

京浜港ドックにおける重力式係船岸増深工法の実用化に向けた実証試験

小笠原 哲也¹・和田 眞郷²・野口 孝俊³・菅 崇⁴・

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: tetsuya.ogasawara@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 東洋建設(株)土木事業本部土木技術部(〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-24)
E-mail: wada-masato@toyo-const.co.jp

³ 正会員 国土交通省 関東地方整備局 港湾空港部(〒231-8436 横浜市中区北仲通 5-57)

⁴ 国土交通省 関東地方整備局 港湾空港部(〒231-8436 横浜市中区北仲通 5-57)

船舶の大型化に対して既存係船岸を増深する検討事例が増加している。そのため捨石マウンドの一部を注入・固化することで、法線位置を変更せずに重力式係船岸の増深を可能とする工法が水谷ら¹⁾により開発された。しかし当該工法は注入・固化に用いる可塑状グラウトの2次元注入実験を行った段階であり、実施工上の課題は未検討であった。そこで本研究では、容易に注排水できる京浜港ドックにて実大規模の捨石マウンドを構築し、水中にて捨石内へのグラウト注入や潜水土による捨石掘削など増深手順を模擬した実証試験を行い、当該工法が施工可能であることを確認した。その後ドック内から排水して増深時の捨石斜面の状況を確認し、さらに固結していない捨石を撤去して改良体出来形を陸上計測して、実用化に向けた研究成果が得られたので報告する。

Key Words : caisson-type quay wall, rubble mound, ground improvement, water-depth enlargement

1. はじめに

コンテナ船やクルーズ船の大型化は近年の国際的な動向であり、我が国の港湾においても、競争力維持・向上のため、その対応が急がれている。一方で施設の戦略的な維持管理や既存施設の有効活用を図ることが求められており、船舶の大型化に対しても既設係船岸を増深する工法を検討する事例が増えている。そのような背景から、既設重力式係船岸を増深できる新工法が水谷ら¹⁾により研究開発された(図-1参照)。しかし、当該工法は半地下土槽において、最大粒径約200 mmの捨石に対して可塑状グラウトの注入を行い2次元的な充填性を確認した段階であり、可塑状グラウトの3次元的な広がりに対する検証や、実施工上の課題は未検討であった。そこで、本研究では実施工で使用する捨石を用いて実大規模の実証試験を行い、実用化に向けた検証を行った。

2. 新しい増深工法の概要

従来、既設重力式係船岸を増深する場合は、ケーソンの安定を確保しつつ増深することが難しく、岸壁前面の

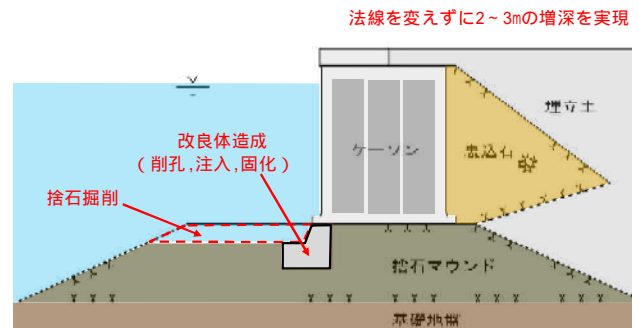


図-1 新しい増深工法の概要図

海面に新たな棧橋を設けることや、矢板式係船岸を構築するなど構造形式を変更して増深される場合が多い²⁾。しかしながら、これらの増深方法では岸壁の法線位置を変更せざるを得ず、既設岸壁の前面海域に十分な余地がない場合には対応が難しい。

新しい増深工法は、既存の重力式係船岸を対象として、捨石マウンドの一部を注入・固化し掘削することで法線位置を変更せずに2～3 m 増深することができる工法である(図-1 参照)。当該工法の施工手順は、重力式係船岸の増深工法に関する施工の手引き(案)³⁾としてまとめられており、図-2 に施工フロー、図-3 に可塑状グラウト材注入・固化状況図、図-4 に前面側捨石の掘削状況図を示す。

