

論文 2 方向曲げを受ける合成長柱の弾塑性挙動に関する実験

柴田 道生*1・徳田 好克*2

要旨：両端の曲げの向きが90度の2方向偏心圧縮実験を、2種類の材長、2種類の偏心比、2種類の偏心量について計12体行った。試験体は12cm×12cmの断面内に溶接H形鋼H-62×60×6×6と4本の丸鋼主筋9φおよび丸鋼フープ3φを配した。載荷の初期には最大曲げモーメントは部材端に生じる。L/D=10の試験体では、最大耐力付近までは最大曲げモーメント位置は部材端にあり、その後徐々に部材中間に移動する。L/D=20では、最大曲げモーメント位置は最大耐力に至る前に部材中間に移動し、部材のほぼ中央に達して最大荷重となる。

キーワード：合成長柱、2方向曲げ、偏心圧縮実験、最大耐力、破壊モード、数値解析

1. はじめに

合成長柱の2軸曲げに関する実験的研究は数少なく、その全てが両端での材端モーメントの向きおよび大きさが等しい条件の下で行われてきた^{1~4)}。高層骨組の隅柱が斜め方向地震力を受ける場合を考えると、柱の材端モーメントベクトルの向きは、整形ラーメンでは両端でほぼ等しいと考えられるが、非整形ラーメンでは両端での材端モーメントベクトルの向きが異なる可能性がある。特に、直交する2方向の内一方の梁が抜けているような場合は、材端モーメントベクトルの向きが異なる可能性が大きい。

両端での荷重条件が異なる2軸曲げ（以後、2方向曲げ）を受ける部材では、材軸に沿って曲げの軸が変化し、それに伴って曲げ強度も変動するので、必ずしも最大曲げモーメント位置で曲げ変形が最大になるとは限らない。本研究では2方向曲げを受けた部材の曲げ変形の分布および破壊モードを実験的に明らかにし、合理的な設計手法を開発するための基礎資料を得る。

2. 実験

2.1 試験体

試験体の概要を図-1に、試験体の仕様と実験および解析より得られた最大荷重 P_x 、 P_a およ

び破壊位置 z_x 、 z_a を表-1に示す。2種類の材長、2種類の偏心量および3種類の等価偏心比について計12体の2方向偏心圧縮実験を行った。試験体名の最初の文字は偏心の大きい方の材端に対応し（A：下端、B：上端）、2番目の文字は材長せい比に（1：L/D=10、2：L/D=20）、3番目は等価偏心比（後述）に（4： $\tilde{\alpha}=1$ 、2： $\tilde{\alpha}=0.5$ ）、4番目は大きい方の偏心量（1： $e_{xA}=0.72$ cmまたは $e_{xB}=0.9$ cm、3： $e_{xA}=2.16$ cmまたは $e_{yB}=2.7$ cm）に対応している。

表中の N_o は降伏軸力、 M_{xo} 、 M_{yo} は強軸および弱軸まわりの基準曲げ強度（中立軸が断面中心を通るときの全塑性モーメント）であり、無次元化細長比 $\lambda = \sqrt{N_o / N_E}$ は部材の降伏軸力と弾性座屈荷重 N_E の比から算定する。鉄骨は板厚6 mmの鋼板を溶接して製作し、焼鈍を行った。主筋およびフープはそれぞれ径9 mm、3 mmの丸鋼を用いた。使用鋼材の引張試験結果を表-2に示す。

コンクリートの調合は表-3を基準とし、細骨材の表面水量に応じて水と細骨材量を補正した。コンクリート打設は断面強軸を水平とする横打ちとし、屋外で打設後2~3日間シートを被せ、脱型した後2~3週間標準水中養生し、その後空中湿布養生とした。実験時の材令は95~126

