

平成 28 年度低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査結果

実施期間：株式会社大林組

技術名称：簡易遮水層併用型吸着層工法

調査対策区分：対策

技術の区分：吸着層工法

実証試験の評価対象物質：セレン、砒素

試験期間：平成 28 年 9 月～平成 29 年 3 月

1. 技術の原理および特徴

本技術は、重金属含有ズリ・土壤の対策工法である吸着層工法の盛土底部に、低透水性の簡易遮水層を設置して（図 1）、重金属汚染拡散リスクを低減する技術である。簡易遮水層を設置しない従来の吸着層工法は、吸着層の施工誤差等から、設計通りの吸着効果が得られない場合に周辺環境へ汚染が拡散するおそれがある。一方で、本技術は簡易遮水層の設置により以下の効果が期待できる。

- ・浸出水が地山に浸透することを防止し、周辺環境への汚染拡散リスクを低減する。
- ・浸出水が盛土法尻部に集水されるため、排水制御が可能となり、吸着効果のモニタリングが容易になる。
- ・吸着層を法尻部に集中配置させる構造の盛土（以下、「B 盛土」という。）が可能となり、対策工事の省力化や低コスト化につながる。

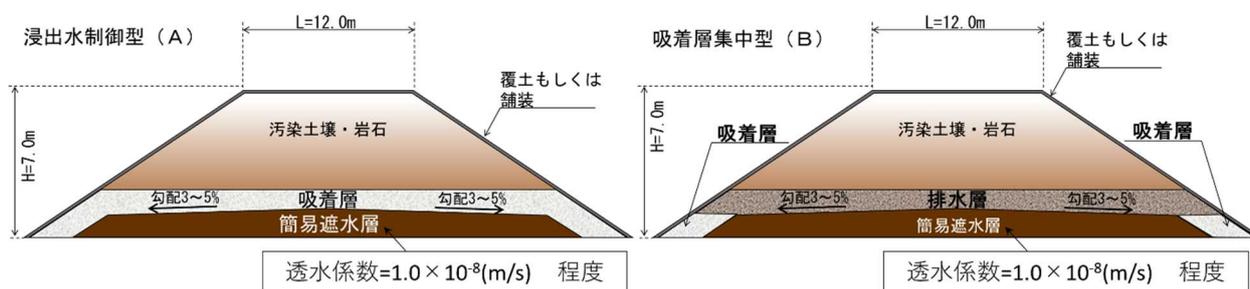


図 1 簡易遮水層併用型の吸着層工法盛土断面
（左図：浸出水制御型（A 盛土）、右図：吸着層集中型（B 盛土））

2. 技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方

従来の吸着層工法盛土は、吸着層を通過した浸出水は地山へと浸透するため、吸着層の施工に不備があった場合、重金属に対して十分な吸着効果が得られず、汚染拡散リスクが懸念される。そのため、観測井戸を盛土場とリスク評価地点の間に配置し、地下水中の対象重金属濃度を確認する。しかし、モニタリングの結果から環境基準値を超過する対象重金属が検出された際は、すでに汚染が周辺環境に拡散した状態であり、地下水浄化等の困難な対策が必要となる。

一方、本技術は、吸着層下部に設置した簡易遮水層の遮水効果により、汚染拡散リスクを低減することが可能である。また、浸出水は法尻部に集水されるため、排水制御が可能となる。そのため、吸着効果のモニタリングが容易になり、迅速な対策立案や施工が可能となる。特に、B 盛土は吸着層を法尻部に集中配置した構造であるため法尻部のみを交換すればよく、対策工事の省力化や低コスト化につながる。

以上から、本技術は吸着層工法の低コスト・低環境負荷に資する技術であると考えられる。また、吸着材配合率を、実現場での様々な現象を考慮できるカラム吸着試験を取入れた設計手法（以下、「新設計法」という。）で最適化し、さらなる低コスト化を目指した。

3. 調査結果の概要

3.1 実証試験内容

(1) 達成目標

本実証試験の達成目標を表1に示す。

吸着層の設計手法に新設計法を採用し、吸着材配合率を最適化することで吸着材使用量を10～90%削減することを目標とした。具体的には、新設計法と従来設計法で吸着材配合率をそれぞれ試算し、比較した。

吸着層の吸着機能については新設計法の妥当性を評価することで検証した。具体的には、設計した配合率の吸着層を有する試験盛土を作製し、上部から散水を行い浸出水中の汚染濃度等を測定し、吸着層が破過するまでの期間を算出した。破過までの期間が設計より早ければ危険側の設計、遅ければ安全側の設計であると評価した。

