

港湾における土砂処分場の設計方法に関する考察

Consideration on Design Method of Disposal Facility of Dredged Clay in Seaport

| | | |
|------|------------------|------------------------|
| 土田 孝 | Takashi TSUCHIDA | (広島大学大学院工学研究科) |
| 奥名孝行 | Takayuki OKUMYO | (中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所) |
| 君島伸治 | Shinji KIMIJIMA | (中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所) |
| 片桐雅明 | Masaaki KATAGIRI | (日建設計シビル (株)) |

港湾の機能を維持するための航路・泊地の浚渫をスムーズに実施するためには、浚渫土を処分する土砂処分場の整備が不可欠である。土砂処分場の建設には多大な費用を要するため、浚渫土の活用する技術の開発とともに、土砂処分場の建設費用の低減さらには既存および新たに建設される処分場の効率的な利用が課題となる。本研究は、粘性土の間隙比-圧密圧力モデルを用いて、浚渫土の液性限界から各種の条件での浚渫土の体積変化を概算する方法を提案し、土砂処分場の概略設計に適用する方法を示した。

キーワード：海成粘土、浚渫、圧密、圧縮、港湾、地盤改良 (IGC : D05, E02, H07)

1. はじめに

港湾の機能を維持し、船舶の大型化に対応した増深などのためには、海底地盤を掘削して水深を確保する浚渫が不可欠である。特に、瀬戸内海沿岸の港は水深が浅く、瀬戸内海中央の航路からそれぞれの港までの航路を維持するために大量の浚渫を行っている。浚渫をスムーズに実施するためには、発生する浚渫土を処分するための土砂処分場が必要不可欠であるが、土砂処分場の建設には多大な費用を要するため、建設費用の低減や既存の処分場の効率的な利用が課題となっている。

処分場の効率的な利用を考えるうえでは、浚渫の方法、浚渫土を処分場内に投入する方法、投入前処理（乾燥や脱水による含水比調整）、投入後の処理（投入後の圧密促進や護岸嵩上げなど）を組み合わせ、処分場の設計を最適化する必要がある。

本研究では、浚渫地の環境や施工条件等によってさまざまな条件が与えられ、一般化することの困難な土砂処分場整備計画に対し、土砂処分場の合理的な設計を行う手法を提案することを目的としている。

2. 粘性土の間隙比-圧密圧力モデルの適用性の検討

筆者は高含水比の粘土の圧縮曲線が、液性限界で正規化した一つの線（粘土の体積比の対数と圧密圧力が直線）HWCL（High Water Content Compression Line）であらわすことができることを示し、HWCLを用いた粘土の一般的な間隙比-圧密圧力関係（モデル）を提案した。本モデルは以下の仮定を用いている¹⁾²⁾。

(仮定 1) 高い含水比を初期間隙比として粘土を圧密すると、間隙比と圧密圧力 σ_v' の関係は、体積比 $v=1+e$ の対

数 $\ln v$ と $\log \sigma_v'$ の直線関係として表すことができる。この直線関係を高含水比における間隙比-圧密圧力関係 HWCL (High Water Content Compression Line) と呼ぶ。 $\sigma_v' < 10\text{kPa}$ の範囲では初期含水比が液性限界 w_L の 4 倍程度のときに HWCL を実験的に求めることができる。

(仮定 2) HWCL は粘土の液性限界と良好な相関があり、体積比の対数 $\ln v$ と液性限界の体積比の対数 $\ln v_L$ との比を次式のように体積比指数 I_{sv} と定義すると、

$$I_{sv} = \frac{\ln v}{\ln v_L} \quad (1)$$

HWCL は次式で表される。

$$I_{sv} = b - a \ln \sigma_v' \quad (2)$$

上式のパラメータ a と b は、21 種類の粘土の平均値から $a=0.117$, $b=1.435$ となる。さらに、粘土の種類によるばらつきを考慮すると HWCL の範囲は次式で表すことができる。

$$I_{sv} = 1.435 \pm 0.1 - 0.117 \ln \sigma_v' \quad (3)$$

± 0.1 は粘土の種類によるばらつきの範囲を表している。次に、初期間隙比が $4w_L$ よりも小さい場合の間隙比 e と $\log \sigma_v'$ の関係を、HWCL と関連付けて以下のように仮定する。

(仮定 3) 圧密圧力が小さいときは e と $\log \sigma_v'$ が直線であると仮定する。そして、圧密圧力が $\sigma_{v'}^{\text{HWCL}}$ に到達したときに滑らかに HWCL に収束し、それ以上の圧密圧力においては HWCL によって間隙比と圧密圧力の関係が規定される。粘土の初期含水比が大きいほど $\sigma_{v'}^{\text{HWCL}}$ は小さく、初期含水比が小さくなるほど $\sigma_{v'}^{\text{HWCL}}$ は大きくなる。収束点での e と $\log \sigma_v'$ の勾配が圧密圧力 $\sigma_{v'}^{\text{HWCL}}$ に以下の領域における勾配（圧縮指数 C_c ）となる。

図-1(a)は上記の仮定を I_{sv} と $\log \sigma_v'$ のグラフ上で、図-1(b)は間隙比 e と $\log \sigma_v'$ のグラフ上で説明している。まず圧縮曲線は圧密圧力が小さい前半部と圧密圧力が大きい後半部の2つに分けて考える。前半は e と $\log \sigma_v'$ が直線でありその勾配は圧縮指数 C_c で表される。後半は圧縮曲線が HWCL に収斂した後であるので、HWCL が圧縮曲線となる。本モデルでは HWCL に基づいて考えるので、前半部分の C_c は前半部分が HWCL に収束するときの圧密圧力 σ_{HWCL}' によって決まる。 σ_{HWCL}' が小さいほど C_c は大きく、 σ_{HWCL}' が大きいほど C_c は小さくなる。図-1(a), (b)では A 点が収束点を表している。

以上の仮定を用いると HWCL に収束する A 点の間隙比と体積比がそれぞれ以下のように求められる。

$$e_{HWCL} = (1 + e_L)^{b - a \ln \sigma_{HWCL}'} - 1 \quad (4)$$

$$v_{HWCL} = (1 + e_L)^{b - a \ln \sigma_{HWCL}'} \quad (5)$$

滑らかに HWCL に収束するときの傾きが圧縮指数なので、A 点における傾きである圧縮指数 $C_{c(\sigma_{HWCL}')}$ は次式で与えられる。

$$C_{c(\sigma_{HWCL}')} = 2.303 C_c \cdot (1 + e_{HWCL}) = 2.303 C_c \cdot (1 + e_L)^{b - a \ln \sigma_{HWCL}'} \quad (6)$$

