

## 微量物質の造粒石炭灰からの溶出と地盤中での移動の環境影響評価

山口大学大学院 学生会員 ○西原浩一郎 正会員 吉本憲正

山口大学大学院 正会員 兵動正幸 中田幸男 村田秀一

宇部興産(株) 本郷孝 大中昭 虫合一浩

## 1. はじめに

石炭灰の有効利用技術の一つとして、石炭灰に固化剤を添加し、砂礫大に造粒化した造粒石炭灰を地盤材料として利用する方法が提案されている。すでに力学特性の面からは様々な試験を行い、地盤材料として有用であることが確認されているが、造粒石炭灰のような微量物質を含む材料の地盤工学的な有効利用には、その材料からの微量物質溶出挙動の把握またその微量物質が地盤中でどのような移動挙動を示すのか把握することが重要である。そこで本研究では、造粒石炭灰を地盤材料として利用することを想定し溶出試験を行い、得られた結果から移流分散解析を行い微量物質の地盤中での移動挙動を調べた。

## 2. 実験概要

本研究では、溶出した微量物質の移流分散解析を行い、地盤中での移動挙動を調べることを目的としているので、解析に必要な移流分散パラメータを同定するために定水位条件下でカラム試験を行った。用いた試料は山口県下関より採取したマサ土(S-Masado)、石炭灰および造粒石炭灰である。造粒石炭灰は石炭灰：セメント：添加剤=83：5：12の配合で製造プラントにより製造された試料である。養生条件は含水比40～50%で養生されたものであり、細粒分が約14%のものである。また、表-1に環境庁告示第46号法による溶出試験結果を示す。これにより、本研究で用いた造粒石炭灰は土壤環境基準を満たす材料であることが分かる。供試体は、S-Masadoと造粒石炭灰は2mm以下に粒度調整し締固め法によりそれぞれ乾燥密度 $\rho_d=1.605\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=0.876\text{g/cm}^3$ となるように作製した。石炭灰は $\rho_d=0.900\text{g/cm}^3$ となるように空中落下法で作製した。S-Masadoでのカラム試験は後で述べる微量物質の地盤中での移動挙動を表現するためのパラメータを同定するために行い、造粒石炭灰および石炭灰でのカラム試験は本研究ではホウ素(B)と六価クロム(Cr(VI))に着目したのでBとCr(VI)の移流分散解析における源泉の入力濃度を与えるために行った。

## 3. 自然地盤による微量物質の緩衝作用とその移動

微量物質の地盤中での移動挙動を表現するためのパラメータには分散特性(分散長 $\alpha_L$ )および遅延特性(分配係数 $K_d$ )がある。これらをそれぞれ同定するため非吸着性物質であるNaCl溶液および模擬液によるトレーサ試験を実施した。実験は $\phi 5 \times h 20\text{ cm}$ と $\phi 10 \times h 40\text{ cm}$ のカラムを用い、動水勾配 $i$ を0.5, 2.5の2種類の条件下で行った。なお模擬液とは、石炭灰に含まれる様々な微量物質を石炭灰と水を1:5の固液比でバッチ形式により溶出して得られたものであり、微量物質を高濃度に含有するpH=12程度の高アルカリ溶液である。まず1%NaClトレーサ試験によるS-Masadoの $\alpha_L$ の同定について述べる。これは、移流分散解析による解析解により、 $\alpha_L$ に関する破過曲線のパラメトリック・スタディを実施し、NaClトレーサ試験より得られる実測破過曲線とのフィッティングにより同定した。解析に用いた支配方程式を以下に示す。

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad \left( D = \alpha_L v, R = \left( 1 + \frac{\rho_d}{n_e} K_d \right) \right) \quad (1)$$

表-1 環境庁告示第46号法による溶出試験結果

| 試料名   | 造粒石炭灰      | 土壤環境基準 |
|-------|------------|--------|
| 六価クロム | N.D(<0.01) | 0.05   |
| ヒ素    | 0.003      | 0.01   |
| ホウ素   | 0.2        | 1      |
| セレン   | 0.007      | 0.01   |
| pH    | 10.9       | -      |

