

# 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 III

## ——排水せん断特性——

Mechanical Properties of Saturated Soft Clay Improved by Cement-Mixing III

——Drained Shear Properties——

小 林 晃\*・龍 岡 文 夫\*\*

Akira KOBAYASHI and Fumio TATSUOKA

### 1. 緒 言

セメント改良土の地盤の長期安定性を検討するために、排水条件のもとでのせん断変形強度特性を把握しておかなければならない。また、前報告<sup>10)</sup>で述べた非排水条件の下における特徴あるせん断変形強度特性を有効応力を用いて解析するためには、有効応力状態が明確な排水試験結果を知っておかなければならない。この報告では、まず非排水試験の結果をまとめ、一連の三軸排水試験の結果と、その一軸試験との比較を示す。

### 2. 非排水せん断試験のまとめ

排水せん断特性と非排水せん断特性の相違を明確にするために、まず、非排水せん断特性<sup>10)</sup>のまとめを行う。図10は、非排水せん断試験におけるピーク強度  $q_{max}$  と、圧密有効拘束圧の関係を示したものであり、 $\sigma'_c$  の  $q_{max}$  に対する影響は非常に小さいことがわかる。

今、 $\varepsilon_a = 15\%$  のときの  $q = \sigma_a - \sigma_r$  の値を残留強度  $q_R$  と定義する。 $q_{max}/q_u$ 、 $q_R/q_u$  の値を  $\sigma'_c/q_u$  の値に対してプロットすると図11に示すようになる。 $\sigma'_c < 0.7$  では、 $q_{max}/q_u$  の値は  $a_w, \sigma'_c$  によらずに、ほぼ1.0である。以下、 $\sigma'_c/q_u$  が0.7より大きい小さいかで分けて議論しているが、0.7という数値は、 $a_w = 8\%$  ないし10%に対して求められたものである。 $a_w$  がこれより大きくなると、0.7より大きくなると推定される(詳しくは後述)。 $q_R/q_u$  の値は  $a_w, \sigma'_c$  によらずほぼ一定で約0.85である。一軸試験では  $\varepsilon_a = 15\%$  まで実験はしなかったが実際上  $q_R$  はほとんどゼロであることと好対照である。

$\sigma'_c/q_u$  が約0.7よりも大きくなると、 $q_{max}/q_u, q_R/q_u$  は  $\sigma'_c/q_u$  の増加とともに大きくなる(図11)。これは後に詳しく検討するように、圧密中に一度セメンテーションが破壊され、より稠密な構造になり、より強い物質が形成されたためと考えられる。このことは、 $a_w = 8\%$  の場合

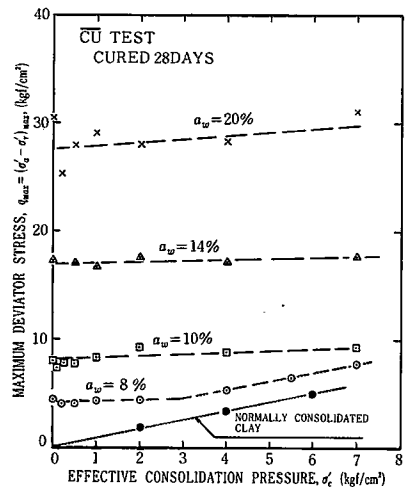


図10 三軸圧密非排水試験におけるピーク強度  $q_{max}$  と圧密有効応力  $\sigma'_c$  の関係

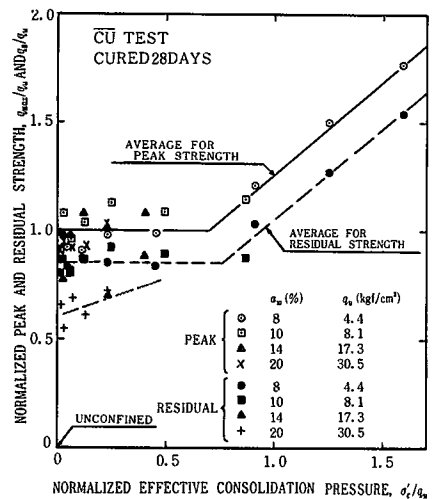


図11 一軸圧縮強度  $q_u$  で正規化した三軸圧密非排水試験におけるピーク強度  $q_{max}$ 、残留強度  $q_R$  と圧密有効拘束圧  $\sigma'_c$  の関係

