

要求される性能に基づいた土留潜堤の設計手法の検討

中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 特別会員 ○松村 洸南

1. はじめに

環境創造を目的とした人工的な干潟の造成が行われる場合、波浪や潮流による土砂の流出を防ぐために土留潜堤が設けられる。人工干潟の土留潜堤は、港湾法第56条の2の2に定められている「港湾の施設の技術上の基準・同解説 ⅴ」の対象とする港湾の施設（技術基準対象施設）には含まれていない。そのため、潜堤の要求性能と性能規定に関する明確な記述はない。軟弱な地盤上に設けられる際は潜堤の下に地盤改良が施されてきた。地盤改良は全体事業費の中で占める割合が高く、人工干潟を整備する上での課題の一つとなっている。

このため、潜堤の基礎部を工夫することによって地盤改良を伴わずに潜堤の沈下を抑制し、コスト削減と安定的な潜堤を築造することを目的として実験及び解析を行った。

2. 沈下を許容する土留潜堤の天端高の設定

潜堤築造時の即時沈下は許容し、背後の土砂が流出しない堤体高を維持することを要求性能とした。築造時の沈下を許容することから余盛施工を行うことが必要であり、設計時の考え方を見直す必要がある。

図-1に、施工直後堤体が沈下することを予測し、所定の高さより高く設定した堤体断面を示す。なお、潜堤からの作用荷重を分散させるため、堤体の下にジオテキスタイルならびに浮き基礎(粗朶沈床)を施すこととした。

図-2に、施工段階ごとに即時沈下が発生し、その後沈下速度が減少して安定する沈下曲線のイメージを示す。計画した捨石量を施工後、沈下速度がほぼ0になった時点で、沈下した堤体の天端が所定の堤体高以上の位置にあれば竣工とみなすことにした。

沈下量の経時変化が安定し、堤体の天端高さが所定の堤体高さ以上におさまっていることが即時沈下の照査項目となる。照査は室内実験で行うこととし、後述する。

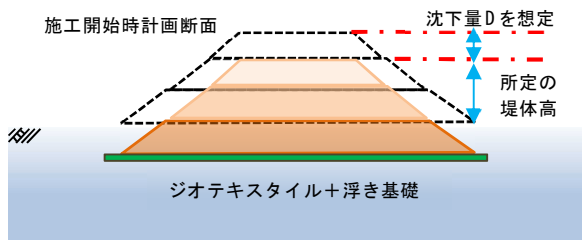


図-1 即時沈下と段階的な施工を考慮した堤体の断面

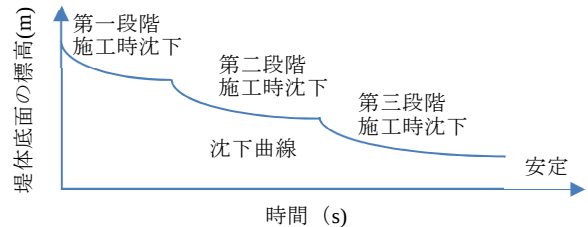


図-2 施工段階毎の沈下曲線のイメージ

3. 数値解析による断面の安定性の検討

3.1 自然条件

モデルケースとして人工干潟を造成することを想定し、検討を行った。表-1に土層の物性値を示す。

表-1 各土層の地盤物性値

土質名		地盤定数
浚渫土 (粘性土)	浚渫前	$\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 4.5 \text{ kN/m}^3$) $C_u = 2.50 + 1.75 \cdot Z \text{ kN/m}^2$ ($Z_0 = \text{地表面}$)
	浚渫後	$\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 4.5 \text{ kN/m}^3$) $C_u = 1.17 \text{ kN/m}^2$
覆砂土 (砂質土)		$\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 10.0 \text{ kN/m}^3$) $\phi = 25^\circ$

3.2 検討対象断面の選定

表-2に検討対象断面を示す。

表-2 検討対象断面

案1	捨石傾斜堤 +SCP改良 (一般的な断面)	
案2	捨石傾斜堤 +ジオテキスタイル +浮き基礎 (潜堤の荷重を分散させる構造)	
案3	ジオテキスタイル +カルシア改質土 (カルシア改質土が面として作用し、応力分散を期待した構造)	

