

重力式係船岸増深のための基礎構造に関する研究

一般社団法人 日本埋立浚渫協会 共同研究 WG

独立行政法人港湾空港技術研究所(以下、港空研という)と一般社団法人日本埋立浚渫協会(以下、埋浚という)は、平成21年度から3年半にわたり重力式係船岸増深のための基礎構造に関する共同研究を行った。主な研究テーマは、既存の重力式係船岸に対して、捨石マウンドの一部を改良・固化し掘削することで法線位置を変更せずに数メートルの増深を可能とする工法(図-1)の検討である。本誌において中間報告¹⁾を行ったが、その後、設計・施工法の検討を進め、あわせて大型土槽において実物に近い捨石へ注入実験を行い、実用化に向けた研究成果が得られたので報告するものである。

1. はじめに

輸送船舶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、競争力維持のため、その対応が急がれている。一方、社会基盤全般において、既存施設の戦略的な維持管理や有効活用が求められており、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。

そのような状況を踏まえ、港空研(地盤研究領域の土質研究チーム、地盤改良研究チーム、基礎工研究チーム)と埋浚(技術委員会)は共同で、新しい増深工法の研究を遂行してきた。研究内容は、図-1に示すような既設重力式係船岸の捨石マウンドの一部を改良・固化してから、マウンドを数メートル掘り下げることで増深する工法の開発である。研究期間は、平成21年12月～平成25年5月の3年半にわたり、東京理科大学の菊池喜昭教授には、港空研在籍時からご指導を受け、その後は専門委員として参加いただいた。

詳細な検討内容については、港湾空港技術研究所資料²⁾及び埋浚報告書³⁾に詳細を示してあるが、本稿では、その検討内容を概説する。

2. 試設計算

捨石マウンドの一部を改良・固化し重力式係船岸を増深する方法の可否を判断する手がかりとして、図-1のような断面(増深前の捨石マウンド高-16.1m)を設定して、図-2の検討フローにより静的安定計算に基づく試設計を行った。静的安定計算には従来からの一般的な手法を用いた。

