

論文

[2065] 鉄筋コンクリート造有孔梁の変形能に関する実験的研究

石渡康弘\*1・林 郁夫\*1・森本 仁\*1・松崎育弘\*2

1. はじめに

建築物を計画する場合、設備貫通孔を梁端部およびスパン全域にあけられれば、設計上大きく自由度が増す。本実験では、高層鉄筋コンクリート造建物を対象として応力の厳しい梁端部に貫通孔を設け、さらにスパン全域にわたり貫通孔を設けた梁の靱性能について検討することを目的としている。ここでは、主に開口補強筋量および座屈補強筋の有無が有孔梁の変形能に及ぼす影響について検討を行う。

表-1 試験体一覧

No	共通事項	$\sigma_B$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	開口の有無	有孔部	
				開口補強筋 wp <sub>w0</sub> (%)	座屈補強筋
1	・ bxD=25x32.7(cm)	442	無	—	—
2	・ d =28.1(cm)	395	有	—	—
3	・ L <sub>o</sub> =130.8(cm)	392	有	2-D6 (0.55)	—
4	・ M/QD=2.0	401	有	4-D6 (1.11)	—
5	・ 主筋 6-D16	401	有	3-D10 (1.85)	—
6	・ pt=1.70(%)	438	有	2-D6 (0.55)	有 (2-D6)
7		456	有	4-D6 (1.11)	有 (2-D6)
8		462	有	4-D6 (1.11)	有 (4-D6)

注) ・ 無孔梁 (No. 1) 筋筋 4-U5.1 @72.5 (p<sub>w</sub>=0.44%)  
 ・ 有孔梁 (No. 2~8) 孔際筋筋 4-U5.1 2set (sp<sub>w0</sub>=0.49%)  
 ・  $wp_{w0} = \sqrt{2}w_{as}/b \cdot C$ ,  $sp_{w0} = \sum sa_s/b \cdot C$

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は縮尺を 1/2.6とし、無孔梁を含めて計 8 体を計画した。表-1 に全試験体の諸元を、図-1 に無孔梁のNo.1と有孔梁のNo.4とNo.7の配筋図を示す。また、図-2 に貫通孔回りの配筋詳細を示す。各試験体とも、断面寸法、内法スパン、主筋量を一定とした。有孔梁のNo.2~8 については、径 He = 82mmの貫通孔 (He / D=0.25、Dは梁高) を梁端部から 0.5Dと 1.5Dの位置に左右対称に 4ヶ所設けた。筋筋については、無孔梁のNo.1では 4-U5.1 を72.5mmピッチで等間隔に配筋し、有孔梁のNo.2~8 では各試験体とも貫通孔際にダブルの 4-U5.1 を配筋した。主な変動因子は、開口補強筋の有無、開口補強筋量、座屈補強筋の有無および座屈補強筋量である。No.2は開口補強筋がない試験体、No.3~No.5は開口補強筋量をwp<sub>w0</sub>=0.55~1.85%

