

重金属等を含む発生土の盛土内利用に向けて ～覆土による環境リスク低減の可能性の検討～

稲垣由紀子・加藤俊二・佐々木哲也

1. はじめに

建設発生土（以下「発生土」という。）の有効利用に対する社会的要請が高まる中、自然由来重金属等含有土についても、環境安全性を適切に評価しつつ盛土材等としての利用を促進することが求められている。「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（2023年版）」¹⁾（以下「自然由来マニュアル」という。）では、重金属等への対策が必要な発生土（以下「要対策土」という。）の盛土材等への利用にあたり、要対策土の重金属等溶出特性、地下水経路でのリスクの評価に基づくリスクレベル区分に応じて対策工法を選定することが示されている。その際、リスクレベル区分によっては、土壌汚染対策法に基づく基準不適合土壌への措置に適用されるような二重遮水シート等による対策では過度に安全側となる傾向で、環境安全性を確保しつつ、効率的かつ簡易な対策が求められる。

簡易な対策工法の1つとして、要対策土への覆土が考えられる。これは、覆土により盛土内への水の浸透を抑制することで、要対策土からの重金属等の溶出と周辺への流出を低減し、重金属等による周辺への影響を抑える対策である。

この対策により要対策土を盛土内部に利用する場合、以下を評価する必要がある。

- (1) 盛土内の要対策土からの重金属等溶出特性
- (2) 要対策土への雨水や地下水の浸透状況
- (3) 盛土敷地外で重金属等濃度を評価すべき地点における濃度の推移

(1) については、重金属等溶出特性を調べる各種試験方法の特徴や適用性が自然由来マニュアル¹⁾に整理されているので参照されたい。本報文では、(2) および (3) に関する検討結果を示す。

(2) については、要対策土の内部利用を模擬した盛土への降雨実験により模擬要対策土への雨

水の浸透状況を把握するとともに、その結果を浸透流解析で再現できる可能性を確認した。これらを踏まえ (3) については、要対策土からの重金属等の溶出を仮定し、長期間を対象に移流拡散解析で重金属等が盛土敷地外へ広がる状況を試算した結果から、要対策土への簡易な覆土による対策で周辺への影響を抑制できる可能性を確認した。

2. 要対策土利用を模擬した降雨実験

要対策土からの重金属等の溶出に影響を与え得る盛土内の要対策土への水の浸透状況、および盛土表面の遮水による浸透抑制効果について確認するため、以下の降雨実験を行った。

2.1 実験方法

道路盛土内部への要対策土利用を模擬し、図-1のような実験用盛土を構築した。盛土のり肩の基盤排水層、盛土内部の模擬要対策土部は、いずれも砕石を不織布で覆って作製した。模擬要対策土部の上面先端部には集水容器を設け、盛土内水位が模擬要対策土上面を超える、または降雨が上方から模擬要対策土上面に直接浸透して到達する水を回収し、接続した管で盛土外へ排水して量を確認できるようにした。図-1は天端とのり肩をブルーシートで遮水した盛土（以下「遮水あり盛土」という。）であるが、同様の形状・材料・計測機類の配置で天端およびのり肩の遮水がない盛土（以下「遮水なし盛土」）でも実験を行った。

