

浚渫粘土を母材料とする人工石材を裏込材として用いた重力式護岸の遠心模型実験

江守 辰哉¹・上野 一彦²・渡部 要一³

¹ 正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: tatsuya.emori@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: kazuhiko.ueno@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 北海道大学 大学院 公共政策学連携研究部(〒060-8628 北海道札幌市北 13 条西 8 丁目)
E-mail: watabe@eng.hokudai.ac.jp

浚渫土砂処分場の容量が逼迫している一方で港湾工事に使用される石材の供給量不足が懸念されており、浚渫土の有効利用技術の1つとして、浚渫土を母材料とする人工石材の製造技術の開発がされている。本論文では、浚渫土に固化材と添加材を混合することで準硬石相当の強度を有する人工石材の配合検討を実施し、高含水比の浚渫土に対して、セメントと少量の生石灰を加えることで、準硬石相当の人工石材が作成可能であることを示した。また、作製した人工石材は軽量でありながら、天然石材と同程度のせん断特性を有するため、護岸の裏込材として使用することで土圧低減効果が期待された。そこで、人工石材の護岸裏込材としての利用を目的として遠心模型実験を実施し、護岸の安定照査に従来法が適用可能であることを示した。

Key Words : dredged clay, artificial rock, quicklime, centrifugal model test, gravity revetment

1. はじめに

ここ数年、国内の港湾整備事業に伴って発生する浚渫土量は年間1,000 万m³ オーダーで推移している。浚渫土の大半は軟弱な粘性土であることが多く、主に土砂処分場に埋立て処分されるが、土砂処分場の容量不足が常態化している。一方で、護岸の築造などに用いられる石材は有限な材料であり、大型の港湾整備プロジェクトでは供給量が不足することが懸念されている。

上記問題の解決が期待できる技術として、浚渫粘土に固化材を添加して粒状体に改良したものを砂礫材として利用する造粒固化技術がある。また、石材の代替利用を目的とした人工石材の製造技術として、高含水比に加水調整した浚渫粘土に高圧脱水固化装置を用いて高強度の固化ブロックを製造する技術¹⁾や低含水比の浚渫粘土を曝気乾燥した後、固化材をスラリーとして添加することで人工石材を製造する技術²⁾などが提案されている。

本研究では、浚渫された浚渫粘土の含水状態に応じて固化材と各種添加材を加えることで準硬石相当の人工石材を製造する技術を提案し、製造した人工石材の材料特性を明らかにするとともに護岸裏込材として代替利用することを目的として、遠心模型実験装置を用いて重力式護岸の変形挙動について調べた結果について報告する。

2. 人工石材の高強度化の方向性

準硬石相当の人工石材を確実かつ効率的に製造するためには、固化処理土の製造直後のワーカビリティを確保するとともに水セメント比を低下させる必要がある。本稿では、以下の2種類の添加材を使用することによって人工石材の上記要求性能の両立を図った。

(1) 生石灰

石灰系土質改良材による改良効果は、短期的な効果として消化吸水反応による含水比低下、中長期的な効果としてポズラン硬化反応による強度増加が挙げられる。特に生石灰は、消化吸水反応と反応時の発熱による蒸発により含水比を大きく低下させることができ、消化吸収反応後の含水比 w は式(1)により求められる³⁾。

$$w = \frac{w_0 / 100 - 0.76 \cdot a / 100}{1 + 1.36 \cdot a / 100} \cdot 100 \quad (1)$$

ここに、 w : 低下後の含水比(%), w_0 : 初期含水比(%)
 a : 土の乾燥重量に対する生石灰添加率(%)

また、初期含水比 $w_0=114\%$ (液性限界の 1.5 倍相当) に加水調整した粘性土に生石灰を添加した際の生石灰添

加率と改質処理土の含水比の関係を図-1に示す。図中の点線は式(1)から求められる低下後の含水比の理論値を示しており、プロットは改質処理土の含水比の実測値を示す。生石灰の添加によって低下した含水比の実測値は算定式によって求められた含水比の理論値と同等の値を示すことから、生石灰による含水比低下量の予測が可能であると言える。

