

III- 423

非排水三軸試験でのひずみ軟化について

㈱奥村組 技術研究所 ○正会員 森尾 敏 日下部 伸
山口大学 工学部 正会員 安福 規之 兵動 正幸

1. まえがき

筆者らは、非共軸性(応力主軸と塑性ひずみ増分主軸が一致しない現象)の評価を取り入れた繰返し弾塑性構成モデルを提案し、非排水繰返し単純せん断試験で表れる非共軸性を増分線形モデルの範疇で比較的うまく表現することを示した¹⁾。本報告では、このモデルを Verdugoら^{2), 3)} が行った非排水三軸圧縮試験のシミュレーション解析に適用し、ひずみ軟化挙動について若干の考察を加えた。

2. モデルの修正

応力、ひずみのパラメーターとして次式を用いる。

$$q = \sigma_a - \sigma_r, \quad p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3 \quad \cdots \cdots 1)$$

$$e = (2/3)(\varepsilon_a - \varepsilon_r), \quad v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \quad \cdots \cdots 2)$$

非排水三軸圧縮試験への適用にあたり、ストレーン・ダイレイタンスー関係に変数 μ を導入し、式3)のように修正した。以下、圧縮を負とする。

$$-dv^p/|de^p| = \mu (M - c |\eta|) \quad \cdots \cdots 3)$$

ここに、 $M = 6 \cdot \sin \phi_m / (3 - \sin \phi_m)$ 、 ϕ_m は体積最大圧縮時の内部摩擦角、 $\eta = q/p$ 、 c は非共軸性の程度を表すスカラー(ただし、本解析では常に $c = 1$ になる)、 $\mu = \text{EXP}(-D \int |de^p|)$ である。

D は新たに加わった定数で、前モデル¹⁾は $D = 0$ の場合である。モデルを修正したのは、前モデルでは同じ間隙比の下で、やや密な砂の非排水せん断強度は初期拘束圧にかかわらず一定である現象(図-1 (C))が表現できなかったためである。

3. 解析結果

Verdugoらの実験結果^{2), 3)}と解析結果の比較を図-1 (a) ~ (c)に、実験で用いられた豊浦砂の間隙比 e_0 と解析で用いた定数を表-1に示す。 G_1 、 K_1 はせん断弾性係数 G 及び体積弾性係数 K の初期値、 ϕ は破壊時の内部摩擦角、 r は硬化係数 K_F の

表-1 間隙比 e_0 及び解析の定数

	e_0	G_1 kPa	K_1 kPa	ϕ deg.	ϕ_m deg.	r	D
L1	0.930	5430	14500	31.5	32.0	1.5	0.0
L2	0.930	9400	25100	31.5	32.0	1.5	0.0
L3	0.933	34400	91600	31.5	32.0	1.5	0.0
M1	0.930	12200	32600	31.5	32.0	1.5	0.0
M2	0.883	27000	72000	31.5	30.0	4.0	0.0
M3	0.861	28200	75400	31.5	30.0	8.0	10.0
D1	0.735	32600	87000	31.5	29.0	15.0	5.0
D2	0.735	103200	274800	31.5	29.0	15.0	15.0
D3	0.735	146000	389200	31.5	29.0	15.0	30.0
D4	0.735	178700	476700	31.5	29.0	10.0	60.0

