

繰返し載荷時の粘土の応力～ひずみ～強度特性

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○ 升本 隆士
名古屋工業大学 正会員 中井 照夫
名古屋工業大学学部生 東本 崇

従来の t_{ij} を用いた粘土の移動硬化型弾塑性モデル(kinematic t_{ij} -clay model¹⁾)を拡張した前回のモデル²⁾では、繰返し排水せん断による粘土の強度増加を表現することができなかった。ここでは、ひずみ硬化パラメータを改良することで、間隙比減少の影響による粘土の変形の硬化特性を考慮し、併せて強度特性をも表現可能なモデル³⁾に拡張している。そして、このモデルの解析結果を、異なる履歴を受けた繰返し載荷試験結果や従来のモデルによる解析結果と比較・検討する。

1. 粘土の移動硬化モデル(kinematic t_{ij} -clay model)の拡張

従来の粘土の移動硬化型弾塑性モデルでは、単調載荷や繰返し載荷など、応力経路によらず塑性体積ひずみは、圧縮側のみであった。しかし、過圧密粘土のせん断過程や繰返し載荷などでは、体積膨張し強度も増加することが、実験結果より確認されている。ここでは、新たなパラメータを導入することなしに、繰返し載荷や過圧密により密な初期状態にある粘土のひずみ硬化特性を、表現する方法について述べる。

まず、現在の応力状態(平均応力 t_N 、応力比 $X = t/t_N = \sqrt{x_{ij}x_{ij}}$ 、降伏関数の中心軸 $n = \sqrt{n_{ij}n_{ij}}$)の移動硬化型弾塑性モデル(kinematic t_{ij} -clay model)の降伏関数 f は次式で表される。

$$f = \ln t_N + g(X^* + n) - \ln t_{N1} = 0, \quad g(z) = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \ln \left| 1 - (1-\alpha) \frac{z}{M^*} \right| \quad (1)$$

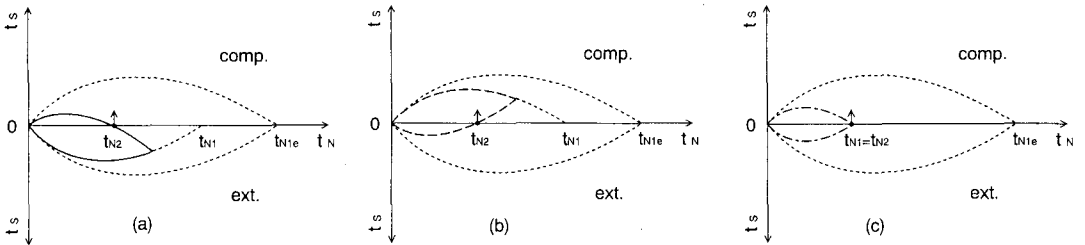


図-1 $t_s \sim t_N$ 関係で表した t_{N1} , t_{N2} および t_{N1e}

また、せん断時には応力比(x_{ij})の変化にともない、中心軸 n_{ij} が $X^* = \xi$ を一定に保ちながら動くため、載荷側では応力比($X = X^* + n$)、除荷側では応力比($X = n - X^*$)という関係にある。ここでは、図-1(b),(a)に示すように載荷側では t_{N1} で、除荷側では t_{N2} でひずみ硬化を表現する。 t_{N1} および t_{N2} は次式で表せる。

$$t_{N1} = t_N \exp(g(X^* + n)), \quad t_{N2} = t_{N1} \exp(-g(2n)) \quad (2)$$

一方、図-2に示すように繰返しせん断を受けた粘土では、たとえ同じ応力状態のA(A')点にあっても塑性体積ひずみが生じ、その時の塑性体積ひずみを ε_v^p とすれば、この ε_v^p と等価なNCL上の平均応力 t_{N1e} は、

$$t_{N1e} = t_{N0} \exp \left(\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p \right) \quad (3)$$

