

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を製作し、浸出水やカラム内部環境の観測・分析を実施した。カラム内部は実験開始とともに酸素濃度が低下し、その後時間とともに上昇した。酸素濃度の変化および採水分析の結果から、黄鉄鉱などの鉱物と水との反応が起こっている可能性が示唆された。また、カラム長が長い場合に砒素濃度が大きな値を示した。その原因は単なるカラム長の違いではなく、カラムが長くなることによる内部環境の変化によると考えられる。また、土研式雨水曝露試験の促進実験として、重金属等促進溶出試験装置を考案し、製作した。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考案し、予察的な実験を行った。

キーワード：自然由来 重金属等 大型カラム試験 重金属等促進溶出試験装置 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として昨年度製作した、大型カラム試験装置による約 10 ヶ月間の観測結果の整理を行った。また、土研式雨水曝露試験の促進実験の位置づけとして、重金属等促進溶出試験装置を考案し、製作した。

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考案し、装置の製作および予察的な実験を行った。

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・分析を行うことにした。

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することとした。

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することとした。（図-2）

本装置を土木研究所構内の屋外に据え付け、岩石の掘削ざり試料(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、酸素濃度計と土壤水分計、温度計、電気伝導率計を50cmおきに設置した。



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 水質	浸出水量 水質	浸出水量 水質	浸出水量 水質	浸出水量 水質
	酸素濃度	酸素濃度	酸素濃度	酸素濃度	
	土壤水分	土壤水分	土壤水分	土壤水分	
	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湛水	

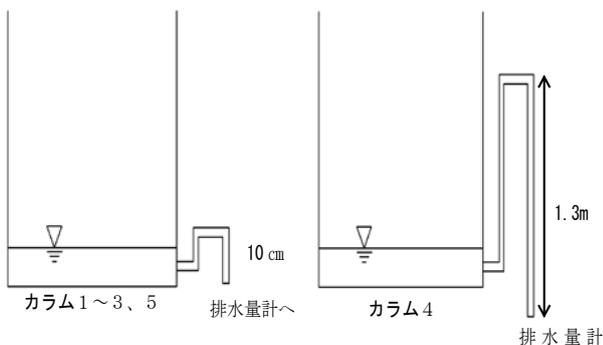


図-2 排水管からの空気流入対策

カラム4は湛水条件を想定

カラムは5つ製作し、お互い比較・分析できるように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、2013年3月11日までの約270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。また、表-2に、各カラムの浸出水が初めて採水された（初通水）日にちと実験開始から初通水までの積算雨量を示す。それから、各カラムの浸透率の時間変化を図-4に示す。浸透率は、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である。

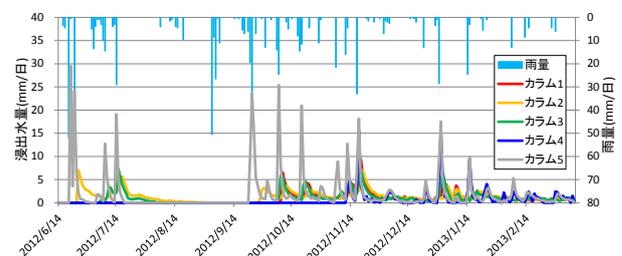


図-3 浸出水量と雨量との関係

表-2 各カラムの初通水日と通水までの積算雨量

	カラム1	カラム2	カラム3	カラム4	カラム5
初通水日	10月8日	6月24日	7月5日	11月12日	6月20日
初通水日までの積算雨量(mm)	433	92.5	117	533	60.5

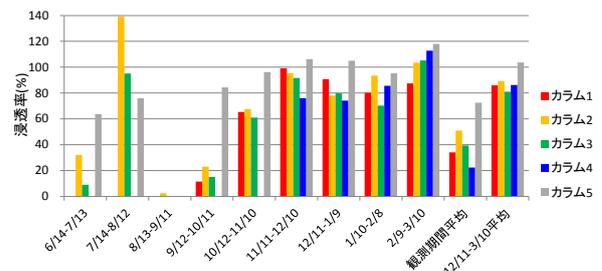


図-4 各カラムの浸透率の変化

実験開始より30日ごと浸出水量を雨量で割った値

カラム 5 は実験開始から 6 日後の 6 月 19 日に発生した比較的大きな降雨 (52mm/日) に反応して通水した。その後、カラム 5 は夏の渇水期を除いて降雨によく反応して通水した。このカラムが最も浸透率が高かった。