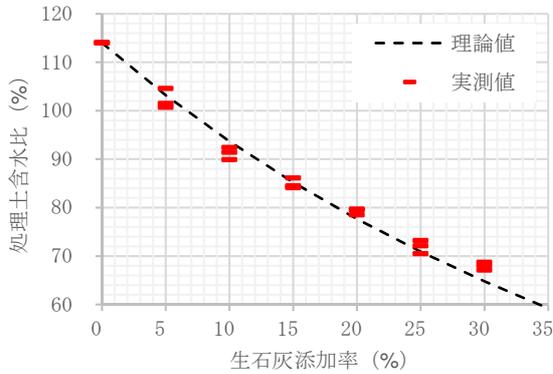


図-1 生石灰添加率と処理土含水比の関係

(2) フライアッシュ (石炭灰)

フライアッシュの主成分であるシリカやアルミナはセメントの水和反応によって生じる水酸化カルシウムと徐々に反応してカルシウムシリケート水和物を生成する。生成されたカルシウムシリケート水和物はセメントの水和生成物と類似した化合物であるので、コンクリートの耐久性や水密性を高めることから強度増加に寄与することが知られている。また、フライアッシュ粒子は微視的には球形をしており、練り混ぜ直後の流動性を高めてワーカビリティの改善に寄与している。上記の性質により、低含水比の浚渫土の固化処理に有効であると考えられた。

3. 配合試験および室内試験

(1) 使用材料

人工石材の配合には、母材料として名古屋港で浚渫された粘性土(以下、名古屋港粘土)、固化材として高炉セメントB種、添加材として生石灰およびフライアッシュを用いた。名古屋港粘土の物理特性を表-1に示す。一般に正規圧密状態にある海成粘土の含水比は、浚渫される際に加水されて液性限界の1.0~1.3倍程度になることが多いことから、本検討においても名古屋港粘土の初期含水比を液性限界の1.0~1.3倍(含水比w=80~100%)に加水・調泥したものを使用して配合試験を実施した。

(2) 実験方法および手順

本検討では、浚渫土とセメントおよび添加材を混合して作成した固化処理土(以下、固化体)と固化体を小型破砕機によって粒径φ=6.7~9.5mmに破砕したもの(以下、破砕材)について、強度・力学特性を調査した。

固化体の強度特性は、「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法(JCASL-01:2006)」に基づいて供試体の作製と材齢28日における一軸圧縮試験を実施した。また、固化体の配合ケースを表-2に示す。Case1はセメントのみの添加、Case2はセメントと生石灰の添加、Case3はセメントとフライアッシュを添加したケースである。

破砕材の力学特性は、材齢28日以上が経過時点で一軸圧縮強さが10MPaを超える配合で作成した破砕材に対して圧密排水三軸圧縮試験(以下、CD試験)を実施することにより評価した。また、天然石材として6号砕石(φ=6.7~9.5mmに調整)についてもCD試験を実施した。

表-1 名古屋港粘土の物理特性

土粒子密度ρs		2.686 Mg/m ³
粒度	砂	14.75 %
	シルト	37.15 %
	粘土	48.10 %
液性限界wL		75.8 %
塑性限界wP		35.3 %
塑性指数Ip		40.5
強熱減量Li		7.5 %

