

論文

[2204] 反曲点高さが角形鋼管で被覆した X 形配筋の合成柱の弾塑性性状に与える影響

森下 貴博\*1・佐々木 良一\*2・山本 裕康\*3・南 宏一\*4

1. はじめに

筆者らは、鉄筋コンクリート（以下、RC）造短柱のぜい性的なせん断破壊を防止するために、高圧縮力に対してコンクリートの外周を角形鋼管で被覆した拘束効果と、高せん断力に対してせん断補強筋を必要としない X 形配筋のもつ効果を組み合わせて、高圧縮力と高せん断力に対して優れた性能をもつ構法を考案し、その耐震性能に対する研究を行ってきた[1][2]。

しかし、これまでの実験的研究では、柱の反曲点高さ比を  $y_0=0.50$  としたものを対象としていた。一方、X 形配筋柱における反曲点高さ比  $y_0$  の影響を検討した倉本らの研究では、 $y_0$  が大きくなるに従って、せん断耐力および初期剛性は減少するが、しかしながら最大耐力以後の耐力劣化の性状は、反曲点高さによって殆ど差がないという報告がなされている[3]。そこで、本構法における反曲点高さ比  $y_0$  が、剛性、耐力および最大耐力以後の挙動にどのような影響を与えるのか、また、文献[4]に示される反曲点高さ比の影響による X 形配筋の負担せん断力の低減率  $\gamma$  についての妥当性を調べるために、角形鋼管で被覆した全平行形、全 X 形の 6 体の試験体を用いて実験的研究を行った。さらに、被覆鋼管を用いない RC 造柱（以下、純 RC 造とする）における反曲高さ比の影響とを比較検討するために、同様の実験変数をもつ、6 体の試験体を計画し、計 12 体について実験的な検討を行った。本論文はその内容を報告するものである。

2. 実験計画

反曲点高さ比の影響をより単純明解に把握できるようにするため、作用軸力を零とした単調載荷の実験を行うことを実験計画の基本にして、実験変数を決定した。すべての試験体について柱長さ比は、 $\eta=h/D=3.0$  ( $h$ :柱長さ、 $D$ :柱せい) であり、実験変数は、配筋法として主筋を全 X 形および全平行形と、反曲点高さ比を  $y_0=0.50, 0.75, 1.00$  とし、これらの組合せで計 12 体の試験体を計画した。実験計画の一覧を表-1 に示す。被覆鋼管としては角形鋼管を選び、公称寸法として

表-1 実験計画

反曲点高さ比 $y_0$	被覆鋼管形		純 RC 形	
	平行形	X 形	平行形	X 形
0.50	SP05	SX05	RP05	RX05
0.75	SP08	SX08	RP08	RX08
1.00	SP10	SX10	RP10	RX10

□-200x200x4.5(STKR400)を用いた。この被覆鋼管はコンクリートの拘束のみに機能させることを目的とするために、文献[1]の研究と同様に、鋼管と試験体定着部の材端部の間には5mmのクリアランス（図-1のA部分）を設け、直接的に、曲げ、せん断力が鋼管に作用しないようにした。また鋼管の内側とコンクリートとの間は、自然付着の状態とした。

\*1 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 摂南大学助教授 工学部建築学科 (正会員)

\*3 日本建設(株) 技術研究室 工修 (正会員)

\*4 福山大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

### 3. 実験

図-1に鋼管で被覆したものおよび純RC造のX形配筋の試験体の断面構成および形状寸法を示す。全主筋量としては8-D16(SD395)を用いており、被覆鋼管の平行配筋のみのものは $p_t=2.18\%$ とした。被覆鋼管試験体の柱体部には帯筋は設けていないが、純RC造については帯筋として $3.0\phi@50$ (SR235、 $P_w=0.14\%$ )を用い、さらに主筋をX形としたものについては帯筋固定用の鉄筋 $3.0\phi$ を配筋した。被覆鋼管の板厚は、市販されているものの中で最も薄いものという条件から選び、純RC造柱の帯筋比は、平行配筋柱で反曲点高さ比 $y_0$ が1.00の場合で、せん断破壊を生ずる条件から定めている。従って、本実験では被覆鋼管と帯筋量の間には、量的な関係は取り扱っておらず、それぞれの部材構成における反曲点高さ比 $y_0$ の影響のみ考察することにした。

