

建設工事における自然由来重金属含有岩石をもちいた盛土設計について ～サイト概念モデルの構築～

林 貴博¹・掛田 浩司¹・宮川 浩幸²

¹北海道開発局旭川開発建設部士別道路事務所第3工務課（〒098-2214 北海道中川郡美深町字敷島143）

²北海道開発局旭川開発建設部士別道路事務所第2工務課（〒098-2214 北海道中川郡美深町字敷島143）

トンネル掘削ずりは自然由来の重金属等をしばしば含有し、砒素などが土壤汚染対策法の溶出量基準を超過する。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きた。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、さらに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リスク評価に基づく対策方法を検討した。その結果、地盤による重金属等の吸着や地下水による拡散を考慮することにより、吸着材なしでも対策可能と評価できた。このようなリスクに応じた合理的な対策をとる考え方は日本では認知度がまだ低く、その普及が今後の課題となる。

キーワード 自然由来重金属, リスク評価, サイト概念モデル, 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。その解消と、道路交通の定時性、安全性向上や現道の交通事故低減を目的として、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。

(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ら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などからは、先進ボーリングのコアによる溶出量試験において、砒素やセレンが土壤汚染対策法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。



図-1 バイパス全体図

2. 対策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、砒素などの自然由来の重金属等が土壤汚染対策法（以下“土対法”と略記）によ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については、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ている。また、岩盤の砕屑物であるずりは土対法とは見なされないことから、土対法の適用外と判断されている。しかし、環境への配慮の必要性などから、過去においては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全国各地で検討され、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）¹⁾」（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1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普遍化している。その代表例には米国のRBCA（Risk-Based Corrective Action：リスクに基づく修復措置）があり、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²⁾。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、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の影響範囲を評価する、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。

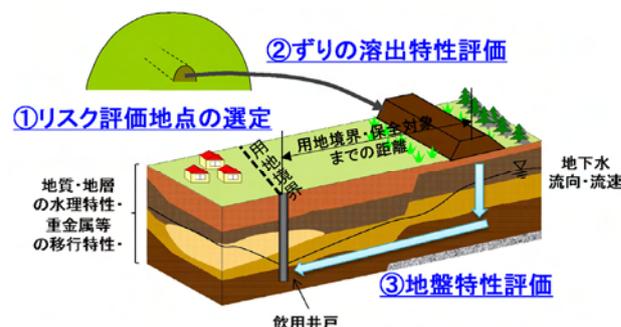


図-2 サイト概念モデルの構築と評価対象（文献²⁾に加筆）

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、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、盛土の形状（高さ・幅など）も把握した。

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ボーリング調査などで地質分布を把握することにより評価し、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。

このような評価結果に基づき、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。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、ずりの盛土へ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した。

移流分散解析の結果、リスク評価地点において基準超過となった場合、ずりからの溶出量低減や重金属等の捕捉といった対策の効果を新たに解析条件に加えて再度リスク評価を行う。その対策方法の1つが吸着層工法である。吸着層工法の概要を従来からの遮水工と比較して表-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、重金属の地盤への溶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。

吸着層工法とは対極的に、遮水工はずりからの重金属の溶出を封じ込める方法である（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（溶出しない）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を想定してリスク評価を行う必要がある。

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)³⁾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"> 重金属の溶出特性 吸着層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"> 吸着材の吸着容量はずりにより異なる 盛土形状

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</p> <p>＜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</p> <p>重金属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＞ <ul style="list-style-type: none"> 重金属の溶出特性 移流分散解析によるリスク評価
留意点	<ul style="list-style-type: none"> 一重遮水シートのモデル化 盛土形状

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り、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。この吸着材（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など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。

(2) サイト概念モデルの構築

リスク評価にあたっては、図-3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。しかし、実測データは少ないため、過去の事例を参考に法面部で15%、舗装部で10%と仮定した（実際にはより少ない浸透率であることが想定される）。その他のパラメータの設定方法は、次節以降のとおりである。

サイト概念モデル	パラメータ	評価方法
15% 10% 15%	降雨浸透率	文献値
一次元	溶出量	溶出量試験 カラム試験
評価地点	遅延係数	カラム試験
不飽和帯	遅延係数	バッチ試験
飽和帯	遅延係数 透水係数 有効間隙率	バッチ試験 ボーリング 揚水試験 土質試験
地下水の流れ【一次元】		
分散【三次元】		

