

機械脱水処理技術による浚渫土の減容化効果と 処理土の地盤材料への適用性

山本健吾¹・為廣哲也²

¹正会員 りんかい日産建設株式会社 土木本部 技術環境部（〒105-0014 東京都港区二丁目3-8）
² りんかい日産建設株式会社 土木本部 技術環境部（〒105-0014 東京都港区二丁目3-8）

港湾事業等で発生する浚渫土については、良質な砂質系のものが、覆砂や干潟・浅場造成に一部活用されているものの、高含水で細粒分を多く含む浚渫土のほとんどは土砂処分場へ埋立処分されている。新規処分場の建設が困難な状況の中、循環型社会形成への社会的ニーズから、既存処分場の延命化や資源化を目的とした浚渫土の「減容化」や「有効利用」が重要となってきた。減容化という課題に対応するためのひとつの技術として機械脱水処理技術があり、中でも高圧フィルタープレスによる脱水処理は大幅な減容化と処理土特性による有効利用が可能な技術である。本文では高圧フィルタープレス脱水処理の技術概要、処理土および処理土地盤の特性、減容化効果と有効利用に関し、報告するものである。

キーワード： 機械脱水処理，高圧フィルタープレス，減容化，有効活用

1. はじめに

港湾事業等において発生する浚渫土砂については、これまで土砂処分場等で埋立処分されることが多く、大規模な用地造成を必要とする空港島建設などでは埋立材として利用されてきた。また、一部では、砂分を多く含有する良質な浚渫土砂を覆砂や干潟造成などに活用されている事例¹⁾もある。

一方、近年では、新規の土砂処分場の確保が困難な状況になってきており、継続的に発生する浚渫土砂を受け入れる既存土砂処分場の延命化を図ることが課題となってきた。さらに、浚渫土砂を資源として捉え、これまで以上に有効利用していくことが、循環型社会形成へ向けた社会的なニーズとなってきた。

筆者らは、このような背景から、浚渫土砂の「減容化」と「有効利用」をキーワードとして、浚渫土の減容化技術である機械脱水処理技術の中でも、特に高い濾過圧力を有する「高圧フィルタープレス脱水処理」に関する技術開発を進めてきている。

本論文は、これまでに実施してきた試験の研究成果や施工実績等から、本技術による減容化効果や処理土の工学的特性および地盤材料としての適用性について報告するものである。

2. 高圧フィルタープレス脱水処理の概要



写真-1 高圧フィルタープレス（型式：PPF-160-595）

表-1 高圧フィルタープレスの仕様

型式名	PPF-160-595
濾過容積(*注)	6.4m ³
濾過面積	595m ²
濾板寸法	1,630mm × 1,630mm
濾室数	136室
濾布洗浄方法	自動式
処理土(脱水ケーキ)厚	23.5mm(平均値)