\* 日本道路公団

\*\* 東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

で  $\sigma'_c/q_u < 0.7$  となる  $\sigma'_c = 0.2, 0.5, 1, 2 \text{ kgf/cm}^2$  のとき、ピーク強度時に  $\sigma'_r \approx 0.0$  となっているが  $\sigma'_c/q_u > 0.7$  となる  $\sigma'_c = 4, 5, 5.7 \text{ kgf/cm}^2$  のときはピーク強度時の  $\sigma'_r$  の値はゼロになっておらず、一定の有効拘束圧が存在していることに対応している(図 6(b), 7(b)<sup>10)</sup>)。後に三軸排水試験結果によって示すがセメント改良土の場合は、このわずかであるが一定の有効拘束圧の存在することによってピーク強度は若干であるが増加する。ここで興味深いことは、図 10 に示すように  $a_w = 8\%$  で  $\sigma'_c > 0.7q_u$  のとき、 $q_{max}$  の値は同一の条件での粘土(未処理土)強度よりも依然として大きいことである(粘土の実験の詳細は後に述べる)。さらに  $\sigma'_c$  を大きくすれば、寺師ら<sup>3)</sup> が報告しているようにセメント改良土の強度が未処理土

の強度と一致してくるかも知れないが、今回の実験の範囲ではそのようなことはなかった。同じ  $\sigma'_c$  に対してもセメント改良土と未処理土では破壊時の有効応力状態が異なっているし、内部構造も同一ではないので、両者の強度が一致するという必然性は必ずしもないと思われる。

3. 実 験 結 果

$a_w = 8\%, 10\%, 14\%, 20\%$  の場合の実験結果を図 12~15 に示す。この場合の特徴はピーク強度についても残留強度についても非排水の場合よりも  $\sigma'_c$  の影響を著しく受けるということである。特に  $a_w$  が小さいほど  $\sigma'_c$  の影響が著しい。図 16 に  $q_{max}/q_u$  と  $\sigma'_c$  の関係を各  $a_w$  の値についてまとめてある。 $a_w = 8\%$  で  $\sigma'_c = 4, 5, 5.7 \text{ kgf/cm}^2$