キーワード 人工干潟, 土留潜堤, 軟弱地盤
連絡先 〒734-0011 広島市南区宇品海岸 3-10-28

中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所
TEL082-250-1903

3.3 軟弱地盤上の潜堤の検討に適用可能な解析手法

軟弱地盤上の潜堤の検討に適用可能な解析手法として、有限要素法(FEM), 粒子法(例えば SPH), 個別要素法(DEM)が考えられる。捨石と軟弱地盤を忠実に再現するには FEM より SPH や DEM が有利であるといえ、本検討ではマウンドのモデル化で実績のある DEM を用いることとする。

3.4 解析モデルの検討

3.4.1 解析パラメータ

ジオテキスタイル+浮き基礎の解析モデルを例にとってモデル各部の概要を説明する。

黄色い要素が堤体、緑色がジオテキスタイル、白が浮き基礎、茶色が浚渫土を表す。ジオテキスタイルは粒径 3.5mm の粒子を直径の間隔で格子状に配置した。浮き基礎は粒径 5.0mm の粒子を木材の配置位置に対応する場所に平面的に配置してモデル化した。

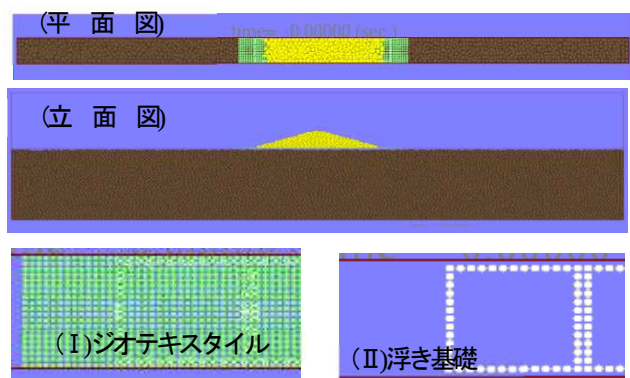


図-3 解析モデル

表-3 解析に用いたパラメータ

ばね係数(N/m)	2×10^3 (実験に用いた粘性土の値)
粘性減衰係数(Ns/m)	0.973 (経験上定めた値)
密度(kg/m ³)	2000 (粘性土) 2250 (伊勢砂利のみ) 7820 (伊勢砂利を鉛弾で調整) 1000 (浮き基礎)
要素間摩擦係数	3° (粘性土) 30° (捨石：内部摩擦角 35°程度)
要素間転がり摩擦係数	0.1 (捨石)

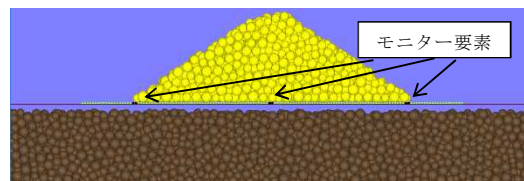
表-4 解析条件

時間間隔(s)	1×10^{-5}
载荷速度(m/s) (堤体支持版の降下速度)	0.05
堤体支持版と 粒子との関係	粘性土とは無関係、他粒子と 接する場合回転拘束

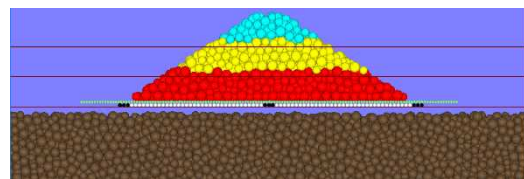
3.4.2 解析ケース

3種類のモデルについて図-4に示す。

本稿では、紙面の制約によりモデルbに着目する。

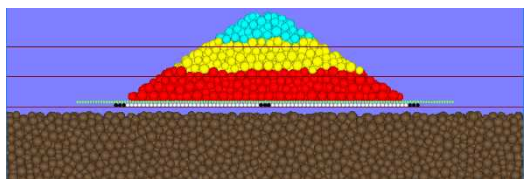


a ジオテキスタイルのみのモデル



浮き基礎のブロック毎に剛体とし回転を考慮する

b ジオテキスタイル+浮き基礎



カルシア改質土を用いる場合、浮き基礎全体を剛体とする（回転は考慮しない）

c ジオテキスタイル+カルシア改質土

図-4 解析ケース

3.5 粘性土粒子の変位ベクトルの比較

図-6に解析ケースbにおける粘性土粒子の変位ベクトルを示す。堤体下部に、堤体とともに変位する楔状の剛体部(変位量 1cm 程度の領域)が存在し、図-7に示す。テルツァギの基礎底部の剛体領域のモデルに対応しており、古典的モデルには一定の合理性が認められる。

