

# 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 —

旭川開発建設部 士別道路事務所 第2工務課 ○藤原 拓也  
高橋 裕樹  
パシフィックコンサルタンツ（株） 山本 隆広

一般国道40号のバイパス事業では、自然由来の重金属等を含むトンネル掘削土が大量に発生するため、その対策を合理化するためにサイト概念モデルに基づくリスク評価を平成23年度より数多く実施してきた。本論はそのとりまとめを行ったものである。リスク評価の条件設定のために実施した各種試験の結果を示したうえで、本路線での盛土計画や地盤特性を踏まえた感度解析を行い、条件が異なる複数の盛土箇所でのリスク評価の結果を総括した。

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、感度解析

## 1. はじめに

### (1) 事業概要

一般国道40号は旭川市から稚内市に至る延長250 kmの幹線道路で、このうち音威子府村から中川町の間の一部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のバイパス事業を行っている（図-1）。現在、4本のトンネルのうち、3本のトンネルは掘削が完了している。



図-1 バイパス全体図

### (2) 地質概要

本路線の基盤地質は、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形成する蛇紋岩などである。

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。

## 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や、自然由来の重金属等が土対法の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が、トンネルは坑口を除き土対法第4条（3,000 m<sup>2</sup>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対象外とされていることから、いわゆるトンネル掘削ずりや土対法の適用対象外とされている。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、より合理的な対策が検討され、その知見が「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）により2010年3月に示された。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（主に人）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。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。

対応マニュアルに示される対策工法のうち、北海道では、遮水工封じ込めから吸着層工法にすることでコストが縮減された事例が多い。本路線でも、当初は人工資材を用いた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大量に発生するため、さらなるコスト縮減と環境保全の両立が求められた。そこで、サイト概念モデルを用いたリスク評価に基づく対策が平成23～29年度に検討され、様々な条件でのリスク評価が実施された。また、リスク評価の条件や評価結果の妥当性を確認するための調査が実施されている。本論では、そのとりまとめを行う。

### 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してサイト概念モデルを構築する。

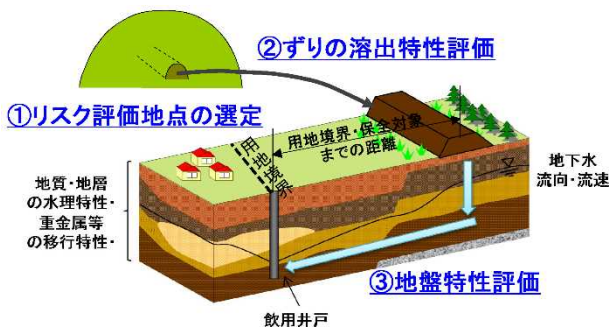


図-2 サイト概念モデルの構築と評価対象 (文献<sup>2)</sup> に加筆)

リスク評価地点は、本来であれば飲用井戸などの人への曝露地点に設定するが、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、本路線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、本路線の堆積岩から成るずりは重金属等の含有量基準に適合するため、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。

ずりの溶出特性や地盤特性の評価結果に基づき、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。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は、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。これらの方法のうち、本路線では吸着層工法を採用しており、吸着層に用いる材料(近傍の河川工事で発生する掘削土)の吸着性能や層の厚さを加味した解析により、吸着層を設計している。

### 4. リスク評価の具体的内容

#### (1) 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が、実測事例が少ないため、当初は盛土法面部は15%、舗装部は10%と仮定したが、その後の本路線での現地調査により盛土法面部は15～20%と確認できた(詳細は5(1)参照)。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-1)。第二溶出量基準を超過しているBトンネルについては、ずりと河川掘削土を混合する溶出量低減対策を講じており、河川掘削土を3割混合することにより、溶出濃度を約15%まで低減している。その他のパラメータの設定方法は、文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

