

# 管中混合固化処理工法を想定した名古屋港浚渫処理土の力学挙動の把握

## Mechanical properties of dredged soil treated by Pneumatic Flow Method

堀内俊輔<sup>1</sup>, 依田広貴<sup>1</sup>, 中野正樹<sup>1</sup>, 山田英司<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学・大学院工学研究科, [s-horiuchi@soil.civil.nagoya-u.ac.jp](mailto:s-horiuchi@soil.civil.nagoya-u.ac.jp)

<sup>2</sup> 中部電力株式会社・技術開発本部・電力技術研究所・土木建築グループ

### 概要

名古屋港の浚渫土は年間 130 万 m<sup>3</sup> を越えており、浚渫土の仮置き場である名古屋港ポートアイランドへの受け入れ容量に限界がきている。本研究の目的は管中混合固化処理工法<sup>1)</sup>を想定した名古屋港ポートアイランド浅層部の浚渫土の改良効果と地盤材料としての有用性、力学特性を把握することである。まず、浚渫土の物理的、力学的性質を把握し、浚渫土が固化材等の改良なしでは、地盤材料として有効利用できないことを示した。次に、浚渫土に固化材として高炉セメント B 種を添加した流動性を持ったセメント改良土の各種室内力学試験を行った。その結果、ポートアイランド浅層部の浚渫土は、適切な固化材配合率により、目標フロー値、一軸圧縮強度を満足する地盤材料に転化することと、特徴的な挙動として、処理土の三軸せん断特性について、固化材添加量が多く、拘束圧が低いと、有効応力パスがテンションカット（引張り限界）に到達し、破壊に至ることが分かった。

キーワード：浚渫土、セメント固化処理土、管中混合固化処理工法、三軸圧縮試験

## 1. はじめに

名古屋港は、日本有数の貿易港として中部圏の経済・産業だけでなく、日本の経済をも支えている。その一方で、河川からの土砂流入が絶えない浅水深の港であり、また年々大型化する船舶に対応するための大水深コンテナターミナル、航路・泊地の整備拡充が必要となっており、毎年 130 万 m<sup>3</sup> 以上の浚渫土砂が発生している。これら浚渫土砂はその多くが、名古屋港ポートアイランド（以後、PI）に仮置きされている。しかし、PI の受け入れ容量にも限界がきており、その対応として、築堤嵩上げ、プラスチックボードドレーンを施工し、圧密沈下を促進することによる浚渫土減容化など、処分容量の増大が図られてはいるが、今後も浚渫土砂は発生し続けること、さらに土砂循環との視点から、浚渫土の有効利活用が喫緊の課題となっている。

本研究では、PI 浅層部の含水比の高い浚渫土砂の有効利活用として、浚渫土砂改良に対し多くの実績を残している管中混合固化処理工法に着目する。管中混合固化処理工法は、その施工実績から施工マニュアル<sup>1)</sup>も整備され、浚渫土砂の改良工法としては十分に実用化できている。しかし設計においては、一軸圧縮強度とフロー値のみを設計値としており、既往のセメント処理土の研究においても、変形挙動に注目した研究は少なく、三軸試験を行っていても粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi$  に注目した研究が多いたとえば<sup>2), ~6)</sup>。しかし今後、地盤工学においても性能照査型設計への転換は不可避であり、固化処理土の変形挙動の把握は重要な

と思われる。もちろん変形挙動の把握は数値解析への応用も可能になる。

そこで本研究では、管中混合固化処理工法をターゲットとして、PI 浚渫土、特に浅層部の高含水比浚渫土の改良土の力学挙動を、室内試験により把握することを目的とする。

## 2. 浚渫土の物理的性質の把握

本研究で用いた浚渫土は、名古屋港 PI 浅層部にある比較的高い含水比を有する浚渫土である。浚渫土の物理的性質を表 2.1 に、粒径加積曲線を図 2.1 に示す。表 2.1、図 2.1 より、浚渫土は粘土分 35.1%、シルト分 34.2%、砂分 30.7% から構成され、PI に堆積した浚渫土の中では、比較的砂分が多い材料である。しかし細粒分含有率が 7 割以上を占め

表 2.1 浚渫土の物理的性質

土粒子密度	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.639
自然含水比	$w_n$ [%]	40~70
液性限界	$w_l$ [%]	57.0
塑性限界	$w_p$ [%]	29.6
塑性指数	$I_p$ [%]	27.4
粘土分	[%]	35.1
シルト分	[%]	34.2
砂分	[%]	30.7
平均粒径 $D_{50}$	[mm]	0.011
pH		8.0

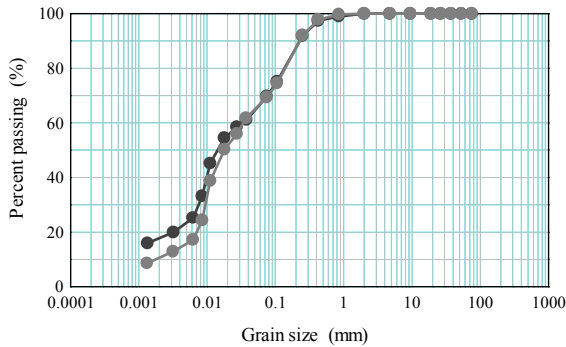


図 2.1 浚渫土の粒径加積曲線

る材料であり、地盤材料の工学的分類に基づく粘土 (CH) に分類される。自然含水比のまま、モールドで供試体を整形し、一軸圧縮試験を実施したところ、一軸圧縮強度が 20kPa 程度の低い値を示すことから<sup>7)</sup>、そのままでは浚渫土を地盤材料として有効利用することは困難である。