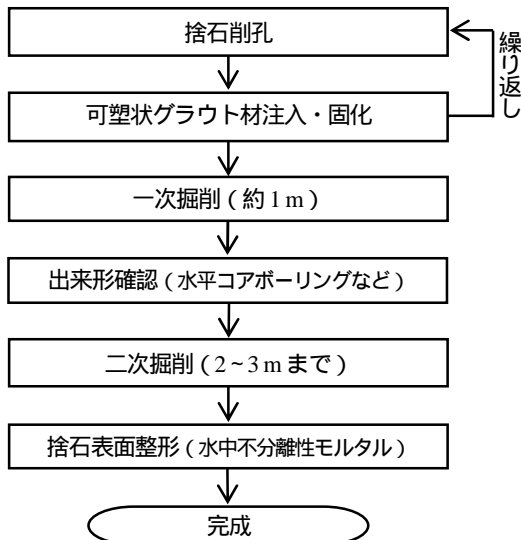


図-2 新しい増深工法の施工フロー

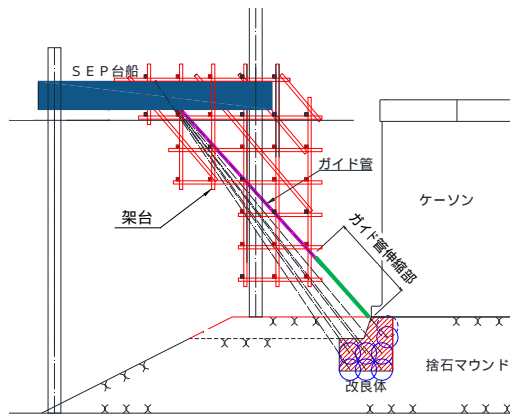
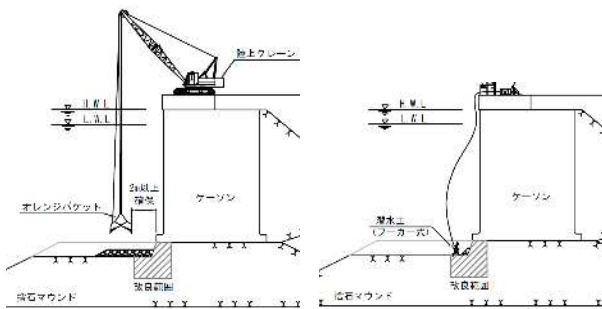


図-3 可塑状グラウト材注入・固化状況図



(a) オレンジバケットによる捨石掘削状況図 (b) 潜水士による捨石掘削状況図

図-4 前面側捨石掘削状況図

図-3のように、係船岸の前面などから捨石を削孔して注入管を挿入し、陸上で製造した可塑状グラウトをポンプ圧送して捨石内に注入する。注入1回の改良体は球状で直径は2m~2.5m程度であり、削孔~注入を繰り返して所定範囲の改良体を構築する。改良体構築後、一次掘削として捨石前面を約1m掘削し水中コアボーリングなどを行って改良体の充填状況と充填範囲を検証する。次に、二次掘削として所定の深さ(2~3m程度)まで捨石を掘削する。最後に係船岸前趾からの捨石法面前面側

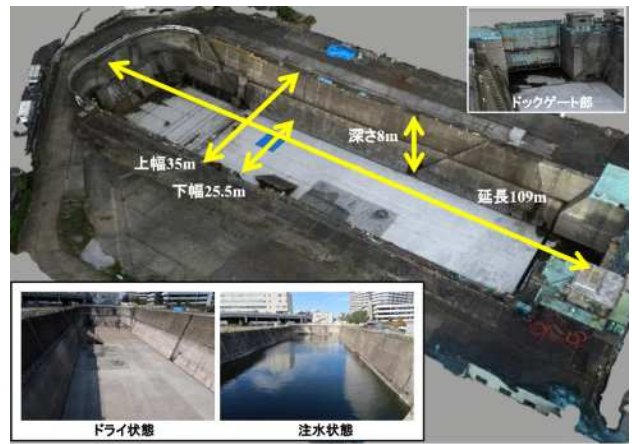


図-5 京浜港ドックの概要図

に型枠を組み立てて水中不分離性モルタルを注入し、表面保護を兼ねた捨石法面の表面整形を行う。なお図-4(a) オレンジバケットによる捨石掘削は、バケットにより係船岸を傷つけないように係船岸から離れた箇所を掘削すると想定されており、(b)潜水士による捨石掘削は、係船岸近傍の掘削と想定されている。これらの施工方法は、増深工法としての実績はないが、削孔、注入、および捨石掘削に関して従来工法で行われているものを参考に設定されている。

