

トンネル掘削土から発生する自然由来重金属等のリスク評価および対策の検討 ～ 施工現場での迅速な対応に向けて ～

菊地浩貴¹・石川堅一²・高橋末広³

^{1,2,3} 飯田国道事務所 工務課 (〒395-0024 長野県飯田市東栄町 3350)

自然由来の重金属等を含む掘削土を盛土利用するにあたり、吸着層工法を適用する。周辺環境へのリスク評価を行う手法として、重金属等の溶出特性と原地盤等の吸着特性を室内試験で定量的に評価し、移流分散解析モデルを用いた。その結果、原地盤等の吸着特性を活用することで合理的な対策が実現できることを示した。また、重金属等が発生した際に、施工現場で迅速な対応が出来るよう、早見表を作成し活用方法を検討した。

キーワード：自然由来重金属等、吸着層、リスク評価、合理的対策

1. はじめに

切土工事やトンネル工事などでは、土壤汚染対策法の基準を超過する自然由来重金属等を含む掘削土（以下、要対策土）が発生し、対策が必要とされる事例が増えている。青崩峠道路トンネル工事では、砒素の溶出量が基準値を超過する要対策土が発生したため、吸着材を用いた吸着層工法を適用している。吸着層工法は、重金属等の溶出濃度に応じて吸着材の配合量を設計する合理的な対策だが、当該地のように溶出基準は超過するものの濃度が低い砒素に対しては、計算上必要な吸着材の量は少ない。そこで、本件では天然の地盤材料（原地盤や良質掘削土）がある程度の吸着性能を有することに着目し、その性能を積極的に活用する吸着層工法を検討した。

なお、本件で吸着層工法を適用する盛土場所は、自然

由来の砒素が存在する場所として土壤汚染対策法の「形質変更時要届出区域」に指定されている。

2. 地質概要および砒素の分布状況

対象区域は、図-1に示した青崩峠道路の事業区域である。青崩峠道路トンネル断面には、表-1に示す泥質変成岩、珪質変成岩、斑状マイロナイト、細粒マイロナイトが分布する。当該地では平成17年度より先進ボーリングコアの分析が行われており、一部の箇所では砒素の溶出量が土壤汚染対策法の基準値を超過している。

青崩峠道路トンネルには、先進掘削する調査坑（直径4.7m、高さ3.6m）と調査坑貫通後に掘削する本坑（直径11.2m、高さ6.5m）がある。平成28年6月までに調査坑の約50%の掘削が完了し、約70,000m³の掘