*1 摂南大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

*2 摂南大学大学院生 工学研究科社会開発工学専攻

表 - 1 試験体の仕様と実験結果

	B143a	B143b	B141a	B141b	B123	B121	A123	A121	B243	B241	A223	A221
F_c (MPa)	31.4	31.4	34.0	30.9	34.0	30.9	30.9	30.9	29.5	29.5	30.1	30.1
N_o (kN)	783	787	819	777	815	780	772	775	757	758	768	764
M_{xo} (kNm)	16.06	16.21	16.65	15.97	16.56	16.03	15.81	15.92	15.77	15.73	15.93	15.78
M_{yo} (kNm)	12.36	12.43	12.91	12.28	12.83	12.34	12.22	12.26	11.89	11.90	12.07	12.03
L/D	10	10	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20
A	0.451	0.450	0.454	0.450	0.455	0.449	0.450	0.451	0.903	0.902	0.901	0.901
e_{xA} (cm)	2.16	2.16	0.72	0.72	1.08	0.36	2.16	0.72	2.16	0.72	2.16	0.72
e_{yB} (cm)	2.70	2.70	0.90	0.90	2.70	0.90	1.35	0.45	2.70	0.90	1.35	0.45
P_x (kN)	450	431	687	704	488	689	520	766	293	512	312	538
P_a (kN)	415	417	639	606	461	620	447	625	252	402	287	427
z_x/L	0.70	0.55	0.37	0.53	0.85	0.83	0.10	0.25	0.46	0.52	0.45	0.43
z_a/L	0.500	0.500	0.564	0.564	0.744	0.623	0.293	0.387	0.497	0.493	0.449	0.494

日であり、平均強度は 31.2 MPa、標準偏差は 1.4 MPa (4.5%)であった。

2.2 載荷システム

載荷・測定システムの概要を図-2に示す。

試験体を交差かまぼこ球座(図-3)を介して試験機に設置し、下端に x 方向の偏心 $e_A = (e_{xA}, 0)$ 、上端に y 方向の偏心 $e_B = (0, e_{yB})$ を与えて 2 方向偏心圧縮を加える。両端での曲げの軸が異なると曲げ強度も異なるから、両端の偏心量の比 α そのものでなく、曲げ強度の比に対応した等価偏心比 $\tilde{\alpha}$ によって非対称性を評価する。

$$\tilde{\alpha} = \begin{cases} \alpha\beta & \alpha = e_{yB} / e_{xA} & : e_{xA} > e_{yB} \\ \alpha / \beta & \alpha = e_{xA} / e_{yB} & : e_{xA} < e_{yB} \end{cases}$$

弱軸曲げと強軸曲げの曲げ強度比 β は存在軸力に依存するが、今回は便宜的に基準曲げ強度(前述)の比 $\beta = M_{yo} / M_{xo} \approx 0.8$ を用いた。

2.3 測定システム

部材端を支点とする測定フレームに設置した変位計により、材軸方向変位、球座の x, y 軸回りの回転角および材長の 8 分割点での x, y 軸方向変位を測定した。先行する予備実験⁵⁾では両材端の外側に設けた取り付けボルトに測定フレームを取り付けたので、球座が回転しても取り付けボルトは傾くことはないが、球座の回転に

表 - 2 鋼材の引張試験結果

	降伏応力	引張強度	伸び率
鉄骨	324 MPa	471 MPa	28.5 %
主筋	317 MPa	447 MPa	30.6 %

表 - 3 コンクリートの調合 (1 m³ 当たり)

W/C	水	セメント	砂	砂利	AE 剤
65 %	210 kg	323 kg	867 kg	830 kg	3.55 kg

よって生じる試験体材端の移動を正確に測定することが困難であった(図-4(a))。本実験では球座の回転による材端移動の影響を除去するため、取り付けボルトを試験体材端に取り付けた。球座が回転すると取り付けボルトが傾くので(図-4(b))、ベアリング機構 A, B を介して、取り付けボルトと測定フレームの間に中間リングを設け、測定フレームを常に鉛直を保持するようにした(図-4(c))。

3. 実験結果と考察

3.1 最大荷重

実験および数値解析(付録 参照)で得られた最大荷重を表 1 中に P_x, P_a として示す。実験値は数値解より大きく P_x / P_a は 1.03 ~ 1.28 の範囲にある。これは図-4(c)に示すような複雑なリンク機構が球座の回転に拘束を及ぼしたと考えられ、今後の検討課題である。

