

# 転炉系製鋼スラグを有効利用する 人工干潟および弾塑性FEM解析に基づく 施工管理方法について

熊谷 隆宏<sup>1</sup>・高 将真<sup>2</sup>・田中 裕一<sup>3</sup>・乗松 秀臣<sup>4</sup>・川島 浩治<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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:Takahiro.Kumagai@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup>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:Chanjin.Ko@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>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:Yuichi.Tanaka@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup>正会員 五洋建設(株) 中国支店 (〒730-8542 広島市中区上八丁堀4-1)  
E-mail:Hidetomi.Norimatsu@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>5</sup>正会員 五洋建設(株) 中国支店 (〒730-8542 広島市中区上八丁堀4-1)  
E-mail:Kouji.Kawashima@mail.penta-ocean.co.jp

鉄鋼スラグの一種である転炉系製鋼スラグを中詰材に有効利用する人工干潟を造成した。スラグを中詰材に用いる干潟の断面構造として、下層に粒径30~85mmの脱炭スラグ、その上に粒径0~25mmの脱リンスラグ、そして覆砂を配置する3層構造にすることにより、粒径の小さい材料の下層への落ち込みが抑制され、安定な構造を実現できることを明らかにした。また、修正カムクレイモデルを搭載した地盤解析モデルによる圧密沈下解析を干潟の施工管理に導入した。FEM解析において、干潟の施工履歴を再現しながら、将来の沈下予測を行い、中詰部の上げ越しの高さおよび覆砂の仕上げ高さを評価した。FEM解析を施工管理に導入することにより、干潟や藻場基盤としての機能を維持する上で必要な地盤高さを将来にわたって確保することを可能にする高精度の施工を実現した。

**Key Words :** steel slag, recycle, consolidation analysis, artificial tidal flat

## 1. はじめに

近年、開発等に伴う埋立によって失われた干潟の修復・再生を目的とした環境創造事業の一環として、藻場や人工干潟の造成が各地で行われている。人工干潟の造成にあたっては、航路や泊地の整備事業で発生する浚渫土を中詰材として有効利用するとともに、漁業資源であるアサリの増殖を目的として覆砂を行う造成方法が数多く報告されている(例えば、春日井ら<sup>1)</sup>;古川ら<sup>2)</sup>;潮見ら<sup>3)</sup>)。

一方、製鉄工程で発生する副産物である鉄鋼スラグは、全国で年間 3,800 万 t (2011 年度)<sup>4)</sup>が生成されている日本最大の産業副産物であり、その有効利用が期待されている。本研究において、鉄鋼スラグの一種である転炉系製鋼スラグ(以降、スラグと称する)を中詰材に有効利

用する人工干潟(藻場基盤)が我が国で初めて本格施工により造成された。

人工干潟や浅場を粘性土地盤上に造成する場合、投入した材料の荷重により原地盤の圧密沈下が生じる。このため、干潟や藻場基盤としての機能を維持する上で必要な地盤高さが長期的に確保されるように、施工時に上げ越しを実施する等の対策が必要である。

本研究では、修正カムクレイモデル<sup>5)</sup>を搭載した地盤解析モデルによる圧密沈下解析を人工干潟の施工管理に導入した。FEM解析において、施工履歴を再現しながら、干潟の完成後20年間の沈下予測を行い、中詰部の上げ越しの高さおよび覆砂の仕上げ高さを評価した。FEM解析を施工管理に導入することにより、干潟や藻場基盤としての機能を維持する上で必要な地盤高さを将来にわたって確保することを可能にする高精度の施工を実現した。

## 2. スラグを中詰材に用いる人工干潟

人工干潟の計画平面図と断面図を図-1、図-2に示す。造成する干潟において、中詰材にスラグが有効利用される。ただし、スラグは水中単位体積重量が  $12 \text{ kN/m}^3$  程度と大きいため、偏差荷重による安定性の問題に特に留意する必要がある。施工時および施工完了後に、すべり破壊が生じることがないようにスラグは土留め潜堤から離れた位置に配置される。また、使用する転炉系製鋼スラグは高炉水砕スラグと異なり、潜在水硬性を有さないため、海水中で長期間経過しても固結する性質はない。