図-3 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高濃度を解析における初期値として設定した（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、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	溶出量最高濃度
D	砒素	0.13 mg/L
B	砒素 セレン	0.81 mg/L 0.012 mg/L
A	砒素	0.17 mg/L

溶出量の減衰状況は、カラム試験で評価した（図-4）。カラム試験では溶出量試験より高い濃度となっているが、試験条件（固液比が高く間隙率が0.5程度と大きいなど）から砒素など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濃度とは言い難いと判断した（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）。

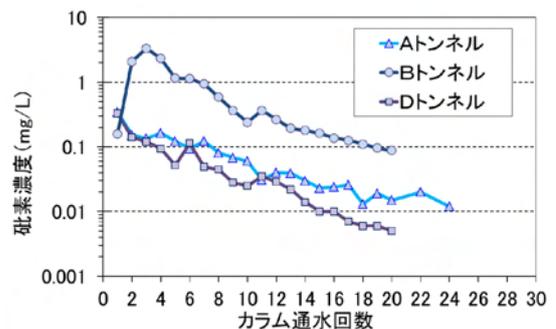


図-4 カラム試験における溶出濃度の低減状況

Bトンネルでは、第二溶出量基準を超える砒素が溶出している。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、河川掘削土の混合による溶出量低減効果をバッチ試験により評価した(図-5)。試料には土質の異なる2種類を用いた。その結果、ずりに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20%まで低下した。

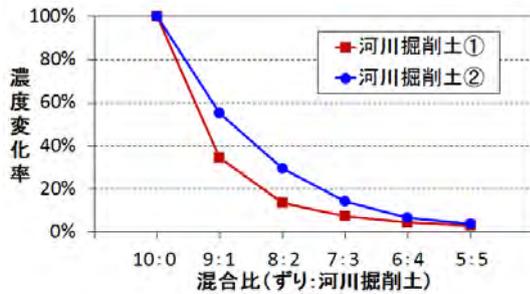


図-5 河川掘削土の混合によるBトンネルずりの溶出量低減

(4) 地盤特性の評価

盛土予定箇所それぞれでボーリングを行って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は、移流分散解析において解析結果に与える影響(感度)が大きいため、揚水試験により的確に評価した(図-6)。また、自動記録式水位計により地下水位の変動状況を把握し、地下水の流動状況を評価した。



図-6 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通りの方法で行なった。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-7に示す使用方法を模擬してカラムにずりと河川掘削土を充填し(図-8)、カラム上部から数日おきに水を注ぐ方法で試験した。1回あたりの注水量は約150ccである。

試験の結果は図-8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法を採用した。

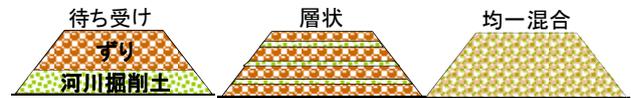


図-7 河川掘削土の使用法案

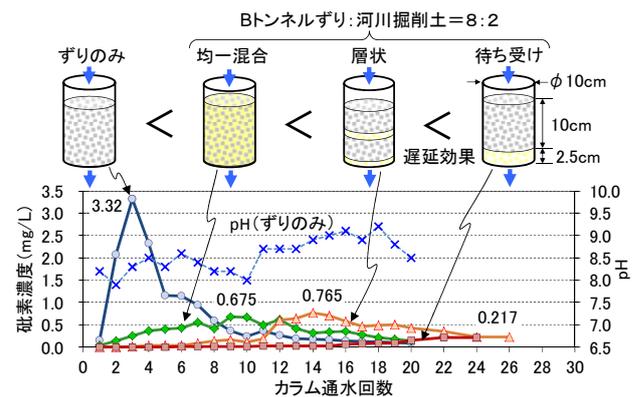


図-8 カラム試験結果(河川掘削土の使用法検討)

次に、河川掘削土の遅延係数と分散長を評価するためのカラム試験を行なった(図-9)。試料には土質の異なる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で各2カラムずつ用意し、合計12カラムで実施した。

