

京都大学大学院 学生員 ○ 加藤 智大
 京都大学大学院 Feyzullah GULSEN
 京都大学大学院 正会員 乾 徹
 京都大学大学院 正会員 高井 敦史
 京都大学大学院 正会員 勝見 武

1. はじめに

近年、土を大規模に扱う社会基盤整備事業が集中し、建設工事に伴い生じる発生土を有効利用する必要が高まっている。発生土利用時、日本には自然由来の重金属等を含有する土壌が広く分布しているため、現場の状況に応じ環境汚染を起こさないよう適切に対処する必要がある。基準を超過した重金属等が確認された場合、遮水シートを用い水理的に隔離する方策を取った管理型盛土等による対処が挙げられる。一方で、このように水理的な隔離を施した管理型盛土による対応は、過剰に安全側ではないかとの指摘もみられた。よって、2017年に成立した土壌汚染対策法の改正では、自然由来の重金属等が基準を超えて含まれた土を合理的に活用する方向が示され、技術的検討が進められている。合理的対応の一つとして覆土による降雨浸透抑制が考えられるが、その定量評価はなされていない。そこで本研究では、覆土の降雨浸透抑制機能を、浸透流解析により定量的に評価した。

2. 解析方法

2.1 土質材料 覆土の降雨浸透抑制機能を

パラメトリックスタディによって検討した。飽和・不飽和解析コードを用い、浸透流解析を行った。盛土底部の断面を通過した水量を算出し、覆土による自然由来重金属等含有土路体への降雨浸透抑制機能を評価した。入力

表-1 解析に用いた土質パラメータ

土質名	砂質土 A	砂質土 B	砂質土 C	礫	帯水層
飽和透水係数: k_{sat} (m/s)	1.0×10^{-6}	5.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	5.0×10^{-3}	1.2×10^{-5}
有効間隙率: n	0.30	0.30	0.30	0.15	0.30
比貯留係数(1/m)	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
VG モデル定数: α (1/cm)	0.0349	0.0700	0.0242	2.30	0.170
VG モデル定数: n	2.06	1.82	1.55	2.20	1.39
残留体積含水率: θ_r	0.0750	0.110	0.00	0.00200	0.00
飽和体積含水率: θ_s	0.348	0.0338	0.410	0.400	0.365

パラメータを表-1 に示す。覆土材には3種類の砂質土を想定し、文献^{2), 3)}を参考にパラメータを定めた。飽和透水係数 k_{sat} が異なる砂質土 A と B を覆土材に用いることで k_{sat} の違いが降雨浸透抑制に及ぼす影響を、保水性が砂質土 B より優れた砂質土 C を用いることで保水性の違いが降雨浸透抑制に及ぼす影響を、それぞれ検討した。各試料の保水性を図-1 に示す。

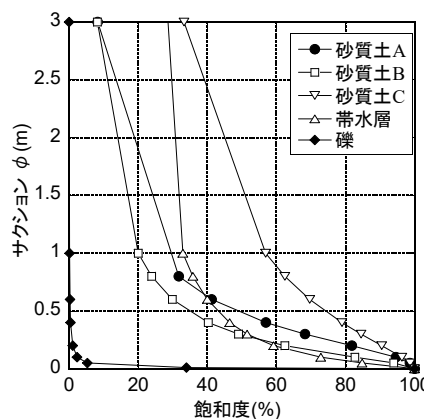


図-1 水分保持特性の比較

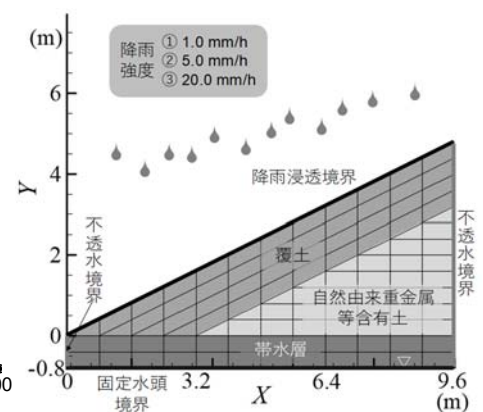


図-2 有限要素メッシュと境界条件

水分保持特性曲線は van Genuchten (VG) モデルを用いて検討した。不飽和透水係数比は、Mualem モデルに VG 定数を代入し推定した。路体の自然由来重金属等含有土は礫質、盛土底部の帯水層は砂質と想定し解析を行った。

