

遮水層併用型吸着層工法の開発

森下 智貴 三浦 俊彦 山田 祐樹

鈴木 和明 西田 憲司 長谷川 甫
(本社エンジニアリング本部) (本社エンジニアリング本部)

Development of an Adsorption Layer Method Combined Water Shielding Layer

Tomotaka Morishita Toshihiko Miura Yuki Yamada

Kazuaki Suzuki Kenji Nishida Hajime Hasegawa

Abstract

The frequency of application of the adsorption layer method for preventing the diffusion of heavy metals from naturally contaminated soil has been increasing at construction sites in recent years. However, there is concern that break down of the adsorption layer may allow heavy metals to directly permeate into the ground causing contamination. We developed an adsorption layer method incorporating a water shielding layer for improved performance. The water shielding layer and the adsorption layer were installed at the bottom of an embankment, and leachate from contaminated soil was guided to the foot of slope. Testing indicated that the combination adsorption layer method was effective in purifying heavy metals.

概要

吸着層工法は汚染土を盛土材として利用する工法であり、低コストで環境負荷が低いため近年施工事例が増加している。一方で、吸着層が破過した場合に汚染が直接地山に到達する懸念がある。そこで、吸着層工法の信頼性を向上させるために吸着層盛土の底部に土質遮水層を設置した遮水層併用型吸着層工法を開発した。土質遮水層は汚染土から浸出する水の流れを制御して法尻部に集水する働きを持ち、地山への重金属浸透防止効果が期待される。また、土質遮水層に加え、法尻部にのみ高配合の吸着層を配置する吸着層集中型も考案した。本研究において、土質遮水層の効果と吸着層集中型の吸着機能を検証するために、浸出水制御型および吸着層集中型の2種類の実大盛土を構築して散水試験を実施した。その結果、10年降水量相当の散水量で土質遮水層は地山への汚染水の浸透を防ぎ、考案した吸着層構造は汚染土から浸出する重金属を吸着することを実証した。

1. はじめに

吸着層工法は自然由来の重金属を含む土壌および岩石に対する拡散防止工法であり、近年施工例が増加している。Fig. 1に示すように、締固めた汚染土の下部に吸着層を層厚30cm程度で敷設し、盛土の周囲は透水性の小さい材料で被覆される。降雨等の浸透はできるだけ少なくして汚染土からの重金属の溶出を避けるが、それでも発生した汚染土からの浸出水に含まれる重金属を底部に敷設した吸着層で吸着する仕組みである。従来の吸着層工法は、地山に直接吸着層を敷設するため、万が一吸着層が破過する場合は重金属を含む浸出水が地山へと直接浸透する可能性がある(ここで、破過とは吸着層を通過した浸出水の重金属濃度が基準値を超過することを示す)。その場合、地山および地下水に汚染が拡散されるというリスクが懸念される。また、拡散リスクのモニタリングは下流部における飲用井戸や敷地境界などのリスク評価地点で実施するため、拡散が確認された場合にはすでに地下水に汚染が広範囲に到達していることが考えられる。

大林組はこれらのリスクを避けるために、Fig. 2に示す吸着層の下部に土質遮水層を敷設する構造を考案した。

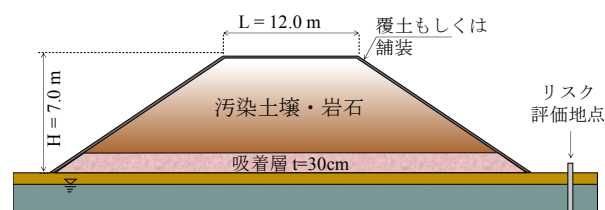
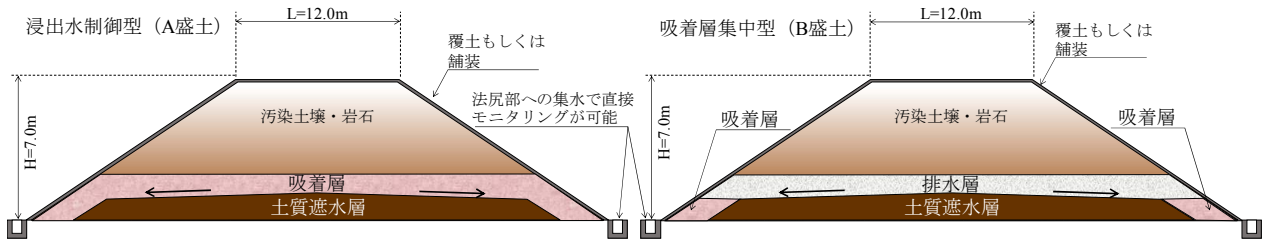