浸出水の制御については簡易遮水層の効果を検証することで評価した。具体的には、盛土直下への浸出水量および盛土内含水率を測定し、簡易遮水層の遮水効果により盛土直下へ浸出水が浸透しないことを検証した。

表1 本実証試験の達成目標

項目	目的	達成目標
吸着層の設計手法	吸着材配合率の最適化	吸着材使用量を10～90%削減
吸着層の吸着機能	吸着層の吸着機能を検証	吸着層の破過時間について、設計値と実測値を比較し、両者のずれを評価
浸出水の制御	簡易遮水層の遮水効果を検証	盛土直下に浸出水を浸透させない

(2) 吸着層設計手法の合理化

吸着材の配合率決定に際して、新設計法、従来設計A法およびB法の設計手法を表2に示す。本実証試験では砒素とセレンを対象として設計した。従来設計AおよびB法は吸着層工法設計マニュアルに掲載されている手法である。

新設計法は吸着材の性能評価にカラム吸着試験を用いた。カラム吸着試験はバッチ吸着試験より現場に近い評価方法である。以下に各ステップについて詳述する。

STEP1：汚染土からの溶出評価では全ての設計法でシリアルバッチ試験の1回目の値を採用し、同じ溶出量での比較を行った。

STEP2：吸着材の性能について、新設計法はカラム吸着試験、従来設計法はバッチ吸着試験の結果を用いて評価した。

STEP3：吸着材混合率について、新設計法および従来設計A法は移流分散解析、従来設計B法は吸着層工法設計マニュアル記載の計算表により評価した。本試験では L/S (L :散水量、 S :汚染土質量) = 10 で吸着層が破過する場合の吸着材混合率を設計した。

表2 設計手法の比較

設計STEP	新設計法	従来設計A法	従来設計B法
STEP1 汚染土からの溶出評価	シリアルバッチ試験 1回目 ($L/S=10$)	シリアルバッチ試験 1回目 ($L/S=10$)	シリアルバッチ試験 1回目 ($L/S=10$)
STEP2 吸着材性能評価	カラム吸着試験 逆解析で吸着層材の 分配係数を算出	バッチ吸着試験 吸着材の分配係数を 推定	バッチ吸着試験 吸着材の吸着容量の 推定
STEP3 吸着材混合率推定	移流分散解析	移流分散解析	計算表

なお、カラム吸着試験は直径5cm、高さ10cmのカラムに吸着層試料を詰め、上向き方向に試料土の溶出液を流速5mm/hで通水し、回収した浸出水の砒素およびセレン濃度を測定した。吸着層試料は吸着層材料(7号

碎石+山砂)に吸着材(MT-V3, 石原産業社製)を3, 5, 10 wt%で配合した試料を用いた。試料土の溶出液は汚染土と水を液固比 10 で抽出したものを使用した。

(3) 吸着層の吸着機能検証

試験盛土を2基(以下、それぞれA盛土、B盛土という。)施工して散水試験を実施し、吸着層の吸着機能を検証した。試験盛土の構造を図2に、各層の使用材料の土質試験結果を表3に示す。

試験盛土の吸着層配合率は、前節の新設計法により算出した。A盛土は、汚染土の下部に吸着層、底部に山砂と粘性土を混合した簡易遮水層を設置した。B盛土は、簡易遮水層上部に透水性の良い排水層を、盛土法尻部に高配合の吸着層を設置した構造である。AおよびB盛土ともに簡易遮水層上面には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。

散水試験は、試験盛土の上部から5mm/hの強度で計20m³を散水することとした。本試験盛土における散水範囲の汚染土量はおよそ2tであるため、散水量と汚染土量の液固比がL/S=10となる散水量である。5mm/hの強度で散水した場合、41.7日間の散水試験期間となる。試験盛土上部(面積4m²)から20m³を散水するため、総降水量は5000mmとなる。年間降水量1700mm、降雨浸透率30%と仮定すると、約10年分の降水量に相当する。

散水期間中、盛土浸透水を図3に示す位置に設置した浸透柵で、盛土浸出水を盛土法尻部に設置した集水溝で適宜回収し、それらの水に含まれるセレンおよび砒素の濃度を測定した。得られたセレンおよび砒素の濃度について、散水量を液固比で整理し、L/S=10で破過する設計と比較することで新設計法の妥当性を検討した。