次いでカラム 2、カラム 3 が通水した。これらのカラムは積算雨量 100mm 前後で通水したが、カラム 5 の約 2 倍の体積を持つことから、初通水まで多くの降雨が必要であったと推定される。

カラム 1 は初通水まで 433mm の降雨を必要とした。多量の降雨を必要とした原因は、ロームの覆土層の透水性が低いことに起因するものと考えられる。ただし、一度通水した後は、他のカラムと通水率に大きな違いがない(図-4)ことから、通水の原因は、ロームの覆土層にクラックが入り、透水性が上昇したことによるものと推定される。

カラム 4 は初通水まで 533mm の降雨を必要とした。これは、地下水としてカラム内部に貯留される量が大いことに起因すると考えられる。

通水率は、図-4 の 12 月 11 日から 3 月 10 日までの平均をみると、カラム 1 から 4 までいずれも 80% 程度、カラム 5 はほぼ 100% となっており、覆土条件による通水率の違いはないように見える。過年度より実施中の実大盛土実験では、山砂覆土<ローム覆土<覆土なしの順でそれぞれ浸透率が大きく異なっていた¹⁾。実大盛土では盛土平面積約 9 割が斜面であることから、斜面と平坦地での排水条件の違いが結果に大きく影響したものと考えられる。

2.3.2 土壌水分

カラム 1 から 4 内に設置した土壌水分の計測結果と雨量との関係を図-5 に示す。土壌水分は含水率で表示した。なおカラム 3 の計器は不具合が多かったため信頼性に劣ると考えられる。

カラム 4 では、11 月 12 日に初通水が見られたが、土壌水分の計測結果によると、深度 2.0m では 7 月初旬から 8 月上旬にかけて一度飽和したものの、一旦不飽和になり、10 月上旬に再び飽和になったこと、深度 1.5m では 10 月末に飽和になったことが推定され、浸出水の観測結果とも矛盾しない結果が得られている。

全体的に、1)一般に上部ほど乾燥していること、2)カラム 4 を除き、全層で不飽和であること、3)上部ほど降雨に敏感に反応して土壌水分の上昇が見られることがわかる。

