

セメント系固化材により安定処理された粘性土の力学的性質

Mechanical properties of stabilized clay by cement type solidifier

上 俊二* (Shunji Ue)
藤原東雄** (Haruo Fujiwara)
酒井敏明*** (Toshiaki Sakai)
牛山宏隆**** (Hirotaka Ushiyama)
柳原勝也***** (Katsuya Yanagihara)

本報告では、セメント系固化材による軟弱地盤の安定処理効果を調べる基礎的な研究として、カオリン粘土の含水比と固化材の添加量を定量的に変化させた粘土供試体の力学試験を行い、安定処理土の力学的性質について考察をおこなった。その結果、固化材が粘土中の水分と化学反応を起こすことにより擬似的に過圧密土となることを示し、安定処理土の力学的性質は含水比、固化材の添加量により大きく変化することを定量的に示した。

また、このように擬似的に過圧密土となった安定処理土の強度定数は固化材添加量の増大にともない粘着力の増大が顕著に現れることが明らかになった。

キーワード：土質安定処理、圧密試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、過圧密 (IGC:D10/D6)

1. まえがき

セメントや石灰などの在来の固化材にかわりセメント系固化材が使用されるようになった背景には、①良質な砂質材料が枯渇の傾向にあり、現地材料を高品位化して再利用する必要性が増したこと、②軟弱地盤での開発が盛んになり、固化材を添加・混合することにより、軟弱土を現位置で処理する方法が注目されてきたこと、③環境保全を目的としたヘドロの固化、産業廃棄物中の有害物の溶出防止のための固化材の開発が求められたこと、などの情勢が上げられ、対象となる土の範囲が細粒土側に広がったことと、ポルトランドセメントの水和を阻害する有機物を含んだ土にも対応が求められていることなどがあげられる¹⁾。

このようにセメント系固化材は、普通の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を処理するために、在来のJIS規格のセメントを母体に、各種の有効成分を改良目的に応じて添加した固化材であり、それらの対象土に対して改良効果を発揮することが在来のセメントや石灰に比べて優れているので、適切に使用すれば、ポルトランドセメントなどと比較して単価が高くても、少ない添加量で優れた改良効果を得ることができることが期待されている。しかし、安定処理土の設計強度定数を満足するセメント系固化材の添加量は、事前にこれまでの実施例を参考にして設計強度定数を満足する添加量を想定して室内配合試験を行って決定しているのが現状であり、あらかじめ設計強度定数と添加量の相関が予測できるなら設計、配合試験時に実用上有益な資料となると考えられる。

本報告では、セメント系固化材による軟弱地盤の安定処理効果を調べる基礎的な研究として、代表的な粘土鉱物であるカオリナイトを主成分とするカオリン粘土を用い、この粘土の含水比と固化材の添加量を定量的に変化させた粘土供試体の力学試験を行い、含水比および添加量の異なる安定処理土の力学的性質について検討をおこなった。

*徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 助教授、**同 教授

徳山曹達(株)セメント建材研究所 主任、*同 主席、*****同 研究員

2. 実験概要

2. 1 試料

本実験に用いた粘土試料はアメリカ産の市販のカオリン粘土である。また、本実験には固化材として、主に粘性土から砂質土までの一般軟弱土およびヘドロの地盤改良に用いられる市販の固化材一般品（ハードキープP-430）を使用した。このセメント系固化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にカオリン粘土、セメント系固化材の物理的性質、図-1に粒径加積曲線を示している。図中にはカオリン粘土とセメント系固化材を混合、調整した試料の仮定の粒径加積曲線の一例も示している。

表-1. 試料の物理的性質

	固 化 材	カオリン粘土
比 重 G_s	3.07	2.65
比 表 面 積 (cm^2/g)	3800	
液性限界 W_L (%)		78.7
塑性限界 W_P (%)		37.5
塑性指数 I_P		41.2