### 3. 浚渫土の力学特性の把握

ここでは、力学試験を行い、浚渫土の力学的性質を把握する。5章において管中混合固化処理工法を想定した配合試験から得られた改良土の力学試験を示し、改良効果を比較する。ここではそのための基礎データを示すことになる。力学試験としては、標準圧密試験、三軸圧縮試験である。

#### 3.1 浚渫土の一次元圧縮特性

浚渫土の標準圧密試験を、JIS A 1217 : 2000 に準じて実施した。標準圧密試験用の供試体は、浚渫土を 425 $\mu$ m ふるいで裏ごしすることで貝殻片などの混入物を取り除き、液性限界の 2 倍になるよう含水比調整して、真空状態で練り返し、予備圧密槽内で約 1 週間、一次元圧縮 (鉛直応力: 196.2kPa) して作製した (以後、再構成試料と呼ぶ)。なお、予備圧密終了時の供試体含水比は 35%であった。図 3.1 に浚渫土の標準圧密試験の結果 (比体積  $v$  ~ 鉛直応力  $\sigma_v$  関係) を示す。圧縮線の傾きは  $\lambda = 0.12$  ( $C_c = 0.29$ ) であり、粘性土の多い浚渫土に比べて、圧縮性は小さい。

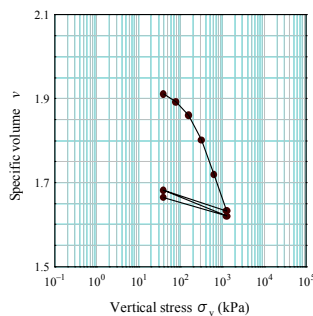


図 3.1 浚渫土の標準圧密試験結果

#### 3.2 浚渫土のせん断特性

浚渫土の側圧一定非排水三軸圧縮試験を実施した。試験用供試体は、3.1 と同様に再構成試料 (鉛直応力: 196.2kPa) を作製し、直径 35mm、高さ 80mm の円筒供試体になるようにトリミングした。拘束圧 98.1kPa、294.3kPa でそれぞれ 24 時間等方圧密した後、せん断速度 0.007mm/min で非排水せん断を行った。

図 3.2 に浚渫土の非排水三軸圧縮試験結果を示す。平均有効応力  $p'$  ~ 軸差応力  $q$  関係に着目すると、浚渫土は拘束圧 98.1、294.3kPa とともに、せん断初期に  $p'$  が減少しながら  $q$  が増加した後、 $p'$  が増加に転じながら  $q$  は増加する挙動となった。この挙動は、典型的な練返し粘土の非排水せん断挙動を呈している。

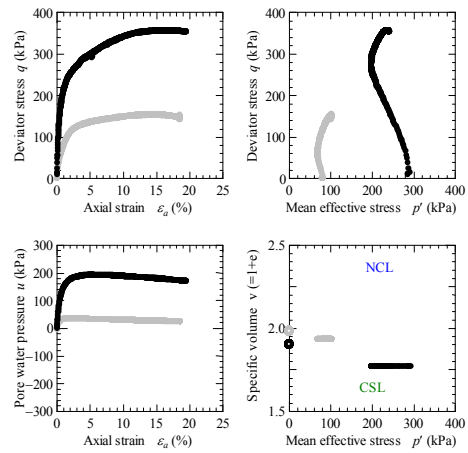


図 3.2 浚渫土の非排水三軸圧縮試験結果

### 4. 管中混合固化処理工法を想定した供試体の作製方法

本章では浅層部の高含水比浚渫土を対象として、管中混合固化処理工法による有効利用を試みるため、固化材として高炉セメント B 種を採用し、固化材添加後、固化作用が起こる前に流動性のある改良土を作製する手順を述べる。

#### 4.1 管中混合固化処理土の概要<sup>1)</sup>

軟弱な浚渫土に固化材を添加して攪拌混合し、港湾・空港の埋立てや裏埋材に用いる改良工法を軟質土固化処理工法<sup>1)</sup>と呼ぶ。管中混合固化処理工法は軟質土固化処理工法の一つであり、図 4.1 のように空気圧送中の管内に固化材を添加して、管内で発生するプラグ流による乱流効果を利用して、浚渫土と固化材を混合する工法である。管中混合固化処理工法は、浚渫土を改良して、埋立材や裏埋材、

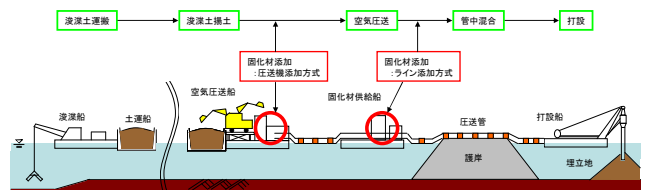


図 4.1 管中混合固化処理工法の施工概要図<sup>1)</sup>

表 4.1 管中混合固化処理工法の適用範囲<sup>1)</sup>

分類	含水比(土運船運搬土)	適用性	評価項目		
			固化材添加量	圧送能力	
粘性土	砂礫分 30~50%	高	○	標準	やや低下
		低	○	標準	低下
	砂礫分 30%以下	200%以上 (2.8w <sub>L</sub> 程度以上)	×	—	—
		110%~200% (1.5w <sub>L</sub> ~2.8w <sub>L</sub> 程度)	○	増加	標準
		90%~110% (1.3w <sub>L</sub> ~1.5w <sub>L</sub> 程度)	○	標準	標準
		70%~90% (1.0w <sub>L</sub> ~1.3w <sub>L</sub> 程度)	○	標準	やや低下
		50%~70% (0.7w <sub>L</sub> ~1.0w <sub>L</sub> 程度)	○	標準	低下
		50%以下 (0.7w <sub>L</sub> 以下)	×	—	—