3. 実証試験の概要

(1) 京浜港ドックについて

京浜港ドックは、1926年(大正15年)に建設された施設であり、国土交通省関東地方整備局が所有する設備である(図-5参照)。関東大震災後の横浜港の発展に大きく寄与し、当時の大水深岸壁建設における中心的役割を果たした。

2015年度より、実物大の模型実験が可能な実証試験フィールドとして、海洋・港湾技術に関わる新技術の早期実用化に向けて官民共同で研究を推進しており、90年を経過してもなお活躍している施設である。延長109m、下幅25.5m、深さ8m(実験での水深5.5m)と非常に大きく、波浪の影響を受けずに実海域と同様の環境で実大規模の実験が可能である。またドック内への注排水が可能であるため、水中施工した結果を、排水後に陸上で目視確認できることが大きなメリットであり、本研究においても捨石掘削や改良体の出来形を目視確認でき、非常に有益であった。なお、京浜港ドックは2017年9月に土木学会選奨の土木遺産に認定された。

(2) 実証試験の概要

水谷らによる2次元注入実験¹⁾では、最大粒径200mm程度の石に対して15打フロー値168~186mmの可塑状グラウトが適切であり、2.5m程度の円盤形で石の空



写真-1 使用した捨石(30~200kg/個,小豆島産の花崗岩)

表-1 実証試験の目的

課題	検証内容
実大規模の捨石マウンドに対して限定注入・固化が可能か	実際に使用されている 30~200 kg/個の捨石を使用した捨石マウンドに対して可塑状グラウトを注入・固化して,改良体の出来形を検証する
施工の手引に記載されているような施工方法が可能か	実大規模の捨石マウンドに対して,施工の手引に記載された施工方法が可能か模擬して検証する
改良体の圧縮強度はどの程度か	予備充填実験と実大規模実験の改良体をコア抜きして一軸圧縮強度試験を実施して強度を把握し必要強度と比較検証する
可塑状グラウトの注入管理方法	予備充填実験と実大規模実験による可塑状グラウトの注入実績より注入流量,注入圧力の管理値を把握する
可塑状グラウトの注入中に周辺海域へのリークや濁度, pHの変化がないか	実大規模の捨石マウンドへ可塑状グラウトを注入中に,周囲の海域中の濁度, pHを測定して変化がないか検証する

隙内に充填可能であった。

本研究では,実施工で使用する捨石 30~200 kg/個(小豆島産の花崗岩:写真-1 参照)を対象にしたので,最大・最小粒径や捨石間の空隙の大きさが異なり,実大規模実験を行うにあたって可塑状グラウトの適切なフレッシュ性を決定する必要があると考えた。そこで本研究では,まず陸上ヤードで予備充填実験を行って可塑状グラウトの配合を決定し,その結果を受けてドック内での実大規模実験を実施するという2段階で行うこととした。

実証試験の目的を表-1に示す。当該工法では,捨石マウンドの一部を限定的に改良して浮き基礎タイプの改良体を構築するという特徴があるので,実大規模の捨石マウンドに対して限定注入が可能かどうかを検証すること,また施工の手引き(案)³⁾で想定している増深手順を模擬的に実施して,施工可能かを検証することが主要な検証項目である。

a) 予備充填実験の概要

予備充填実験は,京浜港ドックの陸上ヤードで実施した。図-6に示すように, 3 m×高さ 3 mの円形鋼製型枠を2つ(型枠 No.1, No.2)作製して型枠内に捨石を投入した。捨石投入時にあらかじめグラウトの注入管を鉛直に挿入しておき,注入管の先端は高さ中央の 1.5 mの位置とした。また実施工では海水中での注入になるため,京浜港ドック付近の海水を採取して型枠内に注水した。