3.2 変形状

荷重 - 変位関係の代表例を図-5, 6に示す。同図(a) は荷重 P と軸方向変位 w の関係を示し、縦軸は降伏軸力 N_0 で、横軸は降伏軸方向変位 $w_0 = N_0 L / (EA)$ で無次元化されている。図中の印を実線で結んだプロットは実験値、破線は数値解析結果を表す。図-5では荷重の初期の段階でわずかなドリフトがみられるが、これは下部球座での荷重初期におけるめりこみを含んでいるためと考えられる。最大荷重に至るまでの挙動は、実験と解析はよく対応しているが、実験値の初期剛性は解析結果よりわずかに小さい。

同図(b),(c) は上下球座の回転角 θ_x, θ_y と作用荷重 P の関係を示し、横軸は等曲げを受ける単純梁の降伏材端角 $\theta_0 = 0.5 M_{y0} L / (EI)_y$ で無次元化されている。印および 印は θ_x および θ_y の実験値を、実線および破線は数値解析結果を示す。両試験体とも下端で x 方向の大きな偏心を受けおり、大きな y 軸曲げ変形を示す。これらの例では、最大荷重に至るまでの挙動は、実験と解析はよく対応している。

3.3 絶対たわみと最大曲げモーメント位置

実験では変形後の材軸線と変形前の材軸線の距離を x, y 軸方向変位 $u(z), v(z)$ として計測するが、部材の曲げ変形挙動に影響を及ぼす指標は、図 7(a)に示す、変形後の材軸線と荷重の作用線との距離 u^*, v^* であり、

$$u^*(z) = u(z) + e_{xA}(1 - z/L) + e_{xB}z/L$$

$$v^*(z) = v(z) + e_{yA}(1 - z/L) + e_{yB}z/L$$

これらの2乗平均 $\tilde{v} = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}}$ が変形後の材軸線と荷重線との距離(以後「絶対たわみ」と呼ぶ)となる(図 7(b))。

荷重の初期の段階では u^*, v^* も直線分布に近く、絶対たわみの分布は両端で大きく中央で小さい。この例(B143b)では、印の最大荷重時においても中央部の絶対たわみはB端の値より小さいが、その後、塑性変形の進行とともに中央部の絶対たわみが大きくなっていく。

