

セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性 VII —有効応力法による整理—

Mechanical Properties of Saturated Soft Clay Improved by Cement-Mixing VII
—Analyses by Effective Stress Method—

小林 晃*・龍岡 文夫**
Akira KOBAYASHI and Fumio TATSUOKA

1. 緒 言

足立ら⁹⁾によると、軟岩の一種である大谷石のような多孔質凝灰岩でも、有効応力の原理は成り立っている。一方、セメント改良土は多くの点で軟岩と力学特性が似かよっているところがある。したがって、セメント改良土でも有効応力を用いて排水試験結果と非排水試験結果を統一的に整理できるものと考えられる。

2. 正規圧密粘土の力学特性

上述の作業を行うためには、未改良土、すなわち粘土自身の力学挙動を知っておく必要がある。そこで、未処理粘性土を含水比約 150% の状態でよく練り返した後、予圧密槽（内径 20 cm、高さ 37 cm）内で約 10 日間真空脱気してから、同一の予圧密槽内で 0.6 kgf/cm² の上載圧で約 10 日一次元予圧密した。予圧密終了後、供試体を予圧密槽から押し出した後、パラフィンで密閉して、恒温恒室内で一定期間保存して供試体内の含水比が一樣になるのを待った。三軸供試体は直径 5 cm、高さ 10 cm とした。初期圧密応力は 0.1 kgf/cm² とし、これ以降の実験手順はセメント改良土の場合と全く同じとした。排水試験、非排水試験は共に圧密有効拘束圧 σ'_c は 2, 4, 6 kgf/cm² の 3 種類とし、背圧 σ_{BF} は 1 kgf/cm² ないし 2 kgf/cm² とした。このような手順で作った供試体の B 値は、ほぼ 1.0 になることが確認されている（大河内、龍岡¹⁹⁾、図 36 に実験結果を示す。圧密非排水試験の場合はセメント改良土の場合と異なり、 q/σ'_c , $\Delta u/\sigma'_c$ のように圧密有効応力 σ'_c で正規化したパラメーターと、軸ひずみ ϵ_a との関係は、 σ'_c の大きさによらない。これはすでに多くの人々によって報告されているように（たとえば Ladd²⁰⁾）、これは、セメンテーションのない正規圧密粘性土の特徴である。これに対して、圧密排水試験の場合は、 v と ϵ_a の関係は σ'_c の値にはよらないが、 q/σ'_c と ϵ_a の関係は σ'_c の影響をやや受けるようである。しかし、 ϵ_a が 10% 以下では、このような正規化は、他の研究（たとえば柴田²¹⁾）が示すように、成り立つようである。

