

論文 各種構成モデルを用いた RC 構造部材の繰り返し変形挙動解析

水野英二*¹・神戸篤士*²・畑中重光*³

要旨: 本研究では、普通強度材料ならびに高強度材料を用いた RC 柱部材の水平方向繰り返し変形挙動について各種構成モデルを用いることにより解析的研究を行い、解析結果と実験データとを比較し、採用した構成モデルの適用性について検討する。ここでは、鉄筋には修正二曲面モデルおよび完全弾塑性型構成モデルを、コンクリートには完全弾塑性型構成モデルおよびひずみ軟化型構成モデルを用いる。本解析結果を通して、使用した構成モデルの有効性について論ずるとともに、特にひずみ軟化型構成モデルを有限要素解析に用いる場合の留意点について論ずる。

キーワード: 繰り返し変形挙動, RC 柱, ひずみ軟化型モデル, 修正二曲面モデル

1. はじめに

平成7年に起こった兵庫県南部地震の際、帯筋によって内部コンクリートへの拘束効果が期待されていた鉄筋コンクリート (RC) 柱の多くはその効果を発揮することなく脆くも崩壊した。それゆえ、RC 柱の繰り返し変形挙動を精度良く予測するためには、3次元有限要素解析を行うのが最も理想的ではあるが、解析モデルの設定、非線形解析手法の設定、構成モデルの選定、さらに解析に要する膨大な計算時間、などの要因により、単体の RC 柱の3次元変形挙動解析ですら難しいのが現状である。

本研究では、有限変形を考慮できるはり理論を定式化し、これを有限要素解析プログラム FEAP に組み込むことにより、一定軸圧縮荷重下での RC 柱の水平方向繰り返し変形挙動解析を行う。ここでは、各種構成モデル (完全弾塑性型構成モデルを含む鉄筋ならびにコンクリートの構成モデル) を組み合わせた解析結果と実験データとを比較・検討することにより、本研究で提案する構成モデルの妥当性について論ずる。さらに、コンクリートの構成モデルに、ひずみ軟化型の応力-ひずみ関係を導入する場合の有限要素解析上での注意点についても言及する。

2. 解析手法

本解析手法は、以下の仮定に基づいて定式化され、有限要素プログラム FEAP のはりのエレメントサブルーチンに次節で説明する構成モデルと共に組み込まれている。

- 1) Bernoulli-Euler のはり理論が成り立つ。
- 2) 応力は軸応力のみが断面に作用する。
- 3) 局部座屈は考慮しない。
- 4) 有限要素解析にて、はりの変形は Hermitian 3 次形状関数を用いて表現した。
- 5) Green のひずみを導入した更新ラグランジアン法を用いて仮想仕事の原理により定式化した。

3. 構成モデルの概要

3.1 修正二曲面モデル (鋼材)

筆者らの修正二曲面モデル^{1),2)}は、Dafalias・Popov³⁾による二曲面モデルの基本的な考えを変えることなく、従来の降伏曲面および境界曲面に加え、仮想境界曲面および記憶曲面などを導入することにより、降伏棚を有する鋼素材の一般応力状態での繰り返し挙動を予測することが可能な塑性モデルである。

塑性域まで繰り返し応力を受ける鋼素材の一軸状態での応力 σ - 塑性ひずみ ε^p 曲線は、図-1 に示す

* 1 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph.D. (正会員)

* 2 (株) 秋吉組 工事部 工事課

* 3 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

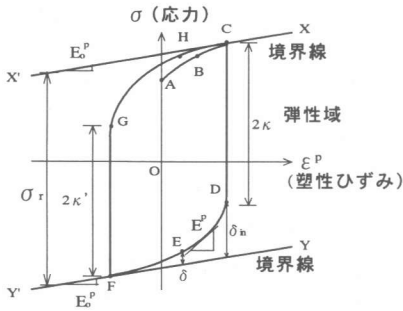


図-1 一軸応力状態での応力-ひずみ関係(鋼材)

