

セメント系固化材により安定処理された カオリン粘土の力学的性質

上 俊二¹・藤原東雄²・竹内 潤³・福田 靖⁴・酒井敏明⁵・柳原勝也⁵

¹正会員 徳山工業高等専門学校 助教授 土木建築工学科 (〒745 徳山市久米高城3538)

²正会員 工博 徳山工業高等専門学校 教授 土木建築工学科(〒745 徳山市久米高城3538)

³学生会員 長岡技術科学大学大学院工学研究科 建設工学専攻 (〒940-21長岡市上富岡町1603-1)

⁴正会員 徳山工業高等専門学校 技官 土木建築工学科 (〒745 徳山市久米高城3538)

⁵正会員 (株)トクヤマ セメント建材研究所 (〒745 徳山市御影町1-1)

セメント系固化材により安定処理された粘土の力学的性質を調べる目的で、固化材添加量と材令(養生期間)が定量的に変化されたカオリン粘土(安定処理土)に対して、圧密試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験が実施された。その結果、安定処理土は見かけ上過圧密土となり、固化材添加量と材令の変化により圧密降伏応力が変化し、圧密降伏応力を境に力学特性が変化することが明らかにされた。以上の実験結果より、見かけ上過圧密土となった安定処理土の非排水せん断強度の評価法が提案された。

Key Words : soil stabilization, overconsolidation, undrained shear strength, clay, cementation consolidation yield stress

1. まえがき

従来、地盤改良にはセメントおよび生石灰が多く用いられてきたが、対象となる土質の範囲が広がったことでセメント系固化材が使用されている。セメント系固化材は普通セメントでは固化しにくい高含水比粘性土や有機質土あるいは産業廃棄物などの特殊な土質条件にも適用するために、在来のJIS規格のセメントを母体に各種の有効成分を添加した固化材である。砂質土地盤や粘性土地盤に普通セメント、または特殊な土質の場合、セメント系固化材を添加混合することによって液状化対策や土圧の低減、支持力の増大などの効果を期待して、土木構造物の基礎地盤の改良をはじめとして産業廃棄物の無害化を目的とした改良まで幅広く使用されている¹⁾²⁾。

これまで、セメント系固化材による安定処理土の力学特性を明らかにするために、主に一軸圧縮強さが取り上げられ、固化材添加量や養生日数の関係について調べられ、その強度発現に及ぼす要因を土質による影響、土の含水比、有機物含有量による影響、温度による影響などについて報告されている³⁾⁴⁾。また、三軸圧縮試験による静力学的性質⁵⁾⁶⁾および動力学的性質(液状化特性)⁷⁾⁸⁾についても研究が行われているが、広範な応力域での力学的性質を扱った研究は少ないように思われる。固化材の化

学的作用により安定処理された粘土は、人工的にセメンテーション作用を受けた粘土と見なされ、見かけ上過圧密の挙動を示すことが報告されている¹⁰⁾¹³⁾。一方、軟岩を対象とした建設工事が増加したことにより、軟岩の力学的性質に関する研究が増えている¹⁴⁾。軟岩は堆積過程にセメンテーション作用を受けたものと見なされ、セメンテーション作用を受けた粘土の力学特性を堆積軟岩の研究結果より推定できることが報告されている¹⁵⁾。

そこで、本研究では広範な応力域におけるセメント系固化材により安定処理された粘土の力学的特性を明らかにする目的で、一定の含水比に調整した粘土試料に対し、固化材添加量および材令(養生日数)を定量的に変化させた供試体に対して、圧密試験、一軸圧縮試験を実施した。また、三軸試験に関しては広範な応力域(1~20 kgf/cm²)における圧密非排水せん断試験を実施した。上記の試験で得られた実験結果をもとに、見かけ上過圧密となった安定処理土の非排水せん断強度の評価を試みた。

2. 実験概要

(1) 試料および供試体の作成

本実験で使用した粘土試料はアメリカ産の市販のカオ

表-1 試料の主な化学的組成(%)

	材リソ粘上	固上材
SiO ₂	45.3	20.2
Al ₂ O ₃	39.7	4.9
CaO	0.1	62.1
SO ₃	0.1	4.5
ig.loss	14.2	—

表-2 試料の物理的性質

	材リソ粘上	固上材
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	3.07
比表面積 (cm ² /g)	—	3800
液性限界 w_L (%)	78.5	—
塑性限界 w_p (%)	37.5	—
塑性指数 I_p (%)	41.0	—

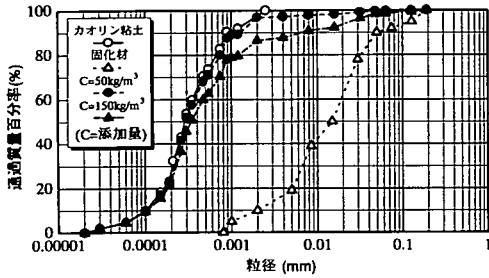


図-1 試料の粒径加積曲線

リン粘上(ASP-100)である。カオリン粘上にはSiO₂やAl₂O₃の粘上鉱物が多く含まれ、改良効果の高い粘上であることが報告されている¹⁶⁾。また、セメント系固上材は主に粘上土から砂質土までの一般軟弱土およびヘドロの安定処理に用いられる市販の固上材一般品を使用した。このセメント系固上材はセメントを主成分として一部無機薬品を添加剤として加えたものである。表-1に試料の主な化学的組成、表-2に試料の物理的性質を示す。また、図-1に試料の粒径加積曲線を示す。図中にはカオリン粘上1m³に対してセメント系固上材を50および150kg混合調整した試料の粒径加積曲線も示している。

JSF規格(T821)に準じて、乾燥状態のカオリン粘上を所定の初期含水比になるように加水し、ホバートミキサーで混合および調整した後、水となじみをよくするため一週間湿潤箱内で密閉して養生した。含水比を調整した試料土に粉末状態のセメント系固上材を一定の割合で徐々に添加しながらホバートミキサーで混合した。混合時間は、通常10分程度とされるがカオリン粘上与固上材の混合性を良くするため15分間混合した。混合後、含水比が変