### (1) スラグ材の選定

スラグに関しては、海域投入時のpHの上昇を抑制するため、細粒分を除去した粒径30~85 mmの脱炭スラグが基本的に使用される。また、干潟・藻場基盤としての機能を考慮して敷設される覆砂の材料として、近隣の河口における浚渫砂が用いられる。浚渫砂は中央粒径が0.5~1.0 mm程度の粗砂であり、覆砂材として用いる場合、中詰材のスラグとの粒径の違いにより、覆砂が中詰材の上に留まらず、中詰材の内部に落ち込む問題が考えられる。このため、噛み合わせにより小さい粒子が大きい粒子に捕捉されて、落ち込みが抑制されるような中詰材と覆砂の層構造について、アクリル製の円筒容器 ( $\phi 0.3 \text{ m} \times \text{H}1.0 \text{ m}$ ) を用いて検討する。

覆砂とスラグの粒径条件に関する実験ケースを表-1に示す。スラグとしては、基本となる粒径30~85mmの脱炭スラグと、pHの上昇を抑制する効果を持つ粒径0~25mmの脱リンスラグの2種類を検討する。各材料の粒度分布を図-3に示す。なお、0~25 mmのスラグは、0~5 mmと5~25 mmの粒子がそれぞれ33%、67%になるように粒度調整されたものである。

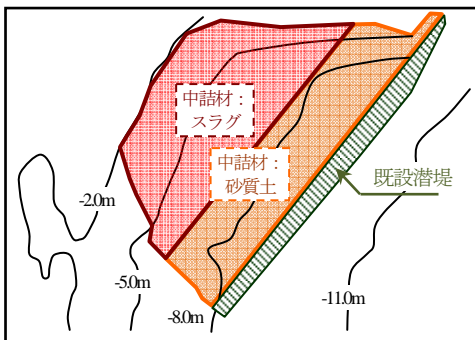


図-1 人工干潟計画平面図

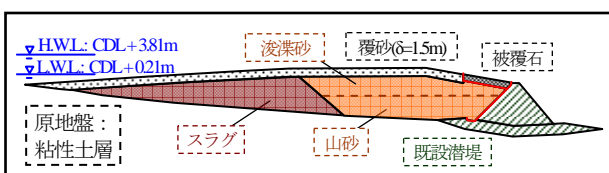


図-2 人工干潟計画断面図

表-1 実験ケース

	Case 1	Case 2	Case 3
上層材料	浚渫砂	浚渫砂	スラグ 径(0-25mm)
下層材料	スラグ 径(30-85mm)	スラグ 径(0-25mm)	スラグ 径(30-85mm)
粒径比 (上層/下層)	0.02	0.10	0.15

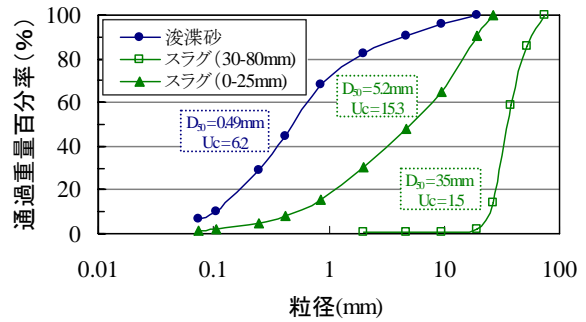


図-3 材料の粒度分布

実験において、まず容器内に下層材料を充填し、海水を満たしたうえで上層材料を投入した。さらに、上層材料の落下を促進するために、プラスチック製のハンマーを用いて軽い打撃振動を与えた。

各材料の投入結果を写真-1に示す。Case 1のように、粗いスラグの上に砂を投入すると、砂は留まることなくすべてスラグの空隙内に落ち込んだ。一方、Case 2、Case 3のように、上層の粒径 $d$ と下層の粒径 $D$ の粒径比 $d/D$ を0.1以上にするると、上層と下層の粒子が噛み合わさり、上層の粒子の落ち込みが抑制される。上層の一部の細粒分は容器の底面まで到達したが、多くは下層材料の上に留まり、2層構造として成立することが確認された。