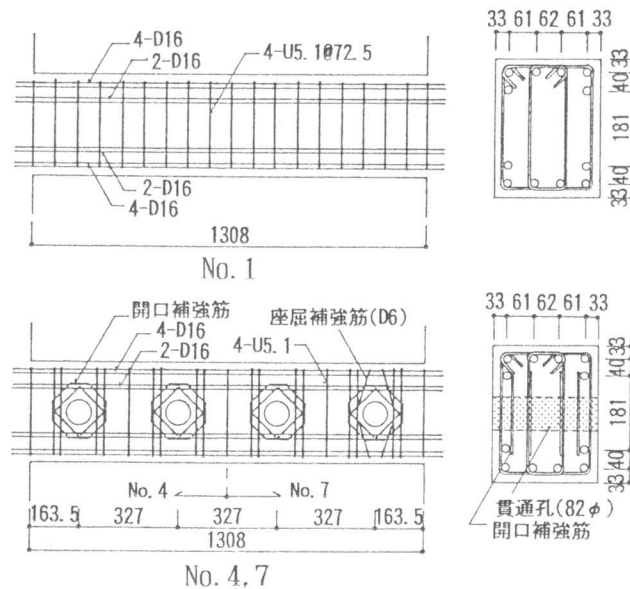


図-1 配筋例

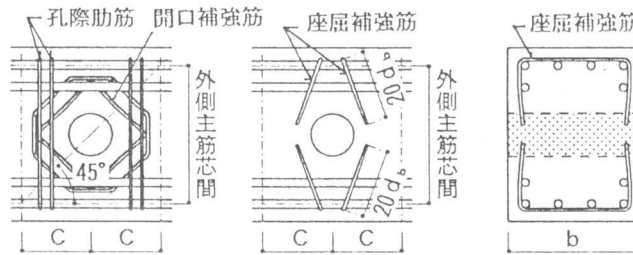


図-2 貫通孔回り詳細図

\*1 鉄建建設(株)技術研究所 (正会員)

\*2 東京理科大学教授 工学部第1部建築学科 工博 (正会員)

と変えている。また、No. 6とNo. 7については、No. 3とNo. 4の端部のみの貫通孔上下部に口状の座屈補強筋D6を1set配筋した。同様に、No. 8については、No. 4に座屈補強筋D6を同様に配筋した。座屈補強筋の長さは各試験体とも $20d_b$  ( $d_b$ は鉄筋径)とし、その鉄筋径は肋筋とはほぼ同じ径を想定した(ただし、鉄筋の材質は変えている)。試験体には調合強度 $420\text{kgf/cm}^2$ の普通コンクリートを用いた。コンクリートの圧縮強度 $\sigma_B$ を表-1に示す。また、主筋にはSD395を、肋筋には高強度異形PC鋼棒を、開口補強筋等にはSD295Aをそれぞれ用いた。鉄筋の試験結果を表-2に示す。

### 2.2 加力および測定方法

図-3に加力装置の概要を示す。加力は、反力壁に固定した150tonfジャッキでL型ビームを介して水平力を加え、変形を制御して正負交番繰り返し加力を行った。なお、L型ビームの平行度を保つために、L型ビームの上部にパンタグラフを設けた。加力履歴は、部材角 $R = \pm 1/200 \text{ rad}$ を1回、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ を2回繰り返しした後、最後に押し切りを標準としたが、急激な耐力低下が生じた場合は、その時点で加力を中止した。

表-2 鉄筋試験結果

径	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び量 (%)	備考
D16	3980	$1.89 \times 10^6$	5580	25.3	全試験体
U5.1	13300	$1.94 \times 10^6$	14400	7.4	No. 2~5
	13280	$1.89 \times 10^6$	14230	9.2	No. 1, 6~8
D6	3300	$1.90 \times 10^6$	5200	15.8	No. 2~4
	3240	$1.78 \times 10^6$	5160	17.7	No. 6~8
D10	3260	$1.82 \times 10^6$	4690	20.6	No. 5