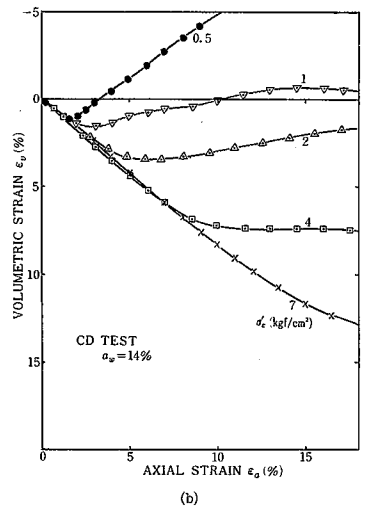
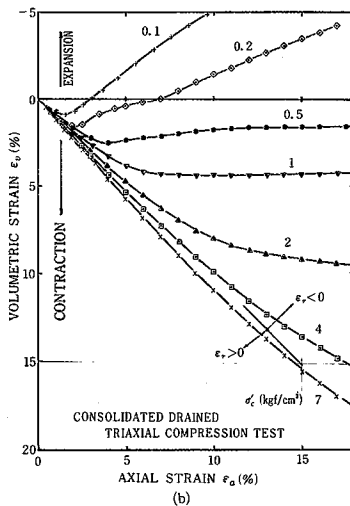
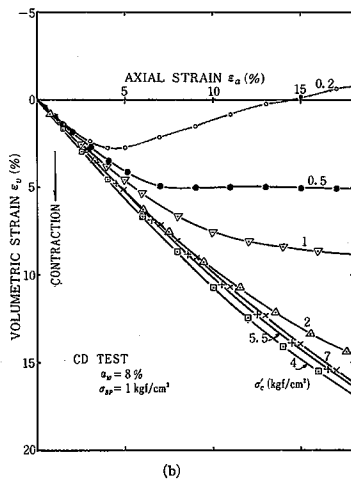
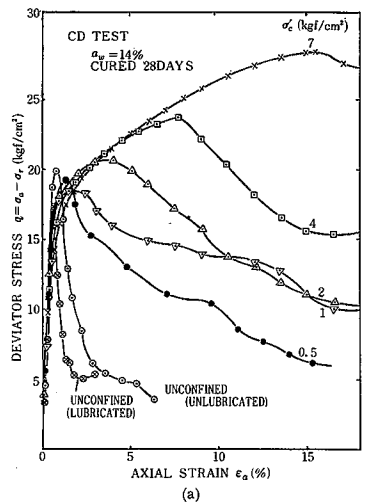
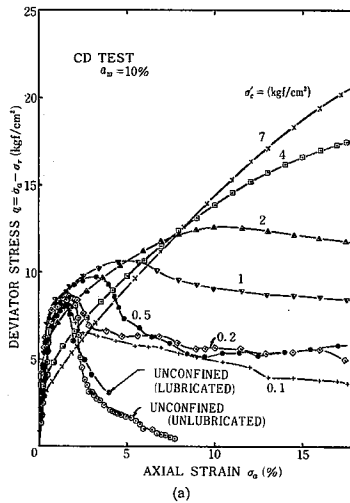
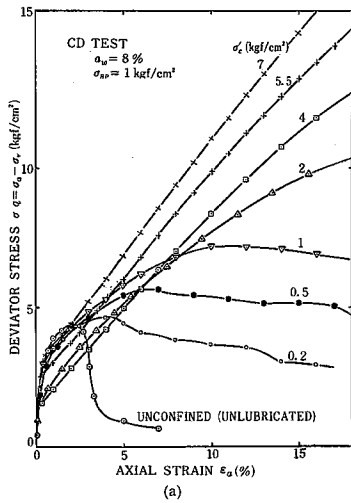


図12  $a_w = 8\%$  のときの三軸圧密排水試験結果

図13  $a_w = 10\%$  のときの三軸圧密排水試験結果

図14  $a_w = 14\%$  のときの三軸圧密排水試験結果

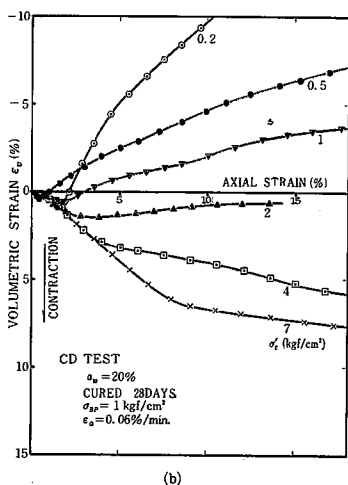
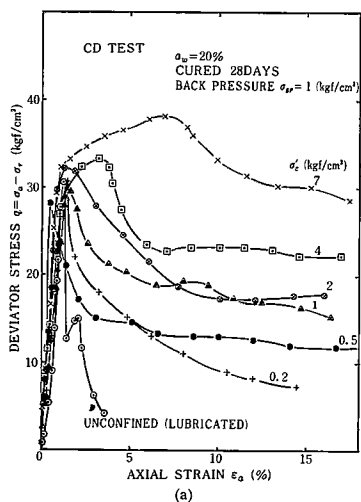


図15  $a_w = 20\%$  のときの三軸圧密排水試験結果

$cm^2$  の場合は軸ひずみ  $\epsilon_a \approx 30\%$  でもまだ  $q$  は最大値に達していないので、そのときの  $q$  の値を  $q_{max}$  としてプロットしてある。図を見て明らかなように  $q_{max}/q_u$  の  $\sigma'_c$  に対する増加率は  $a_w$  が小さいほど大きい。このことは  $a_w$  あるいは  $q_u$  が小さいほど、拘束圧下での排水せん断強度の推定には拘束圧の影響を考慮しなければならないことを意味している。 $a_w$  あるいは  $q_u$  が小さいほど、 $q_{max}$  に対する  $\sigma'_c$  の影響が大きい理由は、 $a_w$  あるいは  $q_u$  が小さいと圧密中およびせん断中にセメンテーションが破壊され、より稠密でより強い構造ができるためと考えられる。このことについては後に詳しく論ずる。

