

論文 中心軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリートの拘束効果に関する三次元FEM解析

水野英二*1・森本康介*2・畑中重光*3

要旨: 筆者らのひずみ軟化型構成モデルを採り入れた三次元有限要素プログラムにより、中心軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリート（角形断面）の拘束効果について検討を行った。本研究では、コンクリート要素と鉄筋要素との間に付着要素を考慮した場合のパラメトリック解析を行い、解析結果と実験挙動とを比較した。本解析結果に基づき、コンファインドコンクリート内部の損傷の進展および等価拘束圧の分布について考察した。その結果、（1）付着要素を導入することにより実験挙動を再現できること、（2）角形断面の内部拘束圧状態は、隅角部にて円形断面の場合のおよそ2倍もの拘束圧が作用することを確認した。

キーワード: コンファインドコンクリート, 三次元FEM解析, 付着要素, 等価拘束圧

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）構造物・部材の終局耐力および塑性変形挙動は、コンクリート材料のひずみ軟化挙動に大きく影響される。このため、有限要素プログラムを用いた数値シミュレーション解析によって、コンクリート構造物および部材の塑性変形性能を検証する場合、コンクリート材料の引張・圧縮軟化挙動を精度よく再現できる構成モデルの確立が必要となってきた。これまでに提案されているコンクリート構成モデルについては、文献^{1),2),3),4)}に紹介されている。

筆者らは、これまでにコンクリートのひずみ軟化型構成モデルを開発し^{5),6),7)}、コンクリート充填鋼管柱およびコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析に応用してきた^{8),9)}。これまでの研究では、コンクリート要素と鉄筋要素が節点を共有している（完全付着である）ため、横補強筋とコンクリートの滑りが考慮できず、コンクリートは、高い拘束力を受ける。そのため、平均軸応力-平均軸ひずみ関係として延性的な解析結果が得られている。本研究では、横補強筋とコンクリートとの境界面の影響を考慮するために、付着要素¹⁰⁾をコンファイン

ドコンクリートの解析へ導入し、等価拘束圧^{5),6)}という指標を用いて横補強筋による拘束効果を定量的に考察する。なお、この等価拘束圧とは、一般状態での応力量を側方応力一定の三軸圧縮実験経路上の応力量に換算した場合の側方応力のことを意味する。

2. 解析手法

2.1 解析対象

解析対象とした試験体（No.1 および No.2）を図-1に示す。さらに、試験体の形状・材料に関する諸量を表-1に示す。実験に用いられた試験体¹⁰⁾では、鉄筋の上下部にコンクリートが存在するが、本解析では、鉄筋に囲まれたコア部分のコンクリートのみ（かぶりはゼロと仮定する）を対象として、図-1の斜線部に示す1/8部分にて解析を行った。付着要素には弾性体を用い、厚さはそれ自体が解析結果に影響を与えないように極力薄くし、文献¹⁰⁾の場合と同様、鉄筋幅の1/200の厚さとした。コンクリート、鉄筋および付着要素の位置関係を図-2に示す。付着要素の材料定数(E_i, ν_i :ヤング率およびポアソン比)は、鉄筋の材料定数(E_s, ν_s)を基準として、表-2に示す値を用いる。

* 1 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph.D. (正会員)

* 2 三重大学大学院 工学研究科博士前期課程建築学専攻 (正会員)

* 3 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

表-1 解析に用いるコンファインドコンクリートの形状・材料データ

	D (mm)	H (mm)	S (mm)	Pv (%)	σ_{sy} (MPa)	σ_{ly} (MPa)	Es (GPa)	ν_s	fc' (MPa)	Ec (GPa)	ν_c
No.1	94	100	50	0.62	297	0.92	210	0.3	30.3	28.6	0.2
No.2			25	1.24		1.84					

D: 試験体幅 H: 試験体高さ S: ピッチ Pv: 横補強筋の体積比 σ_{sy} : 横補強筋の降伏応力
 σ_{ly} : 円形の場合の計算拘束圧 ($\sigma_{ly} = Pv/2 \cdot \sigma_{sy}/100$) Es: 横補強筋のヤング率 ν_s : 横補強筋のポアソン比
 fc': コンクリートの一軸圧縮強度 Ec: コンクリートのヤング率 ν_c : コンクリートのポアソン比

