

セメント混合固結土柱を含む粘性土（複合土）の強度特性

西林 清 茂 松 尾 龍 之
細 谷 芳 己 須 藤 賢
梅 津 喜美夫

An Experimental Study on Strength Properties of Clay Containing a Cement-treated Soil Pile

Kiyoshige Nishibayashi Tatsuyuki Matsuo
Yoshimi Hosoya Ken Sudo
Kimio Umetsu

Abstract

In order to study the mechanical properties of composite ground made by the deep mixing method, unconfined and triaxial compression tests with varying area ratios of cement-treated soil pile to clay (replacement ratio), strength ratios, and confining stresses were carried out on composite soils (consisting of clay and cement-treated soil having different stress-strain curves). The following were found as a result: (1) The stress-strain curve of composite soil approaches the shape of that of cement-treated soil as the replacement ratio becomes higher. (2) As the strength ratio becomes higher, the failure strain of composite soil approaches that of cement-treated soil at low replacement ratio. (3) At a replacement ratio where the failure strain of composite soil is near that of cement-treated soil, the strength of composite soil is close to the failure strength (peak strength) of cement-treated soil and the strength of clay at the failure strain of cement-treated soil is proportional to the area of each. (4) The residual strength of composite soil is influenced by confining stress, but the relation between failure strain and strength of composite soil in case of changing the strength ratio and the replacement ratio is not influenced by the confining stress, etc.

概 要

深層混合工法における複合地盤の力学的性質を調べることを目的として、応力～ひずみ曲線の異なる粘性土とセメント混合固結土を組み合わせた複合土について、その置換率、強度比および側圧を変化させた一軸圧縮、三軸圧縮(UU)試験を行なった。その結果、(1) 複合土の応力～ひずみ曲線は、置換率が大きくなるに従って、固結土の応力～ひずみ曲線の形状に近づく、(2) 複合土の破壊ひずみは、強度比が大きくなるほど小さい置換率で、固結土の破壊ひずみに等しくなる。(3) 複合土の強度は、複合土の破壊ひずみが固結土の破壊ひずみに近い置換率では、固結土の破壊強度(ピーク強度)とその時のひずみ量に相当する粘性土の強度を面積比で足し合わせた値に近い、(4) 複合土の残留強度は側圧の影響をうけるが、強度比や置換率に対する複合土の破壊ひずみおよび強度の関係は側圧の影響をうけない、などがわかった。

1. まえがき

軟弱地盤改良工法の一つに、セメントなどの化学安定剤を軟弱粘性土と均一混合して大きな強度を期待する深層混合処理工法がある。

この工法の特徴として、

(1) セメント改良された混合固結土は、未改良の軟弱な粘性土に比べ、強度が非常に大きく、ピーク時の圧縮ひずみも小さい。

(2) 当工法の改良形状は、一般に、ブロック状、格子状、壁状、杭状などの形状があるが、いずれも未改良の軟弱粘性土が残り、しかも、未改良土部と改良土部の比

率が異なる複合地盤を構成する。

(3) 地盤改良の深さは、現在約 50 m にも及んでおり、固結体は大きな拘束圧を受けることになる。などがある。しかしながら、このような軟弱粘性土と固結土から構成される複合地盤としての力学的特性については、いまだ未解明な点が多く残されている。

本研究は、複合地盤としての強度・変形特性を把握することを目的として、応力～ひずみ曲線の異なる粘性土と混合固結土柱を組み合わせた複合土の強度特性に及ぼす置換率、強度比、側圧の影響について調べたものである。