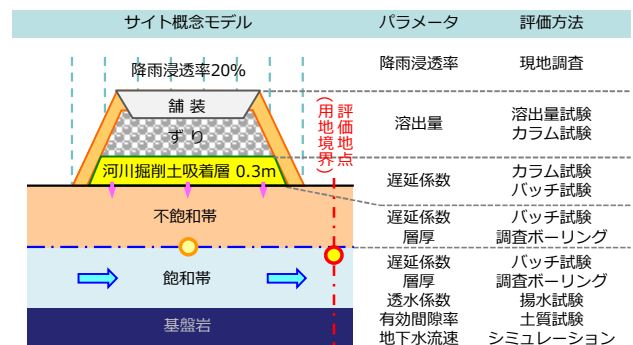


図-3 サイト概念モデルとパラメータの評価方法

表-1 ずりの溶出量

| トンネル  | 溶出量最大値(mg/L) |           |
|-------|--------------|-----------|
| A     | 砒素 0.17      |           |
| B     | 砒素 0.81      | セレン 0.012 |
| C     | 砒素 0.067     | セレン 0.019 |
| D 起点側 | 砒素 0.13      |           |
| D 終点側 | 砒素 0.075     |           |

## (2) 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採用した。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の評価した（図-4）。

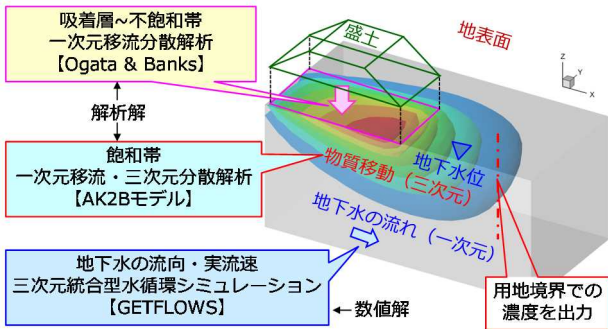


図-4 リスク評価における解析手法

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。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、シルト層と基盤岩の値は文献に基づき設定した。

## (3) リスク評価の条件と結果

平成23～29年度に実施したリスク評価の条件の一部とその評価結果を表-2に示す。本路線では、リスク評価の対象とした12箇所の盛土において、盛土するずりの種類（ずり発生元のトンネル）、盛土形状、降雨浸透率、地盤特性などの解析条件が異なる39ケースについて移流分散解析を行っており、評価地点ごとの解析結果もそれぞれ異なった濃度となっている。

表-2 リスク評価の条件と結果の一例

| 溶出特性 | トンネル※1               | A     | A       | A+D起   | D終     |        |
|------|----------------------|-------|---------|--------|--------|--------|
|      | 地質                   | 泥岩・砂岩 | 泥岩・砂岩   | 泥岩     | 泥岩     |        |
|      | 対象物質                 | 砒素    | セレン     | 砒素     | 砒素     |        |
| 濃度   | mg/L                 | 0.13  | 0.03    | 0.17   | 0.033  |        |
| 盛土形状 | 高さ                   | m     | 6.8     | 6.8    | 7.6    | 5.3    |
|      | 長さ                   | m     | 45      | 45     | 250    | 250    |
|      | 幅                    | m     | 34      | 34     | 48     | 36     |
|      | 評価地点までの距離 ※2         | m     | 37.0    | 37.0   | 11.4   | 4.9    |
| 解析条件 | 降雨浸透率                | %     | 20      | 20     | 15～10  | 15～10  |
|      | 吸着層                  | m     | 0.3     | 0.3    | 0.3    | 0.3    |
|      | 不飽和層①<br>シルト・砂質土     | m     | 0.8     | 0.8    | 1.7    | 1.4    |
|      | 不飽和層②<br>砂礫          | m     | 0.8     | 0.8    | —      | 1.1    |
|      | 飽和層<br>(帯水層)         | m     | 0.3     | 0.3    | 18.0   | 6.7    |
|      | 吸着層                  | —     | 69      | 2      | 25     | 103    |
|      | 不飽和層①<br>シルト・砂質土     | —     | 62      | 1      | 14     | 52     |
|      | 不飽和層②<br>砂礫          | —     | 185     | 2      | —      | 61     |
|      | 飽和層<br>(帯水層)         | —     | 185     | 2      | 28     | 61     |
|      | 地下水流速                | m/年   | 626     | 626    | 84     | 227    |
| 解析結果 | リスク評価地点<br>濃度 C      | mg/L  | 0.00002 | 0.0025 | 0.0043 | 0.0001 |
|      | 濃度比 C/C <sub>0</sub> | %     | 0.01%   | 8.33%  | 2.53%  | 0.30%  |
|      | ピーク濃度時期              | 年     | 150     | 6      | 80     | 220    |

