

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—

旭川開発建設部 士別道路事務所 第3工務課 ○荒木 大輔
掛田 浩司
旭川開発建設部 士別道路事務所 第2工務課 宮川 浩幸

トンネル掘削ずりは自然由来の重金属等をしばしば多く含有し、砒素などが土壌汚染対策法の溶出量基準を超過することがある。その対策は従来から遮水工などにより行われ、建設コスト増大の要因となっている。近年、北海道では市販の吸着材を用いた吸着層工法により対策コストが縮減されてきたが、いっそうのコスト縮減を図るため、一般国道40号のバイパス事業ではサイト概念モデルを用いたリスク評価を行った。その結果、重金属等の地盤による吸着や地下水による分散を考慮することにより、吸着材なしでもリスクは十分に低いと評価された。このようなリスクに応じた合理的な対策方法はまだ認知度が低く、今後その普及が期待される。

キーワード 自然由来重金属等、サイト概念モデル、リスク評価、移流分散解析、吸着層工法

1. はじめに

(1) 事業概要

一般国道40号は250 kmの幹線道路で、このうち一部の区間では雪崩による特殊通行規制区間となっている。このため、その解消とともに道路交通の定時性や安全性の向上と現道の交通事故低減などを目的として、総延長約19 kmの一般国道のバイパス事業を行っている。現在、**図-1**に示す4本のトンネルが施工中である。



図-1 バイパス全体図

(2) 地質概要

バイパス建設箇所の基盤地質は、上部蝦夷層群西知良内層の泥岩、中部蝦夷層群佐古丹別層の砂岩およびそれに貫入した北海道中軸部神居古潭構造帯の一部をなす蛇紋岩などである。

これらの地質のうち、すべてのトンネルに出現する泥岩や砂岩は、先進ボーリングのコアによる溶出量試験において砒素やセレンが土壌汚染対策法（以下“土対法”

と略記）における溶出量基準を超過している。また、Bトンネルでは砒素が第二溶出量基準を超過している。

2. 対策の経緯とリスク評価導入の背景

トンネル掘削により発生するずりからは、自然由来の重金属等が土対法における溶出量基準を超過することがある。土対法は2003年に施行され、2010年には自然由来であっても適用対象と改正されている。トンネル掘削ずりが土対法の適用対象となるかは、トンネルは坑口を除き土対法第4条（3,000 m²以上の形質変更）の適用対象外とされ、また、固結した岩盤は土対法の適用外とされている¹⁾。しかし、環境への配慮の必要性などから、これまで土対法に準拠して高価な遮水工を採用する事例が多くあり、トンネル建設におけるコスト増大の要因となってきた。

このようなずりの対策コストを縮減するため、より合理的な対策手法が検討され、その知見は「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）²⁾」（以下“対応マニュアル”と略記）によって2010年3月に公表された。この対応マニュアルでは、サイト概念モデルによるリスク評価の考え方が導入されたことが特徴のひとつとなっている。

リスク評価に基づく対策は、欧米諸国ではすでに一般化し、その代表例としては米国におけるRBCA（Risk-Based Corrective Action：リスクに基づく修復措置）がある。その考え方は、汚染の発生源から受容体（おもに人）に至るまでの曝露経路を各種調査により明らかにし、サイ

ト概念モデルを構築して曝露地点でのリスクを評価するというものである³⁾。許容できないリスクがある場合には、曝露量を環境基準などの目標に適合させるまで発生源の量や濃度を低減させるか、曝露経路における重金属等の移動を抑制する対策を行う。

対応マニュアルに示される対策工法のうち、北海道では吸着層工法により対策コストが縮減された事例が多い。当バイパスでも、当初は吸着層工法により対策されてきたが、対策を要するずりが今後も大量に発生することから、さらなるコスト縮減と環境保全の両立を図るため、サイト概念モデルを用いたリスク評価に基づく対策を検討した。なお、ここでいうリスク評価とは、重金属等の地下水を介した移動範囲とその濃度を予測し影響を評価する、という意味で用いている。

3. リスク評価に基づく対策の検討方法

リスク評価に基づく対策の検討では、図-2に示すとおり、リスク評価地点を選定し、ずりの溶出特性を評価し、ずりとリスク評価地点までの曝露経路となる地盤の特性を評価する。このようにリスクを評価するために調査・評価すべき対象を明らかにし、重金属等の移動プロセスを把握するためにサイト概念モデルを構築する。

