

## セメント系固化材により改良した種々の土の静的強度特性

Undrained shear strength characteristics of various soils treated with cement stabilizers

岡林 茂生 Shigeo OKABAYASHI (㈱宇部三菱セメント研究所)  
 藤野 秀利 Hidetoshi FUJINO (㈱宇部三菱セメント研究所)  
 山本 哲朗 Tetsuro YAMAMOTO (山口大学工学部)  
 鈴木 素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学工学部)  
 川島 洋史 Hiroshi KAWASHIMA (㈱ウエスコ)

改良性能の異なる5種類の固化材を用いて安定処理された種々の土を対象に、一軸および三軸圧縮試験を行い、処理土の強度・変形特性を調べた。その結果、特殊土を対象とした安定処理土の一軸圧縮強さは土と固化材の種類によって著しく異なることを示した。また三軸圧縮試験結果の整理において、一軸圧縮強さが高い値を示す場合には破壊包絡線が得られなかったが、低い値を示す場合には破壊包絡線が得られた。さらに、一軸および三軸圧縮試験から求められる処理土の各非排水強度の関係は、土および固化材の種類によらず、簡便な相関式で与えられる。

キーワード：安定処理土、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、非排水強度 (IGC:D10)

### 1 はじめに

軟弱地盤を改良する有効な手法の一つとして化学的安定処理工法がある。この工法は軟弱な土にセメント系固化材等を添加・混合し、土の安定性や耐久性を向上させるもので、構造物の基礎地盤・路床・路盤の安定処理または浚渫底泥の固化処理などに採用されている。

本安定処理工法を活用した地盤改良の実績は非常に多いものの、一般に改良土の強度は、試験の簡便性などの理由から一軸圧縮強さで評価されている<sup>1)</sup>。従来の研究では、地盤内の拘束圧や間隙水圧、排水条件など原位置の状態を再現した上で安定処理土の強度特性が把握されておらず、改良土の基本的な強度・変形特性は十分に解明されていないのが現状である。

これらのことから、本研究では、固化特性の異なる5種類の固化材を用いて改良した種々の土を対象に、一軸および三軸圧縮試験を行い、土質力学的な基礎データを収集するとともに、静的な荷重を受けた場合の強度・変形特性を系統的に把握することを目的としている。

### 2 試験概要

#### 2.1 試料土および固化材

試験に用いた試料土はシルト質砂、粘質土、有機質粘土、泥炭、有機質火山灰土(黒ぼく)および火山灰質土(ローム)の6種類である。図-1および表-1にそれぞれ各試料土の粒径加積曲線および土質特性を示す。なお、泥炭については有機分が非常に多いため、細粒分含有率については測定することができなかった。

使用した固化材は、普通ポルトランドセメント(OPC)の他に、セメント系固化材3種類(固化材A(一般軟弱土用:セメント-せっこう系)、固化材B

(有機質土用:セメント-せっこう系)、固化材C(高有機質土用:セメント-高炉スラグ-せっこう系))、および生石灰の計5種類である。

#### 2.2 試験条件

一軸圧縮試験および三軸圧縮試験の試験ケースを表-2に示す。一軸圧縮試験は6種類の土に対し、OPCの他に、1~2種類の固化材を50~200 kg/m<sup>3</sup>の添加量で安定処理したものについて行った。このうち、一軸圧縮強さが約200~400 kN/m<sup>2</sup>および固化材添加量の違いにより特徴的な強度発現を示した供試体については三軸圧縮試験を行った。

#### 2.3 試験方法

供試体(φ=50mm, h=100mm)は、地盤工学会基準の「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法(JGS 0821-2000)」<sup>2)</sup>に準じて作製し、所定期間湿空養生(温度20±3℃, 湿度95%)を行った。

