

機械脱水処理土を用いた盛土の試験施工

佐藤哲也*・中道正人**・矢野米生***・右田宏文****・片桐雅明*****・山本修司*****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 国土交通省 九州地方整備局 関門航路事務所 所長

*** 国土交通省 九州地方整備局 関門航路事務所 海洋環境課 課長

**** 国土交通省 九州地方整備局 関門航路事務所 品質管理課 総合評価係長

***** (株) 日建設シビル 土質研究室 主任研究員

***** (財) 沿岸技術研究センター 理事

浚渫土砂処分場の護岸の腹付及び嵩上げ材として、浚渫土砂から間隙水を強制的に取り除いて製造する機械脱水処理土が適用できるか否かを検討した。脱水処理土は、浚渫土砂から製造されるため、浚渫土砂の有効利用及び処分量の削減が図れる。本文では、盛土の試験施工より機械脱水処理土の物性値を評価した結果を報告する。

キーワード：リサイクル材、機械脱水処理土、浚渫土砂処分場延命化、減容化

1. はじめに

関門航路では、航路維持ならびに大型化する船舶に対応するための浚渫が行われている。現在、この関門航路等で発生する浚渫土砂の多くを、北九州空港に隣接する新門司沖土砂処分場(第3工区)で処分しているが、処分可能容量が限界に近づきつつある。そのために、新処分場を整備する必要があるが、早急な確保は難しい状況である。そこで、現存処分場を延命化して使用していくことを検討してきた。

今回対象とする延命化方策は、浚渫土砂処分場に処分された水分を多く含む浚渫土砂から間隙水を強制的に脱水して減容化を行うと共に、脱水して発生する機械脱水処理土を、護岸嵩上げのための構造材に活用して、土砂処分場の容量を増加させる方法である。しかし、この機械脱水処理土は、水中部を含む護岸の構造材料として使用されたことがなく、構造材料に活用するための設計定数や特性を把握する必要がある。そこで、物性値を把握するための検討^{1)～6)}が行われてきて、平成19年度には、現地(新門司沖土砂処分場(第3工区))で実規模の盛土試験施工が実施された。本文は、この試験施工から得られた結果をとりまとめたものである。

2. プロジェクトの概要

2.1 処分場の延命化方策

土砂処分場の延命化方策には、複数の方策がある。本プロジェクトでは、水分を多く含む浚渫土砂から脱水機械で水分を去除くことにより減容化を図ると共に、脱水して発生する機械脱水処理土を護岸の嵩上げを行う構造材として使用することで、土砂処分場の容量増加を目指している(図-1)。これまで、容量増加のために嵩上げ盛

土を行う場合には、購入土砂等を構造材料として使用してきたが、浚渫土砂のリサイクル材料である機械脱水処理土を使用することで、購入土砂が必要なく、資源の削減を図ることにも寄与することが出来る。

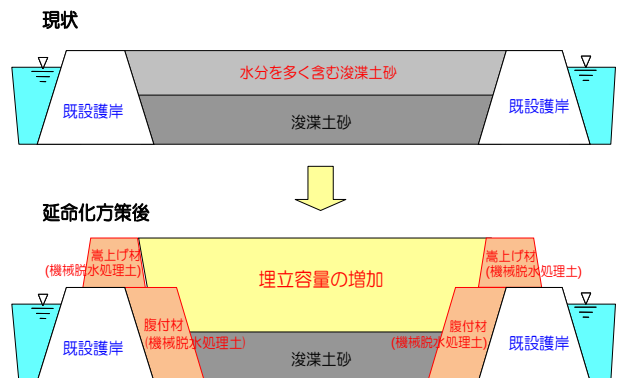


図-1 土砂処分場の延命化方策

2.2 機械脱水処理土

機械脱水処理土(写真-1)とは、埋立処分された高含水



写真-1 機械脱水処理土

比の浚渫土砂(写真-2)を加圧脱水濾過方式(図-2)で、強制的に間隙水を搾り出し、水分を除去した土塊(材料)である。製造された機械脱水処理土は、ある程度の強度をもつこと^{1), 2)}から、盛土の構造材料に使用することが可能になる。また、間隙水を搾り出すことで、浚渫土砂の減容化も図れる。



