

海域に敷設した鉄鋼スラグ製品の波浪安定性

Wave Stability of Iron and Steel Slag Laid on Sea Beds

本田 秀樹 HONDA Hideki JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(副課長)
鈴木 操 SUZUKI Misao JFE スチール 資源循環推進部 主任部員(副部長)

要旨

鉄鋼スラグ製品を用いた海域環境修復技術として、鉄鋼スラグ炭酸固化体を海藻着生基盤材として防波堤マウンド被覆材に用いた場合、港湾工事中鉄鋼スラグを覆砂材として適用した場合の波浪安定性を水理模型実験により明らかにした。鉄鋼スラグ炭酸固化体を防波堤被覆材に用いる場合、波浪安定に必要な重量は、その気孔部分に水を飽和させた重量(飽和重量)をハドソン式に適用することで算定可能であることが分かった。ただし、防波堤マウンドが $h'/h = 0.65$ (h' : マウンド上の水深, h : 水深), $0.08 \leq B_M/L \leq 0.10$ (B_M : マウンド前肩幅, L : マウンド上の水深 h' での波長) の条件では、安定数を補正する必要がある。また、港湾工事中鉄鋼スラグは、海砂と同等以上の波浪安定性を有していることを明らかにした。

Abstract:

JFE Steel and JFE R&D studied the wave stability of a carbonated steelmaking slag block to be employed as armor units of breakwater, and iron and steel slag to be applied to sand capping works through hydraulic model tests. The required mass for the stability of the carbonated steelmaking slag block can be estimated by Hudson's formula using the saturation weight. However, it is necessary to modify the stability number of Hudson's formula to the condition of the mound of breakwater $h'/h = 0.65$ (h' : water depth on top of rubble mound foundation, h : water depth) and $0.08 \leq B_M/L \leq 0.10$ (B_M : berm width, L : wavelength at the water depth h'). The wave stability of the iron and steel slag was found to be better than the sea sand.

1. はじめに

国内の沿岸海域では、これまでの大規模な埋立てにより、多くの藻場が消失してきた。藻場は、水質浄化や稚魚の生育場といった機能を有しており、沿岸環境の観点から非常に重要な役割を果たしている。このため、沿岸海域の環境再生を目的とした「自然再生推進法」が施行(2003年)され、藻場を人為的に再生するための種々の藻場造成技術が開発されてきた¹⁾。

JFE スチールでは、天然資源ではなく、鉄鋼生産にともない副生する鉄鋼スラグ製品を用いた海域環境修復技術の開発を行い、その海藻着生効果²⁾や底生生物着生効果³⁾を明らかにしてきた。

一方、これらの製品を海域に設置する場合、波浪や流れに対する安定性が重要となる。本稿では、鉄鋼スラグ炭酸固化体(以下、マリンプロック)を海藻着生基盤材として防波堤マウンド被覆材に用いた場合、および、港湾工事中

鉄鋼スラグ(港湾の施設の技術上の基準・同解説⁴⁾に示されている鉄鋼スラグ製品)を覆砂材として用いた場合の波浪安定性を把握する目的で実施した水理実験の概要を紹介する。

2. マリンプロックの波浪安定性

2.1 マリンプロックのハドソン式への適用性

波浪に対して安定となる防波堤マウンド被覆材の必要重量は、被覆材の気中の単位体積重量、安定数、有義波高をパラメーターとした(1)式に示すハドソン式を用いて算定されている⁵⁾。マリンプロックは、製鋼スラグにCO₂を吹き込み、スラグ中のCaOと反応させて固化させた多孔質体である⁶⁾。マリンプロックの気中の単位体積重量は、標準的な無筋コンクリートと同程度であるが、水中では連続した気孔のはほすべてに海水が入り込むため、気孔率に相当する体積部分には浮力が作用せず、単位体積重量が大きくなる。この効果をハドソン式(1)に反映させるには、式中に用いている気中の単位体積重量として、マリンプロックの気孔部分に水を飽和させた重量(飽和重量)を用いれば