一軸圧縮試験および三軸圧縮試験はJIS A 1216 および

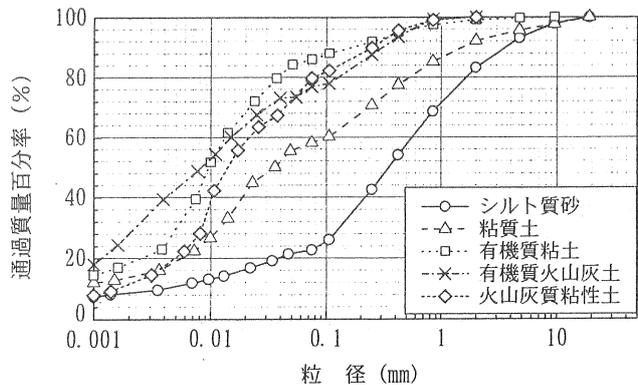


図-1 各試料土の粒径加積曲線

表-1 試料土の土質特性

工学的分類	シルト質砂	粘質土	有機質粘土(浚渫土)	泥炭	有機質火山灰土(黒ぼく)	火山灰質粘性土(ローム)
採取地	大阪府	山口県	静岡県	北海道	広島県	千葉県
自然含水比 (%)	15.3	45.0	119.8	697.3	94.5	93.7
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.08	1.80	1.34	1.03	1.45	1.43
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.67	2.69	2.48	1.53	2.45	2.77
細粒分含有率 (%)	23	56	86	—	73	80
液性限界 (%)	NP	47.4	115.4	NP	111.0	119.5
塑性指数	NP	19.9	51.8	NP	44.9	56.9
有機物含有量* (%)	0.28	0.28	18.8	90.6	17.8	0.04

\* 泥炭(強熱減量試験), その他の試料(有機物含有量試験)

表-2 試料土と固化材の種類・添加量

試料土	固化材	固化材添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	
		一軸圧縮試験	三軸圧縮試験
シルト質砂	OPC, 固化材A	50~200	—
粘質土	OPC, 固化材A		50
有機質粘土	OPC, 固化材A, 固化材B	100~200	150
泥炭	OPC, 固化材B, 固化材C		200
有機質火山灰土	OPC, 固化材B, 固化材C		200
火山灰質粘性土	OPC, 固化材A, 生石灰		—

JGS 0521-2000 に準拠して行った。三軸圧縮試験は、安定処理土供試体の飽和化が困難なことや、改良土のせん断強度 ( $\tau_f$ ) の算定が  $\phi_v=0$  法から  $\tau_f=q_v/2$  としていることなどの理由から<sup>3)</sup>、非圧密・非排水(UU)条件で行った。拘束圧 ( $\sigma_3$ ) は現場の土被り圧を考慮して 50, 100 および 150 kN/m<sup>2</sup> とした。

### 3 試験結果および考察

#### 3.1 一軸圧縮試験

図-2 に安定処理した各試料土の固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。

##### (a) シルト質砂

両固化材ともに添加量の増加により、 $q_u$  はほぼ直線的に増加するが、固化材種類の違いによる差は小さい。これは、セメント水和物(C-S-H)による砂粒子の接着が不可欠で、エトリンサイトによる寄与度が小さいためと推察される。

##### (b) 粘質土

シルト質砂と同様な強度増加傾向を示しているが、土粒子の細粒分がやや多いことによって、固化材添加量が 100 kg/m<sup>3</sup> 以上の領域で固化材Aの改良効果は、OPC に比較して大きい。

##### (c) 有機質粘土

有機質粘土に用いた各固化材の改良効果は、固化材B

>固化材A>OPC となり、固化材添加量が多いほどその差は顕著となった。これは固化材中のせつこう量と対応しており、生成したエトリンサイトが強度増加に大きく影響していることが推察される<sup>4)</sup>。

