

2 軸曲げを受ける鉄筋コンクリート長柱の弾塑性安定 に関する実験的研究 (その3)

若林 實・南 宏一・岩井 哲

EXPERIMENTAL STUDY ON ELASTIC-PLASTIC STABILITY OF SLENDER REINFORCED CONCRETE COLUMNS SUBJECTED TO BIAXIAL BENDING (PART III)

By Minoru WAKABAYASHI, Koichi MINAMI and Satoshi IWAI

Synopsis

The elastic-plastic behavior of slender reinforced concrete columns subjected to biaxially eccentric loads was studied experimentally and analytically. Eight pin-ended column specimens, whose length to section depth ratio were approximately 25, with square cross section were loaded monotonically at various magnitudes and angles of end eccentricities. The ultimate loads, longitudinal and transverse deformations and the behavior up to failure were examined in detail. The test results were compared with the numerical solution of the analytical model which considered the nonlinearities of the material properties and the changes in moments due to deflections and variations in stiffness. The columns with small end eccentricities approached an unstable condition at failure. The only one column with large eccentricity was stable and the material failure occurred. Comparisons of analytical ultimate load and deflection with test results show a good correlation.

1. 序

これまでの (その1)¹⁾ および (その2)²⁾ で、柱材長が断面せいの5倍と15倍の鉄筋コンクリート柱の2軸偏心載荷に関する実験と解析の結果を発表した。本報告は、材長が断面せいの25倍で、このシリーズでは最も細長い柱の2軸偏心載荷実験結果から、部材耐力と横方向変形・軸方向歪分布・破壊状況について述べ、長柱の弾塑性解析結果をもとに耐力・変形挙動に関する考察を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は 120mm×120mm の正方形断面を有し、有効部材長 $l=3080$ mm で前回までの試験体に比べて部材長だけが長くなっている。断面の詳細を Fig. 1 に示す。主筋は異形鋼 SD30 の D10 を8本用いた対称配筋とし、試験体端部の鋼板の両側でナットによって固定した。鉄筋の材料試験結果を Table 1 に示す。帯筋は SR24 規格相当品の 4.5mm ϕ 丸鋼を用い、60mm 間隔で取り付けた。コンクリート材料の重量調合比および各材料の比重を Table 2 に示す。調合材料としては、圧縮強度 39.7 N/mm² (405 kg/cm²) の普通ポルトランドセメント、粒径 1.2mm 以下の淀川産の川砂 (吸水率 0.809% ; 絶乾状態で使用)、粒径 5~10mm の京都府城陽産の山砂利 (表乾状態で使用) を用いた。試験体数は全8体で、コンクリートは Fig. 1 の C 側面を上面として水平打設した。なお、主筋が中央で自重によってたわむのを防止するため、水セメント比 30% のセメントペーストで作製した1辺 15mm の立方体形のスペーサーを、部材の3等分点付近で隅角部

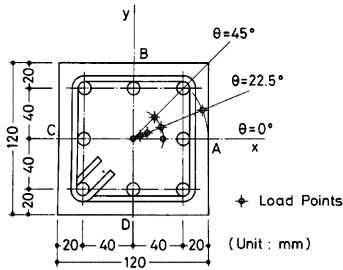


Fig. 1 Column cross section

Table 1 Mechanical properties of main reinforcement

Upper Yield Strength	356 N/mm ² (3.63 t/cm ²)
Lower Yield Strength	342 N/mm ² (3.49 t/cm ²)
Ultimate Strength	539 N/mm ² (5.50 t/cm ²)
Elongation	22.6%

Table 2 Mix proportion of concrete and mixing material properties

	Specific Gravity	Mix Proportions by Weight
Water	1	0.66
Normal Portland Cement	3.16	1
Sand, smaller than 1.2 mm	2.45	1.91
Gravel, size from 5 mm to 10 mm	2.50	2.76

主筋の下に置いている。また、試験体は 1 体ずつ打設するため、各試験体について強度試験用シリンダー 10 cm ϕ $\times$ 20 cm を圧縮用に 5 本と割裂引張用に 3 本をそれぞれ用意した。コンクリートのスランブは 19.6 cm $\sim$ 21.8 cm で平均 20.4 cm であった。試験体は打設後 1 週間を湿布養生し、その後は実験日まで空中養生とした。載荷実験時の材齢は 71 $\sim$ 85 日であった。

2.2 載荷方法

実験変数に前回と同様の載荷偏心率 $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ と偏心距離 e ($e/D = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5$) の 2 組を選び、Fig. 1 に示すように中心圧縮と 1 軸偏心圧縮を含む 7 通りの載荷を行った。試験体は上下端に球面半径 57 mm の球面滑り軸受けを用いて両端ピン支持とし、負荷容量が圧縮 3900 kN (400 t) の油圧式ジャッキによって加力を行った。実験時の載荷状況を Photo 1 に示す。

実験では、偏心載荷の前に、柱断面の全塑性圧縮耐力の 1/4 程度にあたる 15 t までの弾性とみられる範囲で、断面の幾何学的中心について中心圧縮載荷を行った後、除荷して、初期不整を調べるためにその過程における変形を計測した。偏心載荷実験は、その幾何学的中心から所定の偏心量だけ載荷点をずらせる方法で加力を行った。