2. 実験方法

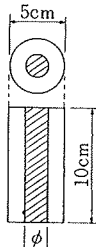
2.1. 対象土の土性および試料調整方法

実験で使用した試料は、千葉県佐倉市白井地区で採取した沖積粘性土であり、その物理的性質は表一に示す

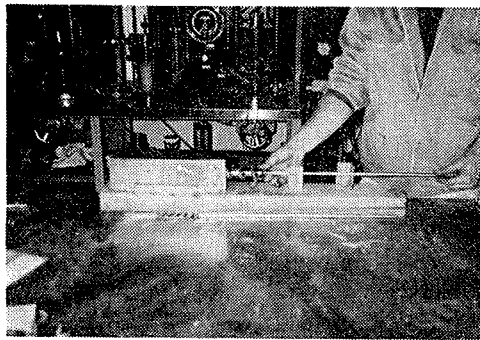
試験項目		白井粘性土	
比重		2.66	
コンテ ンシ ス	液性限界 W_L	91.0%	
	塑性限界 W_p	40.1%	
	塑性指数 I_p	50.9%	
粒 度 組 成	レキ 2mm 以上	0%	
	砂	2mm～0.42mm	0.3%
		0.42mm～0.074mm	1.9%
	シルト 0.074mm～0.005mm	27.2%	
	粘土 0.005mm 以下	70.6%	
コロイド分 0.001mm 以下	10.0%		

表一 物理的性質

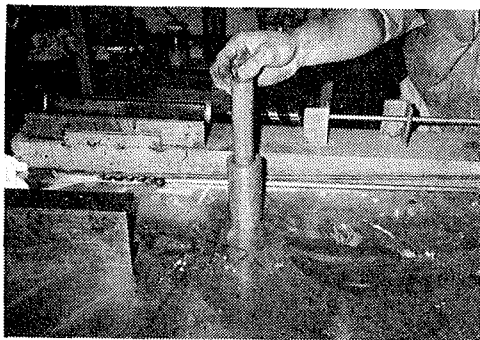
供試体 断面積・A	混合固結土		粘性土	置換率
	直径φ(cm)	断面積 A_p (cm^2)	断面積 A_c (cm^2)	A_p/A (%)
19.63 cm^2	0	0	19.63	0
	1	0.79	18.84	4
	2	3.14	16.49	16
	3	7.07	12.56	36
	4	12.57	7.07	64
	5	19.63	0	100



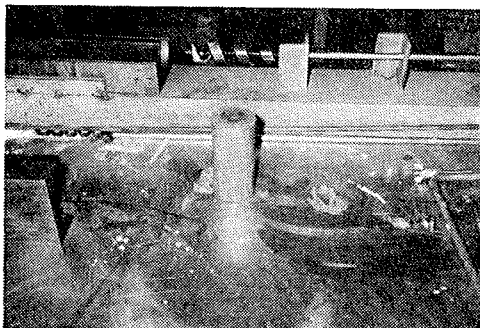
表二 供試体寸法



写真一 粘性土供試体の孔あけ



写真二 混合固結土挿入



写真三 複合土供試体

とおりである。粘性土試料は、含水比100%の調整試料を圧密荷重 1.0 kgf/cm² で再圧密したものである。混合固結土試料は、含水比100%の粘性土調整試料に、セメント、水（水道水）、着色剤を加え、十分に混合した後モールドに入れ、ビニール袋で密封し、温度20°C、湿度90%の養生室で7日間養生を行なったものを使用した。

2.2. 複合土供試体の作製方法

複合土の供試体作製方法は、径 5 cm、高さ 12.5 cm に成形した粘性土に所定径のドリルで孔をあけ(写真一)、同じ寸法径に成形した固結土を先にあけた孔の中に注意深く入れて(写真二)、その後端面を成形して径 5 cm、高さ 10 cm の複合土を作成した(写真三)。

2.3. 試験条件

2.3.1. 置換率 複合土の置換率は表二に示すように固結土の直径を 0, 1, 2, 3, 4, 5 cm と変化させて置換率 $A_p/A=0, 4, 16, 36, 64, 100\%$ の 5 ケースとした。

2.3.2. 強度比 複合土を作成した固結土 (q_{up}) と粘性土 ($q_u \approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2$) との強度比 (q_{up}/q_u) は、固結土のセメント配合を変化させて、約 2.5 倍、5 倍、7.5 倍、10 倍程度の 4 ケースとした。

