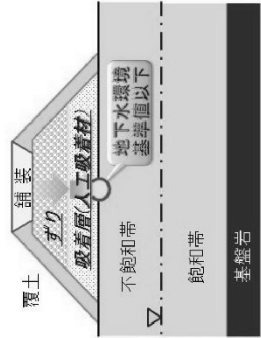
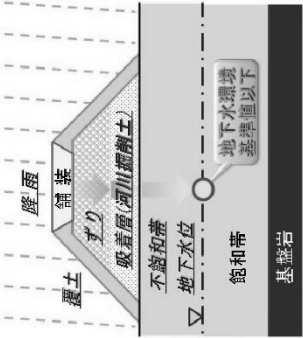
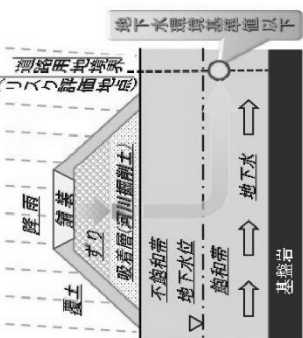
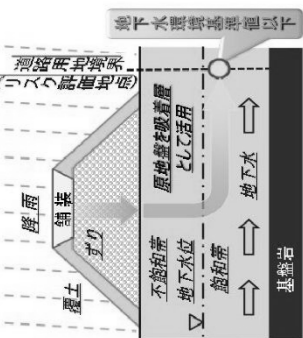


7. 対策事例

(1) 対策事例について

トンネル工事における自然由来の重金属等を溶出する発生土を吸着層工法で対策した事例の概要を表7.1に示す。また、トンネル工事等における酸性化する発生土を対策した事例の概要を表7.2に示す。各事例の詳細は次節の(2)で示す。これらの事例では、重金属等溶出や酸性化する発生土の対策を合理化するため、発生土の特性や盛土する地盤の特性などを評価するための調査・試験や解析を行っている。また、対策箇所周辺の土地利用状況、自然環境、施工計画や施工状況も考慮し、各種ある対策のうち最適な方法で対策を講じている。このように、対策の合理化には諸条件を勘案し適切な手法で評価することが肝要で、これらの事例を参考にされたい。

表7.1 トンネル掘削発生土の吸着層工法による対策事例一覧

事例名	事例 A	事例 B	事例 C	事例 D
施工年度	平成 22～23 年度	平成 22～23 年度	平成 24 年度	平成 23 年度
対策土量	平成 22 年度=約 4.3 万 m ³ 平成 23 年度=約 17 万 m ³	約 10 万 m ³	約 2.9 万 m ³	盛土 2 箇所で約 20.4 万 m ³ (計画)
重金属等の溶出量	砒素 平均溶出量 0.038～0.084 mg/L 砒素 溶出総量 0.05～0.118 mg/kg ・トンネルごとに先進ボーリングコアと仮置きざりを用いて短期溶出試験※1による溶出量と連続溶出試験による溶出総量を評価	砒素 最大溶出量 0.063 mg/L (短期溶出試験※1) ・先進ボーリングコアの使用 ・平均的には基準値をわずかに超過する程度	A トンネル 砒素 0.13 mg/L B トンネル 砒素 0.81 mg/L セレン 0.02 mg/L C トンネル 砒素 0.17 mg/L ・先進ボーリングコアを使用した短期溶出試験での最大溶出量	砒素 最大溶出量 0.052 mg/L (短期溶出試験※1) ・先進ボーリングコアの使用
対策対象の地質	白亜紀泥岩・砂岩 (中部硬英層群)	新第三紀硬質泥岩	白亜紀泥岩・砂岩 (中部硬英層群)	泥岩・砂岩
対策場所	道路本線の盛土材料として使用	道路本線の盛土材料として使用	道路本線の盛土材料として使用	道路本線の盛土材料として使用
対策方法	河川掘削土を母材とし人工吸着材を用いた吸着層工法および増土	天然材料 (河川掘削土) を用いた吸着層工法および増土	リスク評価に基づく河川掘削土を用いた吸着層工法および増土と混合処理工法 (河川掘削土混合により砒素を 0.12 mg/L へ低減)	原地盤の吸着特性を活用した吸着層工法および増土
設計手法	対策目標を地下水環境基準とし吸着層の下面 (盛土と原地盤の境界) で基準以下となるように人工吸着材の配合量を設計	移流分散解析により河川掘削土による吸着層の厚さを設計	サイト概念モデルに基づく移流分散解析により吸着層と盛土地盤の吸着・分散を評価し河川掘削土による吸着層の厚さと盛土範囲を設計	サイト概念モデルに基づく移流分散解析により原地盤の吸着性能を考慮し人工吸着材を用いなくとも対策可能であると評価
対策目標 (評価範囲 (資料手続))				
	調査・解析・評価・手法	先進ボーリングコアと仮置きざりを使用 短期溶出試験で平均溶出量を評価 連続溶出試験で溶出総量を評価	先進ボーリングコアを使用 短期溶出試験で最大溶出量を評価 コラム試験で溶出量の経時変化を評価	先進ボーリングコアを使用 短期溶出試験で最大溶出量を評価 コラム試験で溶出量の経時変化を評価
	ザリ溶出特性	なし	一部あり	あり
	サイト概念モデル適用	—	飽和層：地下水流動を一次元・分散を三次元 設計法 A	一次元 設計法 A
	移流分散解析	吸着層の吸着容量に基づく設計 設計法 B	移流分散解析評価に基づく設計 設計法 A	移流分散解析評価に基づく設計 設計法 A
その他				トンネルずり処理に関して初の吸着層工法適用現場である。平成 22 年にサイト概念モデルに基づくリスク評価を取り入れ、人工吸着材を用いない吸着層工法を適用した。