表-2 固化体の配合ケース一覧

	改良仕様	原料土含水比 (%)	セメント添加量 (kg/m ³)	添加材添加率** (%)	水セメント比
Case1-1	セメントのみ	0.8wL	350.0	0.0	1.5
Case1-2	セメントのみ	1.1wL	350.0	0.0	2.0
Case1-3	セメントのみ	1.3wL	300.0	0.0	3.0
Case2-1	セメント+生石灰	1.1wL	300.0	3.0	2.3
Case2-2	セメント+生石灰		350.0	3.0	2.0
Case2-3	セメント+生石灰		400.0	3.0	1.7
Case2-4	セメント+生石灰		300.0	5.0	2.3
Case2-5	セメント+生石灰		350.0	5.0	2.0
Case2-6	セメント+生石灰		400.0	5.0	1.7
Case2-7	セメント+生石灰		300.0	10.0	2.3
Case2-8	セメント+生石灰		350.0	10.0	2.0
Case2-9	セメント+生石灰		400.0	10.0	1.7
Case2-10	セメント+生石灰		1.3wL	200.0	3.0
Case2-11	セメント+生石灰	250.0		3.0	3.0
Case2-12	セメント+生石灰	200.0		5.0	3.7
Case2-13	セメント+生石灰	250.0		5.0	3.0
Case2-14	セメント+生石灰	200.0		10.0	3.7
Case2-15	セメント+生石灰	250.0	10.0	3.0	
Case3-1	セメント+FA	1.1wL	380.0	5.0	1.8
Case3-2	セメント+FA		340.0	15.0	2.0
Case3-3	セメント+FA		427.5	5.0	1.6
Case3-4	セメント+FA		382.5	15.0	1.8
Case3-5	セメント+FA		425.0	15.0	1.6
Case3-6	セメント+FA		285.0	5.0	2.4
Case3-7	セメント+FA		270.0	10.0	2.6

**生石灰添加率は土粒子重量に対する添加率, FA添加率はセメント重量に対する添加率

(3) 実験結果および考察

生石灰を添加して作製した固化体の一軸圧縮試験結果を図-2に示す。生石灰を添加した場合、セメントのみの配合に比べて強度が増加する傾向が確認できた。これは、生石灰の消化吸収反応による見かけ含水比の低下とポズラン硬化反応によるものであると考えられる。特に水固化材比が3.0以上となるような高含水比領域(1.3w_v)においては、生石灰の脱水作用によって強度が大きく改善し、準硬石相当の人工石材が作成可能であることが示された。しかしながら、水固化材比が2.0以下となるような低含水比領域(0.8~1.1w_v)では、強度改善効果が小さいか強度が低下する傾向にある。これは、生石灰の脱水作用によってセメントの水和反応に供する水分が不足し、固化不良を生じた可能性が考えられる。

また、フライアッシュを添加して作製した固化体の一軸圧縮試験結果を図-3に示す。フライアッシュを5%添加したケースは、10~15%程度の強度改善効果を確認した。特に水固化材比が小さい領域での効果が比較的大きい要因として、フライアッシュのボールベアリング効果によって均質な固化体を形成できたことが考えられる。

以上のことから、生石灰は高含水比の浚渫土に添加することで、また、フライアッシュは低含水比の浚渫土に添加することで準硬石相当(qu=10MPa)の強度を有する人工石材の作製に対して、それぞれ効果を発揮することを確認した。

破砕材(D_r=80%充填時)のCD試験⁴⁾における軸ひずみ15%時点でのモールの応力円を図-4に示す。圧縮応力が100~200kPa時点での破壊包絡線から $c=23.8\text{kPa}$, $\phi=34.8^\circ$ という結果が得られた。この値は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁵⁾(以下、港湾基準)で提案されている裏込材の設計用パラメータと同等の値を示しており、通常的设计法が適用可能であることが示唆された。ただし、圧縮応力が200~400kPa時点での破壊包絡線から $c=150.9\text{kPa}$, $\phi=19.9^\circ$ という結果が得られ、拘束圧の増加に伴ってせん断抵抗角が低下するとともに粘着力が増加することが確認された。これは、人工石材のせん断過程で粒子破砕が生じ、見かけの粘着力が発生したことが要因であると考えられる。