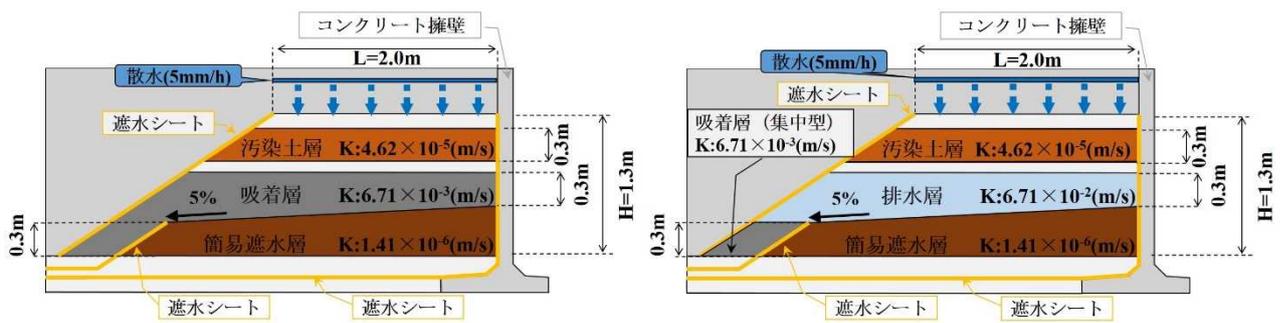


図2 試験盛土構造図(左図:A盛土、右図:B盛土)

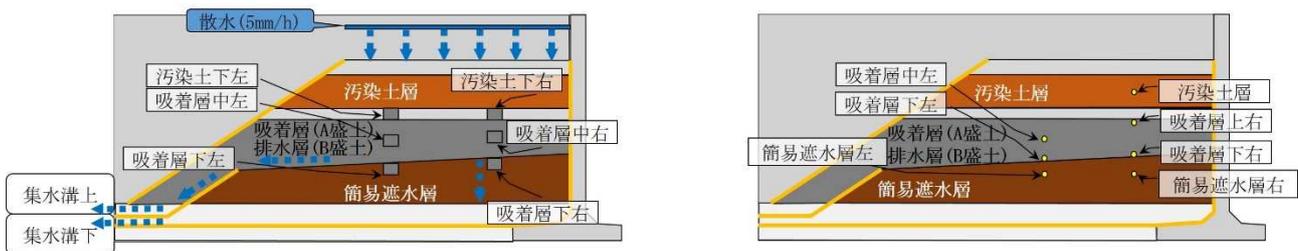


図3 散水試験概要図(左図:採水柵設置位置、右図:含水率計設置位置)

表 3 使用材料の土質試験結果

試料名称	四日市土壌 (汚染土)	排水層・ 浸透水回収層	簡易遮水層	吸着層
自然含水比 (%)	10.1	1.3	9.3	1.5
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.901	1.868	1.881	1.640
最適含水比 (%)	12.9	5.1	12.7	7.3
土質分類	細粒分混じり 礫質砂	粒径幅の広い 砂混じり礫	細粒分質砂	分級された 砂混じり礫
飽和透水係数 K (m/s)	4.62×10^{-5}	1.21×10^{-2}	1.41×10^{-6}	6.71×10^{-3}
砒素溶出量 (mg/L)	0.17	0.002	<0.001	0.001
砒素全含有量 (mg/kg)	1,000	7.4	4.1	3.5
セレン溶出量 (mg/L)	0.019	<0.001	<0.001	0.002
セレン全含有量 (mg/kg)	10	0.1	0.6	<0.1

(4) 簡易遮水層の遮水効果検証

図3左図に示す集水溝上および下で盛土浸出水の流量を、図3右図に示す含水率計で散水に伴う各層の含水率変化を観察した。これらの結果から、盛土内の水分移動特性を把握することで、簡易遮水層の遮水効果を検証した。

3.2 実証試験結果

(1) 吸着層設計手法の合理化

STEP1: 汚染土からの溶出評価

実大盛土に使用した汚染土壌の砒素土壌溶出量について、カラム溶出試験およびシリアルバッチ試験の結果を図4に示す。

カラム溶出試験において、砒素は継続的な溶出を示し、通水量が液固比20となった時点でも基準値(0.01 mg/L)以下にはならなかった。セレンは初期に著しく高い濃度を示し、液固比1以降で基準値(0.01 mg/L)以下となった。

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、その後徐々に低下した。6回目以降はほぼ同程度の濃度となった。セレンでは回数ごとに徐々に濃度が低下し、5回目以降はほぼ同程度となった。シリアルバッチ試験ではL/S=10に相当する繰返し回数1回目での砒素およびセレン溶出量が、カラム溶出試験と比較して高い値を示した。