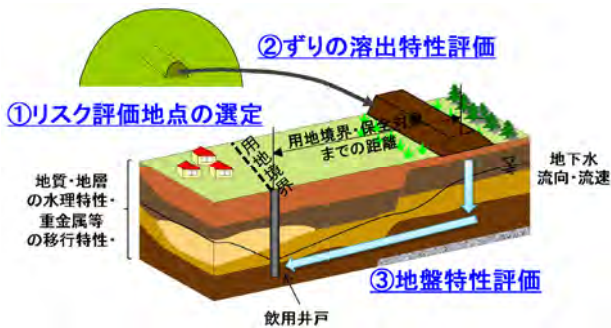


図-2 サイト概念モデルの構築と評価対象 (文献³⁾ に加筆)

リスク評価地点は、飲用井戸など人への曝露地点に設定することが本来であるが、当バイパスでは安全性と将来の維持管理を考慮し用地境界をリスク評価地点とした。

ずりの溶出特性は、溶出量基準を超過する物質の種類、その濃度と経時変化、含有量、pHなどについて溶出量試験やカラム試験などで評価した。また、当バイパスではずりを道路盛土の材料として使用するため、盛土形状(長さ・幅)も考慮した。

地盤特性については、重金属等の発生源(ずりの盛土)からリスク評価地点に至る曝露経路を設定するため、ボーリング調査などで地質分布を把握し、地下水位観測や揚水試験などにより地下水の流向・流速や透水係数などの水理特性を評価した。また、地盤による重金属等の

吸着性能をバッチ試験などにより評価した。なお、ずりからの重金属等の曝露方法としては、ずりの直接摂取と地下水経由の2通りが想定されるが、堆積岩のずりでは自然由来の重金属等が含有量基準を超過することは稀で、また、ずりを覆土することにより直接摂取は防止できるため、地下水経由の曝露リスクを評価対象とした。

上述した評価の結果に基づき、移流分散解析のパラメータを設定し、盛土から溶出した重金属等の濃度がリスク評価地点でどのように変化するかを予測した。その結果、リスク評価地点において地下水環境基準を超過する場合、盛土への降雨浸透防止、ずりからの溶出量低減、重金属等の捕捉といった数値解析によって評価が可能な対策を新たに解析条件に加えることになる(図-3)。

これらの対策方法のうち、本バイパスでは吸着層工法を採用した。吸着層工法の概要を表-1に示す。吸着層工法は、重金属等を溶出するずりの下部に吸着層を設けることにより、重金属等の地盤への浸出を遅延かつ低減させる方法で、その効果は移流分散解析により評価できる。

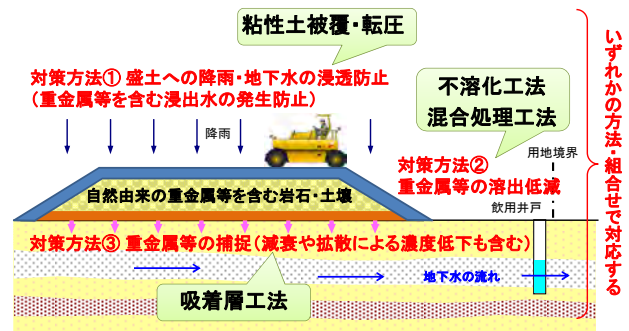


図-3 リスク評価で考慮できる対策効果 (文献³⁾ に加筆)

表-1 吸着層工法の概要

工法	吸着層工法
概要	<p>吸着層により重金属溶出を遅延させ濃度を基準未満に低減させる</p> <p>左のグラフは五十嵐ほか(2004)⁴⁾より引用・加筆</p>
コスト	人工材料の場合: 3,000 ~ 6,000 円/m ³ (吸着材の吸着容量と価格による)
検討課題	<ul style="list-style-type: none"> ・重金属等の溶出特性 ・吸着層あるいは地盤の吸着性能と透水性 ・移流分散解析によるリスク評価
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・吸着容量は吸着材により異なる ・重金属等の溶出量の経時変化は盛土形状で異なる

吸着層工法のコストは、市販されている人工材料を用いる場合、表-1に示すようにずり 1 m³あたり 3,000 ~ 6,000 円が一般的であるが、人工材料の吸着性能により