2.3 測定方法

荷重は試験体上部に設置した容量 1960 kN (200 t) $\cdot$ 感度 20×10^{-6} / t のロードセルで、変形は摺動型変位計と電気抵抗歪ゲージで計測した。載荷実験時の測定状況を Fig. 2 に示す。変位計は測定用フレームに取り付けられ、Fig. 3 に示すように、部材中央で水平 2 方向の横たわみ u, v と捩れ角 α を、部材上端と下端で材端回転角 θ_x, θ_y と部材の全圧縮変形量 w をそれぞれ測定した。測定装置の詳細は前報 (その 2)²⁾ にあるので参照されたい。

軸方向歪の測定は、Fig. 2 (b) に示す部材中央の 5 ケ所と両材端近傍の合計 7 断面位置で、4 隅の鉄筋とコンクリート 4 側面に歪ゲージを貼付して行った。また部材中央には、変位計を用いた治具^{1), 2)} をコンクリート表面の軸方向歪および曲率の測定用に標点距離を $3D = 360$ mm として取り付けた。

なお試験体下方のロードセルは実験時の荷重のモニターに使用したものである。

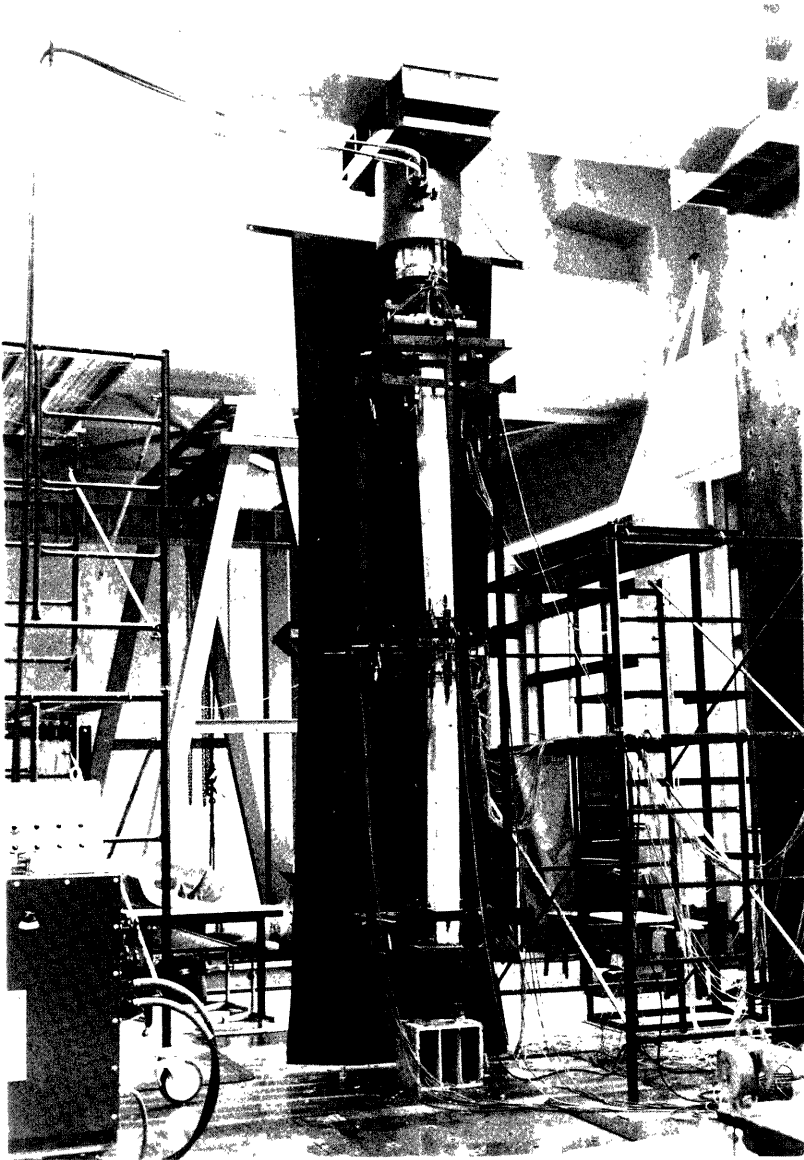


Photo 1 Loading test of specimen A000b

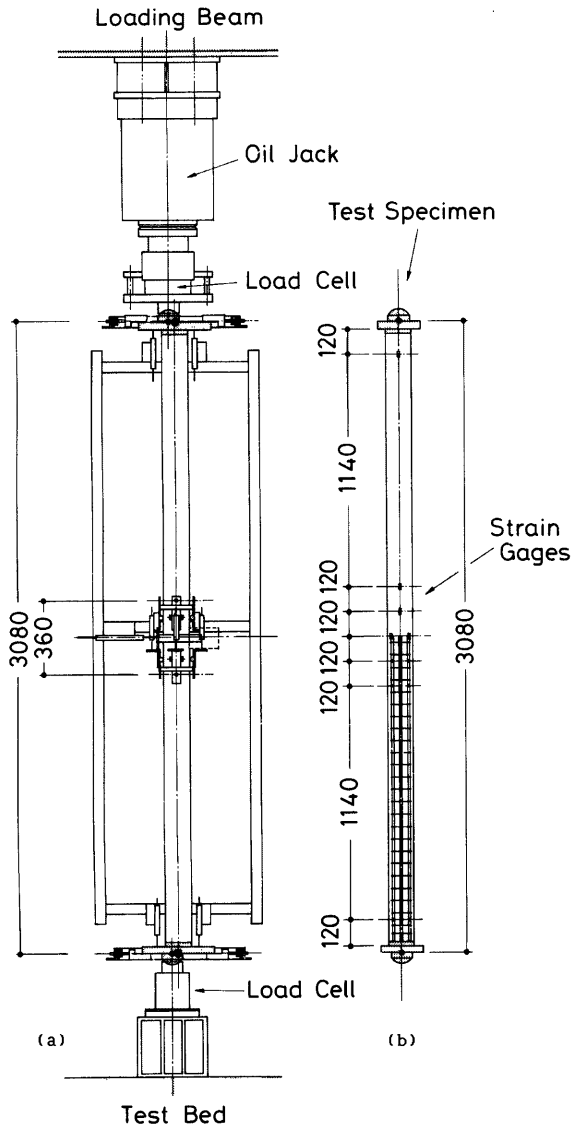


Fig. 2 Loading arrangement and measuring system

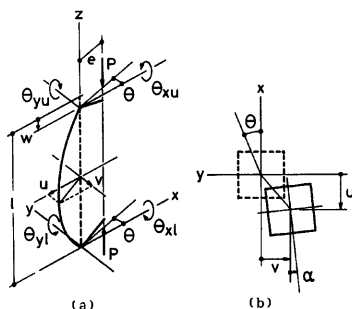


Fig. 3 Positive displacement and rotations

3. 実験結果と考察

3.1 部材中央の横方向変形と載荷経過

実験結果の一覧を Table 3 に示す。試験体名は次のように表現されている。英字“A”は今回の材長と断面せい比 $L/D=25$ の実験シリーズを示す(これまでの $L/D=15$ シリーズは“B”, $L/D=5$ のシリーズは“C”で表されていた)。英字に続く3桁の数字の最初は偏心角 θ を示し, “0”は 0° , “2”は 22.5° , “4”は 45° を意味し, 残りの2桁の数字は偏心比 e/D をパーセント表示したものである。

Table 3 には, 引張初亀裂発生時の荷重 P_i , コンクリートの圧壊が認められた時の荷重 P_u , 最大荷重 P_{max} と最大荷重時の変形を示す諸量をまとめている。ここで $\delta_{e_{max}}$ は部材中央部で変位計による計測値から推定された断面隅角部の最大圧縮歪であり, $\epsilon_{e_{max}}$ は歪ゲージによって実測された最大圧縮歪である。

部材中央の断面重心の横方向変位 u, v と荷重 P との関係を Fig. 4 に示す。偏心の小さい場合には, コンクリートの引張初亀裂や圧壊は最大荷重を過ぎたあたりでほぼ同時に発生し, 荷重が急激に低下した。偏心が大きくなるに従って, 圧壊の始まる時点が最大荷重をこえて変形が相当に進んだところになり, 圧壊発生とともに荷重の低下が大きくなった。

