

論文 コンクリートの軟化特性を考慮した RC 梁の弾塑性解析

稲田 祐二^{*1}・近藤 一夫^{*2}・川端 康洋^{*3}・河内 武^{*4}

要旨：RC構造物のより正確な耐震性能評価には、ポストピーク領域を含む変形挙動に、疑似脆性材料であるコンクリートの終局挙動としての軟化特性が、どのように影響を与えるかを精度よく把握することが重要となる。本研究では、筆者等が提案している解析ツールであるハイブリッド型応力法一次元有限要素を、このようなポストピーク挙動を含む荷重－変形経路解析に適用する手法を述べると共に、本要素を用いて行ったRC構造骨組の基本構成要素である曲げ破壊する梁の荷重－変位経路解析の結果について報告する。

キーワード：軟化特性、ポストピーク挙動、破壊エネルギー、ハイブリッド型応力法

1. はじめに

構造物の耐震性能評価には、崩壊過程に於ける荷重－変位経路を、より正確に把握することが重要である。特に、RC構造物は、硬化材料である鉄筋と、疑似脆性材料であるコンクリートから構成されており、コンクリートの軟化特性が構造物のポストピーク領域を含む変形挙動に大きな影響を与えることが予想される。一般に、軟化特性は、変形の局所化や構造不安定現象を引き起こす要因となっており、構造物あるいは部材のピーク耐力やそれ以降の靱性能の正確な評価には、重要な要因であると考えられる。しかしながら、このような軟化特性を有する構造物の弾塑性破壊解析に、硬化材料を対象として展開された従来の連続体力学を基礎とする離散化数値解析手法や求解法を適用すると、様々な問題が生じることは、よく知られている¹⁾。一方、筆者等は、ハイブリッド型応力法一次元有限要素は弾塑性領域にわたって離散化誤差を全く生じないため、RC骨組の崩壊解析ツールとしてきわめて有効であることを示してきた²⁾。本研究では、本要素をこのようなポ

ストピーク挙動を含む荷重－変形経路解析に適用する手法を述べると共に、RC構造骨組の基本構成部材である曲げ破壊する梁の荷重－変位経路解析結果を報告し、この種の問題に対する本解析手法の有効性を示す。

2. 解析方法

本研究で採用した一次元有限要素は、図－1に示す塑性域の拡がり考慮したハイブリッド型応力法立体梁・柱要素にせん断変形を付加したTimoshenko梁・柱要素³⁾である。要素剛性マトリックス及び荷重ベクトル算定に用いたエネルギー積分は、図－2に示すように、要素を材軸方向及び断面(x-y平面)方向に分割して得られる微小なセグメントを損傷評価の基本単位とし、各セグメント内での材料特性は同一であるものとして実行している。又、材の応力－ひずみ関係は、材軸方向直成分のみについて設定することとし、せん断接線係数については、材軸方向直成分に関する接線係数に比例するものとしている。尚、数値計算には、著者等の開発したハイブリッド型応力法一次元有限要

- | | | | |
|-----|---------|-----------|----------|
| * 1 | 米子高専助教授 | 建築学科 | 工修 (正会員) |
| * 2 | 広島大学助教授 | 工学部建設構造工学 | 工博 |
| * 3 | 米子高専教授 | 建築学科 | |
| * 4 | 清水建設(株) | 技術研究所 | 工修 |