図-1 青崩峠道路 計画平面図

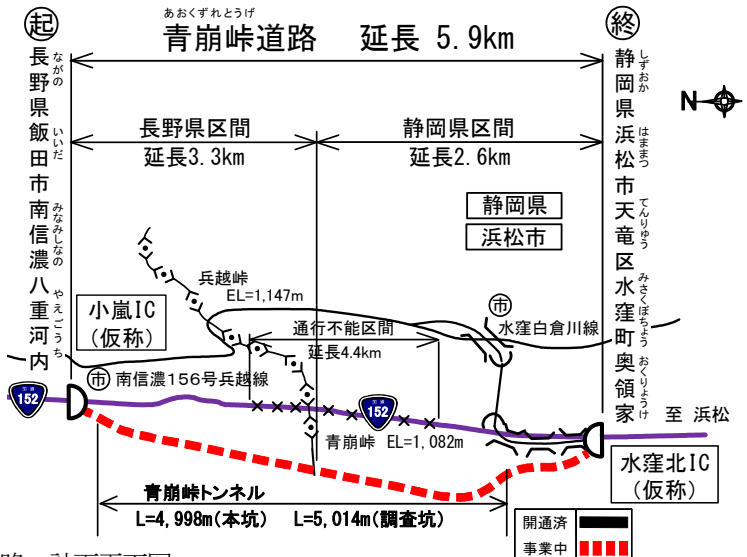


図-2 青崩峠道路 計画断面図

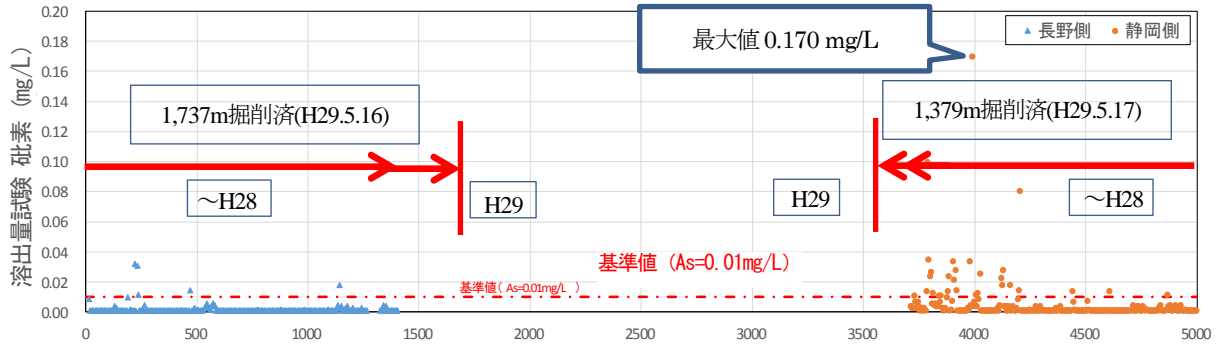
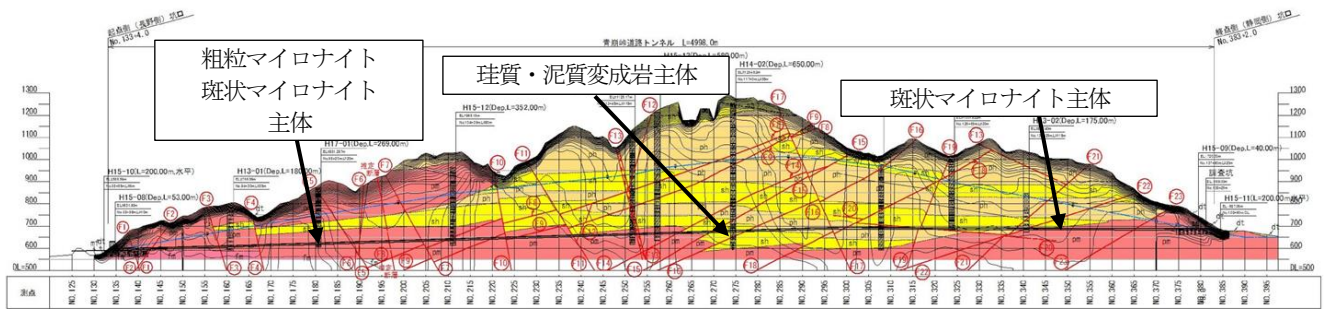


図-2 青崩峠道路トンネル地質断面図および砒素溶出量

削土のうち約 6% にあたる 4,000 m³ の要対策土が発生したため、人工吸着材で対策を実施した。図-2に示すように平成 28 年度までに溶出量基準を超過した砒素濃度の平均値は 0.029mg/L、最大溶出量は 0.17mg/L、超過割合は、長野県側で 268 検体中 5 (1.9%)、静岡県側で 262 検体中 29 (11.1%) であった。静岡県側の要対策土も県境の兵越峠を越えて長野県側に運搬して吸

着層工法で対策している。平成 29 年度以降の工事で約 3.1 万m³の要対策土の発生が予測されている。砒素以外の重金属等は、基準値以下である。

3. 吸着層工法の概要

吸着層工法の模式図を図-3に示す。重金属等が溶出する可能性がある盛土の下面に吸着層を敷設することで、周辺環境に環境基準を超過する水が流出することを防止する工法である。

表-2に、吸着層に①人工吸着材を用いる場合と②健全土を用いる場合の概要を示す。本検討結果を受けて、平成 29 年度以降の工事で②の適用を目指す。

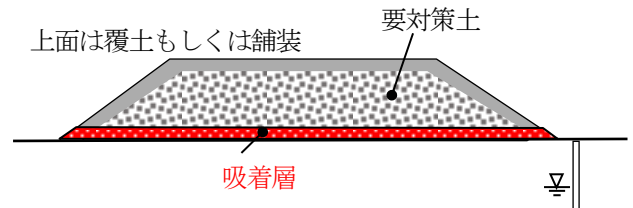


図-3 吸着層工法の概念図

表 -1 青崩峠道路の地質構成

地質区分	地質記号	地質概況
崖錘堆積物	tl	φ 2 mm以上の角礫を混入する礫質土
土石流堆積物	df	φ 2 mm以上の亜角礫～円礫を混入する岩塊・玉石混じりの砂質土。マイロナイトの他に、変成岩や花崗岩類を混入する。
細粒マイロナイト	fm	著しく剥離性に富む灰白～緑灰色の岩石。数 mm間隔でせん断面が発達する。中央構造線近傍では、岩質が軟質となる。
斑状マイロナイト	pm	φ 数 mmの長石等からなるポーフィライトが特徴的。時折、チャート様のウルトラマイロナイトや有色鉱物が特徴的な礫を挟む。
泥質変成岩	ph	5～10 mm間隔で片理構造が発達し、剥離性に富む。破砕部では、片理沿いに粘土を挟む。
珪質変成岩	sh	泥質変成岩中に挟まれる。見掛けの厚さは数 m～100 m。片理構造が発達する。