※1: A: Aトンネル D起: Dトンネル起点側 D終: Dトンネル終点側

※2: 盛土法尻から評価地点までの距離

## 5. リスク評価の妥当性の検証

### (1) 降雨浸透率

移流分散解析における解析条件の妥当性を検証するため、盛土への降雨浸透率を路体盛土で実際に測定した。測定方法は、図-5に示すとおりで、法面部では路体盛土内に50 m<sup>2</sup>程度の遮水シートを埋め込み、そのシートの範囲内に浸透した雨水の量を盛土外に設置した転倒桁式の量水計で測定する方法で、3箇所を調査した。

降雨浸透率は、量水計で測定された水量の累積値を遮水シートの敷設範囲への総雨量で除すことで求めた。測定結果のうち、測定期間が5年と最も長い箇所の調査結果を図-5に示す。この調査箇所では、降雨浸透率が16%と算出された（図-6）。他の調査箇所では、2箇所ともに19%となっている。

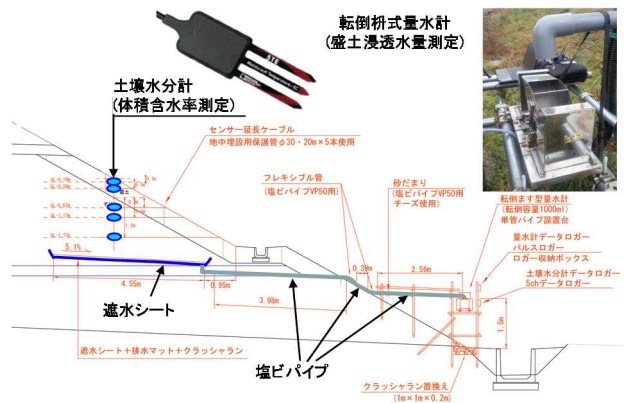


図-5 降雨浸透量の調査施設

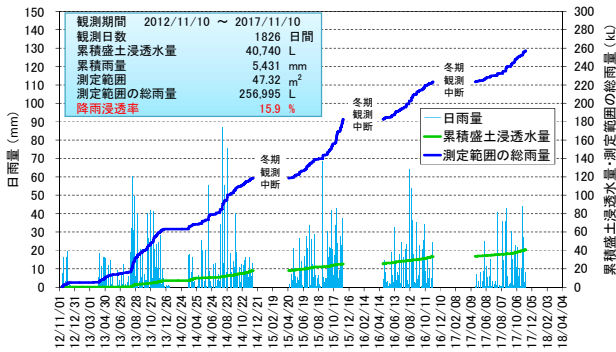
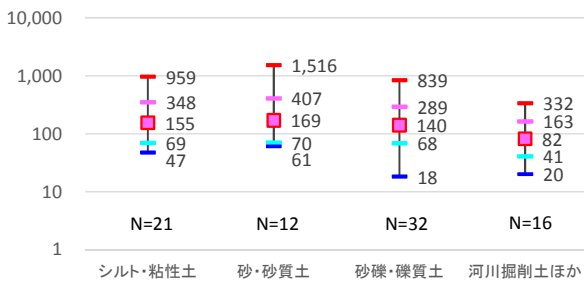


