

東北大学 正 平井弘義
学 森添貞彦

1. 緒言

著者らは先に粘性土の弾塑性構成式を提案し、その応用として地盤の力学解析を行ってきた。¹⁾ そこで示された構成式は載荷過程に関して導かれたものであるが、除荷過程について実験事実を検討してみるといくつかの問題点が指摘されてくる。その一つとして応力履歴を受けたときの降伏曲面の内側において弾性的挙動を必ずしも示さないことがあげられる。これは降伏曲面の移動硬化によるものと考えられ多くの研究がなされてきているが、その定式化についてはあまり明確になっていないように思われる。

そこで今回特に除荷に関する粘性土の構成式を提案するため、降伏関数及び硬化パラメータについて考察する。さらに実験結果と提案された構成式を比較し、粘性土の除荷における力学挙動とその定式化を検討する。

2. 構成式の誘導

粘性土の構成式を求めるため、降伏関数と硬化パラメータを決定することが必要となる。載荷時においては先に提案した次式を用いる。¹⁾

$$f_e = J_2 + \beta I_1^2 + \gamma I_1 = 0 \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \phi_1 T_{ij}^{(p)} \dot{E}_{ij}^{(p)} / 3 + \phi_2 T_{ij}^{(p)} \dot{E}_{ij}^{(p)} \quad (2)$$

ここに f_e は降伏関数、 J_2 は偏差応力 T_{ij} の 2 次不変量、 I_1 は応力 T_{ij} の 1 次不変量、 β, ϕ_1, ϕ_2 は材料定数、 γ は硬化パラメータ、 $\dot{E}_{ij}^{(p)}$ は塑性ひずみ速度である。

次に除荷時では次式を仮定する。

$$f_u = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - \lambda = 0 \quad (3)$$

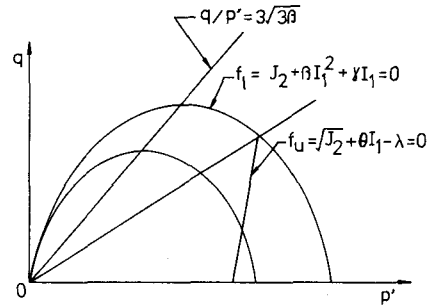


図1. 載荷と除荷における降伏関数

$$\lambda = \phi_3 T_{ij}^{(p)} \dot{E}_{ij}^{(p)} / 3 \quad (4)$$

ここに ϕ と ϕ_3 は材料定数であり、 λ は硬化パラメータである。図1に式(1)と(3)が示されている。式(1)と(2)の材料定数 β, ϕ_1, ϕ_2 は既に求められているので、今回式(3)と(4)の材料定数 α, ϕ_3 を実験結果を用いて決定する。

3. 除荷時における材料定数の決定

用いた試料は白石市の寿山から採取した粘性土であり、含水比 20% に調整した後、モールド内で湿潤密度 1.9 t/m^3 に突き固めて作成した。いま塑性ひずみ-応力関係は Prager によると次式により与えられる。

$$\dot{E}_{ij}^{(p)} = \frac{1}{h} \frac{\partial f}{\partial T_{mn}} T_{mn} \frac{\partial f}{\partial T_{ij}} \quad (5)$$

$$h = - \frac{\partial f}{\partial \lambda} \frac{\partial f}{\partial E_{kl}^{(p)}} \frac{\partial f}{\partial T_{kl}} \quad (6)$$

式(3)と(4)を式(5)に代入すると次式をうる。

$$\dot{d}^{(p)} = - \frac{\dot{\gamma} - 3\sqrt{3}\alpha\dot{p}'}{9\phi_3\dot{p}'} \quad (7)$$

$$\dot{v}^{(p)} = \frac{\dot{\gamma} - 3\sqrt{3}\alpha\dot{p}'}{\sqrt{3}\phi_3\dot{p}'} \quad (8)$$

ここに $d^{(p)}$ は偏差塑性ひずみ、 $v^{(p)}$ は体積塑性ひずみ、 $\dot{\gamma}$ は軸差応力、 $\dot{p}'$ は平均主応力である。図2には $\dot{p}' = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ の一定平均主応力下の排水

