

7.3 環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究①

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ

（特命事項担当、地質）

研究担当者：阿南修司・品川俊介

【要旨】

ハザード評価に関して、盛土内部環境を模擬した試験方法として大型カラム試験装置の約 2 年間の観測結果をとりまとめた。浸出水中の重金属等について、時間の経過による明瞭な濃度の低下は認められなかった。またカラム内部の酸素濃度は降雨に伴って低下し、また夏に低く、冬に高い季節変動が認められた。そして酸素濃度の変化が浸出水の砒素濃度と関係している可能性があることがわかった。

対策工法に関して、吸着層工法の設計に関する基礎実験として、土の水みち形成実験を実施した。蛍光染料を土に浸透させた後に、土を切断して紫外線ライト下で断面の写真撮影を行ったところ、蛍光強度の濃淡が観察された。蛍光染料は細粒の粘土粒子に強く吸着されること、また、透水により細粒分の移動が生じていることが明らかになった。蛍光強度の濃淡の発現要因を解明するため、実験後の試料の粒度分析や含水率の測定などを行い、検討する必要があることがわかった。

キーワード：自然由来 重金属等 大型カラム試験 吸着層工法 水みち形成実験

1. はじめに

自然由来重金属等含有岩石・土壌や人為汚染土壌、廃棄物混じり土（以下、「要対策土」）に遭遇する事例が顕在化する中、平成 22 年に改正土壌汚染対策法が施行され、自然・人為の由来を問わず要対策土へのより厳格な対応が求められている。このような背景から、工事区域内における要対策土の有効利用に対するニーズは大きい。

有効利用の促進のためには、土壌汚染対策法への対応に加え、適切なハザード及びリスク評価技術を確立する必要がある。また、要対策土への対策技術について、技術基準が未整備の工法がほとんどで、設計・施工・維持管理の指針が必要である。

本研究では、環境安全性を確保しながら建設発生土の有効利用を進めていく技術の提案を通じて低環境負荷を実現することを目的としている。

本年度は、ハザード評価に関して、盛土内部環境を模擬した試験方法である、大型カラム試験装置による約 2 年間の観測結果の整理を行った。

対策工法に関しては、吸着層工法の設計に関する基礎実験として、土の水みち形成実験を実施し、水みちの把握手法について検討を行った。

2. 大型カラム試験

2.1 実験の目的

これまで、各種岩石について土研式雨水曝露試験を実施し、重金属等の長期的な溶出傾向を把握してきたが、実際の盛土構造物中での岩石からの重金属等の溶出特性を推定する上ではいくつかの課題がある。

その一つは、盛土内と土研式雨水曝露試験とは重金属等の溶出特性を支配する環境条件が大きく異なる可能性があることである。特に盛土内の酸化還元状態を把握する目的で実大盛土実験を実施したが、盛土浸透水の回収の目的で設置した盛土底面の排水材から盛土内への空気の流入の疑いがあることがわかった。実大盛土実験の実施には多大な費用がかかることから、盛土と同程度の深さを持つ大型カラムを屋外に構築し、内部環境、浸出水量・水質の観測・分析を行っている。

実際の盛土構造物中での岩石からの重金属等の溶出特性を推定する上でのもう一つの課題は、浸出水の重金属等の濃度が浸透路長にどの程度依存するかについての知見がないことである。そこで、大型カラムの長さを変えた実験も実施している。

2.2 実験方法

直径 60cm の塩ビ管（1.3～3.05m）に底板、排水管を取り付けて大型カラムとし、排水管には雨量計を改



図-1 大型カラム試験装置

表-1 各カラムの仕様

	カラム1	カラム2	カラム3	カラム4	カラム5
カラム長	3.05m	3.05m	2.55m	2.55m	1.30m
表層	芝+ローム 0.5m	芝+山砂 0.5m	芝	芝	芝
ずり	2.5m	2.5m	2.5m	2.5m	1.25m
排水層	0.05m	0.05m	0.05m	0.05m	0.05m
観測項目	浸出水量	浸出水量	浸出水量	浸出水量	浸出水量
	水質	水質	水質	水質	水質
	酸素濃度	酸素濃度	酸素濃度	酸素濃度	
	土壌水分	土壌水分	土壌水分	土壌水分	
	温度	温度	温度	温度	
	電気伝導率	電気伝導率	電気伝導率	電気伝導率	
その他				1.25m潜水	

