

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・菅原雄

【要旨】

自然由来の重金属等の発生源評価方法について、土研式雨水曝露試験や大型カラム試験などの結果を分析した。そして、実験結果を踏まえ、自然由来重金属等を含む岩石の発生源評価指標を提案した。

対策工法に関しては、吸着層工法の材料評価試験方法の体系を整理し、繰り返し吸着試験方法などを開発した。また土の水みち形成実験を実施した結果、透水現象の不均衡や細粒分の移動が生じていることが示唆された。その結果を踏まえ、吸着層工法の効果を確認するための吸着試験方法を考案した。さらに、吸着層工法の設計法の技術的配慮事項を提案した。

本研究の結果および現場技術相談内容を踏まえ、関連するマニュアルの改訂素案をとりまとめた。

キーワード：自然由来 重金属等 発生源評価 曝露試験 吸着層工法

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。

上記を踏まえ、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研究を実施した。

発生源評価に関して、土研式雨水曝露試験の結果と各種の溶出試験の結果を比較・整理し、室内試験の組み合わせによる評価基準の検討を行った。また、盛土内環境を模擬した試験方法として、大型カラム試験を考案し、観測を実施した。そして、これらの検討内容を踏まえ、平成 22 年 3 月に作成した「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」¹⁾の改訂すべき点を検討した。

対策工法に関しては、土木研究所と大学、民間企業との共同研究「盛土内処理による自然由来の重金属等対策工法の材料評価に関する共同研究」において、吸着層工法の材料評価試験方法の体系を整理し、カラム試験方法や繰り返し吸着試験の方法を検討した。また、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、実施し、その結果を踏まえて水みち発生を考慮した吸着層試験方法を提案した。これらを踏まえて、吸着層工法の設計法に関する検討を実施した。

2. 自然由来重金属等を含む岩石の発生源評価基準の再検討

トンネル工事等において発生する掘削ずりについて、自然由来の重金属等の溶出による環境汚染を防止する観点から、溶出特性の評価が必要であるが、岩石に対して土壌汚染対策法の手法をそのまま適用することはできない²⁾。そこで土木研究所では平成 17 年 12 月より、岩石からの重金属等の長期的な環境影響を適切に把握するために、各種岩石について長期間の曝露試験および各種室内試験を実施中である。

品川・佐々木²⁾は、各種岩石を用いた土研式雨水曝露試験³⁾結果（約 1 年間の浸出水の重金属等平均濃度）と、短期溶出試験⁴⁾や酸性化可能性試験⁵⁾の結果を比

較した。その結果、酸性化可能性試験の検液の pH が 3.5 以下の試料を長期的な酸性化の可能性のあるものとして評価できること、および短期溶出試験と酸性化可能性試験の組み合わせにより、概ね安全側に重金属

等の長期溶出特性が評価できることを明らかにした。本研究では、その後の試験結果を踏まえて岩石からの重金属等の長期溶出特性評価方法を再検討した。

表-1 各試験の実施試料と曝露日数

試料名	岩種	曝露日数
SK2	硫砒鉄鉱含有鉱脈	2,191
YN	安山岩	2,191
DM	火山礫凝灰岩	2,191
NK	泥岩	2,191
SP	砂岩	2,191
TK	泥質片岩	1,344
KS	砂質泥岩	1,344
MB1	泥岩	1,344
MB2	泥質細粒砂岩	1,344
MB3	泥岩	1,344
MB4	凝灰岩	1,344
MB5	泥質砂岩	1,344
SE	凝灰岩	1,316
AI	凝灰角礫岩 (変質)	1,260
US	安山岩 (変質)	1,260
TU	凝灰角礫岩 (変質)	1,260
MR	安山岩 (変質)	1,260
KB1	泥岩	559
KB2	泥岩	559
KB3	泥岩	559
KB4	砂岩・泥岩	559
KR	泥岩	559
KB5	泥岩	364
AB	(変質粘土)	364
TT	極細粒砂岩	364
RY1	片麻岩	308
RY2	片麻岩	308
YZ1	泥岩	280
YZ2	泥岩	280

表-2 溶出試験等の条件

試験名称	溶出条件	試料粒径
短期溶出試験	固液比 1:10, 6 時間振とう, HCl 水溶液(pH5.8-6.3)	<2mm
酸性化可能性試験	固液比 1:10, 30% H_2O_2 溶液 反応が収束するまで静置	<2mm
土研式雨水曝露試験	野外で試料を通過した雨水を 最大 28 日間貯留	40~10mm

表-3 検液の測定方法

項目	測定方法
カドミウム	JIS K 0102 55.2~4 のいずれか
鉛	JIS K 0102 54.2~4 のいずれか
砒素	JIS K 0102 61.2 または 61.3
pH	JIS K 0102 12.1
EC	JIS K 0102 13

2.1 実験方法

同一試料を用いて各種の溶出試験を実施した。各試験の実施試料および土研式雨水曝露試験に供した日数を表-1 に、主要な試験条件を表-2 に示す。

試験には国内各地で採取した岩石 25 試料を用いた。これらの原岩をハンマーで粗粉碎し、ジョークラッシャーおよびステンレス製の鉄鉢で試験に適する粒径となるよう粉碎した。

各種溶出試験においては、検液のカドミウム、鉛、ひ素の各濃度および水素イオン濃度指数(pH)、電気伝導率(EC)を測定した。検液の測定方法については表-3 に示す。

1) 短期溶出試験¹⁾

試料調製方法を除き、環告 18 号試験に準じた試験である。

2) 酸性化可能性試験¹⁾

「過酸化水素水を用いる pH 試験」⁴⁾に準拠した試験である。

3) 土研式雨水曝露試験³⁾

試料をワグネルポットに詰めて屋外曝露し、試料を通過した雨水を採水瓶に貯留、28 日毎に分析する試験である (図-1)。

2.2 実験結果

364 日 (以下、約 1 年間という) 以上曝露した 25 試料のうち、短期溶出試験において Cd,Pb,As のいずれかの元素で土壤環境基準を超過したものが 10 試料 (40%)、酸性化可能性試験において pH が 3.5 以下のものが 9 試料 (36%)、土研式雨水曝露試験においては最初の約 1 年間の浸出水の平均濃度が Cd,Pb,As のいずれかの元素で土壤環境基準を超過したものが 13 試料 (52%)、最初の約 1 年間の浸出水の最低 pH が

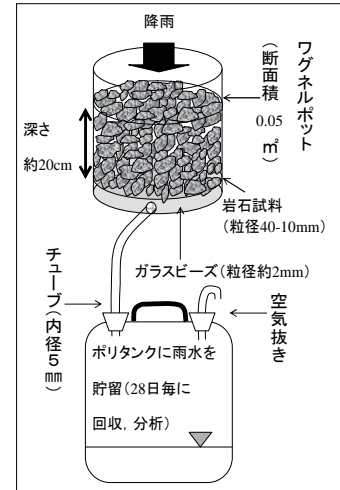


図-1 土研式雨水曝露試験の概要³⁾

5.7以下になったものが8試料（32%）であった。

なお、土研式雨水曝露試験において最低 pH が 5.7 以下となった試料は KB1 試料を除きすべて、平均濃度がいずれかの元素で土壤環境基準を超過した。

2.3 長期溶出特性の評価方法の検討

1) 酸性化可能性の判定

品川・佐々木²⁾は、酸性化可能性試験で pH が 3.5 以下、あるいは短期溶出試験の検液の pH が 5.7 以下のものについては長期的な酸性化の可能性があるものと評価した。図-2 に、土研式雨水曝露試験結果（約 1 年間の最低 pH が 5.7 以下を酸性化と定義）に基づく酸性化可能性試験の評価を示す。

安全側に評価した 2 試料のうち YN 試料については曝露開始後約 1,000 日で酸性化した。また、DM 試料については約 2,100 日で pH が 5.3 程度まで低下した

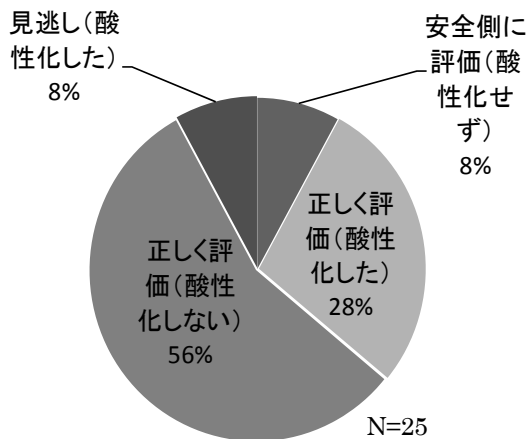


図-2 土研式雨水曝露試験結果（約 1 年間の最低 pH）に基づく酸性化可能性試験の評価

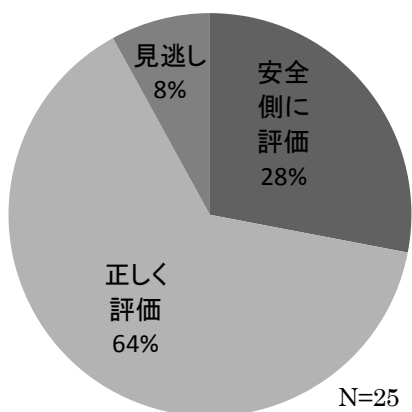


図-3 土研式雨水曝露試験結果（約 1 年間の平均濃度）に基づく重金属の長期溶出に関する判定の評価

ことから、長期的には酸性化したものと評価可能である。

見逃し判定をした 2 試料のうち、US 試料については pH が 4.4 と酸性を示したが、2 回目の採水時には pH が 6.8 まで上昇した。したがって、US 試料については長期的には酸性化しない試料と見なすことが可能である。また KB1 試料について、見逃しの原因ははっきりしないが、試料の不均質性に起因する可能性がある。