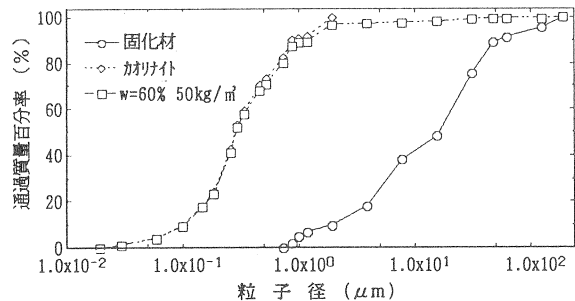


図-1. 試料の粒径加積曲線

2. 2 実験方法

乾燥状態のカオリン粘土は添加水の分散性が悪いので、所定の含水比になるように加水しミキサーで混合、調整した後、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体状態のセメント系固化材を一定の割合で徐々に添加しながらミキサーで混合した。混合時間は、通常10分程度とされるが固化材の混合性が劣るので15分間混合した。混合後含水比が変化しない状態で20分間静置し、モールドにタッピングをしながら充填することにより供試体を作製した。その後供試体を温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度95%以上の恒温恒湿槽に静置して養生した。養生期間は7日間とした。表-2に今回作成した供試体の初期性状値を示す。これによると、固化材の添加量が増加すると供試体の含水比が低下し、乾燥密度が増加している。これはセメント系固化材が粘土の間隙水と水和反応を起こすことによる含水比の低下、イオン交換、団粒化などによって物性の改善が行われたことを示している。

以上の供試体に対して、①標準圧密試験、②一軸圧縮試験、③圧密非排水三軸圧縮試験（CU試験）を実施した。なお、一軸圧縮試験については養生期間が3日および28日の供試体についても実施した。

表-2. 安定処理土の初期性状

	w = 60%				
固化材添加量 C (kg/m^3)	10	20	30	40	50
含水比 w (%)	59.7	58.8	58.5	58.2	57.4
湿潤密度 ρ_w (g/cm^3)	1.602	1.583	1.581	1.577	1.577
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.003	0.997	0.997	0.997	1.002
	w = 100%				
固化材添加量 C (kg/m^3)	10	20	30	40	50
含水比 w (%)	99.5	99.5	97.1	96.8	94.7
湿潤密度 ρ_w (g/cm^3)	1.439	1.443	1.427	1.459	1.466
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	0.721	0.723	0.747	0.741	0.753

3. 実験結果と考察

3. 1. 圧密試験結果

図-2は初期含水比 $w=100\%$ 、材齢7日の安定処理土の圧密試験より得られた $e-\log p$ 曲線の一例である。供試体は一定の圧密応力を載荷しないで作製したにもかかわらず、固化材を添加することにより生じたと考えられる見かけ上の圧密降伏点が生じている。また、固化材添加量の増加にともない圧密降伏応力が増加していることが明かである。特に、 $C=10\text{ kg/m}^3$ から 20 kg/m^3 になると圧密降伏応力は急激に増加しており、 $C=20\text{ kg/m}^3$ から 50 kg/m^3 では漸増している。これは前述したように一定量以上の固化材が添加されると粘土粒子間に化学的作用（水和反応）が生じることにより強固な土構造となって擬似的に過圧密土になるものと考えられる。

図-3は初期含水比 $w=60\%$ および 100% の供試体の固化材添加量と圧密降伏応力の関係を示したものである。 $C=10\text{ kg/m}^3$ では差異はないものの $C=20\text{ kg/m}^3$ 以上になると $w=60\%$ の方が $w=100\%$ のものより増加率が大きくなり、固化材添加量の増加にともない圧密降伏応力は増加している。

