

# 変動三軸圧縮応力を受けるコンクリートのひずみ軟化挙動のモデル化

名古屋大学工学部 正 員○水野英二  
三重大学 工学部 畑中重光

**1. はじめに** 著者らは、コンクリート供試体 (10x10x10 cm) の三軸圧縮実験データ<sup>1)</sup>を考察することにより、低側圧下でのコンクリート材料の圧縮軟化挙動のモデル化を行ってきている<sup>2)</sup>。本研究では、塑性力学に基づく、著者らの圧縮軟化モデルを応用することにより、変動側圧が作用する場合のコンクリートの圧縮軟化挙動のモデル予測を行い、さらにこれを実験結果と比較し、モデルの妥当性を検討した。

**2. 圧縮軟化モデルの概要** 著者らの圧縮軟化モデルは、ひずみ空間で定義した塑性理論に基づいており、非関連流れ則の仮定の基に、以下に示す(1)降伏関数Fおよび(2)塑性ポテンシャル関数Gを用いている。

**2. 1 Lade型降伏関数F** 弾性主ひずみ空間 ( $\varepsilon_1^e, \varepsilon_2^e, \varepsilon_3^e$ ) でのLade型降伏関数の曲面の概要を図-1に示す。降伏関数Fはひずみ  $\varepsilon_{ij}$ 、塑性ひずみ  $\varepsilon_{ij}^p$ 、強度パラメータ  $f_p$  を用いて次式によって表すことができる。

$$F = F(\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, f_p) = 0 \quad (1)$$

ここで、強度パラメータ  $f_p$  は塑性仕事量  $W_p$  が増えるに従って増加し、降伏強度 ( $f_p = \eta_1$ ) に達した後は減少する関数で仮定され、一般形は次式で表現される。

$$f_p = f_p(W_p, \sigma_c) \quad (2)$$

なお、式(2)は各種一定側圧  $\sigma_c$  のもとでの三軸圧縮実験データより定められる。

**2. 2 塑性ポテンシャル関数G** 弾性ひずみの不変量 ( $\bar{I}_1 - \sqrt{J_2}$ ) 空間での塑性ポテンシャル曲面を図-2に示す。本モデルでは、塑性ポテンシャル関数を次式で示すような降伏関数と類似の関数形で仮定した。

$$G = G(\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, k) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $k$  は塑性ポテンシャル曲面Gと降伏曲面Fとの関係を示す値である (図-2参照)。著者らの研究によれば、 $1/k$  値は、側圧の値にもよるが、ひずみ硬化域ではマイナスの値 ( $-1 \sim 0$ ) を、ひずみ軟化域ではプラスの値 ( $0 \sim 1$ ) となることが分かっている。

**3. 変動三軸応力下での提案モデルのインプリメンテーション** 変動三軸応力 (変動側圧) 下でのコン

クリートの圧縮軟化挙動のモデル化を行う場合、特に三軸実験データより得た一定側圧下での  $f_p$ - $W_p$  関係 (式(2)) の取り扱い方が重要となる。ここでは、一定側圧下での  $f_p$ - $W_p$  関係を基に、変動側圧下での  $f_p$ - $W_p$  関係の推定法について説明するとともに、実験データとモデル予測結果との比較を示す。

**3. 1 変動側圧下での  $f_p$ - $W_p$  関係の推定法** いま、軸応力  $\sigma_1$ 、側圧  $\sigma_c$  なる応力状態でつり合いにあるコンクリートが軸応力 ( $\sigma_1 + d\sigma_1$ )、側圧 ( $\sigma_c + d\sigma_c$ ) なる応力状態へと移る場合 (ただし、応力増分は微小である)、一定側圧下での  $f_p$ - $W_p$  関係を用いて、弾性ひずみ増分  $d\varepsilon_{ij}^e$  および塑性ひずみ増分  $d\varepsilon_{ij}^p$  を