2.3.3. 側圧 側圧は、0 (一軸圧縮試験)、0.5, 1.0, 2.0, 4.0 kgf/cm² の 5 通りである。

2.4. 試験方法

試験は、写真一に示す三軸圧縮試験装置を用いて、

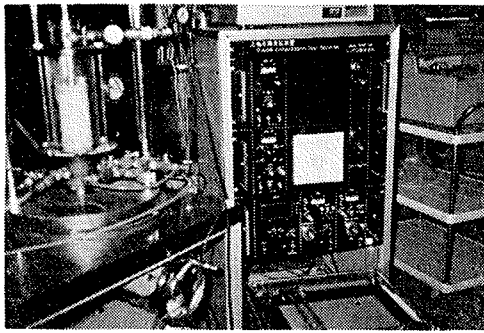


写真-4 三軸圧縮試験装置

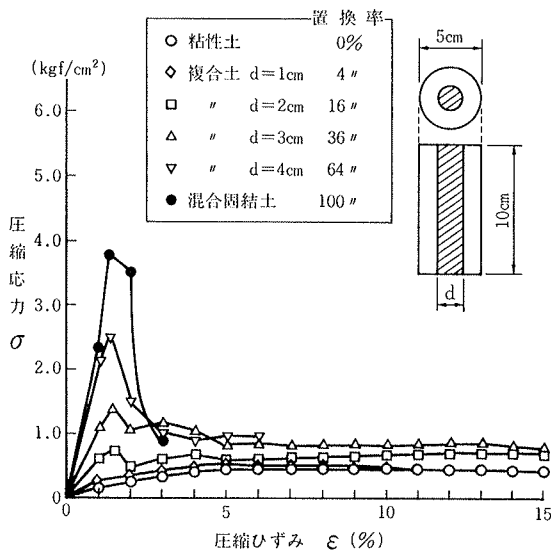


図-1 一軸圧縮試験結果 $\sigma \sim \epsilon$ 関係

軸圧縮速度 1%/min で、一軸圧縮試験、三軸圧縮（非圧密非排水、UU）試験を行なった。

4. 実験結果と考察

4.1. 複合土の応力 (σ) ~ ひずみ (ϵ) 関係

複合土の $\sigma \sim \epsilon$ の関係の代表例として、図-1は一軸圧縮試験の $\sigma \sim \epsilon$ の関係を示したものである。図中、●は固結土の $\sigma \sim \epsilon$ 関係を示したものである。図中、○印は粘性土の $\sigma \sim \epsilon$ 関係であるが、固結土は明確なピークを生じ、強度は大きく破壊ひずみが小さいのに対し、粘性土は、破壊ひずみが大きく強度は小さく、ひずみが15%に至っても強度低下は小さい。このような固結土と粘性土を組み合わせた複合土の $\sigma \sim \epsilon$ 関係は、図-1をみる限り、置換率が小さいと粘性土に近く、大きくなると固結土に近くなるというように連続的に変化している。また、ピーク後の複合土の残留応力は、わずかではあるが粘性土の応力より大きく、破壊後も固結土の残留応力が働いているものと考えられる。

図-2は、三軸圧縮（UU）試験の $\sigma_3 = 4 \text{ kgf/cm}^2$ の $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$ 関係を示したものである。複合土の $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$ 関係は、一軸試験結果で述べたことと同様の傾向を示している。しかし、拘束圧を受けることにより、破壊