図-2に荷重装置を示すが、反曲点高さを変化させるため、鋼製のコ字形荷重用治具を取り付け、これに柱端部にRC造製の定着ブロックを設けたものを取り付け、単調曲げ、せん断力を負荷させた。柱頭の回転量をコ字形荷重用治具の下部に取り付けた変位計(A)の鉛直変位量 $\delta_u$ より測定し、かつ、その回転による、せん断力を負荷するジャッキ(A)の作用線の傾きが反曲点高さの変動 $\Delta y$ に与える影響を測定し、7章で示す終局曲げ耐力から決まるせん断力の計算値において考慮した(図-3)。

荷重方法は、柱材の変位部材角 $R (= \delta/h)$  ( $\delta$ :柱頭部の変位、 $h$ :柱長さ、図-3)を制御変位振幅値として、最終値を $R=0.05\text{rad}$ とする単調荷重を行った。表-2に各試験体のコンクリート強度を示すが、鋼管 $\square-200\times 200\times 4.5$ の実測寸法は、外径 $200.2\text{mm}$ 、板厚 $4.56\text{mm}$ で、その引張降伏応力度 $\sigma_y$ は $3500\text{kgf/cm}^2$ 、平行およびX形主筋に用いたD16の引張降伏応力度 $\sigma_y$ は $4150\text{kgf/cm}^2$ 、帯筋の引張降伏応力度 $\sigma_{wy}$ は $2540\text{kgf/cm}^2$ である。

