

## 技術論文

# pHシミュレーション技術を用いた鉄鋼スラグの土工利用におけるアルカリ流出のリスク評価

## Risk Assessment for Outflow of Alkaline Water from Iron & Steel Slag Used as Geo-materials with pH Simulation Technique

篠崎 晴彦\* 宮本 孝行  
Haruhiko SHINOZAKI Takayuki MIYAMOTO

## 抄 録

鉄鋼スラグは、土木材料として高強度・支持力特性を有しており、従来から道路用路盤材の他に、仮設道路、資材置場舗装材等に用いられてきた。一方、鉄鋼スラグは、アルカリ性を有するため、陸上で利用する場合、降雨浸透に伴う周辺へのアルカリ水流出への配慮が必要である。そこで、スラグの物理特性、アルカリ溶出特性、土壌のアルカリ吸着特性を考慮した移流分散解析により、長期のアルカリ流出リスク評価を行った。

## Abstract

Iron & Steel Slag has properties such as high strength and bearing capacity as geo-material, has been used for low cost pavement such as temporary work road and storage yard etc other than roadbed aggregate. On the other hand, slag is alkaline, so consideration or countermeasure for outflow of alkali water is very important. Long term risk simulation on diffusion of alkaline is conducted with convective dispersion analysis considering mechanical and alkali elution property of slag, absorption property of surrounding soil.

## 1. 緒 言

鉄鋼スラグは、締め固め特性が良好で高い支持力が得られることから、陸上において道路用路盤材 (JIS A 5015 規格) の他に、軟弱地盤上の仮設道路、資材置場などの無被覆での用途に利用されてきた。一方、スラグを無被覆で利用する場合、スラグに浸透した雨水はアルカリ性を呈するため、その流出防止対策が必要となる。そこで、既往の移流拡散解析プログラムにスラグの物理特性、アルカリ溶出特性 (溶出フラックス等)、周辺土壌のアルカリ吸着特性を評価し、陸上土木用途におけるアルカリ拡散のシミュレーションにより、リスク評価を行った。

## 2. 解析手法の概要

アルカリ影響範囲のシミュレーションは、“水の流れをシミュレートする浸透流解析”と“物質の流れをシミュレートする移流分散解析”について3次元移流拡散解析プログラム G-TRAN/3D<sup>®</sup>を用いて実行した。以下に解析フローと本プログラムの基本理論について示す。

## 2.1 解析のフロー

後述する浸透流方程式において濃度変化による密度変化がないとすると、浸透と移流分散は別々の問題として扱うことができる。シミュレーションでは、最初に浸透流解析により地盤内の水の圧力と流速分布を計算し、移流分散解析により流速分布に従って流れる化学物質の濃度分布を計算する。

## 2.2 各解析の支配方程式とパラメータ

## 2.2.1 浸透流解析

浸透流解析の支配方程式を式 (1) に示す。密度流がない場合の浸透流解析は、土中の微小要素を流出入する流体の質量保存則とダルシー則 (水頭と流速の関係式) を用いて以下のように導かれる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho K_r K_{ij}^s \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \rho K_r K_{i3}^s \right) + \rho q = \rho (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ : 流体の密度、 $K_r$ : 比透水係数 (飽和透水係数に対する不飽和透水係数の比) のテンソル、 $K_{ij}^s$ : 飽和透

\* 設備・保全技術センター 土木建築技術部 スラグ利用技術室 主幹 博士 (工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



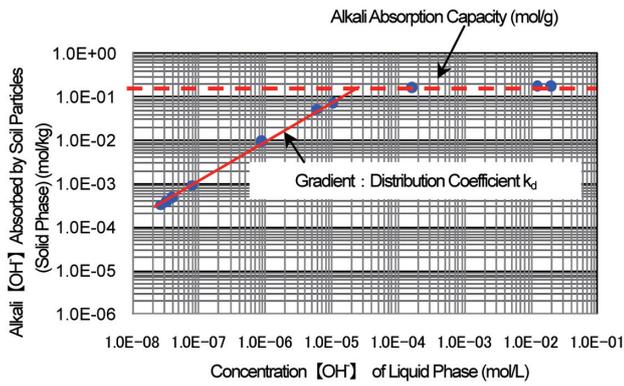


図1 土壌のアルカリ吸着試験における吸着平衡後の溶液濃度 (OH<sup>-</sup>) と土壌へのアルカリ吸着量 (OH<sup>-</sup>) の関係の一例

