

論文 鋼管で囲んだ高強度鉄筋コンクリート柱

小室 努^{*1}・川端一三^{*2}・成原弘之^{*3}・今井和正^{*4}

要旨： 鋼管で囲んだ高強度コンクリート柱の地震時の力学性状を把握することを目的に、軸方向筋とスパイラル状の横補強筋を有する高強度鉄筋コンクリート円形鋼管柱試験体の曲げせん断実験を実施した。実験の変数は、鋼管の径厚比と軸力とし、径厚比は最大で143、軸力は一定軸力および変動軸力とした。全ての試験体は、部材変形角で1/25に至るまで耐力低下はなく、優れた変形能力を示した。終局曲げ耐力およびモーメント-変形角関係については、鉄筋コンクリートと鋼管の剛性、耐力に関する既往の評価式による算定値を累加することで、精度よく予測できることを示した。

キーワード： 高強度、鉄筋コンクリート鋼管柱、径厚比、終局曲げ耐力、靱性、重ね継手

1. はじめに

軸方向筋と横補強筋を有する高強度鉄筋コンクリートを鋼管で囲んだ鉄筋コンクリート鋼管柱を考案・開発した。鉄筋コンクリート鋼管柱と鉄骨梁とで構成する架構は、一般の鉄筋コンクリート架構より自由な空間が構成できるので、事務所、商業施設、ホテル等の各種用途の高層建築物に幅広く適用できる。また、鋼管は、構造体およびコンクリート型枠の両方に用いることができるので、建設工期およびコストの面で効果が発揮できる。

本研究では、この鉄筋コンクリート鋼管柱の地震時の力学性状を把握することを目的に、一定軸力下および変動軸力下での水平加力試験を実施し、本柱の耐震性能を考察した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、円形鋼管で囲んだ鉄筋コンクリート柱で、上下両端に加力スタブを有している。実験パラメータは、鋼管の径厚比(70, 119, 143)と軸力(一定軸力, 変動軸力)で、試験体

数は3体である。試験体の断面外径寸法は、No.1, No.2 試験体が300mm, No.3 試験体が250mmであり、試験部分の長さは断面外径の3倍である。試験体の形状を図-1に、試験体諸元を表-1に示す。軸方向筋は連続しておらず、柱中央位

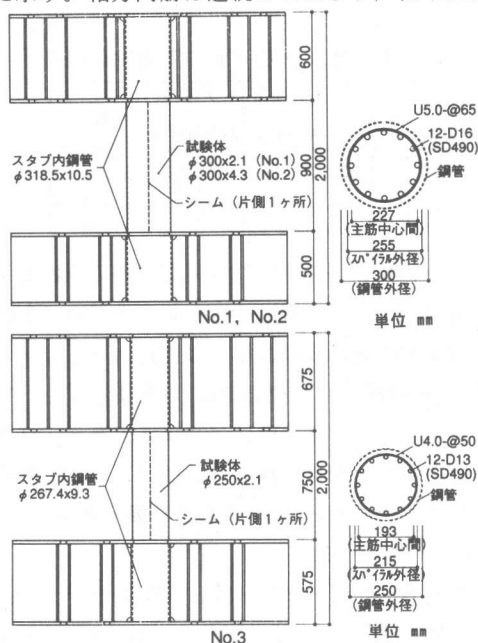


図-1 試験体形状および配筋

*1 大成建設(株)	設計本部構造グループ	工修(正会員)
*2 大成建設(株)	設計本部構造グループ	(正会員)
*3 大成建設(株)	技術研究所 構造防耐火研究室	工修
*4 大成建設(株)	技術研究所 構造防耐火研究室	工修(正会員)

表-1 試験体諸元一覧

試験体	鋼管外径 (mm)	板厚 (mm), 径厚比*1	軸方向筋	横補強筋, ρ_w *2	材長 (mm)	軸力 (kN)
No.1	300	2.1, 143	12-D16	U5.0-@65, 0.21%	900	1270 一定軸力
No.2		4.3, 70				1240, [2650], [0], [-1960]*3 一定軸力
No.3	250	2.1, 119	12-D13	U4.0-@50, 0.20%	750	-1490~2650 変動軸力

*1 径厚比=鋼管外径/鋼管板厚

*2 ρ_w : 横補強筋比 (=2・a w / [Dc・s]) a w: 横補強筋断面積 Dc: コンクリート外径 s: 横補強筋ピッチ

*3 []内の軸力は, 1/200, 1/100, 1/50 で実施

表-2 鋼管の材料特性

試験体	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
No.1	2.1	412	476	201	28.9
No.2	4.3	374	461	209	39.5
No.3	2.1	407	477	204	33.6

