

論文 要素および構造レベルにおけるひずみ軟化型コンクリート 構成モデルの検証解析

水野英二¹・畑中重光²・森本康介³

要旨：本研究では、要素レベルおよび構造部材レベルにおける、実験データならびに既存のコンクリート構成モデルによる数値解析結果を用いて、筆者らのひずみ軟化型構成モデルの検証解析を行った。要素レベルでの検証解析では、非比例荷重および主軸回転荷重経路を対象として、コンクリート要素の変形挙動を構成モデルによる解析結果ならびに実験データと比較した。さらに、構造部材レベルでの検証解析では、コンファインドコンクリートの三次元有限要素解析を行い、各種構成モデルの解析結果と比較した。これら2種類の解析を通して、筆者らのひずみ軟化型構成モデルの妥当性を検証した。

キーワード：ひずみ軟化型構成モデル, 検証解析, 要素解析, 構造解析, コンファインドコンクリート

1. はじめに

近年、コンクリートのひび割れ発生後の複雑な非線形挙動も、構成モデルおよび有限要素法(FEM)の進歩により予測することが可能となってきた。筆者らの研究によれば、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とが分かっている^{1),2),3)}。それゆえ、有限要素法などによるRC構造物・部材の弾塑性解析では、今後、コンクリート材料のひずみ軟化挙動を精度良く取り扱うことができる構成モデルの導入が不可欠であると思われる。

これまでの構成モデルの研究動向については、文献^{4),5)}で報告されている。また、筆者らは、これまでにひずみ軟化型コンクリート構成モデル^{6),7),8)}を開発し、コンファインドコンクリートおよびコンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素法解析^{1),2),3)}に応用してきた。

本研究では、要素(一ガウス点の応力-ひずみ)および構造部材レベルでの解析を通して、実験データならびに既存のコンクリート構成モデルによる解析結果と比較することにより、筆者らのひずみ軟化型構成モデルの検証を行う。

2. 要素レベルでの検証解析

これまでにも筆者らは、三軸圧縮荷重、漸増荷重、途中荷重、途中除荷などの荷重経路を用いて、軟化型構成モデルの検証を行っている^{6),7),8)}。本節では、土木学会コンクリート委員会力学特性部会による「構成則の検証解析」⁹⁾で用いられた荷重経路の中から2種類の荷重経路に対して検証を行う。

2.1 楔解析⁹⁾

荷重経路：荷重経路の概要を図-1に示す。この荷重経路の手順は、図-1(a)に示すように、ステップI：静水圧荷重(図中、OA)、ステップII：一定側圧下での圧縮荷重(AB)、ステップIII：比例三軸引張荷重(BC：三軸方向に等ひずみで引張)である。また、図-1(b)には、応力空間での荷重経路の概念図を示す。

解析データ：本解析で用いたコンクリート材料諸特性は、一軸圧縮強度 $f_c' = 34.7 \text{ MPa}$ (340 kgf/cm^2)、体積弾性定数 $K = 7,260 \text{ MPa}$ ($7.12 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$)、せん断弾性定数 $G = 10,310 \text{ MPa}$ ($1.01 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)である。ステップIの静水圧荷重の後、せん断弾性定数Gは実験データに基づき、 $3,270 \text{ MPa}$ ($3.21 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$)とした。

*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 教授 工学部 建築学科 工博 (正会員)

*3 三重大学 大学院 工学研究科 博士課程前期課程 (正会員)

