

論文 RC柱の力学的性状に及ぼす歪勾配の影響

張 冠華*³, 嶋津孝之*¹, 荒木秀夫*², 堀内弘太*⁴

要旨: 偏心圧縮荷重下におけるRC柱の力学特性に及ぼす歪勾配の影響を明らかにするため、大型鉄筋コンクリート柱を用い、中心圧縮、偏心率0.1及び0.3の偏心圧縮実験を行った。また、拘束されたコンクリートの応力度-歪度曲線に修正Kent and Park式を用いたFiber法による断面解析を行った。解析では寸法効果及び歪勾配の影響を取り入れることによって耐力、軸力-軸歪関係などを追跡することが可能であった。

キーワード: 歪勾配, 偏心圧縮, 大型RC柱, 高強度横補強筋, 断面解析

1. はじめに

偏心圧縮を受ける鉄筋コンクリート柱の断面内には歪勾配が存在し、その力学的性状は中心圧縮のそれと異なることが知られている。この影響は早くから実験的に検討されており、Sturman等[1]がφ150mmの円柱供試体を用いて行った実験では偏心圧縮の場合、コンクリート内部におけるマイクロクラックの発生が抑制され、コンクリート強度及びコンクリートの強度時歪は共に大きくなることが述べられている。Hognestad等[2]の研究では偏心圧縮を受ける試験体の最大応力度が大きいことが確認された。鈴木等[3]もφ100mmの円柱供試体及び断面100mm×100mmの試験体を用い、この歪勾配の影響について検討を行っている。また、文献[1]では歪勾配が存在する場合の応力度-歪度関係のモデルも提案している。しかし、これらの研究は歪勾配の大きさに言及しておらず、殆ど定性的なものとなっている。筆者等はこれまで無筋コンクリート柱の場合について偏心率を変数にとり歪勾配が及ぼす影響を把握してきた[4][5]。本論文は鉄筋入りのコンクリート柱について検討するものである。尚、高層RC造建物を念頭において、より現実な状況のものを把握するため、高強度横補強筋を使用した大型試験体を用いて中心圧縮及び偏心圧縮実験を行った。

2. 実験概要

2-1 試験体

試験体形状及び配筋を図1に示す。試験体全体は図に示すI型の形状をしており、検討の対象としている部分は中央の長さ800mmのものである。

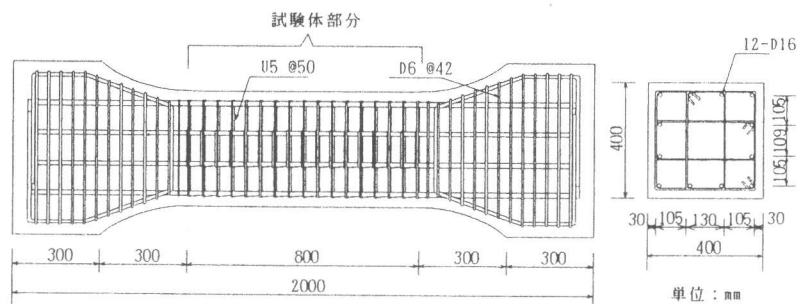


図1 試験体形状及び配筋

- *1広島大学教授 工学部第四類 工博(正会員)
- *2広島大学助教授 工学部第四類 工博(正会員)
- *3広島大学大学院生 工学研究科構造工学専攻 工修(正会員)
- *4広島大学大学院生 工学研究科構造工学専攻

以後この部分を試験体と言う。断面は400mm×400mmである。局部破壊の防止および試験体部分に均等な応力を加えるため、両側にスタブを設けた。主筋には12本のD16の異形鉄筋を使用し、 $p_k=1.49\%$ となっている。横補強筋には $\phi 5$ の高強度横補強筋を□フープと中子筋に配し、 $p_w=0.39\%$ となっている。コンクリート及び鉄筋の力学的特性をそれぞれ表1と表2に示す。 F_c は400kgf/cm²を目標としたが、実験実施時強度は幾分ばらついたものとなった。試験体は計6体であり、偏心率0(中心圧縮), 0.1, 0.3に、それぞれ2体を用意した。試験体一覧と偏心率等は表1に示した。