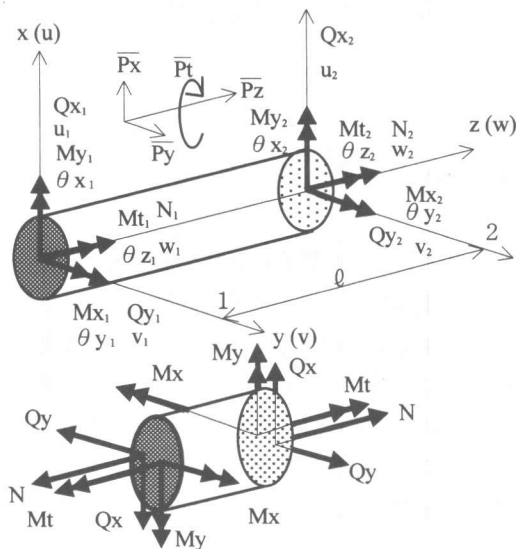


図-1 立体梁・柱要素の要素座標系での記号の定義

素による立体骨組構造物の弾塑性崩壊解析プログラムLAP96⁴⁾を用いている。

RC構造物を対象とした既往の弾塑性解析⁵⁾では、コンクリートの軟化特性がもたらす数値計算上の困難さを避けるため、軟化特性を硬化特性に置き換え、その差を不釣り合い力として評価するという解析手法も採用されているが、本研究では、軟化特性としての負の接線勾配をそのまま構成則に取り込むという手法を採用している。従って、各増分ステップに於いて、停留条件式を満たす複数の釣合解の中から安定経路を見出すための求解法が必要となる。ここでは、近藤等が、弧長法をベースとした有限変形数値解析手法の展開に於いて、増分応答経路の方向を制御するための条件式として用いた次式⁶⁾を、増分変位ベクトルの方向を決定する判定式として採用している。

$$\{\Delta d\}^T \cdot \{\Delta \bar{d}\} + \zeta \cdot \{\Delta p\}^T \cdot \{\Delta \bar{p}\} > 0 \quad (1)$$

ここに、 $\{\Delta d\}$ ：増分変位ベクトル、 $\{\Delta p\}$ ：増分荷重ベクトル、 ζ (≥ 0)：弧長に及ぼす荷重項の寄与の軽重を表す係数、 $\{\Delta \bar{d}\}$ ：前回の増分変位ベクトル、 $\{\Delta \bar{p}\}$ ：前回の増分荷重ベクトルである。又、森迫が用

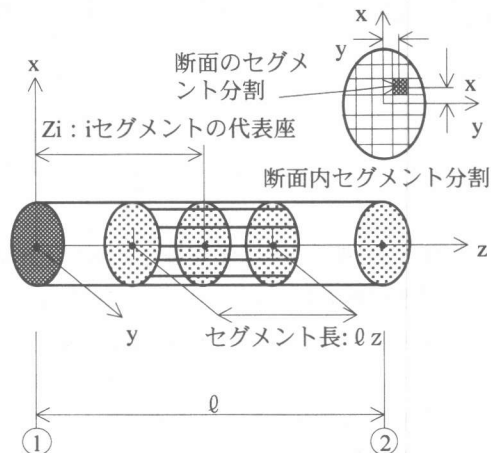


図-2 要素のセグメント分割

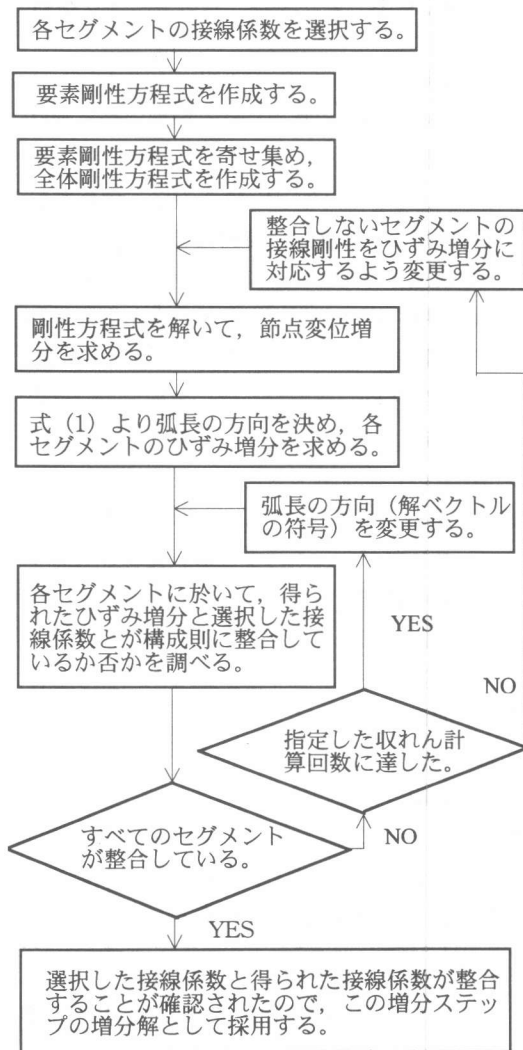


図-3 採用した求解法のフローチャート

いた方法⁷⁾と同様に、各増分ステップで選択した剛性が、それを用いて得られた結果と整合していることも応答経路決定の必要条件としている。以上の流れを示すと、図-3のようになる。