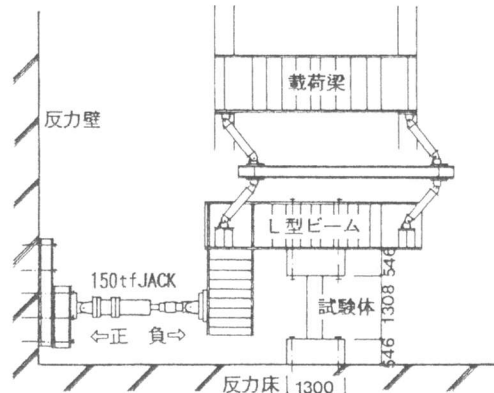


図-3 加力装置

表-3 実験結果一覧

No	せん断ひびわれ発生時			梁降伏時			最大耐力時			せん断強度		Ru (rad.)
	eQsc (tonf)	Rsc (rad.)	eQsc/cQsc	eQy (tonf)	Ry (rad.)	eQy/cQmu	eQmax (tonf)	Rmax (rad.)	eQmax/cQmu	cQsu (tonf)	cQsu/cQmu	
1	+ 9.63 - 9.15	+ 1/560 - 1/620	+ 1.09 - 1.04	+ 21.65 - 19.33	+ 1/110 - 1/120	+ 1.15 - 1.05	+ 22.47 - 20.56	+ 1/34 - 1/34	+ 1.23 - 1.12	22.05	1.20	1/21
2	+ 6.53 - 4.13	+ 1/590 - 1/760	+ 0.78 - 0.49	+ 21.20 - 19.40	+ 1/130 - 1/116	+ 1.16 - 1.06	+ 21.93 - 19.75	+ 1/69 - 1/67	+ 1.20 - 1.08	18.57	1.01	1/56
3	+ 5.87 - 3.60	+ 1/620 - 1/700	+ 0.70 - 0.43	+ 19.23 - 18.08	+ 1/104 - 1/94	+ 1.05 - 0.99	+ 21.49 - 19.67	+ 1/51 - 1/51	+ 1.17 - 1.07	20.29	1.10	1/40
4	+ 6.99 - 3.75	+ 1/560 - 1/700	+ 0.83 - 0.45	+ 20.11 - 19.22	+ 1/114 - 1/110	+ 1.10 - 1.05	+ 21.64 - 19.37	+ 1/68 - 1/100	+ 1.18 - 1.06	21.97	1.20	1/32
5	+ 8.04 - 5.78	+ 1/430 - 1/810	+ 0.95 - 0.69	+ 19.50 - 18.32	+ 1/112 - 1/108	+ 1.06 - 1.00	+ 22.09 - 19.82	+ 1/33 - 1/34	+ 1.21 - 1.08	23.87	1.30	1/29
6	+ 10.54 - 8.24	+ 1/490 - 1/590	+ 1.20 - 0.94	+ 22.13 - 17.50	+ 1/110 - 1/160	+ 1.21 - 0.96	+ 23.68 - 19.65	+ 1/33 - 1/51	+ 1.29 - 1.07	20.66	1.12	1/38
7	+ 8.05 - 6.44	+ 1/680 - 1/700	+ 0.90 - 0.72	+ 20.83 - 18.80	+ 1/120 - 1/155	+ 1.14 - 1.03	+ 22.85 - 21.39	+ 1/33 - 1/34	+ 1.25 - 1.17	22.40	1.22	1/22
8	+ 7.96 - 6.61	+ 1/710 - 1/700	+ 0.89 - 0.74	+ 20.93 - 18.85	+ 1/117 - 1/144	+ 1.14 - 1.03	+ 22.83 - 21.63	+ 1/33 - 1/34	+ 1.25 - 1.18	22.45	1.22	1/23

注) ・ eは実験値を、cは計算値を示す。 ・ +は正荷重を、-は負荷重を示す。 ・ Ruは限界変形角を示す。

$$cQsc^{(1)} = \left\{ \frac{0.085kc(\sigma_B + 500)}{M/Qd + 1.7} \right\} \cdot b \cdot j \quad cQmu^{(1)} = \sum 0.9at \cdot \sigma_y \cdot d / L_0$$

$$cQsu^{(1)} = \left\{ \frac{0.053pt^{0.23}(\sigma_B + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.7\sqrt{p_w \cdot \sigma_y} \right\} \cdot b \cdot j \quad (\text{無孔梁}) \text{ただし、}\sigma_y \text{は実強度で算出。}$$

$$cQsu^{(1)} = \left\{ \frac{0.053pt^{0.23}(\sigma_B + 180) \cdot (1 - 1.61He/D)}{M/Qd + 0.12} + 2.7\sqrt{sp_{wo} \cdot \sigma_y + wp_{wo} \cdot \omega_y} \right\} \cdot b \cdot j \quad (\text{有孔梁})$$