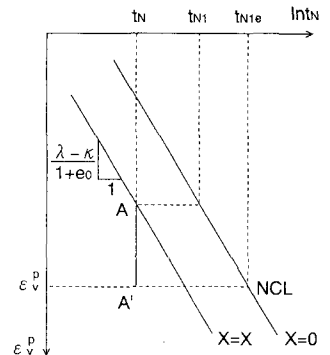


図-2 $\varepsilon_v^p \sim \ln t_N$ 関係で表した t_{N1e} の定義

ここに、 t_{N0} は $X=0$ で $\varepsilon_v^p=0$ となる基準状態の t_N であり、 ε_v^p は過去の履歴から生じた塑性体積ひずみである。

さて、図-1に示すように、過圧密あるいはせん断履歴のある場合の t_{N1} , t_{N2} および t_{N1e} は、 $t_{N2} \leq t_{N1} < t_{N1e}$ という関係にある。そこで、このような状態($t_{N1}/t_{N1e} < 1$)では、従来のモデルで用いたひずみ硬化パラメータの増分($d\varepsilon_v^p$)の代わりに体積膨張可能な塑性仕事増分(dW^p)を用い、その中で前回提案したひずみ硬化特性を考慮している。一方、正規圧密状態からの単調載荷時($t_{N1}/t_{N1e}=1$)では、従来通り($d\varepsilon_v^p$)を用いている。具体的に、 $d\varepsilon_v^p$, dW^p , $d\varepsilon_v^{p0}$ は次式のように定義している。

$$d\epsilon_{v(i)}^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{1}{t_{Ni}} dt_{Ni} \left(\frac{t_{Ni}}{t_{Ni}} \right), dW^{*p} = \frac{1}{\sqrt{3}} t_{Ni} d\epsilon_v^{p(IC)}, d\epsilon_v^{p(IC)} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{1}{t_{Ni}} dt_{Ni} \left(\frac{t_{Ni}}{t_{Ni}} \right) \quad (i=1,2) \quad (4)$$

ここに、 dt_{N1}, dt_{N2} に分けてひずみ硬化を考慮したのは、載荷時と除荷時のひずみ発生量の差を表現するためであり、 t_{N1}/t_{N2} でひずみの硬化特性を表現している。さらに、図-3に示すような任意の応力点における応力～ひずみ挙動を表現するために、関数Rを次式で与える。

$$R = \frac{x_{ij}^* \cdot n_{ij}}{|X^*| |n|} \quad (-1 \leq R \leq 1) \quad (5)$$

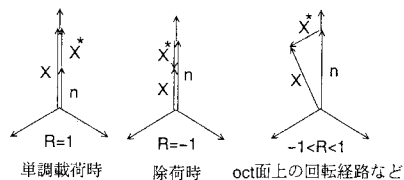


図-3 x_{ij}^* と n_{ij} のなす角度

そして、一般的な応力条件下におけるひずみ硬化パラメータ増分($d\epsilon_v^p, dW^{*p}$)を次式で与える。

$$d\epsilon_v^p = \frac{1}{2} (d\epsilon_{v(1)}^p + d\epsilon_{v(2)}^p + R(d\epsilon_{v(1)}^p - d\epsilon_{v(2)}^p)) \quad , \quad dW^{*p} = \frac{1}{2} (dW_{(1)}^{*p} + dW_{(2)}^{*p} + R(dW_{(1)}^{*p} - dW_{(2)}^{*p})) \quad (6)$$

