

自然由来の重金属による汚染岩石の  
地盤汚染対策工に関する研究

共同研究報告書

平成23年4月

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所  
国立大学法人 北海道大学

Copyright © (2011) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# 自然由来の重金属による汚染岩石の 地盤汚染対策工に関する研究

## 共同研究報告書

独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所  
寒地基礎技術研究グループ 防災地質チーム

上席研究員 伊東 佳彦  
主任研究員 日下部 祐基  
研究員 岡崎 健治  
研究員 田本 修一  
元副室長 中川 伸一※<sup>1</sup>  
教授 五十嵐 敏文

国立大学法人 北海道大学大学院工学研究院

※1：現 北海道開発局釧路開発建設部

### 要旨

本研究は、合理的・経済的な重金属汚染対策工法の構築を目的として、砒素が溶出する岩石を用いた覆土による重金属汚染対策工法に関する実験的な検討を行った。試験の内容は、覆土材料を重金属移行抑止層として敷土に用いた場合、その有効性を評価するための吸着試験、逐次溶出試験であって、これらの結果をもとに敷土底部より漏洩する砒素の溶出・拡散評価を行った。その結果、覆土材料に使用した床掘土及び購入土は、砒素の吸着能を有し、砒素の固液相濃度をヘンリー式で仮定することにより表現が可能となった。そして、細粒分を含む現地発生土を用いることにより、砒素漏洩濃度の低減が可能であったことから、現地発生土の吸着効果を利用した処理対策が有効であることが明らかとなった。

キーワード：重金属、地盤汚染対策、覆土、拡散、吸着

## ま え が き

建設工事において遭遇する自然的原因による重金属に対しては、平成 15 年 9 月に刊行された「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)」に準拠して評価・対策が実施されている。しかし、同マニュアルは平成 15 年 2 月に施行された土壤汚染対策法に準拠しているが、同法は本来、自然的原因による岩石ズリ中の有害重金属は対象外としており、より合理的な評価・対策法が求められている。特に北海道では近年、建設工事において有害重金属や酸性水の流出が発生する事例が確認されており、施工上あるいは事業費上の課題となっている。

本共同研究ではこのようなことを背景に、合理的な重金属の対策法の技術開発を目指して、平成 17 年度から平成 19 年度の約 3 カ年にわたり行ったものである。本報告書では、実現場において覆土を施した盛土の実験、及び室内試験結果を基に重金属の溶出・拡散評価を行い、その成果をとりまとめたものである。

本共同研究の参加者ならびに関係者の方々のご支援、ご協力に深く感謝するとともに今後とも本分野の研究がますます進展することを期待する。

## 目 次

1. はじめに .....	3
2. 実験の概要	
2. 1 実施場所 .....	4
2. 2 実験に用いた試料の材料特性 .....	5
2. 3 実験ケース .....	9
2. 4 実験に用いた計測器 .....	10
2. 5 バッチ式吸着試験 .....	11
2. 6 逐次溶出試験 .....	12
3. 実験結果	
3. 1 試験盛土の施工 .....	13
3. 2 モニタリング結果 .....	15
3. 3 浸出水水質分析結果 .....	16
3. 4 バッチ式吸着試験 .....	19
3. 5 逐次溶出試験 .....	19
4. ヒ素の溶出・拡散評価 .....	20
5. おわりに .....	23
<参考文献> .....	24

## 1. はじめに

### 1. 1 研究目的

本共同研究は、自然由来の重金属類を含有する岩石のずりを用いて、実施工規模の各種対策工を含めた試験盛土を行い、盛土内に埋設した各種計器の実測データを取得・分析することにより盛土内における重金属類の溶出過程を解明する。また、嫌気性条件下における重金属類の溶出抑制効果を検証し、重金属類を含有する岩盤掘削ずりの合理的な処理対策法の構築を目的とする。

### 1. 2 研究実施場所

寒地土木研究所、北海道大学大学院工学研究科、上川町

### 1. 3 研究期間

平成17年11月1日～平成20年3月31日

### 1. 4 共同研究担当者

機 関 名	所 属 名	氏 名	役 職 名
寒地土木研究所	寒地基礎技術研究グループ 防災地質チーム	伊東 佳彦	上席研究員
		日下部 祐基	主任研究員
		岡崎 健治	研究員
		田本 修一	研究員
		中川 伸一	(元副室長)
北海道大学	大学院工学研究院	五十嵐 敏文	教 授

## 2. 実験の概要

本実験で対象とする重金属は、ヒ素とした。ヒ素の溶出形態は、一般的に酸化にとまないヒ素を含む硫化鉱物が分解する、もしくは還元にとまない酸化物などから溶出することが知られている。また、ヒ素の溶出は、pHの影響も大きく受ける。ここで、図-1にヒ素、鉄、硫黄、酸素、水素を含む系におけるpHと酸化還元電位Ehの関係<sup>1)</sup>を示す。この図からヒ素は、pHとEhの変化により様々な鉱物と共存していることがわかる。参考文献<sup>2)</sup>で述べた種々の試験結果から試験後の検液のpHが、1~3程度を示す酸性のもの、5~10程度を示す弱酸からアルカリ性のものとに分けられことから、本実験では主にpH5~10の弱酸性からアルカリ性領域における酸化還元電位に着目して検討を行った。酸性を示すものは、ヒ素と共存する鉄や粘土鉱物などが溶解し、環境基準値を超えるヒ素の溶出が想定されたため、実験の対象外とした。図-1よりEhが正を示すと酸化状態、負を示すと還元状態を表す。岩石ずりが大気中に暴露されると酸化状態(Ehが正の値)になり、雨水により種々の鉱物と化学反応を起こす。本実験は地下水位以上の盛土において、覆土による酸素の進入を抑制することにより岩石の酸化を抑制し、ヒ素の溶出を抑制することを想定した。

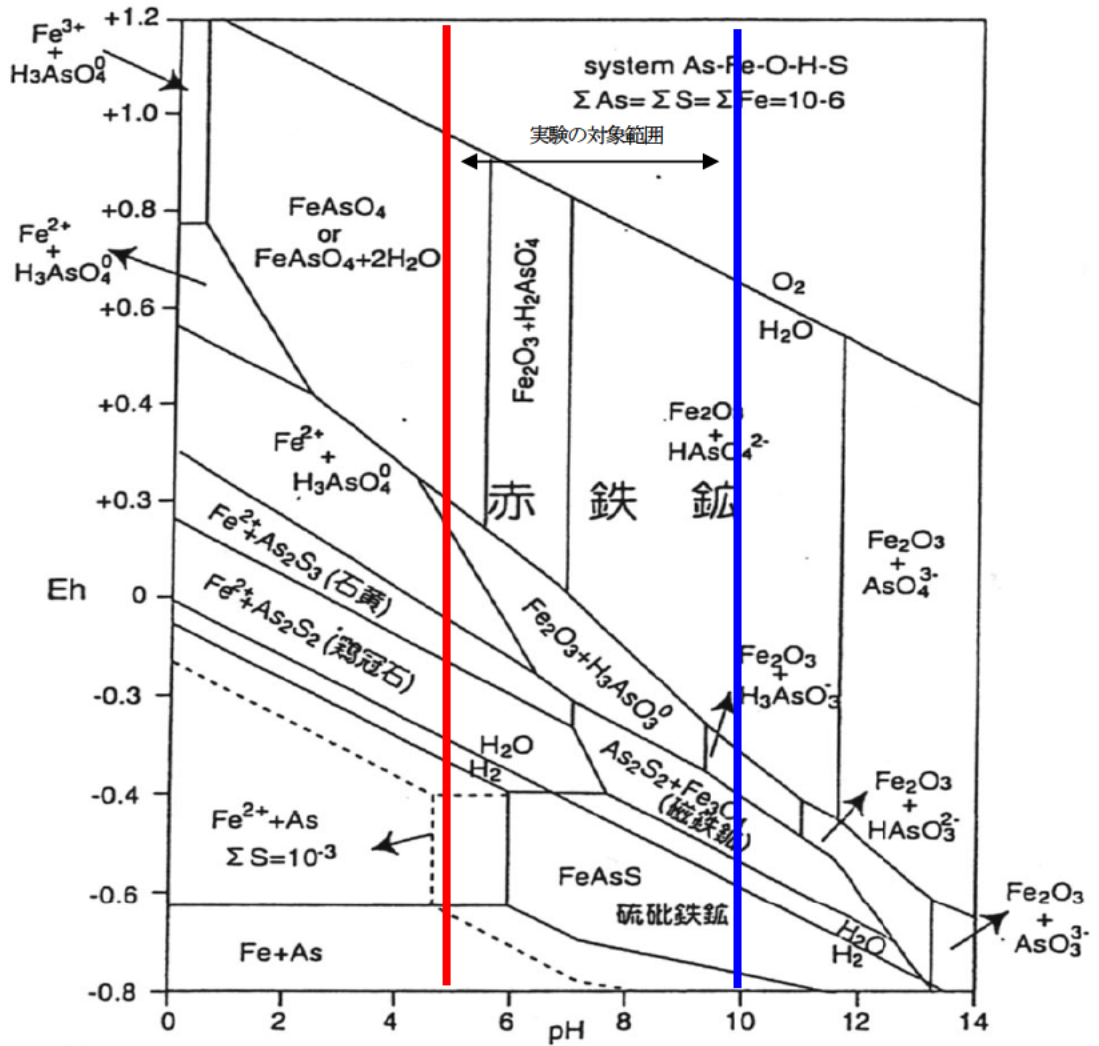


図-1 As-Fe-O-S系のEh-pHダイアグラム<sup>1)</sup>

## 2. 1 実施場所

実験は、図-2に示す旭川開発建設部管内一般国道450号旭川紋別自動車道上川町中越地区において行った。同地区において一般国道450号旭川紋別自動車道中越トンネルよりヒ素を含有する掘削ずりが発生しており、現場実験ではこの掘削ずりを用いた。