ただし、 $\sigma_y$ と $\omega_y$ は実強度で算出。

測定は、試験体の上下スタブ間の相対変形、軸方向変形、試験区間の曲率等を変位計で、また、主な主筋、肋筋および開口補強筋等の歪度を歪ゲージにより測定した。

### 3. 実験結果

表-3に諸現象発生の実験結果一覧を、図-4にNo.5を除く各試験体の荷重変形曲線を、図-5にNo.1、No.2、No.3およびNo.6の $R = 1/50\text{rad.}$ 時のひびわれ状況を、写真-1に座屈補強筋の有無を因子としたNo.4とNo.7の $R = 1/33\text{rad.}$ 時のひびわれ状況を示す。また、図-6に開口補強筋量を因子とした試験体の荷重変形曲線の包絡線を示す。表-3で、 $R_u$ は限界変形角を示し、荷重変形曲線の包絡線上で最大荷重の80%に耐力が低下した時の変形角と定義する。ただし、 $R_u$ は正負のうち小さな値を採用した。

#### 3.1 実験経過

無孔梁のNo.1では、 $R = 1/200\text{rad.}$ までに曲げひびわれ、せん断ひびわれが順次生じ、 $R = 1/100\text{rad.}$ 頃主筋が降伏した。 $R = 1/67\text{rad.}$ 頃上端主筋に沿って付着ひびわれが生じ、その後下端主筋にも付着ひびわれが生じた。以降の加力で、付着ひびわれとせん断ひびわれが多数生じたが、最後まで付着割裂破壊することはなかった。最終的には、梁端部のコンクリートが圧壊して耐力低下が生じた。有孔梁のNo.2~8では、 $R = 1/200\text{rad.}$ までに端部に曲げひびわれが、貫通孔周辺にせん断ひびわれが生じた。貫通孔周辺のせん断ひびわれは、スパン全域の貫通孔にわたってほぼ同時に生じた。以降の加力で、せん断ひびわれが伸展し、