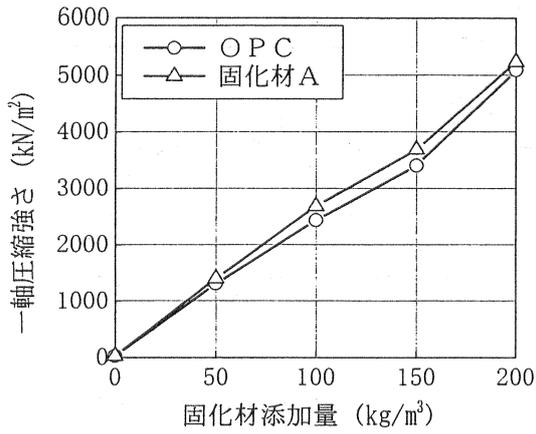
##### (d) 泥炭

OPC および固化材Bを添加した処理土の  $q_u$  は、固化材添加量の増加に伴い、ほぼ直線的に大きくなっている。これに対し、固化材Cを添加した改良土の  $q_u$  は、固化材添加量が 100~150 kg/m<sup>3</sup> の領域では OPC を添加した改良土よりも小さいが、固化材添加量を 200 kg/m<sup>3</sup> とすると急激に増加した。この固化材Cによる大幅な強度増加の理由として、セメントから遊離するカルシウムイオンが土中に含まれている多量の有機物に消費されるため、固化材添加量 150 kg/m<sup>3</sup> 以下の添加量領域では、高炉スラグの活性化が十分進行していないが、固化材添加量が多くなると高炉スラグの水和が促進したことによるものであると考えられる<sup>5)</sup>。

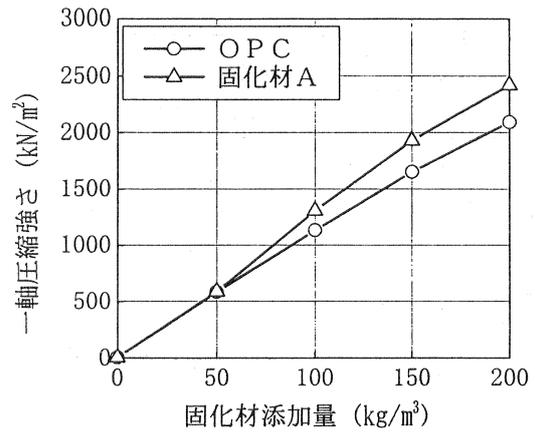
##### (e) 有機質火山灰土

固化材Bを添加した処理土の強度は OPC を添加したものより全体として大きく、固化材添加量が多いほどその差異は明瞭になる。しかしながら、固化材Cを添加した処理土の強度は固化材添加量が増えてもほとんど増加せず、OPC を添加したものより全体として小さい。いずれの固化材を用いても、有機質火山灰土を対象とした処

