

## 自然由来による重金属等（ヒ素）汚染盛土の処理工法と溶出特性に関わる短期現場試験

(株)イーエス総合研究所 正会員 ○植松えり子  
(株)イーエス総合研究所 小口 智久  
(株)イーエス総合研究所 松本 勲  
(株)イーエス総合研究所 国際会員 常松 哲

### 1. はじめに

平成 15 年 2 月に施行された土壤汚染対策法（以下、旧法という）は、平成 22 年 4 月に改正された（以下、新法という）。この法律の目的は、旧・新法ともに、同法 1 条に規定するとおり「土壌の特定有害物質による汚染の把握に関する措置及びその汚染による人の健康に係る被害の防止に関する措置を定めること等により、土壤汚染対策の実施を図り、もって国民の健康を保護することを目的とする」ものであることには変わりはないが、汚染土の処理に関する観点から新法を概観すると、次の 2 点が挙げられる。① 旧法では自然的原因により有害物質が含まれる土壌については法の対象外とされ、搬出時においてのみ適切な汚染防止対策を講じる必要があるとされていた<sup>1)~3)</sup>。しかし、新法では、人為的・自然的原因との区分はなくなり、汚染土壌に対する対応措置は全て新法に基づいて行うことになった<sup>4), 5)</sup>。

また、旧法では② 汚染防止措置として封じ込めが最良の工法として採用されることが多かった。この工法は遮断工と遮水工封じ込めに大別され、遮断工は一般に外周仕切りを鉄筋コンクリート構造とし、汚染土壌を周辺的一般環境から厳重に遮断する構造で、周囲には必要に応じ集水渠、集水桝等を設け、雨水の流入、滞留しないようにするなど<sup>6), 7)</sup> 施工日数と費用が多分に要する工法である。これに対し遮水工には、汚染土壌を掘削除去して遮水構造の中に封じ込める方法と、汚染土壌を原位置で封じ込める方法がある。両者ともに、汚染物質が外部へ漏出・流出しない構造とし、遮水材料として、不透水シート、粘土、覆土・植栽工、またはアスファルト等による舗装工等が用いられる工法である<sup>6), 7)</sup>。この工法は、遮断工に比べ施工日数、施工コストが軽減できる。しかし、いずれの工法も建設費と施工日数を要し、過剰な措置と考えられ、有効かつ合理的・経済的な対策工法の技術開発が求められている。

現地発生土は粘土分を含有した土壌が多く、土壌粘土によるイオン交換・吸着反応について古くから知られており<sup>8), 9)</sup>、その反応は、土壌中の粘土鉱物の種類と量比、各鉱物の電荷、構造、粒子の形状、溶液の pH と温度等々、多くの要因によって規定される複雑な現象であるが<sup>10)</sup>、道内産火山灰土・粘性土はヒ素の吸着性能を有することが明らかにされている<sup>11)</sup>。この特性を考慮して、現地発生土に汚染土を包み込み、敷土や覆土による重金属汚染対策工法に関する現場実験を行い、現地発生土を利用した処理対策が有効であることが明らかにされている<sup>12), 13)</sup>。

従って、本報告では、汚染処理対策の有効かつ合理的・経済的な工法を見出す目的で、自然由来重金属類（ヒ素）汚染土を用いて盛土を造成し、著者らが研究開発したカルシウム系不溶化剤<sup>14)~17)</sup> を使用し盛土全体に混合した工法（混合工法）、敷土に不溶化剤を混合した工法（不溶化吸着工法）、不溶化剤を層状に盛土に散布する工法（層状工法）、吹付け材に不溶化剤を添加し層状あるいは法面に吹付ける工法（吹付け工法）等、10 タイプの処理工法を設定し、各処理工法ごとの溶出濃度を測定した。

なお、敷土と覆土材には土捨場に集積されている現地発生土を利用した。また、酸性雨曝露期間を約 10 年と想定し、pH2.8 の酸性水（3,500L）を盛土上面から 7 回散水した<sup>18), 19)</sup>。この浸透水を盛土下部に設けた有孔排水パイプを介してタンクに回収し、ヒ素濃度の測定に供した。さらに、盛土内の温度、硫化水素の発生の有無、敷土の体積含水率の測定を行った。観測期間は 50 日間である。なお、汚染水の拡散防止を図るため、敷土下部の排水溝を包み込むように敷土全体に遮水シート（ $t=1.0\text{mm}$ ）を敷設した。

---

Short-term in situ research for the relationship between the processing methods of fill contaminated with heavy metals (arsenic) of natural origin and its leak properties.

Eriko Uematsu, Tomohisa Koguchi, Isao Matsumoto, Satoshi Tsunematsu (ES General Laboratory)

## 2. 実験方法

### 2-1. 供試材料

#### 1) 不溶化剤

本実験で使用した不溶化剤はカルシウム（石膏）を主成分とした RE-I（株式会社 HMI 製）である<sup>14)~17)</sup>。本不溶化剤の粒径及び pH を Table1 に示す。

Table1 不溶化剤 (RE-I) の粒径及び pH

外観	粒径	pH
粉体	< 3 mm	6.8

#### 2) 盛土材及び敷土・覆土

本実験では、北海道内の道路建設に伴うトンネル工事で発生した汚染土（掘削ずり）を盛土材とし、また、敷土・覆土には現地発生土を使用した。盛土材及び現地発生土の物理特性を Table2 に、ヒ素溶出量・含有量・pH の結果を Table3 に示す。表に示すとおり、盛土材、現地発生土ともに品質にばらつきが多い。これは、盛土材は細粗粒分を完全に均一化することが難しいためであり、また、現地発生土は管内の工事現場から発生した残土のため、変動が大きいと考えられる。