注) 濾過容積は処理土(脱水ケーキ)厚が23.5mmの場合。

写真-1および表-1に高圧フィルタープレス（型式：PPF-160-595）の全景写真と仕様を示す。

高圧フィルタープレス脱水処理とは、主として細粒分を多く含む浚渫土を処理対象とし、従来の標準型フィルタープレスの濾過圧力が0.7～1.0MPaであ

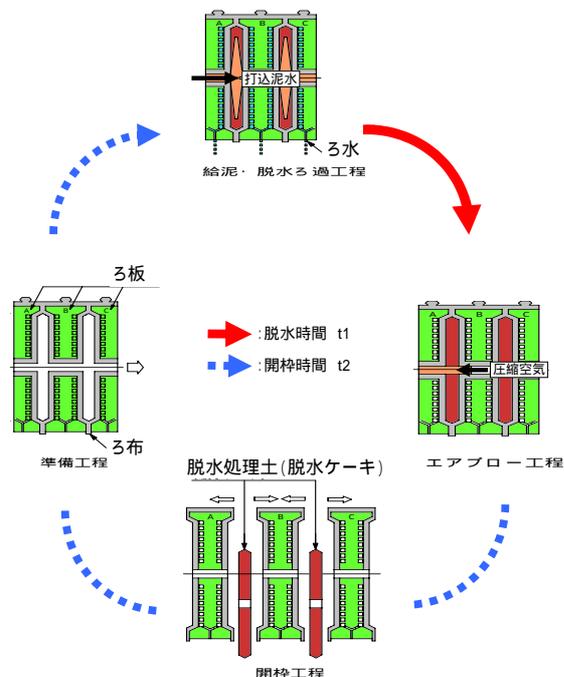


図-1 脱水工程およびサイクルタイム

るのに対して、特殊高压打込ポンプにより4MPaという非常に高い濾過圧力を有する高压フィルタープレスを用いて脱水処理を行う技術である。

脱水処理システムのフローは、「前処理」、「貯泥」、「反応」、「高压脱水処理」、「余水処理」という5つの工程から成っている。

前処理工程では、浚渫土に含まれる夾雑物や砂礫分 (>74 μ) をトロンメル(回転式フルイ)や砂分除去装置により除去し、次の貯泥工程では砂礫分が除去された浚渫土(泥水)を貯泥槽において、一旦貯留する。その後、反応工程では脱水促進等を目的として脱水助剤(無機凝集剤のPACや消石灰・酸化マグネシウム等)を添加し、十分に反応させた後、泥水をスラリー槽へ移送する。

その後、泥水は順次、給泥ポンプ及び特殊高压打込ポンプにより高压フィルタープレスへ打ち込まれ、バッチ処理による脱水処理が行われる。

バッチ処理による脱水工程(1サイクル)およびサイクルタイムについては図-1に示すとおりである。

脱水処理により発生する濾水は余水処理設備(浄化・中和装置)によって処理され、放流される。

3. 脱水処理土の特性

(1) 濾過圧力の違いによる脱水処理土の特性

濾過圧力の違いによる脱水処理土の特性把握を目的として小型高压脱水試験機による脱水試験を実施した。試験における供試泥および脱水条件としては、～ に示すとおりである。

供試泥 : 海域浚渫土

供試泥の土質特性:

項目	値	
自然含水比 w_n (%)	169.1	
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.710	
粒度組成	礫分 (%)	0.1
	砂分 (%)	5.7
	シルト分 (%)	47.7
	粘土分 (%)	46.5
液性限界 W_L (%)	86.4	
塑性限界 W_P (%)	31.7	

濾過圧力 :

試験ケース(濾過圧力)	摘要
0.7MPa	標準型フィルタープレスに相当
1.5MPa	中圧型フィルタープレスに相当
4.0MPa	高压フィルタープレス

打込泥水含水比 : 300% (=濃度25%)

脱水助剤 :

脱水助剤の種類	添加率(乾土重量当り)
PAC(ホリ塩化アルミニウム)	2%
MgO(酸化マグネシウム)	2%

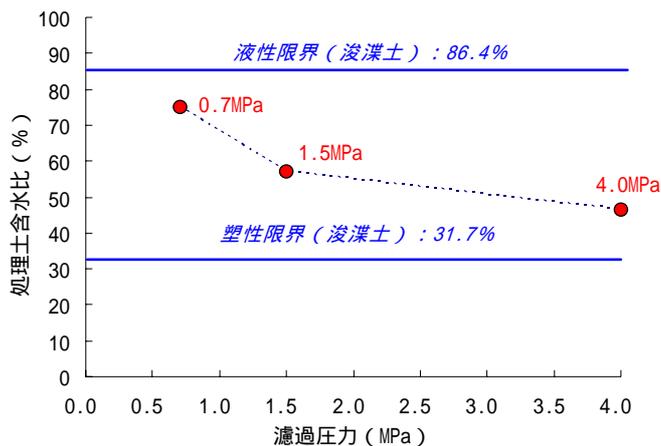


図-2 濾過圧力と処理土含水比

図-2に試験結果による脱水濾過圧力と脱水処理土含水比の関係を示す。図-2より濾過圧力4MPa(高压フィルタープレス)における脱水処理土の含水比(=46.6%)は浚渫土の塑性限界($W_P=31.7\%$)に近い状態まで脱水処理されていることが判る。

一方、濾過圧力0.7MPa(標準型フィルタープレスに相当)では液性限界($W_L=86.4\%$)を下回る程度(処理土含水比=75.1%)となっている。

(但し、単位時間当たり濾水量にもとづく脱水完了判定は同条件とした。)

