

## 論文 部材端開口を有する鉄筋コンクリート梁の補強法

鈴木 紀雄<sup>\*1</sup>・眞田 暁子<sup>\*2</sup>・丸田 誠<sup>\*3</sup>

要旨: 鉄筋コンクリート梁の設備配管用貫通孔は, 地震時に大きな変形を受ける梁端部を避けて設けられることが一般的である。しかし, 開口を梁端部に設ければ, 配管を隠す「下がり天井」の幅が小さくなり, 居室空間の質を高めることができる。本報告では, 直径が梁せいの  $1/3$  の円形開口を梁端から梁せいの  $1/2$  の距離に設け, 曲げ降伏後も  $0.04\text{rad}$ .まで耐力を保持させる補強法について述べる。

キーワード: 梁, 開口, せん断補強, 変形能力, ヒンジ領域

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート造の集合住宅では, 設備配管が下がり天井で隠されてほかの居室を横切り, 建物外周大梁の円形貫通口(以後「開口」, 開口を設けた梁を「有孔梁」と呼ぶ)を通して外気に開放されることが多い。下がり天井の幅を小さくするには, 開口を梁端に設けることが望まれるが, 梁端部は大地震時にヒンジが形成されて大きな塑性変形を受ける部位なので, 構造上は開口を設けないほうが良い。このため, 建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>1)</sup>では, 開口中心を梁の部材端から  $1D$  ( $D$ は梁せい)以上離すことを推奨している。また, 開口補強法に関する研究<sup>例え<sup>2)</sup></sup>は数多いが, ヒンジ領域外を対象としたものが大多数である。

これに対して別所らは, 開口中心が梁端から  $D/2$  の距離にある有孔梁の実験結果に基づき, 開口中心を部材端から  $D/2$  に近づけられる図-1のような補強法を提案した<sup>3)</sup>。しかし, この実験試験体は, コンクリート強度が  $Fc30$  で, 開口補強筋に SR295 の丸鋼を使用したものであり, 近年の高強度材料への適用性は不明

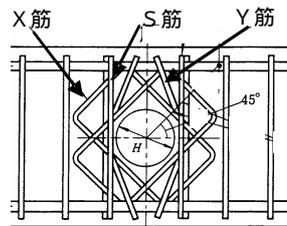


図-1 別所らの補強法<sup>3)</sup>

である。また, 市販の補強金物を用い,  $Fc54$  まで適用できる梁端開口補強法も発表されている<sup>4)5)</sup>が, より安価な補強方法が求められている。

本論では, このような背景を踏まえて開発した, 高強度コンクリートに適用できる梁端開口補強法について報告する。

### 2. 対象と目標

#### 2.1 対象

通常の梁に必用とされる開口直径は  $200\text{mm}$  が上限である。これは, 梁せい  $D$  の  $1/3$  弱に相当することから 開口直径の最大値を  $D/3$  とした。開口中心と梁端との距離は,  $D/2$  を最小値とした。

また, 超高層建物の梁を調査し, 入力せん断力応力度(せん断力を梁の全断面積で除した値)の上限をコンクリート強度の  $0.06$  倍とした。

#### 2.2 変形性能の目標

超高層建物の設計では, 極めて稀な地震に対して, 最大層間変形角が  $0.01\text{rad}$ .以下に抑えられることが多い。この変形角には柱の変形も含まれるが, 安全側に全ての変形が梁で生じているとし, 地震動の不確実性や応答解析の信頼性を考慮して  $0.02\text{rad}$ .程度の変形を保証するように梁の設計が行われる。さらに実験のばらつきなども考慮し, 十分な余裕を見込むことができる  $0.04\text{rad}$ .を梁の終局変形角の目標とした。

\*1 鹿島技術研究所 グループリーダー 工博 (正会員)

\*2 鹿島技術研究所 工修 (正会員)

\*3 鹿島技術研究所 上席研究員 博士(工学) (正会員)

### 3. 補強方法

本研究では、図 - 2 のような補強法を検討した。

別所らは、図 - 1 のように、「Y筋」と称するいわゆる「かざし筋」を主筋の座屈防止を目的として用いた。同様の補強筋が文献 4)5)でも用いられており、変形能力を向上させるのに有効であると考えられることから、本開発でも同様の補強筋を採用することにした。Y筋の機能については、後で考察する。