捨石の投入時に捨石重量を測定し,また海水の注入量を測定して両者の結果から型枠内の空隙率を測定した。

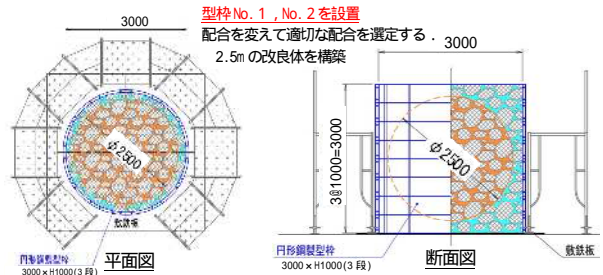


図-6 予備充填実験の概要図

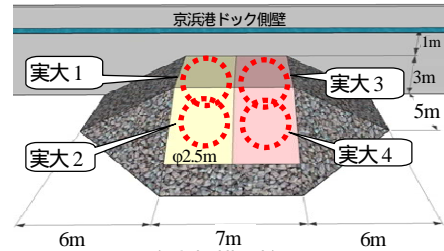


図-7 実大規模の捨石マウンド

捨石天端に蓋をしてから,型枠2つに対してフレッシュ性が異なる可塑状グラウトをそれぞれ注入した。養生後,型枠を脱型して充填範囲を比較し良好な方を実大規模実験に使用する配合とした。また水平方向に改良体をコア抜きし,充填状況の観察と圧縮強度試験を実施した。また型枠 No.1のみワイヤーソー切断し断面を観察した。

b) 実大規模実験の概要

京浜港ドック内に図-7に示すような実大規模の捨石マウンドを構築した。捨石マウンド天端の法線方向長さ 7 m,天端奥行き長さ 5 m,捨石マウンド厚さ 3 mである。捨石法面は一般的な 1:2の傾斜とした。

実大規模実験において,増深工法の検証のために模擬的に施工する項目は,図-2における可塑状グラウトの注入・固化,一次掘削,出来形確認(水中での水平コアボーリングなど),および二次掘削とした。捨石削孔については,捨石マウンド下にある置換砂の液状化対策工事において,ロータリーパーカッション工法により施工実績がある。そのため本研究では,実施工可能と考えて削孔は行わず,図-8(a)のように捨石マウンド構築中にあらかじめ注入管を設置しておいた。また,捨石法面の表面整形については,型枠を組み立ててから水中不分離性モルタルを注入するもので,一般的工法のため本研究では検証しなかった。

注入にあたって,実施工ではケーソンが捨石天端にあり注入圧に抵抗するが,本研究では捨石天端に敷鉄板を重ねて敷き,水中で上載圧 1.2 t/m²としてグラウト注入圧に抵抗できるようにした。ドライで捨石マウンド構築後,ドック内に注水して実施工と同様に水中の施工環境を実現した。次に予備充填実験で配合決定した可塑状グラウトを,実施工と同様にポンプ圧送して水中の捨石マウンド内に注入し,実大1~4の4球の改良体を構築した(図-7参照)。注入後,図-8(b)のように潜水土により捨石前面側を約 1 mの深さで一次掘削して施工性を検証した。

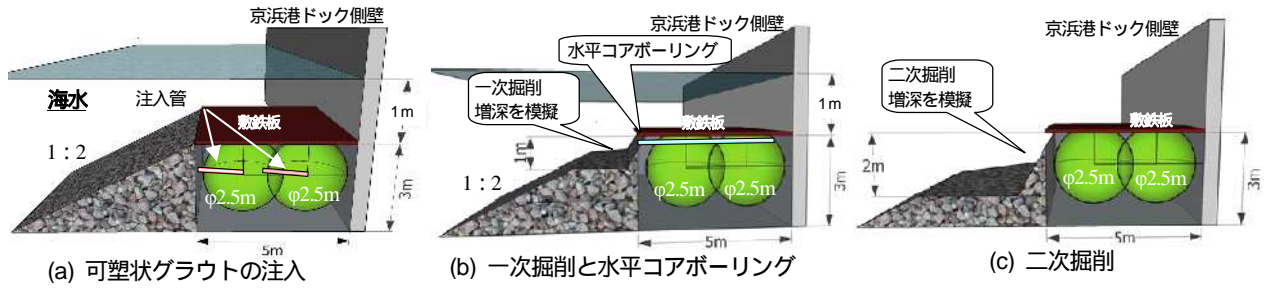


図-8 実大規模実験の施工手順概要図

次に水中にて潜水土により水平コアボーリングを行って可塑状グラウトの注入状況を確認した。図-8(c)の二次掘削は、実際には水中施工であるが、ドック内排水後にバックホウにより掘削して2m増深可能か検証した。一次掘削にて潜水土による係船岸近傍の掘削は検証できているので、一次掘削の出来形を陸上で確認したいことと、ドライでは浮力が作用せず、斜面の安定に関しては危険側になると考えたためである。

