

# 浚渫土砂の機械的減容化に関する研究

## A Study on Mechanical Reduction of Dredged Clay Volume and Material Properties of Clay Lumps

守屋正平\*・山本修司\*\*・村山伊知郎\*\*\*

MORIYA Masahira, YAMAMOTO Shuji and MURAYAMA Ichiro

\* (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼第一調査部長

\*\* (財) 沿岸技術研究センター 理事

\*\*\*国土交通省 九州地方整備局 関門航路事務所 所長

This paper describes the material properties of dredged clay of which volume was reduced by filter-press mechanics to accelerate consolidation. The consolidation yielding stress of filter-pressed clay is significantly smaller than the filtrated pressure. The material properties of a group of clay lump depends on the strength of each clay lump.

*Key Words : filter-pressed clay, reduction, dredged clay*

### 1. はじめに

関門航路では、航路維持及び整備のために毎年大量の浚渫土砂が発生する。これに対して土砂処分場は不足しており、環境的な配慮からも現状の土砂処分場をなるべく延命化することが望まれている。そのための方策として、浚渫土砂の間隙水を強制的に絞り出して減容化し、強度を増すことにより土砂処分場の腹付け・嵩上げ材として使用することが検討されている。

本文では、このプロジェクトの概要を紹介するとともに、プロジェクトに用いようとしている機械的に減容化処理した浚渫粘土土塊ならびにそれらの集合体である土塊群の力学特性について実験的に求めた結果を報告する。

### 2. プロジェクトの概要

関門航路は、本州と九州の間にある関門海峡を通る全長 45 km、一日約 700 隻の船舶が航行するわが国有数の国際幹線航路である。航路で浚渫された海底土砂のうち、砂分は分級し有効利用されている<sup>1)</sup>が、浚渫土の大部分を占める粘性土は、土砂処分場に投入処分されている。

現在、関門航路の浚渫土砂が投入されているのは、新門司沖土砂処分場第Ⅲ工区である。しかし、この区画もこのままではあと 10 年程度で満杯となる見込みである。

既往の土砂処分場を延命化する考え方は、大きく次の二つがある。一つは、護岸を嵩上げして、受け入れる土砂処分場の容積を増加させることである。他方は、投入する浚渫土の容積を減らすこと、堆積した浚渫土の体積を減らすことである。前者は受入容量の増大であり、後者は投入する(投入した)浚渫土の減容化である。

容量の増大化では、既設護岸を更に嵩上げするので、護岸の安定性や嵩上げのための腹付け土・盛土の安定性が問題となる。また、浚渫土砂の受け入れを中断することなく嵩上げを行うためには、嵩上げのための腹付け土

を浚渫土投入よりも先に行うこと、即ち腹付け土表面高さが浚渫土埋立表面よりも高い状態を維持して施工していく必要がある。

一方、浚渫土の減容化は、処分場に投入する前に減容化する事前処理(プラント処理)と投入後に減容化する現場処理に大別できる。事前処理は、近年各種方法が提案され、大規模なプラントも実用化され、処理能力も大幅に向上している。ただし、現状では処理コストが割高であるという点が問題である。

本検討を行うにあたり、まず民間保有の技術の中に本プロジェクトを実行する上で最適な技術を調査する目的で公募により現地実証実験を行うことを検討した。しかし、固化処理を行った場合の強度や陸上での埋立の実績はあるものの、水中埋立の例やその強度測定法についての経験は殆ど皆無であり、まず減容化処理を行った土塊および土塊群の強度特性を調査することが必要であると判明した。

このため、当初予定した現地における実規模実験を縮小し、現地を模した中・小規模なタンク試験を行うこととした。またその対象は、浚渫土砂減容化処理の代表例として濾過加圧脱水(供給圧 4Mpa, 1Mpa)による処理土を用いた。