※1 短期溶出試験『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(暫定版)』H22.3 に示される試験方法を参考に設計手法

※2 『吸着工法設計マニュアル』H24.6 (一般社団法人北海道環境保全技術協会)に示される設計手法

(2) 事例紹介

事例A

① 概要

施 工 年 度 : 平成22～23年度
対 策 土 量 : 平成22年度=約4.3万 m³ 平成23年度=約17万 m³
対策対象と溶出量 : 砒素 0.038～0.084 mg/L (短期溶出試験)
砒素 0.05～0.118 mg/kg (連続溶出試験による溶出総量)
トンネルごとに溶出量と溶出総量を評価
対策対象の地質 : 白亜紀泥岩・砂岩 (中部蝦夷層群)
対策場所 : 本線の盛土材料としてトンネル掘削土を使用
対策方法 : 河川掘削土を母材とし人工吸着材を用いた吸着層工法と覆土
設計手法 : 対策目標を地下水環境基準とし吸着層の下面 (盛土と原地盤の境界) で基準以下となるように人工吸着材の配合量を設計

② 経緯と対応の流れ

事前の地質調査において、トンネル掘削の対象となる泥岩・砂岩は砒素が土壤溶出量基準値を超過することが判明したため、有識者による検討会で対策方法を審議した。

③ 対策要否の判定方法

先進ボーリングによるコアから2 mピッチで試料採取し、10 m区間ごとに5箇所分を均等混合して1試料とし、短期溶出試験により対策の要否を判定した。

④ 対策工検討

本バイパスでは、トンネル掘削による大量の発生土を道路盛土の路体材料として使用することから、経済性に優れた吸着層工法を採用した。対策目標は、吸着層の下面 (盛土と原地盤の境界) で地下水環境基準を満たすものとした。検討当時には3本のトンネルが施工されていたことから、トンネルごとに吸着層に用いる人工吸着材を選定し、配合量を設計した。検討の手順は下記のとおりである。

1) 発生土溶出量の評価

連続溶出試験により、発生土から土壤溶出量基準値を超えて溶出する砒素の総量 (溶出総量) を求めた (図7.1)。連続溶出試験とは、短期溶出試験の残渣 (溶出液を取り出した後にビーカー内に残った固体試料) を用いて短期溶出試験を再度繰り返す試験方法であり、繰り返し溶出試験ともいう。基準値を超えた回それぞれの濃度と溶液量から単位質量あたりの溶出量を求め、その総和を溶出総量とした (0.05～0.118 mg/kg)。

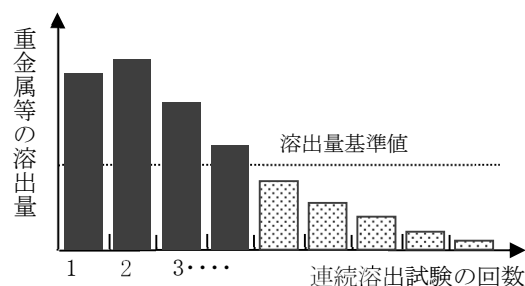


図7.1 連続溶出試験結果の例

2) 吸着材 (人工吸着材) の選定と吸着容量の評価

様々な原材料を用いて製造されている数多くの吸着材から、対策対象の発生土の溶出特性に適合する材料を候補として選定し、バッチ試験によりそれぞれの吸着容量を評価して採用する材料を決定した。吸着容量は、バッチ試験により得られた吸着等温線における土壤溶出量基準値の濃度での吸着量とした (図7.2)。

試験にあたっては、吸着層の母材（人工吸着材を混合する河川掘削土）による影響を確認するため吸着材と母材との混合試料を用い、溶液は実際の発生土から溶出させたもの（発生土溶出液）を用いた。