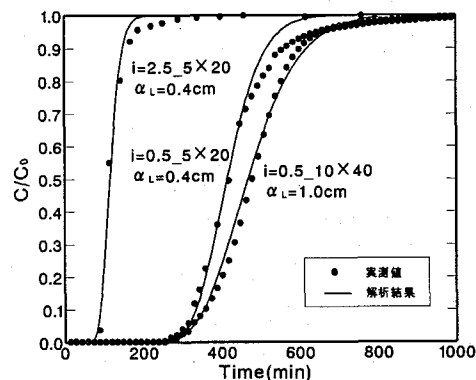


図-1 分散長の同定(S-masado)

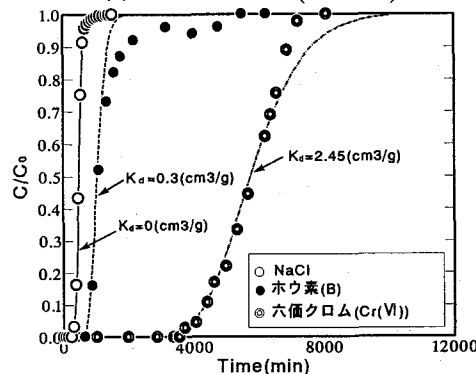


図-2 分配係数の同定結果(B, Cr(VI))

なお、 $R$ :遅延係数[-],  $t$ :時間[T],  $D$ :分散係数[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>],  $v$ :実流速[LT<sup>-1</sup>],  $K_d$ :分配係数[M<sup>-1</sup>L<sup>3</sup>],  $\rho_d$ :土の乾燥密度[ML<sup>-3</sup>],  $n_e$ :有効間隙率[-],  $\alpha_L$ :分散長[L]である. 式(1)の左辺第一項は遅延項, 右辺第一項は分散項, 右辺第二項は移流項を表している.  $R$  は地盤内での吸着の効果,  $D$  は地盤内での分散の効果を表したものである. 図-1に得られたNaClの破過曲線の結果を示す. 図中のプロットは実測値であり, 実線は遅延効果がないと想定した場合の解析解である. この図から得られた $\alpha_L$ はS-Masadoの場合供試体スケールに依存していることがわかる. 次に図-2にB, Cr(VI)に関する $K_d$ の同定結果を示す. これは $\alpha_L$ と模擬液トレーサ試験の結果を踏まえ, ここでは飽和地盤内における微量物質の移動を定量的に評価するために必要な遅延特性を表現するパラメータ $K_d$ の同定を行った. 図-1同様に図中のプロットは実測値であり, 実線は解析解である. なお, $\alpha_L$ は先に求めた $\alpha_L=1.0\text{cm}$ を用い, 遅延特性については, 線形並行吸着モデルを適用した. 実験結果からBよりCr(VI)の方が地盤に吸着されやすいことがわかった. また図より解析結果は後半若干誤差が出るものの実測値を概ね表現しているといえる.

#### 4. 移流分散解析による解析結果

カラム試験やトレーサ一試験の結果より, 造粒石炭灰を飽和地盤への埋戻し材として利用した事例を想定し, 利用開始から100年間に渡るB, Cr(VI)の溶出挙動および地盤内

での溶出挙動を汎用の浸透流解析(MODFLOW)および移流分散解析(MT3D)を用いて推定した. 解析に用いた鉛直二次元断面(単位奥行き)を図-3に示す. 解析手法の説明について以下に示す. 1) 造粒石炭灰は解析対象断面の中心部分に幅3m, 深さ3m単位奥行き1mの範囲で埋め戻した場合を想定し, 周辺地盤は飽和されたS-masadoが存在するとした. 2) 解析では, 造粒石炭灰からのB, Cr(VI)の汚染分布を移流分散解析より求めた. 移流分散解析には「MT3D」を使用し, 解析に使用したパラメータを表-2に示す. なお, $\alpha_L$ と $K_d$ は前章で得られたものを使用した. なお $\alpha_L$ については観測スケールに依存する<sup>1)</sup>ことから解析対象断面に併せて1mとした. また, B, Cr(VI)の解析の中での源泉の時間的濃度変化を図-4, 5の実線で与えた. これはカラム試験より得られた結果を基に, 各固液比ごとの濃度を年数に変え解析条件として与えた. また, 同図に解析による観測点での濃度変化を破線で示した. 源泉の濃度変化が急激に起こっているにも係わらず, Cr(VI)においては, 地盤へ吸着されやすいため $K_d$ が高く, そのため観測点での濃度変化は緩やかに起こることがわかる. またB, Cr(VI)どちらも観測点での濃度は源泉濃度よりも低いことがわかる.