以上の結果から、設計に用いる溶出量は、安全側の検討を行うこととして、シリアルバッチ試験の1回目の値である砒素0.1mg/L、セレン0.018mg/Lと決定した。

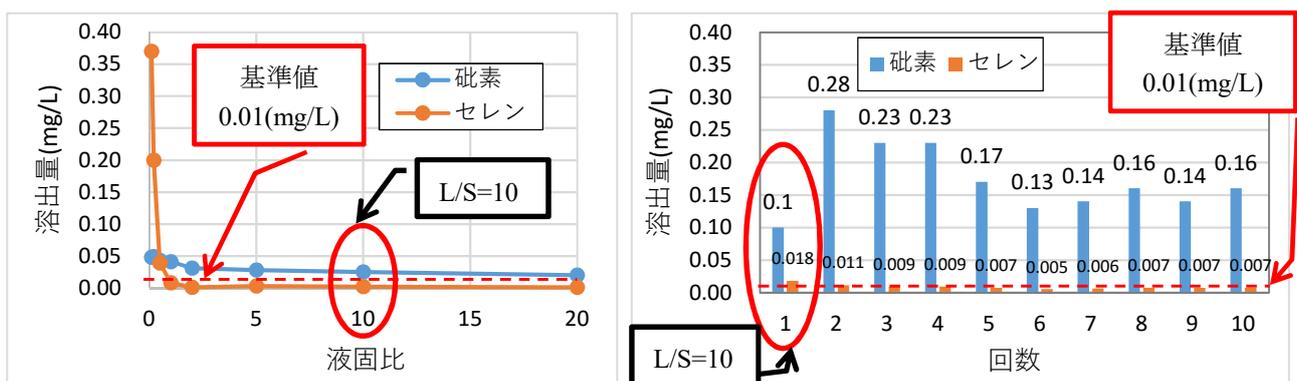


図 4 土壌溶出量評価 (左: カラム溶出試験、右: シリアルバッチ試験)

STEP2: 吸着材性能評価

カラム吸着試験結果および逆解析の一例を図5に示す。逆解析で得られる吸着パラメータを使用して、L/S=10で破過する配合率を設定した。配合率の決定においては、実証試験を想定しL/S=10の散水量で破過する場合の吸着層配合率を、吸着層を模擬した一次元移流拡散方程式で算出したところ、0.3%となった。これを踏まえ試験盛土のA盛土吸着層における吸着材配合率を0.3%に設定した。

同様の方法でセレンについても計算した。算出した砒素とセレンの配合率を表4に示す。詳細な記述は省略するが、吸着層工法設計マニュアルに示された従来設計AおよびB法により算出した配合率と比較したところ、砒素に関しては、各種設計方法に関して、大きな違いは確認されなかった。

試験盛土の吸着層における吸着材配合率は、盛土内での砒素とセレンの移動特性をそれぞれ把握できるように、算出した配合率のうち低いものを採用した。

B盛土における集中型吸着層の配合率は、実験の都合上、A盛土吸着層との体積比から算出した。具体的には吸着層の体積がA盛土の1/4倍であったため、4倍の配合率(1.2%)とした。

なお、A盛土と同様の手法でB盛土集中型吸着層の配合率を設計した場合、L/S=10で破過する配合率は1.28%となり、試験盛土に採用した配合率1.2%はL/S=9.5で破過する配合率であった。

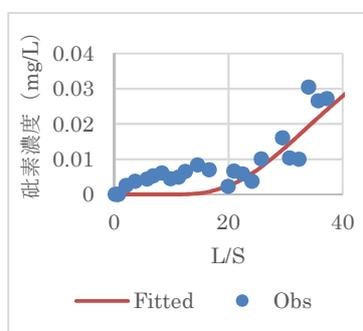


図5 吸着材配合率 10%のカラム試験結果と逆解析からフィッティングした破過曲線

表4 各種設計法による吸着材配合率算出結果一覧

対象重金属	吸着材配合率 (wt%)			
	従来設計 A 法	従来設計 B 法	新設計法	新設計法 (集中型)
砒素	0.33	0.32	0.30	1.2
セレン	2.75	2.75	1.37	—

(2) 簡易遮水層の遮水効果証

① 流量観測結果

散水量と集水溝上および下で観測された盛土浸出水流量の関係を図6に示す。集水溝下の浸出水流量、すなわち簡易遮水層を通過し地山へ浸透する流量は観測されなかった。散水量と集水溝上の水量は同様の動きをしており、散水量よりも集水溝上部の浸出水流量がやや少ない結果となった。集水溝下での浸出水流量が観測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。