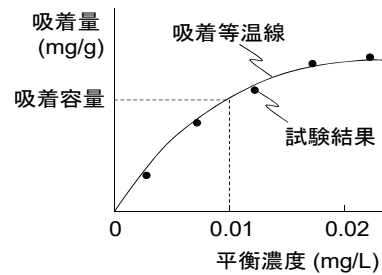


図7.2 吸着等温線と吸着容量の例

3) 吸着材配合量の設計

上記の溶出総量、吸着容量、盛土の高さ、発生土の乾燥密度、吸着層厚（30 cm）などから、吸着材の配合量を算出した（図7.3）。算出された吸着材の量が少ない場合、施工において均質に混合できるかどうかを試験施工において確認し、使用材料ごとに30 kg/m³ないし35 kg/m³と設定した。

- ・発生土の盛土高さ：H（m）
- ・発生土の乾燥密度：b（kg/m³）
- ・単位面積あたりの発生土量：D=bH（kg/m²）
- ・単位重量あたりの設計溶出量：A（mg/kg）
- ・単位面積あたりの設計溶出量：E=AD（kg/m²）
- ・吸着材の吸着容量：Qc（kg/kg）
- ・単位面積あたりの吸着材量：G=E/Qc（kg/m²）
- ・吸着層厚：h（m）
- ・吸着材配合量：I=G/h（kg/m³）

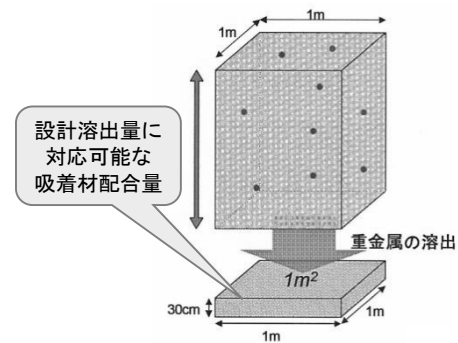


図7.3 吸着容量に基づく人工吸着材の配合量設計

⑤ 施工

吸着層の施工は、下記の手順で行った。

- a. 吸着層母材の敷均し
- b. 吸着材（フレコン）配置・散布
- c. 吸着材と吸着層母材の混合（写真7.1）
- d. 敷均し・締固め（t = 0.3 m）
- e. 品質確認試験（パッチ吸着試験）
- f. 発生土受け入れ・盛土



写真7.1 人工吸着材を用いた吸着層の施工

⑥ モニタリング状況

盛土箇所に施工前に配置したモニタリング孔において、盛土の施工中は毎月、施工後は年4回の頻度で2年間の地下水水質のモニタリングを実施し、地下水環境基準の超過は認められなかったため、モニタリングを終了している。

事例B

① 概要

施工年度：平成22～23年度
対策土量：約10万 m³
対策対象と溶出量：砒素 最大溶出量0.063 mg/L（短期溶出試験）
平均的には基準値をわずかに超過する程度
対策対象の地質：新第三紀硬質泥岩
対策場所：本線の盛土材料としてトンネル工事の発生土を使用
対策方法：天然材料（河川掘削土）を用いた吸着層工法および覆土
設計手法：移流分散解析により河川掘削土による吸着層の厚さを設計
評価地点：吸着層下面（盛土と原地盤の境界）または地下水位上面
評価基準：地下水環境基準

② 経緯と対応の流れ

事前調査（平成16～17年度）で土壤汚染対策法の第一溶出量基準（当時）を超過する砒素が、トンネル全長（約3 km）の約1/4を占める新第三紀硬質泥岩において確認された。この対策として、当初は遮水工法や人工吸着材を用いた吸着層工法も検討されたが、発生土からの溶出量が低濃度であり、盛土予定地の近傍で採取可能な河川掘削土が砒素の吸着性を有していたことから、河川掘削土という天然材料のみからなる吸着層工法を採用した。検討に際しては、有識者の意見を取り入れるとともに、道環境部局と随時協議を行い承認を得てきた。河川掘削土については、採取時期・場所により性状が異なったので、吸着性能を評価した。

③ 対策要否の判定方法

先進ボーリングによるコアから2 mピッチで試料採取し、10 m区間ごとに5箇所分を均等混合して1試料とし、短期溶出試験により対策の要否を判定した。

④ 対策工検討

本トンネルでは、砒素の溶出量が土壤溶出量基準値を超過する発生土の対策として、路体盛土の底部に現地発生土（天然材料）を用いた吸着層を敷設した吸着層工法を採用した。以下に、当該地での吸着層工法の検討方法を示す。