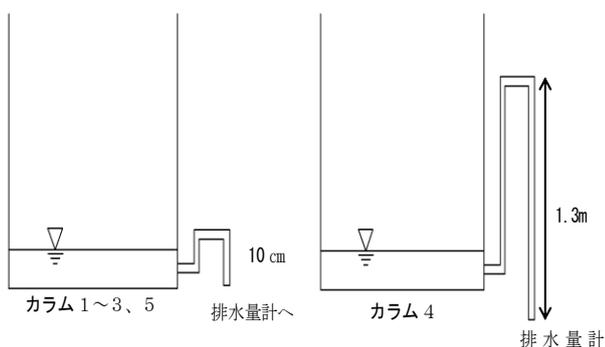


図-2 排水管からの空気流入対策

カラム 4 は潜水条件を想定

造した排水量計および、排水（浸出水）回収用のポリタンク（20L）を接続した。装置の外観を図-1、各カラムの仕様を表-1 に示す。なお、各カラムの排水管からの空気流入対策として、排水管の形状を工夫し、底面に水がわずかにたまる構造とした。（図-2）

本装置を土木研究所構内の屋外に据え付け、岩石の掘削ずり試料(上総層群笠森層・砂質シルト)をほぼ一定の密度になるよう 15cm ごとに人力で締め固めながら大型カラム内に充填した。試料は含水比が約 35%で湿潤密度を約 1.63g/cm³とした。また、カラム 1 から 4 については、酸素濃度計と土壌水分計、温度計、電気伝導率計を 50cm おきに設置した。

カラムは 5 つ製作し、お互い比較・分析できるよう

2.5m 充填した基本的な形状とした。底部には排水材を入れ、地下水はほとんどない条件（5cm 程度）とした。カラム 1 およびカラム 2 は、表面にそれぞれ、ローム 50cm、山砂 50cm を覆土し、覆土条件による内部環境や浸出水量・水質の違いを把握する目的で製作した。

カラム 4 は、地下水位がカラム長の半分（125cm）まで存在する条件とした。

カラム 5 は、カラム長をカラム 3 の半分（125cm）とした。

2.3 実験結果

実験は 2012 年 6 月 13 日より開始し、現在も実験を継続中である。以下に、2014 年 3 月 18 日までの約 640 日間の実験結果を整理する。

2.3.1 浸出水量

図-3 に浸出水量の時間変化と雨量との関係を示す。各カラムは初通水までの時間がそれぞれ異なっていたものの、その後の浸出率（実験開始より 30 日ごとに、その期間の浸出水量を雨量で割った値）には大きな違いはなく、カラム 1~4 は 60~70%、カラム 5 は 80% であった（図-4）。

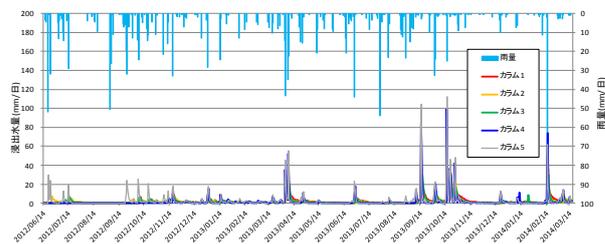


図-3 浸出水量と雨量との関係

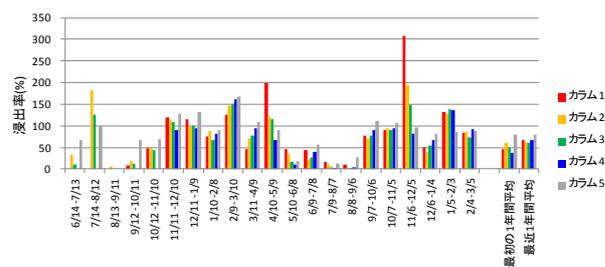


図-4 各カラムの浸出率の変化

実験開始より 30 日ごと浸出水量を雨量で割った値

2.3.2 酸素濃度

カラム 1 から 4 内に設置した酸素濃度の計測結果と雨量との関係を図-5 に示す。いずれの結果にも共通することは、1)深部ほど酸素濃度が低い、2)夏に酸素濃度が低く、冬に高い季節変動が見られる、3)降雨に反応して酸素濃度が低下しているように見えることである。