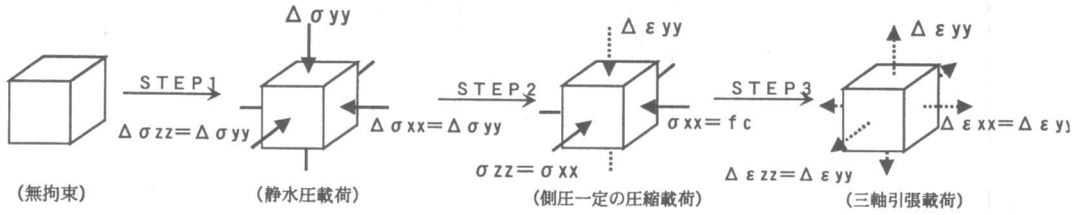


図-1 (a) 楔解析の載荷経路

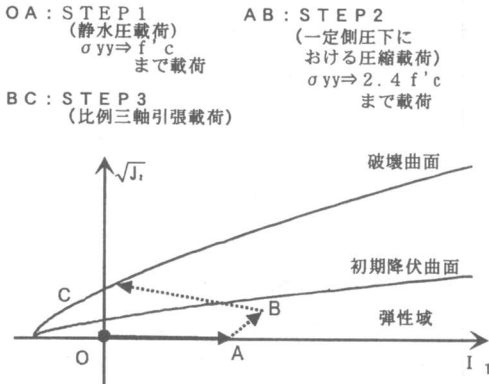


図-1 (b) 楔解析の応力経路

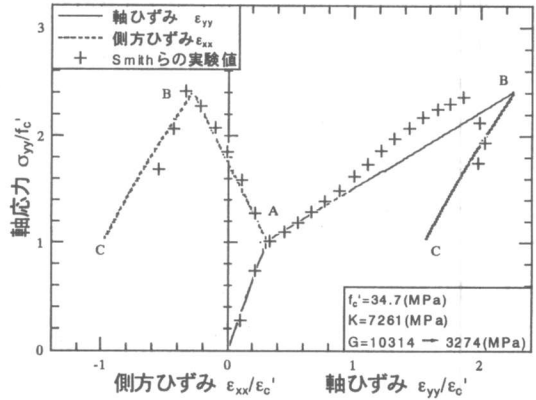


図-2 楔解析の解析結果

解析結果および考察: 解析結果を図-2に示す。図中、実線および破線は、ひずみ軟化型構成モデルによる解析結果を、シンボルは実験結果を示す。縦軸は軸応力 σ_{yy} をコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c で除した無次元量で、横軸は各ひずみ (軸ひずみ, 側方ひずみ) を一軸圧縮破壊時のひずみ ϵ_c' で除した無次元量で示してある。本モデルによるひずみ ϵ_c' は、 0.28×10^{-2} である。

ステップ I (O→A) は、静水圧圧縮載荷であるので、応力不変量空間での載荷経路は I_1 軸上を進み、筆者らの構成モデルによればコンクリートは弾性挙動を示す (図-2のOA)。ステップ II (A→B) では、一定側圧下における圧縮載荷であるので、応力不変量空間での載荷経路は一軸圧縮の場合と同じの傾きで進む。区間ABは初期降伏曲線内に存在するため、本解析では弾性挙動を示している (図-2のAB)。ステップ III (三軸引張載荷: B→C) では、載荷経路での途中から、初期降伏曲面を越えて弾塑性域に入り、その後、点Cで破壊曲面に至るため、応力-ひずみ曲線のBC間(図-2参照)で、弾塑性挙動が見られる

(図-1(b)参照)。また、点Cを越えた後、ひずみ軟化域でスナップバック (不安定) 現象が生ずる。

実験結果⁹⁾と多少の相違がステップ III にて認められるものの、全体的な挙動は一致している。また、点C付近にて、不安定現象が生ずる点は、長谷川モデルによる結果⁹⁾と一致している。

2.2 主軸回転載荷解析 (圧縮せん断解析)

載荷経路: 載荷経路の概要を図-3に示す。この載荷経路の手順は、図-3(a)に示すように、ステップ I: 一軸圧縮載荷 (図中, OA), ステップ II: 一定静水圧 I_1 下でのせん断載荷 (AB) である。また、図-3(b)には、応力空間での載荷経路の概念図を示す。