写真-2 高含水比の浚渫土砂

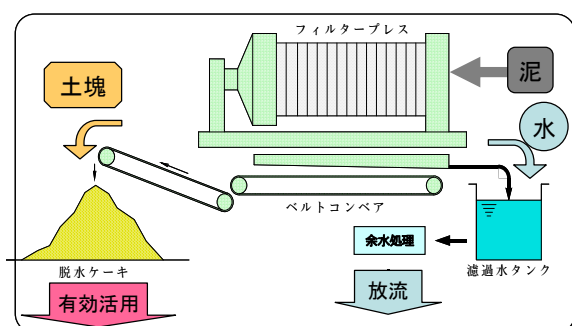


図-2 加圧脱水濾過方式の概念図

2.3 試験施工計画の策定

(1) 試験盛土の仮設計値

機械脱水処理土は、水中部を含む護岸の構造材料として、使用されたことがなく、材料の物性値を把握する必要があった。そこで、物性値を把握するための室内小規模試験が平成15年度に行われた。その試験のデータ^{1)~4)}を基に実規模の盛土試験施工計画を策定した。表-1に、盛土試験施工を実施するために設定した機械脱水処理土の盛土における仮設計値を示す。

表-1 試験盛土の仮設計用値

プレス 圧力	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断：破壊基準	
		粘着力 C (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
4 MPa	16.7	0	30

(2) 原泥条件の設定

機械脱水処理土は、供給圧4 MPaとした加圧脱水濾過方式で製造することとした。その原泥は新門司沖土砂処分場(第3工区)に堆積していた浚渫土砂とし、その物理的特性は、平成15年度の試験施工の原泥³⁾の液性限界に近いものとする。その液性限界は、78.1~89.3%であり、平均で83.0%であった。

(3) 試験盛土形状と調査項目の策定

今回の試験施工では、盛土部の密度、圧縮性、せん断強度を把握するため、盛立て中に各種調査と測量を行うこととした。また、安全管理のため、のり尻の水平変位とりのり肩部底面の沈下に関する動態観測も計画した。

図-4に、試験盛土の形状と動態観測機器の位置を示す。天端幅は23.5 m、DL+6.0 mの高さでの天端長さは30 m、のり勾配は1:1.8と設定した。

密度は、投入した土量の重量と体積を把握し、盛り立て後に盛土部を測量して、その体積を求めることとした。投入量の把握は、脱水処理土がバッチごとに製造されるため、1バッチの質量と体積をあらかじめ求め、それに投入したバッチ数を乗じたものとした。また、3層目、5層目、8層目において、現場密度試験を行い、現位置での密度も測定するものとした。

圧縮性に関しては、盛り立てた層の自重による変化を把握するため、1 mの盛立てごとに層別沈下計を設置することとした。層別沈下計は、ゲージが林立すること避けるため、3層分を1箇所に集めた多段式沈下計(図-4右下参照)を採用した。また、盛り立てた層の数ヶ所から、乱れの少ない試料を採取し、それに対する段階圧密試験も計画した。