以上により、酸性化可能性に関する判定基準はおおむね妥当であると考えられる。

2) 重金属等の長期溶出に関する判定

品川・佐々木²⁾は、短期溶出試験の結果、いずれかの元素で土壤溶出量基準を超過、または検液の pH が 5.7 以下か、あるいは酸性化可能性試験の検液の pH が 3.5 以下の試料については、長期的に重金属等が溶出する可能性があるものと評価した。図-3 に、土研式雨水曝露試験結果（約 1 年間の平均濃度が環境基準値を満たさないものを重金属等が溶出したと定義）に基づく重金属の長期溶出に関する判定の評価を示す。

安全側に評価した 7 試料のうち、2 試料は、前述の酸性化すると判定されたもの実際には酸性化しなかった試料である。残りの 5 試料は短期溶出試験結果（主に As）が土壤環境基準値を超過するものの、土研式雨水曝露試験における約 1 年間の平均濃度が土壤環境基準値を超過しなかったものである。これらはいずれも泥質岩（KS,MB1,MB2,MB3 および MB5 試料）であった。

一方、見逃し判定をしたのは KB2（泥岩）および KB4（砂岩・泥岩）の 2 試料であった。

以上の結果からは、品川・佐々木²⁾の評価基準は、おおむね妥当であると言える。しかしながら泥質岩に適用しようとする場合は、過剰に安全側に評価する可能性があることから、できる限り曝露試験の実施を行うことが望ましい。

3. 土研式雨水曝露試験における、曝露条件と浸出水水質の関係

土研式雨水曝露試験は岩石試料からの重金属等の長期溶出特性を把握する試験として考案されたものであるが、適切なハザード評価をおこなうには試験手法の特性を把握することが必要である。

そこで土研式雨水曝露試験における浸出水の水質の変化と曝露期間中の気候条件の整理を行い、気象条件が重金属等の溶出に与える影響について分析する。

3.1 曝露試験における岩石試料の特徴および浸出水にみられる重金属等の濃度変化

土研式雨水曝露試験に用いた試料は 29 試料で、短期溶出試験において重金属等の溶出が認められた岩石である（表-1）。曝露期間は長いもので 6 年程度経っている。

土研式雨水曝露試験において、降雨量から算出される水量に対し浸出水量は岩種によって異なる。硬質な岩石は浸透率が 80%以上であるのに対し、軟質化や細片化する泥質岩や変質岩は 50～73%程度であった。これは初生的にあるいは物理的風化の進展により岩石の吸水率が大きく、吸水した水分の蒸発により結果として浸透率が低下したものと考えられる。

次に土研式雨水曝露試験における浸出水の重金属等の濃度変化は、初回採水時に高い試料（12 試料で確認される）、2 回目～数回目（半年程度）で最大となる試料（同 15 試料）、半年～一年程度で最大（同 13 試料）、一年以上の曝露で最大（同 15 試料）となるものがあり、試料や重金属等の種類ごとにその濃度変化傾向が異なっていた。特に泥質岩は特徴的に初回採水時の As 濃度が高く、時間経過とともに濃度が低下する傾向にあった。ただし、スレーキングしやすい試料については細粒化が進行している間に浸出水の As 濃度が最大となり、その後低下する傾向となった⁵⁾。変質岩についても細粒化（軟質化）とともに As 濃度が上昇した。また、これらの物理的变化による濃度変化のほかに、試料全般に共通することとして、大局的な濃度変化の中にも採水回ごとに濃度が高低していた。図-4 に、泥質岩からの砒素の溶出濃度変化をスレーキングしやすいものとしにくいに分けて示す。

3.2 気候条件と重金属等の溶出との関係

土研式雨水曝露試験における浸出水の重金属等濃度の変化に関する要因を把握するため、曝露期間中の気候条件と浸出水の重金属等濃度の対比を試みた。その結果、期間降雨量が比較的多い夏期では浸出水の濃度が低く、降雨量が少ない冬季に濃度が高い傾向にあることが分かった。そこで、気候要素ごとの影響をみるため、降雨および気温による整理を行った。

1) 降雨条件の違いによる重金属等の溶出傾向

同一試料において採水期間中の降雨量が同じである 2 期間において、浸出水の重金属等濃度が有意に異なっていた。両者を対比すると時間雨量が大きい降雨が含まれる場合に濃度が低くなる結果が得られた。次に平均降雨強度（以下降雨強度）による整理を試みた。代表的な 2 ケースを図-5 に示す。その結果、降雨強度

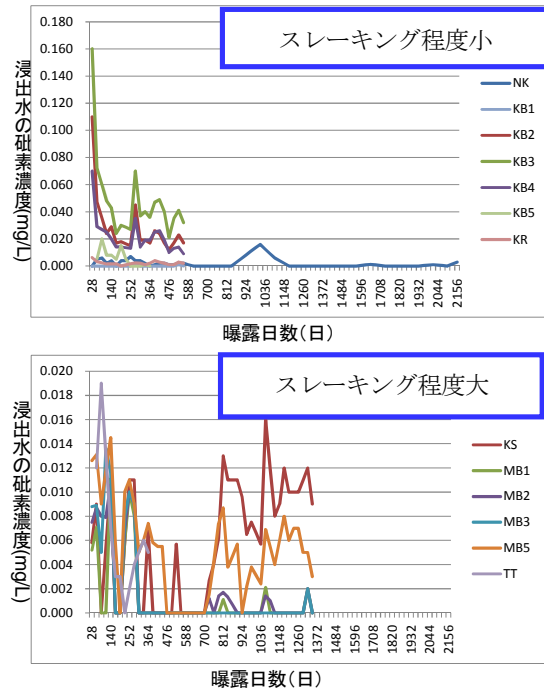


図-4 雨水曝露試験による泥質岩の浸出水濃度変化（砒素）

が 5mm 程度の時は、相対的に低い濃度となる。一方で 1～2mm/h の降雨強度の時に濃度が最大となることが多く、低濃度～高濃度の幅広い値となっていた。このような降雨条件の違いに対する浸出水の重金属等濃度の変化は 27 試料で確認され、全試料中で重金属等(Cd, Pb, As, Se, F, B)の濃度が検出下限値以上となった 79 ケースのうち 54 ケースが該当した。なお、この傾向は岩種や重金属等の種類を問わず認められた。

2) 温度条件の違いによる重金属等の溶出傾向

図-5 には曝露期間中の平均気温による分類も示した。採水期間における平均気温（日平均気温の平均）によって、10℃未満（図-6 中の◆）、10℃以上 20℃未満（同▲）、20℃以上（同■）に分類し、浸出水の濃度変化との関係について整理を行った。その結果、曝露期間の平均気温が高温の時には、低温時に比べ浸出水の重金属等濃度が高くなる傾向が得られた。降雨条件の違いによる傾向と同様に、温度条件の違いに対する重金属等濃度変化の傾向は 24 試料で確認され、前述の 79 ケースのうち 43 ケースが該当した。また、この傾向も岩種や重金属等の種類を問わず認められた。

3.3 土研式雨水曝露試験における長期溶出評価の検討

土研式雨水曝露試験において降雨が浸出水の重金属等の濃度に与える影響は、期間総雨量よりも降雨強度の方がより明確に現れた。これは、雨水が岩石試料

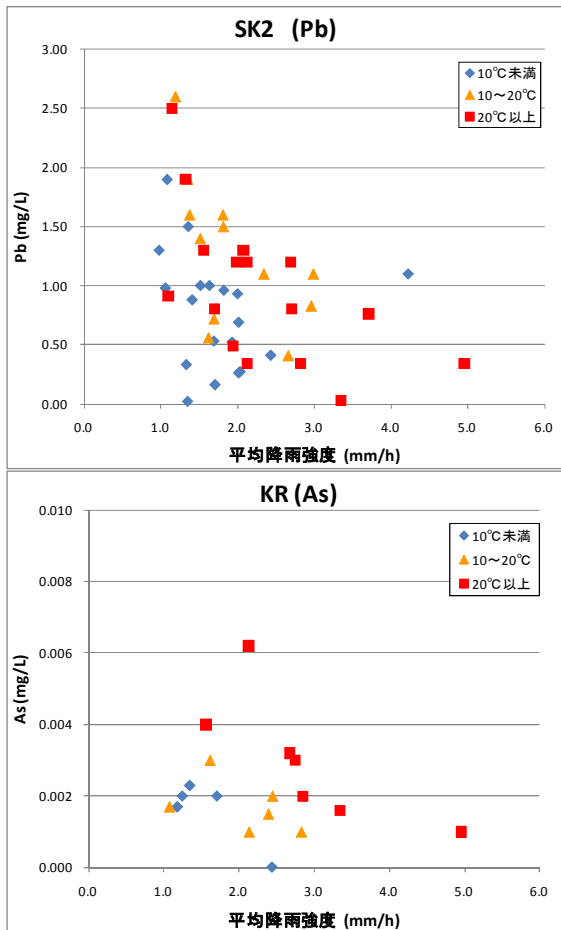


図-5 溶出濃度の降雨強度依存性と温度依存性(上:SK2、鉛, 下:KR、砒素)