ここで、異なる圧縮応力条件下で軸ひずみが15%となるまでせん断させた後の粒度分布を図-5に示す。天然石材はせん断の前後で粒度分布がほとんど変化していないことが確認できた。一方で、人工石材はせん断前の粒径の半分程度である $\phi=4\sim 6\text{mm}$ の粒子が相対的に増加しているが、 $\phi=2\text{mm}$ 以下の粒子はほとんど増加していないことが粒径加積曲線から確認することができた。このことから人工石材の粒子破砕の性質として、端部の「欠け」や「すり減り」ではなく、粒子を二分するような「割裂」に近い状態で人工石材が破砕されていることが示唆された。

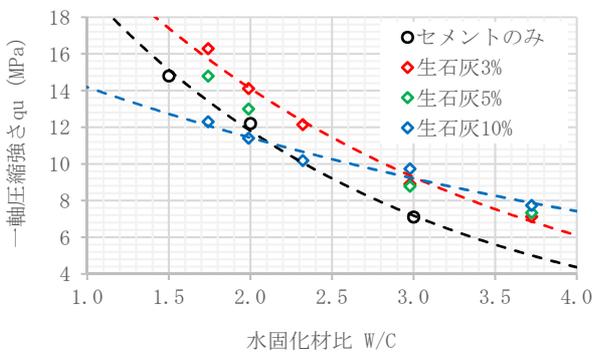


図-2 水固化材比と一軸圧縮強さの関係 (Case2)

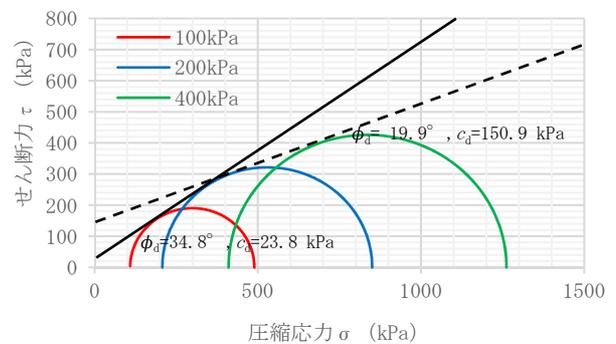


図-4 軸ひずみ15%時点でのモールの応力円

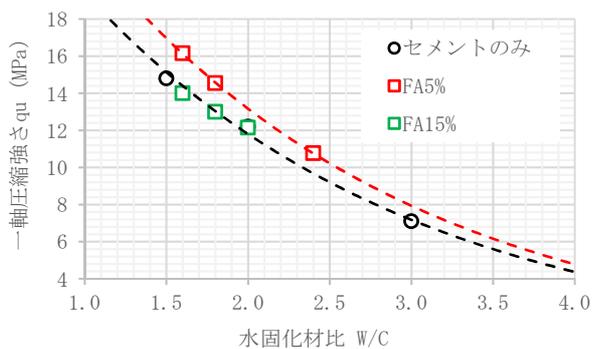


図-3 水固化材比と一軸圧縮強さの関係 (Case3)

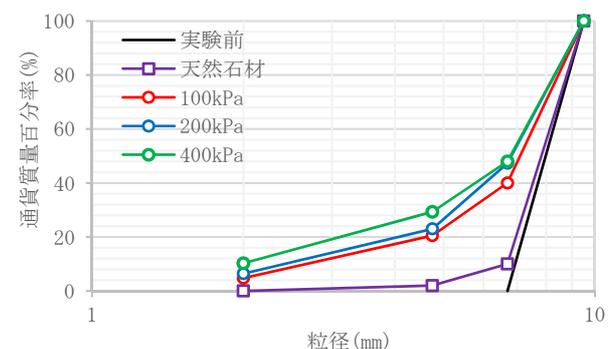


図-5 せん断試験前後の粒度分布

(4) 本研究における人工石材の特徴

添加材を添加して作製した人工石材の材料特性を表-3にまとめる. 本研究における人工石材の特徴として, 天然石材に比べて軽量な材料であるが, 一軸圧縮強さは天然石材(硬石)の1/10程度であること. また, せん断特性は天然石材⁶⁾や港湾基準に記載の設計用パラメータと同程度であるが, 拘束圧が高くなると粒子破砕を生じる恐れがあることが示唆された.