2.3.3 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

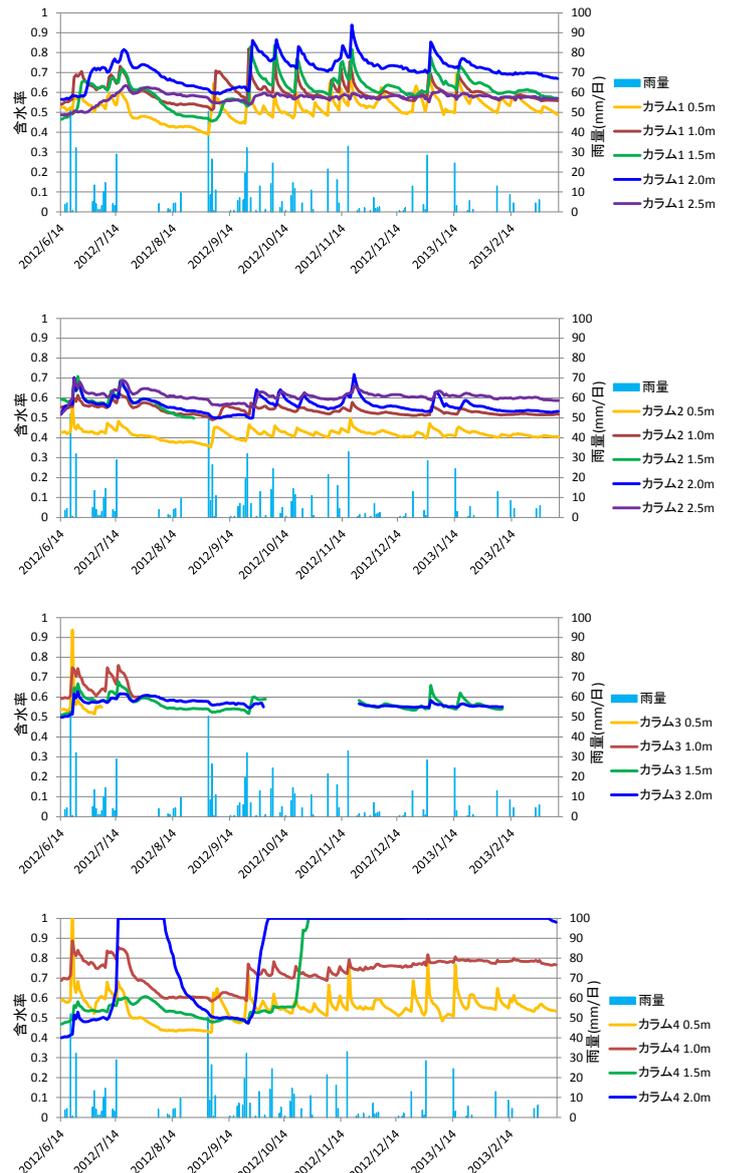


図-5 含水率と雨量との関係

雨量との関係を図-6 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)初期に酸素濃度が低く、時間とともに上昇傾向が見られる、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。

酸素濃度は降雨浸透時に値が低下する傾向が見られるが、時間とともに降雨への反応性が低下しているように見える。水が供給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) が起こるものの、時間とともにその反応が収束しつつあることを示しているのかもしれない。

2.3.4 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

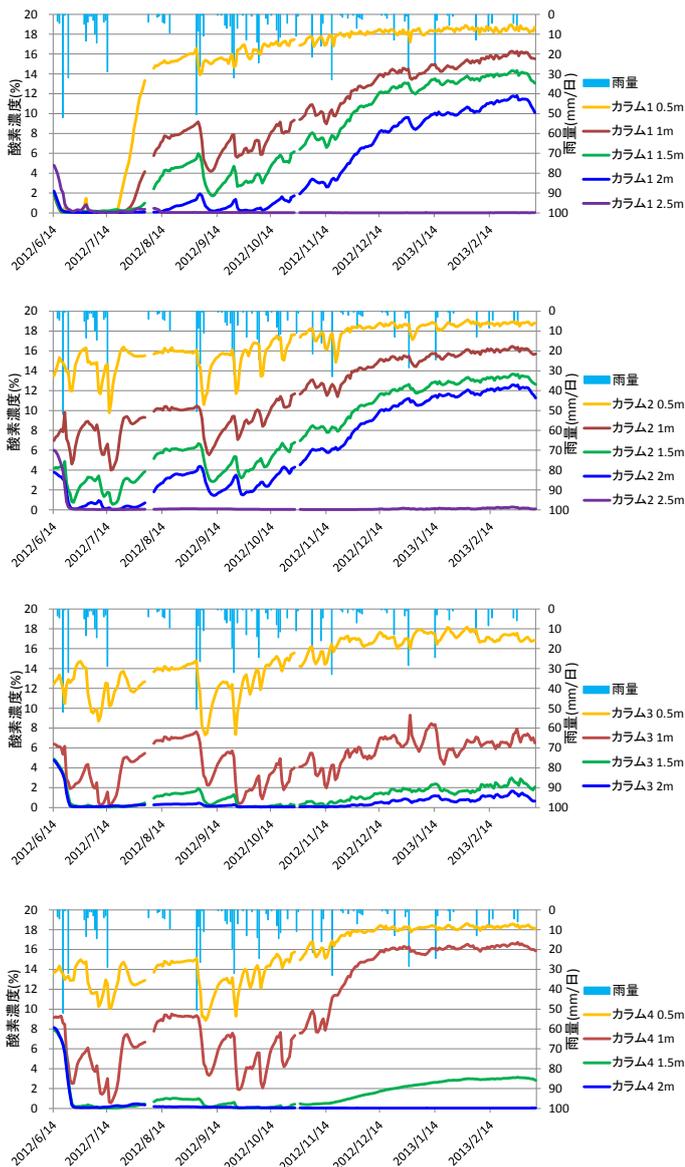


図-6 酸素濃度と雨量との関係

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-7に示す。

硫酸イオン濃度が比較的高い結果を示しており、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。これらの濃度は秋以降低下傾向にあるように見え、砒素濃度ともやや似た傾向で推移する。ただし、硫酸イオン濃度、カルシウムイオン濃度については3月に上昇に転じているように見える。