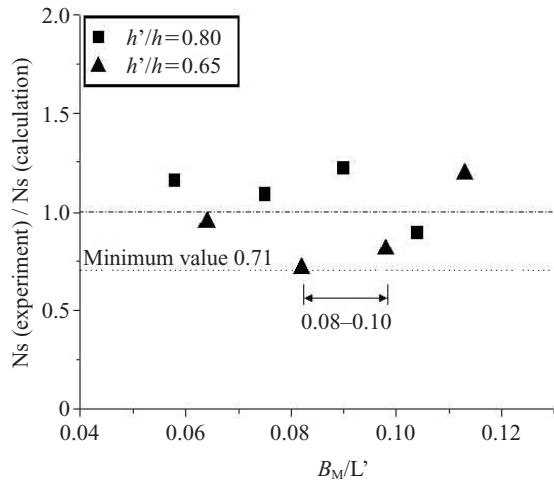


図2 安定数の比較

Fig.2 Comparison of the stability number

要があり、また、今回の実験条件以外では、水理実験などにより検証する必要がある。

3. 覆砂材としての港湾工用鉄鋼スラグの波浪安定性

3.1 水理実験による波浪安定性の検証

覆砂材の波浪安定性は、波や流れといった外力に対して、覆砂材粒子の自重が抵抗力となり、その両者の関係で決まる。港湾工用鉄鋼スラグのうち、高炉水砕スラグは、単粒度で粒子形状が角張っているため、単位体積重量は海砂よりも軽量である⁸⁾。ところが、粒子としての真比重は海砂と同程度(約2.7)⁹⁾であることから、海砂と同等の波浪安定性を有していると考えられる。そこで、港湾工用鉄鋼スラグの波浪安定性を把握する目的で、海砂との比較実験を行った。なお、製鋼スラグは、単位体積重量も粒子としての真比重も海砂より大きいため、理論的に既存の評価方法が適用できると考えられる。

