

序 自然斜面の安定、切り取り地盤の安定、アースダムの引張り裂発生などの工学的問題、および、せん断時に発揮される粘着抵抗力の評価などの物性論的問題に対しても、負応力を含めた低応力下での土の挙動の解明が要求されている。土の引張強度を測定するために採用されている方法に、①圧裂試験^(2), 3, 4, 5)、②曲げ試験^(6), 7)、③直接一軸引張試験^(8), 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)、および④管型試体を用いた三軸伸張試験によるものがある。①は、コンクリートの引張強度を評価するために赤土⁽¹⁷⁾により煮染されたものであるが、圧縮時と引張時に同じ弾性定数をもつような完全弾性体材料にのみ適用される⁽¹⁸⁾。また、供試体内では、二軸応力状態（最大主応力：圧縮）であり、弾性体仮定を満足する破壊のメカニズムは知られていて、土に対する適用には注意を要する。②の方法も *Ajazi*⁽¹⁰⁾ の研究を除いて、材料が弾性体である場合に引張強度は求められる。③は、原理的には最も単純であるが、試験法、装置に特殊性を要する。以上の方法は、いづれも締め固め土に対して適用されていて、有効応力に関する議論は行われていないが、*Bishop & Garga*⁽¹⁶⁾ に提案された④の方法は、負有効応力を発生させることができる利点がある。ところが、供試体内のひずみ・応力の分布が均一でないため、応力ひずみ特性を調べる目的に対しては、結果の解釈がむづかしい。さて、土の負応力下の挙動を解明するに際して、(i)有効応力が測定できること、(ii)単に引張強度のみならず、応力ひずみ特性が重要である、という認識に立てば、④の試験法が最もすぐれていると思われる。さらに、粘着抵抗力の評価についても、図1に示すように、 $\sigma_1 > 0$ 、 $\sigma_3 < 0$ となる有効応力状態が必要条件であり、④の試験法で可能である。くびれ部の軸方向直交断面に作用する垂直応力の平均値 $\bar{\sigma}$ は、軸方向に沿って、図2に示すように分布し、断面の最小主応力： σ_E がある値（ > 0 ）に達すると、負の値となり得ることがわかる。次式：

$$\sigma_0/\sigma_E = (1 - \sigma_r/\sigma_E)/r_0 + \sigma_r/\sigma_E, \quad r_0 = A_0/A_E < 1$$

から明らかのように、せん断中の断面面積比 r_0 を正しく評価できれば σ_0 を計算することができる。筆者らは、ひずみ・応力非一様性を考慮して、 r_0 を決定する補正法を提案し、それにより合理的な結果が得られることを報告した⁽²²⁾。本報告は、そのような基本的な予備実験・考察の成果に基づいて、正から負の有効主応力下での過圧密粘土の破壊条件およびそのメカニズムを解明することを目的としている。

実験 試料は通称藤の森粘土であり、繰り返し後再圧密したものである。図2に示したような管型試体に整形後、所定の最大圧密圧力 σ_{cmax} まで圧密後膨張させ、側圧一定の三軸伸張試験を排水条件・ひずみ制御で行う。変形速度は、16000分/10mmまたは7200分/10mmとし、せん断応力荷重速度が太い部分に比べて大きいくびれ部の排水条件に万全を期している。同一応力条件について、補正のために、円柱および管型両試体で試験を行っている。

結果 図3に、補正後の代表的応力ひずみ関係を示した。同図から、負応力発生後は、補正軸ひずみ（くびれ部のひずみ）が増大しつづけることがわかる。図4に

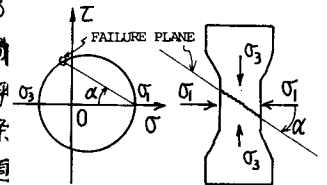


図 1

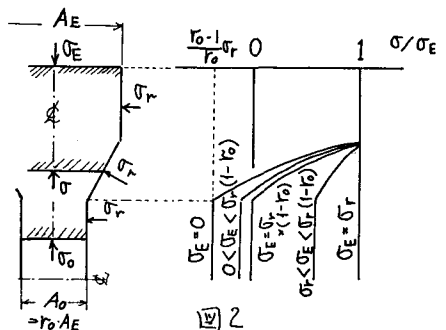


図 2

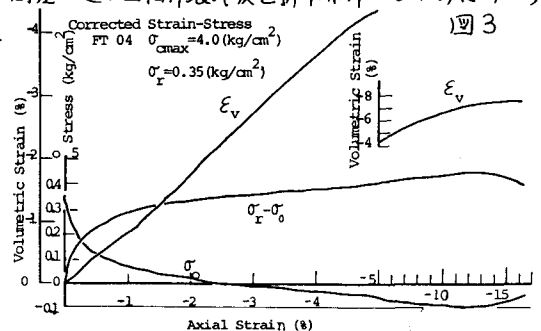
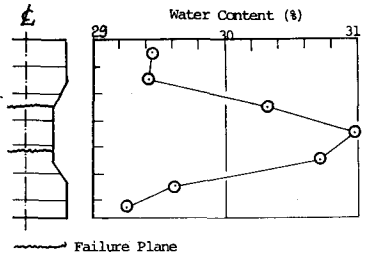
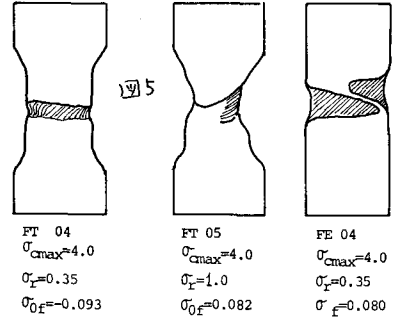
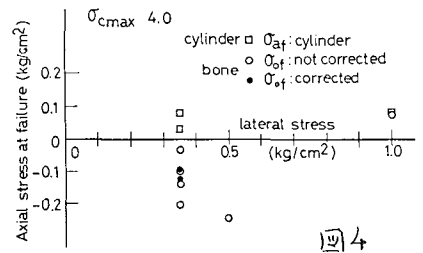