酸素濃度が降雨浸透時に低下する現象は、水が供給

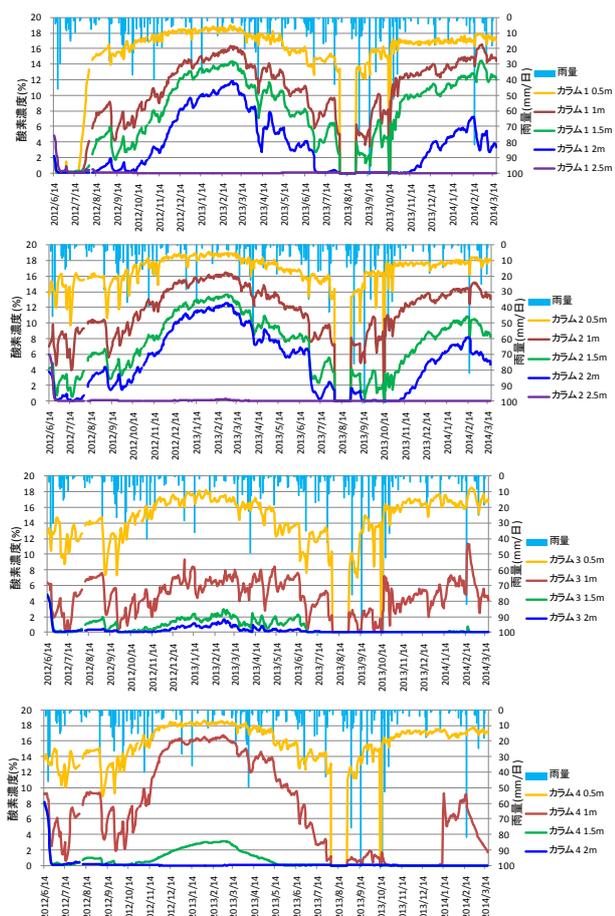


図5 酸素濃度と雨量との関係

されることによってカラム内部で酸素が消費される反応（たとえば鉱物と水との化学反応）が起こっていると推測される。

2.3.3 浸出水の化学分析

浸出水の重金属等濃度で地下水環境基準を継続して超過したものはふっ素のみであった。ここではふっ素のほか、比較的濃度の高い砒素、および黄鉄鉱の酸化反応時に溶出する硫酸イオンと硫酸を中和するカルシウムイオンの分析結果を図-6に示す。

砒素濃度については夏場にやや高めに推移している。これはカラム内部の酸素が消費されている時期と一致する。砒素は還元的な環境では移動しやすくなることが知られているが、それと関係している可能性がある。また、時間とともに低減する傾向は見られない。

