

海洋構造物からのアルカリ溶出挙動に関する研究

千葉工業大学創造工学部都市環境工学科 学生員 ○吉田 英司
 (前)千葉工業大学大学院工学専攻 藤原 誠司
 千葉工業大学創造工学部都市環境工学科 フェロー 矢内 栄二

1. はじめに

近年、様々な海域の環境改善事業が進められており、鉄鋼生産の副産物である製鋼スラグは、砂に類似した形状で、機会的特性も高いため、適用資材として検討が進められてきた。しかし、積層状の製鋼スラグからのアルカリ溶出に伴う pH 影響や、経時変化などが十分に把握できていない。

本研究では、積層状スラグのアルカリ溶出特性に基づいて、構築されたスラグ層内のアルカリ挙動モデルおよび、海水の緩衝作用を考慮した三次元 pH シミュレーションモデルにより pH を算出する。

2. 計算モデルの概要

計算には、金山ら(2014)のスラグ層内のアルカリ挙動モデル¹⁾、五十嵐ら(2014)の pH シミュレーションモデル²⁾、MEC モデルの 3 つを用いた。pH 計算に使用するアルカリ度は、金山らの式(1),(2)を用いて算出し、pH は五十嵐らの式(3)~(5)で表す $[D_{C-A}]$: 海水中の強電解質の陽イオン総電荷量と陰イオン総電荷量の差を用いて算出した。算出した pH をスラグから発生するアルカリの pH として、式(6)~(8)の Navier-Stokes 式、式(9)の連続の式、式(10)の移流拡散方程式により拡散過程を算出した。

$$F=2\lambda U_s B \cdot \frac{\alpha}{\beta} \cdot \exp(-\beta h_s) (C_{eq} - C_B) \cdot$$

$$\frac{I_0(\eta_0)K_0(\eta_1) - I_0(\eta_1)K_0(\eta_0)}{\eta_1 [I_0(\eta_0)K_1(\eta_1) + I_1(\eta_1)K_0(\eta_0)]} \quad (1)$$

$$F=2\lambda U_s B \cdot \frac{\alpha}{\beta} \cdot \exp(-\beta h_s) \frac{K_0(\eta_1)}{\eta_1 K_1(\eta_1)} \quad (2)$$

ここで、F: アルカリ溶出フラックス、 λ : 空隙率、 U_s : 表層流速、B: 空隙スケール、 C_{eq} : 飽和アルカリ濃度、 C_B : スラグ層表面からのアルカリ濃度、 $I_0(\eta)$

および $K_0(\eta)$ は 0 次の第 1 種および第 2 種変形ベッセル関数である。

η_0 および η_1 は、それぞれスラグ層底面 ($z=0$) およびスラグ層表面 ($z=hs$) における η の値である。式(2)は $\beta \cdot h_s$ の値が概ね 5 以上となる場合に採用する。

$$[D_{C-A}] = [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{H}_2\text{BO}_3^-] + 2[\text{MgCO}_3^0] - 2\text{MgT} \quad (3)$$

$$\text{ALKT} = [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{H}_2\text{BO}_3^-] + 2[\text{MgCO}_3^0] \quad (4)$$

$$[D_{C-A}] = \text{ALKT} - 2\text{MgT} \quad (5)$$

ここで、 $[D_{C-A}]$: 海水中の強電解質の陽イオン総電荷量と陰イオン総電荷量の差、ALKT: アルカリ度である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f u - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$0 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

ここで、 u, v, w : x, y, z 方向流速、 ρ : 海水密度、 ρ_0 : 一般的な海水密度、 f : コリオリパラメーター、 A_M, K_M : 水面および鉛直方向の渦動粘性係数、 g : 重力加速度である。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y} - w \frac{\partial H}{\partial z} +$$

$$A_c \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (10)$$

ここで、H:水素イオン指数 (pH), A_c, K_c :水平および鉛直方向の渦動拡散係数である。

3. 計算条件

計算領域は、五十嵐ら(2014)の論文²⁾を参考として、横方向 6.0m、縦方向 0.5m、高さ 1.0m の水路を条件とした。計算領域を図-1 に示す。海水条件は宮崎ら(2013)の論文³⁾より水温、塩分、密度、pH を与えた。気象条件は気温を水温と同じ温度として、蒸気圧量、日射量、雲量は室内の条件を与え、計算時間は 3 時間とした。スラグ条件は金山ら(2014)の論文¹⁾より CASE2(粒径 2.0cm, 空隙率 0.45)を与えた。スラグ層の位置は、水路横方向 1.2m から 1.7m の底層とした。また、スラグ層厚の大きさによるアルカリ溶出の比較のため、層厚 50cm, 20cm を使用した。