コストが変動することに留意が必要である。また、地盤特性などによっては、このような人工材料を用いなくても対策目標（用地境界で地下水環境基準以下など）を達成できる場合もあり、本論でその事例を紹介する。

吸着層工法の普及前は、対策は多くの場合にずりからの重金属等の溶出を封じ込める遮水工が採用されていた（表-2）。土対法に準拠する場合は二重遮水シートとなり完全に遮水する（溶出させない）ことが前提となる。一方、対応マニュアルに基づく場合は一重遮水シートの採用も可能となるが、完全には遮水できず溶出しうること想定してリスク評価を行う必要がある。

表-2 遮水工の概要

工法	遮水工
概要	<p> <二重遮水シート> 保護不敷布マット t=10mm ポリエチレン系遮水シート t=1.5mm <一重遮水シート> 保護不敷布マット t=10mm ポリエチレン系遮水シート t=1.5mm 重金属等を溶出するずりを遮水シートで封じ込める </p>
コスト	二重遮水シート: 10,000~12,000円/m ³ 一重遮水シート: 6,000~8,000円/m ³
検討課題	・一重遮水シートの場合はリスク評価が必要 ・施工中の排水管理など
留意点	・盛土形状によりシート面積(コスト)が異なる ・冬季は施工(シートの着着)が困難

4. リスク評価の具体的内容

(1) 概要と設計方針

当バイパスでは、過年度より吸着材（人工材料）を用いた吸着層工法によって溶出量基準を超過するトンネル掘削ずりの対策が実施されてきた。この人工材料の代わりに天然材料（近傍の河川工事で発生する掘削土）を活用し、盛土箇所地盤による重金属等の吸着や地下水による分散を評価することにより、合理的な対策の設計を試みた。なお、対策対象の砒素やセレンは厳密には半重金属であるが、ここでは重金属等と呼称する。

(2) サイト概念モデルの構築

リスク評価にあたっては、図-4に示すサイト概念モデルを構築した。盛土への降雨浸透率は、移流分散解析において重要なパラメータであるが、実測データが少ないため過去の事例を参考に法面部で15%、舗装部で10%と仮定した（実際にはより低い浸透率が想定される）。その他のパラメータの設定方法は、次節以降に示す。

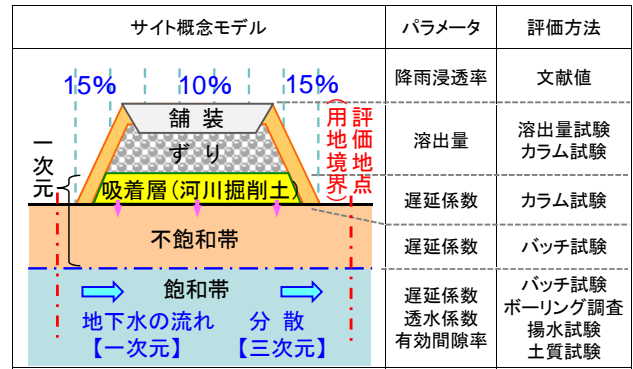


図-4 サイト概念モデルとパラメータの評価方法

(3) ずりの溶出特性の評価

ずりの溶出濃度は、先進ボーリングによる溶出量試験の最大値を解析におけるピーク濃度として設定した（表-3）。なお、リスク評価の対象は、図-1に示す4トンネルのうち、施工中の下記の3トンネルとした。

表-3 ずりの溶出量

トンネル	種類	溶出量最大値
A	砒素	0.17 mg/L
B	砒素 セレン	0.81 mg/L 0.012 mg/L
D	砒素	0.13 mg/L

溶出量の経時変化は、カラム溶出試験で評価した。注水量は約150 mL/回で、約3週間分の降雨量に相当する。試験の結果を図-5に示す。砒素濃度は溶出量試験より高いが、試験条件（充填ずりの粒径が2 mm以下で固液比が高いなど）から砒素が非常に溶出しやすい状況にあり、実際にずりを盛土した場合の溶出濃度とは一致しないと判断される（経験的にはカラム試験での濃度はバッチ試験の10倍程度になることが知られている）。