増深により抵抗側重量となる捨石マウンドの一部を撤去するため、堤体の円弧すべり安全率は減少する。その結果必要安全率を満足しない場合は、増深のため

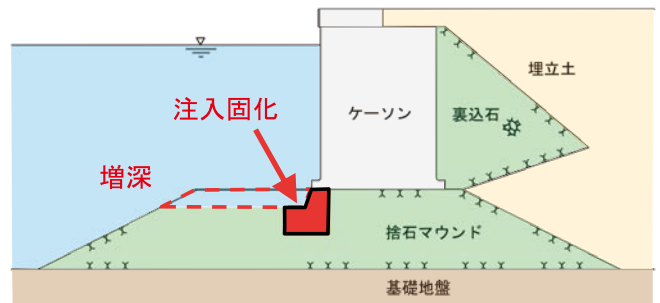


図-1 本工法のイメージ図

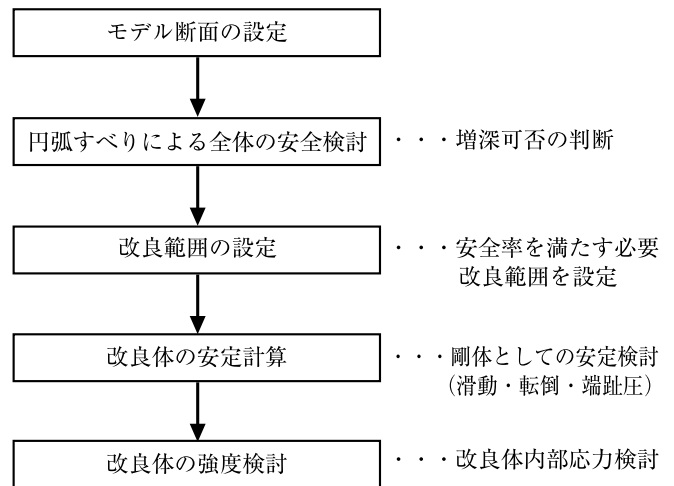


図-2 試設計検討フロー

に別途対策が必要となるが、本モデル断面では必要安全率1.2以上を確保できることを確認した。

次に、ケーソン前趾下部でほぼ直立となる捨石の主働崩壊に対する安定性と、ケーソン底面反力に対して改良体の支持力を確保する(偏心傾斜荷重による改良体内を通るすべりの検討)ために、ケーソン直下部で改良を要する最小幅を2mと算出した。その幅に対して改良体の深さを変え、ケーソン底面の偏心傾斜荷重に対するピシヨップ法による安定計算を行い、改良体

の必要深さを5mと設定した。

さらに、後述の模型振動実験で、改良体自体が不安定な形状ではケーソンに大きな傾斜を生じたため、縦に長い不安定な構造とならないよう逆L字型として、深層混合処理工法における安定検討手法を援用して改良体の底面幅を決定し、5mとした。

なお、改良体の必要強度については、別途有限要素法による数値解析を行って検討した結果、改良体として241MPa以上の設計基準強度を要することが確認された。本工法における改良体の必要強度は、コンクリート等と比較して小さくなった。

あわせて、本誌の中間報告¹⁾等に示すように、1G場と遠心場における模型振動実験を行い、地震時の挙動およびその影響要因について検討した。1G場の実験と遠心場の実験とで係船岸の地震時挙動については概ね一致し、基礎地盤に着底させて大きく改良したケースよりも、逆L字型で基礎地盤から浮かせて一部分を改良したケース(図-1のような改良範囲)が、最もケーソンの変位を抑制できることがわかった。模型振動実験により捨石マウンドの一部を改良・固化する増深工法の有効性が確認された。

3. 捨石マウンドの状況調査

本工法では、改良体の効果や施工性及び信頼性が、捨石の付着物や空隙の状況に大きく左右される。したがって、実際の捨石状況を反映した検討条件や適用条件の整理が重要となるが、既設捨石マウンドの付着物や空隙の状況について示された文献は見当たらず、検討を進める上での条件設定が難しい状況にあった。そのため2ヵ所で捨石マウンドの状況調査を行った。

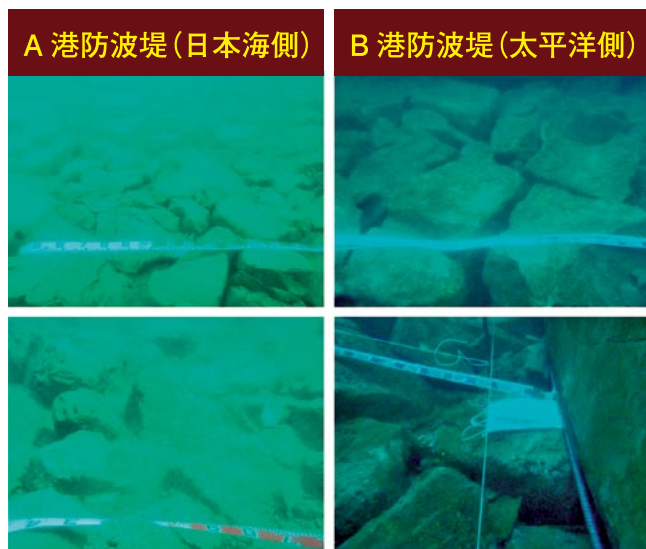


写真-1 捨石マウンドの状況調査結果

撤去工事中である防波堤の捨石マウンドにおいて調査した結果、写真-1に示すように、ケーソン直下の捨石マウンドには、空隙に砂等の混入は見られず、また付着物もなく、清浄な状況が維持されていた。一方で、マウンド法面の捨石表面には付着物があり、空隙にも土が詰まっていた。しかし、捨石撤去時に観察すると、表面から内部に少し入った部分においては、空隙の夾雑物は少なく、良好な状態が維持されているようであった。