二次掘削後、改良体を鉛直にコア抜きしてグラウト充填状況と改良体の圧縮強度を確認した。その後、改良体周囲の固結していない捨石を除去し、改良体出来形を目視確認およびレーザースキャンで確認した。

4. 実証試験の結果

(1) 予備充填実験の結果

a) 捨石空隙率の測定結果

海水の注水量による捨石の空隙率測定結果を表-2に示す。捨石投入時の緩衝材として砕石を厚さ10cm投入していたことや雨水が多少混入したため、型枠下部に設置した排水口の下端高さ10cmまであらかじめ水を入れたあとに注水した量で算定した。なお、捨石重量と型枠容積から算定した捨石空隙率も39.5%とほぼ合致した。これらの算定結果から捨石空隙率を40%とした。

したがって2.5mの球状の改良体を構築するときのグラウト注入量は、2.5mの球の容積8.181m³に対して空隙率40%を乗じて、約3.3m³とした。

b) 可塑状グラウトの配合と注入方法

予備充填実験の配合を表-3に示す。可塑剤Aの量を少量変えてフレッシュ性状を変化させた。写真-2に示すように配合No.1が少し固めで、15回振動させた後の15打フロー値は133mm×134mmであり、配合No.2が少し軟らかめで15打フロー値は154mm×154mmであった。型枠No.1に配合No.1を注入し、型枠No.2に配合No.2を注入した。注入は、あらかじめ鉛直に挿入しておいた注入管から行った。注入圧力0.1MPa程度以上、最大圧力0.2MPa程度を基本とし、50リットル/minの注入流量で管理し、注入量約3.3m³で注入ストップとした。

表-2 捨石空隙率の測定結果

	型枠No.1	型枠No.2
投入した水の量(m ³)	8.00	8.16
事前に投入した水の高さ(m)	0.1	0.1
型枠の容積(m ³) (直径3m×高さ2.9m)	20.499	20.499
空隙率 = ÷	0.390	0.398

表-3 可塑状グラウトの配合

型枠 および 配合No.	基材			可塑材				圧縮強度 N/mm ²
	セメント kg	水 kg	減水剤 kg	可塑剤A (凝集剤) kg	可塑剤B (促進剤) kg	可塑剤C (不分離剤) kg	水 kg	
No.1	1212	485	6.06	0.61	6.06	2.50	121	24以上
No.2				0.48				

静置フロー(mm)	15打フロー(mm)	静置フロー(mm)	15打フロー(mm)
95×96	133×134	100×100	154×154



写真-2 可塑状グラウトのフレッシュ性状

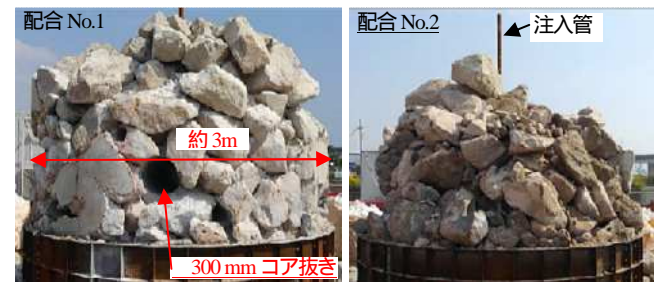


写真-3 可塑状グラウトの充填出来形(予備充填実験)



写真-4 可塑状グラウトの充填範囲(予備充填実験:配合No.1)

c) 可塑状グラウトの充填範囲結果

予備充填実験の配合No.1、No.2の充填範囲結果を写真-3に示す。写真-3でわかるように、配合No.1の充填状況が良好で概ね球に近い出来形であった。水谷らの2次元充填実験での15打フロー値168~186mmと比較して、固めのフレッシュ性状を示す配合が良好であったが、水谷らの実験で使用した最大粒径200mmの石と比較して、本研究の捨石粒径が大きく、捨石間空隙が大きいため原因と考えられる。

d) 捨石間空隙への充填状況

300mmでコア抜きした供試体を写真-4に示す。フェ



写真-5 配合 No.1 のワイヤーソーによる切断面

表-4 コアによる圧縮強度試験結果

コア直径	供試体No.	1-1-1	1-1-2	1-1-3	1-1-4	1-2-1	1-2-2	1-2-3
116	圧縮強度(N/mm ²)	19.1	73.6	30.8	57.8	37.4	16.9	22.2
300	供試体No.	300-1	300-2	300-3	300-4			
300	圧縮強度(N/mm ²)	7.33	9.16	9.88	22.2			