### 4. コンクリート部分の損傷状況

全試験体に対して柱部材角 $R=0.05\text{rad}$ まで加力でき、被覆鋼

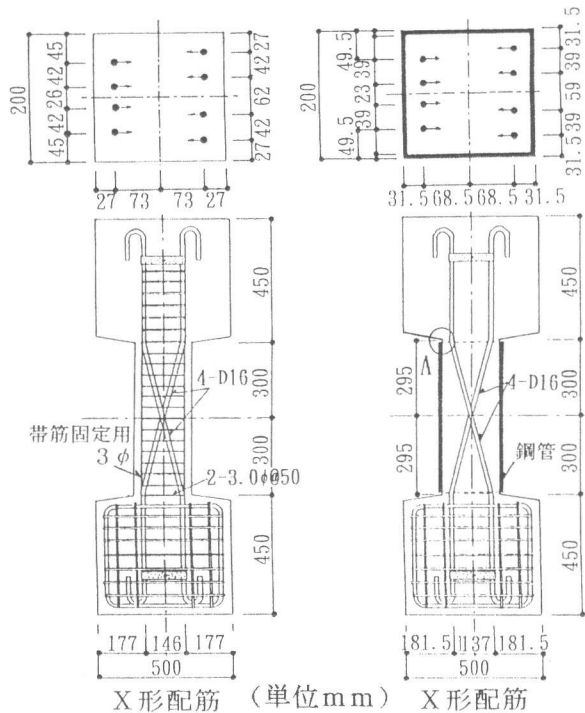


図-1 X形配筋の断面構成および形状寸法

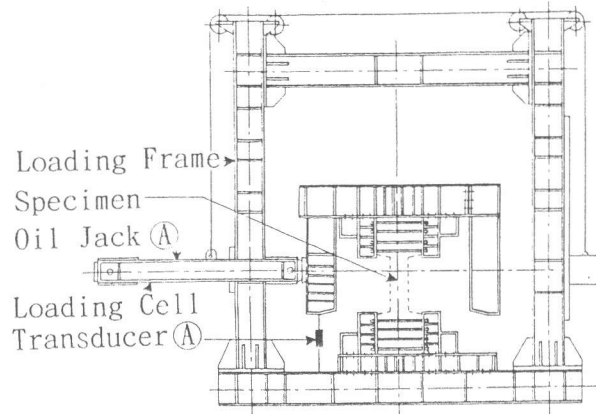


図-2 荷重装置

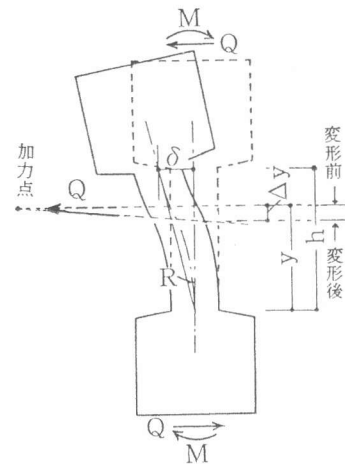


図-3 部材角と柱頭回転による反曲点高さの移動量 $\Delta y$

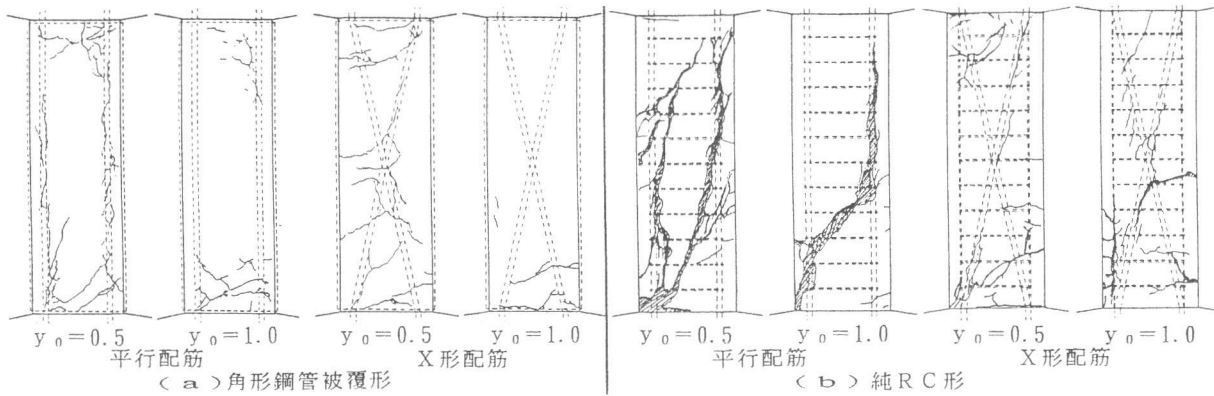


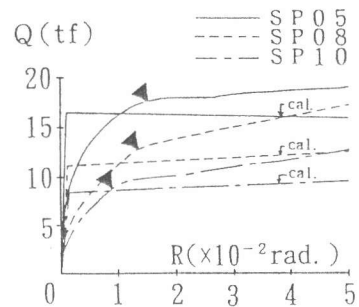
図-4 実験終了後のコンクリートの損傷

管の管壁の座屈は全くみられなかった。図-4に反曲点高さ比  $y_0=0.50$  および  $1.00$  の試験体のコンクリート部分の損傷状況の数例を示す。なお、被覆鋼管内部のコンクリートの損傷状況は、試験体の柱体部が鋼管で被覆されているため、外観からは観察できないので、実験終了後、被覆鋼管をガス切断により取り除いた後を観察した。被覆鋼管の場合は、断面構成のいかんにかかわらず  $y_0=0.50$  の試験体においては、柱頭および柱脚の曲げひび割れが顕著であるのに対し、 $y_0=1.00$  の試験体では、柱脚の曲げひび割れのみ顕著であるが、柱頭の曲げひび割れは極めて微少であることが観察された。一方、純RC造の平行配筋の試験体は、反曲点高さの変化にかかわらず斜張力によるせん断破壊が顕著にみられたが、X形配筋の試験体では反曲点高さ比によらず、異形鉄筋のX形主筋に沿ったひび割れが若干みられるものの、コンクリート部分には、著しい損傷はみられなかった。

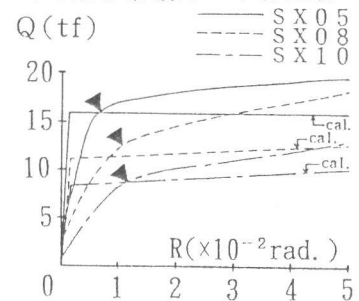
### 5. せん断力-変形関係

各試験体のせん断力-変形関係を図-5に示す。縦軸はせん断力  $Q$  (tf)、横軸は柱部材角  $R$  ( $\times 10^{-2}$  rad.) を表す。図中の直線は初期剛性および後述の曲げ耐力から決まるせん断力の計算値を表し、また各試験体について  $\blacktriangledown$  印は、W・S・Gを貼付した材端の主筋のひずみの実測値が、降伏ひずみに達した位置を示し、これを降伏耐力  $Q_y$  とし、耐力が最も大きい値を最大耐力  $Q_{max}$  とし、それぞれを実験結果として表-2に示す。 $\nabla$  印は純RC造の初期曲げひび割れを表す。