以上の結果より、スラグを中詰めに用いる干潟の断面構造として、下層に30~85mmのスラグ、その上に0~25mmのスラグ、そして覆砂を配置する3層構造にすることにより、安定な構造が実現できると考えられる。

また、現地では潮位変動に伴う流体力が材料の落ち込みを助長することが考えられるため、模擬の潮位変動を与える実験により、提案する構造の安定性を検討した。

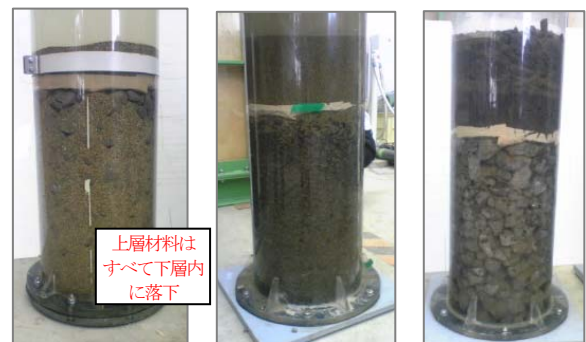


写真-1 材料の投入結果

写真-1 材料の投入結果

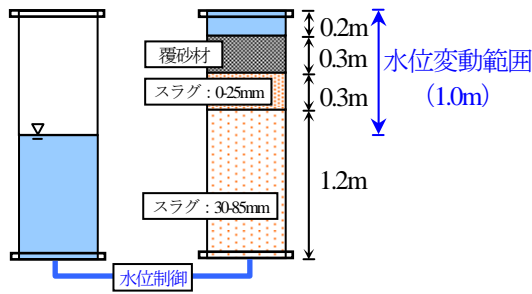


図-4 実験装置模式図

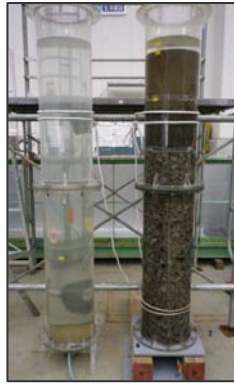


写真-2 土槽作成状況

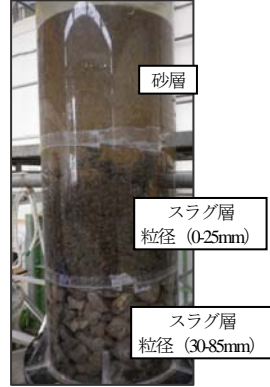


写真-3 実験後の状況

各層の厚さは、現地における大きさの1/4の縮尺に設定した。実験装置の模式図を図-4、土槽作成状況を写真-2に示す。潮位変動の作用は、隣接する水槽内の水の流入出を調整することにより正弦波で与えられる。

材料の落ち込みを促進する流体力として、抗力が想定される。流速の自乗に比例する抗力を現地と同等以上にするために、水位変動の全振幅を現地の1/4となる1.0m、周期は、現地の1/10となる1.2時間に設定した。

覆砂材としての砂の投入を完了した後、ハンマーによって軽い打撃を与えると、砂に含まれる細粒分の一部は、0~25mmのスラグ層に食い込むとともに、その層を通過して30~85mmのスラグ層まで到達するものが現れたが、打撃による地盤表面の沈下量は4cmと微小であることが確認された。また、その後、現地と同等以上の水位変動作用を与えても、細粒分等の落下が進行する傾向は現れなかった。すなわち、水位変動が作用する条件においても、提案する3層構造が安定であることが確認された。実験終了後の土槽の状況を写真-3に示す。

なお、海岸保全施設の技術上の基準・同解説<sup>9)</sup>では、緩傾斜護岸の裏込工の上層と下層の粒径比は、吸出しを防ぐために0.15程度以上にすることが良いとされている。この条件は均一粒径の材料を想定しているが、本実験で使用材料のうち、0~25mmのスラグは、均等係数 $U_c$ が15.3と粒度分布が広く、均一粒径の条件とは異なる。ただし、本実験では、粒径比が0.1以上で上層の粒子の落ち込みが抑制され、安定な構造になることが確認されており、粒度分布の広い材料を含みながらも、既往の知見を概ね適用できることがわかった。