写真-6 300-1 供試体の破壊状況

ノールフタレイン溶液を噴霧して、グラウトを赤く着色した。写真-4のように、コア端部近くまでグラウトが観察され捨石間に隙間なくグラウトが十分充填されており、また目視では付着性も良好に見えた。写真-5に配合 No.1 改良体の中央部をワイヤーソーで鉛直に切断した断面を示す。写真-5のように、捨石間の空隙に可塑状グラウトは十分充填されていた。なお、改良体下部に一部充填されていない箇所があるが、横方向にグラウトが卓越して注入され、先にグラウトが鋼製型枠に到達したために海水がぬけづらくなったためではないかと考えられる。後述する実大規模実験では、型枠による閉塞がないため改良体下部の未充填部は観察されなかった。

e) コア供試体による圧縮強度試験結果

116 mm と 300 mm のコアによる圧縮強度試験結果を表-4 に示す。300 mm のコアによる圧縮強度において最小値 7.33 N/mm² であり、水谷ら¹⁾の試設計で必要強度とされた 2.41 N/mm² の 3 倍以上の強度を発現し、所要の性能を満足した。写真-6 のように捨石とグラウトの界面で破壊しており、グラウト単味の圧縮強度 24 N/mm² および捨石の圧縮強度より低い値となった。なお 300-4 の供試体で強度が大きくなった理由は、コア高さ 300 mm と低くしか採取できず、また側面の一方が上から下までほぼ捨石であり、その捨石部分で荷重負担してしまったためと考えられる。また 116 mm の供試体では、供試体に比して捨石の大きさが大きいために、各供試体で捨石とグラウトの比率が大きくばらつき、捨石とグラウト界面での破壊とならないことが多くあり、得られた圧縮強度のばらつきが大きくなったと考えられる。

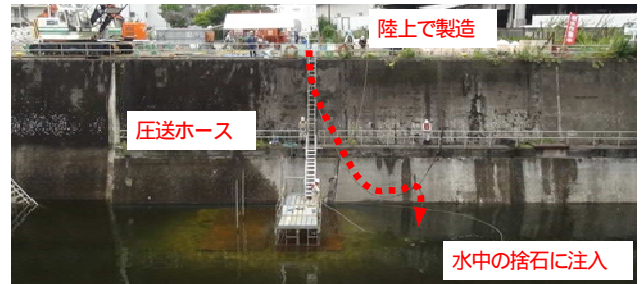


写真-7 実大規模実験の可塑状グラウト注入状況

(2) 実大規模実験の結果

a) 可塑状グラウトの配合と注入方法

捨石重量と捨石出来形より求めた容積から算定した捨石の空隙率は、40.6 % であった。このため実大規模実験でも捨石空隙率は 40 % とした。なお捨石容積は、光波測距器とレベルによる法肩・法尻の測量結果から平均断面法によって容積算定したものである。

実大規模実験に使用する可塑状グラウトは、予備充填実験の結果から表-3 の配合 No.1 とした。注入中に 15 打フロ値を 6 回測定したが、129 ~ 141 mm であった。

注入中の状況を写真-7 に示す。陸上で製造した可塑状グラウトを水中までホースでポンプ圧送して、接続した注入管から捨石マウンド内に注入した。注入圧力は圧送圧力+0.2 Mpa 程度、注入流量 50 リットル/min で管理し、注入量約 3.3m³ で各改良体の注入をストップした。

なお、改良体の実大 1 については、機械トラブルにより充填が不調であったため、本研究の 15 打フロ値や品質・出来形については実大 2 ~ 4 について論じている。

b) 増深工法の施工検証

可塑状グラウト注入後、潜水士により一次掘削を行い、1 m の増深可能か模擬施工を行った。捨石重量が最大で 200 kg と重いため、潜水士により捨石を順次深い側に落としていく方法で行った。一次掘削後、水中にて水平コアボーリング (116 mm) 約 5m を行い充填状況の確認が可能かどうかを検証した。その後排水して一次掘削の出来形確認後、バックホウにより掘削して 2 m 増深を模擬した。水中コアボーリングの状況と一次掘削、二次掘削の施工後の状況を写真-8 に示す。実海域と同様の環境で一連の施工方法は可能であり、捨石を固結した効果で捨石斜面は自立に近い状態で安定し、当該工法が実大規模で可能であることを示した。また、固結していない捨石を水中で潜水士が取り除いて斜面を構築でき、構造物の近傍であっても掘削箇所と改良体の範囲を工夫することで、構造物を傷つけず掘削可能であることを示した。

c) 改良体の出来形

写真-9 および図-9 のように改良体出来形は想定していた 2.5m 程度であり、ほぼ想定どおりであった。ただし、改良体下部に固結状況の異なるものが若干確認されており、可塑状グラウトが若干分離したものと考えられ、