本結果より、高い濾過圧力を有するタイプ(高压フィルタープレス)の方が大きな減容化効果(含水比による体積変化率)を得られることが判る。

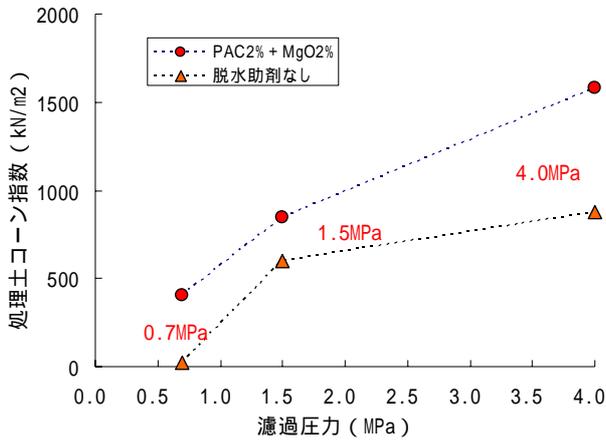


図-3 濾過圧力と処理土強度（コーン指数）

図-3に試験結果による脱水濾過圧力と処理土強度（コーン指数）の関係を示す。

図-3より脱水処理土における強度の指標であるコーン指数を比較すると、濾過圧力の違いにより処理土の特性が異なることが判る。

ここで、脱水助剤を添加しないケースと添加するケース（PAC 2% + MgO 2%）において、コーン指数に差が出ているのは脱水助剤（MgO）の効果により強度増加していることによるものである。

(2) 高圧フィルタープレス脱水処理土の特性

高圧フィルタープレスによる脱水処理土は写真-2（上）に示すように濾室内で作製された時点では縦横約160cm、厚み23mm程度の板状を呈している。

これが開枠後、下部ベルコンから排出される時点では写真-2（下）に示すように板状の土塊となる。

この段階における脱水処理土の特性について、これまでの施工実績（小型高圧脱水試験結果も含む）をもとにとりまとめた結果を以下に示す。

脱水処理土（脱水ケーキ）含水比： W_c

処理土の含水比は脱水処理の対象となる浚渫土の物理特性により異なるが、浚渫土のコンシステンシー特性である液性限界と塑性限界の間の値と考えられる。

実績による浚渫土のコンシステンシー特性と脱水処理土含水比の関係から、浚渫土のコンシステンシーが既知である場合に脱水処理土の含水比を推定できることを示した文献³⁾もある。

この文献を参考として、施工実績をもとに高圧フィルタープレスによる脱水処理土について整理したものを図-4に示す。

このグラフは横軸に脱水処理の対象となる浚渫土のコンシステンシー指数(I_p)をとり、縦軸には浚渫土の液性限界と脱水処理土含水比の差を I_p で除し

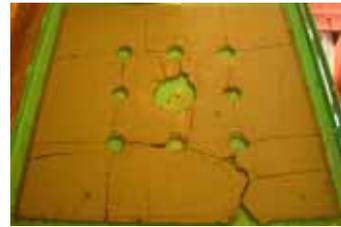


写真-2 脱水処理土²⁾

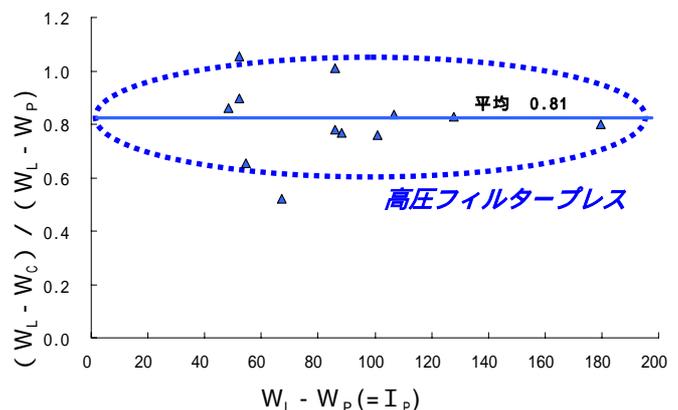


図-4 浚渫土のコンシステンシーと脱水処理土含水比の関係

た値をプロットしたものであり、縦軸の値は脱水処理土含水比が浚渫土の液性限界と塑性限界の間のどの辺にあるかを示している。

図-4より、高圧フィルタープレス脱水処理におけるこの縦軸の平均値は0.8程度となっており、塑性限界に近い状態まで脱水できることを示している。

また、この値をもとに処理対象となる浚渫土のコンシステンシーが既知であれば、高圧フィルタープレス脱水処理による脱水処理土の含水比は(1)式に示すように推定可能である。