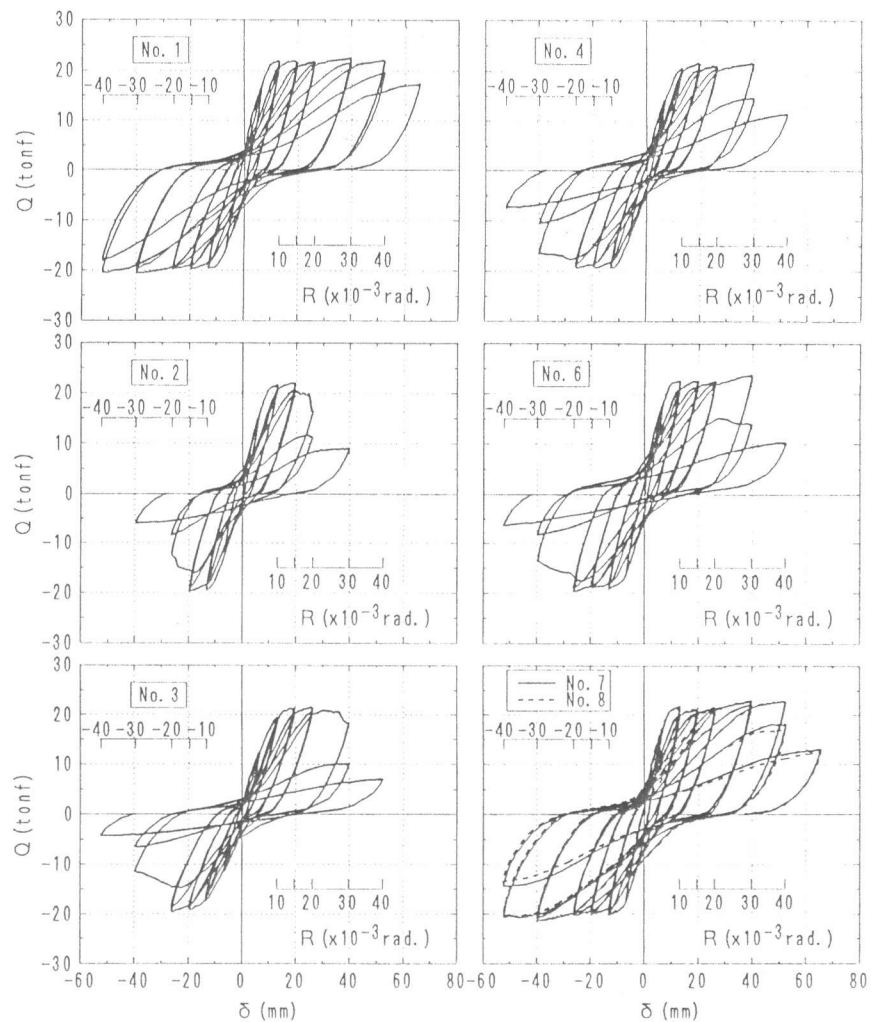


図-4 荷重変形曲線

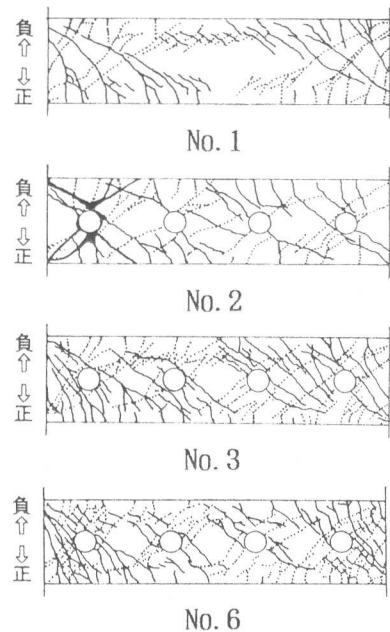


図-5 ひびわれ状況 ( $R = 1/50\text{rad.}$ 時)

ひびわれ幅も拡大していった。最終的には、各試験体とも梁端部の貫通孔上下のコンクリートが圧壊し、耐力低下を起こした。その時、主筋の座屈もみられた。R=1/50rad. 時の各試験体のひびわれ状況を比較すると、開口補強筋を配筋していないNo. 2では、一般的に発生したせん断ひびわれの本数が少なく、それらのひびわれが集中する傾向がみられ、端部の貫通孔周辺のせん断ひびわれ幅がかなり拡大している。それに対し、開口補強筋を設けた試験体では、せん断ひびわれが分散し、それらのひびわれ幅はそれほど拡大していない。また、R=1/33rad. 時のNo. 4とNo. 7のひびわれ状況を比較すると、座屈補強筋の効果が明らかにみられ、座屈補強筋のないNo. 4では端部の貫通孔周辺のコンクリートが圧壊しているのに対し、No. 7ではその傾向はみられなかった。

一方、せん断ひびわれの実験値に対する計算値の比は、有孔梁試験体では0.45~1.20、平均値は0.77、無孔梁試験体のNo. 1が1.04~1.09であり、有孔梁試験体の方が低い実験結果を示した。また、表-3に各試験体の曲げ強度に対するせん断強度の比率（以下、 $cQ_{su}/cQ_{mu}$ とする）を示す。

### 3.2 荷重変形曲線の比較

各試験体の荷重変形曲線の比較を行う。開口補強筋量を変えた有孔梁のNo. 2~5を比較すると、開口補強筋量を増やすことにより履歴が改善されている。しかし、 $w_{pwo}=1.85\%$ のNo. 5でもR=+1/33rad. で急激な耐力低下が生じたことにより、梁端部に貫通孔を設けた場合、開口補強筋のみの補強では著しい変形能の改善は難しいと思われる。次に、座屈補強筋の効果について検討を行う。座屈補強筋の有無のみが異なるNo. 3とNo. 6、No. 4、No. 7およびNo. 8について比較すると、座屈補強筋が変形能に及ぼす効果がみられ、特に $w_{pwo}=1.11\%$ のNo. 7では変形能の改善効果が大きいことがわかる。本試験体の中では、 $w_{pwo}=1.11\%$  ( $cQ_{su}/cQ_{mu}=1.22$ ) で座屈補強筋を設けたNo. 7が無孔梁のNo. 1とほぼ同等の優れた変形能を示した。なお、座屈補強筋量を変えたNo. 7とNo. 8がほぼ同じ履歴を示したことにより、本実験では座屈補強筋量を増した効果はみられなかった。