4. スラグからのアルカリ溶出挙動

4.1 pH 平面分布図(層厚 50cm)

スラグ層厚 50cm における pH の平面分布算出結果を図-2(a)(t=0min), 図-2(b)(t=10min)に示す。10 分後には海水の初期 pH8.23 が、pH8.40 近くまで増えており、スラグからアルカリが溶出していることがわかる。

4.2 pH 平面分布図(層厚 20cm)

スラグ層厚 20cm における pH の平面分布算出結果を図-3(a)(t=0min), 図-3(b)(t=10min)に示す。10 分後には海水の初期 pH8.23 が、pH8.30 近くまで増えており、スラグからアルカリが溶出していることがわかる。また、層厚 50cm よりも pH が低かった。

5. まとめ

pH 計算の結果、スラグ層厚 50cm とスラグ層厚 20cm を比較した場合、既往の研究結果と同様にスラグ層厚の厚い 50cm の方がアルカリ性が強くなった。このことから、スラグ層厚が大きい程アルカリ溶出量は多くなると考えられる。

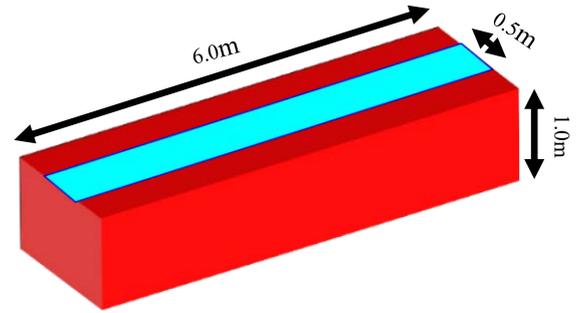


図-1 計算領域

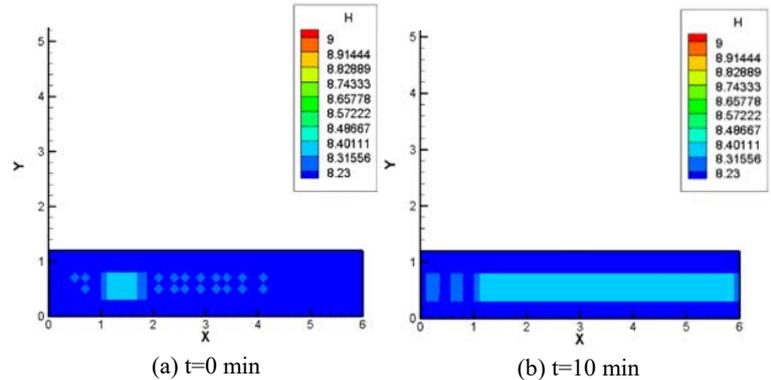


図-2 pH 平面分布図 (層厚 50cm)

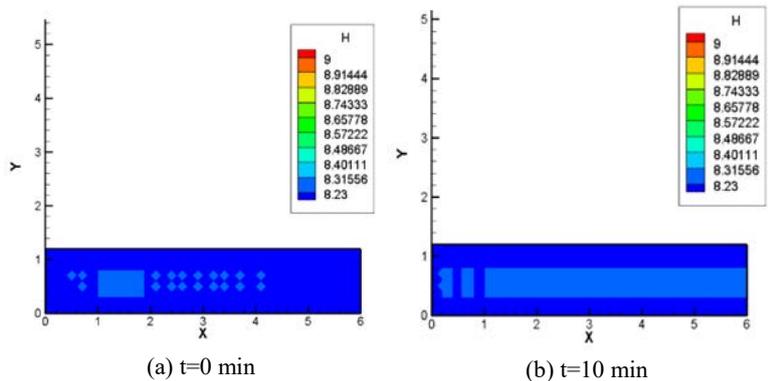


図-3 pH 平面分布図 (層厚 20cm)

参考文献

- 1) 金山進ほか: 海水中に積層された製鋼スラグからのアルカリ溶出に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, I_1152-I_1157, 2014.
- 2) 五十嵐学ほか: 海水の緩衝作用を考慮した三次元 pH シミュレーションモデル, pH 緩衝能の計算方法土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.
- 3) 宮崎哲史ほか: 海域における鉄鋼スラグ製品からのアルカリ溶出に関する大規模水槽実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.1042-1047, 2013