中を通過する接触時間の違いによって、濃度の違いが生じていることを示していると考えられる。土研式雨水曝露試験における浸出水の濃度は、降雨強度が大きくなると濃度が低下する傾向にあり、降雨強度が2倍になると濃度は半分程度となっている。また、降雨強度が小さいときには濃度が低いものもあり、濃度の幅が大きくなる場合がある。これは、降雨強度が小さい場合に、接触時間が短い場合と長い場合の両方が含まれているためと考えられる。逆に降雨強度が大きい場合は、接触時間が短い場合が多いため濃度が低くなる。

一方で気温の影響をみると、曝露期間中の気温が相対的に高温の場合、浸出水の重金属濃度が高くなる結果が得られた。今回の検討は外気温で検討しているものの、試料全体としては外気に曝されているため、概ね外気温に近い試料内温度であることが推察される。ただし、今回の結果には、日射による表面部の温度上昇の影響が含まれている。

岩石-水の接触時間の長さや温度による溶出濃度の違いについてはバッチ試験による報告⁶⁾があり、接触時間の増加や温度増加が砒素の溶出を促進させるとしている。今回、カラム様の構造となっている土研式雨水曝露試験においても前述の条件の違いによる効果が確認された。

以上のことから、土研式雨水曝露試験の結果には岩石固有の溶出特性のほかに気象条件等の曝露環境の影響が付加されていると言える。そのため、曝露試験は原位置の環境で行うことが望ましく、結果の評価には岩石の化学的性質の変化傾向や気象条件の違いが把握できる程度の長期的な溶出トレンドをみる必要があると考えられる。

4. 元素毎の掘削ずりの溶出特性評価

4.1 実験の目的

平成25年10月、中部横断自動車道（富沢～六郷）（仮称）南部インターチェンジ工事現場内において、地下水よりセレンを検出した。その原因の一つとして、「セレンを含むトンネル掘削土（岩石）による盛土下の土の置換えを行っていたところ、一時的に置換土が地下水に浸かったことで、セレンを含んだ水が地下に浸透したこと」が挙げられている⁶⁾。そこでセレンを含む掘削ずりについて、他の有害物質との溶出特性を比較するため、各種の試験を開始し、溶出試験の違いによる結果の比較を行った。

4.2 実験方法

4.2.1 試料

試料は、セレンを含む岩石6試料である。試料の諸元を表-4に示す。

表-4 試料一覧

試料名	年代	岩種
KZ	新第三紀	泥岩
SR	新第三紀	泥岩
DG1	新第三紀	泥岩
DG2	新第三紀	泥岩
KB6	古第三紀	泥岩
TE	白亜紀	泥岩

4.2.2 実験方法

各試料は粉碎縮分し、粒径40-10mmとした試料13kgを土研式雨水曝露試験（図-1）に供した。本試験は現在、継続実施中であるが、本研究では308日目または392日目までの結果をまとめた。

また40-10mm試料の一部を全量粒径2mm以下に粉碎し、短期溶出試験（粉碎試料を用いた環告18号試験）に供した。さらに、SR、KB6の各試料について

は、固液比を 1:2 とした短期溶出試験を実施した。

各種試験によって得られた検液は、水質分析を行った。分析項目は Cd, Pb, As, Cr⁶⁺, Hg, Se, F, B, Cu, Zn, Fe, SO₄²⁻, Cl⁻, アルカリ度, Na, K, Ca, Mg, Al, pH, EC の各項目である。また SR, KB6 の検液の一部は HPLC-ICP-MS 法によるセレンの価数分析を行った。

4.3 実験結果

4.3.1 土研式雨水曝露試験および短期溶出試験結果

図-6に砒素、セレン、ふっ素、ほう素について、土研式雨水曝露試験および短期溶出試験の結果を示す。

土研式雨水曝露試験は、溶出現象の時間変化が把握できる試験である。一般に時間が経つにつれて各成分の濃度が減少する傾向が認められるが、その変化傾向は元素毎に異なる様子がわかる。セレン、ほう素は曝

露開始から 56 日までに濃度の極大が認められ、その後減少する。その減少の程度をみると、セレンは急激に、ほう素は緩やかである。砒素も減少傾向が認められるものが多い。一方、ふっ素については様々であり、濃度減少の傾向は不明瞭である。

短期溶出試験の濃度と土研式雨水曝露試験の検液の最大濃度の比較をした（表-5）ところ、砒素は 1:1~3.2、ふっ素は 1:2~3.5 であったのに対し、セレンは 1:2.8~25.5、ほう素は 1:4.5~8.0 と、その濃度比は元素毎に大きく異なった。

4.3.2 固液比を変えた短期溶出試験の濃度およびセレンの価数分析の結果

SR, KB6 の短期溶出試験について、通常行われる固液比 1:10 に加えて、固液比 1:2 の試験を行い、比較を

行った。また、セレンは溶液中では SeO₄²⁻ (Se⁶⁺) または HSeO₃ (Se⁴⁺) の形態を取ることが知られているが、SR, KB6 の短期溶出試験の検液について価数の分析を行った。結果を表-6 に示す。

分析の結果、固液比を大きくした場合の濃度の上昇の割合が、砒素よりセレンの方が大きいことが明らかとなった。また溶液中のセレンのほとんどが Se⁶⁺ であることが分かった。

4.4 実験結果のまとめと考察

土研式雨水曝露試験の最大濃度と短期溶出試験結果の濃度比は、元素毎に異なることが分かった。特に濃度比が大きい元素はセレン、ほう素であり、砒素、ふっ素はその濃度比が小さかった。

固液比を変えた短期溶出試験の結果からは、セレンの濃度比が大きく、砒素の濃度比が小さかった。

これらの関係から、土研式雨水曝露試験の初期の状態は、短期溶出試験に比べて、固液比が大きなバッチ試験の状況に類似していると考えられる。

濃度比が大きいセレン、ほう素は環境中で移動しやすいことが知られている⁷⁾。また、セレンの価数分析の結果、そのほとんどが Se⁶⁺ であることが明らかになったが、Se⁶⁺ は Se⁴⁺ に比べて移動度が高いことが知られている。このように環境中で移動しやすい成分は溶出初期に、短期溶出試験結果に比べて著しく高濃度になりやすく、現場における溶出特

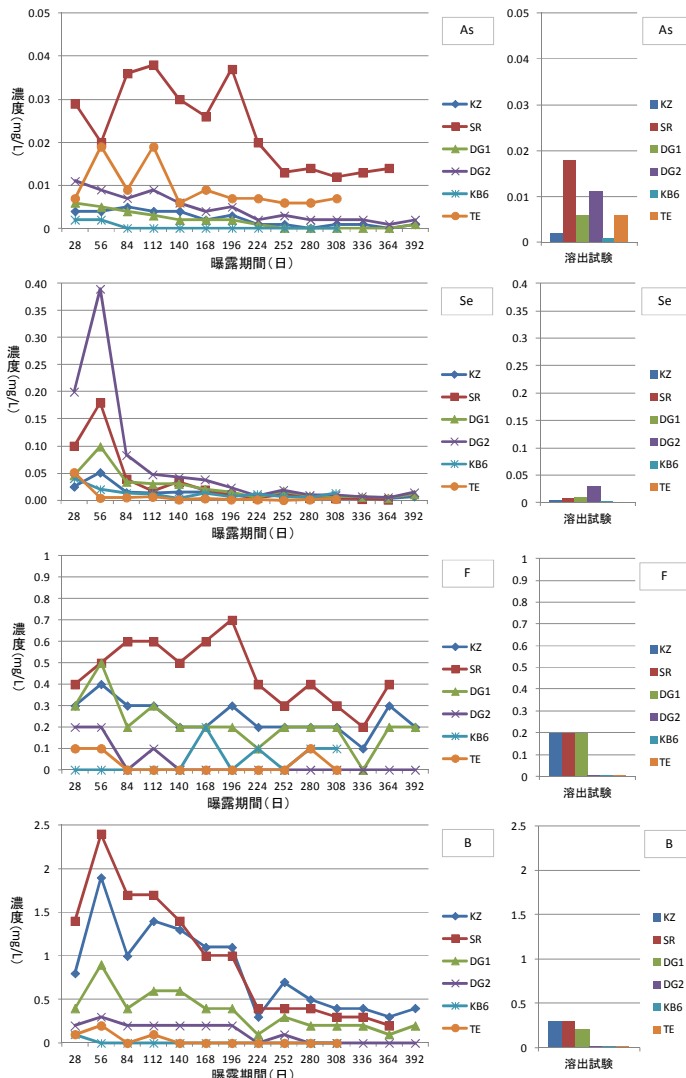


図-6 土研式雨水曝露試験結果（左）と短期溶出試験結果（右）との比較（砒素、セレン、ふっ素、ほう素）

表-5 短期溶出試験濃度と土研式雨水曝露試験の最大濃度との比較(砒素、セレン、ふっ素、ほう素)