## 4. 鉄筋の歪の検討

### 4.1 主筋の歪分布

図-7にNo. 1（無孔梁）とNo. 3（有孔梁）の上端主筋について、R=1/50rad. までの各変形第

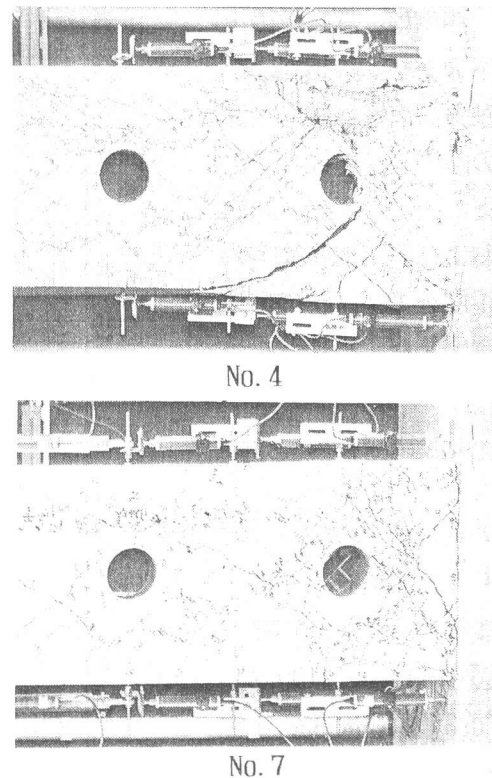


写真-1 ひびわれ状況  
(R=1/33rad. 時)

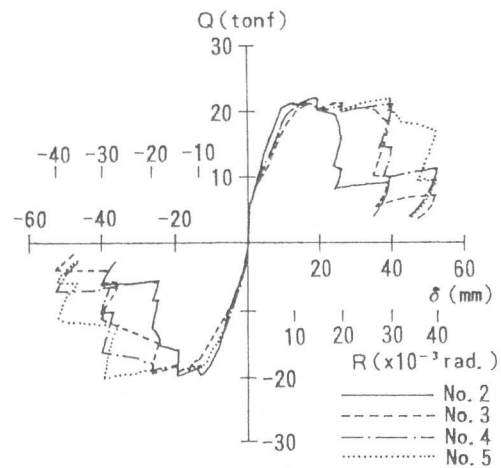


図-6 荷重変形曲線の包絡線  
(開口補強筋量の影響)

1 サイクル目ピーク時の歪分布を示す。No. 1とNo. 3の歪分布に顕著な差はみられず、貫通孔を設けたことによる影響等は特にみられなかった。No. 1では、 $R=1/67\text{rad}$  の繰り返し時に主筋に沿って付着ひびわれが多数生じたが、主筋の歪分布をみると正負とも歪勾配が確保されており、付着強度の劣化は生じなかったと思われる。なお、有孔梁の二段主筋についても、一段主筋と同様な歪を示していた。

#### 4.2 肋筋の歪分布

図-8 に有孔梁のNo. 2、No. 3、No. 5およびNo. 6について、 $R=1/50\text{rad}$  までの各変形第1サイクル目正方向ピーク時の肋筋の歪分布を示す。各試験体とも変形の増大にともない歪が増加しているが、せん断ひびわれがスパン全域の貫通孔に生じたことにより、スパン全域の肋筋の歪が増大している。開口補強筋量を変化させたNo. 2、No. 3およびNo. 5を比較すると開口補強筋量が増えるに従い、肋筋の歪が減少する傾向がみられた。一方、

座屈補強筋を有無としたNo. 3とNo. 6を比較すると、座屈補強筋を設けたNo. 6では、端部の一部の肋筋が大きな歪を示しているが、それほど顕著な差はみられなかった。