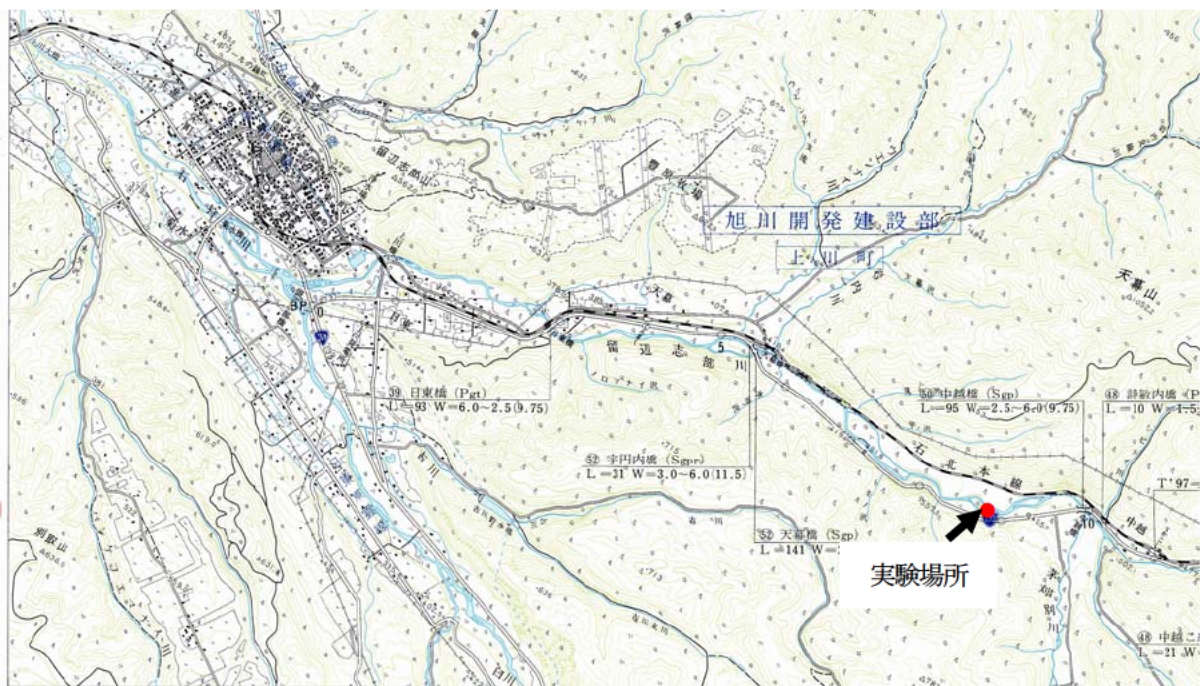


図-2 実験実施場所

## 2. 2 実験に用いた試料の材料特性

実験に用いた試料の材料特性について、表-1に示す。また、各試料の粒度試験結果を図-3に、締固め試験結果を図-4に、及び締固め度と透水係数の関係を図-5にそれぞれ示す。覆土による盛土実験は、雨水による酸素の進入を可能な限り抑制することを主眼としているため、覆土材料は細粒分（粘土・シルト分）をある程度含み、かつ転圧により密度が上げやすい（施工性の良い）材料であること、すなわち透水係数を下げやすいことが条件となる。沼田砂利産および小椋組産の試料を採取し、室内土質試験（締固め試験）を行った結果、沼田砂利の間隙率 $n=37.4\%$ 、小椋組の間隙率 $n=39.4\%$ で沼田砂利の方が間隙率が小さいため、締め固めしやすい土砂と判断し、沼田砂利産のものを選定した。



表-1 各試料の材料特性

	試料番号 (深さ)	沼田砂利	小椋組	床堀土	粘板岩
一般	湿潤密度 $\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>				
	乾燥密度 $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>				
	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	2.615	2.555	2.649	2.731
	自然含水比 $w_n$ %				
	間隙比 $e$				
	飽和度 $S_r$ %				
	強熱減量 $L_i$ %				
粒度	pH				
	石分 75mm以上 %	0.0	0.0	0.0	0.0
	礫分 2~75mm %	28.4	24.1	2.0	65.9
	砂分 0.075~2mm %	50.0	52.6	50.6	19.8
	シルト分 0.005~0.075mm %	12.1	13.3	25.4	7.0
	粘土分 0.005mm未満 %	9.5	10.0	22.0	7.3
	最大粒径 mm	53	75	9.5	37.5
均等係数 $U_c$	150.4	134.5	164.4	917.4	
コンシステンス特性	液性限界 $w_L$ %				
	塑性限界 $w_p$ %				
	塑性指数 $I_p$				
分類	分類名	粘性土質礫質砂	火山灰質礫質砂	粘性土質砂	粘性土まじり砂質礫
	分類記号	(SCsG)	(SVG)	(SCs)	(GS-Cs)
	特記事項				
締固め	試験方法	B-c	B-c	B-c	B-c
	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ g/cm <sup>3</sup>	1.638	1.548	1.196	2.131
	最適含水比 $w_{opt}$ %	20.3	23.0	40.1	8.8
透水	透水係数 $k_{15}$ (cm/s)	3.62E-04		5.54E-04	4.36E-02
	供試体作製条件	$\rho_{dmax}85\%, w_{opt}$		$\rho_{dmax}85\%, w_{opt}$	$\rho_{dmax}85\%, w_{opt}$
	透水係数 $k_{15}$ (cm/s)	2.23E-04		1.71E-04	3.22E-02
	供試体作製条件	$\rho_{dmax}90\%, w_{opt}$		$\rho_{dmax}90\%, w_{opt}$	$\rho_{dmax}90\%, w_{opt}$
	透水係数 $k_{15}$ (cm/s)	4.30E-05		1.29E-05	1.65E-02
	供試体作製条件	$\rho_{dmax}95\%, w_{opt}$		$\rho_{dmax}95\%, w_{opt}$	$\rho_{dmax}95\%, w_{opt}$
水	間隙率 $n$ (%)	37.4	39.4	54.9	22.0

