

I-A 73

ひずみ軟化型コンクリート構成モデルの開発

三重大学 正員 畑中重光
 長大 正員 柴 麻希
 名古屋大学 正員 水野英二

1. まえがき

近年、有限要素法などの数値解析手法および材料力学のめざましい進歩に伴い、大型コンクリート構造物の非線形な変形挙動を解析することが可能となった。しかし、阪神・淡路大震災で生じたようなコンクリート構造部材および構造物のひび割れ発生後の塑性変形挙動ならびに破壊挙動の数値解析を実施し、耐震性能を評価するためには、コンクリート材料の引張・圧縮軟化挙動を精度良く再現できる構成モデルの確立が急務となる。

本研究では、1) 低側圧のみならず高側圧を受けるコンクリートや引張荷重下でのひずみ軟化挙動も再現できるように筆者らの圧縮軟化型コンクリート構成モデル^{1) 2)}を拡張し、2) 各種実験データ^{3) 4) 5)}に対する本提案モデルの予測性能について検討する。

2. ひずみ軟化型コンクリート構成モデル

本研究のひずみ軟化型構成モデルは、ひずみ空間で定義した塑性理論に基づいている¹⁾。すなわち、次式に示すひずみ空間で定義した負荷関数 F および塑性ポテンシャル関数 G を用いて非関連流れ則の仮定の基に定式化される。

$$F = F[\bar{I}_1, \sqrt{\bar{J}_2}, \theta, K, G, m, F_b, f_c', a] = 0 \quad (1)$$

$$G = G[\bar{I}_1, \sqrt{\bar{J}_2}, \theta, K, G, m, k, f_c', a] = 0 \quad (2)$$

ここで、 \bar{I}_1 、 \bar{J}_2 および θ はそれぞれ弾性ひずみの第1次不変量、偏差弾性ひずみの第2次不変量およびローデ角である。K および G はそれぞれ体積弾性係数およびせん断弾性係数であり、a は静水圧軸状態での引張強度に関するパラメータで、本研究では $0.3f_c'$ (f_c' : 一軸圧縮強度) としている。m は負荷曲面の曲率に関するパラメータで $m = 1$ と

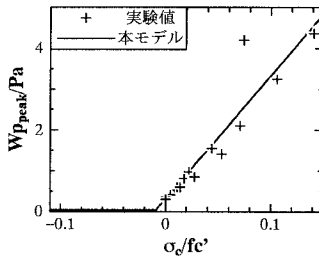


図-2 Wp_{peak}/Pa ~ σ_c/f_c' 関係

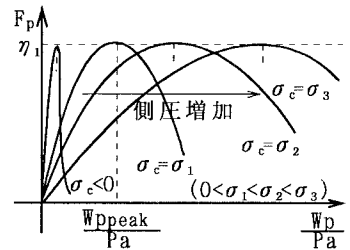


図-1 Fp-Wp/Pa 関係

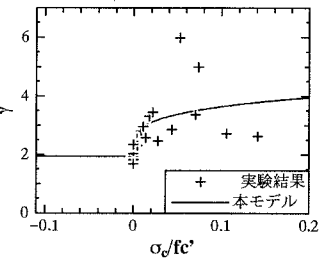


図-3 γ - σ_c/f_c' 関係

している。Fp はコンクリートの損傷度を表す強度パラメータで、降伏曲面では $F_p(\text{最大}) = \eta_1 = 224.5$ であり、一般に大気圧 Pa で無次元化した塑性仕事量 W_p/Pa の関数で表される。Fp-Wp/Pa 関係は、図-1 に示すように側圧が大きくなるに従って延性的になる特徴があり、本研究では、Fp-Wp/Pa 関係の決定に軟化域の応力-ひずみ曲線のなだらかさに影響を与えるパラメータ γ と、破壊点での塑性仕事量 $W_{p,peak}$ (強度パラメータ Fp の最大値 η_1 に対応する塑性仕事量) を大気圧 Pa で除して無次元化したパラメータ $W_{p,peak}/Pa$ の2つを用いた。さらに、 $W_{p,peak}/Pa$ と γ は、コンクリートの強度と作用している拘束圧に関係することが実験結果^{3) 4)}より分かっているので、拘束圧を等価拘束圧の概念²⁾に拡張し、等価拘束圧を強度で除した無次元量 σ_c/f_c' の関数として表した。また本研究では、各種圧縮強度のコンクリートに対する一軸引張実験データ⁵⁾を精度良く再現できるように、等価拘束圧が引張領域では図-1 に示すような急勾配を有する Fp-Wp/Pa 関係を設定した。図-1、図

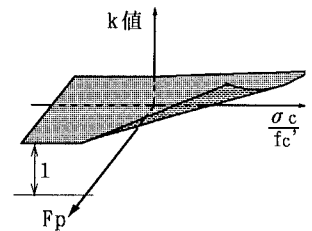
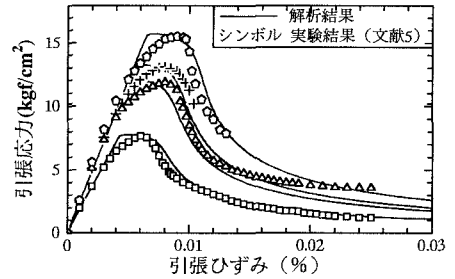