Table2 盛土材及び敷土・覆土の物理特性

	盛土材	現地発生土
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.70~2.76	2.63~2.70
自然含水比 (%)	6.8~10.8	22.7~33.1
最大粒径 (mm)	150	26.5~37.5
均等係数	67~225	5~23
土質分類	G-FS, GS-F	GFS, CHS-G
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.90~1.96	1.54~1.56
最適含水比 (%)	10~13	25.0~26.5

### 2-2. 盛土の形状と施工

盛土の平面図及び断面図を Fig.1 に示す。盛土の形状は高さ 0.9m、長辺 3m、短辺 2m で、最下層に敷土 (0.2m) を設け、その上に汚染土 (掘削ずり) を 3 層 (0.3m/層) に分けて盛土し、各層毎にプレートで締め固めを行った。盛土の法面は覆土で保護した。また、浸透水を採取するため、盛土下部の排水溝に有孔管 (φ50mm) を設置した。盛土内の温度、敷土の体積含水率の測定を行うため各種計測器を設置し、さらに、不溶化剤 (石膏) に由来する硫化水素ガス発生の有無を確認する目的で、検知管を用いモニタリングを実施した。計測器設置位置を Fig.2 に、計測器概要を Table4 に示す。

Table3 ヒ素溶出量・含有量・pH

	盛土材	現地発生土	基準値
ヒ素溶出量 (mg/L)	0.011~0.022	< 0.001	0.01 以下
ヒ素含有量 (mg/kg)	< 15	< 15	150 以下
pH	10.0	7.0	—

