

浸透抑制による建設発生土の環境リスク低減対策に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 2

担当チーム：土質・振動チーム

研究担当者：佐々木 哲也、加藤 俊二、
稲垣 由紀子

【要旨】

本研究では、環境リスクへの対策が必要な要対策土に対する比較的簡易な封じ込めによる対策の可能性について検討した。簡易な封じ込めによる雨水浸透抑制効果の確認のための降雨実験を行い、重金属等の溶出特性に影響を与え得る要対策土部分への降雨浸透は主に盛土内水位上昇によることを確認した。実験での盛土内への水の浸透状況を確認したうえで、これを踏まえた移流拡散解析を行い、長期間における重金属等の拡散に対して、年降水量を平均化した降雨波形でも評価可能と考えられること、要対策土から溶出する重金属等が盛土外へ流出する時の濃度は地下水での希釈により要対策土部分よりも低く抑えられること、要対策土部分における重金属等の溶出濃度が時間の経過に伴い減少する場合には重金属等の拡散が長期的に軽減されることを確認した。以上より、覆土による要対策土の封じ込め対策に対し環境リスク低減効果が期待できることを確認した。

キーワード：発生土利用、要対策土、重金属等含有土、浸透流解析、移流拡散解析

1. はじめに

建設発生土（以下、発生土）の有効利用に対する社会的要請に対応するには、発生土の環境安全性を適切に評価しながら有効利用することが不可欠である。特に、自然由来重金属等含有土についても環境リスクが高くないと考えられるものについては、適切な環境影響評価のもと盛土材等としての利用を促進することが求められる。

一方で、環境リスクの高くない発生土に対しては、従来の封じ込め等の対策工法では過度に安全側の対策となる傾向にあり、より安価な対策が求められている。

そこで、本課題では発生土からの重金属等の溶出特性を踏まえた浸透抑制対策による環境リスク低減効果を明らかにしたうえで、対策手法及びその評価手法を構築することを目的に検討を行った。

具体的には、環境リスクへの対策が必要な土のうち環境リスクが高くない発生土（以下、要対策土）への比較的簡易な覆土による封じ込め対策の効果について検討を行った。覆土による封じ込め対策を施した盛土を対象に、重金属等の溶出特性に影響を与えらるる要対策土への水の浸透状況を確認するため模型実験を行った。その結果をもとに、要対策土への水の浸透状況を浸透流解析で再現するための不飽和特性曲線や透水係数の設定について検討した。次にこれを踏まえて、要対策土からの重金属等の溶出があると仮定し、長期間を対象とした移流拡散解析を行って対策効

果を検証した。移流拡散解析では、長期的な評価をする際の降雨波形の設定方法を検討のうえ、要対策土からの重金属等の溶出に経時変化がある場合の重金属等の拡散状況についても検討した。これらの検討の結果、覆土による封じ込め対策については、簡易な方法で環境リスク低減効果が期待できることを確認した。

2. 降雨実験による要対策土への浸透抑制効果の確認

2. 1 降雨実験

2. 1. 1 実験の目的

覆土により盛土内に封じ込めた要対策土からの重金属等の溶出特性は、要対策土への水の浸透による影響を受ける可能性がある。そこで、覆土された要対策土への浸透抑制効果を確認するため、覆土による要対策土の封じ込めを模擬した盛土に降雨を与える実験を行い、盛土内や要対策土部分への水の浸透状況を把握した。

2. 1. 2 実験方法および条件

(1) 実験条件

実験ケースは表-1に示す6ケースを実施した。要対策土への覆土、さらに要対策土に覆土した盛土の天端およびのり肩の遮水による要対策土への浸透抑制効果を確認するため、(2)で後述する2種類の実験用盛土を構築した。各実験用盛土に対し、降雨条件による要対策土への浸透状況の違いを確認する目的で、(3)で後述する3種類の降雨波形で降雨を与えた。

表-1 降雨実験ケース

ケース名	盛土	降雨波形
A-1	盛土 A (遮水なし盛土)	降雨波形 1
A-2		降雨波形 2
A-3		降雨波形 3
B-1	盛土 B (遮水あり盛土)	降雨波形 1
B-2		降雨波形 2
B-3		降雨波形 3

(2) 実験用盛土

図-1 に示すような、道路盛土を模擬した高さ 3m の実験用盛土を構築した。盛土構築に当たり、盛土背面の境界部からの水の流入、盛土部から基礎地盤への水の浸透による実験結果への影響を防ぐため、盛土の背面部と基礎地盤上部をブルーシートで覆った。

盛土のり尻には基盤排水層、盛土内部には掘削ずりの要対策土の利用を模擬した砕石部分（以下、模擬要対策土部分）を設けた。これらは、ともに単粒度砕石 4 号相当（粒径 30~20mm）を不織布で覆って作製した。

降雨浸透により模擬要対策土部分に到達する水の量を調べるため、模擬要対策土部分には集水容器（直径 17cm、高さ 18cm、足外径 5cm の広口じょうご）およびここに到達した水を盛土外で回収するための塩化ビニル管を設置した。これらの設置位置は、のり面から模擬要対策土に直接浸透する量を把握できるよう、模擬要対策土部分の上面先端部とした。

周辺の盛土部は、表-1 に示す物理特性を有する山砂を締固め度 $D_c=90\%$ を目標に締め固めて構築した。盛土のり面には、表流水による侵食を防止するために侵食防止シートを張った。実際の道路盛土の形状を反映しつつ、盛土背面からの水の流入を防げるよう、天端には勾配約 1.5% で盛土のり肩に向かう傾斜を与えた。

盛土内には盛土内水位を確認するための間隙水圧計、含水状態を確認するための土壌水分計を設置した。基盤排水層からの排水量を調べるため、排水を受ける柵を設け、柵とのり尻に露出した基盤排水層の上面は直接降雨が当たらないよう覆いをした。柵内に排水された水を、揚水ポンプでロードセルを設置した容器に送水して質量を計測することで、排水量を確認した。

実験用盛土は、盛土 A および盛土 B の 2 体構築した。盛土 A（遮水なし盛土）は天端およびのり肩の遮水がないものである。これに対し、盛土 B（遮水あり盛土）は図-1 に示すように、盛土の天端およびのり肩をブルーシート敷設により遮水したものである。のり肩の遮水は、模擬要対策土部分先端の鉛直上方までとした。天端およびのり肩を遮水したブルーシートの端はピツ

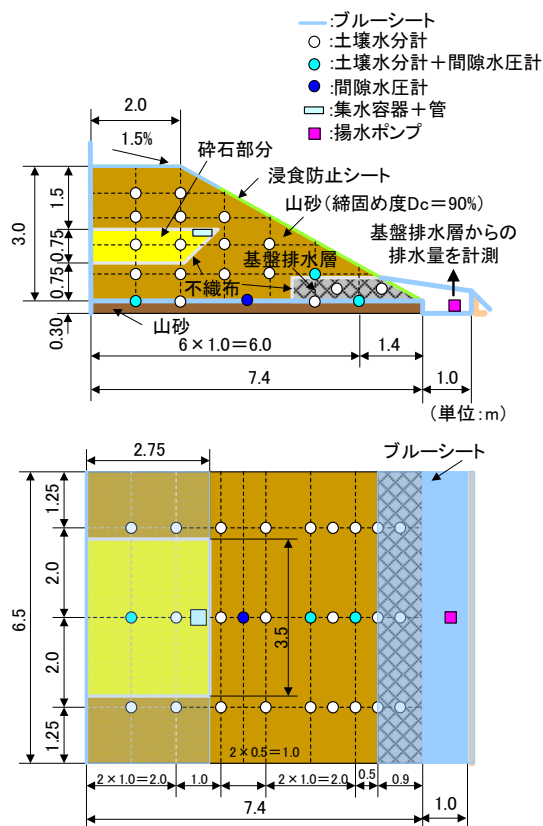


図-1 実験用盛土（盛土 B（遮水あり盛土）の例）

表-1 山砂の物理特性

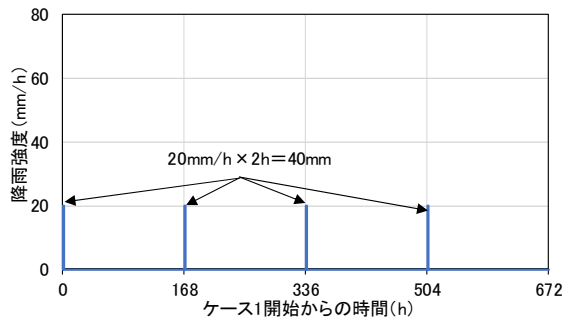
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.174
自然含水比 w_n (%)	16.7
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.717
最適含水比 w_{opt} (%)	17.6
透水係数（締固め度 90%）(m/s)	2.24×10^{-6}

ト側壁に擦り付け、コーキング材により止水した。

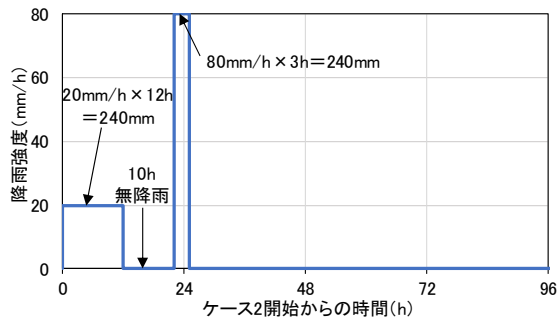
(3) 降雨波形

各実験用盛土には、以下の 3 種類の降雨波形で順に降雨を与えた。各降雨波形は図-2 に示すとおりである。各降雨波形の降雨開始時で盛土内の水分状態に大きな差異のない状態となるよう、無降雨で 1 週間程度放置してから次の降雨波形での降雨を開始した。

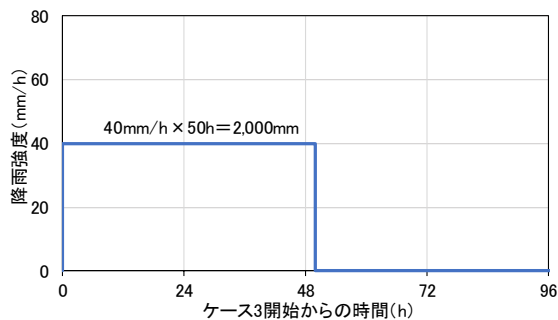
降雨波形 1：降雨強度 20mm/h の降雨を 2 時間連続で与えた後に無降雨の状態で 166 時間（6 日と 22 時間）置くサイクルを 4 回繰り返した（図-2(a)）。28 日間の観測期間内に 40mm の降雨が間欠的に 4 回あり、総雨量は 160mm になる。1991 年から 2020 年の 30 年間に茨城県つくば（館野）で観測¹⁾された 7 月の月降水量の平均値 134.6mm と 9 月の月降水量の平均値 187.6mm の中間的な雨量に相当し、通常起こり得る程度の降雨を模擬したものである。



(a) 降雨波形 1



(b) 降雨波形 2



(c) 降雨波形 3

図-2 各ケースにおける降雨波形

降雨波形 2：降雨強度 20mm/h の降雨を 12 時間連続で与えた後に 10 時間無降雨とし、追加で降雨強度 80mm/h の降雨を 3 時間与えた (図-2(b))。無降雨の前後で 240mm ずつの降雨を与えているが、降雨強度と連続時間が異なっており、長雨の後に豪雨が降る状況を模擬したものである。

降雨波形 3：降雨強度 40mm/h の降雨を連続で 50 時間与えた (図-2(c))。連続して 2,000mm の降雨を与えたものである。国内における日雨量歴代 1 位が、2019 年 10 月 12 日に神奈川県箱根で観測された 922.5mm である²⁾が、これに相当する降雨が 2 日間降り続ける状況に近いものといえる。

(4) 盛土内の状態の観測

各降雨波形を与えている期間とその終了後 1 週間程

度の期間には、基盤排水層からの排水量、模擬要対策土部分の集水容器への水の到達量、盛土内の飽和度、盛土内水位を計測した。

2. 2 実験結果

2. 2. 1 盛土内水位および砕石部分への降雨到達

各ケースの観測期間中において、模擬要対策土部分の集水容器から回収された水の総量 (以下、回収水量) および盛土内の最高水位を表-3 にまとめて示す。盛土内水位は図-1 に示すように、のり尻から 1.4m、3.9m、6.4m の位置に間隙水圧計を設置して計測したが、各盛土・各ケースの最高水位を観測したのはのり尻から 6.4m の位置の間隙水圧計であったため、表-3 の最高水位は全てこの位置で観測された最大値で示している。

回収水量は、遮水なし盛土に降雨波形 3 を与えた時 (ケース A-3) は、降雨として与えた水量の 1/6 に相当する量となったが、それ以外のケースではゼロまたは降雨として与えた水量の 1/10,000 のオーダーに過ぎないわずかな量であった。

最高水位は、降雨波形 1 では各盛土とも模擬要対策土部分の底面に当たる 0.75m より低く、模擬要対策土に達するような水位上昇がなかった (ケース A-1、B-1)。降雨波形 2 では、遮水なし盛土で 1.28m と、模擬要対策土内に水面が形成された (ケース A-2) のに対し、遮水あり盛土では模擬要対策土に達する水位上昇には至らなかった (ケース B-2)。降雨波形 3 では、遮水あり盛土でも模擬要対策土内に水面が形成された (ケース B-3)。遮水なし盛土では 1.54m と、模擬要対策土部分最上部を若干越えた位置に水位が形成された (ケース A-3)。

降雨波形 3 における遮水なし盛土 (ケース A-3) の盛土内水位と累計の回収水量の経時変化を図-3 および図-4 に示す。のり尻から 6.4m の位置において、降雨開始から 7 時間程度経過した時点で盛土内水位は模擬要対策土内に達し、13 時間経過する頃には模擬要対