図-6 降雨浸透量調査結果の例

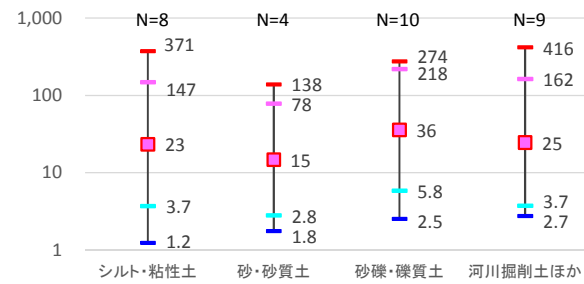
## (2) 遅延係数

原地盤あるいは吸着層の遅延係数は、盛土箇所と盛土するずりの種類ごとに異なることから、それぞれの条件でバッチ試験を行い、試験で得られた分配係数を評価し、遅延係数を算出している。その評価データは290件と多数あることから、ずりの種類および原地盤の土質ごとに整理しており、その一例を図-7および図-8に示す。グラフ中のNはデータ数を示す。砒素の遅延係数はセレンよりも大きく、また、原地盤の土質による遅延係数の違いはあまりないことが把握される。



【As】 - 最大値 - 最小値 □ 相乗平均 -  $\mu+1\sigma$  -  $\mu-1\sigma$

図-7 原地盤の遅延係数 (Aトンネル・砒素)



【Se】 - 最大値 - 最小値 □ 相乗平均 -  $\mu+1\sigma$  -  $\mu-1\sigma$

図-8 原地盤の遅延係数 (Aトンネル・セレン)

## (3) モニタリング結果

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のモニタリングを実施している。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、現在までのところ地下水環境基準の

超過は確認されていない。一部の路体盛土では、盛土の施工後2年間モニタリングを実施して異常がない箇所から随時モニタリングを終了しており、他の盛土においても同様にモニタリングを終了していく予定である。

## 6. リスク評価方法の簡便化

### (1) 本路線におけるリスク評価方法の簡便化の試み

移流分散解析により計算される値は、解析条件により変化するが、その変化の範囲は解析条件が変化する範囲で限定される。例えば、盛土高さであれば、本路線で盛土高さの最大値は計画上決まっており、これを超える盛土高さを解析条件とする必要はない。また、原地盤の不飽和層や飽和層(滞水層)の厚さは、ボーリング調査や地下水観測にて把握することができ、その厚さが変化する範囲内で解析条件を設定すればよい。原地盤の吸着性能についても、前述したようにバッチ試験によるデータが多数あるため、本路線で設定しうる遅延係数はほぼ把握されている(図-7・8)。

このように、数多くのケースでリスク評価を行う中で、解析条件はある程度の範囲で絞り込むことができる。したがって、本路線での解析におけるパラメータの幅を整理したうえで、現実的に各パラメータが変化する範囲で設定値を変化させた感度解析を全てのパラメータについて行えば、そのパラメータの感度を把握することができる。感度が大きいパラメータであれば、その設定を行うための調査や試験を十分に行う必要があり、感度が小さいパラメータであれば、その設定の重要度は低いと言える。そこで、本路線における各パラメータの標準的な値とその変化範囲を表-3に示すとおりを設定し、各パラメータを標準値で設定した標準モデルを図-9に示すとおり構築した。なお、ずり溶出特性のうち影響期間PVとは、溶出特性を評価する際に実施するカラム試験においてカラムへの通水量を示す間隙体積流Pore Volumes of Flowのことであり、1 PVはカラムに充填した試料の間隙体積に相当する。本路線でのカラム試験では通水量が10 PV程度になればカラム内のずり試料からの濃重金属等の溶出が概ね収束することから、10 PVを標準値とした。