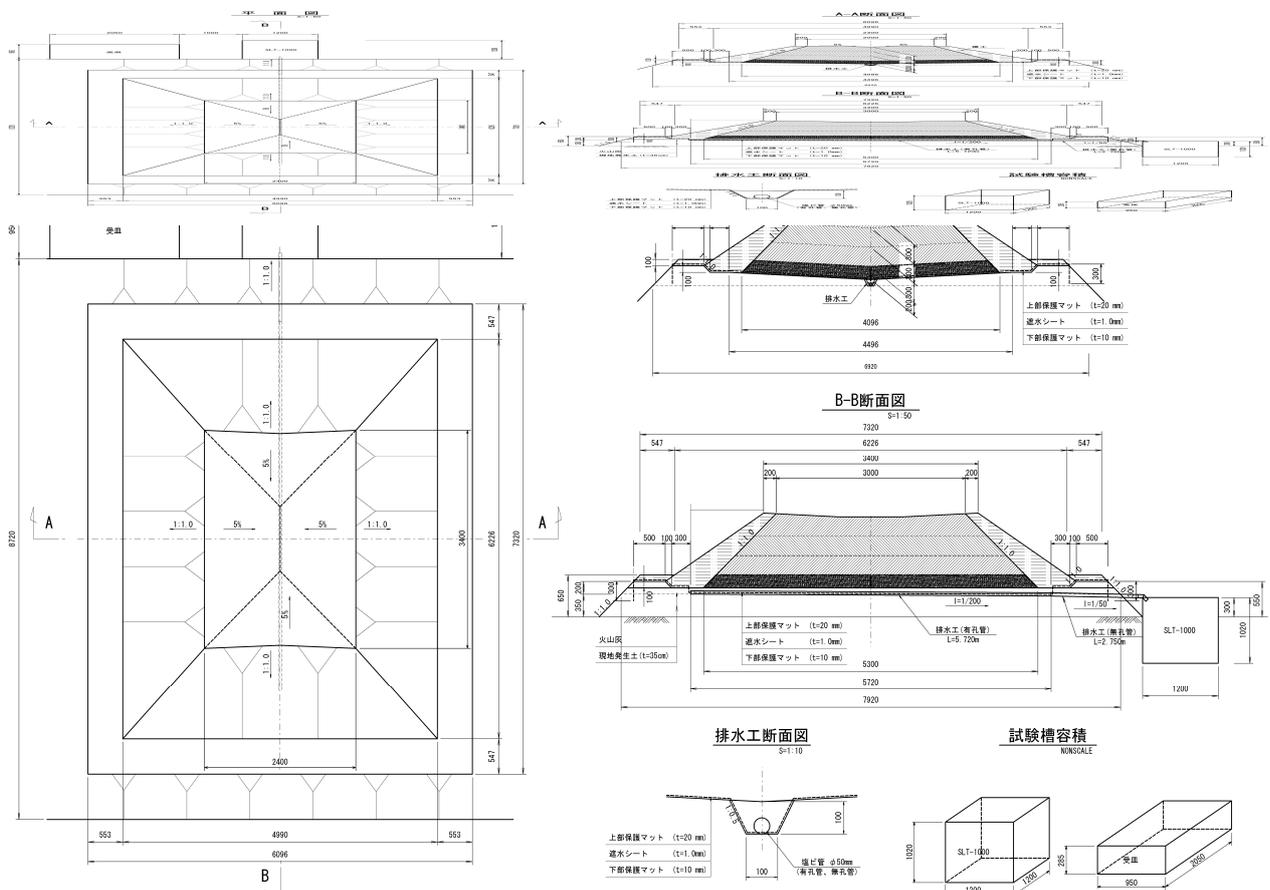


Fig.1 盛土の平面図及び断面図

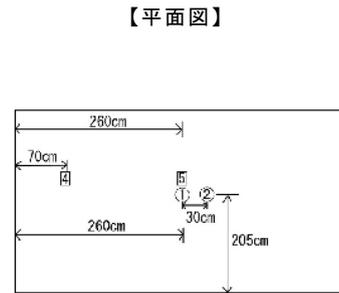
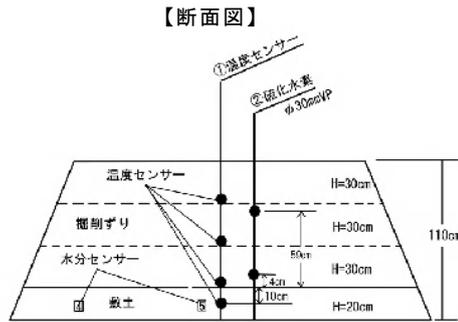


Fig.2 計測器設置位置

Table4 計測器概要

地温及び外気温	二宮電線工業(株)製 0.65×1P T-G
体積含水率	アイネクス(株)製 EC-5 型
硫化水素ガス	(株)ガステック社製 GV-100S

### 2-3. 盛土の処理工法

10タイプの処理工法について盛土を造成した。盛土の処理工法を Table5 に示し、特徴を以下に述べる。

#### 1) 【無処理】タイプ 1

無処理の汚染土（掘削ずり）を敷土の上に盛土し、法面を覆土した。

#### 2) 【不溶化吸着工法】タイプ 2

盛土下部に不溶化剤を混合した不溶化吸着層（敷土）を敷設する工法である。汚染土（掘削ずり）から溶出したヒ素を不溶化吸着層（敷土）で不溶化吸着する方法である。本実験では敷土に対し4%(重量)の不溶化剤を添加した。

#### 3) 【混合法】タイプ 3、4

不溶化剤を汚染土（掘削ずり）に直接混合する工法である。不溶化対象土全てに不溶化剤を混合するため、全体を不溶化することができる。本実験では、自走式土質改良機リテラ（コマツ製）を用い汚染土（掘削ずり）に対し3%(重量)の不溶化剤を混合した。なお、タイプ4は混合法に加え不溶化吸着層を敷設した。

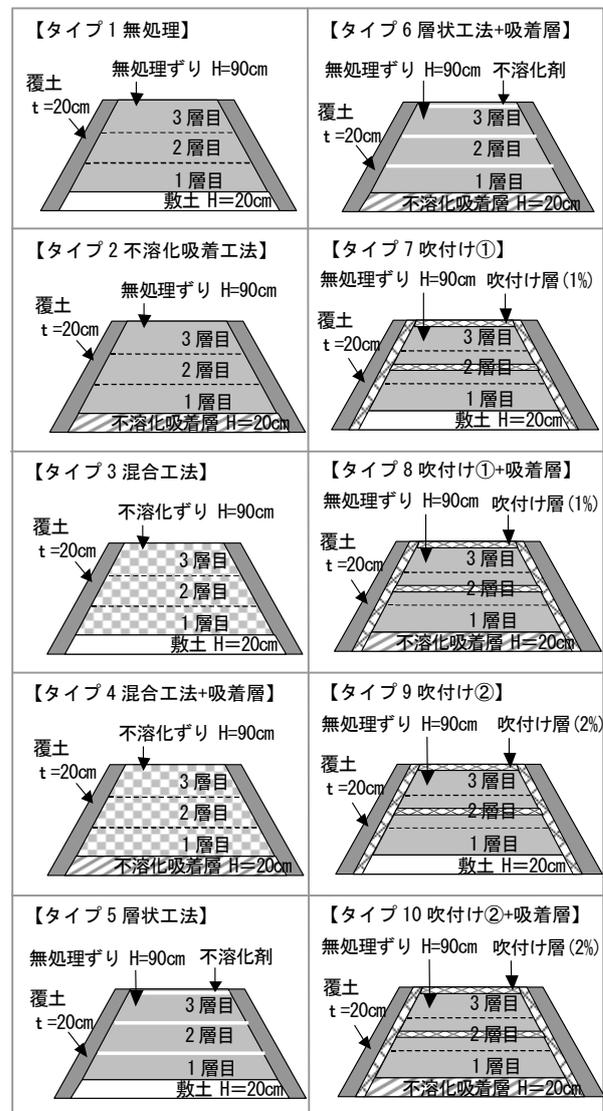
#### 4) 【層状工法】タイプ 5、6

層状工法は、盛土材中に不溶化剤を層状に敷設する工法である。不溶化剤が汚染土に溶解・浸透することで、ヒ素を不溶化することができ、混合法と同様の効果が期待される。なお、タイプ6は層状工法に加え不溶化吸着層を敷設した。

#### 5) 【吹付け工法】タイプ 7、8、9、10

吹付け工法は、不溶化剤と吹付け材（砂質シルト）を混合した泥土を盛土に吹付ける工法である。吹付け層中の不溶化剤が汚染土に浸透することで、ヒ素を不溶化できると考えられる。タイプ7、8は吹付け材中に1%の不溶化剤を、タイプ9、10は吹付け材中に2%の不溶化剤を混合した。なお、タイプ8、10には吹付け工法に加え不溶化吸着層を敷設した。