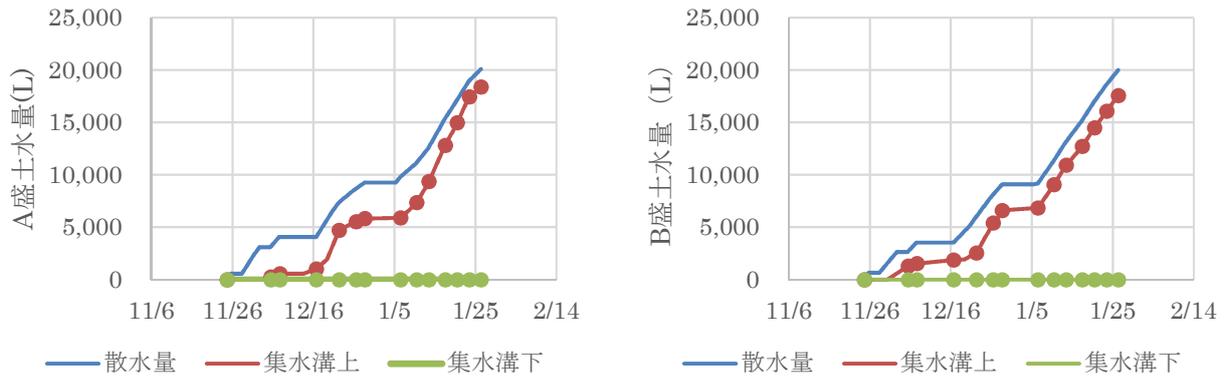


図 6 集水溝流量観測結果

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図 7 に示す。含水率計は事前にキャリブレーションを行い、体積含水率でデータを採取した。また土質データから飽和度に変換して結果を整理した。なお、A および B 盛土ともに同様な傾向を示したため、A 盛土の結果を用いて説明する。以下に各層の水分状況について示す。

- ・ 汚染土層：散水に伴い飽和度は上昇し、飽和度 80～100%で推移した。
- ・ 吸着層：飽和度は中部および上部で低く、下部では高くなった。透水性が高い層であり、水は浸透後、速やかに下部へ移動し、簡易遮水層と吸着層の境界部に滞流すると考えられる。
- ・ 簡易遮水層：L/S=0 における飽和度初期値は 60%程度であり、散水期間中はおおむね初期値で推移していることから、簡易遮水層への水の浸透はないものと考えられる。

以上の結果から推定される盛土内浸透水の移動特性模式図を示す（図 8）。

散水により盛土に浸透した水は汚染土を通過し、吸着層へと浸透した。吸着層は透水係数が高いため簡易遮水層まで速やかに移動し、簡易遮水層の上部に水が集中した。簡易遮水層には水は浸透せず、簡易遮水層に沿って流末部へと流れていくと推定される。

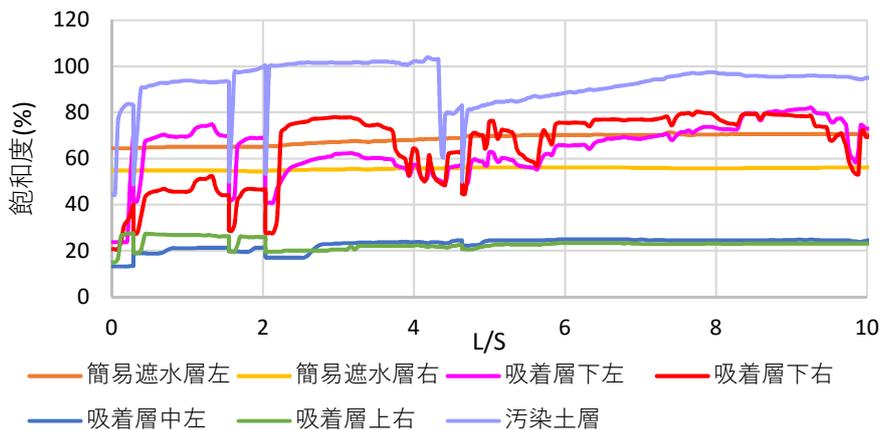


図 7 含水率計測定結果 (A 盛土)