図 3

$\sigma_{cmax} = 4.0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ の場合の破壊時の応力状態を示す。Iyer⁷⁾によれば、乱さない試料 (Drammen plastic clay) の場合、低応力下で引張試験時の破壊包絡線が先行圧密履歴による構造の変化に大きく影響を受けるが、このような低応力下で破壊包絡線の圧密履歴、応力レベル依存性については、より系統的な実験により検討中である。図5に破壊後の供試体形状を示す。負応力が発生した場合の破壊面はいつも軸方向にほぼ直交で引張による破壊を、一方負応力が発生しない場合の破壊面は、供試体形状 (円柱又は骨型) に拘らず、ある角度を成しており、せん断破壊であることを示している。負応力発生時のモールの応力円は、模式的に図1のように表わすが、このとき引張破壊 ($\alpha = 0$) したということは、せん断に対する抵抗が、全て発揮される前に引張応力が最大値に達して破壊したことを意味する。また、Iyer⁷⁾の結果では、負応力が発生しない場合においても $\alpha = 0$ となることがあり、低応力下では、せん断応力変化に伴う局所的負有効応力がミクロな引張き裂を発生させ全体的な引張破壊面の成長に至りより高い垂直応力下では、このようなミクロな引張き裂の発生が抑えられる全体としてより静的挙動を示すと解釈されている。より詳細な検討を要する。図6に、試験終了時の、供試体軸方向含水比の分布を示す。せん断応力レベルが卓越し、平均有効応力が小さいところにおいては、グレイランシーと圧密の効果により、高い含水比が明らかにされている。破壊面が、くどく部に集中していることを意味するが、必ずしも骨型供試体全体にわたり一様とする仮定は正しくないことになる。



考察 実験的に土の引張強度は、低応力下で調べることがわかったが、例えは、図4のように、同じ圧密履歴をもつ試料に対しては、結果はばらつきが見られる。特に低応力 ($\sigma_r = 0.35 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$) のもとについては、高応力 ($\sigma_r = 1.0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$) 下で円柱、骨型両試料に対して同じ強度値を示しているのに対して、ばらつきが目立つ。また、図5において、FT04、FE04は、ともに $\sigma_r = 0.35 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ 、 $\sigma_{cmax} = 4.0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ であるに拘らず、破壊モード従って、強度の符号と変っている。本来的に、採用した低応力域においては、せん断・引張り破壊状態が共存する可能性も考えられるが、データの集積を得る、結論は、なお不十分。

謝辞 御指導を受けている、京都大学防災研究所柴田徹教授に、心より謝意を表します。最後に、本研究の一部は、元本学学生 (現日本IBM (株)) 井上健氏の卒業特許研究として行われたことを記す。

参考文献

- 1) EDEN, W.J. and MITCHEL, J., Can. Geotech. J., Vol. 7, 1970, pp. 285-296
- 2) EISENSTEIN, Z. et al., Proc. Symp. Appl. Finite Element Method Geotech. Eng., U.S. Waterw. Exp. Stn., Vicksburg, pp. 431-456, 3) NARITA, K. & OHNE, Y., Soils & Foundations, Vol. 18, No. 1, 1978, pp. 11-24, 4) LEONARDS, G. A. & NAARAIN, J. Proc. ASCE, Vol. 89, SM2, pp. 47-98, 5) LEE, K. L. & SHEN, C. K., Proc. ASCE, Vol. 9, SM1, pp. 139-166, 6) CONLON, R. J., Can. Geotech. J., Vol. 3, 1966, pp. 113-144, 7) IYER, T. S. R., Can. Geotech. J., Vol. 2, 1975, pp. 70-83, 8) NARAIN, F. J. & RAWA, T. P. C., Proc. ASCE, Vol. 98, SM6, pp. 2185-90, 10) AJAZ, A. & PARRY, R. H. G., Proc. ASCE, Vol. 102, GT9, pp. 929-43, 11) VANICEK, I., Proc. ASCE, Vol. 103, GT9, pp. 1028-30, 12) HASEGAWA, H. & IKEUCHI, M., IUTAM Symp., Grenoble, 1964, pp. 405-412, 13) BISHOP, A. W. & GARGA, V. K., Geotech., Vol. 19, 1969, pp. 309-313, 14) KRISHNAYYA, A. V. G. EISENSTEIN, Z., Can. Geotech. J., Vol. 11, 1974, pp. 623-42, 15) COLBACK, P. S. B., Proc. Cong. Int. Soc. Rock Mech., 1st, Lisbon, 1966, pp. 385-91, 16) HELENELUND, K. V., Proc. Geotech. Conf., Oslo, Vol. 1, 1967, pp. 199-203, 17) 伊藤他, 土木学会第29回年講, Ⅲ, 1974, pp. 210-212, 18) 長谷川, 守孝, 土木学会第25回年講, Ⅲ, 1970, pp. 175-176, 19) 長谷川, 池内, 土木学会第17回年講, Ⅲ, 1962, pp. 33-34, 20) 赤木, 土木学会誌, 29, 11, 1943, pp. 777-787, 21) 淡路, 佐藤, 材料, Vol. 27, No. 255, 1978, pp. 349-355, 22) 清水, 井上, 土木学会南西支部年講, 1978, pp. Ⅲ-9-1-2