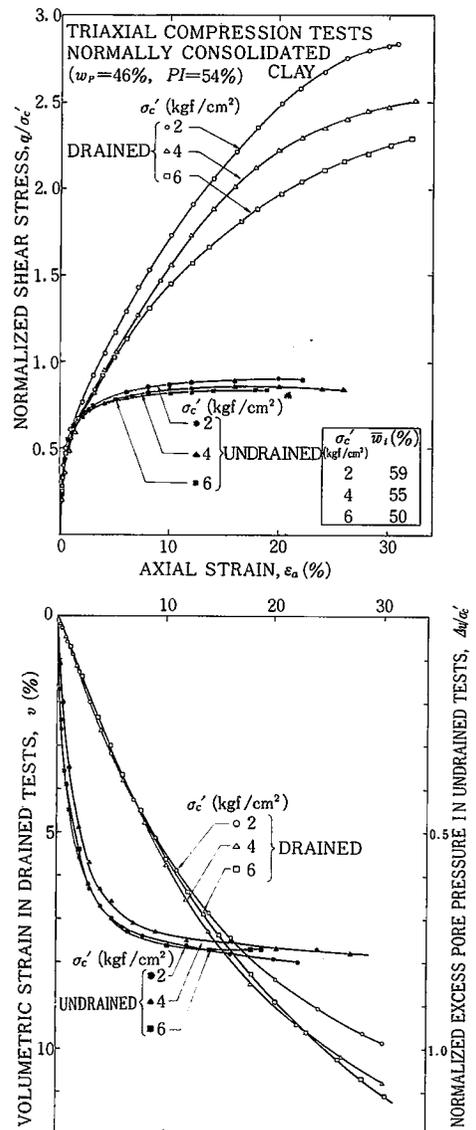


図36 セメント改良土のベース粘土の正規圧密供試体の三軸排水および非排水試験結果

* 日本道路公団

** 東京大学生産技術研究所 第5部

研究 速 報

前にも述べたように強いセメンテーションのあるセメント改良土ではこのような正規化によつては σ'_c によらない応力比とひずみの関係は得られない。セメント改良土は、多くの間隙水を含んだ未圧密状態で固結し、更に圧密が生じてこの間隙の多くは保持されたままであり、この状態からせん断が開始されるため、 σ'_c による正規化は意味をなさないであろう。

今回の粘性土の排水試験では、図 36 に示すように、 ϵ_a が約 30% になつてもピーク強度は得られなかった。したがつて、 $\epsilon_a = 30\%$ のときを一応破壊状態として定義した。図 37 には p - q' 面にこの破壊状態の応力点をプロットしてあるが、非排水試験の破壊包絡線 A'B'C' と、排水試験の破壊包絡線 A''B''C'' はやや一致していない。図 38 は $\log p' \sim w$ (含水比) 関係での全ての試験の状態の変化を示したものである。この図でも破壊状態において排水試験と非排水試験における破壊状態での $w \sim p'$ 関係が若干一致していない。これは、 $\epsilon_a = 20\%$ ですでに非排水試験では十分ピーク応力 (ピーク有効応力比) 状態に達しているが排水試験では $\epsilon_a = 30\%$ でもまだそこまで達していなかったことに対応しているであろう。そこで、 $q/p' = 1.3$ になる $\log p' \sim w$ 面上の点を求めてプロットすると、図 38 上の ⊕印のようになり、排水試験と非排水試験の違いにはあまりよらない $\log p' \sim w$ 関係が得られた。このことは、少なくとも $q/p' = 1.3$ での $p' \sim q \sim w$ 関係は、排水・非排水の条件にあまりよらないことを意味している。すなわち、排水試験と非排水試験における破壊以前および破壊時を含む力学挙動は、同じ関数

$$F(p', q, v) = 0$$

であらわされることを意味し、両試験の結果は有機的に結びつけられていることを意味している。このことは飽和粘性土については Henkel²²⁾ によつて、砂については 龍岡ら²³⁾ によつて、軟岩については 足立ら⁹⁾ によつて確認されている。

3. セメント改良土の実験結果の有効応力法による整理

セメント改良土についても上記のように排水試験と非排水試験との間に有機的な関係が存在し、 F のような関数が存在することが確認されれば、(1) 排水試験結果から非排水での挙動の推定、あるいはその逆、(2) 部分排水試験での挙動の推定等が可能になり、また、(3) セメント改良土の力学的挙動の統一的な記述が可能になる。セメント改良土についてのこのような研究は 寺師ら³⁾ によつて若干なされているが、明確な結論は得られていない。図 39~42 は、今回の研究を $p' \sim q \sim v$ 関係としてまとめたものである。図から明らかなようにいずれの場合もピーク強度状態および残留強度状態で共に $p' \sim q$ 面、 $\log p' \sim v$ 面で排水条件によらない一義的曲線群を作つてい