### 3. 減容化処理土の強度特性の検討

#### 3.1 減容化処理した土塊の力学特性

今回用いた減容化処理土は、供給圧が 1MPa と 4MPa のものである。同じプラントを用いて供給圧のみを変えて処理土を製作したため、土塊の厚さも、両者 23.5 mm である。脱水を早めるための凝集剤として、両者とも、同量(土の乾燥質量に対して 3%)の PAC(ポリ塩化アルミニウム)と MgO(酸化マグネシウム)を用いたので、製造された土塊の違いは、加えている供給圧の差である。

減容化処理に用いた原泥は、新門司沖土砂処分場Ⅲ工区に堆積していた浚渫土である。これを前処理プラントで不純物や夾雑物を取り除き、含水比を調整してスラリー状にして、濾過加圧脱水機に供した。この調整スラリーの物理的特性を、表-1に示す。

表-1 調整スラリーの物理的特性

項目	単位	範囲	平均値	
土粒子密度	g/cm <sup>3</sup>	2.627 ~ 2.683	2.65	
含水比	%	275.5 ~ 308.8	288	
粒度	砂分	%	6.1 ~ 10.1	7
	シルト分	%	75.2 ~ 83.2	79
	粘土分	%	10.5 ~ 15.3	14
液性限界	%	52.5 ~ 76.0	70	
塑性限界	%	26.8 ~ 34.3	31	
塑性指数		25.7 ~ 44.1	39	
強熱減量	%	10.57 ~ 12.07	11.5	

プラントで製造された土塊を採取し、それをビニール袋に密封して、衝撃を与えないように試験室に運び込んで各実験に供した。実験室では、乾燥しないようにそれらを密封したまま保管し、実験に供するときに開封した。

強度のインデックスとして、針貫入試験の結果を用い、それと含水比の関係を検討した。針貫入試験は、軟岩などの強度推定において実績があり、貫入量-貫入抵抗曲線の傾きが一軸圧縮強さ（非排水強度）とよい相関にあることが示されている<sup>2)</sup>。

今回の針貫入試験は、一軸試験機を用い、直径:0.84mmの木綿針を変位速度3mm/minで15mmまで貫入させ、そのときの貫入量と貫入抵抗を測定した。貫入方向は、土塊の厚さ方向とした。実験が終了した後、その土塊の含水比を測定した。

図-1に、1MPaと4MPaで製造された土塊に対して行った針貫入試験結果の一例を示す。4MPa試料では、平均値に対して±25%程度のばらつきがあり、1MPa試料も、同程度のばらつきがある。貫入抵抗 $q$ は、貫入の初期には勾配のばらつきが見られるが、貫入するに従ってほぼ線形（勾配が一定）に増加しているとみなせる。

図-2に、針貫入量ごとの含水比 $w$ と貫入抵抗曲線の勾配 $\Delta q/\Delta d$ との関係を示す。図-2に示したように、貫入量によってこの曲線の傾きが異なるものもあるため、ここでは貫入量が、1~2、4~5、9~10mmの傾きを求めた。

1MPa試料、ならびに4MPa試料の含水比は、それぞれ、53~57%、33~40%に分布した。また、それらの $\Delta q/\Delta d$ は、貫入深度によらず、それぞれ、0.6~1.0N/mm、1.5~3.5N/mmを示した。すなわち、貫入抵抗と貫入量がほぼ線形関係にあることを意味している。また、同じ試料でも、特に4MPa試料で顕著だが、含水比が小さいものほど、 $\Delta q/\Delta d$ が大きくなっていることが読み取れる。このように、含水比と $\Delta q/\Delta d$ の関係は図に示す破線のような相関関係にあることが示唆される。