ように、一般に、塑性ひずみが生じない弾性域(例えば図中、OA)、非線形な弾性域(AC)、さらに定常状態の塑性域(CX)に分けることができる。弾性域および定常状態の塑性域での鋼素材の挙動は、それぞれ弾性係数 E および定常状態の塑性係数 E_0^p ($=$ 応力増分 $d\sigma$ / 塑性ひずみ増分 $d\varepsilon^p$) を用いて、表現することができる。従って、筆者らの修正二曲面モデルは、これら両領域間(遷移領域)の非線形曲線の接線塑性係数 E^p を定義することに帰着する。この場合、弾性域から塑性域へと移行する時点の応力点(例えば、図中の D 点)と境界線 YY' との距離 δ_n 、現応力点 E と境界線 YY' との距離 δ 、形状パラメータ h 、さらに、定常状態の塑性係数 E_0^p を用いることにより、接線塑性係数 E^p を決定し、ひずみ増分に対して応力増分を計算する。

3.2 ひずみ軟化型構成モデル(コンクリート)

コンクリート部分にはひずみ軟化型の一軸応力-ひずみ関係(図-2 参照)を採用した。圧縮領域では、コンクリートは一軸圧縮強度まで硬化し、その後軟化挙動を示すものと仮定した。硬化域の応力 σ - ひずみ ε 関係式を図中に定義した。なお、式中で用いられている σ_{ck} は一軸圧縮強度であり、 ε_{pk} はピークひずみである。

除荷・再載荷曲線は割線(線形)型のもを採用し、その勾配がひずみの進行に伴い劣化するものとした。一方、引張領域では、コンクリート強度はゼロであると仮定した。実験供試体には、帯鉄筋が使用してあり、

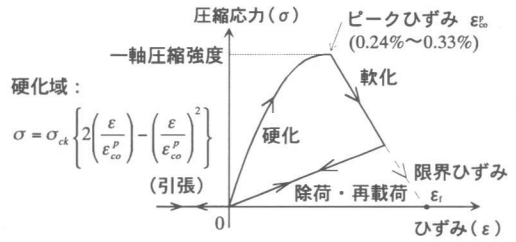


図-2 ひずみ軟化型の一軸応力-ひずみ関係(コンクリート)

これにより内部コンクリートは拘束力を受け圧縮靱性性能が増加するが、本解析では帯鉄筋をモデル化しない代わりに拘束効果として図-2 に示すようにコンクリートの応力-ひずみ曲線の軟化勾配(限界ひずみの値)を変化させることによって、帯鉄筋からの拘束効果を考慮することとした。図-2 に示す ε_f とは、コンクリートの限界ひずみのことである。

4. 供試体および解析モデル

4.1 供試体の概要

対象とする供試体は、文献4) で用いられたものである。供試体は、普通強度材料から成る N 供試体と高強度材料から成る H 供試体、HA 供試体および HB 供試体(以後、この3供試体を H シリーズ供試体と呼ぶ。)の4供試体である。供試体の断面形状および寸法を図-3、各供試体の材料諸元を表-1 に示す。すべての供試体とも、柱部材長は 2250 mm、部材断面は 450 mm × 450 mm、せん断スパン比は 5 であり、主鉄筋比は 1.25% である。

コンクリートのヤング係数については、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準⁹⁾による関係式を用いて算定した。計算に用いたコンクリートのヤング係数および一軸圧縮応力に伴うピークひずみ

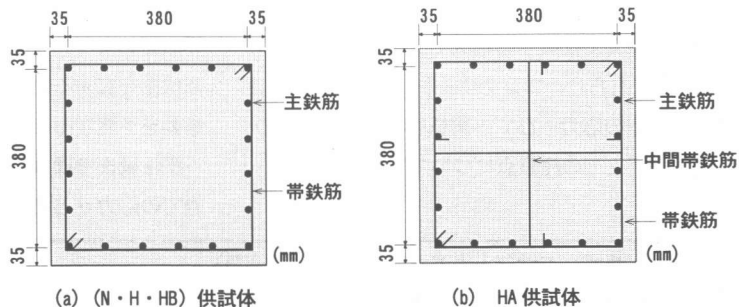


図-3 断面形状および寸法

表-1 材料諸元

	N 供試体	H 供試体	HA 供試体	HB 供試体
コンクリート強度 (MPa)	37.1	65.7	66.8	64.3
主鉄筋	SD345 D13	USD685 D13	USD685 D13	USD685 D13
主鉄筋比	1.25 %	1.25 %	1.25 %	1.25 %
主鉄筋降伏強度 (MPa)	399	795	795	795
主鉄筋引張強度 (MPa)	587	998	998	998
帯鉄筋	SD295A D6 @40mm	SD490 D6 @40mm	SD490 D6 @40mm	SD490 D6 @80mm
面積帯鉄筋比	0.352 %	0.352 %	0.523 %	0.176 %