試験の結果が示されている。等方硬化を仮定すると図1の左の内側では弾性域となるわけであるが、図2より除荷においても体積変化が生じており、これは塑性変形によるものと考えられる。また2回目以後の載荷・除荷においてはほぼ弾性的挙動を示していると思われる。これらのことより1回目の除荷において体積ひずみは塑性によるものとし、偏差ひずみは弾性によるものが支配的であると仮定すると、式(7)と(8)を図2の実験結果に適用し次の値を得る。

$$\alpha = 1.50, \quad \beta = -5.77 \times 10^2 \quad (9)$$

図3に平均主応力 $p' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 一定の場合の実験結果を示す。体積変化は $p = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ のときより大きめにでており、この傾向は理論解式(8)と一致する。図2と3の中に表示される破線は式(8)と(9)より求められる理論式である。

4. 載荷・除荷における間げき水圧の発生と定式化
繰り返し応力を受けるとき間げき水圧が上昇してゆくことが知られている。これを本理論によって定式化することを考える。弾性体積ひずみは次式による。

$$\epsilon_v^{(e)} = 3 \epsilon_1 / I_1, \quad \gamma = -0.0041, \quad (10)$$

また塑性体積ひずみは式(1)~(6)を用い、非排水条件 $\dot{\epsilon}_v = 0$ より三軸圧縮時に對する有効応力 p' と応力の関係が微分方程式として得られる。図4と5に実験値と理論値を示す。ある程度は定量的にとらえていると思われるが、粘性土の場合間げき水圧の発生が時間に依存することと考慮する必要があり、時間効果を組み入れた粘弾/塑性体として解析してゆくべきであろうと考える。

参考文献

1) 平井他4名, 第17回土質工学研究発表会講演概要集, 1982.

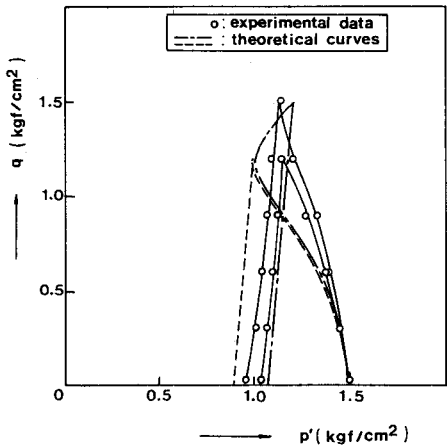


図5. 載荷・除荷における有効応力経路

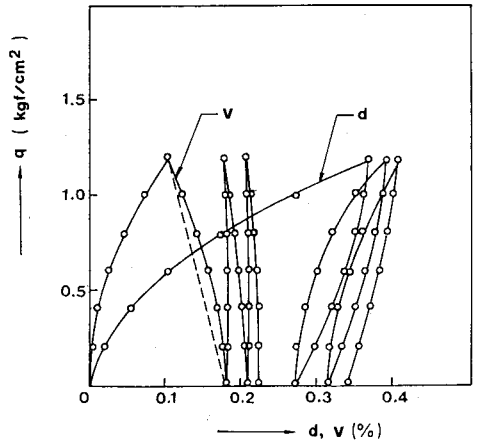


図2. 平均主応力一定下の応力-ひずみ関係

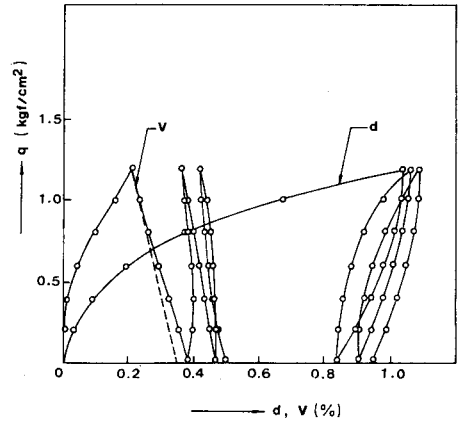


図3. 平均主応力一定下の応力-ひずみ関係

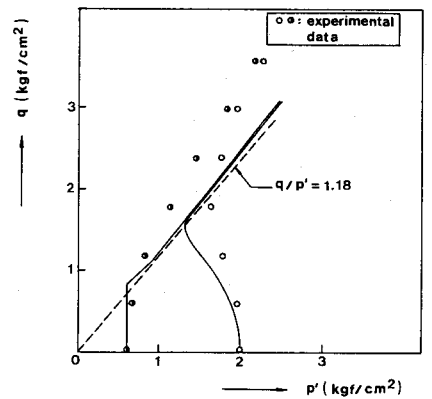


図4. 正規及び過圧密粘土の有効応力経路 (過圧密粘土については 1.5 kgf/cm^2 で等方圧密後、 0.6 kgf/cm^2 までは除荷した。)