3. コンクリートの軟化特性算定法

LAP96で用いている鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-4に示す bi-linear型とし、コンクリートの応力-ひずみ関係は、図-5に示す3折れ線の特性としている。コンクリートの軟化特性は、一般に、引張に対する軟化特性と圧縮に対する軟化特性に区別される。本研究では、これらの軟化特性を破壊力学の概念に基づいて決定する。即ち、引張破壊のような完全局所化状態に対しては、引張破壊エネルギーを既知として、吉川等が用いた等価構成則の算出法⁸⁾に基づいて誘導した次式を用いて軟化特性を決定する。

$$\alpha_{yp} = \ell_z / (\ell_z + 2 G_f E_e / f_t^2) \quad (2)$$

ここに、 α_{yp} : 引張軟化域のヤング係数低減比、 G_f : 破壊エネルギー、 f_t : コンクリートの引張強度、 E_e : コンクリートの初期弾性係数、 ℓ_z : セグメント長である。

一方、圧縮破壊のような準局所化状態に対する軟化特性は、基本的にMarkeset等⁹⁾により提案された、圧縮割裂ひび割れと局所化したせん断ひび割れを組み合わせた圧縮損傷領域 (CDZ) モデルに基づいて決定する。即ち、解析結果のセグメント分割依存性を排除するために、圧縮破壊過程に於いて消費される全エネルギーがセグメント長に依存せず、等しくなるように補正をした次式によってコンクリートの圧縮損傷領域での応力-平均ひずみ関係を表す。

$$\varepsilon_m = \varepsilon + \varepsilon_d (\ell_d / \ell_z) + w / \ell_z \quad (3)$$

ここに、 ε_m : 圧縮損傷領域の平均ひずみ、 ε : 圧縮損傷領域全体の共通のひずみ、 ε_d : 圧縮損傷領域の平均付加ひずみ、 ℓ_d : 圧縮損傷領域の長さ、 w : 局所変形であり、式(3)の右辺第1項及び第2項を決定するために定義さ

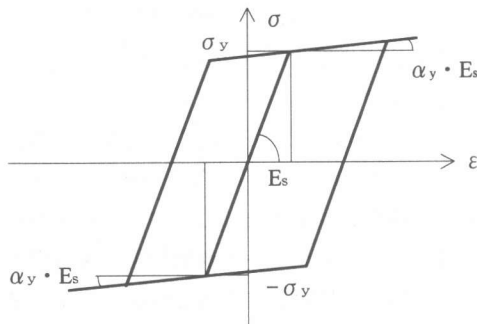


図-4 鉄筋の応力-ひずみ関係

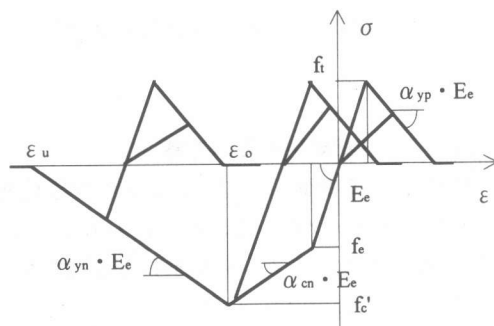


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

れるエネルギーは、引張破壊エネルギーに比例するものとして、次式で定義される。

$$W^{tn} + W^s = G_f / r \quad (4)$$

ここに、 $W^{tn} + W^s$: 割裂ひび割れによって吸収される全エネルギー、 r : 平均ひび割れ間隔であり、更に、材料定数 k を定義し、 $W^s = kW^{tn}$ なる関係を導入する。以上により、圧縮領域での軟化特性が決定される。

4. RC梁の数値解析

4.1 解析モデルと解析データ諸元

解析対象として選んだのは、スラブの開発を目的になされた図-6に示す諸元を持つ梁の面外曲げの問題¹⁰⁾である。この問題を選択したのは、実験結果を有すると共に、断面内にせん断補強筋が配されておらず、3章で述べた軟化特性算定法の適合性がよいこと、又、せん断スパン比が大きいためせん断力の影響は小さいと考えられるためである。図-7に解析モデルを示すが、要素数は3で節点数は4である。セグ