また、図 - 2 のような平行四辺形の閉鎖型鉄筋（以後「Z筋」と呼ぶ）2個をX形に組み合わせたものを1組として、必要な組数だけ配置することにした。この形状は、図 - 1 の斜め筋に比べると、開口から離れた損傷が小さい部位に定着させることができるため、補強効果が高いことが非ヒンジ領域の開口を対象とした既往の研究<sup>6)</sup>から分かっている。Z筋には、開口を通る斜めひび割れの拡大を抑制する機能を期待する。

孔際のせん断補強筋は「S筋」と呼ぶ。

### 4. 構造実験

前章で述べた補強法を用いた有孔梁の構造実験を行い、その効果を確認した。

#### 4.1 試験体

試験体は表 - 1 および図 - 3 に示した縮尺約 1/2 の梁 5 体である。共通して、断面寸法は 30cm×40cm、開口中心と梁端との距離は D/2 とした。Y筋の入れ方も 5 体で共通している。パラメータは、コンクリート強度（目標 Fc36 と Fc48）、Z筋の組数（2組と3組）、開口直径（D/3 と D/4）である。ただし、コンクリートの実強度

は、表 - 2 のように大差ないものになった。最大強度時のせん断応力度は、コンクリート実強度の 0.053 倍～0.078 倍であった。Fc36 コンクリートを用いた 2 体のせん断スパン比は 2.5、Fc48 コンクリートを用いた 3 体のせん断スパン比は 2.0 とした。有孔梁のせん断強度式として常用され

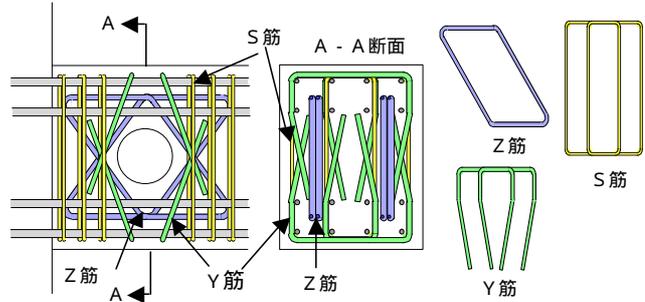


図 - 2 補強方法

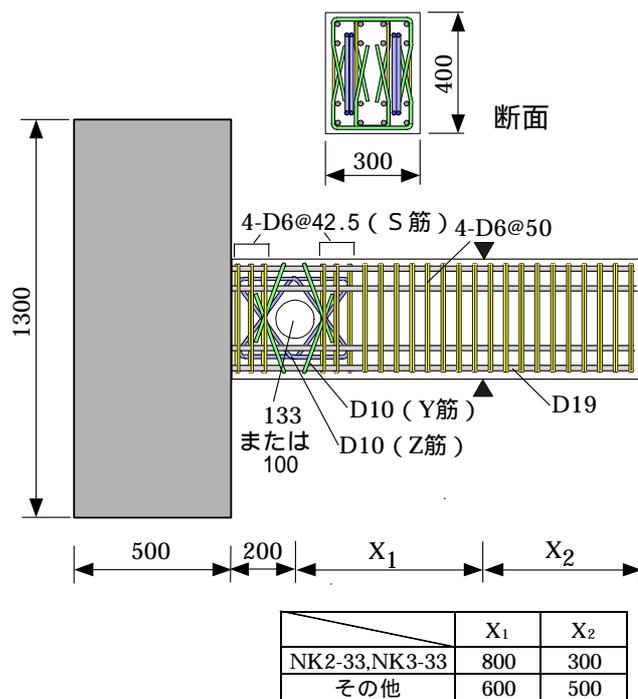


図 - 3 試験体

表 - 1 試験体一覧

試験体名	断面	M/QD	孔径	設計コンクリート強度	主筋	一般部せん断補強筋	Z筋	Y筋	S筋	せん断余裕度*1	せん断余裕度*2
NK2-33	300mm × 400mm	2.5	133mm	36N/mm <sup>2</sup>	6-D19	4-D6@50 (SD345)	2組D10 (SD345)	D10 (SD345)	4-D6@42.5 (SD345)	0.98	1.13
NK3-33							3組D10 (SD345)				
HK2-33	300mm × 400mm	2.0	133mm	48N/mm <sup>2</sup>	8-D19	4-D6@50 (SD785)	2組D10 (SD785)	D10 (SD345)	4-D6@42.5 (SD785)	0.95	1.00
HK3-33							3組D10 (SD785)				
HK2-25			100mm				4-D6@50 (SD345)	3組D10 (SD345)	4-D6@42.5 (SD345)	0.71	0.79