実験では、以下に示すような降雨波形を与え、

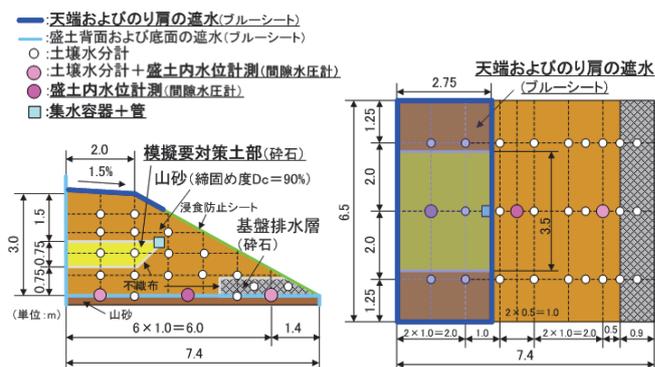


図-1 実験用盛土

盛土内に設置した間隙水圧計で盛土内水位、土壌水分計で体積含水率を計測した。

通常降雨：降雨強度20mm/hで2時間の連続降雨後166時間無降雨とするのを4回繰り返す。

長雨の後に豪雨：降雨強度20mm/hで12時間の連続降雨の後、10時間の無降雨を経て降雨強度80mm/hで3時間の連続降雨を与える。

総雨量の多い長雨：降雨強度40mm/hで50時間の連続降雨を与える。

2.2 模擬要対策土部への降雨浸透状況

集水容器からの回収水量と盛土内の最高水位を表-1に示す。遮水なし盛土に総雨量の多い長雨を与えたケースを除き、水位が模擬要対策土部上面より上には達せず、回収水量はほぼゼロであった。

図-2は、遮水なし盛土に総雨量の多い長雨を与えたケースの集水容器から回収された水量の累計（以下「累計回収水量」という。）と盛土内水位の経時変化である。図-2で橙色に塗りつぶした時間帯のみで、水の回収による累計回収水量の増加が見られ、盛土内水位が模擬要対策土上面を超えていた。

これらの状況から、模擬要対策土部への上から直接の水の浸透はほとんどなく、要対策土への水の浸透および要対策土からの重金属等の溶出に与える影響が大きいのは、盛土内水位の上昇であると考えられる。また、長雨を含む降雨条件において、遮水あり盛土では遮水なし盛土に比べて盛土内水位の上昇が抑えられ（表-1）、天端およびのり肩の遮水による効果が確認された。

表-1 回収水量および最高水位

降雨波形	遮水なし盛土		遮水あり盛土	
	回収水量	最高水位	回収水量	最高水位
通常降雨	0L	0.11m	0L	0.23m
長雨の後に豪雨	0L	1.28m (模擬要対策土内)	0.41L	0.34m
総雨量の多い長雨	13,538L =13.538 m ³	1.54m (模擬要対策土上面より上)	0.61L	0.93m (模擬要対策土内)

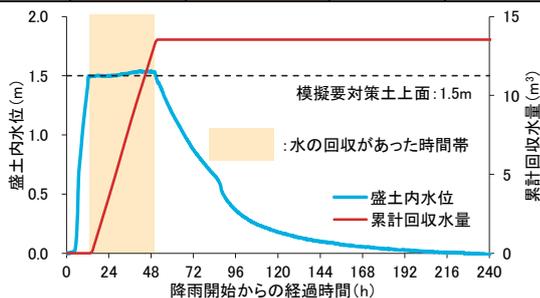


図-2 盛土内水位と累計回収水量
(遮水なし盛土・総雨量の多い長雨)

3. 浸透流解析による降雨浸透状況の再現

2. の結果から、要対策土への水の流入は主に盛土内水位の上昇によるもので、要対策土からの重金属等の溶出の評価に際しても盛土内水位の再現性が重要であることがわかった。

そこで、長期的な降雨浸透や重金属等の溶出・広がりへの評価に向け、浸透流解析で2. の盛土内水位を再現可能なパラメータの設定を検討した。

3.1 解析手法および条件

実験用盛土を図-3のようにモデル化、模擬要対策土部と基盤排水層は碎石、その周辺全体は山砂とし、Dtransu-2D・ELにより図-4の不飽和特性曲線（サクシオン圧曲線および比透水係数曲線）と表-2のパラメータを用いて浸透流解析を行った。