USD：高強度鉄筋コンクリート用棒鋼

を表-2に示す。なお、鉄筋のヤング係数は、全ての解析にて207 GPaを用いた。

4.2 解析モデル

図-4に示すように、鉄筋コンクリート柱の先端に一定軸力を加え、さらに水平方向に繰り返し変位を作用させる。N 供試体に対しては0.90MN、H 供試体、HA 供試体、およびHB 供試体に対しては1.79MNの一定軸力を作用させる。

本解析では、柱軸方向にそれぞれ5、10、15、20、25分割した解析ケースを考え、解析結果を5節、6節および7節にて考察する。また、全解析を通して断面は、図-5に示すように、464ブロックに分割する。図中、黒いブロック部分が主鉄筋部分である。

せん断スパン比が5であり、弾性変形に対する曲げの影響が97%と大きいため、本解析では、せん断の変形への影響は無視した。

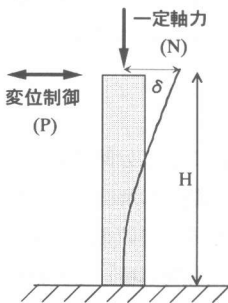


図-4 解析モデル

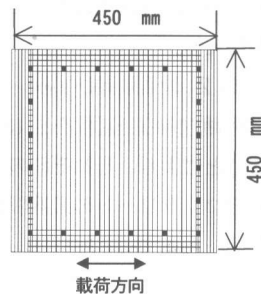


図-5 断面分割図

5. 各種構成モデルによる解析結果の比較・検討

本節では、鉄筋およびコンクリートに対する構成モデルの組み合わせの違いが解析結果に与える影響

表-2 コンクリートのヤング係数およびピークひずみ

供試体	ヤング係数 (GPa)	ピークひずみ (%)
H	40.6	0.324
HA	40.9	0.327
HB	40.1	0.320
N	30.5	0.243

表-3 構成モデルの組み合わせ

解析ケース	鉄筋の構成モデル	コンクリートの構成モデル
1	完全弾塑性	完全弾塑性
2	修正二曲面	完全弾塑性
3	完全弾塑性	ひずみ軟化型
4	修正二曲面	ひずみ軟化型

を調べるため、表-3に示す4種類の解析を行う。

解析の対象となった供試体は、H 供試体である。ここでは、要素分割数を10とした場合の解析結果を示し、各種構成モデルによる結果を考察する。なお、解析ケース3および解析ケース4における、コンクリートの限界ひずみの値を2.37% (6.2節に示す、要素数が10の場合における最適な限界ひずみの値) に設定して解析を行った。

図-6~図-9に、それぞれ解析ケース1~解析ケース4に対する水平荷重P-水平変位δ曲線を示す。各図中の破線は文献4)に報告されている実験曲線であり、実線は本解析から得られた結果である。以下、4解析ケースの解析結果を考察する。

ケース1：両材料に完全弾塑性型モデルを採り入れた解析結果によれば、実験曲線と比較して最大耐力までの挙動は再現しているが、軟化挙動および除荷・再載荷挙動を正確に予測できない (図-6)。

ケース2：修正二曲面モデルを鉄筋に、完全弾塑性型モデルをコンクリートに採り入れた解析結果も実験結果と比較して、ポストピークの挙動に関して良い一致を示さない。ただし、修正二曲面モデルを鉄筋の構成モデルとして採り入れたため、除荷・再載荷曲線の勾配が緩やかになる (図-7)。

ケース3：完全弾塑性型モデルを鉄筋に、ひずみ軟化型モデルをコンクリートに用いた解析結果は、ポストピークの挙動に関して実験結果と良い一致を示した。しかし、除荷・再載荷曲線の勾配が繰り返し回数の増加に伴って低減しない (図-8)。

ケース4：修正二曲面モデルを鉄筋に、さらにひずみ軟化型モデルをコンクリートに用いた解析結果

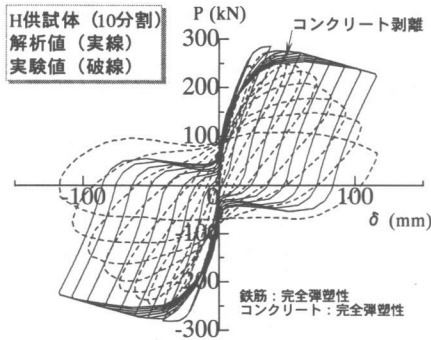


図-6 荷重-変形曲線 (解析ケース1)