表-2 付着要素の形状・材料データ

	Ei (GPa)	ν_i	Ei/Es, ν_i/ν_s	t_i (mm)	t_s (mm)
ケース1	付着要素なし (完全付着)				
ケース2	42	0.06	1/5	0.01	1.87
ケース3	21	0.03	1/10		
ケース4	4.2	0.006	1/50		
ケース5	2.1	0.003	1/100		
ケース6	0.42	0.0006	1/500		
ケース7	0.21	0.0003	1/1000		

Ei: 付着要素のヤング率 ν_i : 付着要素のポアソン比 Es: 鉄筋のヤング率
 ν_s : 鉄筋のポアソン比 t_i : 付着要素の幅 ($t_i = t_s/200$) t_s : 鉄筋の幅

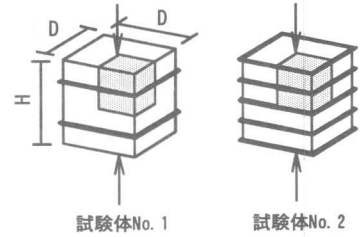


図-1 試験体 (全体図)

2.2 要素分割図

有限要素解析に用いた試験体の要素分割図を図-3に示す。また、解析モデルは、二軸 (X, Y軸) 対称・上下対称を仮定し、試験体の1/8部分とした。

2.3 境界条件

X=0, Y=0, Z=0平面でそれぞれX, Y, Z方向を固定した。端部は無拘束とした。

2.4 解析プログラム

本研究では、8 節点アイソパラメトリック三次元ソリッド要素 (8 ガウス点)¹¹⁾を組み込んだ有限要素プログラム FEAP¹²⁾を使用する。コンクリートのひずみ軟化領域まで解析するため、試験体 (高さH) の上部に $2.5 \times 10^5 H$ (0.005%軸ひずみに相当) を与える変位制御とした。

2.5 構成モデル

コンクリート部分には、筆者らのひずみ軟化型モデル⁷⁾を採用し、鉄筋部分には von Mises モデルを用いた。

3. 解析結果

3.1 平均軸応力-軸ひずみ関係

付着要素の剛性を変化させた解析 (ケース1~ケース7) より得られた、試験体 No.1 および No.2

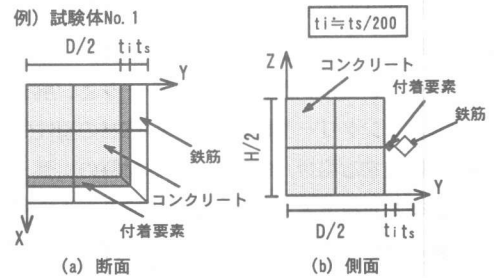


図-2 付着要素の位置関係

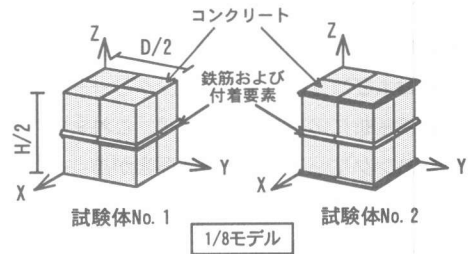


図-3 要素分割図

の平均軸応力-平均軸ひずみ関係をそれぞれ図-4 (a)および(b)に示す。比較のため、実験値¹⁰⁾ (図中のシンボル) とプレーンコンクリートの平均軸応力-平均軸ひずみ関係も併せて示しておく。なお、図中の軸応力の値は、解析モデルの最上面での節点力の総和を最上面の面積で割ったものである。

プレーンコンクリートの最大応力までは、どのケースもほぼ同様の挙動を示す。プレーンコンクリートの最大応力以降は、付着要素の材料パラメータ（ヤング係数 E_i 、ポアソン比 ν_i ）が小さいほど、コンファインドコンクリート試験体の最大応力が下がる傾向がある。ひずみ軟化域では、付着要素の材料パラメータが小さいケースほど、多少ではあるが負勾配の大きい平均軸応力—平均軸ひずみ曲線が得られた。すなわち、付着要素の材料パラメータを変化させることにより、実験値の再現性を高めることができると思われる。