表-3 安定処理土の初期性状

添加量 C kg/m ³	材齢 日	含水比 w %	間隙比 e	湿潤密度 g/cm ³	乾燥密度 g/cm ³
50	1	94.9	2.75	1.44	0.74
	3	94.9	2.75	1.44	0.74
	7	94.7	2.75	1.44	0.74
	28	93.2	2.75	1.44	0.75
	91	92.3	2.74	1.44	0.75
100	1	87.8	2.46	1.47	0.78
	3	87.3	2.46	1.47	0.78
	7	87.5	2.46	1.47	0.78
	28	86.5	2.46	1.47	0.79
	91	86.5	2.45	1.47	0.79
150	1	82.2	2.22	1.49	0.82
	3	81.9	2.22	1.49	0.82
	7	80.8	2.22	1.49	0.82
	28	80.0	2.22	1.49	0.83
	91	79.8	2.22	1.49	0.83

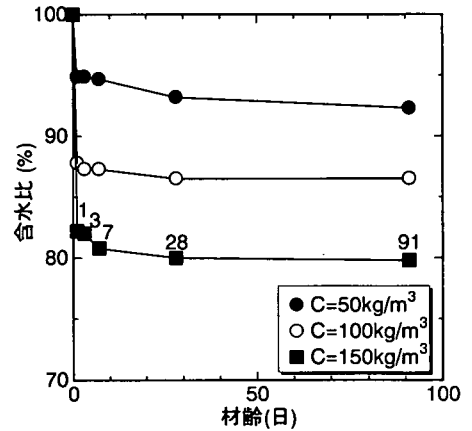


図-2 安定処理土の含水比の経時変化

化しない状態で20分間静置し、モールド内に安定処理土を3層に分けて入れ、その際各層ごとに気泡の除去の操作として、モールドをコンクリートの床に軽く打ちつけ充填することにより供試体を作成した。その後、供試体を温度20±3℃、湿度95%以上の恒温恒湿槽に静置して養生した。

実験は固上材添加量および材齢の変化による安定処理土の力学的性質を調べる目的で、カオリン粘上の初期含水比をw=100%とし、固上材添加量(以下Cとする)を試料土1m³に対して50,100および150kgに変化させ、材齢を1,3,7,28日(一軸圧縮試験では91日)に変化させた供試体を作成した。表-3に供試体の初期性状値を示す。また、

図-2は安定処理土の含水比の経時変化を示したものである。粘土に固化材を添加混合すると土中の間隙水と水和反応が生じ、含水比が急激に低下するが、材齢3日を過ぎるとほぼ定常になるものの、その後も徐々に低下していることがわかる。

(2) 実験方法

以上の条件で作成した安定処理土に対してJSF規格に基づいた(1)圧密試験(定ひずみ圧密試験),(2)一軸圧縮試験,(3)三軸圧縮試験(等方圧密非排水せん断試験)を実施した。

定ひずみ速度圧密試験は直径6cm,高さ2cmの圧密リングに供試体をセットし、供試体上面より 1.0kgf/cm^2 のバックプレッシャーを負荷し、ひずみ速度 $0.01\%/\text{min}$ で圧縮(圧密)を行った。供試体底面で間隙水圧を測定した。

一軸圧縮試験は直径5cm,高さ10cmの供試体に対してひずみ速度 $1\%/\text{min}$ で圧縮を行った。

三軸圧縮試験は、広範な応力域(拘束圧 $1\text{kgf/cm}^2 \sim 20\text{kgf/cm}^2$)でのせん断挙動を明らかにする目的で、油圧制御方式による中圧三軸圧縮試験機を使用し、直径5cm,高さ10cmの供試体に対して所定の拘束圧で等方圧密を行った後、軸ひずみ速度 $0.1\%/\text{min}$ で圧縮を行った。なお、圧密時間は3t法により決定した。また、 1.0kgf/cm^2 のバックプレッシャーを供試体に負荷し、供試体底面で間隙水圧を測定した。

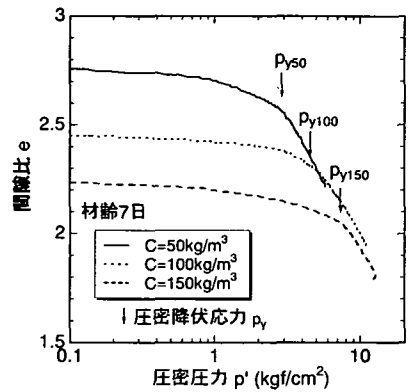
3. 実験結果と考察

(1) 圧密試験および一軸圧縮試験

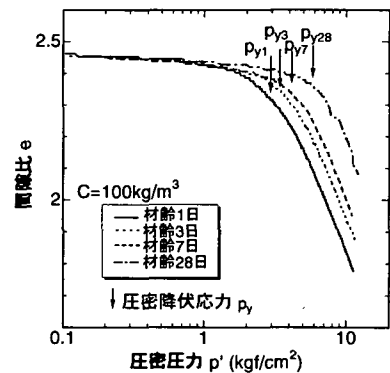
図-3(a)は材齢7日の安定処理土の定ひずみ圧密試験より得られた固化材添加量の影響を調べた $e-\log p'$ 曲線である。供試体は一定の圧密圧力を負荷しないで作成したにも関わらず、見かけ上の圧密降伏応力が生じている。また、添加量の多いものほど土中の間隙水との水和反応が進み含水比(間隙比)が減少し、圧密降伏応力が大きくなっていることがわかる。図-3(b)は同じく $C=100\text{kg/m}^3$ の安定処理土において材齢の影響を調べた $e-\log p'$ 曲線である。材齢が長くなるほど、圧密降伏応力が大きくなることからわかる。これは材齢の増加に伴い、セメント水和物と土粒子との結合力(セメンテーション)が増加し、圧密降伏応力が大きくなるものと考えられる。

図-4は定ひずみ圧密試験より得られた圧密降伏応力の経時変化を示したものである。添加量が多いものほど圧密降伏応力が大きく、いずれの添加量においても材齢の増加に伴い圧密降伏応力は対数軸に対してほぼ直線的に増加していることがわかる。

図-5(a)は材齢7日の安定処理土の一軸圧縮試験にお



(a) 固化材添加量の影響 (材齢7日)



(b) 材齢の影響 ($C=100\text{kg/m}^3$)

図-3 定ひずみ圧密試験結果($e-\log p'$ 曲線)