山砂の不飽和特性曲線には、「河川堤防の構造検討の手引き」²⁾の記載値を用いた。サクシオン圧曲線は2. の実験に用いた山砂の保水性試験結果と整合的であった。その上で山砂の透水係数は、盛土が層毎に水平方向の転圧で構築されることに伴う異方性が想定されることを考慮し、かつ2. の実験の盛土内水位を再現可能な値として、変水位透水試験結果に対し水平方向：約10倍、鉛直方向：約5倍の値を設定した。なお、堤防の浸透

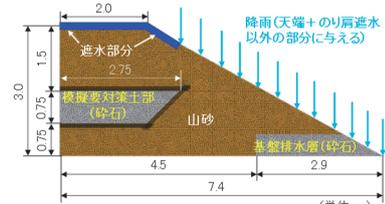


図-3 実験用盛土のモデル化（遮水あり盛土の例）

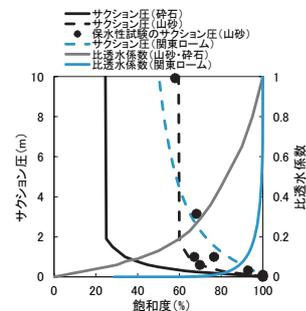


図-4 不飽和特性曲線

表-2 解析に用いたパラメータ

透水係数 (m/sec)	山砂	碎石	関東ローム
	水平: 2.0×10^{-5} 鉛直: 1.0×10^{-5}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-6}
間隙率	0.43	0.4	0.75
比貯留係数 (m ⁻¹)	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}
縦分散長 (m)	0.1	0.1	1
横分散長 (m)	0.01	0.01	0.1
分子拡散係数 (m ² /sec)	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}
屈曲率	0.5	0.5	0.5

流解析においても再現透水係数が室内透水試験による透水係数よりも高くなることや、透水性の異方性が確認されている³⁾。

降雨は、遮水あり盛土ではのり肩遮水の部分を除いたのり面のみ（図-3）、遮水なし盛土では天端とのり面全体の、直接浸透する部分に与えた。

3.2 浸透流解析結果

着目した時点における浸透流解析結果と実験結果を比較した。図-5は遮水なし盛土に総雨量の多い長雨を与えた場合の例である。実験結果の体積含水率は、全て砂質土を対象とした換算式で求めているため、碎石中の体積含水率は参考値である。

全体として3.1のように透水係数に割増および異方性を考慮したことで、盛土内の水位形成状況や体積含水率分布は実験結果と概ね整合した。

同様の傾向は、遮水あり盛土や他の降雨波形の結果でも見られ、評価に際しては、室内透水試験の供試体と盛土の状態の違いや、盛土における透水性の異方性の考慮が必要となることがわかった。