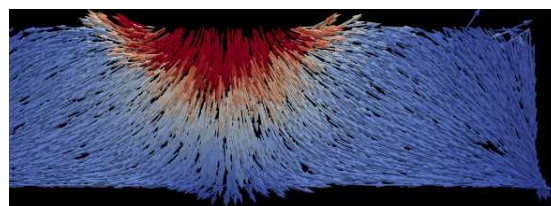


図-5 解析ケースbの粘性土粒子の変位ベクトル

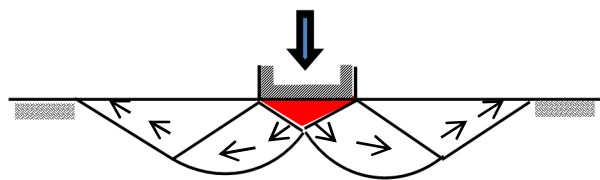


図-6 Terzaghi の極限つり合い状態

3.6 沈下量の予測式

解析結果を基に堤体の沈下量を算定する方法を考える。なお、堤体はある程度沈下した後静止し、沈下量は堤体死加重とこれに対する抵抗力の釣り合いにより求まる。予測式では、堤体死加重に対する抵抗力として、

くさび形状の境界面に作用するせん断抵抗力と堤体底面に作用する浮力による支持力を考慮する。

すべり面法による水平粘土地盤中の帯基礎の支持力を求める方法に関する記述が文献²⁾にある。

文献²⁾の 4.74 式によれば、基礎の支持力 q_d は、式(1)で与えられるとしている。

$$q_d = (\pi + 2)Cu + \gamma D \quad (1)$$

q_d : 基礎の支持力(kN/m²), Cu : 浚渫土せん断強度(kN/m²), γ : 浚渫土密度(kN/m³), D : 根入れ長さ(m)

q_d が図-7 のせん断抵抗力と浮力の和に対応すると考えると、第一項がせん断抵抗力、第二項が浮力に相当する。式(1)の Cu に深度方向 z にせん断強度が増加する地盤定数を考え、 z を D と置くと次式(1)'が得られる。

$$q_d = (\pi + 2)(c_0 + c_1 D) + \gamma D \quad (1)'$$

c_0, c_1 : 係数

これは潜堤底面に作用するせん断強度として深度 D のそれを用いることと等価である。ここで D を堤体の沈下量と考え、式(1)' を D について整理すると式(2)が得られる。

$$D = (q_d - c_0(\pi + 2)) / (c_1(\pi + 2) + \gamma) \quad (2)$$

この予測式は、実験および解析を通して、図-8 に示すように堤体の形状が保持されたまま沈下することが明らかになったことに基づいている。つまり、式(2)における特徴は、潜堤の設置圧は変化せず沈下し、その深度における浮力とせん断抵抗を用いて支持力を算定するところにある。