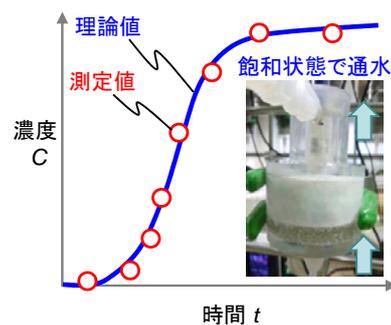


図-9 遅延係数と分散長を求めるためのカラム試験

試験にあたっては、仮の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。

次に、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溶出液をカラムの下部からポンプで通水させ、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、仮の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、最も理論値が測定値と近似する組合せを選出し、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、安全側の配慮としてより遅延係数が小さい試料(河川掘削土①)の値を採用し、次項に示す移流分散解析を行った。

表-3 カラム試験で求めた遅延係数と分散長

試料名	ずり種類	溶出液濃度 mg/L	遅延係数	分散長 m	分配係数 L/kg	間隙率	乾燥密度 g/cm ³
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		
A	砒素0.07	25	0.0008	10			
		30	0.0003	12			
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		
			61	0.0131	31		
	B	砒素0.17	86	0.0249	43		
A	砒素0.07	92	0.0759	46			
		34	0.0011	17			
			45	0.0055	22		

(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る用い、合理的な評価ができる手法を考案した(図-10)。

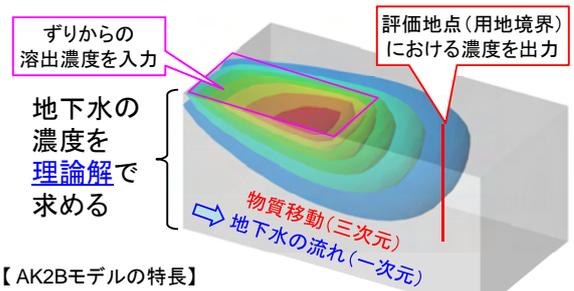


図-10 リスク評価における解析手法

すなわち、鉛直方向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(Ogata & Banks⁴⁾)で行い、様々な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理論解(AK2Bモデル)で解析した(図-11)。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、揚水試験結果や数多くある地下水位データによる実測値を用いるほか、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-12)。

このような理論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徴がある。このため計算負荷が小さく、現実的かつ不確実性の少ない解析結果を得ることができた。また、汎用性に優れるため、検討断面位置の選定、盛土規模(幅・長さ)、地盤特性などの解析条件を様々に変えて解析でき、対策工の設計

において数多くの比較検討により最適な対策方法を採用することが可能となった。



【AK2Bモデルの特長】

- ✓ 盛土全体を扱えるため現実的な評価ができる
- ✓ 計算負荷が小さいため多くのケースで比較検討できる

図-11 飽和帯での移流分散解析

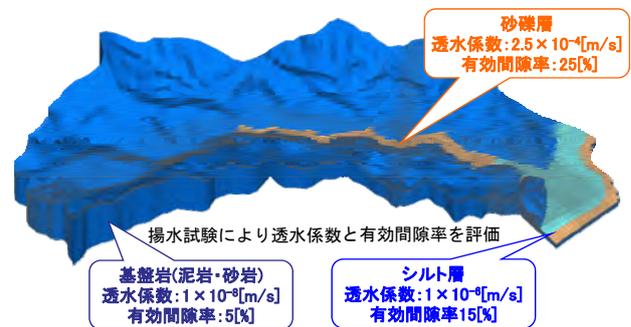


図-12 三次元統合型水循環シミュレーションモデル

(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際には、図-13に示す5つの変数を考慮した。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とするために、対策対象のずりを盛土しない区間の距離を示す。吸着層厚 t は河川掘削土による吸着層の厚さを示す。

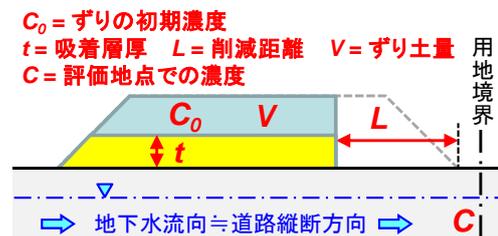


図-13 盛土方法を設計するための変数

これらの変数のうち、対策目標を達成するためには、 C_0 、 t 、 L を変化させることができる。そこで、これらの値を様々に変化させて解析し、現実的で効率的な施工を実現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 が対策目標である地下水環境基準の砒素0.01 mg/L以下となるように、計画盛土の区間全長から地下水の上流方向へ盛土区間を10 mピッチで削減して繰り返