#### 5. まとめ

本研究では, 溶出した微量物質の地盤中での移動挙動を調べることを目的に, 室内カラム試験を実施し, 移流分散解析に必要なパラメータを同定した. また, B, Cr(VI)の飽和地盤内での溶出挙動を移流分散解析により推定した. 実験結果よりCr(VI)はBよりも地盤へ吸着されやすいことがわかった. B, Cr(VI)の吸着特性は, 線形平衡吸着モデルを用いることで概ね表現できた. また, B, Cr(VI)のどちらも観測点での濃度は源泉濃度よりも低く, Cr(VI)においては, $K_d$ が高いために観測点での濃度変化は緩やかに起こることがわかった.

(参考文献) 1) 中村充利ほか: 地下水中の物質移行特性の評価手法について, 第2回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 25-30, 1996.

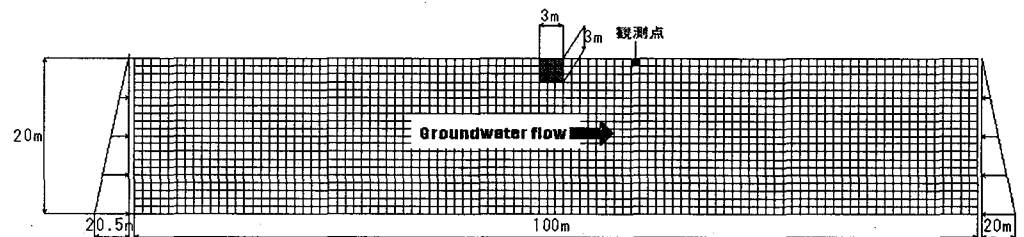


図-3 解析断面

表-2 数値解析に使用したパラメータ

| パラメータ | 単位                 | Cr(VI)                | B                     |
|-------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 動水勾配  | -                  | 0.5                   | 2                     |
| 透水係数  | cm/min             | $5.78 \times 10^{-2}$ | $5.67 \times 10^{-2}$ |
| 有効間隙率 | -                  | 0.3257                | 0.3257                |
| 線分散長  | cm                 | 1                     | 1                     |
| 土粒子密度 | g/cm <sup>3</sup>  | 1.609                 | 1.633                 |
| 分配係数  | cm <sup>3</sup> /g | 2.45                  | 0.3                   |

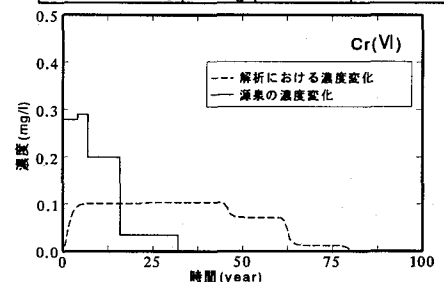


図-4 源泉および解析結果の濃度変化

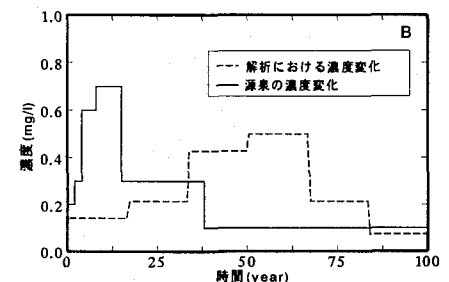


図-5 源泉および解析結果の濃度変化