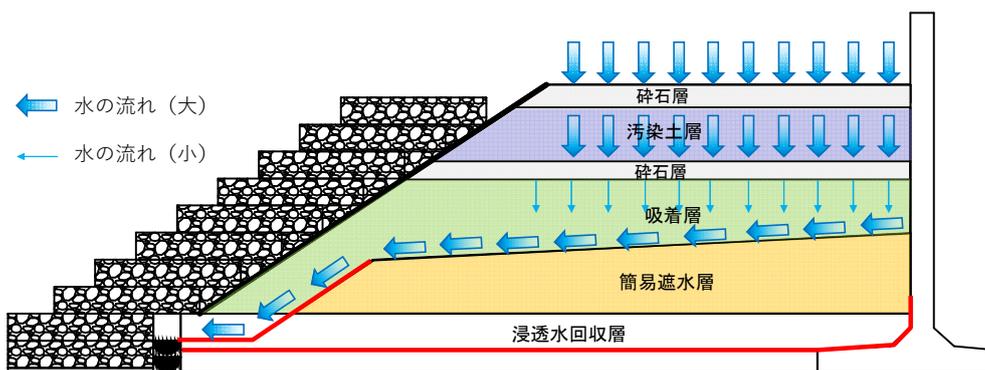


図 8 推定される盛土内の水の流れ

(3) 吸着層の吸着機能検証

浸透枘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図 9 に示す。

吸着層の形状によらず、A 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、吸着層の効果が確認できた。また、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 (○のプロット) に着目すると、A 盛土で $L/S=9.5$ 、B 盛土で $L/S=8.5$ の液固比で破過していた。なお、B 盛土の場合は $L/S=4.3$ においても砒素濃度は 0.01mg/L を超過したが、砒素の溶出傾向を考慮し、前後のデータの移動平均から部分的な超過であり破過ではないと判断した。設計値は A 盛土では $L/S=10$ で、B 盛土では $L/S=9.5$ で破過する設計であり、設計に対して安全率を見込む必要がある。

次に実大盛土からの重金属の溶出傾向とカラム溶出試験 (3.2.(1)) での傾向を比較する。汚染土下の値 (▲のプロット) が汚染土からの重金属の溶出傾向を示している。砒素の溶出傾向は実大盛土において初期で低い値を示すが、カラム溶出試験では初期に最も高い値を示した。これは、カラム溶出試験は事前に飽和しているのに対し、実大盛土は飽和しておらず通水初期において構造的に不安定だったことが影響していると考えられる。セレンの溶出傾向はカラム溶出試験と実大試験で同様に初期に高い値を示す傾向にあった。

以上の結果から、セレンと砒素で、溶出特性が大きく異なることが実大スケールでも明らかとなった。また、吸着層を設計する場合は重金属の溶出特性を考慮した設計が重要であると考えられた。

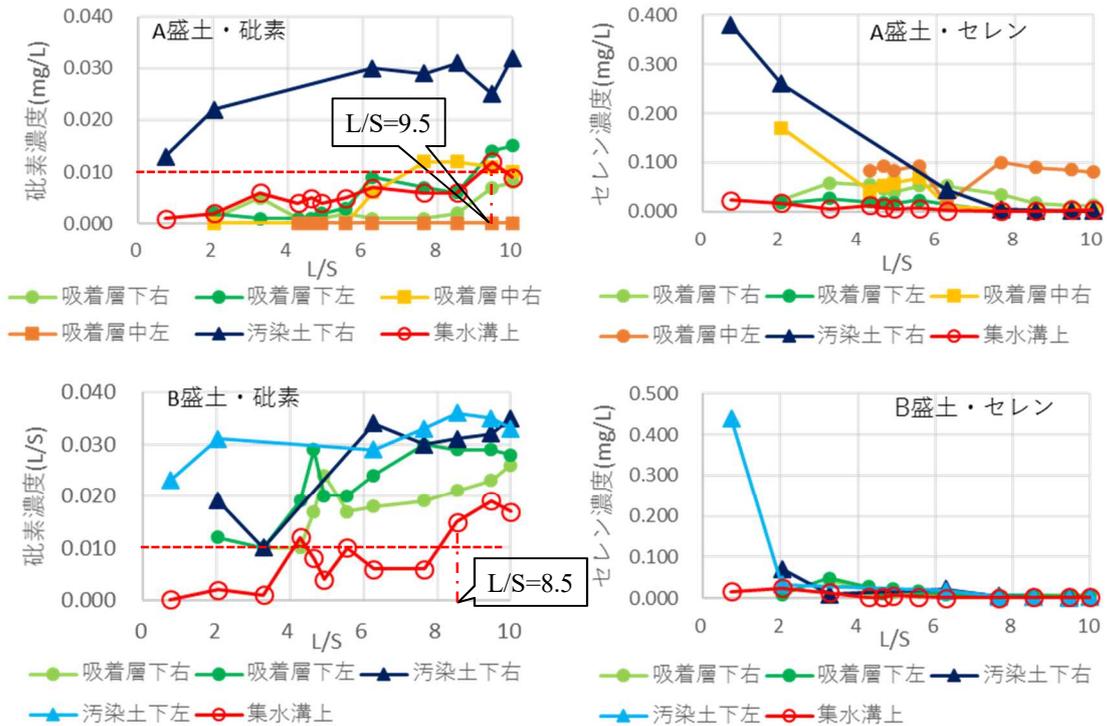


図 9 実大盛土における砒素・セレン採水分析結果
 (上左：A 盛土砒素、上右：A 盛土セレン、下左：B 盛土砒素、下右：B 盛土セレン)
 ※赤破線は砒素土壌溶出量基準値 (0.01mg/L) を示す。