Fig. 1 従来の吸着層盛土の例(寸法は想定値)

Example of Conventional Adsorption Layer Method

土質遮水層を設置した目的は、盛土内の浸出水が直接地山に浸透するのを極力減らすためである。吸着層及び排水層は透水性が大きい材料で構築されるため、土質遮水層に到達した浸出水は勾配に沿って法尻部へと流れると考えられる。浸出水が横方向に流れることにより含まれる重金属と吸着層の接触機会が増え、吸着効果の向上が期待できる。また、吸着層を通過して浄化された浸出水は法尻部に集水されるため、法尻部で採水して重金属濃度をモニタリングすることにより、吸着層の状態を監視できる。そのため、万が一吸着層が破過した場合でも、重金属が地下水に到達する前に対策を講じることができ。この構造に加えて、土質遮水層に併せて吸着材が高



(左図：浸出水制御型(A盛土)，右図：吸着層集中型(B盛土))

Fig. 2 遮水層併用型吸着層工法の断面図(寸法は想定値)

Sectional View of Adsorption Layer Method Combined Water Shielding Layer

配合の吸着層を法尻部に設置する構造についても考案した。これは吸着層が破過した場合、吸着層のみを交換することが可能であり、破過時の対策費用が抑えられると期待できる。ここでは、前者の構造を浸出水制御型(A盛土：Fig. 2左)、後者の構造を吸着層集中型(B盛土：Fig. 2右)と呼称する。それぞれの構造は次のとおりである。浸出水制御型(A盛土)は底部に層厚30cm以上の土質遮水層、その上部に層厚30 cmの吸着層を配置する構造である。土質遮水層は吸着層、排水層より2桁以上小さい透水係数の材料を使用し、中心から法尻方向に勾配をつけた。吸着層集中型(B盛土)は土質遮水層の上部に層厚30cmの透水性の大きい材料を使用した排水層、法尻部に吸着材を多く配合した吸着層を配置する構造とした。

本研究は、土質遮水層および吸着層の効果を検証することを目的として、2種類の吸着層盛土を実大スケールで構築し、天端から10年分相当の降水量の水量を散水することで、盛土内の重金属移動特性および水分移動特性について調査した。

2. 吸着層設計

2.1 吸着層の設計方法

考案した2種類の吸着層工法の実証試験のために、吸着層の配合量設計を実施した内容を本章で示す。吸着材配合量は、汚染土質量に対し10倍の水を散水した場合に破過する量とした。なお、通水する水(液体)と汚染土(固体)の比を液固比と呼び、ここでは汚染土と散水した水の液固比は10となる。はじめに、A盛土について設計し、B盛土はA盛土の設計値に基づいて設定した。設計手法は「吸着層工法設計マニュアル」に記載された吸着容量に基づく設計を参考にした。

2.1.1 重金属の溶出量評価方法 本研究で使用した汚染土は人為由来汚染土で、砒素とセレンが含まれており、環告46号試験¹⁾ 2)での溶出量はそれぞれ0.10, 0.018mg/Lであった。所定の期間において汚染土から溶出する重金属の設計溶出量を評価するために砒素、セレンについてシリアルバッチ試験およびカラム溶出試験を実施した。シリアルバッチ試験は、環告46号試験を連続して繰り返し行う試験であり、汚染土からの長期的な溶出挙動が把握できる。繰り返し回数は10回とした。カラム溶出試験は直径5cm、高さ30cmのカラムに4mm以下に篩

分けした土壌試料を、2cmごとに125gのランマーを高さ20cmから3回落下させて締固めた。充填後、カラム内試料土の上端まで純水を満たして2日間以上平衡させた。1mMのCaCl₂溶液をカラムの下部から15mL/hの通水速度で通水させ、液固比が0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20となった時点で採水し、分析した。