部材の横方向変位の軌跡を Fig. 5 に示す。 $\theta=0^\circ$ の1軸偏心の場合と $\theta=45^\circ$ の2軸偏心の場合は, 変位の進行方向がほぼ真直であるのに比べて, $\theta=22.5^\circ$ の各2軸偏心載荷の場合では最大荷重点あたりから進行方向が変化している。これは Fig. 6 の試験体 A220 の例で示すように, 断面の中立軸の傾きが徐々に変わっていくことに結びついており, 常に中立軸に垂直な方向へ変形が進んでいることがわかる。中立軸の変動は, 圧縮側および引張側の各鉄筋の隆伏や, コンクリートの圧縮歪の増大による圧壊・剥落などが原因していると思われる。

中央断面の捩れ角 α は載荷全過程を通じてほとんど現れず, 最大で 0.3° であった。部材上下端の回転角は x 軸回りと y 軸回りについてそれぞれよく一致しており, 最大荷重後も含めて上下に対称な変形が生じていた。Photo 2 の載荷終了後の試験体の写真にみられるように, 破壊はすべて部材中央付近で生じた。

3.2 荷重-軸方向歪関係

部材中央で変位計によって計測された軸方向変位から求められた4側面の幅方向中央点 (Fig. 1 の A, B, C, D) における軸方向歪 ϵ と荷重 P との関係を全載荷過程について Fig. 7 に示す。歪は圧縮を正としている。また Fig. 8 は最大荷重到達直後までの歪履歴を示したものである。実線は Fig. 7 と同じ変位計のデータであり, 破線は部材中央の各コンクリート側面に貼付した2枚の歪ゲージによるデータを平均して得たものである。前回までの実験結果と同様に, 両者はよく合っている。

偏心が小さい場合には, 最大荷重点に達するまで全断面圧縮の状態が続き, 最大荷重点を過ぎると曲率が

Table 3 Summary

Specimen name	θ deg.	e/D	F_c	ε_p	σ_t	P_t	P_b	P_{max}		
			kN/mm ² (kg/cm ²)	10^{-3}	kN/mm ² (kg/cm ²)	kN (t)	kN (t)	kN (t)	u cm	v cm
A000a	0	0	29.4 (300)	2.44	2.25 (22.9)		543 (55.4)	543 (55.4)	0.52	0.44
A000b	0	0	29.0 (302)	2.34	2.16 (22.0)		538 (54.9)	538 (54.9)	0.58	0.54
A205	22.5	0.05	30.8 (314)	2.32	2.90 (29.6)	294 (30.0)	294 (30.0)	320 (32.6)	1.21	1.46
A210	22.5	0.1	30.5 (311)	2.35	2.87 (29.3)	273 (27.3)		275 (28.0)	1.35	1.09
A220	22.5	0.2	32.0 (326)	2.45	2.68 (27.3)	185 (18.9)	169 (17.2)	185 (18.9)	2.57	1.74
A250	22.5	0.5	29.5 (301)	2.32	2.36 (24.1)	77 (7.9)	100 (10.2)	107 (10.9)	4.23	2.25
A020	0	0.2	29.9 (305)	2.29	2.74 (27.9)	182 (18.6)	166 (16.9)	184 (18.8)	3.37	-0.12
A420	45	0.2	31.9 (325)	2.78	2.57 (26.2)	169 (17.2)	144 (14.7)	169 (17.2)	2.06	2.54