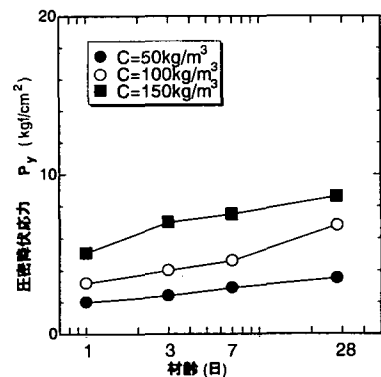
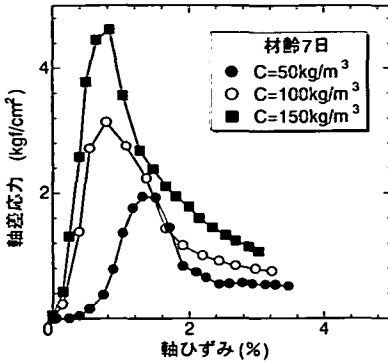
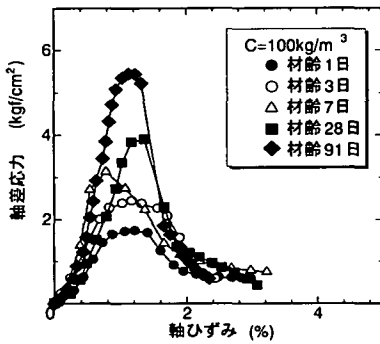


図-4 圧密降伏応力の経時変化

ける固化材添加量の影響を調べた応力～ひずみ曲線である。添加量が多いものほど一軸圧縮強さは大きくなり、初期変形係数 E_{30} も増加していることがわかる。図-5(b)は同じく $C=100\text{kg/m}^3$ の安定処理土の材齢の影響を調べた応力～ひずみ曲線である。一軸圧縮強さは材齢の長いものほど大きくなっている。また、材齢が長くなるほど



(a) 固化材添加量の影響 (材齢7日)



(b) 材齢の影響 (C=100kg/m³)

図-5 一軸試験結果(応力ひずみ曲線)

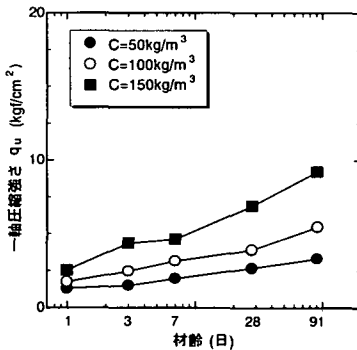


図-6 一軸圧縮強さの経時変化

せん断初期における曲線の立ち上がり急になり、初期変形係数 E_{30} が増加していることが明らかである。なお、今回は軸変位を載荷ピストンの上部に設置した外部変位計で測定したため、材令が短い場合あるいは固化材添加量の少ないものほど応力ひずみ曲線がS型になっており、供試体上下端でのベッディングエラーが含まれているものと考えられ、剛性が過小評価されているものと考

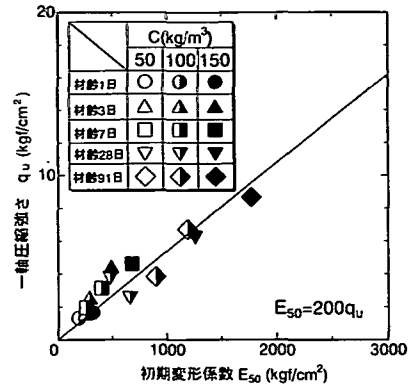


図-7 一軸圧縮強さと初期変形係数 E_{30} の関係

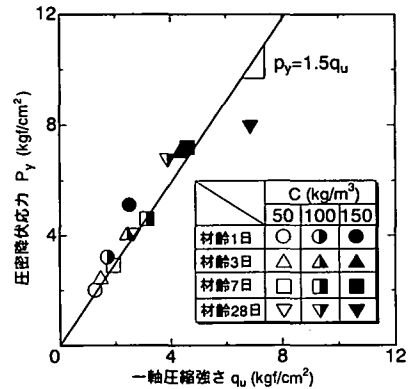


図-8 一軸圧縮強さと圧密降伏応力の関係

えられる¹⁷⁾。また、いずれの供試体においても脆性的な挙動を示しピーク強度を越え、軸ひずみが大きくなると残留強度は0.7kgf/cm²程度に落ち着き、せん断抵抗が一定となることがわかる。

図-6は安定処理土の一軸圧縮強さの経時変化を示したものである。固化材添加量の多いものほど一軸圧縮強さが大きく、いずれの添加量においても材齢の増加に伴い一軸圧縮強さは対数軸に対してほぼ直線的に増加していることがわかる。

図-7は安定処理土の初期変形係数 E_{30} と一軸圧縮強さの関係を示したものである。両者には多少のばらつきはあるものの図中に示す相関関係があることがわかる。前述したように剛性が過小評価されているものと考えられるため E_{30} は小さい値を示している。橋本ら¹⁷⁾は0.01%のひずみレベルまでのヤング率は通常の一軸・三軸圧縮試験で測定した E_{30} より10倍大きいことを示している。

図-8は安定処理土の一軸圧縮強さと圧密降伏応力の関係を示したものである。今回実施した試験条件の範囲では、両者には相関関係があることがわかり、次式が得られる。

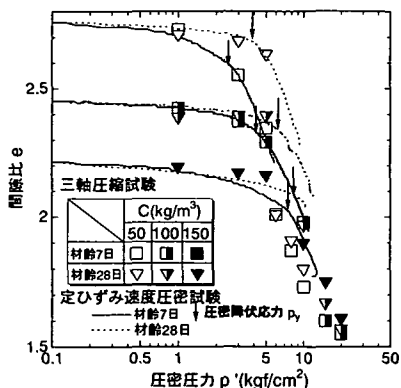


図-9 等方圧密時の $e-\log p'$ 曲線

$$p_y = 15q_u \quad (1)$$

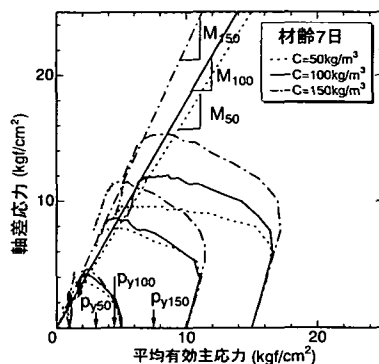
ここで、 p_y は圧密降伏応力、 q_u は一軸圧縮強さを示す。したがって、一軸圧縮試験から圧密降伏応力を求められる可能性があることが明らかになった。なお、一軸圧縮強さより圧密降伏応力などの圧密特性を表現する試みが他の研究者ら^{11),19)}によっても確かめられており、その有用性が示された。