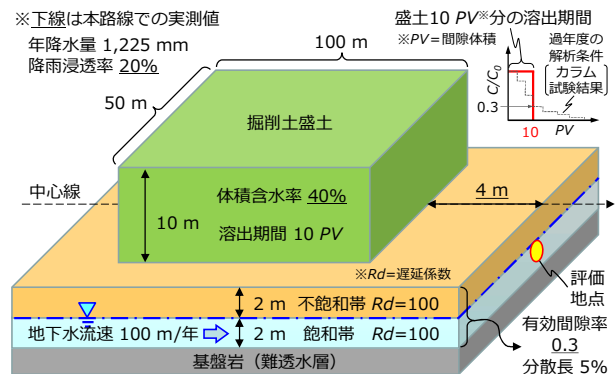


図-9 感度解析における標準モデル

表-3 標準モデルでの感度解析における各パラメータの設定値と解析結果

| 感度解析対象パラメータ | 単位    | パラメータ設定値 |      |       |      |      | 解析結果 $C/C_0$ |       |       |       |       | 標準値設定の考え方 |                          |                     |
|-------------|-------|----------|------|-------|------|------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------------------------|---------------------|
|             |       | 減少値      |      | 標準値   | 増加値  |      | 減少値          |       | 標準値   | 増加値   |       |           |                          |                     |
|             |       | ②        | ①    |       | ①    | ②    | ②            | ①     |       | ①     | ②     |           |                          |                     |
| 降雨浸透        | 降水量   | mm/年     | —    | —     | 1225 | —    | —            | —     | —     | —     | —     | —         | 実測値(アメダスデータ~2015年の平均値)   |                     |
|             | 降雨浸透率 | —        | 0.1  | 0.15  | 0.2  | 0.25 | 0.3          | 0.009 | 0.014 | 0.018 | 0.022 | 0.025     | 実測値(降雨浸透量調査結果の平均値)       |                     |
| 溶出特性        | 濃度    | —        | 0.1  | 0.5   | 1    | 2    | 5            | 0.002 | 0.009 | 0.018 | 0.036 | 0.090     | 感度解析結果を利用しやすいように濃度比で1とする |                     |
|             | 影響期間  | PV       | 5    | 7.5   | 10   | 20   | 50           | 0.005 | 0.014 | 0.018 | 0.024 | 0.025     | カラム試験で重金属等の溶出が約10PVで概ね収束 |                     |
|             | 体積含水率 | —        | —    | —     | 0.4  | —    | —            | —     | —     | —     | —     | —         | 実測値(土壌水分計測定結果の平均値)       |                     |
| 盛土形状        | 盛土高   | m        | 5    | 7.5   | 10   | 12.5 | 15           | 0.010 | 0.014 | 0.018 | 0.021 | 0.022     | 2段盛(小段2つ分)を想定            |                     |
|             | 盛土長   | m        | 10   | 50    | 100  | 200  | 500          | 0.004 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.025     | 既存の条件設定より概略設定            |                     |
|             | 盛土幅   | m        | 5    | 25    | 50   | 100  | 250          | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.018     | 既存の条件設定より概略設定            |                     |
| 評価地点        | 距離    | m        | 1    | 2     | 4    | 10   | 20           | 0.020 | 0.019 | 0.018 | 0.016 | 0.014     | 盛土法尻からの距離                |                     |
| 原地盤         | 不飽和帯  | 層厚       | m    | 0.5   | 1    | 2    | 5            | 10    | 0.024 | 0.021 | 0.018 | 0.013     | 0.000                    | 琴平地区上流部から中流部の平均的な層厚 |
|             |       | 有効間隙率    | —    | 0.2   | 0.25 | 0.3  | 0.35         | 0.4   | 0.032 | 0.023 | 0.018 | 0.014     | 0.011                    | 揚水試験結果の平均値          |
|             |       | 遅延係数     | —    | 10    | 50   | 100  | 200          | 500   | 0.254 | 0.047 | 0.018 | 0.005     | 0.001                    | 吸着性能試験結果で普遍的な値      |
|             | 飽和帯   | 分散長      | m    | 0.025 | 0.05 | 0.1  | 0.2          | 0.3   | 0.023 | 0.021 | 0.018 | 0.015     | 0.014                    | 移行距離(不飽和層厚)の5%      |
|             |       | 浸透速度     | m/年  | 0.61  | 0.70 | 0.82 | 0.98         | 1.23  | 0.011 | 0.014 | 0.018 | 0.023     | 0.032                    | 揚水試験結果の平均値          |
|             |       | 層厚       | m    | 0.5   | 1    | 2    | 5            | 10    | 0.039 | 0.022 | 0.018 | 0.018     | 0.018                    | 琴平地区上流部から中流部の平均的な層厚 |
| 飽和帯         | 有効間隙率 | —        | 0.2  | 0.25  | 0.3  | 0.35 | 0.4          | 0.027 | 0.022 | 0.018 | 0.015 | 0.013     | 揚水試験結果の平均値               |                     |
|             | 遅延係数  | —        | 10   | 50    | 100  | 200  | 500          | 0.019 | 0.019 | 0.018 | 0.015 | 0.009     | 吸着性能試験結果で普遍的な値           |                     |
|             | 分散長   | m        | 0.05 | 0.1   | 0.2  | 0.4  | 0.6          | 0.036 | 0.025 | 0.018 | 0.013 | 0.012     | 移行距離(盛土法尻から評価地点)の5%      |                     |
|             | 地下水流速 | m/年      | 25   | 50    | 100  | 250  | 500          | 0.042 | 0.031 | 0.018 | 0.008 | 0.004     | 一般的な地下水流速                |                     |