試料 元素	KZ			SR			DG1		
	短期溶出 A(mg/L)	雨水曝露 B(mg/L)	濃度比 B÷A	短期溶出 A(mg/L)	雨水曝露 B(mg/L)	濃度比 B÷A	短期溶出 A(mg/L)	雨水曝露 B(mg/L)	濃度比 B÷A
As	0.002	0.005	2.5	0.018	0.038	2.1	0.006	0.006	1.0
Se	0.005	0.051	10.2	0.008	0.039	4.9	0.009	0.099	11.0
F	0.2	0.4	2.0	0.2	0.7	3.5	0.2	0.5	2.5
B	0.3	1.9	6.3	0.3	2.4	8.0	0.2	0.9	4.5

試料 元素	DG2			KB6			TE		
	短期溶出 A(mg/L)	雨水曝露 B(mg/L)	濃度比 B÷A	短期溶出 A(mg/L)	雨水曝露 B(mg/L)	濃度比 B÷A	短期溶出 A(mg/L)	雨水曝露 B(mg/L)	濃度比 B÷A
As	0.011	0.011	1.0	0.001	0.002	2.0	0.006	0.019	3.2
Se	0.030	0.083	2.8	0.003	0.040	13.3	0.002	0.051	25.5
F	<0.1	0.2	-	<0.1	0.2	-	<0.1	0.1	-
B	<0.1	0.3	-	<0.1	0.1	-	<0.1	0.2	-

表-6 固液比を変えた短期溶出試験濃度の比較(砒素、セレン、ふっ素、ほう素)

試料 元素	SR			KB6		
	固液比1:10 A(mg/L)	固液比1:2 B(mg/L)	濃度比 B÷A	固液比1:10 A(mg/L)	固液比1:2 B(mg/L)	濃度比 B÷A
	As	0.010	0.029	2.9	<0.001	<0.001
Se	0.008	0.039	4.9	0.003	0.011	3.7
Se ⁴⁺	<0.001	<0.001	-	<0.001	<0.001	-
Se ⁶⁺	0.008	0.037	4.6	0.002	0.010	5.0

性評価において、課題があることが分かった。

5. 大型カラム試験

5.1 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⁸⁾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。

5.2 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-7、各カラムの仕様を表-7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-8)

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、カラム3は覆土がない条件とし、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。



図-7 大型カラム試験装置

表-7 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湛水	

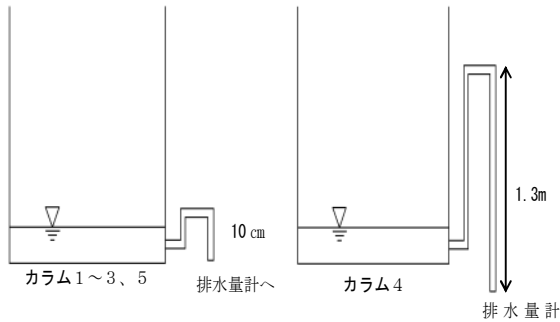


図-8 排水管からの空気流入対策

カラム4は湛水条件を想定

5.3 実験結果

実験は2012年6月13日より2014年12月24日までの約2年半の期間実施した。土壌水分に関しては2013年3月11日までの約270日間、その他のデータに関しては2014年3月18日までの約640日間の実験結果を整理する。

5.3.1 浸出水量

図-9に浸出水量の時間変化と雨量との関係を示す。また、表-8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

表-8 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

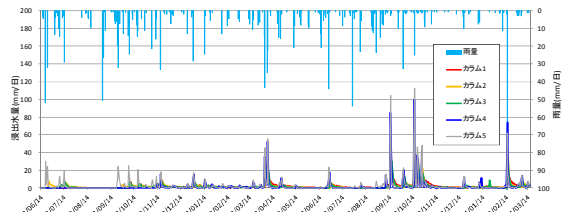


図-9 浸出水量と雨量との関係

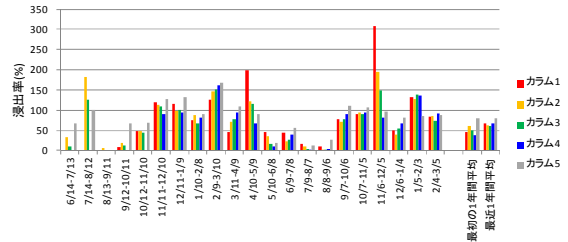


図-10 各カラムの浸出率の変化

実験開始より30日ごと浸出水量を雨量で割った値

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。

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、他のカラムと浸透率に大きな違いがない（図-10）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多いことに起因すると考えられる。

初通水後の浸出率（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%であり（図-10）、覆土条件による透水性の違いはないよ

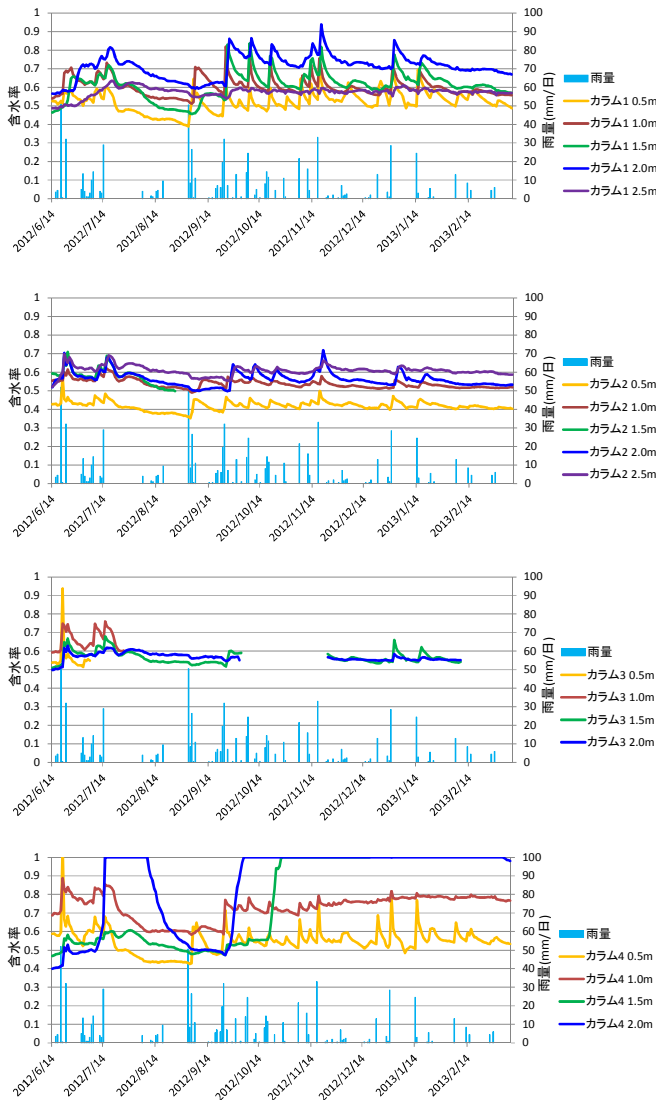


図-11 含水率と雨量との関係

うに見える。別途実施した実大盛土実験では、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。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。

5.3.2 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-11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

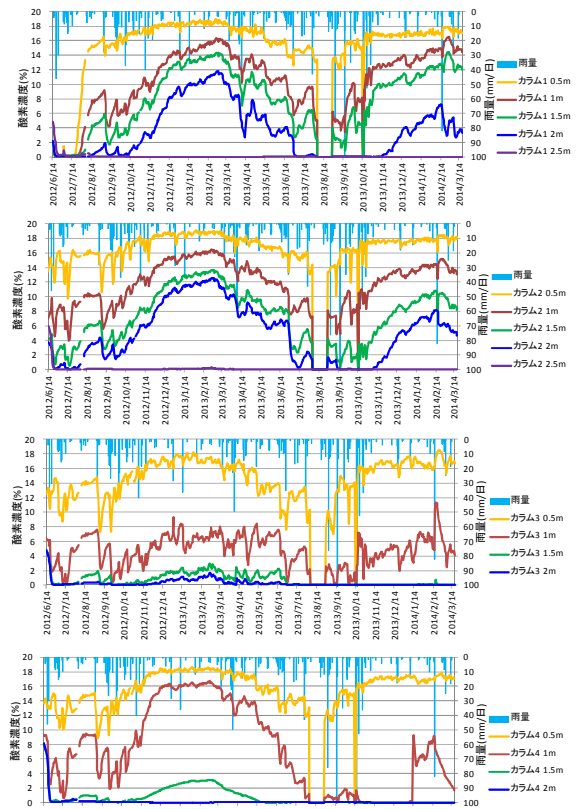


図-12 酸素濃度と雨量との関係

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。

5.3.3 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雨量との関係を図-12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）が起こっていると推測される。