(2) 三軸圧縮試験

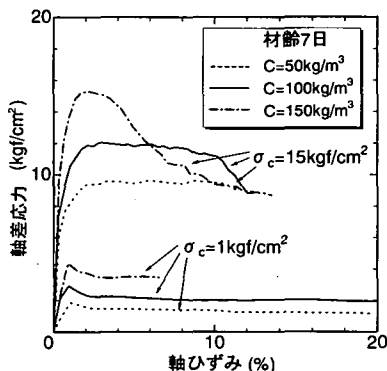
図-9は等方圧密後の間隙比を定ひずみ圧密試験より得られた $e-\log p'$ 曲線にプロットしたものである。圧密降伏応力付近では間隙比に対する材齢の影響が大きいが、圧密降伏応力を越える領域(正規圧密領域)では間隙比に対する材齢の影響は少なくなることがわかる。

図-10(a)(b)(c)は材齢7日の安定処理土における固化材添加量の影響を調べた三軸圧縮試験結果である。また、図-11(a)(b)(c)は以上の試験結果を試験時の拘束圧 σ_c で正規化したものである。図-10(a)の有効応力径路では固化材添加量が増加すると軸差応力が増加していることが明らかである。圧密試験より得られた圧密降伏応力(図中の p_y)より低い拘束圧(過圧密領域)と圧密降伏応力より高い拘束圧(正規圧密領域)では径路の形状が異なっていることが特徴的である。また、正規圧密領域における破壊線の傾き M は添加量が多いほど大きくなることからわかる。図-11(a)の正規化した有効応力径路では、過圧密領域では過圧密比(p_y/σ_c)により径路はそれぞれ異なっているが、正規圧密領域になると各添加量ごとに応力径路の形状は類似して行くことがわかる。

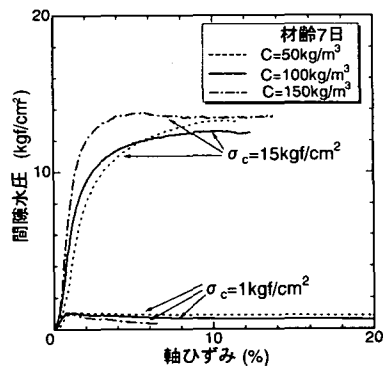
図-10(b)は軸差応力と軸ひずみの関係であるが、応力ひずみ関係は拘束圧により大きく影響されることがわかる。拘束圧 $\sigma_c=1\text{kgf/cm}^2$ ではいずれの添加量においても



(a) 有効応力径路



(b) 軸差応力と軸ひずみの関係

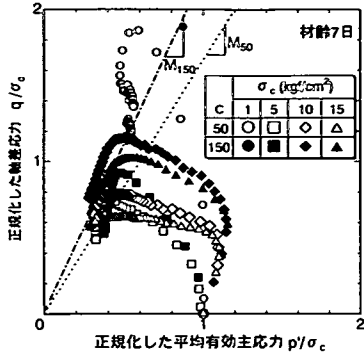


(c) 間隙水圧と軸ひずみの関係

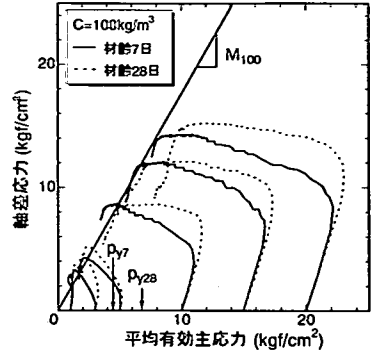
図-10 三軸試験結果(材齢7日)

ひずみ硬化後ピーク応力に達しひずみ軟化に転じている。しかし、 $\sigma_c=15\text{kgf/cm}^2$ では添加量が少ないものほどひずみ軟化傾向が薄れ正規圧密土の挙動を示している。

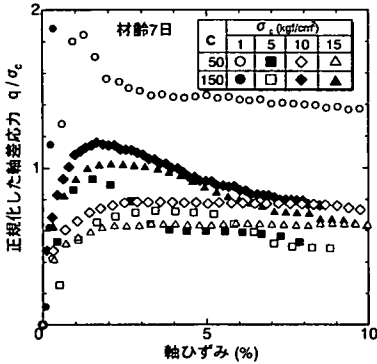
図-11(b)は正規化した軸差応力と軸ひずみの関係であるが、前述したように圧密降伏応力より低い拘束圧では過圧密比の影響を受けていることが明らかであるが、圧



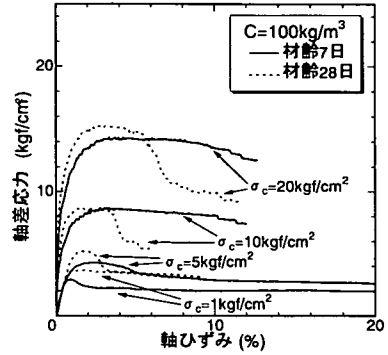
(a) 正規化した有効応力経路



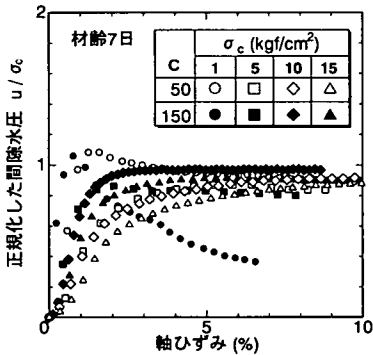
(a) 有効応力経路



(b) 正規化した軸差応力と軸ひずみの関係

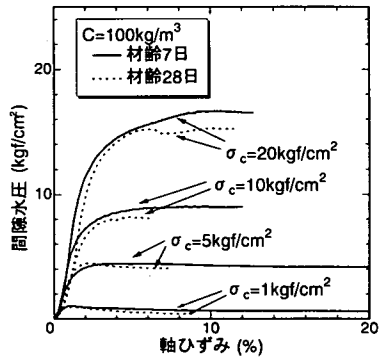


(b) 軸差応力と軸ひずみの関係



(c) 正規化した間隙水圧と軸ひずみの関係

図-11 正規化した三軸試験結果 (材齢7日)



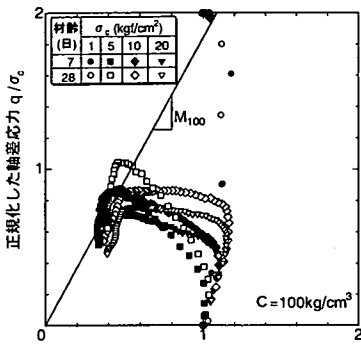
(c) 間隙水圧と軸ひずみの関係

図-12 三軸試験結果 (C=100kg/m³)