$(W_L - W_C) / (W_L - W_P) = k$ とすると

$$W_C = W_L - k (W_L - W_P) \quad (1)$$

ここで、 W_C ：脱水処理土（脱水ケーキ）含水比（%）

W_L ：浚渫土の液性限界（%）

W_P ：浚渫土の塑性限界（%）

k ：脱水ケーキ含水比推算係数（例：0.8）

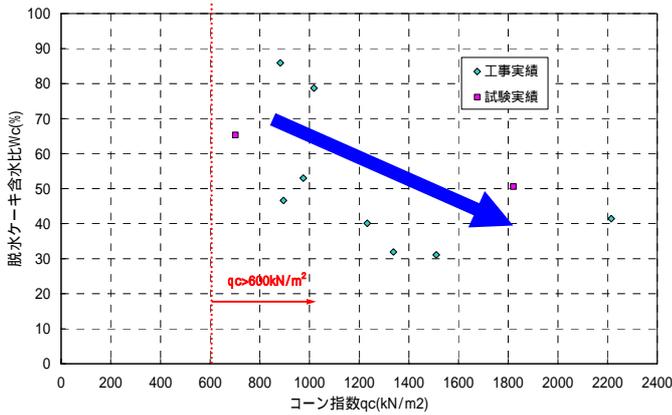


図-5 脱水処理土含水比とコーン指数



写真-3 コーン指数試験

コーン指数： q_c

処理土における強度の指標としては、建設発生土利用技術マニュアル(第3版)⁴⁾にも示されているように、コーン指数(q_c)が用いられている。

図-5は実績にもとづく高圧フィルタープレス脱水処理土のコーン指数と含水比の関係を示したグラフであるが、第3種建設発生土の土質区分を示すコーン指数の 400kN/m^2 を十分に満足した実績データ(600kN/m^2 以上)となっている。

また、グラフより処理土含水比とコーン指数については、負の相関傾向が見られる。

脱水処理土のコーン指数試験を現場にて実施する場合には、コーンペトロメーターを使用し、人力で貫入可能なコーン指数 $1,500\text{kN/m}^2$ 程度までの計測範囲が一般的である。一方、高圧フィルタープレス脱水処理においては、対象浚渫土の物理特性にもよるが、人力では 10cm もしくは 7.5cm まで貫入できないケースも多く、コーン指数試験では計測レンジに余裕を持った力計を使用し、一軸圧縮試験機を改良して機械的に貫入させる方法による試験を実施する場合もある。(写真-3 参照)



写真-4 針貫入試験

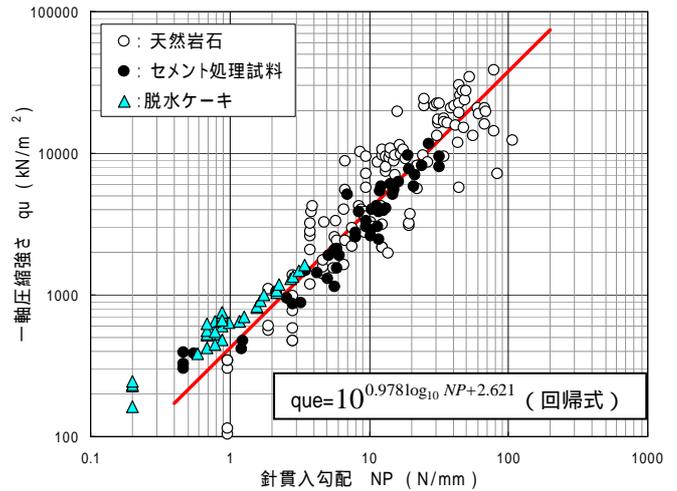


図-6 針貫入勾配と一軸圧縮強度の関係

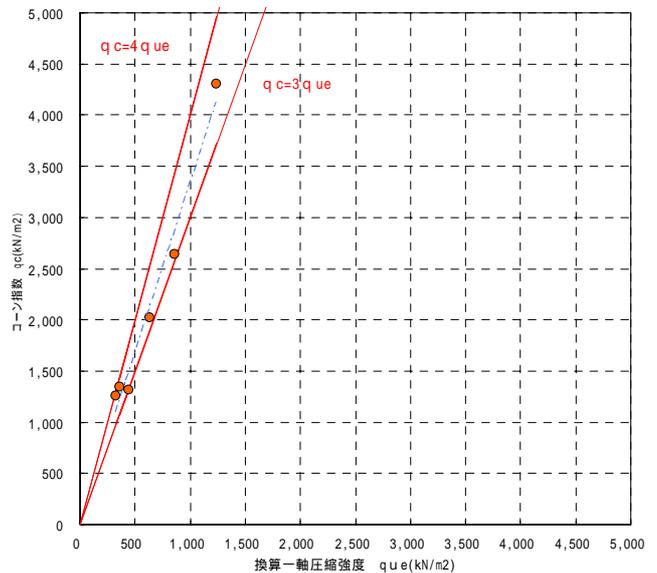


図-7 換算一軸圧縮強度とコーン指数の関係

針貫入試験による換算一軸圧縮強度(q_{ue})