3.2 平均等価拘束圧 σ_{AVE} の変動

試験体 No.1 および No.2 の各ケースにおける、軸ひずみに対する平均等価拘束圧の変動を考えてみる。平均等価拘束圧とは全ガウス点の等価拘束圧 σ_{ij} の総和をガウス点の個数で割った値である。平均軸ひずみ $\varepsilon_z = 0.1\%, 1.0\%, 2.0\%$ の時点および最大応力の時点での平均等価拘束圧を円形断面に対する場合の計算側圧 σ_{LY} （このケースでは、表-1の式を用いれば 0.92MPa と 1.84MPa ）で除した値と軸ひずみの関係を図-5に示す。No.1 および No.2 の両試験体とも付着要素の材料パラメータが小さくなるほど、鉄筋からの拘束圧が遅れて作用する傾向にある。特に、最大応力時点の拘束圧（図中の黒塗りシンボル）は、各ケースによりかなりの差が生じる。しかし、試験体 No.1 および No.2 ともに、軸ひずみ ε_z が 2.0% の時点においては、どのケースもほぼ同様の拘束圧が作用する。

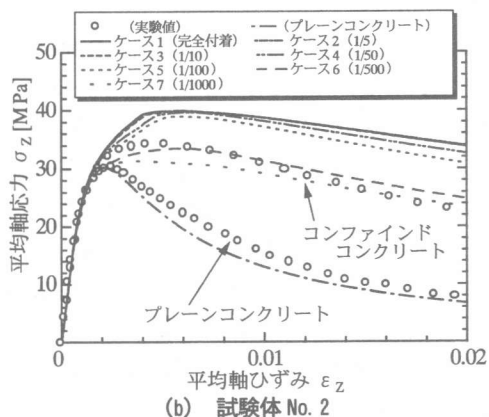
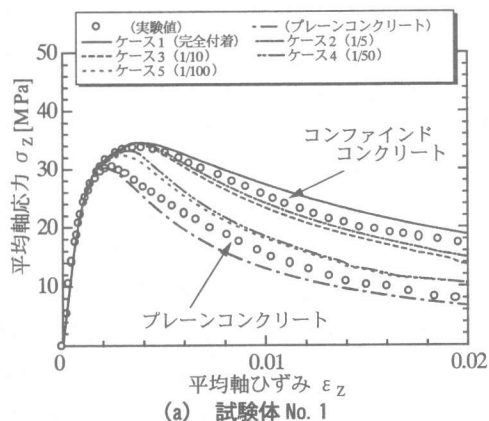
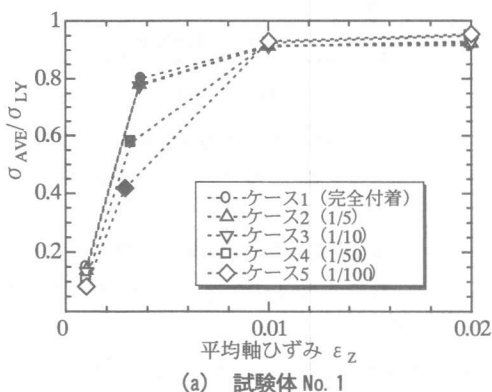


図-4 平均軸応力—平均軸ひずみ関係

既往の実験結果¹⁰⁾によれば、角形コンファインドコンクリートでは、円形コンファインドコンクリートに対する計算側圧 σ_{LY} の約 $1/2$ 程度の拘束効果しか得られないと考えられている。試験体 No.1 の

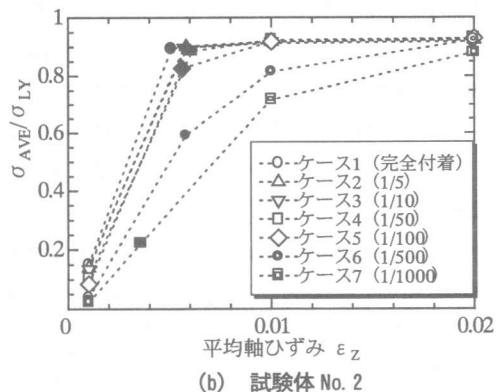


図-5 平均等価拘束圧の変動

解析結果 (図-4 (a)参照) によれば, ケース1 (完全付着), ケース2 (付着剛性 1/5), およびケース3 (付着剛性 1/10) の計3ケースが実験値をほぼ再現しており, これらの最大応力時点 (図-5 (a)の黒塗りシンボル) では, 円形コンファインドコンクリートに対する計算側圧 σ_{LY} の8割程度の拘束圧が作用している。一方, 試験体 No.2 に関しては, ケース6 (付着剛性 1/500) が実験値をほぼ再現しており (図-4 (b)参照), この場合, 最大応力時点 (図-5 (b)の黒塗りシンボル) では, 円形コンファインドコンクリートに対する計算側圧 σ_{LY} の6割程度の拘束圧が作用すると考察できる。