この濃度の低下傾向について、反応物質量が分解によって減少したため、気温が低下し反応速度が低下したため、あるいは反応に寄与する水の量が少ないためなど、いくつかの原因が考えられる。

ふっ素濃度については時間とともに低下傾向が認められるものの、2月にスパイク状に大きな値を示し

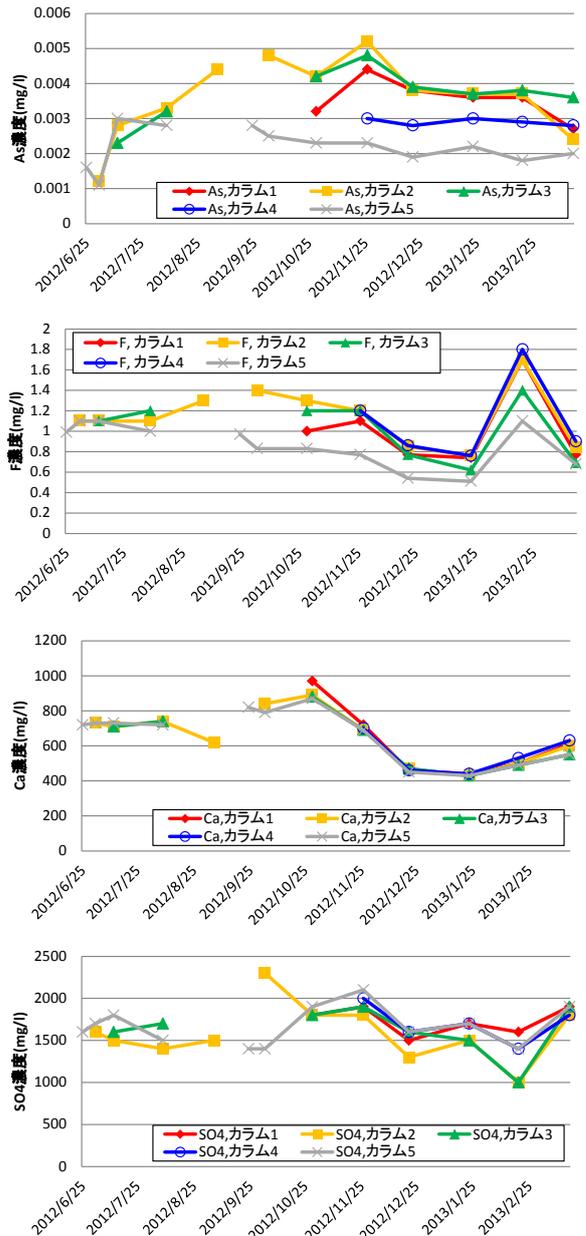


図-7 浸出水の化学分析結果(砒素、ふっ素、カルシウムイオン、硫酸イオン)

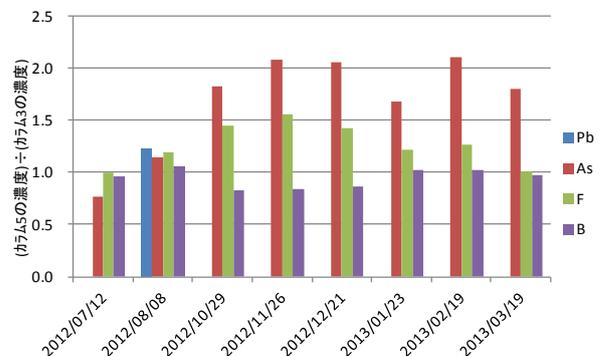


図-8 カラム5とカラム3の浸出水の濃度比(鉛、砒素、ふっ素、ほう素)

