

有明粘土のせん断特性とそのモデル化について

長崎大学 工学部 正 棚橋 由彦 学 ○川口 浩
同 上 学 井上 久登 正 持下 輝雄

1. まえがき

地盤材料の力学的挙動を解析的に予測するためには、土の構成モデルを構築することが必要不可欠であり、現在までに、種々の構成モデルが提案されている。著者らも、基本的には異方弾性論に基づく正規圧密粘土の弾塑性構成モデルを既に提案しているが¹⁾、降伏曲面が拡張された von Mises 型のため、伸張条件になると強度を過大に評価する傾向があった。そこで、既提案のモデルを伸張条件下にも適用し得るように拡張し、既報²⁾の乱さない有明粘土を試料とした一連の純粋三軸圧密非排水試験の結果と比較、検討したので、これらの結果について報告する。また、1次、2次、3次不変量を用いて得られた二、三の破壊規準についても若干の考察を行う。

2. 試料、試験方法及び条件

用いた多軸試験機、試料及び試験方法等については、既報²⁾に詳しいので、ここでは省略する。なお、試験条件と供試体のせん断開始時の間隙比、実測の破壊時諸量については、一括して表-1に示す。

3. 提案した弾塑性構成モデル 表-1 試験条件と実測の破壊時諸量

提案した弾塑性構成モデルの定式化、弾塑性パラメータの決定方法等については文献¹⁾に詳しいので、ここではモデルの修正と非排水条件への拡張について記述する。なお、本報告を通して応力、ひずみともに圧縮を正とする。

提案モデルによる体積ひずみ増分 dv 、正八面体せん断ひずみ増分 $d\gamma$ は、式(1)で与えられる。

$$\begin{bmatrix} dv \\ d\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sc & Sd \\ 0 & Ss \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} \quad (1)$$

b 値	θ (°)	せん断開始時の間隙比 e_0	破壊時の最大主ひずみ ϵ_1 (%)	破壊時の主応力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_f$
0.000	0	3.030	18.8	3.245
0.268	15	2.845	10.3	3.549
0.500	30	2.964	6.3	3.575
0.732	45	2.738	9.1	4.081
1.000	60	2.816	4.9	3.164

ここに、 Sc 、 Ss 、 Sd はそれぞれ圧縮による体積ひずみ V_c 、ダイレイタンシー V_d 、正八面体せん断ひずみ γ_d の各増分の生じやすさを示す係数であり、 dp は平均有効主応力増分、 dq は正八面体せん断応力増分である。なお、有効応力表示にはプライム符号(′)を付し、全応力表示には付していない。

主応力増分軸方向に直交座標 1, 2, 3 をとった場合のモデルは式(2)で与えられる。

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\epsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{23} \\ C_{31} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{12} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma'_1 \\ d\sigma'_2 \\ d\sigma'_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} d\gamma_{23} \\ d\gamma_{31} \\ d\gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(C_{22}-C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 2(C_{33}-C_{31}) & 0 \\ 0 & 0 & 2(C_{11}-C_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\tau_{23} \\ d\tau_{31} \\ d\tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2)_1$$

$$C_{11} = \{(Sc+3Ss)+2Sd\}/9$$

$$C_{22} = (Sc+3Ss)/9$$

$$C_{33} = \{(Sc+3Ss)-2Sd\}/9$$

$$C_{23} = \{(2Sc-3Ss)-2Sd\}/18$$

$$C_{31} = \{(2Sc-3Ss)+2Sd\}/18$$

$$C_{12} = (2Sc-3Ss)/18$$

$$(2)_2$$

$$Sc = \lambda/(1+e)/p', \quad Sd = \mu/(1+e)/p', \quad Ss = (\nu + \mu/(1+e) \cdot No/(Mo - \eta))/p'$$

上式中 p 、 q 、 η はそれぞれ平均有効主応力、正八面体せん断応力、正八面体応力比($=q/p$)である。なお、式(2)中の λ 、 μ 、 ν 、 No 、 Mo は弾塑性パラメータで、 e はせん断開始時の間隙比である。本報告では、既往の三軸圧縮圧密排水試験の結果を整理して得られた $\lambda=0.45$ 、 $\mu=0.078$ 、 $\nu=0.023$ 、 $No=0.66$ を採用した。

ここで、 Mo は同試験結果における限界状態の正八面体応力比で、この値をモデルにそのまま適用すると、圧縮条件から伸張条件、すなわち、 b 値の増加に伴う強度・変形特性の変化を予測できない。そこで、一連の $\bar{C}TU$ 試験の結果における限界状態の正八面体応力比 $M(=\eta_f)$ と b 値の関係(図-1)から、式(3)を得たので、