ふっ素濃度は、若干の増減があるものの、時間とともに大幅な低減は起こっていない。

硫酸イオン濃度が高い値を示しており、同時にカルシウムイオン濃度が高いことから、黄鉄鉱の酸化による分解反応が起こっている可能性があると考えられる。

カラム長が浸出水の重金属等濃度にどの程度影響するかを検討する目的で、カラム3とカラム5の分析

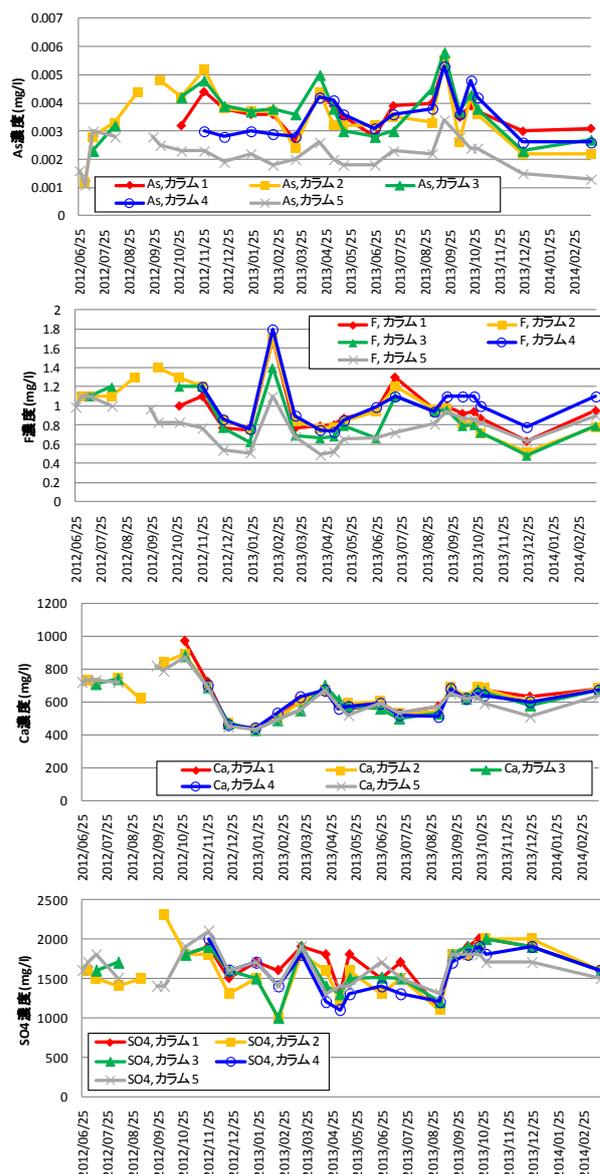


図6 浸出水の化学分析結果（砒素、ふっ素、カルシウムイオン、硫酸イオン）

結果を比較する。両者は基本的に同じ材料・方法で構築されているが、長さがそれぞれ2.5mと1.25mとしたものである。いくつかの成分について比較を行った（図-7）。その結果、砒素はカラム長が2倍になったときに濃度が約2倍になっているが、その他の元素については0.8倍から1.5倍程度でカラム長と濃度との関係はあまりないと考えられた。ただし、ほう素および塩化物イオンについては1年半程度ないしは1年弱経過したあたりから1.5倍を超える程度になっている。これはカラム5のほう素および塩化物濃度が徐々に低下していることによる。

カラム長が長いと砒素濃度が大きくなる原因としては、24年度に考察したように、還元領域の拡大と還元状態での砒素の移動性が大きくなることから、単純

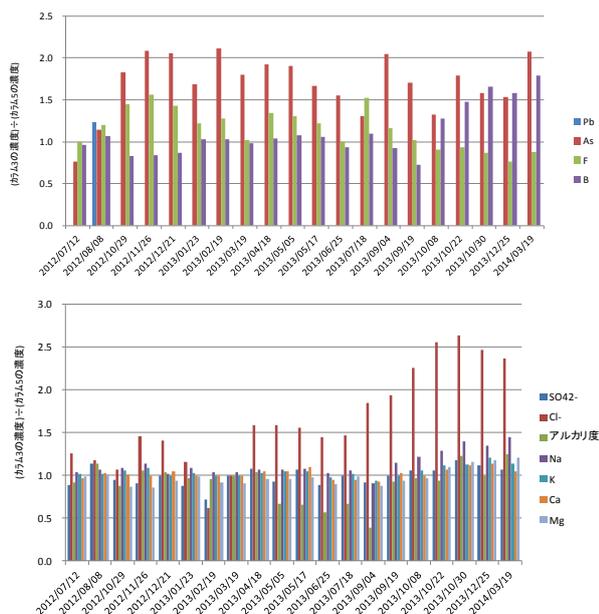


図-7 カラム5とカラム3の浸出水の濃度比
(上:重金属等、下:その他成分)

に接触機会がふえることによるのではなく、内部環境の違いによる可能性が高いと考えられる。

3. 吸着層の設計に関わる土の水みち形成実験

3.1 実験の目的

吸着層工法では、吸着層母材として土質材料が用いられる。工法の設計にあたり、吸着層母材としていかなる性状の土を用いるかは、吸着層が機能するかどうかに関わる非常に重要な要素であるにもかかわらず詳しい検討結果がなく、設計上支障がある。具体的には、水みちの発生が起これば、投入した吸着資材の一部しか反応に寄与しないことになる。また、透水性が高すぎると吸着資材と浸透水との接触時間が短くなり、吸着が不十分なまま環境中へ浸透水が放出されることになる。

今年度は、昨年度に実施した水みちの形成実験を元に、若干の仕様の変更を行って実験を実施した。

3.2 昨年度実施した予備実験の方法と結果

図-8に示すような水みち形成実験用土槽を製作した。土槽本体はアクリル製で、土槽に充填した土を3cmごとにスライスして試料採取や観察が可能な構造とした。また、土槽にできるだけ均等に水を浸透させるため、土槽上面の5cm四方に1点ずつ、計36点より輸液セットで一定量の水を浸透させられるようにした。

予察的な実験として土槽に山砂を充填し、蛍光染料であるフルオレセイン溶液(濃度1/100)を各輸液セットに0.1Lずつ、計3.6Lずつ入れ、各輸液セットからおおむね3mL/分の速度で土槽に一斉に供給した。