脱水処理土の強度を示す指標として、コーン指数の他に針貫入試験による換算一軸圧縮強度(q_{ue})を用いる場合もある。(写真-4 参照)

ただし、コーン指数試験では 4.75mm 以下に調整した試料を用い、これをランマーにて締固めた供試体を作製して行うが、この針貫入試験は脱水処理土の



写真-5 加茂湖事例による有効利用（水中埋立）

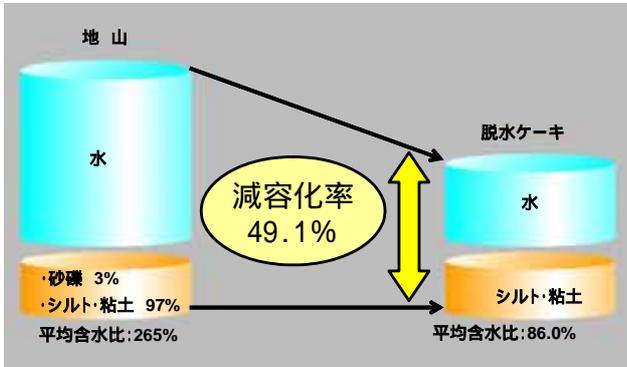


図-8 減容化効果（加茂湖浚渫工事）

土塊を用いて針貫入勾配(NP)と呼ばれる貫入抵抗を求め、図-6に示すように、測定された針貫入勾配(NP)と一軸圧縮強度(q_u)の相関式より、換算一軸圧縮強度(q_{ue})を求めるものである。この換算一軸圧縮強度は脱水処理土（土塊）の母材強度を示したものであり、粒度調整し、締固めを行うコーン指数と直接比較することはできないが、図-7に示すように両者の関係をもとに針貫入試験による換算一軸圧縮強度を得ることでコーン指数の推定は可能であり、ここで示した試験結果においては、コーン指数が換算一軸圧縮強度の3～4倍程度の範囲となった。

3. 脱水処理土による減容化と有効利用

浚渫土を機械脱水処理する大きなメリットとしては、「減容化効果」が挙げられる。高含水の浚渫土を高圧脱水処理し、より低含水比の脱水処理土とすることができれば、さらに大きな減容化効果が期待できる。また、高圧フィルタープレス脱水処理等の減容化技術により、浚渫土を減容化し、脱水処理土を地盤材料等の他、多用途へ「有効利用」できれば、社会ニーズへの対応が可能となる。

有効利用に関するこれまでの施工実績としては、「埋立材」としての利用が多かったが、「裏埋材」としての利用も可能となってきた。有効利用された施工事例において実施された地盤調査等から、高圧フィルタープレスによる脱水処理土を用いて造成された地盤の特性を以下に示す。

表-2 浚渫土（地山）の土質特性

項 目		値（平均）
自然含水比 w_n (%)		265.6
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.660
粒 度 組 成	礫分 (%)	0.0
	砂分 (%)	3.2
	シルト分 (%)	35.7
	粘土分 (%)	61.1
液性限界 W_L (%)		229.7
塑性限界 W_P (%)		51.1

表-3 脱水処理土による埋立地盤の工学特性

項 目	値（範囲）
含水比 w (%)	90～135
単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	13.6～14.6
粘着力 C_u (kN/m ²)	20.0～40.0
圧縮指数 C_c (kN/m ²)	1.0～1.4
圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	90～180
圧密係数 C_v (cm ² /day)	30～70

加茂湖浚渫工事(H8～H15)

本工事は漁場保全事業として湖底の堆積泥（約200,000m³）を浚渫し、高圧フィルタープレス脱水処理された処理土を湖岸の造成地の「埋立材」として有効利用した事例である。写真-5に脱水処理土による埋立状況写真を示す。