実験および解析より得られた絶対たわみ分布

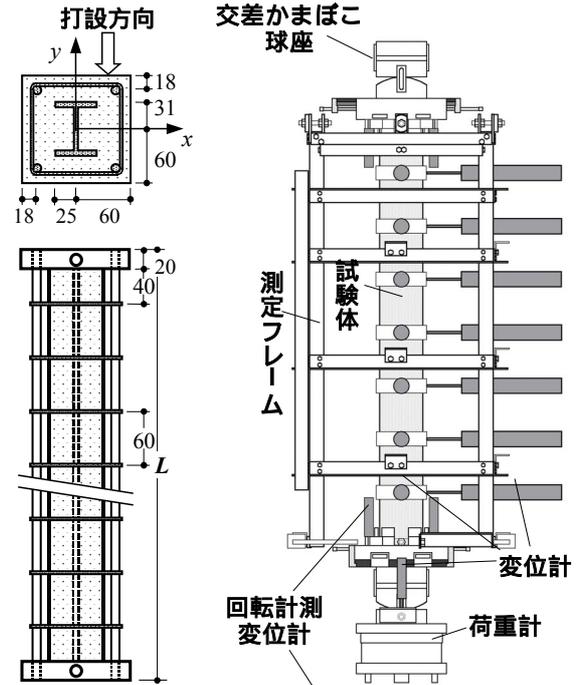


図-1 試験体

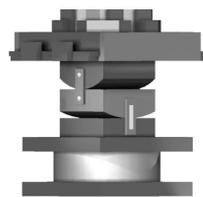


図-3 交差かまぼこ球座

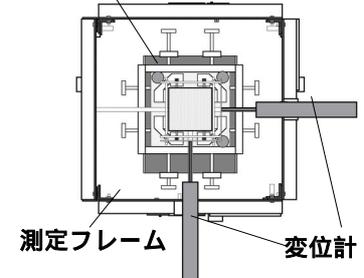
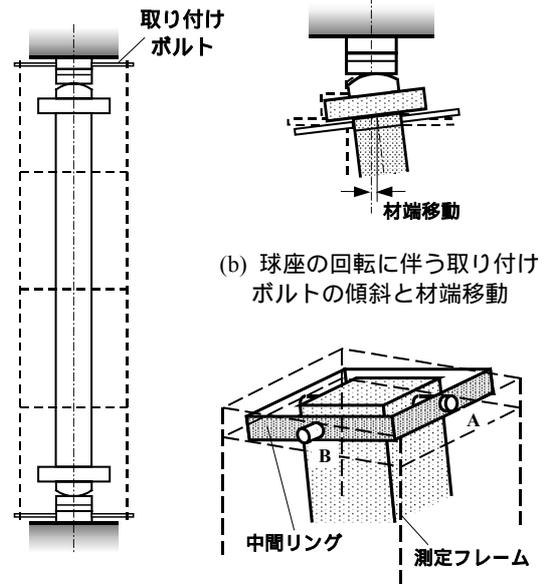


図-2 荷重・測定システム



(a) 取り付けボルトを球座の外側に付けた場合

(c) リンク機構

図-4 取り付けボルトの傾斜と材端移動

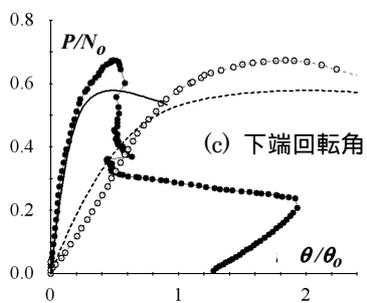
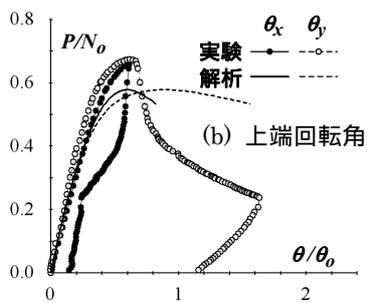
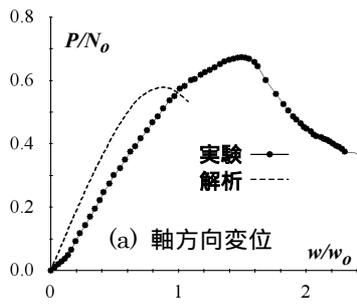


図 - 5 A123 $L/D = 10$

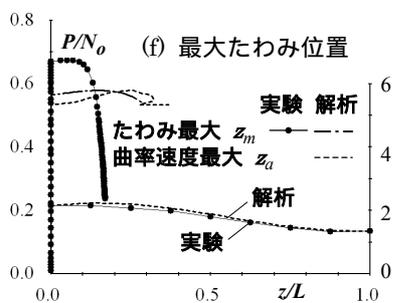
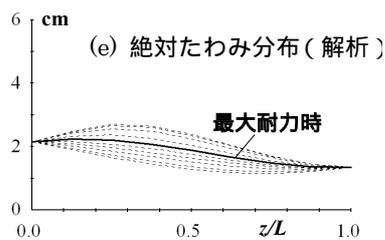
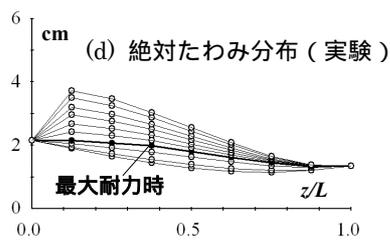


図 - 5 A123 $L/D = 10$ $e_{xA} = 2.16$ cm $e_{yB} = 1.35$ cm

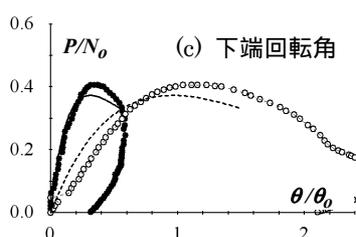
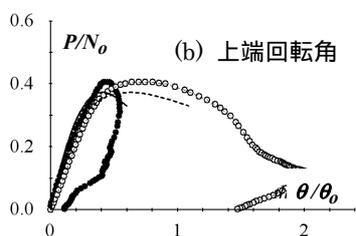
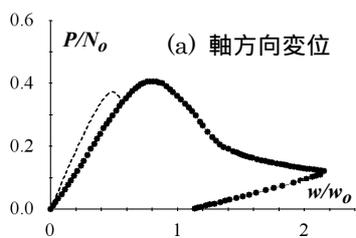