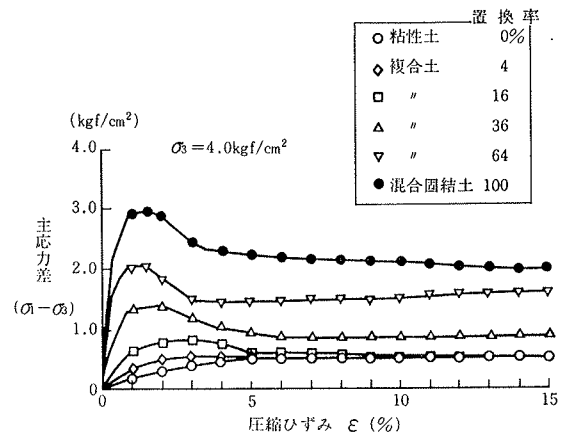


図-2 三軸圧縮試験結果 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$ 関係

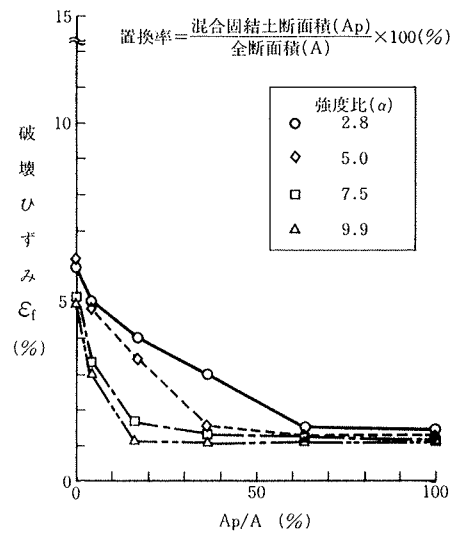


図-3 強度比をパラメーターにした破壊ひずみ (ϵ_f) と置換率 (A_p/A) の関係

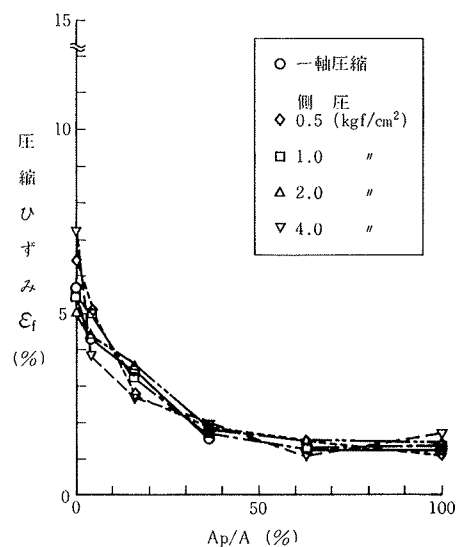


図-4 側圧をパラメーターにした破壊ひずみ (ϵ_f) と置換率 (A_p/A) の関係

後の残留強度は大きくなっていることが特徴的である。

4.2. 複合土の破壊ひずみ (ϵ_f)

複合土の破壊ひずみ (ϵ_f) と置換率 (A_p/A) の関係について、強度比をパラメータにして示したものを図-3に示す。複合土の ϵ_f は置換率の増加とともに小さくなる傾向があり、置換率が小さければ粘性土の ϵ_f に近く、置換率が大きくなれば固結土の ϵ_f に近づく。また、強度比によっても複合土の ϵ_f は変化し、強度比の大きいものほど小さい置換率で固結土の ϵ_f に近づいてくる。これは、複合土の ϵ_f が、置換率約50%以上では、強度比によらず固結土の ϵ_f と同程度であるが、それ以下の置換率では、強度比が無視できないほど複合土の ϵ_f に大きく影響するというを示している。

図-4は、 $\epsilon_f \sim A_p/A$ の関係を、強度比約5倍のものについて側圧をパラメータにして示したものである。複合土の ϵ_f は、前述したように置換率の増加とともに小さくなるが、その傾向は、側圧を変化させてもあまり影響されないようである。また、ここでは示していないが、他の強度比についても、同様の傾向である。

4.3. 複合土の圧縮強さ

複合土の圧縮強さと置換率の関係として、図-5は、一軸圧縮強さ (q_u) と置換率 (A_p/A) の関係、図-6は、最大主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と置換率の関係 ($\sigma_3 = 4 \text{ kgf/cm}^2$) を強度比をパラメータとして示したものである。図-5、図-6中には、図-7の模式図に示すように、固結土および粘性土の最大強度 (q_p, q_c) を面積比で足し合わせた値〔(1)式で求めた値〕を実線で、固結土の破壊強度 (q_p) とその時のひずみ量に相当する粘性土の強度 (q_c) を面積比で足し合わせた値〔(2)式で求めた値〕を点線で示している。複合土の強度は、当然のことながら置換率と強度比が大きくなるほど増加する。しかし、その強度は、図中実線で示される固結土および粘性土の最大強度を面積比で足し合わせた値よりも小さい。その傾向も置換率により若干異なっている。すなわち、複合土の強度は、図-3と図-5の両者からわかるように、複合土の ϵ_f (破壊ひずみ) が固結土の ϵ_f に近い置換率では、図-5、図-6中点線で示される固結土の破壊強度とその時のひずみ量に相当する粘性土の強度を足し合わせた値に近くなる。しかし、複合土の ϵ_f が混合固結土の ϵ_f より大きくなるにつれて (粘性土の影響が強くなり、粘性土の ϵ_f に近づく)、複合土の強度は点線で示す(2)式で求まる値より大きくなり、粘性土と固結土両者の最大強度を足し合わせた値に近づいてくる。これは、粘性土の強度と固結土の残留強度を足し合わせた効果があるためと考えられる。