高圧フィルタープレス脱水処理による処理土はコーン指数(600kN/m²以上)で規定されており、ダンプトラック運搬、ブルドーザ撒き出しによる水中埋立（層厚約1.5m）および陸上盛土（層厚約6.5m）が行なわれている。脱水処理対象となる浚渫土（地山）の土質特性と脱水処理土による埋立地盤の工学特性を表-2、表-3に示す。

なお、本事例における地盤調査結果等の詳細については参考文献^{5), 6), 7), 8)}を参照されたい。減容化に関しては、図-8に示すように、(2)式の定義による脱水処理土の減容化率は約49%となった。

また、脱水直後と埋立後の体積変化は平均0.96(0.75～1.23)であることが報告されている⁶⁾。

$$\text{減容化率}(\%) = \frac{\text{脱水ケーキ量}}{\text{浚渫土量(地山) - 砂分回収量}} \times 100 \quad (2)$$



写真-6 英虞湾事例による有効利用（低地嵩上げ盛土）

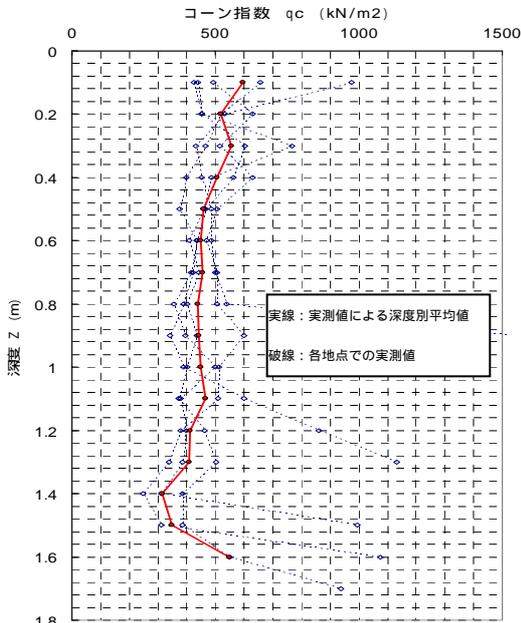


図-9 コーン指数（原位置試験）

英虞湾浚渫工事（H19）

英虞湾浚渫工事は、漁場の水環境再生を目的として、水質悪化の要因となっている堆積泥の浚渫を行う工事である。浚渫土は高圧フィルタープレス脱水処理した後、「低地嵩上げ盛土」に処理土が利用されている。脱水処理土の品質管理としては q_c 400kN/m² の規定があり、造成に関する締固め（転圧）仕様は規定されていない。本工事ではバックホウ（0.45m³）及びブルドーザー（6t）による敷均し・整形を実施している。写真-6に施工状況を示す。

脱水処理土地盤の造成完了後の調査として、原位置試験および採取試料による室内力学試験を実施した。表-4および表-5に浚渫土（地山）の土質特性、処理土地盤の工学特性をそれぞれ示す。

採取試料（深度別）による一軸及び三軸（UU）試験によるせん断強度 C_u は深度に関係なくよく一致した結果となった。また、原位置で実施したコーン貫入試験結果（図-9）では、深度方向に依存せず、400~500kN/m² の範囲となっていることから、概ね均質な地盤となっていると考えられる。

関門航路浚渫土砂減容化試験工事（H19）

中長期的な継続事業である関門航路整備事業においては発生する浚渫土砂を受け入れる土砂処分場の

表-4 浚渫土（地山）の土質特性

項目	値（範囲）	
自然含水比 w_n	169.4 ~ 221.7%	
土粒子密度 s	2.587 ~ 2.669g/cm ³	
粒度組成	礫分	0.0%
	砂分	3.8 ~ 21.6%
	シルト分	34.7 ~ 48.6%
	粘土分	37.7 ~ 52.6%

表-5 脱水処理土地盤の工学特性

項目	値（範囲）
含水比 w_c	61.3 ~ 63.1%
単位体積重量 t	15.3 ~ 15.7kN/m ³
粘着力 C_u	31.0 ~ 33.6kN/m ²
圧縮指数 C_c	0.596
圧密降伏応力 p_c	90.9kN/m ²

