

大阪大学工学部 正員 〇松井 保
カリフォルニア大学
バークレー土木工学科 J.K. ミッチェル

1 まえがき

土の力学的挙動のメカニズムに対する微視的物性論的概念は十分確立されたとはいえない現状である。土粒子間相互作用のメカニズムを明らかにし、土のせん断抵抗に關する普遍的概念を得るためのアプローチの一つとしてレートプロセス理論が用いられ、土のせん断抵抗力の発生機構に対する微視的概念が開発されてきた。その結果、多数の1次結合からなる凝着を伴う土粒子間接触が存在し、この凝着による結合力が、含水量の非常に大きい粘土・水系以外の固体的あるいは半固体的状態の土に対して、せん断抵抗力の基本的な発生源となることが明らかにされている。また、粘土粒子に対する固體間接触の存在に対する物理的証拠の一つとして、走査型顕微鏡により観察された粘土粒子表面に残された摩擦痕がすでに示されている。

本報告は、上記の結果をふまえて、土のせん断機構の微視的概念をさらに発展させ、せん断時の土粒子間応力および土の「真の摩擦角」について考察を加えるものである。

2 土のせん断抵抗力の微視的モデル

土のせん断抵抗力の基本的な発生源は、砂粒子のみならず粘土粒子に対しても、土粒子間接触と考へられる。粘性土に対するアコースティックエミッション(AE)の挙動によつて、粘土粒子間接触の存在は新するもう一つの物理的証拠が得られる。すなわち、もしせん断中の粘土土試体中において AE が測定されるならば、その結果はせん断時の粘土粒子間接触をさらに裏づけるものである。せん断時の AE は土粒子間摩擦により生じるものであり、吸着層間の接触のみによつては生じないと考へられるからである。図-1 は、最適含水量で締固められた4種の粘性土に対して三軸クリープ試験によつて得られた AE 発生数と応力レベルとの関係を示している。この図から、AE は粘性土においてもくにベントナイトにおいてさえも観察されることが明らかにされている。

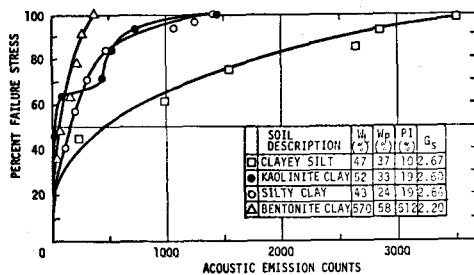


図-1

つぎに、土粒子間接触の接合部に作用する垂直力に着目した土のせん断抵抗力の微視的モデルを示す。図-2に示すように、有効主応力 σ'_1 , σ'_3 が作用する軸差応力状態にある土要素を微視的観察から3つの状態、すなわち等方的平均有効主応力 σ'_m を受ける要素、軸差応力 $(\sigma'_1 - \sigma'_m)$ および $(\sigma'_3 - \sigma'_m)$ を受ける要素、および外力が作用しない要素に分割して考へる。単位面積当りの土粒子接合数を S_s 、1接合長に作用する垂直力を P 、土要素に外的に作用する等方的垂直応力による P の成分を $P_{ext,n}$ 、同じく軸差応力による P の成分を $P_{ext,d}$ 、土粒子間相互作用による P の成分を P_{int} 、1接合長における真の接触面積を A_c 、 $P_{ext,n}$ 、 $P_{ext,d}$ および P_{int} によつて生じる A_c の部分をそれぞれ $A_{cent,n}$ 、 $A_{cent,d}$ および A_{cent} 、土粒子の降伏応力を σ_y とする。定義より、

$$P = P_{ext,n} + P_{ext,d} + P_{int} \quad (1) \quad A_c = A_{cent,n} + A_{cent,d} + A_{cent} \quad (2)$$

摩擦の凝着理論により、

$$P = \sigma_y A_c \quad (3)$$

$$P_{ext,n} = \sigma_y A_{cent,n} \quad (4)$$

$$P_{ext,d} = \sigma_y A_{cent,d} \quad (5)$$

$$P_{int} = \sigma_y A_{cent} \quad (6)$$

原子オーダーの微視的結合数 N が

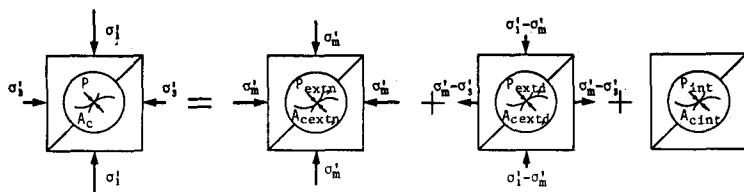


図-2

土粒子間の真の接触面積に比例すると仮定し、その比例係数を α^* とすれば、 $S = \alpha^* S_s \cdot A_c$ (7)

実験的にすでに明らかにされているように、せん断強さ T_f は結合数 S に比例するつて、 $T_f = f_f \cdot S$ (8)

ここに、 f_f は1原子結合に作用する破壊時のせん断力である。式(7)を式(8)に代入し、式(1)および式(3)を用いれば、次式が得られる。

$$T_f = \left(\frac{\alpha^* f_f}{G_y} \right) \cdot S_s \cdot P = \left(\frac{\alpha^* f_f}{G_y} \right) \cdot S_s (P_{ext,n} + P_{ext,d} + P_{int}) \quad \text{.....(9)}$$

一方、破壊に至るまでのせん断抵抗力 T に対しては、紙面の都合で詳細は省略するが、式(9)中の f_f を f に置きかえるだけで同様の表現が得られる。ただし、 f は1原子結合に作用するせん断力で、せん断ひずみの増加とともに双曲線的に増加し、破壊時には f_f に達する。