せん断挙動に関しては、乱れの少ない試料に対する一面せん断試験と現場一面せん断試験を計画した。

盛土の施工段階から終了後の深度方向における特性を把握するために、RIコーン試験を行うものとした。

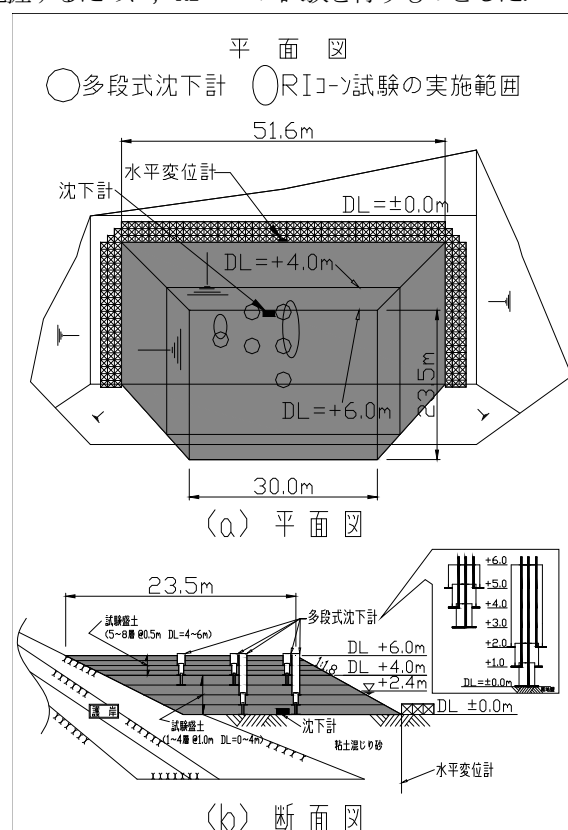


図-4 試験盛土と動態観測・調査位置図

(4) 盛土方法

護岸周辺には粘土混じり砂が堆積しており、今回の盛土試験では、載荷段階(盛立層数)の計測データを多く収集することを目的としたために、以下のとおり施工した。

- 1) 堆積土(粘土混じり砂)をDL±0 mまで掘削し、±10 cmの精度でその表面を整形した。
- 2) 在来地盤と機械脱水処理土を分離するシートを敷設し、のり尻に3列の土嚢を配置した。
- 3) 盛土の水平変位と沈下をリアルタイムで計測する動態観測機器を設置した。
- 4) 盛土の全層厚6mの内、1層目から4層目(DL±0m～+4m)は1m層厚で台船投入により施工、5層目から8層目(DL+4m～+6m)は0.5m層厚でブルドーザで施工し、各層毎に測量等を行うこととした。

3. 試験施工より得られた結果と評価

策定した盛土試験施工計画を基にして、試験盛土が平成19年度に実施された。以下に、試験盛土施工から得られた結果を記述する。

3.1 機械脱水処理土の製作

表-3に示す浚渫土砂(原泥)を供給圧4MPaの加圧脱水濾過方式(図-2)により機械脱水処理土を製作した。この原泥より製作された機械脱水処理土の性状を表-4に示す。含水比は $48\% \pm 2\%$ 、液性限界は $82\% \pm 1\%$ となった。また含水比は粘土の液性限界に依存するため物性値のバラツキからその影響を軽減するため、 w を w_L で正規化した w/w_L で管理することが検討^{1), 2)}された。今回の試験施工では $w/w_L = 0.54 \pm 0.02$ となった。強度は $428 \text{ kN/m}^2 \pm 24 \text{ kN/m}^2 (= \text{kPa})$ となった。

表-3 原泥(地山)の物性値

項 目	単位	平均値
土粒子の密度	g/cm^3	2.613
含水比 w	%	145.6
粒度	礫分 (2~75 mm)	0.0
	砂分 (0.075~2 mm)	4.4
	シルト (0.005~0.075 mm)	55.7
	粘土 (0.005 mm未満)	39.6
液性限界 w_L	%	89.4
塑性限界 w_P	%	30.5
w/w_L		1.63