2.1.2 吸着材性能評価 吸着材の性能評価は試料土の溶出液を用いたバッチ吸着試験により実施した。試験方法は次のとおりである。試料土と純水を液固比10で6時間振とうし、0.45μmフィルターでろ過して試料土の溶出液とした。試料土の溶出液に対して、吸着材の液固比を変化させて添加し、24時間振とう後に遠心分離、0.45 μmフィルターでろ過した後、上澄み液のセレン、砒素濃度を測定した。上澄み液の濃度を平衡濃度とし、吸着量は(1)式で算出した。結果は吸着等温線(平衡濃度と吸着量の関係)で整理した。吸着等温線において平衡濃度が砒素、セレンの基準値である0.01mg/Lになる吸着量を吸着材の吸着容量(Q_c)とした。

$$Q = (C_0 - C) \times V / M \quad (1)$$

- Q : 吸着量(mg/g)
- C₀ : 試料土の溶出液の濃度重金属(mg/L)
- C : 平衡濃度(mg/L)
- V : 試料土の溶出液の量(L)
- M : 吸着材の質量(g)

2.1.3 吸着層配合率の設定 試験期間に溶出すると推定される設計溶出量に対して、吸着材が持つ吸着容量の関係から吸着材配合率を設定した。実大盛土の汚染土の層厚は30cm、質量はおおよそ2000kgであり、盛土天端から液固比10となる20m³の水を散水した。散水流量は事前に浸透流解析を行い、全散水量が浸透可能な5mm/hとした。

2.2 吸着材

吸着材は酸化鉄と鉄粉を主材料とする微細粒子粉体材料³⁾を使用した。本材はセレンおよび砒素に適用可能である。

2.3 吸着層の設計

2.3.1 汚染土からの溶出量評価 汚染土からの溶出量を評価するために実施したシリアルバッチ試験の結果をFig. 3に示す。シリアルバッチ試験において砒素濃度は

繰返し回数1回目よりも2回目で高い値を示した。その後徐々に低下し、6回目以降はほぼ同程度の濃度となった。セレン濃度は回数ごとに低下し、5回目以降はほぼ同程度となった。Fig. 4にカラム溶出試験結果を示す。砒素濃度は液固比0.1のとき0.048mg/Lでその後、徐々に低下しな