表-3 人工石材の材料特性

	一軸圧縮強さ qu (MPa)	(表乾)比重 Ds (Mg/m ³)	内部摩擦角 φ d (°)	粘着力 cd (kPa)
花崗岩 (規格品)	160	2.61	32.8	68.6
花崗岩 (非規格品)	80	2.65	29.4	58.8
人工石材	10~15	1.66	34.8	23.8
参考) 設計用値	30以上	(2.65)	35.0	20.0

4. 遠心模型実験

(1) 実験諸元および使用材料

遠心模型実験に使用する模型地盤の模式図を図-6に示す. 模型のスケールは1/40, 模型地盤に作用させる遠心加速度を40gとし, 実物換算で高さ10m相当の重力式護岸をモデル化した.

遠心模型実験に使用する石材は, 天然石材として6号砕石, 人工石材として図-7に示すように生石灰を浚渫土の乾燥質量比で3%添加したもの(表2のCase2-1)を使用した. また, 粒径による差が生じないようにそれぞれの石材は, CD試験によりせん断特性を確認した粒径であるφ=6.7~9.5mmとなるよう粒度調整を行った. 重力式護岸(ケーソン)の模型は, モルタルにより作製し, 単位体積重量がγ=20kN/m³となるように調整できるものとした. 支持層は東北珪砂6号を相対密度Dr=90%となるように十分に締固め, 実験中にほとんど沈下を生じない地盤とし, 裏埋め土は同様に東北珪砂6号を空中落下方式にて充填した.

(2) 実験方法および手順

遠心模型実験は, 模型地盤を電動式傾斜台の上に設置し, 40g場に到達した後に1°/minの速度で傾斜させ, 静的な地震時土圧を与えることで護岸の変形挙動を再現した. なお, 実験に際して模型地盤に水位を設けようと傾斜中に地盤内水位が変動することになるため, 水位は設けずに乾燥条件下で実験を実施した. 実験ではケーソン模型の背面に土圧計を設置し, 遠心場における静止土圧および変形時に作用する土圧を計測した. また, ケーソンや裏込材の変形挙動は, 粒子画像流速測定法(以下, PIV)を用いて滑り土塊の面積から評価を行った.

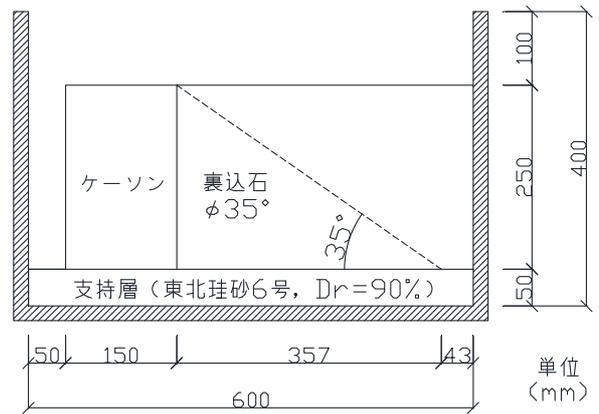


図-6 模型地盤の模式図



図-7 破砕後の人工石材 (左:天然石材, 右:人工石材)