表-3 回収水量および最高水位

	盛土 A (遮水なし盛土)		盛土 B (遮水あり盛土)	
	回収水量	最高水位	回収水量	最高水位
降雨波形 1 (通常降雨)	0L	0.11m	0L	0.23m
	ケース A-1		ケース B-1	
降雨波形 2 (長雨の後に豪雨)	0L	1.28m (模擬要対策土内)	0.41L	0.34m
	ケース A-2		ケース B-2	
降雨波形 3 (総雨量の多い長雨)	13,538L = 13.538m ³	1.54m (模擬要対策土より上)	0.61L	0.93m (模擬要対策土内)
	ケース A-3		ケース B-3	

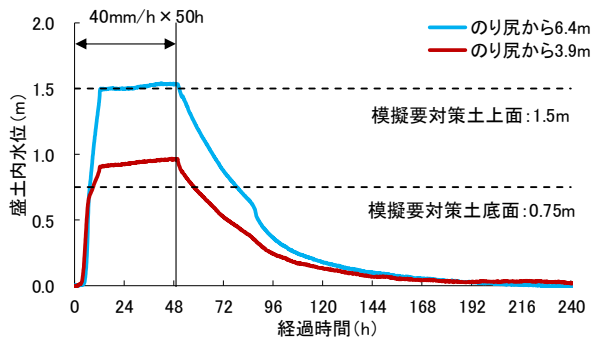


図-3 盛土内水位の経時変化（遮水なし盛土・降雨波形3）

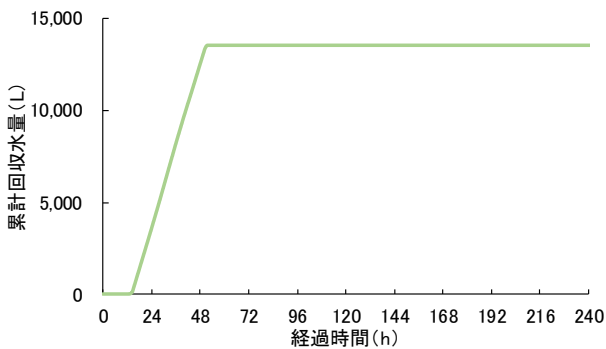


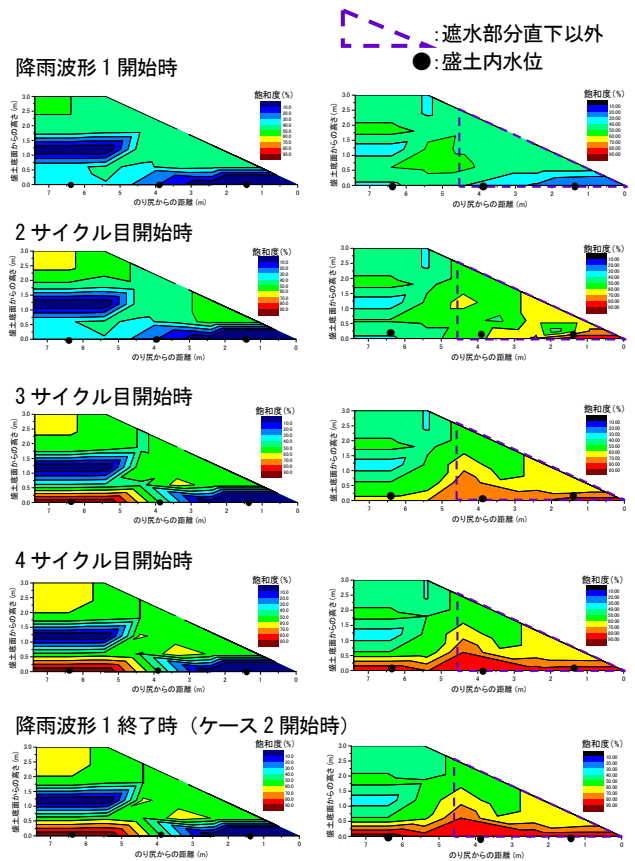
図-4 累計回収水量（遮水なし盛土・降雨波形3）

策土上面を越え、降雨終了（50時間経過）までは盛土内水位が模擬要対策土部分より上にあり、模擬要対策土部分が水浸する状態が続いた（図-3）。また、累計の回収水量は13時間が経過した頃から増加を続け、52時間経過（降雨終了より2時間経過）する頃まで水の回収が続いた（図-4）。盛土内水位が模擬要対策土部分より上にあった時間帯と集水容器からの水の回収が続いた時間帯は一致しており、模擬要対策土部分より上に水位形成した水が集水容器を通過し、回収されたことが考えられる。

以上の結果より、模擬要対策土部分への水の流入は主に盛土内水位の上昇によるもので、盛土内の水位上昇を抑制することは、要対策土への降雨浸透対策として有効と考えられる。また、盛土の天端やのり肩を遮水することで、長雨や豪雨を受けた時の盛土内水位の上昇を抑え、要対策土への水の流入を抑制する効果が期待できると考えられる。

2. 2. 2 盛土内の飽和度分布

各盛土・各降雨波形における盛土内飽和度分布を図-5～図-7に示す。盛土内の各位置における飽和度は、砕石中での土壤水分計のキャリブレーションが困難であったため、全て山砂の中で土壤水分計をキャリブレーションした式で求めた。そのため、模擬要対策土



(a) 遮水なし盛土（ケース A-1） (b) 遮水あり盛土（ケース B-1）

図-5 盛土内の飽和度分布（降雨波形1）

部分、基盤排水層における飽和度は参考扱いとした。

図-5は降雨波形1（通常降雨）での結果である。遮水なし盛土（ケース A-1）では、図-2(a)の降雨波形の3サイクル目の途中で基盤排水層からの排水を受ける柵に漏水のおそれがある箇所が見つかり、修復後に3サイクル目の開始から実験を再開したデータを採用している。3サイクル開始時以降の実際のケース1開始からの経過時間は、遮水なし盛土と遮水あり盛土と異なるため、3サイクル目以降は参考扱いとする。降雨波形1では、降雨のサイクルが進むごとに、遮水なし盛土（ケース A-1）では、天端付近を含め全体的に飽和度の上昇が見られた。一方、遮水あり盛土（ケース B-1）では、のり肩遮水先端部からのり尻の部分（図中の破線で囲んだ部分で、以下、遮水部分直下以外）と盛土底面付近以外では飽和度の上昇はほとんど見られなかった。なお、いずれの盛土も、盛土内の水位形成はほとんど見られなかった。

図-6は降雨波形2（長雨の後に豪雨）での結果である。長雨を模擬して降雨強度20mm/hの降雨を12時間連続で与えた後、遮水なし盛土（ケース A-2）と遮水あり盛土（ケース B-2）のいずれにおいても飽和度が

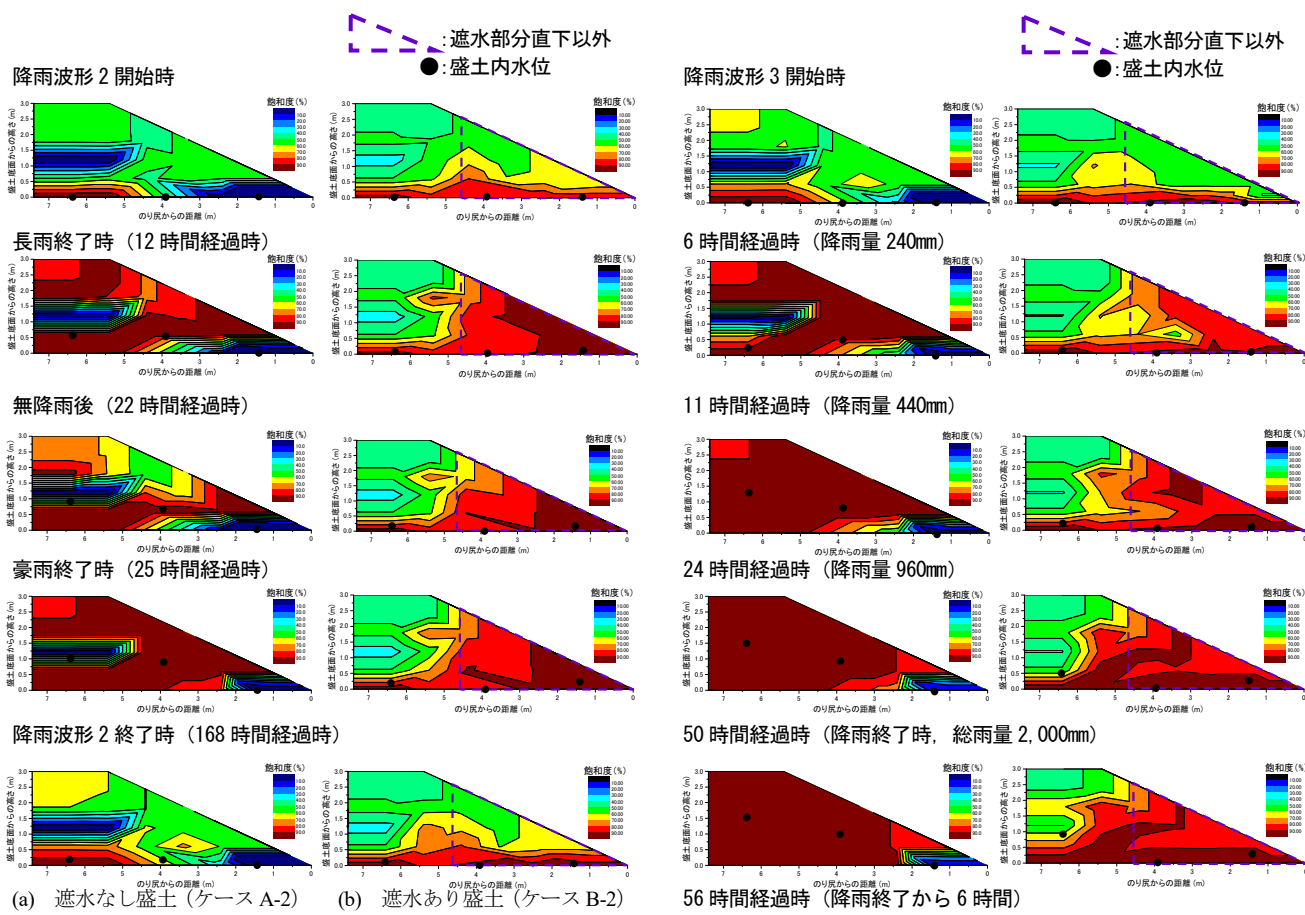


図-6 盛土内の飽和度分布 (降雨波形 2)

80%以上と高い状態になる領域が見られたが、こうした領域は遮水なし盛土ではほぼ全体にわたっていたのに対し、遮水あり盛土では主に遮水部分直下以外の部分に限定されていた。10時間の無降雨とした後は、遮水なし盛土では天端やのり面付近で飽和度の低下が見られたのに対し、遮水あり盛土ではのり肩遮水先端付近の一部で10%程度の飽和度低下が見られたのを除き、大きな変化はなかった。豪雨を模擬して降雨強度80mm/hの降雨を3時間連続で与えると、遮水なし盛土では再びほぼ全体にわたり、飽和度が80%以上となったのに対し、遮水あり盛土ではのり肩遮水先端付近の一部の部分で10%程度飽和度が上昇したのを除き、大きな変化はなかった。降雨を終了させて143時間放置した降雨波形2終了時には、遮水なし盛土の天端付近で降雨波形2開始時よりも飽和度が高くなっていたが、両盛土とも、降雨波形2開始時に近い飽和度分布に戻っていた。降雨に伴う盛土内水位の上昇は、遮水あり盛土では遮水なし盛土に比べて抑えられ、模擬要対策土部分には達しなかった。遮水あり盛土では、飽和度の上昇が主に遮水部分直下以外で生じたのみであったことにより、盛土内水位の上昇も抑えられたと

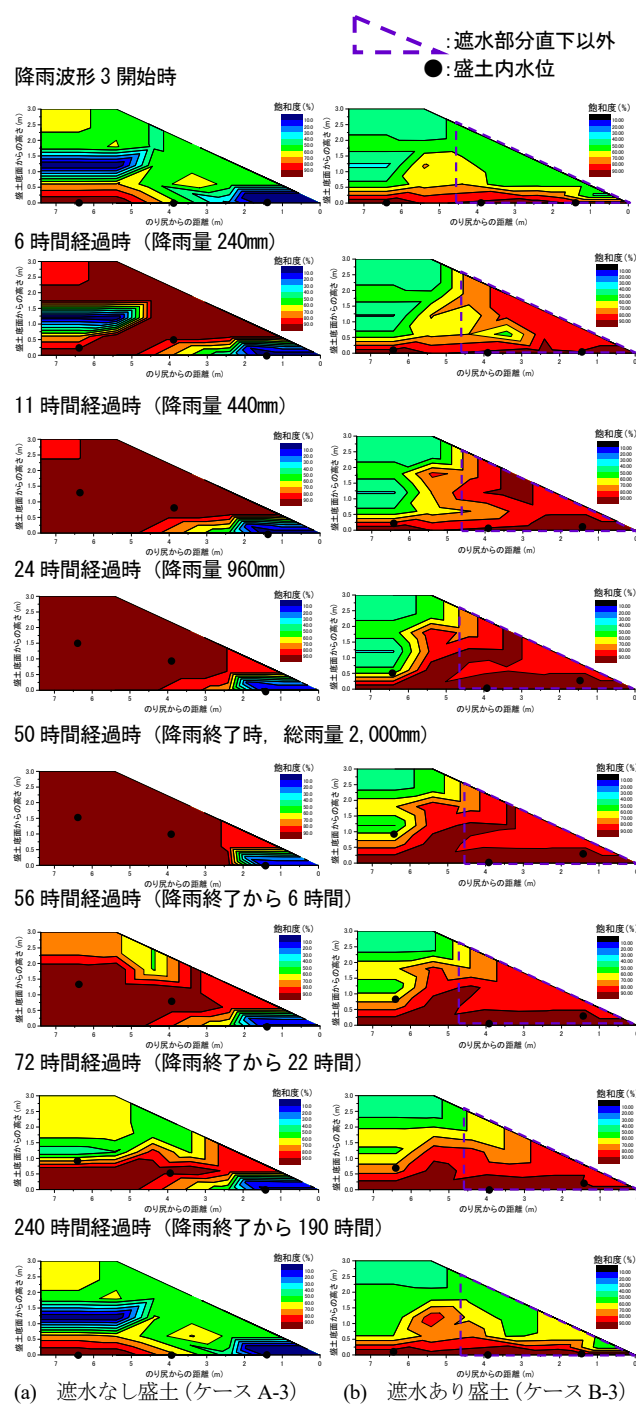


図-7 盛土内の飽和度分布 (降雨波形 3)