2. 異なる履歴を受けた繰返し載荷試験結果と解析値の比較検証

図-4～6に繰返し載荷試験の応力経路を示す。実験(a)は、 $p=196\text{kPa}$ 一定で主応力比(σ_1/σ_3)を2.3と増やしながら圧縮側から繰返しせん断する経路で、実験(b)は伸張側からせん断し最後の経路では圧縮側で折り返す実験である。実験(c)はOCR3.5の過圧密状態からせん断する実験である。また、図中のA点の間隙比(最終的せん断(AB)を行う前)はほぼ等しい。図-1(a)～(c)は、それぞれの経路で採集的なせん断(AB)を行う前のA点の降伏関数の位置を示す。図-7～9では経路(AB)における実測値および解析値の比較を主応力比(σ_1/σ_3)～軸ひずみ(ϵ_a)関係(白ぬきプロット)および軸ひずみ(ϵ_v)～体積ひずみ(ϵ_v)関係(黒の7°プロット)で示す。図-9より従来モデルはひずみの硬化および強度増加が表現できないのに対し、拡張したモデル(図-8)では妥当に表現され、応力履歴を受けた粘土の体積膨張も説明可能となった。また、たとえせん断前の間隙比が等しくても過去のせん断履歴によってその後の応力～ひずみ挙動が違うのは、図-1(a)～(c)の降伏関数の位置関係からも理解できる。

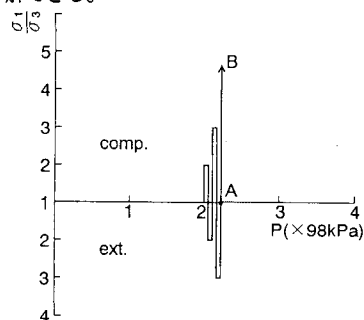


図-4 実験(a)の応力経路

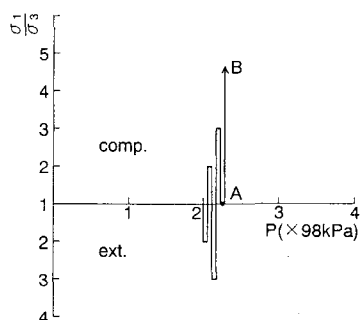


図-5 実験(b)の応力経路

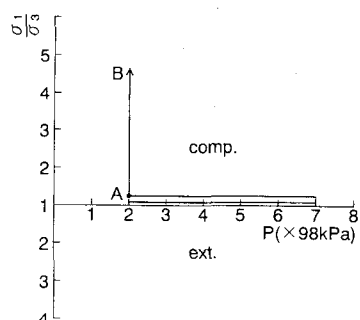


図-6 実験(c)の応力経路

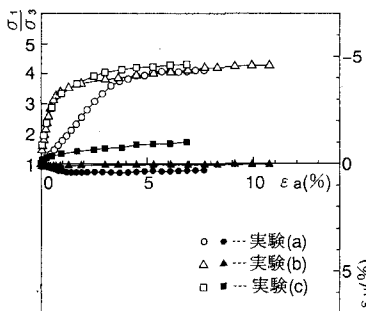


図-7 実験(a),(b),(c)の実測値の比較

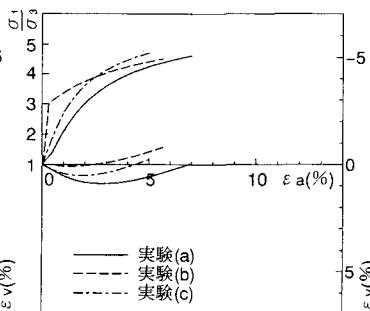


図-8 拡張したモデルの解析結果

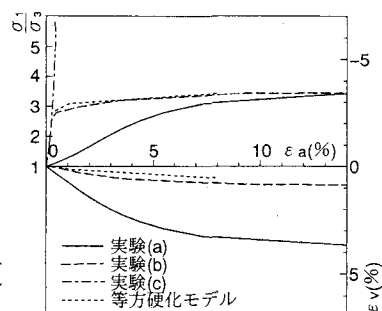


図-9 従来モデルの解析結果

主応力比～軸ひずみ～体積ひずみ関係 主応力比～軸ひずみ～体積ひずみ関係 主応力比～軸ひずみ～体積ひずみ関係
参考文献) 1) Nakai & Hoshikawa (1991): Proc. 7th IACMOG, Vol. 1, 655～660. 2) 中井・升本・渡辺 (1993): 第28回土質工学研究発表講演集, No. 282, 733～734. 3) 渡辺・中井・岩堀 (1994): 本研究発表会「応力履歴を受けた粘土の3次元応力～ひずみ特性」