表-4 機械脱水処理土の物性値

項 目	単位	平均値	標準偏差	変動係数
土粒子の密度	g/cm^3	2.614	0.01	0.3%
含水比 w	%	48.0	1.92	4.0%
粒度	礫分 (2~75 mm)	83.9	6.00	7.2%
	砂分 (0.075~2 mm)	15.3	5.64	36.8%
	シルト (0.005~0.075 mm)	0.7	0.37	50.4%
	粘土 (0.005 mm未満)			
液性限界 w_L	%	82.4	0.94	50.4%
塑性限界 w_P	%	36.1	0.22	1.1%
w/w_L		0.54	0.02	0.6%
針貫入試験からの一軸圧縮強度(q_u)	kN/m^2	428	23.73	3.4%
コーン指数(q_c)	kN/m^2	2,342	306.73	13.1%

既往結果^{1), 2)}に今回得られた機械脱水処理土の物性値を加えた脱水土強度(q_u) - w/w_L の関係を図-5に示す。このことから、脱水土の強度は w/w_L に依存することが確認できた。このことから実際の品質管理を行う場合、脱水土の製作前に原泥の物性を調査し、事前脱水試験で脱水土の強度を把握し、図-5の関係を使って品質管理が行えることになる。

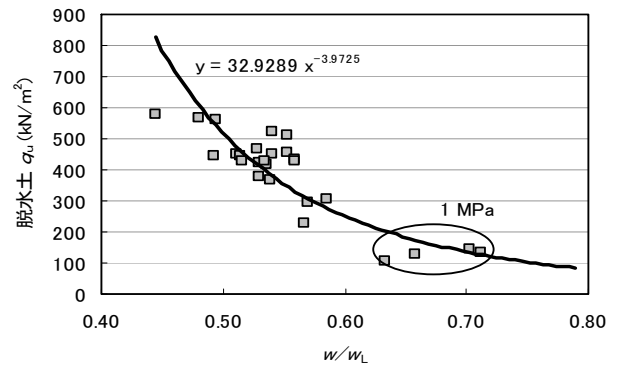


図-5 脱水土強度(q_u) - w/w_L の関係

3.2 盛土の安定

1層目から8層目までを盛り立てたときに計測されたのり尻の水平変位とのり肩下部の鉛直変位は、それぞれ30 mmと110 mmで安定して盛り立てられた。このことから、設計時に用いた仮の破壊基準($c = 0 \text{ kPa}$, $\phi = 30^\circ$)では、問題ないことが確認された。

3.3 盛土時の挙動

図-6に、盛土高さならびに層別沈下計による各層の高さの経時変化を示す。盛立てが進むにつれて、海面下の海上施工部は106~134mm沈下した。陸上施工部の層では5~19mmと、ほとんど沈下してない。試験工事実施中の潮位はDL+1.85~DL+2.90 m(平均DL+2.35 m)であった。

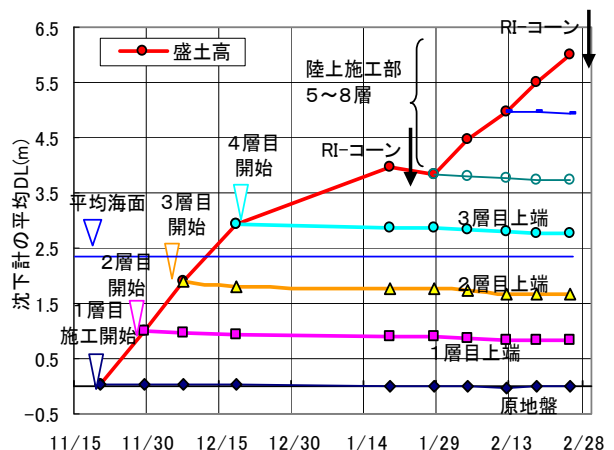


図-6 盛土経過と各層ごとの沈下挙動

3.4 盛立て・敷均した層の密度

各層を盛り立てたとき(施工時)の密度を表-5に示す。

表-5 盛立て直後の最上層の密度 (層全体)