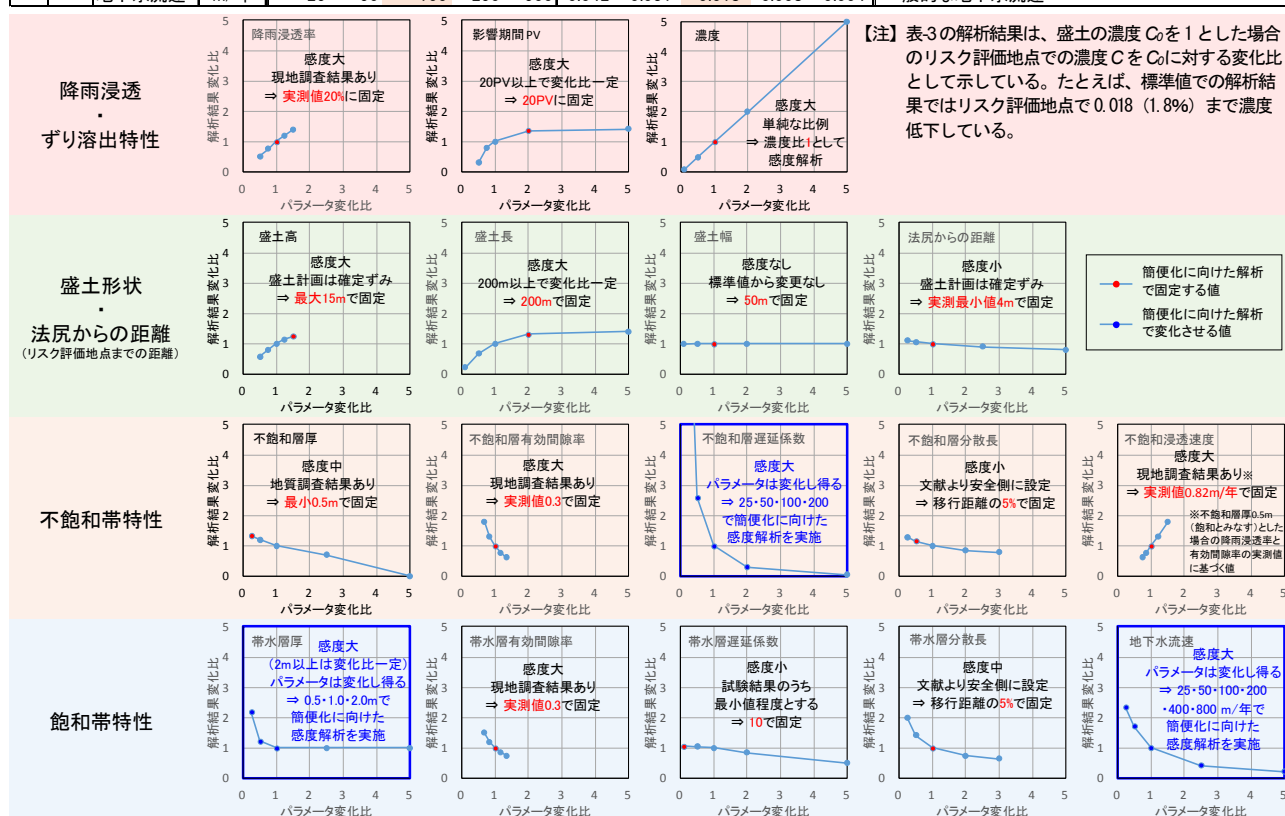


図-10 標準モデルでの感度解析結果

## (2) 標準モデルによる感度解析

標準モデルによる感度解析は、パラメータ19項目のうち値を固定した降水量と体積含水率を除く17項目について、標準値を増減した合計69ケースで実施した。その結果を表-3および図-10に示す。図-10のグラフ横軸はパラメータの変化比、縦軸は解析結果の変化比で、グラフの曲線の傾きが大きいほど感度が高く、傾きがなければ感度はないと言える。感度の大小は各グラフに示すとおりで、パラメータと解析結果の変化が比例関係となるものや、一定の値より大きいと感度が小さくなるものがある。

これらの感度が大きいパラメータのうち、降雨浸透率、濃度、不飽和層有効間隙率、不飽和浸透速度、帯水層有効間隙率は、各種試験により把握された実測値があるた

めパラメータ値を固定することができる。また、盛土高、法尻から(評価地点まで)の距離は、道路計画より予め決まっているため、これらのパラメータ値も固定できる。盛土長は200 m以上になると感度が小さくなることから、パラメータ値を200 mと固定することができる。このように整理すると、感度が高く現地状況によって変化し得るパラメータは、不飽和層遅延係数、帯水層厚、地下水流速の3項目であると把握された。