したがって、複合土の強度を(2)式で正しく把握できる

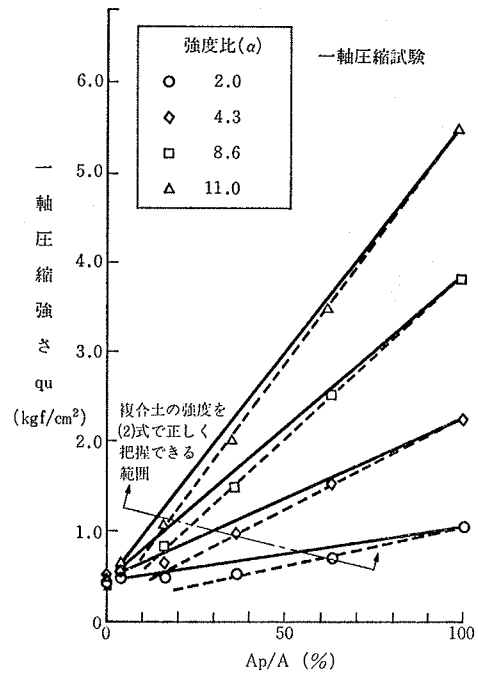


図-5 一軸圧縮強さと置換率の関係

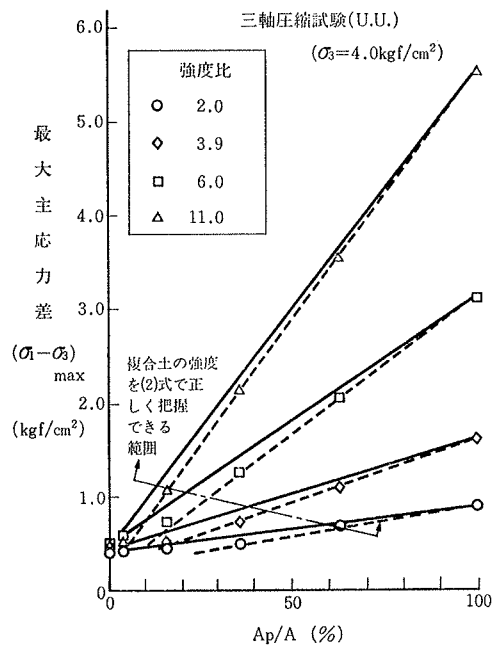


図-6 最大主応力差と置換率の関係

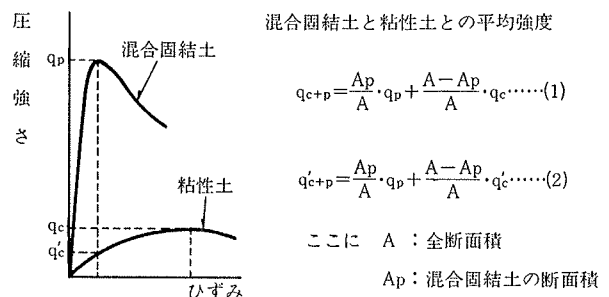


図-7 混合固結土と粘性土の圧縮強さとひずみ関係の模式図

範囲は、図一5、図一6中に示した矢印より上の範囲であり、それ以下の置換率になると(2)式は安全側の値を算定することになる。置換率の小さい範囲で厳密な計算を行なおうとする場合には、強度比を考慮した検討が必要であろう。しかし、現状においては、複合土の強度は(2)式で算定した値を用いれば、実用上問題はないと考えられる。