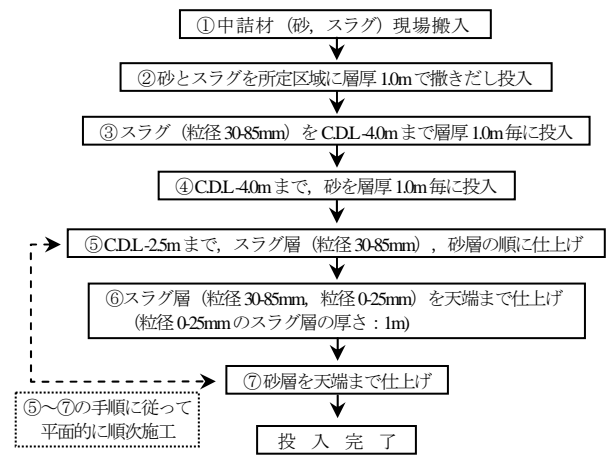


図-5 中詰材の投入手順

## (2) 中詰めの施工方法

人工干潟の中詰め部を施工するにあたり、砂を投入する区域とスラグを投入する区域で異なる施工方法を採用した。すなわち、水深の浅い区域に投入するスラグについて、材料運搬船(ガット船)では施工区域への進入や区域内での回頭が不可能であるため、水深が確保される位置でガットバージへ瀬取りを行い、ガットバージにて現場へ入域し、材料を投入した。また、水深の深い領域に投入する土砂については、フェリーバージでそのまま入域し、タイヤショベルにて投入作業を行った。

図-5に中詰材の投入手順を示す。砂とスラグをそれぞれ中詰材として用いる区域が分かれており、施工時の干潟の安定性を確保するために、砂を投入する区域とスラグを投入する区域を交互に造成する施工方法を用いた。

なお、本工事では、中詰めに用いるスラグの設計数量が $46,200 \text{ m}^3$ であるのに対して、実際の投入量は $53,700 \text{ m}^3$ (30~85mmスラグ:  $36,100 \text{ m}^3$ , 0~25mmスラグ:  $17,600 \text{ m}^3$ )であり設計数量の16%増であった。投入したスラグのうち、海中の拡散によって流出した分もあるが、0~25mmのスラグは、設計では全体の30%の数量であるのに対し、実際の投入量は全体の33%に増加しているため、上層に設置される0~25mmのスラグが実験で想定したよりも多く下層に食い込んだことが考えられる。

ただし、設計数量に対する割増量としては小さい。覆砂部については、下層への食い込みが生じることはなく、提案する3層構造が実現されたことが確認された。

## 3. 弾塑性FEM解析モデルによる沈下挙動解析

粘性土地盤上に干潟を造成する場合、その荷重により圧密沈下が生じる。干潟や藻場基盤としての機能を維持する上で必要な地盤高さを将来にわたって確保するため、施工時に中詰材と覆砂の上げ越しによる対策を行う。

前述したように、本研究では弾塑性モデルによる圧密

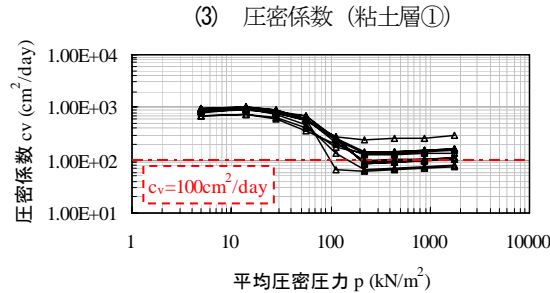
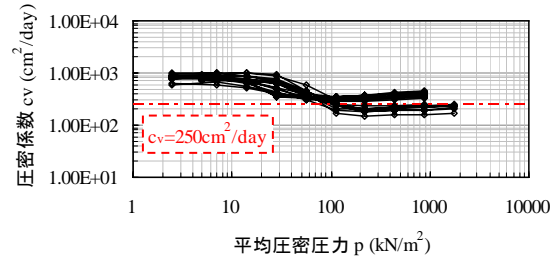
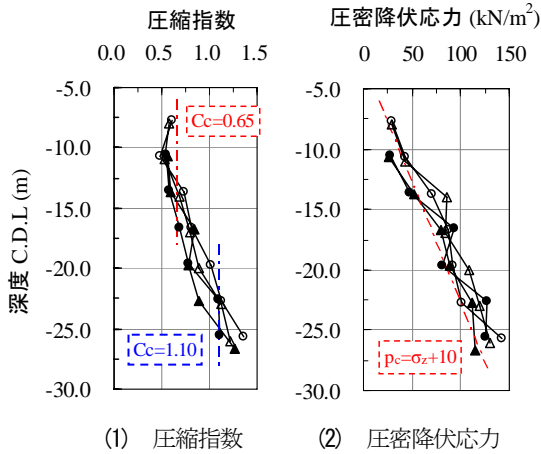


