

7.5 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、平成 21 年度に作成した自然由来の重金属等のハザード評価に関する基準について、土研式雨水曝露試験等の結果を再整理して検証したところ、過去に作成した評価基準はおおむね妥当と考えられたが、泥質岩に適用しようとする誤判定の可能性があることが再確認された。また、曝露試験結果を分析したところ、スレーキングに伴い溶出濃度が増加する傾向が見られ、岩石固有の特性と浸出水濃度に関係が見られることが分かった。さらに、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開発、製作した。

対策工法に関しては、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方法を開発した。

キーワード：自然由来 重金属等 曝露試験 スレーキング 大型カラム試験

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、平成 21 年度に作成した自然由来の重金属等を含む岩石のハザード評価に関する基準について、継続実施中の土研式雨水曝露試験等の結果を再整理して検証した。また、土研式雨水曝露試験結果を詳しく分析し、気温、降水量や岩石の物理的風化等の性状と浸出水濃度との関係を調べた。さらに、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開発、製作した。

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。

2. 自然由来重金属等を含む岩石のハザード評価基準の再検討

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¹⁾。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¹⁾や酸性化可能性試験¹⁾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が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

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
ひ素	JIS K 0102 61.2 または 61.3
pH	JIS K 0102 12.1
EC	JIS K 0102 13

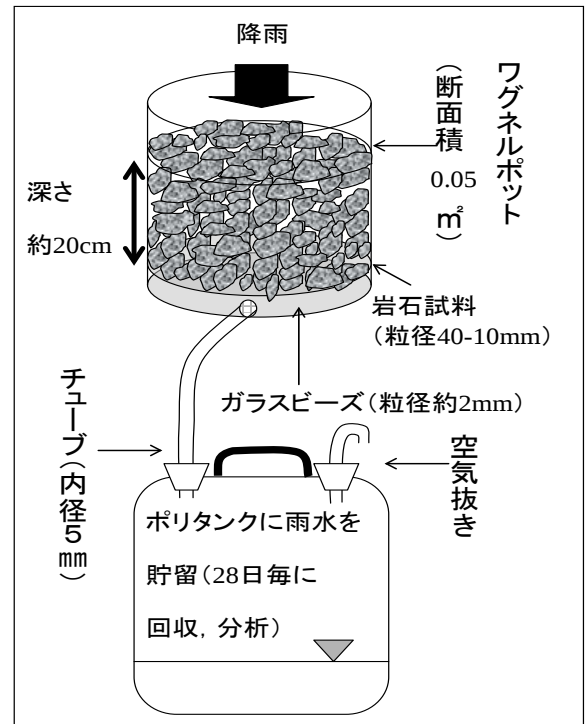
表-3 検液の測定方法

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 ₂ O 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 28 日間貯留	40～10mm

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。

図-1 土研式雨水曝露試験の概要³⁾

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%）、はじめての約 1 年間の浸出水の最低 pH が 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

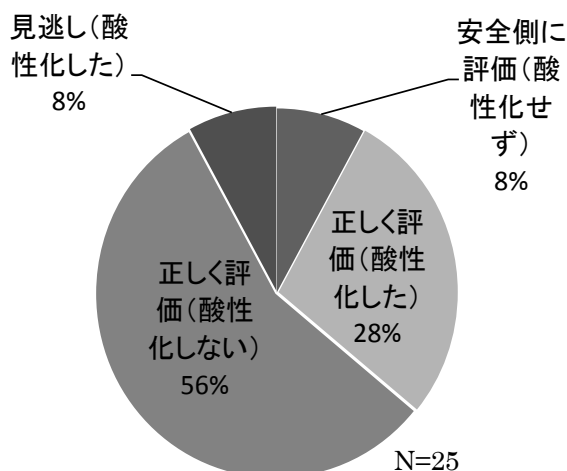


図-2 土研式雨水曝露試験結果（約1年間の最低pH）に基づく酸性化可能性試験の評価

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

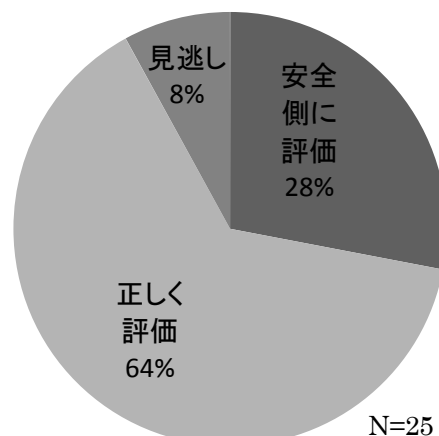


図-3 土研式雨水曝露試験結果（約1年間の平均濃度）に基づく重金属の長期溶出に関する判定の評価

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ものの、泥質岩に適用しようとする場合は誤判定の可能性があると考えられる。