図-4 k 値の概念図

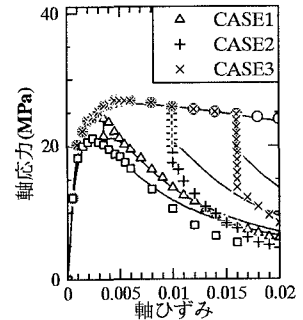
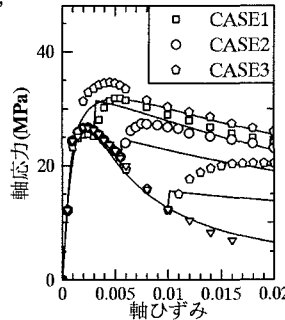
— 2 および図— 3 にそれぞれ、 $F_p - W_p/Pa$ 曲線の概念、 $W_p \rho_{s,k}/Pa - \sigma_c/f_c'$ 関係および $\gamma - \sigma_c/f_c'$ 関係を示す。また、パラメータ k は、負荷関数 F と塑性ポテンシャル関数 G との関係を示すパラメータで、主に側方ひずみに影響を与える。パラメータ k は、強度パラメータ F_p と等価拘束圧を強度で除した無次元量 σ_c/f_c' の関数として、図— 4 に示すような曲面で表される。以上に述べた $F_p - W_p/Pa$ 曲線および k 値を適切に決定することにより、ひずみ軟化型コンクリート構成モデルを開発した。

3 シミュレーション解析結果

図— 5 に、様々な一軸圧縮強度を有するコンクリートの一軸引張実験⁵⁾のフィードバック解析結果を示す。図中、解析結果を実線で、実験結果を印で示してある。これより、本モデルは強度の異なるコンクリートの引張軟化挙動を精度良く再現していることが分かる。一方、表— 1 に水—セメント比 $W/C=0.55$ 、一軸圧縮強度 $f_c'=26.8(\text{MPa})$ を有するコンクリートの側圧途中載荷実験種類を、表— 2 に水—セメント比 $W/C=0.70$ 、一軸圧縮強度 $f_c'=21.2(\text{MPa})$ を有するコンクリートの側圧途中載荷実験種類を示す。側圧途中載荷とは、まず一軸圧縮載荷を行い載荷時軸ひずみ ε_a に達した時点で側応力 σ_c を加え、その後一定側圧 σ_c で三軸圧縮を行う実験で、側圧途中除荷とは、初期拘束圧 σ_c から漸増載荷を行い、除荷時の軸ひずみ ε_b に達したとき側応力 σ_c を除荷し側圧をゼロにする実験である。図— 6 および図— 7 に、表— 1 および表— 2 の実験結果⁴⁾と本モデルによるシミュレーション結果との比較を示す。図中には、一軸圧縮実験結果と漸増載荷実験結果（初期拘束圧 $\sigma_c = 0.74(\text{MPa})$ から 2% 軸ひずみ時 $0.93(\text{MPa})$ まで



図— 5 一軸引張試験のフィードバック解析



図— 6 側圧途中載荷の解析結果

図— 7 側圧途中除荷の解析結果

漸増載荷したもの)と、それらのシミュレーション結果も併示してある。これより、複雑な載荷経路の実験種類に対しても本モデルは再現可能であることが分かる。

表— 1 途中載荷実験の種類⁴⁾ ($W/C=0.55$)

	載荷時の軸ひずみ ε_a (%)	載荷応力 σ_a (MPa)
ケース 1	0.30	0.76
ケース 2	0.55	0.79
ケース 3	1.00	0.83

表— 2 途中除荷実験の種類⁴⁾ ($W/C=0.70$)

	初期拘束圧 σ_c (MPa)	除荷時の軸ひずみ ε_b (%)	除荷時側応力 σ_b (MPa)
ケース 1	0.74	0.35	0.77
ケース 2	0.74	1.0	0.83
ケース 3	0.74	1.6	0.89

4 まとめ

本研究では、コンクリートの引張および圧縮ひずみ軟化挙動を予測することが可能な構成モデルを開発した。本構成モデルのパラメータは、一軸圧縮強度 f_c' で無次元化した量で表現されるため、一軸圧縮強度の異なるコンクリートの構成モデルとして用いることが可能である。また、本構成モデルによるシミュレーション結果と実験結果を比較し、載荷経路依存性に対する有効性を評価した。

参考文献

- [1]水野英二・畑中重光：コンクリート工学論文集，Vol.2(2)，1991，pp.85-95。 [2]水野英二・畑中重光：コンクリート工学論文集，Vol.3(2)，1992，pp.1-13。 [3]Hatanaka, S.・Kosaka, Y.・Tanigawa, Y.：J. Structural and Construction Engineering, (Trans. of AIJ), No.377, 1987, pp.27-40。 [4]近藤洋右・島崎宗厳・畑中重光：日本建築学会東海支部研究報告集，Vol.31, 1993.2, pp.45-48。 [5]W. F. Chen：Plasticity in Reinforced Concrete, 丸善，昭60，pp.196-257。