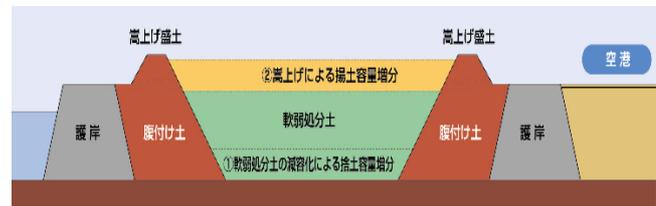


図-10 堆積浚渫土の減容化と腹付土・築堤への有効利用

容量が限界に近づきつつあり、本工事は処分場の延命化と浚渫土の有効利用を目的とした減容化技術に関する試験工事である。図-10に減容化による処分場延命化対策の模式図を示す。

延命化対策として浚渫土砂の減容化技術に関する検討や試験（有識者による減容化技術検討委員会およびH15官民共同研究による現地試験²⁾・室内試験）等をふまえ、本工事では、実際の処分場において、堆積浚渫土を高圧脱水処理し、この脱水処理土が「裏埋材（腹付土）」として適用可能かどうかを把握するために実施されたものである。写真-7に施工全景を示す。

脱水処理土を「裏埋土」として使用する場合、水中部を含むことおよび護岸や裏埋土自体の安定を考慮すると、脱水処理土の強度もこれまで以上に必要となる。本工事ではこれまでの知見にもとづき、脱水助剤は水浸強度低下が少ないPACとMgOの組合せとし、高圧フィルタープレス脱水処理によって得られる処理土は、コーン指数として2,000kN/m²以上（針貫入試験による換算一軸圧縮強度が400kN/m²以上）を管理値として品質管理された。

裏埋工の施工については、クレーン台船（グラブバケット投入）による海上施工（±0.0~+4.0m）とキャリアダンプ運搬・ブルドーザー撒き出し及び転圧により陸上施工（+4.0~+6.0m）に分けて施工された。

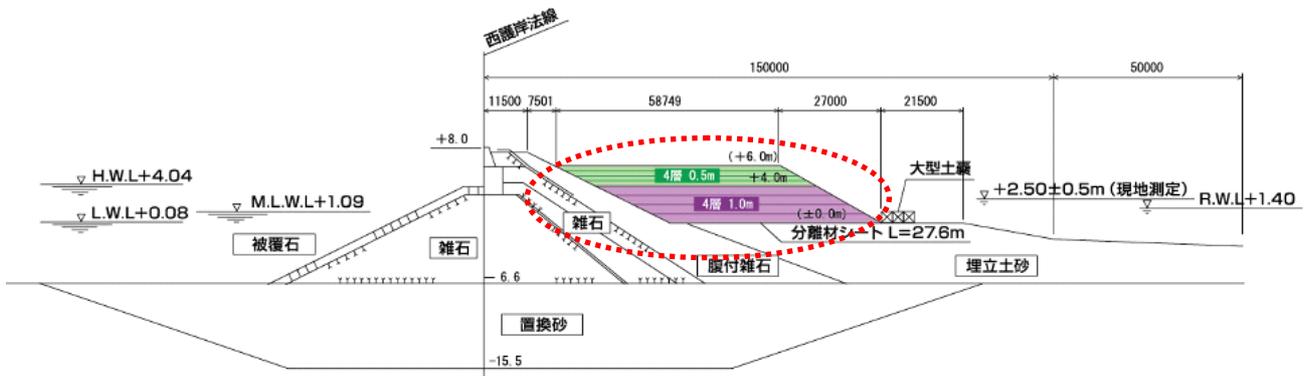


図-11 裏埋工 標準断面図（関門航路浚渫土砂減容化試験工事）



写真-7 関門航路浚渫土砂減容化試験工事（全景）



写真-8 関門航路浚渫土砂減容化試験工事（裏埋工 5層目）



写真-9 現場載荷試験



写真-10 現場一面せん断試験

図-11と写真-8に裏埋工における標準断面図と裏埋工（5層目）施工完了写真を示す。

脱水処理土地盤（裏埋土）については、現場載荷試験、現場一面せん断試験等の原位置試験も合わせて実施された。

裏埋土の法肩より50cmの位置で実施された現場載荷試験(写真-9)では、これまでに得られたデータをもとに設定した土質常数を用いて安定計算のシミュレーションを行い、その結果をもとにすべり破壊を生じる可能性があると思定される設定条件にて試験を実施した。

段階載荷が進むにつれて法面側の沈下が大きくなり、載荷板約80kN/m²まで載荷した段階で、すべり破壊する前に転倒する恐れがあったことから、この時点で試験を終了した。