4. 固化材の選定

ここまでの検討結果から、本工法において堤体の安定性が最も良好だったのは、係船岸の前趾付近を適度な大きさで、基礎地盤から浮かせて一部改良・固化したときであった。一方で、ケーソン直下の捨石には夾雑物がなかったことを踏まえると、捨石のような大きな空隙を有する粗粒材に対して、試設計で設定した所定の範囲に、要求どおりに改良体を構築できるかが課題として浮上した。

室内試験で確認したところ、流動性の高いモルタルのような固化材では、自重が卓越し下方へ自由落下して注入範囲を制御できなかった。また自由落下を抑制するために流動性を低くした固化材では、下方への落下が小さくても、同時に横方向への広がりが小さくなった。注入管ピッチが狭くなることから施工効率が著しく低下すると懸念された。

そこで、流動特性や発現強度の観点から、可塑状グラウトを選定した。可塑状グラウトは、セメントミルクに可塑材を混入したもので、トンネルやシールドの空洞注入材として多数の実績がある。写真-2のように自重ではほとんど流動せず、加圧・振動により容易に流動するため、捨石のように大粒径で大きな空隙を有する地盤に対して、注入範囲を制御しながら改良体を構築することに適していると判断した。



(a) 静置時

(b) 15回振動後

写真-2 可塑状グラウトのフレッシュ性

予備実験として、図-3に示す直径570mm×高さ880mmのドラム缶内に捨石材を投入したのに対して可塑状グラウトをモルタルポンプにて注入し、所定の範囲を計画通り注入できるかを確認した。可塑状グラウトを注入後、ドラム缶を解体して出来形を観察したが、写真-3に示すように下方へ自由落下せず、また中心の注入管先端から水平方向に向かってドラム缶壁付近までグラウトが到達していた。これにより、可塑状グラウトを使用することで、捨石マウンドに対して注入範囲を制御しながら改良することが可能であることが示唆された。

5. 大型土槽における捨石への注入実験

(1) 実験方法

予備実験の結果を踏まえて、本工法に対する可塑状グラウトの適用性の最終確認として、最大径約200mmの捨石材を用いて作製した模型地盤に対する可塑状グラウトの注入実験を行った。

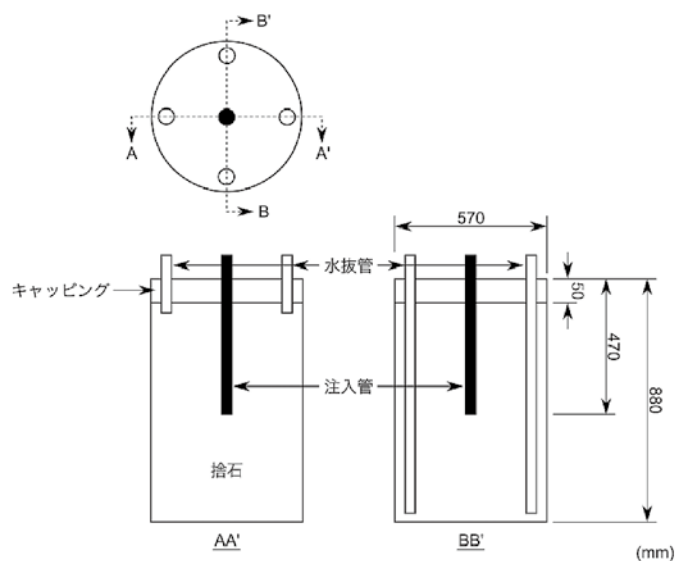


図-3 予備実験供試体構造図



写真-3 予備実験供試体出来形

実験は、港湾空港技術研究所内にある内寸幅6m、奥行き3m、高さ3mの大型土槽を用いて実施した。この土槽内を鋼製簡易土留材で仕切り、幅0.6m、長さ6m、深さ3mの幅の狭い2次元的な2つの模型地盤を作製した。模型実験のイメージを図-4に示す。この2次元的な地盤に対して可塑状グラウトを注入し、注入管の筒先から円盤状の範囲を改良できれば施工可能性が確認されたこととなる。一方、可塑状グラウトが土槽底面に沈澱するような状況となった場合は、この材料による捨石内の限定範囲の注入は難しいと判断される。