\*1 せん断強度は、Y筋寄与分を無視した広沢式<sup>1)</sup>による

\*2 せん断強度は、Y筋寄与分を考慮した広沢式<sup>1)</sup>による

ている広沢式<sup>1)</sup>によるせん断余裕度は、Y筋を斜め筋として考慮しない場合 0.71~1.06, 考慮した場合は 0.79~1.19 であり、計算上は曲げ破壊型とせん断破壊先行型が混在している。

材料特性は、表 - 2 に示すとおりである。

#### 4.2 加力方法

試験体の柱に相当する部分を反力床に固定して直立させ、カンティレバー形式で正負交番の水平方向加力を行った。

#### 4.3 実験結果

##### (1) 荷重 - 変形関係と破壊進展状況

加力終了時のひび割れ状況の例として、Z筋の組数だけが異なる HK2-33 と HK3-33 の結果を図 - 4 に示す。また、図 - 5 に 5 体の荷重 - 変形関係を示す。

全ての試験体で主筋の曲げ降伏が先行した。開口直径が D/3 の 4 体のうち、Z筋が 2 組の NK2-33 と HK2-33 は開口上下のコンクリートが圧壊してせん断破壊した。それぞれ終局変形角（最大強度の 80% に耐力低下する時の変計角と定義）は 0.08rad. と 0.04rad. となった（NK2-33 は、

0.08rad. 以降も最大強度の 80% 以上の耐力があったが、0.08rad. 時点の耐力低下がやや激しかったので、この値を終局変形とした）。3 組の Z筋を配した NK3-33 と HK3-33 及び開口が小さい HK2-25 では開口上下のコンクリートにひび割れは生じたものの最終的な破壊に至らず、0.1rad. に達しても耐力低下が生じなかった。

表 - 2 材料の機械的性質

##### 鉄筋

鉄筋種 径	材質	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	用途
D6	SD345	385	185	536	横補強筋、S筋
	SD785	1063	185	1150	横補強筋、S筋
D10	SD345	392	191	438	Z筋、Y筋
	SD785	1134	204	1259	Z筋
D19	SD345	371	191	468	主筋

##### コンクリート

試験体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kN/mm <sup>2</sup> )
NK2-33, NK3-33	39.7	29.5	3.05
上記以外	42.3	31.1	3.18