層	標高	盛立て状況	土量変化率	かさ密度	乾燥密度	間隙比	飽和密度	平均飽和密度 g/cm^3
	DL+m		測量/投入	g/cm^3	g/cm^3		g/cm^3	
8	5.5 ~ 6.0	水面上, 重機敷均し	1.06	1.445	0.975	1.679	1.614	1.612
7	5.0 ~ 5.5		1.06	1.455	0.981	1.663	1.618	
6	4.5 ~ 5.0		1.05	1.471	0.992	1.633	1.625	
5	4.0 ~ 4.5		1.11	1.384	0.933	1.800	1.589	
4	3.0 ~ 4.0	水面上, 台船投入	1.23	1.251	0.843	2.098	1.534	1.534
3	2.0 ~ 3.0	潮干帯, 台船投入	1.14	1.354	0.913	1.861	1.576	1.576
2	1.0 ~ 2.0	水面下, 台船投入	1.42	1.087	0.733	2.563	1.467	1.472
1	0.0 ~ 1.0		1.39	1.109	0.748	2.492	1.476	

註：かさ密度＝投入質量／測量した体積．乾燥密度を算定する際、土塊の含水比を 48% とした。

1～4 層目は台船から盛り立てた層で、潮位が DL+1.85～2.90 m であったため、1 層目 2 層目は水面下、3 層目は潮干帯、4 層目は水面上と、撒きだし状況が異なる。5～8 層目は、接地圧が 30 kPa 程度の重機による敷均しである。得られた密度に関する情報も、盛立て状況の違いによって異なっていることがわかる。

土量変化率は、製造された脱水処理土の体積を 1 とした場合に現場でどの程度増加するかを示したものである。重機で施工した陸上部では、1.1 程度で、水中では 1.4 程度という結果となった。

飽和密度は、水面下の投入部で小さく、重機による敷均し部で大きい。ただし、潮干帯では「水締め」の効果により、密度が増加していることがわかる。

表-6 は、3 層目、5 層目、8 層目で行った現場密度試験の結果である。表-5 の飽和密度と比較すると、0.01 ～ 0.05 g/cm^3 の差異の中にあり、ほぼ同じ結果とみなせる。

表-6 現場密度試験の結果

	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm^3)	飽和密度 (g/cm^3)
8 層 (重機敷均)	50.0	1.557	1.653
5 層 (重機敷均)	56.3	1.573	1.634
3 層 (潮干帯)	58.4	1.425	1.569

3.5 盛立てによる密度の変化

図-6 に示したように、盛立ての進行とともに、各層が圧縮した。表-7 に、最終状態における各層全体の密度に関わる情報をまとめる。最も大きな圧力が作用する 1 層目では、初期状態から 0.1 g/cm^3 程度増加し、1.58 g/cm^3 程度となった。陸上施工部でも圧縮し、飽和密度は増加した。

また、室内試験から求めた締固め曲線と現場密度試験の結果を図-7 に示す。締固め試験は B 法、E 法という異なるエネルギーを与えた。締固め曲線は、加えたエネルギーが大きいほど、最適含水比が小さく、乾燥密度が大きくなるという一般的な盛土材料と同じ特性を示していることがわかる。機械脱水処理土は、含水比を管理し締

め固めることで盛土の密度管理が出来ることから、従来の盛土の施工管理が適用出来ることがわかった。

表-7 盛立て最終段階での層全体の密度

層	間隙比	かさ密度 (g/cm^3)	乾燥密度 (g/cm^3)	飽和密度 (g/cm^3)
8	1.679	1.464	1.009	1.648
7	1.571	1.526	1.051	1.675
6	1.513	1.561	1.076	1.690
5	1.866	1.368	0.973	1.607
4	1.672	1.468	1.012	1.650
3	1.838	1.382	0.952	1.613
2	2.156	1.243	0.856	1.553
1	2.014	1.301	0.897	1.578