固化材添加量: 設計基準強度が $q_{uck}=100kN/m^2$ 、強熱減量 $L=10\%$ 以下の場合、固化材添加量 $C=50\sim70kg/m^3$ 程度が標準。  
 圧送能力: 浚渫土中の雜物が少ない、処理土の含水比調整が容易あるいは管内の圧力損失が比較的小さいことなどにより  
 圧送機種の能力が十分発揮できる状態が標準。  
 粘性土: 細粒分(0.075mm以下)が50%以上含まれる土。

表層改良などの施工事例が数多く存在する。

また、管中混合固化処理工法における土質の適用範囲を表 4.1 に示す。詳細はマニュアルに記載されているが、管中混合固化処理工法に適する浚渫土は、砂分の含有率が30%以下で、含水比が液性限界の1.3~1.5倍程度の粘性土である。今回用いる浚渫土は、表 2.1 に示しているように砂分が30%であり、比較的管中混合固化処理工法に適した試料といえる。

#### 4.2 管中混合固化処理土の作製・養生方法

管中混合固化処理工法によって改良された土（以後、処理土と表記する）の作製方法、および供試体の作製・養生方法について述べる。処理土の作製は、文献 8) に準じて行った。また、固化材には高炉セメント B 種を使用した。浚渫土を規定含水比（液性限界の1.3~1.5倍程度）に調整し、粉体状の固化材を添加してミキサーにより攪拌混合した。この時、試料が飛散することを防ぐため、初めにミキサーの回転数を低速（154r.p.m）に設定して5分間攪拌し、いったん中断して手練りで十分にかき混ぜた後、回転数を中速（234r.p.m）に上げて更に5分間攪拌した。

供試体の作製方法として、攪拌後の試料をモールドに何層かに分けて入れ、その際にコンクリート床にモールドを打ち付け（タッピング）、気泡除去を行った。また、供試体の上端が時間経過とともに沈降する恐れがあるため、あらかじめモールド内に硬質フィルムを入れておき、規定の高さよりも1~1.5cm程度高くなるように試料を詰め、養生後に規定の高さに成形した。作製した供試体はモールド全体を密封材で被覆し、一定温度（21℃）に保たれた部屋に設置された水槽の中に入れて規定日数養生した。

#### 4.3 管中混合固化処理土の配合設定

管中混合固化処理工法は、空気圧送の過程で攪拌混合と圧送を行うので、空気圧送に必要な流動性を最低限確保する必要がある。流動性は処理土の利用用途や圧送能力、圧送距離により必要な値が変わってくるが、一般に処理土の

フロー値が90~100mm以上ならば、最低限の流動性が確保できるとされている<sup>1)</sup>。管中混合固化処理土の配合設計の要点は、以下の2点である。

- ① 浚渫土の物理特性に基づき、流動性が確保できる目標フロー値90~100mm以上を満足するように、浚渫土の含水比を調整する（規定含水比の決定）。
- ② 処理土を用いる箇所で要求される目標強度を満足するように、固化材添加量を決定する。

そこで、4.3.1 で浚渫土を用いた管中混合固化処理土の流動特性を調べ、浚渫土の規定含水比を決定する。4.3.2 では固化材（高炉セメント B 種）添加量が管中混合固化処理土の力学特性に与える影響を調べる。本研究では管中混合固化処理土の具体的な用途を設定していないが、本研究と同じ名古屋港浚渫土砂を管中混合固化処理して埋立に用いた中部国際空港建設時の室内強度430kPaを参考に、室内目標強度を養生28日の一軸圧縮強度が400kPa以上と設定した。

#### 4.3.1 管中混合固化処理土の流動特性

表 2.1 に示す浚渫土の物理的性質をもとにして、浚渫土の含水比 $w_n$ を液性限界 $w_L$ の1.2~1.6倍に、固化材添加量 $C$ を50~100kg/m<sup>3</sup>に変えて処理土を作製し、フロー試験をJHS A 313: 1992 に準じて実施した。なお固化材添加量 $C$ は、処理土1m<sup>3</sup>に対する固化材の質量(kg)を表す。

図 4.2 に、固化材を添加する際の浚渫土含水比とフロー値の関係を、固化材添加量 $C$ ごとに示す。なお浚渫土のフロー値も併せて示す。図 4.5 より、固化材添加量 $C$ によるフロー値の差はほとんどみられず、フロー値90~100mm以上の条件を満たす浚渫土の含水比 $w_n$ は、固化材添加量 $C$ によらず80%以上となった。固化材添加量 $C$ によるフロー値のばらつきが少なく、表 4.1 から液性限界 $w_L$ の1.4倍程度の処理土評価として標準であることから、本研究における浚渫土の規定含水比を $w=79.8\%$ とする。

