

第2回（平成15年）技術報告会
北海道土木技術会 土質基礎研究委員会

地盤環境問題に関する技術報告会 （その2）

報 告 集

平成15年11月

主催 北海道土木技術会
土質基礎研究委員会

目 次

特別講演：「安全と環境との整合をめざす海外の冬期道路管理」――	1
---------------------------------	---

石本 敬志 ((財) 日本気象協会)

a. セッション1

a-1 地盤環境対策としての	1 1
----------------	-----

地盤改良技術の適用

日置 和昭 (不動建設(株))

櫛原 信二 (同 上)

小飼 喜弘 (同 上)

佐藤 敏和 (同 上)

大林 淳 (同 上)

a-2 セメント改良土からの	2 1
----------------	-----

六価クロムの溶出特性および還元化特性に関する一考察

谷中 仁志 (サンコーコンサルタント(株))

加藤 喜則 (日本道路公団試験研究所)

武 昌信 ((株) サンコー環境調査センター)

a-3 テフロン処理防塵固化材による	2 9
--------------------	-----

軟弱地盤安定処理

西田 浩行 (日鐵セメント(株))

畠山 誠 (同 上)

阿部 直也 (同 上)

a-4 揮発性有機塩素化合物による	3 7
-------------------	-----

深層土壌汚染の原位置浄化方法

白井 克巳 ((株) 竹中土木)

富田 洋 (同 上)

森嶋 章 (同 上)

斉藤 聰 ((株) 竹中工務店)

奥田 信康 (同 上)

木村 玄 (同 上)

岩本 宏 (同 上)

山本 光起 (同 上)

b. セッション2

b-1 粒度調整による河川工事発生土の有効利用 ----- 4 3

数田 茂 (北海道開発局)

水嶋 稔 (同 上)

西村 右敏 ((株)開発工営所)

b-2 建設発生土に含まれる重金属流出に関する検討 ----- 5 3

橋本 祥司 (北海道開発土木研究所)

伊東 佳彦 (同 上)

田本 修一 (同 上)

b-3 中性無機改良材 (S T-エコロ) による建設発生土の改良 ----- 6 1

竹内 雄三 (小野田ケミコ(株))

竹田 敏彦 (同 上)

佐藤 勝義 (同 上)

石本 敬志
(財) 日本気象協会 北海道支社

1 : まえがき

雪や氷の影響を受け、滑りやすくなる冬期路面对策として、塩を中心にした凍結防止剤は、世界中の積雪・寒冷地域で使われている。冬期交通の安全確保に不可欠な凍結防止剤は、一方で、車や道路構造物への影響の他に、地下水や湖沼などの水質や植生など、環境への影響も懸念されている。

こうした矛盾する要因を含む案件では、早い段階から関連情報の社会的共有に基づく、開かれた冷静な議論が必要であり、各国とも、種々の取り組みをしている。1998年以降、世界道路協会(PIARC)冬期道路管理委員会(C17)委員として触れている欧米の具体例を紹介しながら、わが国における交通安全と環境の将来像を考えたい。

2 : 交通安全と環境負荷を考慮した、社会的合意形成

雪氷路面に使われる塩などの凍結防止剤や、砂などの滑り止め材は、冬道の安全確保に広く使われている。一方で、環境に与える影響も調べられており、安全と環境との整合を図るには、気象条件に見合った運用が最も重要であることが世界共通の認識になっている。ここでは、環境への負荷を下げる試みや、矛盾する側面を持つ課題について社会的合意形成事例や、そうした事例に取り組むためのモデルを紹介する。

2-1 : 粘土地盤置換による塩水浸透防止

当該道路はフィンランド最南端部に位置し、危険物輸送車が通り維持水準が高く、年平均日交通量は3,300台である。地下水位が高く路面陥没対策や水質保護を目的とした国内最大規模の地下水保護対策が施工された¹⁾。

フィンランドでは、凍結防止剤による地下水の塩分濃度が25 mg/l以上、あるいは、散布する塩の量が年間8 t/kmを超える場合には対策が必要であると規定されている。これらの条件及び調査結果から判断し、当該道路20 kmのうち、16.5 kmの区間について地下水対策を行うこととし、延べ面積は330,000 m²に及ぶ予定である。14箇所地下水汲上げ設備が設けられ、10箇所は海に排水、残り4箇所は他の国土内に排水される予定である。路盤には粘土質の不浸透層(Geosynthetic Clay Liner ; GCL)が施工されるなど、対策地域の選定と具体的工法を示している。

道路改良・新設に要する全体費用は1,440万ドルであり、そのうち、地下水対策費用が380万ドルである。これは、1 km当りの地下水対策費用を227(千ドル)と仮定した場合である。1 m²当りの対策費用は11.5ドルとなる。対策費用の内訳は以下のとおりである。

- ① 不浸透層(粘土層)の敷設……3.0(百万ドル)
- ② 道路沿いの排水……0.3(百万ドル)
- ③ パイプ敷設……0.3(百万ドル)
- ④ 給水設備……0.2(百万ドル)

2-2：摩擦係数を下げて達成した地下水塩素濃度削減

フィンランドでは南部の海岸線に沿い、水が浸透しやすい地質のウーシマー地区で、塩散布量を減らす実験を 1999 年秋から実施した²⁾。この地区は、路面管理に使われる塩散布で、地下水の塩素濃度が上がり、環境問題になる事が懸念されていた。

交通安全のために塩散布は欠かせないが、こういった場合にその散布量を減らせるのか、また、塩散布の減少による地下水の塩素濃度、交通事故、走行速度などとの関連が調べられた。また、沿道住民や道路利用者を含む社会的合意形成にも配慮した実験は、真冬の厳しい気候から徐々に暖くなる時期に実施された。ただし、湿気を含んだ暖かい路面の凍結や、過冷却した降雨に起因するスリップ事故防止のためには、従来通りに散布するなどのきめの細かさもあわせ持っている。

なお、この実験では、管理目標としての路面摩擦係数を通常の 0.30 よりも低い 0.25 とした。その結果、

- ・ 従来の冬と比較して約 40% (10t/km から 5.8t/km) 塩散布量を減らせた。
- ・ しかし、他のスリップ事故抑制対策を実施したため、全体として冬期の道路維持費用は減らなかった。
- ・ 塩散布量の減少で、交通事故件数は変わらず、車両走行速度も 0.1km/h 遅くなっただけでほとんど変化が無かった。
- ・ 地下水の塩素濃度は 1999 年と 2000 年を比較した場合、20 箇所の観測点で減少が見られ、全体的に見ると、1.36 mg/l 減った。
- ・ 道路利用者（モニター）から実験に関する意見を聴取した結果、モニターの 3 人に 1 人は塩散布の廃止を望み、彼らの多くが塩散布量の減少を望んでいる結果が得られた。

なお、2003 年の世界水会議で、地表面水質世界一の評価を得たフィンランドでは自然状態にある地下水の塩分濃度は 10 mg/l 未満である。家庭用地下水への塩分含有量は、道路庁の管理目標で、水 1 l あたり 100 mg に制限されている。

2-3：道路起因の非排出ガス系粒状物質の現状と健康

仏、オーストリア、独の全死亡率の 3% は、道路交通起因の呼吸器疾患との論文もあり、粒状物質問題も継続的な研究がスウェーデン道路交通研究所などで進んでいる³⁾。10 年前にも、排気ガスや粉塵が社会問題になっており、ノールウェーの 2 万人以上の街では $\text{NO}_2 > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{10} > 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ など、窒素酸化物や 10 ミクロン以下の粉塵が一定量を越えると予測されるときは、交通規制を行うことも検討していた時期もある。北欧では、スパイクタイヤを法律では禁止せず、軽量ピンなど改良スパイクタイヤの研究が続いている。一方、日本ではスパイクタイヤを禁止して現在に至っている。

粒子状物質は排出ガス系と非排出ガス系に分けられる。排出ガス系では、表-1 に示すように普通乗用車のディーゼルエンジンがガソリン車の百倍、10t を越える大型車は更に数倍多そうである。ただ、表を見て分かるように触媒などを使う改良で、排出量は 1/10 以下となるように、化石燃料を使う車でも、環境や健康を配慮した改良が進んでいる事も事実である。

Table 3. Emissions of exhaust particles (mg km^{-1}) (Lenner and Karlsson, 1998). W cat. = without catalytic converter (figures in brackets are standard deviations).

Car				Heavy truck		
W cat.	Cat.	New cat.	Diesel	< 16 t	> 16 t	Bus
16 (2)	2.4 (0.5)	1.4 (0.3)	279 (56)	630 (227)	1080 (430)	830 (274)

表-1 1 km 走行排出粒子量. Wcat は触媒改良なし. 改良で 1/10 以下になる。

排出ガス系粒状物質を最少現にしようとする、エンジン改良も最近始まっている。非排出系粒子には舗装摩耗、タイヤのゴムや接着剤、ブレーキライニング摩耗などが含まれ、その 63% は、 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の微粒子である。 $1 \mu\text{m}$ 以下の超微粒子ほど、呼吸器の奥深くまで侵入し影響が大きい。この論文には、スパイクタイヤ有無による、舗装骨材や重金属についての日本の疫学関係研究者の論文も 2 編引用されており、国内異分野との情報交流の不足を、外国文献に教えられた気がする。

しかし、非排出ガス系粒状物質の実態は未解明の部分が多い。この研究は既往文献調査であるが、今後も調査が続けられるようなので、その動向に注目したい。

2-4：環境と安全の社会的合意を目指すカナダの取り組み

冬期道路の安全向上のため、凍結防止剤散布量を増やすと環境負荷が大きくなる。それが、CMA など有機物素材を中心とする物でも、富栄養化などの影響は避けられない。冬期道路管理に必要な不可欠なことを認めた上で、凍結防止剤の全国的な現状、環境負荷、将来の課題やあり方を全国規模で検討したレポートが、1999 年にカナダから発表されている⁴⁾。

その中で、固結防止に使われるシアン化合物が紫外線による光分解や加水分解でシアン化水素になる可能性を最も危険な場合として、今後の経緯を見守る必要を提起している。

図-1 には、カナダ全域の塩による環境影響を概観する目的で、道路の塩散布により各地の流域に、年平均水 1 リットル当たり何 g の塩濃度があるかを推定した結果である。このグラフは特定河川を対象にした推定結果ではない。カナダ南東部では、トロントやケベック、モントリオール、中西部ではエドモントンなど、大都市周辺で塩の量が多い。また、中西部プレーリー地帯で、降雪量が少ないのに比較的高い値になっているのは、降水量が少なく希釈されにくいことも影響している。緯度が高い地域で散布量が少ない傾向は、北欧と同じである。

また、図-2 は、大都市があり、塩分濃度が高かったカナダ東部のオンタリオ州、ケベック州を対象にした、水溶固形物量と電気伝導度分布である。やはり、人口密度が高い所で、雪や寒さの影響が大きいことを反映し、大きな値となっている。

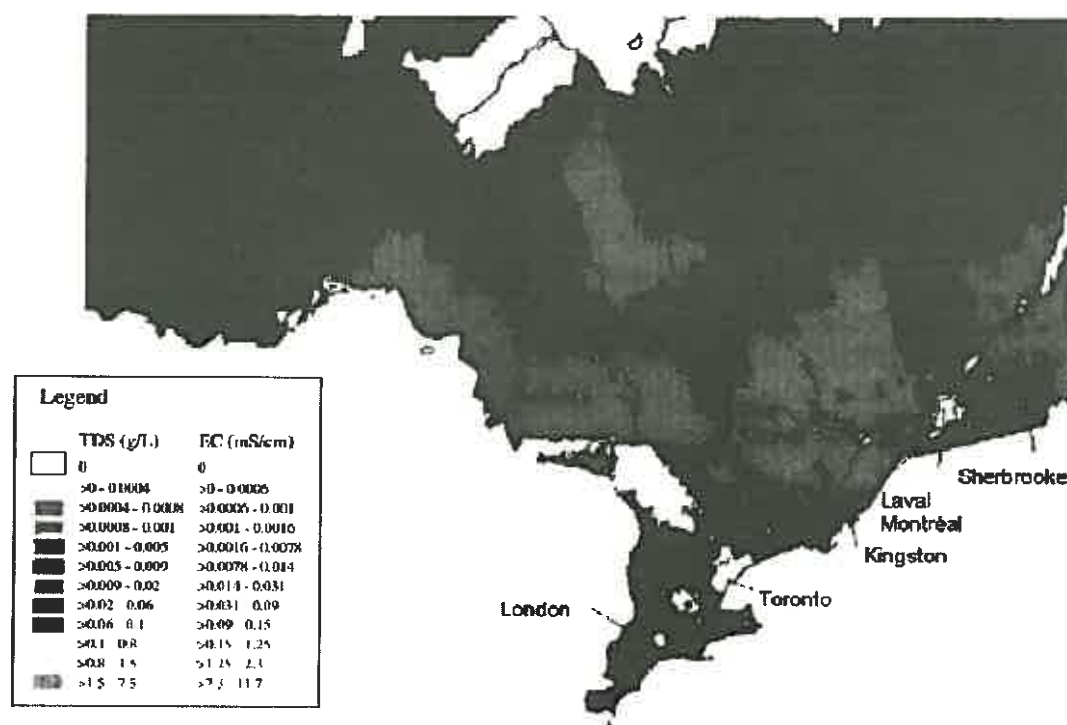
更に、図-3 には、各州道路管理地域ごとに、アルカリ土壌判定に使われる、道路沿いの交換性ナトリウム率 (ESP) を示した。塩分濃度が高い地域で高い値を示している。これら一連の検討では、自然条件下の濃度にも配慮し、生態系への影響を総合的に検討しており、今後の経緯に注目したい。

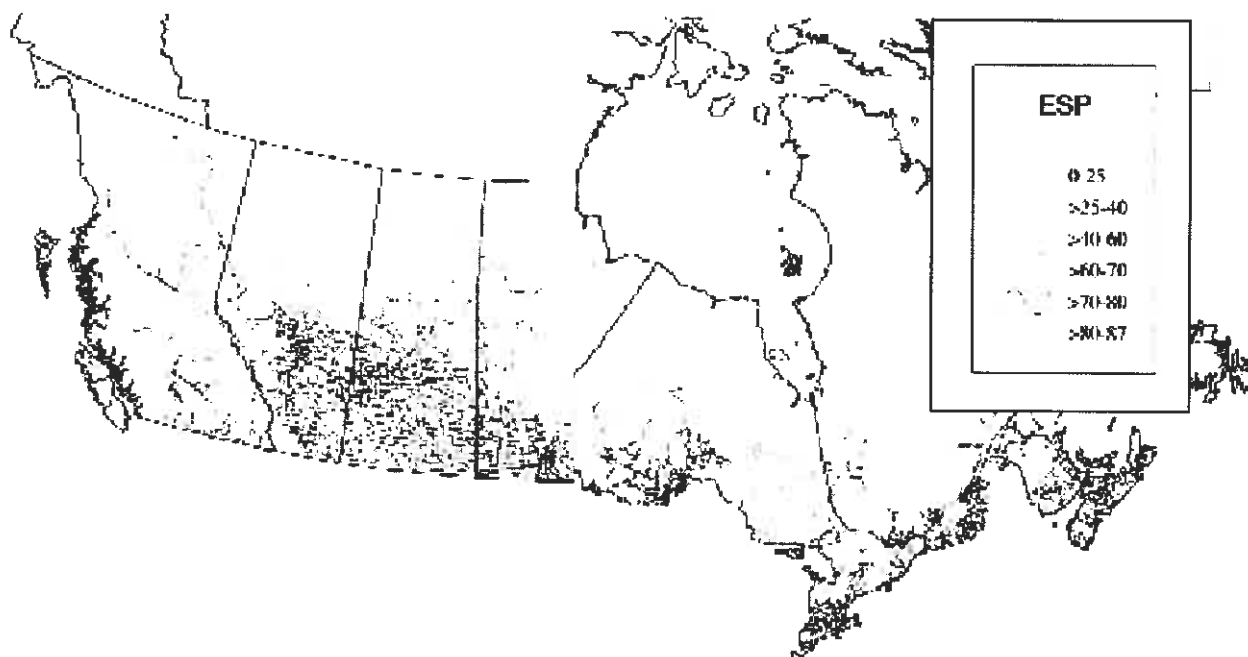
FIGURE 10 Estimated road salt chloride concentrations by watershed, calculated from average annual road salt loadings and average annual runoff (from Mayer *et al.*, 1999)



図－1 散布塩負荷と平均流出量から推定した塩濃度↑、図－2 南東部拡大図↓

FIGURE 22 Estimates for total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC) of average soil solution and surface waters, by level 2 watersheds and by municipal boundary, Ontario and Quebec (from Morin *et al.*, 2000)





図－3 道路沿いの交換性ナトリウム率（ESP）

3：矛盾する要因を取り入れた、冬期道路管理政策検討モデル

交通安全と環境保全の両立という、矛盾した要因を含む課題を扱う方針策定モデルが発表された⁵⁾。交通確保に要する凍結防止剤必要度(D)、環境への圧力(P)、環境への圧力で変わる可能性のある環境分野の状態(S)、人の健康や自然への影響(I)、予想される社会的反応(R)を考慮した、モデルの適用が望ましいというもので、概要を図－4に示す。

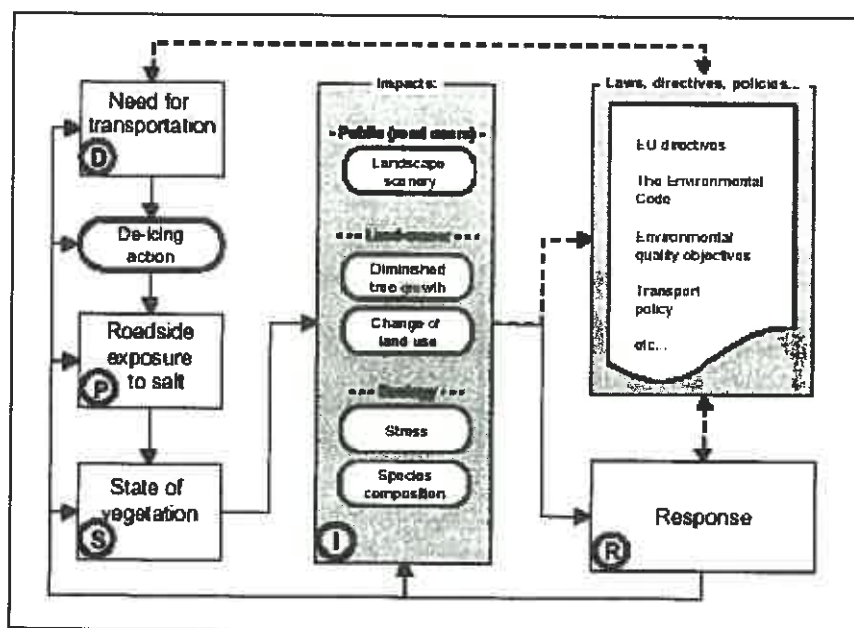


Figure 6 The System Of De-icing Action And Damage To Vegetation As Illustrated By The DPSIR model.

図－4 凍結防止剤総合評価の DPSIR モデルにおける、各要素の関連流れ図

道路に散布された凍結防止剤が周辺へ移動する過程を模式的に、図－5に示す。凍結防止剤が路側の排水溝には入らなかったり、路側や土壤に浸透し、塩水が地下水に達する場合もある。また、土壤溶液や地下水が植物の根に接すると、根から植物体内に摂取される可能性がある。木の葉や幹、茎などの残留塩分の一部は植物体内に入るが、大部分は近くの地表面まで運ばれる。

塩分が植物に及ぼす影響は、浸透圧を圧迫し吸水障害を起こすなど、直接被害の他にも、菌類や昆虫からの被害を受けやすくする傾向があるとの報告もある。また成木よりも、幼木であるほど大きな影響があるので、森の世代交代や再生に、より大きな影響がある。

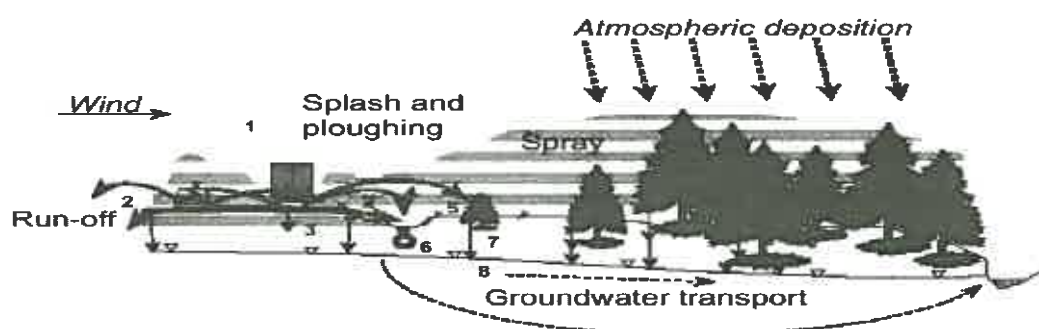


Figure 2 A Conceptual Model Of The Transport Mechanisms And Pathways From The Road.

図－5 道路に散布された凍結防止剤が、道路周辺に運ばれていく過程を示す模式図。図中の番号は、図－6の流れ図中の番号に対応。

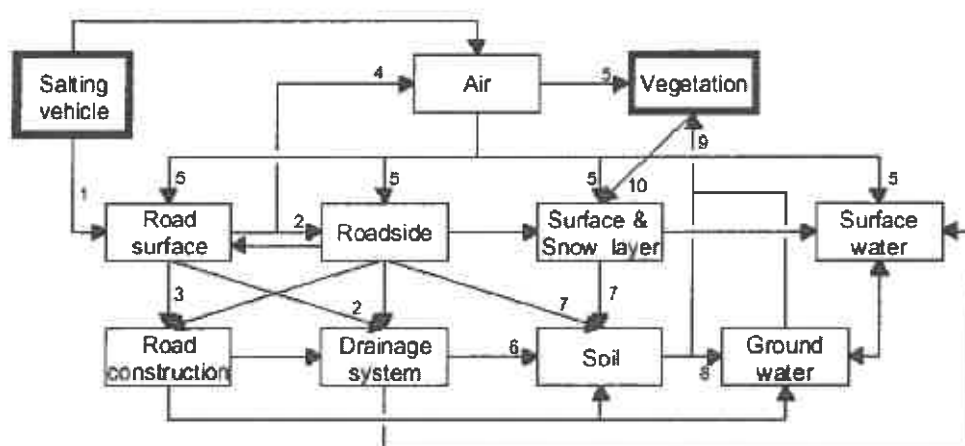


Figure 3 A Box Model Of The Physical System Of De-icing Salt Migration From The Vehicle That Carries On The De-icing Actions To The Compartments On, In Or Around The Road Which Are Involved In The Migration Or Accumulation Of De-icing Salt. The Boxes Depict The Compartments Where The De-icing Salt Either Is Passing Through Or – To Some Extent – Is Retained Or Accumulated. The Arrows Depict The Mechanisms That Govern The Migration Of The De-icing Salt, Such As: Deposition, Run-off, Infiltration, Percolation, and Root Uptake.