Table5 盛土の処理工法



## 2-4. 浸透水及び盛土材の試験方法

盛土が長期間酸性雨に曝露された際の溶出特性を明らかにするため、酸性水 (pH2.8) を盛土に散水し、浸透水及び盛土材のヒ素及び pH を測定した。ヒ素は水素化物発生装置-フレーム原子吸光法、pH はガラス電極法により測定を行った。

### 1) 散水方法

酸性水は 10 年の施工期間を想定した酸性雨の酸量 (pH2.8) とし、小型水中ポンプを用いて 1 回につき 500L を 7~10 日おきに計 7 回散布した。酸性雨の想定濃度は硫酸添加溶出試験 ((社) 土壤環境センター)<sup>18)</sup> を参考とした。散水方法を Fig.3 に示す。なお、盛土への雨水 (降雨) 浸透防止のため、散水時以外は盛土全体をシートで覆った。

### 2) 試験試料の採取方法

#### ① 浸透水

ヒ素及び pH の測定に供するため、盛土下部に設置した貯水タンクから浸透水を採水した。結果は土壤汚染対策法に定めるヒ素の地下水基準 (0.01 mg/L 以下) と比較した。

#### ② 盛土材及び敷土

盛土施工時・盛土解体時に盛土材を採取して不溶化効果を確認した。試料の採取は敷土と盛土 3 層の計 4 層から行い、それぞれの層で 5 点採取後等重量混合し 1 つの試料とした。溶出試験 (環告 18 号) によりヒ素及び pH を測定し、土壤汚染対策法に定めるヒ素の溶出量基準 (0.01 mg/L 以下) と比較した。

#### ③ 各種モニタリング

地温及び外気温、体積含水率は 2 時間間隔で測定し、硫化水素濃度は盛土施工完了後及び各散水後 (7 回) に盛土下層及び中層で測定を行った。

## 3. 実験結果

### 3-1. 浸透水

2 で述べたとおり、盛土材はヒ素溶出量の相違の他、粒度、形状、細粒分と粗粒分との含有率等のばらつきが大きく、盛土内の締め固め密度や透水性に影響を及ぼすとともに、散水後の水みちも多様であると考えられ、各タイプとも十分な均一性を保つことが困難であった。そのため、浸透速度、浸透水量に変化が生じ、浸透水のヒ素溶出濃度、pH 等に影響を与えているものと考えられる。

浸透水のヒ素濃度を Fig.4 に示す。ヒ素濃度は、タイプ 7 を除く全てのタイプで基準値以下であった。無処理であるタイプ 1 でも効果がみられることから、敷土層でもヒ素が吸着されたと考えられる。このことは、現地発生土においてもヒ素吸着効果があることを示唆している<sup>11)</sup>。一方、タイプ 7 が基準値付近となった原因としては、吹付け材中の不溶化剤添加不足の他、前述した盛土の不均一性が影響していると考えられる。

次に浸透水の pH を Fig.5 に示す。pH は、タイプ 7 の 1~3 回目以外は pH7~8 の中性域で推移していた。汚染土 (掘削ずり) の pH は pH10 とアルカリ性であるのに対し、浸透水は中性付近であった。これは酸性水を散水したことに加え、不溶化剤、敷土の pH が中性であるためと考えられる。一方、タイプ 7 の 1~3 回目は pH8~9 とアルカリ性を示していた。タイプ 7 はヒ素も若干高い値を示していることから、他のタイプに