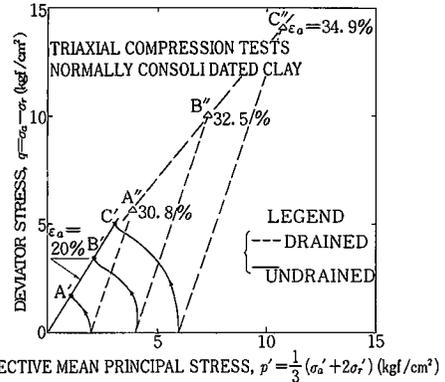


図37 正規圧密粘土の有効応力径路

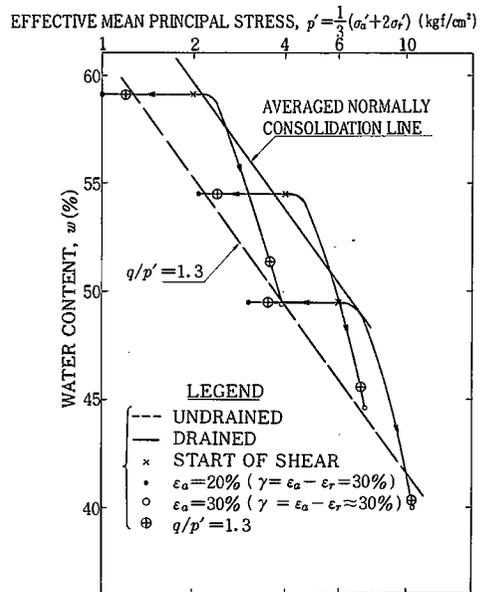


図38 正規圧密粘土の体積変化~有効応力変化関係

る。ただし残留状態での $\log p' \sim v$ 関係は排水試験と非排水試験のデータのオーバーラッピングのある $a_w = 8\%$ と 10% についてのみ示し、データの点は図の簡略化のため $\log p' \sim v$ 面上には示していない。 $\log p' \sim v$ 関係を見ると、等方圧密で $p' < (q_r)_u$ (一軸試験での降伏応力) では圧密量は非常に小さく、 $p' > (q_r)_u$ になると急激に圧密量が増加することが分かる。このように現象が不連続的でも少なくとも $a_w = 8\%$ の時は、ピーク強度時、残留強度時には排水条件によらない一義的な $\log p' \sim v$ 関係があるということは、重要な事実である。また、図 39(a), 40(a) には排水試験で求めた降伏曲線 Y_1 と Y_2 を示している。非排水試験での有効応力径路を見ると、降伏曲線 Y_1, Y_2 の下方では q の増加に伴う p' の減少は小さく降伏はほとんど生じていないことが分かる。し

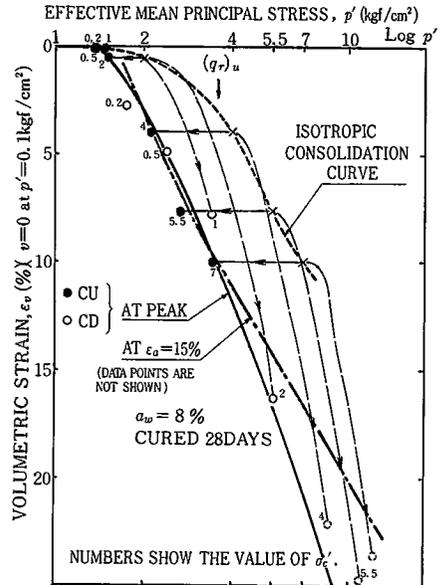
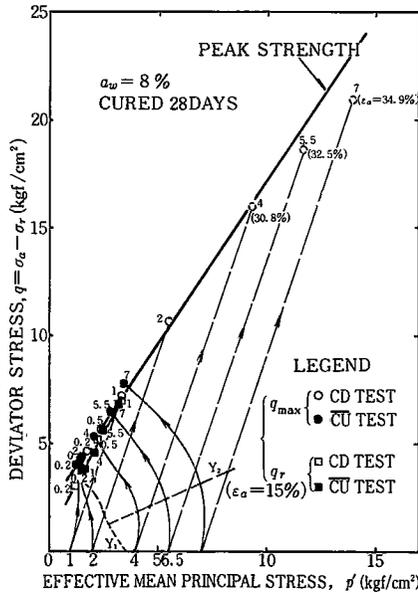