これを M_0 の代りに導入し b 値の影響を考慮に入れた。

$$M = -0.173 \cdot b + 0.580 \quad (3)$$

次に、非排水条件への拡張であるが、式(1)に $dv=0$ を代入すると平均有効主応力増分 dp' は式(4)で与えられる。

$$dp' = -\mu / \lambda \cdot dq \quad (4)$$

従って、間隙水圧増分 du は式(5)で与えられる。

$$du = dp - dp' \quad (5)$$

4. 提案モデルの検証

紙数の都合上、 $b=0, 0.5, 1$ の実験結果と従来の提案モデル(図中破線)と修正したモデル(図中実線)を示すことにする。

1) 間隙水圧特性 図-2示した間隙水圧 u と最大主ひずみ ε_1 の関係から、修正モデルは実測値と同様に、間隙水圧 u は b 値にかかわらずせん断の進行に伴い単調増加するが、破壊時の間隙水圧 u_f は b 値の増加に伴い上昇し、 $b \geq 0.5$ になると初期圧密圧力 σ_c の70%前後に収束することが認められる。また、 b 値の増加に伴う間隙水圧 u の初期立上がり勾配が大きくなる傾向は、実測値より修正モデルの方が顕著に認められる。

2) 強度・変形特性 図-3(a)~(c)に有効応力比(σ'_1 / σ'_3)と主ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ との関係を示す。(b)図より、実測値はせん断初期を除けば $d\varepsilon_2=0$ であるが、修正モデルは $\varepsilon_2=0$ であり、 $b=0.5$ で明らかに平面ひずみの状態を満足している。図から、修正モデルでは、 b 値が1に近づくに伴ない、実測の強度を表現できなくなる傾向があったが、修正モデルは、任意の b 値に対し妥当に強度を評価しているのが認められる。なお、破壊時の有効応力比(σ'_1 / σ'_3)_fや最大主ひずみ ε_{1f} は実測値とほぼ同様の結果を得ることを確認している。

5. 破壊規準

図-4に、1次、2次、3次不変量を用いて得られる破壊規準(No.1, 2, 3)と既往の破壊規準、及び実測値、式(3)(No.4)を同一 Oct-面 に示す。図より、モデル1はLadeの破壊規準にほぼ一致し、また、 b 値の増加に伴い、モデル2は強度をMohr-Coulombの破壊規準より低く見積り、モデル3はLadeの破壊規準より高く見積っている。なお、各モデルは、次式で与えられる。

$$\text{No.1} \quad I_2^2 / I_1^2 = K_1 \quad \text{No.2} \quad I_1 \cdot I_3 / I_2^2 = K_2$$

$$\text{No.3} \quad I_2 \cdot I_3 / I_1^5 = K_3$$

6. あとがき

提案した修正モデルは、既報²⁾の試験結果と定性的には一致する結果を得た。現在、変形(圧密・せん断・ダイレイタンス)と安定を総合的に解析しようとの機運が高まりつつあるが、このモデルを用いた地盤解析は、この方面の研究に資するものと思われる。

参考文献

- (1) 棚橋：第33回土木学会年次学術講演概要，Ⅲ-34, pp61-, 1978.
- (2) 棚橋・川口他：第21回土質工学研究発表会，vol.1, pp431-, 1986.

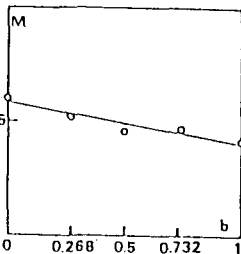


図-1 限界状態の応力比と b 値の関係

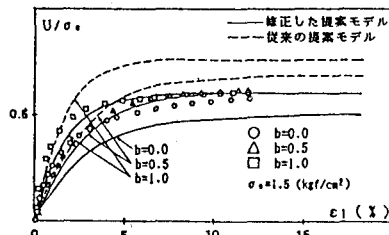


図-2 間隙水圧と最大主ひずみの関係

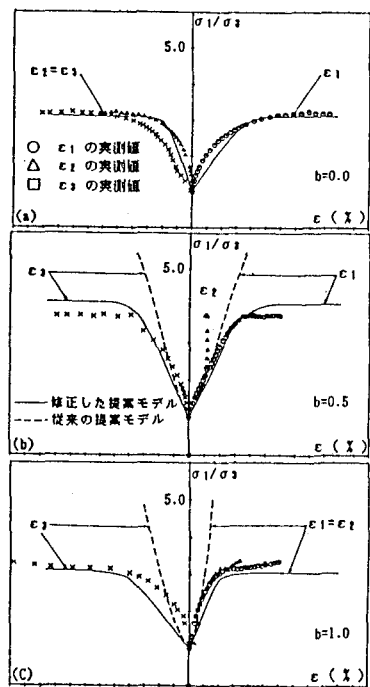


図-3 有効応力比と主ひずみの関係

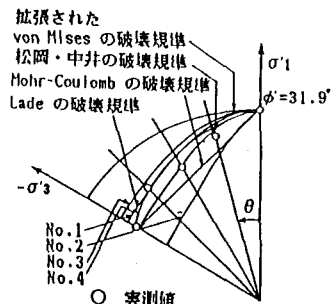


図-4 提案モデル，既往の破壊規準と実測値