3.3 各 Gauss 点での等価拘束圧 σ_c の変動

次に, 有限要素内における各 Gauss 点での等価拘束圧の変動を考察するため, ここでは, 試験体 No.1 のケース2 (付着剛性 1/5) を採り挙げる。一例として, 図-6 に示すように, 試験体内の Gauss 点 (①~⑤) を選択しその等価拘束圧の変動を図-7 に示す。なお, 図-7 は, 平均軸ひずみ $\varepsilon_z = 0.1\%, 0.5\%, 1.0\%, 1.5\%, 2.0\%$ の時点および最大応力の時点での各 Gauss 点の等価拘束圧を, 円形断面に対する計算側圧 σ_{LY} (0.92MPa) で除した値と軸ひずみとの関係である。また, 併せてケース2 (付着剛性 1/5) の全 Gauss 点の平均等価拘束圧 σ_{AVE} を円形断面に対する計算側圧 σ_{LY} で除した値と軸ひずみとの関係 (図中の太い実線) も示す。

①の Gauss 点は, 鉄筋で二辺を拘束された隅角部の Gauss 点であるため, この Gauss 点が最も強い拘束圧を受けることが予測される。図-7 によると, この Gauss 点は, 初期の時点から他の Gauss 点よりも強い拘束圧 (平均軸ひずみ $\varepsilon_z = 0.1\%$ の時点で 0.5MPa) を受けており, 平均軸ひずみ ε_z が 2.0% の時点では 2.0MPa まで拘束圧が上昇している。しかし, 平均軸応力が最大の時点では, この Gauss 点の等価拘束圧は逆に他の部分よりも小さい。これは, 破壊前における隅角部付近の Gauss 点が, 既に軟化が進行している周囲の Gauss 点から引張の力を受け, 拘束力が低減されるためと考えられる。

①の Gauss 点から離れている②・④・⑤の各 Gauss 点の拘束圧は, 平均軸ひずみ $\varepsilon_z = 0.1\%$ から平均

軸ひずみ $\varepsilon_z = 1.5\%$ まで, 平均等価拘束圧 σ_{AVE}/σ_{LY} にほぼ一致した挙動を示している。また, ①の Gauss 点に比較的近い場所にある③の Gauss 点は, ②・④・⑤の各 Gauss 点よりも高めの拘束圧を受けていることが分かる。

なお, 試験体 No.2 における各 Gauss 点での等価拘束圧の変動に関しては図示していないが, 鉄筋間隔が試験体 No.1 よりも密であるため, 試験体全体でほぼ一様に拘束圧が作用しており, 試験体 No.1 の各 Gauss 点で見られたような等価拘束圧の差は見られなかった。

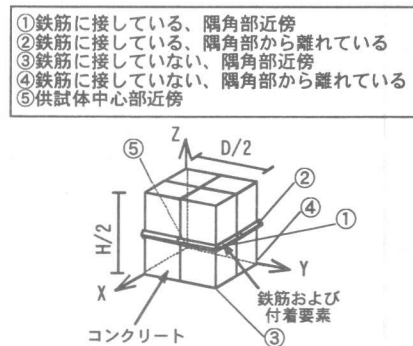


図-6 選択した Gauss 点のおおよその位置 (試験体 No.1)

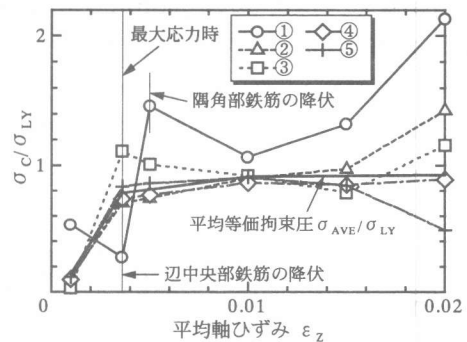


図-7 各 Gauss 点の等価拘束圧の変動 (試験体 No.1: ケース2, 付着剛性 1/5)