表-3 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
D16	591	723	199	14.3
D13	590	711	189	13.0
U5.1	1294	1440	203	7.2
U4.0	1180	1634	196	7.4

表-4 コンクリートの圧縮試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
No.1	65.0	33.5	0.22
No.2	65.6	34.4	0.22
No.3	66.3	35.5	0.21

置で重ね長さ 25D (D:鉄筋呼び径) の重ね継手を用いている。鋼管は SM490 相当を用い, 主筋には SD490 を, 横補強筋には円形スパイラルの異形 PC 鋼棒 (SBPD1275/1420) を使用した。コンクリートの目標強度は 60N/mm² である。試験体に使用した鋼材, 鉄筋およびコンクリートの材料特性を表-2, 表-3 および表-4 に示す。

2.2 載荷方法

加力方法を図-2 に示す。試験体 No.1, No.2 は, 軸力 0.3 $\sigma_B \cdot cA$ (σ_B : コンクリート強度, cA : コンクリート断面積) を一定に保ち, 水平方向力を変位制御で部材角 $\pm 1/400$ で 1 回, $\pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50, \pm 1/25$ でそれぞれ 2 回の正負繰返しとした。なお, 試験体 No.2 では,

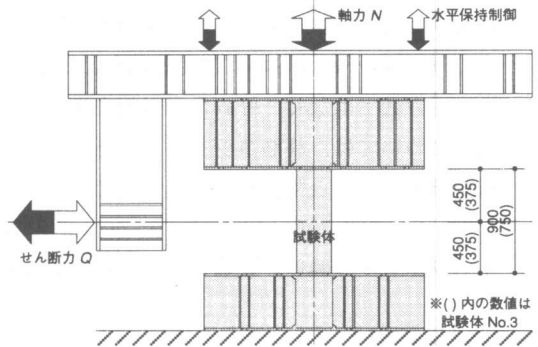


図-2 加力方法

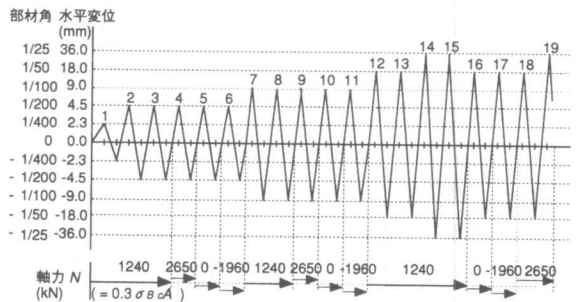


図-3 加力サイクル図 (No.2)

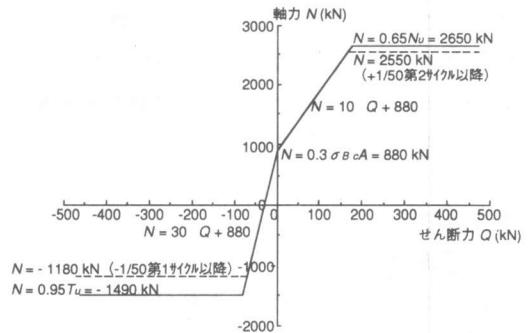


図-4 N-Q 載荷関係図 (No.3)

異なる軸力の場合の復元力特性を確認する目的で, 0.3 $\sigma_B \cdot cA$ (軸応力度で 20MPa) の軸力のほかで, 部材角 1/200, 1/100, 1/50 の加力サイクルにおいて, 2650 kN, 0 および -1960 kN (軸

表-5 実験結果一覧

試験体	加力方向	鋼管						軸方向筋				最大耐力	
		圧縮降伏		引張降伏		局部座屈		圧縮降伏		引張降伏		Q	R
		Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)	Q (kN)	R (rad)
No.1	正	331	0.0030	371	0.0035	613	0.0101	585	0.0089	548	0.0089	748	0.0407
	負	-253	-0.0017	-267	-0.0017	-631	-0.0105	-546	-0.0070	-619	-0.0099	-737	-0.0411
No.2	正	442	0.0035	444	0.0037	660	0.0101	655	0.0076	164	0.0031	907	0.0405
	負	-305	-0.0017	-545	-0.0040	-703	-0.0101	-620	-0.0044	-210	-0.0011	-906	-0.0407
No.3	正	87	0.0021	372	0.0134	177	0.0052	178	0.0046	-	-	457	0.0205
	負	-	-	-45	-0.0007	-	-	-	-	-45	-0.0021	-190	-0.0199