上式はさらに以下ようになる。

$$C_{c(\sigma_{HWCL}')} = 2.303 a \cdot \ln(1 + e_L) \cdot (1 + e_L)^{b - a \ln \sigma_{HWCL}'} \quad (7)$$

図-2 は式(7)を用い、パラメータ a と b として 21 種類の海成粘土の平均値である 0.117 と 1.435 を用いて計算した $C_{c(\sigma_{HWCL}')}$ と液性限界 w_L (%) の関係である²⁾ (土粒子比重は 2.700 と仮定)。図中には C_c と w_L の代表的な関係として次式を比較のため示している。

$$C_c = 0.007(w_L - 10) \quad (8)$$

$$C_c = 0.009(w_L - 10) \quad (9)$$

図をみると、HWCL に収束するときの圧密圧力 σ_{HWCL}' が 800kPa のとき C_c と w_L の関係は式(9)にもっとも近く、 C_c と w_L の関係が式(8)のようになるには σ_{HWCL}' が 4,000kPa から 8,000kPa となる必要がある。一般の圧密試験の最大圧力は 1,280kPa であるので、式(8)で与えられる圧縮指数となる場合は圧縮曲線が HWCL に収束することはない。

前半部分の $e - \log \sigma_v'$ の直線関係は次式で表される。

$$e = e_{HWCL} - C_{c(\sigma_{HWCL}')} \log \frac{\sigma_v'}{\sigma_{HWCL}'} \quad (\sigma_v' < \sigma_{HWCL}') \quad (10)$$

圧密圧力が σ_{HWCL}' よりも大きい範囲では HWCL に収束し HWCL が圧縮曲線になるため次式となる。

$$e = (1 + e_L)^{b - a \ln \sigma_v'} - 1 \quad (\sigma_v' \geq \sigma_{HWCL}') \quad (11)$$

以上、圧縮曲線をまとめて示すと以下ようになる。

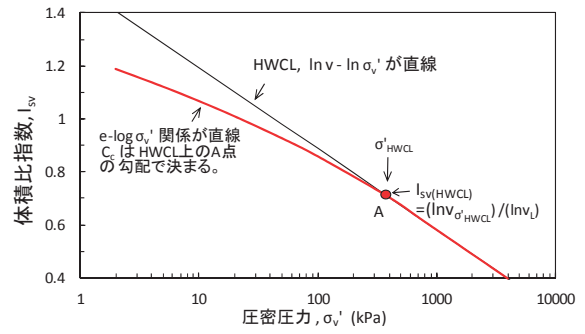


図-1(a) HWCL に基づいた粘性土の間隙比-圧密圧力のモデル(体積比指数 I_{sv} と $\log \sigma_v'$)

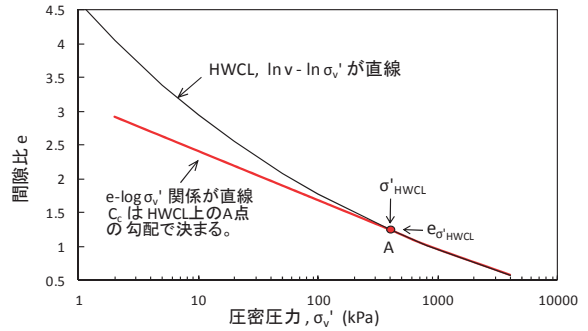


図-1(b) HWCL に基づいた粘性土の間隙比-圧密圧力のモデル(間隙比 e と $\log \sigma_v'$)

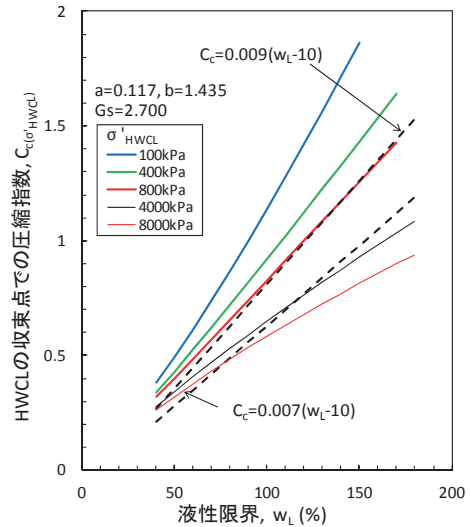


図-2 液性限界と HWCL の収束点における圧縮指数 $C_{c(\sigma_{HWCL}')}$ の関係

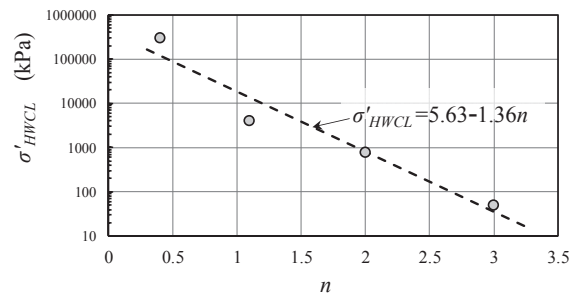


図-3 σ_{HWCL}' と液性限界で正規化した初期含水比 $n = w_0/w_L = e_0/e_L$ との関係

$\sigma'_v < \sigma'_{HWCL}$, $e \leq e_0$ の範囲で

$$e = e_{HWCL} - C_{c(\sigma'_{HWCL})} \log \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{HWCL}}$$

ただし,

$$C_{c(\sigma'_{HWCL})} = 2.303a \cdot \ln(1 + e_L) \cdot (1 + e_L)^{b-a \ln \sigma'_{HWCL}} \quad (12)$$

$\sigma'_v \geq \sigma'_{HWCL}$ の範囲で

$$e = (1 + e_L)^{b-a \ln \sigma'_v} - 1$$

σ'_{HWCL} は正規化初期含水比 $n = w_0/w_L$ より次式で決定

$$\log_{10} \sigma'_{HWCL} = 5.63 - 1.36n \quad (\text{図-3})$$

ただし, 初期含水比 $w_0(\%)$, 初期間隙比 e_0 , 液性限界 $w_L(\%)$, 液性限界の間隙比 $e_{Ln} = w_0/w_L = e_0/e_L$, $a=0.107$, $b=1.435$ (21 種類 of 海成粘土の平均値²⁾).