1) 発生源の調査

・発生土からの砒素の溶出・移行特性

移流分散解析の発生源である発生土からの砒素の溶出・移行特性（分散係数・遅延係数・初期濃度）をカラム試験により評価した。

カラム試験は、トンネルの切羽から採取した試料を用い、通水回数ごとに溶出水の砒素濃度を測定した。カラム試験の仕様を表7.3に示す。

表 7.3 カラム試験仕様

カラム内径	50 mm
発生土の粒径	2 mm以下
発生土試料高さ	100 mm
一回あたりの通水量	100 mL
通水サイクル	1回/日

2) 受入地の調査

・地盤構成と地下水位の確認

盛土予定地においてボーリング調査を行い地盤構成と地下水位の確認を行った。また、ボーリング孔を地下水観測孔として仕上げ、約2年間のモニタリングを行い地下水位の変動状況を確認した。当該地では、地下水位の最大値をリスク評価地点に採用した。

・受入地基礎地盤の吸着性能の確認

受入地地盤の吸着性能は、バッチ試験により評価した。試験の対象とした土層は、地下水位より上位の沖積層とした。試験試料は、上記のボーリングコアのほか、ボーリングのない地点ではトレンチ（深度0.5 m）を掘削し試料を採取した。

3) 吸着層の設計

・吸着層の吸着性能の確認

盛土予定地周辺で入手可能な天然材料（河川掘削土や火山灰など）を吸着層に採用した。

吸着層の吸着性能は、受入地の沖積層の場合と同様にパッチ試験により評価した。

・リスク評価地点の設定

リスク評価地点は、吸着層底面または地下水位の最大値とした（図7.4）。

・吸着層の設計

リスク評価地点での砒素の濃度変化を、一次元移流分散解析により求めた。解析モデルは、地表から「覆土層」、「ずり層（発生土）」、「敷土層」、「沖積層」の4層構造とした（図7.4）。解析断面は、盛土の工区単位で盛土厚が最大となる地点とした。

本解析では、ずり（発生土）層厚と吸着層層厚との和を一定とし、吸着層の層厚を30 cm単位でその層厚を変化させリスク評価地点での砒素のピーク濃度が地下水環境基準値以下となる吸着層の層厚を求めた。

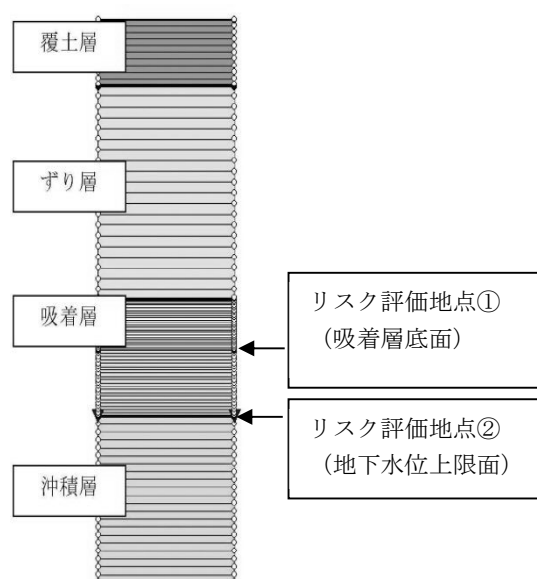


図7.4 移流分散解析に用いた一次元メッシュ

⑤ 施工

当該地の吸着層には、天然材料を用いていることから、盛土の施工は通常盛土と同様である（写真7.2）。

施工中は、寸法管理と現場密度試験（砂置換）などにより品質管理を行った。



写真7.2 吸着層の施工状況

⑥ モニタリング状況

盛土施工時および施工後のモニタリング地点は、トンネル掘削時の地下水位の変動を測定する目的で掘削したボーリング孔、受入地周辺で掘削したモニタリング孔、既存井戸とし、年4回採水して地下水中の砒素濃度を測定した。その結果、地下水環境基準を超過する砒素濃度は確認されなかったため、モニタリングを終了している。

事例C

① 概要

施 工 年 度 : 平成24年度
対 策 土 量 : 約2.9万 m³
対策対象と溶出量 : Aトンネル 砒素 0.13 mg/L
Bトンネル 砒素 0.81 mg/L、セレン0.02 mg/L
(砒素は河川掘削土混合により0.12 mg/Lへ低減)
Cトンネル 砒素 0.17 mg/L
先進ボーリングでのコアを用いた短期溶出試験^{*1}での最大値
対策対象の地質 : 白亜紀泥岩・砂岩（中部蝦夷層群）
対策場所 : 本線の盛土材料としてトンネル発生土を使用
対策方法 : リスク評価に基づく河川掘削土を用いた吸着層工法および覆土
発生土と河川掘削土との混合処理工法
設計手法 : サイト概念モデルに基づく移流分散解析により吸着層と盛土地盤の吸着・
分散を評価し河川掘削土による吸着層の厚さと盛土範囲を設計
評価地点 : 道路用地境界
評価基準 : 地下水環境基準
その他 : 事例Aを経て対策方法をいっそう合理化するため本事例により対策した。
サイト概念モデルに基づくリスク評価による対策を平成24年度以降も検討
している。