2.2 解析断面と境界条件 本研究では、建設工事に伴い発生する自然由来重金属等含有土が道路盛土に利用されることを想定し、斜面勾配を 1:2 の急勾配に設定した。盛土の飽和度は、27.7mm/day の降雨を 4 日に 1 日適用し、2 ヶ月間の先行降雨の後に定常状態を確認し初期の飽和度と定め、解析を行った。解析断面の有限要素メッシュと境界条件を、図-2 に示す。盛土斜面の表面は降雨浸透境界とし、降雨強度を 1.0 mm/h、5.0 mm/h、20.0 mm/h に変化させ、定常時の水収支や保水形態等の比較を行った。一方、盛土側面と帯水層の側面は不透水境界とした。さらに、盛土下部の帯水層-0.8m の地点に地下水位があると想定し、固定水頭境界を設定した。

3. 解析結果とその考察

3.1 結果の整理 図-3 に降雨強度 1.0 mm/h 時、図-4 に 5.0 mm/h 時、図-5 に 20.0 mm/h 時の盛土底部からの浸出水量を示す。飽和透水係数 k_{sat} の影響を比較すると、砂質土 B や C のように k_{sat} が高い場合、降雨が全て盛土に浸透した。同じサクションに対して、礫質である路体の透水係数 k が覆土の k より小さくなり、浸透水はより流れやすい覆土内を流下する、キャピラリーバリア (CB) 効果が見られた。砂質土 A のように k_{sat} が低い場合、降雨強度 5.0 mm/h、20.0 mm/h 時に表面流出が見られた。地表面が飽和すると自動的に地表面からの過度な降雨浸透を制限する境界条件を用い、降雨量から盛土への浸透水量の差を取って表面流出を評価した。定常時、覆土表面は飽和しており、浸透フラックスが k_{sat} を上回り表面流出が発生したと考えられる。表面流によって盛土中への降雨浸透水量を低減でき、結果的に重金属等含有土路体への浸透を抑制できた。表-2 に水収支結果を示す。降雨量から重金属等含有土底部の浸出水量を差し引き、降雨量で除して降雨浸透抑制機能の評価した。降雨強度 1.0mm/h 時、砂質土 A は CB 効果が見られなかったため他の 2 ケースと比べ抑制機能が劣った。一方 5.0mm/h 時、砂質土 A は他の 2 ケースと比べ 30%程、20.0mm/h 時は 55%程高い抑制機能を示した。覆土と路体の保水性の差の影響を比較すると、保水性の差が大きいほど CB 効果が顕著に発揮され、路体への浸透を抑制できたことがわかった。

3.2 結果の考察 低降雨強度時、覆土と路体に保水性に差をつけ、 k_{sat} が大きい覆土材を用いることで CB 効果による覆土層内での排水が発生し、重金属等含有土路体への浸透水をある程度抑制できることがわかった。保水性の差が大きい程、CB 効果がより顕著に発揮されることが確認された。

覆土層の k_{sat} を浸透フラックス以下に設定することで、表面流出を発生させることができた。1.0×10⁻⁶ m/s のように極端に k_{sat} が低くない砂質土でも、表面流出を用いて盛土内部への降雨浸透を効果的に抑制できるとわかった。

4. おわりに

覆土層による CB 効果を発現するには、飽和透水係数と保水性の両者が影響し、施工時には適切な覆土材を選ぶような検討が必要になる。一方、表面流を発生させ浸透抑制を図る覆土設計では、覆土の飽和透水係数のみを考慮し、10⁻⁶ m/s オーダーの k_{sat} を持つ覆土であっても、ある程度降雨浸透を抑制できると考察した。降雨は外的要因であり人為的に操作することはできないことから、施工性が良いことに加え、高降雨強度であっても安定した浸透抑制機能を見込める、飽和透水係数の小さな材料を覆土に用いることが望ましい。