実験は、水路を中央で2分割して、同じ粒径分布に調整した港湾工用鉄鋼スラグと海砂を水路底面に設置し、波浪を作用させた。実験状況を写真3に示す。実験条件は、

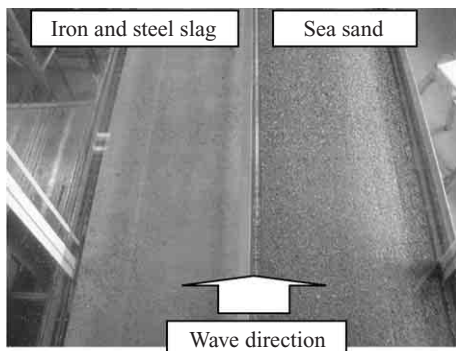


写真3 実験状況

Photo 3 Situation of experiment

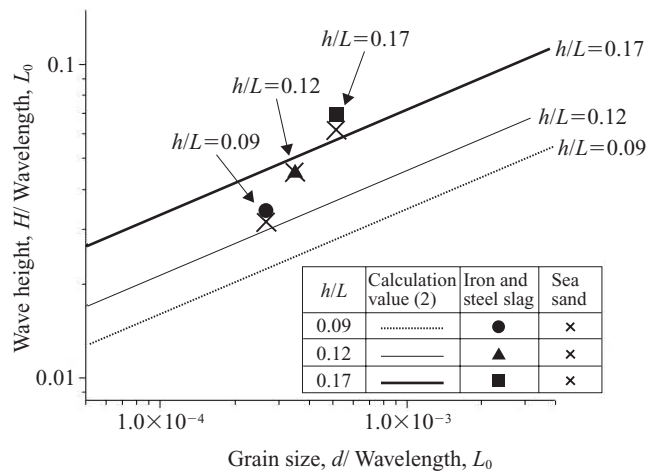


図3 港湾工用鉄鋼スラグと海砂の安定性の比較

Fig.3 Comparison of the stability between Iron and steel slag and sea sand

水深2種類(30.0 cm, 35.0 cm)、周期3種類(1.2 s, 1.6 s, 2.0 s)の規則波とした。実験では、波高を段階的に大きくしていき、港湾工用鉄鋼スラグと海砂が移動する直前の限界波高を求めた。ここでは、覆砂材表面の第1層がほとんど動き出す全面移動状態¹⁰⁾を移動限界と定義して、(2)式に示す計算値と実験値を比較した。なお、覆砂材の移動状況は目視観察とした。実験結果を図3に示す。縦軸は、限界波高(H)と沖波波長(L₀)の比、横軸は覆砂材の粒径(d)と沖波波長(L₀)の比である。図中のプロットは港湾工用鉄鋼スラグと海砂の実験値、線は(2)式における全面移動状態の計算値であり、線より上側が安全側の領域となる。図3に示すように、港湾工用鉄鋼スラグの実験値は、海砂の実験値や(2)式の計算値よりも安全側であることから、港湾工用鉄鋼スラグは海砂と同等以上の波浪安定性を有していると判断できる。これは、港湾工用鉄鋼スラグの表面が角張っていること、内部摩擦角(35~40°)が海砂より大きいことが、波浪に対する抵抗力増加に影響していると考えられる。

$$\sinh\left[\frac{2\pi h}{L}\right] = 1.77\left[\frac{H}{L_0}\right]\left[\frac{L_0}{d}\right]^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

h : 水深,
H : 移動限界波高,
L : 波長,
L₀ : 沖波波長,
d : 覆砂材の粒径

3.2 数値解析手法による覆砂材の安定性評価

藻場・浅場を新たに造成する場合、現地の波浪や流れ(潮流)に対して、施工後も安定となる粒径の覆砂材を用いる必要がある。ここでは、数値解析を用いた評価事例につ

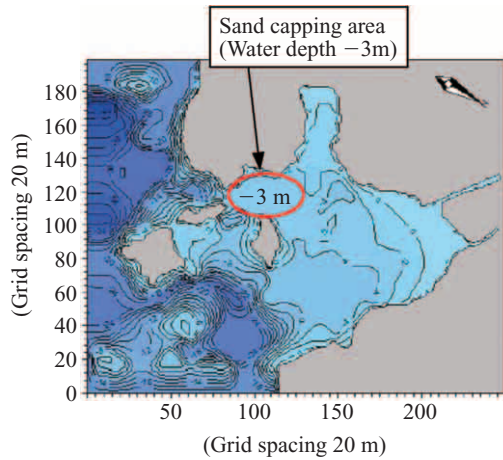


図4 解析領域
Fig.4 Model area

いて述べる。

波、流れが作用する場合の安定性の評価指標は、粒子を動かそうとする力（底面せん断力）と粒子の自重による抵抗力（摩擦抵抗）の比で表されるシールドズ数（3式）が用いられている。港湾工用鉄鋼スラグは、海砂と同等以上の波浪安定性を有することから、シールドズ数を適用した評価でも安全側であると判断した。ここでは、丸山らの方法¹¹⁾を用いてシールドズ数を算定し、覆砂材が安定となる評価基準は、シールドズ数0.5以下¹²⁾とした。解析領域を図4に示す。図中の○印を水深3.0mに覆砂（高上げ）して、安定に必要な粒径を検討した。解析では、波浪、潮位変動、風、河川流入の条件を与えて最大流速分布を求め、この最大流速、粒子の比重、粒径から、(3)式でシールドズ数を算定した。ここでは、解析領域全体を粒径0.02mm、0.2mmとした。粒径0.02mmにおけるシールドズ数分布を図5、粒径0.2mmのシールドズ数分布を図6に示す。その結果、粒径0.02mmの場合、覆砂部分のシールドズ数0.5以上の部分が存在しており不安定となっている。一方、粒径0.2mmにすると、シールドズ数0.3以下で安定となることから、この海域では粒径0.2mm以上の覆砂材を用いる必要があることが分かる。

$$\psi = \frac{1}{2} \frac{fu^2}{(s-1)gd} \dots\dots\dots (3)$$

- f : Jonsson の摩擦係数,
- u : 底面の流速振幅,
- s : 覆砂材の水（海水）に対する比重,
- g : 重力加速度,
- d : 粒径

ここで、摩擦係数 f は、Swartの近似式((4)式)を用いた。

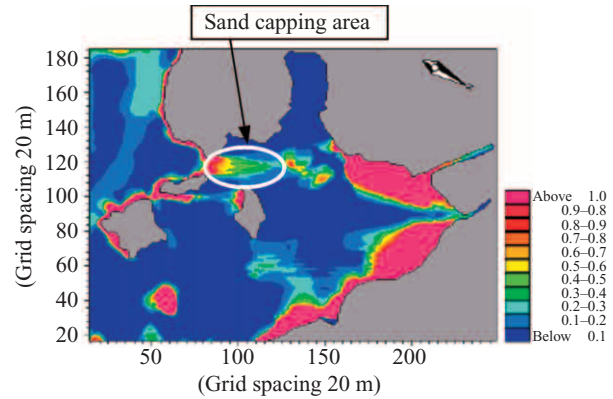


図5 シールドズ数の計算結果（粒径0.02mm）
Fig.5 Result of Shields number (Grain size of sand is 0.02mm)