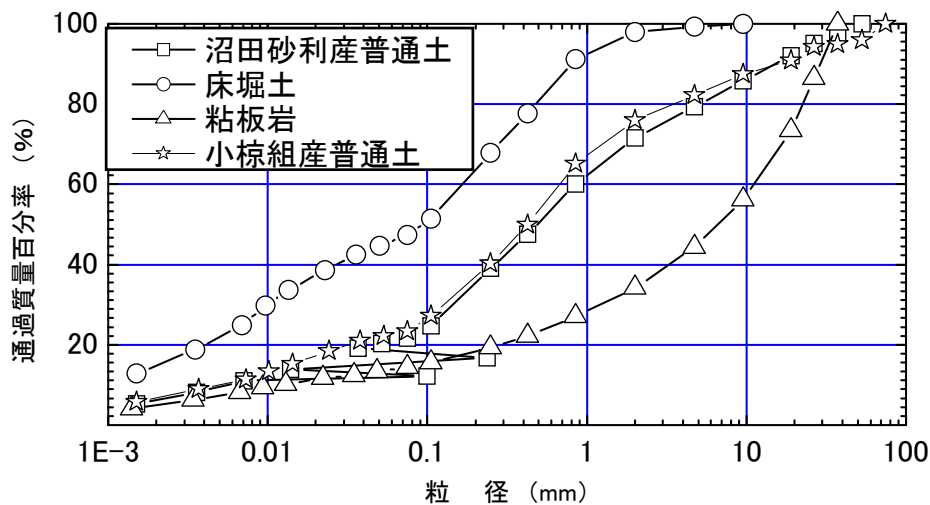
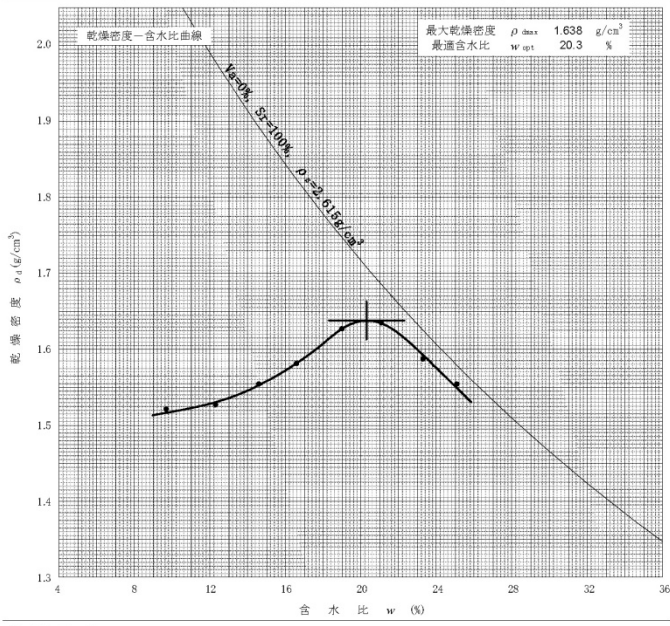
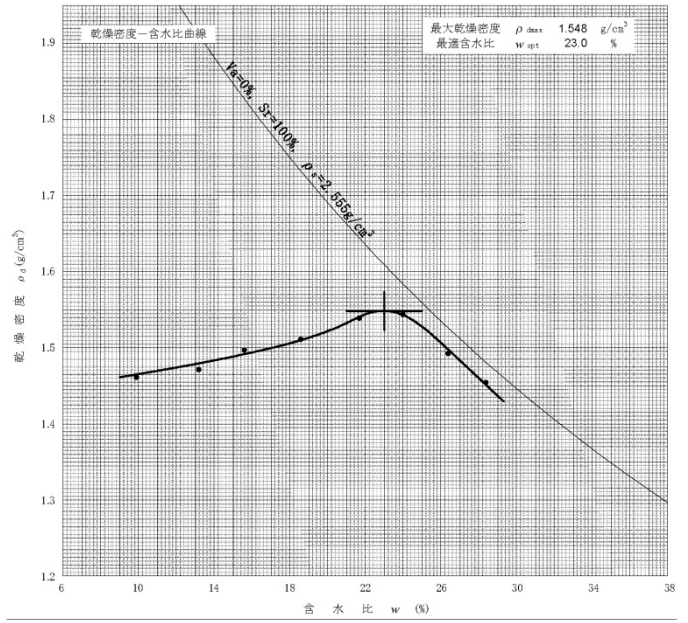


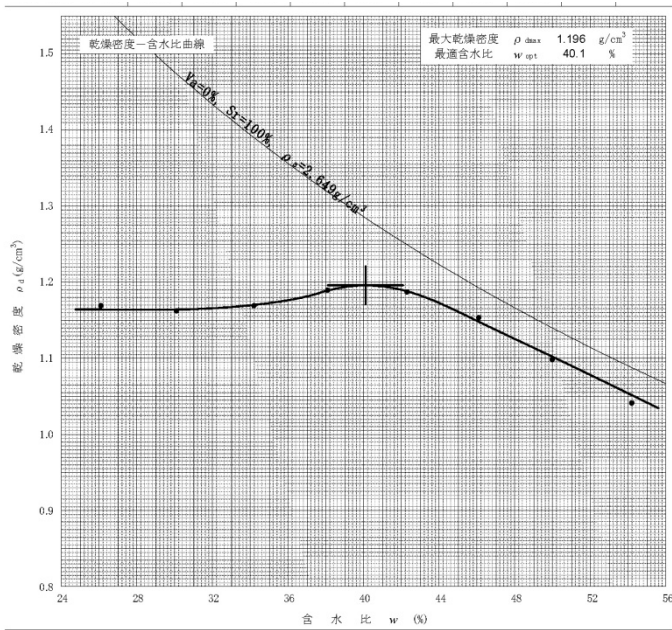
図-3 各試料の粒度試験結果



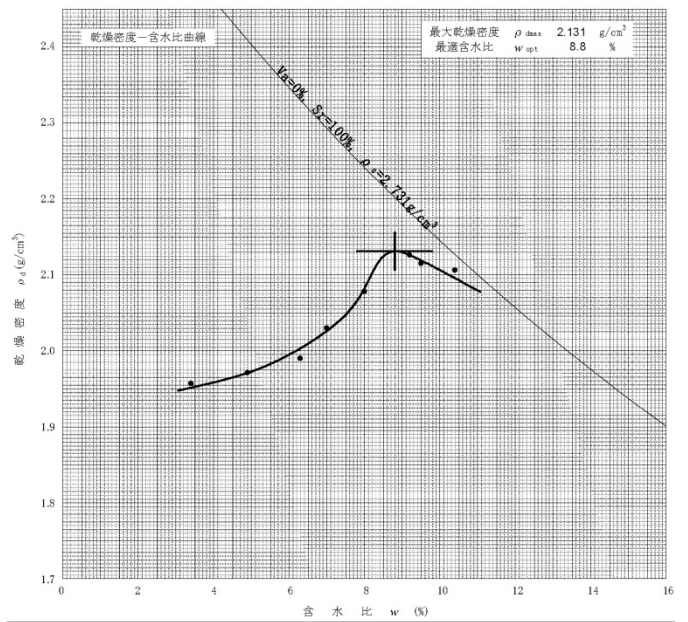
(1) 沼田砂利産普通土



(2) 小椋組産普通土



(3) 床堀土



(4) 粘板岩

図-4 各試料の締固め試験結果

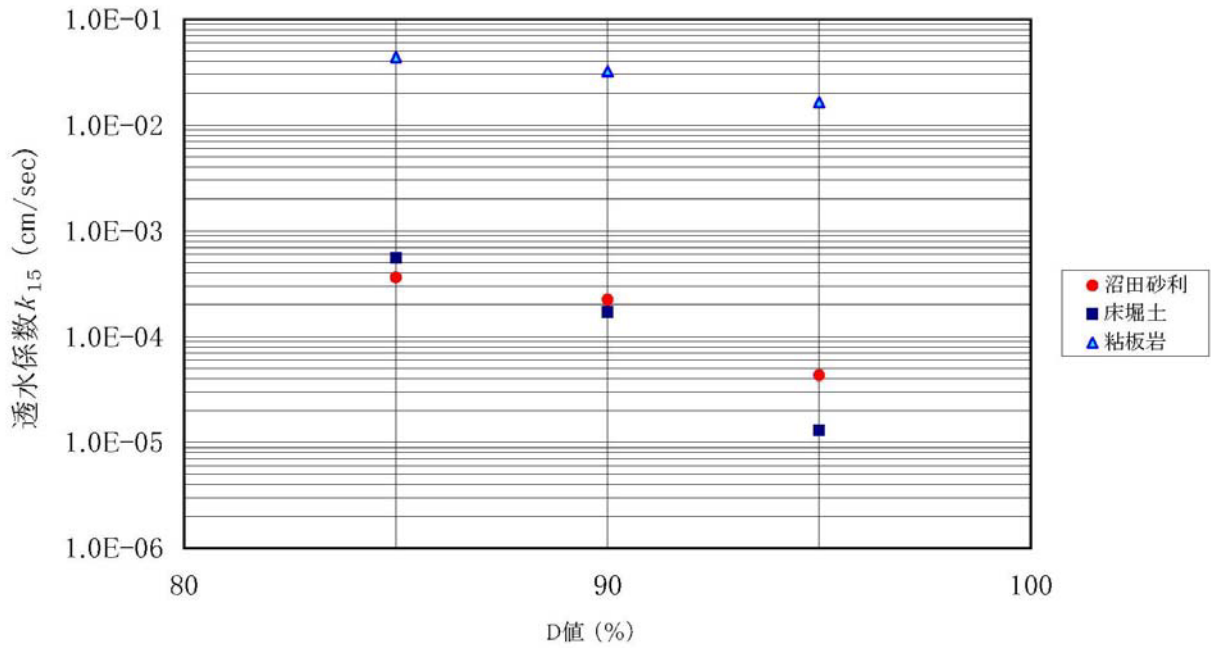


図-5 締固め度と透水係数の関係

次に、覆土材料の鉱物化学的特性を把握するため、X線粉末回折結果を表-2に示す。床堀土、普通土とも石英、長石、クリストバライトのほか、方解石、黄鉄鉱が認められた。また、粘土鉱物としては、2八面型緑泥石と雲母粘土鉱物が認められる。