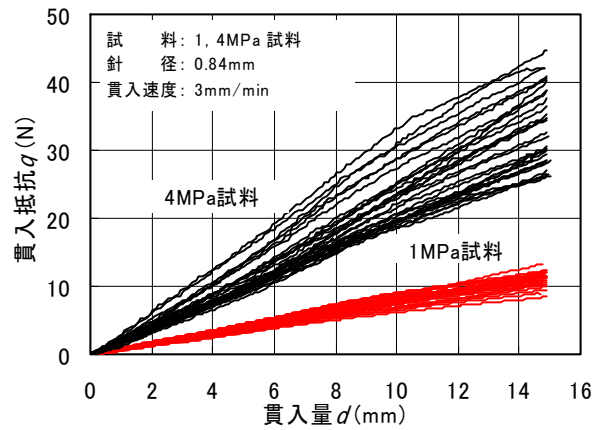


図-1 針貫入試験結果

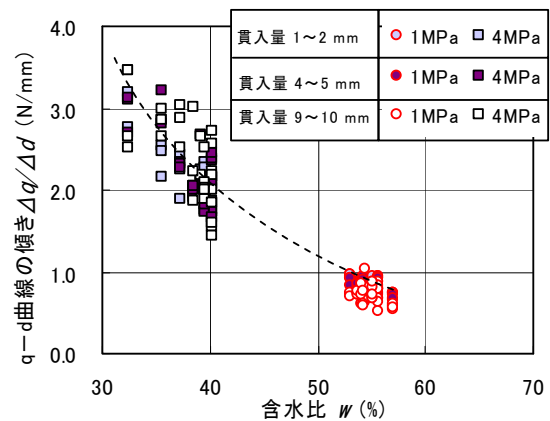


図-2 含水比と $\Delta q/\Delta d$ の関係

次に、20MPaまで載荷できる高圧用の圧密試験機を用いて、減容化処理土の段階載荷圧密試験を行った。供試体（厚さ20mm、直径50mm）は、厚さ23.5mmの土塊の中央部分から切り出した。

図-3に、1MPaならびに4MPaで製造された土塊の圧縮曲線を示す。両土塊とも、正規圧密状態ではほぼ重なり、圧縮指数は0.58~0.73となった。また、圧密降伏応力は、1MPaの場合には570~590kPa程度であり、与えた供給圧の60%程度、4MPaの場合は、1.5~1.7MPaであり、これは与えた供給圧の40%程度に相当する。

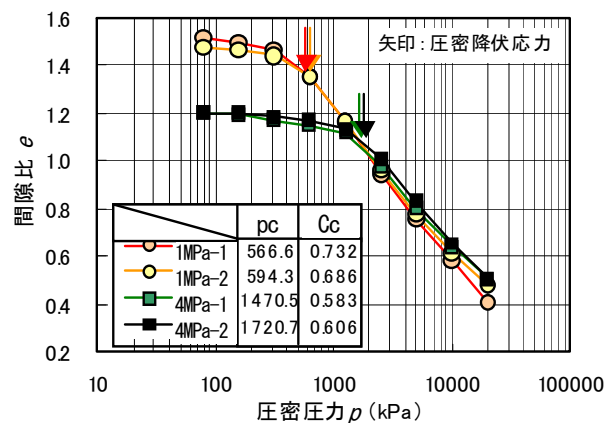


図-3 減容化処理土塊の圧縮曲線

与えた供給圧よりも土塊が示す圧密降伏応力が小さい理由は、次のように考えられる。濾過加圧脱水では、粘土層の中を水が流れる。この場合、濾布に接する土塊表面では、水圧がゼロであり、打込みポンプにより与えられた圧力はすべて土塊に有効応力として作用する。従って表層の圧密降伏応力は、与えた供給圧の大きさに等しくなり、それより内側の部分は、そこから濾布までの距離を水が流れるときに生じる浸透力分を減じた有効応力が作用していることになる。更に、圧密が完了する前にスラリーの打込みが打ち切られるので、土塊内部には未圧密の部分が残されることも要因となると考えられる。

次に、処理土塊のせん断強さを求めるために、圧密定圧一面せん断試験を行った。直径 50mm、高さ 20mm の供試体は土塊から切り出し、1MPa 試料、4MPa 試料とも、圧密圧力は供給圧 (1MPa または 4MPa)、供給圧の半分、25kPa の 3 種類とした。

図-4 に、垂直応力とせん断応力の関係を示す。破壊線は、図-3 に示した圧密降伏応力も考慮して設定した。即ち、圧密降伏応力よりも大きい垂直圧力を加えた実験は、せん断時に正規圧密状態にあるものとして、原点を通る破壊線とした。また、圧密降伏応力よりも小さい垂直圧力を加えた実験は過圧密状態にあるものとして、その破壊点と圧密降伏応力における正規圧密状態の破壊線の点を結ぶ直線を過圧密状態の破壊線とした。ここで、圧密降伏応力は、圧密試験の結果の平均値、すなわち、1MPa 試料で 580kPa、4MPa 試料で 1600kPa とした。