捨石は手作業で積み上げた。完成した地盤の密度はケース1で1.51ton/m³(空隙率42%)、ケース2では1.52ton/m³(空隙率41.6%)であった。捨石を所定の高さまで積み上げた後、土槽を水道水で満たした。

両ケースとも同様の材料を用いて可塑状グラウトを混練したが、配合を変化させ、ケース1では硬練り(静置フロー93mm)、ケース2では標準的な硬さ(静置フロー104mm)とした。可塑状グラウトの設計強度はいずれも24N/mm²である。

実際の施工時には、捨石マウンド上面にはケーソン荷重や水圧等が加わることになる。本実験では、捨石地盤上面に鋼材等を載せ、多少の拘束圧が加わる条件で注入を行うこととした。

(2) 注入状況

ケース1、ケース2ともに注入流量を約30ℓ/minとして注入を行った。しかしながら、ケース1では注入途中で注入圧力が約0.3MPaと高くなり、捨石上面に設置していた上載物では地盤の隆起を抑止できなかった。そのため、予定より少ない489ℓ注入した時点で実験を終了した。

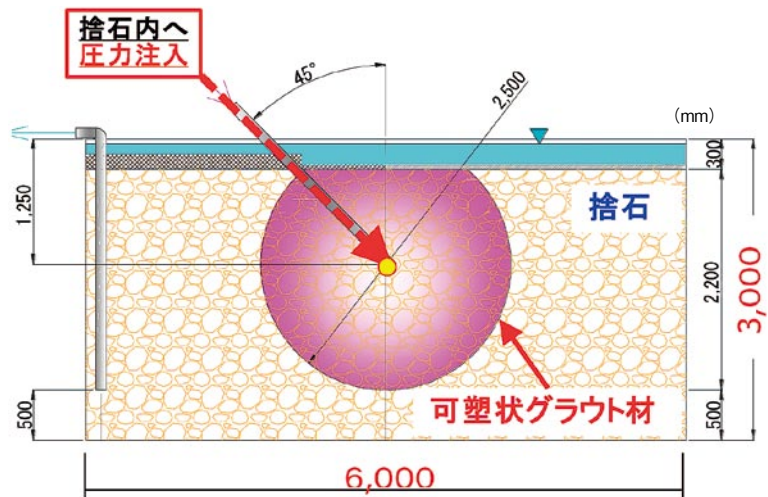


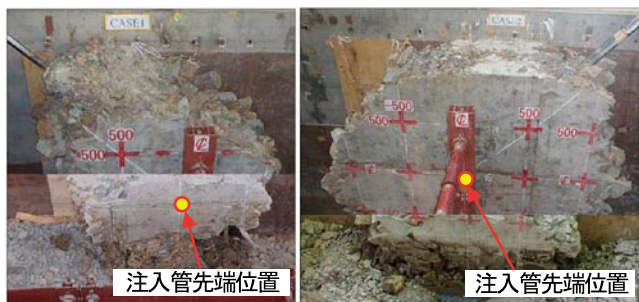
図-4 捨石への注入実験イメージ図

一方、ケース2では注入圧力約0.10MPaで安定して注入することができた。ケース2では可塑状グラウトの流動性が高いことがその理由と考えられる。約1,000ℓ注入後、試みに注入流量を約50ℓ/minと増加させたが、注入圧力は変化せず、引き続き安定的に注入できた。最終的に予定注入量1,200ℓに達したところで注入を完了した。

(3) 実験結果

注入実験終了後、模型地盤を解体し、改良体の出来形を確認した。改良体の出来形を写真-4に示す。いずれのケースでも注入管先端位置を中心として、自重によって生じる下方向への注入が卓越せず、横や上にも広がっていることが確認できる。