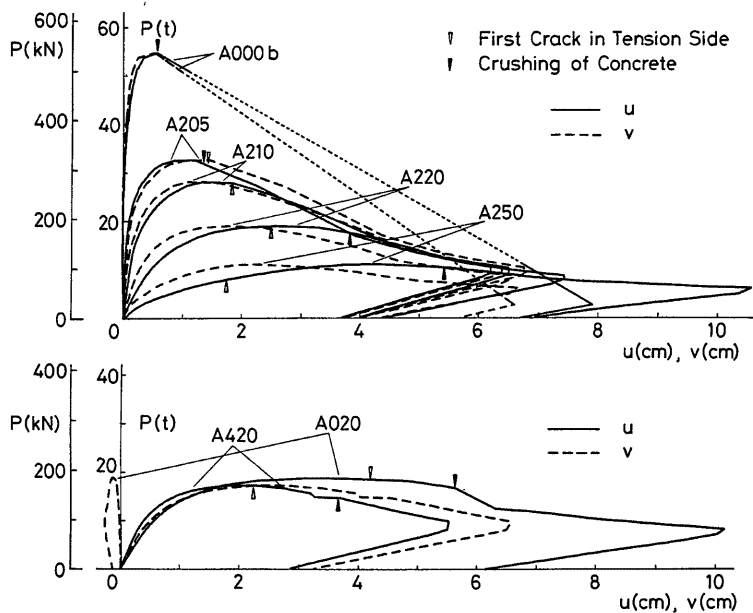


Fig. 4 Load vs. lateral deflection relationships

of test results

$P=P_{max}$										
w cm	α deg.	θ_{xu} deg.	θ_{yu} deg.	θ_{xl} deg.	θ_{yl} deg.	d^{ϵ}_0 10^{-3}	d^{ϕ}_x 10^{-4} cm	d^{ϕ}_y 10^{-4} cm	d^{ϵ}_{max} 10^{-3}	d^{ϵ}_{max} 10^{-3}
5.87	-0.04	0.06	0.08	0.21	0.16	2.11	0.91	1.12	3.32	2.89
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.42	-0.07	0.93	0.74	0.89	0.85	0.92	1.48	1.31	2.59	2.98
2.50	-0.02	0.65	0.78	0.71	0.90	0.76	0.97	1.32	2.13	2.41
2.19	0.07	1.06	1.58	1.05	1.59	0.30	1.76	2.52	2.87	2.57
1.65	-0.07	1.45	2.73	1.48	2.79	-0.25	2.04	3.75	3.23	3.39
2.16	-0.07	-0.12	2.00	-0.04	2.06	0.28	-0.02	3.24	2.24	2.41
2.08	-0.04	1.52	1.26	1.54	1.24	0.20	2.41	1.85	2.75	2.73

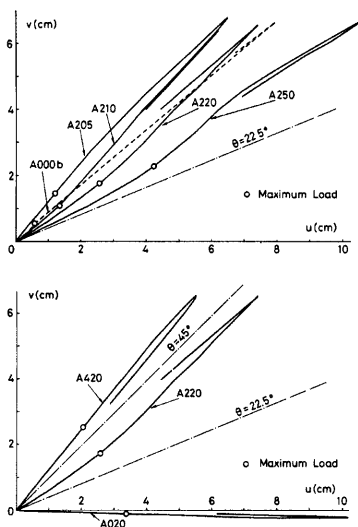


Fig. 5 Trajectories of lateral deflection

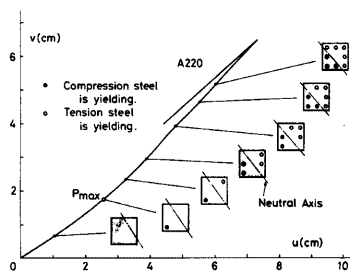
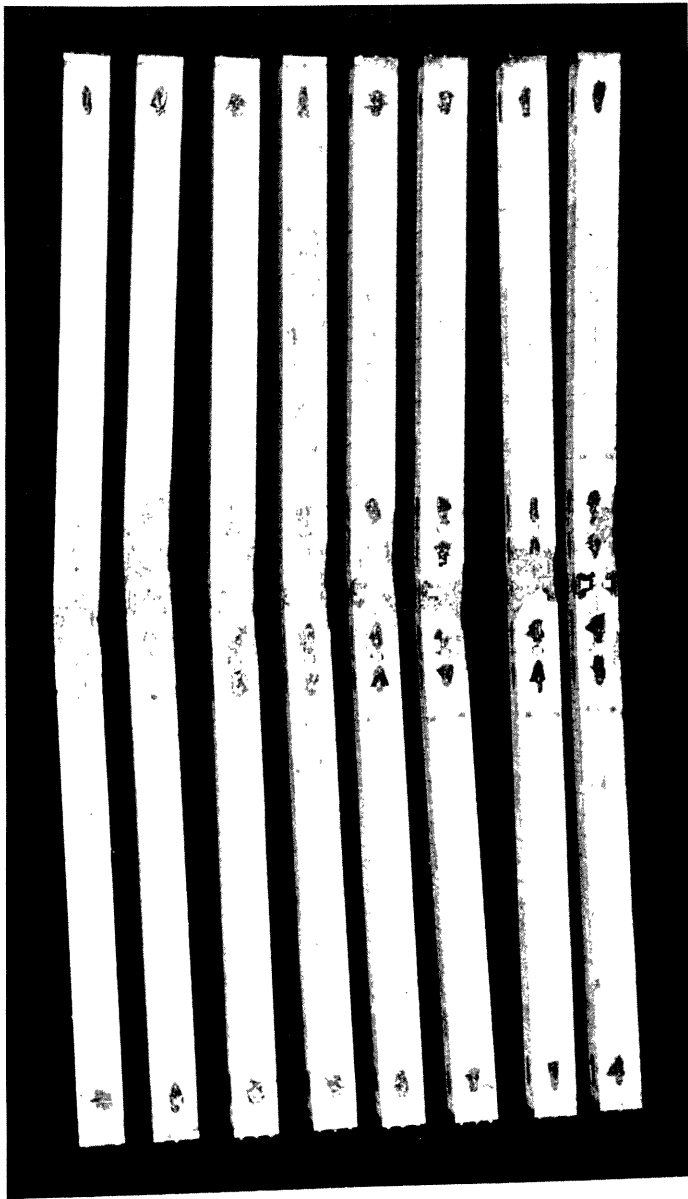