② 経緯と対応の流れ

事前の地質調査において、トンネル掘削の対象となる泥岩・砂岩は砒素が土壌溶出量基準値を超過することが判明したことから、前例で示したように人工吸着材を用いた吸着層工法により対策を行ってきたが、さらに合理化を進めるためにリスク評価を行った。その方法は有識者による検討会で審議し、評価結果を道環境部局へ報告し了承を得た。

③ 対策要否の判定方法

先進ボーリングのコアから2 mピッチで試料採取し、10 m区間ごとに5箇所分を均等混合したものを1試料として、短期溶出試験により対策の要否を判定した。

④ 対策工検討

過年度までの対策では、人工吸着材を用いた吸着層により吸着層の下面（盛土と原地盤の境界）で地下水環境基準以下となることを対策目標としてきたが、これをより合理化して道路用地境界で地下水環境基準以下とすることを対策目標とした。そのためには、吸着層や地盤による砒素などの吸着と地下水による分散を評価して濃度を予測する必要がある。その手順を下記に示す。

1) サイト概念モデルの構築

道路用地境界（リスク評価地点）での砒素やセレンの濃度の予測は、移流分散解析により行うことができる。適切な解析を行うためには、盛土状況や現地の地盤・水理状況などの的確なモデル化が重要で、図7.5に示すサイト概念モデルを構築した。解析におけるパラメータとその評価方法を下記に示す。

降雨浸透率：降雨が盛土へ浸透する割合で、実測データが少ないため他現場での事例を参考に設定した。

溶 出 量：先進ボーリングでの短期溶出試験の最大値を解析における濃度のピーク値とし、溶出量の経時変化はカラム試験で評価した。砒素が第二溶出量基準を超過する発生土に対しては、事前検討において発生土に河川掘削土を混合すると溶出濃度が低減する結果がバッチ溶出試験で得られたことから、これを溶出量低減対策として採用し、低減後の溶出濃度を設定した。

吸 着 層：河川掘削土を活用して吸着層とするため、その遅延係数をカラム試験と土質試験により評価した。

不 飽 和 帯：ボーリングにより地質状況を確認し、土質ごとにコアを用いてバッチ吸着試験と

土質試験を行い、遅延係数を評価した。

飽和帯：ボーリングにより地質分布や帯水層の状況を、地下水位観測により地下水の流動状況を把握した。コアを用いてバッチ吸着試験を行い、遅延係数を評価した。また、揚水試験により透水係数と有効間隙率を評価した。

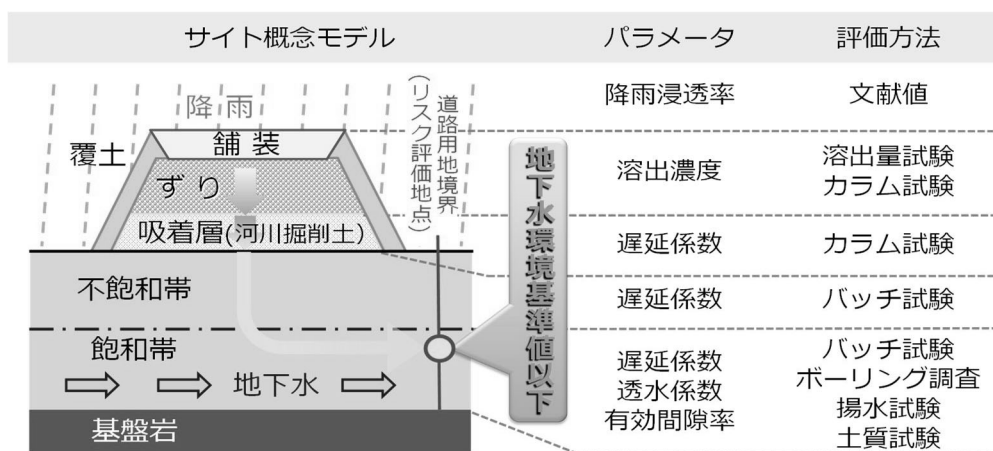


図7.5 サイト概念モデルとパラメータの評価方法

2) 移流分散解析

移流分散解析は、重金属等の地盤中の移動状況に応じた適切な解析手法を組み合わせで行った。鉛直下方へ移動する不飽和帯(吸着層から地下水位まで)では一次元移流分散解析の解析解(Ogata & Banks)を用い、飽和帯では一次元の地下水流動に対して三次元の分散を計算する解析解(AK2Bモデル)で評価した(図7.6)。この飽和帯の解析において重要な地下水の流向と実流速は、揚水試験結果や地下水位データを踏まえた三次元地下水シミュレーションにより評価した。