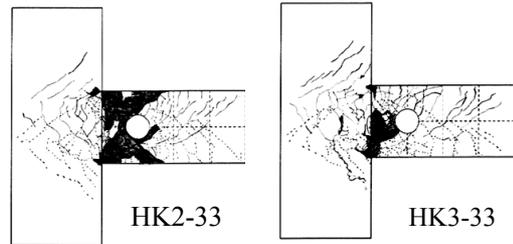


図 - 4 ひび割れ図

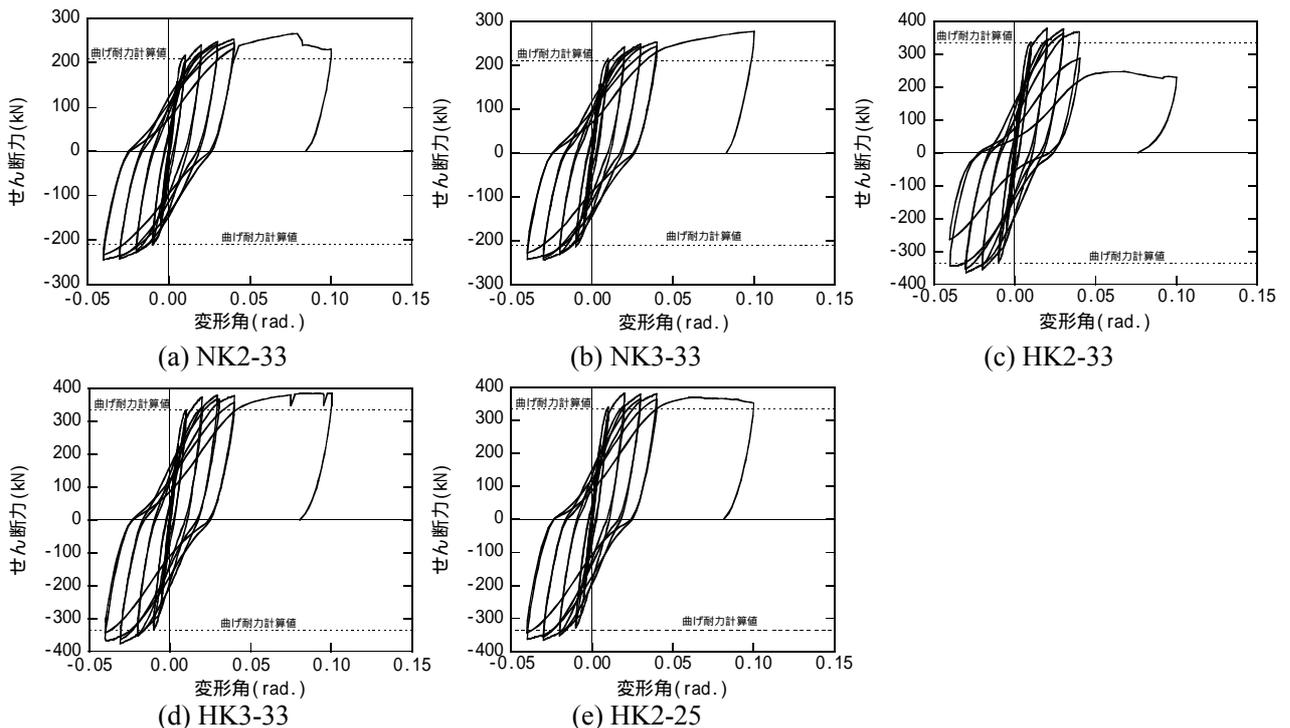


図 - 5 荷重 - 変形関係

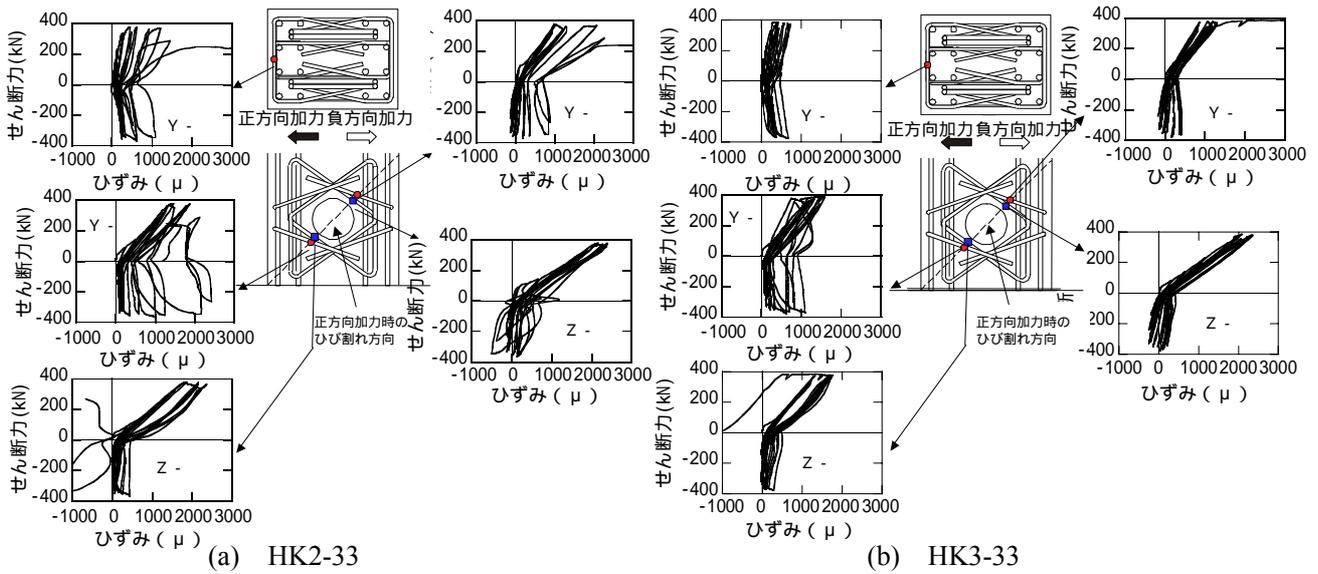


図 - 6 Z筋とY筋のひずみ

(2) Z筋とY筋のひずみ

Z筋の組数だけが異なるHK2-33とHK3-33のZ筋およびY筋のひずみと梁せん断力の関係(ε-Q関係)を図-6に示す。開口左右のひび割れの向きとZ筋のひずみの関係を見ると、ひび割れを横切るZ筋が引張を受けており、斜めひび割れの拡大を抑制する機能を果たしていたと考えられる。