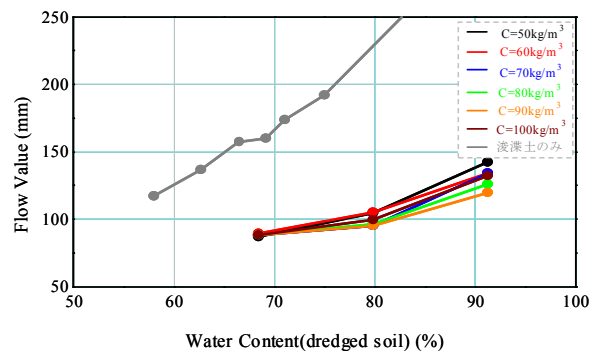


図 4.2 浚渫土含水比-フロー値関係

#### 4.3.2 管中混合固化処理土の一軸圧縮特性

4.3.1 から、浚渫土含水比が79.8%の時に、管中混合固化処理工法に必要な最低限の流動性が確保されることが

わかった。そこで、 $w=79.8\%$ を浚渫土の規定含水比として、固化材添加量  $C$  を 50, 70,  $100\text{kg/m}^3$  として処理土を作製し、JIS A 1216:1998 に準じて処理土の一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験用の供試体は、直径 50mm、高さ 100mm であり、タッピングにより試料内の気泡を除去し、規定日数の養生終了後に、試料の余剰部分を成形して作製した。なお、せん断速度は  $1\text{mm/min}$  である。

図 4.3 に各種処理土の養生日数と一軸圧縮強度の関係を示す。養生日数は 3, 7, 28, 56, 91 日とした。図 4.3 より、固化材添加量  $C$  に応じて一軸圧縮強度は増加し、特に初期の強度増加率は大きい。また、固化材添加量  $C$  により差はあるものの、養生 28 日以降もわずかながら強度増加がみられ、処理土の長期養生効果が期待できる。また固化材添加量  $C=70\text{kg/m}^3$  では養生 28 日の一軸圧縮強度が  $400\text{kPa}$  以上となった。したがって本研究における浚渫土の基準固化材添加量  $C$  を  $70\text{kg/m}^3$  と設定する。なお、固化材添加量  $C=50\text{kg/m}^3$  においても、養生 28 日の一軸圧縮強度は  $127\text{kPa}$  で、通常設定する設計基準強度  $100\sim 200\text{kPa}$  を満足し、処理土として利用可能である。

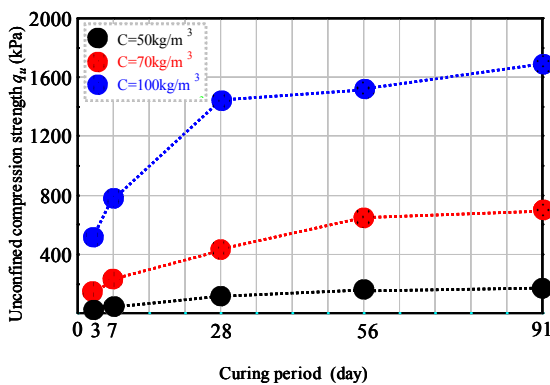


図 4.3 処理土 ( $w=79.8\%$ ) の養生日数-一軸圧縮強度関係

## 5. 管中混合固化処理土の力学的性質の把握

4.3 において基準配合を決定した。ここでは基準配合で作製した処理土に対し、圧縮特性やせん断特性に及ぼす養生日数の影響および、固化材添加量の影響を把握するために、各種力学試験を実施した。

### 5.1 管中混合固化処理土の一次元圧縮特性

処理土の標準圧密試験を JIS A 1217:2000 に準じて実施した。圧密試験用の供試体は、タッピングにより試料内の気泡を除去して、図 5.1 に示す圧密試験用プラスチック容器

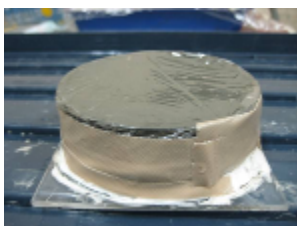


図 5.1 圧密試験用プラスチック容器

器に入れ（直径 80mm、高さ約 30mm）、規定日数の養生終了後に圧密リングを押し込み、試料を乱さないようにトリミングした。

### (1) 養生日数の影響

図 5.2 に、規定含水比  $w=79.8\%$ 、基準固化材添加量  $C=70\text{kg/m}^3$  の処理土に対する養生日数の違いによる圧縮特性を、浚渫土砂の圧縮特性と併せて示す。養生日数は 7 日、28 日、56 日とした。処理土の初期比体積は養生日数によらず一定で、浚渫土と比較してかなり大きくなる。これは、処理前の浚渫土の規定含水比が高く、またセメントとの固化反応により、締め固めずとも大きい含水比のままでも供試体が状態を保てるためであると考えられる。処理土の初期圧縮量（載荷前～ $200\text{kPa}$  程度）は小さいが、 $200\text{kPa}$  より大きな鉛直応力になると、養生 7 日では圧縮量が増加し、全体の圧縮量は浚渫土とほぼ変わらない。養生 28 日と 56 日の  $300\text{kPa}$  より大きな鉛直応力での圧縮量は増加するもののそれほど大きくなり、全体としては養生 7 日の約半分程度である。養生 7 日では固化反応が十分に進行していないが、養生 28 日以降はセメントの固化反応が十分に進行していると考えられる。すなわち、処理土は浚渫土に比べて比体積が大きいにも関わらず、 $200\text{kPa}$  程度の鉛直応力までの低圧条件下では浚渫土よりも圧縮量が小さくなっており、固化材の添加、養生過程を施すことで、低圧条件下において圧縮性の低い材料に改善される。一方、 $200\text{kPa}$  を越える高圧条件下では、圧縮線の傾きが急増し、粘土の先行圧密圧力に類似する。このあたりからセメント固化が、載荷により劣化し始めていると考えられ、その度合いは養生日数が少ないほど大きくなる。