以上のように, 本モデルは各種の液性限界を有する粘土において初期含水比が変化するときの e - $\log \sigma'_v$ 関係を与えるモデルである。

3. モデル式で計算した e - $\log \sigma'_v$ 曲線と実験結果との比較

実験結果を上記のモデル式による計算結果と比較する。徳山港の浚渫粘土 (液性限界 111.6%) を用いて, 異なる初期含水比の条件で段階荷重圧密試験を行い e - $\log \sigma'_v$ 曲線を求めた。圧密初期の小さい圧密応力を加えやすいこと, および沈下量が大きいときにも高さを精度よく測定する

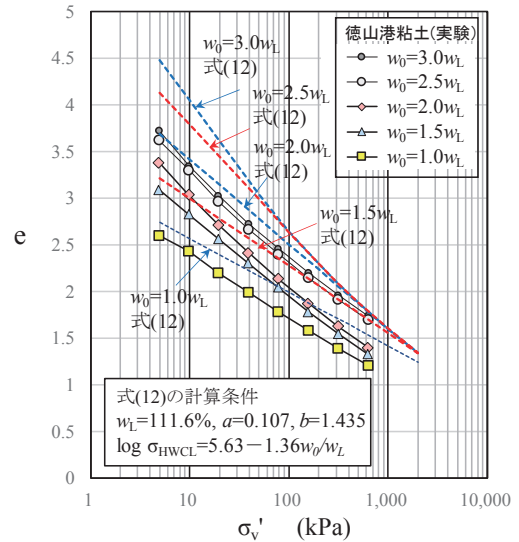


図-4 初期含水比 w_0 が $3w_L$, $2.5w_L$, $2w_L$, $1.5w_L$, $1.0w_L$ のときの e - $\log \sigma'_v$ 線の実験結果 (マーカーと実線) と式(12)による計算(点線)の比較

目的で, 圧密リングは直径 9cm と高さ 3cm とし通常の圧密試験の供試体の 1.5 倍の大きさとして試験を行った。

図-4 は初期含水比を $3w_L$, $2.5w_L$, $2w_L$, $1.5w_L$, $1.0w_L$ のときの徳山港粘土の e - $\log \sigma'_v$ 曲線と, 式(12)による計算結果の比較である。図をみると, 初期含水比 $2w_L$, $1.5w_L$, $1.0w_L$ における実験と計算の e - $\log \sigma'_v$ 関係は比較的一致しているが, 初期含水比が $2.5w_L$, $3.0w_L$ の場合, 実験の e - $\log \sigma'_v$ 曲線は計算よりも小さい値となり, 初期含水比の影響が小さかつ

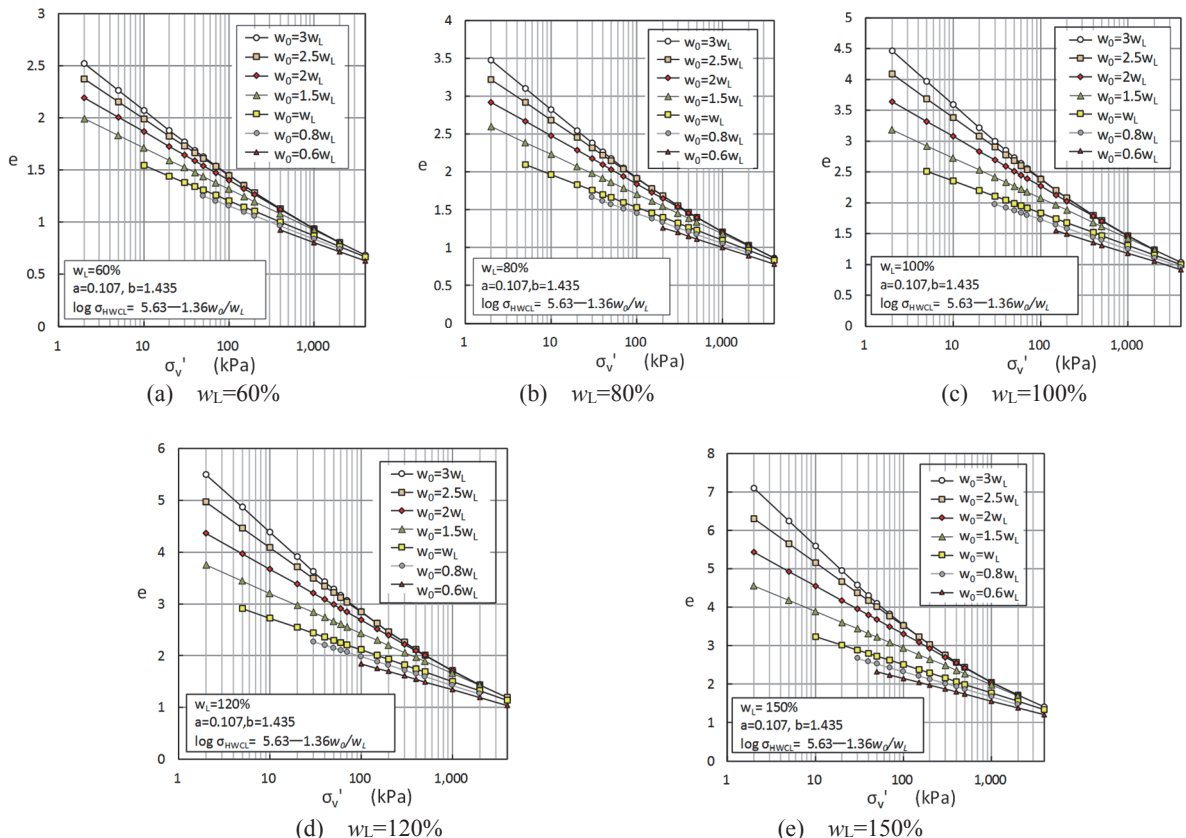


図-5 粘性土の間隙比-圧密圧力モデルによる $w_L=60\%$, 80% , 100% , 120% , 150% のときの e - $\log \sigma'_v$ 関係

た。これらの初期含水比では圧密試験の最初の圧密圧力である載荷盤の重さによって、供試体高さ 30mm の 35~45% に相当する 10~14mm の沈下が発生した。このとき載荷盤と圧密容器の隙間からの粘土粒子の流出が観察されており、初期に与える圧密圧力として載荷盤の重量が過大であったため正しい一次元圧密条件となっていなかった可能性が考えられる。高含水比領域の $e\text{-}\log \sigma'_v$ 曲線と計算モデルの適合性は既往の研究¹⁾²⁾で検証されているが、今回の粘土については、自重圧密やより小さい圧密圧力から圧密試験を開始するなど、試験方法を改善してさらに検討する必要があると考えられる。