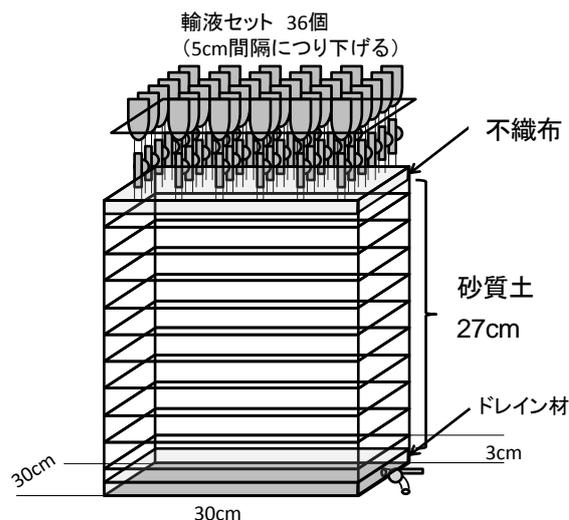


図-8 水みち形成実験装置(予備実験)

この操作を1日1回ずつ、計5回行い、浸透量は合計200mm (200mL/cm²)とした。

浸透操作が終了した後、次の要領で試料の写真撮影を行った。

- 1) 土槽を暗室に持ち込み、土槽の側面にワイヤーを挿入し、試料を3cm厚で切断
- 2) 切断した試料表面をへらで整形
- 3) 試料表面に紫外線ライト(蛍光灯)を照射し、デジタルカメラで写真撮影
- 4) 1~3を深さ方向に9断面実施

1回目の浸透の結果、底面からの排水は透明に近い状態であった。すなわち、蛍光染料は土粒子に吸着された。2回目以降の排水は蛍光染料の橙色を呈していた。

試料断面の写真を図-9に示す。表層は、滴下位置(格子点)に対応して強く発色する点が認められる。深度3cmから15cmまでは比較的均質に見えるが写真の上部でやや発色が弱い。18cm以深については濃淡がやや目立つ。特に24cm、27cmは濃淡が著しい。写真を詳しく見てみると、灰色ないしは黒っぽく見える点が無数に見えるほか、強く発色する場所がある。灰色ないし黒っぽく見える点も強く発色する点も凝灰質の粘土粒子のようである。たとえば深度21cmの左上部分の拡大写真(図-10)をみると、写真上部に強く発色する部分があり、その中心に灰色部分が存在する。これは凝灰質粘土の周辺および粘土粒子の途中まで蛍光染料が浸透、吸着しているものの、粘土粒子の中心部には達せず、灰色に写っているものと思われる。粘土粒子は蛍光染料を強く吸着するが、粒子の内部に水が浸透した部分と浸透しなかった部分が存在するも