Fig. 6 Variation of inclination and depth of the neutral axis

増大して圧縮側と引張側とに歪が急速に進展した。一方、偏心が大きい場合には、初期の段階から断面内に引張域が現れ、特にコンクリートの圧壊が始まった時から曲率が急激に増大していることが注目される。最大荷重時における部材中央の断面隅角部の最大圧縮歪は、A000とA250を除いて、コンクリートシリンダーの最大強度時の歪 ϵ_p とあまり差がなく、まだ圧壊が生じるほどの歪には達していないといえる。



A000a A000b A205 A210 A220 A250 A020 A420

Photo 2 Column specimens after testing — Compression sides

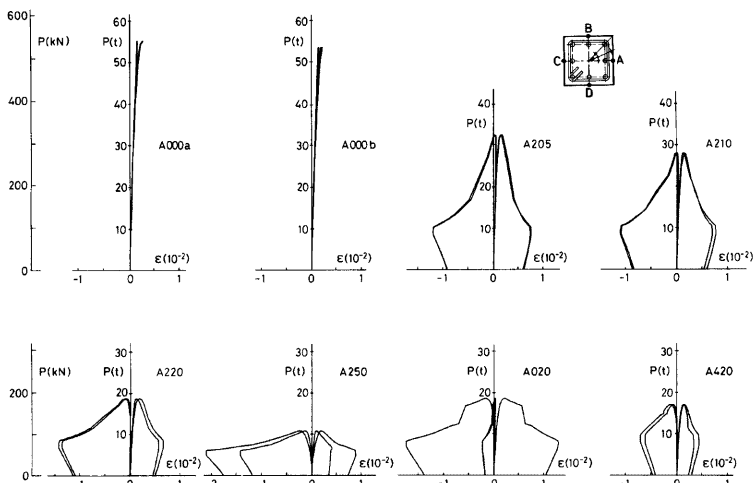


Fig. 7 Load vs. longitudinal strain relationships

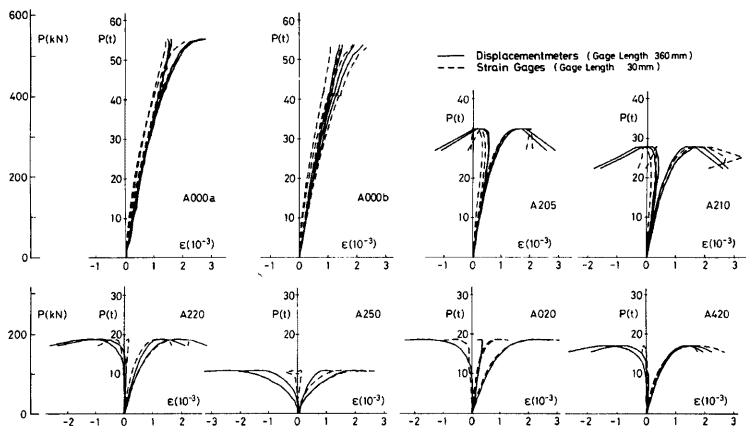


Fig. 8 Comparison between the strain data of displacementmeters and strain gages

3.3 破壊状況

コンクリートの圧壊はいずれの載荷の場合も急激な耐力低下を引き起した。圧壊による剝落が生じた領域は、Photo 3 に示すように、1 軸偏心載荷の場合に断面せい D とほぼ同じ程度の範囲であったが、2 軸偏心載荷の場合には $2D \sim 3D$ の範囲に広がっているのは、これまでの部材長の短いものと同じ傾向である。