## (3) リスク評価の簡便化に向けた感度解析

不飽和帯の遅延係数 $R_d$ 、地下水流速 $v$ 、飽和帯層厚 $H$ 、についてより詳細に感度解析を行ったところ、遅延係数 $R_d$ ・帯水層厚 $H$ ・地下水流速 $v$ と濃度 $C$ の関係性が把握さ

れた(図-11)。このように、 $Rd \cdot H \cdot v$ が分かれば、グラフに示す近似曲線を用いて評価地点での濃度比を簡便に見積もることができ、概略のリスク評価や要対策土の盛土場所選定の検討などに活用できる(図-11)。たとえば、各種調査・試験から不飽和帯の遅延係数 $Rd=200$ 、帯水層厚 $H=2.0$ m、地下水流速 $v=250$ m/年と分かれば、 $H$ と $v$ から図-12のグラフの横軸は500の位置となり、これが $Rd=200$ の曲線と交差位置の縦軸の値を読み取れば、盛土の初期濃度に対するリスク評価地点の濃度は $C/C_0 \approx 0.006$ になることが速やかに読みとれる(図-12の青矢印と文字)。この濃度比から、盛土の濃度が $0.2$  mg/Lとすれば、リスク評価地点の濃度は $0.2$  mg/L  $\times$   $0.006 = 0.0012$  mg/Lと計算され地下水環境基準未満となるため、リスクは問題ないレベルであると評価できる。