表-2 吸着層に人工吸着材と健全土を適用する際の概要

	①人工資材を用いた吸着層工法 (平成28年度まで)	②健全土を用いた吸着層工法 (平成29年度以降に適用目標)
模式図		
評価方法	<ul style="list-style-type: none"> 吸着層材料の吸着性能 (パッチ) 試験により人工資材の性能を把握 評価地点は盛土出口 原地盤への重金属等の拡大はない 	<ul style="list-style-type: none"> 1次元移流分散解析で重金属等の移行状況を把握 健全土の吸着・遅延効果を活用し、原地盤へ基準値を超過する重金属等は流出しない。評価地点は盛土出口。

※モニタリングで妥当性を確認

※モニタリングで妥当性を確認

4. 検討の流れおよび解析モデルの概要

(1) リスク評価の流れ

リスク評価の流れを図-4 に示す。まず、現地踏査にて、要対策土および健全土を試料採取した。要対策土については溶出特性を把握するためのカラム試験を行い、砒素溶出量の経時変化を評価した。ここで求めた溶出量は、移流分散解析モデルへの入力値である。健全土に対

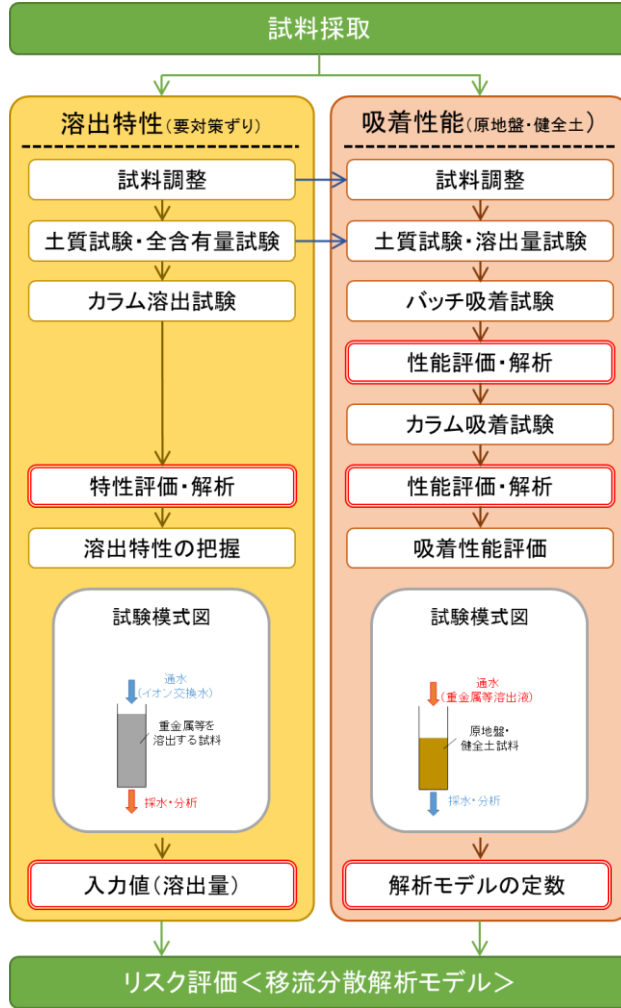


図-4 検討の流れ

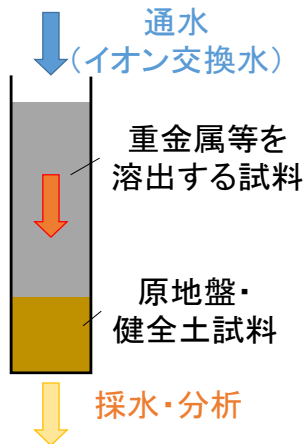


図-5モデルのイメージ

しては、バッチ試験およびカラム試験で吸着性能を評価し、それに基づき解析モデルの定数を設定した。また、要対策土と健全土の両方を詰めたカラム試験を行い、健全土による対策効果を検証した。