両試料とも、正規圧密領域では同じ破壊線となると考えて破壊線を決定した。その結果、その破壊線の傾きは約 33 度となった。一方、過圧密状態のそれは、両試料とも、22 度程度となった。また、その切片 ( $\sigma = 0\text{kPa}$ ) でのせん断応力  $\tau_0$  は、150kPa (1MPa 試料)、350kPa (4MPa 試料) 程度となった。これは、それぞれ試料の圧密降伏応力の約 25%にあたる。

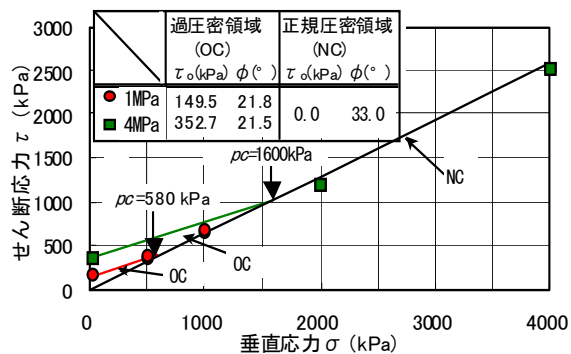


図-4 一面せん断試験による破壊基準線

### 3.2 減容化処理した土塊群の力学特性

構築された土構造物の安定性を考える上で必要な破壊基準を求めるために、減容化処理土塊群に対する大型一面せん断試験を行った。せん断箱は、下箱の深さが 300mm、上箱の厚さが 200mm の一辺が 800mm の矩形容器である。

上箱は側面のみで構成され、重錘を直接供試体に加えることで上載圧力を加える方式となっている。この試験機ならびに試験方法は、松岡らが行った原位置一面せん断試験の概念<sup>3)</sup>を参考としている。また、せん断箱の寸法は、実験に供する減容化処理土塊の最大粒径が 100mm 程度であることより設定した。

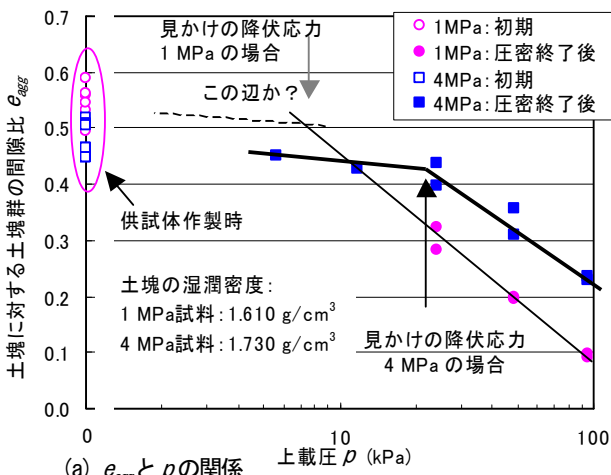
供試体の作製は、前もってふるい分けておいた数段階の粒度階から、目標となる粒度となるよう必要量をそれぞれはかりとり、8 分割しておく。分割された各粒度階の試料をシートに置き、シート内で静かに混ぜ合わせる。この混合試料を 1 層分として、せん断箱内に入れる。この作業を繰り返し行い、所定の高さまで試料が投入できたら、表面を整えて、入らなかった試料の質量を測定して、せん断箱中の試料の質量を算出する。

圧密 (圧縮) 過程では、4 つに分割された上箱のそれぞれに載荷板を置き、その上に重錘をおいて、垂直力を供試体に加える。圧密中の垂直変位は、載荷板の沈下を 4 点で測定して求める。載荷とともに供試体は直ちに沈下し、その後ほとんど沈下が生じなかった。そこで、作業効率から、設定した圧密時間 20 分が終了した後、上載荷重を加えたまま、水平方向に毎分 1mm の変位速度でせん断させ、牽引 (水平) 力、上箱の水平変位、供試体高さを計測する。せん断の打切りは、せん断容器の一辺の 15% (120mm) とした。また、上載圧は、24, 48, 95kPa を基本とし、4MPa 試料では、6, 12kPa の実験も行った。