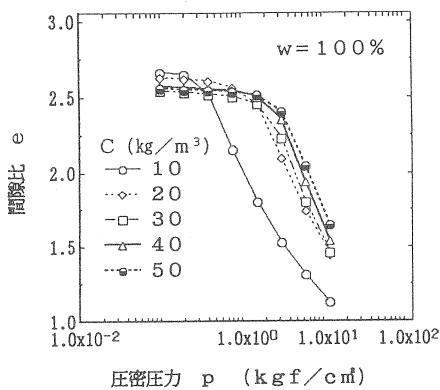


図-2. 安定処理土の $e-\log p$ 曲線

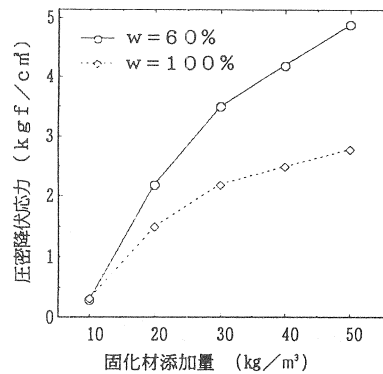


図-3. 固化材添加量と圧密降伏応力の関係

3. 2. 一軸圧縮試験結果

図-4は $w=100\%$ で材齢7日の安定処理土の一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ曲線の一例である。固化材添加量が増加すると一軸圧縮強度も増加している。また、固化材添加量の増加にともない初期変形係数 E_0 も増加し、 $C=20\text{ kg/m}^3$ 以上の固化材が添加されると応力ひずみ曲線に降伏点（ピーク）が現れ、安定処理

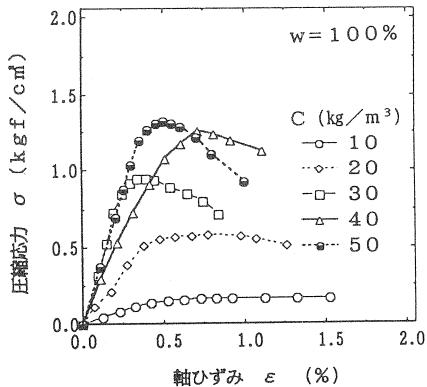


図-4. 一軸圧縮試験結果

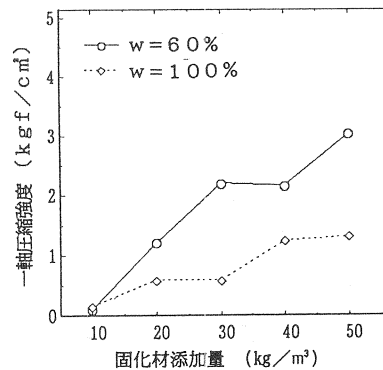


図-5. 固化材添加量と一軸圧縮強度の関係

土は脆性的な性質に変化しているものと考えられる。

図-5は $w=60\%$ および 100% の供試体の固化材添加量と一軸圧縮強度の関係を示したものである。前述した圧密降伏応力と固化材添加量の関係と同様な傾向を示し、固化材添加量の増加にともないほぼ比例して増加しており、より安定した土構造に変化していることがわかる。

図-6は $w=60\%$ および 100% の供試体の圧密降伏応力と一軸圧縮強度の関係を示したものである。これによると両者は初期含水比ごとに比例関係があることが明らかであり、 $w=60\%$ の供試体では圧密降伏応力は一軸圧縮強度の約 0.6 倍であり、 $w=100\%$ では約 0.5 倍であることがわかる。以上より安定処理土の一軸圧縮強度から圧密降伏応力が推定できる可能性があることがわかった。

図-7は $w=60\%$ および 100% の供試体の養生期間（材齢）と一軸圧縮強度の関係を示したものである。材齢が長くなるに連れて一軸圧縮強度は増加している。 $w=60\%$ および 100% の供試体とも材齢28日の一軸圧縮強度は材齢28日の約 1.7 倍となっており、長期の材齢ほど大きい強度を示している。