3.3 技術の実用性および評価

(1) 本技術を適用した盛土構造 (案)

本技術を用いた盛土を実際に構築する際の盛土構造 (案) を図 10 に示す。盛土上部に降雨等の浸透を防ぐ覆土層を設置し、法尻部に吸着層の変形を抑制する法面保護工を設置した。簡易遮水層の設置により盛土法尻部へ集水された浸出水は、有孔管によりモニタリング側溝に排水される構造とした。側溝に排水された浸出水を、100m ごとに 1 箇所設置したモニタリング柵に集水し、水質測定および排水管理が実施できる構造とした。B 盛土については、覆土層法尻部に加えて盛土内部にも法面保護工を設置し、集中型吸着層と盛土本体部分の縁が切れた構造とした (図 11)。そのため、モニタリングにより吸着層の破過が確認された場合には、法尻部の撤去可能部のみを掘削・除去し、吸着層を再構築することで、要求性能を維持することが可能となる。

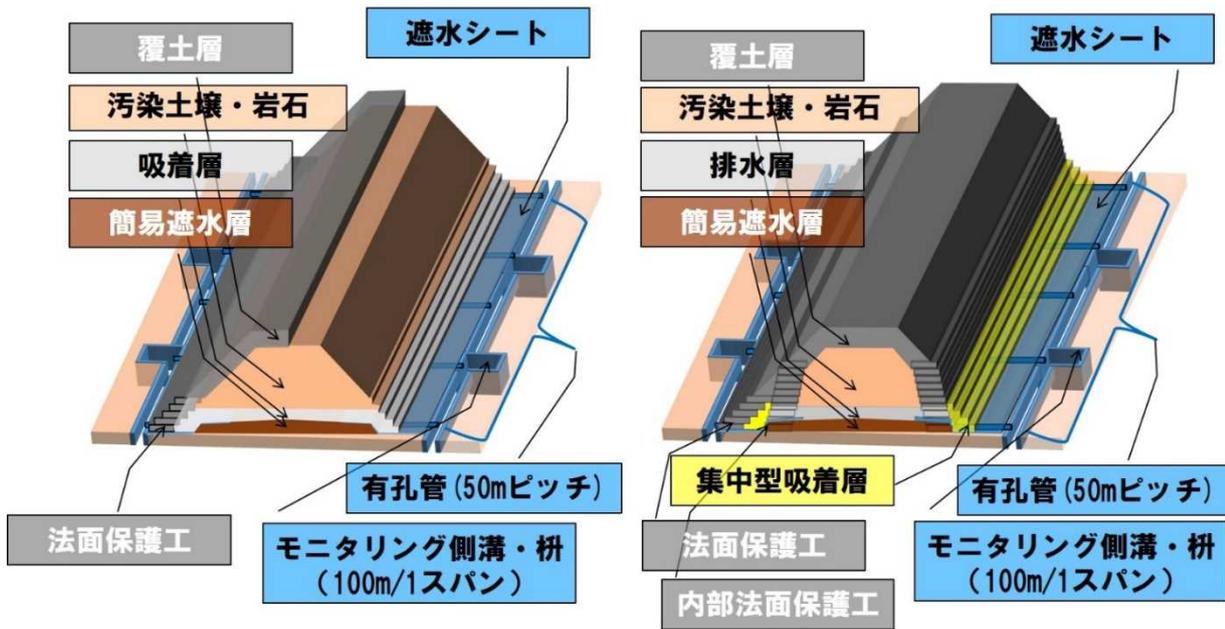


図 10 本技術を適用した盛土構造 (案)
(左図: A 盛土、右図: B 盛土)