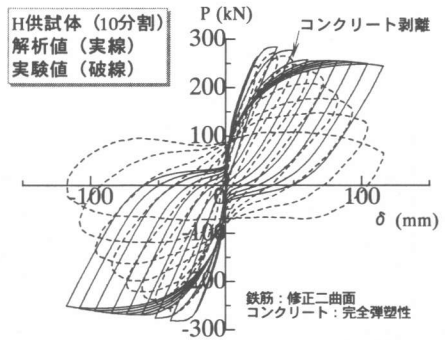


図-7 荷重-変形曲線 (解析ケース2)

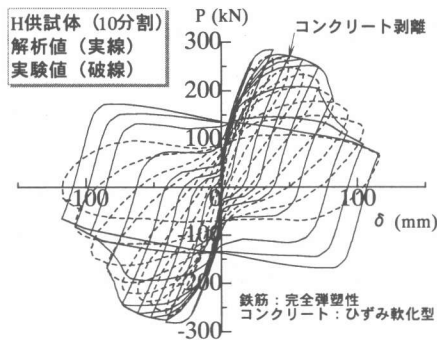


図-8 荷重-変形曲線 (解析ケース3)

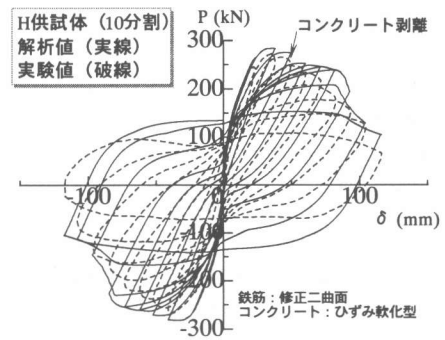


図-9 荷重-変形曲線 (解析ケース4)

は実験結果と比較して、ポストピークの挙動、さらには除荷・再載荷曲線の勾配が繰り返し回数の増加に伴って低減するという点で極めて良い一致を示した。しかし、コンクリートの剥離および鉄筋の座屈が生ずる領域以降では、繰り返し耐力は実験結果よりも多少大きい結果となった (図-9)。

6. ひずみ軟化型モデルの限界ひずみと要素分割数との関係

6.1 分割数の影響

ひずみ軟化型モデルの欠点は、分割数 (要素長さ) の違いが、特にポストピークの解析結果に大きく影響することが予想されることである。このことを検討するため、H 供試体を対象として、まずコンクリートの構成モデルを完全弾塑性モデルに設定し、分割数を 5, 10, 15, 20, 25 と変化させた一方向載荷解析 (Push over 解析) を行った。なお、鉄筋の構成モデルは修正二曲面モデルを用いた。解析結果を図-10に示す。図から分かるように、分割数の違いにより荷重-変形曲線 (特にポストピーク曲線) にコ

ンクリートの完全弾塑性型構成モデルが大きく影響を及ぼすことはないことが分かる。

さらに、H 供試体を対象として、コンクリートの構成モデルにひずみ軟化型モデルを用いた場合、分割数の違いが解析結果に与える影響を計算した結果を図-11に示す。ここでは、ひずみ軟化型モデルの限界ひずみを 2.37% として計算した。図から分かるように、分割が細かいと軟化曲線が急になることが伺える。

6.2 最適限界ひずみ

柱軸方向の分割数を 5, 10, 15, 20, 25 分割と設定することにより、それぞれの分割数での解析に用いるべきコンクリートの最適限界ひずみの値を決定するため、Push Over 解析 (一方向載荷解析) を実施した。

一例として、H 供試体の 10 分割での解析モデルに対して、限界ひずみの値を 2.25%, 2.37%, 2.5% と変化させた解析を行った。解析結果と実験結果との比較を図-12に示す。図より、限界ひずみが 2.37% の場合の解析結果が繰り返し実験結果の包絡