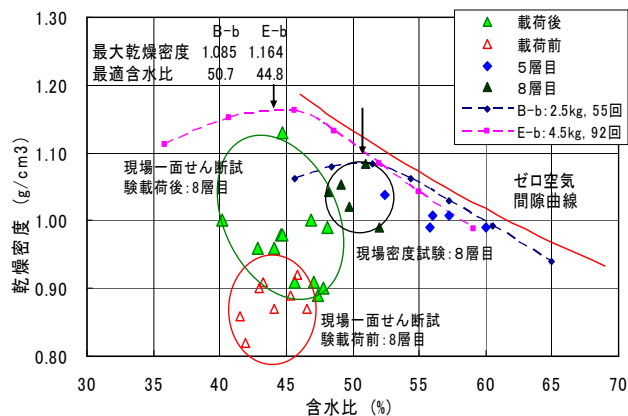


図-7 締固め試験と現場密度試験の関係

3.6 圧縮特性

図-6 に示した層ごとの沈下挙動を、上載圧と間隙比の関係に換算したものを図-8 に示す。なお、各層の有効応力は、各層厚の半分の位置で応力と代表値とした。同図には、現場密度試験の結果と 3 層目から採取した試料に対する圧密試験ならびに 2003 年の圧密試験の結果^{1), 2)} も示してある。

水中に堆積させた 1 層目・2 層目の盛立て直後の間隙比は 2.5 程度と大きい。また、その圧縮曲線は、2003 年に示した水中堆積させた試料の成果^{1), 2)} にほぼ重なってい

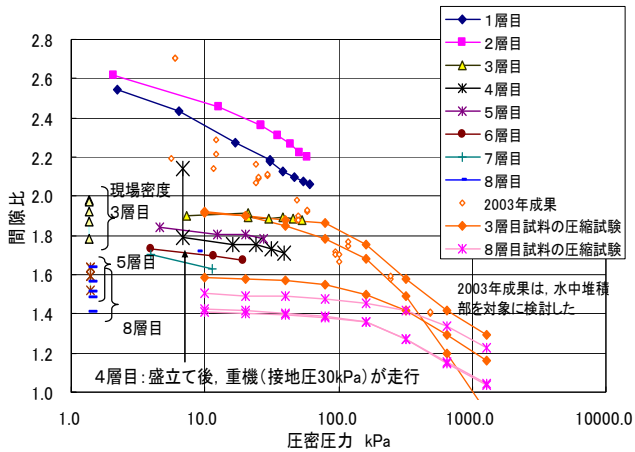


図-8 締固め試験と現場密度試験の関係

ることがわかる。

台船から盛り立てた3層目の間隙比は1.8程度であり、水中部に堆積させた層よりも小さい。その層に上載圧が作用していくと応力が増加したが、間隙比はほとんど変化しなかった。同じ層から採取した供試体に対する圧密試験の結果も、図-6に示した結果から算定した関係に重なり、80 kPa程度までは間隙比が大きく変化していないことがわかる。

上載圧が小さいこともあるが、他の陸上施工部の挙動も盛立てによって、それほど間隙比は変化していないことがわかる。ただし、3層目の圧密試験の結果から、ある応力を超えた段階で圧縮性が大きくなる降伏応力を有するものと考えられる。

4層目の盛立て時の間隙比は2.1程度と大きかったが、盛立て後、接地圧が30 kPa程度の重機が走行したことで150mm程度沈下した。そのため、間隙比は1.8程度となり、その後の盛土荷重に対してはそれほど大きな間隙比の変化は生じなかった。なお、重機が走行したときには、3層目はほとんど影響しなかった。

脱水処理土群は、圧密によって、間隙がつぶれ、密度が増加していく。図-9は、図-8の間隙比を飽和密度に換算した関係である。陸上施工部は、16.0～16.5 kN/m³程度の初期密度に対して、圧力が作用してもそれほど、密度は増加していない。これより、設計用の値は、16.5 kN/m³と提案できる。ただし、200kPaを超えると密度が増加していることから、適用範囲は200 kPaまでの条件とした。一方、水中部のものは、14.5 kN/m³程度で堆積し、覆土によって密度が増加している。このことから、水中堆積部の密度は、初期値を14.5 kN/m³とし、上載圧で変化させることを提案できる。