本論文では以上の課題があることを前提に、本研究では式(12)を用いて初期含水比が異なる粘性土の $e\text{-}\log \sigma'_v$ 線を用い、さまざまな含水比で投入されたときの土砂処分場の浚渫土の体積について検討する。

4. 粘性土の間隙比-圧密圧力モデルによる初期含水比と圧密後の体積の関係に関する考察

浚渫土砂の処分場を考える際には、なるべく小さい費用による処分が求められる。粘性土の一般的な間隙比-圧密圧力モデルは、液性限界や初期含水比によって変化する粘性土の圧縮特性を表現できるので、土砂処分場の設計に活用することができる。

液性限界の変化による圧縮特性の変化を調べるため、 $w_L = 60\%, 80\%, 100\%, 120\%, 150\%$ ($G_s=2.70$)の $e\text{-}\log \sigma'_v$ 関係

を式(12)によって計算し、図-5に示した。図のように、いずれの液性限界においても、初期含水比の影響は圧密圧力が大きくなっても継続しており、例えば圧密圧力 100kPa の間隙比を比較すると、初期含水比によって大きく異なっている。また、液性限界の違いによる圧縮曲線の違いを比べると、いずれの初期含水比の条件でも液性限界が大きい粘土ほど間隙比が大きく、圧密による圧縮量も大きい。土砂処分においては、液性限界が高い粘土ほど圧縮特性を活用した体積の縮減が重要になるといえる。

港湾における浚渫の目的は、新たに航路・泊地を新設あるいは増深する場合と、既存の航路・泊地に堆積した土砂を除去する場合とがある。一般に、海底の粘性土地盤の含水比は液性限界 w_L と密接な関連があり、港湾地域の多くの海底地盤の深度 0.5~5m における含水比はおおむね $0.9w_L \sim 1.1w_L$ となっている。一方、航路・泊地内に最近堆積した粘土では含水比は表層で $1.5w_L \sim 2.0w_L$ であり、堆積厚さが 1m になると下部の粘土の含水比は圧密により低下して $1.2w_L \sim 1.4w_L$ である。

このように、長年月を経て堆積した海底を新たに掘削する場合と、航路や泊地に最近堆積した土では含水比が大きく異なっているので、浚渫された原海底地盤の粘土の平均的な含水比を液性限界の 1.2 倍であると仮定し、浚渫後に処分場に投入され圧密圧力が加わった場合の体積の変化について検討する。

$1.2w_L$ の含水比のときの体積を 1 とし、圧密後の体積縮減 V を次式で計算する。

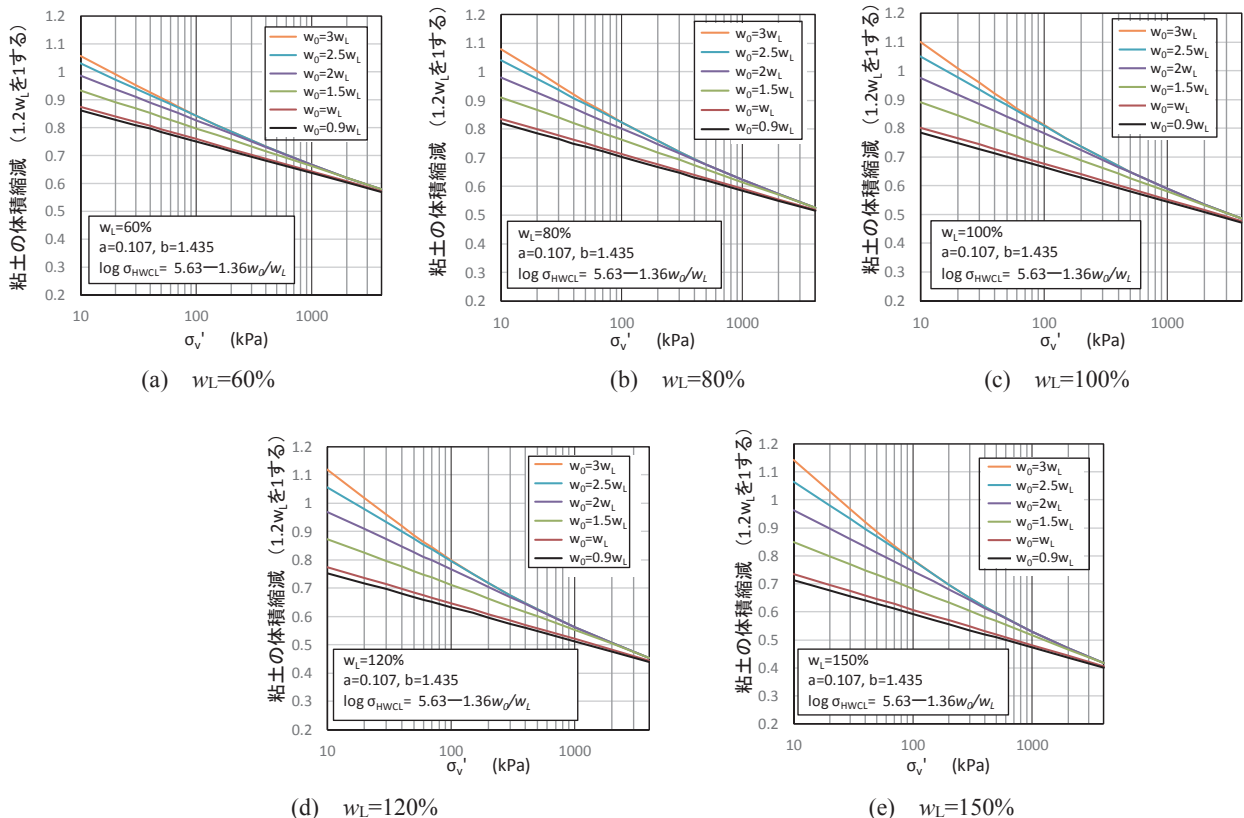


図-6 液性限界の 1.2 倍の体積を 1 とした時の圧密圧力と体積の関係

$$V = \frac{1+e}{1+1.2e_L} = \frac{1+G_s w / 100}{1+1.2G_s w_L / 100} \quad (13)$$

上式で V を計算し、圧密圧力との関係を図-6 に示した。図のように、いずれの液性限界でも初期含水比によって圧縮特性は変化するが、液性限界が大きく初期含水比が小さいほど圧縮後の体積は小さい。たとえば圧密圧力 100kPa、液性限界 60% では、初期含水比が $2.0w_L$ のときは約 0.83、初期含水比が $1.0w_L$ のときは 0.76 であり、液性限界 150% ではそれぞれ 0.75、0.61 である。次に図-6 を用いて土砂処分場に処分する浚渫土砂の減容化方法との関連について考察する。