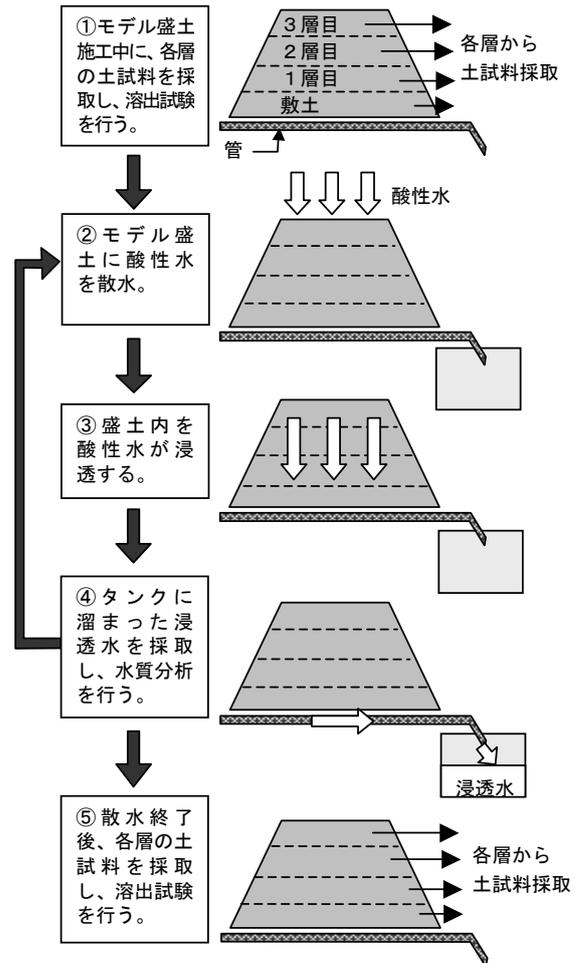


Fig.3 酸性水の散水方法

比べ不溶化剤の添加が少ないことや敷土のヒ素吸着能力の相違等が影響していると考えられる。

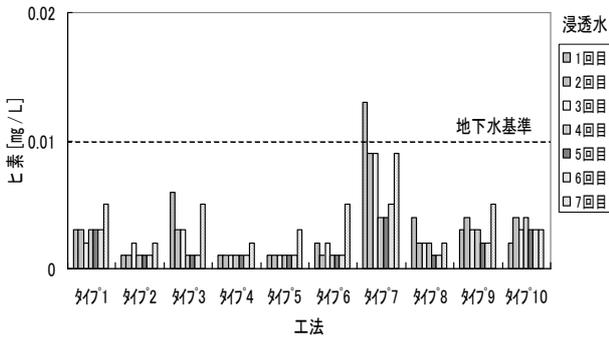


Fig.4 浸透水のヒ素濃度

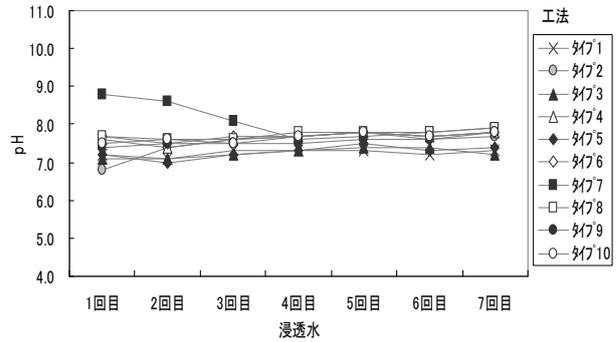


Fig.5 浸透水のpH

### 3-2. 盛土材及び敷土

盛土材のヒ素溶出量及び pH を Table6 に示す。

酸性水散水前後の1～3層を比較すると、不溶化剤を混合していないタイプ1（無処理）、タイプ2（不溶化吸着）は散水前後ともに基準値を超える結果であった。一方、不溶化剤を混合したタイプ3（混合）は散水前後ともに基準値を満たしており、酸性雨に対する耐久性を確認することができた。また、不溶化剤を層状に敷設したタイプ5、6（層状）は、散水前は基準値を超過していたが、散水後は基準値を満たしていた。これは、水に溶解したカルシウムイオンが盛土内を浸透しヒ素を不溶化したためと考えられる。不溶化剤を吹付けたタイプ7～10（吹付け）は、散水前は基準値を超過していたが、散水後は全体的にヒ素濃度が低下し、タイプ10の3層目を除き基準値を満たしていた。これもタイプ5、6と同様の効果と考えられる。敷土は全て下限値である0.001 mg/L付近の値であり、不溶化吸着層からの再溶出はみられなかった。

一方 pH は、酸性水を散水した影響もあり、全体的に低下していた。その中でも、不溶化剤を混合したタイプ3（混合）及びタイプ4（混合+吸着層）は散水前から pH が低く、散水後には中性付近まで低下していた。散水前から pH が低いのは、不溶化剤の主成分である硫酸カルシウムの溶解により中和された影響と考えられる。更に酸性雨を散水したことで、pH が中性付近まで低下したと考えられる。

### 3-3. 各種計測器による観測結果

各処理工法の代表としてタイプ1（無処理）、タイプ2（不溶化吸着）、タイプ3（混合）、タイプ5（層状）、タイプ7（吹付け）の地温及び外気温を Fig.6 から Fig.10 に、体積含水率を Fig.11 から Fig.15 に示す。

Table6 盛土材のヒ素溶出量及びpH

工法	項目	ヒ素[mg/L]		pH [-]	
		散布前	散布後	散布前	散布後
タイプ1 無処理	3層目	0.017	0.011	9.7	8.6
	2層目	0.021	0.013	9.6	8.6
	1層目	0.016	0.014	9.4	8.4
	敷土	<0.001	<0.001	6.6	6.3
タイプ2 不溶化 吸着層	3層目	0.018	0.013	9.3	9.1
	2層目	0.012	0.013	9.9	9.0
	1層目	0.016	0.013	8.9	8.8
	敷土	<0.001	<0.001	7.2	7.4
タイプ3 混合	3層目	0.008	0.004	8.9	7.8
	2層目	0.005	0.004	9.0	7.6
	1層目	0.006	0.004	7.7	7.4
	敷土	<0.001	<0.001	6.3	6.7
タイプ4 混合 +吸着層	3層目	0.007	0.005	8.8	7.8
	2層目	0.004	0.004	8.9	7.6
	1層目	0.007	0.004	8.3	7.6
	敷土	0.001	<0.001	7.2	7.2
タイプ5 層状	3層目	0.019	0.004	9.6	7.8
	2層目	0.013	0.005	9.7	7.7
	1層目	0.016	0.007	9.3	8.0
	敷土	<0.001	<0.001	7.0	6.5
タイプ6 層状 +吸着層	3層目	0.019	0.007	9.8	8.1
	2層目	0.012	0.009	9.7	8.5
	1層目	0.013	0.010	9.2	8.6
	敷土	<0.001	<0.001	7.2	7.1
タイプ7 吹付け①	3層目	0.019	0.010	9.6	8.8
	2層目	0.014	0.008	9.8	8.9
	1層目	0.018	0.009	7.9	8.7
	敷土	<0.001	<0.001	6.6	6.4
タイプ8 吹付け① +吸着層	3層目	0.016	0.006	9.6	8.4
	2層目	0.011	0.006	9.5	8.4
	1層目	0.017	0.003	8.4	8.0
	敷土	<0.001	<0.001	7.2	7.3
タイプ9 吹付け②	3層目	0.017	0.009	9.6	8.9
	2層目	0.011	0.009	9.6	8.8
	1層目	0.017	0.009	8.0	8.6
	敷土	<0.001	<0.001	6.5	6.7
タイプ10 吹付け② +吸着層	3層目	0.019	0.012	9.7	9.0
	2層目	0.012	0.008	9.6	9.0
	1層目	0.016	0.009	9.5	8.8
	敷土	<0.001	0.001	7.2	7.4