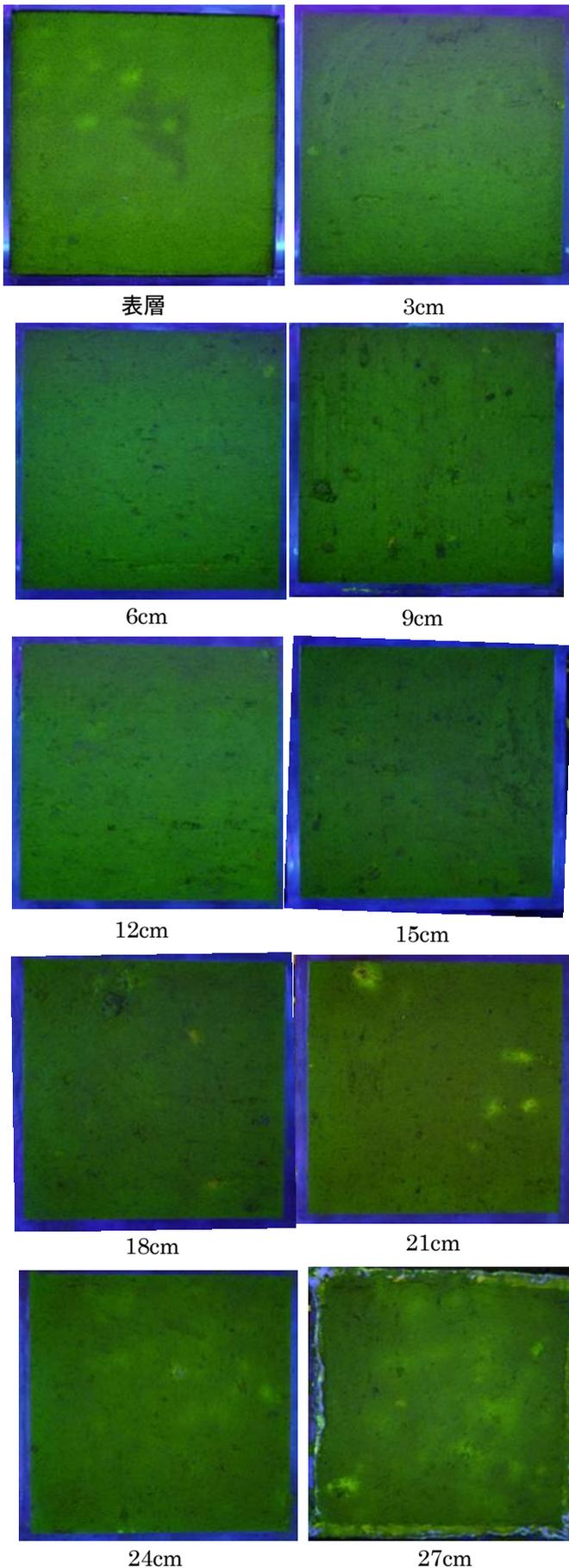


図-9 試料断面の写真（予備実験）

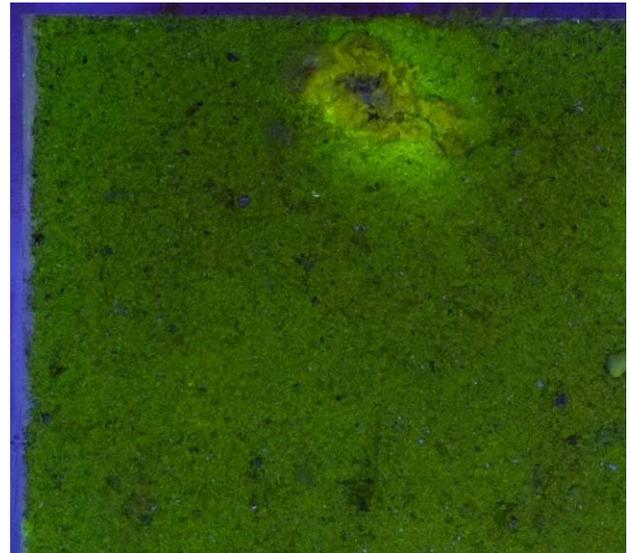


図-10 深度 21cm の左上部分の拡大写真

のと考えられる。

以上の観察の結果、粘土分の量と関係して濃淡が出ている可能性があることがわかった。すなわち、蛍光強度の濃淡の原因として、浸透の不均質性だけでなく、蛍光染料の吸着能の不均質性の可能性があると考えられた。

3.3 本実験の方法と結果

予備実験の結果、輸液セットによる浸透速度の調整は非常に困難であることから、図-11 のように、輸液セットの代わりにチューブポンプにより滴下するものとし、滴下速度は 0.36mL/分とした。また、浸透量を予備実験より多い約 1,500mm とし、水を浸透させた後にフルオロセイン溶液(1/1000)を 100mm 程度浸透させた後に、予備実験と同様の方法で試料の写真撮影を行った。