5.3.4 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

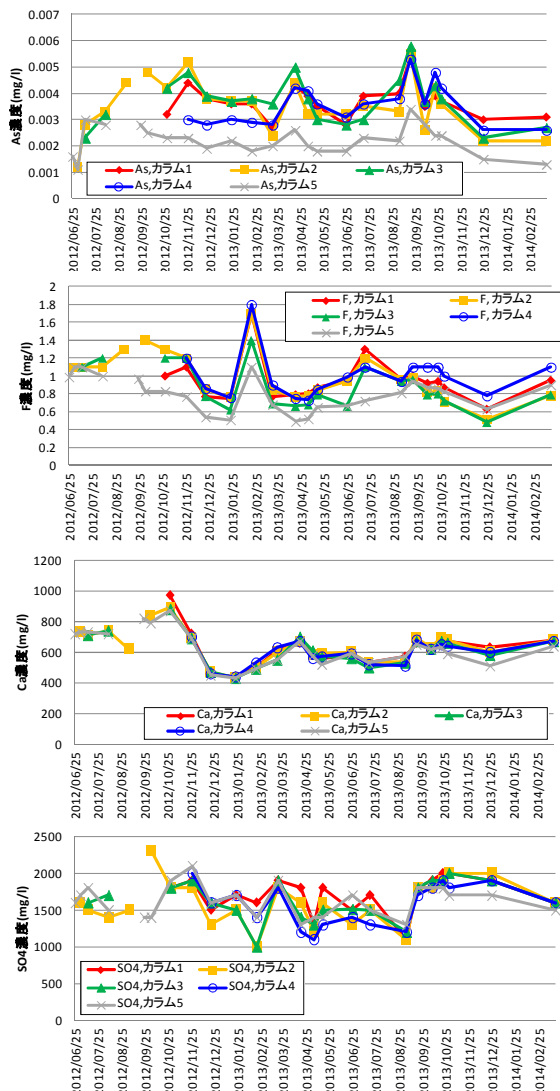


図-13 浸出水の化学分析結果（砒素、ふっ素、カルシウムイオン、硫酸イオン）

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-13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

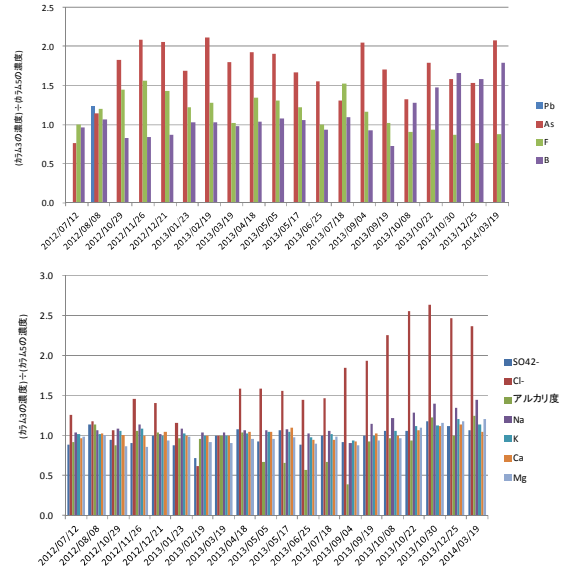


図-14 カラム5とカラム3の浸出水の濃度比（上:重金属等、下:その他成分）

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-14）。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、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増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。

6. 自然由来重金属等を含む岩石の発生源評価の検討

自然由来重金属等を含む岩石の発生源評価方法としては、土壤汚染対策法の方法に準ずる方法が実施されることが多い。すなわち、試料を粉碎し、目開き 2mm のふるいを通過した試料に対して環告第 18 号および第 19 号（平成 15 年）を実施し、土壤溶出量基準および土壤含有量基準と比較するものである。

一方、岩石を粉碎して溶出試験し、土壤溶出量基準値と比較する方法についてはかねてから問題が指摘されている。たとえば、建設工事ではより大きな塊で使用されるので、粉碎して溶出試験することは過剰に安全側の評価になる、岩石に含まれる黄鉄鉱などの酸化に伴い、重金属等の溶出が著しく促進される事例を評価できない、酸性水の影響についても評価が必要である、などである。

「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壤への対応マニュアル（暫定版）」¹⁾ではスクリーニング基準を新たに設け、全含有量が日本もしくは地球の上部地殻の全含有量の平均値以下であるものは対策不要とし、全含有量がスクリーニング基準を満足しないものについては短期溶出試験、酸性化可能性試験および実現象再現溶出試験の結果を総合的に判断して評価することとしている。

このマニュアルの方法についても課題がある。まず、スクリーニング基準を満足する岩石が、短期溶出試験（粉碎試料の環告第 18 号試験）を満足するとは限らず、現場での対応に混乱が生じている。また、各種の溶出試験結果の評価の評価基準が明確化されていない。さらに、中部横断自動車道の事例や本研究から、元素によって溶出試験結果と土研式雨水曝露試験結果に値の大きな乖離がある場合や、発生土の利用環境も評価に取り込む必要があることなどが明らかになってきた。

このような状況を踏まえ、次のような評価方法を提案する。

- 1) スクリーニング基準は適用しない。
- 2) 地下水面より高い位置に盛り立てる場合において、土研式雨水曝露試験結果による浸出水の年平均濃度が地下水環境基準を満足する場合は対策不要とする。

この基準は、地下水環境基準が年平均濃度で評価する点と、曝露試験結果の浸出水年平均濃度がこの基準を下回るものは一般に、初期濃度が高く、時間とともに濃度低減が見られることから、長期的な環

境リスクが少ないと考えられることによる。

- 3) 地下水面より高い位置に盛り立てる場合において、短期溶出試験結果が土壤溶出量基準を満足し、かつ酸性化可能性試験結果が pH3.5 以上のものは対策不要とする。ただし泥質岩の評価に関しては過剰に安全側になることがあるので、可能な限り土研式雨水曝露試験など、溶出現象の時間変化が把握できる実現象再現溶出試験を行い、専門家による評価を実施することが望ましい。

この基準は、2) の基準および、土研式雨水曝露試験結果と短期溶出試験および酸性化可能性試験結果との関係に基づく。

- 4) 地下水面以下に盛り立てる場合については土研式雨水曝露試験その他の実現象再現溶出試験結果などについて、個別に専門家による評価を行う。

今後に残された課題としては、短期溶出試験結果と土壤溶出量基準と比較することの妥当性に関する元素毎の検討、発生源評価における盛土厚の考慮の必要性の検討、地下水面下に盛り立てる場合の評価方法の検討を挙げることができる。

7. 吸着層工法に関する材料評価試験方法の検討

自然由来の重金属等が溶出し、環境への影響が懸念される場合、従前は、2重の遮水シートによる盛土内封じ込め対策を行う事例が多かった。遮水シートによる対策は、水を通さない対策であることから、リスクを大幅に軽減できるが、費用が高額であることや、盛土内にシートを入れることによる盛土のすべり破壊やシートの破損による有害物質の漏洩の懸念など、課題もある。

近年、吸着層工法や不溶化工法といった低価格の対策工法が現場で採用されることが増えてきたが、資材の評価方法や設計法に関する基準や指針が存在せず、工法の信頼性に対する懸念がある。そこで、土木研究所では平成 22 年より土木研究所と大学、民間企業による「盛土内処理による自然由来の重金属等対策工法の材料評価に関する共同研究」を立ち上げ、吸着層工法に用いる資材の材料評価方法の検討を行った。

共同研究の中で、吸着層工法の設計・施工のための材料評価試験方法の体系を整理（図-15）すると共に、吸着資材の評価のための試験方法として、不飽和カラム吸着試験および、繰り返し吸着試験（図-16）を開発した。