(2) 一次元移流分散解析モデル

砒素溶出特性（モデルへの入力値）および健全土の吸着特性等を用いて移流分散解析を行い、吸着層の効果を評価した。濃度固定条件で移行経路が1次元と仮定すると、重金属等濃度の経時変化は式(1)で表せる¹⁾。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{R_d x - (v/\theta)t}{2[R_d D_h t]^{1/2}} + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{vx}{\theta D_h}\right) \operatorname{erfc} \frac{R_d x + (v/\theta)t}{2[R_d D_h t]^{1/2}} \quad (1)$$

ここで、 R_d ：遅延係数、 C_0 、 C ：初期濃度、濃度、 t ：時間、 x ：移行距離、 v ：流速、 θ ：体積含水率、 D_h ：分散係数である。なお、 erfc は余誤差関数である。

一方、カラム溶出試験において、要対策土から溶出する砒素濃度は採水回数とともに低減する。解析では、カラム出口の砒素濃度 C を、式(2)で表現した。

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{R_d x - (v/\theta)t}{2[R_d D_h t]^{1/2}} + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{vx}{\theta D_h}\right) \operatorname{erfc} \frac{R_d x + (v/\theta)t}{2[R_d D_h t]^{1/2}} \right] \quad (2)$$

ここでの R_d は、要対策土からの砒素の溶出低減状況を表現する定数となっており、移流分散解析モデルへの入力値（砒素濃度）が経時変化する状況を再現している。

(3) 吸着に関する遅延係数の設定

自然由来重金属等の濃度は低いことから、土の吸着性能を表す分配係数 (K_d) は直線近似が適応できる範囲であることが多く、濃度によらず吸着量一定と仮定すると、遅延係数 R は、次式で表現できる¹⁾。

$$R = \left(1 + \frac{\rho_d}{\theta} K_d \right) \quad (3)$$

ここで、 K_d ：飽和度に対する分配係数、 ρ_d ：土の乾燥密度、 θ ：体積含水率（飽和時は間隙率）

なお、短時間の室内試験では不可逆吸着の定量評価が難しいため、安全側の設計となるよう、本検討では可逆吸着のみをモデル化した。

(4) 長期的な重金属等の溶出特性（溶出に関する遅延係数の設定）

要対策土の長期的な砒素の溶出の経時変化を確認するためにカラム溶出試験を行った。表-3 にカラム試験の諸元を示す。

表-3 カラム溶出試験の諸元

項目		単位	値	備考
カラム仕様	充填試料重量	W	g	374.7 *
	充填試料層厚	H	cm	14.8 *
	内径	ϕ	cm	4.6 *
	充填面積	A	cm ²	16.62
	充填体積	V	cm ³	245.96
土質性状	含水比	w	%	0.2 *
	土粒子密度	ρ_s	g/cm ³	2.709 *
カラム内充填状況	湿潤密度	ρ_t	g/cm ³	1.523
	乾燥密度	ρ_d	g/cm ³	1.520
	間隙比	e	-	0.78
	間隙率	n	%	43.9
	飽和度	S_r	-	0.76
	体積含水率	θ	-	0.34
化学性状	溶出量	A_s	mg/L	0.030 *
	全含有量	A_s	mg/kg	6.3 *

*: 実測値

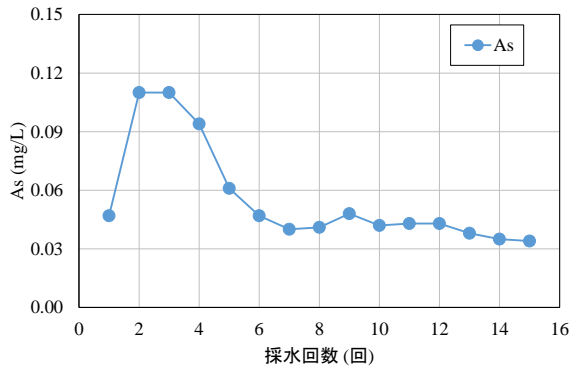


図-6 カラム試験での砒素溶出状況

カラム溶出試験の結果を図-6 に示す。砒素濃度は、採水 2,3 回目で 0.11 mg/L でピークを示した後は減少し、15 回目までに 0.03 mg/L 程度まで低下した。採水15回目までに溶出した砒素の総量は全含有量の 5 % 以下であり、その量は短期溶出試験での溶出量と概ね整合した。