し解析し、ずり土量 V が最大となる吸着層厚 t と削減距離 L の組合せを求めた。

また、ずりの初期濃度 C_0 が高い場合には、吸着層厚 t を増加するだけでは吸着層厚 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ケースもあった。このことから、第二溶出量基準を超過するBトンネルのずりに河川掘削土を混合して初期濃度 C_0 を低減させることは、効果的な対策でありずりの効率的な盛土に有効であった。

(8) リスク評価結果

上記の評価および解析により得られたAトンネルずりのリスク評価結果例を図-14に示す。

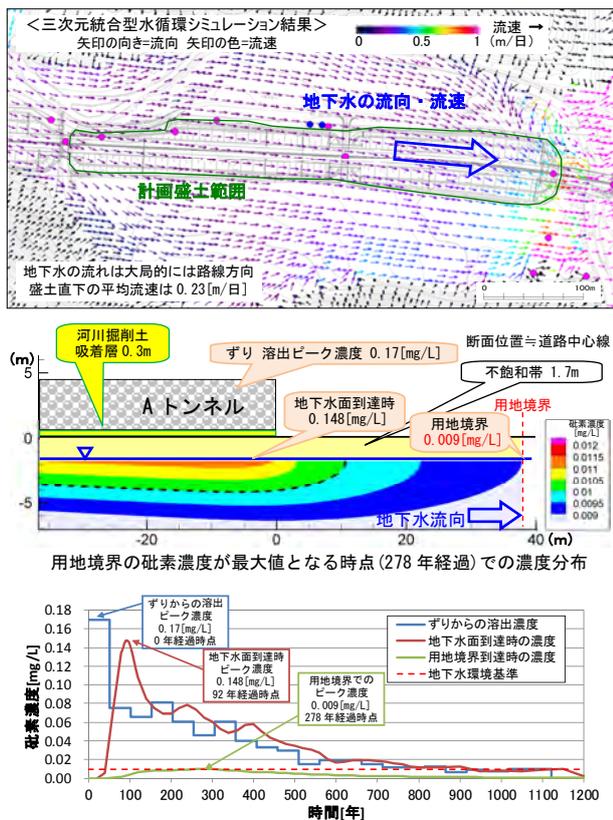


図-14 リスク評価結果の例

Aトンネルずりを盛土した場合、ずりからの砒素の溶出濃度 0.17 mg/L が、吸着層と不飽和帯を通過後に 0.148 mg/L となり、さらに飽和帯を移動して用地境界に達した時に地下水環境基準 0.01 mg/L 以下となるには、用地境界からの削減距離 L が 40 m 必要との解析結果となった。このほか、河川掘削土を30%混合したBトンネルずりや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。

(9) 結論

上述したリスク評価により、過年度までの吸着層工法で用いていた人工材料の吸着材が不要と判断された。これにより、大幅なコスト削減を達成することができた。

5. 今後の課題

(1) より現実的なパラメータの設定

4章で示したように、リスク評価の手法は確立できたが、移流分散解析に用いるパラメータにはまだ検討の余地がある。とくに、ずりの溶出特性については、盛土した場合の溶出量の的確な予測が困難なため、かなり安全側の評価にならざるを得ない。同様に、降雨浸透率も実測データが少ないため、過大評価の可能性はある。

これらのパラメータは解析結果に与える影響（感度）が大きいため、より現実的で確実に評価する方法を確立することが今後の課題となる。なお、降雨浸透率については、今年度から現場実験を開始する計画である。

(2) リスク評価結果の妥当性の確認

リスク評価に基づく対策工の施工は、2012年度から開始したところである。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）付近での地下水の水質などを今後モニタリングしていく。

(3) リスク評価の考え方の普及

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、まだ国内ではほとんど普及していない。その適用にあたっては、関係者とのリスクコミュニケーションを図りつつ、リスク評価の考え方について社会的認知を得ていく必要があると考える。

6. おわりに

トンネル施工においては、自然由来で低濃度の重金属を溶出する膨大な掘削ずりが発生する。その対策を合理化するためには、リスク評価は最適な手法の1つであり、今後、その導入は進展していくと考えられる。本論がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 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) .
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) A. Ogata and R. B. Banks (1961) : A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media, US Geological Survey Professional Papers, No. 34, 1961, p. 411-A.