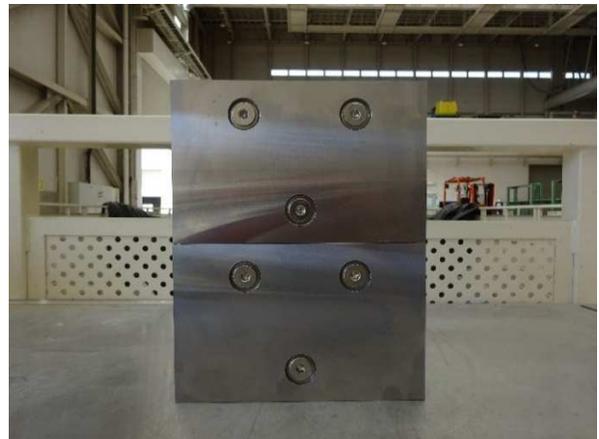


図-8 ケーソン模型

また, 実験ケースの一覧を表-4に示すとともに模式図を図-9に示す. Case1では, 裏込材として天然石材を模擬した6号砕石を全面に使用して比較検討の基準ケースとした. Case2では, Case1と同様にケーソン背面の全面を人工石材で充填し, 人工石材を裏込材として使用した際の土圧低減効果について検証できるようにした. Case3では, ケーソン背面に人工石材を法勾配35°となるように盛り立てた後, その背後地盤を珪砂6号によって充填した. Case3における法勾配は, 人工石材のせん断抵抗角と同程度としており, 理論上は背面の珪砂の影響を受け

ないとされている断面である。Case4 は、一般的な施工断面として、人工石材を法勾配40°で盛り建てて模型地盤を作製した。また、Case2において実験の前後で粒度試験を実施し、粒子破碎の有無を確認した。

表-4 実験ケース一覧

	裏込材料	裏込勾配	埋土材料
Case1	6号砕石	-	6号砕石
Case2	人工石材	-	人工石材
Case3	人工石材	35°	珪砂6号
Case4	人工石材	40°	珪砂6号

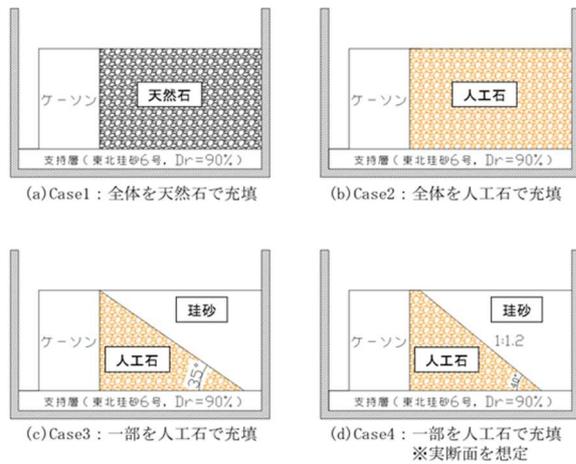


図-9 実験ケース模式図

(3) 実験結果および考察

各実験ケースにおける護岸変形時の断面写真と PIV による解析結果を図-10 に示す。また、護岸変形時の傾斜角 θ と傾斜角から算出される換算水平震度 k_h の一覧を表-5 にまとめる。計測土圧については、石材のロッキング等の影響により正しく計測できていないことが懸念されたため、Case1 の結果を基準とする相対的な評価とした。

Case1 においてケーソンは転倒破壊の挙動を示しており、破壊時の傾斜角から算出される換算水平震度は $k_h=0.249$ であった。これは設計水平震度の標準値と比較しても妥当な結果であるといえる。Case2 も Case1 と同様にケーソンは転倒破壊の挙動を示している。また、静止土圧は天然石材を使用した Case1 の 67.9%であり、人工石材を使用したことによる土圧低減効果も示された。また、Case2 における破壊時の傾斜角から算出される換算水平震度は $k_h=0.277$ であり、Case1 よりも大きい値を示し、安定性が向上することが示唆された。Case3 や Case4 も同様に転倒破壊の挙動を示した。Case3 と Case4 では換算水平震度がそれぞれ $k_h=0.268$ と 0.266 であり、Case2 と比べて若干低下した。これは、人工石材のせん断抵抗角が $\phi=34.8^\circ$ であることから背面の珪砂の影響を受けたものだと考えられる。人工石材を護岸裏込材として使用した場合、天然石材を使用したケースに比べると安定性が向上している結果が得られた。ただし、実務上は使用する箇所で作用する応力によって粒子破碎も懸念されるので、天然石材と同程度の材料として取り扱うの