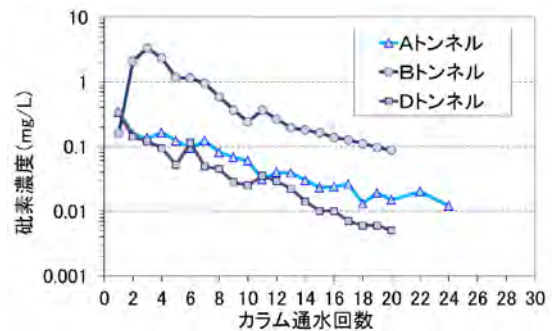


図-5 カラム試験における溶出濃度の変化

Bトンネルでは、溶出量試験で第二溶出量基準を超える砒素が溶出した。この対策として、ずりからの溶出量を第二溶出量基準以下とするために、河川掘削土との混合による溶出量の低減効果をバッチ試験により評価した（図-6）。試料には①細砂混じりシルトと②礫混じりシルト質細砂の2種類を用いた。試験の結果、河川掘削土

を多く混合するほど砒素の溶出濃度は低減し、河川掘削土を30%混合した場合には、ずりのみの濃度の約15%まで低下した。

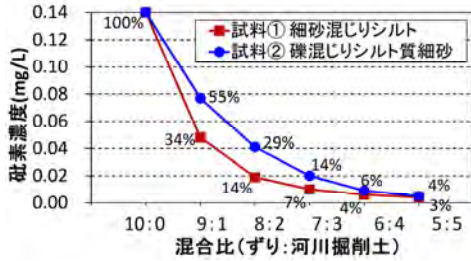


図-6 河川掘削土との混合によるBTンネルずりの砒素溶出量低減

(4) 地盤特性の評価

盛土予定箇所のボーリング調査を行い地質分布と地下水位を確認し、ボーリングコアを用いたバッチ吸着試験および土質試験により原地盤の吸着性能（遅延係数）を把握した。なお、遅延係数は次式で算出できる。

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{\theta} K_d$$

R: 遅延係数 ρ_d : 乾燥密度 K_d : 分配係数
 θ : 体積含水率（飽和時は間隙率）

次に、飽和帯の透水係数と有効間隙率を、移流分散解析や後述する地下水シミュレーションにおいて解析結果に与える影響（感度）が大きいため、揚水試験で評価した（図-7）。また、自動記録式水位計により地下水位の変動状況を連続観測し、地下水の流動状況を評価した。



図-7 揚水試験状況

(5) 吸着材（河川掘削土）の評価

吸着層に用いる河川掘削土の吸着性能は、カラム試験で評価した。試験は2通りの方法で行った。まず、河川掘削土の効果的な使用方法を比較検討するため、図-8に示す盛土を模擬してカラムにずりと河川掘削土を充填し（図-9）、カラム上部から数日おきに水を注いだ。1回あたりの注水量は約150 mLである。

試験の結果は図-9に示すとおりで、遅延効果が最大となる待ち受け型の使用方法を採用した。

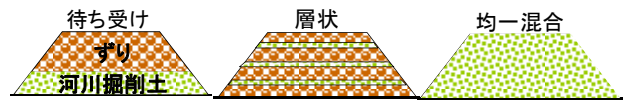


図-8 河川掘削土の使用方法案

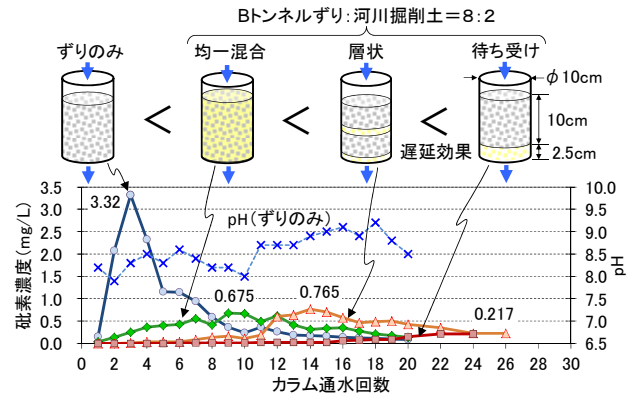


図-9 カラム試験結果（河川掘削土の使用方法検討）

次に、河川掘削土の遅延係数と分散長を評価するため飽和カラム吸着試験を行った（図-10）。試料は溶出量低減を確認する試験（図-6）と同じ2種類の河川掘削土を用い、遅延係数には濃度依存性があるためずりの種類ごとに試験した。また、試料の不均質性を考慮して同条件下で各2カラムずつ用意し、合計12カラムで実施した。