3.7 せん断特性

盛立て層8層目において、現場一面せん断試験を行い、7層目の乱れの少ない試料に対しては、三軸試験を行った。図-10は、現場一面せん断試験の破壊点(最大せん断応力)、

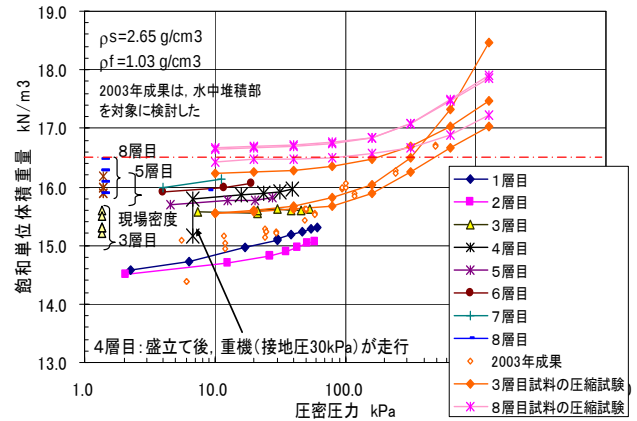


図-9 締固め試験と現場密度試験の関係

仮の破壊基準を設定した際に参考とした水中堆積部を想定した既往の実験結果、盛立部の3層目(DL+3m)と8層目(DL+6m)から採取した試料に対する室内試験の結果及び今回提案する破壊基準線を示してある。今回の結果が、 $c=5\text{ kPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ 度をすべて満足していることから、破壊線を粘着力成分を有する ϕ 材とみなして $c=5\text{ kPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ 度を提案することができる。ただし、圧密特性の結果と試験が行われたのが最大でも250 kPaまでであることから、提案条件は、圧密圧力が200 kPaまでの範囲とする。

図-11は、7層目の乱れの少ない試料に対して行った三軸試験結果である。この試験でも $c=14.6\text{ kPa}$ 、 $\phi=32.8^\circ$ 度であり、 $c=5\text{ kPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ 度を上回る結果が得られた。