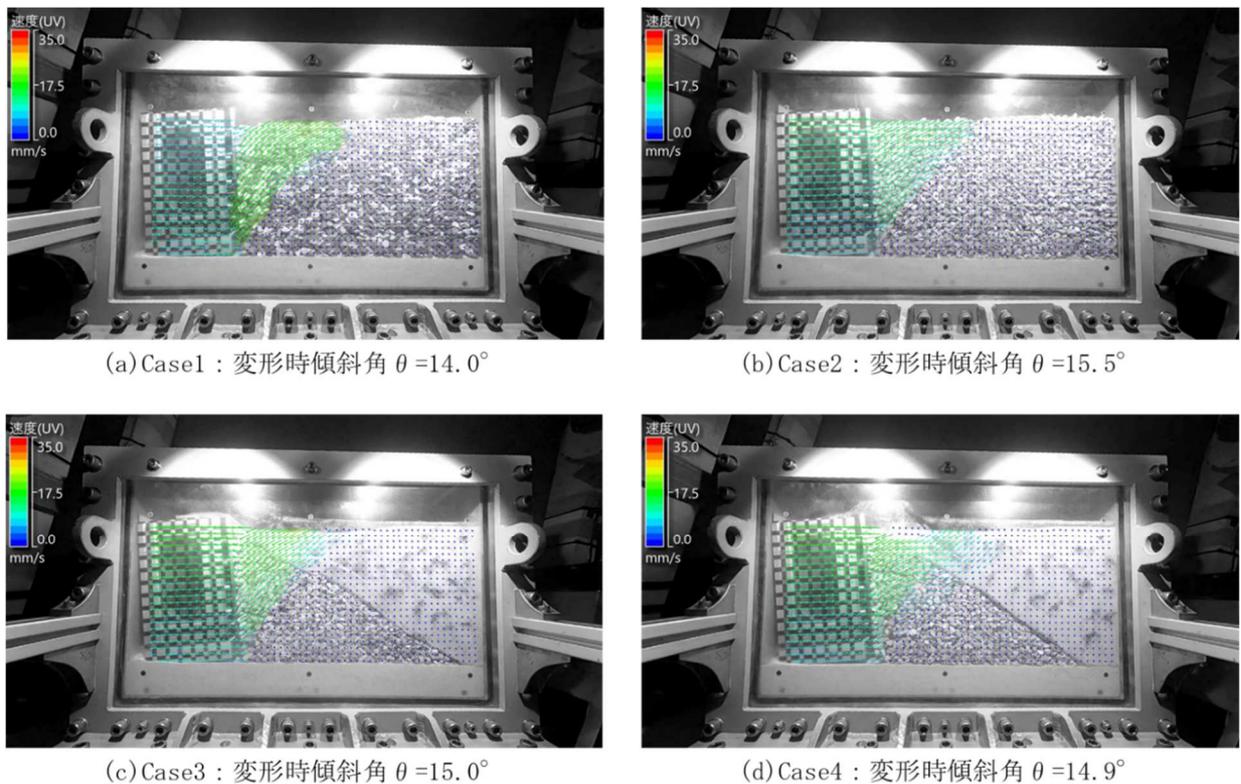


図-10 変形時の断面写真

が妥当であると考えられる。また、ケーソンや裏込材の変形挙動から天然石材と同様に震度法による照査が適用可能であることが示唆された。Case2 における実験前後の粒径分布を図-11 に示す。粒度試験結果から実験中に作用する応力レベルでは、粒子端部の欠けなどは生じているが、明確な粒子破碎の傾向は確認されなかった。