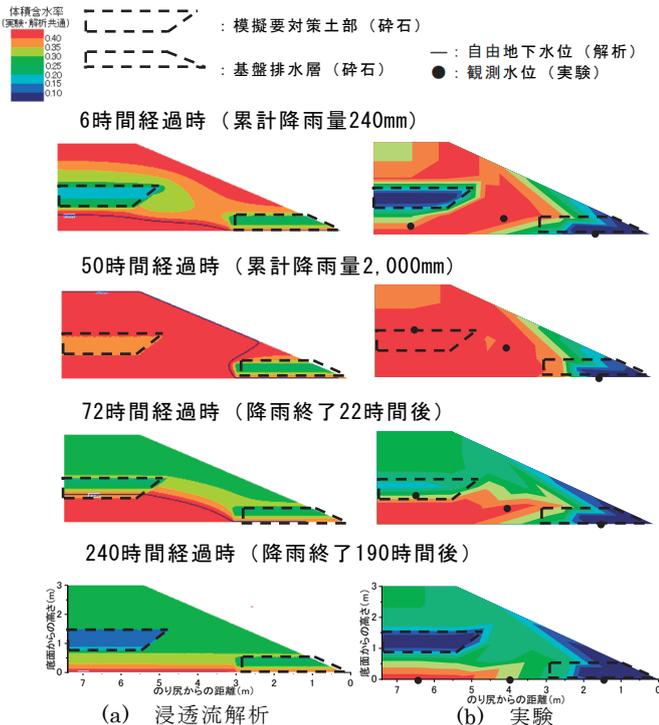


図-5 遮水なし盛土の体積含水率分布および水位

4. 移流拡散解析での長期的な重金属等影響評価

要対策土への覆土による対策の適用可能性を確認するため、移流拡散解析により盛土敷地外への長期的な重金属等の影響を評価した。

4.1 盛土のモデル化

図-3を両断面化した盛土が関東ロームの基礎地

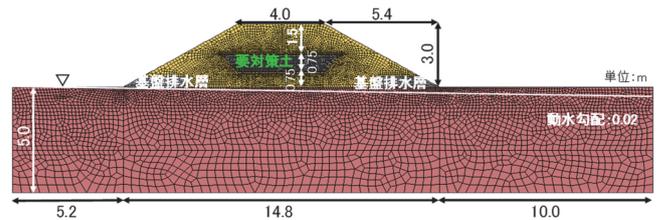


図-6 実験用盛土の両断面モデル化（遮水なし盛土の例）

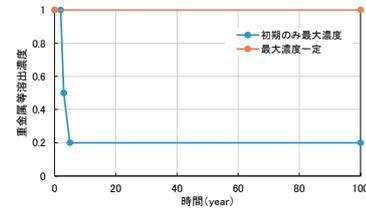


図-7 要対策土部の重金属等溶出特性

盤上にある（図-6）想定で、Dtransu-2D・ELを用い3. を踏まえて図-4および表-2のパラメータを設定し、100年を対象に移流拡散解析を行った。

要対策土部には図-7に示す重金属等溶出特性を設定した。濃度は最大値を1として正規化している。要対策土からの重金属等溶出濃度は、溶出特性が不明の場合に安全側として「最大濃度一定」のような設定が考えられるが、長期的に一定とは限らず初期のみ高濃度の場合もある⁴⁾ため、「初期のみ最大濃度」と併せて2パターンとした。

降雨波形は、降雨強度0.68mm/hの連続降雨とした。2. より降雨波形は盛土内水位形成に大きな影響を与えると考えられたが、1年間のアメダスデータと年降水量の平均化のいずれで与えても、解析結果に大きな違いがなかった⁴⁾ことによる。

4.2 解析ケース

解析は表-3に示すケースで行った。2. および3. で、遮水あり盛土では遮水なし盛土に比べて盛土内水位の上昇が抑えられる状況が再現されたため、天端およびのり肩の遮水の有無による違いを比較した。また、要対策土部の重金属等溶出特性（図-7）の違いによる比較をした。

表-3 対象期間100年の移流拡散解析実施ケース

	盛土	重金属等溶出特性
ケース1	遮水あり盛土	最大濃度一定
ケース2	遮水なし盛土	最大濃度一定
ケース3	遮水なし盛土	初期のみ最大濃度

4.3 解析結果

3年後、10年後、100年後を例に、図-8に盛土および基礎地盤における重金属等濃度の分布を凡例のように色分けして示す。図-9には地下水流下流側の評価地点（図-8に●で示した点）での重金属等濃度の推移を示す。