図39 セメント改良土 ($a_w = 8\%$) の (a) 有効応力経路と (b) 体積変化～有効応力変化関係

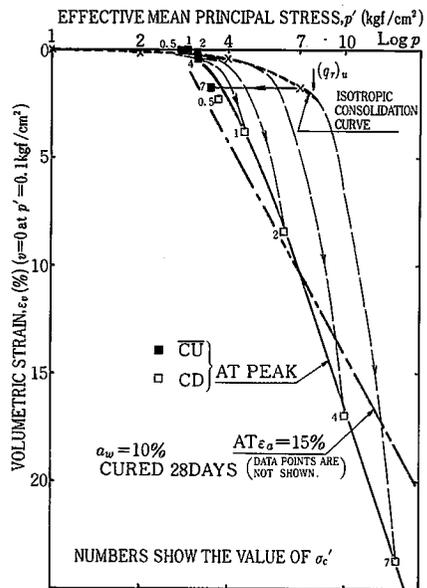
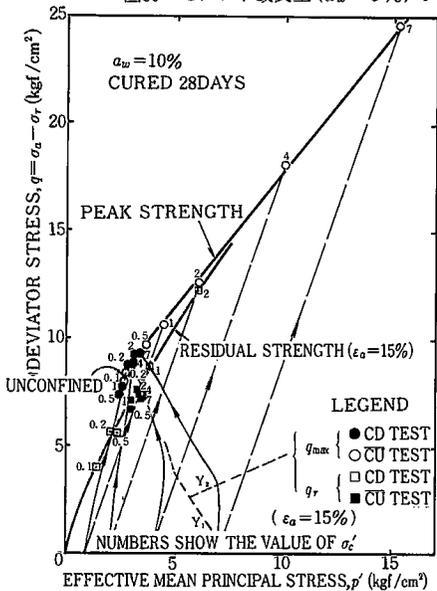


図40 セメント改良土 ($a_w = 10\%$) の (a) 有効応力経路と (b) 体積変化～有効応力変化関係

しかし、降伏曲線に達すると q の増加に伴う p' の減少は大きく、降伏が大きく生じはじめたことを示している。すなわち降伏特性も排水条件によらない有効応力であらわした一義的降伏曲線で規定されているようである。

これらの事実から、セメント改良土でもその変形・強度特性は排水条件によらない有効応力で表示した一義的な破壊基準に従っており、変形に関しても有効応力で表示した一義的な構成関係に従っていることが分かる。こ

これらの有効応力で表示したグラフを見ると、これまでに述べてきたような排水試験と非排水試験で何故変形・強度特性がどのように異なっていたのかが、よく理解できる。例えば、非排水試験で q_{max} , q_R が σ'_c の値によらない場合は、 q_{max} 状態, q_R 状態で有効応力状態(より一般的には $p' \sim q \sim v$ 状態)が σ'_c によらずに同一になっているからである。