考えられる。
 図-7は降雨波形3(総雨量の多い長雨)での結果である。各盛土ともり面上から飽和度の上昇が始まったが、6時間経過(累計降雨量240mm)の時点で遮水なし盛土(ケースA-3)では飽和度70%以上の領域が広がっていたのに対し、遮水あり盛土(ケースB-3)では主にのり面上で飽和度が70%以上に上昇したのにとどまった。この時点では、各盛土とも模擬要対策土部分に達する水位上昇は見られなかった。11時間経過

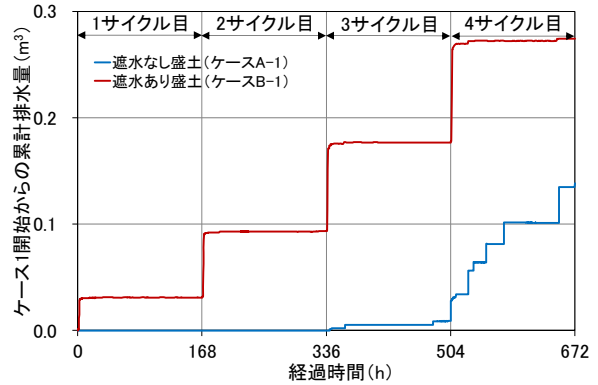
時（累計降雨量 440mm）には、遮水なし盛土ではほぼ全体で飽和度が 80%を超えた。遮水あり盛土でも飽和度は上昇したが、飽和度が 80%以上となった領域は主に遮水部分直下以外の部分で、上昇後の飽和度も遮水なし盛土に比べて抑えられた。盛土内水位は、遮水なし盛土では模擬要対策土内に達する上昇があったが、遮水あり盛土では 6 時間経過時から大きな変化は見られなかった。50 時間経過時（累計降雨量 2,000mm）までの間、各盛土とも盛土底面付近で飽和度の上昇があったが、盛土内の飽和度分布に大きな変化はなかった。盛土内水位は上昇し、遮水なし盛土では模擬要対策土上面を越え、遮水あり盛土では模擬要対策土内に達した。56 時間経過時（降雨終了から 6 時間経過時）には、遮水なし盛土では天端付近とのり面付近、遮水あり盛土ではのり面付近で飽和度の低下が見られた。この時点での盛土内水位は、各盛土とも降雨時と大きな違いはなかった。その後、遮水なし盛土では天端付近とのり面付近、遮水あり盛土では遮水部分直下以外で飽和度の低下が進んだ。また、各盛土の盛土内水位の低下も進み、240 時間経過時（降雨終了から 190 時間経過時）には、各盛土とも、降雨波形 3 の開始時に近い飽和度分布に戻り、盛土内水位も盛土底面に近づいた。

以上のように、降雨波形によらず、遮水なし盛土（盛土 A）では盛土内のほぼ全体で飽和度が上昇したが、遮水あり盛土（盛土 B）では、主に遮水部分直下以外で飽和度が上昇した。天端とのり肩の遮水により、遮水部分直下の飽和度上昇が抑えられ、盛土内で飽和度が上昇する範囲が限定的になったといえる。

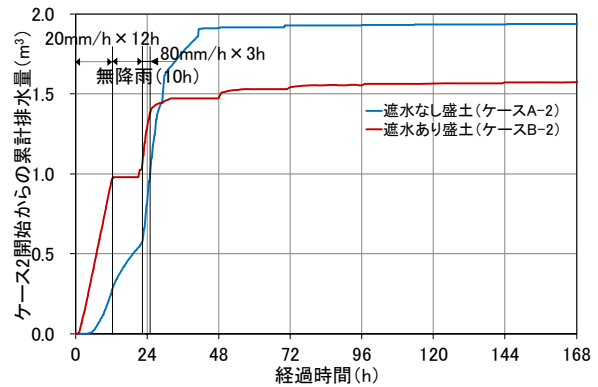
2. 2. 3 基盤排水層からの排水量

遮水なし盛土（盛土 A）および遮水あり盛土（盛土 B）の基盤排水層からの排水状況について、各降雨波形開始時からの経過時間と累計排水量の関係を図-8 に示す。排水量は盛土長 1m 当たりへ換算した値、つまり盛土長が 6.5m であるため、観測された排水量を 6.5 で除した値で示している。

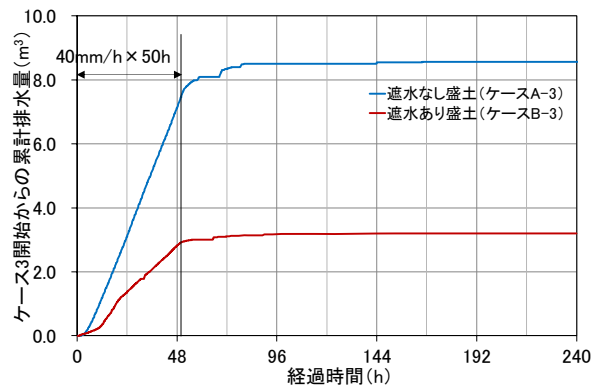
図-8(a)は降雨波形 1 の結果である。遮水なし盛土（ケース A-1）では、降雨波形の 3 サイクル目の途中で基盤排水層からの排水を受ける桝に漏水のおそれのある箇所が見つかったため、補修を行い、各土壌水分計の値が 2 サイクル目の終了時と同等程度であることを確認のうえ、降雨実験と観測を 3 サイクル目の最初から実施し直した。つまり、3 サイクル目の再実施の開始時点は本来の 3 サイクル目開始日時より遅れているが、図-8(a)では遮水あり盛土での結果との比較のため、



(a) 降雨波形 1



(b) 降雨波形 2



(c) 降雨波形 3

図-8 基盤排水層からの累計排水量

め、3 サイクル目再実施以降の結果は、本来の 3 サイクル目開始時点を示している。基盤排水層からの排水は、遮水なし盛土では 2 サイクル目まで確認されなかったが、遮水あり盛土（ケース B-1）では 1 サイクル目から確認され、サイクルが進むのに伴い排水量も増えた。4 サイクル目までの全体の排水量も遮水なし盛土（ケース A-1）に比べて多い。2. 2. 2 で遮水なし盛土では盛土全体で飽和度の上昇が見られたのに対し、遮水あり盛土ではのり尻付近に限定して飽和度の上昇が見られたことから、基盤排水層からの排水

量が増えたものと考えられる。

図-8(b)は降雨波形2の結果である。降雨に伴う基盤排水層からの排水量は、最初に降雨強度20mm/hの12時間連続で長雨を与えた時点では遮水あり盛土(ケースB-2)の方が多かった。しかし、長雨終了後からは、遮水なし盛土(ケースA-2)で時間当たりの累計排水量の増加が多くなり、遮水あり盛土よりも速いペースで基盤排水層からの排水が進んだ。降雨強度80mm/hの3時間連続で与えた豪雨の後には、遮水なし盛土の方が遮水あり盛土の累計排水量を上回り、降雨波形2の観測期間全体では遮水なし盛土の方が基盤排水層からの排水量が多くなった。遮水なし盛土では、遮水あり盛土に比べて長雨を与えた時の浸透量が多い分、排水量が増えたと考えられる。

図-8(c)は降雨波形3の結果である。観測期間を通じ、遮水なし盛土(ケースA-3)の基盤排水層からの排水量は、遮水あり盛土(ケースB-3)の3倍に近い量で推移した。遮水なし盛土では2.2.2に示したとおり、盛土全体で飽和度の上昇が見られ、遮水あり盛土に比べて飽和度の上昇も大きかったことから、盛土内への雨水の浸透量が多い分、排水量も増えた状況が考えられる。

以上のように、基盤排水層からの排水量は、浸透した降雨量が少なく盛土内の飽和度の上昇も限定的な場合はのり尻付近の飽和度が上昇しやすい遮水あり盛土の方が多いが、降雨量が増えて盛土内の飽和度の上昇が大きくなる場合は、遮水なし盛土の方が多くなった。降雨量が増えた時には、天端とのり肩が遮水されていると、盛土内への浸透量が抑制され、基盤排水層からの排水量も抑えられた。

2.2.4 降雨の盛土内への浸透・排水・保水の関係

2.2.1~2.2.3の結果から、同じ降雨波形で降雨を与えても、天端およびのり肩の遮水の有無により盛土内の水位上昇、飽和度分布や基盤排水層からの排水量には違いが見られた。そこで、降雨量、基盤排水層からの排水量(以下、排水量)、2時点間での盛土内保水量の増減(以下、保水量変化)、降雨のうち盛土内に浸透せずのり面を流下した量(以下、流下量)の関係、さらに盛土内の飽和度との関係について考察する。ここで、ケースA-3(遮水なし盛土・降雨波形3)に関しては、2.2.1で述べたとおり、模擬要対策土の上部先端に設けた集水容器に回収され、排水された水の量が降雨として与えた水量の1/6に相当する量であったため、集水容器への回収水量も別途考慮する。

以下、排水量、保水量、保水量変化、集水容器への

回収水量、盛土内の間隙体積は、盛土長1m当たりの量で示す。降雨量についても、特段断らない限り盛土長1mのうち基盤排水層の上を覆った以外の部分に降雨として与えられる水の量(単位:m³)で示す。

(1) 各量の算出方法と間隙体積

実験用盛土は2.1.2で示したとおり、降雨が基礎地盤へ浸透しない構造としたことから、着目した任意の2時点間において以下の関係が仮定できる。

$$\begin{aligned} (\text{降雨量}) &= (\text{排水量}) + (\text{保水量変化}) \\ &\quad + (\text{集水容器への回収水量}) \\ &\quad + (\text{のり面流下量}) \\ &= (\text{浸透量}) + (\text{のり面流下量}) \end{aligned}$$

降雨量は、降雨として与えられた水の量として、降雨強度・降雨を与えた時間・降雨を受けた面積を乗じて求めた。

排水量は、基盤排水層から排水される水の量として、2.1.2で示した方法で確認した。

保水量はある時点において盛土の間隙に保水されている水の量、保水量変化は、着目した2時点間における保水量の変化、つまり差である。これらを求めるに当たり、盛土内を図-9中の破線で示すように区切った各ブロックにおける間隙体積を求めた。間隙体積の計算では、盛土に用いた山砂と碎石の間隙率はそれぞれ0.43、0.4とした。山砂の間隙率は試験値であり、碎石の間隙率は一般的に用いられる値での仮定である。個々の時点における保水量は、各土壌水分計で計測された飽和度を当該ブロックの間隙体積に乘じ、全ブロック分合計することで求めた。保水量変化は、着目した2時点間における各ブロックの飽和度変化を間隙体積に乘じた合計とした。負の値となる場合は、盛土内の保水量が減少したことを示す。なお、盛土全体の間隙体積は5.973m³であり、うち、遮水部分直下以外の間隙体積は2.546m³であった。

ケースA-3においては、集水容器への回収水量、つまり模擬要対策土部分に設けた集水容器と塩化ビニル

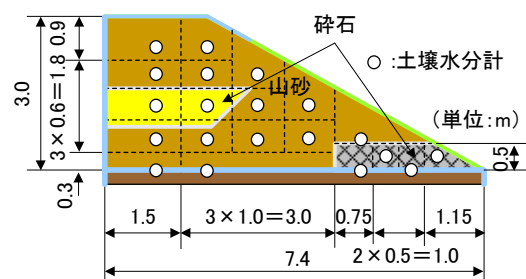


図-9 保水量計算時のブロック割

管を通して盛土外へ出た水量も考慮する。回収水量は、盛土外でロードセルを設置した容器に回収され、確認された質量をもとに求められる。

浸透量は、降雨量のうち盛土内に浸透した水量である。保水量変化と排水量、ケース A-3 ではさらに回収水量も含めた水量の和に当たる。

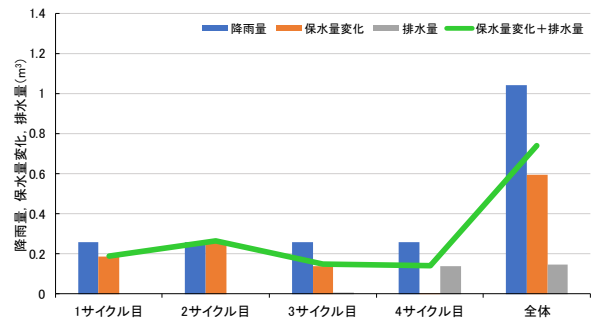
のり面流下量は、盛土内に浸透せずにのり面を流下する量とし、降雨量から浸透量を減じて求めた。