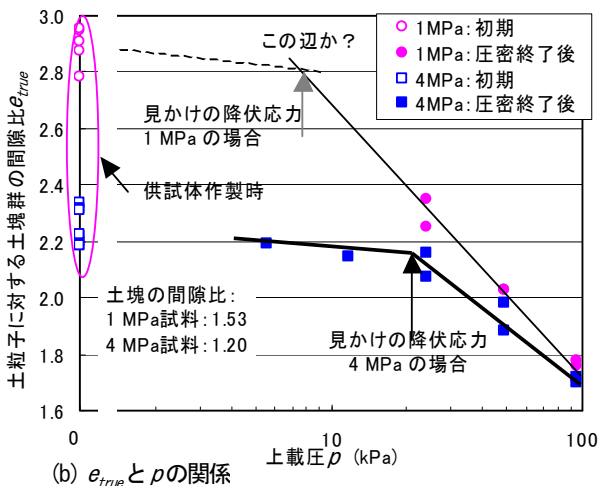
圧縮特性ならびにせん断特性を評価する上で、間隙比の概念は重要である。今回対象としている減容化処理土は、土塊そのものも粘土の塊であり、ある間隙を有している。そこで、土塊に対する土塊群の間隙比  $e_{agg}$ 、土粒子に対する土塊群の間隙比  $e_{true}$ 、土粒子に対する土塊の間隙比  $e_{lump}$  を定義しておく。土塊に対する土塊群の間隙比  $e_{agg}$  は、土塊の骨格で土塊間にできる間隙比 (みかけの間隙比) となる。土塊そのものも間隙水を有していることから、土粒子を固体とした場合の土塊の間隙比は、 $e_{lump}$  となる。従って、土粒子を固体とした場合の土塊群の間隙比  $e_{true}$  (真の間隙比) は、土粒子の体積に対する土塊内の間隙比と土塊間隙の間隙比の双方を加えたものの比となる。

圧密 (圧縮) 過程で測定した沈下量から、 $e_{agg}$ 、 $e_{true}$  を算出して、対数表示した上載圧との関係を示したものが、図-5 である。(a) 図は、 $e_{agg}$  (見かけの間隙比) との、(b) 図は  $e_{true}$  (真の間隙比) との関係である。

見かけの間隙比  $e_{agg}$  と上載圧  $p$  の関係 ((a) 図) を見ると、供試体作製時の  $e_{agg}$  は、1MPa 試料が 0.5 ~ 0.6 程度を示したのに対し、4MPa 試料は 0.45 ~ 0.52 程度となり、1MPa 試料の方が若干大きくなった。この結果は、両試料の粒度に大きな差がなかったためと思われる。載荷により沈下が生じ、上載圧が 25kPa を超えると、1MPa 試料の  $e_{agg}$  は 0.3 程度となり、4MPa 試料のそれよりも小さくなった。更に、上載圧が大きくなると  $e_{agg}$  は直線的に減少した。しかもその減少率は、4MPa 試料の方が小さくなった。