5. 粘性土の間隙比-圧密圧力モデルを用いた土砂処分場における浚渫土砂の減容化に関する考察

土砂処分場における減容化とは、処分場に投入する浚渫土の体積をいかにして減少させるかという問題である。前章までに述べた粘性土の間隙比-圧密圧力モデルを用いてこれまでの減容化対策の考え方を整理し、土砂処分場の必要容量の推定方法及合理的な土砂処分場の設計方法について検討する。

土砂処分場における減容化方策は、適切な浚渫方法および揚土方法の選択、投入前処理及び投入後の処理があり、以下の 5 項目に分類できる。

- ・ 浚渫方法および揚土方法の選択による減容化
- ・ 処分場投入前の減容化処理
- ・ 浚渫土の利活用による処分量の低減
- ・ ドレーンによる圧密沈下の促進による減容化
- ・ 嵩上げによる処分場容量の増加と圧密促進

以下にそれぞれの方策の効果について、粘性土の間隙比-圧密圧力モデルを用いて考察する。

5.1 浚渫方法および揚土方法の選択による減容化

浚渫および浚渫土砂の運搬・土捨て方法の一般的な組み

表-1 浚渫および運搬・土捨て方法の一般的な組み合わせ³⁾

| 浚渫船 | 運搬方法 | 土捨て方法 |
|--------|-------------|--------------|
| ポンプ浚渫船 | 排砂管 | 直接排送（排砂管） |
| | 排砂管と中継ぎポンプ船 | |
| グラブ浚渫船 | 土運船（底開・側開式） | バージ直投 |
| | 土運船（密閉式） | バージアンローダ埋立て |
| | | 揚土機+ベルトコンベヤー |
| | | 揚土機+空気圧送 |
| | | 揚土機+ダンプ運搬 |

合わせを表-1 に示す。表のように、浚渫方法としてはポンプ浚渫とグラブ浚渫があり、ポンプ浚渫では排砂管により処分場に直接配送する方法が一般的である。一方、グラブ浚渫の場合、浚渫土は土運船（底開・側開式あるいは密閉式）で処分場まで運び、バージアンローダーによる水搬方式で処分場に投入するか、揚土後にベルトコンベヤー、空気圧送、ダンプ運搬で投入する方法がある。

浚渫方法および揚土方法が最も影響するのは浚渫土砂の含水比である。ポンプ浚渫およびバージアンローダーによる揚土では、浚渫土砂に加水し流動性を高めて水搬するため、投入時の初期含水比は液性限界の 3 倍程度になる。これに対してグラブ浚渫の場合、ほぼ原地盤の含水比で回収されるが土運船で運搬中に含水比がやや上昇した状態で処分場に運搬される。加水しないでベルトコンベヤーあるいはダンプ運搬で搬入した場合、含水比は原地盤の含水比+10~20%と考えられる。空気圧送で処分場に運搬される場合は、空気圧送に必要な流動性を得るため液性限界の 1.3~1.8 倍に加水調整される。

5.2 処分場投入前の減容化処理

処分場投入前の減容化処理は、投入前に浚渫土の含水比を低下させることによって圧密した後も減容化の効果が持続することを活用した方法である。具体的な方法としては、天日乾燥、自重圧密脱水、高圧フィルタープレスによる機械脱水が考えられる。各工法の特徴をまとめると表-2 のようになる。

表-2 投入前減容化処理の方法と特徴

| 投入前処理 | 概要 | 特徴と留意点 |
|------------|--|---|
| 天日乾燥 | 天日乾燥は浚渫土を敷き広げて土と空気の接触面からの乾燥によって浚渫土の含水比を低下させる方法である。 | 処分場に隣接した作業ヤードに浚渫土を敷き広げるポンドを設置する必要がある。処分場に十分な作業ヤードがあり、さらに人家から離れていることが望ましい。 |
| 自重圧密による脱水 | 自重圧密脱水は、浚渫土を作業ヤードに設置したポンドに収め、自重圧密によって含水比を液性限界付近まで低下させるものである。 | 処分場に隣接した作業ヤードに自重圧密のためのポンドを設置する必要がある。浚渫の工程とポンドの数、自重圧密終了後の処分場への投入までの全体の効率を検討する必要がある。 |
| 高圧フィルタープレス | 高含水比の浚渫土砂を最大 4MPa の圧力で圧密し、容積を半分程度まで縮減する。圧密に要する時間は 60 分前後である。 | 体積の縮減率は大きい、他の工法に比べ時間がかかること、コストが大きいことに注意を要する。ただし、脱水後の土は築堤材として十分な強度があり、新門司処分場では嵩上げ用の築堤に用いられた。 |

5.3 浚渫土の利活用による処分量の低減

浚渫土は港湾工事における埋立材料、裏込め材料として直接使用されてきたが、このほかに人工干潟の造成材料、セメント固化処理土、製鋼スラグ混合土としての利用、高圧フィルタープレスで脱水後に築堤材として利用する方法などがある。

門司沖土砂処分場では、浚渫土を高圧フィルタープレスによって減容化することにより、脱水固化した浚渫土をレキ質土の代替材料として、処分場を嵩上げして増量する際の築堤等に使用した⁴⁾。このほかに浚渫土の利活用方策としては、セメント固化処理を行って、埋立材・裏込め材に使用する方法がよく用いられている。2010年に供用が開始された東京国際空港D滑走路建設事業が代表例⁵⁾であり、管中混合固化処理工法によって浚渫土を原料土とする490万m³のセメント固化処理土が空港本体の埋立材として使用された。

浚渫土を利用して人工干潟を造成した例としては、徳山下松港大島地区において120万m³の浚渫土を活用して29.3haの人工干潟が造成された⁶⁾。このほか、浚渫土に製鋼スラグを混合した製鋼スラグ混合土を裏込めや埋め立てに使用する工法が研究されている⁷⁾。

空港の建設や人工干潟の造成など大型事業の場合を除くと、一般に浚渫による土砂の発生とその利活用のタイミングと量(発生量と必要量)を一致させることは難しいため、利活用を促進するためには浚渫土砂をストックし、必要に応じて活用できる体制がのぞましい。港湾の土砂処分場にこのようなリサイクルのための土砂材料の調整機能を付加することは、浚渫土のリサイクルを促進し、処分費用を減少させる効果が得られる。