研 究 速 報

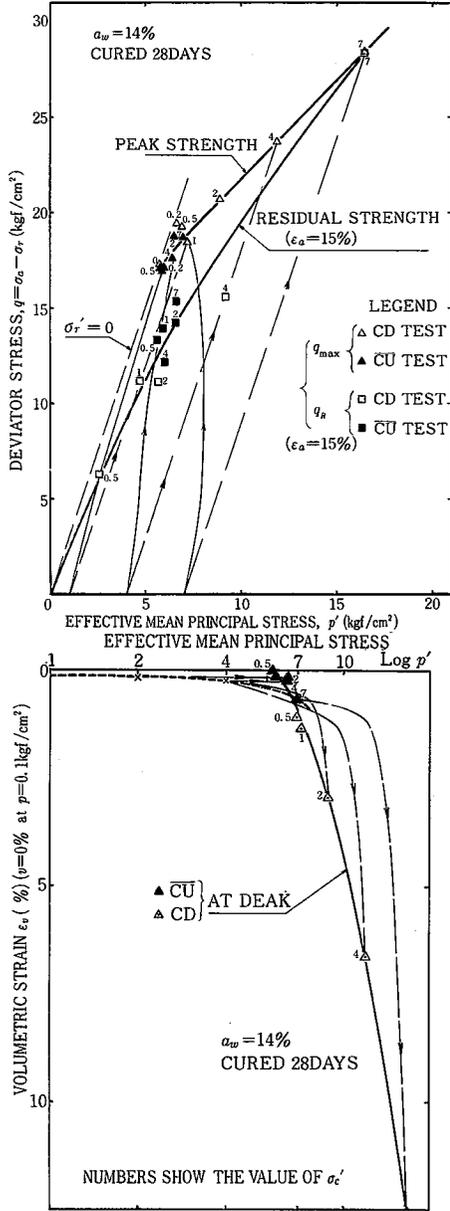


図41 セメント改良土 ($a_w = 14\%$) の (a) 有効応力径路と (b) 体積変化～有効応力変化関係

4. 結 語

以上示したように、セメント改良土でも今回実験した範囲では a_w の値によらず、有効応力の原理が成り立っていることが分った。しかし、非排水状態のせん断挙動を有効応力で整理した実験結果から推定しようとするならば、結局せん断中の有効拘束圧の変化を前もって知っておく必要があるので、有効応力法は設計上はそれほど有利な方法ではないと思われる。(1982年9月20日受理)

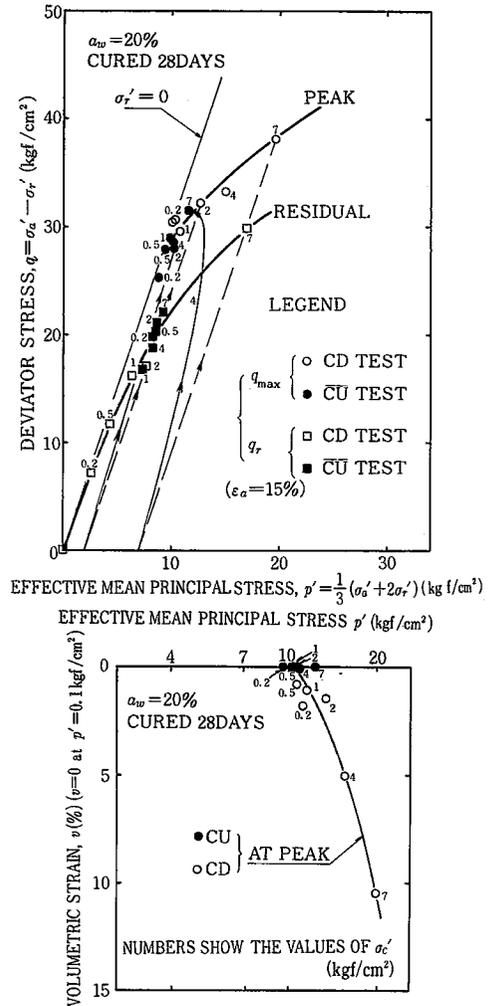


図42 セメント改良土 ($a_w = 20\%$) の (a) 有効応力径路と (b) 体積変化～有効応力変化関係

参 考 文 献

- 19) 大河内保彦・龍岡丈夫 (1982), "粘性土の長期 K₀ 圧密非排水せん断試験", 第 17 回土質工学研究発表会, 沖縄
- 20) Ladd, C. et al. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics," State-of-the-art report, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 421-494
- 21) 柴田徹 (1963), "粘土のダイラタンシーについて", 京都大学防災研究所年報, 第 6 号, pp. 128-134
- 22) Henkel, D.J. (1960), "The relationship between the strength, pore-water pressure, and volume change characteristics of saturated clays," Geotechnique, Vol. 9, No. 3, pp. 119-135
- 23) Tatsuoka, F. and Ishihara, K. (1973), "Stress path and dilatancy performance of sand," Proc. 8th Int. Conf. on SMFE, Moscow