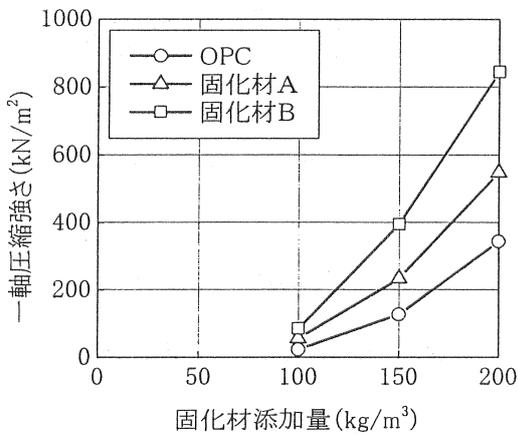
セメント系固化材により改良した種々の土の静的強度特性



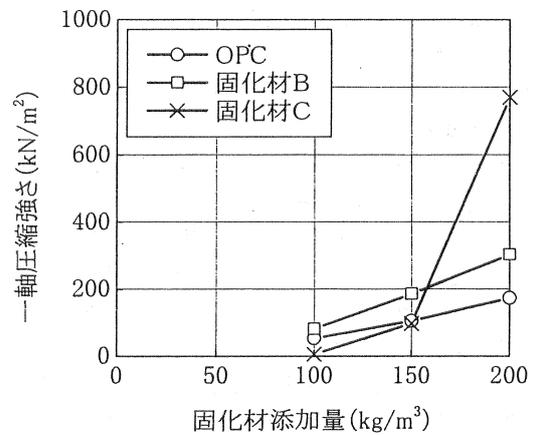
(a) シルト質砂



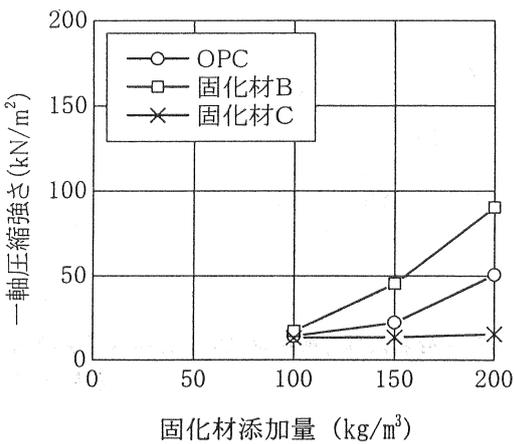
(b) 粘質土



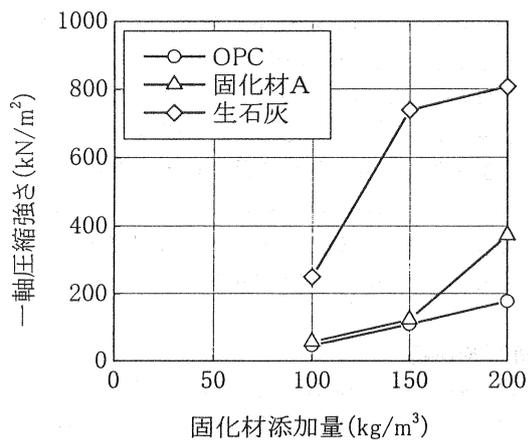
(c) 有機質粘土



(d) 泥炭



(e) 有機質火山灰土



(f) 火山灰質粘性土

図-2 一軸圧縮強さと固化材添加量の関係 (材齢7日)

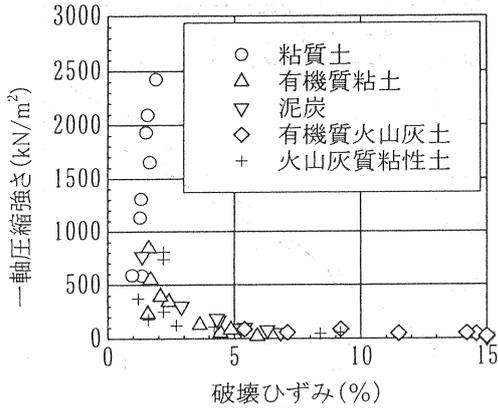


図-3 破壊ひずみと一軸圧縮強さ (材齢 7 日)

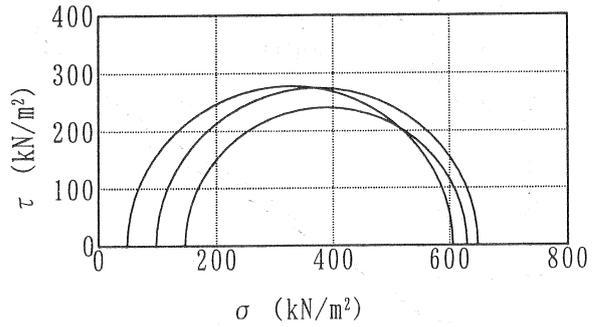
理土の  $q_u$  は大きくても  $90\text{kN/m}^2$  程度であった。これは前述した有機物がセメントおよび高炉スラグの水和反応を含めて大きく阻害したためと考えられる。