メント分割は、材軸方向については、セグメント長を中央で75mm、その他で25mmとし、断面方向については、コンクリートを深さ方向に41、幅方向に2等分割、鉄筋を32分割することにより、合計114セグメント分割としている。表1に、材料実験結果を基に決定した解析用材料定数を、コンクリートの軟化特性を決定するために採用した材料定数である破壊パラメータと共に示す。又、表2には、軟化パラメータをセグメント長で補正したもの示す。尚、コンクリートの α_{cn} は、 $f_e = 2f_c'/3$ として決定している。

4. 2 解析結果とその考察

解析は、RC断面スラブの鉄筋の塑性剛性低下率をパラメータとして、 $\alpha_y=1/10000$ 、 $\alpha_y=1/100$ の2ケースと、軟化挙動を考察するためのプレーンコンクリート断面ケースについて行った。図-8に荷重と中央変位の関係を、解析結果と実験結果を合わせて示す。解析は、 $\alpha_y = 1/10000$ のケースで中央変位3.38cm、 $P=59.67\text{kN}$ 、 $\alpha_y=1/100$ のケースで中央変位2.53cm、 $P=54.70\text{kN}$ で、いずれも整合剛性行列問題に於ける循環剛性選択過程に陥り、解析を終了している。また、実験に於ける最大耐力は、56.78kNであり、この時の中央変位は8.81cmである。 $\alpha_y = 1/10000$ のケースの解析結果は、実験結果に於ける最大耐力とほぼ等しくなっているものの、 $\alpha_y = 1/100$ のケースでは、すべての鉄筋が降伏するまでは、ほぼ同一の経路を辿るが、その後は、鉄筋の塑性剛性の影響から、耐力が更に上昇している。一方、変形は、実験結果に対してかなり小さくなっている。これは、採用した有限要素の定式化に平面保持を仮定した梁・柱理論を用いているため、又、鉄筋とコンクリートとの間のすべり等も考慮していないためと考えられる。比較のため行った鉄筋が配筋されていない仮想のプレーンコンクリート断面の解析結果は、ポストピークの破壊過程にsnap-back現象を生じており、

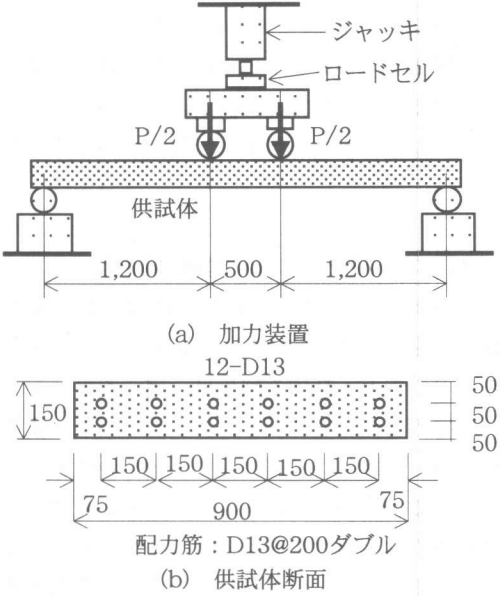


図-6 解析対象の梁の諸元



図-7 解析モデル

表-1 材料定数と破壊パラメータ

鉄筋	$\sigma_y(\text{MPa})$	336.4
	$E_s(\text{GPa})$	190.3
	ν_s	0.3
コンクリート	$f_c'(\text{MPa})$	54.33
	$f_t(\text{MPa})$	3.207
	ν_c	0.226
	$E_c(\text{GPa})$	37.27
破壊パラメータ	$G_f(\text{N/m})$	150
	$L_d(\text{cm})$	30
	$r(\text{mm})$	1.25
	k	3
	$W_c(\text{mm})$	0.6

表-2 コンクリートの軟化特性パラメータ

	$L_s=75\text{mm}$	$L_s=25\text{mm}$
α_{yn}	-0.005558	-0.01853
α_{yp}	-0.06426	-0.02238