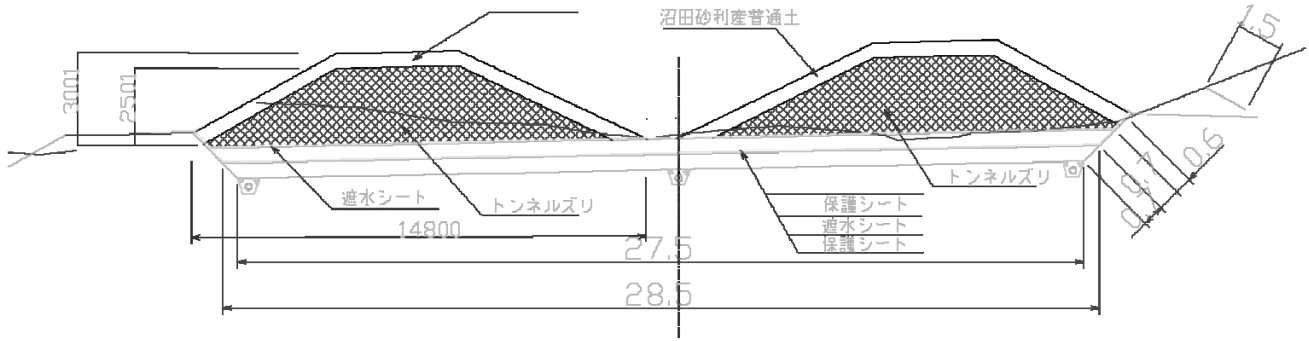
表-2 X線回折結果一覧表

試料名	含有鉱物														
	主要造岩鉱物						その他			粘土鉱物					
	石英	長石類	黒雲母	角閃石	輝石	カンラン石	クリストバライト	方解石	黄鉄鉱	スメクタイト	バーミキュライト	緑泥石	カオリナイト	雲母粘土鉱物	ハロイサイト
床堀土	○	○					○	○				△	-	△	
沼田砂利	○	◎					○	△	△			△	-	△	

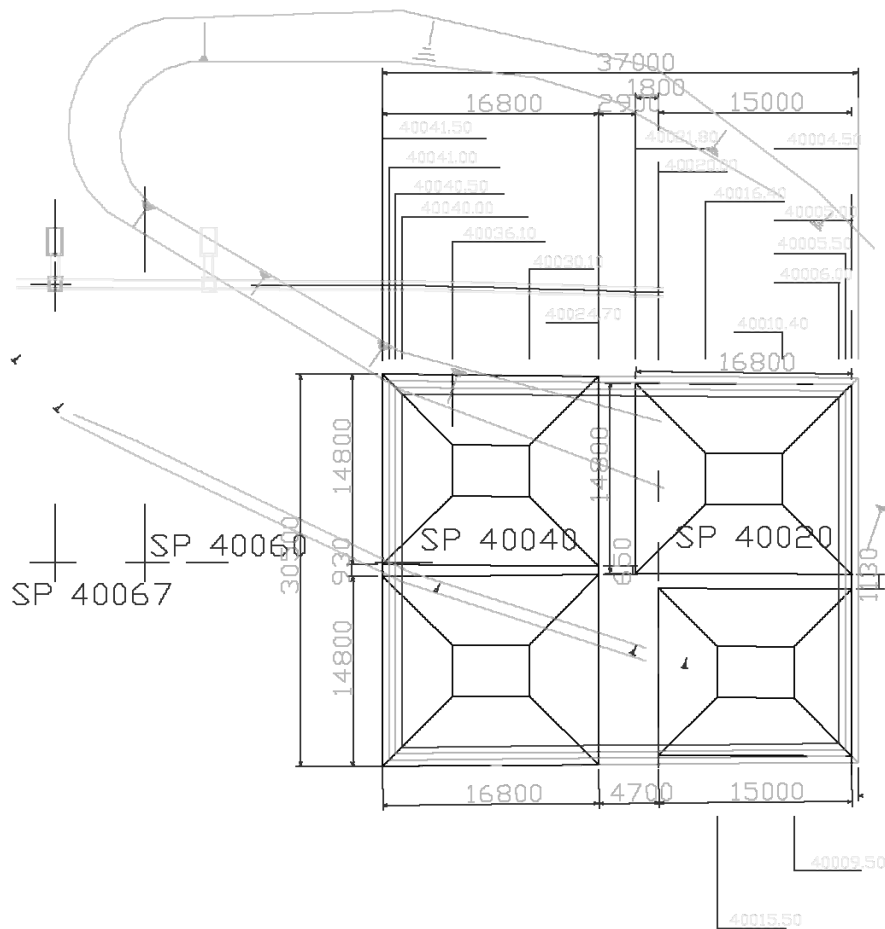
◎ : 明瞭でピーク強度非常に高い      + : 存在するがピーク不明瞭  
 ○ : 明瞭でピーク強度高い              - : 不明瞭(可能性あり)  
 △ : ピークは明瞭だが強度小さい

### 2. 3 実験ケース

図-6に盛土形状を、表-3に実験ケース一覧をそれぞれ示す。図-6に示すように13~16.8 m四方で高さ2.5~3.0 m程度の盛土を複数の異なる材料で覆土することによって合計4基築造した。覆土材料として表-3に示すように、ケース1では覆土のない状態、ケース2では床堀土(粘性土)、ケース3では比較的細粒分の多い購入土、ケース4ではケース3で用いた購入土に酸素消費材としてウッドチップを3%混入させそれぞれ実験に供した。



(1) 断面図



(2) 平面図

図-6 盛土形状

表-3 実験ケース一覧表

ケース	1	2	3	4
路体材料	汚染ずり	汚染ずり	汚染ずり	汚染ずり
覆土材料	—	床堀土	沼田砂利産普通土	沼田砂利産普通土 + 3%ウッドチップ
路体締固め度D	85%以上	85%以上	85%以上	85%以上
路体乾燥密度	1.811g/cm <sup>3</sup> 以上	1.811g/cm <sup>3</sup> 以上	1.811g/cm <sup>3</sup> 以上	1.811g/cm <sup>3</sup> 以上
覆土締固め度D	—	95%以上	85~90%	85~90%
覆土乾燥密度	—	1.136g/cm <sup>3</sup> 以上	1.392~1.474g/cm <sup>3</sup>	1.392~1.474g/cm <sup>3</sup>
路体透水係数k	4.36 × 10 <sup>-2</sup> (D=85%)	4.36 × 10 <sup>-2</sup> (D=85%)	4.36 × 10 <sup>-2</sup> (D=85%)	4.36 × 10 <sup>-2</sup> (D=85%)
覆土透水係数k	—	1.29 × 10 <sup>-5</sup> (D=95%)	3.62 × 10 <sup>-4</sup> (D=85%) ~ 2.23 × 10 <sup>-4</sup> (D=90%)	3.62 × 10 <sup>-4</sup> (D=85%) ~ 2.23 × 10 <sup>-4</sup> (D=90%)

## 2. 4 実験に用いた計測器

実験に用いた計測器の設置位置について図-7 に示す。盛土内のモニタリングは、TDR による土中水分量、熱電対による地温、ガルバニ式酸素濃度計による間隙気相中の酸素濃度を測定項目とし、各計測機器は全ケースに対して盛土天端から 0.5m、1.5m の深度で埋設した。計測は平成 17 年 12 月から平成 19 年 7 月まで行った。また、実験期間中、盛土内の溶出水を分析するため、計測機器と同深度において土壤溶液採取器を全ケースに設置した (写真-1)。

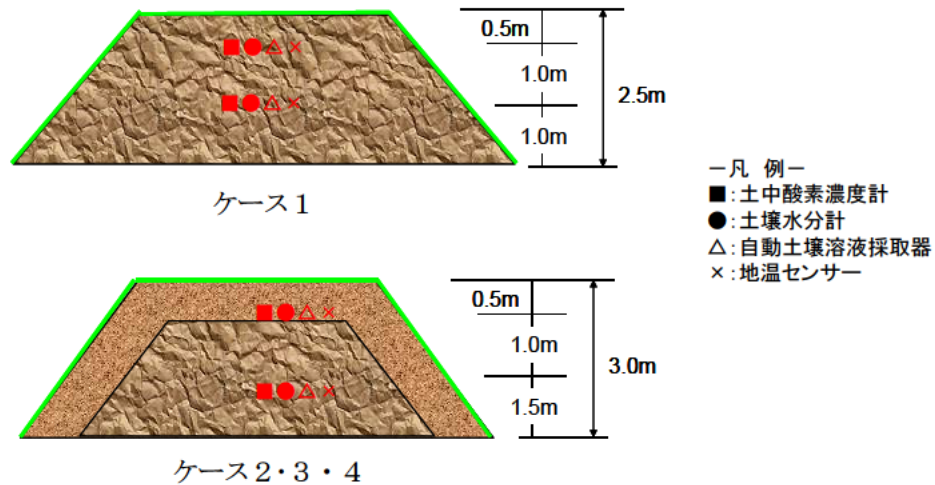


図-7 計測器の設置位置



写真-1 計測器の設置状況

## 2. 5 バッチ式吸着試験

覆土を施した盛土底部からのヒ素の溶出拡散評価のため、現場実験で用いた試料を使いバッチ式吸着試験及び逐次溶出試験を行った。試験に用いた試料の物理特性を表-4に示す。

表-4 各試料の物理特性

試料名	床堀土	購入土	掘削ずり (粘板岩)
自然含水比 $W_n(\%)$	25.9	26.1	15.4
風乾試料含水比 $W_{dry}(\%)$	15.0	8.8	-
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.649	2.615	2.751
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.0939	0.488	6.64
均等係数 $U_c$	164.4	150.4	917.4
細粒分含有率 $F_c(\%)$	47.4	21.6	14.3
地盤材料の分類	SCs	SCsG	GS-Cs