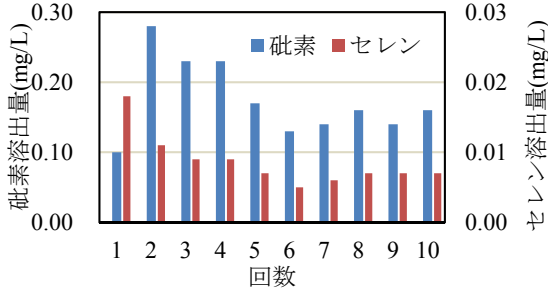


Fig. 3 シリアルバッチ試験結果
Result of Serial Batch Test

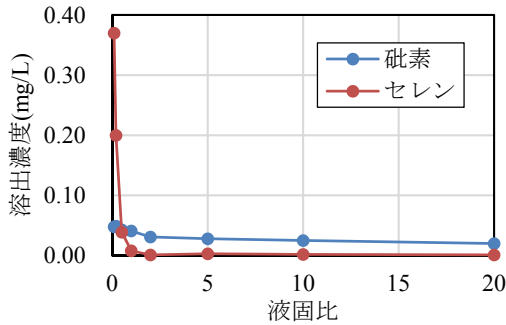


Fig. 4 カラム溶出試験結果
Result of Column Leaching Test

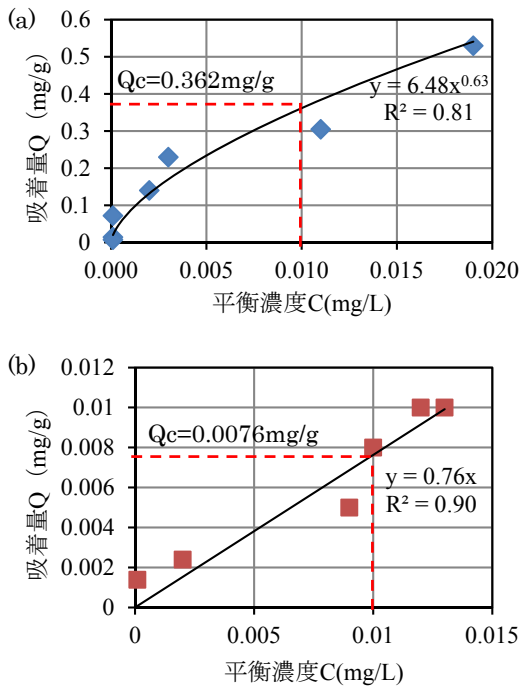


Fig. 5 バッチ吸着試験結果 (a)砒素, (b)セレン
Results of batch adsorption test (a) As (b) Se

がら液固比20で0.020mg/Lとなった。砒素の場合、一般的な自然由来汚染土は初期に高い濃度を示し、その後基準値以下に低下する傾向を示す²⁾。今回使用した汚染土は人為由来汚染土であり、汚染土の由来により溶出傾向が異なる場合があることが確認された。吸着層工法は盛り立てた汚染土から溶出する重金属を吸着し、盛土内に安定に保持する工法であるので、今回使用した汚染土のように基準値以下になる液固比が推定できない場合は吸着層工法には適さず、一般的な自然由来汚染土のように通水に伴い濃度が基準値以下となる土壌を対象とすることが望ましいと考える。セレンは通水初期に高い値を示し、その後速やかに濃度が低下した。これは一般的な自然由来汚染土と同様の傾向を示していた²⁾。セレンを含む汚染土を対象とする場合、周囲への汚染拡散防止をモニタリングするには吸着層盛土施工直後の重金属移動特性に留意する必要がある。

吸着層の設計にあたっては、実大盛土試験では汚染土に対し液固比10で散水するので、液固比10での重金属溶出量が溶出するものとした。シリアルバッチ試験で液固比10に相当するのは1回目の結果であり、単位質量あたりの溶出量に換算して砒素で1.0mg/kg、セレンで0.18mg/kgとなる。カラム溶出試験では、液固比10での累積溶出量であり、単位質量あたりに換算して砒素で0.53mg/kg、セレンで0.14mg/kgとなる。設計溶出量は安全側を考慮してシリアルバッチ試験の値を採用した。

2.3.2 吸着材性能評価 試料土の溶出液を用いたバッチ吸着試験結果をFig. 5に示す。図に示すように吸着容量(Qc)は砒素、セレンでそれぞれ0.362, 0.0076mg/kgであり、砒素に対する吸着力がセレンよりも大きかった。

2.3.3 吸着層の設計 吸着層配合率は構築する盛土構造を想定して、試験期間中に溶出する重金属量を設計溶出量と汚染土質量から計算し、吸着材の吸着容量と吸着層の規格で吸着できる配合率を設定した。その結果、液固比10で破過する吸着層配合率として砒素は0.3%、セレンは2.8%となった。

2.3.4 実大盛土の吸着層配合率 吸着層設計の結果、砒素とセレンを比較すると、セレンの方が吸着材に吸着されにくい性質を持つため配合率はセレンの方が高かった。実大盛土の配合は実験期間内に破過が生じて砒素やセレンの移動特性が把握できるように、低い配合率である砒素の値を採用し、A盛土は0.3%で施工した。

2.3.5 集中型吸着層の設計 B盛土における集中型吸着層の配合率は、A盛土吸着層との体積比から算出した。具体的にはB盛土の吸着層の体積はA盛土の1/4倍であったため、4倍の配合率である1.2%で施工した。