Q : せん断力 R : 部材変形角

応力度でそれぞれ 40MPa, 0 および -30MPa) の一定軸力下の加力も行った。加力サイクルを図-3に示す。

試験体 No.3 の加力は、図-4に示す軸力-水平力関係に従い、0.65Nu~0.95Tu の変動軸力と水平力の組み合わせ加力とした。

3. 実験結果

3.1 せん断力-変形角関係

実験結果一覧を表-5に、No1, No2 および No3 試験体のせん断力-部材変形角関係を図-5, 図-6 および図-7に示す。以下に各試験体についての性状を示す。

(1) No.1 試験体 (図-5)

部材変形角 (R) = 1/200 に至るまでに、鋼管の圧縮降伏と引張降伏が引き続き起き、R=1/100 のサイクル中に、軸方向筋の圧縮降伏および引張降伏が生じた。また、R=±1/100 のピーク時に、圧縮側鋼管の局部座屈が観察された。局部座屈は、スタブフェースから 60mm 程度の位置で生じた。R=1/25 に至るまで耐力の低下はなく、エネルギー吸収のよいループを示し、十分な変形性能を有している。

(2) No.2 試験体 (図-6)

No.2 試験体は、軸力 0.3 σ_B・C A (20MPa) の R=1/200, 1/100 の 2 サイクルをそれぞれ終了した後、40MPa, 0, -30MPa の一定軸力下で同一の部材角で加力を各 1 サイクル行い、20MPa の軸力下の R=1/25 の 2 サイクル終了

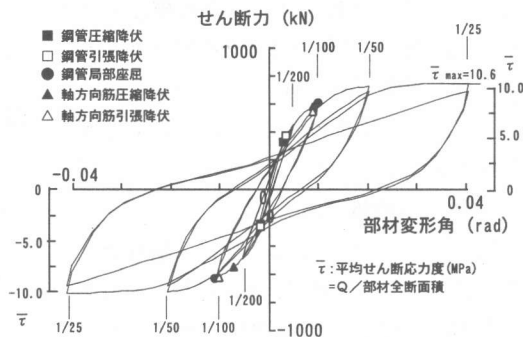


図-5 No.1 試験体 せん断力-部材変形角関係

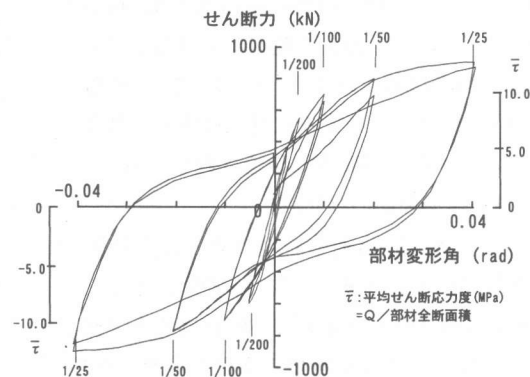
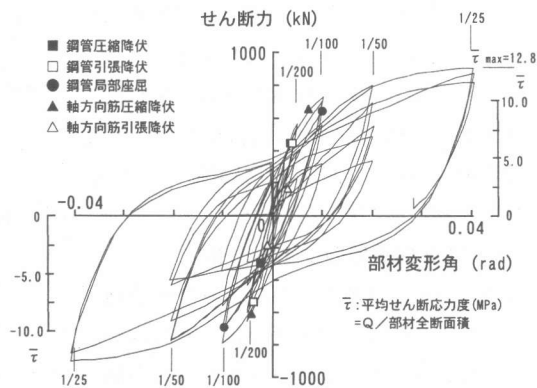


図-6 No.2 試験体 せん断力-部材変形角関係

後、前述3種類の一定軸力下の加力を $R=1/50$ で各1サイクル行った。全ての加力の結果を図-6の上図に、20MPaの軸力での加力結果を図-6の下図に示す。

鋼管の圧縮降伏・引張降伏・局部座屈および軸方向筋の圧縮降伏は、No.1試験体とほぼ同じ部材変形角で生じた。図-6の下図において $R=1/200$ と $1/100$ のピーク点が、次の部材変形角へと続くループより突出しているのは、その間に軸力を変えたサイクルを経験させた影響であるが、これ以外は、No.1のループ形状と比較し変化はなく、エネルギー吸収のよいループを示している。