図 - 6 A223 $L/D = 20$

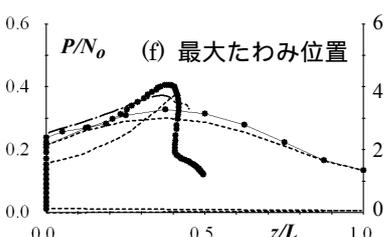
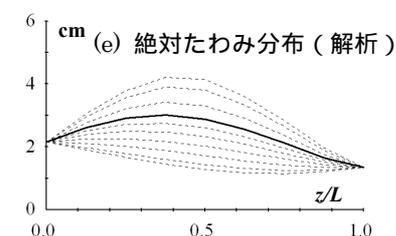
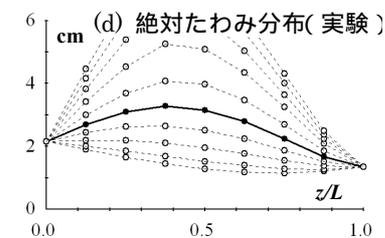


図 - 6 A223 $L/D = 20$ $e_{xA} = 2.16$ cm $e_{yB} = 1.35$ cm

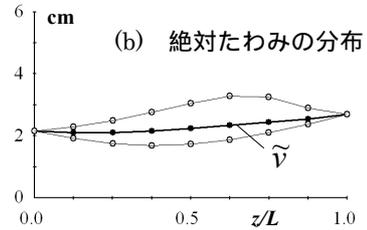
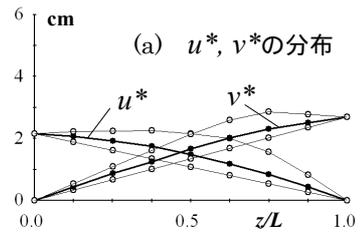


図 - 7 絶対たわみ分布 (B143b)

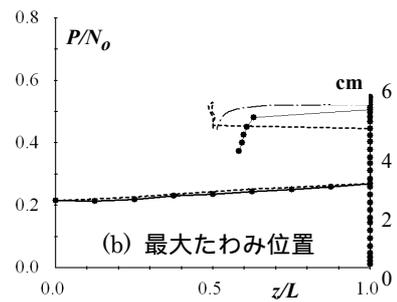
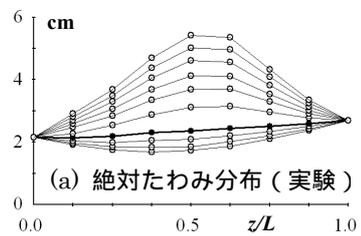


図 - 8 B143b

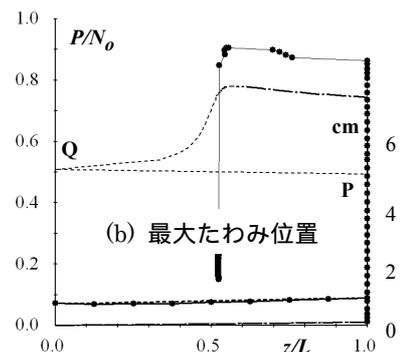
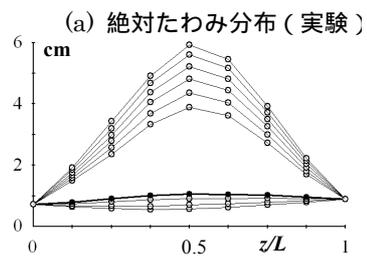