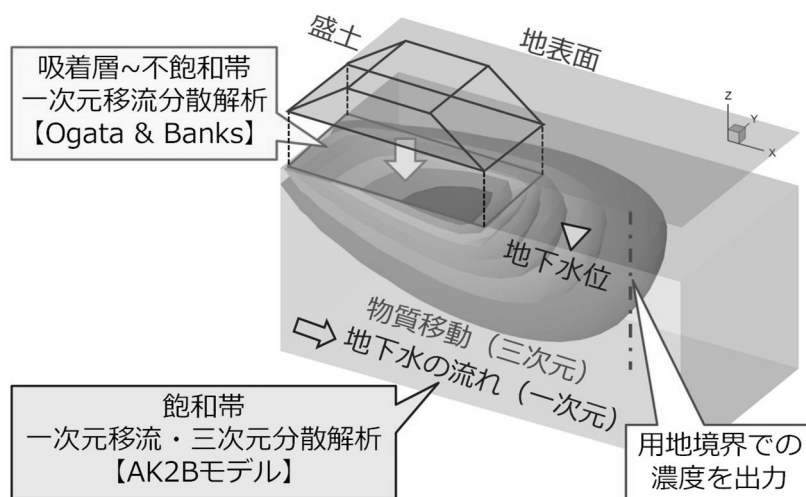


図7.6 移流分散解析の手法

3) 対策工の設計

河川掘削土による吸着層の厚さと発生土を盛土しない範囲である削減距離の2つをパラメータとし、種々の組み合わせで移流分散解析を行い、用地境界で地下水環境基準以下となり発生土の盛土量が最大となる吸着層厚と削減距離の組み合わせを検討した(図7.7)。この結果、従来のように人工吸着材を使用しなくても、リスクは十分に低く問題ないと評価した。

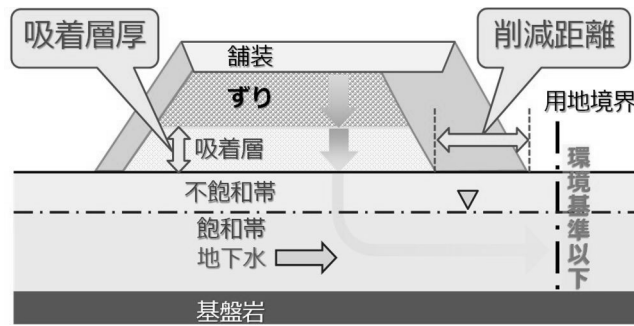


図7.7 対策工の設計

⑤ 施工

リスク評価により、人工吸着材が不要となったことから、対策は河川掘削土による吸着層と覆土を行うことを除き、通常の盛土工事における施工手順および品質管理で施工した。

溶出量低減対策としての発生土と河川掘削土との混合は、発生土を積んだダンプに現場内で河川掘削土を積み増して所定の場所で荷降ろしし、ブルドーザーで敷き均して1層30 cmごとに締め固めることを繰り返すことにより行った（図7.8）。その対策効果を確認するため、規則的に配置した10箇所で試料を採取して短期溶出試験を行ったところ、いずれの試料でも第二溶出量基準未満となり、盛土全体を代表する試験結果の平均値は移流分散解析で設定した溶出量より下回っていることが確認された。



図7.8 ずり（発生土）と河川掘削土との混合による溶出量低減対策

⑥ モニタリング状況

リスク評価に基づく対策は、平成24年度の工事から行われており、その妥当性を確認するために施工前に盛土周辺に配置したモニタリング孔において施工中は月1回の頻度で地下水の水質が確認された。また、施工後は年4回の頻度で2年間以上のモニタリングが実施された。その結果、地下水環境基準の超過は認められなかったためモニタリングを終了し、掘削土対策が完了されている。

<参考文献>

- ・平成24年度北海道開発技術研究会論文：コスト縮減に向けた自然由来重金属等の対策事例について―サイト概念モデルの構築―
- ・平成29年度北海道開発技術研究会論文：サイト概念モデルによる重金属等を含むトンネル掘削土の対策事例―感度解析によるリスク評価結果の総括―
- ・令和4年度北海道開発技術研究会論文：自然由来重金属等のリスク管理―トンネル掘削土の合理的対策における妥当性評価―
- ・2023年資源・素材学会（松山）講演予稿集：北海道の国道における自然由来重金属等を含むトンネル掘削土の対策事例

