

# リスク評価に基づくトンネル掘削ずりの対策事例 —自然由来重金属対策におけるコスト縮減方法—

新藤 和男\*・河口 達也\*\*

## Case Study of Tunnel Drilling Waste Countermeasures Utilizing Risk Assessment —A Cost Reduction Method for Countermeasures against Naturally Occurring Heavy Metals—

Kazuo SHINDOU\* and Tatsuya KAWAGUCHI\*\*

### Abstract

Tunnel drilling waste often contains naturally occurring heavy metals, such as arsenic, in quantities that exceed the elution standards set by the Soil Contamination Countermeasures Act. Through the years, this has been prevented by seepage control work; however, such measures have also increased construction costs. In recent years, methods of constructing adsorbent layers that utilize commercially available adsorbents have reduced construction costs in Hokkaido. To further reduce the costs, this study investigated a method that utilizes risk assessment for the national route 40 bypass project. The results revealed that by considering the adsorption of heavy metals from soil and the dispersal of groundwater, countermeasures are possible without the use of adsorbents. While this kind of rational countermeasure based on risk remains to be properly recognized in Japan, it is hoped that awareness for this will spread in the future.

**Keywords:** naturally occurring heavy metals, drilling waste, cost reduction, site conceptual model, risk assessment, advection–dispersion analysis, adsorption layer construction method

### (要 旨)

トンネル掘削ずりはしばしば自然由来の重金属等を多く含有し、砒素などの重金属の溶出量が土壤汚染対策法で定められた基準を超過することがある。その対策は従来は遮水工封じ込めなどにより行われてきたが、そのことが建設コストを増大させる一因となってきた。これに対し近年、北海道内におけるトンネル工事では市販の吸着材を用いた吸着層工法を採用することによる対策コストの縮減が試みられてきた。筆者らは、より一層のコスト縮減を図るため、一般国道のバイパス事業でサイト概念モデルを用いたリスク評価を導入した。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減されると評価された。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。本論では、この一般国道のバイパス事業を例に、トンネル掘削ずり対策におけるサイト概念モデルを用いたリスク評価の具体的な検討方法を紹介する。

**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

\* 応用地質(株)北海道支店 \*\* 応用地質(株)エンジニアリング本部

\*\*\* OYO Corporation

## 1. 背景と最近の動向

トンネル掘削ずりに含まれる自然由来の重金属等が、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することがある。土対法は2003年に施行され、2010年には基準超過原因が自然由来であっても適用対象と改正されている。トンネル掘削ずりについては、土対法第4条（3,000 m<sup>2</sup>以上の形質変更）により、坑口部を除き適用対象外となる。また、固結した岩盤は土対法の適用外とされる<sup>1)</sup>。しかし、地域住民への環境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いる。

このようなずりの対策コストを縮減するために、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）<sup>2)</sup>」（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）という考え方がある。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<sup>3)</sup>。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。

北海道では対応マニュアルに示される対策工法のうち、吸着層工法を採用したことにより対策コストが縮減された事例が多い。吸着層工法は、重金属等を吸着する資材を盛土（ずり）の底部に層状に敷設し、重金属類を捕捉することによって地下水環境基準などの対策目標を達成する方法である（詳細は後述）。吸着層には、市販の人工吸着材を用いることがあるが、その資材コストは吸着層への配合量によって異なり、場合によっては不経済となることもある。

この対処方法として、近年ではサイト概念モデルを用いたリスク評価を行い、地盤による重金属等の吸着や地下水による分散を考慮することで、より経済的な重金属対策を行っている。

## 2. リスク評価に基づく対策の検討方法

### 2.1 評価するリスク

重金属等による人の健康影響に対するリスクは、農作物、飲用水、あるいは砂塵などを介して重金属等が

人の体内へ取り込まれる（曝露する）ことにより生じる。ずりからの重金属等の曝露方法には、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、通常、地下水経由の曝露リスクを評価対象とする。

なお、有害物質に関するリスク評価とは、一般には有害物質の曝露量を計算し、人の健康影響に対するリスクを評価することを指しているが、本論では飲用井戸や用地境界などのリスク評価地点での地下水中の濃度を予測する、という狭義で用いる。

### 2.2 サイト概念モデル

リスク評価に基づく対策の検討は、図-1に示す①～③の項目について検討・評価し、重金属等の移動プロセスを把握するために調査・評価すべき対象を明らかにし、サイト概念モデルを構築することにより、合理的な対策を行うことが可能となる。