### 1) 地温及び外気温

外気温は昼夜の温度差により-5~20℃の範囲で変動を繰り返したが、地温は昼夜の大きな変動はみられず、季節変化とともに徐々に低下した。無処理のタイプ1と比較しても、処理工法による差はみられず、不溶化剤添加による地温の変化等はみられなかった。なお、観測期間は平成20年9月30日から11月18日の50日間である。

### 2) 体積含水率

体積含水率は、タイプ7を除き散水後に一時的に上昇したが、1日程度でほぼ一定の含水率となり、30~40%の範囲で推移していた。これに対しタイプ7は、散水による体積含水率の変化はほとんどみられなかった。これは浸透水が汚染土(掘削ずり)を通過した後速やかに敷土を浸透したためと考えられる。この原因は他のタイプに比べ盛土に粗粒分が比較的多いため、空隙が形成され水みちができていた可能性がある。また、敷土に対しても同様の可能性が考えられる。

### 3) 硫化水素

硫化水素ガスは全ての測定で検出されず、硫化水素ガスの発生は確認されなかった。

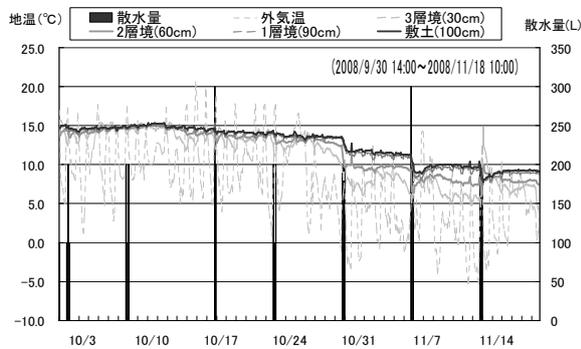


Fig. 6 【地温及び外気温】タイプ1 (無処理)

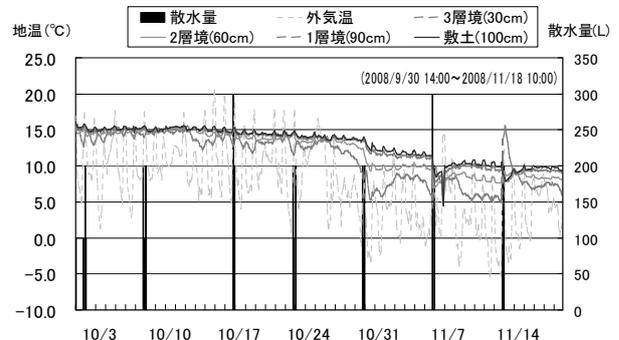


Fig. 7 【地温及び外気温】タイプ2 (不溶化吸着)

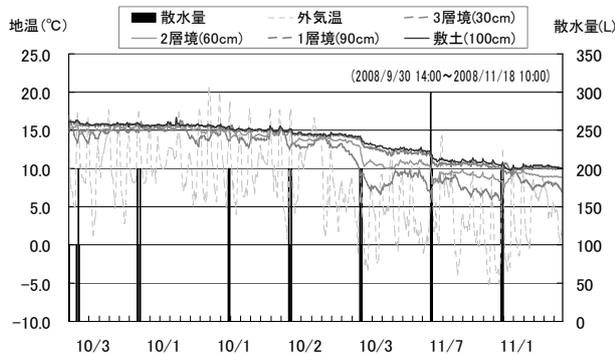


Fig. 8 【地温及び外気温】タイプ3 (混合)

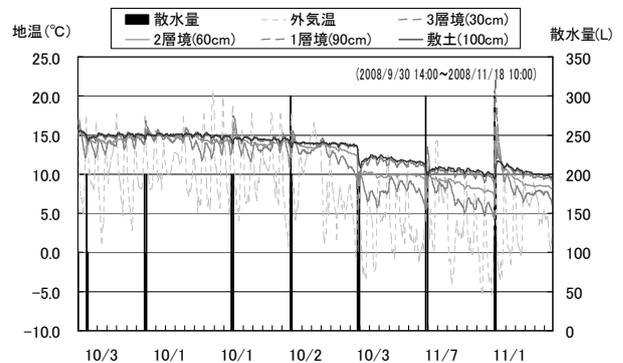


Fig. 9 【地温及び外気温】タイプ5 (層状)