3. 実大盛土試験

3.1 実大盛土試験の目的

実大盛土試験は土質遮水層の効果の検証と2種類の吸着層構造の効果を確認することを目的として実施した。

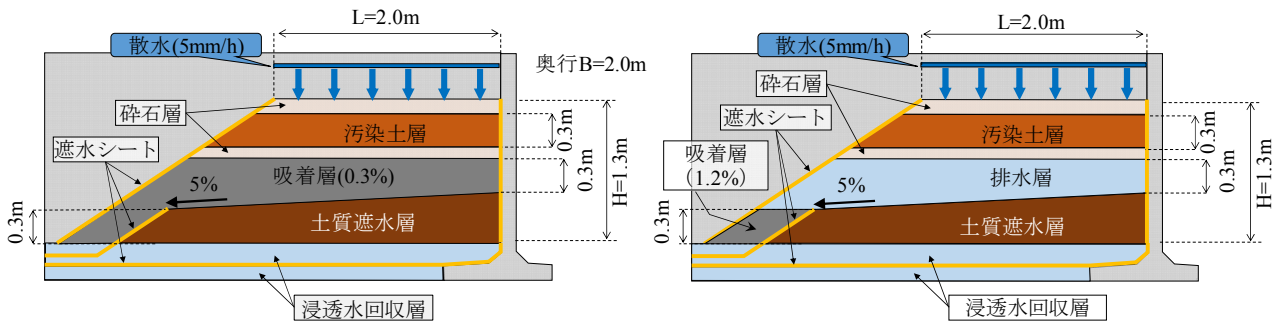


Fig. 6 実大盛土断面図(左図：A盛土, 右図：B盛土)
Sectional Views of Full-scale Embankments

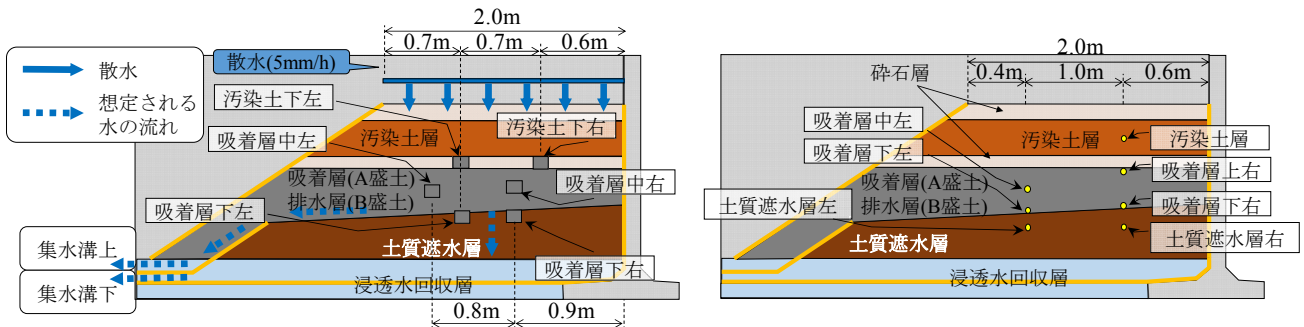


Fig. 7 観測機材配置図(左図：採水升・集水溝, 右図：含水率計)
Arrangements of Water Catchment Devices and Water Content Meters

法尻部の集水溝における流量測定で、吸着層の効果は盛土内に設置した採水栓および集水溝での採水・分析による重金属濃度測定により確認した。

盛土構造はFig. 2に示すような左右対称の構造を想定しており、左右で同様の現象を示すと考え、コンクリート擁壁を用いて片側のみ再現する構造とした。

3.2 実大盛土の構築および試験方法

3.2.1 盛土材料および実大盛土の構築 実大盛土はTable 1に示す盛土材料で構築した。排水層・浸透水回収層は砕石(C-40)、土質遮水層は山砂70%にトクレーを30%混合した材料、吸着層は7号砕石90%に山砂を10%混合した材料、砕石層は7号砕石を使用した。土質遮水層の飽和透水係数は 1.41×10^{-6} m/sであり、吸着層、排水層に比べておよそ3桁以上低い値であった。吸着層の配合量は設計の通り、A盛土、B盛土でそれぞれ0.3、1.2%とした。まず必要量の吸着材と山砂をモルタルミキサーで均一に混合し、その後7号砕石を加え混合した。吸着材の混合状況を確認するために混合後の吸着層材料を適当に10試料採取し、重クロム酸カリウム滴定法(JIS M 8213:1995)で鉄の配合量を確認した。その結果、A盛土およびB盛土の配合量の平均値はそれぞれ0.30、1.24%であり、設計値 $\pm 2\sigma$ の範囲内であった。

実大盛土(A盛土、B盛土)はFig. 6に示す構造で施工し

Table 1 盛土材料
Materials of Embankments

試料名称	飽和透水係数 (m/s)	土質分類
汚染土層	4.62×10^{-5}	細粒分混じり礫質砂
排水層・浸透水回収層	1.21×10^{-2}	粒径幅の広い砂混じり礫
土質遮水層	1.41×10^{-6}	細粒分質砂
吸着層 (吸着材配合前)	6.71×10^{-3}	分級された砂混じり礫
砕石層	9.54×10^{-3}	分級された砂混じり礫