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。ここで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る。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は、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-5 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。

3.1 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關与する要因を把握するため、曝露期間中

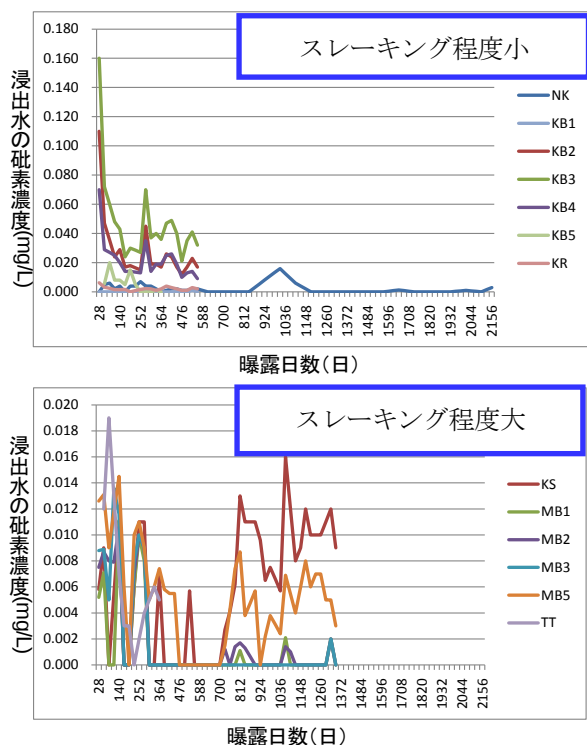


図-5 雨水曝露試験による泥質岩の浸出水濃度変化（砒素）

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-6に示す。その結果、降雨強度が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、

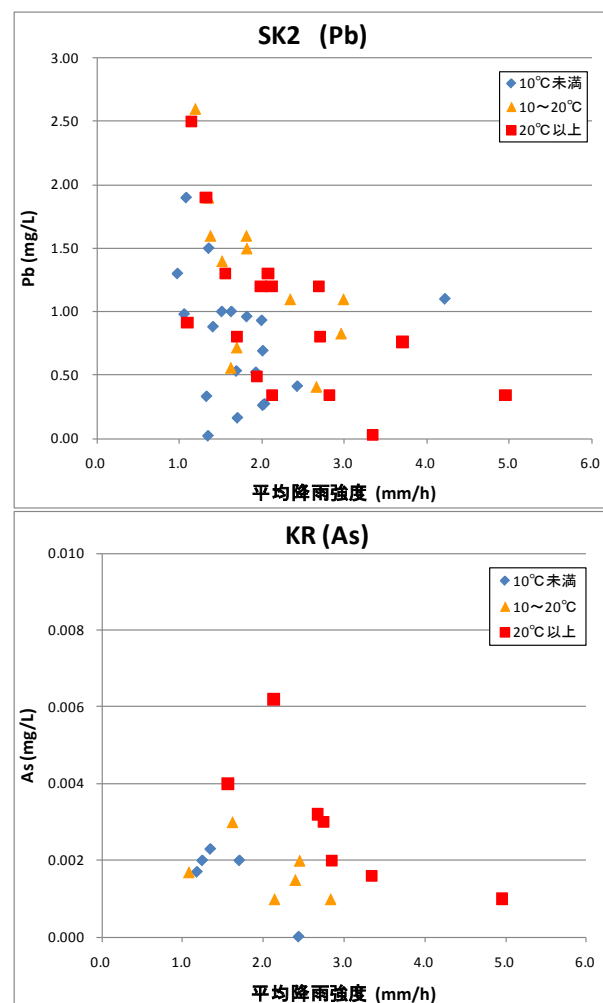


図-6 溶出濃度の降雨強度依存性と温度依存性(上:SK2、鉛, 下:KR、砒素)

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-6 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。

3.2 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に濃度が低くなる。

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⁹⁾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いえる。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. 大型カラム試験装置の製作