2-2 加力及び測定方法

加力には広島大学所有の3000tonf能力の大型試験機を用い、静的漸増型とした。加力概略図を図2に示す。歪はコンクリート表面及び鉄筋に貼付した歪ゲージを用いて測定した。また、試験体両側面に変位計をそれぞれ9本を用い、軸歪を測定した。

3. 実験結果

3-1 最終破壊状況

図3に各偏心率ごとの最終破壊状況を例示する。中心圧縮試験体は最大耐力に近づくとひび割れが発生し、ひび割れが進むにつれ、最大耐力にいたり、その後は無筋の場合と違って耐力が徐々に低下してゆき、断面全体のコンクリートの圧壊で終局に至った。ひび割れは試験体部分全体にわたって発生しており、パターン的にはX型の傾向が多少あるものの、無筋試験体のように明確に現れていない。

偏心圧縮の場合、最大耐力に近い荷重レベルで、曲げを受ける断面において圧縮の大きい所(試験体上部)の主筋に近い位置で加力方向と平行なひび割れが発生し、ひび割れが進むにつれ、上面においてもひび割れが発生し、かぶり

表1 コンクリートの力学的特性

試験体名	偏心率	実験実施時強度等		
		σ_B^* (kgf/cm ²)	ϵ_B^{**} (μ)	E_B (10 ⁵ kgf/cm ²)
RUS-40-0-1	0 (中心圧縮)	441	3146	2.72
RUS-40-0-2		451	3124	2.85
RUS-40-0.1-1	0.1	534	3004	3.02
RUS-40-0.1-2		427	2955	2.54
RUS-40-0.1-2	0.3	361	2999	2.55
RUS-40-0.1-2		388	3306	2.50

* σ_B は同一養生シリンダーによる実験実施時強度
** ϵ_B は同強度時歪 但し、 E_B の応力レベルは $1/3\sigma_B$

表2 鉄筋の力学的特性

鉄筋種類	降伏点 kgf/cm ²	降伏歪 μ	引張強さ kgf/cm ²	ヤング係数 kgf/cm ² ($\times 10^6$)
D16	3676	1895	5498	1.94
U5	14498	7473	15856	1.94
D6	4245	2258	5811	1.88

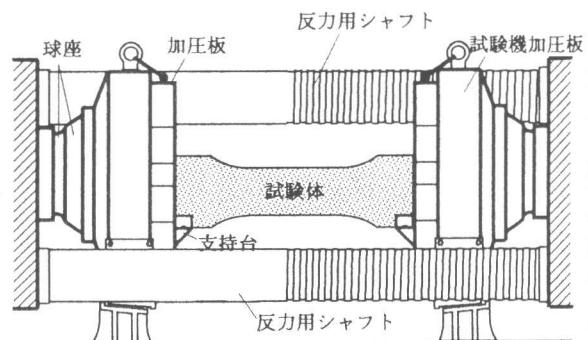


図2 加力概略図

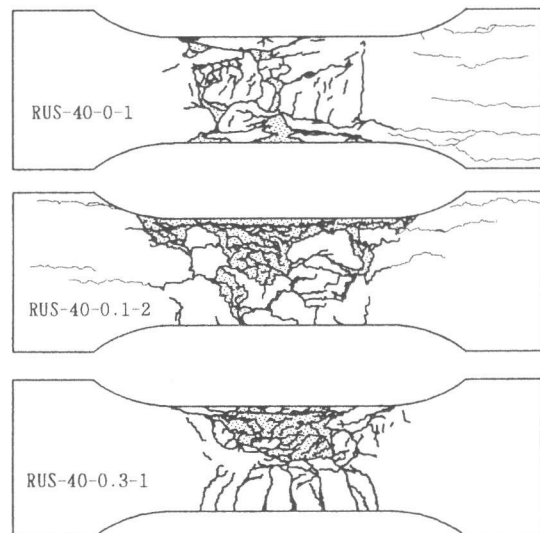


図3 最終破壊状況

コンクリートの圧壊・剥落によって耐力は最大となる。その後、耐力を維持しながら、軸方向変形の増加に従い、徐々に耐力が低下して行った。上部コアコンクリートの圧壊と共に耐力が急に下がり、そして終局に至った。試験後、全ての試験体において主筋の座屈が確認された。主筋の座屈等による横補強筋の破断は見られなかった。偏心率が大きな試験体の下部では引張りひび割れが見られた。ひび割れ全体の傾向は偏心率が小さいほど圧壊領域が大きく、深いことが分かる。