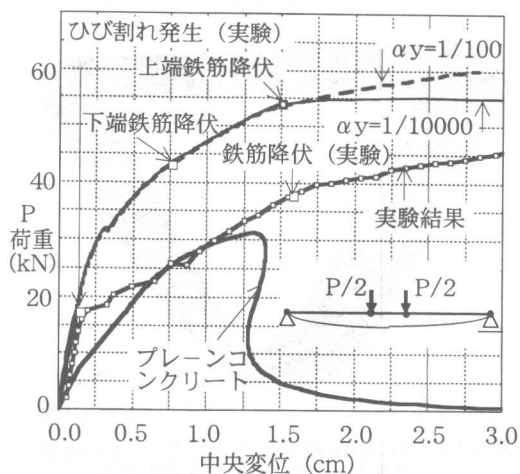


図-8 荷重-中央変位関係の解析結果と実験結果

きわめ脆性的であること、そして、このピーク耐力は、RC断面の解析経路に見られるひび割れ荷重レベルに、ほぼ一致していることがわかる。図-9には、 $\alpha_y = 1/10000$ のケースに於ける圧縮縁コンクリートの応力-ひずみ関係と荷重-ひずみ関係の解析結果を示す。圧縮縁のコンクリートは、上端鉄筋降伏以後に圧縮軟化領域に到達したことがわかる。図-10には、 $\alpha_y = 1/10000$ のケースに於ける下端鉄筋の応力-ひずみ関係と荷重-ひずみ関係の解析結果を示す。下端鉄筋の降伏に伴い荷重-変形関係の剛性が低下しているのがわかる。図-11には、 $\alpha_y = 1/10000$ のケースに於ける引張縁コンクリートの応力-ひずみ関係と荷重-ひずみ関係の解析結果を示す。引張縁コンクリートが引張耐力に到達するのは、ひび割れの発生レベルに対して、非常に早期であることがわかる。

図-12と図-13は、プレーンコンクリート断面とRC ($\alpha_y=1/100$) 断面の解析ケースに対し、荷重点変位 2 cm 時の変形状を 100 倍に拡大して表示したものである。両者の性状を比較すると、プレーンコンクリート断面供試体の方は、変形の局所化が生じているが、RC断面供試体については、鉄筋の効果で変形が分散していることがわかる。