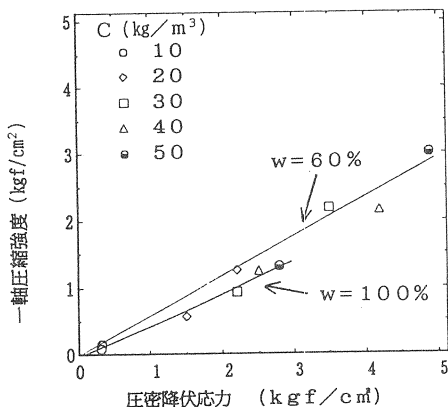


図-6. 圧密降伏応力と一軸圧縮強度の関係

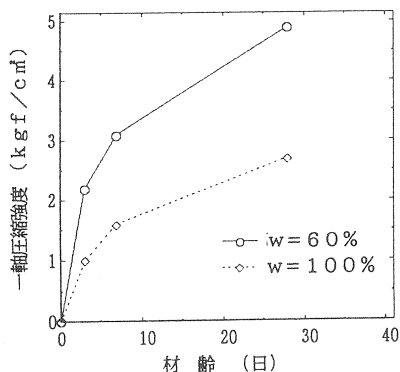


図-7. 安定処理土の材令と一軸圧縮強度の関係

3. 3. 三軸圧縮試験結果

図-8は三軸圧縮試験（CU試験）より得られた $w=60$ および 100% の安定処理土の有効応力経路図である。特に、 $w=60\%$ の拘束圧 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の試験において $C = 30 \text{ kg/m}^3$ 以上になると応力経路の立ち上がりが急になり、典型的な過圧密土の挙動を示すことが明らかである。これは圧密試験の結果からも明らかのように固化材添加量の増加にともない安定処理土は化学的作用により見かけ上圧密降伏応力 p_c が増加し、

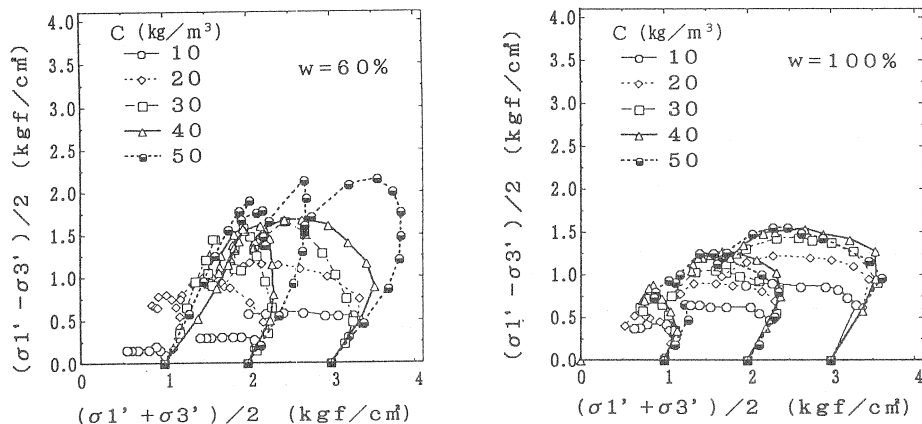


図-8. 有効応力経路図

擬似的に過圧密土になるものと考えられる。よって、過圧密比 $n = p_c / \sigma_c$ が大きくなると過圧密土の挙動を示すものと考えられる。 $w = 100\%$ の場合には、 $w = 60\%$ に比べ圧密降伏応力が小さいので過圧密土の挙動はそれほど見られないが、固化材の添加量が増加し過圧密比が大きくなると過圧密土の挙動を示す傾向が認められた。

図-9、10は三軸圧縮試験（CU試験）より得られた結果より、軸差応力の最大時を破壊時の応力状態とみなし、 $w = 60\%$ および $w = 100\%$ の供試体の破壊時の応力状態を示したものであり、図-9が全応力表示の結果、図-10が有効応力表示の結果である。図中には固化材の添加量ごとに線を引いている。モール・クーロンの破壊基準によると、この直線の切片が粘着力 c_{cu} （あるいは c' ）、勾配が内部摩擦角 ϕ_{cu} （あるいは ϕ' ）に相当するものとする。圧密試験の結果によると、今回実施した拘束圧（ $\sigma_c = 1.0 \sim 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ ）の範囲では見かけ上過圧密領域に位置するものが多く、モール・クーロンの破壊基準により求めた強度定数（ c 、 ϕ ）は過圧密領域での強度定数となる。これによると、固化材添加量の増加にともない粘着力 c の増加はみられるが、内部摩擦角 ϕ の増加はさほどみられないことがわかる。以上の結果より、固化材を添加することにより見かけ上過圧密状態となった安定処理土の強度定数は粘着力 c の増加が顕著に現われ、基本的には c 材とみなしてよいものと考えられる。また、 $w = 60\%$ の安定処理土は $w = 100\%$ のものに比べ、粘着力 c の増加の割合が大きく、内部摩擦角 ϕ は小さい値を示している。これは、含水比の相違により固化材と粘土と水分の配合率が変化するため粘土粒子間の結合力、摩擦抵抗が変化するものと考えられる。