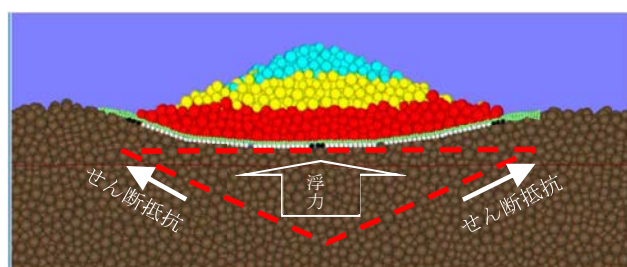


図-7 堤体の沈下に対する反力のイメージ

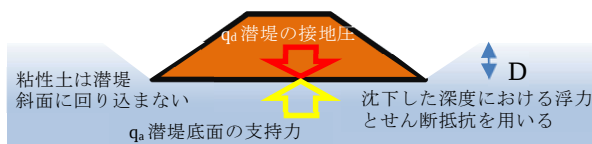


図-8 支持力の考え方

4. 模型実験による性能照査

4.1 模型実験の概要

施工後の要求性能と性能規定を確認するために模型実験を行う。実験により、堤体の沈下が安定していること、沈下量が予測値以下であることを確認する。

実験模型は縮尺が 1/60 で、実験室内の土槽内に海底地盤を模擬した軟弱粘性土を投入し、その上に石材で潜堤模型を構築した。軟弱粘性土は現地で採取した浚渫土を用い、潜堤模型は実際の潜堤の築堤過程を考慮して段階的に構築した。

4.1.1 使用材料

軟弱粘性土は徳山下松港の浚渫土を用いた。捨石は花崗岩質である伊勢砂利を用い、模型の縮尺 1/60 に合わせて 1~1.5cm とした。乾燥密度が 1339kg/m³ であり、潜堤の重量を増やすために鉛弾を袋詰めにした材料を用いた。

4.1.2 実験方法および計測方法

土槽内部に色砂およびマーカをセットして浚渫土を投入し、実験ケースに応じてジオテキスタイル、浮き基礎を設置した。その上に石材を投入し、沈下量を計測した。

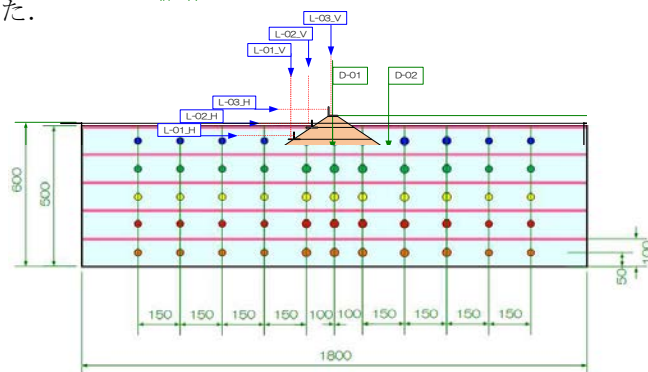


図-9 色砂およびターゲット、変位計の配置

4.1.3 実験ケースおよび諸条件

実験ケースを表-5、図-10 に示す。堤体を伊勢砂利のみで作成すると、堤体底面中央部の沈下量が 13.3mm と小さく、浮き基礎の効果が出にくいことが懸念されたため、堤体深部に鉛弾を積み増すことにより堤体底面に作用する圧力を 3.0 倍とし、沈下量を大きくして両者の差が明確になるモデルを設定した。

表-5 実験ケース

No	内容
1	ジオテキスタイル+浮き基礎, 堤体重量 3 倍
2	ジオテキスタイルのみ, 堤体重量 3 倍

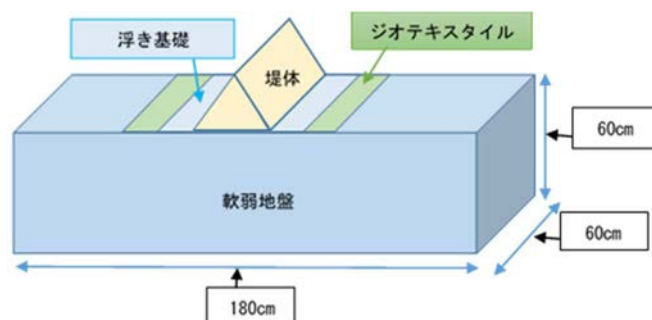


図-10 実験ケース

4.2 実験結果

写真-1, 図-11 に堤体底面中央および右端(法先)の沈下量を示す。いずれも 48 時間後の沈下量である。



写真-1 実験終了時(手前はジオテキスタイルのみ)