3-2 断面における歪の分布性状

試験体断面における最大耐力付近までの歪分布性状を図4に例示する。試験体の両側面に貼付した歪ゲージによるものの平均を用いた。約25tonfごとの荷重段階における歪を結んだ。中心圧縮の試験体ではどの位置もほぼ同じ歪であり、均等に載荷されているのが分かる。偏心率0.1の場合、試験体上面から底面までの全域にわたって圧縮域となっており、試験体上面から底面にかけて緩やかな歪勾配がある。また、ほぼ平面保持が成り立っていることがわかる。偏心率0.3の場合、偏心率0.1の場合より急な歪勾配になっており、試験体底面付近は引張域となっている。この試験体も、どの荷重段階においても直線的な分布である。

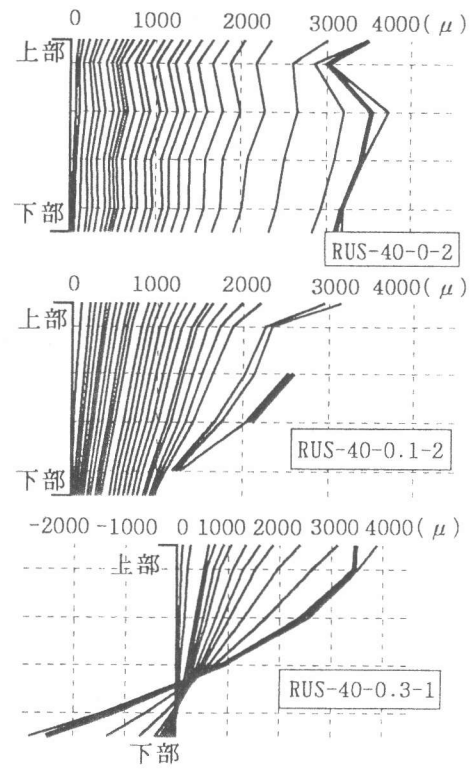


図4 断面における歪分布性状

3-3 横補強筋の歪性状

外周の横補強筋の歪と軸方向歪の関係を図5に例示する。横軸の軸歪は変位計によるもので、中心圧縮は全ての変位計の平均を用いており、偏心圧縮を受ける試験体は両側面上部3本、計6本の変位計の平均を用いた。横補強筋の歪は各所に貼付した2枚の鉄筋ゲージの平均である。尚、同図中に軸力-軸歪関係も挿入した。中心圧縮の試験体では補強筋上部、側面、下部の各所歪は概ね一致し、軸歪の増加につれて横補強筋歪も増加している。偏心圧縮を受け