図-6 圧密試験結果

沈下解析を人工干潟の施工管理に導入する。試験結果に基づいて解析用の土質パラメータを設定し、沈下挙動を予測するとともに、施工期間中における沈下挙動のモニタリング結果を用いてフィードバックすることにより、解析の精度を向上させる。そして、施工後20年間にわたる地盤の沈下挙動を精度良く予測し、施工時に目標とすべき中詰材の天端高および覆砂仕上げ高を設定する。

(1) 土層のモデル化および土質定数の設定

原地盤の土層構成のモデル化に関しては、既往の土質報告書およびボーリング柱状図を参考にして、C.D.L-18mまでを沖積粘土層①、C.D.L-18m~C.D.L-30mを沖積

粘土層②に区分した。土質のモデル化に関しては、覆砂、中詰材（砂、スラグ）はモールクーロン型の弾塑性モデル、粘土層は修正カムクレイモデルを適用した。

原地盤層の土質パラメータは、サンプリングした試料の土質試験結果に基づいて設定した。圧縮指数、圧密降伏応力、圧密係数に関する圧密試験結果を図-6に示す。

なお、潜堤下部におけるドレーンによる地盤改良領域の圧密は完了しているものとし、それに伴う地盤の強度増加を考慮した。また、覆砂と中詰材の変形係数Eについては、砂とスラグの内部摩擦角φをそれぞれ、30°、35°に仮定し、既往の内部摩擦角とN値の関係式および変形係数EとN値の関係式を用いて算定した。

$$\phi = \sqrt{15N} + 15 \quad (1)$$

$$E = 700N \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

表-2に、使用する土質パラメータの一覧を示す。

(2) 解析対象位置および解析工程

図-7に示す測線No.1と測線No.2の2つの測線において解析を実施する。また、これらの測線上で、砂を中詰めする区域とスラグを中詰めする区域のそれぞれにおいて、磁気電送システムを用いた高性能の水圧式沈下計を設置し、沈下挙動のモニタリングを実施する。沈下計は施工開始前に原地盤上に設置され、干潟の造成に伴う原地盤の沈下量が2時間毎に連続的に計測される。

図-8に、測線No.1を対象にした2次元FEM解析メッシュと解析工程を示す。実際の人工干潟の施工履歴を再現しながら、干潟の完成後20年間の沈下予測を行い、中詰部の上げ越しの高さおよび覆砂の仕上げ高を評価する。