(f) 火山灰質粘性土

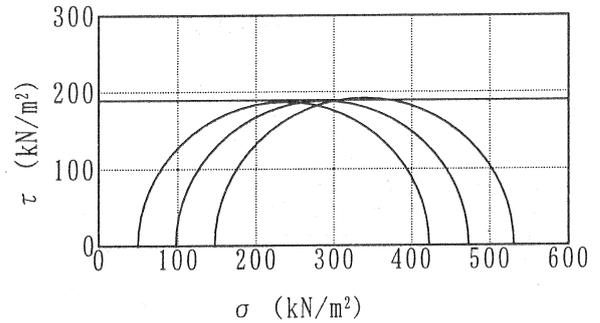
固化材 A を添加した処理土の  $q_u$  は固化材添加量が  $150\text{kg/m}^3$  以下では OPC のそれとほぼ同じで、それ以上の固化材添加量で固化材 A と OPC の差異が明瞭に出ている。これに対して生石灰を添加した改良土の  $q_u$  は  $100\sim 150\text{kg/m}^3$  の添加量で高い強度を示した。固化材 A の強度があまり増加しない理由として、固化材から溶出した  $\text{Ca}^{2+}$  が火山灰中に含まれる粘土粒子に吸着され、C-S-H やエトリンガイトの生成が不十分となったためと推察される<sup>9)</sup>。生石灰の強度増加については、改良初期段階における石灰の水和に伴う含水比の低下と生石灰から供給される多量の Ca 分による粘土粒子の凝集に加えて、ポゾラン反応が進行したことによると考えられる。以上、安定処理土の  $q_u$  は固化材添加量の増加と共に大きくなるが、土および固化材の種類によって大きく変化するため、周知のように改良目的に応じて対象となる土の性状に適合する固化材の種類および添加量を選定する必要がある。図-3 にシルト質砂を除いた安定処理土の  $q_u$  と破壊ひずみ ( $\epsilon_f$ ) の関係を示した。  $\epsilon_f$  は  $q_u$  の増加とともに小さくなり、  $q_u$  が  $200\text{kN/m}^2$  以上の領域において、  $1\sim 3\%$  程度となり脆性的な破壊挙動を示すことが確認された。

3.2 三軸圧縮試験

図-4 に三軸圧縮試験の結果であるモール応力円と破壊包絡線の例を示す。本実験範囲では図のように各円のばらつきに関して 2 つのパターンに分けることができた。(a) は個々の円にばらつきがあるため包絡線が得られないものである。逆に (b) は従来のように、包絡線が得られるものである。これらの差異の要因として供試体の強度が考えられる。(a) は  $q_u$  で  $500\text{kN/m}^2$  以上の高強度を示したものに多く、本研究の実験範囲では、粘質土 (OPC, 固化材 A の  $50\text{kg/m}^3$  添加)、泥炭 (固化材 C の  $200\text{kg/m}^3$



(a) 包絡線が描けないタイプ



(b) 包絡線が描けるタイプ

図-4 モールの応力円と破壊包絡線

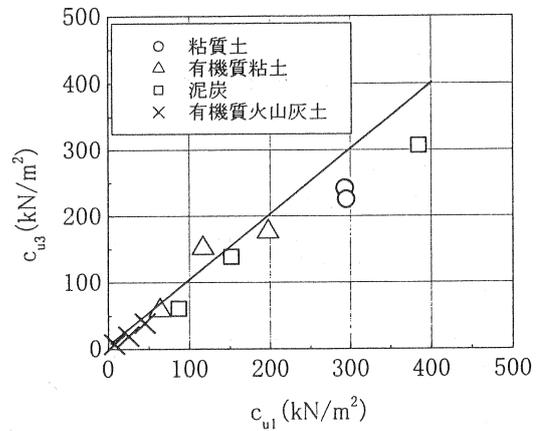


図-5 一軸および三軸圧縮試験の非排水強度の関係 (材齢 7 日)