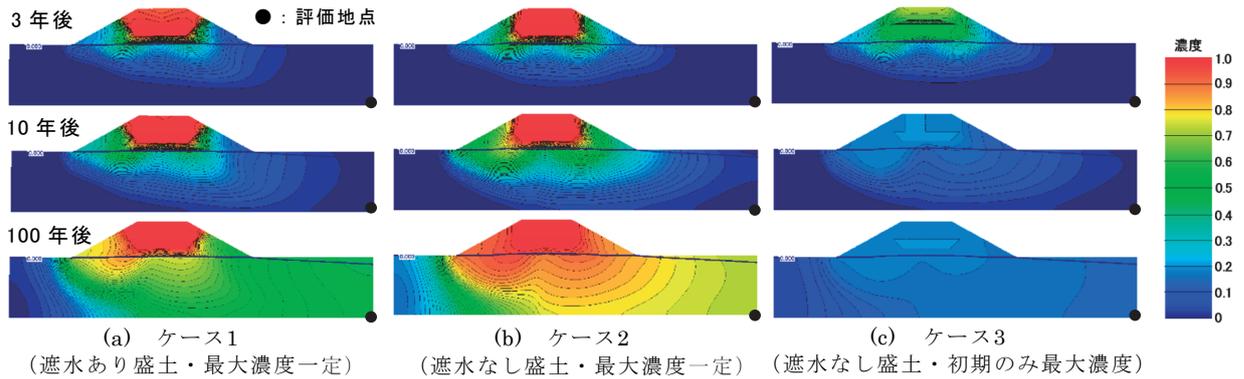


図-8 長期的な重金属等拡散の予測

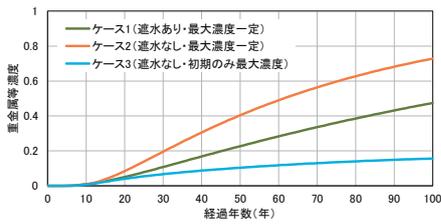


図-9 評価地点における重金属等濃度の推移

各ケースとも、重金属等濃度は盛土敷地外へ向かって要対策土からの最大溶出濃度以下となり、覆土による流出抑制と地下水での希釈で周辺への影響を抑制できる可能性が確認された。

4.3.1 天端およびのり肩の遮水による効果

図-8より、重金属等濃度は各時点とも、ケース1（遮水あり盛土）ではケース2（遮水なし盛土）に比べて高濃度の領域が狭い分布となった。評価地点で同じ濃度に達するまでの時間もケース1の方が長く（図-9）、比較的簡易な遮水で盛土敷地境界での濃度がより抑えられる結果となり、周辺への影響を抑制できる可能性が確認された。

4.3.2 要対策土からの重金属等溶出特性の影響

図-8で濃度0.2以上の領域に着目すると、ケース2（最大濃度一定）では時間の経過に伴い拡大したが、ケース3（初期のみ最大濃度）では終始限定的であった。評価地点での濃度もケース3の方が低濃度で推移し（図-9）、図-7の重金属等溶出特性による違いが反映された。溶出特性が盛土

敷地外への重金属等の広がり方に与える影響は大きく、長期的な対策効果の評価には、要対策土からの長期的な重金属等溶出特性の把握と適切なモデル化が重要であることがわかった。

5. まとめ

要対策土への覆土による対策について、降雨実験、浸透流解析、移流拡散解析により、環境リスク低減工法として重金属等による周辺への影響を抑制できる可能性を確認した。また、その効果は天端およびのり肩の遮水で高まることを確認した。

対策効果の評価には、実際の盛土の不飽和浸透特性、要対策土からの長期的な重金属等溶出特性の適切な考慮が重要であることがわかった。

参考文献

- 1) 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改訂委員会：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（2023年度版）、258p、国土交通省、2023。
- 2) (財) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）、p.56、2012。
- 3) 富澤・東・石原・佐々木：大型模型を用いた降雨実験による堤体内浸透挙動の検証、土木学会第73回年次学術講演会、Ⅲ・235、2022。
- 4) 稲垣・加藤・佐々木：浸透抑制による要対策土の盛土内利用に向けた環境リスク低減効果の検討、第15回地盤改良シンポジウム、pp.541～548、2022。

稲垣由紀子



土木研究所 地質・地盤研究
グループ土質・振動チーム
主任研究員、博士（工学）
Dr. INAGAKI Yukiko

加藤俊二



土木研究所 地質・地盤研究
グループ土質・振動チーム
主任研究員
KATO Shunji

佐々木哲也



土木研究所 地質・地盤研究
グループ土質・振動チーム
上席研究員
SASAKI Tetsuya