(2) 降雨量と排水量・保水量変化の関係

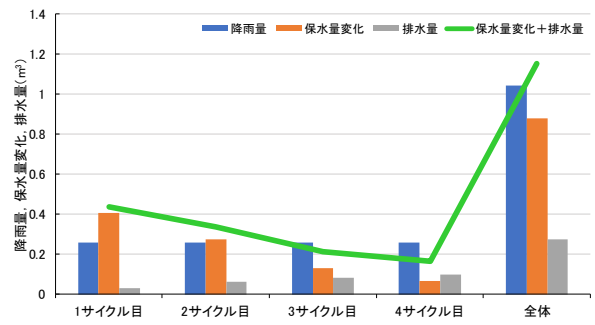
図-10～図-12 に各ケースで着目した 2 時点間、各ケースの開始から終了までの全体の降雨量と排水量・保水量変化等との関係を示す。排水量と保水量変化の和が降雨量を上回ることもあったが、2. 2. 2 で述べたとおり、模擬対策土部分や基盤排水層の飽和度も山砂の中で土壤水分計をキャリブレーションした式で求めたことや、計算時の盛土内のブロック割により、保水量変化の計算に誤差が生じたものと考えられる。

図-10 は降雨波形 1 (通常降雨) の結果である。遮水なし盛土 (ケース A-1)、遮水あり盛土 (ケース B-1) とともに、3 サイクル目までは排水量よりも保水量変化が多く、4 サイクル目では保水量変化よりも排水量が多くなった。盛土内に浸透した降雨が盛土内の飽和度上昇よりも遅れて排水される結果であり、その傾向は、遮水なし盛土 (図-10(a)) でより顕著であった。

図-11 は降雨波形 2 (長雨の後に豪雨) の結果である。降雨強度 20mm/h で 12 時間連続の長雨の際には、遮水なし盛土 (ケース A-2)、遮水あり盛土 (ケース B-2) とともに、降雨量のほぼ全てが盛土内に浸透したが、遮水なし盛土では遮水あり盛土に比べて保水量変化が大きく、排水されずに盛土内の飽和度上昇に寄与した割合が多かった。降雨強度 80mm/h で 3 時間連続の豪雨の際には、各盛土とも降雨量が排水量・保水量変化の合計を上回り、降雨のうち盛土内に浸透しないのり面流下量が生じた。各盛土とも長雨はほぼ全て盛土内に浸透したが、豪雨では一部が盛土内に浸透せずに流下した。のり面流下量は豪雨の際に限っても、降雨波形 2 の観測期間全体としても遮水あり盛土の方が多かった。遮水あり盛土では遮水なし盛土に比べてのり面流下量が多く、盛土内への降雨の浸透が抑えられた。なお、各盛土とも長雨と豪雨の間、降雨終了後の無降雨としていた期間には排水量や負の保水量変化が確認されたが、排水量や保水量の減少は遮水なし盛土の方が大きく、遮水あり盛土に比べて排水が進んだ。遮水なし盛土の方が、浸透量が多い分、排水量も多くなったことが考えられる。

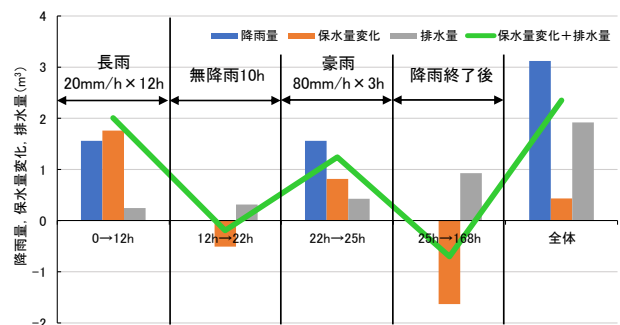


(a) 遮水なし盛土 (ケース A-1)

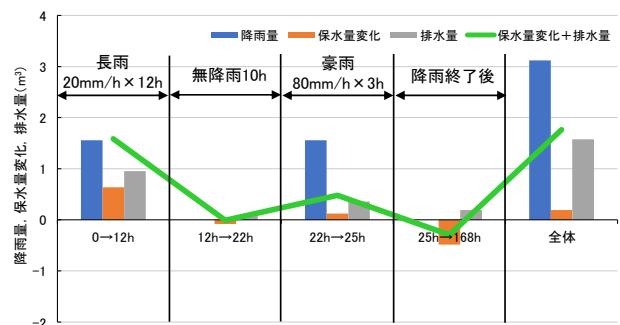


(b) 遮水あり盛土 (ケース B-1)

図-10 降雨量・排水量・保水量変化の関係 (降雨波形 1)



(a) 遮水なし盛土 (ケース A-2)



(b) 遮水あり盛土 (ケース B-2)

図-11 降雨量・排水量・保水量変化の関係 (降雨波形 2)

図-12 は降雨波形 3 (総雨量の多い長雨) の結果である。各盛土とも、降雨開始からの 6 時間 (降雨量 240mm)、6 時間経過時から 11 時間経過時まで (降雨量 200mm)、

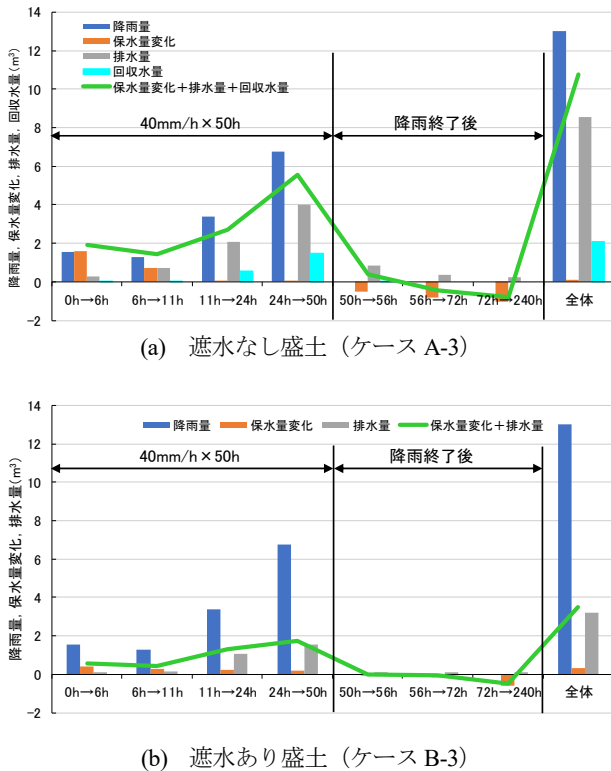


図-12 降雨量・排水量・保水量変化の関係（降雨波形 3）

11 時間経過時から 24 時間経過時まで（降雨量 520mm）、24 時間経過時から 50 時間経過時まで（降雨量 1,040mm）と、時間が経過し累計の降雨量が増えるのに伴い、保水量変化が小さくなった一方、排水量とのり面流下量は増えた。遮水なし盛土（ケース A-3）では、回収水量も増えた。また、遮水なし盛土では、降雨開始直後の降雨量と保水量変化がほぼ等しく、降雨量のほぼ全てが盛土内の飽和度上昇に寄与したが、遮水あり盛土（ケース B-3）では、降雨開始直後から保水量変化がほとんど見られなかった。のり面流下量については、各期間とも、降雨波形 3 の観測期間全体としても、遮水あり盛土の方が多かった。50 時間の降雨終了後は、排水量と負の保水量変化が確認され、排水に伴い盛土内の保水量が減少した。降雨終了後の排水量と保水量の減少は遮水なし盛土の方が大きくなった。これらの状況より、降雨の盛土内への浸透は部分的で、盛土内への浸透量は特に遮水あり盛土では少なく抑えられたといえる。また、遮水なし盛土では、遮水あり盛土に比べて降雨の浸透量は大きかったが、基盤排水層が機能して排水が進んだといえる。

以上より、盛土が長雨や豪雨を受けても全てが盛土内に浸透するとは限らないこと、盛土内に浸透した水が基盤排水層により排水されることが確認された。

(3) 飽和度とのり面流下量との関係

(2)より、降雨波形や盛土の遮水の有無といった条件によっては、降雨の一部、あるいは大部分が盛土内に浸透せずにのり面を流下するのみとなり、その時点で盛土が保水可能な水の量の影響を受けたと考えられる。

そこで、各ケースで着目した 2 時点間について、降雨量を 1 とした場合の保水量変化、排水量、のり面流下量等の割合のステップ毎の変化を図-13～図-15 に示す。一部で（保水量変化/降雨量）と（排水量/降雨量）の和が 1 以上の値になっているが、これは(2)で前述した保水量変化算定時の誤差に起因するものと考えられる。なお、（保水量変化/降雨量）と（排水量/降雨量）の和が 1 以上の場合については、のり面流下量を 0 とした。

図-13～図-15 には、各 2 時点間の初期の飽和度の平均も併せて示す。例えば降雨波形 2 の 22h→25h であれば、降雨波形 2 の開始から 22 時間経過した時点における盛土内の飽和度の平均を示している。飽和度の平均は、当該時点における保水量を間隙体積で除して求めており、盛土全体での平均と、遮水あり盛土での遮水部分直下以外に当たる部分での平均を示した。

図-13 は降雨波形 1（通常降雨）の結果である。遮水なし盛土（ケース A-1）、遮水あり盛土（ケース B-1）ともに、3 サイクル目までは排水量よりも保水量変化の割合が多く、4 サイクル目では保水量変化よりも排

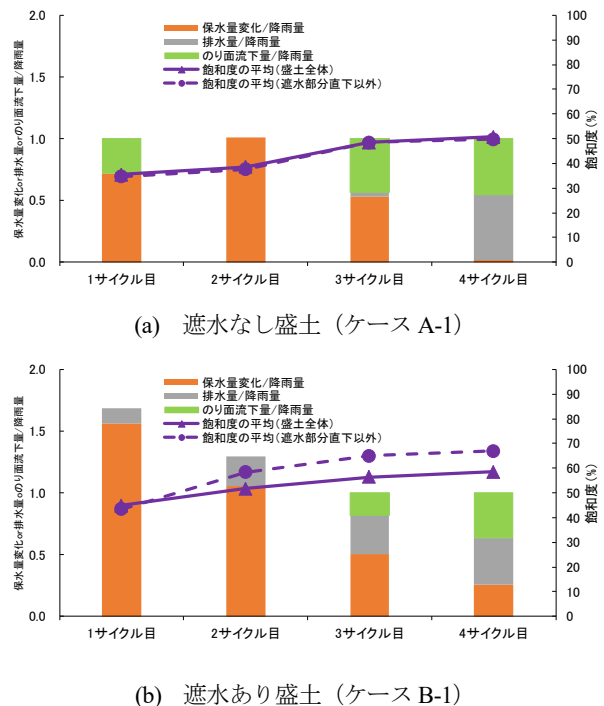
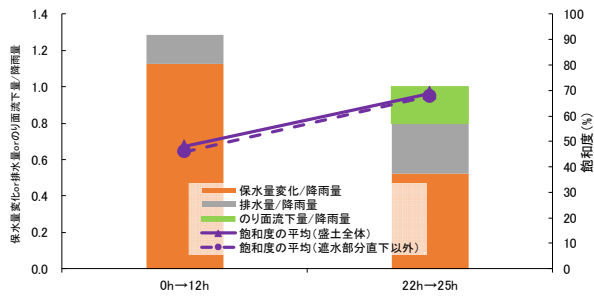
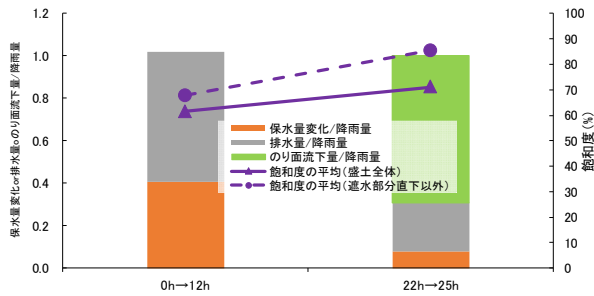


図-13 飽和度と水収支の関係（降雨波形 1）



(a) 遮水なし盛土 (ケース A-2)



(b) 遮水あり盛土 (ケース B-2)

図-14 飽和度と水収支の関係 (降雨波形 2)

の平均を、盛土全体と遮水あり盛土の遮水部分直下以外に当たる部分で比べると、遮水なし盛土ではほとんど差がないまま推移したのに対し、遮水あり盛土では遮水部分直下以外の方が高い飽和度で推移した。

図-14 は降雨波形 2 (長雨の後に豪雨) の結果である。各盛土とも、降雨波形 2 の開始後 12 時間の長雨は全て盛土内に浸透したが、22 時間経過時から 25 時間経過時まで与えた豪雨は、一部が盛土内に浸透せずに流下した。流下した割合は遮水あり盛土 (ケース B-2) の方が多く、降雨量のうち 3 分の 2 程度が流下した。22 時間経過時の飽和度は各盛土ともケース 2 開始時に比べて高かったが、遮水なし盛土 (ケース A-2) では盛土全体の平均と遮水あり盛土の遮水部分直下以外に当たる部分の平均にほとんど差がなかった。一方、遮水あり盛土の飽和度は、平均して盛土全体に対し、遮水部分直下以外で高かった。