3.4 損傷度および等価拘束圧の進展

まず, 試験体 No.1 のケース2 (付着剛性 1/5) について考察を行う。図-8 に示す各切断面での損傷度および等価拘束圧の進展を, 図-9 および図-10 に示す。これらの図は, 図-8 に示す切断面での各

ガウス点毎の情報を示している。損傷度とは、現時点での強度パラメータ F_p の、その最大値 η_1 に対する比 (F_p/η_1) で定義される。また、損傷度の進展図中の点「・」は、そのガウス点が軟化領域にあることを示す。

表面近傍の縦断面の損傷状況を示す図-9(a)によると、鉄筋付近でのコンクリートの損傷が、初期の時点から他の部分よりも遅れて進行している。このことは、各ガウス点での等価拘束圧の変動(図-7)および鉄筋近傍の横断面の等価拘束圧(図-10(a))から分かるように、鉄筋で2辺を拘束された隅角部には、初期の時点から強い拘束圧(平均軸ひずみ $\varepsilon_z = 0.1\%$ の時点で 0.5MPa)が作用しているためである。

一方、隅角部から離れた中間部における縦断面内での損傷は、図-9(b)によると、ほぼ均一に進行してゆくことが分かる。また、鉄筋中間における横断面内での等価拘束圧の進行状況は、初期の時点ではほとんど差はなく、破壊が進むに従い徐々に拘束圧が全体に加わっていくのが分かる(図-10(b))。なお、図には示していないが、解析結果によれば、切断面D内の損傷状況は、プレーンコンクリートのように、全体で比較的一様に進展していく。

次に、試験体 No.2 のケース6(付着剛性 1/500)について考察を行う。図-8と同じ位置の各切断面での損傷度および等価拘束圧の進展を、図-11および図-12に示す。

図-11によると、試験体 No.2 では、鉄筋間隔が試験体 No.1 よりも密であるため、試験体全体でほぼ一様に損傷が進展していく。また、図示していないが、切断面Bにおいても同様の傾向が解析結果より得られた。

図-12によると、平均軸ひずみ $\varepsilon_z = 0.5\%$ の時

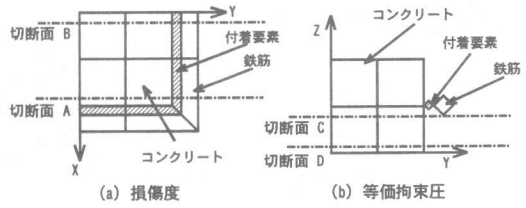


図-8 損傷度および等価拘束圧の進展図の切断面

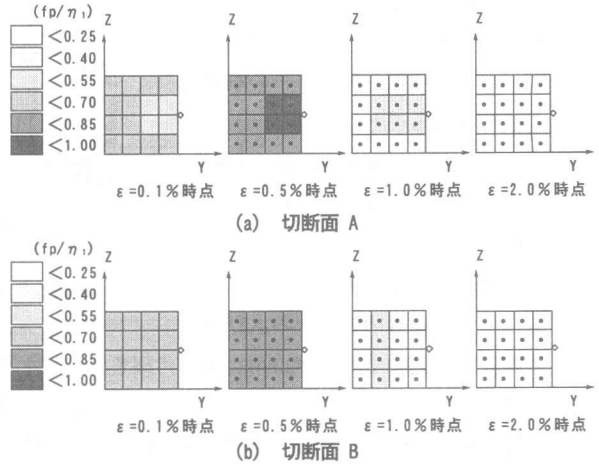


図-9 損傷度の進展図

(試験体 No. 1, ケース 2 : 付着剛性 1/5)

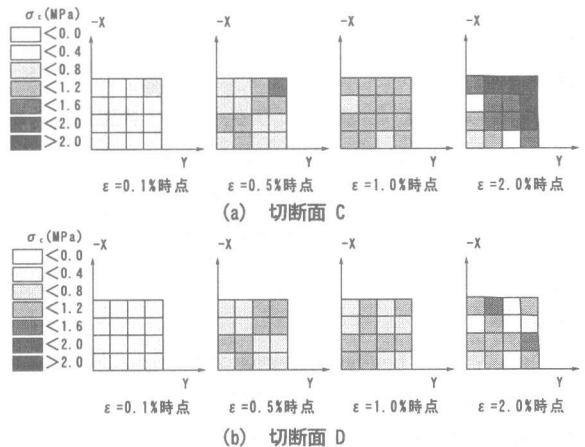


図-10 等価拘束圧の進展図

(試験体 No. 1, ケース 2 : 付着剛性 1/5)

