# 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

#### 録

抄

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(JISA 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>1)</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。

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} \left( \rho K_{r} K_{ij}^{s} \frac{\partial \varphi}{\partial x_{j}} + \rho K_{r} K_{i3}^{s} \right) + \rho q = \rho \left( \beta S_{s} + C_{s} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$
(1)

ここに, ρ:流体の密度, K<sub>r</sub>: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<sub>ii</sub>: 飽和透

<sup>\*</sup> 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

水係数のテンソルで、以下に示される。

$$K_{ij}^{s} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}$$
(2)

ここに,*i*, *j* = 1, 2, 3(1:*x*, 2:*y*, 3:*z*, *xyz* 直交座標の各成分),  $K_{\beta}^{s}$ :飽和透水係数のテンソルの中のZ方向に関する部分で,  $k_{13}, k_{23}, k_{33}, \varphi$ :全水頭, q:流入量及び流出量,  $S_{s}$ :比貯 留係数,  $\beta$ :比貯留係数が有効か否かの係数(飽和時 $\beta$ =1, 不飽和時 $\beta$ =0),  $C_{s}$ :比水分容量。

比貯留係数*S*<sub>s</sub>は,非定常の地下水流動を評価する際に 必要とされるパラメータであり,単位水位低下が発生した 場合に,単位体積の間隙から絞り出される水量を示す。

比水分容量は、水頭 $\varphi$ の変化に対する体積含水率 $\theta$ の変化率で $d\theta/d\varphi$ となる。

水分特性曲線については, van Genuchten (VG) による 経験式<sup>2)</sup>を式 (3) に示す。

$$S_e\left(=\frac{\theta}{n}\right) = \left(\frac{1}{1+(\alpha\varphi)^n}\right)^{1-1/n}$$
(3)

ここに, S: 有効飽和度, n: 間隙率, α 及び n: VG パラメータ。

また、不飽和透水係数と飽和透水係数の比としての比透 水係数について、van Genuchten により次式で示されてい る<sup>2)</sup>。

$$k_{r} = \frac{k_{ij}}{k_{ij}^{s}} = Se^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^{m} \right]^{2}$$
(4)  
$$m = 1 - \frac{1}{m}$$

ここに, m, nは, 定数。

#### 2.2.2 移流分散解析

移流分散解析の支配方程式を式(5)<sup>3)</sup>に示す。移流拡散 解析で対象とする物質は水酸基イオン【OH】である。

$$R\theta\rho\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta\rho D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_j}\right) - \theta\rho V_i\frac{\partial c}{\partial x_i} - R\theta\rho\lambda c - Q_c$$
(5)

ここに, R:遅延係数,  $\theta$ :体積含水率,  $\rho$ :流体密度,  $D_{ij}$ : 分散テンソル, C:濃度,  $V_i$ :間隙内流速,  $\lambda$ :減衰定数,  $Q_i$ :源泉項。

分散テンソルは Bear によって次式により表されている 4。

$$D_{ij} = \alpha_t \|v\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{\|v\|} + D_m \tau \delta_{ij}$$
(6)

ここに、 $a_L$ :縦分散長、 $a_T$ :横分散長、 $v_i$ :間隙内流速ベクトル、 $D_m$ :分子拡散係数、 $\tau$ :屈曲率、||V||:実流速の絶対値、  $\delta_{ii}$ :クロネッカーのデルタ( $i = j : 1, i \neq j : 0$ )。

通常,分子拡散係数に対して流速が大きいため,分子拡 散の影響は無視しうる。縦分散長ならびに横分散長は,土 中などのように流速の不均一性や間隙の分布,間隙径の大 小によって,濃度分布の広がりを表現したものであり,移 流分散方程式では,この現象を濃度差によって物質が広が る拡散現象と等価に考え,分散テンソルとして扱っている。 流速方向の分散長を縦分散長,流速直角方向の分散長を横 分散長という。分散長は,地下水流速に比例する特性を有 することが示されており<sup>5</sup>,横分散長は,縦分散長の約1 /10程度である。

また,原位置トレーサー試験から,分散長は試験スケールに依存するという傾向が明らかになってきており,縦分散長は、物質移行距離の1/100~1の規模といわれている 6.7。

屈曲率τは,分子拡散係数を有効分子拡散係数として, 多孔質媒体中に適応するための修正項として与えられ,実際の流路長さL<sub>e</sub>に対する直線流路長Lの比で与えられる<sup>8</sup>。

$$\tau = \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \tag{7}$$

この場合屈曲率は、1以下の値となり、0.3~0.64の値が示されている?。

吸着は,化学的吸着,収着,イオン交換などにより溶質 が土粒子表面に付着する作用を含み物質の移動を遅らせる 効果がある。一般に地下水流速は,反応速度に対して遅く 線形吸着モデルを用いて評価される。線形吸着の場合吸着 量は,溶液の濃度に比例するとして,次式で表される。

C' = k<sub>d</sub>c (8)
 ここに, C': 土粒子の単位重量に対する吸着量, k<sub>d</sub>:分配係数,
 c: 濃度。

線形吸着モデルでは、分配係数 $k_a$ と遅延係数Rの関係は、 次式で与えられる。

$$\mathbf{R} = 1 + \frac{\theta}{\rho} k_d \tag{9}$$

ここに, R: 遅延係数,  $k_d$ : 飽和土に対する分配係数,  $\rho_d$ : 土の乾燥密度,  $\theta$ : 体積含水率。

分配係数 $k_a$ は、対象とする物質が、ある2つの相(本 検討では、土と間隙水)の接した系中で平衡状態にある場 合を対象として、各相の濃度比であり、シリアルバッチ試 験により求めることができる。具体的には、アルカリの問 題を扱う場合、土とアルカリ溶液(水酸化カルシウム溶液) を土の質量とアルカリ溶液の濃度、質量を種々変更して混 合、振とうし、振とう前後の溶液の pH 変化より、吸着後 平衡時の溶液濃度(mol/L)と土壌のアルカリ吸着量(mol/ kg)の関係における勾配から求めることができる(図1参 照)。

尚,図において,吸着平衡における溶液濃度がある程度 大きくなると,単位質量あたりの土のアルカリ吸着量が一 定値となっていく。このときの単位質量あたりの土のアル カリ吸着量をアルカリ吸着能力という。

また,分配係数 $k_a$ は吸着後の平衡時の溶液濃度により変化し,濃度が大きくなるにつれて小さくなる。また,遅延係数 $R \ge 1$ で,R = 1のときは,吸着が起こらないことを示す。

吸着した物質濃度の累積量が、アルカリ吸着能力に等し



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

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 壌の一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日当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	0 year	12.3	7
property	10 year	10	-
(pH of void	50 year	11.8	-
water)	100 year	11.7	-
Maximum ability of alkali		_	1.0×10=3
absorption (OH <sup>-</sup> mol/g)			1.0~10 *

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<sub>max</sub>) 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>111</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-濃度をpH に換算した分布図を図4に示す。図より,OH-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 ateady atate-



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0.75m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0.2m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,炭酸化の影響や土壌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。

#### 参照文献

- 1) (株)地層科学研究所: http://www.geolab.jp/
- 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)
- 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
- Gelhar, L.W.: Stochastic Subsurface Hydrology from Theory to Application. Water Resource Research. 22 (9), 135-145 (1986)
- Fetter, C.W.: Contaminant Hydrogeology. Prentice Hall, 1999, p. 83
- 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
- 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