Example of relation of concentration [OH<sup>-</sup>] of liquid phase and OH<sup>-</sup> absorbed by soil particles in equilibrium by alkali absorption test

なくなった時点で、吸着現象が起こらない  $k_d=0$ ,  $R=1$  として以降の計算を行う。

源泉項  $Q_i$  は、スラグからの物質のフラックスを表し、指数関数あるいは、濃度固定 (例えば、pH 一定) などで与えている。

偏微分形式で表される浸透流方程式及び移流分散方程式は、複雑な形状の地盤領域の問題に対して直接解くことができない。そこで、浸透流方程式は、重み関数として形状関数を適用する Galerkin 法で近似化、有限要素法による定式化を行い、移流分散方程式は、移流と分散を EL 法で分離して、別々に近似化、有限要素法による定式化を行い解く。詳細は、既往の文献を参照されたい<sup>3,10)</sup>。

### 3. pHシミュレーション技術による解析事例

#### 3.1 解析モデルの概要

モデルを図2に示す。解析モデルは、幅5m厚さ0.25mの鉄鋼スラグによる無被覆仮設路盤と腐植土壌、粘性土土壌の1様地盤から構成される。地盤領域は、寸法の影響を避けるため、念のため、深さ50m幅1000mと大きくとった。年間降雨量は1800mmとし、そのうち50%がスラグ層に浸透し、直下の地盤に流れるものとした。解析期間は100年間とし、計算は1日単位で行い、降雨は便宜上年間降雨量を1日あたりに計算した量を連続的に与えた。スラグは、長期的に固化するため、透水係数の低下に伴い、降雨の浸透率も大きく低下していくものと想定されるが、これらの知見が十分でないため、安全を見て浸透率を一定に設定した。

また、地盤の地下水については、あらかじめ設定せず、浸透流解析より自然に地下水流を発生させた。地下水流を発生させるため、モデル、右側面(下流側)は、浸出面境界、モデル右側(上流側)及び下端部は、不透水境界とした。

表1に、解析パラメータの一覧を示す。ここで、土壌の

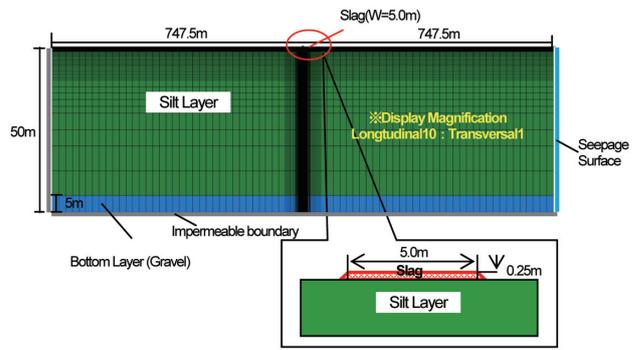


図2 解析モデル Simulation model

表1 解析パラメータ Simulation parameter

	Slag	Ground
Application site	Pavement	Original ground
Particle density (g/cm <sup>3</sup> )	3.3	2.7
Porosity ratio N	0.5	0.5
Coefficient of permeability (cm/s)	5×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-4</sup>
Longitudinal dispersion length (m)	0.5	0.5
Transverse dispersion length (m)	0.05	0.05
Alkali elute property (pH of void water)	0 year	12.3
	10 year	10
	50 year	11.8
	100 year	11.7
Maximum ability of alkali absorption (OH <sup>-</sup> mol/g)	-	1.0×10 <sup>-3</sup>

各パラメータは、ほぼプログラムのデフォルト値を採用した。尚、アルカリ吸着特性の中で、分配係数については、ほぼ同等のアルカリ吸着能力(最大アルカリ吸着量  $C_{max}$ )をもつ、土壌を用いたバッチ試験により、代表的な平衡時の溶液濃度に対する分配係数を求めてプログラムに与えている。一方、スラグの水分特性としての VG パラメータは、土柱法<sup>11)</sup>によりスラグを詰めた円筒に通水後、1日放置後の高さ方向の含水率を測定し、VG モデルでフィッティングさせて求めた。また、スラグの溶出特性は、カラムにスラグを詰めた試験体上部から蒸留水を連続通水させて、浸透水の pH を経時的に測定し、実験での累積通水液固比(累積通水量/スラグ重量)と pH の関係を求めた。実験での累積通水液固比を現場の累積通水液固比(降雨浸透量×経過年数/スラグ厚さ×密度)と同じとなるようにして、現場での経過年数に換算した。