点までは、隅角部においてより強い拘束圧が作用するという試験体 No.1 に見られたような顕著な傾向は見られず、拘束圧は全体でほぼ一様に作用する。

4. まとめ

(1) 筆者らが開発したひずみ軟化型コンクリート

構成モデルを採り入れた三次元有限要素プログラムにより、中心軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリート（角形断面）の拘束効果について検討を行った。本研究では、コンクリート要素と鉄筋要素との間に付着要素を考慮した。

- (2) 二種類のコンファインドコンクリートを対象に、付着要素の剛性を変化させることによりパラメトリック解析（三次元有限要素解析）を行った。実験結果を精度良く再現できる解析結果を用いて、ひずみ軟化域を含む領域までのコンクリート内部の損傷状況および等価拘束圧の変動状況を定量的に示し、考察を加えた。
- (3) 等価拘束圧の分布から、鉄筋で二辺を拘束される隅角部が大きな拘束力を受け、その隅角部から離れるに従って拘束力が小さくなることを解析的に確認した。

謝辞

本研究費の一部は、文部省ハイテクリサーチ構想による研究費（中部大学）、および平成 9・10 年度文部省科研費・基盤研究 B(2) (研究代表者・谷川恭雄 名古屋大学大学院教授) によったことを付記する。

参考文献

- 1) Chen, W. F. : Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill (色部誠, 河角誠, 安達洋: コンクリート構造物の塑性解析), 丸善, 1985
- 2) 前川宏一, 長谷川俊昭: コンクリート構成則の研究動向と課題, コンクリート工学, Vol.32, No.5, pp.13-22, 1994
- 3) 佐藤良一: 連続体コンクリートの構成則, コンクリート工学, Vol.35, No.4, pp.3-11, 1997
- 4) 土木学会コンクリート委員会: 構成モデル小委員会 (301) 成果報告書, 土木学会, 1997
- 5) 水野英二・畑中重光: 塑性理論によるコンクリート

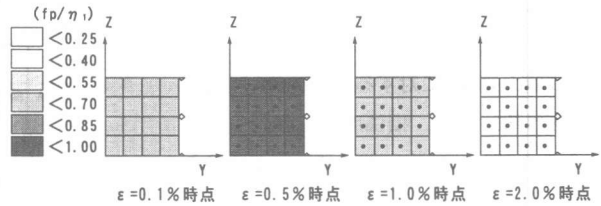


図-1 1 損傷度の進展図
断面 A (試験体 No. 2, ケース 6 : 付着剛性 1/500)

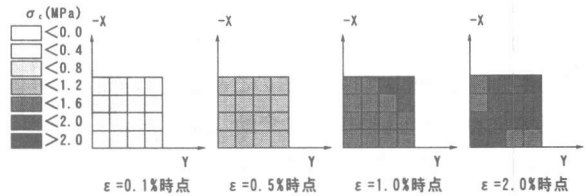


図-1 2 等価拘束圧の進展図
断面 C (試験体 No. 2, ケース 6 : 付着剛性 1/500)

の圧縮軟化特性のモデル化, コンクリート工学論文集, Vol.2(2), pp.85-95, 1991

- 6) 水野英二・畑中重光: 塑性理論によるコンクリートの経路依存型圧縮軟化特性のモデル化, コンクリート工学論文集, Vol.3(2), pp.1-13, 1992
- 7) 柴麻紀・前田欣昌・畑中重光・水野英二: ひずみ軟化を考慮したコンクリート構成モデルの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.18(2), pp.401-406, 1996
- 8) 前田欣昌・畑中重光・水野英二: ひずみ軟化型コンクリート構成モデルを用いたコンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.18(2), pp.407-412, 1996
- 9) 小宮敏明・前田欣昌・畑中重光・水野英二: ひずみ軟化型コンクリート構成モデルを用いたコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.8(2), pp.389-394, 1996
- 10) 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光: 構成モデルに基づく各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.8, pp.365-368, 1986
- 11) Chen, W. F. and Mizuno, E. : Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier, 661pp, 1990
- 12) Zienkiewicz, O. C. : The Finite Element Method, Third Ed., (吉識・山田監訳: マトリックス有限要素法), 培風館, pp.672-796, 1984