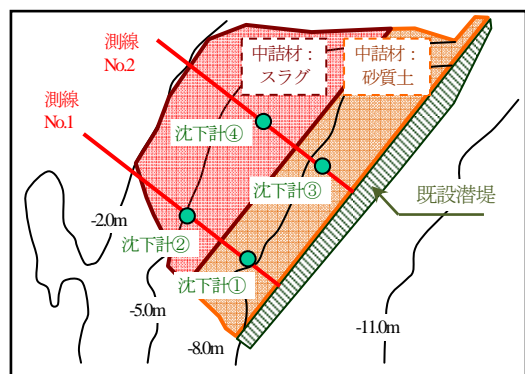


図-7 解析対象位置および沈下計設置位置図

表-2 解析に用いる土質パラメータ一覧

	構成則	単位体積重量 (kN/m³)		間隙比	圧縮指数	膨潤指数	内部摩擦角 (°)	変形係数 (kN/m²)	圧密降伏応力(kN/m²)	圧密係数 (cm²/day)
覆砂	モールクーロン	気中: 18.0	水中: 10.0	—	—	—	30	1.05×10⁴	—	—
スラグ	モールクーロン	気中: 20.0	水中: 12.0	—	—	—	35	1.87×10⁴	—	—
中詰砂	モールクーロン	気中: 18.0	水中: 10.0	—	—	—	30	1.05×10⁴	—	—
粘土層①	修正カムクレイ	気中: 15.5	水中: 5.5	1.9	0.65	0.10	30	—	γ'z + 10	250
粘土層②	修正カムクレイ	気中: 15.5	水中: 5.5	1.9	1.10	0.17	30	—	γ'z + 10	100



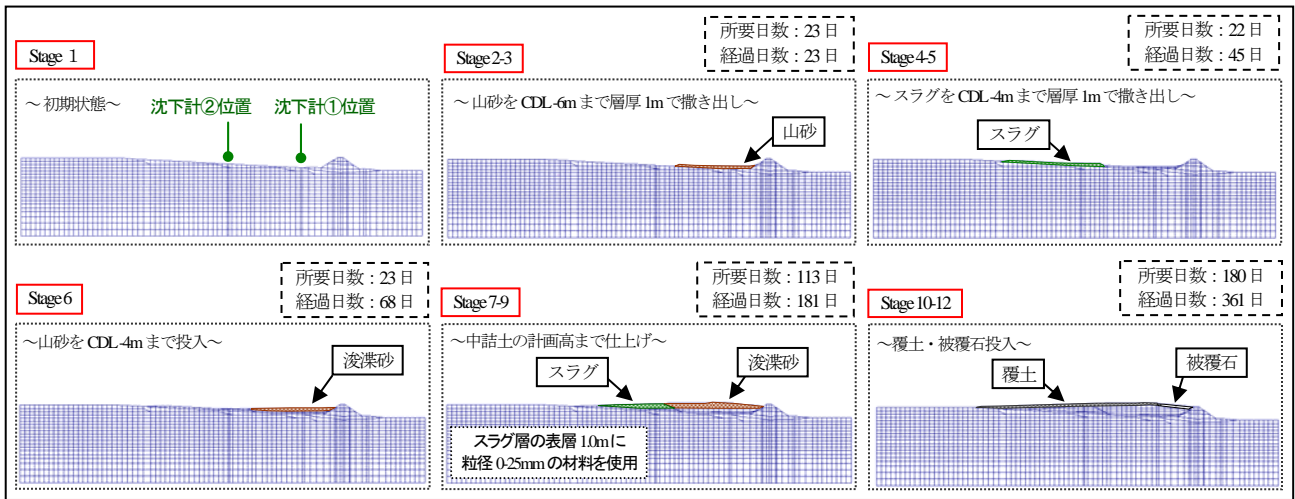


図-8 解析工程例 (測線 No.1)

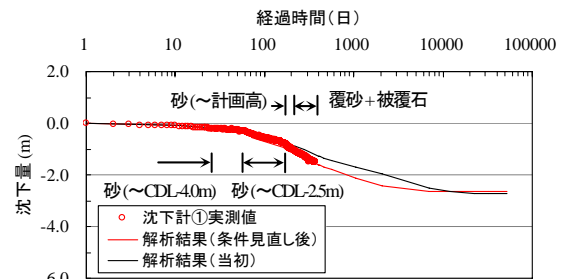
(3) 解析結果

施工期間中の圧密沈下挙動のモニタリングにおいて、圧密試験結果より推定される沈下速度より速い沈下挙動が確認されたため、圧密係数に関して当初条件の3倍とするように見直しを行った。また、実際の中詰工において、スラグの投入量が設計数量の16%増となったことから、30~85mmのスラグ層の上に0~25mmのスラグを投入したときに、粒径の小さいスラグの一部が下層に食い込んだと考えられる。食い込みによって生じた投入量の増加分を10%程度と仮定して、相当する荷重の増加を考慮するように解析条件の見直しを行った。