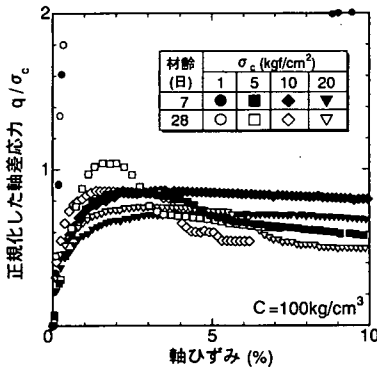
密降伏応力より高い拘束圧になると各添加量ごとに曲線の形状は類似してることがわかる。

図-10(c)は間隙水圧と軸ひずみの関係である。拘束圧 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ では軸差応力が最大になる時に間隙水圧は最大となり、その後ひずみ軟化に伴い減少している。一方 $\sigma_c = 15 \text{ kgf/cm}^2$ では添加量が多いものはピークに達した後減少しているが、添加量の少ないものはピークが表

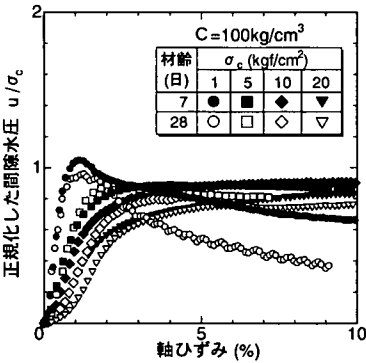
れず徐々に増加する傾向を示している。図-11(c)は正規化した間隙水圧と軸ひずみの関係であるが、圧密降伏応力より低い拘束圧では過圧密比の大きいものほどせん断初期における曲線の勾配が急になり、ピーク後減少する傾向を示すが、圧密降伏応力より高い拘束圧になると、せん断初期における曲線の勾配が緩やかになり、各添加量ごとに曲線の形状は類似してることがわかる。



(a) 正規化した有効応力経路



(b) 正規化した軸差応力と軸ひずみの関係



(c) 正規化した間隙水圧と軸ひずみの関係

図-1 3 正規化した三軸試験結果 (C=100kg/m³)

図-1 2 (a) (b) (c) はC=100kg/m³の安定処理土における材齢の影響を調べた三軸圧縮試験結果である。また、図-1 3 (a) (b) (c) は以上の試験結果を試験時の拘束圧で正規化したものである。図-1 2 (a)の有効応力経路では圧密降伏応力より低い拘束圧では、材齢28日の安定処理土は材齢7日の安定処理土に比べ曲線の立ち上がりが急に

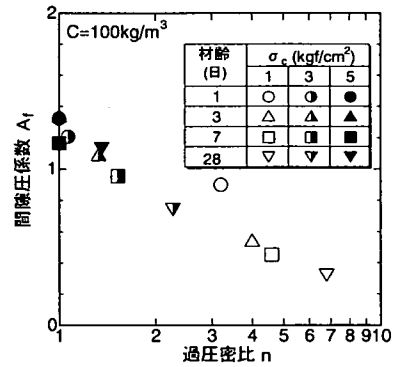
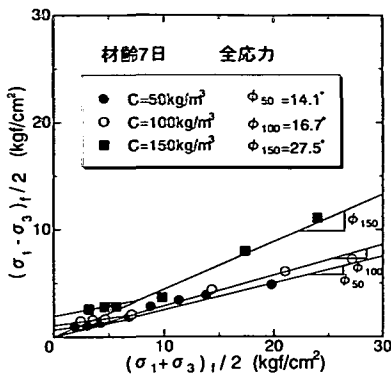


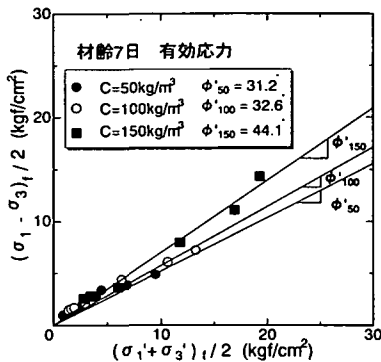
図-1 4 間隙係数 A_v と過圧密比の関係

なり最大軸差応力が大きくなっているが、圧密降伏応力より高い拘束圧ではせん断初期における曲線の形状は異なっているが、最大軸差応力はほぼ等しくなり、同一の破壊線に至ることがわかる。

図-1 3 (a)の正規化した有効応力経路では、圧密降伏応力より低い拘束圧では過圧密比により応力経路はそれぞれ異なっているが、圧密降伏応力より高い拘束圧になると、各材齢ごとに応力経路の形状は類似しており、破壊時の応力状態は同じ位置に至ることがわかる。図-1 2 (b)は軸差応力と軸ひずみの関係である。圧密降伏応力より低い拘束圧では最大軸差応力は材齢28日の方が大きくなっているが、圧密降伏応力より高い拘束圧では最大軸差応力はほぼ等しくなる傾向がみられる。しかし、材齢7日では低い拘束圧では軸差応力がピークに達した後軟化する傾向がみられる。高い拘束圧ではその傾向が薄れてくるが、材齢28日は材齢日に比べると嘉門ら¹²が述べているように固化材により形成された土構造がピーク後に破壊され、セメンテーション作用が大きい土ほどひずみ硬化～軟化型の傾向が強いことがわかる。図-1 3 (b)は正規化した軸差応力と軸ひずみの関係であるが、前述したように低い拘束圧では材齢の長短により最大軸差応力および曲線の形状が異なるが、拘束圧が高くなるほど材齢の影響がなくなり、ひずみ軟化する傾向が薄れてくる。また、最大軸差応力はほぼ等しくなることがわかる。図-1 2 (c)は間隙水圧と軸ひずみの関係である。低い拘束圧では軸差応力が最大になる時に間隙水圧は最大となり、その後ひずみ軟化に伴い減少しているが、拘束圧が高くなるほどその傾向は薄れ、間隙水圧は増加する傾向を示している。図-1 3 (c)は正規化した間隙水圧と軸ひずみの関係であるが、低い拘束圧ではせん断初期における曲線の勾配が急になり、ピークに達した後減少する傾向を示すが、高い拘束圧になると、せん断初期における曲線の勾配が緩やかになり、ひずみとともに増加する傾向を示す。