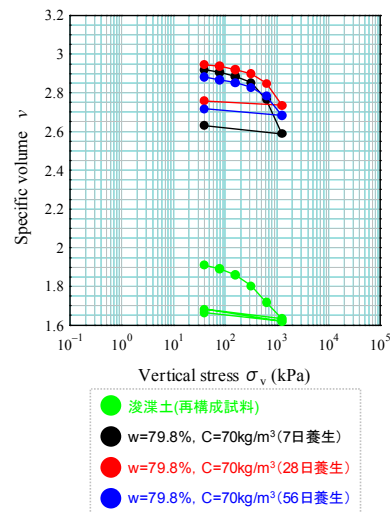


図 5.2 標準圧密試験結果（養生日数比較）

### (2) セメント添加量の影響

図 5.3 に浚渫土の含水比を  $w=79.8\%$  と一定にし、また養生日数は 28 日で固定して、固化材添加量  $C$  を 30.9, 50,  $70\text{kg/m}^3$  の 3 パターンに変えて、固化材添加量の処理土の



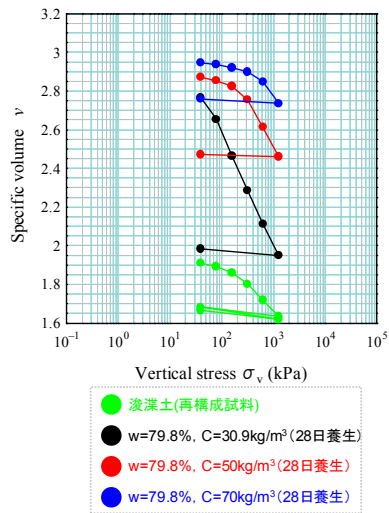


図 5.3 標準圧密試験結果(固化材添加量比較)

圧縮特性への影響を示す。図 5.3 に示すように、処理土の初期比体積は固化材添加量によらず一定で、浚渫土と比較してかなり大きくなる。処理土の圧縮量は、固化材添加量の減少に伴い大きくなり、 $C=50\text{kg/m}^3$  の時に浚渫土の圧縮量を越え、 $C=30.9\text{kg/m}^3$  では大圧縮がおり、セメントの固化作用は初期比体積を大きくすることのみ使われている。図 4.3 で示したように、固化材添加量  $C=50\text{kg/m}^3$  の養生 28 日の一軸圧縮強度は  $127\text{kPa}$  で、 $C=30.9\text{kg/m}^3$  の場合は、それを下回ることが予測され、地盤材料としての利用用途は限られることを示唆している。

## 5.2 管中混合固化処理土のせん断特性

処理土のせん断特性を調べるため、側圧一定非排水三軸圧縮試験を実施した。基準設計配合で作製した処理土について、せん断挙動に及ぼす養生日数の影響を調べ、ついでセメント添加量の影響を調べた。試験用供試体寸法は、一軸圧縮試験と同じ直径  $50\text{mm}$ 、高さ  $100\text{mm}$  の円筒供試体で、拘束圧  $98.1\text{kPa}$ 、 $294.3\text{kPa}$  でそれぞれ 24 時間等方圧密した後、せん断速度  $0.014\text{mm/min}$  で非排水せん断を行った。

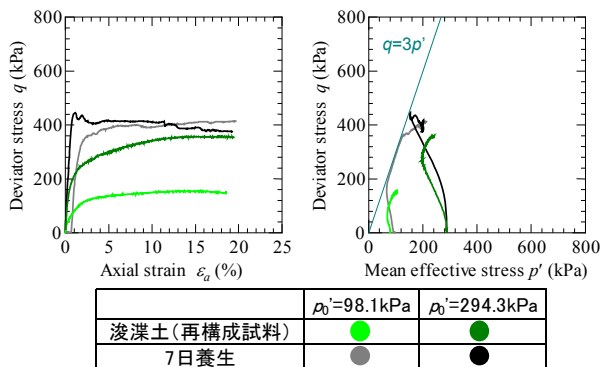


図 5.4 処理土 ( $C=70\text{kg/m}^3$ , 養生 7 日) のせん断特性

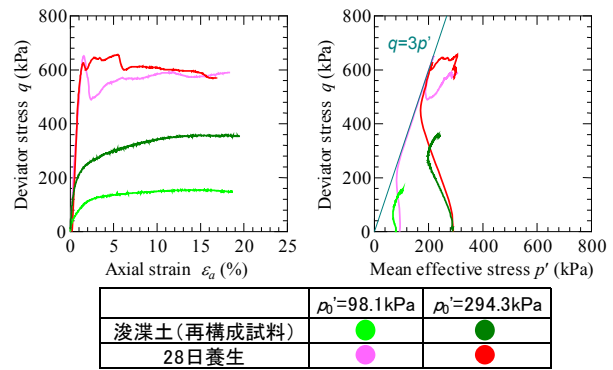


図 5.5 処理土 ( $C=70\text{kg/m}^3$ , 養生 28 日) のせん断特性

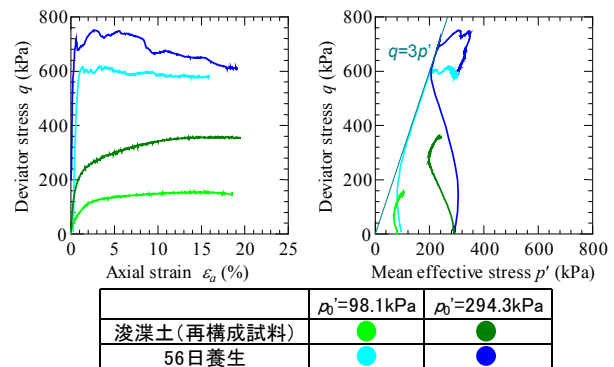


図 5.6 処理土 ( $C=70\text{kg/m}^3$ , 養生 56 日) のせん断特性

### (1) 養生日数がせん断挙動に及ぼす影響

基準配合 ( $w=79.8\%$ ,  $C=70\text{kg/m}^3$ ) で作製した処理土に対し、養生日数 7 日、28 日、56 日における試験結果を浚渫土の試験結果と併せて、それぞれ図 5.4~5.6 に示す。