Y- とZ- の結果から分かるように、Y筋のε-Q関係は、ほぼ同位置のZ筋とよく似た形となっており、Z筋と同様に斜めひび割れの拡大を抑制していたと考えられる。また、主筋にかかっている部分で測定したY筋のひずみ(Y-)を見ると、開口横でコンクリートの圧壊が生じたHK2-33ではこのY筋周囲のコンクリートが圧縮になるとき(Y-では正方向加力時)に引張ひずみが増大して最終的には引張降伏したが、圧壊が生じなかったHK3-33ではY-のひずみは小さかった。これより、Y筋はコンクリートを拘束する機能も果たしていたと推測できる。

(3) S筋のひずみ

図-7にHK2-33とHK3-33のS筋のε-Q関係を示す。正方向加力、負方向加力のいずれでも、せん断力が増大すると引張ひずみが大きくなるという、一般的なせん断補強筋で観察され

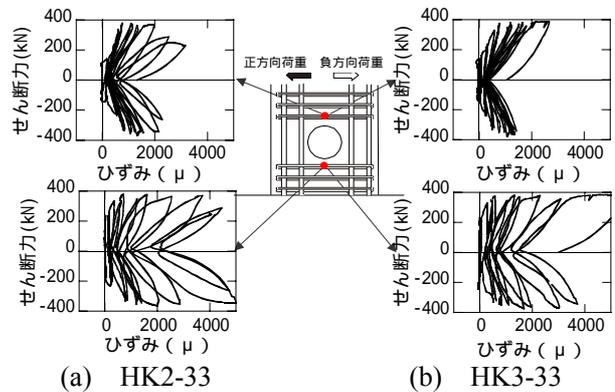


図 - 7 S筋のひずみ

る傾向を示していることから、S筋はせん断補強筋として機能していたと考えられる。

5. 終局変形角の評価

鉄筋コンクリート部材の変形能力には、せん断余裕度(せん断強度と曲げ強度の比)が強く影響するとされている。ここでも、せん断余裕度と終局変形角の関係を整理する。

5.1 検討資料

前章で述べた5体のほかに、既往の梁端開口試験体81体<sup>7)~19)</sup>を検討対象に加える。これらの実験のパラメータは、下記のような範囲にある。

- ・ 開口中心と梁端の距離・・・D/3～D/1
- ・ 開口の直径・・・梁せいのD/5～D/3
- ・ コンクリート強度・・・20N/mm<sup>2</sup>～67N/mm<sup>2</sup>
- ・ 入力せん断応力度・・・0.035bDσ<sub>B</sub>～0.167bDσ<sub>B</sub>  
(b, Dは梁断面の幅とせい, σ<sub>B</sub>はコンクリ

ートの圧縮強度)。ただし、係数が高いものは、圧縮強度が  $20\text{N/mm}^2$  程度の低強度コンクリートを使ったものであるため、せん断応力度の絶対値は大きいものではない。

- 開口補強法・・・すべて斜め筋を有している。斜め筋は、正方形の閉鎖型鉄筋を  $45$  度回転させて用いたものが大多数である。

## 5.2 強度算定式

曲げ強度  $Q_f$  は次式で算定する。

$$Q_f = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_{ty} \cdot d / a \quad (1)$$

$a_t$  : 引張主筋の断面積,  $\sigma_{ty}$  : 引張主筋の降伏強度,  $d$  : 有効せい,  $a$  : 梁のせん断スパン

有孔梁のせん断強度を計算する式として、終局強度型指針式<sup>20)</sup>(式(2))を用いる。

$${}_s Q_{su} = b \cdot j_{tw} \cdot p_{ws} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi_s + \sum A_d \cdot d \cdot \sigma_y \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$j_{tw} = j_t - H / \cos \phi_s - G \cdot \tan \phi_s \quad (3)$$

$$\cot \phi_s = \min \left( \sqrt{v \cdot \sigma_B / p_{ws} \cdot \sigma_{wy} - 1}, 2.5 \right) \quad (4)$$