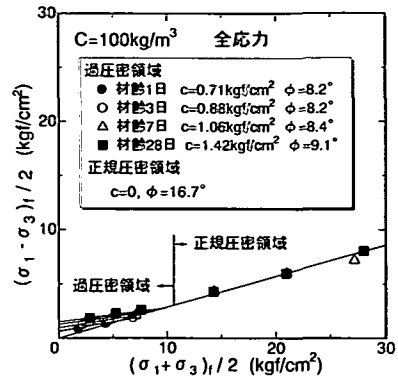


(a) 全応力表示

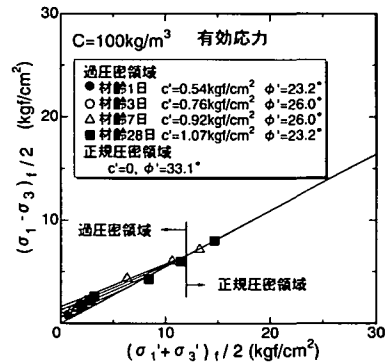


(b) 有効応力表示

図-15 破壊時の応力状態 (材齢7日)



(a) 全応力表示



(b) 有効応力表示

図-16 破壊時の応力状態 (C=100kg/m³)

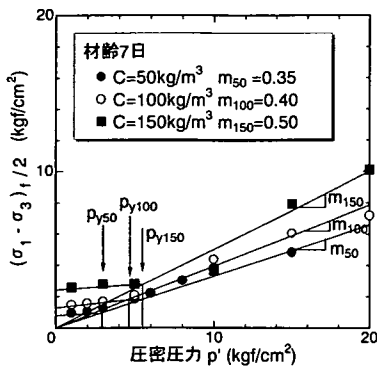
図-14はC=100kg/m³の安定処理土における過圧密比と破壊時(軸差応力最大時)の間隙圧係数 A_v の関係を示したものである。両者の関係によると過圧密比が大きくなると間隙圧係数 A_v は減少しており、過圧密比が大きくなるほど破壊時の間隙圧は小さくなる。これは通常の応力解放による過圧密土あるいは二次圧密などの時間効果を受けた擬似過圧密粘土と同じ傾向を示している^{19,21)}。

図-15(a)(b)は材齢7日の安定処理土の破壊時(軸差応力最大時)の応力状態を各添加量ごとに全応力と有効応力で整理したものである。図中には圧密降伏応力より高い拘束圧を正規圧密領域とみなし、破壊点を添加量ごとに直線で結び、強度定数 ϕ を求めている。図中に示すように、正規圧密領域では添加量が多いものほど ϕ および ϕ' は大きくなる。また、圧密降伏応力より低い拘束圧を過圧密領域と見なし、添加量ごとに直線を引いている。過圧密領域では、添加量が多いものほど c および c' が大きくなる。また、圧密降伏応力より低い拘束圧(正規圧密領域)では、材齢の長短によらず破壊線は一本の直線で表すことができ、破壊時の応力状態はほぼ同じとなる。低拘束圧(過圧密領域)では各材齢ごとに破壊線が定まり、材齢の長いものほど強度定数 c は大きくなる。有効応力表示では、全応力表示ほど材齢の影響が顕著に表れないが、過圧密領域において材齢の長いものほど強度定数 c は増加していることがわかる。

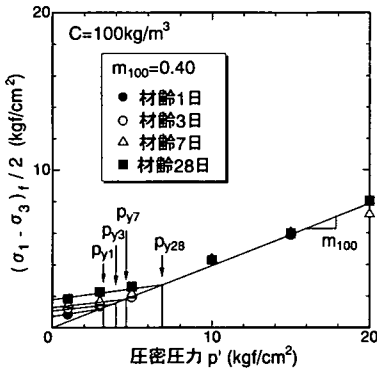
図-16(a)(b)はC=100kg/m³の安定処理土の破壊時(軸差応力最大時)の応力状態を各材齢ごとに全応力と有効応力で整理したものである。全応力表示では圧密降

伏応力より高い拘束圧(正規圧密領域)では、材齢の長短によらず破壊線は一本の直線で表すことができ、破壊時の応力状態はほぼ同じとなる。低拘束圧(過圧密領域)では各材齢ごとに破壊線が定まり、材齢の長いものほど強度定数 c は大きくなる。有効応力表示では、全応力表示ほど材齢の影響が顕著に表れないが、過圧密領域において材齢の長いものほど強度定数 c は増加していることがわかる。

図-17(a)(b)は圧密圧力(拘束圧) p_0 と非排水せん断強さ $c_u=(\sigma_1 - \sigma_3)_t/2$ の関係を示したものである。図-17(a)は材齢7日の安定処理土の添加量の影響を示したものである。各添加量ごとに直線を引くと圧密降伏応力を境に直線の勾配が変化していることがわかる。圧密降伏応力より高い拘束圧(正規圧密領域)での直線の勾配を強度増加率 $m=(c_u/p_0)$ とすると添加量の多いものほど強度増加率 m は大きくなる。図-17(b)はC=100kg/m³の安定処理土の材齢の影響を示したものであるが、各材齢ごとに直線を引くと圧密降伏応力を境に直線の勾配が変化していることがわかる。圧密降伏応力より高い拘束圧(正規圧密領域)では材齢の長短によらず



(a) 固化材添加量の影響 (材齢7日)



(b) 材齢の影響 (C=100kg/m³)

図-17 非排水せん断強度と圧密圧力の関係

強度増加率 m は一定なることがわかる。

以上の結果より、圧密降伏応力以上の拘束圧が負荷されるとセメンテーションにより形成された土構造が破壊され、破壊時の非排水せん断強度は同じになるものと考えられる。また、固化材添加量の多少によりセメント水和物により形成された土粒子の形状に差異が生じ、強度増加率および強度定数 ϕ が異なるものと考えられる。

4. セメント系固化材により安定処理された粘土の非排水せん断強度の評価

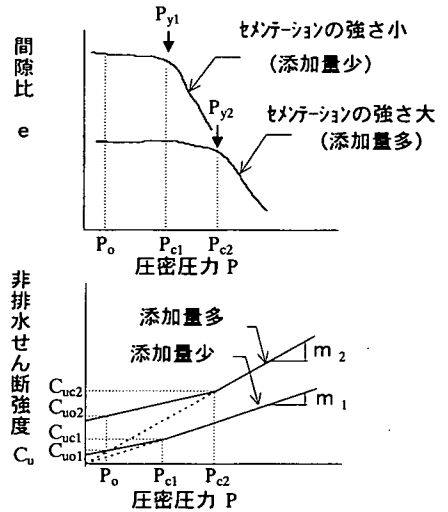
ここでは以上の実験結果をもとに、セメント系固化材により安定処理された粘土は人工的にセメンテーション作用を受け見かけ上過圧密土 (擬似過圧密土) になるものと仮定して、非排水せん断強度の評価を試みた。