た。ふっ素濃度の変化の原因については不明である。

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。重金属等のうち、検出下限値以上でお互いの分析値が存在するものについて比較を行った(図-8)。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。

カラム長が長いと砒素濃度が大きくなる原因として、1)固相との接触機会が増えることによる溶解量の増加、2)還元領域の拡大と還元状態での砒素の移動性の増加などの仮説が考えられる。

もし1)がその原因だとすると、接触時間の増加によっても濃度が上昇すると考えられるが、そうだとすると各カラムの初通水時の分析結果が最大になるはずである。しかしながら実際にはそうになっていないことから、この仮説は有力でないと考えられる。

2)について、砒素は還元状態で移動性が高いことがよく知られている。また、図-6で示されるように、カラム内の酸素濃度は下層ほど低く、還元的と考えられることから、有力であると考えられる。

砒素濃度はカラム長が長くなると濃度が大きくなるものの、その原因は単純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. 重金属等促進溶出試験装置の製作

3.1 装置開発の必要性

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、この方法では少なくとも半年以上の時間が必要であり、場合によっては数年後に溶出特性が変化するものがあることがわかっている。現場で発生する掘削ずりを評価するためには、土研式雨水曝露試験との関係がわかっている促進実験方法の開発が必要である。

一方、土研式雨水曝露試験は、降雨強度、温度およびスレーキングの進行によって浸出水の濃度が変化することがわかっている²⁾。

そこで、土研式雨水曝露試験を温湿度および降雨条件管理下で実施できる重金属等促進溶出試験装置を開発した。



図-10 重金属等促進溶出試験装置(人工降雨装置貯留槽部、制御部、自動採水装置)



図-9 重金属等促進溶出試験装置(土研式雨水曝露試験装置、人工降雨装置噴霧部)

3.2 装置の構造、仕様

装置は、恒温恒湿室、人工降雨装置、土研式雨水曝露試験装置、自動採水装置からなる。

恒温恒湿室は人工降雨装置の制御部で運転、停止を制御可能である。温度 10~60℃の範囲で湿度 10~95%で連続運転・制御できる。

土研式雨水曝露試験装置(図-9)は、恒温恒湿室内に設置し、その上部にスプレー式の人工降雨装置が備わっている。屋外で実施しているものと同一の仕様(断面積 500cm²、高さ 30cm)であり、重量 15kg 程度の岩石の掘削ずりを充填可能である。

人工降雨装置は恒温恒湿室外に設置した貯留槽部、制御部(図-10)および恒温恒湿室内の噴霧部からなる。人工降雨は水または硫酸水溶液(最低 pH2)が使用可能である。降雨強度は 6~20mm/時で制御可能である。

自動採水装置(図-10)は人工降雨装置の制御部で制御し、土研式雨水曝露試験装置底部の排水孔の水をチューブポンプで恒温恒湿室外の試料瓶に回収できる。採水瓶は各試料 6 本ずつ搭載されており、プログラムに従って 1 サイクルごとに 1 本に回収している。

本装置は人工降雨装置の制御部で一括制御できるようになっており、降雨強度、降雨時間、採水時間、恒温

恒湿室の運転時間などをすべてプログラム制御する。プログラムの1サイクルは最大7日間で、任意の長さとする事ができる。

今後は、本装置を利用した促進溶出実験の条件を決定するための実験を計画している。

4. 吸着層の設計に関わる土の水みち形成実験

4.1 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、水みちの形成を把握することを目的に、土槽実験の装置を製作し、試行した。