ケース1では、想定より注入圧力が高くなったため充填範囲は小さくなったが、ある程度制御しながら注入可能であることがわかった。ケース2では注入管先端を中心として直径約2.5mの円盤に近い形で想定した形状に充填されており、改良範囲を制御して非常に良好に充填できたと考えられる。また、捨石天端を押さえていた上載物の直下まで充填されており、ケーソン底版直下まで充填できることが示唆された。可塑状グラウトによる捨石への限定注入が可能であることが示されたと言える。



ケース1 ケース2
写真-4 捨石への注入実験出来形

6. 施工方法

本工法で想定している施工イメージを図-5に示す。捨石を削孔して注入管を挿入し、可塑状グラウトを注入して所要の範囲を改良した後、前面を掘削する。捨石削孔には、捨石削孔にて実績のあるパーカッションによる打撃と先端ビットによる回転掘削の併用を想定している。また、注入方法については、施工断面に応じて前述の方法以外に種々の工夫により、適切かつ確実な注入が行えると考えている。

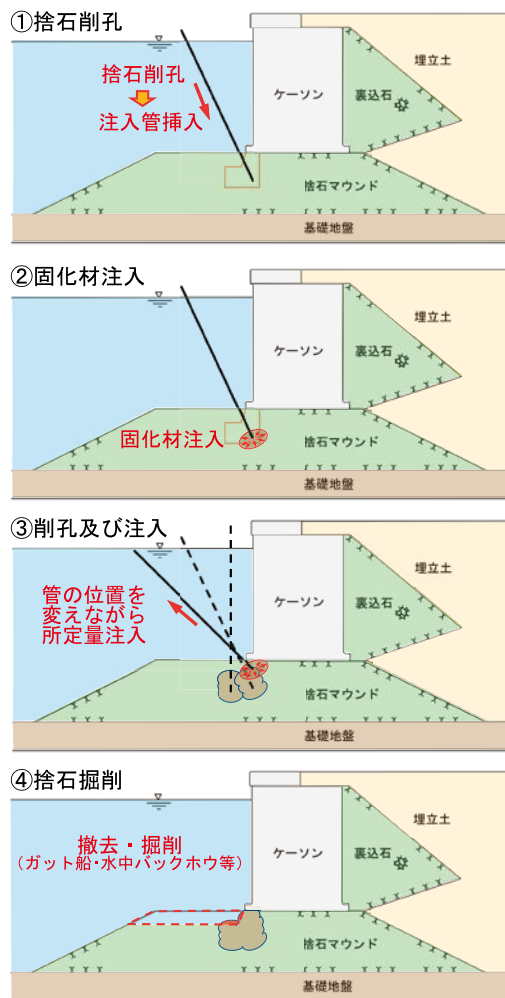


図-5 施工イメージ図

7. おわりに

本稿で紹介した以外にも様々な検討を行い、その内容は、港湾空港技術研究所資料²⁾及び埋浚報告³⁾に詳しく紹介してある。研究レベルでの工法開発は終了したと考えており、今後、実構造物への適用を目標として取り組みを進めていきたいと考えている。各種機関において現地での実証実験等が計画されることを期待している。また本工法は、その特性から既設係船岸の基礎支持力の向上を目的とした耐震補強工法や、津波に対する防波堤等の基礎支持力の強化等、増深以外の目的への応用も期待される。

(文責 五洋建設株式会社 小笠原哲也)

参考文献

- 1) (社)日本埋立浚渫協会 共同研究 WG: 重力式係船岸増深のための基礎構造に関する研究(中間報告), marine voice 21, Vol.279, pp.22-25, 2012.8
- 2) 水谷, 森川, 渡部, 菊池, 合田, 加藤, 小笠原: 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 (投稿中)
- 3) (一社)日本埋立浚渫協会: 重力式係船岸増深のための基礎構造に関する共同研究報告書, 2013.11