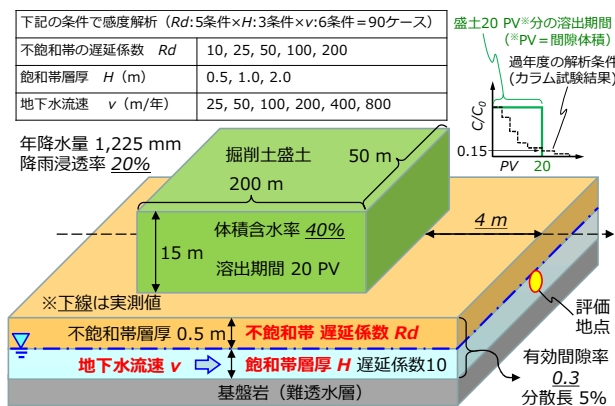


図-11 リスク評価の簡便化に向けた感度解析

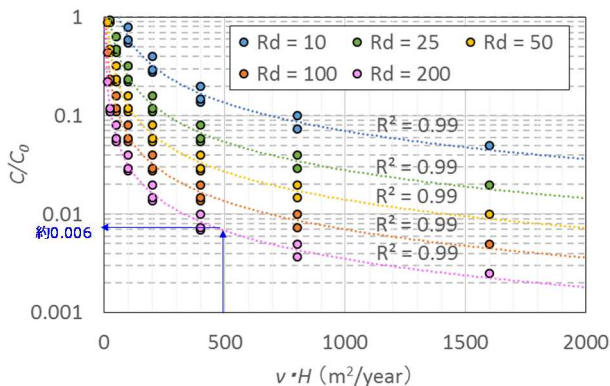


図-12 リスク評価の簡便化に向けた感度解析結果

#### (4) 簡便化したリスク評価手法の検証

簡便化した手法の妥当性を検証するために、簡便化手法で得られた近似曲線に過年度の解析結果をプロットし、その関係を確認した(図-13)。グラフは縦軸・横軸とも対数であるため近似曲線は直線で示されている。プロットされた過年度の解析結果は、すべてのケースで近似曲線で示される濃度比を下回っており、簡便化した評価方法は問題ない(安全側となる)ことを確認した。ただし、標準モデルを安全側に構築する上でいくつかの前提条件を設けていることから、簡便化手法による評価にあたっては、表-4に示す適用条件を確認する必要がある。

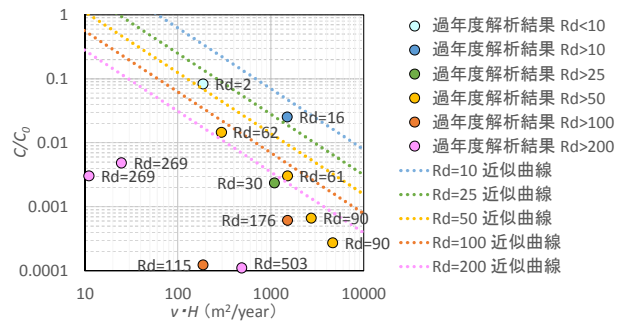


図-13 簡便化したリスク評価手法の検証

表-4 本路線でのリスク評価の簡便化手法の適用条件

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| ✓ 盛土高さ15 m以下    | ✓ 飽和帯層厚0.5 m以上  |
| ✓ 不飽和帯層厚0.5 m以上 | ✓ 飽和帯遅延係数10以上   |
| ✓ 不飽和帯遅延係数10以上  | ✓ 地下水流速25 m/年以上 |

## 7. まとめ

移流分散解析によるリスク評価では、評価箇所ごとの溶出特性や地盤特性などの解析条件を設定し、評価地点の濃度を計算するのが一般的である。本路線でも、個別に条件を設定して数多く解析したところ、得られた解析結果はある程度の範囲となるため、リスク評価の簡便化を試みた。本論で示したように、不飽和層と飽和層(帯水層)が存在する原地盤上に一般的な台形状の道路路体盛土を行う場合において、現地条件を反映した包括的な標準モデルで感度解析を行うことにより、グラフの読み取りで評価地点の濃度を簡便に把握する方法を考案することができた。今後、移流分散解析によるリスク評価を行う現場において、概略のリスク評価や評価結果の妥当性を検討する際に本論が一助となれば幸いである。

謝辞：本検討にあたり、北海道大学大学院工学研究院の五十嵐敏文教授およびオハイオ州立大学の茨木希准教授には、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) 荒木大輔・掛田浩司・宮川浩幸(2013)：コスト削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24年度北海道開発技術研究発表会。
- 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.