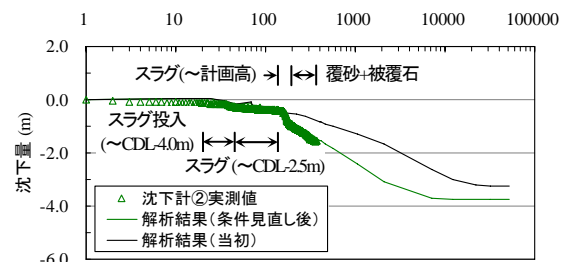
原地盤の沈下の実測値と解析結果の比較を図-9に示す。図中、当初の解析条件(圧密係数の見直しなし、およびスラグの荷重増加なし)による解析結果を併せて示す。条件の見直しにより、特に、スラグの投入区域において実測の沈下挙動の再現性が向上することがわかる。また、スラグ投入区域では、上層スラグの投入時に食い込みによる荷重の増加が生じ、沈下が進む傾向が現れるとともに、最終沈下量が大きくなる傾向になる。また、測線 No.1部の覆砂完了時のメッシュ変形図を図-10に示すように、砂とスラグの投入区域の境界で、水平方向の変位が逆方向に分かれる2次元変形挙動が現れ、この境界周辺で沈下量が大きくなる傾向になることがわかる。

沈下計①と②の位置を対象にして、1次元解析と2次元解析を行った結果の比較を図-11に示す。1次元解析では、特に沈下計②位置のスラグ区域において、沈下量が過小に評価される。このような結果より、精度の良い沈下予測には、2次元解析が必要であることが示唆される。

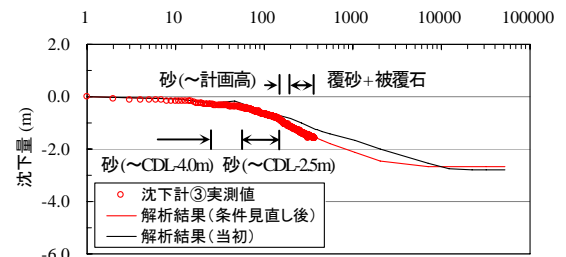
本工事では、干潟あるいは藻場基盤としての機能を維持するために、圧密完了後においても覆砂天端高としてCDL-2.0m以上確保されることが要求されている。このため、中詰部と覆砂の施工時に、それぞれの最適な天端高さを解析によって評価した。測線 No.1 において、それぞれの施工高さを評価した結果例を表-3に示す。



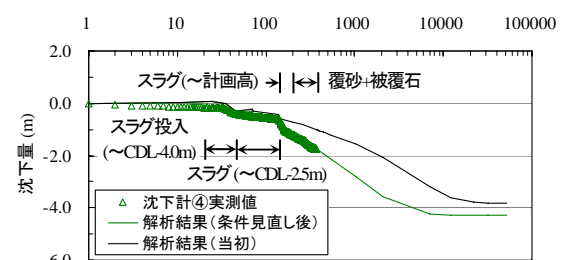
(1) 沈下計①設置位置 (測線 No.1, 砂投入区域)



(2) 沈下計②設置位置 (測線 No.1, スラグ投入区域)



(3) 沈下計③設置位置 (測線 No.2, 砂投入区域)



(4) 沈下計④設置位置 (測線 No.2, スラグ投入区域)

図-9 実測値と解析結果の沈下挙動の比較

変形に関する長期的なモニタリングを実施し、必要があれば対策を講じることが望ましいと考えられる。

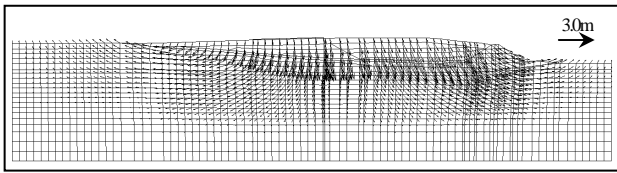


図-10 メッシュ変形ベクトル図 (測線 No.1)