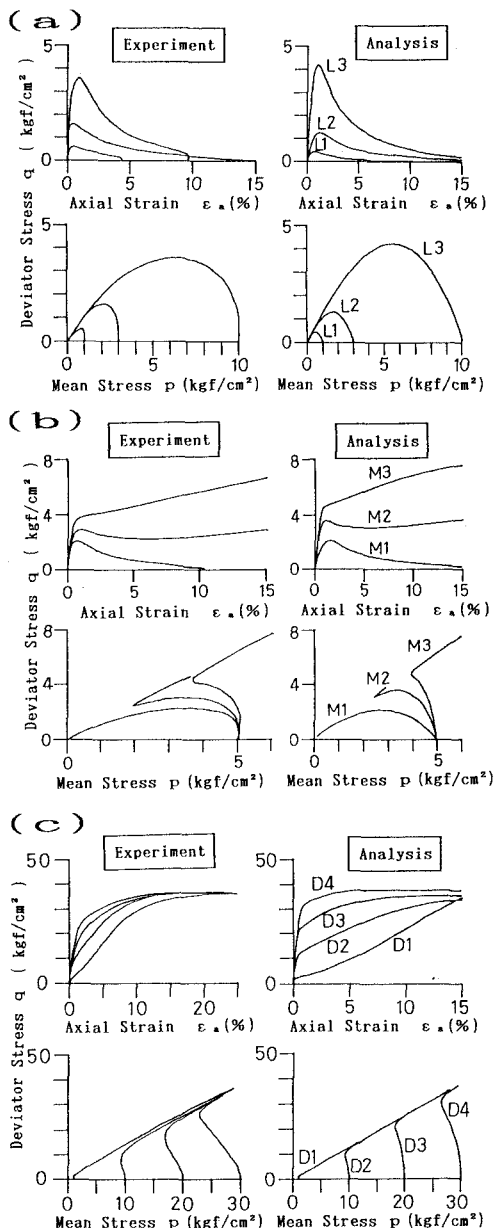


図-1 実験結果^{2), 3)}と解析結果の比較

初期値を規定する定数である。

図-1(a)では、極めてゆる詰め砂の非排水強度がゼロになる挙動、(b)では、 e_0 の減少に伴いひずみ軟化から硬化に至る挙動、(c)では、やや密な砂の硬化挙動がうまく表現されている。

4. ひずみ軟化挙動の考察

以下、硬化型(硬化係数 $K_P > 0$)のモデルにおいて、三軸圧縮状態を対象にする。非関連流れ則を用いたモデルでは、次式が成立する。

$$\begin{Bmatrix} dq \\ dp \end{Bmatrix} = \frac{1}{K_P + H_S} \begin{bmatrix} D_{SS} & D_{SP} \\ D_{PS} & D_{PP} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} de \\ dv \end{Bmatrix} \quad \cdots 4)$$

$$D_{SS} = 3G(K_P + K_{NP}g_P), \quad D_{SP} = -3GK_{NS}n_P$$

$$D_{PS} = -3GK_{NP}n_S, \quad D_{PP} = K(K_P + 3Gn_Sg_S)$$

ここに、 $H_S = 3Gn_Sg_S + K_{NP}g_P$ 、 $n_P = (\partial f / \partial p) / N_r$ 、 $n_S = (\partial f / \partial q) / N_r$ 、 f は負荷曲面、 g_P 、 g_S は塑性ひずみ増分方向を示す単位ベクトル($g_S^2 + g_P^2 = 1$)、 $N_r = \{(\partial f / \partial p)^2 + (\partial f / \partial q)^2\}^{1/2}$ である。

非排水条件下($dv = 0$)では、次式が得られる。

$$dq = \frac{3G(K_P + K_{NP}g_P)}{K_P + H_S} de \quad \cdots \cdots 5)$$

又、負荷の条件(負荷指標 $df > 0$)は次式となる。

$$df = \frac{K_P(3Gn_S)}{K_P + H_S} de > 0 \quad \cdots \cdots 6)$$

式6)で、式7)が成り立つことを考えると式8)が得られる。この結果、式5)で式8)を考慮すると軟化の条件は、式9)で与えられる。

$$n_S \cdot de > 0 \quad \cdots \cdots 7) \quad K_P + H_S > 0 \quad \cdots \cdots 8)$$