(a)  $e_{agg}$ と $p$ の関係



(b)  $e_{true}$ と $p$ の関係

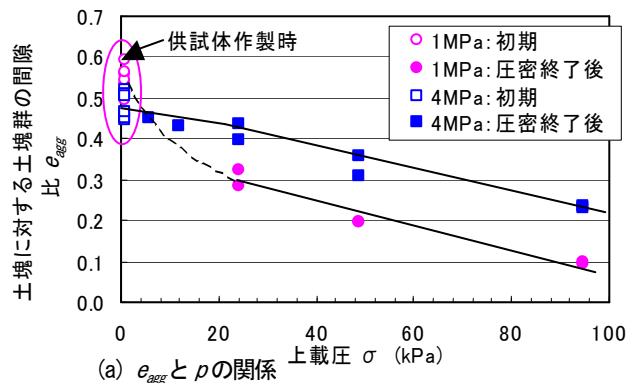
図-5 減容化処理した土塊群の圧縮曲線

図-6 に、上載圧と  $e_{agg}$  (a) 図、せん断強さ (b) 図の関係を示す。今回対象とした土塊群の破壊線 (b) 図は、数 kPa 程度の  $c$  を有する  $\phi$  材と見なせ、その  $\phi$  は、4MPa 試料で 36.5 度、1MPa 試料で 23.6 度となった。 $e_{agg}$  (a) 図) は、供試体作製時では、1MPa 試料が 4MPa 試料よりも大きく、上載圧が 24kPa を超えると、1MPa 試料の  $e_{agg}$  は 4MPa 試料のそれよりも小さくなった。このように、詰まり方として、1MPa 試料の間隙比が小さいにもかかわらず、破壊基準線は、4MPa 試料の  $\phi$  が大きくなった。このことは、土塊群のせん断強さが、土塊の詰まり方よりも、土塊自身のせん断強さに、大きく影響されることを意味している。

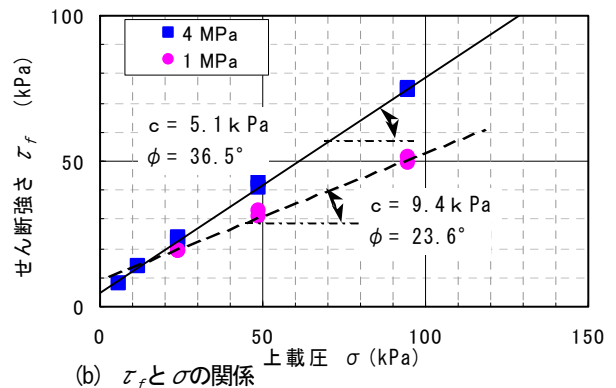
#### 4. まとめ

本文では、浚渫粘土を減容化し土木材料としての適用性を検討するプロジェクトを紹介し、そのために行った試験の結果をとりまとめ報告した。以下に、本検討から得られた知見をまとめる。

- ①濾過加圧脱水方式で製造された減容化処理土土塊の圧密降伏応力は、与えた供給圧より小さい。
- ②減容化処理土土塊群の圧密曲線は土塊のせん断強さが支配的である。



(a)  $e_{agg}$ と $p$ の関係



(b)  $\tau_f$ と $\sigma$ の関係

図-6 上載圧と見かけの間隙比、せん断強さの関係

③減容化処理土土塊群の強度定数は土塊のせん断強さに大きく依存する。

今後、更に様々な実験を行い、減容化処理土の特性を明らかにするとともに、地盤材料として用いる場合の設計法、調査法、試験法を検討していく予定である。

#### 謝辞

関門航路浚渫土砂減容化に当たっての技術課題については、「関門航路浚渫土砂減容化検討調査委員会 (委員長: 善功 九州大学大学院工学研究院教授)」が設置され、本稿は同委員会の委員の方々のご助言及びご指導を踏まえて取り纏めさせていただいた。また、試験に供した減容化処理土は、民間 23 社<sup>4)</sup>による共同研究の一環として提供頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 木賀一美: 関門航路しゅんせつ土分級工事 (福岡県), 日経コンストラクション, 2003年2/28号, pp. 30-35, 2003.
- 2) 岡田 繁・泉谷泰志・飯塚友之助・堀内澄夫: 針貫入試験による軟弱な地山強度の推定, 土と基礎, Vol. 33, No. 3, pp. 35-38, 1985.
- 3) 松岡 元・劉斯宏・山田章史・松山幸太郎・田代幸英・袴着正隆・江藤芳武: ロックフィル材の原位置一面せん断試験の実施例, 第38回地盤工学研究発表会概要集, pp. 549-550, 2003.
- 4) 山本健吾・爲廣哲也: 浚渫土砂の脱水減容化処理と水中での処理土特性に関する基礎試験について, 第49回地盤工学シンポジウム (投稿中), 2004.