③ せん断時の土粒子間応力と土の“真の摩擦角”

P_{o1} 成分 $P_{ext,n}$ は平均全主応力 σ_m と等価間隙圧 $\bar{u}$ によって与えられ、 $P_{ext,d}$ は土構造のダイレイタンシーによる垂直力 P_D によって与えられる。一方、 P_{int} は主として、過圧密によって生じるような応力履歴による垂直力 P_H 、ファンデルワールスカや静電的引力によって生じるような土粒子間引力 P_A 、水和作用や静電的及発力によって生じる土粒子間及発力 P_R 、不飽和土における土粒子間のサクション P_s 、およびセメンテーションによる垂直力 P_c によって与えられると考えられる。したがって、概念的に次式が得られる。

$$P = P_{ext,n} + P_{ext,d} + P_{int} = (\sigma_m - \bar{u}) / S_s + P_D + P_H + P_A + P_R + P_s + P_c \quad \text{.....(10)}$$

($P \cdot S_s$) は単位面積当たりの土粒子間力すなわち粒子間応力を表わし、これを σ'_c と書けば、式(10)は次式になる。

$$\sigma'_c = (\sigma_m - \bar{u}) + \sigma'_{Dc} + \sigma'_{Hc} + \sigma'_{Ac} + \sigma'_{Rc} + \sigma'_{sc} + \sigma'_{cc} \quad \text{.....(11)}$$

ここに、 σ'_{Dc} 、 σ'_{Hc} 、 σ'_{Ac} 、 σ'_{Rc} 、 σ'_{sc} および σ'_{cc} はそれぞれダイレイタンシー、応力履歴、土粒子間引力、土粒子間及発力、サクションおよびセメンテーションに起因する粒子間応力である。

式(10)および式(11)を式(9)に代入すれば、それぞれ次式が得られる。

$$T_f = \left(\alpha^* f_f / G_y \right) \{ \sigma'_m + S_s (P_D + P_H + P_A + P_R + P_s + P_c) \} \quad \text{.....(12)}$$

$$T_f = \left(\alpha^* f_f / G_y \right) (\sigma'_m + \sigma'_{Dc} + \sigma'_{Hc} + \sigma'_{Ac} + \sigma'_{Rc} + \sigma'_{sc} + \sigma'_{cc}) \quad \text{.....(12')}$$

式(11)の σ'_c を“真の有効応力”と考へ、”真の摩擦角”を ϕ^* で表わすと、 $T_f = \sigma'_c \tan \phi^*$ (13)

式(12')と式(13)と比較すれば、”真の摩擦角”は次式によって微視的物性論的に表現される。

$$\phi^* = \tan^{-1} \left(\alpha^* f_f / G_y \right) \quad \text{.....(14)}$$

式(14)は、一つの土に対しては ϕ^* の値が一一定であり、異なる粒子紋物に対しては変わりうることを示している。

普通の土に対する α^* 、 G_y の概略値はそれぞれ $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ および 10^3 kgf/cm^2 であり、 f_f の値は実験結果より約 $5 \times 10^{-8} \text{ gf}$ であるので、これらの値を式(14)に代入すれば、 $\phi^* = \tan^{-1}(0.25) = 14.0^\circ$ (15)

Chattopadhyay¹⁰⁾ は、残留応力状態の“真の摩擦角” ϕ'_r を実験的に測定した。その際、”真の有効応力”としては $\sigma^* = \sigma - u_w - R + A$ (16) を用いたが、その結果モンモリロナイトに対して $\phi'_r = 8.5^\circ$ 、カオリナイトに対して $\phi'_r = 11^\circ$ が得られている。これらの値が式(15)の ϕ^* の値に概略一致していることは、式(14)で表わされる“真の摩擦角”の微視的表現の妥当性を支持するものである。

本研究は財団法人長島学術振興財団海外派遣援助によるものであり、同財団に深甚なる謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Mitchell J.K. et al., "Bonding, Effective Stresses and Strength of Soils," Jour. of S.M.F.D., ASCE, Vol. 95, No. SM15, 1969, pp. 1219-1246
- 2) Andersland O.B. et al., "Soil Deformation Rates and Activation Energy," Geotechnique, Vol. 20, No. 1, 1970, pp. 1-16.
- 3) Matsui T. et al., "Flow Mechanism of Clay-Water System and Microscopic Meaning on Shear Parameters of Soils," Proc. of Specialty Session 9, 9th ICSMFE, 1977, pp. 243-252.
- 4) 伊藤 和彦, "粘土の流動破壊に関する研究," 日本会議集 第23巻, 1975, pp. 101-123
- 5) 松中 伊藤, "粘土系水素の流動機構に関する基礎的研究," 日本会議集 第24巻, 1975, pp. 41-51.
- 6) 松中伊藤 阿部, "土のせん断抵抗力の発生機構について," 第32回土壌学会講演会 III, 1976, pp. 117-118
- 7) Matsui T. et al., "On the Existence of Solid-to-Solid Contact between Clay Particles," Proc. of Specialty Session 9, 9th ICSMFE, 1977, pp. 278-300
- 8) Koerner R.H. et al., "Acoustic Emission Behavior of Cohesive Soils," Jour. of G.E.D., ASCE, Vol. 103, No. GTB, 1977, pp. 837-850
- 9) Bowden F.P. et al., "The Friction and Lubrication of Solids", Clarendon Press, Oxford, 1954.
- 10) Chattopadhyay R.K., "Residual Shear Strength of Some Pure Clay Minerals," Ph.D. Thesis, Univ. of Alberta, Edmonton Canada, 1972.