バッチ式吸着試験の模式図を図-8 に示す。試験は、20～25℃の温度条件で粉碎した粘板岩 50g に脱イオン水 500mL を加え、往復振とう機を用いて約 200rpm、6 時間、24 時間及び 14 日間の振とうを行った。振とう後の各溶出液の遠心分離を行い床堀土、購入土を固液比 1:10 となるよう投入した。4 時間振とう後、遠心分離を行い 0.45 μm メンブレンフィルターによって固液分離を行い、ろ液中のヒ素を ICP-AES 法により分析した。吸着前後のヒ素濃度変化から各試料への吸着量を求めた。

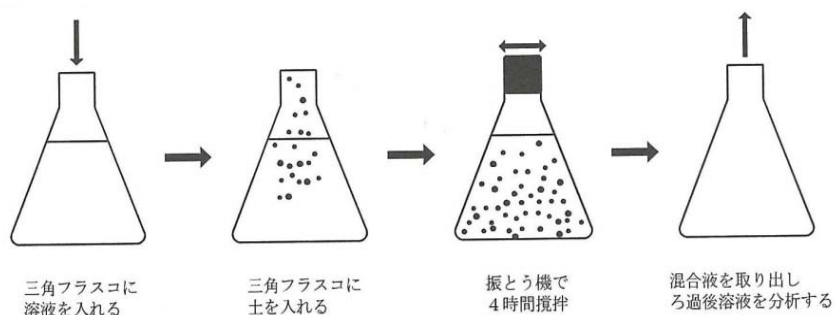


図-8 バッチ式吸着試験の模式図<sup>3)</sup>

## 2. 6 逐次溶出試験

逐次溶出試験は、図-9に示すように20～25℃の温度条件で粉碎した粘板岩15gに脱イオン水150mLを加え、往復振とう機を用いて約120rpmで1日間の振とうを行った。振とう後、遠心分離を行い0.45 μmメンブレンフィルターによって固液分離し、岩石試料に再び脱イオン水150mLを加え溶出試験を10回繰り返し、ろ液中のpHの測定及びヒ素をICP-AES法により分析した。

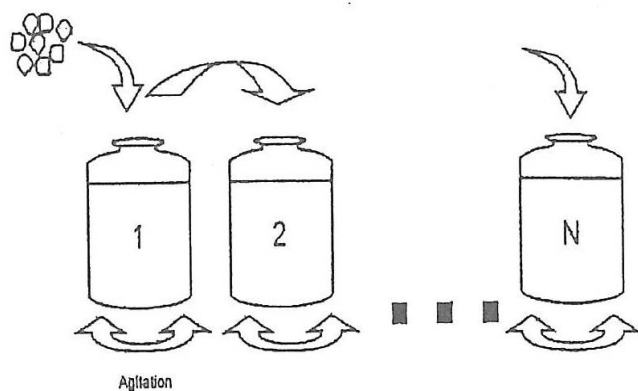


図-9 逐次溶出試験の模式図<sup>4)</sup>

### 3. 実験結果

#### 3. 1 試験盛土の施工

試験盛土の施工は、旭川開発建設部上川道路建設事業所の協力（写真-2）のもと行った。路体盛土の試験転圧結果を表-5及び図-10に示す。また、覆土の現場密度試験結果を表-6に示す。表-5より路体盛土の乾燥密度は1.811g/cm<sup>3</sup>以上のため、コンバインドローラーによる転圧回数は5回とした。また、表-3より覆土の乾燥密度は、概ね計画通りの乾燥密度を示しているが、ケース3の普通土の乾燥密度がやや高い結果となった。



写真-2 試験盛土の施工状況

表-5 路体盛土の試験転圧結果一覧

盛土材料	トンネルズリ		使用機械	コンバインドローラー	
	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	最大乾燥密度の 補正値 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
3	1.843	1.707	8.0	1.973	86.5
5	1.999	1.866	7.1	2.009	92.9
7	2.019	1.877	7.6	1.990	94.3

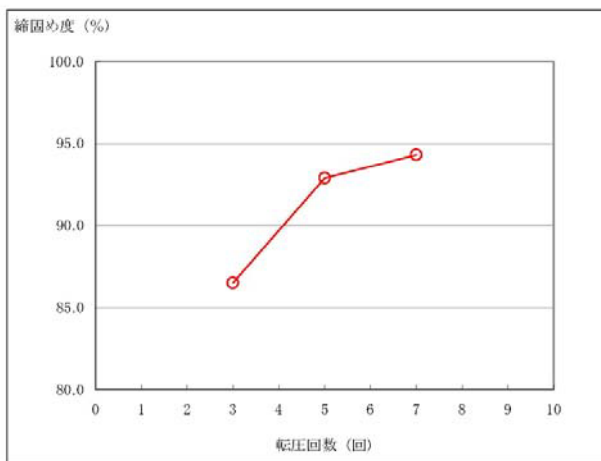


図-10 路体盛土の試験転圧結果



表-6 覆土の現場密度試験結果

測 点	購入土	購入土+チップ	発生土
路床仕上がり面からの深さ cm			
工 種 区 分	盛 土 工	盛 土 工	盛 土 工
転 圧 方 法			
土 質 番 号	土取場No.1	土取場No.2	クッション材
*礫の積比重	1.917		
測 定 方 法 (穴の径)	φ 25法	φ 16法	φ 16法
① 試験前 (砂+容器) 質量 g	17000	11092	11249
② 試験後 (砂+容器) 質量 g	5315	6150	6373
③*ベースプレート中の砂の質量 g	861	1327	1324
④ 穴につめた砂の質量[①-(②+③)] g	10824	3615	3552
⑤*砂の単位体積質量 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	1.439	1.330	1.332
⑥ 穴の容積 (④/⑤) cm <sup>3</sup>	7522	2718	2667
⑦ (湿潤土+容器) 質量 g	14190	4884	4525
⑧ ⑦の容器質量 g			
⑨ 湿潤土質量 (⑦-⑧) g	14190	4884	4525
⑩ 湿潤密度 $\rho_r = (\text{⑨}/\text{⑥})$ g/cm <sup>3</sup>	1.886	1.797	1.697
⑪ (乾燥土+容器) 質量 g	11462	3901	3173
⑫ ⑪の容器質量 g			
⑬ 乾燥土質量 (⑪-⑫) g	11462	3901	3173
⑭ 乾燥密度 $\rho_d = (\text{⑬}/\text{⑥})$ g/cm <sup>3</sup>	1.524	1.435	1.190
⑮ 水の質量 (⑨-⑬) g	2728	983	1352
⑯ 含水比 $w = (100 \times \text{⑮}/\text{⑬})$ %	23.8	25.2	42.6
⑰ 礫の乾燥質量 (+7.5mm又は+19mm) g	1238		
⑱ 混雑率 $P = (100 \times \text{⑰}/\text{⑬})$ %	10.8		
⑲ 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ g/cm <sup>3</sup>	1.692	1.642	1.243
⑳ 最大乾燥密度の補正值 $\rho_{dp}$ g/cm <sup>3</sup>	1.714		
㉑ 締固め度 $D_c = (100 \times \text{⑲}/\text{⑲})$ 又は $(\text{⑲}/\text{⑲})$ %	88.9	87.4	95.7

### 3. 2 モニタリング結果

盛土築造後、モニタリングは平成17年12月より開始し、平成19年7月まで行った。モニタリング結果を図-11に示す。地温では、外気温が氷点下0度以下を示しているのに対し、覆土のケースでは、内部温度が最低2℃、平均10℃、最大22℃であり、冬期でもプラス温度であった。体積含水率は、覆土のケースにおいてずり内部の体積含水率が15%以上を示し、少なからず降雨の影響を受けていた。土中酸素濃度は、無対策のケースと比較して、覆土を施したケースで夏期に大きく減少し冬期に十分には回復しないことが判明した。すなわち、覆土を施したケースでは、覆土で外気と遮断されることにより酸素の流通が制限されることが確認された。また、雨水や融雪水によって盛土内の環境が、嫌気的な環境と好気的な環境の季節変動を繰り返すものと考えられる。なお、図-11中のデータ欠損部分は、冬期間の積雪荷重によりデータロガーと接続した電源ケーブルが切断したため、データが欠損した。また、ケース4酸素濃度計上部のデータは、データロガーの測定設定電圧よりも高い値が出力されたため、欠損している。