事例D

① 概要

施 工 年 度	： 平成23年度
対 策 土 量	： 盛土2箇所で約20.4万 m ³ （設計時の計画）
対 策 対 象 と 溶 出 量	： 砒素 最大溶出量0.052 mg/L（短期溶出試験；設計時の値）
対 策 対 象 の 地 質	： 泥岩および砂岩
対 策 場 所	： 本線の盛土材料としてトンネル発生土を使用
対 策 方 法	： 原地盤の吸着特性を活用した吸着層工法および覆土
設 計 手 法	： サイト概念モデルに基づく移流分散解析により原地盤の吸着性能を考慮し人工吸着材を用いなくても対策可能であると評価
評 価 地 点	： 道路用地境界 （近隣数km以内における地下水の飲用利用はないが、安全側に考え用地境界で評価した）
評 価 基 準	： 地下水環境基準
そ の 他	： トンネル発生土の対策において初めて吸着層工法を適用した現場である。平成22年にサイト概念モデルによるリスク評価を取り入れ、人工吸着材を用いない吸着層工法を適用した。

② 経緯と対応の流れ

当該路線においては、事前の地質調査において、トンネル掘削の対象となる泥岩・砂岩が土壌溶出量基準値を超過することが判明しており、平成18年度より対策が継続的に検討されてきた。

平成18年度には、遮水シート封じ込め工法よりも経済的な工法として全国で初めて吸着層工法（人工吸着材を適用）を適用し、工事を継続していた。更に、平成22年3月に「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（暫定版）が公開されたことを受けて、サイト概念モデルによるリスク評価に基づき合理的な対応方法を検討し、原地盤の吸着性能を活用することで、土工配分への配慮やモニタリングなどは必要であるが、吸着層に用いる人工吸着材の購入コストゼロの経済的な対策を実現した。