(3) No.3 試験体 (図-7)

$R=1/400$ ピークに至るまでに、鋼管の圧縮降伏および引張降伏が、それぞれ正加力および負加力で起き、 $R=1/200$ のサイクル中に、軸方向筋の圧縮降伏および引張降伏が、それぞれ正加力および負加力で生じた。また、正加力 $R=1/200$ のピーク時に、圧縮側鋼管の局部座屈が観察された。局部座屈は、スタブフェースから60mm程度の位置で生じた。正加力 $R=1/20$ 、負加力 $R=1/50$ に至るまで耐力の低下はなく、高圧縮・引張軸力下でも、十分な変形性能が認められた。

3.2 鉄筋継手部のひずみ分布

試験体 No.3 の軸方向筋ひずみ分布を図-8に示す。縦軸は計測位置の軸方向高さを示し、横軸は各サイクルピーク時の軸方向筋のひずみを示す。軸方向筋の重ね継手は、柱脚から212.5~537.5mmの範囲に設けられている。主筋降伏部を除くと、柱が圧縮・引張軸力の場合ともに、ひずみは概ね直線状に分布しており、応力が確実に伝達されている。

3.3 横補強筋のひずみ

ヒンジ部分の横補強筋のひずみと部材変形角の関係を図-9に示す。各試験体とも $R=1/25$ の最終サイクルまで、降伏ひずみに至っていない。No.2試験体の最後の半サイクルの大きなひずみ増は、40MPaの高軸力下の