土木研究所では平成 21 年度より、重金属等含有掘削ずりを用いた試験盛土を構築し、盛土築造方法の違いによる内部環境、浸出水量・水質の違いに関するモニタリング調査を行っている。酸素濃度計の観測結果によると、盛土内部は転圧の違いや覆土の有無によらず好气的であると推定された⁷⁾が、盛土底面の排水層（ジオテキスタイル）を通じた空気の流通がある懸念があった。しかしながら盛土の構造上、空気の流通を遮断するような改良が困難であった。また、盛土を新たに築造するには多額の費用がかかるため、実施が困難であった。

そこで盛土と同程度の高さの大型カラムを用いた曝露試験による、内部環境、浸出水量・水質のモニタリング調査を計画した。

大型カラムによる実験は 5 ケース計画した（表-3、写真-1）。

カラムは材料に塩化ビニール管(VU600)を用い、カラム内に掘削ずり(砂質泥岩)及び覆土材料を充填した。カラム上面は解放されているので、降雨がカラム内に浸透する。浸透した雨水はカラム下端部のドレインより浸出水量計を通過し、ポリエチレン製タンクに捕集される。捕集した浸出水試料は定期的に分析を行い、ケース毎の比較を行う予定である。

ケース 1～4 では、カラム内の深度 0.5m ごとに温度、電気伝導率、土壌水分および酸素濃度センサーを埋めてあり、1 時間に 1 回自動測定する計画である。また、同深度に採水用浸出水たまりを設け、適宜土中水を抜きとって酸化還元電位の測定を行う計画である。

ケース 1～3 では、覆土の有無や覆土材料の違いによる内部環境や浸出水の性質の比較を行う計画である。また、ケース 3 と 4 では、地下水の有無による内部環境や浸出水の性質の比較、ケース 3 と 5 では、カラム長の違いによる浸出水濃度の比較を行う計画である。

表-3 実験ケース

	ずり厚	覆土	地下水位
ケース 1	2.5m	ローム 0.5m	0.05m
ケース 2	2.5m	山砂 0.5m	0.05m
ケース 3	2.5m	なし	0.05m
ケース 4	2.5m	なし	1.25m
ケース 5	1.25m	なし	0.05m



写真-1 大型カラム試験装置

5. 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ている。

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-7）を開発した。本研究の内容については平成24年度に共同研究報告書としてとりまとめを予定している。

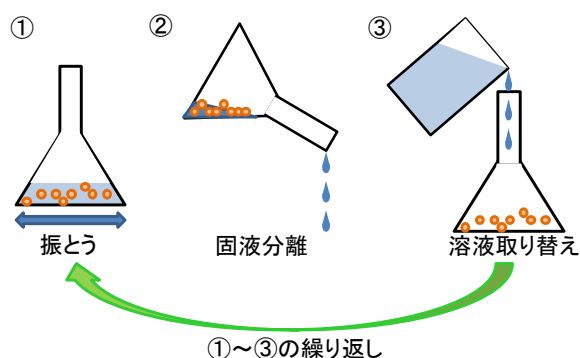


図-7 繰り返し吸着試験

6. まとめ

- ・ハザード評価に関して、過去に作成した評価基準はおおむね妥当と考えられたが、泥質岩に適用しようとする誤判定の可能性があることが再確認された。
- ・曝露試験結果を分析したところ、スレーキングに伴い溶出濃度が増加する傾向が見られ、岩石固有の特性と浸出水濃度に関係が見られることが分かった。
- ・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開発、製作した。
- ・対策工法に関しては、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方法を開発した。

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) 田本修一・伊東佳彦・岡崎健治(2008)：建設発生土に含まれる砒素の溶出特性について（その3），第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集，pp.2079-2080
- 7) 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，CD-ROM

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: Verification was made of the hazard criterion of the natural source heavy metals developed in 2009FY. According to the latest testing data, the criterion was generally appropriate, but it was confirmed that it may be inappropriate when applied to muddy rocks. On the basis of the exposure test results, it was found that the increase of metal concentration of leached water is correlated with the progress of slaking; consequently it was understood that it is related with the characteristics of rocks and the concentration of leached water. In conjunction with this study, we have developed a large scale column test equipment to simulate inside environment of the earth fill. In order to establish measures against heavy metal hazards, we have systematized testing and evaluation system of the absorptive layer method and developed some testing methods in the joint research project.

Key words : Natural source, Heavy metals, Exposure tests, Slaking, Large scale column tests