図 - 9 B141b

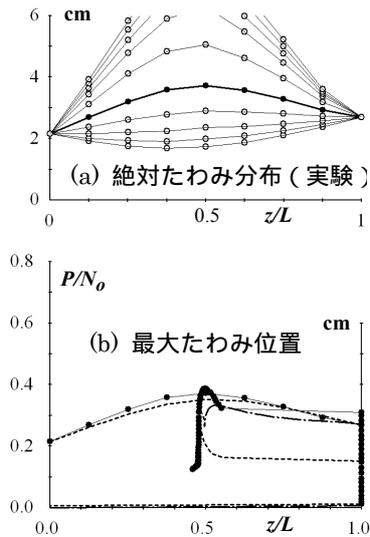


図 - 10 B243

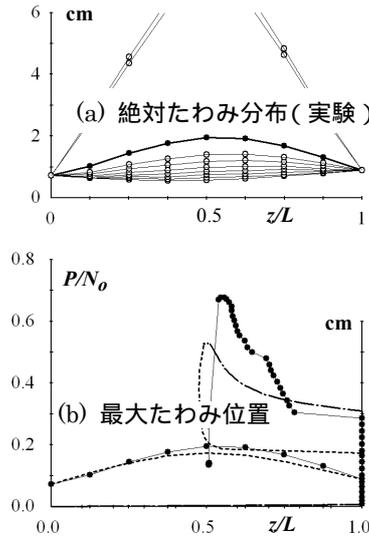


図 - 11 B241

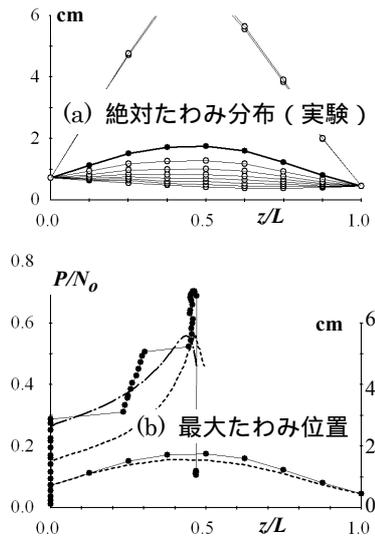


図 - 12 A221

の経緯を図 5, 6 (d),(e) に示す。最大荷重時のたわみ形は印および太実線で示されている。

同図(f)では、最大荷重時の絶対たわみ分布を重ねて、絶対たわみ最大の位置 z_m と荷重の関係を示す。印を実線で結んだプロットは実験値を、1点鎖線は数値解析結果を表す。最大位置の判定は、計測された最大たわみ点とその両側の2点を結ぶ2次曲線の頂点として求めた。絶対たわみ最大の位置は最大曲げモーメント位置でもある。

A123 の実験値に着目すると、最大荷重に至るまでは最大曲げモーメントはA端に生じ、その後、荷重の低下とともに最大曲げモーメント位置 z_m は徐々に部材中間に移動して破壊に至る。A223 の実験値では、軸力比が0.25程度まではA端にあった最大曲げモーメント位置が、その後の荷重の上昇とともに部材中間に移動し $z_m/L = 0.4$ 付近で最大荷重に達する。両試験体とも、1点鎖線で示された解析結果は実験値と良好な対応を示している。

大変形域では最大たわみ位置が破壊位置に対応するが、2方向曲げでは曲げ強度が材軸方向に連続的に変動するので、最大耐力の近傍では塑性変形が最も進行する位置と最大曲げモーメント位置とは必ずしも一致しない。塑性変形の進行を判定する指標として曲率速度を選び、数

値解析で得られた曲率速度が最大となる点の経緯を同図の破線で示す。A123 では曲率速度最大の点と曲げモーメント最大の点は同様の挙動を示すが、A223 では最大曲率点の部材中間への移動が早期に発生する。各試験体の実験終了後の破壊位置 z_x 、および数値解析による曲率速度最大位置 z_a を表1中に示す。

図 8 ~ 12 はその他の試験体の絶対たわみ分布および最大曲げモーメント位置の経緯を示す。

偏心量の小さい B141b, A121, B121, B241, B221 では最大耐力に達した直後に急激な変形の増大と耐力の低下がみられた。これらの試験体では最大荷重以降の挙動にコンクリートの圧壊が支配的な影響を与え、その他の偏心量の大きい試験体では鋼材の曲げ降伏が支配的であったと考えられる。

最大曲げモーメント位置の推移については実験値と解析結果は良好な対応を示す。最大曲率速度位置の推移は B141b を除いて A223 と同様の傾向を示す。B141b の場合、弾性域では曲率速度は曲げモーメントと同様の分布を示すので、B 端の曲率速度が最大となる。塑性化の進行とともに曲げ強度が相対的に小さい A 端の曲率速度が増加していくが、図 - 9 (b) の P 点に至るまでは B 端での曲率速度が最大であり、同図の Q 点に達して A 端での曲率速度が最大となる。そ