写真一5は、試験後の複合土供試体を二つ割りにして破壊状況を示したものである。粘性土単体と固結土単体は、ともにほぼ同じように約60°の斜めのすべり面が生じており、複合土の固結土部分と粘性土部分のせん断面もほぼ一致したすべり面が生じている。しかし、置換率（パイル径）の小さいところで、せん断面がいくつか入るものも見られた。複合土の強度が(1)式に近づく値が得られるという上述の結果は、このような複雑な破壊状況が要因の一つになっているものと推察される。

4.4. 複合土の変形係数 (E_{50})

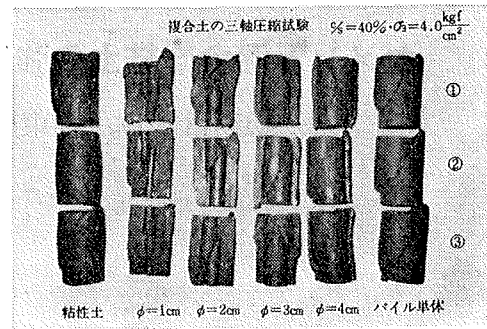
図一8に変形係数 (E_{50}) と置換率の関係を示す。変形係数 E_{50} は、応力～ひずみ曲線上、 $q_u/2$ または $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ の点と原点を結ぶ線の勾配として表わしたものである。図一8に示すように、複合土の E_{50} は、置換率の増加とともに大きくなり、固結土の E_{50} に近くなっていく傾向がある。これは、図一1および図一2で示されるように、置換率が大きくなるほど、複合土の応力～ひずみ曲線の立ち上がりが固結土のそれに近くなり、固結土を入れた効果が圧縮ひずみの初期にあらわれていることがわかる。このことから、複合土の E_{50} は、粘性土の E_{50} と固結土の E_{50} を面積比で足し合わせることで十分把握できるものと考えられる。

5. まとめ

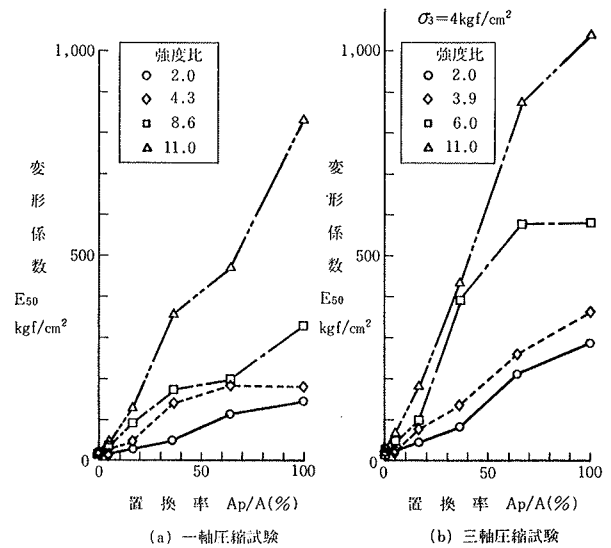
複合土の強度特性（圧縮強さ）について、置換率、強度比、側圧の影響に着目し、一軸圧縮試験、三軸圧縮（UU）試験を実施した。その結果、以下のことが判明した。

(1) 複合土の応力～ひずみ曲線は、置換率が小さいと粘性土に近く、大きくなると固結土に近くなる。

(2) 複合土の破壊ひずみ（圧縮ひずみ）は、強度比が大きくなるほど小さい置換率で、固結土の破壊ひずみに



写真一5 複合土の破壊断面



図一8 複合土の変形係数 (E_{50}) と置換率 (A_p/A)

等しくなる。

(3) 複合土の強度（圧縮強さ）は、複合土の破壊ひずみが固結土の破壊ひずみに近い置換率では、固結土の破壊強度（ピーク強度）とその時のひずみ量に相当する粘性土の強度を面積比で足し合わせた値に近い。しかし、複合土の破壊ひずみが固結土の破壊ひずみより大きくなるにつれて、複合土の強度は、粘性土と固結土の最大強度を面積比で足し合わせた値に近くなる。

(4) 複合土の変形係数 (E_{50}) は、置換率の増加とともに増大する傾向にある。

(5) 複合土の残留強度は側圧の影響をうけるが、強度比や置換率に対する複合土の破壊ひずみおよび強度の関係は側圧の影響を受けない。