現在、有識者を含む「減容化技術検討委員会」（委託：関門航路事務所、受託：（財）沿岸技術研究センター）において詳細な解析が進められているところであり、沈下量と荷重の関係から支持力を求める幾つかの手法を当てはめた結果、本試験における地盤の支持力は20～50kN/m²程度となることが報告されている⁹⁾。

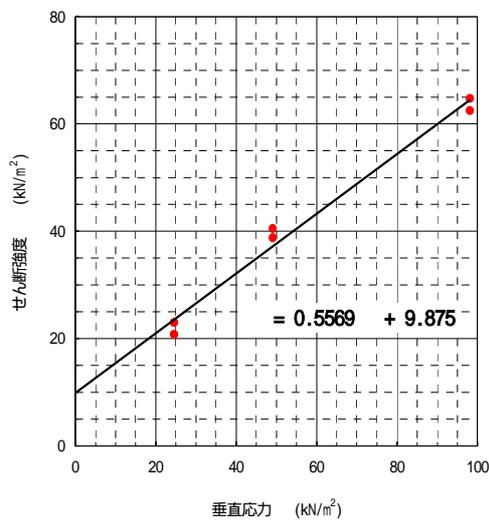


図-12 垂直応力とせん断強度の関係

また、裏埋工の最終層となる8層目にて実施した現場一面せん断試験(写真-10)における試験結果として、垂直応力とせん断強度(最大せん断応力)の関係を図-12に示す。その結果、破壊基準線は $=0.5569 + 9.875$ となった。

なお、脱水処理土のせん断特性については、本試験結果に加えて、別途発注工事で実施される乱れの少ない採取試料を用いた一面せん断試験の結果も合わせて評価する必要がある。

5. まとめ

- 1) 浚渫土砂においては、砂礫が主体のものであればそのまま覆砂、干潟、浅場等へ直接利用可能であるが、細粒分を多く含む高含水比の性状を持つものについては「減容化」や「有効利用」していくことがリサイクルの観点から今後も重要となる。
- 2) 減容化技術のひとつである機械脱水処理の中でも、特に「高圧フィルタープレス脱水処理」は、塑性限界近くまで脱水可能であり、減容化効果が大きい技術である。
- 3) 高圧フィルタープレス脱水処理により得られる処理土は、コーン指数が 600kN/m^2 以上の強度を持った地盤材料として有効利用が可能である。
- 4) 関門航路浚渫土砂減容化試験工事においては、高圧フィルタープレスによる脱水処理土が「裏埋土」としての利用も可能であることが確認されたことから、本事例をふまえた今後の利用が期待される。
- 5) これまでの施工実績や調査・試験等により、高圧脱水処理土による地盤の工学的特性も少しずつ明らかになってきており、さらにデータが蓄積さ

れていくことにより地盤材料としての設計も可能となり、浚渫土の減容化と有効利用を両立できる技術として確立したものになっていくものと考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本埋立浚渫協会：マリンボイス 2 1「浚渫土砂を用いた人工干潟の造成 - 大阪湾 阪南港阪南 2 区人工干潟の造成 -」, vol.247, 2006.
- 2) 減容化技術ワーキンググループ：関門航路浚渫土砂減容化技術公募に関わる「減容化技術現地試験報告書」, 2004. 7
- 3) (社)底質浄化協会：高圧機械脱水機による減容化システム 技術資料, 2001. 8
- 4) (独)土木研究所編：建設発生土利用技術マニュアル(第3版), 2004
- 5) 藤尾良也, 川浦栄太郎, 武林昌哉, 森嘉仁：加茂湖における機械脱水処理土の土質特性(その1), 第62回土木学会年次学術講演会概要集, 2007.
- 6) 新舎博, 山本健吾, 藤村貢, 原輝夫：加茂湖における機械脱水処理土の土質特性(その2), 第62回土木学会年次学術講演会概要集, 2007.
- 7) 堀井良介, 中島勝治, 森研造, 阿部哲志：加茂湖における機械脱水処理土の土質特性(その3), 第62回土木学会年次学術講演会概要集, 2007.
- 8) 森好生, 梅木康之, 伊東剛, : 加茂湖における機械脱水処理土の土質特性(その4), 第62回土木学会年次学術講演会概要集, 2007.
- 9) 中道ら：脱水処理土の盛土のり肩近傍における現場支持力試験, 土木学会第63回年次学術講演会(投稿中)