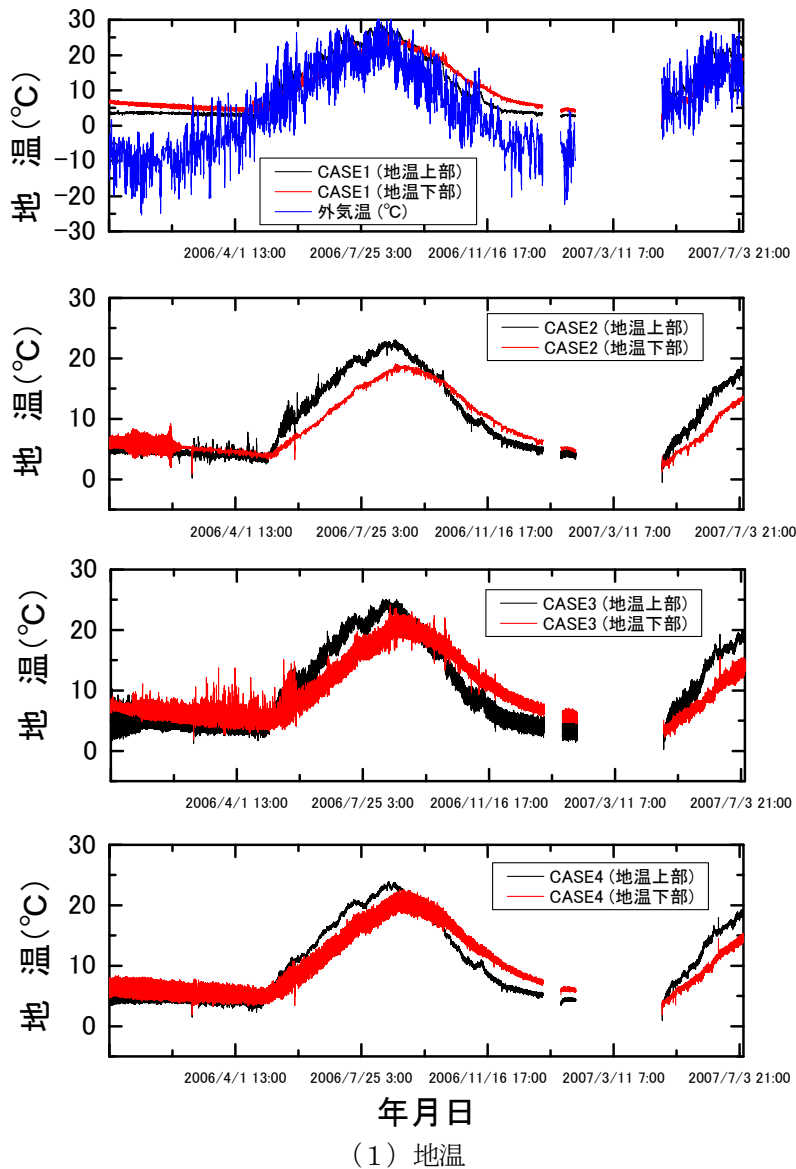
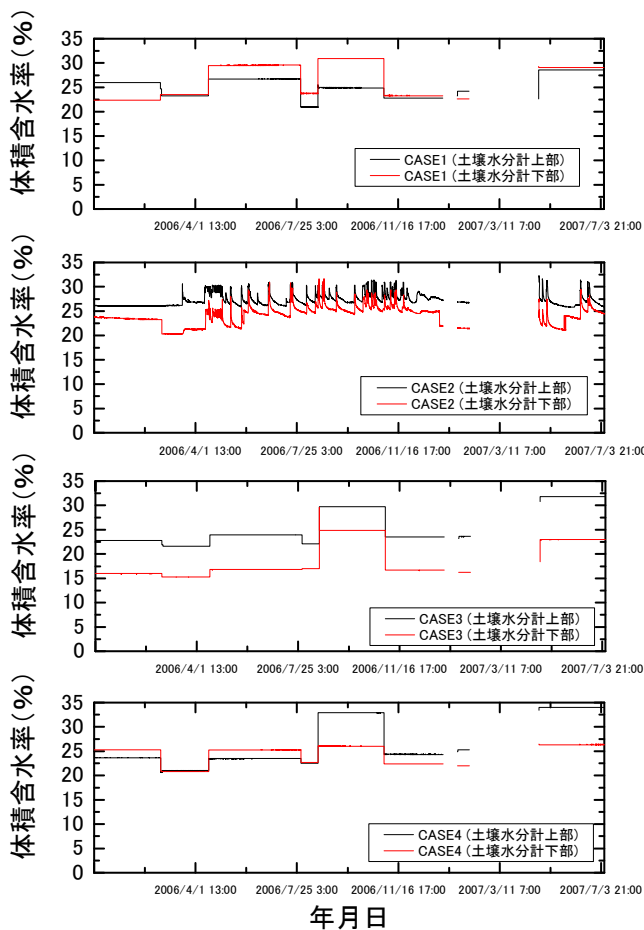
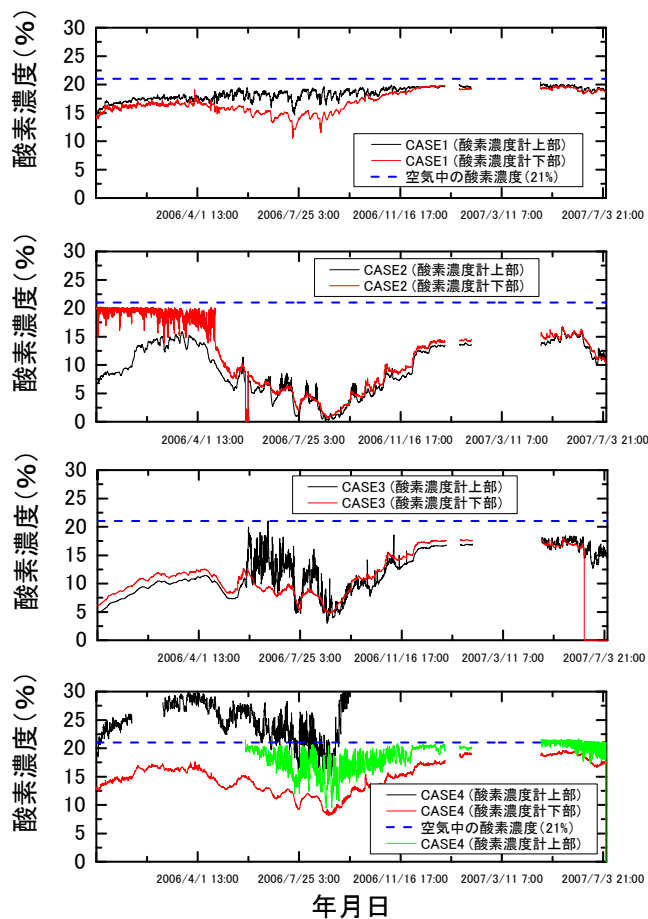


図-11 モニタリング結果



(2) 体積含水率



(3) 土中酸素濃度

図-11 モニタリング結果

### 3. 3 浸出水水質分析結果

浸出水水質分析結果についてヒ素の溶出量を図-12 に示す。また、電気伝導度  $E_c$  について図-13 に示す。図-12 よりずり内部のヒ素溶出量は、すべてのケースで土壌溶出量基準値を超過している。また、pH は 10~11 のアルカリ性を示す。しかし、覆土のケース 2 における底部浸出水の結果では、ずり内部のヒ素溶出量が約 1 年後に土壌溶出量基準値以下となっている。この結果、覆土のみによる対策ではヒ素の流出拡散を抑止できないため、敷土に吸着層などの重金属移行抑止層を設ける必要があると考えられる。

図-13 よりヒ素溶出量について電気伝導度の推移と比較すると、覆土のケースではずり内部の電気伝導度が 2007/4/26 以降おおむね安定している。すなわち、ヒ素の溶出現象は安定した可能性が考えられる。また、モニタリング終了の判断指標として電気伝導度は、有意な目安であると考えられる。