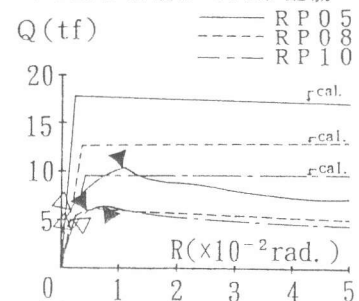
被覆鋼管を用いたRC造柱の挙動特性は、断面構成および反曲点高さによる変化にかかわらず、本実験の最終変位幅である  $R=0.05$  rad. に達しても耐力の低下が見られず、むしろ上昇しているということである。これは、図-3に示すせん断力の加力



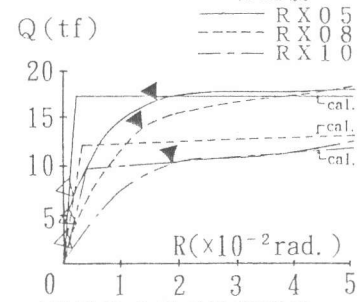
(a) 鋼管被覆形で平行配筋



(b) 鋼管被覆形でX形配筋



(c) 純RC形で平行配筋



(d) 純RC形でX形配筋

図-5 せん断力-変形関係

位置の変動により、反曲点高さが下降しているのが原因と思われる。各断面構成ごとについては  $y_{\theta}$  が同じとき、殆ど同程度の耐力を保持しているが、反曲点高さ比  $y_{\theta}$  が 0.50、0.75、1.00 と変化する場、  $y_{\theta}$  が大きくなるに従い耐力は低下する傾向を示している。また、純 RC 造柱に対しては、X 形配筋では  $y_{\theta}$  が同じとき、被覆鋼管柱と殆ど同程度の耐力を保持する。しかしながら平行配筋では  $R=0.01\text{rad}$ . 内外で斜張力によるせん断破壊を生ずるため耐力は低下している。

## 6. X形主筋のひずみの推移状況

図-6 に被覆鋼管と純 RC 造の X 形配筋の  $y_{\theta}=0.50$  および  $y_{\theta}=1.00$  の変位部材角  $R=0.02\text{rad}$ . までの主筋ひずみ度の推移状況を示す。縦軸に柱頭部のひずみ度  $\varepsilon_{top}$ 、 $\varepsilon_{cen.}$  ( $\times 10^{-6}$ )、横軸に柱脚部のひずみ度  $\varepsilon_{bas.}$  ( $\times 10^{-6}$ ) を表し、図中の丸数字は主筋の W・S・G の測定位置を示し、点線