応力除荷による過圧密土の研究はこれまで多くの研究者によってなされてきた。三田ら²⁰⁾や Mayne ら²¹⁾は過圧密土と正規圧密土の非排水せん断強度の比として次式

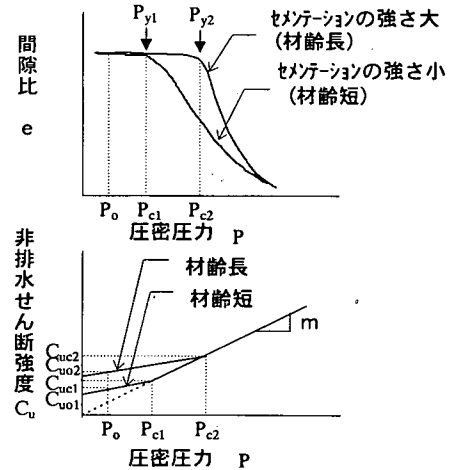
$$\frac{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{(NC)}} = n^{\Lambda_0} \quad (2)$$

ここで、添字(NC)は正規圧密土、(OC)は過圧密土を意味している。また、 n は過圧密比、 Λ_0 は実験定数である。

図-18(a)(b)はセメント系固化材により安定処理された粘土の間隙比と圧密圧力および非排水せん断強度と圧密圧力の関係(模式図)である。図-18(a)は材齢が等しい安定処理土のセメンテーションの強さ(固化材添加量の影響)を示したものである。固化材添加量の多い



(a) 固化材添加量の影響



(b) 材齢の影響

図-18 安定処理土の強度特性(模式図)

を提案している。

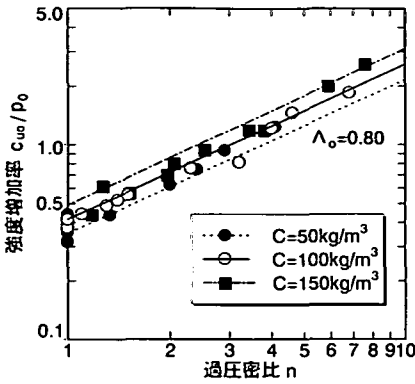


図-19 過圧密比と非排水せん断強度比の関係

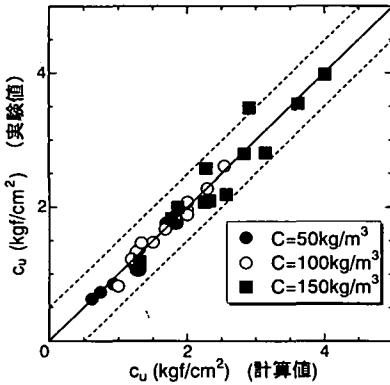


図-20 非排水せん断強度の実験値と計算値の比較

ものほど水和反応による間隙比の減少が大きく、圧密降伏応力が大きくなり、正規圧密領域における強度増加率が大きくなることを示している。また、図-18(b)は固化材添加量が同じ安定処理土のセメンテーションの強さ(材齢の影響)を示したものである。材齢が長いものほどセメント水和物と土粒子とのセメンテーション作用が増大し、圧密降伏応力は大きくなるが、正規圧密領域における強度増加率は材齢によらず同じになることを示している。これらの関係より、圧密降伏応力 p_y より低い圧密圧力 p_0 で非排水せん断試験を行った場合の非排水せん断強度 c_{u0} は圧密圧力 p_c より p_0 まで除荷された過圧密土の非排水せん断強度が c_{uc} から c_{u0} まで低下する場合と同等に扱えるものとする、式(2)は次式のように書き換えられる。

$$\frac{\left(\frac{c_{u0}}{p_0}\right)}{\left(\frac{c_{uc}}{p_c}\right)} = n^{\Lambda_0} \quad (3)$$

ここで、 c_{uc}/p_c は正規圧密領域における非排水強度増加率 m とすると、見かけ上過圧密状態にある粘土の非排水せん断強度比 c_{u0}/p_0 は次式で表される。

$$c_{u0}/p_0 = mn^{\Lambda_0} \quad (4)$$

図-19は三軸試験結果より過圧密比 n と非排水強度比 c_{u0}/p_0 の関係を両対数で示したものである。両者には各添加量ごとに直線関係があることがわかり、直線の勾配を実験定数 Λ_0 とすると今回実施した実験の範囲では Λ_0 は添加量によらずほぼ一定となることがわかる。

正規圧密(過圧密比 $n=1$)における強度増加率を m とすると両者の関係は式(4)で表されることが確認された。したがって、見かけ上過圧密粘土となった安定処理土の非排水せん断強度 c_{u0} は応力除荷による過圧密粘土あるいは二次圧密などの時間効果を受けた擬似過圧密土²²⁾と同様に次式で表される。

$$c_{u0} = mp_0 n^{\Lambda_0} \quad (5)$$

図-20は式(5)に含まれる実験定数を実験結果より決定し、セメント系固化材による安定処理土の非排水せん断強度の実験値と計算値の対応を示したものである。図に示すように過圧密比が $n=10$ の範囲内では両者には多少のばらつきはあるものの両者の対応は良好であることがわかる。

以上の結果より、今回実施した実験条件の範囲では一軸圧縮試験より得られた安定処理土の一軸圧縮強さより圧密降伏応力を式(1)で推定出来る可能性があることが明らかになった。また、三軸圧縮試験では圧密降伏応力より高い拘束圧(正規圧密領域)での非排水せん断強さより強度増加率 m を決定し、圧密降伏応力より低い拘束圧

(過圧密領域)での非排水せん断強さより実験定数 Λ_0 を

決定することにより、見かけ上過圧密土となった安定処理土の非排水せん断強度を式(5)により容易に推定できる可能性があることが明らかになった。しかし、セメンテーションと過圧密は本質的には異なる現象のため過圧密比が高い場合(拘束圧がゼロに近い場合)での摘要には限界があることが考えられる。

5. あとがき

本研究では、一定の含水比に調整されたカオリン粘土にセメント系固化材の添加量および材齢を定量的に変化させた供試体に対して力学試験を行い、安定処理土の力学的性質を調べた。本研究で得られた主な結論を列挙す