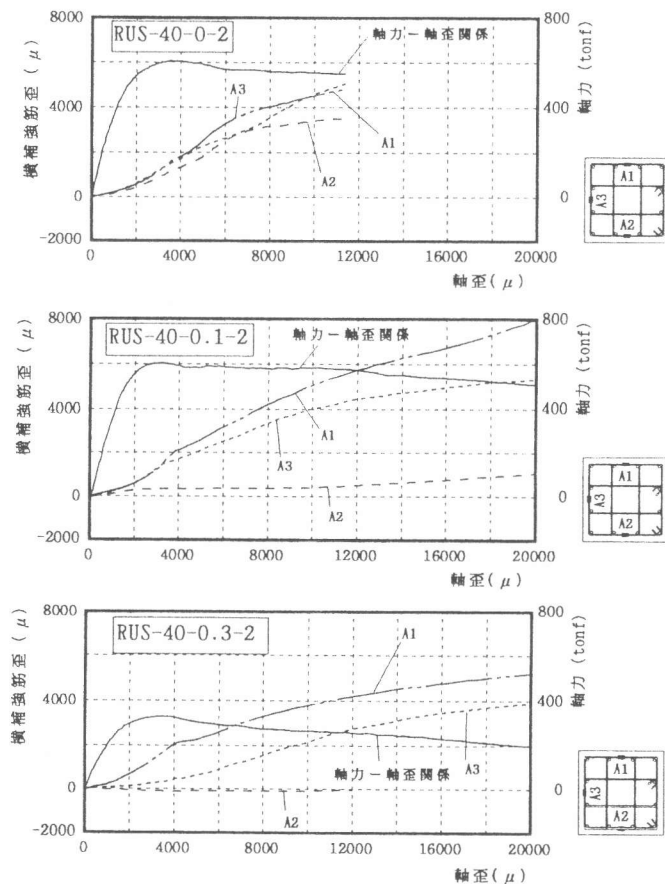


図5 横補強筋の歪性状

る試験体は同一補強筋の各所歪は異なり、同一荷重レベルで圧縮が大きい位置程大きくなっている。偏心率0.1のものを見ると、上部の歪はほぼ中心圧縮と変わらなく、側面位置（断面上で中間に当たる）の歪も大差はないが、下部の歪はかなり小さくなっている。偏心率0.3のものについては上部歪は中心圧縮とそれほど変わらないが、側面の歪が小さくなり、下部はほぼ零である。この相違は、断面内に歪勾配が存在することによって各所の軸歪が違い、コンクリートの横歪が異なってくることに原因がある。横補強筋歪の値を見ると、最大耐力点付近ではいずれの試験体においても歪は2000 μ 前後であり、この高強度鉄筋の降伏歪の1/3程度である。この時点での拘束応力は普通鉄筋の降伏強度を超えていないことが分かる

4. 結果の考察

ここで、耐力や軸力-軸歪関係について実験結果と解析結果を比較し、検討する。解析はFiber法による断面解析である。解析方法などは文献[6]等に詳しく述べているので、簡単に仮定などを述べるに留める。断面を1cm \times 1cmの微小要素に分割し、要素内では等歪・等応力と仮定した。主筋は完全弾塑性型とした。横補強筋の拘束効果はコンクリートの応力度-歪度モデルの中に取り入れる。また、平面保持の法則が成り立つと仮定している。

拘束されたコンクリートの応力度-歪度関係は修正Kent and Park式[7]を用いた。但し、横補強筋の降伏強度の代わりに有効拘束応力を用い、実験のピーク点における横補強筋の歪を参考に通常鉄筋降伏強度並の値とした。解析は、寸法効果及び歪勾配の影響を取り入れたものと、それを考慮しないもの、2ケースについて行った。尚、寸法効果及び歪勾配の影響を考慮する場合、Kent and Park式におけるシリンダー強度の代わりに無筋コンクリートの強度を用いた。無筋コンクリートの強度についてはシリンダー強度に寸法効果及び歪勾配の影響に関する係数をかけて求めた。寸法効果の係数は無筋コンクリート試験体の結果[4,5]を平均した値0.761を用いた。又、無筋コンクリートの強度時歪も同様に求めたが、その係数は1.0とした。歪勾配の影響も無筋コンクリート試験体の結果を用いた。文献[5]で偏心率を変数にして定量化を図っており、下記の式になる。式(1)はコンクリート強度に関するもので、式(2)はコンクリート強度時歪に関するものである。

$$K_{sgf} = 0.761e^{0.415+1} \quad (1)$$

$$K_{sgs} = 0.264e^{0.153+1} \quad (2)$$

ここに、eは偏心率で、 K_{sgf} 、 K_{sgs} はそれぞれ無筋コンクリート強度及び強度時歪に関する係数である。

4-1 耐力

各試験体の耐力を表3に示した。実験値を計算値で割った値と偏心率の関係を図5に示す。寸法効果と歪勾配の影響を考慮しない場合を表第3、4欄に示す。偏心率0.1の解析値は実験値と最も一致しているが、中心圧縮を受ける場合、解析は大きく過大評価し、偏心率0.3のものを若干過小評価していることがわかる。

寸法効果及び歪勾配の影響を考慮して得られた耐力は表3の最後の2欄と図5中の右図である。

表3 試験体耐力一覧表

試験体	実験値	歪勾配等の影響無視		歪勾配等の影響考慮	
		計算値	実験値/計算値	計算値	実験値/計算値
RUS-40-0-1	600	840	0.715	670	0.896
RUS-40-0-2	607	856	0.709	682	0.890
RUS-40-0.1-1	676	705	0.960	716	0.945
RUS-40-0.1-2	606	585	1.035	593	1.022
RUS-40-0.3-1	315	293	1.076	335	0.939
RUS-40-0.3-2	331	308	1.075	354	0.934