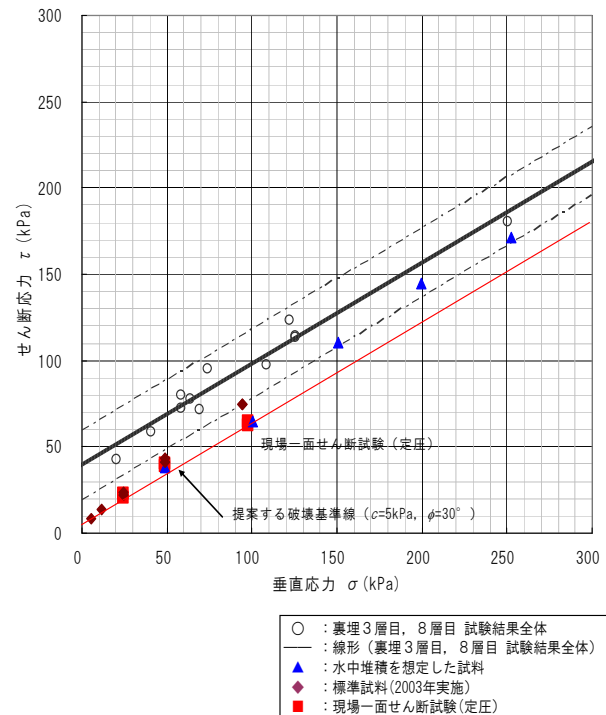


図-10 現場一面せん断試験の破壊点と既往成果の関係

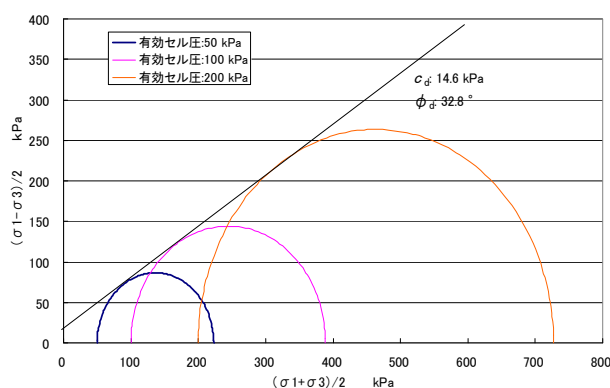


図-11 陸上施工部より採取した試料の三軸試験結果

4. まとめ

機械脱水処理土を築堤材料として用いる際の物性値を評価するために試験施工を実施した。

以下に、現時点までに得られた機械脱水処理土に関する知見を示す。

- 1) 機械脱水処理土を計画した高さまで、安定して盛り立てることができた。
- 2) 機械脱水処理土を水中に投入すると、その間隙比は2.5程度、陸上部では締固めの方法によって異なるが、間隙比は1.4～2.0となった。
- 3) 機械脱水処理土による盛土は、最大乾燥密度が得られるため、密度管理が可能である。
- 4) 単位体積重量の設計用値は、陸上施工部で16.5 kN/m³と提案できる。ただし、適用範囲は200 kPaまでとする。一方、水中施工部のものは、初期値を14.5 kN/m³とし、上載圧で変化させる。
- 5) 破壊線は、粘着力成分を有するφ材とみなして $c = 5$ kPa, $\phi = 30$ 度を提案できる。ただし、適用範囲は200 kPaまでとする。
- 6) 浚渫土砂から間隙水を強制的に取除いて製造した機械脱水処理土は、水中部も含めた構造材料として活用できることが確認できた。

なお、試験施工から得られた結果や提案値は、表-3の新門司沖土砂処分場第3工区に処分されている土砂を対象としたものである。

今後、盛土内から採取した試料に対する力学試験結果や長期耐久性の結果もあわせて、脱水処理土の力学特性を総合的に評価していく予定である。

5. 謝辞

本事業を行うに当たり、関門航路浚渫土砂減容化技術検討委員会（委員長：善功企九州大学教授）から有意義な助言をいただいた。また、盛土試験工事はりんかい日産建設、計測は東京ソイルリサーチがそれぞれ行った。関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 守屋正平，山本修司，村山伊知郎：浚渫土砂の機械的減容化に関する研究，沿岸センター研究論文集No. 4, pp. 73-76, 2004
- 2) 村山伊知郎，梶原清隆，竹田春美，吉野新造，山本修司，守屋正平，豊饒智樹，片桐雅明，寺師昌明：脱水処理した浚渫粘土土塊ならびに土塊群の力学特性，第49回地盤工学シンポジウム論文集，pp. 91-98, 2004.
- 3) 山本健吾・爲廣哲也：機械脱水処理した処理土塊群の水中における基礎特性，第49回地盤工学シンポジウム論文集，pp. 119-126, 2004.
- 4) 石原弘一・梶原清隆・竹田春美・吉野新造・山本修司・山崎真史・西村正人・片桐雅明・寺師昌明：水中・空気中で堆積させた脱水処理土群の一面せん断特性，土木学会第60回年次学術講演会，pp. 181-182, 2005.
- 5) 山崎真史，石原弘一，守屋正平，片桐雅明：機械脱水処理土の力学特性，沿岸センター研究論文集No. 5, pp. 89-92, 2005
- 6) 佐藤哲也，山中道德，右田宏文，片桐雅明：機械脱水処理した浚渫粘性土の力学特性，沿岸センター研究論文集 No. 7, pp. 51-54, 2007