れば以下の通りである。

- (1) 安定処理土の力学的性質は固化材添加量および材齢に影響され、固化材添加量の増加により含水比が低下し、材齢の増加によりセメンテーション作用が増加することが示された。
- (2) 一軸圧縮強さと圧密降伏応力には相関関係があり、一軸圧縮強さより圧密降伏応力を推定できる可能性があることが示された。
- (3) 安定処理土は化学的作用により見かけ上過圧密土となり、圧密降伏応力を境に力学的特性が異なることが示された。
- (4) 安定処理土の材齢が同じであれば、圧密降伏応力より高い拘束圧（正規圧密領域）では、固化材添加量の多いものほど強度増加率は大きくなることが示された。
- (5) 安定処理土の固化材添加量が一定であれば、圧密降伏応力より高い拘束圧（正規圧密領域）では、材齢の長短によらず強度増加率は一定となることが示された。
- (6) セメンテーション作用により見かけ上過圧密土となった安定処理土の強度特性は、応力除荷による過圧密土の強度特性に類似していることが明らかにされた。
- (7) 以上の結果より、セメント系固化材による安定処理土の非排水せん断強度を評価する方法が提案された。

謝辞：本研究を行うにあたり、茨城大学工学部教授安原一哉先生には有益なご助言・ご指導を頂きました。記して、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寺師昌明, 田中洋行, 光本司, 新留雄二, 本間定吉: 石灰・セメント系安定処理土の基本特性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第19巻, 第1号, pp.33-57. 1980.
- 2) 寺師昌明: 地盤改良, 土と基礎, Vol.37, No.12, pp.74-77, 1989.
- 3) 善功企: 事前混合処理工法による埋地地盤対策, 土と基礎, Vol.42, No.2, Ser.433, pp.37-42, 1994.
- 4) たとえば(社)セメント協会編: セメント系固化材による地盤改良マニュアル, 技報堂出版, 1994.
- 5) Clough, G. W., Nicholas Sitar, Robert C. Bachus, Nader and Shafii Rad: Cemented sand under static loading, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, No.6, pp.799-817. 1981.
- 6) 松岡元, 孫徳安, 蒼田孝宏: セメント混合砂の3主応力制

- 御試験結果とその統一的解釈, 土木学会論文集, No.457, pp.119-128, 1993.
- 7) 牟田親弘, 草深守人, 前川厚二, 松本基: セメント混合改良土の力学的性質, 土木学会第47回年次学術講演会概要集Ⅲ部, pp.1060-1061, 1992.
 - 8) 立石義孝, 鬼塚克忠, 吉武茂樹: 安定処理を施した珪藻土の強度発現特性, 土木学会第48回年次学術講演会概要集Ⅲ部, pp.638-639, 1993.
 - 9) 山本哲朗, 山内智也, 堀淵幸司: 砂~シルト地盤に対する液状化対策としてのセメント安定処理の効果に及ぼす粒度の影響, 土木学会論文集, No.541, pp.133-146, 1996.
 - 10) Fisher, K.P., Andersen, K.H. and Moun, J.: Properties of an artificially cemented clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.325-331, 1978.
 - 11) 嘉門雅史, 長尾毅: 人工的にセメンテーションを与えた粘性土の土質工学的性質について, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.389-390, 1986.
 - 12) 嘉門雅史, 佐野都雄, 陶秀珍: 人工的に粒子間にセメンテーションを与えたカオリン粘土の物理化学的特性, 土木学会第42回年次学術講演会概要集, pp.302-303, 1987.
 - 13) 安原一哉, 山内豊隆: 土の物理化学とせん断, 土と基礎, Vol.33, No.12, Ser.335, pp.47-54, 1985.
 - 14) 足立紀尚, 吉田信之: 軟岩の力学的挙動, 土と基礎, Vol.41, No.10, Ser.No.429, pp.7-12, 1993.
 - 15) 足立紀尚, 佐野都雄: 過圧密粘土の力学特性, 土と基礎, Vol.33, No.3, Ser.326, pp.3-8, 1985.
 - 16) 鬼塚克忠, 南里勝: 生石灰とポゾラン材料添加による建設発生土(有明粘土)の強度発現特性, 土木学会論文集, No.547, pp.97-106, 1996.
 - 17) 橋本文男, 島正憲, 森拓男, 龍岡文夫, 木幡行宏: 化学的固化に対する新しい考え方—東京湾道路におけるセメント改良土工法—, 土と基礎, Vol.42, No.2, Ser.433, pp.13-18, 1994.
 - 18) 安原一哉, 佐藤研一, 足立雅樹, 堀内澄夫, 草刈太一, 小田原卓郎: 石灰灰を用いた気泡混合軽量スラリー(3), 土木学会第47回年次学術講演会概要集Ⅲ部, pp.1050-1051, 1992.
 - 19) 矢島寿一, 丸尾茂樹, 小川正二: 飽和軽量土の初期間隙比・一軸圧縮強さと破壊基準の関係, 土木学会論文集No.554/Ⅲ-37, pp.251-257, 1996.
 - 20) Mitachi, T and Kitago, S.: Change in undrained shear strength characteristics of saturated remolded clay due to swelling, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.45-58. 1976.
 - 21) Mayne, P.W.: Cam-clay predictions of undrained strength, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.106, GT.11, pp.1219-1242. 1980.
 - 22) Yasuhara, K. and Ue, S.: Increase in undrained shear strength due to secondary compression, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.3, pp.50-64. 1983.
 - 23) 安原一哉, 平尾和年, 藤原東雄, 上俊二: 擬似過圧密粘土のせん断特性, 土と基礎, Vol.33, No.3, Ser.326, pp.29-35, 1985.

(1997. 2. 4受付)

MECHANICAL PROPERTIES OF STABILIZED KAOLIN CLAY BY CEMENT TYPE SOLIDIFIER

Shunji UE, Haruo FUJIWARA, Jun TAKEUCHI,
Yasushi FUKUDA, Toshiaki SAKAI and Katsuya YANAGIHARA

In order to investigate the mechanical properties of stabilized Kaolin clay by cement type solidifier, consolidation tests, unconfined compression tests and triaxial compression tests were carried out under various conditions. Various factors that influence the stabilized Kaolin clay and fundamental mechanical properties are obtained.

It is clear that the behavior of stabilized clay is similar to those of overconsolidated clays due to unloading, and quasi-overconsolidated clay from consolidating for a long period.