耐力単位：tonf

表及び図からは実験値と計算値の対応は全体として大分改善されたことがわかる。しかし、解析値は中心圧縮で寸法効果を考慮しても実験値を尚上回っており、かぶりコンクリートの耐力喪失を考慮していないのが若干影響しているほか、拘束効果の度合いを更に検討する必要があると思われる。また、偏心率の大きいものを過大評価する傾向が有るが、これは前述したように歪勾配が存在することによって試験体断面下部の横補強筋の拘束効果が低下することに起因すると考えられる。

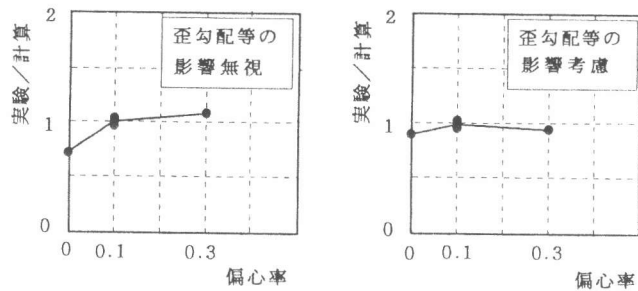


図6 耐力と偏心率の関係

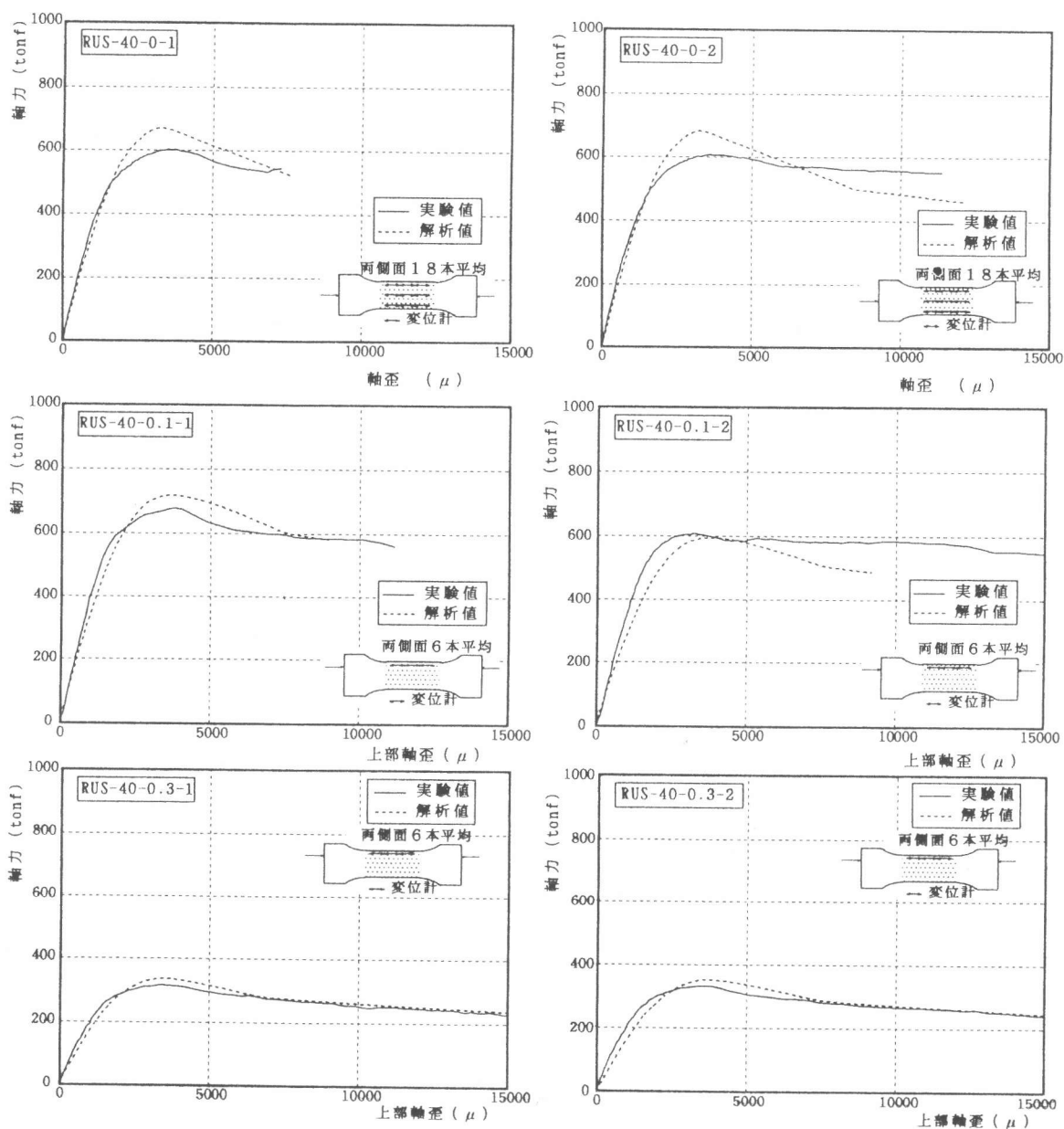


図7 軸力-軸歪関係

4-2 軸力-軸歪関係の比較

図7は軸力-軸歪関係の実験値と解析値を比較したもので、解析値は歪勾配等の影響を考慮したものである。軸歪は中心圧縮のものが側面に取り付けた変位計の平均、偏心圧縮のものが上部変位計の平均を用いている。実験値は、全ての試験体で最大耐力後で軸歪が増大するにつれ、耐力が緩やかに低下して行き、極めて韌性に富んだ挙動を示している。解析値は偏心率0.1及び中心圧縮の下降域で実験値よりやや急であるが、最大耐力時軸歪もよく捉えており、全体的によく実験値を追跡していることがわかる。解析値の下降域が急になるのは拘束効果を過小評価している点に原因があると考えられる。本解析では前述したように通常鉄筋降伏強度並の有効拘束応力を用いており柱の最大耐力の評価には妥当な措置であるが、本実験の試験体横補強筋に高強度補強筋を使用しているため最大点を過ぎても歪の伸びにより拘束応力が増加し、耐力の低下に抵抗している。

5. まとめ

本研究では大型の鉄筋コンクリート柱試験体を用いた中心・偏心圧縮実験と断面解析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 実験では偏心圧縮荷重下の軸力-軸歪関係及び高強度横補強筋の歪性状を把握した。
- (2) 断面解析では、無筋コンクリート柱から得られた寸法効果と歪勾配の影響を取り入れた応力度-歪度モデルを用いて柱の耐力等は概ね評価できることが分かった。
- (3) 高強度横補強筋を用いる場合、柱の最大耐力に対する拘束効果は普通鉄筋程度と考えられる。韌性に対する拘束効果は普通鉄筋以上に期待できるものの、この点の定量的把握については今後検討を要する。