図 5.4 に示す養生 7 日のせん断挙動について、浚渫土が拘束圧の違いで変形挙動、最大軸差応力に違いが表れるのに対し、処理土は拘束圧の影響を受けず、ほぼ同じ最大軸差応力を示す。また最大軸差応力は  $400\text{kPa}$  を越えるものの、浚渫土の拘束圧  $294\text{kPa}$  での最大軸差応力よりも若干大きい程度である。有効応力パスから、浚渫土に比べ大きな応力比にまで状態をとることができ、その傾きは原点を通り傾き 3 のいわゆるテンションカットに到達し、破壊に至っていると考えられる。通常の固化材などで処理されていない土は、有効応力パスがテンションカットにまで到達することはなく、固化材による処理土の大きな特徴である。

図 5.5 に示す養生 28 日のせん断挙動も、養生 7 日の処理土と同様に、拘束圧によらずほぼ同じ最大軸差応力を示し、その値は約  $600\text{kPa}$  で、浚渫土よりも高い最大軸差応力を得る。また図 5.6 に示す養生 56 日においては、拘束圧の違いによる最大軸差応力の違いが現れたが、最大軸差応力は  $700\text{kPa}$  程度となり、養生日数とともに最大軸差応力も高くなる。しかしやはり、有効応力パスは、テンションカットに漸近し、その後破壊に至っている。

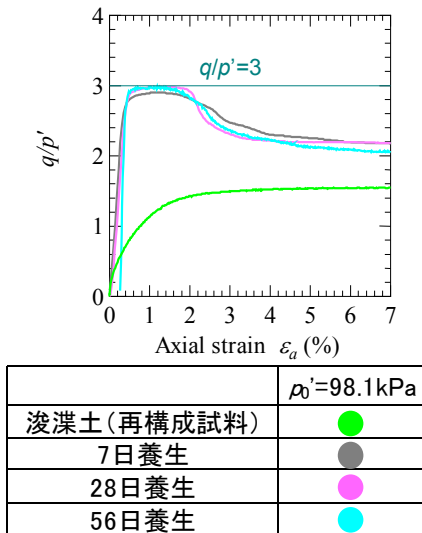


図 5.7 テンションカットへの接近 ( $P_0'=98.1\text{kPa}$ )

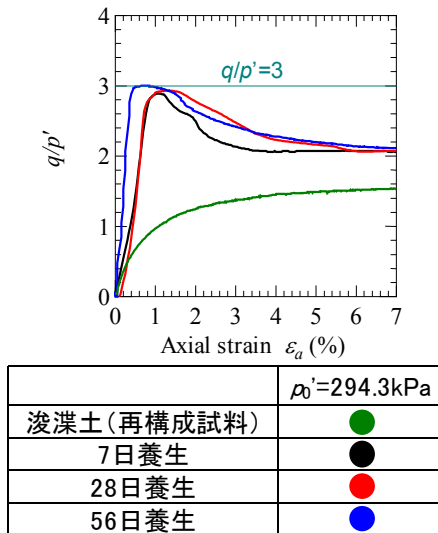


図 5.8 テンションカットへの接近 ( $P_0'=294.3\text{kPa}$ )

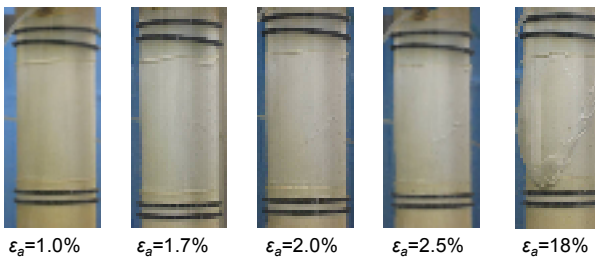


図 5.9 供試体写真

テンションカットに達したときの供試体の応力状態は、側方有効応力  $\sigma_3'$  がゼロとなる。引張り破壊に抵抗できない材料は、最大の応力比は、テンションカットに到達した 3 となり、抵抗できる材料はテンションカットをこえる<sup>9)</sup>。  $q \sim p'$  関係ではテンションカットに漸近した状態がわかりにくいので、縦軸に応力比  $q/p'$ 、横軸に軸ひずみ  $\varepsilon_a$  をとり、拘束圧ごとに整理した。図 5.7 は拘束圧が 98.1 kPa、図 5.8 は 294.3kPa である。拘束圧が 98.1kPa で低い場合、養生日数によらず、軸ひずみが 1%を過ぎた時点で  $q/p'$  は

ほぼ 3 に到達する。一方、拘束圧が 294.3kPa で高い場合、養生日数 7 日では、応力比  $q/p'$  が 3 に達しておらず、養生日数が増加するとともに応力比  $q/p'$  が 3 に到達する。

図 5.9 に 28 日養生、側圧 98.1kPa の供試体の破壊に至るまでの変形挙動を示す。軸ひずみ 18%では供試体を貫くせん断帯が明確に現れている。軸差応力  $q$  がピークを示し、その後減少しながら増減を繰り返しているが、 $q$  のピーク後の挙動は、供試体に発生したせん断帯などから供試体を要素とみなして解釈することができない。軸ひずみ 2.5%においても供試体を貫くせん断帯の発生を確認したが、有効応力パスがテンションカットに到達した時点との観察が不十分であり、今後の課題としたい。

