トンネル掘削ずりを用いた砒素の不飽和カラム溶出試験

(株)奥村組　正会員　岩本容昭　(株)奥村組　正会員　大塚義一
(株)奥村組　正会員　太田博光　(株)奥村組　正会員○倉品　悠
(株)奥村組　　白石祐彰　(株)奥村組　正会員　清水祐也
(株)ハイドロ総合技術研究所　正会員　森田修二　岩手大学　正会員　大河原正文

１．はじめに

自然由来の重金属類を含むトンネル掘削ずりの適正な処分場の設計・施工のためには，掘削ずりからの重金属類の溶出特性を把握する必要がある．岩手県の北上高地を縦断する幹線道路となる押角トンネルの工事においても自然由来の重金属類を含む掘削ずりの発生が予想されたため，現地調査や浸出水の砒素濃度のモニタリングを実施[1)]して、ベントナイト混合土によって封じ込め措置をした．本研究では，砒素を含む押角トンネルの掘削ずりを用いて、現地を再現するためにカラム溶出試験を実施した．現地の処分場で発生しうる溶出量を，カラム試験で模擬して推定することで，遮水層の層厚など処分場の適正な設計に生かすことを目的としている．また，砒素の溶出量を定式化し，移流拡散モデルを構築して解析的な検証も行ったので，その成果について報告する．なお，解析には地盤解析ソフト FEAST を用いた．

２．カラム溶出試験の概要

砒素溶出量を定式化した溶出パラメータを評価するために，浸透条件と砒素濃度の相関関係を求めることを目的とした．**図-1** にカラム溶出試験装置を示す。直径 30cm のカラムに高さ 100cm の掘削ずりを充てんした．実際の掘削ずり処分場の含水状態を模擬して，不飽和での実験を行うために，掘削ずりの上部から噴霧装置で 100mL/min の注水を均等に行い，底部からの浸出水を集水し，浸出流量，砒素濃度，電気伝導度（EC）および水温を測定した．測定時間は 5 時間で，浸出水は 30 分ごとに試料瓶に保管した後に，水質分析を行った．浸出水の流量は転倒枡流量計（ウイジン社 UIZ-TB050）で測定した.また，カラム中の体積含水率とサクションは土壌水分計（Delta-T 社 プロファイルプローブ PR2/6）と水ポテンシャルセンサー（DECAGON 社 MPS-2）で測定し，不飽和浸透特性を原位置不飽和透水試験[2)]と同様の手順で測定した．

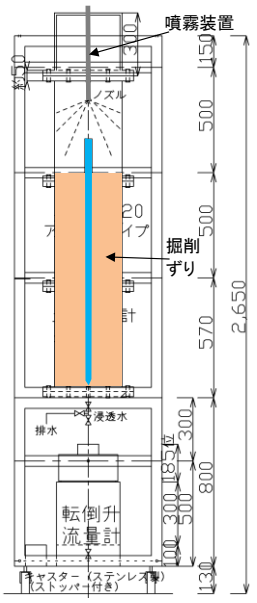

図-1　カラム溶出試験装置

３．カラム試験に使用した試料

図-3 に押角トンネルの土捨て場から採取した掘削ずり約 1m^3 の粒度試験の結果を示す.均等係数はUc=18.9、曲率係数はUc'＝1.16であり、粒度分布が良いという分類となる．今回は中央粒径付近（9.5mm～19mm）のずりを用いた．**表-1** には掘削ずりの砒素の溶出試験の結果を示す．現地で採取した試料（1m^3×3 袋）を環告 18 号で分析した結果で、N=3 の平均値である．

表-1　溶出量試験と分析結果

	砒素及びその化合物(mg/L)	pH	電位伝導度(mS/m)
No.1	0.017	8.3	7.7
No.2	0.016	8.7	6.4
No.3	0.018	8.7	6.7

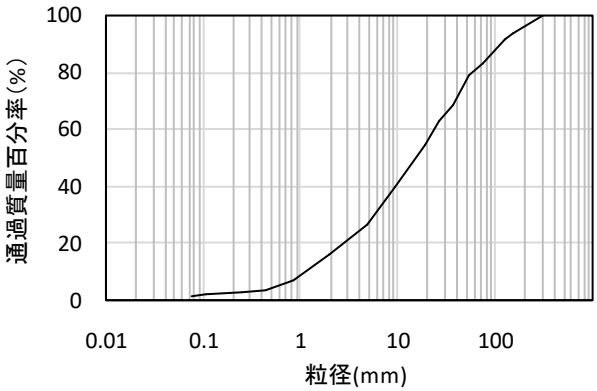

図-2　掘削ずりの粒径加積曲線

キーワード：掘削ずり，カラム溶出試験，砒素，不飽和浸透流
連絡先：〒108-8381　東京都港区芝 5-6-1　（株）奥村組　倉品　悠　TEL 03-5427-8518

© Japan Society of Civil Engineers

4．不飽和浸透水のカラム試験結果

図-3 にはカラム試験による体積含水率の測定結果を示す．掘削ずりの天端から 2.5cm，22.5cm，42 .5cm，82.5cm の測定結果を示している．ほぼ 60 分経過後には，全測点で 0. 05～0.06 で安定した含水率となっている．**図-4** にはサクション（GL-12.5cm）と浸出水の流量の変化を示す．約 15 分後から下端から浸出が始まり 60 分後から一定値（100mL/min）を示し定常状態にある．この程度の注水流量では，上端から下端まで均等に僅かな含水率で定常状態になることが分かる．