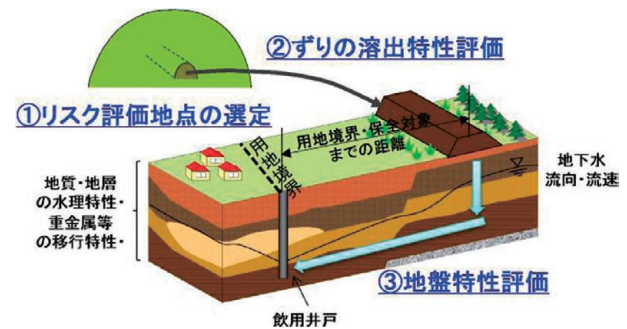


図-1 サイト概念モデルの構築と評価対象（文献<sup>3)</sup>に加筆）

Fig. 1 Construction of a site conceptual model and Object for construction

サイト概念モデルとは、自然由来の重金属等を含む岩石・土壌（発生源）、発生源から敷地境界や保全対象区域までの距離・曝露経路（周辺状況）、周辺地盤の重金属等の吸着特性・地下水の流れ（周辺地盤）などの現場毎の特性を考慮し、環境への影響を評価するためのモデルを指す<sup>2)</sup>。

### 2.3 移流分散解析と対策方法の検討

盛土（ずり）から溶出した重金属等の移動プロセスを想定したサイト概念モデルに基づき、移流分散解析を行ってリスク評価地点における重金属等の濃度を予測する。

移流分散解析にあたっては、吸着層や地盤の遅延係数、飽和帯の厚さ（地下水位）、地下水の実流速などのパラメータを設定する。その方法は4章で詳述する。解析の結果、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解析によって評

価が可能な対策を新たに解析の条件に加え、対策工の適性や規模を評価し、施工条件も勘案して効果的な対策工を選定する(図-2)。

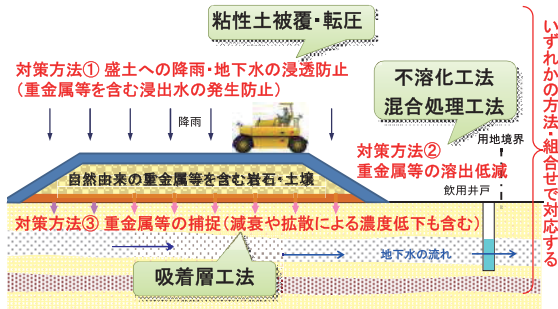


図-2 リスク評価で考慮できる対策効果 (文献<sup>3)</sup>に加筆)  
 Fig. 2 The measure effect risk assessment which can be taken into consideration

2.4 対策工の概要

重金属等を溶出する掘削ずりの対策方法のうち、コスト削減の実績がある吸着層工法と、従前より採用実績が多い遮水工の概要を以下に示す。

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。吸着層工法の概要を表-1に示す。

表-1 吸着層工法の概要  
 Table 1 The outline of absorbable layer construction method

工法	吸着層工法
概要	
コスト	人工材料の場合: 3,000 ~ 6,000 円/m <sup>3</sup> (吸着材の吸着容量と価格による)
検討課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>重金属等の溶出特性</li> <li>吸着層あるいは地盤の吸着性能と透水性</li> <li>移流分散解析によるリスク評価</li> </ul>
留意点	<ul style="list-style-type: none"> <li>吸着容量は吸着材により異なる</li> <li>重金属等の溶出量の経時変化は盛土形状で異なる</li> </ul>

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1m<sup>3</sup>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、本論がその事例である。

吸着層工法の普及前は、対策は多くの場合、ずりからの重金属等の溶出を封じ込める遮水工で行われてきた(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を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  
 Table 2 The outline of seepage control work

工法	遮水工
概要	
コスト	二重遮水シート: 10,000~12,000 円/m <sup>3</sup> 一重遮水シート: 6,000~8,000 円/m <sup>3</sup>
検討課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>一重遮水シートの場合はリスク評価が必要(遮水シートの透水性の設定が必要: 一般値はない)</li> <li>施工中の排水管理など</li> </ul>
留意点	<ul style="list-style-type: none"> <li>盛土形状によりシート面積(コスト)が異なる</li> <li>冬季は施工(シートの着着)が困難</li> </ul>