図－6 散布された凍結防止剤の移動、残留、蓄積過程を示す流れ図。矢印は、残留、透過、浸透、根からの吸水など移動機構を表している。

4：米国の道路気象情報有効活用の動き

米国は近年、合理的な道路管理や安全で快適な利用には、気象情報の活用が欠かせないと考え、連邦道路庁内に道路気象を専門に扱う部署を作った。更に、海洋大気庁、国防総省、州、大学、関連企業などと連携し、研究を進めると共に、情報の社会的共有と有効活用を推進している。2002年11月には、各州の有効活用事例、モデルソフト、資料集をインターネット(<http://www.ops.fhwa.dot.gov/Weather/index.htm>)で公開した。

表－2に示した以下の内容は、再掲⁶⁾であるが、情報活用の具体例として貴重なので紹介する。何がどの程度改善できるのか、定量的な説明が示されていて興味深い。

砂塵、霧、雪などによる視程障害対策として、道路利用者がこれから通る所の視程距離低下、停止、低速車両の有無状況について、可変表示板で注意喚起している（カリフォルニア州）。その結果、システム導入前4年で19件あった、霧に起因する交通事故が当該区間で無くなった。視程距離3段階に応じた、速度規制に加え、トラックと一般車の車線が分かれるよう誘導し、視程が150m前後で車線表示灯が点灯、100m以下では道路照明を消す。事情が許すなら、通行止めにして迂回路を表示する（サウスカロライナ州）、などは興味深い。視程障害に関連する、多重衝突事故が増えつつある日本でも、参考にできそうな話題である。霧や雪による視程障害は、対策施設だけでは防ぎきれない。空間的・時間的な変化や障害の程度を含む気象情報を活用し、道路利用者や維持作業関係者が、突然、予期せぬ事態に遭遇しないように支援する情報の役割が、道路の機能や安全向上に与える影響は今後も増えるであろう。

橋は熱容量が小さく、水分があると凍結しやすい。事故の多い橋梁上路面に埋設型自動凍結防止剤散布装置の設置で、冬の事故が68%減った（ミネソタ州）。この他、車種を考慮した強風情報や迂回路指示もある（モンタナ、ネバダ州）。竜巻で有名なオクラホマ州では、一般車だけでなく、緊急車両も竜巻に遭遇させないよう、道路気象情報を活用し、事故回避の成果を得ている。加えて、災害待機時間を減らすなど労働環境改善にも役立てている。

米国連邦道路局はWebsiteを頻繁に更新しており、関連レポートをpdf化し、インターネットで入手を容易にするなどして公開する場合が多くなっている。また、TRB、NCHRPなど関連機関とのリンクも充実している。米国では、産・官・学の実務担当者が集うTRB 冬期道路管理委員会で議論し決められた事案は、所属や立場の違う技術者集団が協力・フォローしている。技術情報の内容だけでなく、技術開発体制としても、日本にとって参考になる内容を含んでいる。

また、凍結防止剤として使われる量が多い、塩によるコンクリート構造物のアルカリ骨材反応や、鋼構造物の錆による劣化促進など材料系の話題もある。最近、開発が盛んな非塩素有機系凍結防止剤も、豊栄養価など環境と無縁ではありえない。

その他、野生動物を対象とした、ロードキルは、北米だけでなく、ヨーロッパの郊外部道路でも、交通と環境分野の課題になっている。

表－２ 米国における道路気象データを用いた道路防災対策事例

		カリフォルニア州運輸局	ミネソタ州運輸局	ミネソタ州運輸局	モンタナ州、ネバダ州運輸局	オクラホマ州運輸局	サウスカロライナ州、テネシー州、ユタ州運輸局
規制要素	砂塵	○					
	竜巻					○	
	霧	○					○
	雪	○					
	吹雪		○				
	強風				○		
	路面凍結			○			
	洪水					○	
	事故					○	
対応	視程距離低下に応じた注意喚起。前方、低速、停止車存在警告を可変表示板で警告	迂回路指示、誘導、法的強制力を持つ機関との協力	事故の多い橋梁に路面埋設型の自動凍結防止剤散布装置設置	横風情報、背の高い車:9m/s で強風情報、18m/s で迂回路指示を可変表示板で表示	竜巻、大雨、雪対応事前規制	道路照明消灯、車線灯点灯、推奨速度、100m以下で通行止め。液化炭酸ガスによる消散。可変表示板の他、ラジオや電話などでも対応。	
効果	多重衝突事故、4年で19件あったが、システム稼働後皆無。	滞留車両の減少による維持作業の効率化→通行止め期間の短縮	冬の衝突事故 68%減少	道路利用者、維持作業関係者の安全確保	人身、物損事故の回避、情報集中による、待機職員削減、労働環境改善	霧による衝突、30年で200件あった事故が、システム導入の94年以降、一件に減った。	
備考				可変表示板には路面状況、吹きだまり、落石情報なども表示		サウスカロライナ州は連邦裁判所の指示により設置	

※連邦道路局活用事例集より抜粋

5 : あとがき

道路の全国平均輸送分担率は人数、人キロとも7割、トン数で9割、トンキロで5割と、客・貨共に他の輸送手段に比べて高い傾向が続いている(<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/es15/es150410.xls>)。北海道を含む雪や寒さの影響を受ける地域では、自動車への依存率が全国平均より高いのも現状である。

更に、電気やガス・水道に加え鉄道も駅周辺や沿線の道路が使える事を前提に防雪や日常の維持・防災体制ができています。道路利用者だけでなく、ライフラインを含む、地域公共財にとって道路は生命線としての役割を担っている。

その役割は冬も変わらず、冬期路面管理の安全確保のため、凍結防止剤の有効活用は不可欠であり、関係者だけでなく、社会全体が多面的な側面を持つ事実資料を共有する必要がある。その上で、道路の機能や安全、費用と環境負荷を含めた将来像についての議論が必要である。

そうした議論の一つがここで紹介した事例である。もう一つは、気象情報の有効活用を中心に据えた、過不足のない維持作業の改善と、道路利用者への情報サービスである。

絶対零度（ -273°C ）から見れば、いつも融点近くにある雪氷は温度や環境条件により、著しくその物性が変わる。その厳しい実態を雪国の道路利用者は体で知っている。道路雪氷と安全や環境問題を通して、公共事業の将来像を社会全体で考えるモデルを、雪国でこそ作ることができる可能性がある、とはいえないであろうか。

引用文献

- 1 : Pekka Vallius、The Biggest Ground Water Protection Project in Finland-The Protection of Highway 25 Cost 3.8Million Dollars、PIARC2002 第11回国際冬期道路会議 論文集（CD）2002.1
- 2 : Seppo Mäkinen and Tapani Angervuori、MINIMISING SALT CONSUMPTION ON GROUND WATER AREAS IN THE UUSIMAA REGION OF FINLAND、PIARC2002 第11回国際冬期道路会議 論文集（CD）2002.1
- 3 : Mats Gustafson、Non-exhaust particles in The road Environment-A Literature Review
PIARC2002 第11回国際冬期道路会議 論文集（CD）2002.1
- 4 : Environment Canada & Health Canada、Canadian Environmental Protection Act、1999、Priority Substances List Assessment Report、2001、pp.1-170
- 5 : Goran Blomqvist、De-icing salt and Road side Environment-Strategies for Impact Analysis、PIARC2002 第11回国際冬期道路会議 論文集（CD）2002.1
- 6 : 石本敬志、欧米における気象情報を活用した冬期路面管理の動向について、「ゆき」No.51 特集“スパイクタイヤ規制後の冬期道路交通確保の現状と今後の課題について”、pp. 69-74、2002.4

地盤環境対策としての地盤改良技術の適用

不動建設株式会社 日置和昭¹・櫛原信二¹・小飼喜弘²・佐藤敏和²・大林淳¹

1. はじめに

我が国は世界でも有数の軟弱地盤国であり、軟弱地盤に重要な構造物を建設せざるを得ないという特殊事情から、多種多様な地盤改良技術¹⁾が開発・実用化されてきた。一方、近年では循環型社会への移行を背景に、これまで地盤に与えてきた環境負荷を取除き、地盤環境を蘇らせる技術が必要とされており、この分野における地盤改良技術の適用が多いに期待されている。

本文では、環境リスク低減対策、環境負荷低減対策としての地盤改良技術の適用事例や研究事例等について報告する。

2. 地盤改良技術の分類

軟弱地盤における地盤工学上の問題点としては、載荷あるいは除荷に起因する安定・沈下問題、地震時の液状化問題、さらにクイックサンドやパイピングなどの透水性問題がある。これらの問題点に対して、写真-1および図-1に示すような静的締固め砂杭工法（SAVE コンポーザー）に代表される粒状体の材料を地盤中に均一に残置する技術、写真-2～3および図-2～3に示すような粉体噴射攪拌（DJM）工法や大径化・高速化対応深層混合処理（CI-CMC）工法に代表される粉体状、スラリー状の材料を地盤と均質に攪拌混合する技術、写真-4～5および図-4に示すような鉛直シート（ジオロック）工法に代表される地盤に不足している特性を有する材料を連続的に設置する技術等が開発・実用化されている。多種多様な地盤改良技術を上記のように分類すると表-1ようになる。

表-1 地盤改良技術の分類

地盤改良技術	地盤改良工法名	
粒状体の材料を 地盤中に均一に残置する技術	打戻し式サンドコンパクションパイル工法	コンポーザー
	静的締固め砂杭工法	SAVEコンポーザー
	サンドドレーン工法	
	オーガー式サンドドレーン工法	
	砕石パイル工法	グラベルドレーン工法
粉体状、スラリー状の材料を 地盤と均質に攪拌混合する技術	深層混合処理（CDM）工法	CMC工法
	大径化・高速化対応深層混合処理工法	CI-CMC工法
	変位低減型深層混合処理工法	CDM-LODIC工法
	粉体噴射攪拌工法	DJM工法
	交差噴流式複合攪拌工法	JACSMAN
	高圧噴射攪拌工法（交差噴流式）	Xjet工法
	高圧噴射攪拌工法（大径型）	Superjet工法
	浅層・中層混合処理工法	パワーブレンダー工法
	ソイルセメント地中連続壁工法	TRD工法
地盤に不足している特性を有する材料を 連続的に設置する技術	特殊軽量鋼矢板止水工法	シートウォール工法
	鉛直シート工法	ジオロック工法

Kazuaki Hioki, Shinji Kushiara, Yoshihiro Kogai, Toshikazu Sato, Jun Ohbayashi (Fudo Construction Co.,Ltd.)

1：〒110-0016 東京都台東区台東 1-2-1 TEL 03-3837-6034 FAX 03-3837-6158

2：〒060-0003 北海道札幌市中央区北三条西 2-1 TEL 011-281-6771 FAX 011-222-4727

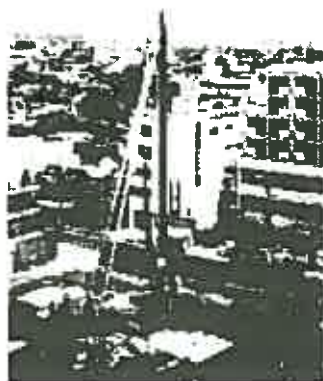


写真-1 SAVEコンポーザ-施工状況

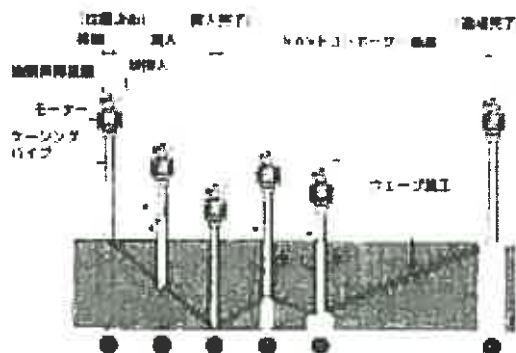


図-1 SAVEコンポーザ-施工手順

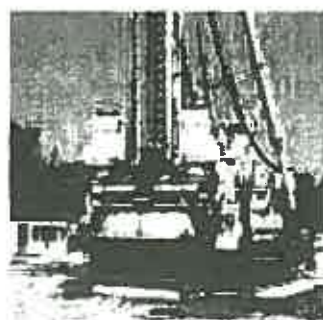


写真-2 DJM工法施工状況

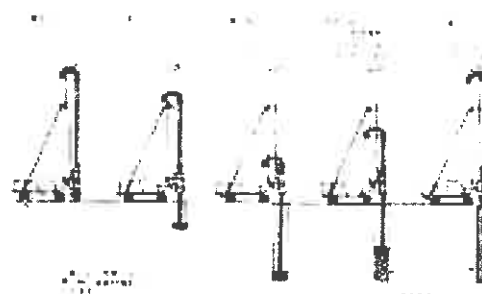


図-2 DJM工法施工手順



写真-3 CI-CMC工法スラリー吐出状況

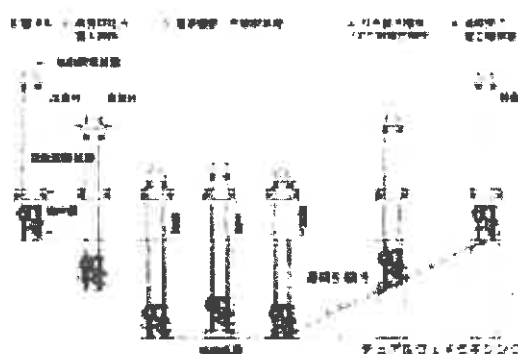


図-3 CI-CMC工法施工手順

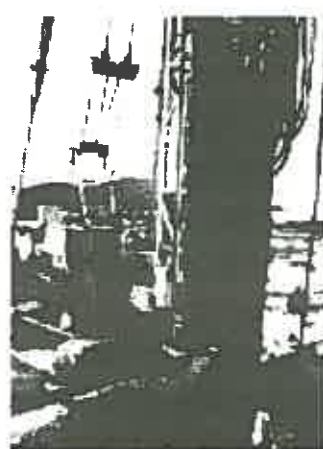


写真-4 ジオロック工法施工状況

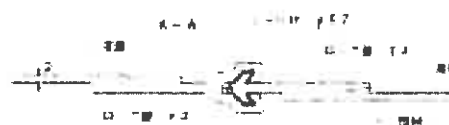


図-4 ジオロックシート構造



写真-5 ジオロックシート接続部

3. 環境リスク低減対策技術

3.1 鉛直遮水工

鉛直遮水工は、汚染地盤や廃棄物地盤から溶出する有害物質を鉛直遮水壁で封じ込めることにより汚染拡散のリスクを低減させるための技術であり、従来からの地盤改良技術そのものである。陸上では不適正処分場、海上では海面埋立処分場への適用事例が多く、遮水材料により、注入固化工法、地中壁工法、鋼矢板工法、その他工法（シート）に分類される²⁾。適用される具体的な地盤改良工法としては、ソイルセメント地中連続壁（TRD）工法、交差噴流式複合攪拌工法（JACSMAN）、特殊軽量鋼矢板止水（シートウォール）工法、鉛直シート（ジオロック）工法等があり、三層構造遮水技術（トリナー工法）³⁾も開発・実用化されている。トリナー工法の施工状況を写真-6に、施工手順を図-5に示す。その特長としては、①ソイルセメント壁体と鉛直シート等の三層構造を形成することにより、より遮水性に優れた鉛直遮水壁が構築できるため、大幅にリスクを低減できる、②地震等によりソイルセメント壁体にクラックが生じた場合でも、鉛直シート等による遮水機能は保持される、③ソイルセメント壁体の施工にTRD工法を採用することにより、砂礫地盤や軟硬岩などの硬質地盤への適用が可能である、④ソイルセメント壁体造成と鉛直シート打設の平行施工により、鉛直シート打設の負荷が低減され、施工性が向上する、⑤低振動・低騒音型の施工機を使用するため、都市部での施工にも適している、などが挙げられ、PCB、ダイオキシン等の有害物質の封じ込め対策⁴⁾としても適用されている。また、長期モニタリング⁵⁾により遮水性能が長期的に維持されていることも確認されている。

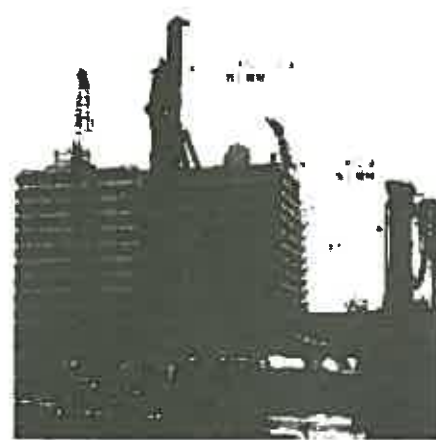


写真-6 トリナー工法施工状況

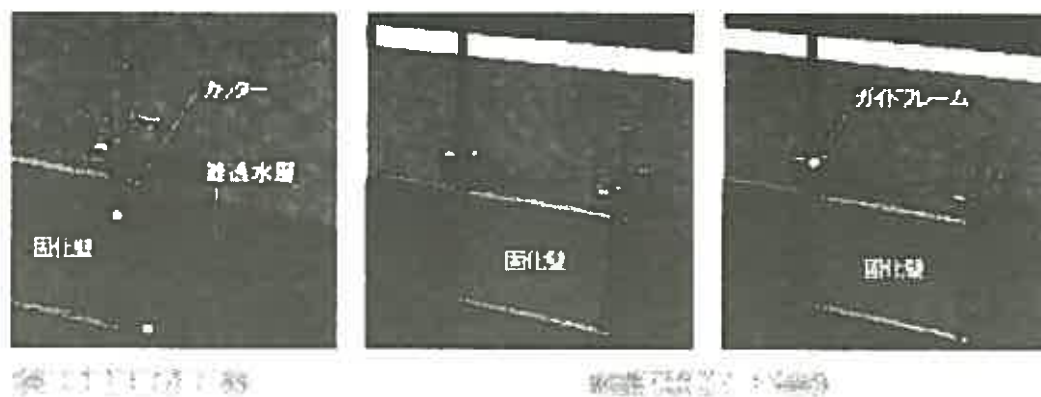


図-5 トリナー工法施工手順

3.2 セメント系固化材・薬剤による不溶化处理

セメント系固化材や薬剤による不溶化处理は、鉛直遮水工と同様、汚染地盤から人への有害物質の暴露経路を遮断しリスクを低減させるための技術であり、従来からの地盤改良技術をそのまま適用できる。対象有害物質は重金属類であり、セメント系固化材や薬剤を汚染地盤と攪拌混合することにより、不溶化处理を行う。不溶化处理における対象物質と使用薬剤等の例⁶⁾を表-2に示す。また、最近では、六価クロムの溶出が懸念されるセメント系固化材に替わり、貝殻を主成分とする改良材「フドウミックス」を開発⁷⁾し、不溶化剤としての適用性を把握するため、重金属類による実汚染土を用いた溶出試験を実施している。溶出試験結果を表-3に示す。フドウミックスにより不溶化处理を行うことにより、溶出基準値を十分に満足する結

果が得られている。なお、フドウミックスは、近年、農水省などでセメントに替わるクロムレスの固化材として研究がなされているエコルトンの一種であり、図-6 に示すように、セメントの代替材として積極的に強度を追求したフドウミックス A、生石灰の代替材として高含水比材料の含水比低減と pH 上昇の抑制を主目的としたフドウミックス B がある（上述の溶出試験は、フドウミックス A で行った）。不溶化処理に適用される具体的な地盤改良工法としては、機械攪拌系の工法として、粉体噴射攪拌（DJM）工法、深層混合処理（CMC）工法、大径化・高速化対応深層混合処理（CI-CMC）工法、噴射攪拌系の工法として、交差噴流式高圧噴射攪拌（X-jet）工法、複合攪拌系の工法として、交差噴流式複合攪拌工法（JACSMAN）等があり、先に述べたように薬剤が粉体状であっても、スラリー状であっても均質に攪拌混合することができる。

一方、不溶化処理では効果の長期的な安定性に対する懸念が指摘されている⁸⁾。川地⁹⁾は、「セメント系固化材による不溶化処理は、基本的には重金属類のセメント水和物マトリックスへの取り込みによるものであり、強度が維持されることは不溶化効果の持続を示唆する」と考察しており、セメント系固化材を用いた不溶化処理の長期的安定性に関しては、地盤改良による改良効果の持続程度から推察することができる。深層混合処理改良体における一軸圧縮強さの経時変化^{10), 11)}を図-7 に示す。いずれの調査現場においても、経過日数とともに改良体の強度は増加しており、その品質は維持されているものと考えられる。

表-2 化学的不溶化における対象物質と使用薬剤等の例⁶⁾

対象物質	使用薬剤等	作用
カドミウム化合物	塩化ナトリウム	硫化カドミウムを生成
シアン化合物 シアノ錯塩を含まない場合	硫酸第一鉄	難溶性塩を生成
鉛化合物	硫化ナトリウム	硫化鉛を生成
六価クロム化合物	硫酸第一鉄	三価クロムに還元 (その後中和により固定)
砒酸化合物	塩化第二鉄・硫酸第二鉄	砒酸鉄を生成
水銀化合物	硫化ナトリウム	硫化水銀を生成

表-3 フドウミックスによる不溶化処理土の溶出試験結果

原地盤土質名	原地盤に基準以上含まれている汚染物質	初期溶出値 (mg/l)	溶出基準値 (mg/l)	貝粉系+水 (mg/l)
粘土	ヒ素	0.08	<0.01	<0.005
砂	水銀 カドミウム	0.0146 0.024	<0.0005 <0.01	0.0004 <0.001