解析データ: 本解析で用いたコンクリート材料諸特性は、一軸圧縮強度 $f'_c = 30.6$ MPa (300 kgf/cm^2), 体積弾性定数 $K = 7,260$ MPa ($7.12 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$), せん断弾性定数 $G = 10,310$ MPa ($1.01 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) である。

解析結果および考察: 解析結果と実験結果との比較を図-4に示す。図中の縦軸は、せん断応力 τ_{xy} をコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c で除した

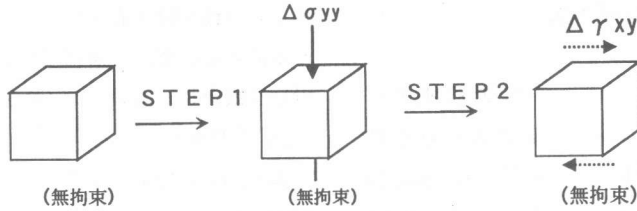


図-3(a) 主軸回転載荷解析の載荷経路

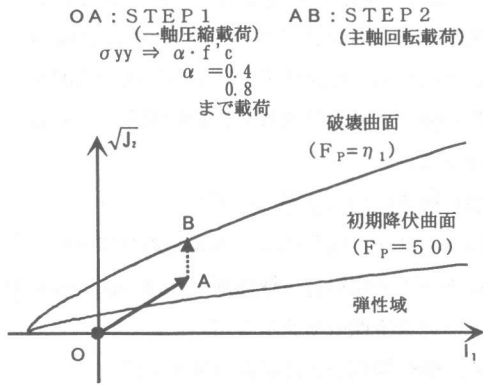


図-3(b) 主軸回転載荷解析の応力経路

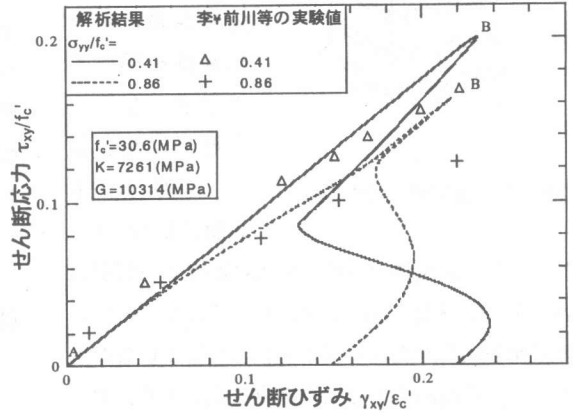


図-4 主軸回転載荷解析の解析結果

無次元量を、横軸は、せん断ひずみ γ_{xy} をコンクリートの一軸圧縮破壊時のひずみ ϵ_c で除した無次元量を示す。本モデルのひずみ ϵ_c は、 0.26×10^{-2} である。なお、実線および破線は、ステップ I 終了時点の軸圧縮応力比がそれぞれ $\sigma_{yy}/f'_c = 0.41$ および 0.86 の場合の解析結果である。

ステップ I (O→A) では、一軸圧縮を行いステップ II (A→B) ではせん断ひずみ γ_{xy} を与える。応力不変量空間の載荷経路は、ステップ II ではせん断のみが増加しているため、点 A からは $\sqrt{2}$ 軸と平行に破壊曲面に向かって進み、点 B で破壊曲面に至る。また、軟化域において、スナップバック現象(不安定現象)が点 B の直後と軟化の進展した時点で生じることが分かった。

スナップバック現象は、筆者らのこれまでの研究¹⁾によれば、強度パラメータ (F_p) - 塑性吸収エネルギー曲線の勾配が急な場合に生じる。通常、勾配が急となる領域は、軟化域に入った直後の $F_p = \eta_1 (=F_{pmax})$ 付近である。

実験結果(各シンボル)はピークまでしかデー

タがないため、本モデルの軟化域での比較は出来なかった。ピーク付近では供試体が急激に破壊し不安定であったため、軟化挙動が測定されなかったと思われる。このことから、本モデルがピーク直後にスナップバックを予測することに妥当性が認められる。