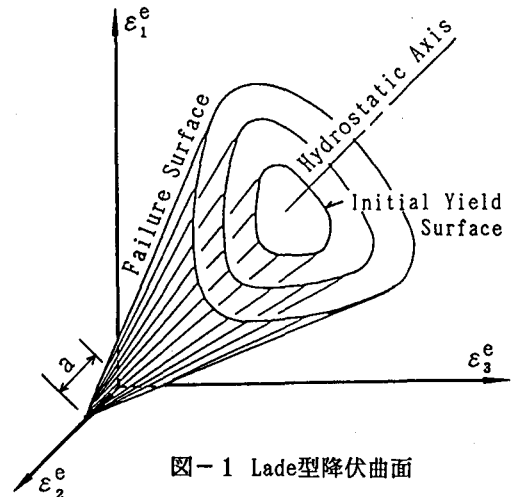


図-1 Lade型降伏曲面

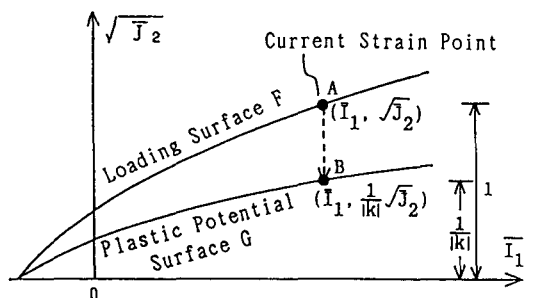


図-2 塑性ポテンシャル曲面の定義

予測することが必要となる。図-3に、一定側圧 $\sigma_c$ での $f_p$ - $W_p$ 曲線と一定側圧( $\sigma_c + d\sigma_c$ )での $f_p$ - $W_p$ 曲線を示す。図中の点Aは、一定側圧 $\sigma_c$ 下での $f_p$ - $W_p$ 曲線上の現つり合い点を、さらに点Cは一定側圧( $\sigma_c + d\sigma_c$ )での $f_p$ - $W_p$ 曲線上の応力増分後のつり合い点を概略的に示している。この応力増分による塑性仕事 $W_p$ の増加は、この図に示す点A→点Cまでの塑性仕事ではなく、点B→点Cまでの塑性仕事である。この塑性仕事増分量 $dW_p$ を用いて、弾性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^e$ および塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^p$ を弾塑性増分式を用いて計算する。さらに側圧が変動していく場合、この操作を繰り返すことにより、変動側圧下での $f_p$ - $W_p$ 関係が推定される。

**3.2 実験データ** モデルカリブレーションに用いた実験データは、水セメント比(W/C) 0.70のコンクリート素材供試体(10x10x10 cm)の三軸圧縮実験データ(側圧 $\sigma_c$ 一定: 0 および 4 kgf/cm<sup>2</sup>)である。

### 3.3 材料パラメータ

- ①弾性定数: 弾性域では、線形等方弾性と仮定した。体積弾性係数 $K = 133,333$  kgf/cm<sup>2</sup>;せん断定数 $\mu = 100,000$ kgf/cm<sup>2</sup>を用いた。
- ②一軸圧縮強度 $f_c'$ :  $f_c' = 206.4$  kgf/cm<sup>2</sup>。
- ③破壊曲面に対するパラメータ: 降伏関数F内のパラメータは強度パラメータ $f_p$ 、曲面の曲率を表す $m$ 、引張強度に対応する $a$ である。破壊時での $f_p$ の値 $\eta_1 = 165$ ,  $m = 0$ ,  $a = 0.31 f_c'$ を用いた。
- ④ $f_p$ - $W_p$ 関係: 側圧 $\sigma_c = 0$  および 4 kgf/cm<sup>2</sup>の実験データより $f_p$ - $W_p$ 関係(式(2))をカリブレーションした。
- ⑤塑性ポテンシャル関数G: 式(3)中の $1/k$ 値は硬化域では、 $-1 \sim 0$ 、軟化域では、 $0.5 \sim 0.7$ の値を用いた。

**3.4 モデルの予測結果および評価** 三軸圧縮実験において側圧 $\sigma_c$ が0 kgf/cm<sup>2</sup> から4 kgf/cm<sup>2</sup> (軸ひずみ $\varepsilon_1 = 2\%$ 時点)、および6.4 kgf/cm<sup>2</sup> (軸ひずみ $\varepsilon_1 = 2\%$ 時点)まで変動する場合の予測を行った。実験データとモデル予測との比較を図-4に示す。図

から分かるように、側圧が0→6.4 kgf/cm<sup>2</sup>に変動する場合(△印)、軸ひずみ2%で均等側圧4 kgf/cm<sup>2</sup> (○印)の一軸応力度を越えていない。モデルはこのような経路依存性に対しても有効であると評価できる。

**4. あとがき** 本研究では、著者らが提案した圧縮軟化モデルを用いて、圧縮三軸実験において、変動側圧が作用するコンクリートの圧縮軟化挙動のモデル予測を行い、実験データと比較した。

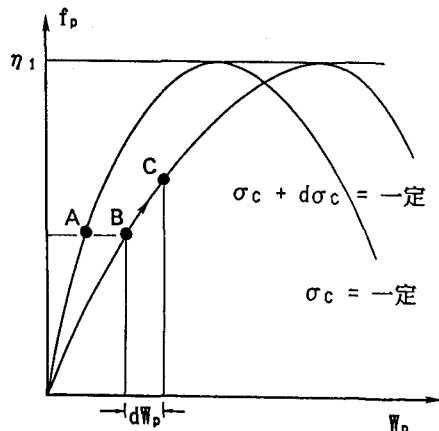


図-3  $f_p$  -  $W_p$  関係の推定法

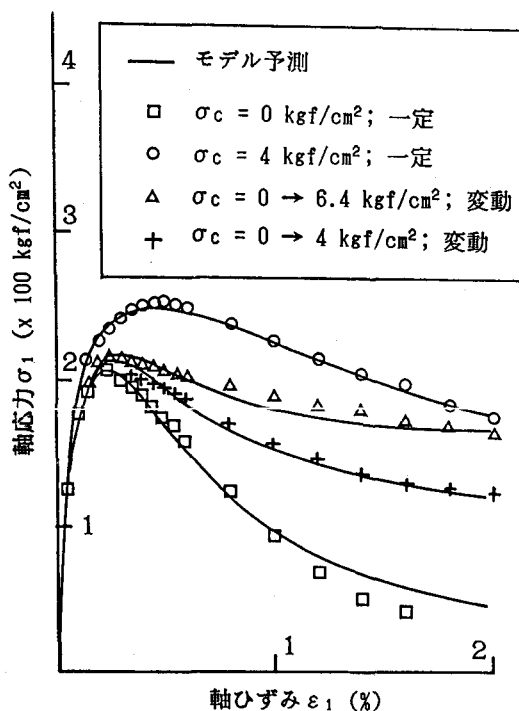


図-4 モデル予測結果と実験データとの比較

《参考文献》 1) Hatanaka, S., et.al.: Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete under Low Lateral Pressure, Trans. of AIJ, No.377, pp.27-40, (1987); 2) 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.