の直後から最大曲率速度位置は部材中間に移動して最大耐力に至る。最終状態での最大曲率速度位置と最大曲げモーメント位置は一致するが、それまでの段階では全く異なった経過をたどる。

4. 結論

合成長柱の2方向偏心圧縮実験を行い、数値解析結果との比較より次の結論を得た。

- 1) 载荷の初期の段階では最大曲げモーメントは部材端に生じる。
- 2) $L/D = 10$ の試験体では、最大耐力の近傍に達するまでは最大曲げモーメント位置は部材端にあり、その後徐々に部材中間に移動する。
- 3) $L/D = 20$ では、最大曲げモーメント位置は最大耐力に至る以前に部材中間に移動し、部材のほぼ中央に達して最大荷重となる。
- 4) 塑性変形最大の位置は必ずしも曲げモーメント最大の位置とは一致せず、両者は全く異なる経緯をたどることもある。
- 5) L/D が大きいと偏心比が小さくても、部材中央付近で破壊する。
- 6) 偏心量が小さいと、最大荷重付近以降でコンクリートの圧壊が卓越し、急激な耐力低下と変形の増大を生じる。

参考文献

- 1) Virdi, K.S. and Dowling, P.J : The Ultimate Strength of Composite Columns in Biaxial Bending, Proceedings Inst. Civil Engrs., Vol. 55, Part 2, pp.251-272, 1973.03.
- 2) 森野捷輔: 構造部材および骨組の弾塑性不安定現象に関する研究, 京都大学学位論文, 1994.07 .
- 3) Johnson, R.P. and May, I.M. : Tests on Restrained Composite Columns, The Structural Engineer, Vol. 56B, No. 2, pp.21-28, 1978.06.
- 4) 柴田道生: 2 軸偏心圧縮を受ける SRC 長柱の耐力および弾塑性性状に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3,

pp.1057-1062, 2000.06 .

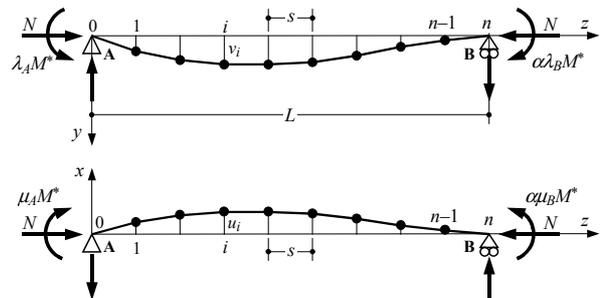
- 5) 徳田好克, 柴田道生: 交差かまぼこ球座を用いた SRC 長柱の偏心圧縮実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.C-1, pp.1031-1032, 2001.09.
- 6) 柴田道生: 非対称曲げを受ける合成長柱の耐力, 構造工学論文集(日本建築学会), pp.197-203, Vol.46B, 2000.03

付録. 数値解析の概要

文献 6) に示された数値解析法の概要を示す.

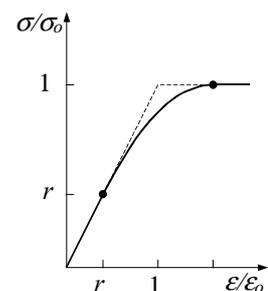
1. 仮定

- 1) 材長を n 分割し、各分割点での曲率を差分近似する(付図 - 1)。



付図 - 1 2 方向曲げを受ける長柱

- 2) 平面保持仮定が成立し、材料の構成則は付図 - 2 のパラボラ型とする。図中の比例限度 r はコンクリートは $r = 0$ 、鋼材は $r = 0.6$ とする。



付図 - 2 構成法則

- 3) コンクリートのコンファインド効果および引張強度を無視する。

2. 解析手順

基準端 A の材端回転角を順次増大させながら、A 端での回転方向 ϕ_A 、中間点での x, y 方向変位 u_i, v_i [$i = 1 \sim n-1$]、相手側端 B での x, y 軸回り回転角を未知数とする非線形連立方程式を解いて、弾塑性挙動を追跡する。