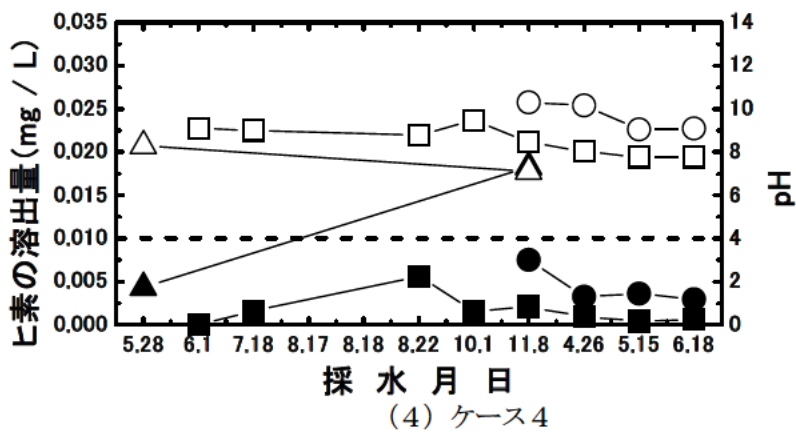
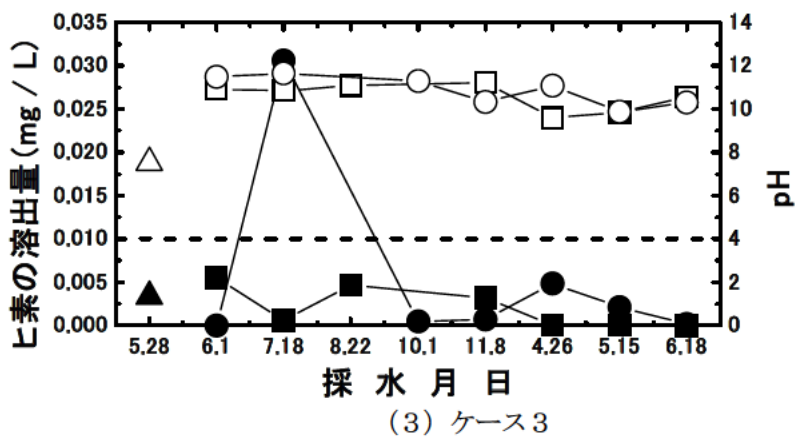
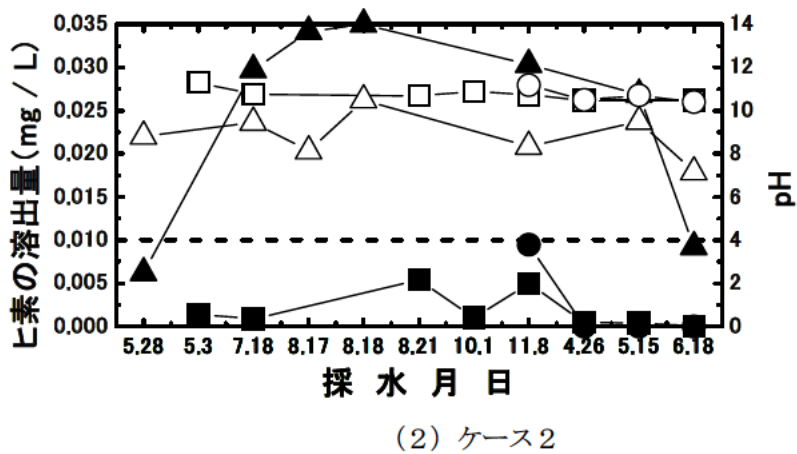
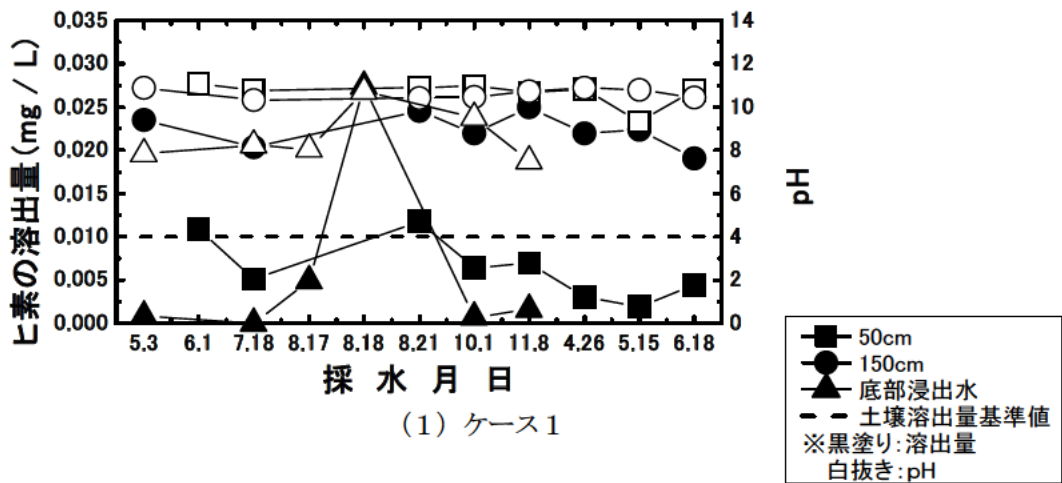
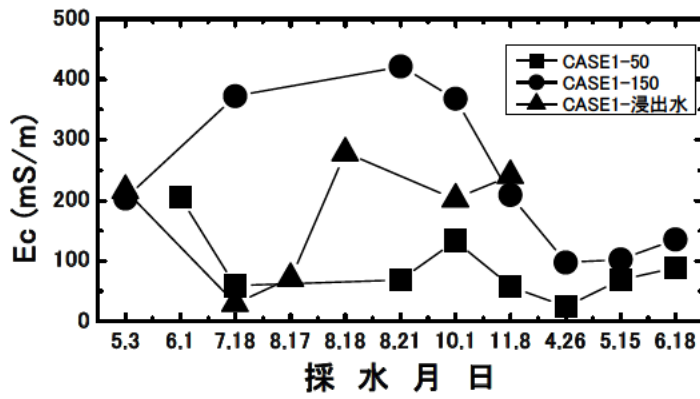
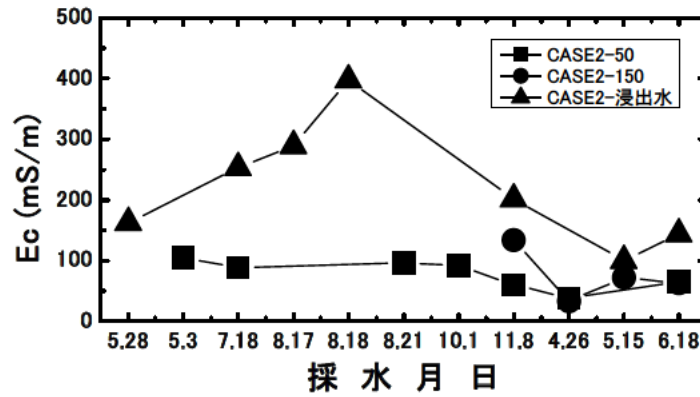


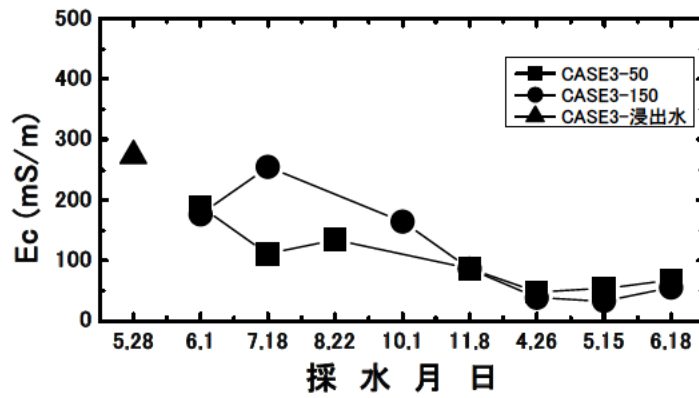
図-12 浸出水水質分析結果 (ヒ素溶出量)



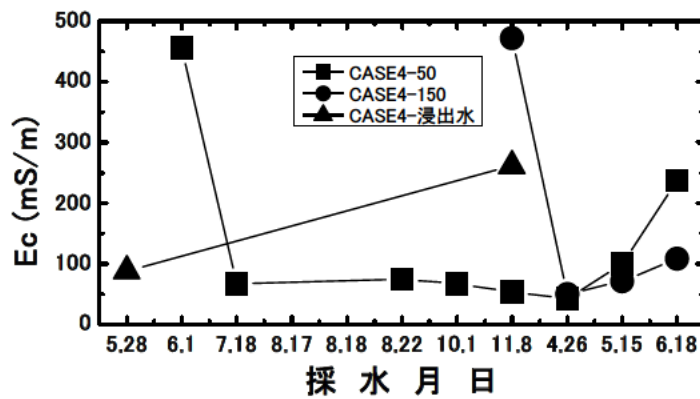
(1) ケース1



(2) ケース2



(3) ケース3



(4) ケース4

図-13 浸出水水質分析結果 (電気伝導度Ec)

※凡例中の「CASE○-50、150」は、盛土天端からの深度を表す。

### 3. 4 バッチ式吸着試験

吸着量  $q$  は、(1)式により求めた。また、分配係数  $K_d$  はヒ素の固液相濃度がヘンリー式で表現されるものと仮定し、(2)式により求めた。

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \times L \times 1000}{W \times W_{dry}} \quad \dots (1)$$

$$K_d = \frac{q}{C_e} \quad \dots (2)$$

ここで、 $q$  は吸着量、 $C_0$  は初期濃度、 $C_e$  は平衡濃度、 $L$  は溶液量、 $W$  は試料土量である。なお、試料土乾燥質量比は表-4 の風乾試料含水比  $W_{dry}$  より求めた。

表-7 吸着試験結果

試料名	振とう後 pH	As溶出濃度 (mg/L)		試料土乾 燥質量比	吸着量 $q$ (mg/kg· dry)	分配係数 $K_d$ (L/g)
		初期濃度 $C_0$	平衡濃度 $C_e$			
床掘土6H	8.7	0.009	0.001	0.885	0.0904	90
床掘土24H	8.6	0.025	0.001		0.271	271
床掘土14DAY	8.3	0.005	0.001		0.0452	45
購入土6H	8.7	0.009	<0.001	0.919	-	-
購入土24H	8.5	0.025	0.001		0.261	261
購入土14DAY	8.2	0.005	<0.001		-	-

吸着試験結果を表-7 に示す。試験用溶媒の初期濃度は溶出期間によって異なり、24 時間溶出操作を行ったヒ素濃度が最大で 0.025mg/L を示した。これは、水酸化鉄を含む岩石中の粘土鉱物が pH の変化によって吸着と解離の両面の性格を有するため、長期間の溶出操作により吸着剤として作用した可能性が考えられる。