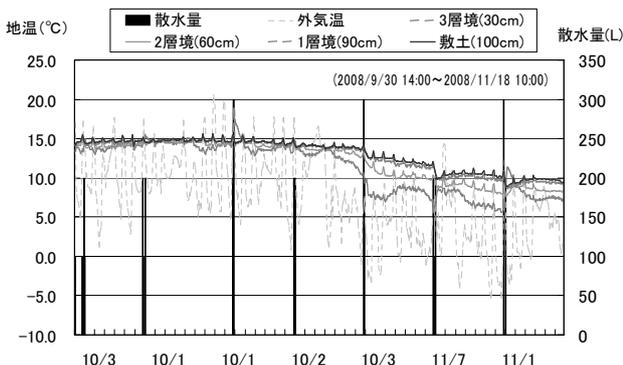


Fig. 10 【地温及び外気温】タイプ7 (吹付け)

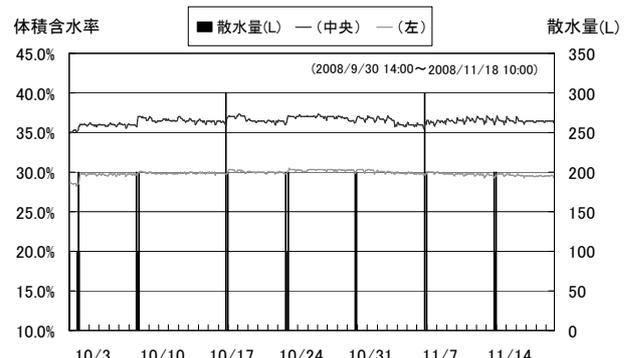


Fig. 11 【体積含水率】タイプ1 (無処理)

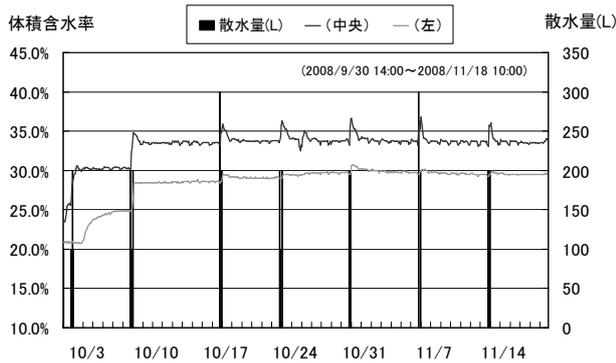


Fig. 12【体積含水率】タイプ2（不溶化吸着）

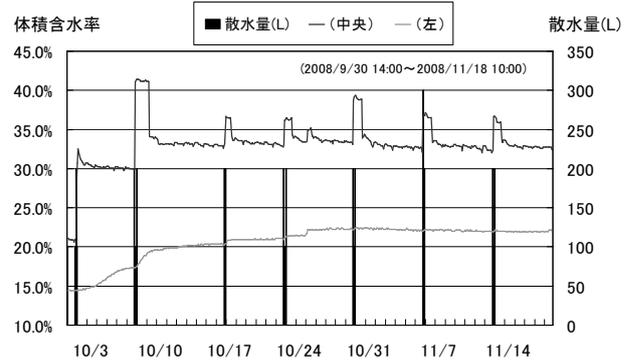


Fig. 13【体積含水率】タイプ3（混合）

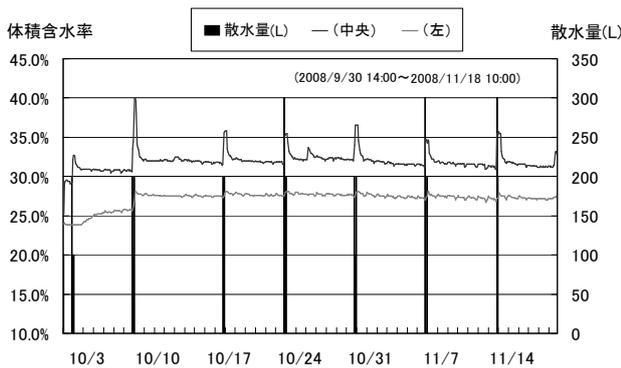


Fig. 14【体積含水率】タイプ5（層状）

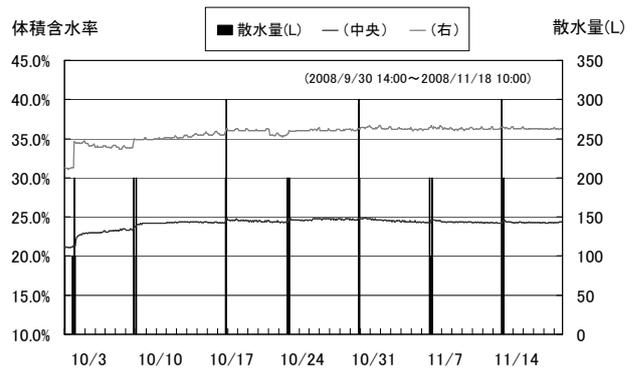


Fig. 15【体積含水率】タイプ7（吹付け）

#### 4. おわりに

公定法による室内溶出試験に関する研究は多数報告されているが<sup>20)~23)</sup>、現場で汚染土を用いて盛土を造成し、盛土内からの溶出液のヒ素濃度について測定した報告は少ないようである。そこで、本報告では、汚染処理対策の有効かつ合理的・経済的な工法を見出す目的で、自然由来重金属類（ヒ素）汚染土を用いて盛土を造成し、カルシウム系不溶化剤を用いた処理工法の溶出特性について実験を行った。短期間の現場実験であったが、以下の知見を得ることができた。