#### 4.3 開口補強筋および座屈補強筋の歪履歴

図-9 に一例としてNo. 6の開口補強筋の歪履歴の包絡線を示す。同図に座屈補強筋の歪履歴も示す。ただし、歪履歴の包絡線は正加力時について $R=1/50\text{rad}$  まで示してある。この図より、端部および中央の開口補強筋ともほぼ同じ程度の歪を示している。また、正加力時にせん断ひびわれが交差する部位（例えば、端部では点5、中央部では点1）では歪が増大するのに対し、直接交差しない部位（例えば、端部では点8、中央部では点4）の歪がそれほど増大しないことがわかる。一方、座屈補強筋（点9）は降伏歪程度の歪を示しており、コンクリートの拘束等に有効であると思われる。

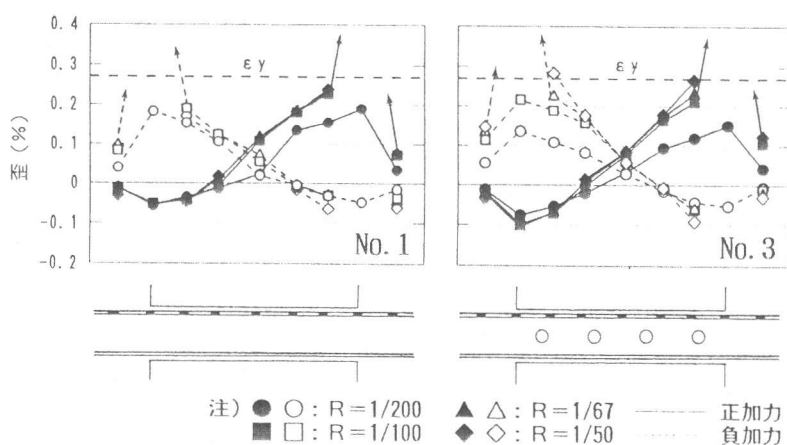


図-7 主筋の歪分布(No. 1, 3)

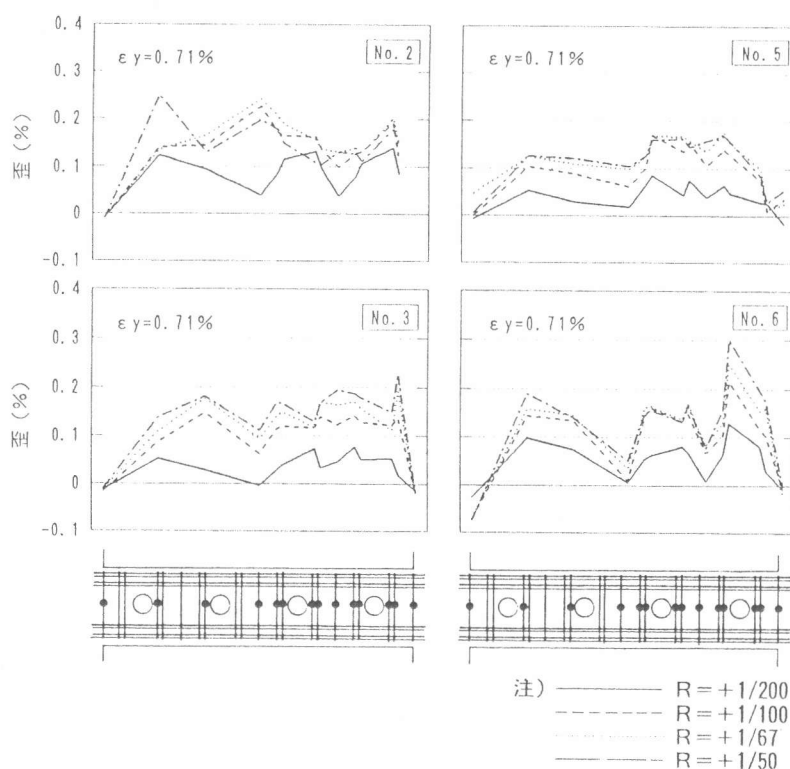


図-8 肋筋の歪分布

### 5. 有孔梁の変形能の検討

図-10に $cQ_{su}/cQ_{mu}$ と限界変形角の関係を示す。ここで、 $cQ_{su}/cQ_{mu}$ は表-3の各式を用いて算出した値である。なお、参考のために無孔梁のNo. 1についても示してある。同図より、No. 2~5 について比較すると開口補強筋量を増すことにより限界変形角が大きくなっているが、同じ  $cQ_{su}/cQ_{mu}$  のNo. 1と比べて小さな限界変形角を示している。一方、座屈補強筋を設けたNo. 6~No. 8を比較すると、座屈補強筋が変形能に及ぼす効果にばらつきがみられるが、座屈補強筋を設けたNo. 7およびNo. 8は座屈補強筋がないNo. 4より変形能が大きく改善され、無孔梁のNo. 1と同程度の限界変形角を示している。