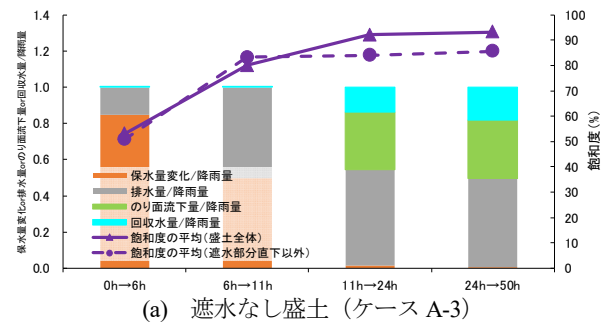
図-15 は降雨波形 3 (総雨量の多い長雨) の結果である。各盛土とも、降雨が続くのに伴い保水量変化の割合の減少と飽和度の上昇が見られた。降雨開始から 11 時間を経過する頃から、飽和度の上昇が緩やかになり、保水量変化の割合が大きく減った。遮水なし盛土 (ケース A-3) では、構造上、回収水量として盛土外へ出た量の割合も増えた。盛土全体の飽和度の平均では、遮水なし盛土の方が高い値で推移した。遮水なし盛土では、遮水あり盛土 (ケース B-3) に比べてのり面流下量の割合が少なく、特に降雨開始後 11 時間が経過する頃までは、降雨は全て盛土内に浸透し、その半分以上が保水したことから、盛土全体として飽和度の高い状態になった。

各ケースとも、盛土内の飽和度が上昇すると、降雨を与えても盛土内に浸透せずにのり面上を流下する割合が増えた。既に受けた降雨が浸透して盛土内の飽和度が上昇した状態では、降雨を受けても浸透可能な量に限界があり、浸透せずに流下したものと考えられる。また、遮水あり盛土の方が遮水なし盛土に比べて、盛土内に浸透せずに流下した割合が多く、天端とのり肩の遮水により、遮水部分の直下への浸透が低減されたと考えられる。

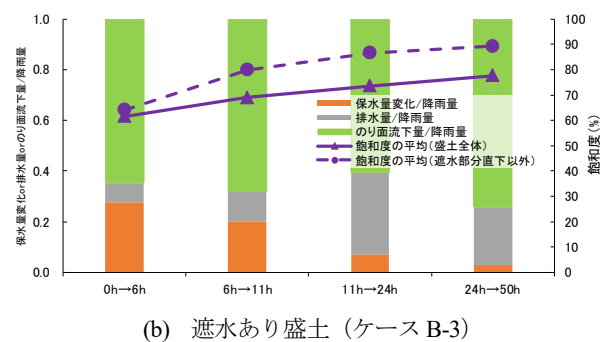
2. 3 覆土した要対策土への浸透抑制効果

要対策土を覆土して盛土内利用することを模擬した降雨実験を行った結果、以下のことが確認された。

- ・盛土内水位が模擬要対策土の上面よりも高くなったケース A-3 を除き、模擬要対策土上部先端に設置した集水容器から回収される水の量は、ゼロまたは降雨として与えた水量の 1/10,000 のオーダーに過ぎない量で



(a) 遮水なし盛土 (ケース A-3)



(b) 遮水あり盛土 (ケース B-3)

図-15 飽和度と水収支の関係 (降雨波形 3)

水量の割合が多くなった。飽和度は、3 サイクル目開始時まで上昇を続けた後は大きな変化がない。2 サイクル目までの降雨が盛土内に保水されて飽和度が上昇したが、3 サイクル目以降は降雨量のうち排水量や流下量の割合が増えており、降雨を受けても盛土内の飽和度上昇が抑えられる結果となった。盛土内の飽和度

あった。このことから、要対策土への降雨の流入は、主に盛土内水位の上昇によるもので、盛土内水位が要対策土部分に達しないようにすることは、要対策土への降雨浸透対策として有効である。

・降雨波形 1 (通常降雨) では、模擬要対策土部分に達する盛土内水位の上昇は見られなかったが、降雨波形 2 (長雨の後に豪雨) や降雨波形 3 (総雨量の多い長雨) では、盛土内水位が模擬要対策土部分に達した。この結果から、通常の降雨に対しては、要対策土部分に達するような盛土内水位が形成される可能性は低いですが、長雨や豪雨を受けると、盛土内水位が要対策土部分に達する可能性がある。

・各ケースとも、累計の降雨量が多くなるに伴い、降雨として与えられた水量のうち、浸透して盛土内の飽和度上昇に寄与する割合や基盤排水層から排水される割合が減り、浸透せずにのり面を流下する割合が増えた。このことから、長雨や豪雨を受けても、盛土が保水可能な量に限界があり、それを超えた分は浸透せずにのり面を流下するのみとなる。

・降雨波形 2 (長雨の後に豪雨)、降雨波形 3 (総雨量の多い長雨) に対しては、遮水あり盛土の方が、盛土内水位や飽和度の上昇が抑えられる結果であった。また、遮水あり盛土の方が、遮水なし盛土に比べて降雨の浸透量が少なく、遮水部分直下の飽和度上昇が抑えられる結果であった。こうしたことから、天端やのり面を遮水することは、特に長雨や豪雨時の盛土内への降雨浸透や盛土内水位の上昇を抑制するのに有効であったといえる。

以上より、要対策土を覆土して盛土内利用することで、重金属等の溶出に影響を与えられと考えられる要対策土への水の流入を抑える効果が期待できること、天端やのり面を遮水することはその効果を高め得ることが確認された。

3. 浸透流解析による盛土内の水の流れの確認

3. 1 浸透流解析

3. 1. 1 浸透流解析の目的

2. では、要対策土を覆土して盛土内利用することを模擬した盛土に降雨を与える実験を行い、盛土内や要対策土部分への水の浸透状況を把握した。しかし、実際に要対策土を盛土内利用するには、より長期的な盛土内の水の流れを考慮する必要があり、実験のみで評価するのは困難である。

そこで、要対策土を覆土して盛土内利用する対策の可能性についてより長期的な評価ができるよう、2.

の実験で確認された盛土内の状況を浸透流解析で再現可能な条件を検討した。

3. 1. 2 解析手法および条件

2. で実施した実験状況の再現のため、盛土を図-1に示す形状をもとに、図-16のようにモデル化し、Dtransu-2D・EL³⁾を用いて浸透流解析を行った。

モデルは1辺5cm程度の四角形または三角形の要素に分割したもので、模擬要対策土部分および基盤排水層は碎石、それらの周辺全体は山砂とし、解析では図

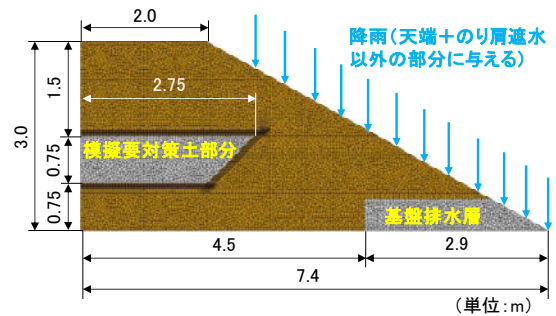


図-16 実験用盛土のモデル化 (遮水あり盛土の例)

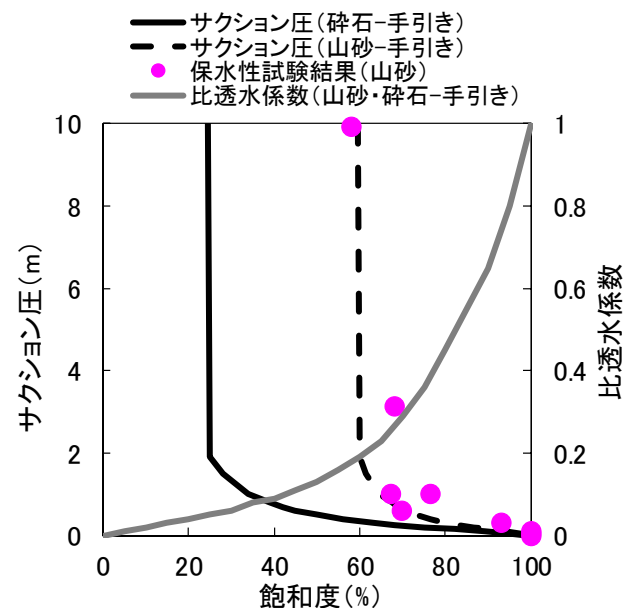


図-17 山砂および碎石の不飽和特性曲線

表-4 実験における地下水位の再現性等を踏まえて設定したパラメータ

	山砂	碎石
不飽和特性曲線	手引き	手引き
透水係数 (m/sec) (室内透水試験結果 に対する比)	水平: 2.0×10^{-5} (約 10 倍)	1.0×10^{-1}
	鉛直: 1.0×10^{-5} (約 5 倍)	
間隙率	0.43	0.4
比貯留係数 (m^3)	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}

-17に示す不飽和特性曲線および表-4に示すパラメータを用いた。

碎石の不飽和特性曲線は「河川堤防の構造検討の手引き」⁴⁾(以下、手引き)を参考に設定した。2.の実験に用いた山砂の保水性試験を行い、図-17に示すとおり飽和度とサクシオン圧の関係をプロットしたところ、手引きのサクシオン圧の曲線と整合的であったため、山砂についても手引きを参考に設定した。

山砂の透水係数は、手引きの不飽和特性曲線を用いた場合に、2.の実験のうち遮水なし盛土で長雨や豪雨を受けるケースA-2およびケースA-3の盛土内水位を再現可能な値を試行錯誤的に設定した。これは、要対策土からの重金属等の溶出は要対策土への水の流入による影響を受けると考えられるが、2.の実験で模擬要対策土部分への水の流入は主に盛土内水位上昇によることが確認され、4.の移流拡散解析で重金属等の拡散状況を予測するに当たっても重要な指標と見なし盛土内水位に着目したためである。

ここで、同じ土と締固め度でも室内透水性試験の供試体と盛土の均質性などの状態の違いや、盛土における透水性の異方性を考慮すると、実際に盛土の透水係数が室内透水試験に比べて1桁程度大きくなることは想定されることから、水平方向と鉛直方向に異方な値を設定した。

その結果、室内透水試験結果(変水位透水試験 $2.24 \times 10^{-6} \text{m/sec}$)に対し、水平方向:約10倍、鉛直方向:約5倍の値を設定した。

山砂の間隙率は、土質試験に基づき設定した。

初期条件は、盛土内水位を盛土底面とし、盛土の各節点の初期全水頭を0と設定した。

降雨は天端およびのり面の遮水されていない部分のみに与えた。図-16は遮水あり盛土の例であるが、のり肩の遮水部分を除いたのり面のみに降雨を与えた。

表-4の間隙率は、2.の降雨実験に関する考察と同様の値を用いた。比貯留係数と碎石の透水係数については、一般的と考えられる値を仮定した。

3. 2 浸透流解析結果

3. 2. 1 遮水なし盛土

2.の実験のうち遮水なし盛土(盛土A)の降雨波形2(ケースA-2)および降雨波形3(ケースA-3)について浸透流解析により再現を試みた結果を、着目した時点の盛土内体積含水率分布と水位形成状況の図として図-18および図-19に示す。比較のため実験結果の図も示す。解析結果ではのり面浅層部で体積含水率がほぼ一様な分布となるのに対し、実験結果ではばらつ

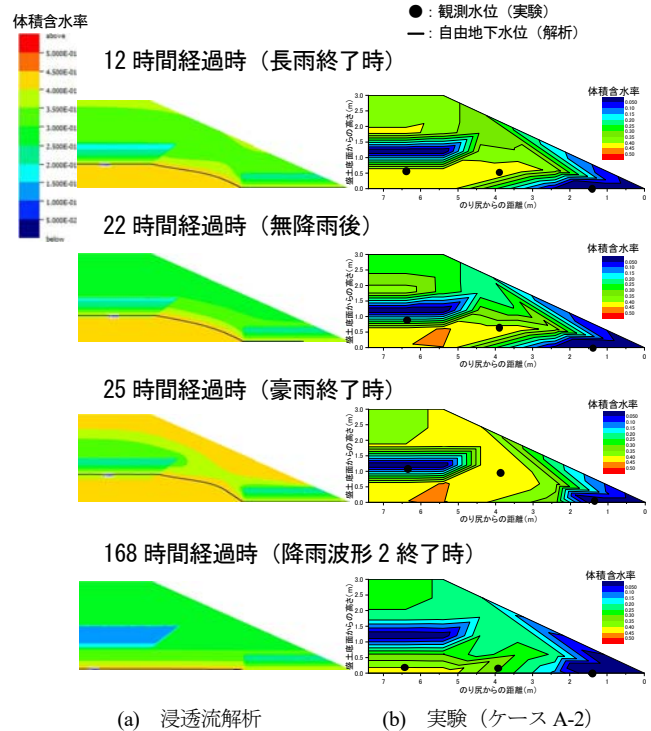


図-18 盛土内の体積含水率分布および水位 (遮水なし盛土・降雨波形2)

きがあるが、実験結果の体積含水率分布図が盛土内の幅方向に1m間隔、高さ方向に0.6m間隔で配置した土壌水分計の計測値をもとに補完して描いたものであることによると考えられる。体積含水率分布の図中には水位形成状況を、浸透流解析結果では自由地下水位の実線、実験結果ではのり尻から1.4m、3.9m、6.4mの点における観測水位を表す●のプロットで示した。

図-18は、図-2(b)の降雨波形2を設定し、遮水なし盛土(ケースA-2)の再現を試みた結果で、12時間経過時(長雨終了時)、22時間経過時(無降雨後)、25時間経過時(豪雨終了時)、168時間経過時(降雨波形2終了時)の例である。各時点における盛土内水位は、実験と解析で概ね整合した。実験に用いた山砂の保水性試験結果に近い不飽和特性を示すと考えられた手引きの不飽和特性曲線を用い、かつ盛土内水位が実験と整合するように透水係数を設定しての結果ではあるが、盛土内の体積含水率が相対的に高い部分と低い部分の分布も、実験と解析で類似の傾向となった。