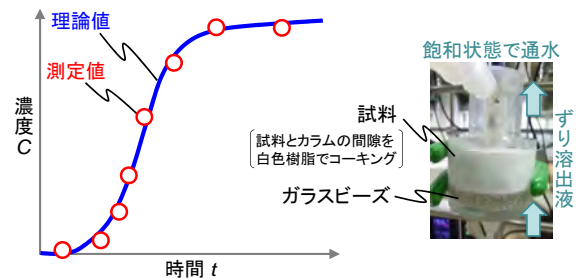


図-10 遅延係数と分散長を求めるための飽和カラム吸着試験

試験にあたっては、遅延係数と分配係数を想定して一次元移流分散解析を予め行い、通水速度や試料の充填厚さなどの試験条件を決定した。その後、カラムに河川掘削土のみを充填し、各トンネルのずりを用いて作成したずり溶出液をカラムの下部からポンプで通水し、飽和状態とした。この状態においてカラム上部で得られた浸出液の砒素濃度を測定し、試験前に行った解析による理論値と比較した。多くの場合、想定した遅延係数と分配係数による理論値と測定値は完全には一致しない。そこで、遅延係数と分散長を変化させた解析を繰り返し行って、理論値が測定値と最も一致する組合せを決定し、その値を河川掘削土の遅延係数と分散長として評価した（表-3）。それらの値のうち、安全側の評価としてより遅延係数が低い試料（河川掘削土①）の結果を移流分散解析に用いる値として設定した。

表-3 飽和カラム吸着試験で求めた遅延係数と分散長

試料名	ずり		遅延係数	分散長 m	分配係数 L/kg	間隙率	乾燥密度 g/cm ³
	種類	溶出液濃度 mg/L					
河川掘削土① 細砂まじりシルト	D	砒素0.05	40	0.0025	16	0.52	1.30
			43	0.0022	17		
	B	砒素0.17	43	0.0039	17		
			36	0.0033	14		
	A	砒素0.07	25	0.0008	10		
河川掘削土② 礫まじりシルト質細砂	D	砒素0.05	64	0.0166	32	0.57	1.13
			61	0.0131	31		
	B	砒素0.17	86	0.0249	43		
			92	0.0759	46		
	A	砒素0.07	34	0.0011	17		
		45	0.0055	22			

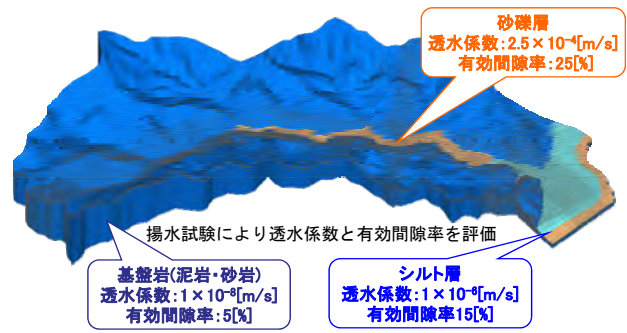


図-12 三次元統合型水循環シミュレーションモデル

(6) 移流分散解析

重金属等の移動状況は、地盤の飽和状態により異なる。そこで、地盤の状況に応じた解析方法を組み合わせて合理的な評価ができる手法を考案した。すなわち、鉛直下方に重金属等が移動する不飽和帯（吸着層から地下水位まで）では一次元移流分散解析解（Ogata & Banks式⁵⁾）で、多方向に物質が移動する飽和帯では一次元の地下水流において三次元の分散を扱う解析解（AK2Bモデル）で重金属等の移動状況の評価した（図-11）。

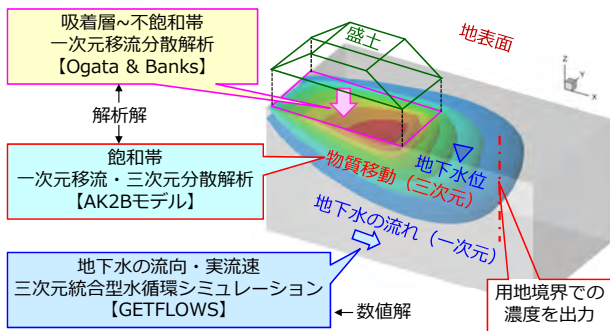


図-11 リスク評価における解析手法

解析解による移流分散解析では、物質の移流に関する計算誤差がなく、数値解析で扱うメッシュで構成される解析モデルを必要としない特長がある。このため計算負荷が小さく、現実的かつ不確実性の低い解析結果を得ることができる。また、汎用性に優れるため、検討断面位置の選定、盛土形状（幅・長さ）、地盤特性などの解析条件を様々に変えて解析して比較検討でき、最適な対策方法の設計が可能となる。さらに、AK2Bモデルでは、盛土全体を扱えることも特長である。