(2) セメント添加量と拘束圧がせん断挙動に及ぼす影響

(1)において、固化材添加量  $C=70\text{kg/m}^3$  の処理土に対し、テンションカットに到達した有効応力パスが観察された。通常の土や今回実験した浚渫土では観察されないものであることから、ここでは、有効応力パスがテンションカットに達する要因について調べることを目的とする。せん断挙動に及ぼす影響として、固化材添加量  $C$  と拘束圧を取り上げる。浚渫土の含水比を  $w=79.8\%$  と一定にし、養生日数を 28 日で固定して、固化材添加量  $C=30.9, 50\text{kg/m}^3$  の 2 パターンに変えた処理土の非排水三軸圧縮試験を行った。

図 5.10 は  $C=50\text{kg/m}^3$  の処理土のせん断試験結果である。拘束圧が大きくなるにつれてせん断変形も変わり、最大軸差応力も上昇する。このような拘束圧依存性は、 $C=70\text{kg/m}^3$

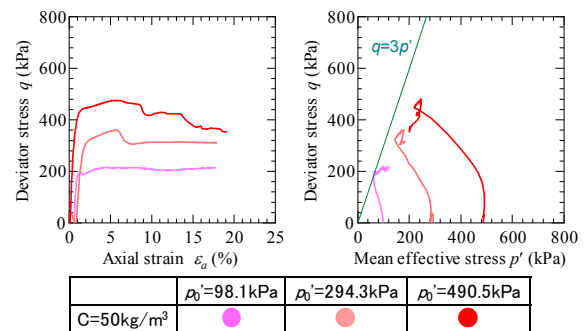


図 5.10 処理土 ( $C=50\text{kg/m}^3$ , 養生 28 日) のせん断特性

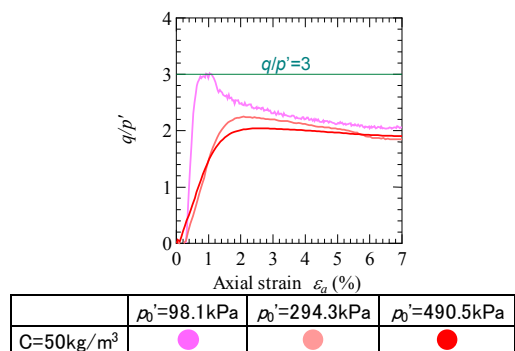


図 5.11 テンションカットへの接近 ( $C=50\text{kg/m}^3$ , 養生 28 日)

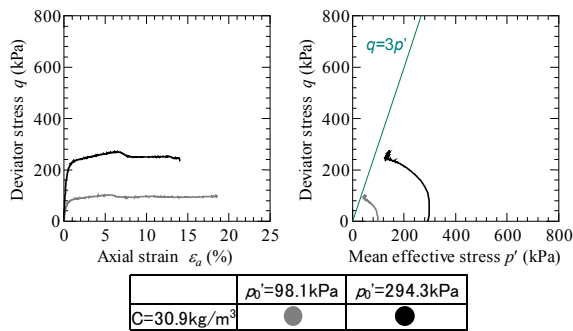


図 5.12 処理土 ( $C=30.9\text{kg/m}^3$ , 養生 28 日) のせん断特性

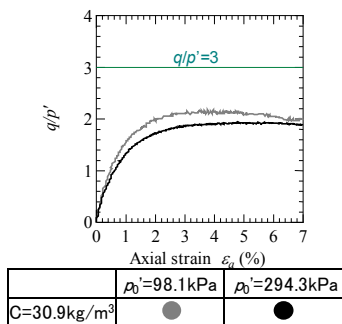


図 5.13 テンションカットへの接近  
( $C=30.9\text{kg/m}^3$ , 養生 28 日)

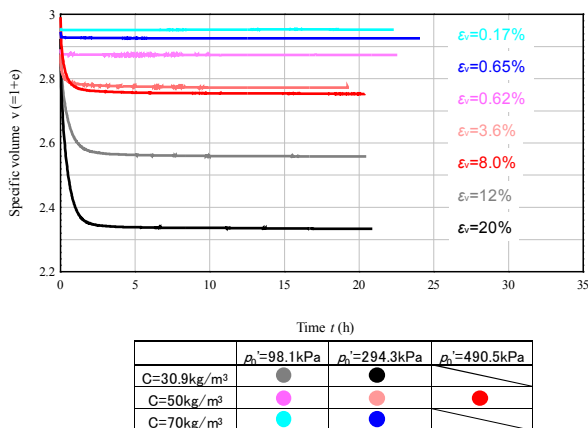


図 5.14 等方圧密過程の沈下曲線  
( $C=30.9, 50, 70\text{kg/m}^3$ , 養生 28 日)

の処理土には観察されなかったことである。拘束圧が 98.1kPa で小さいときは、有効応力パスはテンションカットに到達している。しかし、拘束圧が増加するにしたがい、有効応力パスはテンションカットにまで到達しない。拘束圧に応じたせん断に伴う応力比  $q/p'$  の変化を図 5.11 に示す。拘束圧が 98.1kPa では、確かに応力比は 3 に達しているが、拘束圧が大きくなるにしたがい、応力比は減少し、浚渫土の限界状態定数 ( $M=1.4$ ) に近づく。