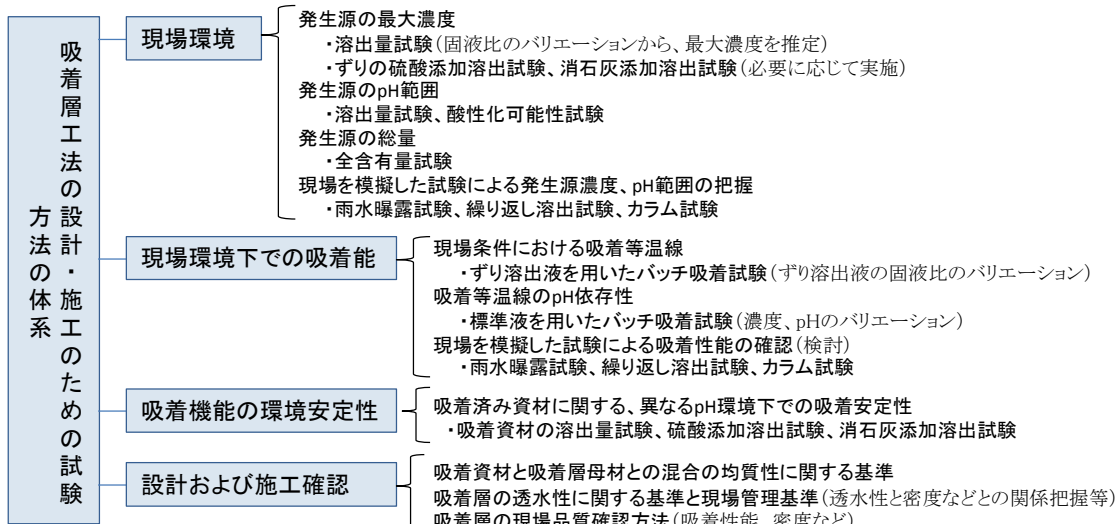


図-15 吸着層工法の設計・施工のための試験方法の体系

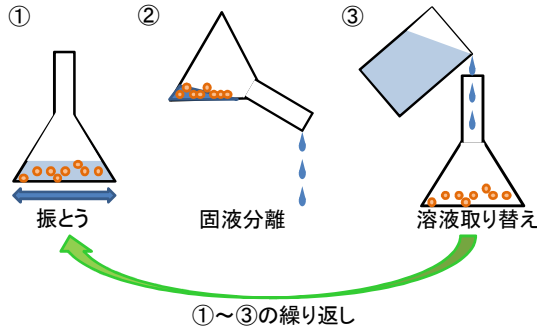


図-16 繰り返し吸着試験

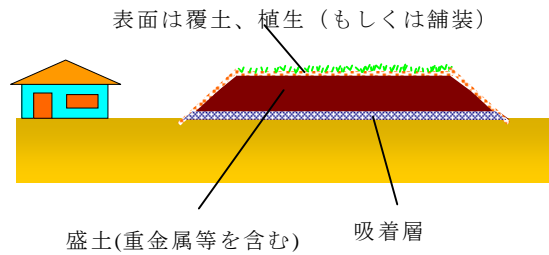


図-17 吸着層工法の概念図²⁾

8. 吸着層工法における水みち発生に関する検討

8.1 検討の背景

吸着層工法(図-17)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ると、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。

そこでまず、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、実験を行った。

8.2 予備実験の方法と結果

図-18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

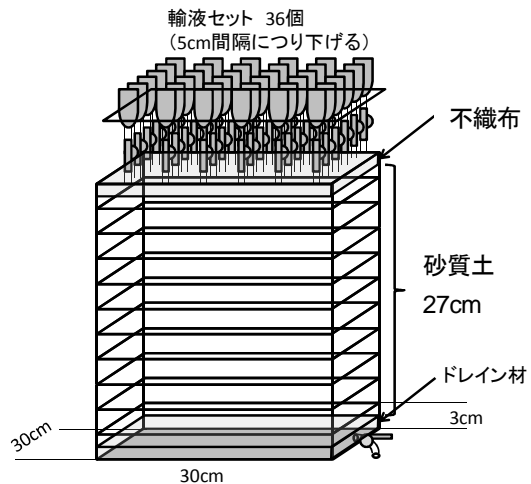


図-18 水みち形成実験装置(予備実験)

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

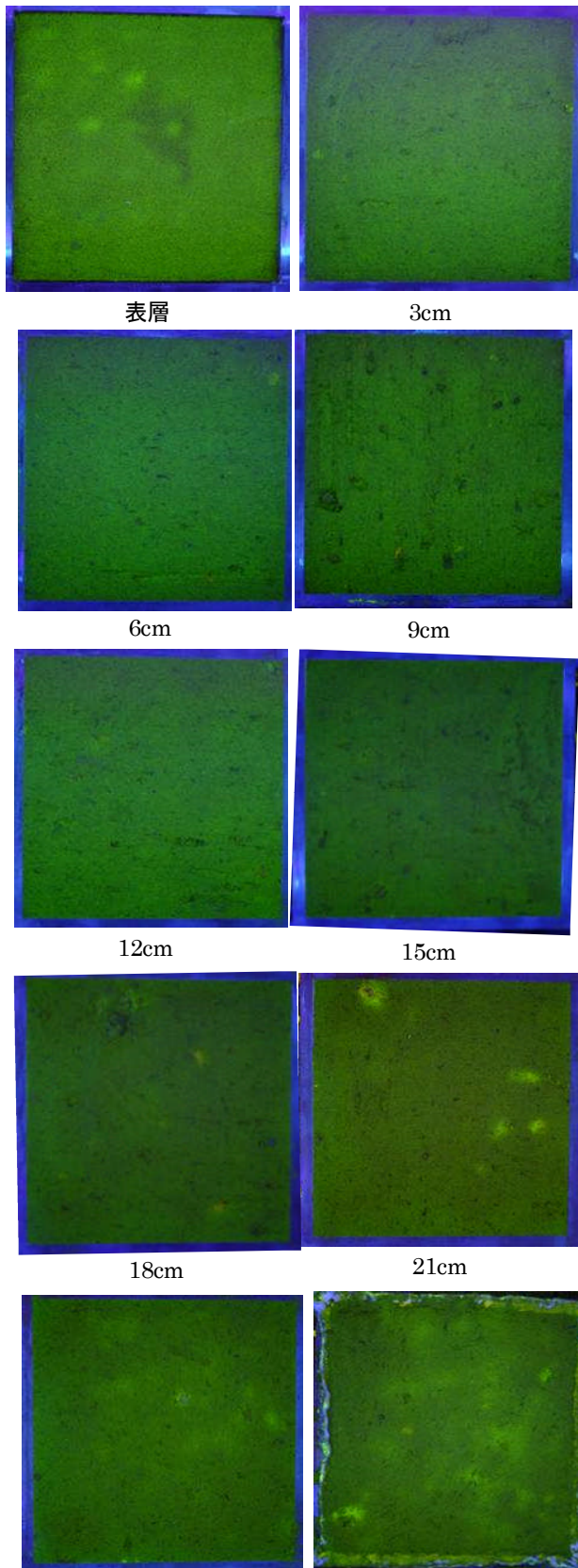


図-19 試料断面の写真(予備実験)

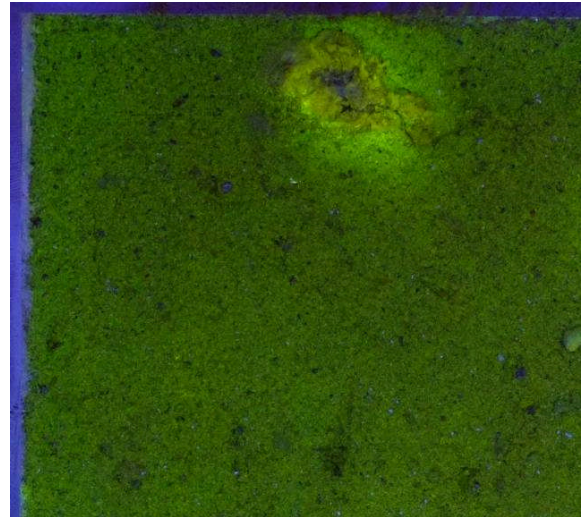


図-20 深度 21cm の左上部分の拡大写真

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。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-19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-20)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。

8.3 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ったことから、図-21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-22に示す。また図-23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。

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-23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、粘土分の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。

蛍光染料を用いた水みち形成実験の結果、透水現象

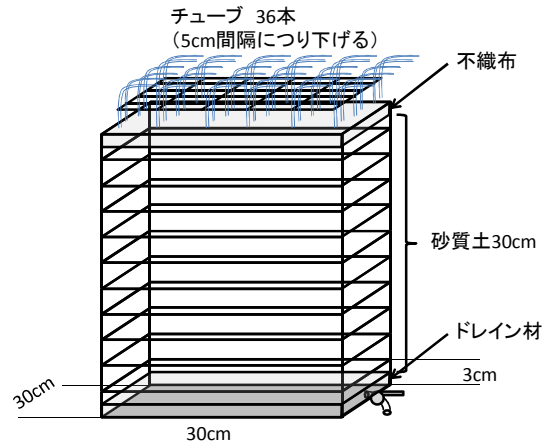


図-21 水みち形成実験装置 (本実験)

の不均質や土粒子の移動が示唆されたこのことから、吸着層の設計にあたっては水みちの形成や土粒子の移動を考慮する必要があると考えられる。

8.4 水みち発生を考慮した吸着層の試験方法の検討

本研究においては土質による水みち形成の差については検討できなかった。そこでどのような土で水みちが形成されるかについての知見が十分でない現状を踏まえ、吸着層工法の確実な効果を確認するための、吸着層内の水みち発生を考慮した吸着層の試験方法を検討した。

8.4.1 吸着層の試験方法での考慮事項

吸着層に求められる性能としては、①盛土内部の水を適切に排水させる透水性、②吸着物質と水との十分な接触時間が確保できる透水性、③吸着物質の保持能力、が挙げられる。また、吸着層の設計上考慮しなければならない条件として、④吸着層内に水みちの発生が起こる場合にはそれを踏まえて吸着材配合量を増やす必要がある。