一方，サクションの値は漸増しており，測定値が安定するのに時間を要していると考えられる．また，実験終了後にはカラムに水を充填させて重量を測定し，ずりの間隙率（n=0.462）と比重（ρ=2.73g/cm^3）を算定した．

表-2 には、原位置不飽和透水試験[2]の手順で同定した透水係数と VG モデルの不飽和パラメータを示す．

表-2 飽和透水係数と不飽和パラメータ

k_0 (10^{-1}cm/s)	n	m	α	θ_r	θ_s
1.67	4	0.75	5	0.01	0.40

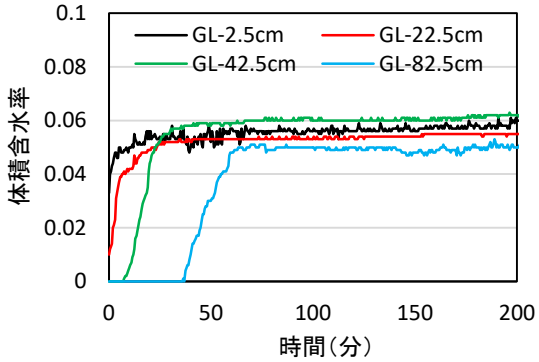

図-3 体積含水率の変化

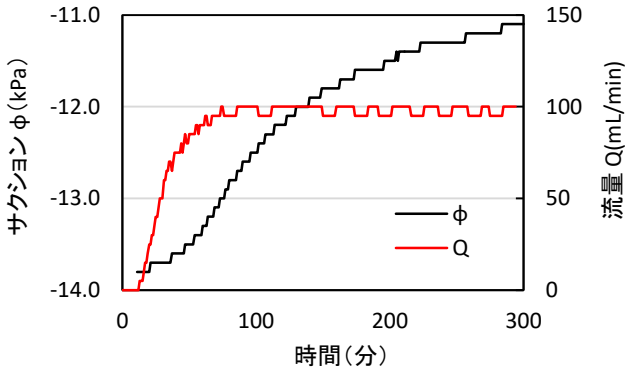

図-4 サクションと浸出流量の変化

5．カラム試験での砒素濃度の変化と定式化

図-5 には浸出水の砒素濃度と電気伝導度の変化を示す．砒素濃度は実験値と解析値を示す。解析値は式(1)の移流拡散方程式で，砒素濃度を式(2)と式(3)で定式化した．

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u_x\frac{\partial C}{\partial x}+u_y\frac{\partial C}{\partial y}+u_z\frac{\partial C}{\partial z}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)-q=0 \qquad (1)$$

$$q=q_a\times a\times(\theta-b\times\theta_r) \qquad (2)$$

$$q_a=q_b\times\left(1-\frac{\Sigma q}{q_{max}}\right) \qquad (3)$$

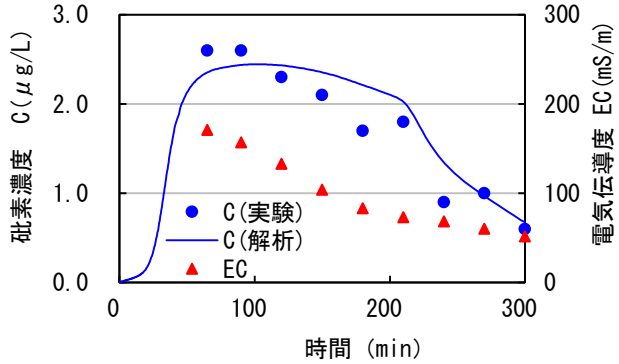

図-5 砒素の溶出量と EC の変化

表-3 溶出パラメータ

q_b (mg/L/day)	q_{max} (mg/L)	a	b	θ_r
0.008	0.008	0.8	0.5	0.05

ここで，Cは砒素濃度，uは流速，Dは分散係数，qは砒素の溶出量，θは体積含水率，θ_rは残留体積含水率，q_bは溶出試験で求められる溶出量，q_{max}は自然流下状態での最大溶出可能量，a, b は実験定数である．

表-3 には同定した溶出パラメータを示す．式(2)は体積含水率に比例して溶出すること，式(3)は自然流下の条件では一定量(q_{max})以上には溶出しないと仮定した．解析によって概ね実験値が再現できている．

6．あとがき

本研究では，現地の掘削ずりを用いたカラム溶出試験を実施し，解析で再現するための溶出パラメータを同定した．今後はパターンを変えたカラム試験を行い、砒素溶出量の変化をモデル化するための検証を続ける予定である．最後に，実験では岩手大学技術部の齊藤剛技官に多大なご支援を頂いたことに感謝の意を表します．

[参考文献]

1) 岩本容昭，太田博光，倉品　悠，長　千佳，清水祐也，森田修二，大河原正文：山岳トンネル掘削ずり処分場内の重金属の挙動把握に関する研究，地盤工学ジャーナル，Vol.15 No.1（ 2020 年 1 月号 ）

2) 森田修二，今泉和俊，三澤孝史：注水圧力制御による原位置不飽和透水試験法，土木学会論文集 C（地圏工学），VOL.73，No.1，pp.39-44，2017

© Japan Society of Civil Engineers