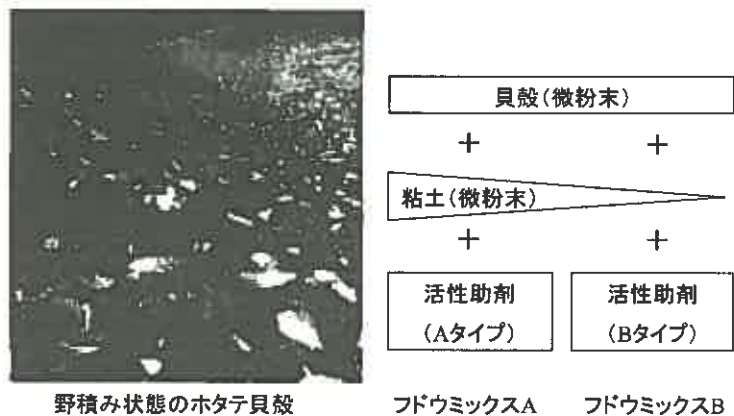


図-6 貝殻を主成分とする改良材「フドウミックス」の分類

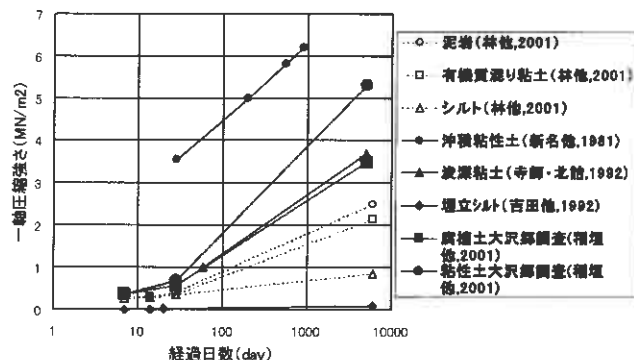


図-7 深層混合処理改良体における一軸圧縮強さの経時変化

3.3 還元剤および栄養剤による無害化处理（土壌還元法）¹²⁾

土壌還元法は、還元剤を用いた化学的脱塩素と栄養剤で活性化された微生物による生物的脱塩素を組合わせて、例えばテトラクロロエチレンを最終的には無害なエチレンやエタンに分解する方法であり、汚染地盤を無害化することでリスク低減を図る。対象有害物質は揮発性有機化合物（以下、VOCs）であり、施工方法としては、図-8 に示すように、専用プラントにより還元剤および栄養剤を供給し、所定の混練処理機を用いて汚染地盤と攪拌混合させる。栄養剤の選定にあたっては、トリタビリティテストを行い、その適用性をみる必要がある。各々の汚染地盤に応じた栄養剤を選定しなければならない。無害化に要する期間は1～6ヶ月程度であるが、これはあくまでもトリタビリティテストを行ったうえでのことである。土壌還元法は、原位置施工が基本であり、その特長としては、①原位置で短期間に土壌環境基準まで無害化することができる、②テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタン、四塩化炭素などの複合汚染物を分解可能、③シス-ジクロロエチレン、塩化ビニルポリマーなどの有害な中間代謝産物の蓄積がない、④添加物は自然界に広く存在する安全な物質である、⑤地盤中微生物を有効活用し、特定微生物（例えば、微生物製剤）を添加しない、⑥生物、化学の両反応を用いるため、低濃度から高濃度までの様々な汚染濃度に対応できる、などが挙げられる。なお、土壌還元法では、汚染地盤の硬さに応じて混練処理機を選定する。汚染地盤が軟弱地盤の場合には、水平攪拌混合方式（強制昇降装置整備）の混練処理機を適用し、硬質地盤の場合には、縦型攪拌混合方式の混練処理機を適用する。

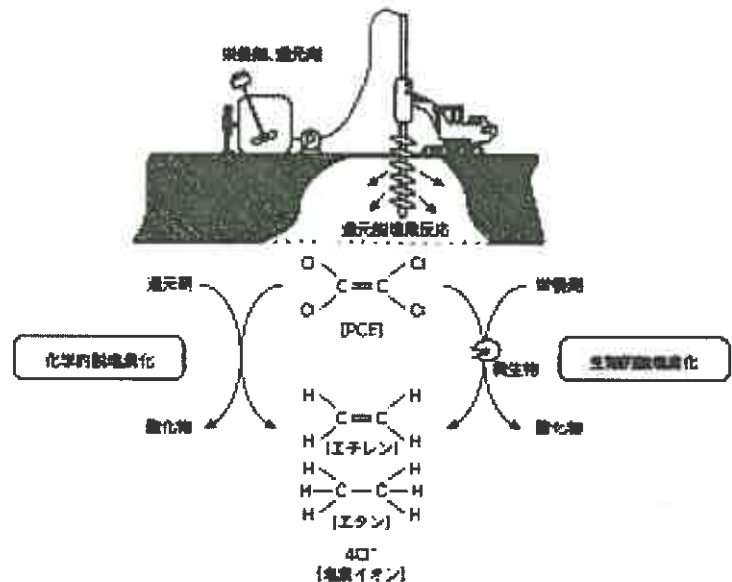


図-8 土壌還元法の原理

3.4 汚染地盤から有害物質を抽出・除去する方策

汚染地盤からVOCsなどの汚染物質を抽出・除去する方法として、地下水揚水法¹³⁾がよく用いられているが、粘性土地盤では透水性が低いいため適用が困難である。VOCs原液を効率よく抽出・除去することができない、などの問題がある。そのため、著者らは、前者については砂杭系地盤改良工法による水みちの形成¹⁴⁾、後者については凍結吸引と融解通水による抽出・除去方法¹⁵⁾を考案し、その有効性について種々の検討を行っている。

まず、VOCsで汚染された粘性土地盤から汚染地下水（溶媒水）を抽出・除去する方法の概念図を図-9に示す。著者らが実施した飽和・不飽和浸透解析¹⁶⁾により、揚水井からの揚水によって、まず砂質土層の水頭が低下し、これに連動して、砂杭、粘性土層の水位が順次低下していくこと、砂杭と粘性土層との間に大きな水位差（動水勾配）が生じ、この水位差の発生が粘性土層の水位低下の主な要因である（砂杭が、井戸として機能している）こと、汚染地下水の流れは、粘性土層 → 砂杭 → 砂質土層 → 揚水井であること、などが明らかにされている。また、鋼矢板等の遮水壁内部で実施することにより、粘性土層に好気性条件を創出できることも特長の一つと言えよう。本技術で適用される具体的な地盤改良工法としては、オーガー式サンドドレーン工法、砕石パイル（グラベルドレーン）工法等があり、粘性土地盤の地下水位低下を目的とした一般的な地盤改良工事¹⁷⁾では砂杭打設の有効性が確認されている。

次に、凍結吸引と融解通水により VOCs 原液を抽出・除去する方法の概念図を図-10 に示す。この方法は、VOCs と水との凝固点（融点）の違い（表-4¹⁸⁾参照）、および凍結融解後に地盤の透水係数が増大する効果に着目したものである。まず、準備工事として汚染地盤に所定の間隔で凍結管および吸引管を打設する。工事前半では、凍結管に冷却液を循環するなどして汚染地盤を凍結させる。汚染地盤全体の凍結が確認されたら、ポンプ吸引等により VOCs 原液のみを選択的に除去回収する。工事後半では、凍結管に温水を循環させて凍結地盤を融解させる。凍結融解後には汚染地盤の透水係数が増大しているので、ポンプアップ等による通水により VOCs 原液周辺の高濃度汚染域を洗浄できる。本技術で適用される具体的な地盤改良工法としては、凍結工法、プラスチックボードドレーン工法等があり、現在、本技術の妥当性を検証するための室内実験を行っている。

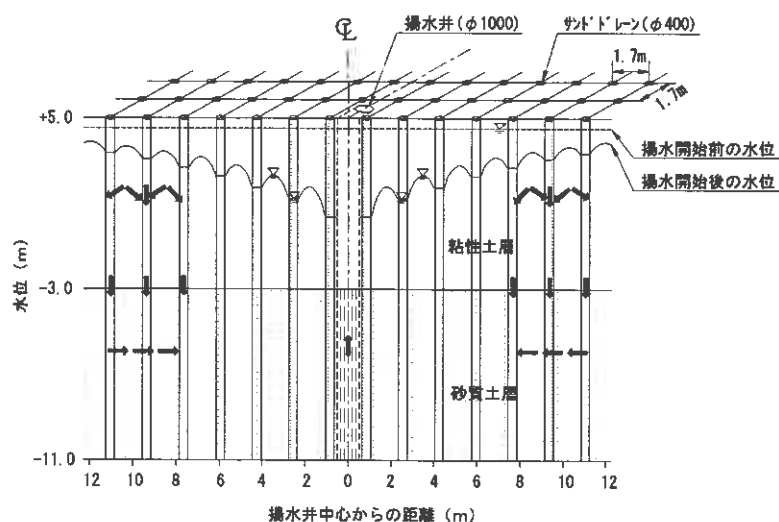


図-9 砂杭系地盤改良工法による水みち形成の概念図

表-4 主な VOCs の融点・沸点

物質名	略称	融点 (°C)	沸点 (°C)
ジクロロメタン	DCM	-96.7	39.8
四塩化炭素	CT	-22.9	76.7
1,2-ジクロロエタン	1,2-DCA	-35.4	83.5
1,1-ジクロロエチレン	DCE	-122.5	31.7
シス-1,2-ジクロロエチレン	c-DCE	-80.0	60.6
1,1,2-トリクロロエタン	1,1,2-TCA	-32.6	74.1
1,1,1-トリクロロエタン	MC	-37.0	113.5
トリクロロエチレン	TCE	-86.4	86.7
テトラクロロエチレン	PCE	-22.4	121.2

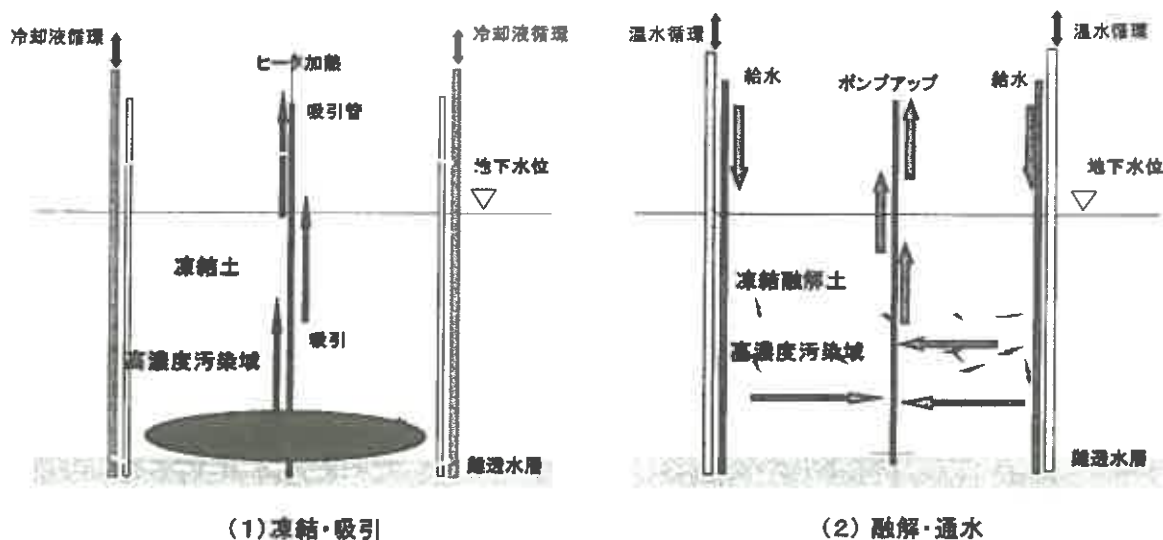


図-10 凍結吸引と融解通水による抽出・除去の概念図

4. 環境負荷低減対策技術

4.1 FUDO 式トータルリサイクルシステムの概要

従来、建築構造物の解体や舗装路の撤去で発生したコンクリート塊やアスコンガラ等は、建設廃材として廃棄処分されてきた。「FUDO 式トータルリサイクルシステム¹⁾」は、図-11 に示すように、それらの建設廃材を破碎し再生することによって、サンドコンパクションパイル工法（コンポーザー）、静的締固め砂杭工法（SAVE コンポーザー）の中詰め材料や流動化埋戻材料として再利用するシステムであり、①建設廃材を再生し、地盤改良材として再利用する環境負荷の少ないシステムである、②従来、使用していた自然砂の採取を抑制でき、現在の建設廃棄物処理場の延命化に寄与する、③発生した建設廃材処分費が軽減できる、④建設廃材を破碎し、RC-40 程度に粒度調整することにより、静的締固め砂杭工法（SAVE コンポーザー）等の中詰め材料として、粘性土地盤の安定・沈下対策から砂質地盤の液状化対策まで広範囲で適用できる、⑤建設廃材を細粒状に再生し、固化材と混合することにより流動化埋戻材料として再利用できる、などの特長を有する。

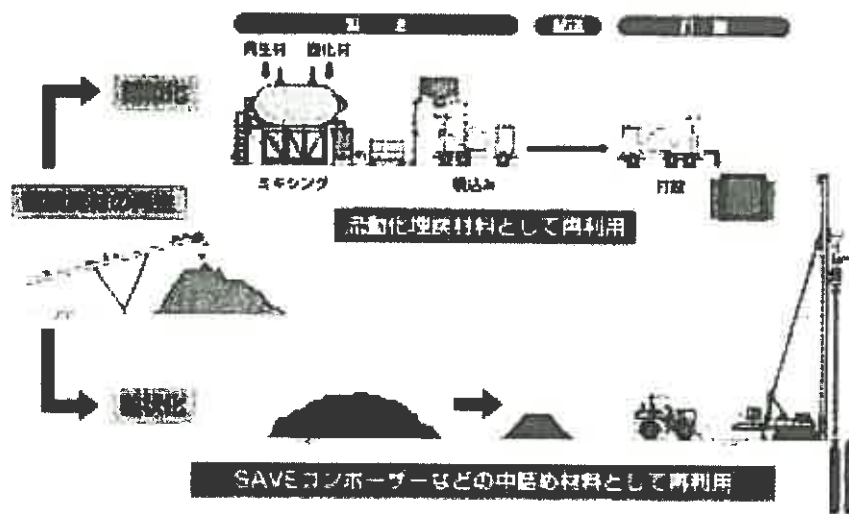


図-11 FUDO 式トータルリサイクルシステムの概要図

4.2 静的締固め砂杭工法（SAVE コンポーザー）等の中詰め材料としての適用事例

建設廃材等を再生し中詰め材料として適用された事例は多く、これまでに建設発生土¹⁹⁾の他に、焼却灰スラグ²⁰⁾、石炭灰²¹⁾、コンクリート廃材による再生砕石²²⁾、アスファルト舗装による再生砕石²³⁾等が中詰め材料として適用されている。建設廃材等による再生材料を中詰め材料として適用する場合、通常、1)中詰め材料としての材料特性の確認、2)施工性（施工能率等）の確認、3)改良効果への影響確認等が行われる。

以下に、東京都内の高等学校改築工事において、既存構造物の解体により発生したコンクリート塊を現場内で加工し、液状化対策工事に適用した事例²²⁾について紹介する。本工事における施工工程を従来の工程と比較したものを図-12 に示す。現場で加工した再生砕石は、所定の改良効果と施工性を確保するため、従来用いられてきた材料の実績を考慮し、品質目標を 1)最大粒径 40mm 以下、2)細粒分含有率 $F_c=5\%$ 以内と設定した。また、再生砕石の生産工程は、①旧構造物の解体 → ②廃材に含まれる鉄筋等の不純物除去 → ③破碎機によるコンクリート塊のクラッシュ → ④10mm フルイに通した粒度調整である。なお、本工事では再生砕石で全施工数量の半数程度をまかなうことができ、不足分に関しては、従来用いられている材料を購入した。本工事で用いた再生砕石と購入砂の粒径加積曲線を図-13 に示す。同図より、再生砕石の粒径は、砕石の実績範囲内であることが伺える。次に、本工事における改良仕様を図-14 に、改良前後における標準貫入試験結果および液状化安全率算定結果を図-15 に示す。同図より、両材料ともにほぼ同等の改良効果が得られていることが伺える。

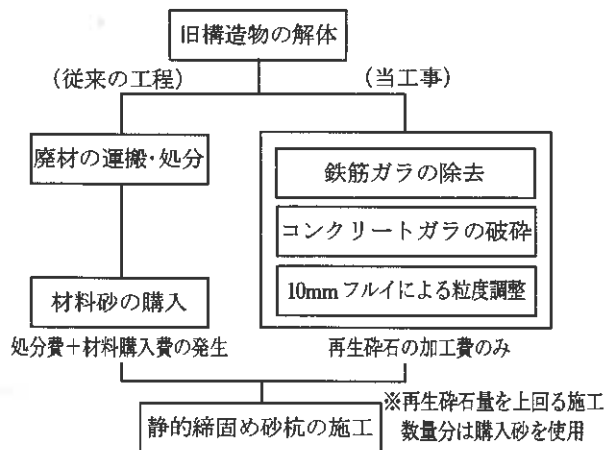


図-12 施工工程の比較

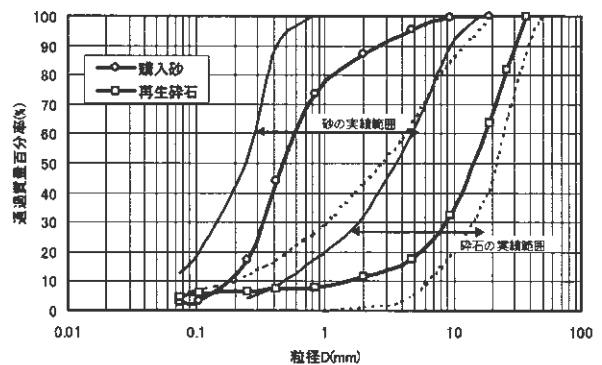


図-13 再生砕石および購入砂の粒径加積曲線

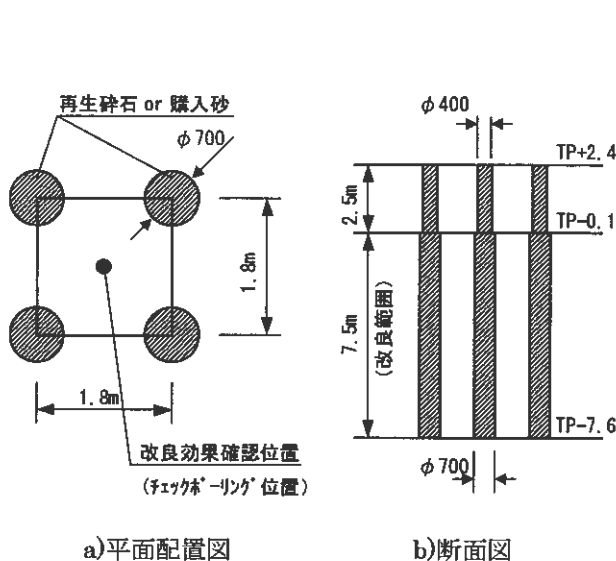


図-14 地盤改良仕様

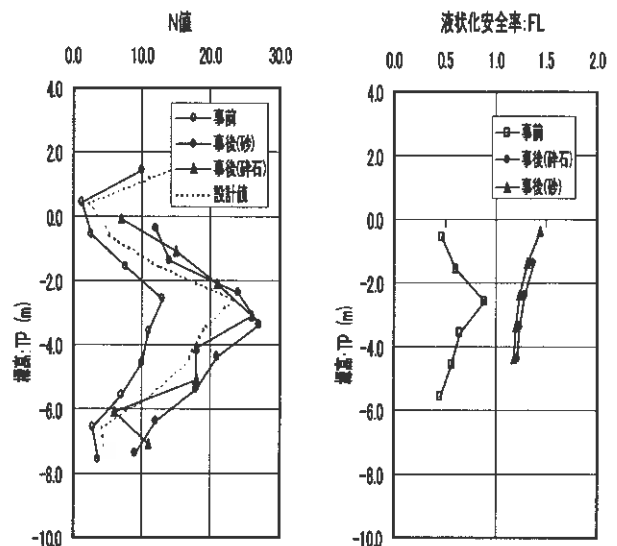


図-15 再生砕石および購入砂による改良効果の比較

4.3 流動化埋戻材料等としての適用事例

建設発生土を流動化埋戻材料として適用された事例も多く、通常、共同溝や地下鉄などの狭い空間の埋戻しに適用される²⁴⁾が、最近では、建築構造物の支持地盤としても適用されている^{25), 26)}。道内で開発・実用化された気泡混合固化土²⁷⁾もその一種であると言えよう。また、重金属類を含む下水汚泥焼却灰を流動化埋戻材料として適用した事例²⁸⁾もあり、このような場合には、流動化の前処理として、硫化ナトリウム等により不溶化処理を行う必要がある。

5. おわりに

環境リスク低減対策、環境負荷低減対策としての地盤改良技術の適用事例等について述べた。しかし、まだ地盤改良技術の知見や理論が十分に活かされているとは言い難い。例えば、ある汚染サイトで浄化工事を検討する場合、まず最適な浄化剤が検討されるが、最適な攪拌混合方式や攪拌混合程度等については十分な検討がなされていない。攪拌混合方式や攪拌混合程度の違いを考慮した浄化効果・効率の予測が今後の課題である。

参考文献

- 1) 不動建設ジオ・エンジニアリング事業本部：FUDO'S TOTAL FOUNDATION ENGINEERING SYSTEM, 2002.
- 2) 総理府・厚生省令：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令, 1998.
- 3) 原田健二・小飼喜弘・佐藤敏和：三層構造遮水壁（トリナー工法），地盤環境問題に関する技術報告会論文集，北海道土木技術会土質基礎研究委員会，pp.53～59，2002.
- 4) 豊田浩：TRD 併用鉛直シート工法による連続地中壁の施工－鶴見川多目的遊水地土壌対策工事－，土木施工 43 巻 4 号，pp.2～8，2002.
- 5) 出口敏博・今林修・花嶋正孝・柳瀬龍二：鉛直しゃ水工による廃棄物埋立地の地下水汚染対策後の水質モニタリング，第 6 回廃棄物学会研究発表会，pp.651～653，1995.
- 6) 環境庁水質保全局：土壌・地下水汚染に係わる調査・対策指針および運用基準，1999.
- 7) 財団法人沿岸開発技術研究センター：評価証第 02005 号，2003.
- 8) 例えば，今村聡：日本における汚染土壌の浄化技術，基礎工，Vol.27 No.2，pp.7～10，1999.
- 9) 川地武：汚染地盤対策としての地盤改良技術の適用性，土と基礎，Vol.50 No.10 Ser.No.537，pp.37～39，2002.
- 10) 林宏親・西川純一・江川拓也・寺師昌明・大石幹太：深層混合処理工法による改良柱体の長期強度，土木学会第 56 回年次学術講演会Ⅲ，pp.378～379，2001.
- 11) 稲垣太浩・福島勇治・野津光夫・柳川陽平・笠原洋二：供用後 10 年以上経過した高速道路盛土直下における深層混合処理改良体の品質，第 37 回地盤工学研究発表会平成 14 年度発表講演集，pp.1117～1118，2002.
- 12) 谷口紳：化学的分解法によるダイオキシン類・PCB・テトラクロロエチレンなどの有機塩素化合物汚染土壌の浄化技術，土壌における難分解性有機化合物・重金属汚染の浄化技術，pp.219～253，2002.
- 13) 例えば，環境庁水質保全局：土壌・地下水汚染に係わる調査・対策指針および運用基準，1999.
- 14) 日置和昭・青木一男・原田健二・山本実：地下水揚水法による汚染地盤の修復効果に関する一考察，土と基礎，Vol.50 No.10 Ser.No.537，pp.7～9，2002.
- 15) 伊藤譲・嘉門雅史・日置和昭・野村忠明・伊豆田久雄：凍結吸引と融解通水による VOC 汚染源の浄化方法，第 9 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.150～153，2003.
- 16) 青木一男・日置和昭：複合地盤の透水特性と地盤環境修復分野への適用性に関する研究，地下水技術，Vol.45 No.6，pp.29～37，2003.
- 17) 阿知波文夫・山口博久・松尾稔：地下水位低下工法を併用した砂杭工法による地盤改良試験工事，土木学会論文集，No.534/VI-30，pp.31～44，1996.
- 18) 社団法人地盤工学会：地盤工学ハンドブック，p.1403，1999.
- 19) 松尾稔・木村稔・西尾良治・安藤裕：建設発生土類を活用した軟弱地盤改良工法の開発，土木学会論文集，No.567/VI-35，pp.237～248，1997.
- 20) 日置和昭・酒井成之・渡邊晃史：焼却灰スラグの SCP への適用性について，第 22 回関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.302～303，1995.
- 21) 滝英治・中島英雄・鈴木英治・肥後道憲・仁田尾洋：石炭灰を中詰め材料に利用したコンパクションパイル工法の試験工事，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，pp.522～523，1999.
- 22) 早野裕次郎・中角功・鈴木亮彦：コンクリートガラ再生材を用いた静的締固め砂杭工法，日本建築学会

大会学術講演梗概集（東北），pp.667～668，2000.