これらを満足させる条件を規定することは現状では困難なので、施工条件に合わせた室内試験を検討することとした。具体的には、施工しようとする材料に多量の水(たとえば設計対応年数分の浸透量)を流下させた後の吸着層に対して不飽和カラム吸着試験を実施し、その性能を確認することを考えた。本試験の結果では、仮に、吸着層に水みちが形成される材料を用いる場合、あるいは吸着材が一部流出した場合には、吸着量が少なく見積もられる。

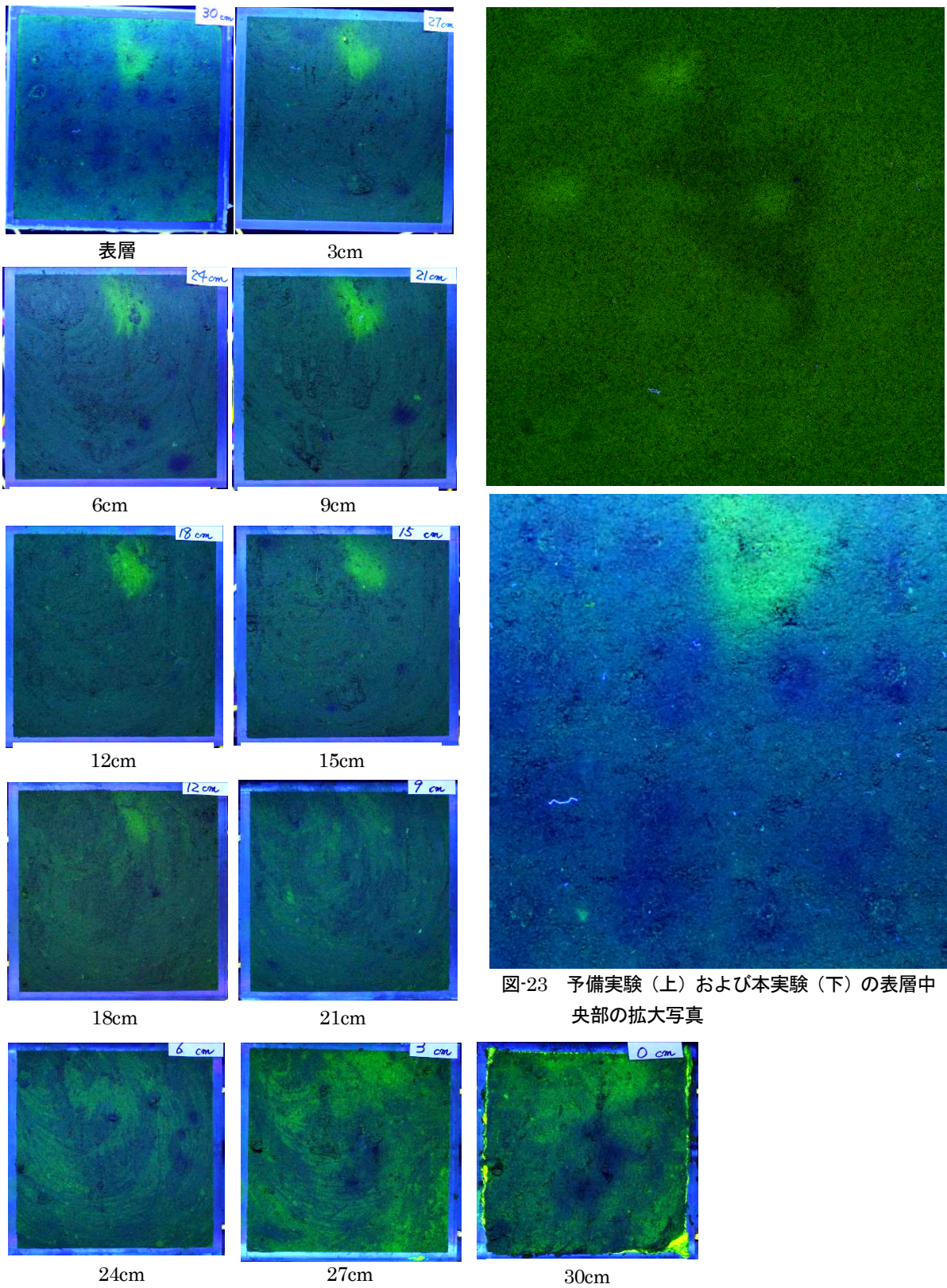


図-22 試料断面の写真 (本実験)

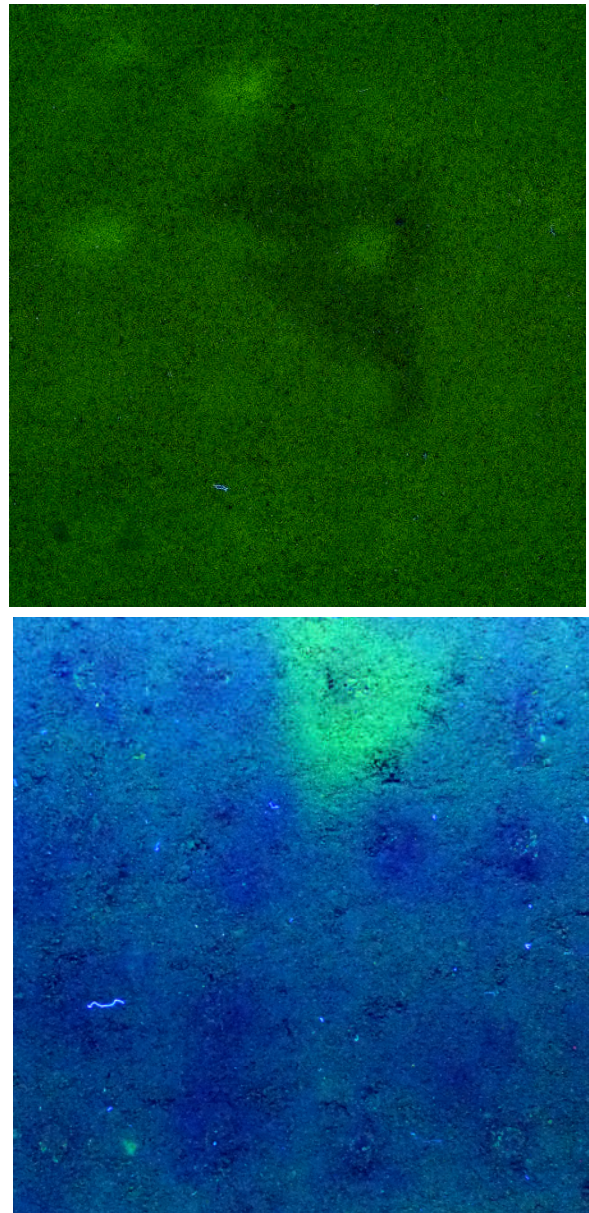


図-23 予備実験 (上) および本実験 (下) の表層中央部の拡大写真

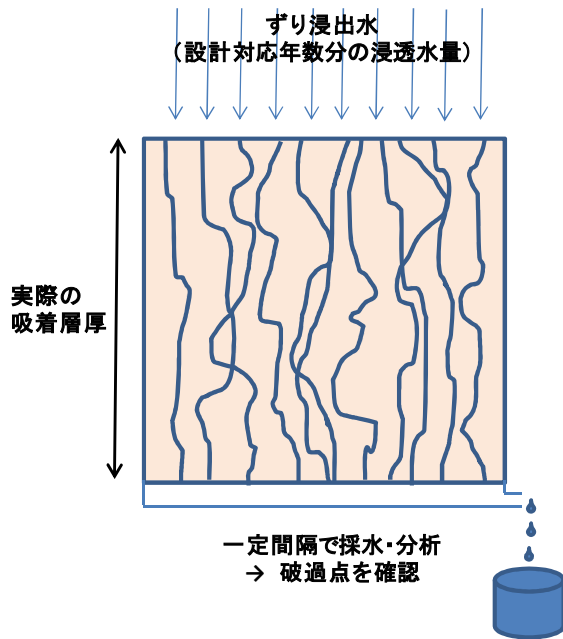


図-24 施工時に行う吸着層の試験方法

8.4.2 施工時に行う吸着層の試験方法

以下に、施工時に行う吸着層の試験方法を示す。概念図を図-24に示す。本試験は吸着層母材、吸着材および要対策土の全てが明確になった後の最終確認試験の位置づけで実施することを想定している。

- 1) 現地で用いる吸着材および吸着層母材を用いる。
- 2) 不飽和浸透カラムに実際の吸着層と同様の条件で土を充填する。
- 3) カラム長は現地の吸着層厚とする。
- 4) カラム上部より、設計対応年数分の浸透量の水を流下させる。(例えば、浸透率10%、設計対応年数100年とすると、年降水量の10倍)
- 5) 現地で用いる要対策土を用いて作成した汚染水を流下させる。
- 6) カラムから浸出する水を一定間隔で採水、分析し、破過点を確認する。
- 7) 総吸着量が設計通りになっているか確認する。

水みちが形成された場合や吸着材が吸着層外に流出した場合には、総吸着量が小さくなると考えられる。また、本試験では要対策土を用いて汚染水を作成することから、より実態に即した結果が得られると考えられる。