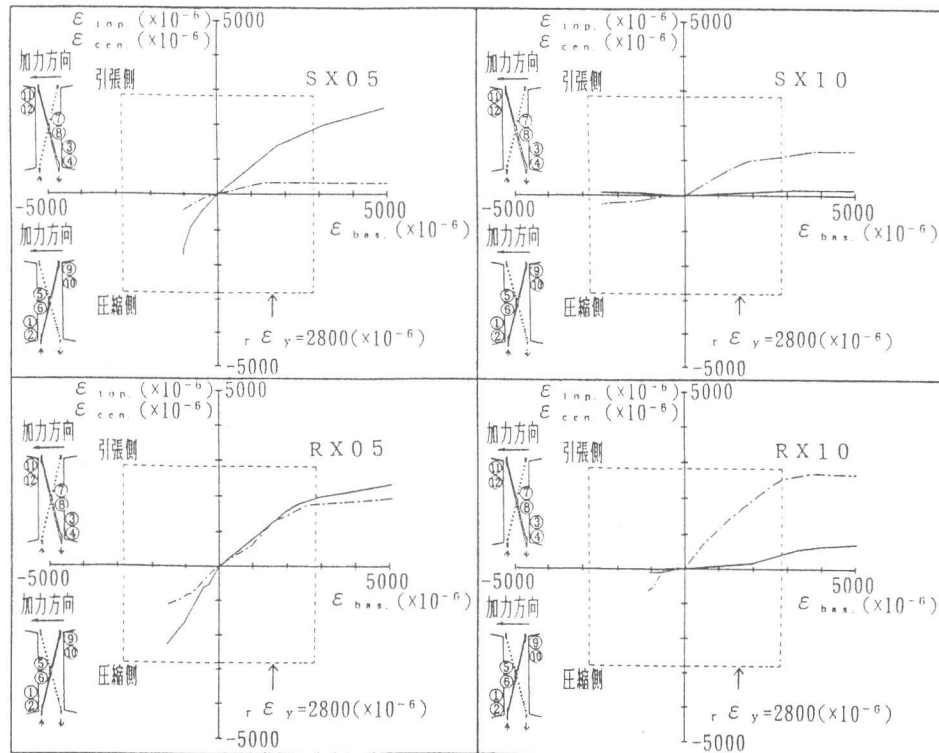


図-6 主筋ひずみ ( —  $\varepsilon_{bas.}$ 、 $\varepsilon_{top.}$ 、- - -  $\varepsilon_{bas.}$ 、 $\varepsilon_{cen.}$  )

は主筋の降伏ひずみ度  $r \varepsilon_y=2800(\times 10^{-6})$  を示す。

すべての試験体について、 $\varepsilon_{top.} - \varepsilon_{bas.}$  関係からは、断面構成にかかわらず反曲点高さ比  $y_{\theta}=0.50$  のとき、圧縮側と引張側の初期ひずみ度との角度は、ほぼ45度になるが、反曲点高さ比  $y_{\theta}$  が大きくなるに従いそれは緩やかになり、 $y_{\theta}=1.00$  になるとその角度はほぼ零となる。すなわち柱頭部のひずみが零であることを示している。また断面構成および反曲点高さの変化にかかわらず、柱脚部の引張側のひずみ度は、変位振幅  $R=0.01\text{rad}$ . 内外で降伏ひずみ度に達しているが、圧縮側は  $R=0.02\text{rad}$ . でも降伏ひずみ度に達していない。ここに示すいずれの試験体においても、柱脚部において、引張側主筋降伏、圧縮側主筋未降伏であり、後に示す図-7の終局曲げ耐力時の応力モデルを裏付けることを示している。

## 7. 終局耐力の検討

純 RC 造柱で平行配筋を除くすべての試験体が曲げ、せん断力を受けたとき、曲げ破壊が、せん断破壊に対して卓越することは、コンクリートの損傷状況、あるいは、文献[1][2][5]により判断できる。従ってここでは、これらの柱材の終局耐力を検討するために、図-7に示すような

応力モデルにおける、柱体部の終局曲げ耐力から決まるせん断力を求めることにした。その終局曲げ耐力は、

$$m_u = \frac{M_u}{c_b \cdot c_d \cdot D \cdot \sigma_B} = \frac{1}{2} \{k(1-k) + (\lambda+1)\Phi \cdot r d_1\} \quad (1)$$

で与えられる。ここに、 $k=(1-\lambda)\Phi$ 、 $\Phi=r_a \cdot r \cdot \sigma_y / c_b \cdot c_d \cdot D \cdot \sigma_B$ 、 $r d_1=r d / c_d$  ( $r d$ : 主筋の中心間距離、 $\lambda$ :  $M_u$ が最大となる時の値)。これより、その終局せん断力は、

$$Q_{um} = \frac{Q_{um}}{c_b \cdot c_d \cdot D \cdot \sigma_B} = \frac{m_u \cdot c_d}{y_0 \cdot h + \Delta y} \quad (2)$$

によって求められる。ここに、 $h$ : 柱長さ、 $\Delta y$ : 柱頭回転によるせん断力の作用位置の移動量。

一方、純RC造で平行配筋のものは、コンクリートの損傷からみて斜張力によるせん断破壊が顕著である。従ってこの柱の終局せん断耐力の検討は、帯筋をトラス機構とし、コンクリートをアーチ機構として求められる日本建築学会、鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説[6]に準拠して行うが、本論ではB法を用いて、その終局せん断耐力を、