23)岡戸雅則・小倉隆治・和田光邦・小林洋二：静的締固め工法への再生材活用事例，第35回地盤工学研究発表会平成12年度発表講演集，pp.1431～1432，2000.

24)流動化処理工法研究機構：流動化処理工法施工実績表（平成5年12月～12年6月），2000.

25)藤井衛・山本実・小林利和・大西智晴：流動化処理工法を適用した直接基礎の事例（その1）計画の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.403～404，2002.

26)藤井衛・山本実・小林利和・大西智晴：流動化処理工法を適用した直接基礎の事例（その2）結果報告，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.405～406，2002.

27)例えば，松田泰明・西川純一・大江祐一・長谷川健一・桑原正彦・村田基治：気泡混合固化土の現場施工事例，第30回土質工学研究発表会平成7年度発表講演集，pp.2497～2498.

28)山田周治郎・今泉繁良・柴田靖平・宮崎隆洋：硫化処理された下水汚泥焼却灰の流動化処理土の特性，第34回地盤工学研究発表会平成11年度発表講演集，pp.967～968，1999.

セメント改良土からの六価クロムの溶出特性および還元化特性等に関する一考察

サンコーコンサルタント(株)札幌支店 谷中 仁志*
日本道路公団試験研究所 加藤 喜則**
(株)サンコー環境調査センター 武 昌信***

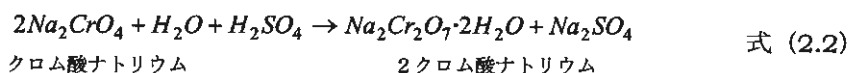
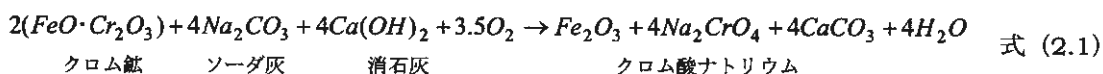
1. はじめに

セメント及びセメント系固化材（以下、「セメント系固化材」という）を使用した改良土（以下、「セメント改良土」という）に関しては、平成 12 年 3 月 24 日付の建設省技調発第 48 号及び同 49 号の通達によって六価クロム溶出試験を実施することが義務付けられた。通達後、各機関の溶出試験結果の取りまとめ、ならびに溶出特性の研究によって溶出試験の頻度が簡略化されたが、その溶出特性の一般的な理解は物理・力学特性と比較すると未だ低いものと考えられる。そこで、本報では六価クロムの基礎的な溶出特性について整理し、土質材料による溶出特性の違いについて一考察を加えるとともに、その化学的特性を考慮して行った還元化試験の結果から、諸材料の還元材としての評価を行った。

2. 六価クロムの化学的性質

クロムの原子価は通常、+2 価、+3 価、+6 価であり、自然界での多くは三価のクロム（マグマ中では Cr^{3+} イオン）として存在する。地殻中でのクロムの平均存在量は 100mg/kg であるが、一般に花崗岩中では 4mg/kg 程度、玄武岩中では 200mg/kg 程度と岩種によってかなり偏在している。土壌中には 5～1000mg/kg が含まれ、平均で 200mg/kg 程度とされているが、六価クロムとしての存在量の報告事例はない。

六価クロム化合物は工業的に製造されたもので、その中でも 2 クロム酸ナトリウムは最も重要であり、他のクロム化合物の原料として製造されている。六価クロム公害はこの産業によるもので、その製造工程における化学反応は下式のとおりである。

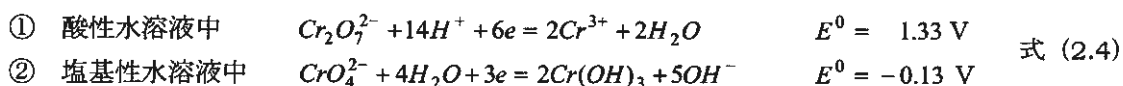


非意図的に生成される六価クロムとしては石炭フライアッシュやセメント中に含まれるものが挙げられる。

六価クロム化合物は強い酸化力を有し（即ちこの化合物自体は還元され易い）、土壌中では有機物や硫化物、+2 価の鉄化合物との還元反応で三価のクロムに変化するため、安定で存在することは難しい。



但し、塩基性（＝水溶液としてはアルカリ性）の環境下では比較的安定に存在しうる。



つまり、六価クロム化合物は酸性水溶液中では強力な酸化剤であるが、塩基性水溶液中では酸化力が弱く、通常アルカリ性を示す普通セメント中の六価クロムは三価クロムに変わることなく、比較的安定に存在する。セメント系固化材を使用した改良土から六価クロムが溶出するのは、セメント系固化材中の六価クロムが三価クロムに

※ Hitoshi Taninaka (Suncoch Consultants Co., Ltd.) 札幌市白石区菊水 3-2-4-1 011-837-5537 / 011-837-5582

※※ Yoshinori Kato (Japan Highway Public Corporation) 東京都町田市忠生 1-4-1 042-791-1621 / 042-791-2380

※※※ Masanobu Take (Suncoch Environmental Research Center) 東京都調布市多摩川 1-4-1 0424-82-6634 / 0424-83-6103

還元されずそのまま溶出するためであるが、硫化物や酸化第 2 鉄などの還元性物質や有機物を多く含む土壌のセメント改良土ではセメント固化材中の六価クロムが三価クロムに還元され、六価クロムの溶出濃度が減少する。このようなことから、地盤改良に用いるセメント系固化材の種類や添加量、対象となる土壌の種類や状態の変化等によって六価クロムの溶出傾向に違いが生じることがわかる。

3. 六価クロムの溶出特性

セメント及びセメント系固化材からの基礎的な六価クロム溶出特性としては、各機関で溶出試験結果の取りまとめが行われてきているが、ここでは主に日本道路公団（以下、「JH」という）での報告^{1)~3)}をもとに、基礎的な溶出特性について整理する。

(1) 試験方法

室内での六価クロム溶出試験のフローを図 3.1 に示す。試験方法は平成 3 年 8 月 23 日付け環境庁告示第 46 号に準拠した。供試体は、JIS A 1210 B 法に準拠して作成した後、含水比が変化しないようビニール袋に入れ温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 95%以上の恒温恒湿室で 7 日及び 28 日間養生したものを用いた。それぞれ、7 日養生は配合試験段階、28 日養生は品質管理段階の溶出試験である。六価クロムの分析方法は低濃度領域での測定が可能で、他の方法に比べ安価で低濃度まで測定できる電気加熱式原子吸光法を採用した。この溶出試験の定量下限値は 0.005mg/l である。

表 3.1 に使用した土質材料の物性値を示す。それぞれ現地地山の地下水より上位にて採取した。各土質材料のみの六価クロム溶出量は土壤環境基準値（ $=0.05\text{mg/l}$ ）以下であった。セメント系固化材は、3 社（A,B,C 社）を使用し、高炉セメント B 種、普通ポルトランドセメン

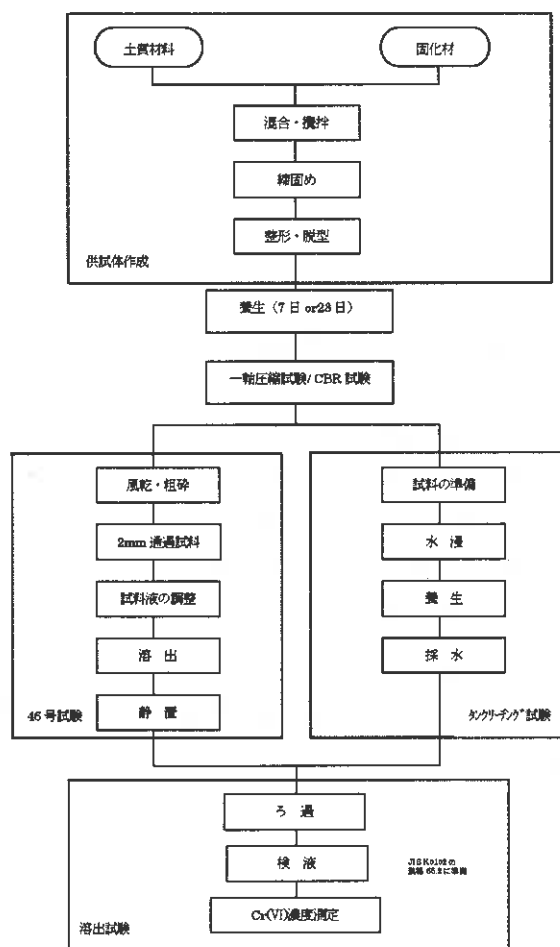


図 3.1 六価クロム溶出試験フロー

表 3.1 土質材料の物理化学特性

本報での表記	稲城砂	愛鷹ローム	掛川粘土	一宮シラス	八戸ローム	碎石 (C-40)	宮崎シラス
採取地	東京都 稲城市	静岡県 沼津市	静岡県 掛川市	静岡県 掛川市一宮	青森県 八戸市	東京都 青梅市	宮崎県 西都市
自然含水比 $W_n(\%)$	15.7	141.7	26.3	37.7	68.6	2.6	23.9
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.644	2.602	2.635	2.345	2.624	2.709	2.417
粒度組成	礫分 (%)	0.0	2.5	0.0	0.5	1.4	4.3
	砂分 (%)	83.5	5.1	4.4	75.0	13.8	82.0
	シルト分 (%)	9.1	41.9	57.8	16.8	25.0	8.7
	粘土分 (%)	7.4	50.5	37.8	7.7	59.8	5.0
コンシステンシー	液性限界 $W_L(\%)$	NP	157.5	35.1	NP	70.6	NP
	塑性限界 $W_P(\%)$	NP	84.8	16.4	NP	42.8	NP
	塑性指数 $I_P(\%)$	NP	72.7	18.7	NP	27.8	NP
生成条件	陸成	陸成	陸成	陸成	陸成	---	陸成
土質材料の色調	茶 褐	暗赤褐	暗青灰	暗乳灰	茶 褐	暗 灰	暗乳灰
土の pH	7.5	7.2	5.0	6.7	7.3	7.6	6.6
強熱減量 (%)	2.6	14.4	3.6	5.3	7.5	3.3	2.3
有機物含有量 (%)	0.2	2.4	1.2	0.2	0.6	<0.1	0.3
全クロム含有量 (mg/kg)	48.2	58	56.1	24.3	56.3	14.6	17.4
六価クロム含有量 (mg/kg)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ORP (mV)	+366	+375	+349	+432	+399	+342	+357

ト、セメント系固化材（従来型）、セメント系固化材（特殊土用）の 4 種類を用いた。固化材の添加率（土の乾燥重量に対する改良材の乾燥重量）は 2,5,10,20%の 4 種類とした。

なお、以下の各特性の検討に際しては、代表的な傾向が認められるデータを抜粋して示す。

（２）六価クロム溶出特性

①土質材料の違いによる溶出濃度

図 3.2～図 3.3 に普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種での各土質材料における 46 号試験結果を示す。ここには、代表して固化材添加率 10%における 46 号試験（7 日養生）結果を示す。土質材料は様々な種類について比較検討するため、稲城砂、愛鷹ローム、掛川粘土、一宮シラス、碎石（C-40）の結果を抜粋した。

同図から同一添加量でも土質材料ごとに溶出量が異なり、また固化剤の種類、メーカーによっても溶出量が異なる事が分かる。これは、前述のように土質材料ごとに、還元性物質や有機物の含有量や pH が異なる事、使用する固化材ごとに含まれる六価クロム含有量などが異なる事に起因するものと考えられる。

ここで、酸化や還元傾向の目安となる土質材料の色調に着目すると、溶出傾向にあった稲城砂や愛鷹ロームは茶褐～暗赤褐色といった明色系統の色調を帯び、比較的溶出しづらい傾向にあった掛川粘土や碎石では暗青灰～暗灰色といった暗色～薄色系統の色調を帯びていることがわかった。これは、土中には鉄分が多量に存在し、酸化雰囲気にある場合には、鉄分が Fe_2O_3 として存在するため、土の色調は褐～赤褐色を帯び、還元雰囲気にある土は鉄分が FeO となり、灰～青灰色を帯びる。このことは鉄が錆びると褐色系を呈する現象から理解することができる。

以上より、図 3.4 の六価クロムの溶出し易さの分類区分に整理したようにシラスのような特殊土を除けば、溶出し易さの程度は土の色調によって概ね判断できることがわかる。また、本報で取り上げた材料は全て陸生のものであるが、海成や湖沼性のものでは陸成のものに比べて還元し易いために溶出しづらい傾向にあることも報告されており、対象土質の生成条件も溶出し易さの判断材料の一つとして考えられる。

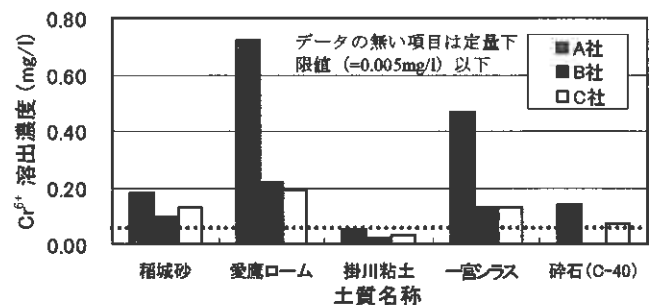


図 3.2 土質材料の違いによる溶出濃度
(7 日：普通ポルトランドセメント 10%)

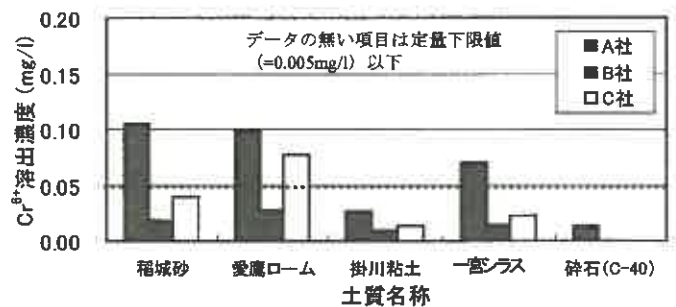
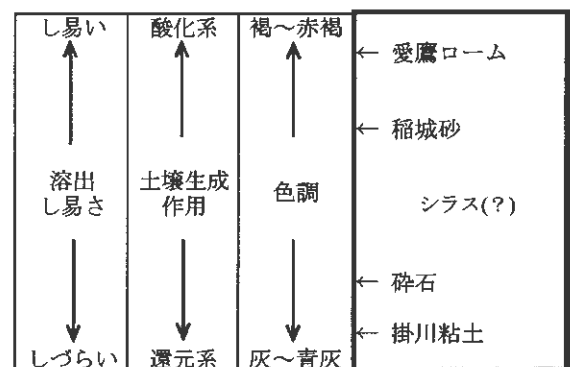


図 3.3 土質材料の違いによる溶出濃度
(7 日：高炉 B 種 10%)



↑ 本報での材料

図 3.4 溶出し易さの簡易分類区分

②固化材種別の違いによる溶出濃度

図 3.5～図 3.6 に固化材種別の違いによる土質材料と溶出濃度の関係を示す。ここには、代表して A 社製品の固化材添加率 2%、10%における 46 号試験（7 日養生）結果を示す。土質材料は試験パターンが多い稲城砂、愛鷹ローム、掛川粘土、一宮シラスの結果を抜粋した。

4 種類の固化材の溶出特性としては、固化材自体の結果と同様に、普通セメント、固化材（従来品）での溶出濃度が大きく、高炉セメント B 種、固化材（特殊土用）の溶出濃度が小さいことがわかる。固化材添加率は、2%に比べて 10%での溶出濃度が相対的に大きくなる。

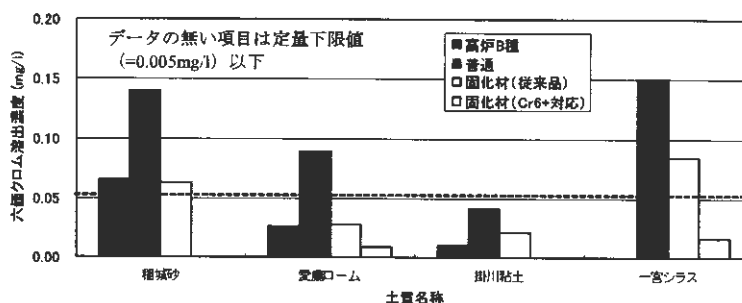


図 3.5 固化材種別による 46 号試験－7 日養生での溶出濃度 (A 社－2%)

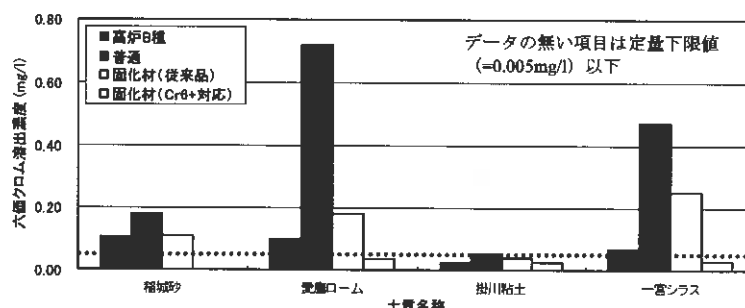


図 3.6 固化材種別による 46 号試験－7 日養生での溶出濃度 (A 社－10%)

③養生日数と溶出濃度の関係

図 3.7 に、46 号試験による 7 日養生（配合試験）と 28 日養生（品質管理）との溶出濃度の関係をセメント種別に示す。作図に使用したデータは、両者の相関データが比較的多く得られている、稲城砂、愛鷹ローム、掛川粘土、一宮シラス、八戸ローム、宮崎シラスのデータのうち、定量下限値 0.005mg/l 以下のデータを省略したものを用いた。図から 28 日養生での溶出濃度は 7 日養生のものに比べて高炉セメントで約 0.82 倍、普通ポルトランドセメントで約 0.52 倍であり、何れも 1 を下回る結果となった。しかし、28 日養生の溶出濃度が 7 日の値を上回るケースも、いくつか認められた。これは土質材料により養生日数と溶出濃度の関係が異なるためであり、相関係数もあり良くない。

そこで、土質材料について着目し、検討することとした。既往の報告事例²⁾によれば、火山灰質系の材料では

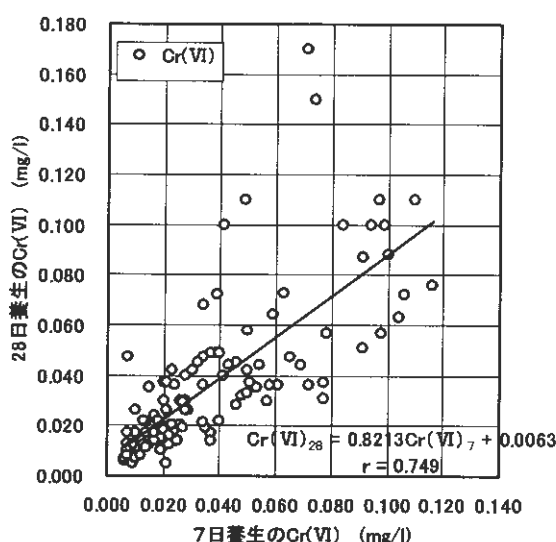
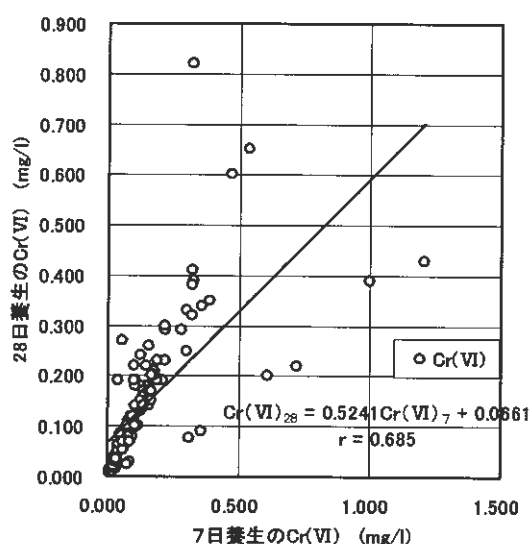


図 3.7 7 日と 28 日養生の溶出濃度の相関（左：普通ポルトランド、右：高炉 B 種）

28 日養生での溶出濃度が 7 日養生時を上回る可能性が大きいことから、稲城砂及び掛川粘土のデータのみとした。また、7 日養生（配合試験）で溶出量が土壤環境基準値を超過した場合には品質管理時の試験対象外となることから、0.05mg/l 以下のデータを抜粋した。

図 3.8 に上記の条件に該当する 7 日養生と 28 日養生との溶出濃度の関係をセメント種類別に示す。同図から、28 日養生での溶出濃度は 7 日養生のものに比べて高炉セメントで約 0.78 倍、普通ポルトランドセメントで約 1.14 倍であり、普通ポルトランドセメントの場合で 1 を上回る結果となった。