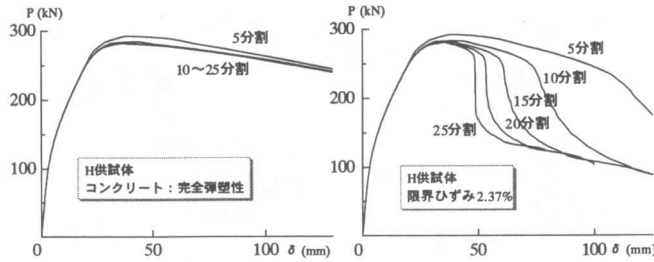


図-10 分割数の影響
(コンクリート：完全弾塑性モデル)

図-11 分割数の影響
(コンクリート：ひずみ軟化型モデル)

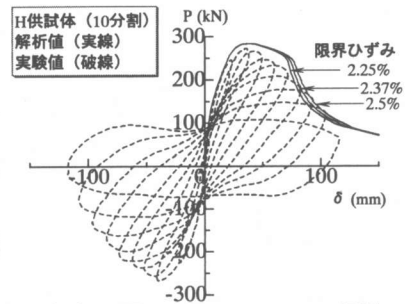


図-12 Push Over 解析

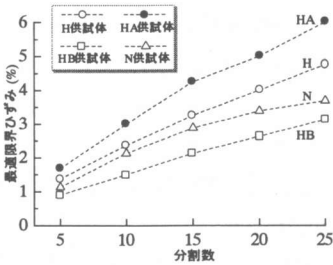


図-13 最適限界ひずみと分割数

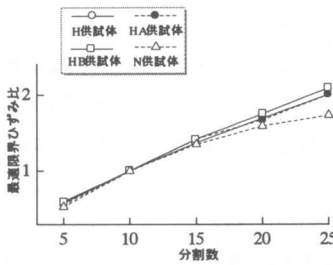


図-14 最適限界ひずみ比と分割数

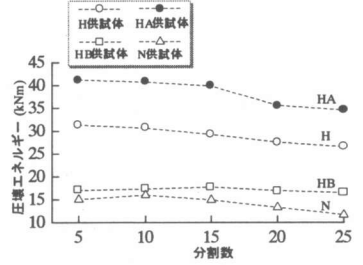


図-15 圧壊エネルギーと分割数

曲線と最も良く一致することが分かる。以降、このような限界ひずみを最適限界ひずみと称する。

5, 15, 20, 25 分割として解析した場合の最適限界ひずみも含めて図-13に○印にて示す。ここで、横軸は分割数、縦軸は最適限界ひずみ値である。他のHシリーズ供試体 (HA 供試体およびHB 供試体) ならびにN 供試体についても、それぞれ●印、□印および△印にて図-13に示す。さらに、各供試体の10分割における最適限界ひずみを基準として、縦軸に最適限界ひずみ比をプロットした結果を図-14に示す。図-13から分かるように、各供試体の帯筋によるコンクリートへの拘束効果の違いにより10分割での最適限界ひずみ値の違いはあるものの、分割数が多く (要素長さが短く) なれば最適限界ひずみ値は大きくなるという類似した傾向がある。また、図-14から分かるように、変化勾配についてもほぼ同じ傾向である。

ピークひずみ以降の軟化域の圧壊エネルギー (1要素当たりに入るエネルギー) を4供試体に対してプロットした結果を図-15に示す。図から分かるように、HB 供試体を除いた3供試体 (H, HA, N 供試体) は分割数の増加に伴い多少減少する傾向を示す。しかし、全体的に見れば、供試体の分割数が

異なっても最適限界ひずみに設定する限り一要素当たりに入る圧壊エネルギーが概ね一定となっていることが分かる。本解析結果は、ひずみ軟化型構成モデルをRC柱の曲げ解析などに採用する場合には、単位体積当たりに入る圧壊エネルギーを一定とするのではなく、一要素当たりに入る圧壊エネルギーを一定とした方が妥当であることを示唆している。

7. 先進的な構成モデルによる解析結果

先進的な構成モデル (修正二曲面モデルおよび最適限界ひずみを設定したひずみ軟化型モデル) を用いて、4供試体に対して解析を行った結果を考察する。なお、解析結果は、要素分割数が10の場合の結果である。

7.1 Hシリーズ供試体およびN供試体

Hシリーズ供試体 (HA 供試体およびHB 供試体) およびN 供試体の解析結果と実験結果との比較を図-16、図-17および図-18に示す。HA 供試体およびHB 供試体に対する解析結果と実験結果との比較 (図-16および図-17) から分かるように、両解析結果とも、実験結果と良く一致した挙動を予測することが分かる。HB 供試体では、帯筋間隔が広いため拘束効果が小さい。