本試験で得られた  $K_d$  の最大値は床掘土で 271L/g、購入土で 261L/g となった。このことから、覆土材料に使用した床掘土及び購入土は、ヒ素の吸着能を有していることが確認された。

### 3. 5 逐次溶出試験

溶出水中のヒ素濃度と pH の変化を図-14 に示す。ヒ素濃度は初回の溶出時に最大値を示し、溶出回数とともに徐々に減少する。このことから、実現場においては岩石に接触する水が増加することによりヒ素の溶出量が減少していくと考えられる。溶出回数によって pH は大きく変化せず、pH7.7~8.4 の弱アルカリ性を示した。

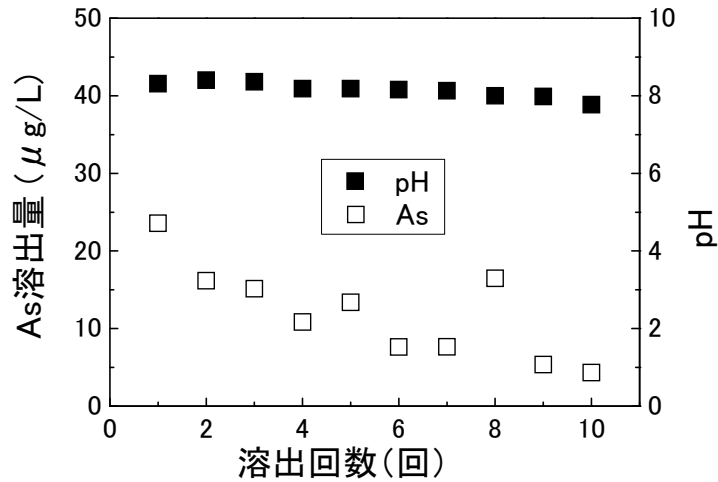


図-14 掘削ずりの溶出回数とヒ素 (As) 溶出量・pHの関係

#### 4. ヒ素の溶出・拡散評価

これまでの実験結果を踏まえ、ずりからのヒ素溶出と覆土材料を敷土として用いた場合のヒ素吸着を考慮し、敷土外部へのヒ素漏洩量を評価した。漏洩量の評価に際しては、1次元移流拡散方程式のステップ入力に対する解析解における下記の近似式<sup>5)</sup>に逐次溶出試験結果を踏まえたずりからのヒ素溶出濃度を与えて解析した。

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x - \left( \frac{v}{R_f} \right) \cdot t}{2\sqrt{\left( \frac{D}{R_f} \right) \cdot t}} \right\} \quad \dots (3)$$

$$R_f = 1 + \frac{\rho_d}{\theta} K_d \quad \dots (4)$$

ここで、 $C$ は敷土下部からの漏洩濃度、 $x$ は距離、 $v$ は浸透速度、 $R_f$ は遅延係数、 $D$ は分散係数、 $t$ は時間、 $\rho_d$ は乾燥密度、 $\theta$ は体積含水率である。

表-8に示す入力値を用い、逐次溶出試験結果から実際の降雨浸透量を考慮し図-15に示すずりからのヒ素浸透量を設定した。ここで、分配係数  $K_d$  は吸着試験の最大濃度における吸着量から算定した値を採用した。

表-8 パラメータ入力値

パラメータ		入力値	
		床掘土	購入土
ずり層	層厚 (m)	2.5	
	体積含水率 $\theta$	0.3	
敷土層	層厚 (m)	0.5	0.5
	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.16	1.2
	体積含水率 $\theta$	0.2	0.2
	分配係数 $K_d$ (L/g)	271	261
	分散係数 $D$ (m <sup>2</sup> /y)	0.3	0.3
有効降雨量 $v$ (mm/y)		365	

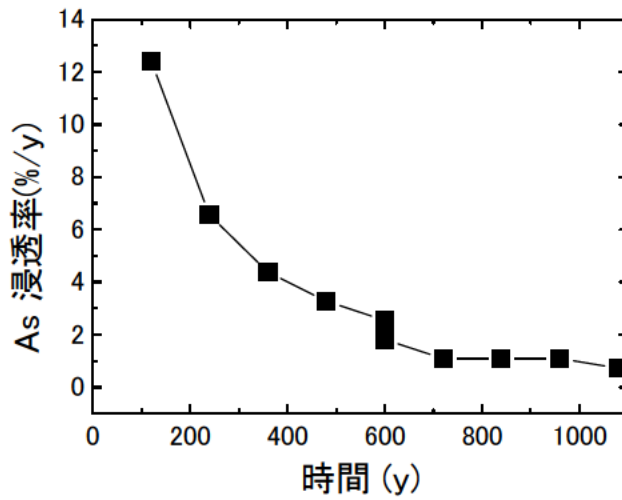


図-15 経年変化とヒ素 (As) 浸透率の関係

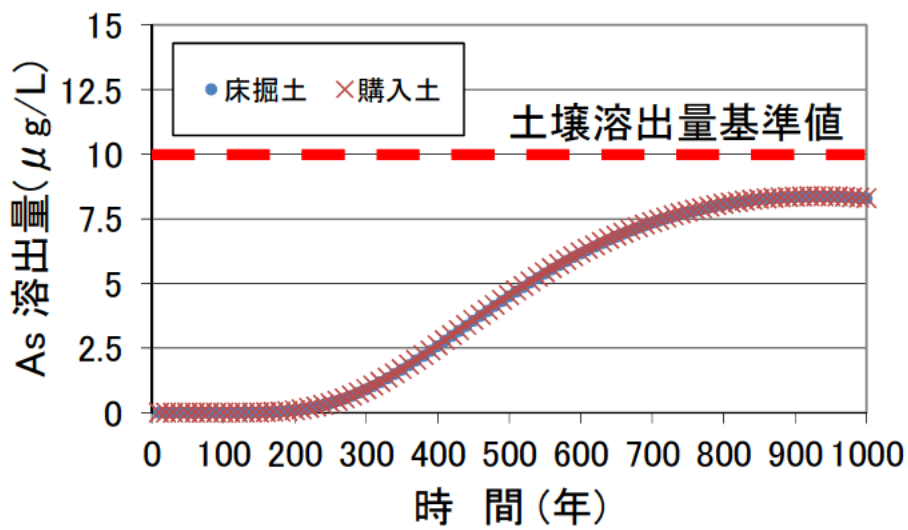


図-16 ヒ素 (As) 漏洩解析結果



これらを入力条件とした敷土底部からのヒ素漏洩解析結果を図-16に示す。この図より、十分な濃度低減が期待できる結果となった。いずれの場合も、細粒分を含む現地発生土を用いることによりヒ素漏洩濃度の低減が可能であり、ヒ素を含有する掘削ずりの処理対策の合理化を図ることができる。ただし、 $K_d$ を求めるための吸着試験は大気条件下で行った試験であり、覆土を施した盛土内の酸素濃度は夏期には5%以下の還元的環境下になる。今後、同環境下におけるヒ素の溶出挙動及び吸着能を明らかにする必要があるものとする。

## 5. おわりに

本共同研究により行った現場実験及びヒ素の溶出・拡散評価を行った結果、以下の知見が得られた。

- ・盛土内の地温は冬期間でもプラス温度を示し、酸素濃度は無対策のケースと比較して、覆土を施したケースで夏期に大きく減少し冬期に十分には回復しないことが判明した。
- ・盛土内のヒ素溶出量は、無対策及び覆土を施したケースの両方で土壌溶出量基準値を超過した。
- ・ヒ素の溶出・拡散評価を行うために実施した室内試験では、覆土材料に使用した床掘土及び購入土は、ヒ素の吸着能を有し、ヘンリー式で仮定することにより表現が可能であった。
- ・室内試験結果より実施したヒ素の溶出・拡散評価では、細粒分を含む現地発生土を用いることによりヒ素漏洩濃度の低減が可能であったことから、現地発生土の吸着効果を利用した処理対策が有効であることが明らかとなった。

今後の課題として、合理的な汚染対策に関する設計法の確立のため、溶出源評価に関する検討、重金属移行抑止層としての敷土層・不飽和層の評価方法の検討が挙げられる。

最後に、本共同研究の実施に当たりご協力いただいた関係各位に謝意を表す。

【参考文献】

- 1) Vink BW : Stability relations of antimony and arsenic compounds in the light of revised and extended Eh – pH diagrams. Chem Geol, Vol .130, pp. 21-30, 1996.
- 2) 田本修一、岡崎健治、阿南修司、伊東佳彦 : 酸性化した溶出水による岩石ずりの重金属類溶出量評価に関する考察、第8回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp.203-208、2009.
- 3) (独) 土木研究所 : 建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル、123p、鹿島出版会、2004.
- 4) The International Ash Working Group : Municipal Solid Waste Incinerator Residues, Elsevier, 974p, 1997.
- 5) Bear, Y.: Hydraulics of Groundwater, McGraw Hill, 1979.

---

共同研究報告書  
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.  
No.420 April 2011

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所  
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046