相関式から、7 日養生時点での溶出量から 28 日養生時点の溶出量を求めようとする、7 日養生の溶出値が 0.05mg/l の時、28 日養生時の溶出量は、高炉セメントで 0.040 mg/l、普通ポルトランドセメントで 0.050mg/l となり環境基準値以下と推定される。しかし、7 日養生の溶出量が基準値以下のデータにおいても、28 日養生時に基準値を超過したデータもあることから、7 日養生時の溶出量が環境基準値付近のデータについては、28 日養生時においても確認する事が望ましいと考えられる。そこで、図から 28 日養生時に環境基準値（0.05mg/l）以上を示す 7 日養生時の値を読み取ると、そのときの溶出濃度が 0.04mg/l 以上となる。

したがって、7 日養生時で溶出濃度が 0.04mg/l 以下であれば、28 日養生後の溶出濃度で基準値以下となることが見込まれ、0.04～0.05mg/l のものにおいては 28 日養生時点に再度、溶質試験を実施すれば良いと考えられる。このように材料や条件を限定すれば、7 日養生の結果により 28 日養生時点の溶出量を推定し、28 日養生時の試験を省略する事が可能であると考えられる。

なお、平成 13 年 5 月 7 日に国土交通省より通達のあった「六価クロム溶出試験要領（案）の一部変更について」では、配合試験を想定した 7 日養生時に土壤環境基準を超えない場合には、火山灰質粘性土を除いて 28 日養生およびタンクリーチング試験の実施を要しないとされているが、安全側に考慮する場合には今回のような考え方で実施することもあると考慮される。

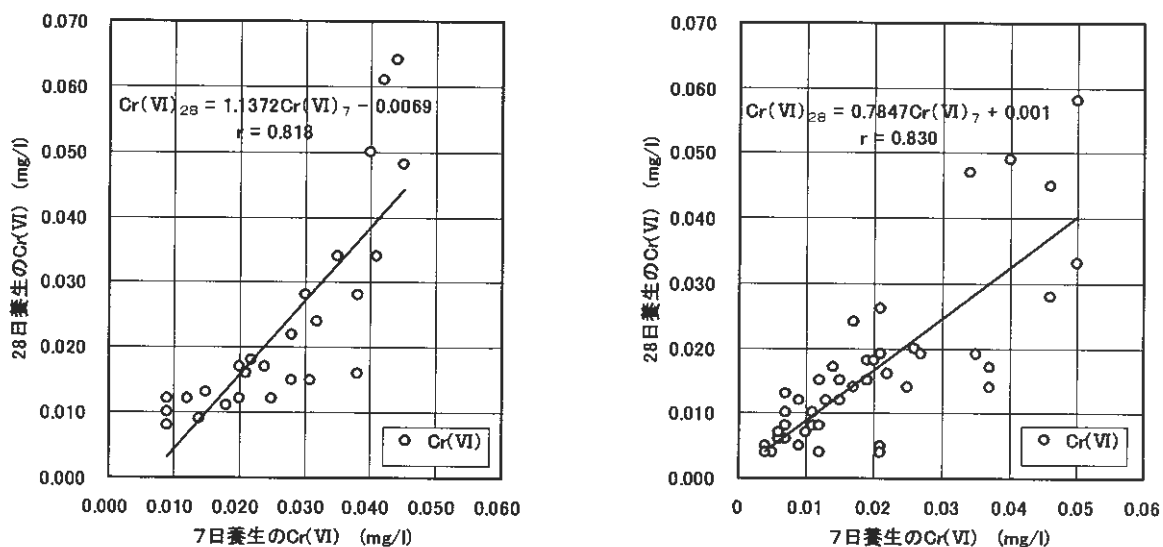


図 3.8 火山灰質土を除く基準値付近の 7 日と 28 日養生の溶出濃度の相関
(左：普通ポルトランド、右：高炉 B 種)

これら以外の影響因子としては、締固めエネルギーの違いや密度の違いによる依存性についても報告されているが、それらの傾向は小さく、前述したような土質材料の違いや固化材種類といった影響因子に支配される傾向が大きいものと考えられる。

4. 六価クロムの還元化特性⁵⁾

前述したように六価クロムは強い酸化力を有する物質であり、化学的に不安定であるため、土壌中の有機物や硫化物等によって三価の状態に変化することが知られている。そこで、条件を変化させて行った還元化試験結果から、六価クロムの基礎的な還元化特性について検討を行った。

(1) 基礎的還元化試験方法

はじめに、基礎的な還元化傾向を把握するために、基礎的なバッチ試験を実施した。6l のポリ容器に Cr^{6+} 1mg/l とした溶媒水 (pH=7.0) を 3l 注水し、還元材と溶媒水の比率 (= 固液比) が 1:10 となるよう 300g 程度の還元材を投入して、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 95% 以上の恒温恒湿室で所定の期間養生後に採水し、分析を行っている。ここで、選定した還元材には塊状として得られないものも多く存在するため、本報では重量比を一定とした。還元材の種類は、還元効果が報じられている⁹⁾堆肥・稲藁・チップ (木片) に、現地でも即効性の還元材として汎用性の高い硫酸第一鉄を加えた 4 材料と、比較対象となるよう 3 種類の土質材料を用いて計 7 種類とした。硫酸第一鉄は、1 時間経過後で定量下限値以下であったため、同図には表れない。硫酸第一鉄の測定結果によれば、濃度比が 1:50,000 の場合でも投入後 30 分経過した時点で等量計算結果のおよそ 8 割以上が還元されることから、極めて瞬時に還元化が終了することがわかっている。

(2) 基礎的還元化試験結果

図 4.1 に投入後経過時間と溶出濃度の関係を示す。溶媒水自体は濃度の変化が殆ど認められないのに対し、投入した場合にはいずれの試験パターンにおいても投入後の経過時間とともに溶出濃度が低下しているのがわかる。材料では、硫酸第一鉄が短期に溶出濃度の低下を示している。また、土質材料と比べて還元材と考えられる堆肥や稲藁、チップ等では急激に溶出濃度が低下し、いずれも還元化が促進されているように推察される。

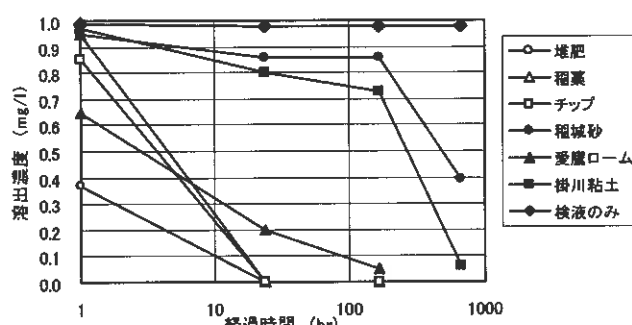


図 4.1 基礎試験結果 (固液比 1:10)

表 4.1 還元化特性試験パターン

投入材	①固液比	②pH
堆肥	固液比(重量比) を1:100、1:200の2 パターン	溶媒水のpHにつ いて、pH=7.0、 11.0の2パターン (固液比=1:200)
稲藁		
チップ		

(3) 還元化特性に関する検討

次に、基礎試験から表 4.1 に示すように試験条件を変化させてバッチ試験を行い、還元化特性について検討を行った。それぞれの検討項目について、得られた試験結果から以下のようにまとめた。

① 固液比の変化による影響

図 4.2 は、基礎試験時に対して、固液比を変化させた場合の経過時間と溶出濃度の関係を示したものである。何れの還元材でも、同じ経過時間では固液比が 1:100 に比べ 1:200 の方が溶出濃度が大きく、固液比が大きいほど溶出濃度の低下が緩やかになる傾向が見られる。これは、還元反応が還元材自体の絶対量に依存していることを示している。

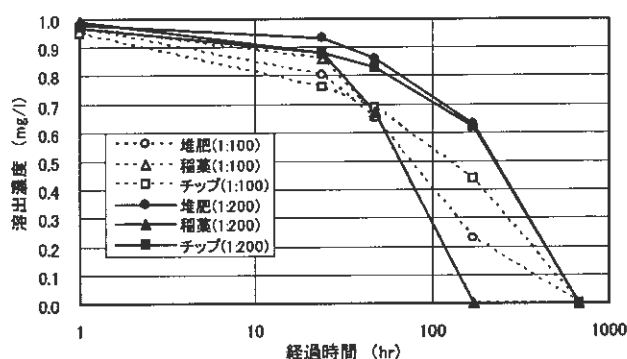


図 4.2 固液比の違いによる六価クロム溶出濃度

②pH の異なる溶媒水での影響

図 4.3 は、溶媒水を pH=11.0 に調整したものについて還元材を投入した場合の経過時間と溶出濃度の関係を示したものである。同図から、何れの還元材でも、若干ではあるが pH=11.0 のアルカリ性を示すケースの方が溶出濃度の低下が小さい。2 章でも述べたように、六価クロムは強い酸化力を有し三価に変化し易いものの、塩基性（＝水溶液としてはアルカリ性）の環境下では式 (2.4) のような E_0 を示し、比較的安定に存在するために、還元化が起こりづらくなったためだと考えられる。

以上の結果より、堆肥・稲藁・チップ等を用いたときに還元効果が高く見受けられた。また、還元反応の特性として①固液比が大きくなるに伴って還元能力も低下する、②塩基性環境下においてはクロムが六価の状態と比較的安定に存在するため、還元能力が低下することがわかった。

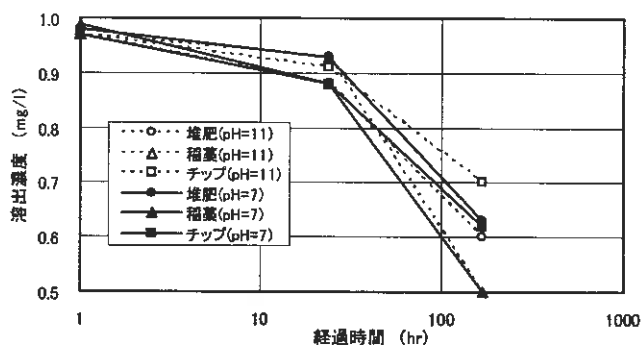


図 4.3 pH の違いによる六価クロム溶出濃度

5. おわりに

本報では、六価クロムの化学的性質の概要について整理し、溶出特性や還元化特性について考察を行ってきたが、今後、実務レベルでの理解を広めるため、試験・分析方法および評価方法に関する報告事例の蓄積が不可欠と思われる。

地質調査業においても調査技士資格の土壤地下水汚染部門が新設される昨今、土壤・地下水環境問題が高まる現状においては、六価クロムに限らず、その他の重金属や揮発塩素系化合物等の有害物質が地盤環境に与える影響についても、より認識を深める必要があると思われる。

【参考文献】

- 1) 緒方・加藤ら：セメント系固化材を用いた改良土の六価クロム溶出試験（その 1），第 36 回地盤工学研究発表会，399
- 2) 加藤・緒方ら：セメント系固化材を用いた改良土の六価クロム溶出試験（その 2），第 36 回地盤工学研究発表会，400
- 3) 佐野・朝日ら：セメント系固化材を用いた改良土の六価クロム溶出試験（その 3），第 36 回地盤工学研究発表会，401
- 4) (株)クボタ：アーバンクボタ NO.23，pp.2-31
- 5) 谷中・加藤：六価クロムの還元化特性に関する検討，第 36 回地盤工学研究発表会，1347
- 6) 加藤忠蔵、遠藤郁夫：六価クロム鉍滓の無害化と再利用、クロム—資源と利用—Ⅱ、内田老鶴圃、pp.465-471
- 7) 谷中・加藤ら：セメント改良土からの六価クロム溶出試験における分析方法の影響，土木学会第 56 回年次学術講演会，III-B324

テフロン®処理防塵固化材による軟弱地盤安定処理

日鐵セメント株式会社 西田 浩行

畠山 誠

阿部 直也

1. はじめに

近年の自然環境保護・保全に対する強い社会的要求を受け、建設事業は天然資源の節約・廃棄物や副産物の再利用化を促進することで循環型社会構築に貢献している。平成9年には建設省（現：国土交通省）にて「建設リサイクル推進計画'97」が制定され、さらに「建設発生土利用技術マニュアル」や「発生土利用促進のための改良工法マニュアル」（監修：旧建設省大臣官房技術調査室 発行：（財）土木研究センター）が発刊されるなど、建設発生土・汚泥の再利用方法として固化材による軟弱地盤安定処理工（地盤改良）技術の啓蒙がなされている。

しかし、セメント系をはじめとする固化材は施工過程において「粉塵飛散問題」を生じ必ずしも周辺環境・作業従事者に対して優しいとはいえない場合があり、粉塵発生量の「抑制化」が強く望まれていた。

そこで、テフロン®の発塵防止技術を応用し開発された新型固化材が「テフロン®処理防塵固化材」である。建設発生土の性状改善するのは勿論、その施工過程における現場周辺環境を飛躍的に清浄化できることが可能となった。本稿は、セメント系のテフロン®処理防塵固化材の概要と安定処理工の事例を紹介する。

2. セメント系テフロン®処理防塵固化材

セメント系テフロン®処理防塵固化材は、テフロン®の発塵防止技術から生まれた新型防塵固化材である。

一般のセメント系固化材に超微細繊維化させたテフロン®をクモの巣状に分散させることで、飛散原因と考えられる10μm以下の固化材微粒子を拘束し発塵量を低減することが可能となった。

この繊維はサブミクロン単位の径で脆弱であるため、対象土と混合攪拌した際に容易に切断されることから一般固化材の水和反応特性を阻害することがない。

また、使用方法是一般固化材と同様であり、多くの浅層改良工法に対応するため、特別な技術や知識を必要とせず容易に扱うことが出来る。

テフロン®処理防塵固化材協会会員【北海道エリア】

セメント系：日鐵セメント㈱・・・アースタイトプラスシリーズ

太平洋セメント㈱・・・ジオセット 60 シリーズ

日本舗道㈱・・・デフィックス C

石灰系：北海道共同石灰㈱・・・ベストキーパー P30-DP

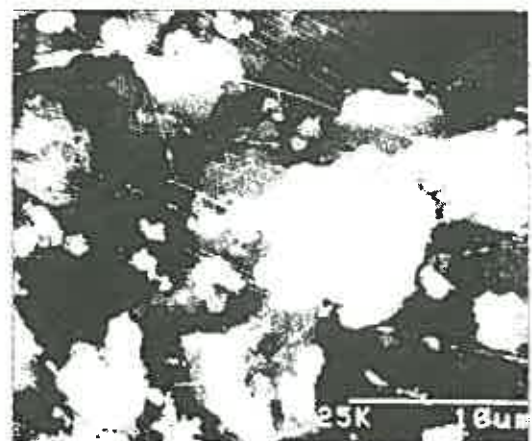


写真-1 固化材粒子間に生成されたテフロン繊維

Hiroyuki Nishida, Hatakeyama Makoto, Naoya Abe 【Nittetsu Cement Co., Ltd】

連絡先：札幌市中央区北4条西4丁目1-1 TEL 011(251)-0196 FAX 011(232)-8249

3. 特徴

【防塵性能】

テフロン[®] 処理防塵固化材の落下発塵量は、防塵性能標準規格 50CPM 以下を管理規格値としている。

これにより固化材の散布・攪拌混合時、重機のクローラによる巻上げや風の影響など、施工時における固化材起因の発塵量を 200CPM 以下に抑制することができる。これまでの軟弱地盤安定処理現場では浮遊粉塵量 100CPM～1000 CPM 以上の値を示すが、セメント系テフロン[®] 処理防塵固化材を使用することで、1/10～1/100 の軽微な土埃程度の現場作業環境を構築する。(図-1 参照)

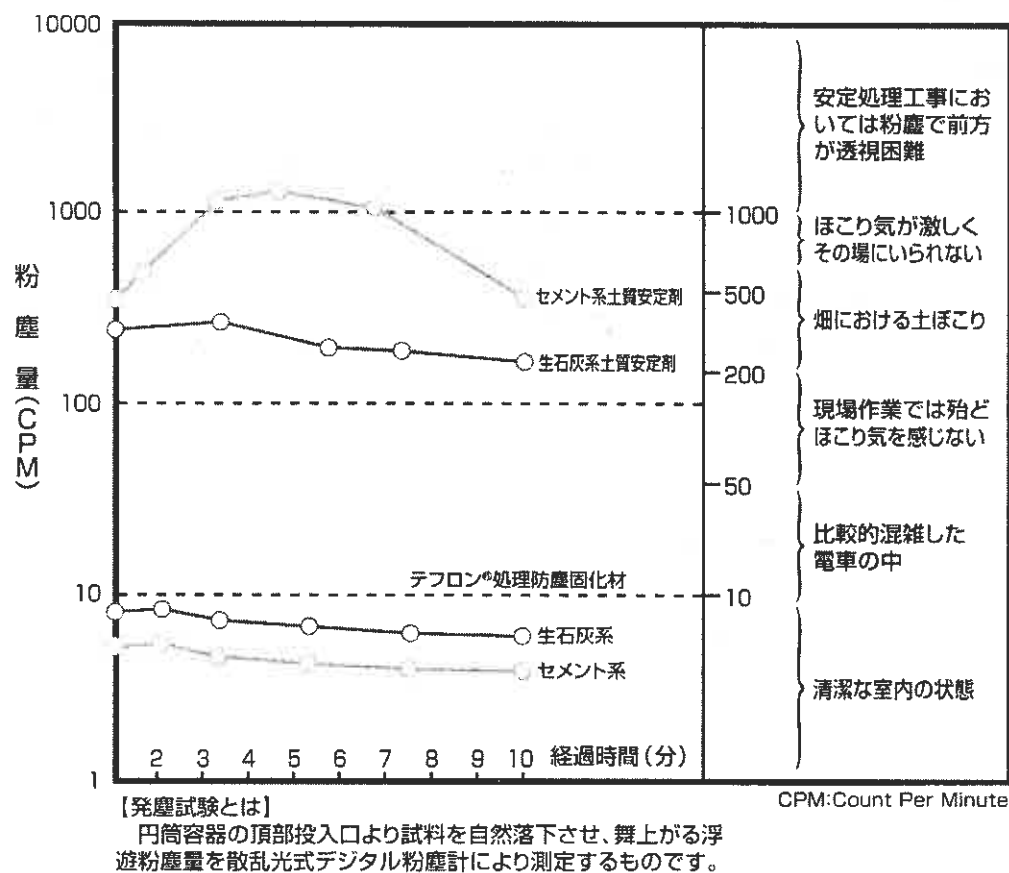


図-1 発塵試験結果による定性的評価



写真-2 セメント系テフロン[®] 処理防塵固化材の散布工



写真-3 一般のセメント系固化材による散布工

【安定処理効果】

セメント系テフロン[®]処理防塵固化材とその基材原料となる一般固化材にて実施した安定処理土の一軸圧縮強度試験（室内）の比較例を記す。

表-1 改良対象土性状

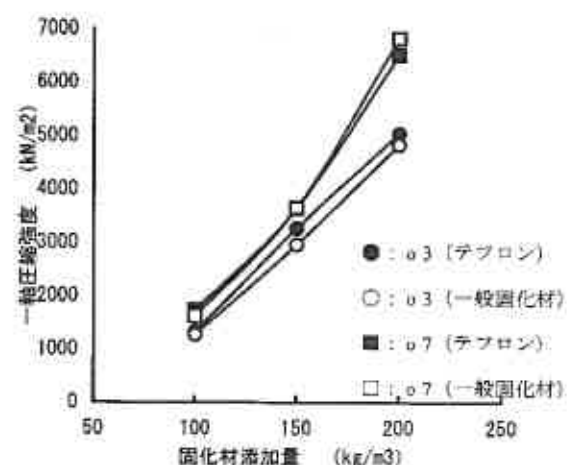
試料 No.	A	B	C
土質区分	泥土	粘土	粘性土
湿潤密度 (tf/m^3)	1.881	1.393	1.611
含水比 (%)	35.4	110.8	40.9
粒度 (%)	11.7	0.5	0
	54.8	38.7	29.6
	33.5	60.8	70.4
強熱減量 (%)	5.6	9.0	6.3
PH	7.5	4.4	6.9
色環	灰	茶	灰

表-2 一軸圧縮強度

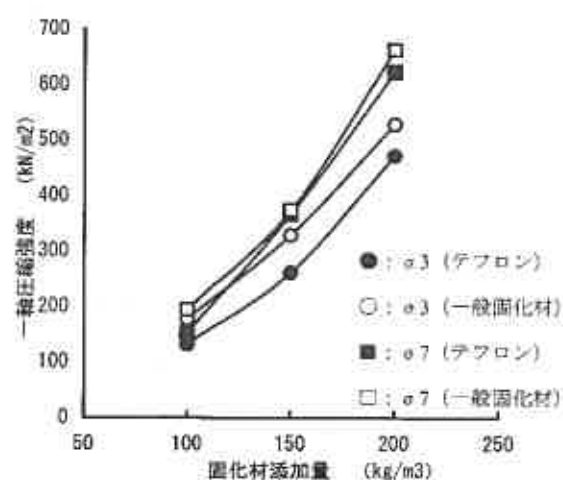
試料 No.	添加量 (kg/m^3)	一軸圧縮強度(kN/m^2)			
		材齢3日		材齢7日	
		テフロン [®] 処理防塵固化材	一般固化材	テフロン [®] 処理防塵固化材	一般固化材
A	100	1334	1282	1739	1628
	150	3277	2972	3652	3659
	200	5049	4836	6521	6831
B	100	132	178	153	195
	150	262	330	367	374
	200	473	530	624	664
C	50	285	258	316	296
	100	1223	1102	1518	1521
	150	1930	1828	2560	2616