謝辞

実験実施にあたっては、ニチブ(株)、広島大学文部技官清水 高、京泉敬太両氏に協力頂いた。また、実験及びデータ整理には平成7年度卒論生田中鉄男君に協力頂いた。ここに、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Sturman, G. M., Shah, S. P. and Winter, G.: "Effects of Flexural Strain Gradients on Microcracking and Strength Design", ACI Journal, Vol. 62, No. 7, 1965, pp. 805~822
- [2] Viest, M., Elstner, R. C. and Hognestad, E.: "Sustained Load Strength of Eccentrically Loaded Short Reinforced Concrete Columns", ACI Journal, Proceedings Vol. 52, 1956, pp. 727-755
- [3] 鈴木計夫、中塚佑、深野慶：曲げひずみ勾配下におけるコンクリートの力学的特性に関する実験的研究、セメント技術年報, X X IX, 1975, pp. 317~321
- [4] 張冠華、嶋津孝之、荒木秀夫、松本孝治：コンクリート柱の力学的特性に及ぼす歪勾配の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 2、1995、pp. 345~350
- [5] 張冠華、嶋津孝之、荒木秀夫、松本孝治：偏心圧縮を受けるコンクリート柱の抵抗特性に及ぼす歪勾配の影響、構造工学論文集、Vol. 42B、1996. 3、投稿中
- [6] 張冠華、嶋津孝之、荒木秀夫他：実大鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 40B, 1994, pp. 323~334
- [7] Park, R., Priestley, M. J. N., and Gill, W. D.: "Ductility of Square-Confined Concrete Columns", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. 4, 1982, pp. 929-950