図-19は、上述の実験ケースA-2に関する浸透流解析と同様の不飽和特性曲線、透水係数と併せ、図-2(c)の降雨波形3を設定し、遮水なし盛土(ケースA-3)の再現を試みた結果で、降雨期間中と50時間の降雨終了後の複数の時点を例に示したものである。6時間経過時(累計降雨量240mm)や11時間経過時(累計降

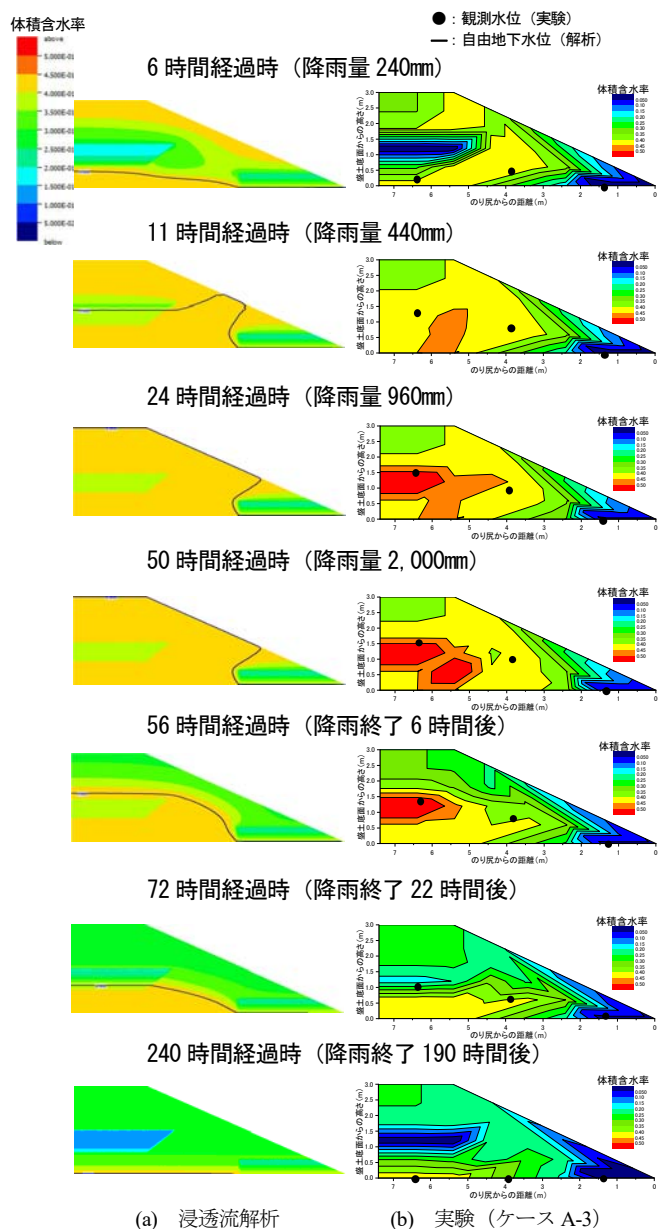


図-19 盛土内の体積含水率分布および水位
(遮水なし盛土・降雨波形3)

雨量 440mm) では、実験と解析で盛土内水面の形状は異なるが、水面下となる断面積に大きな違いが見られないため、盛土内水位を形成する水の量としては概ね実験と解析が整合したと考えられる。24 時間経過時(累計降雨量 960mm) や 50 時間経過時(累計降雨量 2,000mm) の解析結果では、盛土内水位が天端に達し、盛土内のほぼ全体で体積含水率が 0.4 以上となった。この時、実験での盛土内水位は模擬要対策土部分の上面を数 cm 越える程度であったが、実験用盛土は模擬要対策土上部先端に設けた集水容器に達した水が盛土外に排水される構造であったため、模擬要対策土部分より上方への水位上昇が抑えられたことが考えられる。

実験用盛土でも盛土内全体が飽和に近い状態であったため、集水容器に達した水の排水がなければ、盛土内水位が天端に達した可能性は考えられる。56 時間経過時(降雨終了後 6 時間経過時) では、解析の方が高い盛土内水位となったが、実験では降雨中に模擬要対策土上部先端の集水容器に達した水の排水があったのに対し、これが考慮されない解析では、降雨終了後の経過時間が短い時点での盛土内水位が高く計算された状況が考えられる。72 時間経過時(降雨終了 22 時間後) や 240 時間経過時(降雨終了 190 時間後) になると、実験と解析で盛土内水位が概ね整合した。盛土内の体積含水率が相対的に高い部分と低い部分の分布については、各時点とも実験と解析が概ね整合する結果となった。

以上より、実験に用いた山砂の保水性試験結果に近い不飽和特性を示す不飽和特性曲線を設定するだけでは、遮水なし盛土の盛土内水位について浸透流解析と実験の整合が得られないといえる。透水係数について、室内透水試験の値をそのまま用いるのではなく、異方性の考慮や割増をして用いる必要があった。

3. 2. 2 遮水あり盛土

遮水あり盛土(盛土 B) についても、3. 2. 1 と同様に手引きの不飽和特性曲線、異方性と割増を考慮した透水係数を設定し、2. の実験で降雨波形 2 を与えた時(ケース B-2) を例に、浸透流解析で再現を試みた結果を図-20 に示す。図-20 には比較のため、ケース B-2 の実験結果の図も示す。

遮水あり盛土についても遮水なし盛土の場合と同様、盛土内水位、体積含水率分布ともに実験と概ね整合する結果が得られた(図-20)。ただし、この整合も手引きの不飽和特性曲線を用い、室内透水性試験の透水係数に割増と異方性を考慮したことによる結果である。

3. 3 浸透流解析による降雨実験の再現性

3. 2 では、2. の実験の状況について浸透流解析で再現を試み、遮水なし盛土・遮水あり盛土ともに盛土内水位および体積含水率分布について実験と概ね整合する結果が得られた。ただし、これらは実験に用いた山砂に近い不飽和特性を示すと考えられた手引きの不飽和特性曲線を設定し、透水係数は室内透水性試験の値に割増および異方性を考慮して用いたことによるものである。このことは、室内透水性試験の透水係数をそのまま用いたのでは、実験結果の再現性が十分に得られないことを示している。

浸透流解析で要対策土を内部利用した盛土内の状態を再現するには、同じ土と締固め度でも室内透水性試

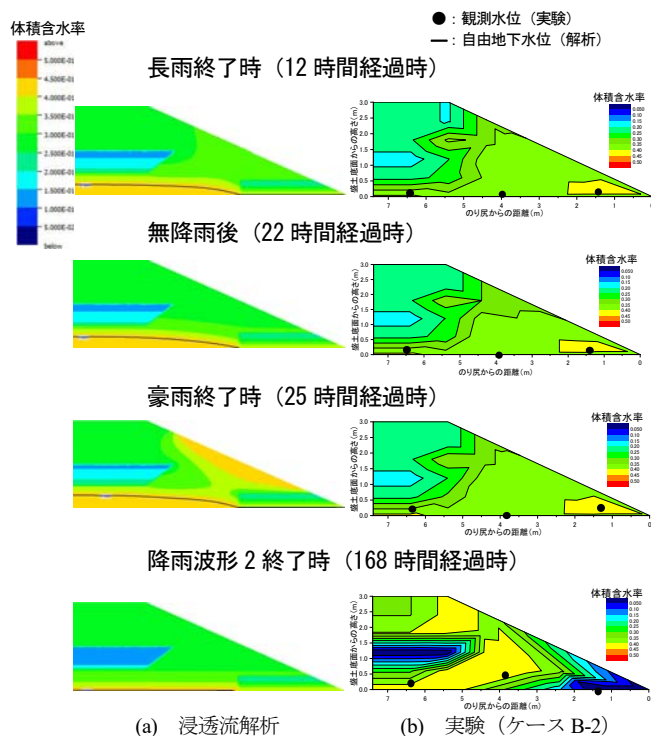


図-20 盛土内の体積含水率分布および水位
(遮水あり盛土・降雨波形 2)

験の供試体と盛土では均質性などの状態が異なることや、盛土における透水性の異方性を考慮する必要があると考えられ、今後の課題である。

4. 移流拡散解析による重金属等の溶出や拡散に対する評価

4. 1 移流拡散解析

4. 1. 1 移流拡散解析の目的

覆土による要対策土の封じ込め対策の適用に当たっては、覆土による対策の長期的な効果について評価する必要がある。具体的には、要対策土へ水が浸透し、要対策土からの重金属等の溶出があった場合でも、長期にわたって重金属等が盛土外へ流出しない、あるいは流出しても評価対象の地点では重金属等の濃度が許容値以内で推移することを確認する必要がある。

要対策土からの重金属等の溶出特性は、盛土内の要対策土への水の浸透状況による影響を受けると考えられるが、要対策土への水の浸透状況が盛土に与えられる降雨の降雨波形の影響を受けることは 2. の実験でも確認されているため、移流拡散解析に当たり降雨波形の設定は重要と考えられる。一方、長期間を対象とする場合、計算の効率化等の観点から、対象地域の 1 時間毎の雨量のような細かい設定をすることが望ましいとは限らない。そのため、第 1 段階として、対象期

間を 1 年とし、多雨地域のアメダスデータをもとに、1 時間毎に降雨強度が変化する降雨波形（以下、時間雨量の降雨波形）、日雨量を 24 時間平均化した降雨強度が 1 日毎に変化する降雨波形（以下、日雨量の降雨波形）、年降水量を平均化した降雨強度を連続的に与える降雨波形（以下、年平均雨量の降雨波形）を設定して移流拡散解析を行い、降雨波形による結果の違いを比較した。

第 2 段階では、上述の検討を踏まえた降雨波形を設定して、100 年を対象とした移流拡散解析を行い、要対策土からの重金属等の拡散状況の予測を行い、覆土による封じ込めの対策効果を検証した。ここで、要対策土からの重金属等の溶出は、濃度一定で長期間続くとは限らないことも確認されている。例えば、自然由来重金属等含有土からの重金属等の溶出は常時一定とはならず、初期のみ高濃度の場合等もある⁹⁾。このため、要対策土からの溶出濃度の変化が対策効果に及ぼす影響を検証した。

4. 1. 2 解析手法および条件

(1) 盛土のモデル化

移流拡散解析を行った盛土形状は、図-21 のように半断面である 2. の実験の遮水なし盛土の盛土形状を両断面化し、直下に基礎地盤を加えたものである。今回、基礎地盤は関東ロームを想定し、地下水の動水勾配は平地部の一般的な値に相当する 0.02 として、一定値を与えた。関東ロームに関する各種パラメータは、表-5 のように設定した。ここに、3. で見出した浸透流解析で盛土内水位の再現性を得るためのパラメータと併せ、移流拡散解析に必要なパラメータを設定し、Dtransu-2D・EL³⁾を用いて移流拡散解析を行った。

不飽和特性曲線は、盛土の山砂および碎石については 3. と同様、手引きのものを設定した（図-17）。基礎地盤については関東ロームを想定し、文献 6)7)を参考に図-22 のように設定した。

透水係数は、盛土の山砂と碎石については 3. と同様、表-4 のとおり設定した。山砂の透水係数は水平方向： $2.0 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 、鉛直方向： $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ で、盛土内水位の再現性を得るため、室内透水性試験結果に割増と異方性を考慮して設定したものである。関東ロームの透水係数は、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ とした（表-5）。

移流拡散解析に必要なパラメータとして、山砂および碎石に対し、表-6 に示すものを設定した。これらの値は、盛土の規模を踏まえた一般的と考えられる値を用いた。

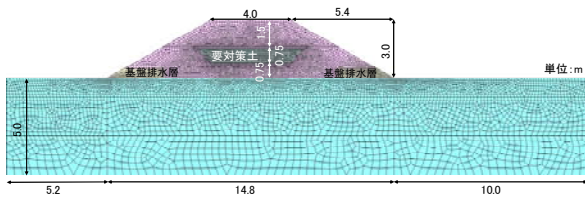


図-21 両断面モデル

表-5 関東ロームのパラメータ

透水係数 (m/sec)	1.0×10^{-6}
間隙率	0.75
比貯留係数 (m^{-1})	1.0×10^{-3}
縦分散長 (m)	1.0
横分散長 (m)	0.1
分子拡散係数 (m^2/sec)	1.0×10^{-9}
屈曲率	0.5

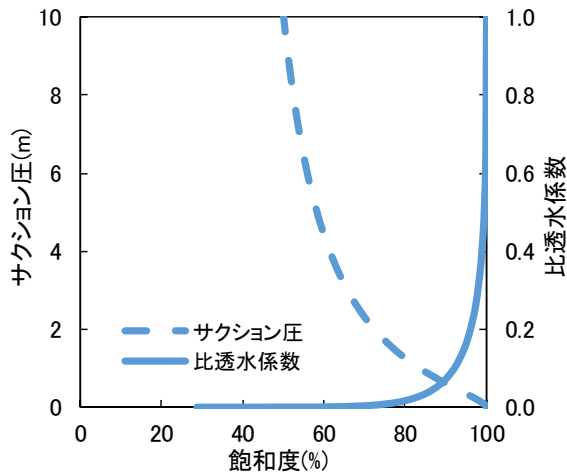


図-22 関東ロームの不飽和特性曲線

表-6 移流拡散解析に用いたパラメータ (山砂および碎石)