図 5.12 は  $C=30.9\text{kg/m}^3$  の処理土のせん断試験結果である。拘束圧が大きくなるにつれてせん断変形も変わり、最大軸差応力も大きくなる点、 $C=30.9\text{kg/m}^3$  の処理土のせん断挙

動と同様である。しかし有効応力パスについては、拘束圧が 98.1kPa, 294.3kPa とともにテンションカットにまで到達していない。せん断に伴う応力比  $q/p'$  の変化を図 5.13 に示す。低い拘束圧の方が高い応力比となるが、ともに応力比 3 にまで達しておらず、やはり浚渫土の限界状態定数に近づいている。

図 5.14 は養生 28 日での、固化材添加量  $C=30.9, 50, 70\text{kg/m}^3$  それぞれの等方圧密過程での比体積変化を示す。 $C=70\text{kg/m}^3$  の処理土では拘束圧によらずほぼ同じ比体積変化となり、通常の土の圧密挙動と異なることがわかる。一方、 $C=30.9, 50\text{kg/m}^3$  の処理土では、拘束圧に応じて、圧密曲線が変化し、拘束圧が大きいほど大きな圧縮を示すといった通常の土と類似した挙動を示している。

以上から、処理土の有効応力パスや強度に及ぼす影響を整理する。処理土は、固化材添加量が多いほど、拘束圧が小さいほど、また養生日数が長いほど、セメントの固化作用が卓越する。そのため、有効拘束圧がゼロに近づいても外力を支えることができ、有効応力パスがテンションカットまで達する。しかし、固化材添加量が小さく、また拘束圧が大きくなってゆくと、浚渫土の限界状態定数よりも大きいものの、有効応力パスはテンションカットに到達しない。なぜなら、固化材添加量が小さいほど、セメントの固化作用の影響は小さくなり、また拘束圧が大きいほど、圧密時の圧縮が大きく、セメントの固化作用を劣化させるとともに、密度（比体積）に応じた強度特性、つまり通常の土の強度特性へと変化するためである。

## 6. 結論

本研究では、名古屋港 PI 浅層部の高含水比浚渫土砂を地盤材料として有効利用するため、管中混合固化処理工法による改良を想定し、得られた固化処理土の力学特性を各種室内試験を行うことにより調べた。以下に本研究で得られた結論を示す。

- 1) 今回用いた浚渫土は砂分を 3 割程度含む材料で、名古屋港 PI の浚渫土のなかでも砂分の多い材料である。
- 2) 高含水比浚渫土のセメント固化処理土について、浚渫土の含水比 70% に対し、固化材添加量を変化させてもフロー値は大きくは変化しない。しかし初期含水比が大きくなるにつれて、固化材添加量に応じてフロー値は変化する。また固化材添加量が増加するにつれて一軸圧縮強度は大きくなる。
- 3) 今回、設定強度を 430kPa としたところ、浚渫土の含水比 79.8%、固化材添加量  $C=70\text{kg/m}^3$  が基準配合となった。
- 3) 処理土の標準圧密試験結果から、 $w_n=79.8\%$ 、 $C=70\text{kg/m}^3$  の処理土は、28 日以上養生を施すことで、鉛直応力 200kPa 程度までであれば、浚渫土よりも圧縮性が小さくなる。しかし、200kPa をこす鉛直

応力では、圧縮性が大きくなる。添加量  $70\text{kg/m}^3$  以下の処理土では、浚渫土よりも大きな圧縮性を示す。

- 4) 処理土の非排水三軸圧縮試験結果から、処理土は、固化材添加量が多いほど、拘束圧が小さいほど、また養生日数が長いほど、セメントの固化作用が卓越し、有効応力パスがテンションカットまで達する。しかし、固化材添加量が小さく、また拘束圧が大きくなってゆくと、セメントの固化作用の影響は小さくなり、有効応力パスはテンションカットに到達しない。

今後は、テンションカットに至るまでの供試体の詳細な観察、そして粘土分の多い典型的な浚渫土を用いた固化処理土についての一連の研究、そして弾塑性構成モデルによる力学挙動の再現などを行ってゆくつもりである。

#### 参考文献

- 1) 財団法人沿岸技術研究センター：管中混合固化処工法技術マニュアル（改訂版）
- 2) 矢島寿一，永岡高，谷崎誠二(1997)，正規・過圧密セメント改良土のせん断特性と破壊基準，土木学会論文集（Ⅲ部門），No.561，pp.205-213.
- 3) 上俊二ら他(1997)，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，土木学会論文集（Ⅲ部門），No.582，pp.217-227.
- 4) 矢島寿一，丸尾茂樹，小川正二(1994)，気泡を混入した軽量土のせん断特性，土木学会論文集（Ⅲ部門），No.499，pp.197-204.
- 5) 矢島寿一，丸尾茂樹，小川正二(1996)，飽和軽量土の初期間隙比・一軸圧縮強さと破壊基準，土木学会論文集（Ⅲ部門），No.554，pp.251-257.
- 6) Kasama, K., Zen, K. and Iwataki, K.(2006), Undrained shear strength of cement-treated soils, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.2, pp.221-232.
- 7) Kai, S., Yamada, E., Nakano, M. and Asaoka, A.(2009), Elasto-plastic description of mechanical behavior on treated soils of the dredged soil of Nagoya Port, *Journal of Applied Mechanics* Vol.11,pp.413-420.
- 8) 社団法人地盤工学会：土質試験の方法と解説（改訂版）
- 9) Atkinson, J. H. (1978) : *The Mechanics of Soils -An Introduction to Critical State Soil Mechanics-*, McGRAW-HILL Book, p.212-214