2.5 重金属等の溶出・吸着特性を評価する試験方法

サイト概念モデルに基づき重金属の対策を行うためには、掘削ずりからの重金属等の溶出量とその経時変化、地盤や吸着層に用いる吸着材の吸着性能を適切に評価することが重要である。本事例で実施した試験方法の概要を以下に示す。

①溶出量試験

重金属等の溶出量を把握するために、環境省告示第18号の方法で実施する試験で、一般に公定法と呼ばれる。公定法では、2mm目のふるいを通過した試料を用いて試験するが、岩盤の掘削物であるずりの場合は試料全量を径2mm以下に粉碎して実施することが多く、これを短期溶出試験と呼んでいる<sup>2)</sup>。

掘削ずりから酸性水の発生が想定される場合は、環境省告示第18号の方法で溶媒に用いる水に代わり、希硫酸や過酸化水素水を溶媒として溶出量試験を実施することもある。

## ②バッチ試験

バッチ試験は閉鎖系溶解実験の総称で、試験方法が簡便なため多くの試料を評価する場合に適する。ここでは、地盤から採取した試料や吸着材などの吸着性能（吸着量）を評価するための試験方法（バッチ吸着試験）を示す。

- i) 掘削ずりの溶出液に対象となる試料を投入し、200 rpm 程度の振とう回数で24時間振とうする。
- ii) 遠心分離（3,000 rpm, 20分）し、0.45 μmのメンブレンフィルターで溶液をろ過する。その後、ろ液中の重金属濃度を測定する。
- iii) 下式で吸着量を求める。

$$S = \frac{(C_0 - C)V}{W} \quad \text{式 (1)}$$

S: 吸着量  $C_0$ : 初期濃度  $C$ : 吸着後濃度  
V: 溶液量  $W$ : 吸着材添加量

- iv) 溶出液の濃度を4段階程度に変化させ、吸着量を算出する。
- v) 平衡液相濃度と吸着量をグラフにプロットし、吸着等温線を作成し吸着性能（分配係数）を把握する。

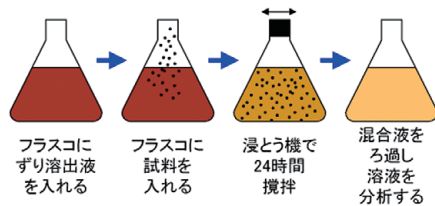


図-3 バッチ試験の模式図

Fig. 3 Schema of batch test

なお、上記と同様な操作で、試料から溶出する重金属等を測定する試験をバッチ溶出試験と言い、前項の溶出量試験がこれに該当する。

## ③カラム試験

バッチ試験よりも現場に近似した状況を再現して評価できる試験方法で、試料の溶出特性を評価するための試験をカラム溶出試験、試料の吸着性能を評価するための試験をカラム吸着試験と区別して呼ぶ。

ずりの溶出特性を評価するためには、カラム溶出試験を行う。ずりをカラムに充填し、カラム上部から水を注入してカラム下端で得られた浸出水の重金属等の濃度を測定する。これを繰り返すことにより、濃度の経時変化を把握でき、移流分散解析の条件とすることができる。

吸着材などを評価するためには、カラム吸着試験を行う。実際の盛土状況を模して、カラム下部から吸着材料、掘削ずりと順に試料をカラムに充填するなどして、対策対象の重金属等を含んだ溶液を浸透させて、カラム下端で得られた浸出水の重金属等の濃度を測定

し、吸着状況を把握する。カラムに注入する溶液は、実際に盛土するずりに対しバッチ溶出試験と同様な溶出操作を行って得られた溶液（これをずり溶出液という）を用いることで、より実際に近い状況での吸着性能の評価が可能となる。

## 3. 対策事例の概要

### 3.1 事業概要

北海道北部にある延長約250kmの幹線道路では、一部の区間が雪崩による特殊通行規制区間となっている。この解消とともに、道路交通の定時性や安全性の向上による交通事故低減などを目的として、総延長約19kmの一般国道のバイパス事業が行われ、図-4に示す4本のトンネルが施工され、対策検討時にはこのうち3本のトンネルの掘削ずりが検討の対象であった。



図-4 対象路線全体図

Fig. 4 Object route general drawing

### 3.2 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は、調査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対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。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。

