4 の a) に示す。No. 3、No. 5 の $R=2.5/1000$ 時、 $5/1000$ 時の開孔補強金物のひずみ分布を図-11 に示す。鉄筋の降伏ひずみ(以下、 ϵ_y)を併せて示す。これらより以下のことが言える。

- p_{wo} の違いによっては、 eQ_{max}/cQ_{SU0} に大きな違いは見られなかった。
- 写真-3、写真-4 の a) 同士を見ると、 $R=5/1000$ 時ではひび割れ性状に顕著な違いは見られなかった。しかし、図-11 を見ると $R=5/1000$ 時には開孔補強金物は No. 5 で降伏し、No. 3 では降伏していなかった。

4.4 開孔上下補強筋比 (p_o) の影響

p_o の違いによるせん断力-変形角関係の包絡線の比較した結果を図-12 に示す。図中、各試験体の cQ_{SU0} の値を併せて示す。横軸に p_o 、縦軸に eQ_{max}/cQ_{SU0} を示した結果を図-13 に示す。No. 2、No. 3 を直線で結び、他の試験体の値も併せて示す。No. 2 の $R=5/1000$ 時、 $7.5/1000$ 時の開孔周囲の状況を写真-4 の b)、c) に示す。 $R=5/1000$ 時、 $7.5/1000$ 時の開孔上部補強筋のひずみ分布を図-14 に示す。これらによると、以下のことが言える。

- 開孔上下補強筋比は 0.257%、0.514% としても耐力には殆ど影響しなかった。
- 同様に、 cQ_{SU0} より大きな Q を受けている $R=7.5/1000$ 時でも開孔上下のひび割れ状況に殆ど影響がなかった。
- 開孔上部補強筋のひずみは、No. 2、No. 3 試験体とも大きな違いは無く、 $R=7.5/1000$ 時でも ϵ_y の 1/2 程度であった。図示しないが、開孔下部補強筋も同様の傾向であった。

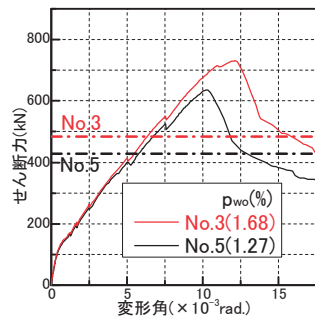


図-9 包絡線の比較

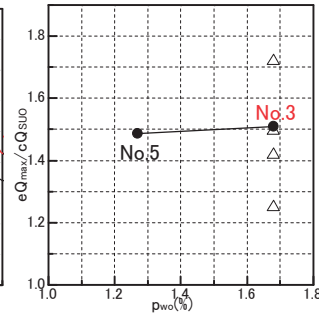
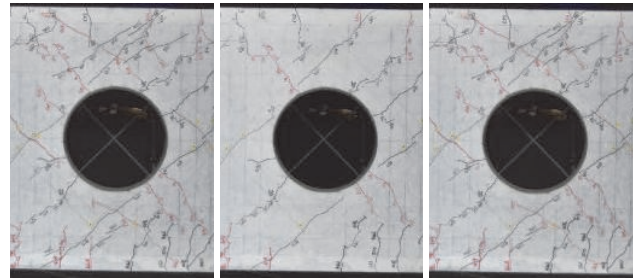


図-10 $p_{wo} - eQ_{max}/cQ_{SU0}$ 関係



a) No. 5: R=5/1000 b) No. 2: R=5/1000 c) No. 2: R=7.5/1000
写真-4 開孔周囲の状況

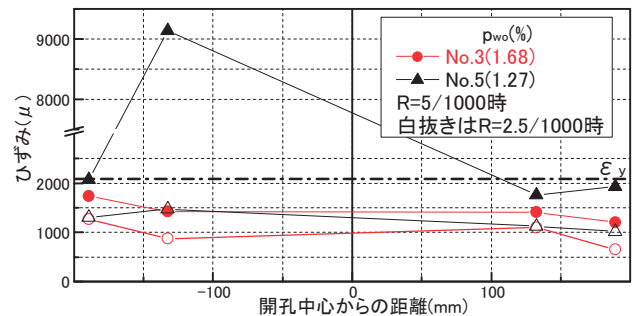


図-11 開孔補強金物ひずみ分布

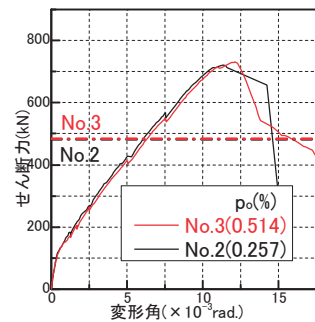


図-12 包絡線の比較

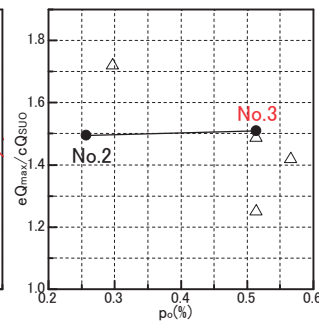


図-13 $p_o - eQ_{max}/cQ_{SU0}$ 関係

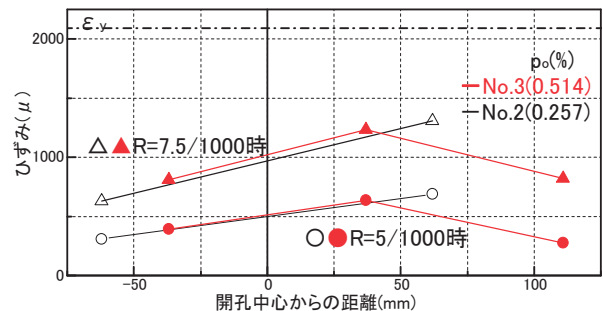


図-14 開孔上部補強筋ひずみ

5. まとめ

各試験体の破壊性状、補強筋の挙動、および各変動因子による影響を最大耐力について報告した。 Q_{SU0} の評価式について、以下のことが言える。

- Q_{SU0} の評価式は、開孔周囲補強筋比に関しては概ね妥当な評価であった。
- コンクリート強度に関しては、強度が低い場合は余裕度が低くなった。
- 開孔径／梁せいの評価は、開孔径／梁せいが大きくなるほど余裕度が小さくなった。

【謝辞】

本研究は、鴻池組、清水建設、東急建設、コーリョー建販との共同で実施した。関係各位に深甚なる謝意を表します。

【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 2010