検討内容については、第三者である有識者に妥当性を確認し、了承を得た。また、吸着層工法を適用することについても北海道環境生活部に報告した上で検討を進めた。

③ 対策要否の判定方法

先進ボーリングのコアから2 mピッチで試料を採取し、10 m区間ごとに5箇所分を均等混合して1試料とし、短期溶出試験により対策の要否を判定した。

④ 対策工検討

検討の流れを図7.9に示す。

1) 調査・データ整理

盛土候補地を選定するとともに、水文地質調査、既存データ整理を行った。

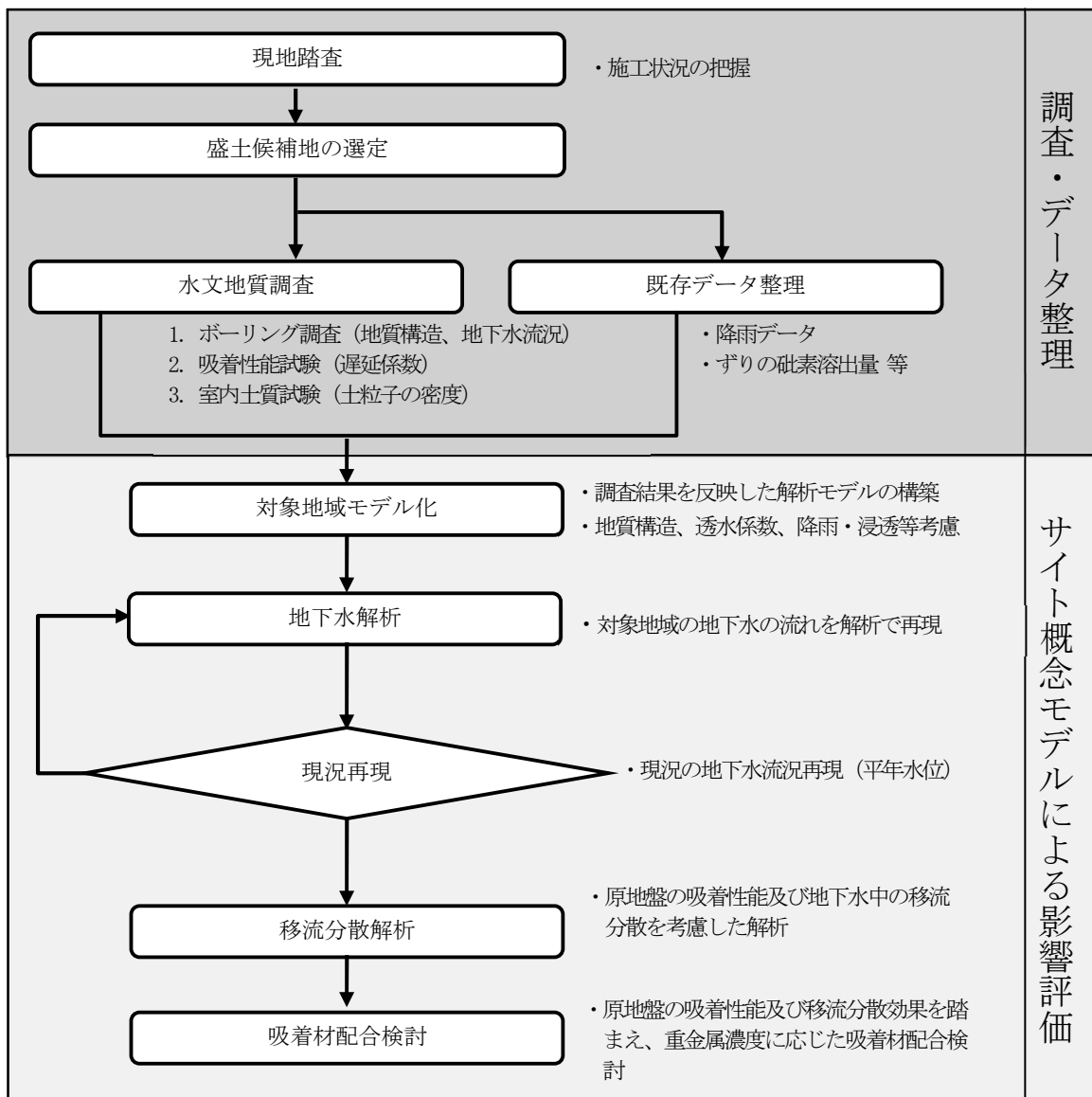


図7.9 検討の流れ

2) サイト概念モデルによる影響評価

対象地域（盛土箇所）をモデル化し、地下水の現況再現解析を行い、移流分散解析によりリスク評価地点における砒素濃度の変化を評価した。解析断面の概要を図7.10に示す。

- ・発生土から溶出する砒素濃度の設定：先進ボーリングの短期溶出試験の最大値を初期値とし、コラム試験により将来的な溶出値の低減傾向（溶出量の遅延係数）を設定し、サイト概念モデルにおける入力条件とした。
- ・吸着層：原地盤を吸着層として活用することを目指し、原地盤試料を鉛直ボーリングで採取し、バッチ試験で各地層の吸着性能を評価した。原地盤の吸着性能で対策できない場合にのみ人工吸着材の適用を検討するという方針で検討を行った。
- ・地下水位：現地地下水観測結果をもとに、地下水位を設定した。

3) 移流分散解析

サイト概念モデルによりリスク評価地点における砒素濃度の変化を二次元断面における移流分散解析により予測した（図7.10）。その結果、原地盤の吸着性能を活用することで、道路用地境界部において環境基準を超過する砒素が流出しないことを確認でき、人工吸着材などを用いることなく、経済的な対策を行うことが可能であった。

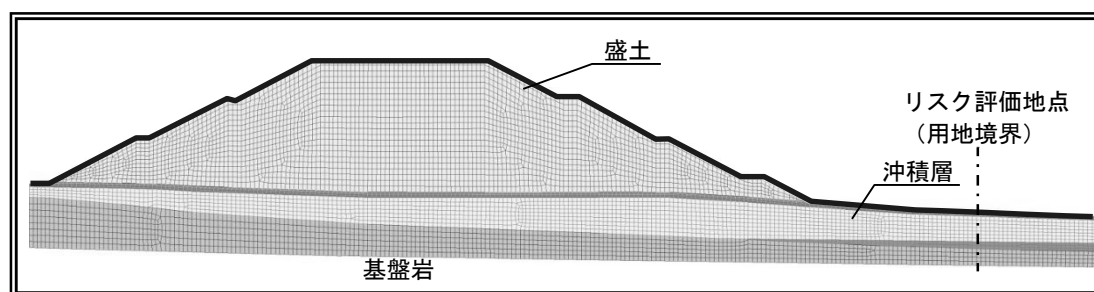


図7.10 解析断面の概要

⑤ 施工

リスク評価結果に基づき、原地盤の吸着性能を活用することで問題となる濃度の重金属が事業用地外に流出する可能性がないと判断できたため、盛土は通常の工事と同様に行った。なお、盛土表面には重金属の溶出が懸念されない土で厚さ50 cm以上の覆土を行った。

⑥ モニタリング状況

施工中は月1回の頻度で盛土周辺のモニタリング孔により地下水の水質を確認し、地下水環境基準の超過は認められなかった。盛土供用後は年4回の頻度で2年間のモニタリングが実施され、問題がないことが確認されたためモニタリングを終了している。