## 4. リスク評価の具体的内容

### 4.1 概要と設計方針

当バイパスでは、当初、トンネル掘削ずりの重金属対策として、人工材料を用いた吸着層工法が実施されてきた。しかしその資材コストが高いため、人工材料の代わりに吸着性能が劣るものの、資材コストはゼロとなる近傍の河川工事で発生する掘削土（以後、河川掘削土と呼ぶ）を吸着層の資材として活用し、コスト削減を図ることを試みた。このためには、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が必要で、サイト概念モデルに基づく移流分散解析により、合理的かつ経済的な対策方法を設計した。

#### 4.2 サイト概念モデルの構築

リスク評価にあたっては、図-5に示すサイト概念モデルを構築した。本事例での検討箇所において、サイト概念モデルの構築に際して考慮した事項は、下記のとおりである。

- ・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、安全性と将来の維持管理を考慮し用地境界などをリスク評価地点とする。
- ・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、pHについて溶出量試験とカラム試験で評価する。
- ・重金属等の溶出には盛土(ずり)への降雨浸透量が重要な要素となるため、盛土の構造(舗装や覆土)も考慮する。
- ・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評価する。まず、ボーリング調査で地質分布を明確にし、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把握する。また、地盤による重金属等の吸着性能をバッチ試験により評価する。
- ・対策方法として河川掘削土を活用した吸着層工法を検討するため、河川掘削土の吸着性能をカラム試験により評価する。

各パラメータのうち盛土への降雨浸透率については、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、他現場での事例を参考に法面部で15%、舗装部で10%と仮定した。なお、この浸透率は実際にはより低いと想定されるため、実際の道路盛土での浸透率の測定を平成24年度から開始している。その他のパラメータの設定方法は、次節以降に示す。

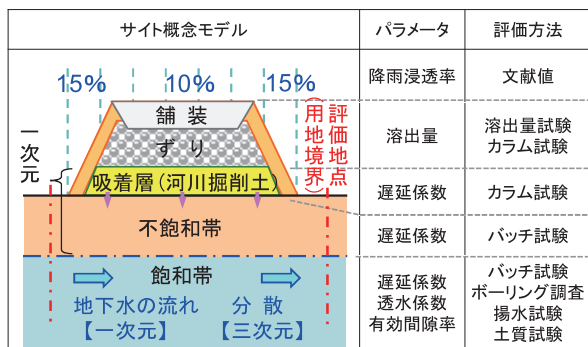


図-5 サイト概念モデルとパラメータの評価方法

Fig. 5 A site conceptual model and the valuation method site conceptual

#### 4.3 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-4に示した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  
Table 3 elution amount of tunnel spoil

トンネル	種類	溶出量最大値
A	砒素	0.17 mg/L
B	砒素	0.81 mg/L
	セレン	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-6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以下で固液比が約1~4:1と高いなど)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)。

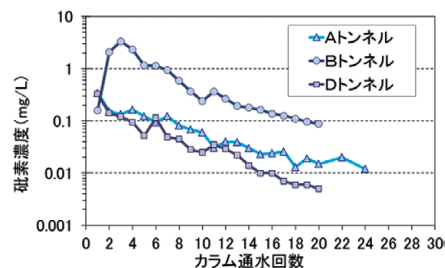


図-6 カラム試験における溶出濃度の変化

Fig. 6 Change of the elution concentration in a column test

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吸着試験により評価した(図-7)。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。

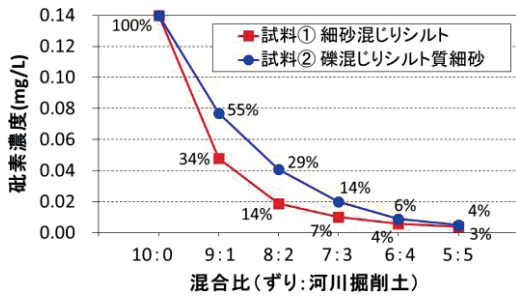


図-7 河川掘削土との混合によるずりの砒素溶出量低減  
Fig. 7 The amount reduction of arsenic elution of tunnel spoil by mixture with the river drilling material

4.4 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。

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad \text{式 (2)}$$

R: 遅延係数  $\rho_d$ : 乾燥密度  $K_d$ : 分配係数  
 $\theta$ : 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の評価にあたっては、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、できる限り正確に評価する必要がある。そこで、揚水試験を実施した(図-8)。また、自動記録式水位計により地下水位の変動状況を広域的に連続観測し、地下水の流動状況を評価した。