図-6 のような溶出濃度の経時変化を移流分散モデルの入力値とするために、解析上の工夫として、遅延係数と分散長で溶出量の低減状況を再現した。表-4、表-5 に解析条件と感度解析ケースを示す。分散長と遅延係数は相互依存するため、表-5 のケースで感度解析を行い、図-6 の経時変化を再現できる値を設定した。図-7 に分散長をパラメータとした感度解析結果を示す。分散長が、溶出の低減割合、低減開始時期、溶出継続期間に影響することがわかる。遅延係数も変化させて感度解析を行い、分散長=移行距離の 1/10 (0.0148 m)、遅延係数=7 程度でカラム試験結果とほぼ一致した。リスク評価解析では、ここで設定した値を用いた。なお、遅延係数 7 は、分散を無視した場合、要対策土層の間隙水が 7 回置き換わると $C/C_{max} \approx 0$ まで低減することを意味している。

表-4 解析条件 (カラム溶出試験)

項目	単位	値	備考
流速	m/h	3.0E-03	通水条件より設定
間隙率	-	0.44	設置条件より推定
飽和度	-	0.76	試験結果より推定
体積含水率	-	0.34	間隙率 × 飽和度
実流速	m/h	9.0E-03	流速/体積含水率
移行距離	m	0.148	カラム設置条件より設定

表-5 感度解析ケース (カラム溶出試験)

case	分散長	遅延係数	備考
	m	-	
1	0.0148	7	標準
2	0.0009	7	分散長
3	0.0300	7	
4	0.0148	3	遅延係数
5	0.0148	15	

分散長の設定根拠
 case1: 移行距離の1/10 (0.0148 m)
 case2: 既存文献式を参考に0.0009 m
 case3: case1の10倍とした。

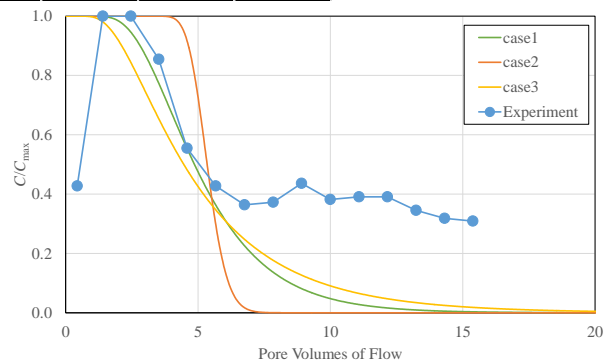


図-7 分散長をパラメータとした感度解析結果 (カラム溶出試験解析)

表-6 バッチ試験で求めた健全土の遅延係数

工区	箇所	試料名	地質区分	分配係数	乾燥密度	間隙率	遅延係数
				K_d	ρ_d		
				mL/g	g/cm ³	-	-
青崩峠	小嵐BP	No.1	砂	26.4	1.6	0.35	121.7
		No.2	砂	18.2	1.6	0.35	84.2

(5) 砒素吸着性能評価

健全土 (原地盤・現地発生土) への砒素に対する吸着性能評価は、バッチ試験とカラム試験で評価した。

a) バッチ吸着試験の評価

バッチ試験で求めた分配係数をもとに、式(3)で計算した健全土の遅延係数を表-6 に示す。間隙率、乾燥密度は一般値 (土木研究所1Dtransu内装値) を用いた。ここで得られた遅延係数は、既存文献値²⁾とで示される目安 (最大 3,000 程度、平均 150 程度、最小 10 程度) と同等であった。

b) カラム吸着試験結果の評価

バッチ吸着試験と同一試料 (健全土および溶液) でカラム吸着試験を行い、バッチとカラムにおける吸着性能の違いを評価し、今後の試験・評価方法の検討を行った。

表-7 カラム吸着試験の諸元

項目		単位	値	備考
カラム仕様	充填試料重量	W	g	636.9 *
	充填試料層厚	H	cm	30 *
	内径	ϕ	cm	4.6 *
	充填面積	A	cm ²	16.62
	充填体積	V	cm ³	498.57
土質性状	含水比	w	%	1.35 *
	土粒子密度	ρ_s	g/cm ³	2.65
カラム内充填状況	湿潤密度	ρ_t	g/cm ³	1.277
	乾燥密度	ρ_d	g/cm ³	1.260
	間隙比	e	-	1.10
	間隙率	n	%	52.4
	分配係数	K_d	mL/g	18.20 *
	遅延係数	R_d	-	44.70
溶液	濃度	As	mg/L	0.048 *