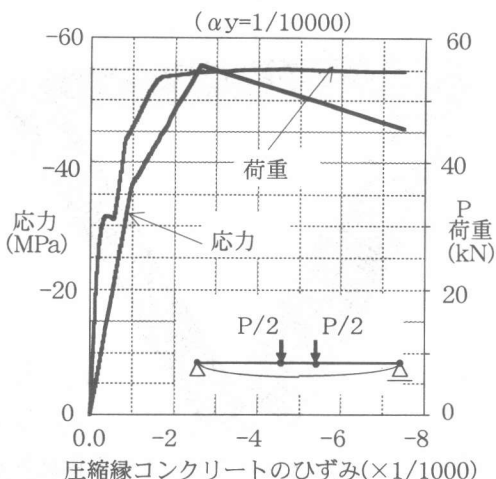


図-9 圧縮縁コンクリートの応力-ひずみ関係と荷重-ひずみ関係の解析結果

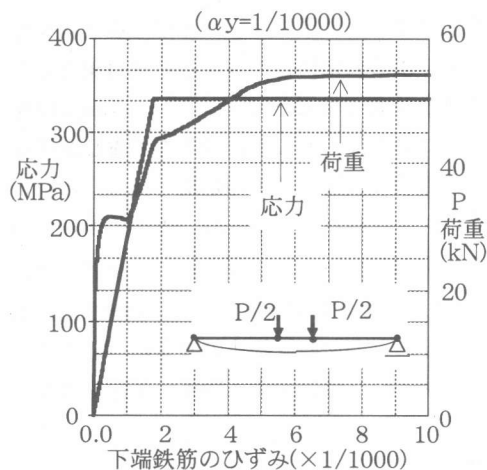


図-10 下端鉄筋の応力-ひずみ関係と荷重-ひずみ関係の解析結果

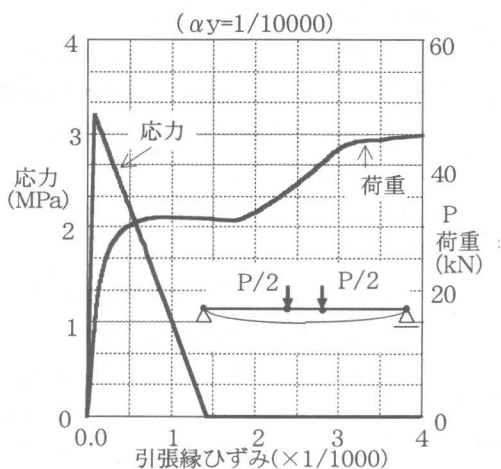


図-11 引張縁コンクリートの応力-ひずみ関係と荷重-ひずみ関係の解析結果

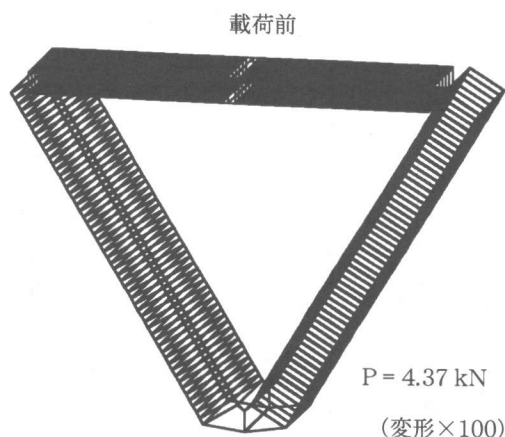


図-12 プレコンクリート断面供試体の
荷重点変位 2 cm に於ける変形状

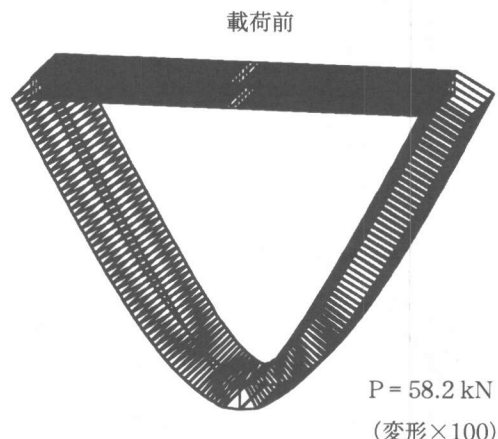


図-13 RC ($\alpha_y=1/100$) 断面供試体の荷
重点変位 2 cm に於ける変形状

5. まとめ

本研究では、ハイブリッド型応力法一次元有限要素による軟化特性を有する材を対象とした解析手法を提示すると共に、snap-back現象を含むコンクリートの軟化特性を考慮した梁部材の弾塑性破壊経路解析の結果を示し、本解析法がポストピーク挙動を含むこの種の問題についても有効なツールとなり得ることを示した。尚、整合剛性行列問題に於いて循環剛性選択過程に陥ることのない求解法の開発については、今後に残された解析手法に関する課題である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書，1993.10
- 2) 稲田祐二ほか：ハイブリッド型応力法による鉄筋コンクリート造骨組の弾塑性崩壊解析，日本建築学会構造系論文集，508号，pp.55~62，1998.6
- 3) 近藤一夫：鋼構造骨組の塑性崩壊解析，培風館，pp.108~115，1991.7
- 4) 稲田祐二ほか：ハイブリッド型応力法による3次元立体骨組の弾塑性崩壊解析プログラム（LAP96）の開発，計算工学講演会論文集，4巻，1号，pp.25~28，1999.5
- 5) 例えば野口 博：鉄筋とコンクリートの構成則モデル，応用力学シリーズ4「構造の崩壊解析 基礎編」，日本建築学会，pp.129~142，1997.
- 6) Kondoh K. and Atluri S.N. : Influence of Local Buckling on Global Instability: Simplified Large Deformation Post-Buckling Analysis of Plane Trusses, Comput. Struct., vol.21, No.4, pp.613~627, 1985.
- 7) 森迫清貴：弾塑性骨組の臨界挙動解析における整合剛性行列形成アルゴリズムとつり合い経路制御パラメータの選択，日本建築学会構造系論文集，519号，pp.55~61，1999.5
- 8) 吉川弘道，西岡真帆：ひずみの局所化領域を有するコンクリート単材の変形挙動と安定／不安定条件，コンクリート工学論文集，6巻，1号，pp.89~101，1995.1
- 9) Markeset G. and Hillerborg A.: Softening of Concrete in Compression-Localization and Size Effects, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp.702~708, 1995
- 10) 河内 武ほか：超軽量骨材を用いた高強度コンクリート構造の開発（その2 スラブの静的曲げ実験），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.29~30，1993.9