縦分散長 (m)	0.1
横分散長 (m)	0.01
分子拡散係数 (m^2/sec)	1.0×10^{-9}
屈曲率	0.5

要対策土部分には、重金属等の溶出があり、吸着や減衰がないことを想定し、最大値を1として正規化した濃度と、遅延係数1、減衰定数0を設定した。

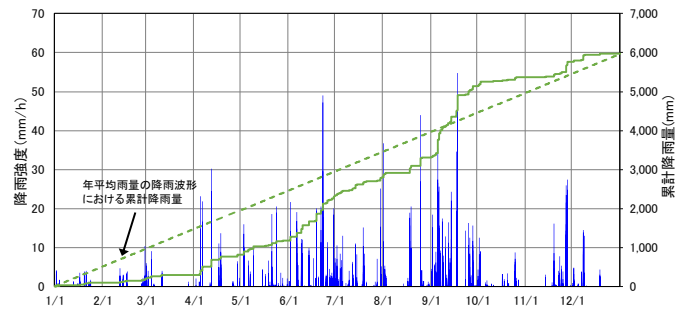
その他、特に断りのないパラメータについては、図-17、表-4、表-5と同様に設定した。

(2) 降雨波形の設定に向けた移流拡散解析

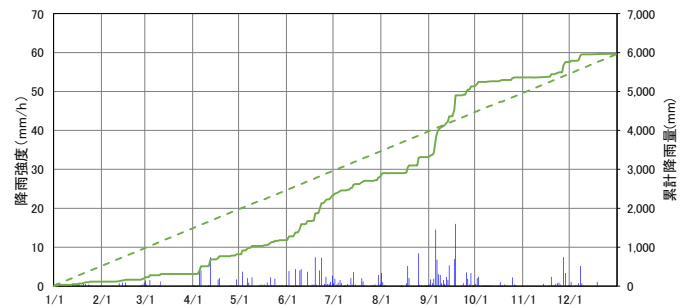
長期間を対象とした移流拡散解析に向けては、4.1.1でも述べた理由から、重金属等の拡散状況について

一定の再現性が得られる範囲で、設定する降雨波形の単純化を検討した。

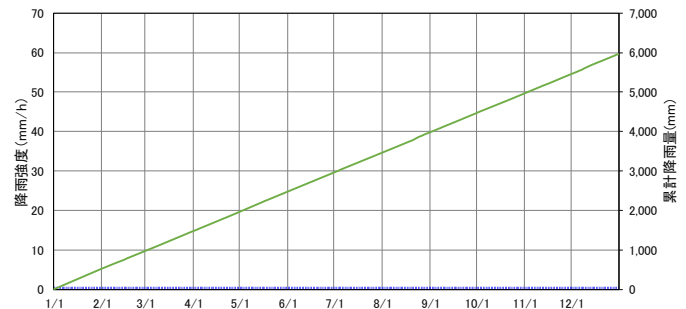
今回の検討では、多雨地域で年降水量の多い年である三重県尾鷲の1954年のアメダスデータ⁸⁾をもとに、図-23に示すような3種類の降雨波形を設定した。図-23(a)は1時間毎に降雨強度が変化する時間雨量の降雨波形、図-23(b)は日雨量を24時間で平均化した降雨強度が1日毎に変化する日雨量の降雨波形である。図-23(c)は、年降水量を平均化した降雨強度0.68mm/hを連続的に与える年平均雨量の降雨波形である。各降雨波形の図には、当該降雨波形の場合の累計雨量と、参考に図-23(a)および図-23(b)には年平均雨量の降雨波形の場合の累計降雨量も示した。対象期間を1年として移流拡散解析を行い、降雨波形の設定が解析結果に与える影響を確認した。



(a) 時間雨量の降雨波形



(b) 日雨量の降雨波形



(c) 年平均雨量の降雨波形

図-23 時間雨量および日雨量の降雨波形

要対策土部分の重金属等の濃度は、要対策土から常時最大濃度で重金属等の溶出がある状況を想定し、1で一定とした。

(3) 要対策土における重金属等濃度の変化を考慮した移流拡散解析

要対策土部分から常時最大濃度で重金属等の溶出がある状況（高濃度一定）と、初期に最大濃度の溶出があった後に溶出濃度が小さくなる状況（初期のみ高濃度）を想定して、要対策土部分に図-24のような濃度の経時変化を設定し、対象期間を100年とした移流拡散解析を行った。移流拡散解析に当たり、降雨波形は上述の(2)の検討結果を踏まえ、年平均雨量の降雨波形に当たる0.68mm/hの連続降雨とした。

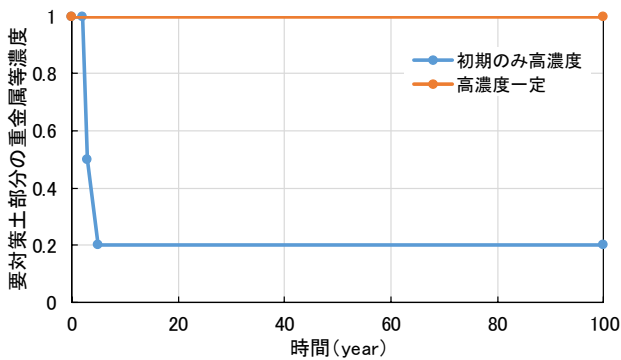


図-24 要対策土部分における濃度の経時変化

4. 2 移流拡散解析結果

4. 2. 1 降雨波形による影響

まず、降雨波形の違いが長期的な重金属等の拡散状況に与える影響を検討するため、図-23に示す時間雨量の降雨波形、日雨量の降雨波形、年平均雨量の降雨波形を設定して1年間の重金属等拡散状況を評価する移流拡散解析を行い、結果を比較した。

(1) 重金属等の濃度分布

図-25に各降雨波形での2か月後、6か月後、9か月後、12か月後の重金属等の濃度分布を示す。いずれの降雨波形でも、時間の経過とともに、盛土内や盛土直下の基礎地盤の同一地点において濃度上昇、盛土外で重金属等濃度が検出される範囲の広がりが見られ、重金属等の拡散が確認された。盛土内で要対策土部分の周辺では最大濃度の70%程度に達する領域も見られるが、12か月が経過した時点でも基礎地盤で検出される濃度は最大濃度の20%程度までの濃度にとどまっており、地下水での希釈により重金属等が基礎地盤へ流出する時の濃度は要対策土部分の濃度に比べて低い濃度になったと考えられる。

2か月後の時点では、時間雨量、日雨量の降雨波形に比べ、年平均雨量の降雨波形では同位置での濃度が高く、濃度が検出される範囲が広がっており、重金属等の拡散がより進んでいる結果であった。これは、2か月後の時点での累計降雨量が、年平均雨量の降雨波

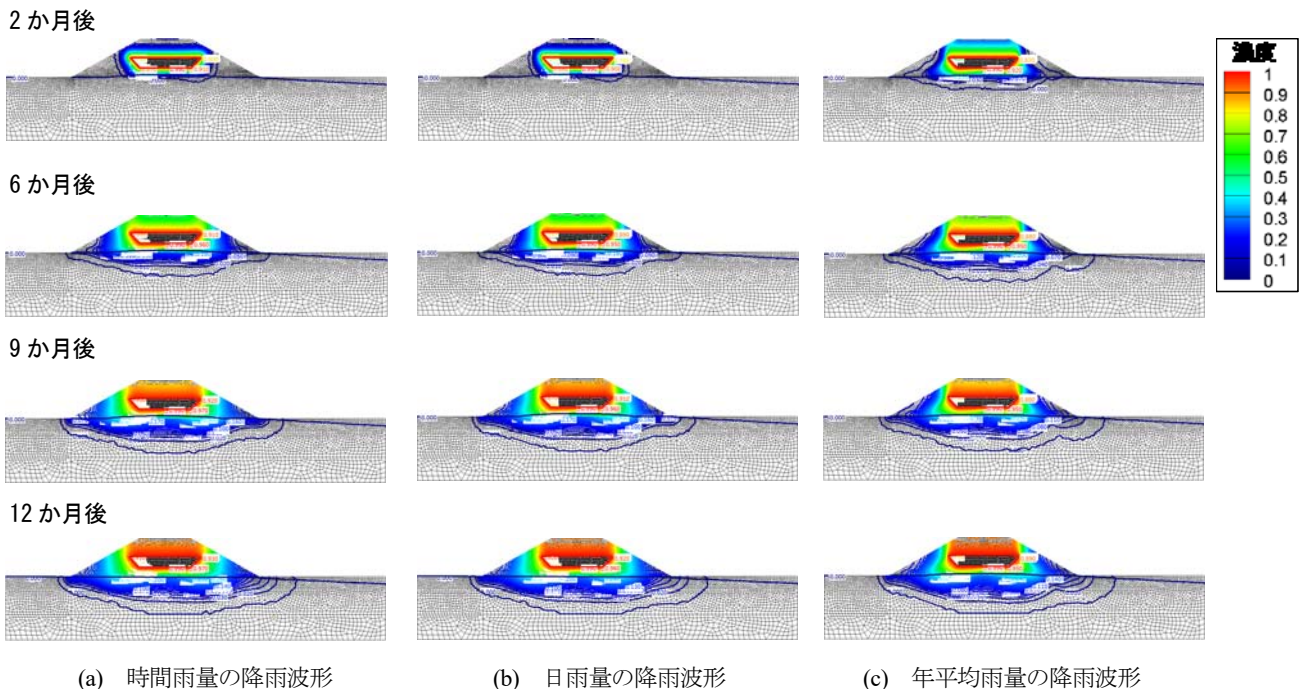


図-25 降雨波形別の重金属等拡散の予測結果

形では時間雨量や日雨量の降雨波形の5倍近くと多いことが影響したと考えられる。6か月後の時点では、年平均雨量の降雨波形の方が、時間雨量や日雨量の降雨波形に比べて基礎地盤の濃度の検出される範囲が広がっているが、2か月後の時点ほど濃度分布に大きな違いはない。直前の1か月(6か月目)には1181.1mmの降雨があり、累計降雨量が年平均雨量の降雨波形の場合の80%近くに達した。また、6か月目には降雨強度10mm/h以上が観測されることもあったが一時的であり(図-23(a))、当該日の日雨量を時間当たりで平均化すると数mm程度であった。このため、日雨量や時間雨量の降雨波形でも、降雨の浸透やそれに伴う重金属等の拡散が進んだと考えられる。9か月後の時点では、濃度分布に降雨波形による大きな違いが見られなかった。直前の1か月(9か月目)に1824.7mmの降雨があり、累計降雨量は、年平均雨量の降雨波形の場合を682.7mm上回るようになった。年間最大の降雨強度54.7mm/hがあったのをはじめ、6か月目に比べて10mm/h以上の降雨強度となるが多かった(図-23(a))。また、長雨が多く日雨量を時間当たりで平均化した雨量としても強い降雨となる傾向であった(図-23(b))。このように直前の1か月が高い降雨強度や日雨量を含み、総雨量の多い条件であったが、時間雨量や日雨量の降雨波形の場合の重金属等の拡散状況は年平均雨量の降雨波形の場合に比べて進んだ状態にはならず、近づいた程度であった。12か月後の時点でも、降雨波形による重金属等の濃度分布の違いがほとんど見られなかった。10か月目以降は、時間雨量や日雨量の降雨波形と年平均雨量の降雨波形で累計降雨量の差が次第に少なくなった時期のため、濃度分布の変化についても降雨波形による影響がほとんどなかったと考えられる。

(2) 盛土底部における濃度の推移

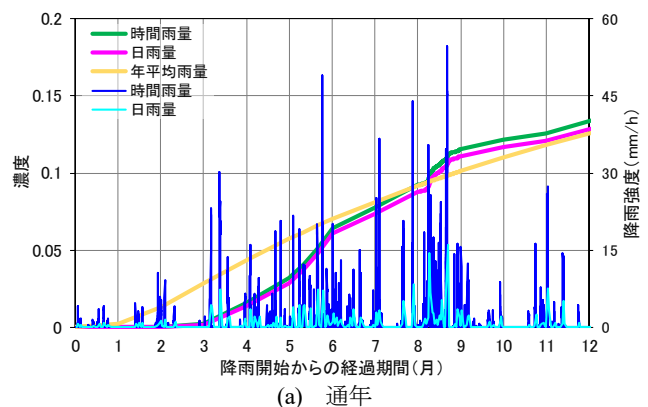
要対策土部分の直下で高濃度になりやすいと考えられ、基礎地盤とも接する盛土底面の中央における重金属等の濃度について、降雨波形別に1か月ごと、9か月目の1か月間については1時間毎の推移を図-26に示す。図-26には、降雨波形と濃度の推移の関係を見るため、時間雨量および日雨量の降雨波形を併せて示した。なお、(1)でも述べたとおり、いずれの降雨波形の12か月後においても基礎地盤への濃度の到達自体が少なく、盛土底面の中央から離れた位置では、降雨波形によらず濃度の上昇がほとんどなかった。

図-26(a)より、年平均雨量の降雨波形と時間雨量や日雨量の降雨波形での差は6か月後から縮まった。6

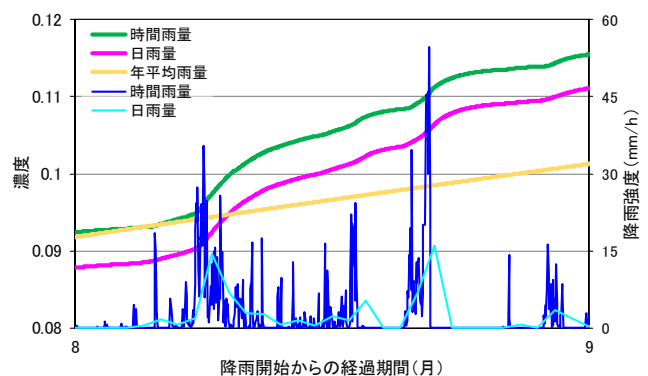
か月後までは年平均雨量、時間雨量、日雨量の降雨波形の順に高濃度となったが、9か月を経過した時から、時間雨量、日雨量、年平均雨量の降雨波形の順に高濃度となった。通年で濃度の上昇は、平均的に見ると降雨波形による違いがほとんど見られなかった。