ただし、 $p_{ws} \cdot \sigma_{wy} > (1/2 - H/j_t) \cdot v \cdot \sigma_B$  のときは  $p_{ws} \cdot \sigma_{wy} = (1/2 - H/j_t) \cdot v \cdot \sigma_B$  とする。

$$v = 1.70 \sigma_B^{-0.333} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5)$$

$b$  : 梁幅,  $j_t$  : 応力中心間距離,  $p_{ws}$  : 孔際せん断補強筋比,  $\sigma_{wy}$  : 孔際せん断補強筋の降伏強度,  $H$  : 開口直径,  $G$  : 孔の両脇の孔際補強筋間隔,  $\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度,  ${}_s \sigma_y$  : 孔際せん断補強筋の降伏強度,  $A_d$  : 斜め筋の断面積で、 $\Sigma$  は図 - 8 の鉄筋を総和する,  ${}_d \sigma_y$  : 斜め筋の降伏強度,  $\theta$  : 斜め筋が梁の部材軸となす角度。

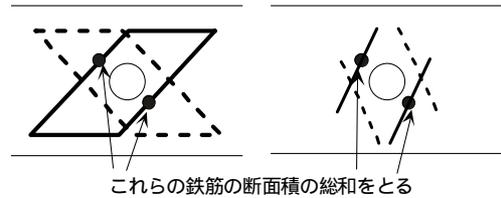


図 - 8 計算に用いる斜め筋の断面積

実験におけるひずみの測定結果から、Y筋もZ筋と同様に斜めひび割れの拡大を抑制する可能性が考えられるので、斜め筋としてZ筋だけを考慮した場合と、Z筋とY筋の両方を考慮した場合を考える。

## 5.3 せん断余裕度と変形能力の関係

せん断強度の計算値と曲げ強度の計算値の比を「せん断余裕度」とよぶ。Y筋を無視した終局強度指針式によるせん断余裕度を  ${}_s \alpha_1$ 、Y筋を考慮した終局強度指針式によるせん断余裕度を  ${}_s \alpha_2$  と表す。

図 - 9(a)(b)はそれぞれ  ${}_s \alpha_1$  および  ${}_s \alpha_2$  と終局変形角の関係を示す。文献 4)5)によると、Y筋の有無および長さが変形能力に影響するので、既往の実験はY筋の長いもの(Y筋端部が開口中心を超えているものを「長い」と定義した)とそれ以外で層別した。本実験の試験体は長いY筋を有するものに属する。Y筋が無いか短いものは、せん断余裕度が大きくなっても終局変形角は目標の  $0.04\text{rad}$ . に届かないことが多い。一方、Y筋が長いものはすべて  $0.04\text{rad}$ . を超えており、 ${}_s \alpha_1$  および  ${}_s \alpha_2$  と終局変形角との間にある程度の相関が見られる。本研究で実験した 5