*: 実測値

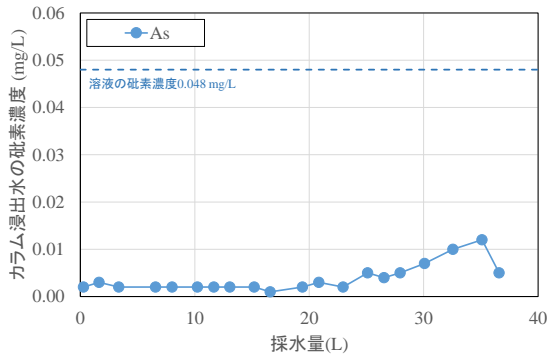


図-8 カラム吸着試験結果（砒素）

表-8 解析ケース

case	遅延係数	備考
	R_d	
case1	44.7	試験結果とカラム設置状況より設定
case2	89.5	case1の2倍
case3	22.4	case1の1/2倍

カラム吸着試験の諸元を表-7に示す。分配係数はバッチ吸着試験で求めたもので、カラム充填状況から算出された遅延係数は44.7である。カラムには、バッチ吸着試験と同じ濃度（0.048 mg/L）の砒素溶液を注水した。

カラム試験結果を図-8に示す。採水量約25 L以降で砒素濃度が上昇し、最大で0.012 mg/Lであった。

カラム吸着試験で得られた結果を基に、1次元移流分散解析（式(1)）を用いて、砒素吸着性能を把握した。解析ケースを表-8に示す。また、カラム吸着試験解析結果にフィッティングした状況を図-9に示す。

砒素濃度の立ち上がり位置を考慮し解析した結果、バッチよりカラムの方が吸着特性を高く評価しているこ

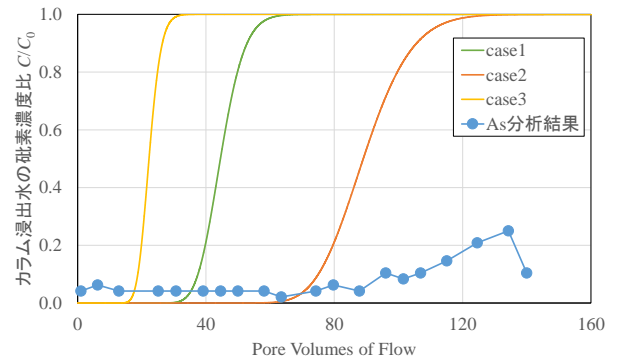


図-9 カラム吸着試験解析結果へのフィッティング

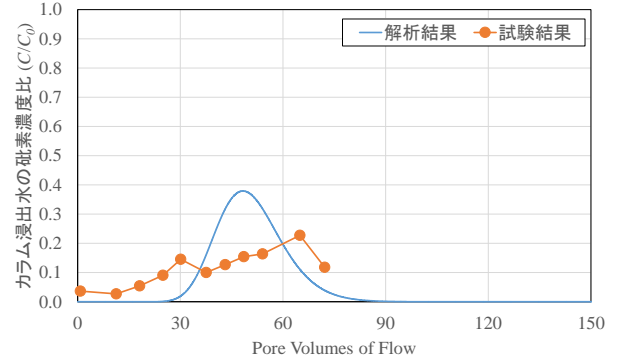


図-10 対策効果カラム試験解析結果（吸着層厚10cm）

とが判明した（ C/C_0 のピークで約3倍程度）。解析では不可逆吸着（固着，収着）は考慮せずに、可逆吸着（遅延）のみを考慮したが、カラム試験では不可逆吸着も生じている可能性も期待できる。バッチ試験で求めた定数を用いた解析は安全側の評価となっていると考える。

(6) 対策効果確認試験

対策効果確認のカラム試験解析と解析結果を図-10に示す。要対策土の遅延係数は、先に示したカラム溶出試験結果を踏まえ7と設定し、要対策土の分散は考慮しないこととした。カラムによる対策効果確認試験の結果は、解析結果よりも低い値（安全側）を示すことを確認できた。

5. 健全土を用いた吸着層工法の設計

上記試験で設定した健全土の吸着性能を用いて1次元移流分散解析を行い、対策工法の設計を行った。

(1) 解析条件

移流分散解析では、要対策土からの影響はその層厚に左右されるとともに、評価地点の砒素濃度は吸着層の層厚や吸着性能に依存する。そこで、本検討では、盛土層厚、吸着層（健全土）層厚、砒素溶出濃度、吸着性能（健全土の遅延係数）を変化させた複数ケースの解析を実施し、現場で生じる様々な状況に対応できる設計見