次に注目すべきことは、排水せん断中の体積収縮量(負のダイレイタンス)が著しく大きいことである。これは  $a_w$  が小さく、 $\sigma'_c$  が大きいほど大きい。一方、セメンテ

ーションのない土では一般には、 $q = q_{max}$  のときは体積膨張傾向が最も著しい(正のダイレイタンス程度が最も大きい)が、セメント改良土の場合、 $q = q_{max}$  のときも依然として体積が収縮している。セメント改良土の場合は、セメンテーションがあるため空隙の大きな構造がピーク強度のときまで、かなり保持されているからこのようなことが生ずるのであろう。セメント改良土の負のダイレイタンス傾向の大きさを示す他の事実を挙げると、まず図12(b)で、 $a_w = 8\%$  で  $\sigma'_c = 4.5, 5.7, 7 \text{ kgf/cm}^2$  の場合と図13(b)で、 $a_w = 10\%$  で  $\sigma'_c = 7 \text{ kgf/cm}^2$  の場合では、わずかではあるが、 $\epsilon_v = (\epsilon_v - \epsilon_a)/2$  が正になっている。すなわち、側圧  $\sigma'_r$  が一定であるにもかかわらず供試体はせん断中に横方向にも収縮しているのである。これはせん断によりセメンテーションが破壊され、構造が現在の側圧にさえも耐え得なくなるためであらう。さらに、 $\sigma'_c$  がある値以上になると正規圧密の飽和粘性土(未処理土)よりも体積収縮量が大きくなっている。図17には正規化された拘束圧  $\sigma'_c/q_u$  に対して、せん断中の最大体積ひずみ  $\epsilon_{v \text{ max}}$  と、 $\epsilon_a = 15\%$  のときの体積ひずみをプロットしてある。正規圧密飽和粘土の場合は  $\sigma'_c = 2 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲で  $\epsilon_a = 15\%$  のときの  $\epsilon_v$  は  $\sigma'_c$  の値によらずほぼ一定で平均して約  $7.4\%$  であるが、セメント改良土は  $\sigma'_c/q_u > 0.4$  になると粘性土の場合より体積収縮量ははるかに大きくなる。Fischer, et al.<sup>11)</sup> によると軽度にセメンテーションされた粘土は、過圧密粘土と似て正規圧密粘土よりも負のダイレイタンス傾向が小さくなる。軽度のセメンテーション傾向を受けただけでは圧密中にセメンテーションが破壊されるから、このようなことも生じるのであろう。これに対して、セメント改良土の場合はセメンテーションの程度が高いため圧密中に空隙の大きい構造が保存されており(保存の程度は  $\sigma'_c/q_u$  による)、高い拘束圧の状態に対しても空隙の大きい構造が保持されているため非常に大きい負のダイレイタンス特性を示すものと解釈できよう。 $\sigma'_c/q_u$  の値がある程度以上大きくなると( $a_w = 8\%, 10\%$  で  $\sigma'_c/q_u = 0.7$ )、 $\epsilon_v$  の大きさはほぼ一定になり、 $\sigma'_c/q_u$  がさらに大きくなると、逆に  $\epsilon_v$  は小さくなってゆき、正規圧密粘性土の値に近づいてゆく。これは  $\sigma'_c$  が大きくなると、圧密中のセメンテーションの破壊の程度、すなわち圧密中の体積収縮量が大きくなり、その  $\sigma'_c$  の値に対応した稠密な、あるいはより稠密な構造ができるためであらう。また、図17を見ると、 $\epsilon_{v \text{ max}}$ 、 $\epsilon_c = 15\%$  における  $\epsilon_v$  も  $\sigma'_c/q_u$  の値だけにより  $a_w$  の値にはよらないようである。このことは、 $a_w$  が大きくても  $\sigma'_c/q_u$  さえ十分に大きくすれば、せん断中の体積収縮量は非常に大きくなり得ることを示唆しているものと思われる。すなわち、セメント改良土が