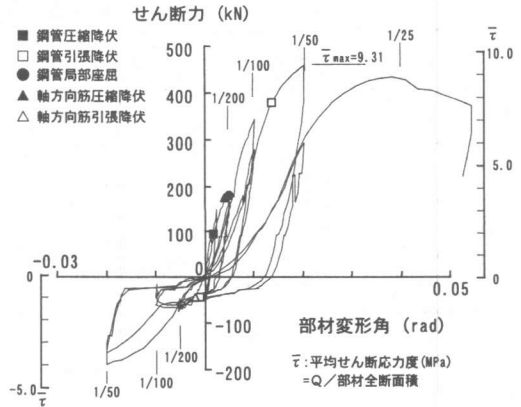


図-7 No.3 試験体 せん断力-部材変形角関係

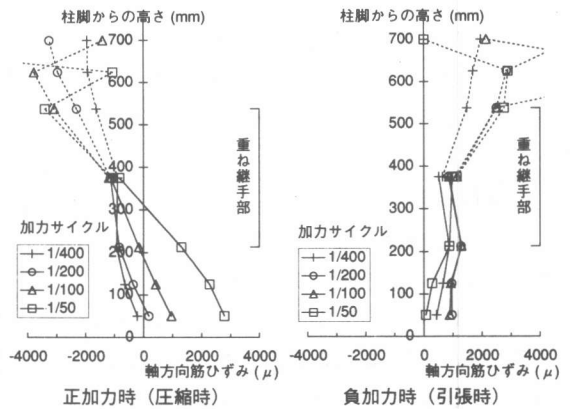


図-8 No.3 試験体 軸方向筋ひずみ分布

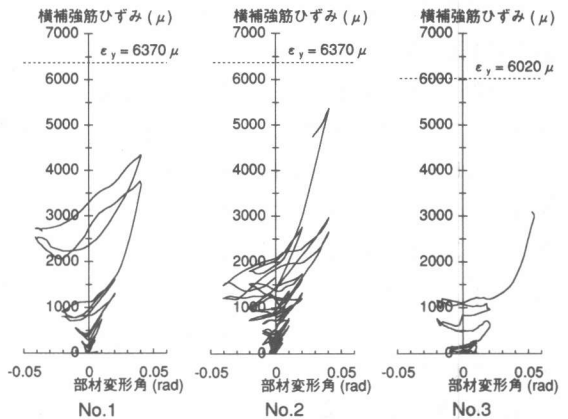


図-9 横補強筋ひずみ-部材変形角関係

$R=1/25$ での過酷な条件下によるものであるが、ピークで5,370 μ であり、弾性ひずみ以内にとどまっている。

4. 考察

4.1 終局曲げ耐力

試験体の終局曲げ耐力を、鉄筋コンクリート (RC) 部の e 関数法¹⁾ による曲げ耐力と鋼管 (S) 部の曲げ耐力²⁾ の一般化累加³⁾ として求めた。各試験体の終局曲げ耐力を示す M-N 相関図を図-10 に示す。図中に、加力 1 サイクル目のピーク時のモーメントと軸力の実験値をプロットした。試験体 No. 2 の軸力=0 の場合を除き、各試験体とも部材変形角 1/200 から 1/100 で実験値が累加耐力計算値と同等となり、最大耐力 (実験最大値) は、累加耐力計算値を上回っていることが分かる。試験体 No. 3 についても、圧縮軸力を受ける正載荷側、引張軸力を受ける負載荷側のいずれも、累加耐力計算値を上回る耐力を有している。なお、試験体 No. 2 では、軸力=0, R=±1/50 の加力を、20MPa の軸力の R=±1/25 を 2 サイクル終了した後に実施したため、耐力が計算値に至らなかったと考えられるが、過酷な大変形 (R=1/25) 後でも、耐力低下は R=1/100 ピーク時と比較し、約 85% と小さい。

4.2 モーメント-部材変形角関係

モーメント-部材変形角関係の骨格曲線を以下の条件により、鉄筋コンクリート (RC) 部と鋼管 (S) 部の累加として図-11 に示すように算定した。

- ・ RC 部の骨格曲線は、初期剛性・曲げひび割れ耐力・降伏点剛性低下率⁴⁾・曲げ降伏耐力・終局曲げ耐力を定め、トリリニアとする。な

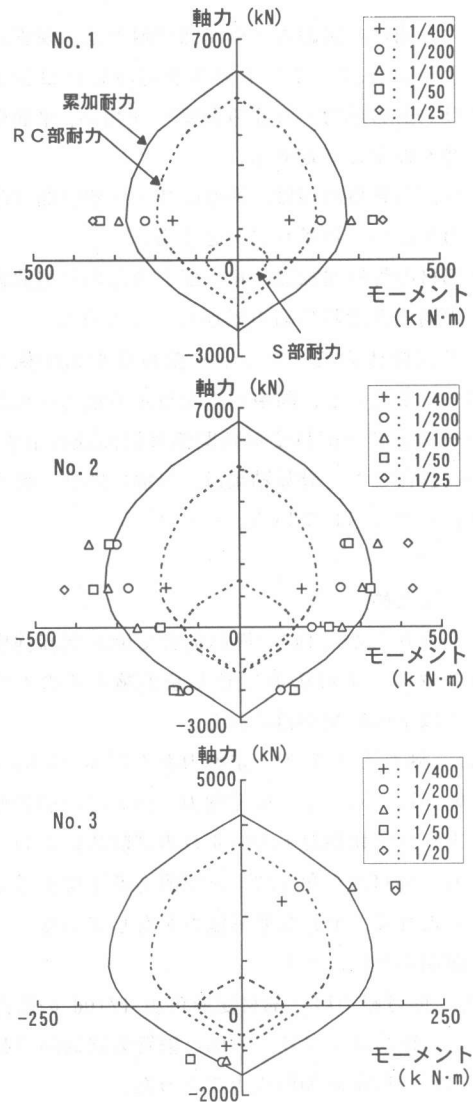


図-10 終局曲げ耐力 M-N 相関関係図

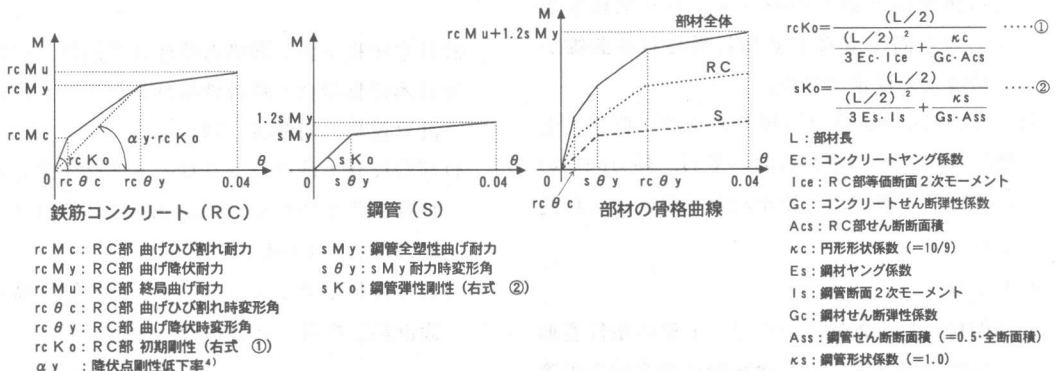


図-11 モーメント-部材変形角関係算定

お、曲げ降伏耐力・終局曲げ耐力は、鋼管によるコンファインド効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係⁵⁾を用い、平面保持を仮定し算定する。