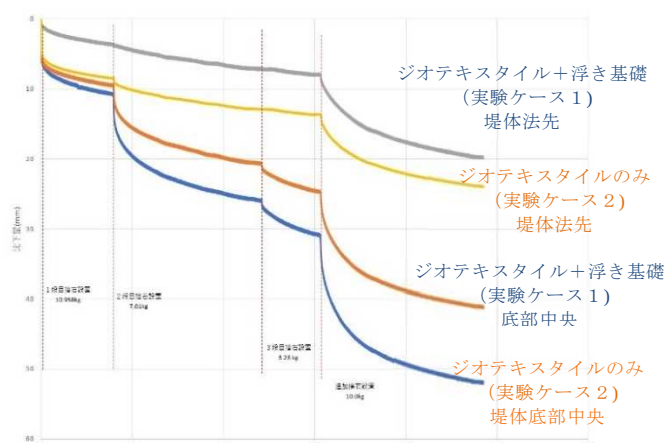


図-11 実験ケース 1 及び実験ケース 2 の堤体底面中央および法先の沈下曲線

4.3 実験と解析の比較

図-12 に、例として解析ケース b の粘性地盤の地中の変位分布と、実験ケース 1 の堤体を取り除いた後の地中の変位分布を比較した。両者の形状は良好に対応している。

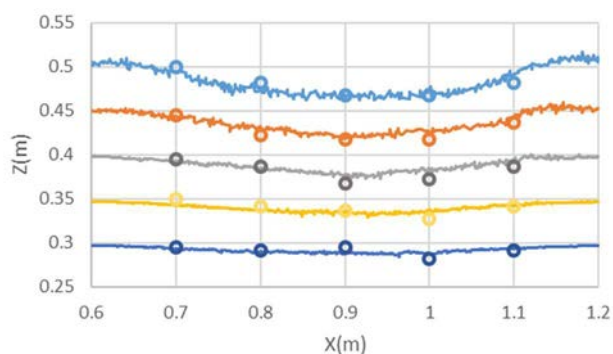


図-12 解析ケース b (実線) と実験ケース 1 (プロット) の地中の変位分布の比較

4.4 竣工時の性能照査

3.6 の沈下量の予測式(2)を用いて模型実験ケース 1 の沈下量予測を行った結果、 $D=121\text{mm}$ が得られた。

浮き基礎潜堤の模型実験ケース 1 では写真-1 に示すように、築堤 48 時間後も形状が安定しており、堤体中央の沈下量は予測値 121mm を下回る 41mm であったので、所定の堤体高さを確保できたと考えられる。よって、実験に用いた断面は竣工時の性能規定を満足できていると言える。

5. まとめ

人工干潟の土留潜堤は、背後の土砂を流出させないために沈下を許さない構造物として設計されてきた。しかしながら、人工干潟の土留潜堤に求められる性能は背後の土砂を流出させない天端高のみであり、多少の沈下は許容できる。このことを踏まえ、地盤改良コストの削減、潜堤からの作用加重を分散させる構造物の検討を目的とし、土留潜堤に特化した設計方法を確立することを試みた。具体には、沈下量の数値解析、縮尺 1/60 の模型実験を行った。また、予測式の妥当性についても確認を行った。

3.6 で検討を行った式(1)および式(2)と類似の式が、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾p678～679に記載されている。実大規模での地盤の挙動を考える上で、どちらの式に妥当性があるのかを検証する必要がある。また、ばらつきを考慮し安全側の定式化に留意する必要がある。精度の良い沈下量予測を試み、予測値の精度を向上させることで潜堤断面の大きさを削減でき、より経済的な設計となると考える。

本実験では 1/60 模型に現地浚渫土をそのまま用いたが、実大実験・解析等を実施し、粘着力等の相似を考慮した性能規定の照査を進める必要がある。

また、解析ではカルシア改質土を剛として考えたが、実際にはひび割れや割裂が生じる可能性がある。これを考慮した検討を行う必要がある。

謝辞

本稿の作成にあたり、関東学院大学の菅野高弘教授には多大なご助力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp6-9, 678-679, 2018.
- 2) 土木工学会：土の強さと地盤の破壊入門，土質工学会入門シリーズ 13, pp.218-219, 2000.