- ・ほとんどの処理工法において、浸透水のヒ素濃度は基準値以下であった。無処理であるタイプ1でも効果がみられたことから、粘土分を含有する敷土層（現地発生土）でもヒ素が吸着されるものと考えられる。
- ・不溶化剤を盛土材全体に混合する混合工法では、盛土材は酸性水散水前後ともにヒ素溶出基準値を満たしており、酸性雨に対して耐久性を有するものと考えられる。
- ・不溶化剤を層状に敷設した層状工法では、盛土材は酸性水散水前は基準値を超過していたが、散水後は基準値を満たしていた。不溶化剤が溶解し、汚染土に浸透することで、ヒ素を不溶化できるものと考えられる。
- ・不溶化剤を吹付けた吹付け工法では、盛土材は酸性水散水前は基準値を超過していたが、散水後は全体的にヒ素濃度が低下した。これも層状工法と同様の効果と考えられる。
- ・不溶化剤（石膏）に由来する硫化水素ガスの発生はなかった。

今回は2ヶ月弱という短期間の実験であったが、各処理工法の特徴について一定の知見を得ることができ、混合工程を要しない層状工法や吹付け工法での不溶化効果を確認することができた。一方で、盛土材は粒度、形状、細粒分と粗粒分の含有率等のばらつきが大きく、盛土内の締め固め密度や透水性に影響を及ぼすとともに、散水後の水みちも多様であると考えられ、各タイプとも十分な均一性を保つことが困難であることもわかった。

今後の課題としては、さらに長期間の現場実証により長期的な溶出特性について知見を深めていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 小澤英明：土壤汚染対策法，白揚社，pp.41-84，2003.
- 2) 木暮敬二：法に基づく土壤汚染の管理技術，技報堂出版，pp.23-41，2004.
- 3) (独)土木研究所編：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル[暫定版]，pp. 1-8，pp.71-72，2004.
- 4) 深津功二：土壤汚染の法務，民事法務研究会，pp.2-37，2010.
- 5) (独)土木研究所：土木研究所資料建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壤への対応マニュアル(暫定版)(案)，pp.1-26，2010.
- 6) (社)地盤工学会：土壤・地下水汚染の調査・予測・対策，pp.165-168，2004.
- 7) (社)地盤工学会：続・土壤・地下水汚染の調査・予測・対策，pp.79-83，2008.
- 8) T. L. Lyon, H. O. Buckman：The nature and Properties of Soils, The Macmillan co, pp.263-274, 1927.
- 9) W. W. Wilbert：Soil Science - Its Principles and Practice -, J. B. Lippincott co, pp.59-69, 1936.
- 10) 日本土壤学会編：土壤の吸着現象 - 基礎と応用 -, 博友社，pp.6-43，1954.
- 11) (社)北海道環境保全協会技術委員会：自然由来ヒ素含有掘削ずり処理のための道内火山灰土・粘性土の吸着層への利用可能性，北海道環境保全協会技術レポート No.1，pp.1-13，2009.
- 12) 田本修一・伊東佳彦・日下部祐基・五十嵐敏文・渡辺歩・青木卓也：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験，地盤工学会北海道支部技術報告集第 47 号，pp.247-250，2007.
- 13) 田本修一・伊東佳彦・岡崎健治・五十嵐敏文：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験(その 2)，地盤工学会北海道支部技術報告集第 48 号，pp.157-160，2008.
- 14) 植松えり子・小口智久・常松哲：廃石膏ボードとホタテ貝殻を利用したヒ素不溶化処理の研究，第 40 回地盤工学研究発表会，pp.2613-2614，2005.
- 15) 植松えり子・小口智久・常松哲：廃石膏ボードを利用したヒ素不溶化処理の研究(その 2) - 不溶化における土粒子の影響 -, 第 41 回地盤工学研究発表会，pp.2369-2370，2006.
- 16) 植松えり子・小口智久・常松哲：石膏粉とホタテ貝殻を利用したヒ素含有土壤の不溶化技術，農業土木北海道第 30 号，pp.42-46，2008.
- 17) 植松えり子・齋藤謙一・小口智久・常松哲：自然的原因による砒素不溶化剤の開発，(社)北海道土地改良設計協会報文集第 21 号，pp.27-34，2009.
- 18) (社)土壤環境センター：重金属等不溶化処理土壤の pH 変化に対する安定性の相対的評価方法 硫酸添加溶出試験法・消石灰添加溶出試験法 解説書，pp.8-9，2009.
- 19) 前掲 7)，pp.87-89.
- 20) 宮口新治：溶出条件の違いによる岩石からの重金属類の溶出特性について，地質と調査，No.2，pp.14-19，2006.
- 21) 高橋良・垣原康之・野呂田晋・遠藤祐司：堆積岩からの自然由来有害元素の溶出に対する風化の影響，北海道立地質研究所報告第 81 号，pp.37-44，2010.
- 22) 野呂田晋・遠藤祐司・八幡正弘・岡村聡：硫黄・褐鉄鉱体および周辺変質岩からの有害元素の溶出特性について，日本応用地質学会北海道支部平成 16 年度研究発表会講演予稿集第 24 号，pp.23-26，2004.
- 23) 田本修一・中川伸一・伊東佳彦：自然由来の有害物質を対象とした建設発生土の溶出について，地盤工学会北海道支部技術報告集第 45 号，pp.301-302，2005.