浸透流解析結果として定常状態における地下水流速ベクトルを図3に示す。図より、ベクトルは鉛直下方向に卓越しており、原地盤のかなり下層に地下水面が形成されている。

この流速ベクトルに基づき、移流分散解析を行い、100年経過後のスラグ下層地盤内の間隙水中の OH<sup>-</sup> 濃度を pH に換算した分布図を図4に示す。図より、OH<sup>-</sup> イオンは、

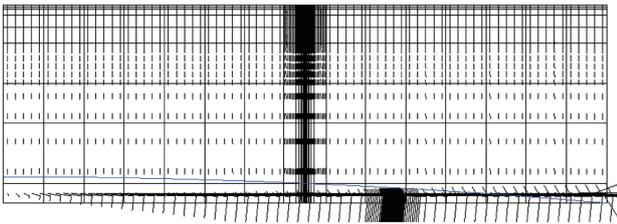


図3 浸透流解析結果  
(定常状態での地盤内の流速ベクトル分布)  
Result of infiltration flow analysis -distribution of the  
velocity of a flowing in ground at a steady state-

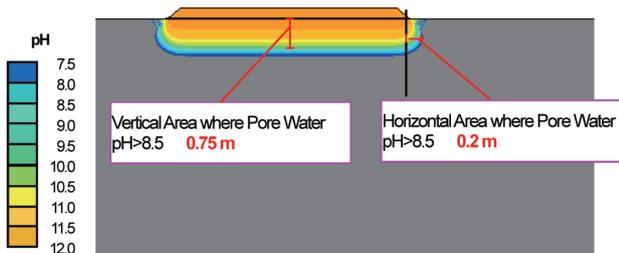


図4 移流分散解析結果(100年後の土層間隙水の pH 分布)  
Result of convective diffusion analysis -distribution of pH  
of pore water in ground after 100 year-

主に鉛直方向に拡散しており、最も範囲が大きいところで、約 0.75 m 程度であった。一方、水平方向にもある程度拡散している。これは、地下水流によりある程度流れに影響された結果である。このケースでは、下流方向にスラグ法尻から 0.2 m 程度となった。

尚、本シミュレーションでは、スラグ層の透水係数の低下に伴う降雨浸透率の低下の他、炭酸化の影響や土壤炭酸ガスの中和なども考慮していないため、安全側の評価になっているものと思われるが、今後の課題である。

#### 4. 結 言

鉄鋼スラグの陸上土木用途でのアルカリ水流出リスク低減のためのリスク評価、対策技術の評価を行う上で、今回紹介した pH シミュレーション技術は有用な手法であると考えられる。今後、長期経過した現場でのスラグ周辺地盤

のアルカリ拡散状況調査とシミュレーション予測の対比による精度向上を図り、鉄鋼スラグの陸上土木用途でのアルカリ流出安全性に努めたい。

#### 謝 辞

本シミュレーションのため、既存の浸透流、移流分散解析プログラムの改良等において、(独)国立環境研究所のご尽力を得た。ここに関係各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) (株)地層科学研究所: <http://www.geolab.jp/>
- 2) van Genuchten, M.T.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898 (1980)
- 3) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究. 土木学会論文集. No.511/III-30, 135-144 (1995)
- 4) Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media. America Elsevier, 1972, p. 605-612
- 5) 中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓: 土壤物理環境測定法. 東京大学出版会, 1995, p. 163
- 6) Gelhar, L.W.: Stochastic Subsurface Hydrology from Theory to Application. Water Resource Research. 22 (9), 135-145 (1986)
- 7) Fetter, C.W.: Contaminant Hydrogeology. Prentice Hall, 1999, p. 83
- 8) Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media. America Elsevier, 1972, p. 111-115
- 9) 大西有三監訳: 地下水の科学 I - 地下水の物理と化学 -. 1995, p. 49-50
- 10) 河野伊一郎, 西垣誠, 田中慎一: 飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象の有限要素法. 土木学会論文集. No.331, 133-141 (1983)
- 11) 例えば, 仙頭紀明, 海野寿康: 2008 年岩手・宮城内陸地震で崩壊した盛土斜面の水分状態と流動性の関係. 土木学会第 64 回年次学術講演論文集. III-158, 2009, p. 315-316



篠崎晴彦 Haruhiko SHINOZAKI  
設備・保全技術センター 土木建築技術部  
スラグ利用技術室 主幹 博士(工学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



宮本孝行 Takayuki MIYAMOTO  
スラグ・セメント事業推進部  
市場開拓室 主幹