飽和帯の解析において重要な地下水の流向と実流速は、揚水試験結果や数多くある地下水位の実測データを用いるほか、地下水流動を形成する集水域やアメダスによる降雨データなどに基づいた三次元統合型水循環シミュレーション（GETFLOWS）により評価した（図-11・12）。当地の地盤は、基盤岩として泥岩や砂岩、これを被覆する砂礫層およびシルト層で構成されている。このうち滞水層は砂礫層で、その透水係数や有効間隙率を揚水試験で評価した。シルト層と基盤岩の値は、文献に基づき設定した。

(7) 移流分散解析結果の対策工設計への反映

移流分散解析の結果を盛土方法の設計へ反映するために、図-13に示す5つの項目を検討した。削減距離 L とは、地盤での重金属等の吸着や分散によって用地境界での濃度を地下水環境基準以下とするために、対策対象のずりを盛土しない区間として設ける距離を示す。吸着層厚 t は河川掘削土による吸着層の厚さを示す。

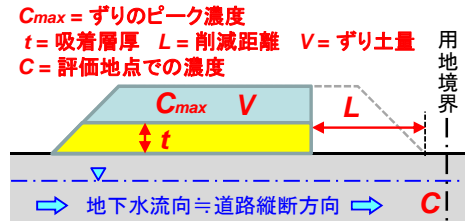


図-13 盛土方法を設計するための変数

本検討では、 C_{max} 、 t 、 L を変化させることができるため、これらの値を変化させて解析し、対策目標を達成でき、現実的で効率的な施工ができる最適な値を求めた。具体的には、用地境界での濃度 C が地下水環境基準の砒素 0.01 mg/L 以下となるように、計画盛土の全長から地下水の上流方向へ盛土区間を 10 m ピッチで削減して解析し、ずり土量 V が最大となる吸着層厚 t との組合せを求めた。

(8) リスク評価結果

上記に基づくAトンネルずりのリスク評価結果を図-14に示す。盛土（ずり）からの砒素の溶出ピーク濃度 0.17 mg/L が、不飽和帯を通過後に 0.148 mg/L となり、用地境界で地下水環境基準 0.01 mg/L 以下となるには、削減距離 L が 40 m 必要との解析結果となった。このほか、Dトンネルずりでも同様な結果が得られ、盛土場所によっては削減距離 L を必要としないケースもあった。

Bトンネルずりは、ずりのみの場合ピーク濃度 C_{max} が第二溶出量基準を超過して高いため、吸着層厚 t を増加するだけでは t が計画盛土高と同程度となったり、削減距離 L が極端に長くなるなど、現実的な対策にならない結果となった。この対策として、前項(3)で示したとおり、ずりに河川掘削土を30%混合して C_{max} を低減させると、Aトンネルずりと同様な結果を得ることができた。