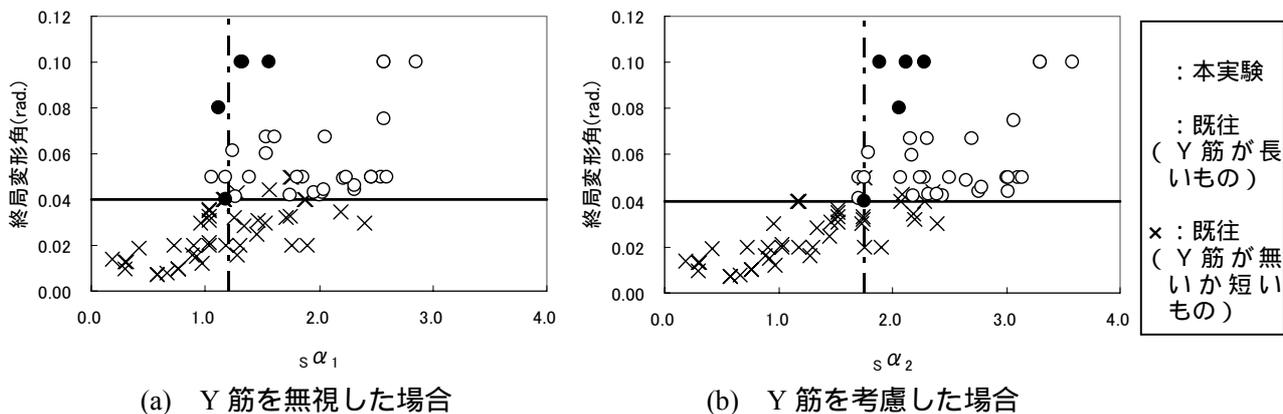


図 - 9 せん断余裕度と変形能力の関係

体の試験体の終局変形角は、せん断余裕度が同じ既往の試験体よりも大きい結果となっており、Z筋の効果が高いことが推察できる。

既往の実験も含めると、 $\alpha_1$  が 1.2 以上かつ  $\alpha_2$  が 1.75 以上ならば、目標とした終局変形角 0.04rad. を上回っている。

## 6. まとめ

直径が梁せいの 1/3 の円形開口を梁端から梁せいの 1/2 の距離に設け、曲げ降伏後も 0.04rad. まで耐力を保持させる補強法を開発した。この補強法は、Z筋、Y筋、S筋と称する 3 種類の補強筋を用いるものである。構造実験により本補強法は高い効果を持つことを確認した。既往の実験も合わせて考えると、終局強度型指針に示されたせん断強度式を用いて算定したせん断余裕度が、Y筋を斜め筋として考慮しない場合 1.2 以上かつ考慮した場合 1.75 以上ならば、終局変形角が 0.04rad. 以上となる。

参考文献（「大会」は「日本建築学会大会学術講演梗概集」を表す）

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会，1999．
- 2) 広澤雅也他：鉄筋コンクリート造有孔梁の耐震性能に関する実験研究（その 8），大会，（1991），pp.289-290
- 3) 別所佐登志他：鉄筋コンクリート有孔ばりの補強方法に関する実験的研究，鹿島建設技術研究所年報，第 26 号，（1977），pp.161-166．
- 4) 日本建築総合試験所：Z-M ダイアレン工法，建築技術性能証明評価概要報告書，2002．
- 5) 日本建築総合試験所：MAX-E 工法，建築技術性能証明評価概要報告書，2002．
- 6) 橋本一郎他： $w_y=8000\text{kgf/cm}^2$  級のせん断補強筋を用いた RC 有孔梁のせん断性状に関する実験研究，日本建築学会学術講演梗概集，（1994），pp.933-934．
- 7) 有本勝彦他：材端近傍に開口を有する RC 梁のせん断耐力に関する研究（その 1），大会，

（2001），pp.337-338

- 8) 細矢博他：開孔を有する高強度 RC 梁の構造性能に関する研究，大会，（2001），pp.355-356
- 9) 押切吉紀他：RC 造有孔梁に関する実験的研究，大会，（1997），pp.263-264
- 10) 土田尚子他：鉄筋コンクリート造有孔梁の実験，大会，（1997），pp.269-270
- 11) 小田稔：鉄筋コンクリート造短スパン梁の構造性能に関する実験的研究，大会，（1996），pp.435-436
- 12) 押切吉紀他：RC 造多孔梁に関する実験的研究，大会，（1996），pp.447-448
- 13) 小森淳他：鉄筋コンクリート造短スパン梁の構造性能に関する実験的研究，大会（1995），pp.481-482
- 14) 市塚貴浩他：高強度せん断補強筋を用いた RC 有孔梁の変形性能に関する実験的研究，大会，（1994），pp.921-922
- 15) 中野克彦他：鉄筋コンクリート有孔梁の変形性状に関する実験研究，大会，（1994），pp.941-942
- 16) 矢下伸之他：鉄筋コンクリート有孔梁の変形能に関する実験研究（その 2）（その 3），大会，（1994），pp.951-954
- 17) 石渡康弘他：鉄筋コンクリート有孔梁の変形性能（その 1），大会，（1993），pp.469-470
- 18) 鉄筋コンクリート有孔梁のせん断伝達に関する実験研究，大会，（1990），pp.329-330
- 19) 13,000 級開孔補強筋を用いた RC 有孔梁のせん断破壊性状（その 1）～（その 3），大会，（1994），pp.935-940
- 20) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建築物の終局強度型耐震設計法指針・同解説，1990