図-8 揚水試験状況  
Fig. 8 Production test situation

4.5 吸着材(河川掘削土)の評価

吸着材として用いる河川掘削土の吸着性能は、カラム吸着試験で評価した。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-9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-10)、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150mLであり、この量は、降雨浸量が1/3と仮定した場合、検討箇所における雨量の約2ヶ月分の浸透量に相当する。

試験の結果は図-10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。

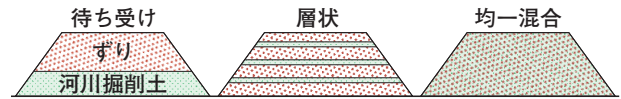


図-9 河川掘削土の使用法  
Fig. 9 Utilization solution of the river drilling material

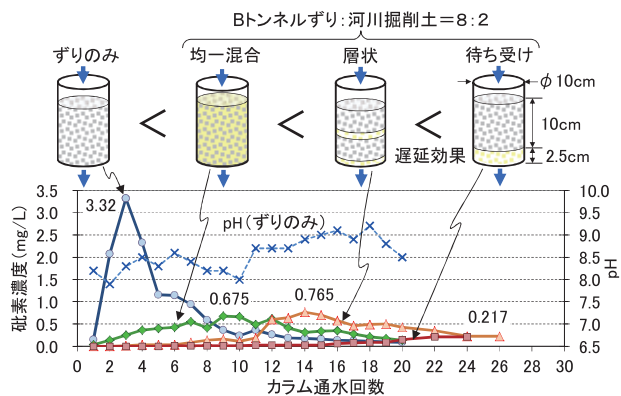


図-10 カラム試験結果(河川掘削土の使用法検討)  
Fig. 10 Column test result

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状態でのカラム吸着試験を行った(図-11)。試料は溶出量低減を確認する試験(図-7)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で各2カラムずつ用意し、合計12カラムで実施した。

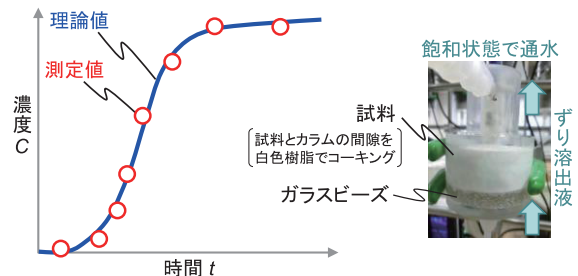


図-11 遅延係数と分散長を求めるための飽和カラム吸着試験  
Fig. 11 The saturation column adsorption test for asking for a retardation coefficient and dispersion length

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-4)。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。なお、遅延係数は前出の式(2)により算出できる。

表-4 飽和カラム吸着試験で求めた遅延係数と分散長

Table 4 A retardation coefficient and the dispersion length that I found in a saturated column adsorption test

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 <sup>3</sup>
	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		
河川掘削土② 礫まじりシルト質細砂	A	砒素0.07	25	0.0008	10	0.57	1.13
			30	0.0003	12		
	D	砒素0.05	64	0.0166	32		
			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			

4.6 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ことで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<sup>5)</sup>)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を評価した(図-12)。