時間雨量の降雨波形と日雨量の降雨波形では、濃度の推移に大きな違いはないが、前者が若干高い濃度で推移した。時間雨量と日雨量の降雨波形では、(1)でも述べた9か月後や6か月後のように直前の1か月の降雨量が多かった時に、濃度の上昇が大きくなっていった。これに対し、直前の1か月の降雨量が常に一定である年平均雨量の降雨波形では、月による濃度の上昇幅のばらつきは少なく、なだらかに濃度が上昇していた。いずれの降雨波形でも、降雨開始から遅れて濃度の上昇が始まった。年平均雨量の降雨波形では1か月、時間雨量と日雨量の降雨波形では3か月が経過した頃から濃度の上昇が始まり、それぞれ505.9mm、301.1mmと、数100mmの降雨を受けた後からであった。

また、9か月目について各降雨波形を用いた場合の1時間毎の濃度の推移について、拡大して図-26(b)に示す。時間雨量や日雨量の降雨波形では時間当たりの濃



(a) 通年



(b) 9か月目

図-26 盛土底面中央における濃度の推移

度の上昇にばらつきが見られ、高い降雨強度の時間帯を含み、日雨量も多くなるような降雨の直後は濃度の上昇が大きくなる傾向であったが、急激な濃度の上昇は見られなかった。また、濃度自体も要対策土部分に比べて20%未満という低濃度での推移であった。

(3) まとめ

(1)および(2)より、重金属等の濃度が検出される範囲の拡大や濃度の上昇はある程度の降雨量を受けてから確認されるようになった。盛土底面で見ると、直前に降雨量が多かった時は一時的に濃度の上昇も大きくなった。ただし、盛土外へ流出する時の濃度は地下水での希釈により要対策土部分での濃度よりも抑えられていること、(2)より一時的に濃度の上昇が大きくなっても急激な上昇にはならないことが確認された。基準値を超えるなど問題となる高濃度にはならないと考えられる。また、年間平均的に見ると、(1)で示した濃度分布、(2)で示した定点での濃度の上昇ともに、降雨波

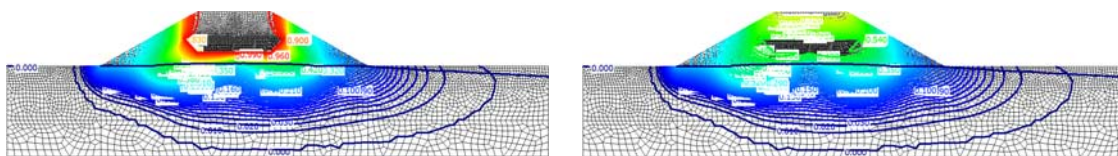
形による違いがほとんど見られなかった。このため、重金属等の拡散状況のより長期間の評価に当たっては、年降水量を平均した降雨強度の連続降雨を設定することで評価できると考えられる。

4. 2. 2 長期的な重金属等の拡散の評価

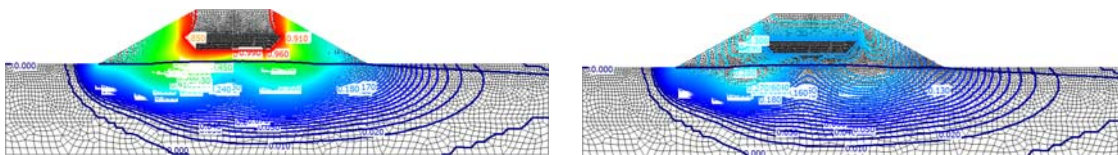
4. 2. 1での検討を踏まえて年平均雨量の降雨波形を設定し、要対策土部分における重金属等の溶出特性別に長期的な重金属等の拡散を評価した結果について、図-27に示す。図-27は、要対策土部分の溶出特性別に、3年後、5年後、10年後、50年後、100年後の盛土内の濃度分布を示したものである。

3年後の時点では、要対策土における溶出特性によらず、基礎地盤中の重金属等の濃度は初期の要対策土部分の濃度の50%以下であった。図-24に示すとおり、初期のみ高濃度の場合、2年後から3年後にかけて要対策土部分における重金属等の濃度が1から0.5に減少したため、要対策土部分周辺の濃度は高濃度一定の

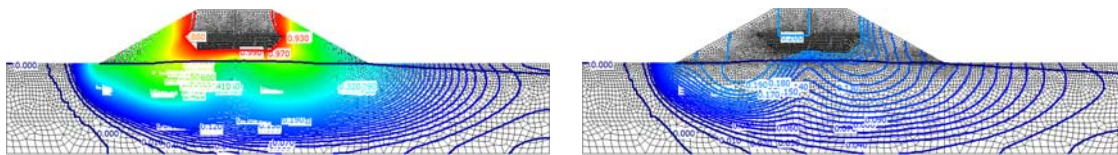
3年後



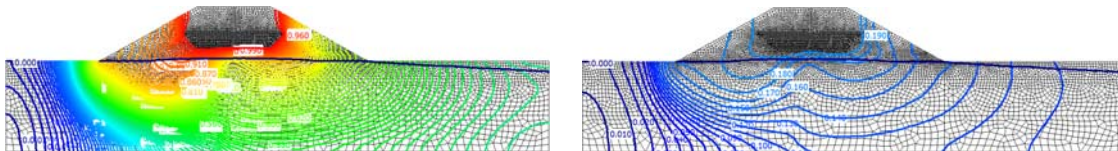
5年後



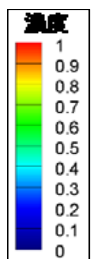
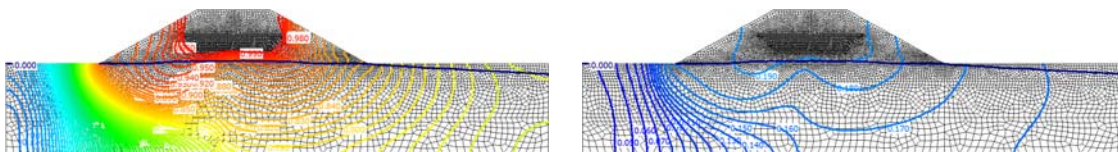
10年後



50年後



100年後



(a) 高濃度一定

(b) 初期のみ高濃度

図-27 長期的な重金属等拡散の予測結果

場合に比べて低くなった。

5年後の時点では、高濃度一定では、基礎地盤中で重金属等の濃度が要対策土部分の50%を超える部分が出てきたが、初期のみ高濃度では、基礎地盤中の重金属等の濃度は初期の模擬要対策土部分での濃度に対して30%以下にとどまった。初期のみ高濃度の場合、3年後から5年後にかけて要対策土部分の濃度が0.5から0.2に減少した(図-24)ため、要対策土部分周辺の濃度は、さらに低くなった。

その後、基礎地盤中の重金属等の濃度は、初期のみ高濃度では、初期の要対策土部分における濃度に対して20%以下となったが、高濃度一定の場合、10年後には最大60%以上、50年後以降には最大90%以上と、重金属等の拡散が続く結果となった。要対策土からの重金属等の溶出濃度が時間の経過に伴い減少する場合、盛土外への拡散は要対策土からの溶出濃度の最大値に比べて抑えられた。

4.3 要対策土を利用した盛土からの重金属等の拡散

2.の実験用盛土を両断面化して基礎地盤を設け、3.での検討を踏まえた不飽和特性および透水係数と、要対策土部分の重金属等の濃度を設定して移流拡散解析を行い、覆土により要対策土を盛土内利用した場合の盛土外への重金属等の拡散状況を予測した。

4.2.1で要対策土部分から常時一定濃度の重金属等の溶出があった場合の1年間での拡散状況について、降雨波形を変えて評価したところ、途中に一時的に時間雨量や日雨量の多い日が含まれる降雨波形でも、年降水量を平均化した連続降雨でも、年間平均的に見ると、重金属等の濃度分布としても、定点における濃度としても、重金属等の拡散状況に大きな違いが見られない結果となった。また、重金属等が盛土外に流出する時の濃度は地下水での希釈により要対策土部分に比べて低く抑えられること、降雨強度が強い時間帯を含むまとまった雨の直後の濃度上昇も急激なものではないと考えられる。そのため、年降水量を平均化した降雨強度の連続降雨を設定することで、長期的な重金属等の拡散を評価できると考えられる。

この結果に基づき、4.2.2で多雨地域の年降水量を平均化した連続降雨を与え、100年間での重金属等の拡散状況を評価した結果、要対策土部分から重金属等の溶出があった場合でも、重金属等が盛土外へ向かう際の濃度は、地下水での希釈により要対策土部分に比べて低く抑えられた。また、盛土外へ拡散する重金属等の濃度は、要対策土からの溶出濃度が時間の経過に伴い減少する場合、要対策土からの最大の溶出濃度

に比べて長期的に低く抑えられた。

こうした結果から、要対策土からの重金属等の溶出濃度の経時変化を踏まえ、要対策土に覆土をして盛土内利用することにより、要対策土に含まれる重金属等が基準値を超過するなどの高濃度で盛土外へ拡散するのを防止する効果を期待できることが確認された。

5. まとめ

本研究では、覆土による要対策土の封じ込め対策の可能性について、覆土した要対策土の盛土内利用を模擬したモデルへの降雨実験、浸透流解析、移流拡散解析により検討し、以下のことが確認された。

- 1) 要対策土からの重金属等の溶出に影響を与えると考えられる要対策土への水の流入は、主に盛土内水位の上昇によると考えられる。このため、盛土内水位が要対策土部分に達しないようにすることは、要対策土への降雨浸透対策として有効である。
- 2) 長雨や豪雨を受けると、盛土内に浸透する降雨の量には限りがあるが、盛土内水位が上昇し、要対策土部分に達する可能性が高くなる。
- 3) 天端やのり肩を遮水することは、盛土内への降雨浸透や盛土内水位の上昇を抑制するのに有効である。
- 4) 浸透流解析による盛土や要対策土への降雨浸透状況の再現のためには、室内透水性試験の値に対して割増した透水係数を設定する必要がある。同じ土と締固め度でも室内試験の供試体と盛土の均質性などの状態が異なることが要因と考えられ、今後の課題である。
- 5) 重金属等の濃度が確認される範囲の広がりや、濃度の上昇は、まとまった降雨の直後に一時的に速まる可能性があるが、年間平均的に見ると、年降水量を平均化した降雨強度の連続降雨を受けた場合と大きな違いがなかった。そのため、年平均降水量で連続的に与える降雨波形を設定すれば、長期間を対象とする重金属等の拡散状況の評価が可能と考えられる。
- 6) 重金属等が盛土外へ向かう際の濃度は、地下水での希釈により要対策土部分からの溶出濃度以下に抑えられる。
- 7) 盛土外へ拡散する重金属等の濃度は、要対策土からの重金属等の溶出濃度が時間の経過に伴い減少する場合、要対策土からの最大の溶出濃度に比べて長期的に低く抑えられる。

以上より、覆土による要対策土の封じ込めにより、比較的低レベルの要対策土に対する環境リスク低減の可能性が期待できる。ただし、対策効果を適切に評価するためには、実際の盛土の不飽和特性や透水性、要

対策土からの重金属等の長期的な溶出特性を適切に考慮することが必要であり、今後の課題である。また、今後は要対策土を利用する場合の土工構造物としての設計・施工・維持管理手法の検討も行う予定である。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ：つくば（館野）平均値（年・月ごとの値）主な要素、過去の気象データ検索、
www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view?prec_no=40&block_no=47646&year=&month=&day=&view=
- 2) 気象庁ホームページ：歴代全国ランキング、過去の気象データ検索、
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall.php?prec_no=&block_no=&year=&month=&day=&view=
- 3) (株) ダイヤコンサルタント HP：
http://www.diaconsult.co.jp/ei_hinmoku/ei_kaiseki/k_iryu/k_iryu03/
- 4) (一財) 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）、pp.54～56、2012
- 5) 阿南修司、品川俊介、倉橋稔幸、山崎秀策：建設発生土の適正利用に向けた環境安全性評価・対策手法の研究（発生源評価）、土木研究所令和元年度研究開発プログラム報告書、9.2.2、pp.7～11、2021
- 6) 開発一郎、佐倉保夫：野外土槽中の不飽和土の水分特性、筑波大学水理実験センター報告、No.5、pp.19-23、1981
- 7) 西垣誠、竹下祐二：室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究、岡山大学工学部土木工学科、pp.28～95、1993
- 8) 気象庁ホームページ：過去の気象データ・ダウンロード、
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>

A STUDY ON MEASURE FOR MITIGATION OF ENVIRONMENTAL RISK BY SEEPAGE CONTROL

Research Period : FY2016-2020

Research Team : Geology and Geotechnical Engineering Research Group
(Soil Mechanics and Dynamics)

Author : SASAKI Tetsuya

KATO Shunji

INAGAKI Yukiko

Abstract : In this research, the possibility of measures by the relatively simple containment for the measures soil which needs the measures to an environmental risks was investigated. As the results of model tests, it was verified that soil upturn of groundwater level mainly caused seepage to soil which needs countermeasure against environmental risks. As the results of advection-diffusion analysis considered the character of seepage to the embankment, it was verified that the density of heavy metal would be lower at the outside of the embankment than the density in embankment. It was also estimated that the diffusion of heavy metal would be decreased in long when the density from construction generated soil would decline with time. The above, it was confirmed environmental risk reduction effect would be expected for measures by cover soil to the soil.

Key words : construction generated soil, soil which needs countermeasure against environmental risks, naturally contaminated soil, seepage flow analysis, advection-diffusion analysis