た。各層は重機で締固め度90%以上を確保した。土質遮水層は5%の勾配を設け、法面には崩壊防止のために法面保護工を設置した。

3.2.2 散水方法 散水は天端全体から散水できるよう灌水ホースを盛土天端に配置した。散水は機械メンテナンス等で一部散水を中断することもあったが、原則として連続散水とした。2.1節で述べたように、散水量は20 m³であり、散水流量5mm/hで延べ41.7日散水した。

3.2.3 盛土内の水分測定および流量測定 盛土内の水分状況を把握するために、Fig. 7右図に示す位置に自記含水率計を設置した。測定頻度は4時間に1回とし、結果は飽和度で整理した。また、Fig. 7左図に示すように、流末部に集水溝を上下に2つ設置し、散水後に盛土を通過

した浸出水の流量を測定できる構造とした。このうち、集水溝上は土質遮水層を通過しなかった浸出水、集水溝下は土質遮水層を通過した浸出水を回収した。

3.2.4 吸着層の効果確認 散水中は盛土内に設置した採水升および集水溝(Fig. 7左図)から適宜採水し、セレン、砒素濃度を分析することで吸着層の効果を検証した。

3.3 実大盛土試験結果

3.3.1 集水溝の流量観測結果 集水溝の流量観測結果をFig. 8に示す。集水溝下の積算流量、すなわち土質遮水層を通過し地山へ浸透する流量は集水溝に回収されなかった。集水溝上の積算流量は直線的な動きをしており、積算散水量よりも集水溝上部の積算流量がやや少ない結果となった。集水溝下での積算流量が観察されなかったことから、水収支の差は盛土内に保持される水量、蒸発量等に起因すると考えられる。この結果から、盛土内を流れる浸出水は土質遮水層の効果により、すべて法尻部へと導水されたものと考えられる。

3.3.2 含水率計測定結果 散水に伴う各層の含水率計測定結果をFig. 9に示す。A盛土およびB盛土ともに同様の傾向であったため、A盛土の結果のみを示す。汚染土層は散水に伴い飽和度が上昇し、飽和度80~100%で推移した。吸着層の飽和度は中部および上部で低く、下部では高くなった。吸着層は透水性が高い層であり、水が浸透後速やかに下部へ移動し、土質遮水層と吸着層の境界部に滞流したと考えられる。土質遮水層の飽和度が試験期間中を通して60%程度で変化量が小さかったのは、本試験の散水量相当では土質遮水層に設置した含水率計に水が到達しなかったためであると推定することができる。

3.3.3 盛土中の水分移動特性の推定 流量観測結果および含水率計測定結果から盛土内の水分移動状況を推定した(Fig. 10)。散水により盛土に浸透した水は汚染土を通過し、吸着層へと浸透する。吸着層は透水係数が高いため土質遮水層まで速やかに移動し、土質遮水層の上部に水が集中する。浸出水は土質遮水層に浸透せず、土質遮水層に沿って流末部へと流れると推定される。

3.3.4 吸着層の効果 採水升および集水溝で採水した試料の砒素およびセレン分析結果を Fig. 11 に示す。汚染土下の濃度は汚染土からの溶出傾向を示しており、砒素は初期に低く、液固比 2~6 から 0.03mg/L 程度で推移した。セレンは液固比 0.7 で 0.4mg/L 程度と高い値を示し、液固比 2 を過ぎると 0.1mg/L 以下で推移した。このように、重金属の溶出傾向は元素により異なっており、カラム溶出試験でも重金属により溶出傾向は異なることが報告されている²⁾。こうした傾向は重金属の種類によって吸着層へ浸透するタイミングが異なることを示唆しており、吸着層工法を設計する場合は重金属の溶出傾向を事前に把握することが重要であるといえる。A 盛土およびB 盛土ともに吸着層通過後のセレンおよび砒素濃度は低下しており吸着層の効果を確認できた。砒素濃度について吸着層通過後の水質を示す集水溝上の値に着目する