5.4 ドレーンによる圧密沈下の促進による減容化

多くの土砂処分場で採用されているが、より効果的に減容化する方法として、真空圧密との併用工法、鉛直ドレーン材と水平ドレーン材を結合した砂層を用いないバーチカルドレーン工法がある。

バーチカルドレーンによって圧密を促進させ浚渫土砂を速やかに圧縮させることは、浚渫土を対象とした土砂処分場の多くで一般的に行われている⁸⁾。東京港の廃棄物処分場では、処分場内の海底地盤とそこに投入された浚渫粘土を海上で打設したキャップ式バーチカルドレーンによって真空圧密を実施し、3~5mの圧密沈下を短期間に発生させることにより、処分容量の増加に成功している⁹⁾。

新門司港土砂処分場では、打設機械を連結フロート上で横行させて軟弱地盤から直接鉛直ドレーンを打込み、さらに鉛直ドレーンを水平ドレーンと連結することによって、排水用の砂層を用いずに浚渫土の圧密を促進することに成功した⁴⁾。徳山下松港の土砂処分場でもこの方法を採用している。

5.5 嵩上げによる処分場容量の増加と圧密促進

限られた面積において処分容量を増加させる方法とし

て、嵩上げは有効である。嵩上げを実施するためには、嵩上げによる地盤高に対応できる護岸構造が必要であることに注意を要する。また、護岸の築堤材として浚渫土を利活用した材料を用いることは処分量の増加に効果がある。

5.6 減容に関する5項目と圧密圧力-体積関係との関連

図-7は、埋立水深8m、埋立地盤標高+4mの海面土砂処分場を想定し、粘土の液性限界が120%の時の図-6を用いて、土砂処分場を検討する際に重要な上記5項目に関して検討する方法を示したものである。

- (1)浚渫の方法と投入前処理：浚渫の方法によって処分場投入時の初期含水比が異なる。また投入前処理により初期含水比を低減することも考えられる。これらに対応した初期含水比の関係を用いる。
- (2)投入前処理として高圧フィルタープレスなど高圧機械脱水の場合：圧密圧力は最大で4MPaであり圧密度は70~80%程度と考えられるので、有効圧密圧力3MPaと推定される。
- (3)投入後の処理が無いとき（海面土砂処分場に浚渫土を投入して埋立が完了しドレーン打設等の処理が無い場合）：浚渫土は一般に圧密係数が極めて小さく圧密に時間を要するので、投入後の全体の平均的な有効圧密圧力は10~20kPaと考えられる。
- (4)投入後処理があるとき（埋立完了後にバーチカルドレーンを打設し圧密を促進させて自重圧密により埋立層が圧縮した場合）：自重圧密では含水比によって圧密圧力が異なるが、最終的な有効圧密圧力の平均は30~80kPaとなる。
- (5)処分場に築堤を行い埋立標高から嵩上げを行った場合：嵩上げた土の重量は、埋め立てられた粘土の圧密荷重となる。含水比によって荷重の大きさは異なるが、4m嵩上げを行ったときの有効圧密圧力の平均は60~130kPa、8m嵩上げを行った場合の圧密圧力は110~200kPaと推定される。

浚渫土の液性限界がわかっている場合、液性限界に対応

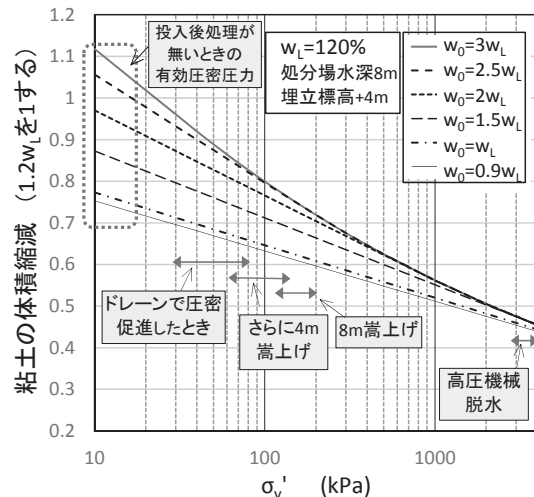


図-7 土砂処分場の検討で重要な圧密圧力の範囲

する図-6 とこれらの有効圧密圧力の範囲における体積縮減を参照すれば、土砂処分場の粘土の体積縮減をおおむね把握することができる。図-7 に示す液性限界 120%の粘土の場合、液性限界の 1.5 倍で処分し、バーチカルドレーンで自重圧密を促進すると、体積は原位置の 75~80%に縮減し、4m の嵩上げを行うと 70~75%、8m の嵩上げを行った場合は、65~70%に縮減する。嵩上げによって処分量を増加させることに加えて、すでに埋め立てた浚渫土の縮減によって処分容量を増加させることができる。一方、図-7 より、高压機械脱水を行うと体積は液性限界により 40~60% とほぼ半分に縮減することがわかるが、高压機械脱水は 1m³あたりの費用が高いため、脱水後の土を築堤材料などに転用することによって、費用対効果を高めることが現実的である。

以上のように、粘性土の間隙比-圧密圧力モデルによる図-6 と図-7 を用いることによって、土砂処分場に浚渫土を処分した場合の体積縮減を概算することができる。これらの概算方法を前提として、合理的な土砂処分場の検討手順を図-8 に示した、それぞれを説明すると以下のとおりである、

- (1) 当該港湾における土砂管理の目標期間を設定する。
- (2) 航路・泊地の土砂堆積量、港湾整備計画上の必要浚渫土量、港湾工事等への浚渫土の利活用計画に基づき、目標期間内において港湾内に発生する土砂量を決定する。
- (3) 浚渫土の土質力学的特性を調べる、
- (4) 浚渫方法と処分場までの運搬方法、浚渫土砂の投入前処理の適用、浚渫土砂の投入後処理の適用について各港湾の状況を考慮して、実施可能な具体的工法案とコスト、時間、制約条件を明らかにする。
- (5) 浚渫・運搬方法、投入前処理、投入後処理の組み合わせについて、目標期間の土砂管理に必要な土砂処分場の容量と建設費用、浚渫・運搬費用、投入前処理費用、投入後処理費用を計算する。処分場の容量の計算で必要となる浚渫土の圧縮特性の概算には式(12)のモデルを用いることができる。
- (6) 現場の条件に適合し、もっとも処分費用が少ない土砂処分の組み合わせを選択し、土砂処分場の容量および諸元を決定する。