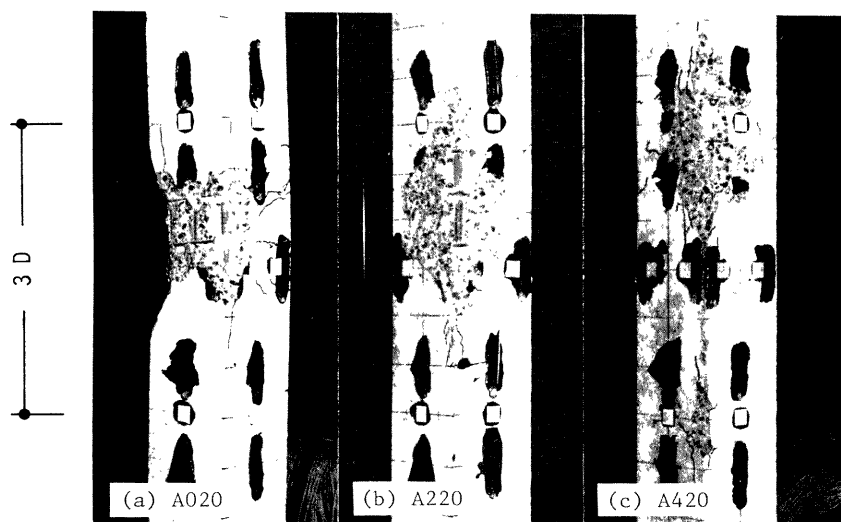


Photo 3 Mid-height portion of columns after testing — Compression sides

4. 解析結果と考察

2 軸偏心圧縮荷重を受ける鉄筋コンクリート長柱の耐力および変形挙動を、文献 3) に示した弾塑性解析法によって調べた。

4.1 解析に導入した定数

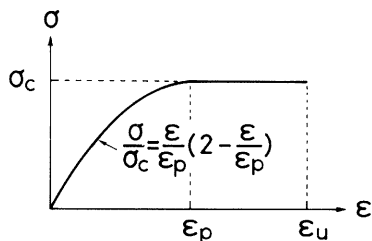
前回と同様に、解析ではコンクリート断面を 10×10 の 100 要素に、また部材長を 10 要素にそれぞれ分割した。応力-歪関係をコンクリートと鉄筋について Fig. 9 の形に仮定し、材料定数として、コンクリートは $\sigma_c = 30.4 \text{ N/mm}^2$ (310 kg/cm^2), $\varepsilon_p = 2.3 \times 10^{-3}$, $\varepsilon_u = 2\varepsilon_p$ を、鉄筋は $\sigma_y = 353 \text{ N/mm}^2$ (3600 kg/cm^2), $E_s = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ($2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$) をとった。

中心圧縮荷重については、 $\theta = 22.5^\circ$, $e = 0.6 \text{ mm}$ ($e/D = 0.005$) において材端に初期偏心を有する場合として扱った。

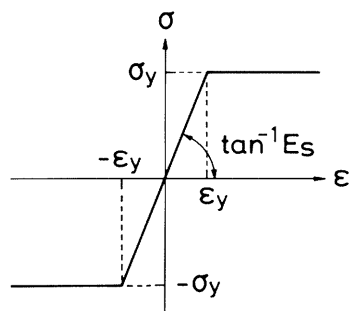
4.2 荷重-変形関係

荷重と部材中央における横方向変形および軸方向歪の関係を表す解析結果と実験結果の比較例をそれぞれ Fig. 10 と Fig. 11 に示す。また解析による最大荷重および最大荷重時の部材の変形諸量の値を Table 4 に示す。

偏心が大きい場合には、実験結果と解析結果は、初期剛性、最大荷重も含めて、荷重-変形曲線がよく合っている。しかし偏心が小さい場合になると、実験結果は解析結果に比べて耐力がやや大きくなっている。試験体の支持に

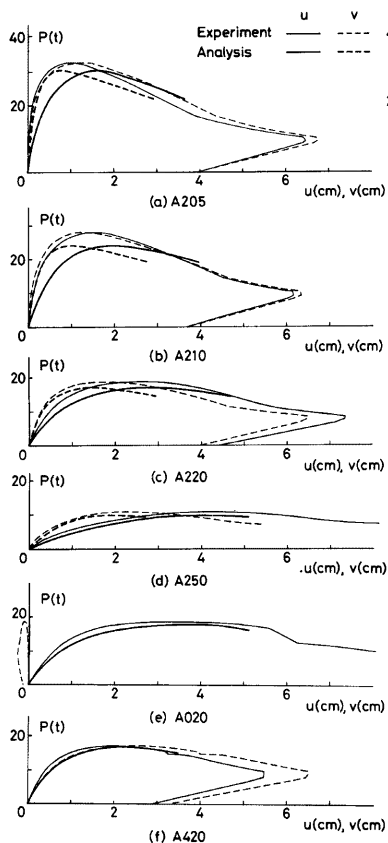
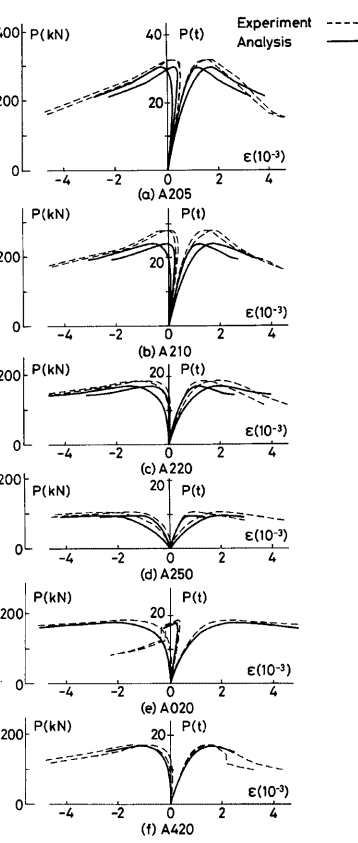