と、A 盛土は液固比 9.5、B 盛土は液固比 8.5 でそれぞれ破過していた。両盛土とも液固比 10 より早く破過してお

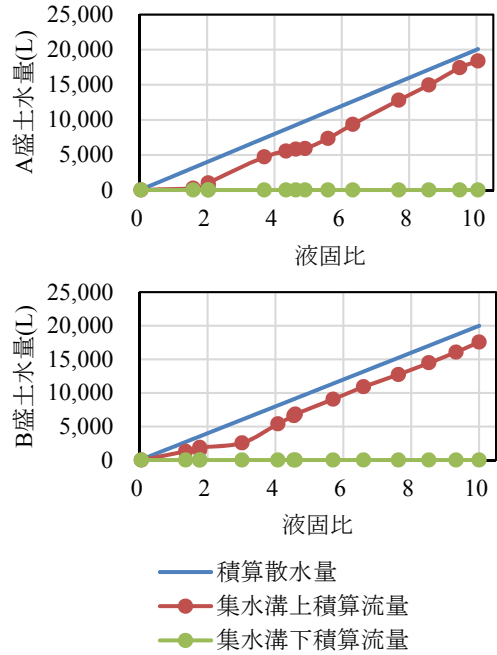


Fig. 8 集水溝の流量観測結果
Result of Flow Measurement at Water Catchments in the Foot of Slope