4.2 実験方法

図-11 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

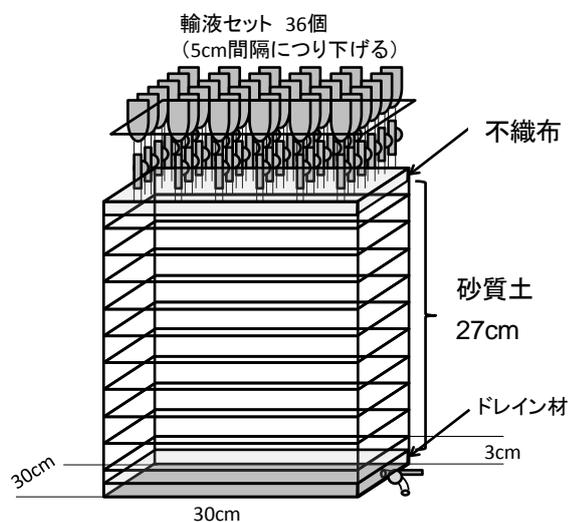


図-11 水みち形成実験用土槽

からおおむね 3mL/分の速度で土槽に一斉に供給した。この操作を1日1回ずつ、計5回行った後に、試料の写真撮影を行った。

試料の写真撮影は以下の要領で行った。

- 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

4.3 実験結果

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-12 に示す。表層は、輸液セットのチューブの位置（格子点）に強い蛍光強度の点が認められる。深度3cm から15cm までは比較的均質に見えるが写真の上部がやや強度が低く暗く見える。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、非常に明るく写る場所がある。灰色ないし黒っぽく見える点も非常に明るく見え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-13）をみると、写真上部に明るい部分があり、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やすい部分と浸透しにくい部分が存在するものと考えられる。

実験を考案した時点では、蛍光の濃いところが水みちであると考えていたが、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る。

以上の結果より、水みち形成実験において蛍光強度の濃淡の発現要因についてはさらなる検討が必要であることがわかった。今後は蛍光染料以外のトレーサー（たとえば食塩水）の利用や、吸着性に乏しいと考えられる粒子（たとえばガラスビーズ）の使用などを試み、水みちの可視化の検討を実施する計画である。