試料断面の写真を図-12 に示す。また図-13 は予備実験と本実験における表層中央部の試料写真である。

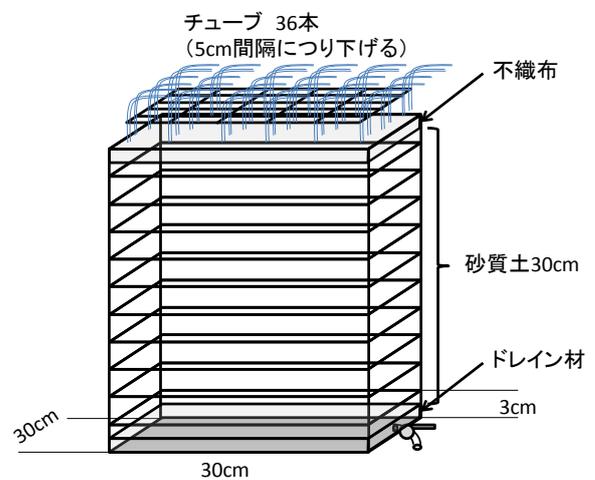


図-11 水みち形成実験装置（本実験）

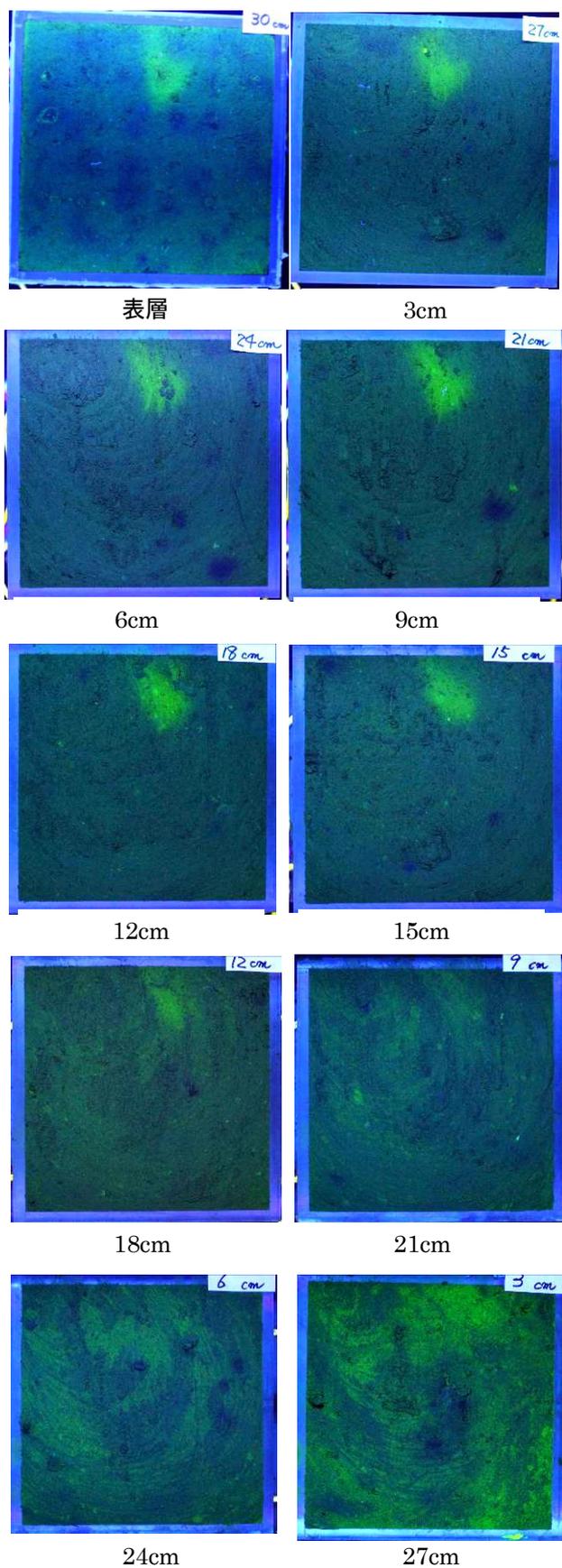


図-12 試料断面の写真（本実験）

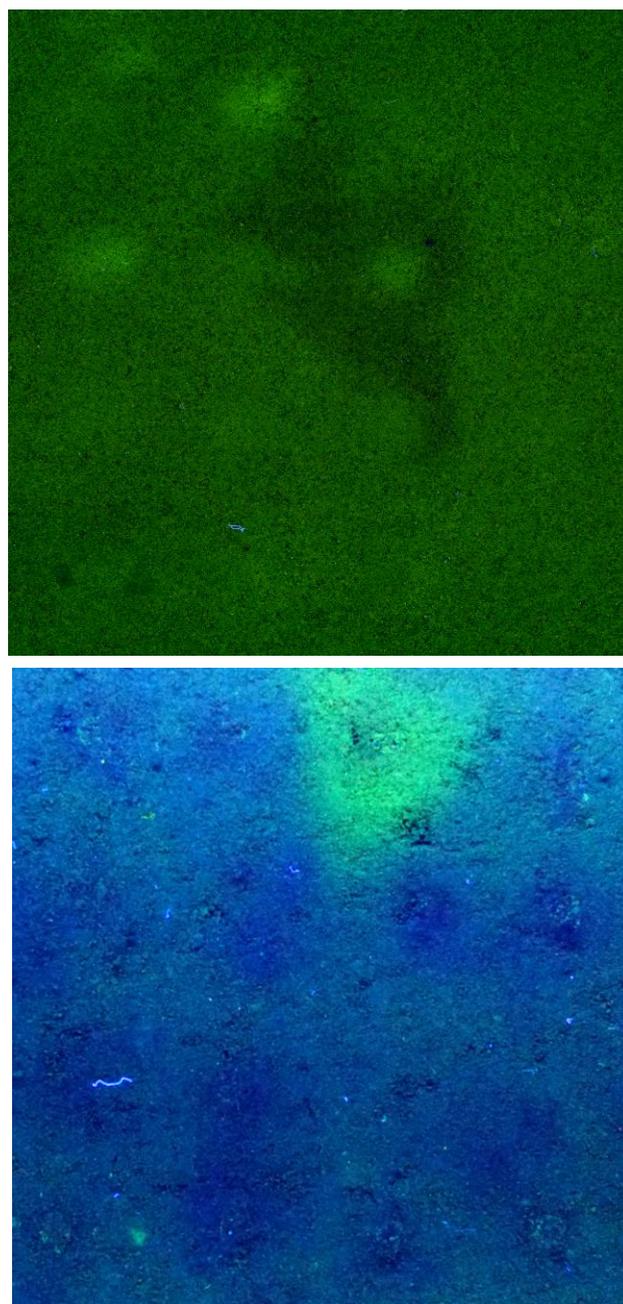


図-13 予備実験（上）および本実験（下）の表層中央部の拡大写真

全般に予備実験より蛍光強度が小さいのは、フルオロセイン溶液の濃度を薄くしたためである。

表層の、水の滴下位置（図-13 ではそれぞれ縦横 4×4 の 16 箇所）の状況は予備実験の結果と異なり、蛍光強度が弱い。蛍光強度は予備実験で明らかになったように、粘土分量と関係していると考え、透水により滴下位置近傍の細粒の土粒子が流出した結果、蛍光強度が弱くなったものと解釈できる。

表層より深度 18cm まで、中央上部に蛍光強度が強い領域が存在する。これはある程度の面積で上下方向に同一の場所に存在することから、材料の不均質に起因するものではなく、透水現象の不均質によるものと考えられるべきものである。

深度 18cm 以深の断面では、それより上位の断面より全般に発色が強く、また色の濃淡が目立つ。同様の現象は予備実験でも確認されている。その原因について、次の 3 つの仮説が考えられる。

- 1) 蛍光物質を吸着しやすい細粒の土粒子が下方に移動、集積しているため。
- 2) 下層では上層より水の滞留時間が長く、土粒子への蛍光物質の吸着量が水の滞留時間が長いほど多いため。
- 3) 下層では排水が不十分で、土粒子の間にフル

オロセイン溶液がとどまっているため。

今後、蛍光強度と粒度との関係や、実験後試料の含水率の影響等について、実験により確かめる必要がある。

5. まとめ

- ・約 2 年間にわたる大型カラム試験による溶出試験の結果、以下のことが明らかになった。
 1. 浸出水中の重金属等について、時間の経過による明瞭な濃度の低下は認められなかった。
 2. カラム内部の酸素濃度は降雨に伴って低下し、また夏に低く、冬に高い季節変動が認められた。そして酸素濃度の変化が浸出水の砒素濃度と関係している可能性がある。
- ・吸着層工法の設計に関する基礎実験として、土の水みち形成実験を実施した。蛍光染料を土に浸透させた後に、土を切断して紫外線ライト下で断面の写真撮影を行ったところ、蛍光強度の濃淡が観察された。蛍光染料は細粒の粘土粒子に強く吸着されること、また、透水により細粒分の移動が生じていることが明らかになった。蛍光強度の濃淡の発現要因を解明するため、実験後の試料の粒度分析や含水率の測定などを行い、検討する必要があることがわかった。

Utilization techniques of excavated waste for the sake of environmental conservation.①

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Geology and Geotechnical

Engineering Research Group

Author : ANAN Shuji

SHINAGAWA Shunsuke

Abstract: For the purpose of the hazard evaluation, the large scale equipment of column test was observed almost 2 years to simulate interior environment of embankment. Concentration of heavy metals in the drainage was not decrease clearly with the passage of time. Oxygen density of the inside the column began to decrease after rainfall and seasonal fluctuated, and oxygen density may change with arsenic concentration in the drainage. In order to develop countermeasure technique for heavy metal hazard, an experimental attempt of water path forming in the soil was made for the development of an absorbed layer technique. After permeate the fluorescent liquid to the soil sample, photos of sliced soil samples took under UV lamp. The photos show variety of fluorescence intensity. From our observation, fluorescence material seems strongly adsorbed to clay particles, and small particles moved by permeation. To understand reveal factor of variety of fluorescence intensity, we need more investigation such as grading analysis or moisture content measurement.

Key words : Natural source, Heavy metals, Large scale column tests, Equipment for accelerated test of reaching heavy metals, Experiment of water path forming