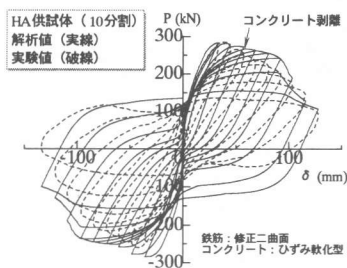


図-16 HA供試体

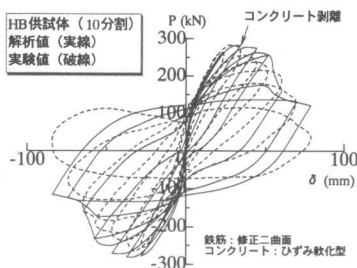


図-17 HB供試体

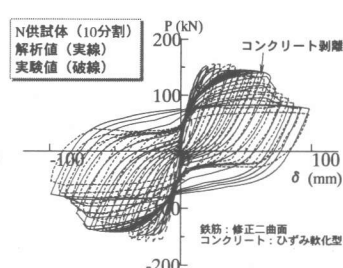


図-18 N供試体

それゆえ、ポストピークの包絡線は、他の供試体の曲線よりも勾配の強いものとなる。普通強度コンクリートから成る N 供試体の解析結果 (図-18) も実験結果と良い一致を示している。

解析結果全体をまとめると、修正二曲面モデルおよびひずみ軟化型モデルを採り入れた解析結果は、構成モデルの組み合わせによる解析結果の中で最も良い一致を示した。しかし、実験結果から観察されたようなコンクリートの剥離以降の挙動については、解析手法が平面保持の仮定に基づいているため、繰り返し耐力が多少大きめの結果となった。

7.2 供試体の最終状況

一例として、H 供試体の最終状況図を図-19 に示す。この図は、繰り返し載荷過程でコンクリート内部に生ずる応力状態を重ね合わせて示してある。これから分かるように、コンクリート基部では圧壊部が集中しており、一般に実験で観察されるような破壊状態に近い結果となっている。

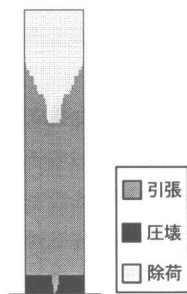


図-19 破壊状況

8. まとめ

一定軸力ならびに横方向繰り返し外力を受ける RC 柱の有限変形挙動解析結果を以下にまとめる。

- 1) コンクリートおよび鉄筋に完全弾塑性型構成モデルを採用することは、RC 柱の最大耐力の予測には問題ないことが分かった。しかし、繰り返し変形挙動に関しては、除荷・再載荷挙動ならびに軟化挙動ともに再現することはできない。
- 2) ポストピーク挙動の再現には、コンクリートの

ひずみ軟化型構成モデルの適用が不可欠であることが分かった。鋼材の構成モデルは、除荷・再載荷挙動に影響することが分かった。

- 3) 繰り返し解析には、4種類の構成モデルの組み合わせの中では、鋼材には修正二曲面モデル、コンクリートにはひずみ軟化型構成モデルが適していることが分かった。
- 4) コンクリートのひずみ軟化型構成モデルの最適限界ひずみは有限要素分割数 (要素長さ) により大きく影響されることが分かった。
- 5) RC 構造部材の曲げ解析にひずみ軟化型構成モデルを採用する際には、要素長が短ければ限界ひずみの値は大きく、要素長が長ければ限界ひずみは小さな値を設定することが肝要である。

謝辞：中部大学総合工学研究所の第6部門Bから研究費をいただいた。ここに、謝意を表す。

参考文献

- 1) 水野英二 ら：鋼部材の繰り返しねじり実験と二曲面モデルによる数値シミュレーション，構造工学論文集，Vol.39A, pp.221-234, 1993.
- 2) 水野英二 ら：鋼素材に対する修正二曲面モデルの一般定式化，構造工学論文集，Vol.40A, pp.235-246, 1994.
- 3) Dafalias, Y.F. and Popov, E.P. : A Model of Nonlinear Hardening Materials for Complex Loading, Acta Mech., pp.173-192, 1975.
- 4) 足立幸郎，運上茂樹，長屋和宏，林昌弘：高軸力下における高強度 RC 部材の変形性能に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, pp.169-174, 1999.
- 5) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準」