試験結果から、セメント系テフロン[®]処理防塵固化材の安定処理効果は、一般固化材と強度発現傾向と類似しており、ほぼ同等として考えられる。

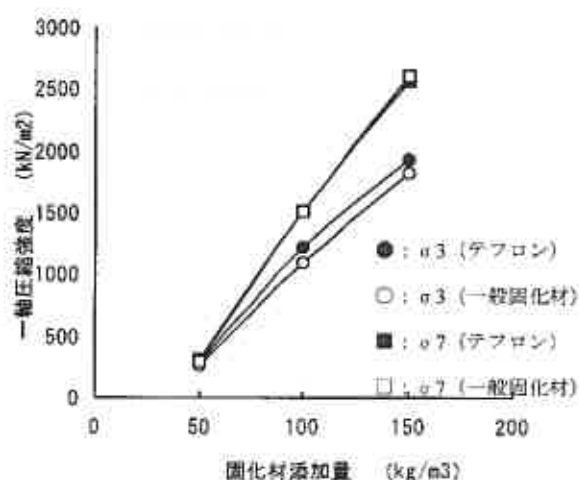
【試料 A】



【試料 B】



【試料 C】



4. 使用方法

セメント系テフロン[®] 処理防塵固化材は一般固化材と同様に使用できる。

ここでは、オープンエア状態で施工する表層安定処理工を例に主な施工プロセスを記載する。

施工面
整理



- ・固化材散布量管理を踏まえ所定面積を区割
- ・防塵固化材（1 tフレコン）の配置

防塵
固化材
散布



- ・区割に所定固化材添加量を散布

攪拌
混合



- ・所定深度まで攪拌混合
- ・ロータリー内蔵型のバックホウタイプや
自走式スタビライザなどで効率良く攪拌

整
正・
転
圧



- ・不陸整正の実施

写真：今金町道神丘7号線特改1種工事 浅層地盤安定処理工事（H15年度施工）より
隣接する畑への固化材飛散を抑制するため一般軟弱土用の防塵タイプ使用

5. 事例

北海道においてテフロン[®] 処理防塵固化材が採用された軟弱地盤安定処理工事の事例を記す。

【平成 13 年度 網走港船揚場外一連工事関連】

平成 12 年度に川筋地区にて浚渫された土砂の一部を水面埋立材として利用した際、極度に泥濁化し建設機械のトラフィカビリティ確保が困難となった。そこで、平成 13 年度の網走港船揚場外一連工事は、浚渫土を船揚場新設用の埋戻材料として有効的に再利用させるためセメント系固化材による安定処理工が実施された。このとき、安定処理工は港湾施設および一般道や民間施設などが隣接するストックヤードにて実施されることから周辺環境への負荷低減のため、セメント系のテフロン[®] 処理防塵固化材が採用された。

【概要】

改良材 : 日鐵アースタイト 104 プラス

(一般軟弱土用ベース)

添加量 : 96 (kg/m³)

対象土 : 礫混じり砂質土

含水比 : $\omega_n=33.4$ (%)

湿潤密度 : $\rho_t=1.829$ (tf/m³)

目標強度 : $qu_f=60$ (kN/m²) …… (現場)

施工時期 : 2001 年 11 月の冬期施工

備 考 : 湿地ブルドーザ走行に要するコーン指数

$qc=300$ (kN/m²)以上から一軸圧縮強度 qu

に換算 (関係式 $qu=qc/5$)

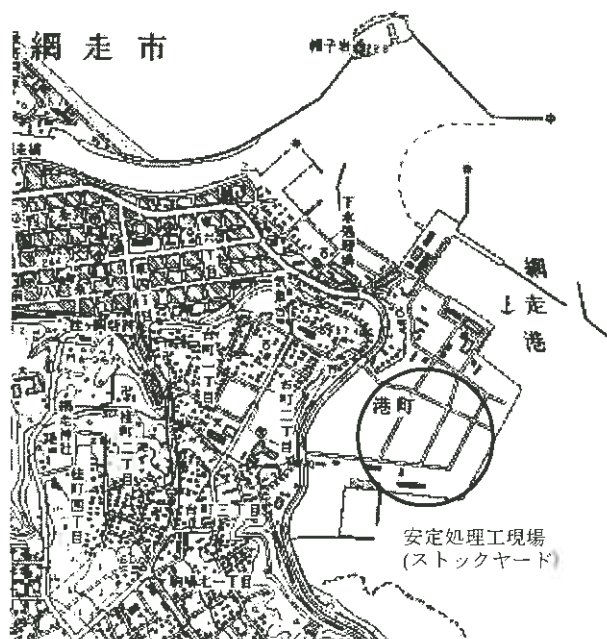


図-2 浚渫土安定処理の施工現場



写真-4 民間石油備蓄施設群



写真-5 木材ストックヤードおよび隣接する一般道

【平成13年度 道営かんがい排水3線第一工区安定処理工事】

空知地区における灌漑排水工事にて軟弱地盤安定処理工が実施された。

当該地は北海道有数の泥炭地域であることを踏まえ、地盤支持力不足を解消し設置函渠の支持を目的に下部の泥炭を改良し埋戻材として再利用した。

セメント系デフロン[®] 処理防塵固化材は、畑作地域という現場周辺環境を勘案し採用されている。



図-3 施工現場（栗沢町北斗）



写真-6 散乱光式デジタル計にて発塵量計測

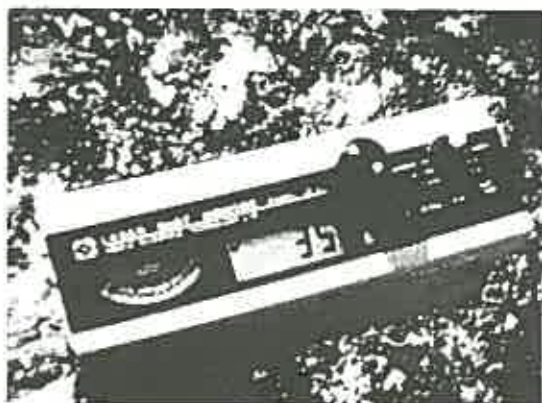


写真-7 粉塵計測値は35CPMを示す

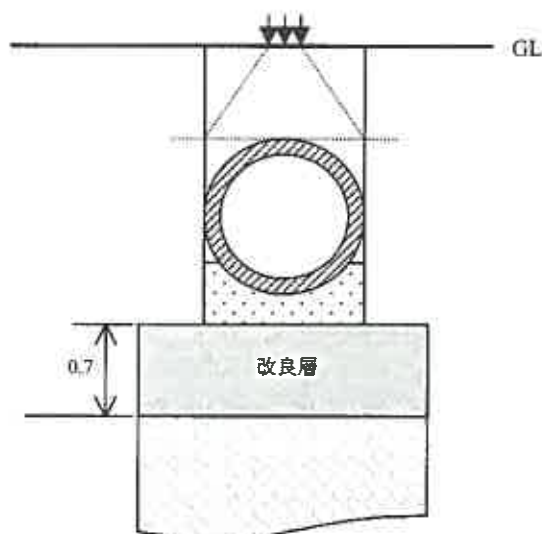


図-4 施工断面

【概要】

改良材 : 日織アースタイト201プラス
(泥炭用セメント系固化材がベース)
添加量 : 220 (kg/m³)
対象土 : 泥炭
改良厚 : 0.7(m)
改良幅 : 3.2(m)
現場強度: q_{uf} = 210 (kN/m²)

現場測定したセメント系固化材発塵量は 35CPM という値を得た (写真-7)。この値は、図-1を参考とすれば「比較的混雑した電車内」という定性的評価になり、従来の地盤改良現場と比べ飛躍的に清浄な環境下で施工が実現していたといえる。

【その他北海道主要実績抜粋】

年度	工事名称	施工場所	備考
12	丘珠(10)格納庫新設建築工事	札幌市	隣接空港施設への負荷低減を踏まえた駐機場基礎改良
	美唄南高等学校産業教育施設新築外構工事	美唄市	一般生活道沿線のフェンス基礎設置工事における現位置改良
	新冠平取線他新冠局改危険箇所工事	新冠町	凍上破壊路線補修にて片側交通開放しながら肩断面路床改良
	道央自動車道江丹別トンネル舗装工事	旭川市	トンネル内におけるコンクリート舗装下部の路盤改良
13	公共牧場整備新内地区第62工区	新得町	牧畜地域における堆肥盤基礎改良
	農免農道整備花岡一地区第1工区	鶴川町	畑作地域の農道整備における路床改良
	女満別空港SSR局新築工事	女満別町	空港施設内における建築基礎改良
	小樽臨海道路建設工事	小樽市	港湾内道路整備における地盤改良
14	室蘭警察署庁舎新築外構工事	室蘭市	一般国道37号沿線における建築基礎現位置泥炭改良
	霧多布港建設工事	浜中町	港湾浚渫土を同港湾内にて固化処理
	北海道栗山高等学校改築外構工事	栗山町	一般生活道沿線のフェンス基礎設置工事における現位置改良
	北海道紋別養護学校きたみ学園分校改築工事	北見市	埋戻・盛土材として発生土再利用
	道央自動車道常盤トンネル舗装工事	旭川市	トンネル内におけるコンクリート舗装下部の路盤改良

【平成15年度施工写真】



写真-8 札幌ファクトリー敷地内における路盤改良工事



写真-9 北海道紋別養護学校きたみ学園分校改築工事



写真-10 上士幌町役場前歩道凍上対策で固化処理実施



写真-11 霧多布港建設工事（H15年度施工）

6. おわりに

発生土・汚泥を対象とした軟弱地盤安定処理工は循環型社会構築のため一層促進されると思われる。

この「埃の立たない固化材」は、施工過程自体を「清浄化」することで現場周辺環境・作業従事者への負担を軽減させ、「再利用による環境保全」という軟弱地盤安定処理工の潜在価値を更に進歩させる。

今後、テフロン[®]処理防塵固化材は、「環境とヒト」により優しい軟弱地盤安定処理工事の実現に大きく貢献できると考えられる。

ー参考文献ー

テフロン[®]処理防塵固化材協会：テフロン[®]処理防塵固化材技術資料（平成11年6月改定）

揮発性有機塩素化合物による深層土壌汚染の原位置浄化方法

(株)竹中土木 ○白井克巳 富田 洋 森嶋 章
(株)竹中工務店 斉藤 聡 奥田信康 木村 玄
岩本 宏 山本光起

1. はじめに

トリクロロエチレン（以下「TCE」という。）やテトラクロロエチレン（以下「PCE」という。）を代表とする揮発性有機塩素化合物（以下「CVOC：Chlorinated Volatile Organic Compound」という。）は、取扱いが容易でその強い脱脂力により、主に溶剤として最近まで広く用いられてきた。これらの化合物は比重が水より大きく、粘性が低いという物理的特性とともに生分解性の低さのために、いったん地盤環境中に放出されると浸透・拡散して地下深部まで汚染してしまう¹⁾。CVOCの製造量・使用量は、1994年よりCVOCを含めた揮発性有機化合物（以下「VOC」という。）に関する項目が土壌環境基準に加えられ減少傾向にあるが、これまでに製造・使用されたものの一部が地盤中に漏洩ないし廃棄された結果、これらの物質による土壌・地下水汚染が各地で確認されている²⁾。

本報では、VOCによる土壌汚染の状況を環境省の最近の調査結果³⁾に基づき紹介するとともに、VOC汚染土壌の浄化技術について概括する。また、最近注目されている深層混合処理工法により金属系還元剤を原位置混合し、掘削を伴わずに深層のCVOCによる汚染土壌を浄化する技術（以下「DCM-e工法」という。）について、筆者らが行ってきている検討結果⁴⁾、⁵⁾について報告する。

2. VOCによる土壌汚染の状況と浄化技術

環境省による平成12年度の調査結果³⁾によれば調査事例1097件中、土壌環境基準の超過事例が574件あり、その内の281件がVOCによる超過事例である。VOCの超過事例を物質毎に分類するとTCE、PCE及びその分解生成物であるcis-1,2-ジクロロエチレン（以下「cis-DCE」という。）といったCVOCの超過事例がそれぞれ178件、152件、105件とCVOC以外の他の項目に比べて多くなっている。汚染原因者の業種としては電機機械器具製造業が57件と多く、次いで洗濯業の51件となっている。また、重金属による深度5m以深の汚染が約12%（回答のあった超過事例201件のうち25件）であるのに比べて、VOCによる汚染深度は回答のあった超過事例164件のうち約31%（51件）が深度5m以深となっており、比較的地下深部にまで汚染が拡散しやすいというVOC汚染の特徴が現れている。

VOC汚染土壌の浄化対策技術を図-1に示す。現在、VOC汚染土壌の浄化対策としては環境省による調査結果³⁾でも明らかのように地下水揚水曝気、土壌ガス吸引といった原位置抽出が一般的であり、次いで掘削浄化となっている。原位置抽出は、汚染地下水の揚水又は土壌中のガスを吸引しVOCを除去、回収する

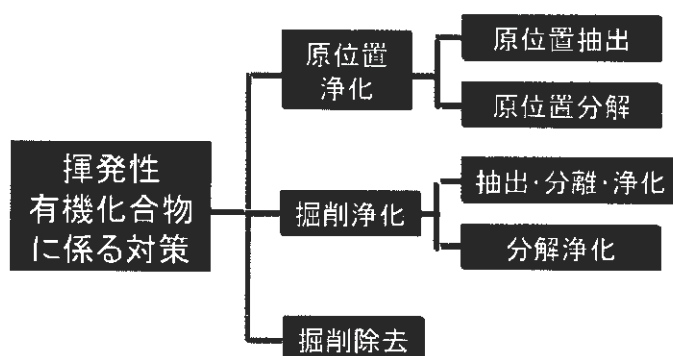


図-1 VOC汚染土壌の浄化技術

Shirai Katsumi, Tomita Hiroshi, Morishima Akira：東京都中央区銀座8-21-1 Tel 03-3542-6321 Fax 03-3541-8825

Saito Satoshi, Okuda Nobuyasu：千葉県印西市大塚1-5-1 Tel 0476-47-1700 Fax 0476-47-6460

Kimura Takashi, Iwamoto Hiroshi, Yamamoto Mitsuoki：東京都中央区銀座8-21-1 Tel 03-3542-7615 Fax

ことにより地下水及び土壌を浄化するものであり、汚染源付近で採用すると対策開始初期に高い VOC 除去効果を示す。しかし、VOC の濃度がある程度低下すると、VOC の土壌吸着特性や地盤の不均質性等の影響により除去効率が落ちることから浄化完了までに年単位の期間を要したり、活性炭に吸着された VOC をさらに処理する必要があるなどの問題点がある。また、掘削浄化は汚染範囲の土壌を掘削し、敷地内において汚染土壌中の VOC を分離（加熱による熱脱着等）、分解（バイオレメディエーション、化学的分解、焼却等による熱分解）するものであるが、コスト面から浅部の汚染もしくは汚染源といった高濃度の汚染土壌対策以外に適用しがたいといった制約がある。

以上のようなことから、比較的低濃度かつ VOC 汚染の特徴である地下深部に広がった汚染を対象とした原位置浄化技術が求められており、深層混合処理工法を用いてゼロ価の鉄（鉄粉）といった金属系還元剤を原位置で汚染土壌に直接混合し CVOC を分解する方法^{4),5),6),7)}が注目されている。なお、前記方法の原理は鉄粉の還元作用に着目したものであるが、排水処理の分野ではこの原理が早くから利用されており^{8),9),10)}、また CVOC による地下水汚染の対策技術としても透過反応壁（PRB：Permeable Reactive Barrier）への利用という形で欧米を中心として既に実用化されている¹¹⁾。

3. DCM-e 工法の概要

金属系還元剤として鉄粉を用いた CVOC の分解・浄化の概念を図-2 に示す。DCM-e 工法の施工概念図を図-3 に示す。また、DCM-e 工法の施工手順を図-4 に示す。

鉄粉による CVOC の分解は、図-2 に示すとおり還元的脱塩素反応により無害なエチレンやエタンに変換されるといわれている。また、施工方法及び施工手順は図-3 及び図-4 に示すとおり、固化材スラリーを用いた通常の深層混合処理工法と大きな差はない。

しかしながら、細粒分を多く含む鋭敏比の高い沖積地盤では、地盤を攪拌すれば泥濘化し著しい強度低下を招くことがある¹²⁾ことから、鉄粉スラリーだけで施工を行うと浄化後の跡地利用の面から問題となる場合がある。一方、地盤の強度回復を目的として固化材に通常のセメントを用いると強アルカリ性雰囲気となり、先崎ら¹⁰⁾が示しているように CVOC の分解を阻害することとな

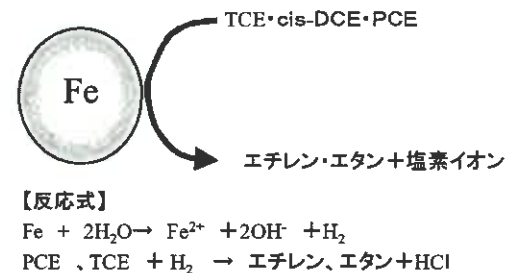


図-2 CVOC の分解概念

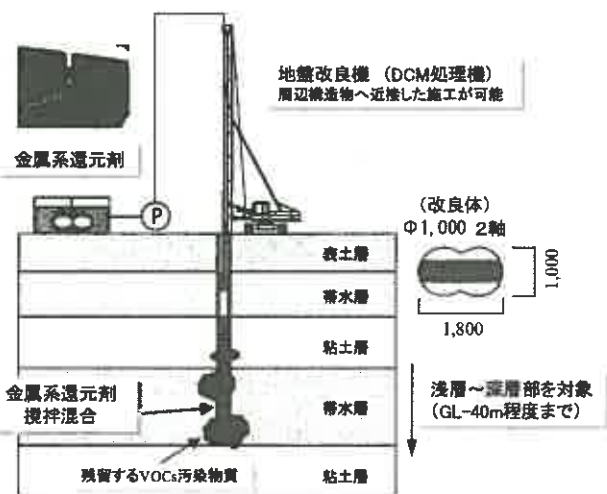


図-3 DCM-e 工法の概要

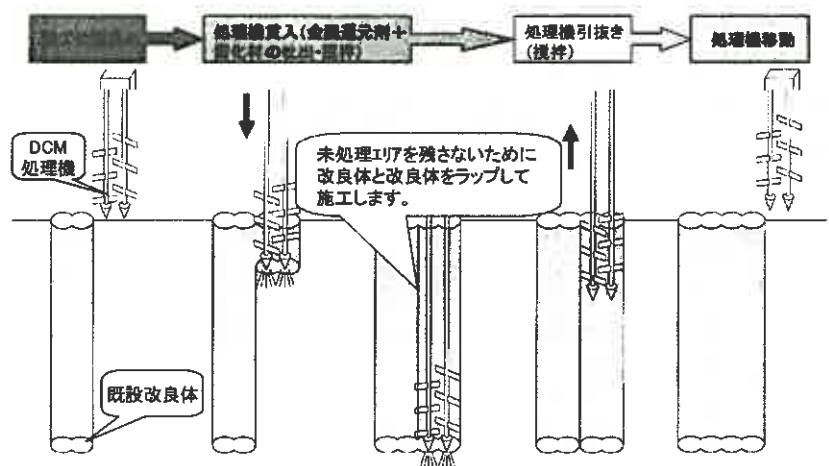


図-4 DCM-e 工法の施工手順

る。よって強アルカリ性雰囲気となる通常のセメントは DCM-e 工法用の固化材として不適切である可能性があり、この場合低アルカリ性の固化材が必要になる。そこで通常のセメントと低アルカリ性セメントを用いた室内実験⁴⁾を行い、CVOC の浄化効果と改良土（固化材を混合し改良された土）の強度発現に関する特性及びそれらを両立する配合の可能性について検討し、実汚染サイトでの試験工事⁵⁾によりその適用性を検証することとした。

4. 室内実験による DCM-e 工法の配合に関する検討

4.1 改良土の目標強度の設定

深層混合処理工法の特徴の一つに、一軸圧縮強度 q_u で数百 kN/m^2 程度の低強度から数千 kN/m^2 の高強度まで改良土の強度を調整できるということがある。ただし、著しく高い強度に地盤改良すれば、浄化工事後の土地利用に支障をきたすことが懸念される。そこで、基本的には施工前の原地盤と同程度に強度を回復させることを目標に①人が載れる地盤の強度 ($q_u=20\text{kN/m}^2$ 程度) 以上、②建設汚泥の判定に用いられる強度の値 ($q_u=50\text{kN/m}^2$) 以上、および③一般に中位の強度を有する土の強度 ($q_u=50\sim100\text{kN/m}^2$ 程度) の3項目を参考として、概ね $q_u=20\sim100\text{kN/m}^2$ 程度が浄化後の地盤に最低限必要な強度の目安とした。

4.2 低アルカリ性セメントを用いた強度試験

土と低アルカリ性セメントとの混合土の材令 28 日の非排水せん断強度をペーンせん断試験により調べた。対象土は異なる3地域で採取した自然含水比状態の粘性土である。表-1に試料土の土質データを示す。低アルカリ性セメントとしてリン酸マグネシアセメント¹³⁾を用い、土 1m^3 当たり $10\sim50\text{kg}$ (以下「 kg/m^3 」とする。) の粉体量を水セメント比 $W/C=80\%$ のスラリーとして土に添加し攪拌混合した。

図-5に非排水せん断強度 C_u を一軸圧縮強度 q_u に換算 ($q_u=2C_u$) した試験結果を示す。図中には、粘性土 a に B 種高炉セメントを低アルカリ性セメントと同様の配合で添加した場合のデータも併せて示している。同図より低アルカリ性セメントを $10\sim50\text{kg/m}^3$ 配合することにより、目標強度である $20\sim100\text{kN/m}^2$ を得られることがわかる。また、B 種高炉セメントも同程度の強度が発現している。

4.3 模擬汚染土を用いた CVOC 分解特性確認試験

材料の配合の違いによる CVOC の分解特性を把握するために、模擬汚染土を用いた試験を行った。

土壌試料は表-1に示す粘性土 b であり、これが TCE で汚染されたものとして、金属系還元剤である鉄粉を用いた浄化を模擬した。鉄粉は製造会社が異なる2種類の浄化用鉄粉 A、B を用いた。固化材としては低アルカリ性セメント及び B 種高炉セメントを用いた。

試験ケースを表-2に示す。同表に示したケースのうち A1、B1 は鉄粉単独での浄化性能を把握すること

表-1 試料土の土質データ

土の種類	土粒子密度 (g/cm^3)	細粒分含有率 ($<75\mu\text{m}$ (%))	自然含水比 (%)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p
粘性土 a	2.768	90.4	84.5	72.6	32.4	40
粘性土 b	2.752	93.2	61.2	61.2	24.7	37
粘性土 c	2.680	90.6	58.3	61.1	28.1	33

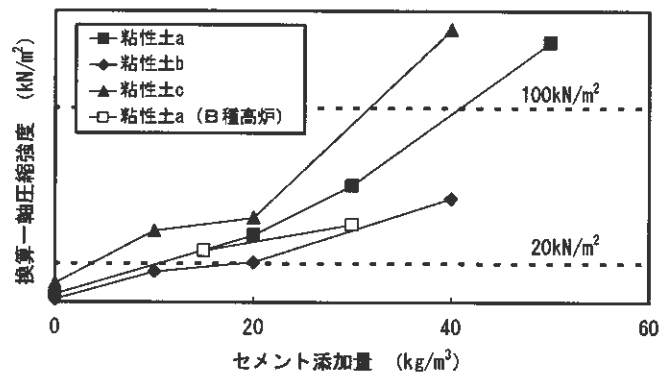


図-5 固化材混合土の固化材添加量と強度の関係

表-2 模擬汚染土に対する試験ケース

鉄の種類	実験ケース	添加量 ($\text{kg}/\text{土}1\text{m}^3$)			
		鉄	低アルカリ性セメント	B種高炉セメント	珪藻土
A	A1	50			
	A2	50	30		
	A3	50		30	
	A4	50		15	15
B	B1	100			
	B2	100	30		
	B3	100		15	15
—	なし	0			