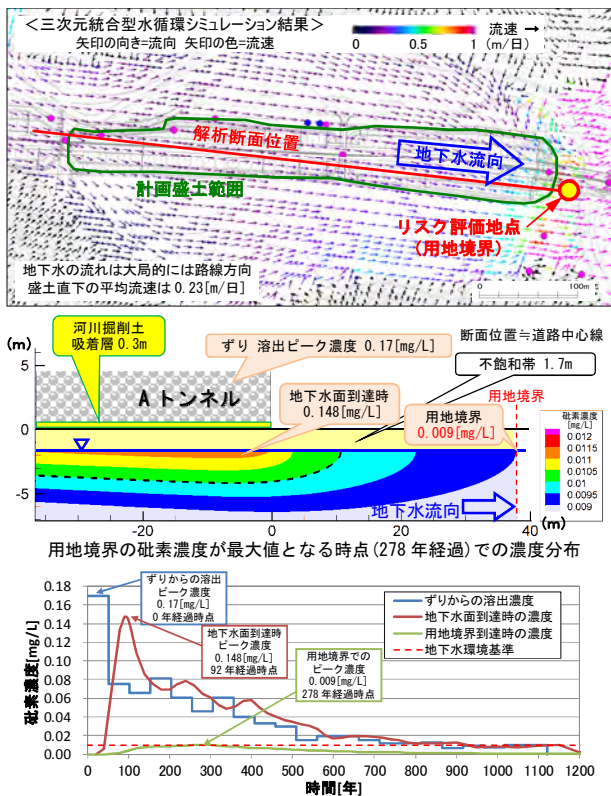


図-14 リスク評価結果の例

(9) コスト削減

上述したリスク評価に基づく対策により、過年度までの人工材料を用いた吸着層工法が不要と判断された。これにより、約90%の大幅なコスト削減を達成できた。

5. リスク評価結果の安全性

リスク評価に基づく対策では、とにかくコスト削減が着目されがちであるが、本章ではその安全性を検証する。

安全性を示す指標として、たとえば土木構造物の安全率がある。これは、許容負荷への裕度を設定したもので、部材強度の極限値を試験で評価できるため成り立つ考え方である。この安全率を、サイト概念モデルに基づくリスク評価結果にも適用できればよいが、たとえば原地盤の遅延係数を正確に評価することは困難である。では、どのように安全性を担保すればよいのか、その留意事項を以下に示す。

(1) サイト概念モデルの構築と解析手法

ずりから砒素などが溶出し地盤へと移動する過程では、pHが中性領域では砒素は溶出しにくいこと、不飽和帯における鉄バクテリアによる生物化学的反応など、吸着や分散以外にも砒素の移動を抑制する現象が実際には様々生じている。しかしこれらを考慮せず、より単純にモデル化し、一次元解析のようにすべての砒素が一方向に移動するといった単純な解析手法を用いることにより、解析結果は実際より過大になるが、安全性を担保できる。

(2) 安全側のパラメータ設定

移流分散解析のパラメータには現実的にあり得る値の範囲がある。その範囲内にある実際の値は、地盤の不均質性や調査技術の限界により、真値を得ることは不可能である。そのため、あり得る値のうちリスク評価地点での濃度がより高くなる値を設定することによって安全性を担保する。本事例ですりの溶出ピーク濃度を溶出量試験の最大値として設定したのがその例である。

その一方で、解析結果に与える影響（感度）が大きいパラメータは、綿密な調査・試験により評価する必要がある。本事例で揚水試験と三次元統合型水循環シミュレーションで地下水の流向と実流速を設定したのがその例である。また、降雨浸透率は文献に基づき安全側に想定したが、その検証を今年度から現場実験で行っている。

(3) リスク評価結果の妥当性の確認

評価結果の妥当性を確認するため、リスク評価地点（用地境界）付近での地下水水質をモニタリングする。地下水環境基準以下であれば問題はないが、上述したようにモデルおよびパラメータを安全側に設定しているため、解析結果が基準をやや下回る値であったとしても、実際にはさらに低い濃度となることが想定される。リスク評価に基づく対策工事は平成24年度から施工しているが、現在のところモニタリング結果に異常はない。

6. 今後の展望

リスク評価とは、汚染源ではなく曝露地点でリスクを評価する考え方で、トンネル施工において膨大に発生する自然由来の重金属等を低濃度で溶出する掘削ずりの対策を合理化するためには、最適手法のひとつである。しかし、その考え方は国内ではまだ普及しておらず、その適用にあたっては関係者とリスクコミュニケーションを図りつつ、社会的認知を得ていく必要がある。今後、リスク評価導入の進展に本論が一助となれば幸いである。

謝辞：本検討を遂行するにあたり、北海道大学大学院工学研究院の五十嵐敏文教授および茨木希客員准教授には、多大なご指導を賜り心から厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省水・大気環境局土壌環境課：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第2版）（2012）、Appendix-18.
- 2) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会（2010）：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）.
- 3) 一般社団法人北海道環境保全技術協会（2012）：自然由来重金属等の対策におけるリスク評価マニュアル.
- 4) 五十嵐敏文・三上隆（2004）：自然由来の重金属含有岩盤掘削ずり埋立に対する周辺粘性土の遮水材としての利用可能性、土と基礎、Vol.52, No.9, pp.22~24.
- 5) A. Ogata and R. B. Banks (1961) : A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media, US Geological Survey Professional Papers 411-A, 1961.