研究速報

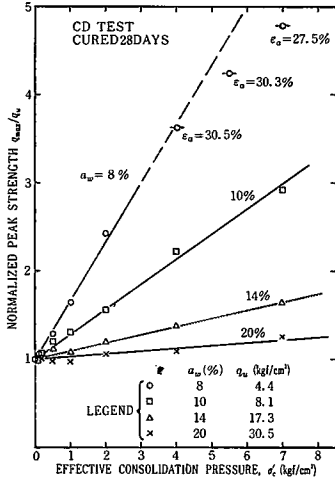


図16 正規化されたせん断強度  $q_{max}/q_u$  と圧密有効拘束圧  $\sigma'_c/q_u$  の関係

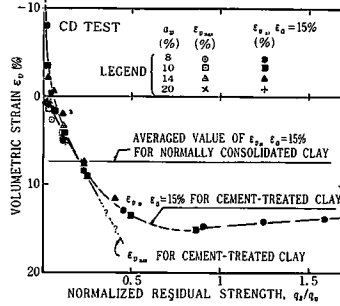


図17 セメント改良土の体積変化 (ダイレイタンシー) 特性のまとめ

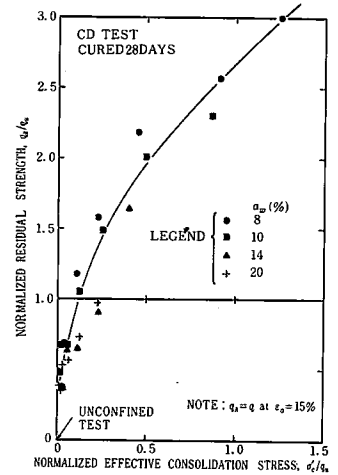


図18 一軸圧縮強度  $q_u$  で正規化された残留強度  $q_r/q_u \sim$  圧密有効拘束圧  $\sigma'_c/q_u$  の関係

ポーラスであることは  $a_w$  あるいは  $q$  の値にはよらない。

次に残留強度  $q_r$  ( $\epsilon_a = 15\%$  のときの  $q$  の値) について見てみよう。図18に示す  $q_r/q_u \sim \sigma'_c/q_u$  関係を見ると非排水せん断の場合と異なり、 $q_r$  の値はどの  $a_w$  の値でも  $\sigma'_c$  の影響を強く受けている。一方、今回の実験の範囲では、一軸試験では、 $q_r$  はほとんどゼロであるが、非常に小さくても  $\sigma'_c/q_u$  がゼロでなければある程度の残留強度が発揮されていることは注目すべきである。すなわち、 $\sigma'_c/q_u$  が小さいほど、 $q_r$  は  $\sigma'_c$  の影響をより強く受ける。このことは前にも述べたように、非排水せん断試験においてピーク強度以降、正のダイレイタンシー傾向が生ずることにより  $\sigma'_c$  がゼロに近い値から若干大きくなることにより残留強度が発揮されたことに対応している。また、図18を見ると  $q_r/q_u \sim \sigma'_c/q_u$  関係が  $a_w$  の値の影響をあまり受けていないことがわかる。この関係を用いれば、 $q_u$  と  $\sigma'_c$  の値から  $q_r$  の概略値を推定できる。残留強度特性については、また後に詳しく触れる。

4. 結 語

セメント改良土を排水条件のもとでせん断すると、非排水条件下でせん断する場合と比較するとはるかに圧密有効拘束圧の影響を強く受け、影響の程度は  $a_w$  が小さいほど大きくなる。また、ピーク強度よりも、残留強度の方が圧密有効拘束圧の影響を受けやすい。さらに、圧密有効拘束圧  $\sigma'_c$  が一軸圧縮強度  $q_u$  の約20%を越えると、正規圧密粘性土よりもせん断時の体積収縮量は大きくなる。(1982年4月8日受理)

参 考 文 献

- 10) 小林晃, 龍岡文夫 (1982), "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 I, II", 生産研究, Vol. 34, No. 7, No. 8
- 11) Fischer, K.P., Andersen, K.H. and Moun, J. (1978), "Properties of an Artificially Cemented Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, pp. 322-331