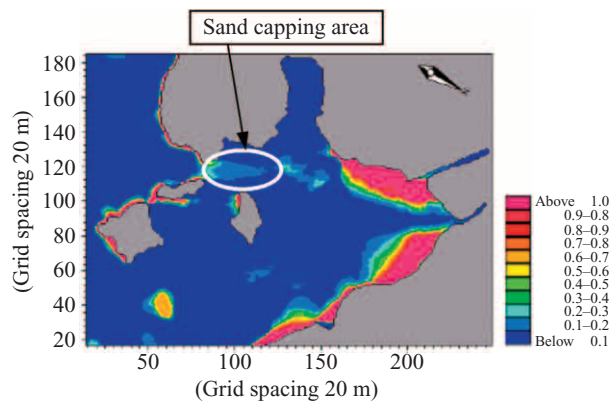


図6 シールドズ数の計算結果（粒径0.2mm）
Fig.6 Result of Shields number (Grain size of sand is 0.2mm)

$$f = \exp \left\{ 5.21 \left[\frac{u}{\sigma k} \right]^{-0.194} - 5.98 \right\} \dots\dots\dots (4)$$

- σ : 波の角周波数
- k : 粗度高さ (= 粒径)

4. おわりに

鉄鋼スラグ炭酸固化体「マリブロック」や港湾工用鉄鋼スラグを海域環境修復に適用する場合に必要な波浪安定性を、水理模型実験により明らかにした。近年、藻場・干潟の再生や深堀跡修復など、沿岸海域の環境改善に向けた取り組みが進められている。そのなかで、リサイクル材料である鉄鋼スラグ製品を用いた環境改善技術に取り組み、天然資源の使用抑制やCO₂ガス発生抑制など社会に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修, 海の自然再生ワーキンググループ著, 海の自然再生ハンドブック, その計画・技術・実践, 第3巻藻場編, 港湾空間高度化環境研究センター, 2003.
- 2) 宮田康人, 沼田哲始, 高木正人, 高橋達人, 小山田久美, 小田俊司.

- 藻場造成用鉄鋼スラグブロックへの海藻着生. 第29回海洋開発シンポジウム論文集, 2004, vol. 20, p. 887-892.
- 3) 宮田康人, 沼田哲始, 豊田恵聖, 佐藤義夫, 小田静, 岡本隆, 高炉水砕スラグの底質改善効果. 第25回海洋開発シンポジウム論文集, 2000, vol. 16, p. 345-350.
 - 4) 日本港湾協会. 港湾の施設の技術上の基準・同解説
 - 5) 日本港湾協会. 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), p.157.
 - 6) 藻場着生基盤技術研究会, 鉄鋼スラグ炭酸固化体利用マニュアル. 港湾空間高度化環境研究センター, 2004.
 - 7) 谷本勝利, 柳生忠彦, 村永努, 柴田鋼三, 合田良実. 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究. 港湾技術研究所報告, 1982, vol. 21, no. 3.
 - 8) 沿岸開発技術研究センター, 鉄鋼スラグ協会. 港湾工事用水砕スラグ利用手引書. p. 13.
 - 9) 沿岸開発技術研究センター, 鉄鋼スラグ協会. 港湾工事用水砕スラグ利用手引書, 付録2.
 - 10) 榎本亨. 環境圏の新しい海岸工学. フジテクノシステム, 1999, p. 129.
 - 11) 丸山康樹, 五十嵐由雄, 石川雄介. アマモ場適地選定手法. 海岸工学

論文集, 1983, vol. 34, p. 227-231.

- 12) 藻場造成型漁港構造物 調査・設計ガイドライン. p. 31.



本田 秀樹



鈴木 操