3. 構造レベルでの検証解析⁹⁾

本節においても、土木学会コンクリート委員会力学特性部会による「構成則の検証解析」⁹⁾で用いられた構造解析の中から、コンファインドコンクリートの圧縮力耐荷特性に対して三次元有限要素解析により検証を行う。

本節で比較の対象としたコンクリート構成モデルは、筆者らのひずみ軟化型構成モデルの他に、非線形弾性構成モデルとしての Ottosen モデル、弾塑性理論に基づく弾-完全塑性型 Drucker-Prager モデル(関連流れ則)、前川らの弾塑性破壊モデル、そしてエンドクロニックモデル、の計 5 モデルである。

3.1 本研究における解析手法

(1) 解析対象

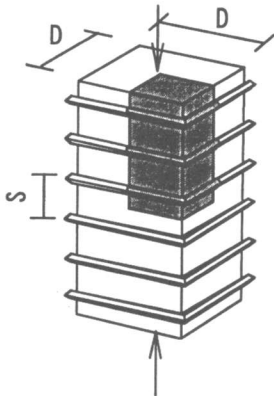


図-5 供試体 (全体図)

他の構成モデルによる解析結果⁹⁾との比較を行うため、文献[9]と同様の解析条件を設定した。解析対象とした試験体を図-5に示す。なお、本解析は試験体の1/8部分(図中の斜線部)に対して行った。試験体の材料・形状に関する各諸量を表-1および表-2に示す。表-2において鋼材体積比を比較的大きく(3%以上)しているが、これは、比較的大きな三軸拘束を発生させるように配慮したためである。解析では、コンクリートと鉄筋間の付着すべりは無視し、コンクリートと鉄筋の変位は同一であるとした(節点を共有する)。

(2) 要素分割図

有限要素解析に用いた試験体のコンクリート部分の要素分割は、すべてのケースにおいて 4×4

$\times 12$ (縦 \times 横 \times 高さ)とした。要素分割例を図-6に示す。また、解析モデルは、軸対称・上下対称を仮定し、試験体の1/8部分とした。

(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。

(4) 解析プログラム

8節点アイソパラメトリック三次元ソリッド要素¹⁰⁾を組み込んだ有限要素プログラム FEAP¹¹⁾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、試験体の上部に 100μ (0.01%)相当の軸ひずみ増分を与え、変位制御により解析を行った。

(5) 解析における構成モデル

コンクリート部分には、筆者らのひずみ軟化型構成モデルを採用し、鉄筋部分には von Mises 型の弾-完全塑性型モデルを用いた。

3.2 他の構成モデルによる解析手法

他のコンクリート構成モデルに対する解析方法を表-3にまとめる。

3.3 解析結果

ひずみ軟化型コンクリート構成モデルと他のコンクリート構成モデルの平均軸応力-平均軸ひずみ関係の解析結果の一例(CASE0及びCASE1)を、それぞれ図-7および図-8に示す。本構成

表-1 コンファインドコンクリートの材料データ⁹⁾

f_c' (MPa)	E_c (GPa)	ν_c	σ_{sy} (MPa)	E_s (GPa)	ν_s
30	25	0.2	350	200	0.3

f_c' : コンクリートの一軸圧縮強度, E_c : 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
 σ_{sy} : 鋼材の降伏応力, E_s : 鋼材のヤング率, ν_s : 鋼材のポアソン比

表-2 解析ケース⁹⁾

解析ケース	横拘束鋼材	横拘束鋼材材料 (体積鋼材比)	鉄筋間隔 S/D	断面形状
Case0	なし	0%	-	正方形
Case1	鉄筋	3%	0.2	正方形
Case2	鉄筋	3%	0.5	正方形
Case3	鉄筋	3%	1.2	正方形
Case4	鉄筋	3%	0.2	円形
Case5	鉄筋	6%	0.2	正方形
Case6	鉄板	3%	-	円形