表-5 変形時の傾斜角および換算水平震度

	変形時傾斜角 θ	換算水平震度 k_h
Case1	14.0°	0.249
Case2	15.5°	0.277
Case3	15.0°	0.268
Case4	14.9°	0.266

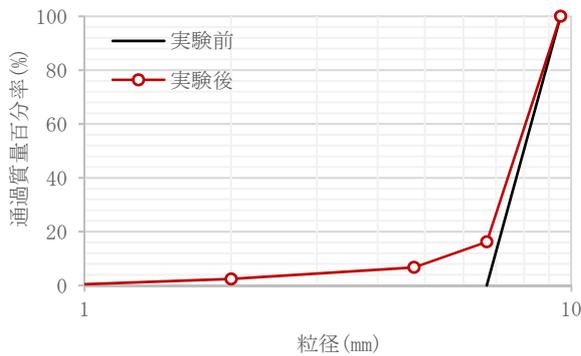


図-11 遠心模型実験前後の粒度分布

5. 結論

名古屋港粘土を母材料とした人工石材の製造実験および材料特性の確認。また、人工石材を裏込材として使用したときの重力式護岸の変形挙動を調査した。一連の実験から得られた結論は次の通りである。

- ① 一般的な含水比 ($w=1.0\sim 1.3w_L$) の浚渫土から人工石材を製造するためには、セメントに加えて生石灰を浚渫土の乾燥質量の3%程度加えることで、準硬石相当の強度を確保することができる。
- ② 浚渫土が高含水比となる場合は、生石灰の添加量を調整することで余剰水を速やかに脱水することができ、脱水後の含水比は式(1)から推定することができる。
- ③ 浚渫土を母材料として製造した人工石材の比重は、天然石材の比重と比べて軽量であるが、拘束圧が高くなると粒子破碎を生じる可能性があるため、人工石材を使用する場合は、施工箇所によって作用する応力レベルに応じた強度定数を設定する必要がある。
- ④ 人工石材を重力式護岸の裏込材として用いた場合、人工石材が軽量材料であることから土圧低減効果を期待することができ、護岸の安定性の照査には従来法(震度法)を適用することができる。

参考文献

- 1) 豊里亮喜ら：高圧脱水固化処理した関門航路浚渫土の強度特性, 土木学会年次学術講演会公演概要集, Vol.72, III-417, 2017.
- 2) 新舎博ら：浚渫粘土を原料とした高強度固化処理ブロックの製造実験, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.75, No.1, 62-75, 2019.
- 3) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル (第7版), p.17, 2018.
- 4) 和泉大志ら：浚渫土を用いた人工石材のせん断特性に関する基礎的研究, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第60号, 2019.
- 5) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018.
- 6) 水上純一ら：マウンド用捨石材の大型三軸試験による強度特性, 港湾技研資料, No.699, 1991.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

CENTRIFUGAL MODEL TESTS OF GRAVITY REVETMENT USING ARTIFICIAL ROCK MADE OF DREDGED CLAY AS BACKFILL MATERIAL

Tatsuya EMORI, Kazuhiko UENO, and Yoichi WATABE

In recent years, there has been a chronic insufficient capacity of dredged material disposal sites. On the other hand, there is concern about the shortage of the supply of rock used for port construction. As one of the techniques to effectively utilize dredged soil, a manufacturing technique of artificial rock material using dredged soil as a base material has been developed. In this paper, we investigated the composition of artificial rock, which has the strength equivalent to that of semi-hard rock, by mixing cement and additives with dredged soil. As a result, it was shown that artificial rock equivalent to semi-hard rock can be produced by adding cement and a small amount of quicklime to dredged soil with a high water content. In addition, the artificial rock material produced has the similar shear characteristics as natural rock material and is a very lightweight material, so it is expected to reduce earth pressure by using it as a backfill material for revetments. Therefore, a series of centrifuge model test was conducted with the aim of using the artificial rock as a backfill material for revetment. The test results confirm that the conventional method (seismic coefficient method) of stability analysis can be applied.