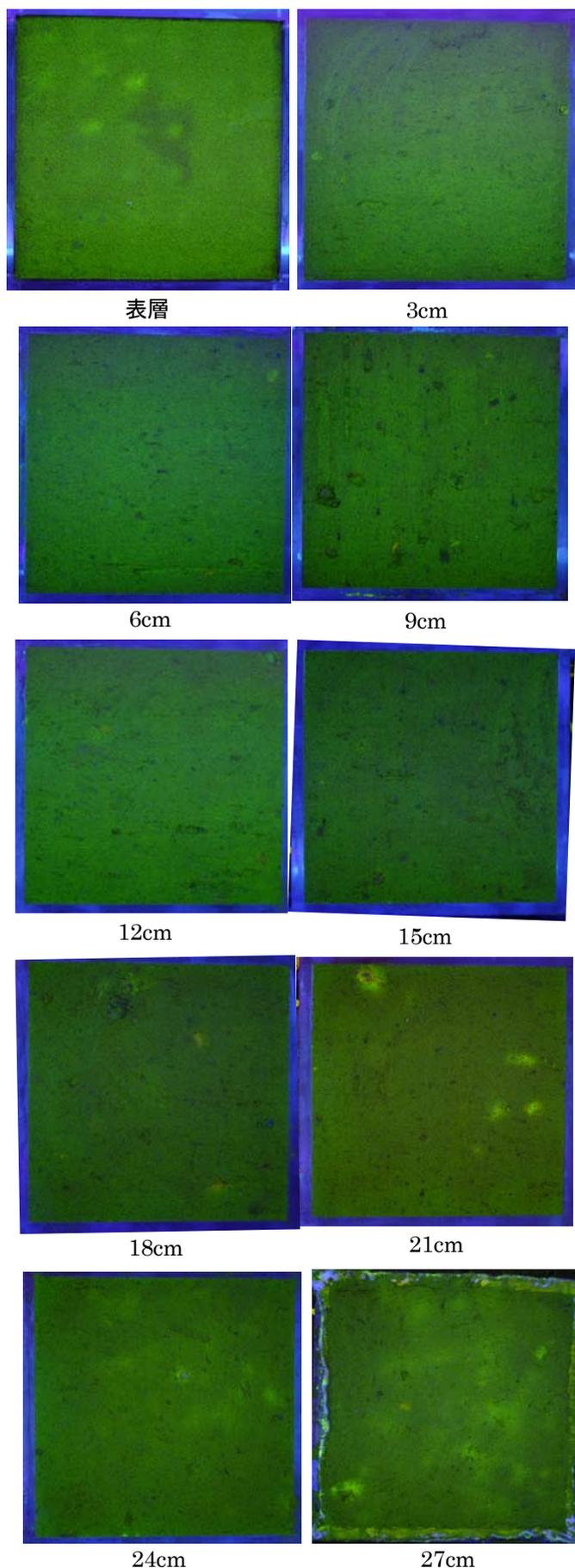


図-12 試料断面の写真

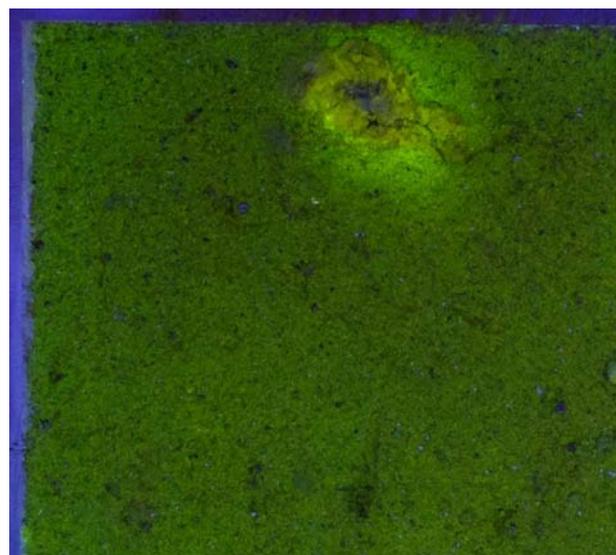


図-13 深度 21cm の左上部分の拡大写真

5. まとめ

- ・盛土を模擬した大型カラム試験装置を製作し、屋外で実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1)カラムの覆土材料としてロームを用いた場合、当初は遮水性能を発揮したが、途中でクラックが入ったと推定され、最終的にはカラムの覆土の有無や覆土の材料によらず、浸透率が 80~90%となった。
- 2)カラム内の酸素濃度は、実験開始後低下するが、時間の経過とともに上昇する傾向が見られる。水が供給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（たとえば鉄物と水との化学反応）が起こっている可能性がある。
- 3)浸出水の化学分析の結果からは、黄鉄鉱などの酸化反応が起こっている可能性があると考えられる。
- 4)カラム長が長い場合に砒素濃度が大きな値となった。その原因として、**カラムが長くなることによる還元領域の拡大と還元状態での砒素の移動性の増加**内部環境の違いに起因する可能性が高いと考えられる。

- ・土研式雨水曝露試験の促進実験の位置づけとして、重金属等促進溶出試験装置を考案し、製作した。
- ・吸着層工法に関する基礎実験として、土の水みち形成実験を試行した。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。その原因として、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ことが推定され、蛍光強度の濃淡の発現要因についてはさらな

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

る検討が必要であることがわかった。

成 23 年度発表講演集, pp.2077-2078.

- 2) 安元ほか(2012):曝露試験による岩石からの重金属等の溶出濃度変化—気候条件の影響. 第 47 回地盤工学研究発表会平成 24 年度発表講演集, pp.1861-1862.

参考文献

- 1) 品川ほか(2011):盛土の築造方法の違いによる自然由来重金属等溶出特性の比較. 第 46 回地盤工学会研究発表会平

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, large scale equipment of column test was constructed to simulate interior environment of embankment. With this device the observation of drainage and changes of environment inside the column were conducted. Oxygen density of the inside the column began to decrease soon after the experiment began to rise again after a certain time. Based on the analysis of the changes of oxygen density and the chemical analysis of drainage, it was suggested that there occurred a chemical reaction between a certain mineral elements, such as pyrite, and water. Another finding was a positive correlation between the length of column and arsenic density in the drainage, which is not caused by the difference of the length of column, but qualitative changes caused by the longer column. In relation to this study new experimental equipment for accelerated test of reaching heavy metals was developed and constructed. 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.

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