(a) Concrete



(b) Reinforcing bar

Fig. 9 Assumptions of stress-strain curves


 Fig. 10 Comparison of P - u and P - v relationships

 Fig. 11 Comparison of P - ϵ relationships

用いた球面滑り軸受けが高圧縮力を受けた際に、回転時に生じる抵抗モーメントが、今回の試験体の偏心率に換算すれば $e/D=2.5\%$ 程度生じることが認められた²⁾ が、偏心が小さい場合ではその抵抗力が原因となって若干耐力が上昇していることが考えられる。

部材中央での軸方向歪の分布状況はいずれの試験体もその傾向をよくとらえている。

横方向変形の軌跡は、Fig. 12 のように、丸印で示された最大荷重時の変形や最大荷重点付近で変形の進行方向が変化している状況が、よく対応した結果を示している。

4.3 軸力-曲げモーメント相関曲線

終局強度理論に基づく2軸曲げ解析³⁾ により算出された断面 ($l/D=0$) の軸力-曲げモーメント (N - M) 相関曲線と、実験結果との関係を Fig. 13 に示す。実験結果については、部材の最大荷重点を丸印で示し、除荷するまでの部材中央における2次モーメントの影響を含む N - M 曲線を相関図の中に加えている。また長柱の弾塑性解析による部材の耐力線 ($l/D=25.7$ と示した曲線) も同時に示した。

Table 4 Summary of analytical results

Specimen name	θ deg.	e/D	P_{max} kN (t)	u cm	v cm	θ_x deg.	θ_y deg.	ε_0 10^{-3}	ϕ_x $10^{-4}/\text{cm}$	ϕ_y $10^{-4}/\text{cm}$	ε_{max} 10^{-3}
A000	22.5	0.005	383 (39.1)	1.21	0.50	0.30	0.72	0.992	0.52	1.25	2.05
A205	22.5	0.05	299 (30.5)	1.61	0.76	0.47	1.00	0.752	0.79	1.63	2.20
A210	22.5	0.1	237 (24.2)	1.92	0.97	0.60	1.20	0.540	1.00	1.93	2.30
A220	22.5	0.2	170 (17.3)	2.89	1.47	0.90	1.80	0.223	1.52	2.94	2.90
A250	22.5	0.5	96.1 (9.8)	3.87	1.84	1.17	2.52	-0.272	1.92	3.88	3.21
A020	0	0.2	177 (18.0)	3.81	0.00	0.00	2.35	0.181	0.00	3.89	2.52
A420	45	0.2	166 (16.9)	2.20	2.20	1.38	1.38	0.234	2.24	2.24	2.92

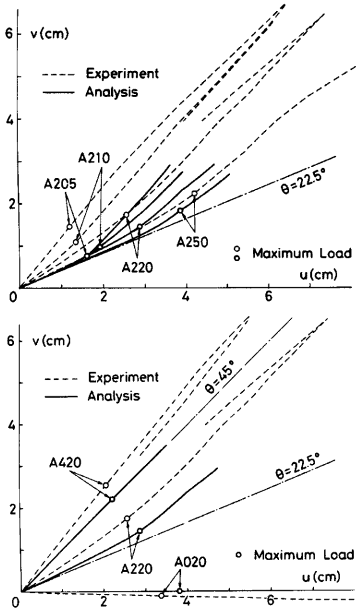


Fig. 12 Comparison of $u-v$ relationships

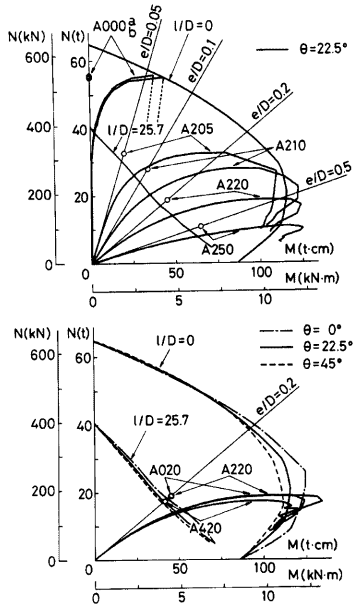


Fig. 13 Interaction diagrams for column section illustrating load-moment behavior up to failure

今回の長柱試験体では、横たわみによる2次モーメントの影響が大きく、その大きさは1次モーメントを上回るものが多い。従って、部材強さは断面強さに比べて著しく低下している。偏心が大きいA250は、部材中央部が断面強さに達して破壊に至る材料破壊の状況を現すが、偏心が小さい载荷のその他の場合では、断面強さに達する前に破壊に至る不安定破壊を生じたことが認められる。

これまでの全実験シリーズに対する部材強さを図示したものがFig. 14である。Fig. 13と同様に、部材耐力の実験結果を丸印で、解析結果を太実線で表している。部材の細長比の影響が実験的にも解析的にもはっきりと出ている。また両者の結果は、各偏心载荷について、よく対応しているといえよう。なお、有次元量で表示しているため、A, B, Cの各シリーズでコンクリート強度の最大値と最小値で9 N/mm² (60 kg/cm²) 程度の差があることについては考慮していない。ここでは断面強さを示す $l/D=0$ の曲線は、Cシリーズ ($l/D=5.7$) の材料強度に基づくものを示している。

5. 結 論

正方形断面に主筋8本を配した、材長が断面せいの約25倍の鉄筋コンクリート長柱試験体8体の2軸偏心圧縮载荷実験および弾塑性解析の結果より、次のことが明らかとなった。