を目的に他の材料を加えていない。A2、A3 及び B2 は固化材種別の違いが CVOC の分解特性に及ぼす影響を検討するためのものであり、A4 及び B3 はスラリー中での鉄粉の沈降防止のために添加する増粘材（珪藻土）の影響検討を目的としている。なお、増粘材としての珪藻土が浄化の促進・阻害に影響しないことを別途実験にて確認している。

試験手順は以下のとおりである。

- ① 粘性土 1000g に対して、TCE 濃度が 1000mg/l の水溶液 80ml 及び所定量の鉄粉、固化材、増粘材、水を手早くかつ均一に混合する。
- ② 混合した土壌を密閉可能なガラス製ネジロビン（有効容量 120ml）に隙間が生じないように充填・密栓し、ビンを遮光・室温で静置する。
- ③ 経時的にビン中の土壌を採取し TCE の土壌溶出濃度を測定する（環告 46 号準拠）。なお、一測定で一ビンを使用することとし、ふたの開閉により TCE が揮散することの影響を排除する。

試験結果を図-6、図-7 に示す。なお、図の縦軸は TCE の初期溶出量に対する各経過日数毎の溶出量の比率を示している。

これらの図より、低アルカリ性セメントを用いた A2、B2 では 11 日後に初期溶出量の約 1/100 と十分な溶出量の低下を示し、鉄粉のみでの TCE 溶出量の低下傾向とほぼ同等となっている。低アルカリ性セメント添加による TCE の分解阻害は認められない。一方、A2 と同量の B 種高炉セメントを用いた A3 の溶出量は、29 日後で初期溶出量の 30% 程度となっており分解性の阻害が認められる。また、A4、B3 は B 種高炉セメント量を各々 A3、B2 の半分にしたにもかかわらず、その TCE 溶出量の低下傾向は A3 とほぼ同じである。以上のことから、低アルカリ性セメントを用いることにより CVOC の分解と混合後地盤の強度回復を両立しうる可能性が確認された。

4.4 実汚染土壌を用いた CVOC 分解特性試験

室内で模擬汚染土壌を作製する際には、揮散防止のために CVOC と添加する材料を土壌試料とともに同時に混合しており、実際の汚染状況や鉄粉の浄化過程を適切に模擬しているとはいえない点もある。そこで、実汚染土に対しては模擬汚染土と同様な CVOC の分解特性試験を行った。

用いた実汚染土壌は PCE、TCE 及び cis-DCE により汚染された粘性土（自然含水比 $w=80\sim100\%$ ）で、表-1 の粘性土 a と同一層で採取されたものである。試験ケースを表-3 に示す。金属還元剤には鉄粉 A を用いているが、事前に鉄粉 A のみでの浄化効果確認試験を行い、 25kg/m^3 以上配合すれば十分な効果が得られることを確認した上で、本試験では鉄粉 A を 25kg/m^3 で配合している。また、実験手順は前記した模擬汚

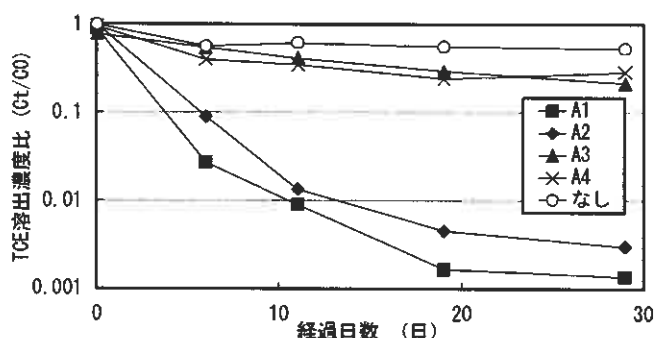


図-6 模擬汚染土に対する鉄粉 A の TCE 分解特性

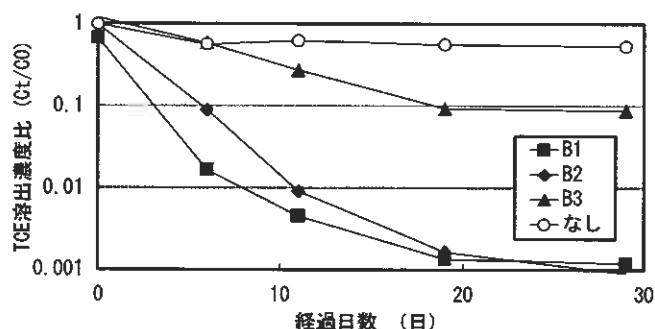


図-7 模擬汚染土に対する鉄粉 B の TCE 分解特性

表-3 実汚染土に対する試験ケース

鉄の 種類	実験 ケース	添加量 (kg/m^3)			
		鉄	低アルカリ性 セメント	B種高炉 セメント	珪藻土
A	A5	25			
	A6	25	30		
	A7	25		15	15
	なし	0			

染土を用いた室内実験に準じた。

試験結果の一例として TCE の溶出量の変化を図-8 に示す。

同図より、低アルカリ性セメントと鉄粉 A を添加した A6 では、鉄粉 A のみの A5 とほぼ同じ傾向で溶出量が低下し試験開始から約 14 日程度で環境基準値以下に達している。これに対し B 種高炉セメントを固化材として用いた A7 では、明確な溶出量の低下は認められない。これより、実汚染土壌に対して低アルカリ性セメントを添加しても、鉄粉の CVOC 分解性への阻害影響は極めて小さく実用上十分に許容しうる範囲であることが確認された。

5. 試験工事による検証

5.1 試験工事の概要

PCE で汚染された実サイトにおいて、DCM-e 工法を用いた浄化試験工事を実施した。サイトは沼地を埋め立てた地盤で、地表面から GL-3m 付近までは礫混じりの埋土、GL-3m~GL-5m は腐植土や砂、粘性土が薄く複雑に堆積した互層、それ以深は軟弱な粘性土層である。粘性土層の土質データを表-4 に示す。PCE が粘性土中にまで達しているため、浄化のための施工深度を GL-8m までとした。配合は、室内試験結果に基づき土 1m³ に対して鉄粉 A を 50kg、低アルカリ性セメントを 30kg 及び W/C=80%の水を加えたスラリーを基本とした。比較のため鉄粉 A だけをスラリー状として混合したケースも実施した。

写真-1 及び写真-2 に施工状況を示す。

5.2 地盤強度の確認

施工後 5 週目及び 18 週目に施工箇所より無水ボーリングにて乱さない試料を採取し、ベーンせん断試験により非排水せん断強度 C_u を測定した。比較のために原地盤（地山）の強度も同様にして測定した。

図-9 に粘性土層（GL-7m 付近）での一軸圧縮強度 q_u に換算（ $q_u=2C_u$ ）した値を示す。

同図より、低アルカリ性セメントの添加により施工後 5 週目で施工前の原地盤程度まで強度が回復したことが確認された。なお、図中の練り返し

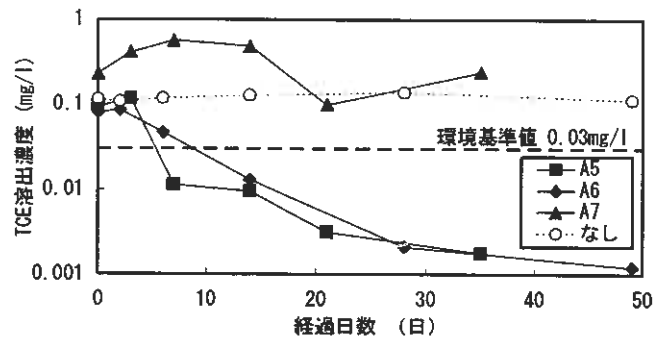


図-8 実汚染土に対する添加配合別の TCE 分解特性

表-4 試験サイトの粘性土の土質

	土粒子 密度 (g/cm ³)	細粒分 含有率 <75 μ m (%)	自然 含水比 (%)	液性 限界 wL (%)	塑性 限界 w _p (%)	塑性 指数 I _p
粘性土	2.701	97.8	83.2	84.5	30.6	53.9

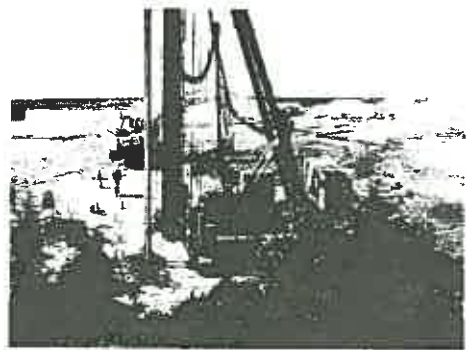


写真-1 施工状況

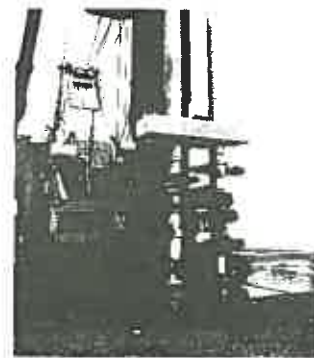


写真-2 攪拌状況

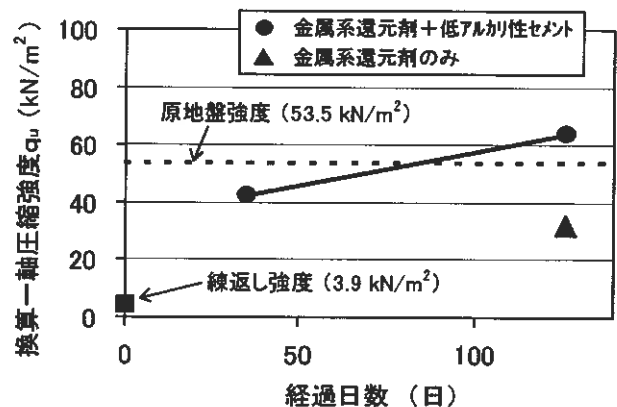


図-9 混合位置の地盤強度

強度は、原地盤から採取した試料土を実験室にてミキサーにより練り返した直後のせん断強度である。

5.3 浄化効果の確認

施工後1週目、5週目及び18週目に施工位置から無水ボーリングにて土壌試料を採取しPCEの溶出量を測定した。

図-10に粘性土層（GL-7m付近）での試験結果を示す。同図に示したように、鉄粉Aだけの場合に比べて溶出量の低減は緩やかであるが、低アルカリ性セメントを併用しても18週目（約4ヶ月）で環境基準値以下となったことが確認された。

6. おわりに

本報では、深層混合処理工法を用いて金属系還元剤を原位置で汚染土壌に混合しCVOCを分解する技術について着目し、金属系還元剤の攪拌混合に伴う地盤強度の回復と浄化効果の両立を図ることの出来る配合について検討した。その結果、金属系還元剤を原位置混合する際に、固化材として低アルカリ性セメントを併用することで地盤を軟弱化させることなくCVOC汚染土壌の浄化が可能であることを確認した。

汚染土壌の浄化技術に関しては土壌汚染対策法の施行、土地評価基準の見直し、事業用地に対する時価評価会計や減損評価会計の導入といった周辺環境の変化により、短期間で確実に経済的に施工可能な方法がいつそう求められるものと予想される。これらを踏まえ、本技術に関してここで得られた知見を基に今後とも改良を重ねていきたいと考えている。

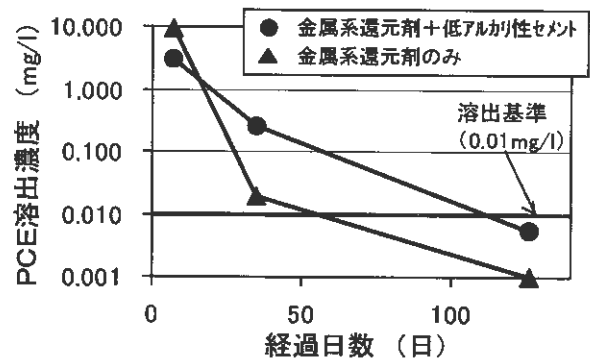


図-10 混合位置土壌のPCE溶出量

【参考文献】

- 1) 渡辺征起・原幸輔（1992）：トリクロロエチレンによる地下水汚染対策調査について，土壌・地下水汚染とその防止対策に関する研究集会第2回講演集，pp.92-97
- 2) 吉田文和（1998）：廃棄物と汚染の政治経済学，岩波書店，pp.303
- 3) 環境省環境管理局水環境部（2002）：平成12年度 土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要
- 4) 岩本宏・斉藤聡・木村玄・奥田信康・山本光起・白井克巳・中間哲志（2003）：固化材を併用した金属系還元剤によるVOC汚染土壌の浄化特性，第38回地盤工学研究発表会，pp.2297-2298
- 5) 木村玄・奥田信康・岩本宏・斉藤聡・山本光起・中間哲志（2003）：揮発性有機化合物による汚染土壌の原位置浄化方法，地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第9回講演集，pp.38-39
- 6) 村井真人・高月修・堀尾哲司・嶋邑勉・野原勝明・高植俊彰（2003）：鉄粉（CI剤）によるVOC分解のための原位置攪拌方法の検討，地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第9回講演集，pp.418-419
- 7) 有山元茂・佐藤和郎・今村聡・樋口雄一（2003）：VOCs汚染に対する原位置浄化技術の適用例，地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第9回講演集，pp.482-485
- 8) 木村利宗（1982）：鉄粉法による排水中の重金属などの有害物質の処理，P P M, No.9, pp.47-56
- 9) 先崎哲夫・熊谷裕男（1988）：還元処理による有機塩素化合物の除去—鉄粉による1,1,2,2-テトラクロロエタンの処理—，工業用水，No.357, pp.2-7
- 10) 先崎哲夫・熊谷裕男（1989）：還元処理による有機塩素化合物の除去（第2報）—鉄粉によるトリクロロエチレンの処理—，工業用水，No.369, pp.19-25
- 11) EPA（1998）：EnviroMetal Technologies, Inc., Metal-Enhanced Dechlorination of Volatile Organic Compounds Using an In-Situ Reactive Iron Wall — Innovative Technology Evaluation Report, EPA/540/R-98/501
- 12) J.K.Mitchell（1960）：FUNDAMENTAL ASPECT OF THIXOTROPY IN SOILS, Proceedings, ASCE, SM3, June, pp.19-52
- 13) 藤森新作・小堀茂次・藤井義文（2003）：湖沼等の環境浄化処理技術の開発，季刊 環境研究，No.129, pp.85-91

粒度調整による河川工事発生土の有効利用

北海道開発局 数田 茂
北海道開発局 水嶋 稔
○(株)開発工営社 西村 右敏

1. はじめに

河川工事で発生した不良土と判定される土砂は、そのほとんどが河川敷地内に存置されているのが現状である。一方で、近年、良質な築堤盛土材料の確保が困難な状況となってきた。

これらの状況を鑑み、石狩川開発建設部では混合土利用マニュアル(案)¹⁾を定め、単独では利用できない河川工事発生土を粒度調整によって改善し、築堤盛土材料としての積極的な利用を推進している。

本報告では、混合土利用マニュアル(案)における調査・検討方法とそれに基づき実施された施工例を紹介する。

2. 粒度調整による土質改良

混合土利用マニュアル(案)は、築堤材料としては不適切であると判定された河川工事発生土を粒度調整によって利用することを目的としている。

粒度調整による土質改良²⁾とは、図-2.1 に示すように性質の異なる2種類以上の土を混合して、粒度分布を改善し所要の材料特性を得ようとするものである。

同図中の材料Aは、細粒分が少ないため透水性が大きく築堤材料としては不向きである。材料Bは、細粒分が多く乾燥収縮によりクラックの発生しやすい性質を有しており、また、その多くは含水比が高くトラフィカビリティが確保できないものである。

配合割合の検討に際しては、所要の材料特性を満足すると同時に、現地発生土の土砂収支を考慮して決定する必要がある。

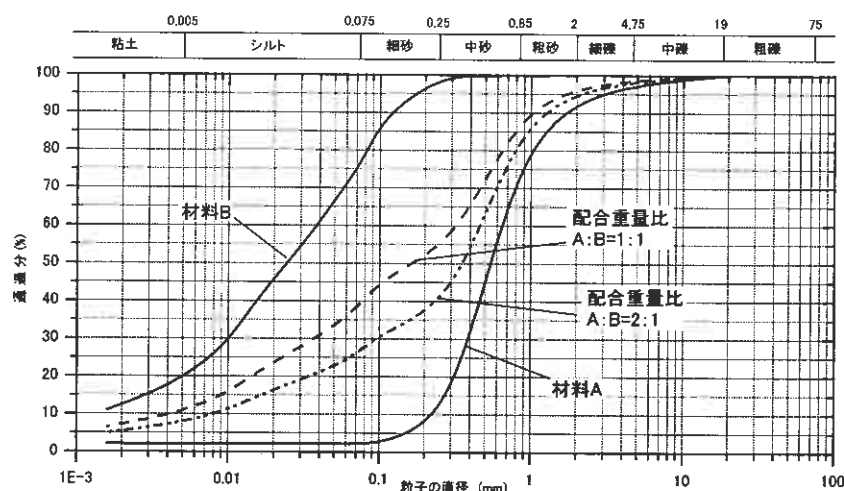


図-2.1 粒度調整例

KAZUTA Shigeru, MIZUSHIMA Minoru

札幌市中央区北2条西19丁目 北海道開発局 石狩川開発建設部 工務課, TEL: 011-621-1541, FAX: 011-615-2880

NISHIMURA Mighitoshi

札幌市中央区北4条西5丁目 株式会社開発工営社 地質部, TEL: 011-207-3666, FAX: 011-218-5777

3. 検討の流れ

混合土の利用にあたっては、図-3.1 に示す大まかな検討フローに従って検討する必要がある。

検討に際して、必要な土質試験項目とその結果の利用を表-3.1 および表-3.2 に示す。

以下に各検討の概略を記す。

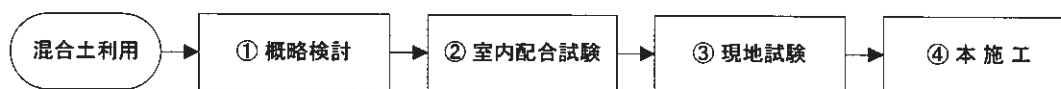


図-3.1 混合土利用の検討フロー

① 概略検討

土取場調査が実施され不良土と判定されている土(粘性土と砂質土)の粒度分布を合成し、目標粒度分布を得る配合割合の検討を行う。

この結果から、室内配合試験で実施する配合割合を決定する。

② 室内配合試験

対象となる土の代表試料を採取し、概略検討の配合割合で粒度調整し、土質試験を実施する。

この結果から、現地試験で実施する配合割合を決定する。

主に、築堤材料としての透水性、施工時のトラフィカビリティを確保できると同時に、盛土材料としての条件^{例えば3)}を満足する配合としなければならない。

③ 現地試験

実際に小規模なヤードを造成し、攪拌機械によって試験施工を行う。

現地では、攪拌回数と混合状態、攪拌機械の処理能力等の確認を行う。攪拌後は、混合土上を使用する施工機械で走行することで、実際のトラフィカビリティを判断することもできる。

混合土を試料採取し、土質試験によって盛土材料として所定の品質が得られているかを確認する。

現地試験の結果から、本施工で実施する配合割合を最終的に決定する。

④ 本施工

粒度試験を実施して品質を確認する。ただし、その頻度は通常 5,000m³に1回程度とするが、小規模な場合は全体で3回程度とする。

表-3.1 各検討に必要な土質試験項目

試験項目	概略検討※1	室内配合試験	現地試験	本施工
土粒子の密度試験	○	○	○	○
土の含水比試験	○	○	○	○
土の粒度試験	○	○	○	○
土の液性限界・塑性限界試験		○	○	
突固めによる土の締固め試験		○	○	
締固めた土のコーン指数試験		○	○	
土の透水試験		○	○	
土の密度試験 (砂置換またはコアカッター)	○			

※1 粒度試験結果、土の密度(単位体積重量)試験結果が無い場合に実施する。

表-3.2 土質試験と結果の利用

試験項目	試験方法	結果の利用
土粒子の密度試験	JIS A 1202	粒度試験(沈降分析)、締固め試験で利用
土の含水比試験	JIS A 1203	土の基本的物理量の計算
土の粒度試験※1	JIS A 1204	土の分類、粒度分布
土の液性限界・塑性限界試験	JIS A 1205	細粒土の分類(シルトと粘土)、土の状態や性質の把握
突固めによる土の締固め試験	JIS A 1210	締固め度と施工含水比、透水試験(供試体密度調整)
締固めた土のコーン指数試験※2	JIS A 1228	建設発生土の土質区分、トラフィカビリティの判定
土の透水試験	JIS A 1218	透水性の評価
砂置換による土の密度試験	JIS A 1214	地山密度の把握、材料堆積時の密度推定
コアカッターによる土の密度試験	JGS 1613	地山密度の把握、材料堆積時の密度推定

※1 ふるい分析および沈降分析

※2 通常は自然含水状態で実施するが、含水比がトラフィカビリティに及ぼす影響を把握する場合は、締固め試験と併用して実施し、含水比とコーン指数の関係を求めるとよい⁴⁾。

4. 築堤盛土材料の品質

混合土を築堤盛土材料として用いる場合の品質目標は、以下の理由から表-4.1としている。

1) 透水性について

通常、河川堤防は、堤体材料や断面形状、基礎地盤および洪水継続時間等の組合せが考慮されて設計されるものであるが^{5)~6)}、築堤盛土材料としての品質は、難透水性材料を当面の目標として透水性の低い $k=1\times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 未満⁷⁾としている。

2) トラフィカビリティについて

湿地ブルドーザの走行に必要なコーン指数は $q_c=300\text{kN/m}^2$ 以上とされているが(表-4.2 参照)、現地地盤状況や混合等の不確実性を考慮して、通常の施工性が確保される $q_c=400\text{kN/m}^2$ 以上⁸⁾としている。ただし、施工機械によってトラフィカビリティの要求値は異なるため、 q_c 値は施工機械の選択の問題とあわせて判断しなければならない。

築堤本体以外で利用する場合の混合土に求められる品質は、使用目的(河川、道路、宅地等)により異なるため、材料規定、締固め規定等は、各基準類または設計図書に従わなければならない。

表-4.1 混合土を築堤盛土材料として用いる場合の品質目標

品質	難透水性が確保される透水係数	・ $k=1\times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 未満 (10^{-4} のオーダー以下) ⁷⁾
	通常の施工性が確保されるコーン指数	・ $q_c=400\text{kN/m}^2$ 以上 ⁸⁾
材質	築堤材料として望ましい土 ²⁾	・細粒分が15%以上:不透水性の確保 ・細粒分が50%以下:乾燥時のクラック防止 ・土質分類的には[GF], [SF], [M], [C]に相当
	築堤材料として望ましくない土 ²⁾	・細粒分がほとんどない土 ・施工機械のトラフィカビリティの得られない土 ・高有機質土[Pt], [Mk]