$$\boxed{K_P + K_{NP}g_P < 0} \quad \cdots \cdots 9)$$

さて、本モデルでは K_P の補間則として式10)が用いられ、体積弾性係数は式11)で与えられる。

$$K_P = r K_I (p / p_I)^{1/2} (1-R)^2 \quad \cdots \cdots 10)$$

$$K = K_I (p / p_I)^{1/2} \quad \cdots \cdots 11)$$

両式を式9)に代入すると式12)が得られ、軟化の条件から K_I 、 p の影響を取り除くことができる。

$$r(1-R)^2 + n_P g_P < 0 \quad \cdots \cdots 12)$$

ここに、 p_I は p の初期値、 R は負荷曲面の半径($0 \leq R < 1$)で、本モデルでは、次式が成立し、

$$n_P = -C_1 \eta^2 / p \quad \cdots 13) \quad g_P = -C_2 (M - |\eta|) \quad \cdots 14)$$

$$n_S = C_3 \eta / p \quad \cdots 15) \quad R = C_4 |\eta| \quad \cdots 16)$$

$n_P > 0$ 、 $n_S < 0$ で、変数 $C_1 \sim C_4$ の符号は正である。

式12)から、 g_P (< 0)の絶対値を大きく設定する

と、即ち、 $\phi_m > \phi$ とすると(表-1参照)、ある応力比 η から常にひずみ軟化を示すことが分かる。

この時、式17)、18)及び式6)～9)、 $g_S \cdot de > 0$ を考慮すると、式19)が成立し、Druckerの局所的安定条件は満足されない。

$$de^T = (df / K_P) g_S \quad \cdots 17) \quad dv^T = (df / K_P) g_P \quad \cdots 18)$$

$$d^2W = dq \cdot de^T + dp \cdot dv^T$$

$$= \frac{3G \cdot df \cdot de}{K_P (K_P + H_S)} \{g_S (K_P + K_{NP}g_P) - K_{NS}g_P^2\} < 0 \quad \cdots 19)$$

また、式8)を考慮すると、式4)で表される弾塑性マトリックス D^{EP} では、次式が成立し、同式は D^{EP} の2つの固有値が共に正で、ひずみ軟化が均質な変形であることを示す。

$$\det. [D^{EP}] = 3GK_P / (K_P + H_S) > 0 \quad \cdots \cdots 20)$$

ところで、近年、せん断中に体積ひずみを膨張側に制御すると、密な砂でもひずみ軟化挙動が現れることが示されている^{4)、5)、6)}。

式21)の a を一定として体積ひずみと軸ひずみの比を制御すると、式22)が成り立つ。

$$dv / d\varepsilon_a = a, \quad (a < 0: \text{膨張}) \quad \cdots \cdots 21)$$

$$dv / de = b, \quad b = 3a / (3-a), \quad (b < 0: \text{膨張}) \quad \cdots 22)$$

この時、 $dq \sim de$ 関係は式23)である。

$$dq = \frac{3G\{K_P + K_{NP}(g_P - bg_S)\}}{K_P + H_S} de \quad \cdots \cdots 23)$$

また、負荷の条件は次式で与えられる。

$$df = \frac{K_P(3Gn_S + bK_{NP})}{K_P + H_S} de > 0 \quad \cdots \cdots 24)$$

上式より、非排水の場合と同様に式8)、式20)が成り立ち、体積ひずみ制御時のひずみ軟化も均質な変形であることが分かる。又、体積ひずみ制御時のひずみ軟化の条件は次式で与えられる。

$$\boxed{K_P + K_{NP}(g_P - bg_S) < 0} \quad \cdots \cdots 25)$$

上式より、非排水時には式9)が成立しない密な砂でも、体積ひずみを制御すること、即ち $b \cdot g_S$ (> 0)によって、ひずみ軟化が容易に生じることが分かり、図は省略するが、解析でも確かめられた。

参考文献 1): 森尾他、「非共輪繰返し弾塑性構成モデルの提案(その2)」、第28回土質工学研究発表会(投稿中)

2): R. Verdugo 他、第26回土質工学研究発表会、PP. 529-532

3): R. Verdugo 他、第27回土質工学研究発表会、PP. 603-606

4): Chu, J., J. Geo. Eng., ASCE, 119(2), PP. 385-387, 1993

5): 内田、第27回土質工学研究発表会、PP. 553-556

6): 五十嵐他、第27回土質工学研究発表会、PP. 557-558