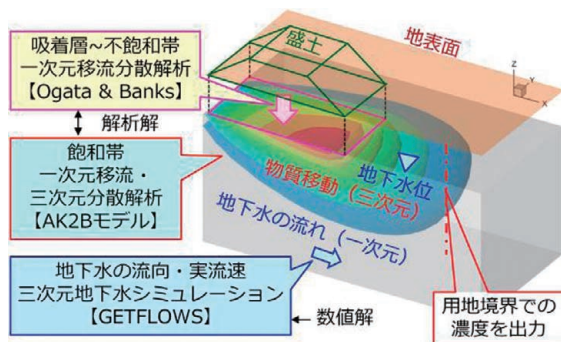


図-12 リスク評価における解析手法  
Fig. 12 The analysis technique in risk assessment

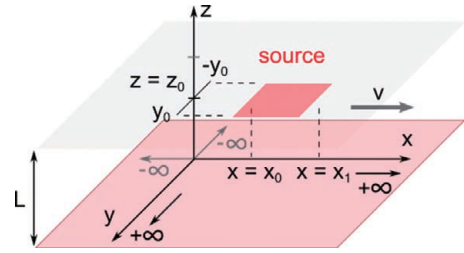


図-13 計算領域の模式図  
Fig. 13 Schematic diagram of simulation domain

AK2B モデルの解析解は下記のとおりである。

$$c(x, y, z, t) = \frac{M_A}{4\theta RL} \int_0^t \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_1-v/R\tau}{2(D_x/R\tau)^{1/2}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0-v/R\tau}{2(D_x/R\tau)^{1/2}}\right) \right] \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{y-y_0}{2(D_y/R\tau)^{1/2}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+y_0}{2(D_y/R\tau)^{1/2}}\right) \right] \exp(-\gamma(t-\tau) - \lambda\tau) \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi z_0}{L}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_z}{L^2} \tau\right) \right] d\tau$$

式(3)

- c: 濃度 [M/L<sup>3</sup>]
- x: x 座標 [L]
- y: y 座標 [L]
- z: z 座標 [L]
- t: 時間 [T]
- M<sub>A</sub>: 汚染源強度 [M/L<sup>2</sup>/T]
- θ: 間隙率
- R: 遅延係数
- L: 帯水層厚さ [L]
- v: 地下水の平均実流速 [L/T]
- D<sub>x</sub>: 縦方向分散係数 [L<sup>2</sup>/T] (D<sub>x</sub>=α<sub>v</sub> v + D\*)
- D<sub>y</sub>: 横方向分散係数(水平方向) [L<sup>2</sup>/T] (D<sub>y</sub>=α<sub>th</sub> v + D\*)
- D<sub>z</sub>: 横方向分散係数(鉛直方向) [L<sup>2</sup>/T] (D<sub>z</sub>=α<sub>v</sub> v + D\*)
- α<sub>v</sub>: 縦分散長 [L]
- α<sub>th</sub>: 横分散長(水平方向) [L]
- α<sub>n</sub>: 横分散長(鉛直方向) [L]
- D\*: 有効分子拡散係数 [L<sup>2</sup>/T]
- λ: 溶質一次減衰係数 [1/T]
- γ: 汚染源一次減衰係数 [1/T]
- x<sub>0</sub>: 上流汚染源座標 [L]
- x<sub>1</sub>: 下流汚染源座標 [L]
- 2y<sub>0</sub>: 汚染源横水平幅 [L]
- z<sub>0</sub>: 帯水層下部からの汚染源座標 [L]

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、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-14・16)。

検討箇所の地盤は、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。また、シルト層と基盤岩の値は、文献に基づき設定した。

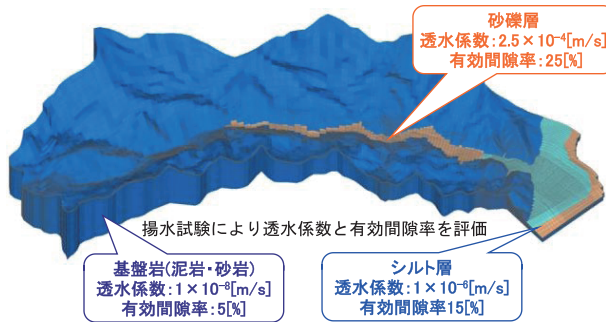


図-14 三次元統合型水循環シミュレーションモデル  
Fig. 14 Three-dimensional integration type water cycle simulation model

4.7 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-15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地下水中の重金属等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。

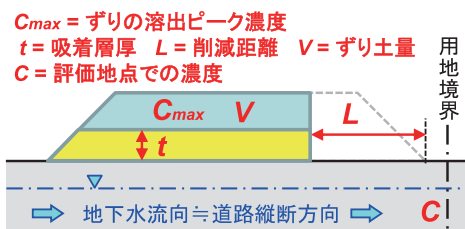


図-15 盛土方法を設計するための変数  
Fig. 15 The variable for designing the banking method

本検討では、ずりと河川掘削土との混合によりずりの溶出ピーク濃度  $C_{max}$  を、河川掘削土による吸着層の厚さを変えることにより  $t$  を、盛土範囲を限定することにより削減距離  $L$  を、それぞれ変化させることができる。そこで、これらの値を変化させて解析し、対策目標を達成でき、かつ現実的で効率的な施工ができる最適な  $C_{max}$ ,  $t$ ,  $L$  の値を求めた。