### 6. まとめ

梁端部より梁成の1/2の位置およびスパン全域にわたり、貫通孔 ( $H_e/D=0.25$ ) を設けた有孔梁について実験を行った結果、以下のことが判明した。

- (1) 開口補強筋量を増すことにより有孔梁の変形能が改善されるが、 $cQ_{su}/cQ_{mu}$ が同程度の無孔梁と比較して、変形能が悪い。
- (2) 端部の貫通孔上下部に座屈補強筋を設けることにより有孔梁の変形能が改善される。
- (3)  $cQ_{su}/cQ_{mu}$ を1.20以上確保し、端部に肋筋径と同径以上の座屈補強筋を設けることにより、無孔梁と同程度の優れた変形能を示した。

謝辞：コーリョー建販より開口補強筋を提供して頂きました。ここに、感謝の意を表します。

### [参考文献]

- [1] 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、日本建築学会、pp. 36、40~42、52~55

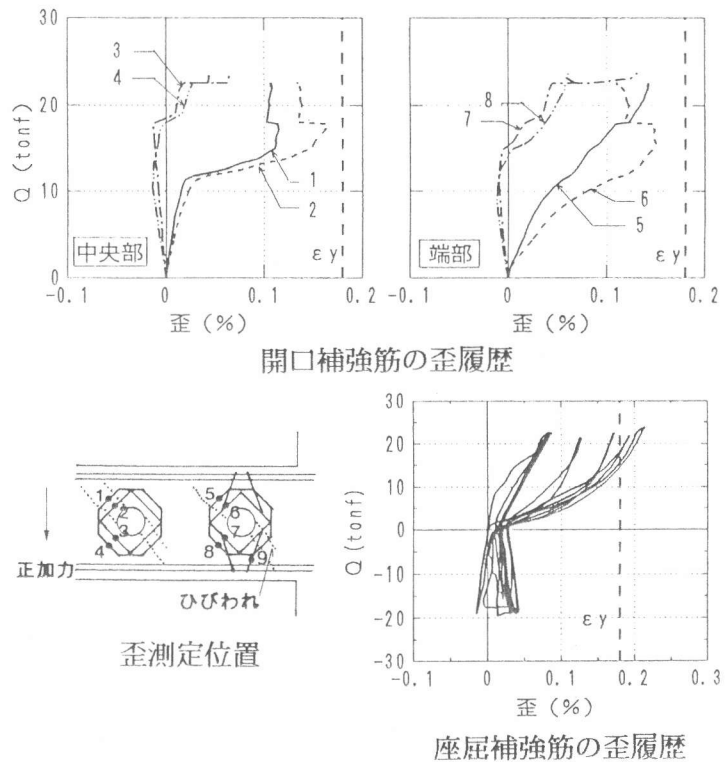


図-9 開口補強筋と座屈補強筋の歪履歴 (No. 6試験体)

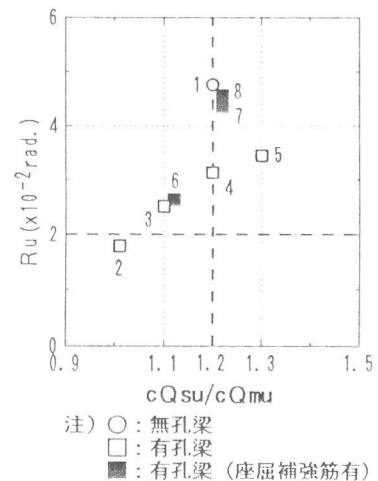


図-10 有孔梁の変形能の検討