表-2 水収支算出結果

土質名	降雨強度 1.0mm/h 時			降雨強度 5.0mm/h 時			降雨強度 20.0mm/h 時		
	砂質土 A	砂質土 B	砂質土 C	砂質土 A	砂質土 B	砂質土 C	砂質土 A	砂質土 B	砂質土 C
降水量(m ³ /day)	2.36×10 ⁻¹	2.36×10 ⁻¹	2.36×10 ⁻¹	1.18	1.18	1.18	4.72	4.72	4.72
盛土への浸透水量(m ³ /day)	2.36×10 ⁻¹	2.36×10 ⁻¹	2.36×10 ⁻¹	7.80×10 ⁻¹	1.18	1.18	7.87×10 ⁻¹	4.72	4.72
表面流出量(m ³ /day)	0.00	0.00	0.00	4.01×10 ⁻¹	0.00	0.00	3.94	0.00	0.00
覆土底部から流出(m ³ /day)	6.46×10 ⁻²	8.38×10 ⁻²	1.04×10 ⁻¹	2.53×10 ⁻¹	1.93×10 ⁻¹	2.78×10 ⁻¹	2.53×10 ⁻¹	1.93×10 ⁻¹	2.78×10 ⁻¹
降雨浸透抑制機能(%)	28.7	51.9	60.0	53.7	26.0	29.5	88.4	30.0	29.7

参考文献 1) 西垣 誠, 菱谷 智幸, 橋本 学, 河野 一郎(1995) : 土木学会論文集, No.511, pp.135-144

2) 澤田 栄伊, 三村 衛, 吉村 貢(2014) : 自然災害科学, Vol.33 特別号, pp.87-99

3) 西垣 誠, 社団法人土質工学会(1989) : 不飽和土の工学的測定に関する信州セミナーテキスト, pp.21

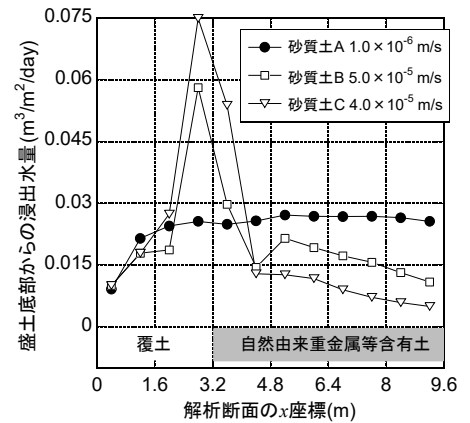


図-3 降雨強度 1.0mm/h 時の浸出水量

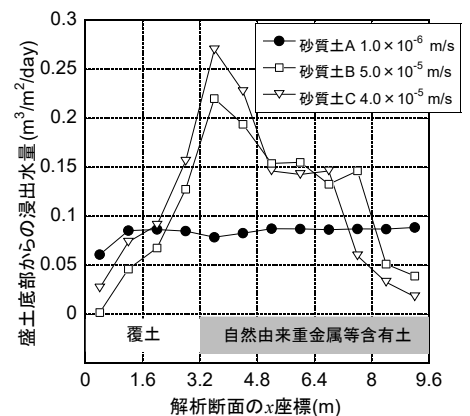


図-4 降雨強度 5.0mm/h 時の浸出水量

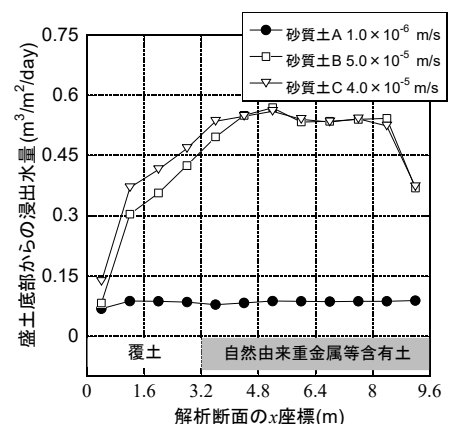


図-5 降雨強度 20.0mm/h 時の浸出水量