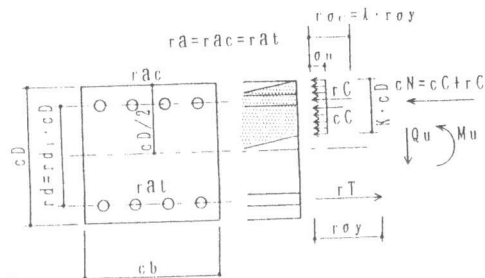


図-7 終局曲げ耐力時の応力モデル

$$Q_u = c_b \cdot r_j \cdot P_w \cdot \sigma_y + \tan \theta \cdot (1-\beta) \cdot c_b \cdot c_d \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2 \quad (3)$$

$$\beta = 2 \cdot P_w \cdot \sigma_y / (\nu \cdot \sigma_B)$$

ここに、 $\tan \theta = \sqrt{\{(2M/Q \cdot D)^2 + 1\}} - 2M/Q \cdot D$ 、 $\nu = (2M/Q \cdot D + 1) / 4$   
( $0.5 \leq \nu \leq 1.0$ )

によって求める。

これらの計算結果と実験値の比較を表-2および、図-5に示す。 $Q_{um1}$ および $Q_{um2}$ は式(2)より求められるものであり、 $Q_{um1}$ は実験値の降伏点 $Q_y$ に、 $Q_{um2}$ は実験値の $Q_{max}$ に対応するものである。なお、上記、式(1)中の $\sigma_B$ は表-2の $F_0$ と対応するものである。これらの結果によれば、純RC造で主筋が平行配筋以外の試験体で、降伏時においては $y_0=0.75$ の試験体を除けば、実験値と計算値は殆ど一致しており、計算値は安全側を与えている。一方、純RC造の平行配筋は、斜張力による終局せん断耐力で評価できるものと考えられる。

## 8. 考察

図-8は、主筋降伏時の無次元化降伏せん断力 $Q_y/bDf_c$ と反曲点高さ比 $y_0$ との関係を示し、図中の○●印は被覆鋼管形の平行形およびX形の実験値を、△▲印は純RC形の平行およびX形の実験値を表す。また、実線および点線は、それぞれ平行形、X形の計算値を表す。純RC造柱の平行配筋では、せん断破壊しているため、せん断耐力で決まる計算値を示す。純RC造で反曲点高さ比 $y_0$ が0.75の試験体を除いて、すべての試験体の降伏耐力 $Q_y$ は断面構成および反曲点高さ比 $y_0$ の変化いかにかわらず実験値が大きくなっている。また文献(4)において、反曲点高さ比がX形配筋の耐力に及ぼす影響は、

表-2 コンクリート強度、実験値、計算値および実験値と計算値との比率

試験体	コンクリート強度 F <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	実験値(tf)、移動量Δy(mm)				計算値(tf)			実験値/計算値		
		Q <sub>y</sub>	Δy	Q <sub>max</sub>	Δy	Q <sub>um1</sub>	Q <sub>um2</sub>	Q <sub>u</sub>	Q <sub>y</sub> /Q <sub>um1</sub>	Q <sub>max</sub> /Q <sub>um2</sub>	Q <sub>y</sub> /Q <sub>u</sub>
SP05	278.2	17.7	6.8	18.8	8.9	16.1	16.0		1.10	1.18	
SP08	255.2	13.0	12.6	16.9	58.8	11.3	12.6		1.15	1.34	
SP10	233.7	9.0	16.4	12.7	75.9	8.5	9.5		1.05	1.34	
SX05	263.6	16.1	1.1	19.3	1.5	15.9	15.9		1.01	1.21	
SX08	287.1	12.5	7.6	17.7	45.5	10.9	11.9		1.14	1.49	
SX10	243.0	8.3	16.0	12.5	79.3	8.2	9.6		1.01	1.30	
RP05	247.0	10.0	7.0	10.0	6.8	17.3	17.3	8.9	0.58	0.58	1.12
RP08	243.1	6.0	1.6	6.0	17.0	12.1	12.6	6.9	0.50	0.48	0.87
RP10	231.9	6.3	9.1	6.3	21.9	9.5	9.6	5.3	0.66	0.66	1.19
RX05	247.5	17.0	1.3	17.9	0.4	17.1	17.1		0.99	1.05	
RX08	239.3	14.0	17.7	18.0	52.2	12.2	13.2		1.15	1.36	
RX10	227.4	10.5	51.4	12.4	113.2	9.8	11.0		1.07	1.12	

$$dQ_u = 2\gamma \cdot d a t \cdot d \sigma_y \cdot \sin \theta \quad \gamma = 0.5/y \quad (4)$$