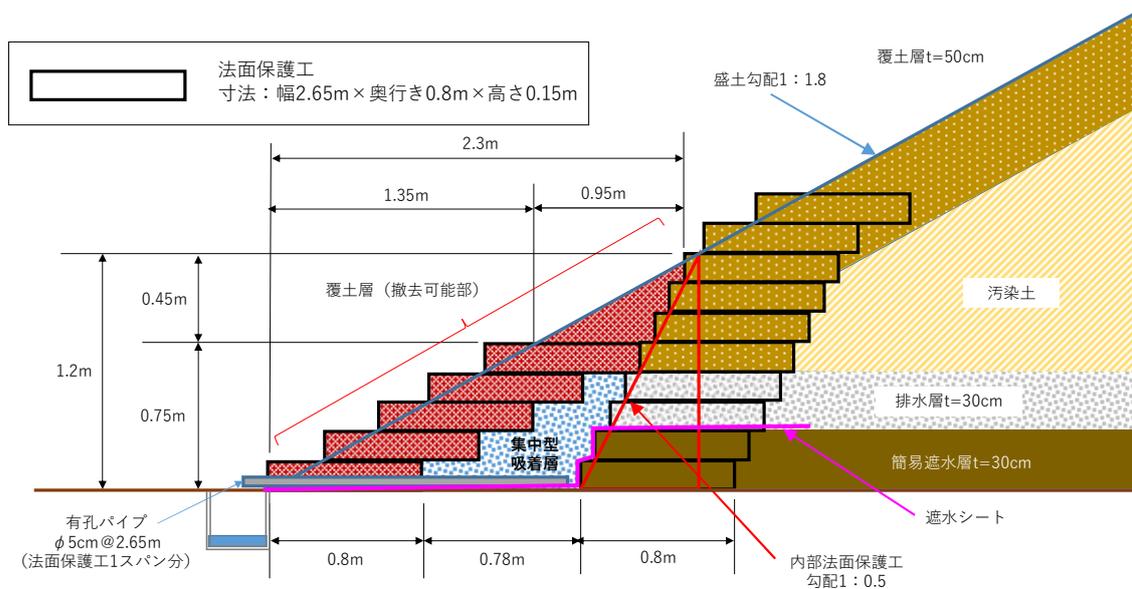


図 11 B 盛土の法尻構造拡大図 (案)

(2) 技術の経済性および環境負荷

表 5 に従来工法と本提案工法の経済性と環境負荷度の比較検討結果を示す。

盛土施工費について比較する。従来工法型と比較すると、A および B 盛土では、簡易遮水層の設置により施工手順が多くなる。一方で、盛土全体の土量に変化がないことから、施工費は簡易遮水層の追加があるものの同等程度であると考えられる。

吸着層の材料費について検討する。従来工法と本工法 A 盛土の吸着層配合率について、本試験の結果から有意な差は確認されなかった。また、B 盛土では A 盛土と比較して、吸着層配合率が約 4 倍高くなる試験結果となったが、吸着材料の総使用量は同等である。以上より 3 工法間に差はないと考えられる。

追加対策費として、吸着層が破過し、汚染が地盤・地下水に拡散した場合の対策費用について比較した。従来工法型では、盛土の撤去・再構築に加えて、周辺環境に拡散した汚染の対策を実施する必要があり、極めて高コストで環境負荷度の大きい対策が必要となる。一方で、A 盛土および B 盛土では、簡易遮水層の効果により、周辺環境への汚染拡散は発生しない為、対策は簡易遮水層以外の再構築のみとなる。特に、B 盛土では、

法尻部に設置した集中型吸着層の撤去、再施工のみであるため、非常に低コストで環境負荷度が小さい対策で済むことが考えられる。

環境負荷度について比較すると、従来工法におけるモニタリングは、盛土の下流側にあるリスク評価地点（モニタリング井戸）にて地下水を採水・分析するため、結果が基準不適合であると判明した場合も、すでに周辺環境へ汚染が拡散していると考えられる。また、地下水の対策は長期間に及ぶことも多く、環境負荷も高くなる。一方で、本吸着層工法では、盛土内浸透水はすべて、簡易遮水層により法尻方向へ集水されるため、周辺環境への汚染拡散は発生せず、吸着層の破損にも迅速に対処可能であることから、環境負荷度の低減が可能になると言える。

以上のことから、本吸着層工法は、従来工法型と比較して、リスク管理の確実性が大幅に向上すること、また、追加対策が必要となった場合についても優れていると考えられた。

表 5 従来工法と本提案工法の経済性と環境負荷度の比較

評価項目	従来工法型	浸出水制御型 (A盛土)	吸着層集中型 (B盛土)	
技術の経済性	盛土施工費	○	○	○
	材料費	○	○	○
	追加対策費	△	○	◎
環境負荷	リスク管理の確実性	△	○	◎
	環境負荷	△	○	◎

◎：特に優れている ○：優れている △：やや難あり

4. 達成目標と評価

表 6 に実証試験の達成目標と評価をまとめる。

表 6 実証試験の達成目標と評価

項目	目的	達成目標	評価
吸着層の設計手法	吸着材配合率の最適化	吸着材使用量を 10~90% 削減	従来設計より削減が想定されたが実証までは至らなかった。 重金属溶出特性を考慮した設計が必要であることが明らかとなった。
吸着層の吸着機能	吸着層の吸着機能を検証	吸着層の破過時間について、設計値と実測値を比較し、両者のずれを評価	設計値と実測値は概ね一致したが、設計値よりも若干早く破過したため安全率を見込む必要がある。
浸出水の制御	簡易遮水層の遮水効果を検証	盛土直下に浸出水を浸透させない	盛土下への浸出水量はなく、流れは制御できた。