S: ピッチ D: 試験体幅

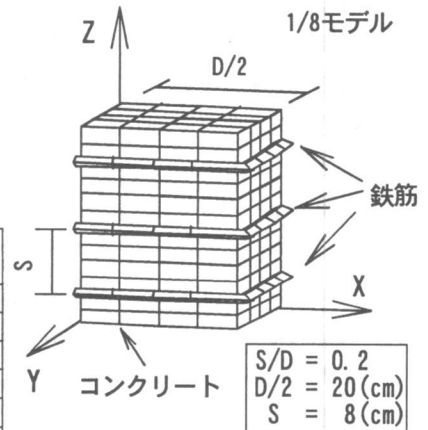


図-6 要素分割図

表-3 他のコンクリート構成モデルの解析方法一覧⁹⁾

材料モデル	Ottosen モデル	Drucker-Prager モデル	前川モデル	エンドクロニック モデル
解析プログラム	FEAP	ABAQUS	COM3	Total-RC
コンクリート要素 (注1)	8 節点 IP	8 節点 IP	20 節点 IP	8 節点 IP
鉄筋要素	トラス	トラス	トラス/ビーム	トラス
解析対象領域	1/4 領域	1/4 領域	1/4 領域	1/4 領域
解析領域内の鉄筋段数	2	3	1	3
要素分割 (縦×横×高さ)	不明	4×4×12	2×2×4	4×4×12

注1) IP はアイソパラメトリック要素を表す。

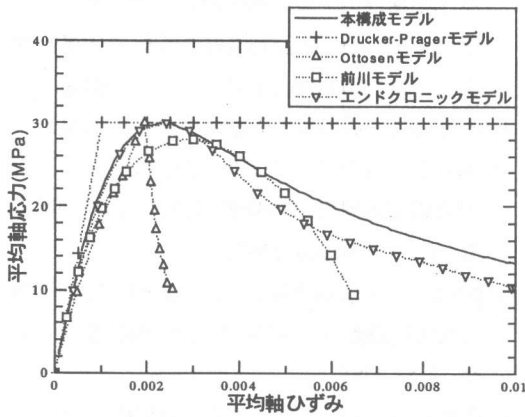


図-7 CASE0 (プレーンコンクリート)

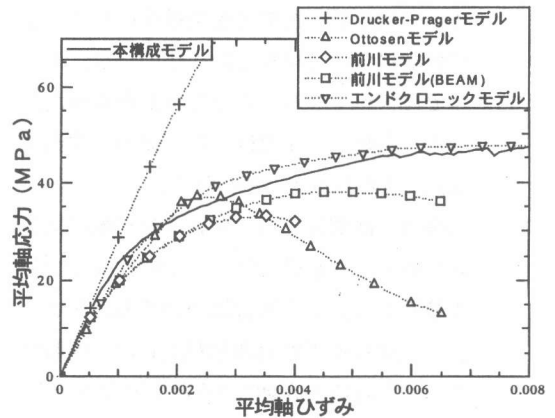


図-8 CASE1 (コンファインドコンクリート)

モデルによる解析結果以外の結果は、文献[9]による。

図-7は、CASE0(プレーンコンクリート)についての解析結果を比較したものである。図から明らかのように、Drucker-Prager モデルでは、材料特性としての弾-完全塑性状態、他の4種類のモデルでは、ひずみ硬化域およびひずみ軟化域の挙動を良く再現している。また、筆者らのひずみ軟化型コンクリート構成モデルによるひずみ軟化域の挙動は、Drucker-Prager モデルを除く他の3種類に比べて比較的延性的であることが分かる。