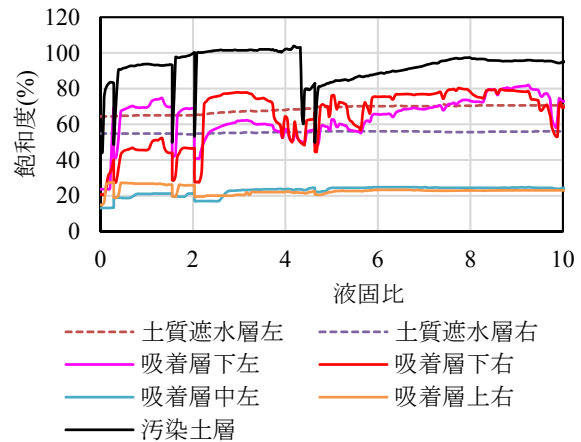


Fig. 9 含水率計測定結果(A盛土)
Measurement of Water Content Meter

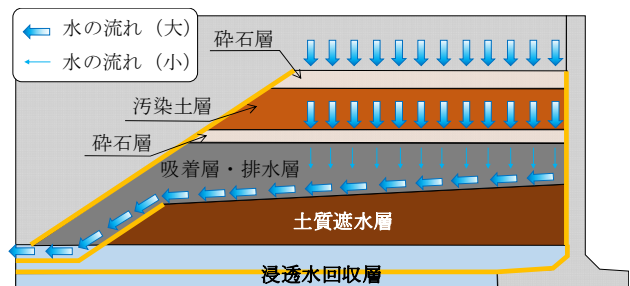


Fig. 10 推定される盛土内の水の流れ
Estimated Water Flow in Embankment

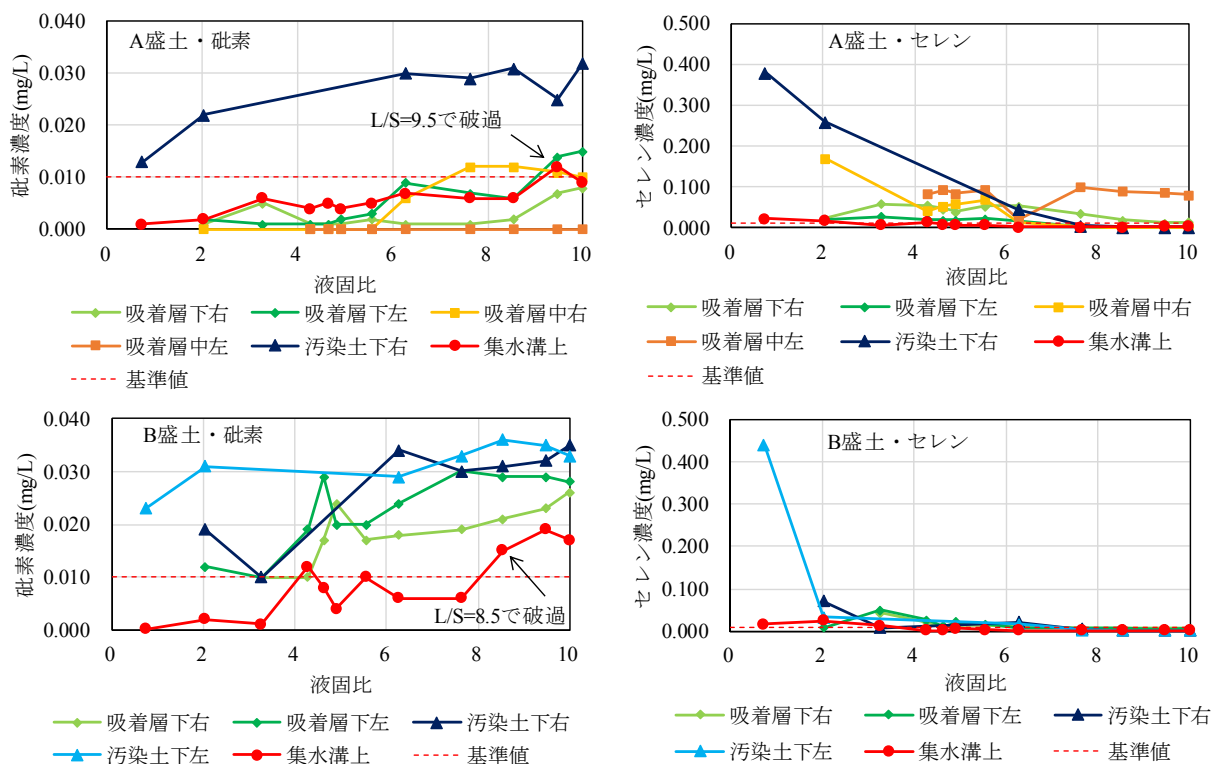


Fig. 11 実大盛土試験における砒素・セレン採水分析結果
 (上左：A盛土砒素，上右：A盛土セレン，下左：B盛土砒素，下右：B盛土セレン)
 Results of Arsenic and Selenite Analysis in Full-Scale Embankment Experiment

り，設計に対して安全率を見込む必要があった。セレン濃度は初期に汚染土から溶出する0.4mg/Lに対し，集水溝上では0.02mg/L程度と低減効果が確認できた。今回は砒素に対応した配合率のため基準値を超過したが，配合率を増やして初期の高濃度の溶出を吸着できればセレンでも基準値以下にできるものと考えられる。

実際に吸着層工法として適用する場合は，汚染土の設計溶出量および溶出傾向を把握して，吸着層が破過しない配合率で設計すれば，汚染拡散防止を図ることができると考えられる。

今後は吸着層の長期安定性および土質遮水層の安定性の向上について研究を行う予定である。

4. まとめ

遮水層併用型吸着層工法として，2種類の吸着層構造を考案した。実証試験で得られた結果を以下に示す。

- 1) 今回使用した人為汚染土における砒素の溶出傾向は継続的に高濃度の砒素が溶出するものであった。一般的な自然由来汚染土と異なる傾向を示しており，吸着層に適用させるには汚染土からの溶出傾向を十分に把握する必要がある。
- 2) 実大盛土試験の流量観測および含水率計測定の結果から，盛土内の浸出水は土質遮水層の効果により地山に浸透しないことが確認され，土質遮水層に沿って法尻部へと流れているものと推定された。

- 3) 浸出水制御型と吸着層集中型の両方で吸着層の効果により重金属濃度が低減された。適切な配合率を設計することで考案した工法で汚染拡散防止効果が得られるものと考えられる。

謝辞

本研究の一部は環境省の委託事業「平成28年度低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査」で実施した。国立研究開発法人産業技術総合研究所の保高徹生博士には実験の遂行に全面的にご協力頂いた。石原産業株式会社には試験施工場所の提供など実験へのご協力頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 北海道環境保全技術協会：吸着層工法設計マニュアル，60p.，2012.6
- 2) 保高徹生，他：重金属等の溶出特性評価方法に関する一考察—上方流カラム試験と環告46号試験の比較—，第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演要旨集，pp.394-396，2014.6
- 3) 土光政伸，他：酸化鉄系材料により不溶化したSe(VI)模擬汚染土壌の安定性評価，第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演要旨集，pp.237-240，2014.6