6. 処分場の検討法の適用 ー尾道糸崎港松永地区ー

6.1 尾道糸崎港松永地区における土砂処分計画

尾道糸崎港は、尾道港区、糸崎港区、松永港区からなる。図-9 に松永港区の航路・泊地と堆積の状況を示す。図中の機織地区は木材を取り扱う埠頭であり貯木場と木材の整理場が設置されている。貯木場と整理場の東側は水深 1~3m の干潟である。航路・泊地は、現在暫定-10m で運用しており、-12m まで増深されている部分があるが平成 29 年度から 31 年度にすべてが-12m まで増深される予定である。泊地の北側は、二級河川の藤井川と本郷川の河口であ

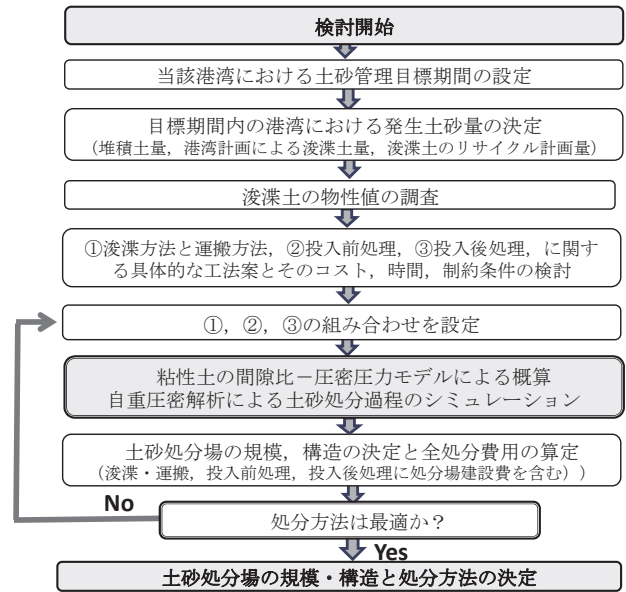


図-8 土砂処分場の検討手順

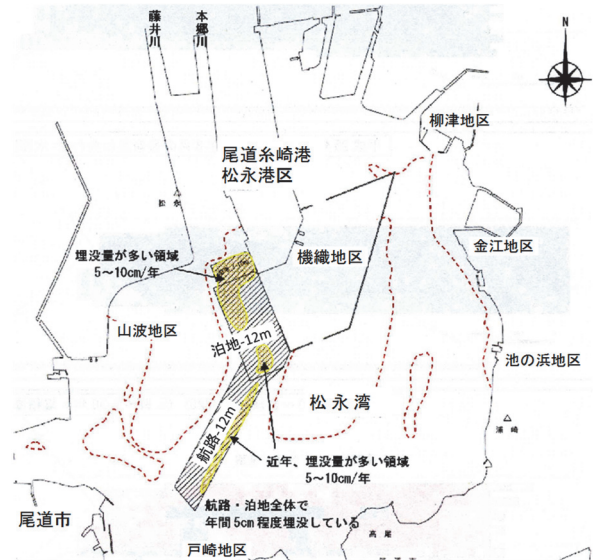


図-9 尾道糸崎港松永港区の航路・泊地と堆積の状況

り、干潟となっている。航路・泊地の埋没状況を調査するため、深浅測量、浮泥流動観測、底質調査、水質調査が実施された結果、2008 年から 2015 年の間で年間 5~10cm の堆積が認められた⁹⁾。

松永地区における土砂処分場を検討する上では以下について検討し、目標期間内において港湾内に発生する土砂量を決定する必要がある。

- ①土砂管理の目標期間の設定
- ②航路・泊地における土砂堆積量
- ③港湾整備計画上の必要浚渫土量
- ④港湾工事等への浚渫土砂の利活用計画

目標期間としてここでは今後 30 年を考慮、航路及び泊地における堆積量の調査結果から、堆積量を算定した結果を表-3 に示した。尾道糸崎港では航路増深やパースの

表-3 尾道糸崎港における航路・泊地の土砂堆積量

| | 面積 | 液性限界 w_L | 初期含水比 | 平均堆積速度 | 年間堆積量 | 10年間堆積量 | 30年間堆積量 |
|-------|------|------------|---------------|----------|-------------|------------|------------|
| 航路・泊地 | 50ha | 79.4% | 1.5~1.8 w_L | 0.04 m/y | 2.0 万 m^3 | 20 万 m^3 | 60 万 m^3 |

表-4 尾道糸崎港における土砂管理計画のまとめ

| 項目 | 土砂量 | 関連事項 |
|-------------------|--------------------|---|
| 目標期間 | 30年間 (2018年~2048年) | |
| 航路・泊地における土砂堆積量 | 60 万 m^3 | 液性限界は 40~120% に分布し平均は 79.4%。自然含水比は液性限界の 1.5~1.8 倍である。 |
| 港湾整備計画上の必要浚渫土量 | 0 | 港湾整備計画なし |
| 港湾工事等への浚渫土砂の利活用計画 | 0 | 浚渫土砂を利用した人工干潟造成構想がある。 |
| 総計 | 60 万 m^3 | |
| 現在使用している土砂処分場の残容量 | 0 万 m^3 | 土砂処分場はない。 |
| 不足する処分容量 | 60 万 m^3 | |

新設などの計画はないため、港湾整備計画上の必要浚渫量 0 とした。港湾工事等への浚渫土砂の利活用計画は、浚渫土砂を活用した人工干潟造成構想があるが具体的な計画となっていないので 0 とした。また、尾道糸崎港では現在使用できる土砂処分場はない。以上の結果を尾道糸崎港の土砂管理計画としてまとめると表-4 のようになる。

6.2 尾道糸崎港における浚渫計画と土砂処分場の考え方

表-4 の土砂管理計画に基づいて浚渫の計画と最適な土砂処分場について検討する。浚渫は航路・泊地において港湾の利用に支障が生じないように実施する必要がある、以下の 2 つのパターンが考えられる。

- a) 5 万 m^3 × 4 回/10 年：5 万 m^3 規模の浚渫を 10 年間に 4 回実施する。1 回の工事の浚渫土量は 1500 m^3 /日で工事期間 2 か月。
- b) 10 万 m^3 × 2 回/10 年：10 万 m^3 規模の浚渫を 10 年間に 2 回実施する。1 回の工事の浚渫土量は 2500 m^3 /日で工事期間 3 か月。