添加) が相当する。一方、  $500\text{kN/m}^2$  未満では (b) のタイプが多く、有機質粘土 (OPC, 固化材 A, 固化材 B の  $150\text{kg/m}^3$  添加)、泥炭 (OPC, 固化材 B の  $200\text{kg/m}^3$  添加)、黒ぼく (OPC, 固化材 B, 固化材 C の  $200\text{kg/m}^3$  添加) がこれに相当する。このことから、安定処理土供試体の  $q_u$  が  $500\text{kN/m}^2$  以上になると、本実験範囲では拘束圧の影響を受けにくく、個々の供試体の不均一性がより顕著に現れ

たためと推察される。なお、(b)の破壊包絡線から得られる内部摩擦角 ( $\phi_v$ ) は  $0.0 \sim 2.6^\circ$  と非常に小さい値のためいずれもゼロと見なした。

### 3.3 一軸および三軸圧縮試験から求められる非排水強度の比較

安定処理土供試体の非排水強度 (三軸圧縮試験から求められる非排水強度  $c_{u3} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ , 一軸圧縮試験から求められる非排水強度  $c_{u1} = q_u / 2$ ) の関係を図-5に示す。ここで、三軸圧縮試験から得られる非排水強度は、3.3で述べた(a)タイプの場合、包絡線を  $\phi_v = 0$  とみなし、各応力円の最大せん断応力を平均した値をとした。さらに、破壊包絡線の得られるタイプと得られないタイプの2つの領域も示している。この図から、一軸および三軸圧縮試験で得られた非排水強度は、 $c_{u3} = c_{u1}$  の関係式が確認された。

## 4 結論

砂質土、粘性土などの一般軟弱土および泥炭、ロームなどの6種類の特種土に対して固化特性の異なる5種類の固化材を添加した安定処理土に対して一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を行い、安定処理土の強度・変形特性を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 泥炭に高有機質土用固化材(セメント-高炉スラグ-せっこう系)を添加した場合、 $q_u$  は固化材添加量が  $100 \sim 150 \text{ kg/m}^3$  の範囲では OPC よりも小さいが、固化材添加量が  $200 \text{ kg/m}^3$  以上になると著しく増加した。
- (2) 火山灰質粘性土に一般軟弱土用固化材(セメント-せっこう系)を添加した場合、 $q_u$  は固化材添加量が  $150 \text{ kg/m}^3$  以下では OPC のそれとほぼ同じで、固化材添加量がそれ以上になると本固化材と OPC の強度差が明瞭にあらわれる。これに対して、生石灰を添加した場合、 $q_u$  は固化材添加量が  $100 \sim 150 \text{ kg/m}^3$  の範囲で高い値を示した。

(3) 三軸圧縮試験では、安定処理土供試体の  $q_u$  が  $500 \text{ kN/m}^2$  以上の領域では、モール円の破壊包絡線が得られなかったが、それ以下の領域では、モール円から破壊包絡線が得られた。この原因として、高強度になると本実験範囲での拘束圧の影響は小さくなり、供試体の不均一性が顕在化したためと推察される。

(4) 安定処理土の一軸および三軸圧縮試験から求められている非排水強度は、従来から用いられている  $\tau_f = q_u / 2$  の関係にあることが確認された。

### 謝辞

本原稿の作成にあたりご協力頂いた、山口大学工学部地盤環境工学研究室大学院生 田口岳志氏 に深甚の謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 木幡行宏ほか：セメント系安定処理土の強度変形特性について、セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, pp. 1-19, 1996.
- 2) 馬場崎亮一ほか：安定処理土の強度に及ぼす影響因子、セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, pp. 20-41, 1996.
- 3) 鳥光照雄：セメント系固化材による安定処理土の強度定数、セメント技術年報, Vol. 34, pp. 475-479, 1980.
- 4) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第二版, pp. 17-19, 1994.
- 5) 岡林茂生ほか：セメント安定処理した泥炭の強度発現性、第35回地盤工学研究発表会概要集, pp. 1223-1224, 2000.
- 6) 清水準ほか：関東ロームの改良強度に及ぼす固化材中の石膏量の影響、第36回地盤工学研究発表会概要集, pp. 775-776, 2001.