- ・ S部の骨格曲線は、弾性剛性・全塑性曲げ耐力を定め、バイリニアとする。

- ・ 部材の骨格曲線は、RC部とS部の骨格曲線の同一変形時の耐力累加として求める。

各試験体のモーメント-部材変形角関係を図-12に示し、図中に上記算定方法で求めたモーメント-部材変形角関係骨格曲線を示す。各試験体とも、計算結果は、実験の剛性、耐力を精度よく示している。

5. まとめ

径厚比70から143の円形鋼管で囲んだ高強度コンクリート柱の曲げせん断実験とその考察から以下の結果が得られた。

- (1) 軸力比 0.3 の一定軸力および $0.65 Nu \sim 0.95 Tu$ (Nu : 柱の圧縮耐力, Tu : 柱の引張耐力) の変動軸力下のいずれの試験体においても、部材変形角 $1/25$ まで耐力低下は生じることなく、十分な変形能力を有していることが明らかになった。
- (2) 曲げ耐力は、部材変形角が $1/100$ の時点で、鉄筋コンクリート部と鋼管の終局曲げ耐力の一般化累加値以上であった。
- (3) モーメント-部材変形角関係の骨格曲線は、鉄筋コンクリート部のモーメント-部材変形角関係と鋼管のモーメント-部材変形角関係を同一変形で累加し得られる曲線から精度よく推定できる。
- (4) 圧縮軸力を受ける場合および引張軸力を受ける場合のいずれにおいても、軸方向筋の応力は柱中央に設けた重ね継手によって伝達されている。

参考文献

- 1) 梅村 魁: 鉄筋コンクリート梁の塑性変形及び終局強度, 日本建築学会論文報告集第42号, 昭26-2

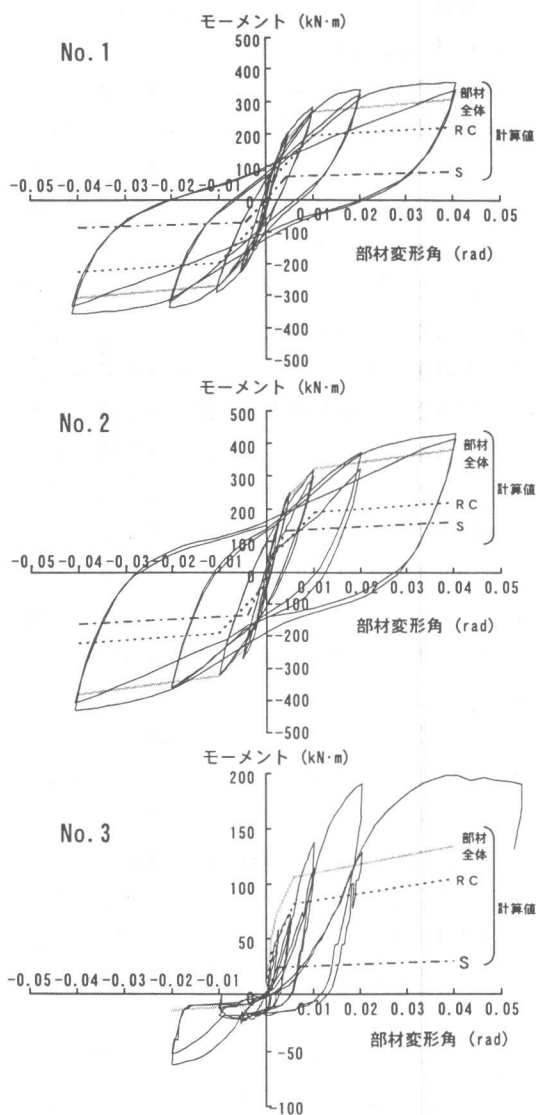


図-12 モーメント-部材変形角関係

- 2) 日本建築学会: 鋼構造塑性設計指針, 1975
- 3) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1987
- 4) 菅野俊介: 鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究, コンクリトジャーナル, Vol. 11, No. 2, pp. 1-9, Feb. 1973
- 5) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, pp. 61-62, 1997