具体的には、現実的な施工を勘案して  $C_{max}$  を設定し、用地境界での砒素あるいはセレンの濃度  $C$  が地下水環境基準 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 ピッチで削減距離  $L$  を増加させて解析し、ずり土量  $V$  が最大

となる吸着層厚  $t$  と  $L$  の組合せを求めた。

4.8 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-16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 4.3 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。

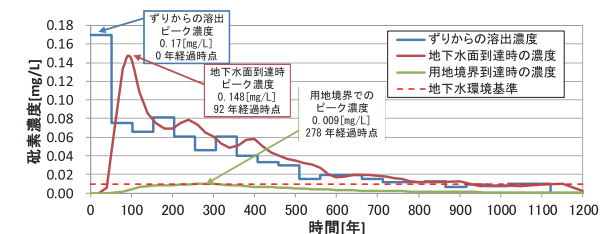
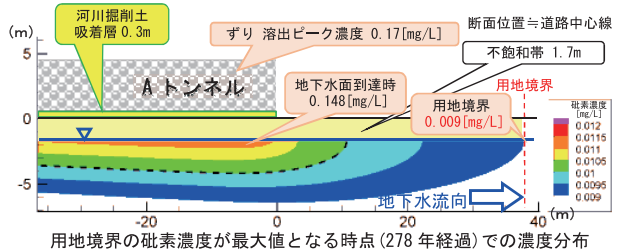
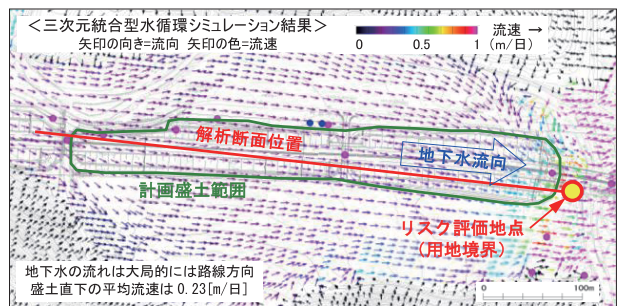


図-16 リスク評価結果の例  
Fig. 16 The example of a risk assessment result

4.9 コスト縮減

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で、河川掘削土による吸着層で対策可能と判断された。これにより、約 90% の大幅なコスト縮減を達成できた。溶出量



基準を超過する掘削ずりは、今後も約 50 万 m<sup>3</sup> 発生することが見込まれており、同様な方法で対策可能となれば、事業全体におけるコスト縮減額は相当なものとなる。

#### 4.10 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）付近で地下水の水質をモニタリングしている。リスク評価に基づく対策工事は着工後 1 年足らずではあるが、現在のところモニタリング結果に異常はない。

### 5. リスク評価結果の安全性

#### 5.1 安全に対する説明性の確保

リスク評価に基づく対策では、合理的な対策によるコスト削減がとかく着目されがちであるが、安全に対する説明性の確保が重要である。たとえば、対策にあたり住民説明会を行うことがあるが、リスク評価に基づく対策方法について住民に理解してもらうように説明し、同意を得るためには、明解な説明をする必要がある。

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、許容負荷への余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説明性は容易に確保されるが、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。

このため、安全性を担保する方法として、サイト概念モデルに基づくリスク評価の考え方を踏まえ、モデル化およびパラメータ設定における安全性への配慮について以下に示す。

#### 5.2 サイト概念モデルの構築と解析手法における安全性

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<sup>6)</sup> こと、地盤中の鉄バクテリアによる生物化学的反応<sup>7)</sup> 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、安全側の解析結果を得ることができる。

#### 5.3 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

よって安全性を確保する。本事例でず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、降雨浸透率は他現場での例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。これまでに得られたデータは約 1 ヶ月間と不十分で、今後検証が必要であるが、解析時に設定した法面部の降雨浸透率 15% よりもはるかに小さい 2% の暫定値が得られている。

### 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、最適な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.

- 6) 鈴木哲也・竹花大介・榊原正幸・板谷利久(2004):  
重金属を含有する掘削土砂の処理判定と対策,  
土と基礎, Vol. 52, No. 9, pp. 13 ~ 15.
- 7) 藤川陽子・濱崎竜英・菅原正孝・南 淳志・殿界和  
夫・鈴木市郎(2008):鉄バクテリア活用の水処理  
技術—1. 鉄バクテリア法の原理—. 用水と廃水,  
50, 18-25.