尾道糸崎港の浚渫粘土の液性限界の平均は 79.4% である。また、本港では浚渫の目的は航路・泊地に堆積した含水比が 1.5~1.8 w_L の粘土を除去することである。そこで、図-6 と同様に、尾道糸崎港の液性限界を 80% とし、初期含水比が 1.65 w_L (現地地の含水比の平均) の時の体積を 1 としたときの体積と圧密圧力の関係を計算すると、図-10 のようになった。図より、原泥よりやや大きい液性限界の 2.0 倍の含水比で浚渫し (グラブ浚渫が相当)、加水せず (液性限界の 2 倍の含水比の場合は加水の必要がない)、土砂処分場に埋め立ててドレーンで自重圧密させた場合、体積は原位置の体積から 0.64~0.70 倍に縮減しており、土砂管理計画で予測された発生量 60 万 m^3 に対してこの場合の処分量は約 40 万 m^3 であると推定される。

40 万 m^3 規模の土砂処分場を尾道糸崎港内に設置する場合、陸上に処分場を設置する方法と海面に処分場を設置することが考えられる。港湾の土砂処分場を陸上に設置した例としては、青森県の港湾で隣接した 2 か所の陸上処分場にそれぞれ 35 万 m^3 (加水後)、21 万 m^3 (加水後) を水平

ドレーンの設置と真空圧密による圧密促進を行いながら処分した事例がある¹⁰⁾。尾道糸崎港において、本例と同様に埋立高さ 5.5m の陸上処分場を設置する場合、7,272 m^2 の面積が必要となり、これらの敷地を陸上に確保するのは難しいと考えられる。浚渫土砂の利活用が実現し、処分土量

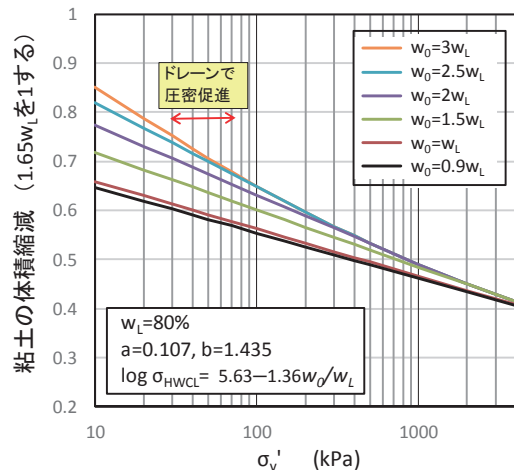


図-10 液性限界の 1.65 倍の体積を 1 とした時の圧密圧力と体積の関係(尾道糸崎港)



図-11 尾道糸崎港の海面土砂処分場の必要規模 (国土地理院の電子地形図に追記)

が半分程度に減少したときに陸上処分場の可能性が出てくると考えられる。

次に 30 年間に処分が必要な 40 万 m^3 を、海面土砂処分場を設置して処分する場合を考える。尾道糸崎港は、航路・泊地以外は干潟状となっていて水深が浅いため、埋立高さを+10m、埋立厚さを海底地盤の圧密沈下を考慮して 12m と仮定すると、必要面積は護岸の面積を含めて 200m×200m と考えられる。図-11 には現在の岸壁の先に 200m×200m の土砂処分場を設置した場合の平面図を示した。処分場の地盤高さを 15m まで許容すれば、170m×170m まで面積を縮小し、護岸の建設費用を抑えることができる。浚渫および運搬方法、圧密促進用ドレーンの設置、地盤高さを総合的に検討することによって、最適な土砂処分場の大きさと護岸構造を決定することができると考えられる。

7. まとめ

港湾の機能を維持するための航路・泊地の浚渫をスムーズに実施するためには、浚渫土を処分する土砂処分場の整備が不可欠である。土砂処分場の建設には多大な費用を要するため、浚渫土の利活用する技術の開発とともに、土砂処分場の建設費用の低減さらには既存および新たに建設される処分場の効率的な利用が課題となる。

本研究では、粘性土の間隙比-圧密圧力モデルを用いて、浚渫土の液性限界から各種の条件のもとでの浚渫土の体積変化を概算する方法を提案した。次に本モデルを浚渫土の処分場の検討に適用し、浚渫方法・揚土方法の選択、投入前処理、投入後の処理、嵩上げによる処分場容量の増加等の減容化方策の効果について検討し、尾道糸崎港を対象として土砂処分場の必要規模の概算法を示した。

中国地方整備局管内の瀬戸内海に立地する港湾では、水深が浅いため、港湾の整備と管理において常に浚渫土の処分問題に直面している。海底の底質は圧縮性の大きい高塑性の粘性土であり、それぞれの港で今後必要となる土砂処分の合理的な方法についてさらに検討を進めていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土田孝：海成粘土地盤の自然間隙比と土被り圧の関係に関する統一的な解釈，地盤工学会論文報告集，Vol.41, No.1, pp.127-143, 2001.
- 2) Tsuchida, T.: e -log σ_v' Relationship for Marine Clays Considering Initial Water Content to Evaluate Soil Structure, *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.35, Issue 1, pp.104-119, 2017.
- 3) 公益社団法人地盤工学会：地盤工学ハンドブック第 1 刷，6.6 浚渫と埋立て，pp. 1130- 1147, 1999.
- 4) 中道正人，河野正文，梅山崇，山本修司，川原修，片桐雅明，大石幹太，吉福司：新門司沖土砂処分場の受入容量拡大プロジェクト，地盤工学シンポジウム，pp. 667- 674, 2014.
- 5) Watabe, Y. and Noguchi, T.: Site-investigation and geotechnical design of D-runway construction in Tokyo Haneda Airport, *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 6, pp. 1003-1018, 2011.
- 6) 潮見幸司，高津宣治，森宣夫，首藤啓，西土井誠，中林孝之，アサリ漁場を目指した人工干潟の造成に関する実証的研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68, No.2, pp.I_1171-I_1175, 2012.
- 7) 一般財団法人沿岸開発技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル，2017.
- 8) 手塚博治，新舎博，竹谷健一，山下徹：新海面処分場の延命化対策－真空圧密による軟弱地盤の減容化－，地盤工学会誌，Vol.56, No.9, pp.14-17, 2008.
- 9) 土田孝，奥名孝行，森晴夫，水野博史：尾道糸崎港と宇部港における航路および泊地に堆積した底泥の土質特性，地盤と建設，Vol.35, No.1, pp.163-168, 2017.
- 10) 新舎博，熊谷隆宏，宮本健児，濱谷拓：水平ドレーンを利用した真空圧密工法による浚渫土の減容化施工，地盤工学ジャーナル，Vol.8, No.1, pp.97-108, 2014.

(2018 年 6 月 25 日 受付)