(1) 柱部材の細長比の影響で、部材中央で横たわみによる2次モーメントの大きさが1次モーメントを上回り、部材強さは断面強さに比べて著しく低下する。

(2) 実験変数の中で、偏心が最も大きい $e/D=0.5$ の場合は材料破壊したが、それ以外の偏心が小さい場合には不安定破壊となった。これは最大荷重時における部材中央の断面隅角部に生じる最大圧縮歪の大きさが、不安定破壊の場合にはコンクリートシリンドラーの圧縮強度時の歪とほぼ同じ程度であることから言えるが、この傾向は解析的にも現れている。

(3) $\theta=22.5^\circ$ の2軸偏心载荷では、部材中央の水平変位は最大荷重点付近から進行方向が変化する。この変形過程は中央断面の中立軸の傾きの変化と対応しており、解析結果も同様の状況を表している。

(4) 部材中央の断面の捩れは、変形的全过程を通じてほとんど現れなかった。

(5) コンクリートの圧壊による剥落が生じた領域は、これまでの短い柱と同様に、1軸偏心载荷の場合に断面せいと同じ程度の範囲であるのに比して、2軸偏心载荷の場合にはその2～3倍の範囲に広がっている。

謝 辞

本研究の実験および実験データの整理にあたって、当時大阪工業大学建築学科4年生の濱田浩司君（現在、㈱榊谷設計）に多大なる御尽力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

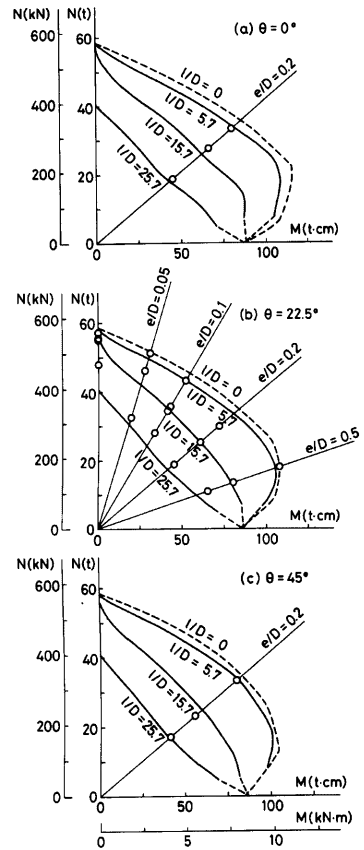


Fig. 14 Slender column interaction diagrams

参 考 文 献

- 1) 若林 實・南 宏一・岩井 哲：2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート長柱の弾塑性安定に関する実験的研究（その1），京都大学防災研究所年報，第25号 B-1，1982.4., pp. 183-196.
- 2) 若林 實・南 宏一・岩井 哲：2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート長柱の弾塑性安定に関する実験的研究（その2），京都大学防災研究所年報，第26号 B-1，1983.4., pp. 297-312.
- 3) 若林 實・中村 武・岩井 哲：2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート長柱の弾塑性安定解析，京都大学防災研究所年報，第23号 B-1，1980.4., pp. 215-227.

記 号

- b : 柱断面幅
 D : 柱断面せい
 E_s : 鉄筋の弾性係数
 e : 荷重の偏心距離
 F_c : コンクリートのシリンダー圧縮強度
 L : 柱部材長（公称値）
 l : 柱有効部材長（支点間長さ）
 M : 曲げモーメント（合モーメントベクトルの大きさ）
 N : 軸方向力
 P : 偏心圧縮荷重
 P_0 : コンクリートの圧壊が初めて観察された時の荷重
 P_{max} : 最大荷重
 P_t : 引張初亀裂発生時の荷重
 u : 部材中央の x 軸方向横変形
 v : 部材中央の y 軸方向横変形
 w : 部材軸方向の全変形量
 x : 断面の主軸で断面せい方向を示す (Fig. 1)
 y : 断面の主軸で断面幅方向を示す (Fig. 1)
 z : 部材軸
 α : 部材中央断面の捩れ角
 ϵ : 軸方向歪
 ϵ_{max} : 最大荷重時の最大圧縮歪
 ϵ_0 : 断面重心の軸方向歪
 ϵ_p : コンクリートの圧縮強度到達時の歪
 ϵ_u : コンクリートの終局歪
 ϵ_f : 鉄筋の降伏歪
 $\mu\epsilon_{max}$: 最大荷重時の最大圧縮歪で変位計による計測値
 $\mu\epsilon_0$: 断面重心歪で変位計による計測値
 $\mu\epsilon_{max}$: 最大荷重時の最大圧縮歪で歪ゲージによる計測値
 θ : 荷重の偏心方向角で x 軸となす角度
 θ_x : x 軸回りの材端回転角
 θ_{xi} : 部材下端における x 軸回りの材端回転角
 θ_{xu} : 部材上端における x 軸回りの材端回転角

- θ_y : y 軸回りの材端回転角
 θ_{yl} : 部材下端における y 軸回りの材端回転角
 θ_{yu} : 部材上端における y 軸回りの材端回転角
 σ : 軸方向応力
 σ_c : 解析で用いられるコンクリート強度
 σ_t : コンクリートシリンダーの割裂試験による引張強度
 σ_y : 鉄筋の降伏応力度
 ϕ_x : x 軸回りの回転に対する曲率
 ϕ_y : y 軸回りの回転に対する曲率
 ϕ_x : x 軸回りの回転に対する曲率で変位計による計測値
 ϕ_y : y 軸回りの回転に対する曲率で変位計による計測値