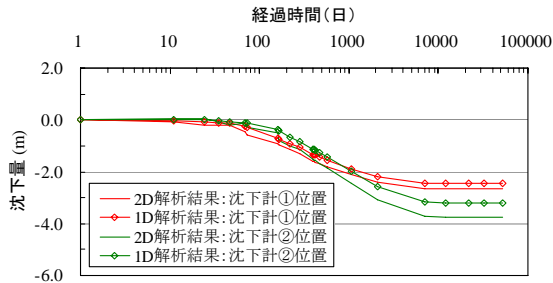


図-11 1次元解析と2次元解析の比較 (沈下計①, ②位置)

表-3 設定した施工時の地盤高さ (測線 No.1)

	潜堤法線からの距離 (m)				
	28	50	68	100	140
中詰工の施工高さ (m) (CDL 基準)	+0.20	+1.00	+0.90	-0.30	-1.80
覆砂仕上げ高 (m) (CDL 基準)	+0.20	+1.00	+1.10	-0.20	-1.80
予測される最終地盤高 (CDL 基準)	-1.93	-1.93	-1.98	-1.91	-1.67

#### (4) 漂砂の検討

前述した圧密沈下量の予測結果に基づく干潟の施工高さの検討においては、波浪や潮流等による漂砂移動の影響は考慮されていない。干潟上では水深が浅いため、波浪や潮流等の擾乱の影響を受けやすい環境にある。

当該地点に来襲する確率波浪として、5年確率波は $H_{1/3} = 1.3 \text{ m}$ ,  $T_{1/3} = 4 \text{ s}$ である。このような波浪が水深3~5mの浅い地点に来襲するとき、覆砂の中央粒径が0.5 mmの条件においてシールス数の値は0.12~0.34と評価される。

確率的な波浪等による擾乱によって、覆砂部に掃流や浮遊状態の漂砂形態が現れ、部分的に地形変化が生じる可能性があると考えられるため、侵食・堆積を含む地盤

#### 4. おわりに

転炉系製鋼スラグを中詰材として用いる人工干潟の造成にあたり、本研究では、粒径30~85 mmの脱炭スラグ、粒径0~25 mmの脱リンスラグおよび覆砂より構成される3層構造を提案する。提案する構造は、粒径の小さい材料の下層への落ち込みが抑制され、安定となることを明らかにした。また、地盤解析モデルによる圧密沈下解析を人工干潟の施工管理に導入した。沈下計によって得られた沈下挙動を解析によって再現した。特に、沈下のモニタリング結果をフィードバックすることにより解析の精度を高めるとともに、干潟の完成後20年間にわたる圧密沈下予測を行い、施工時に目標とすべき中詰部の上げ越しの高さおよび覆砂の仕上げ高さの評価を行った。

#### 参考文献

- 1) 春日井康夫, 久本忠則, 中山康二, 松本英雄: 広島県糸崎港における干潟再生事業, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.107-112, 土木学会, 2003.
- 2) 古川恵太, 岡田知也, 東島義郎, 橋本浩一: 阪南2区における造成干潟実験—都市臨海部に干潟を取り戻すプロジェクト—, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.659-664, 土木学会, 2005.
- 3) 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.L1171-L1175, 土木学会, 2012.
- 4) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグ統計年報 (平成23年度実績), <http://www.slg.jp/pdf/fs-128.pdf>, 2012.
- 5) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968): On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay, in J. Heyman and F. A. Leckie (eds.), Engineering plasticity (Cambridge: Cambridge University Press), pp.535-609.
- 6) 海岸保全施設技術研究会編: 海岸保全施設の技術上の基準・同解説, pp.3\_66-3\_67, 2004.

## CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL TIDAL FLAT BY USE OF STEEL SLAG

Takahiro KUMAGAI, Changjin KO, Yuichi TANAKA, Hidetomi NORIMATSU and Koji KAWASHIMA

Artificial tidal flat has been constructed by use of steel slag as filling materials. Three layers composed by 30-80mm steel slag, 0-25mm steel slag and coverage sand are proposed to realize stable structure without leaking of constitutive materials into lower and coarser layers.

FEM analysis of consolidation settlement by use of elasto-plastic constitutive soil models has been introduced into the construction management of artificial tidal flat. Based on predicted consolidation settlement of ground for 30 years after completion of construction, optimal heights of filling material and sand coverage are determined at the construction stages.