図-8は、CASE1(S/D=0.2)についての解析結果を比較したものである。Drucker-Prager モデルは、平均軸応力が 70[MPa]以上まで上昇しており非現実的な値をとっていることがわかる。Ottosen モデルは、平均軸応力のピーク値が 37[MPa]と、やや低めの値となっている。また、ひずみ軟化領域においては、かなり脆性的な挙動を示している。前川モデル(トラス要素)は、5

種類のモデルによる解析結果の中で最も平均軸応力のピーク値が低く、その後のひずみ軟化領域での挙動については、解析値は示されていない⁹⁾。

一方、横補強筋部分にビーム要素を用いた前川モデル(ビーム要素)では、平均軸応力のピーク値は、Ottosen モデルと同程度であるが、ひずみ軟化領域の挙動は延性的となっている。なお、前川モデル(ビーム要素)は、CASE1の条件に類似した実験結果を用いた検証により、実験値と高い適合性を示しており⁹⁾、CASE1の解析条件においても、実験値に比較的近い結果を与えていると推測される。

ひずみ軟化型構成モデルおよびエンドクロニックモデルによる解析結果は、前川モデル(ビーム要素)に比べて高めの平均軸応力-平均軸ひずみ関係を示している。両モデルとも挙動はかなり延性的となっており、定性的な傾向は一致している。

本モデルでは荷重-変形曲線は全体的に硬化しているものの、軸ひずみが0.55%程度から曲線に

滑らかさを欠き始め、軸ひずみがおよそ 0.8%付近で供試体内のある要素内にてスナップバックを生じた。

4. まとめ

ひずみ軟化型構成モデルを用いた、要素および構造レベルでの検証解析より、以下のことが分かった。

- 1) くさび検証解析では、静水圧载荷した供試体を三軸圧縮した後の引張挙動に対する予測性能について検証した。この場合、モデルではスナップバックなる不安定現象が生じた。実験レベルでは、この近辺の挙動は実測できなかつたと思われる。
- 2) 圧縮せん断解析では、供試体を三軸圧縮した後のせん断挙動に対する予測性能について検証した。この場合についても、スナップバックなる不安定現象が生じた。実験では、それ以降の挙動は得られていない。
- 3) 構造レベルでの検証解析（コンファインドコンクリート）では、弾-完全塑性型 Drucker-Prager モデル（関連流れ則）を用いるとコンファインドコンクリートの最大耐力を大幅に過大評価するため^{1),9)}、一般的に Drucker-Prager モデルを構造解析に用いるには適切ではないと思われる。
- 4) 一方、本構成モデルを用いたコンファインドコンクリートの解析結果は、他の構成モデルのうち、エンドクロニックモデルを用いた場合とほぼ同様の延性的な平均軸応力-平均軸ひずみ関係を示した。
- 5) 解析の対象としたコンファインドコンクリートの平均軸応力-平均軸ひずみ関係は全体的に硬化しているものの、本モデルでは軸ひずみがおよそ 0.8%付近で供試体内のある要素内にてスナップバックを生ずることが分かった。

謝辞

本研究費の一部は、平成9年度文部省科研費

一般研究（C）（畑中・水野）によつたことを付記する。

参考文献

- 1) 水野英二・沼田茂己・畑中重光：部材耐力に及ぼすコンクリートの軟化挙動の影響に関する FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.19(2), pp.471-476, 1997.
- 2) 水野英二・畑中重光：コンクリートのひずみ軟化型構成モデルの開発とコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.186-197, 1997.8.
- 3) 水野英二・沼田茂己・畑中重光：付着要素を導入したコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.495-496, 1997.
- 4) 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.
- 5) 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.13-22, 1997.
- 6) 水野英二・畑中重光：塑性理論によるコンクリート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.
- 7) 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.
- 8) 柴麻希・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.
- 9) 構成モデル小委員会(301)成果報告書, 土木学会コンクリート委員会, コンクリート技術シリーズ, pp.101-111, 1997.
- 10) Chen, W.F. and Mizuno, E. : Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier, pp.1-661, 1990.
- 11) 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.