で示されている。この計算結果は、図-8の一点鎖線で与えている。実験値に対して、計算値は反曲点高さ比によらず、若干低下する傾向にあるが、耐力に与える反曲点高さ比の影響は、ほぼ式(4)で評価できることを示している。

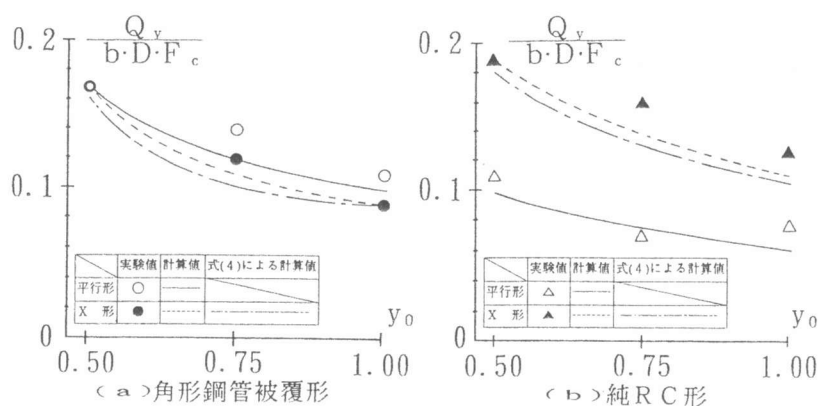


図-8 主筋降伏時の無次元化せん断力-反曲点高さ比関係

## 9. 結論

反曲点高さが、鋼管で被覆拘束されたX形配筋の合成柱の耐力に及ぼす影響を、主筋平行配筋および純RC柱とを比較しながら実験的に検討し、以下のような結果を得た。

- 1) 主筋が平行配筋の純RC造を除いた試験体では、同じ反曲点高さにおいて、主筋の配筋方法および鋼管の有無に関係なく殆ど類似の挙動を示し、耐力の低下もみられない。
- 2) 純RC造の平行配筋を除けば、反曲点高さの変化に関係なく、せん断破壊より曲げ破壊で耐力が決まる傾向にあるので、終局せん断力の算定は、終局曲げ耐力から決まるせん断力で評価できる。
- 3) X形主筋柱の耐力は、反曲点高さ比にかかわらず、曲げモーメントの大きい側の材端のX形主筋の引張および圧縮で決まるので、その耐力は反曲点高さ比に逆比例し、文献(4)の低下率 $\gamma$ で評価できる。
- 4) 主筋を全X形とし、かつ、反曲点高さ比 $y_0$ が0.50でない場合でも、柱中央部に平行配筋を併用しなくても、その試験体の破壊性状は曲げ破壊となり、材端の曲げ耐力を発揮できる。

### 参考文献

- 1) 山本裕康・投野修美・南宏一・佐々木良一：高軸力を受ける角形鋼管で被覆したX形配筋柱の耐力とじん性、コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、pp.257-271、1990.5
- 2) 山本裕康・佐々木良一・南宏一：高軸力を受ける短柱の角形鋼管で被覆したX形配筋の合成柱の弾塑性性状、コンクリート工学年次論文報告集、13-2、pp.969-974、1991.6
- 3) 倉本洋・南宏一：非対称曲げモーメントを受けるX形配筋柱の耐震性能、コンクリート工学年次論文報告集、11-2、pp.483-488、1989.6
- 4) 建設省住宅局建築指導課：X形配筋部材の設計と施工、pp.40-42、1990
- 5) 若林實・南宏一：X形配筋を用いた鉄筋コンクリート柱の耐震性能について、コンクリート工学年次論文報告集、2-2、pp.433-436、1980.6
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、pp.106-116、1990