写真-8 増深工法の施工手順検証



写真-9 改良体の出来形

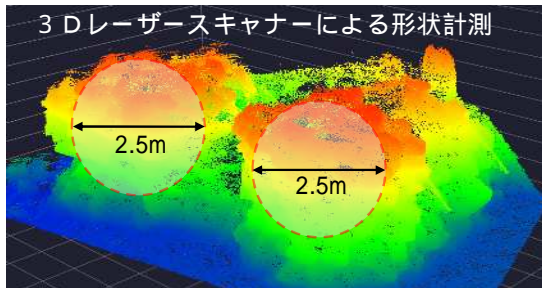


図-9 3D レーザースキャナーによる形状計測結果

表-5 改良体の出来形結果からの注入量算定

	最小半径 r	実施改良体体積 $=4/3\pi r^3$	想定注入グラウト量 $= \times 0.4$	実注入量	想定量に対する注入率
実大2	1.217m	7.550m ³	3.020m ³	3.30m ³	0.92
実大4	1.193m	7.112m ³	2.845m ³	3.30m ³	0.86

実大3は改良体内側に人が入るには危険で十分な測量ができていない
×0.4の0.4は捨石の空隙率

2.5m の球をつくる上で注入量を割増す必要があると考えられた。そこで図-9の点群データより、グラウトがある実質の改良体の径を円中心から外形の最小値と安全側に仮定して、グラウトの注入量を表-5のように算定した。これにより1球で注入する場合、予定数量の0.86~0.92の改良体となっており、約1.2倍に割増して施工することが望ましいと考えられる。

また 116mmのコア抜きし圧縮強度試験を行ったところ、14.0~41.5N/mm²のように予備充填実験と同様にばらついたが、2.41N/mm²より大きな値を示した。

d) 周辺海域への影響

注入中に周辺海域の pH と濁度を測定した。注入管を挿入している箇所と、そこから水平に約5m離れた箇所と、そこから水面付近、中間部、底部を測定した。注入管挿入部の pH は事前 7.17 から完了後 7.01 であり、濁度は事前 8.25 から完了後 8.95 とほぼ変化はなく周辺海域への影響は認められなかった。注入管から 5m 離れた箇所も同様であった。

5. おわりに

実証試験により表-1 に示す項目を検証し、当該工法が実施できることを示した。今後は、本研究の結果を踏まえて、充填範囲の確認など品質管理方法および施工管理方法について検討を行う予定である。

謝辞：研究の実施にあたり、関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所、京浜港湾事務所、(国研)港湾空港技術研究所、(一社)日本埋立浚渫協会ならびに関係各位より多大なご支援・ご助言を賜った。関係各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) 水谷崇亮, 森川嘉之, 渡部要一, 菊池喜昭, 合田和哉, 加藤繁幸, 小笠原哲也: 重力式係船岸の新しい増深工法の開発, 港湾空港技術研究所資料 No1277, 2013.12.
- 2) 日本海洋開発建設協会: 海洋構造物の補修・補強・更新技術, 2008.
- 3) (一社)日本埋立浚渫協会, (国研)海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所: 重力式係船岸の増深工法に関する施工の手引き(案), 2016.10.

(2018.2.8 受付)

THE DEMONSTRATION EXPERIMENT OF THE CONSTRUCTION METHOD FOR DEEPENING CAISSON-TYPE QUAY WALLS IN KEIHIN HARBOR DOCK

Tetsuya OGASAWARA, Masato WADA, Takatoshi NOGUCHI and Takashi SUGA

Mizutani and others have developed the new method of construction which make the caisson-type quay walls deep. But a problem on the actual construction wasn't considered by this method. So we built a stone mound with the actual size in Keihin harbor dock and did the demonstration experiment which imitated a construction process. We confirmed that this method of construction can be built by a demonstration experiment.