9. 吸着層工法の設計法に関する検討

吸着層工法の設計に関しては、北海道環境保全技術協会による「吸着層工法設計マニュアル」⁹⁾が存在す

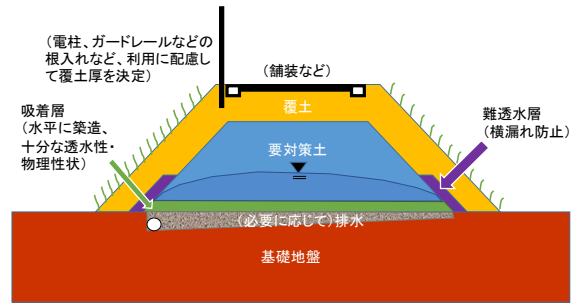


図-25 吸着層工法の断面構成

るが、これまでの検討結果を踏まえ、自然由来重金属等を含む発生土を用いた盛土における吸着層工法の設計法に関して、独自に技術的配慮事項をまとめた。

1) 基本的考え方

自然由来重金属等を含む発生土を用いた盛土に浸透する雨水には、発生土から溶出した重金属等が含まれる。吸着層工法は、重金属等を含む浸透水を吸着層に浸透させ、吸着層に含まれる吸着物質に重金属等の成分を吸着させることで、地下浸透水の重金属等濃度を低減させ、盛土の環境安全性を確保するものである。

吸着層への浸透は、基本的に鉛直下方流を想定しているため、その前提条件が満足できる構造とする。

2) 吸着層工法の断面構成

吸着層の上位に要対策土層を築造する。その外側には、植生工、舗装工の施工や、盛土利用において要対策土層を掘削しないためなどの目的で覆土層を設ける。

吸着層は、一般に吸着材と母材を混合して調製されるが、盛土内への浸透水を浸透させる必要があることから、吸着層より上位にある盛土より、透水性が良好である必要がある。また、盛土内に水が滞留することがあるので、盛土内の水がのり面より漏出しないよう、のり面の下半部には難透水層を形成する。さらに、吸着層の浸透量は場所による不均衡があると浸透量が多い場所から先に吸着能力が失われる。吸着層の表面に傾斜があると水は境界面に沿って側方流が発生すると考えられるので、できる限り水平に築造するなどの工夫が必要である。

なお、吸着層の下位の地盤の透水性が低く、地盤への浸透が確保できない場合は、盛土内部の水が吸着層下面より排水できるよう、排水層を設置する。

概念図を図-25に示す。

3) 盛土の立地に求められる性能

吸着層の浸透量の場所による不均衡が生じないように、沈下や地すべりなどが生じない、安定な地盤上に築造する必要がある。また、地盤より吸着層への地下

水の流入があると吸着層の機能が損なわれることから、地下水の流入がない場に築造する。

4) 吸着材に求められる性能

吸着材に求められる性能として、①吸着材そのものが環境への悪影響をもたらさないこと、②吸着材が吸着層にとどまり、溶解、移動等が起こらないこと、③盛土内の環境変化によらず、長期にわたり吸着性能を維持できること、④吸着層の調製において、吸着材と吸着層母材とが均質に混合できるなど、施工性に優れること、を挙げることができる。このほか、吸着材の吸着性能は、対象元素濃度のみならず、共存物質の濃度に依存することから、⑤吸着材の性能評価に当たっては、実際の要対策土を用いて汚染水を作成して評価する必要がある。

5) 吸着層に求められる性能

吸着層に求められる性能として、□要対策土からの総溶出量を適切に評価し、安全を見込んだ十分な吸着能力を持つこと、②盛土として適切に締め固めた際に十分な透水性が確保できること、③盛土構造物として適切な物理性状を持つことが求められる。

10. 関連マニュアルの改訂素案

本研究および現場技術相談内容を踏まえて、関連するマニュアルである、「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」⁹⁾において、改善すべき点を以下にまとめた。なお、これらの一部についてはすでに、土木研究所と土木研究センター地盤汚染対応技術検討委員会との共著である「建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック」¹⁰⁾に記述した。

1) 調査の必要性に関する記述

事業費抑制および対応の容易さの観点から、事業段階のできるだけ早期に検討を開始することが望ましいことを記述する。

2) 土壌汚染対策法に関する情報の更新

平成 22 年 4 月 1 日以降の法令の改正を反映する。特に自然由来特例区域、埋立地特例区域に関する解説を記述する。

3) 酸性水対策の目的への追加

土壌汚染対策法の目的に合わせて、酸性水対策そのものは本マニュアルの目的に含めていなかったが、実務的に対応が必要なことから、目的の一つとする。

4) スクリーニング基準の削除

スクリーニング基準については適切でないので、基準を削除し、調査フローなどを修正する。

5) 搬出先に応じた試験・評価方法の明示

搬出先に応じて想定されるリスクが異なると考えられる。例えば、公共用地で土地利用が当面変化しないと考えられる土地では、実質的に環境影響がなければよいが、民有地へ搬出する場合には、地下水汚染リスクがないと考えられる場合においても土壌汚染対策法による汚染土壌調査によって要措置区域等の指定を受ける可能性があるため、配慮が必要であるなどである。

そのため、搬出先ごとに必要な配慮内容とその評価方法を示す。

6) 評価方法の例示

土研式雨水曝露試験による浸出水の年平均濃度を地下水環境基準と比較する方法や、短期溶出試験（土壌溶出量基準）と酸性化可能性試験（pH3.5）の組み合わせによる評価方法などを記述するほか、総合的評価に関する例示を行う。

7) 対策工法の施工に関する留意点の追記

事例に基づいて施工に関する留意点を追記する。特にシールド発生土に関する記述は現状で一切ないが、発生土の取り扱いや評価方法に関する解説が必要と考えられる。

8) モニタリングにおける配慮事項

地山湧水がある場合など、必要に応じて盛土内水位モニタリングなどをするなど、配慮事項を追記する。

11. まとめ

本研究では、主に土研式雨水曝露試験結果に根ざして自然由来の重金属等の発生源評価方法の検討を行った。また対策工法に関しては、吸着層工法の基礎的な検討を実施した。

発生源評価に関して研究の現状を踏まえた発生源評価手法の提案を行ったが、より適切な対応のために、元素毎に対策場所や発生土の利用環境に応じた評価方法の開発が望まれる。

対策工法に関しては、安価で有望な対策工法であるが技術基準等が未整備な吸着層工法を対象に、基礎的な検討を実施した。その結果を踏まえ、吸着層工法の確実な効果を確認するための吸着試験方法を考案した。また、吸着層工法の設計法に関して技術的配慮事項を提案した。

そして、本研究の結果および現場技術相談内容を踏まえ、「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」⁹⁾の改善すべき点としてとりまとめた。

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)

参考文献

- 1) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル委員会(2010): 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル(暫定版). 国土交通省ホームページ, 90p.
- 2) 品川俊介・佐々木靖人(2010): 岩石に含まれる自然由来重金属等の溶出特性評価方法. 土木技術資料, Vol.52, p.10-13
- 3) 土木研究所ほか(2007): 建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル(暫定版). 土木研究所共同研究報告書, No.358, p.88-89
- 4) 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会編(2002): 土質試験の方法と解説—第1回改訂版—, 地盤工学会, p.164
- 5) 安元和己・品川俊介・佐々木靖人(2011): 岩石の長期曝露試験による重金属等の溶出特性, 日本応用地質学会平成23年度研究発表会講演論文集, pp.161-162
- 6) 国土交通省関東地方整備局甲府河川国道事務所(2013): 記者発表資料 中部横断自動車道(富沢～六郷)(仮称南部インターチェンジ工事現場内で検出されたセレンへの対応について 流出原因と地下水の利用中止範囲縮小等のお知らせ【第3報】), 国土交通省関東地方整備局甲府河川国道事務所ホームページ, http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000088912.pdf
- 7) 島田允典(2014): 自然由来重金属と環境汚染—応用地質学・地球化学的データバンカー, 240p., 愛智出版.
- 8) 品川俊介・安元和己・浅井健一・中川清森・佐々木靖人(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成23年度発表講演集, pp.2077-2078.
- 9) 一般財団法人北海道環境保全技術協会技術委員会(2012): 吸着層工法設計マニュアル. 60p.
- 10) 独立行政法人土木研究所・一般財団法人土木研究センター地盤汚染対応技術検討委員会編著(2015): 建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック. 101p., 大成出版社.

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

SUGAWARA Yu

Abstract: A result of the exposure test and the large scale column test was analyzed for the pollution source evaluation method which are natural sourced heavy metals. And the pollution source evaluation technique of the rocks containing natural sourced heavy metals was proposed based on an experimental results.

A system of material evaluation tests for an adsorbed layer technique was systemized and serial batch adsorption test method has been developed. And selective permeation and soil particle movement was suggested by the experiment of making water path. After the results, the new adsorption test method for verification the effect. It was based on the result and the adsorption test method to verify the effect of the adsorbed layer technique was developed. Moreover, technical consideration of a design method of the adsorbed layer was proposed.

A rough draft of the revised version of the related manual was gathered based on this study and a result of the site technological consultation contents.

Key words: Natural source, Heavy metals, Pollution source evaluation, Exposure test, Adsorption layer technique