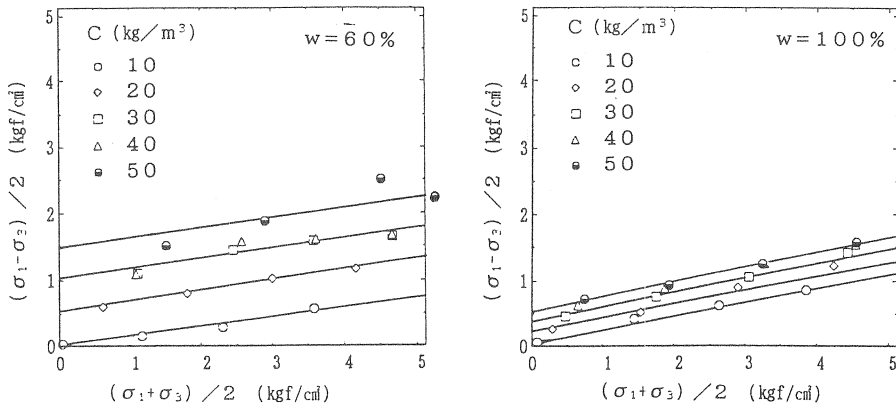


図-9. 安定処理土の強度定数（全応力表示）

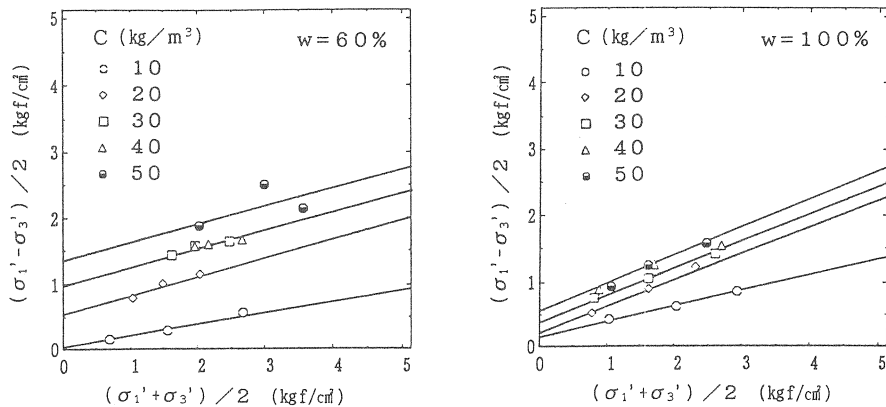


図-10. 安定処理土の強度定数（有効応力表示）

4. あとがき

本報告では、カオリン粘土の含水比とセメント系固化材の添加量を定量的に変化させた粘土供試体の力学試験を行い、安定処理土の力学的性質について考察をおこない、おもに次の結果を得た。

- 1) セメント系固化材による安定処理土の力学的性質は、固化材の添加量および試料の含水比に影響され、固化材添加量と一軸圧縮強度の関係は試料の初期含水比をパラメータとして定量的に表されることが明らかになった。
- 2) セメント系固化材による安定処理土は化学的作用により擬似的に過圧密土となるものと考えられ、固化材の添加量と圧密降伏応力の関係も試料の初期含水比をパラメータとして定量的に表されることが明らかになった。
- 3) 一軸圧縮強度と圧密降伏応力の関係にはよい相関があることが明らかになり、一軸圧縮強度から圧密降伏応力が推定できることが示された。
- 4) セメント系固化材による安定処理土は、上述したように擬似的に過圧密土となるため、降伏応力以下の拘束圧（過圧密領域）においては、固化材の添加量の増加にともない粘着力 c は増加するが、内部摩擦角 ϕ の増加はみられないことが明らかになった。

参考文献

- 1) (社)セメント協会編(1985):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
- 2) 徳山曹達(株)(1990):セメント系固化材ハードキープ技術資料
- 3) 酒井敏明、牛山宏隆、藤原東雄、上 俊二(1992):セメント系固化材によるカオリン粘土安定処理土の強度特性, 第27回土質工学研究発表会概要集, pp. 2319-2320.
- 4) 上 俊二、藤原東雄、酒井敏明、牛山宏隆(1993):セメント系固化材によるカオリン粘土安定処理土の圧密、せん断特性特性, 第28回土質工学研究発表会概要集, pp. 2549-2550.