表-4.2 建設機械の走行に必要なコーン指数⁸⁾一部修正

建設機械の種類	コーン指数 q_c (kN/m ²)	建設機械の接地圧(kN/m ²)
超湿地ブルドーザ	200以上	15~23
湿地ブルドーザ	300以上	22~43
普通ブルドーザ(15t級程度)	500以上	50~60
普通ブルドーザ(21t級程度)	700以上	60~100
スクレーブドーザ	600以上(超湿地型は400以上)	41~56(27)
被けん引式スクレーバ(小型)	700以上	130~140
自走式スクレーバ(小型)	1000以上	400~450
ダンプトラック	1200以上	350~550

5. 目標とする粒度分布

粒度調整の配合割合を決定する手がかりとして、目安となる粒度分布の範囲があれば便利である。そこで、築堤盛土材料として粒度調整する際の目標粒度分布範囲を図-5.1に示す。

この範囲は、石狩川下流域(KP30~42)の平成 11~14 年度排泥池内の浚渫土砂を対象とした配合試験結果に基づき作成したもので、現時点では厳しい範囲としてある。施工実績データの積み重ねによって、目標とする粒度分布の範囲を修正していく予定である。この範囲を決定した根拠を以下に示す。

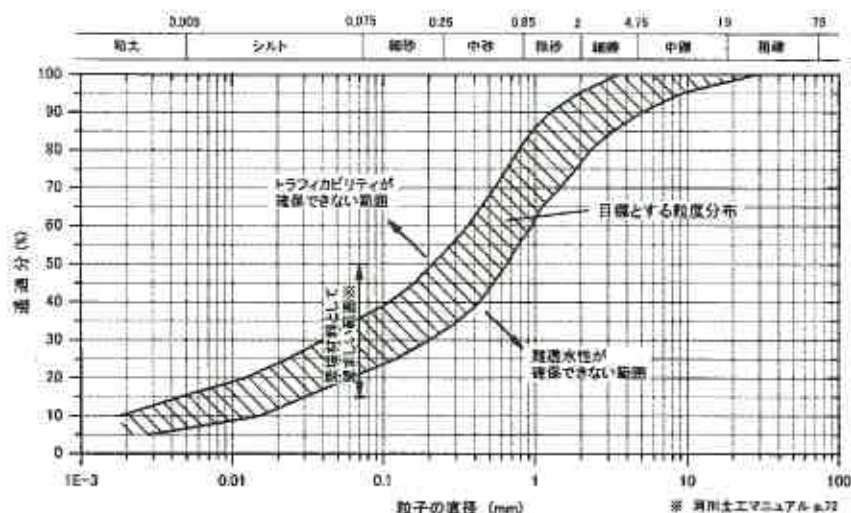


図-5.1 粒度調整で目標とする築堤盛土材料の粒度分布

5.1 浚渫土砂の特性

現在石狩川の浚渫工事において排泥される浚渫土は年間 40～50 万 m^3 であり、その殆どが高水敷(排泥地)に存置されている状況にある。

石狩川下流域でポンプ浚渫された土砂は、排泥池内で分級され堆積する傾向にある。図-5.2 は、昭和 62～平成 14 年度排泥池内(石狩川 KP13～42)に堆積する浚渫土砂の粒度分布を示したものである。

ポンプ浚渫船から排出された排泥水は、沈砂池、遊水池を経由し、河川へ排出する河川環境への影響を配慮した処理が行われている。この沈砂池に堆積する土砂は、図-5.2 に示すような粒度分布状況で、粘土、シルト、砂質土、砂に概ね分類される。なお、遊水池では、微細なコロイド粒子を凝集沈殿させているが、本報告では、このコロイド粒子の凝集堆積物であるフロックは、検討対象外としている。

浚渫土砂の土質分類および性状は表-5.1 に示すようであり、粘土、シルトはトラフィカビリティ不足で、砂は難透水性が確保できないことから、築堤材料への単独利用は困難である。

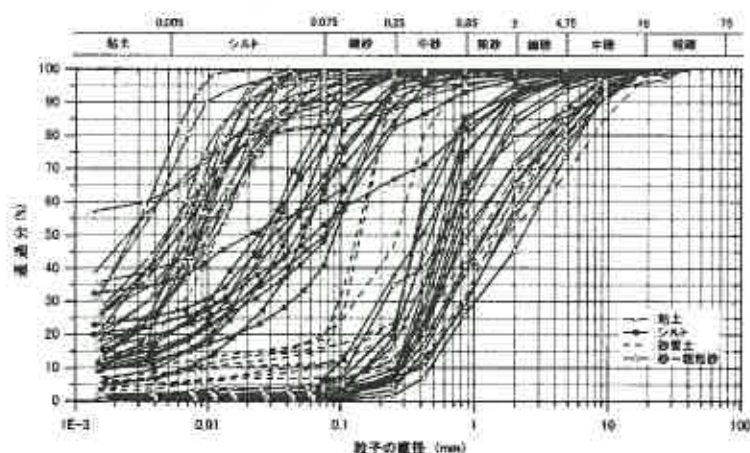


図-5.2 石狩川下流域排泥池における浚渫土砂の粒度分布

表-5.1 浚渫土砂の土質分類および性状

土質区分		土質性状				
土質名	記号	土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	自然含水比 $w(\%)$	細粒分 $F_c(\%)$	コーン指数 $q_c(\text{kN/m}^2)$	透水係数 $k(\text{cm/sec})$
砂～粗粒砂	S	2.64～2.70	5～23	5以下	3000以上	1×10^{-2}
砂質土	SF	2.58～2.67	20～45	5～30	200～800	$1 \times 10^{-2} \sim 10^{-4}$
シルト	M	2.61～2.67	26～60	30～70	3～170	1×10^{-5}
粘土	C	2.50～2.64	54～106	80以上	6～70	$1 \times 10^{-6} \sim 10^{-8}$

一例として図-5.3 に平成 11～14 年度排泥池平面図を、図-5.4 に平成 13 年度排泥池における表層部の浚渫土砂堆積状況を示す。

図-5.4 に示すように、ポンプ浚渫された土砂は、粒径の粗い砂は排出口の手前側に、細かい粘土は奥に堆積する傾向にある。ただし、浚渫土砂の性質上、砂と粘土が明瞭に区分できない区間や、深度方向の分布が互層または土質が異なる場合があるため、堆積状況の把握には注意を要する。



図-5.3 平成 11～14 年度排泥池平面図(石狩川 KP30～42 付近)

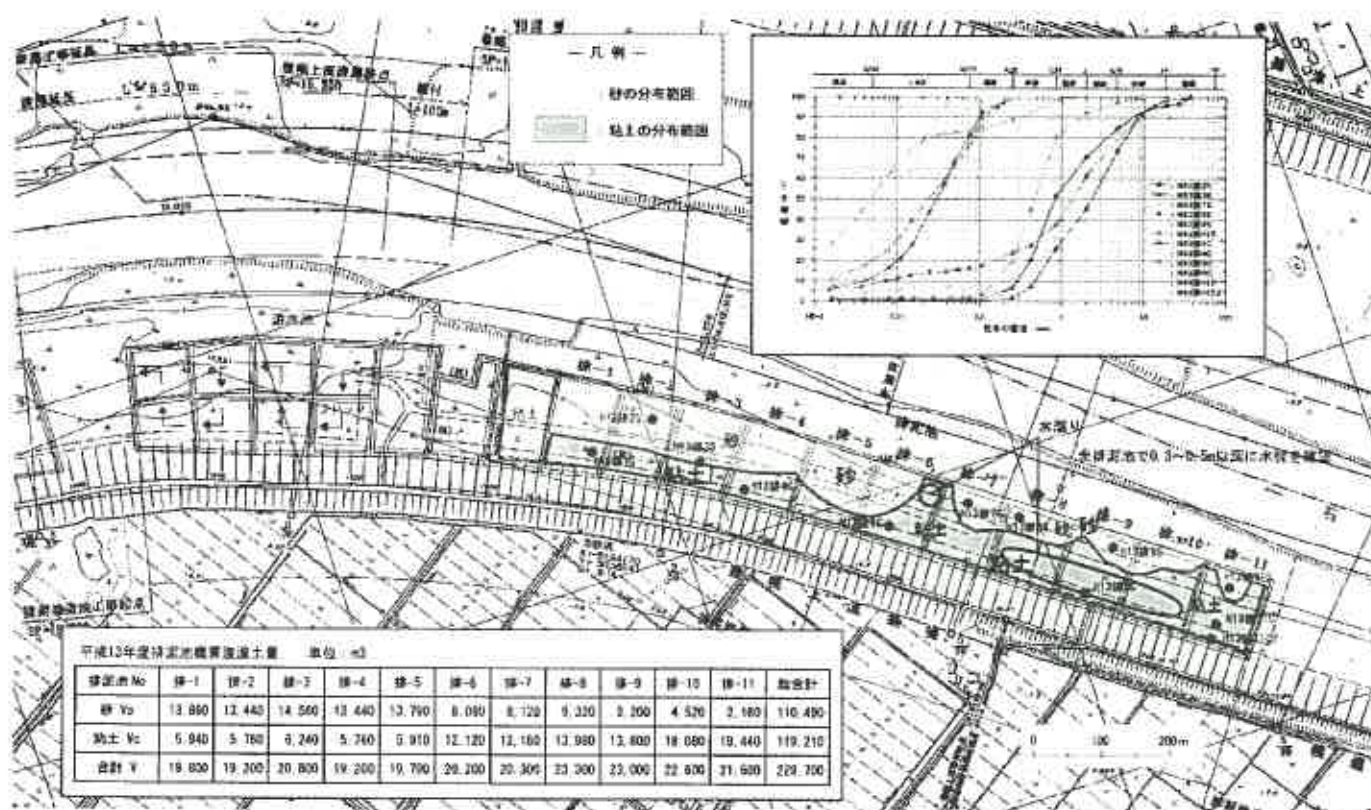


図-5.4 平成 13 年度排泥池における浚渫土砂堆積状況平面図(石狩川 KP38～39.5 付近)

5.2 浚渫土砂の配合検討

表-5.2 に示した石狩川下流域排泥池における浚渫土砂の粒度分布から、配合に用いた代表 5 試料の粒度分布を図-5.5 に示す。

代表試料の名称は便宜上のもので、各試料の粒度分布は、粘土の上限値と下限値、シルトの中間値、砂の上限値と下限値にある。粒度調整による利用検討の配合条件は、これらの組合せで概ね網羅できると考えた。表-5.2 に代表 5 試料の基本的性質を示す。

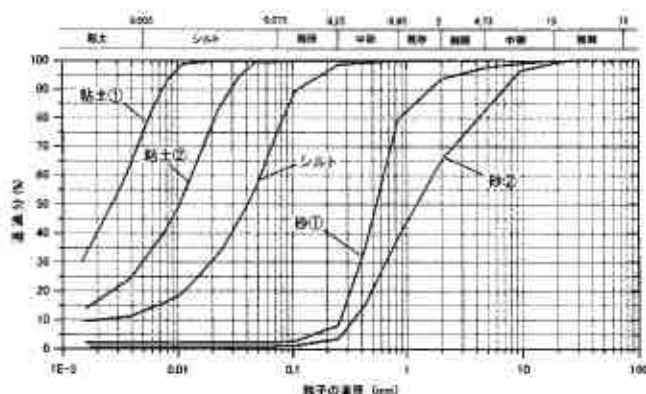


図-5.5 検討した代表5試料の粒度分布

表-5.2 代表試料の土質試験結果

名 称	粘土①	粘土②	シルト	砂①	砂②
湿潤密度(g/cm ³)	1.539	1.601	1.656	1.686	1.750
乾燥密度(g/cm ³)	0.911	0.993	1.099	1.570	1.574
自然含水比 (%)	69.3	59.4	52.7	7.9	5.7
細 粒 分 (%)	99.8	99.2	75.7	2.3	0.9
土 質	粘土 (高液性限界)	シルト (高液性限界)	砂質シルト (低液性限界)	硬まじり砂	硬質砂
透水係数 (cm/sec)	9.34×10^{-6}	7.20×10^{-6}	3.87×10^{-6}	6.64×10^{-3}	6.32×10^{-4}
コーン指数 (kN/m ²)	67.3	0.8	3.4	823	524

5.3 配合検討結果

配合試料の粒度分布を図-5.6 に示す。図中の曲線は、築堤盛土材料の品質目標を満足しているものを実線で、透水性が満足しないものは点線で、コーン指数が満足しないものは破線で示している。

築堤材料として適正な配合範囲の算出例を表-5.3 および図-5.7 に示す。現地試験で実施する配合割合は、このように両者を満足する範囲で決定しなければならないが、施工時期によって含水状況が変化することが想定される場合は、これを見込んで決定する必要がある。

なお、現地試験における配合割合は施工管理上、土取場調査の現場密度試験結果を基に、乾燥重量比から土量(体積)比へ変換しておく必要がある。

この粒度分布の範囲を著しく離れる土質、粒度分布曲線の形状が著しく異なるものは、別途検討が必要である。

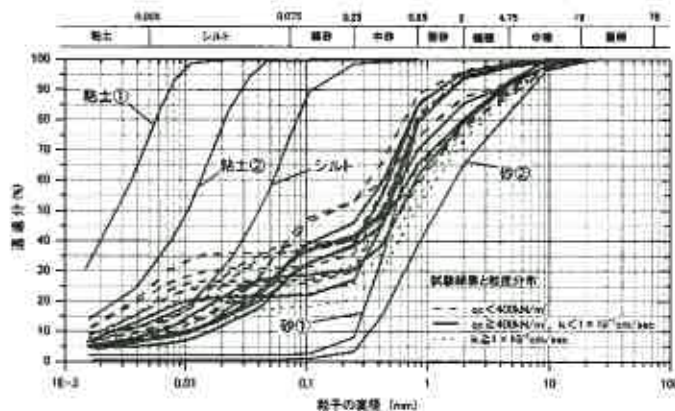


図-5.6 代表試料および配合試料の粒度分布

表-5.3 配合試験結果の一例

名 称	砂②+粘土②配合		
砂:粘土(乾燥重量比)	2:1	3:1	4:1
土粒子の密度(g/cm ³)	2.661	2.663	2.666
自然含水比 (%)	24.1	20.9	15.5
細 粒 分 (%)	38.4	28.5	18.1
土 質	粘性土質 硬質砂	粘性土質 硬質砂	粘性土質 硬質砂
透水係数 (cm/sec)	1.10×10^{-4}	4.04×10^{-4}	1.12×10^{-3}
コーン指数 (kN/m ²)	259	416	1295以上

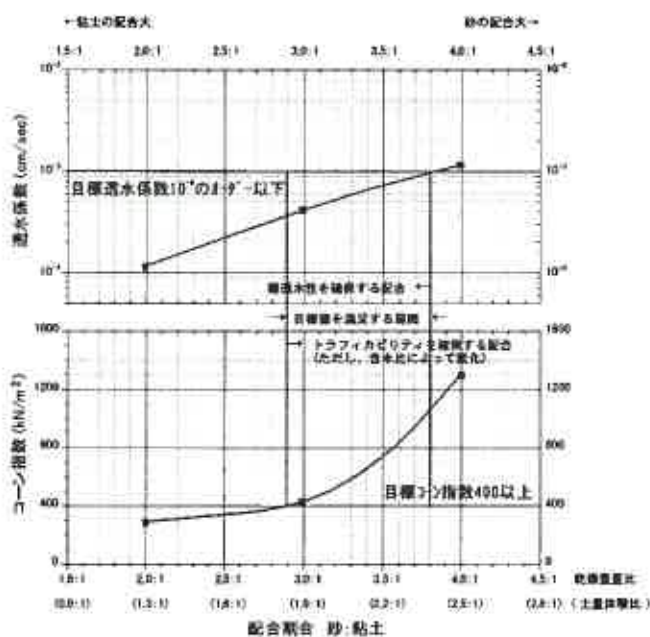


図-5.7 配合割合と透水係数およびコーン指数の関係の一例

6. 攪拌施工例

6.1 攪拌機械

粒度調整では、できるだけ均質に混合することが重要であり、一方の性質の土が一部に集中して盛土されることがないように注意しなければならない。混合の方法としては、一般にバックホウ、スタビライザ等が用いられるが、粘性土の粉碎・混合効果の高いスタビライザを採用するのが望ましい²⁾。

攪拌機械の選定にあたっては、品質確保、処理能力、経済性等を十分考慮して、実際の現場に適用したものを採用する必要がある。

攪拌機械の例として、写真-6.1 にロータリー式攪拌機を写真-6.2 に自走式土質改良機を示す。



写真-6.1 ロータリー式スタビライザ



写真-6.2 自走式土質改良機

6.2 現地試験

スタビライザによる現地試験例を以下に示す。図-6.1 は、混合攪拌ヤードに2材料を搬入し攪拌した場合である(写真-6.5 参照)。これに対して図-6.2 は、材料となる砂地盤に粘土を搬入し攪拌した場合である(写真-6.6 参照)。

現地試験は、材料搬入や混合攪拌ヤード状況等の本施工時を考慮して、本施工と同じ形状で実施し問題点を把握する必要がある。混合後は、試料を採取し、室内土質試験により所定の品質が確保されているか確認する必要がある。

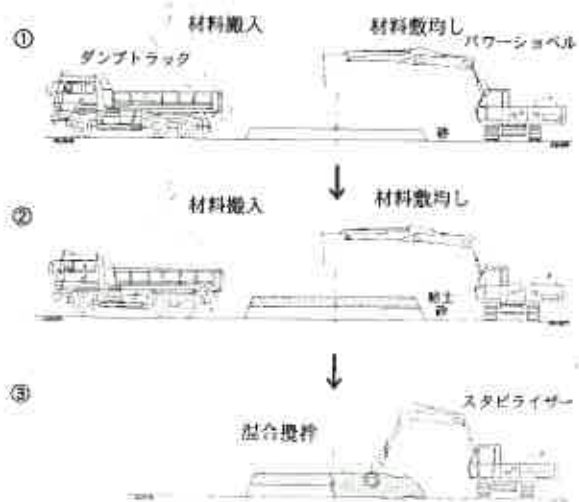


図-6.1 施工例-1 (2材料搬入)

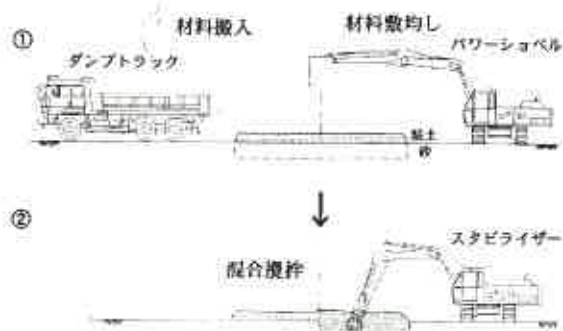


図-6.2 施工例-2 (1材料搬入)



写真-6.3 現地試験状況-1



写真-6.4 現地試験状況-2



写真-6.5 トラフィカビリティの直接確認



写真-6.6 スタビライザ攪拌ヘッド

6.3 本施工

本施工の一例を図-6.3 に示す。これは、図-5.4 に示した平成 12 および 13 年度排泥池で行われている施工状況を模式的に示したものである。この混合土は 18 万 m^3 造られ、幾春別川新水路築堤の盛土材料として利用されている。

施工は、排泥池内で粘土を砂上に搬入敷均し、混合攪拌後、ダンプトラックで盛土場に搬出する一連の流れで行っている。1 層目がなくなれば、2 層目へと高水敷までこの作業を繰返し行っている。

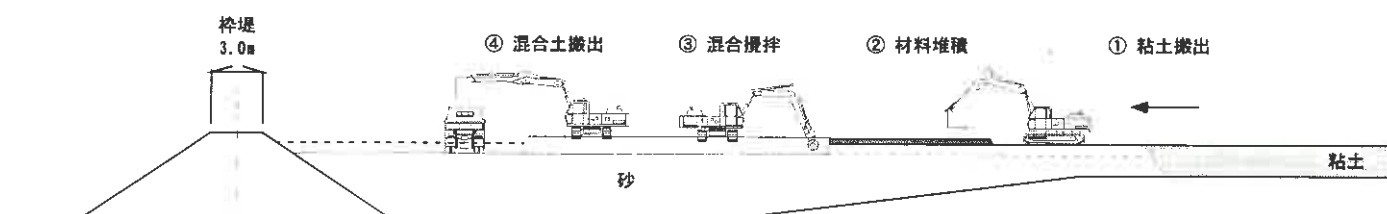


図-6.3 施工実施例模式図(岩見沢河川管内平成 13 年度排泥池)

写真-6.6 は本施工状況の全景で、排泥池内の砂に粘土を所定の厚さで堆積させている。同写真の手前右側は排泥池の杵堤で、杵堤に沿う形でトレンチ排水処理が施されている。

写真-6.7 は施工実施状況で、攪拌直後にトラフィカビリティが得られる配合では、混合土上に攪拌機械が載って施工を進行させることが可能である。なお、同写真のように現地では、丁張りやレーザーレベルによって攪拌深度が一定になる工夫が行われている。



写真-6.6 本施工状況-1



写真-6.7 本施工状況-2

本施工における混合土の品質確認は、粒度試験によって室内試験および現地試験で得られた粒度分布の範囲に収まっているか確認を行う。

6.4 ヤード内排水処理

排泥池の土砂を混合利用する場合は、事前に杵堤を開削して水位を低下させておく必要がある(写真-6.3)。また、排泥池内ではトレンチ等により排水や曝気を行い、含水比を下げることも重要である(写真-6.4)。

これらの粘土の含水比を低下する工夫によって、粒度調整がより一層効果的になり、また図-5.1 に示した粒度調整で目標とする粒度分布の上限も左側にシフトし適用範囲が広がるものとする。



写真-6.3 杵堤開削



写真-6.4 トレンチ排水処理

7. まとめ

建設発生土のリサイクル推進の観点から、河川工事で発生する土砂を有効利用するための研究は重要である。本報告では、これまで単独では利用不能とされていた浚渫発生土(砂、シルト、粘土)に対して、粒度調整を行うことで築堤材料として利用する方法を紹介した。

混合利用を成功させるためには以下の点に配慮する必要がある。

- ・混合する土量に見合ったヤードの確保が必要である。
- ・粒度調整によって良い品質の盛土材料を造るには、対象土砂を最適含水状態に近づける工夫が重要である。
- ・また、浚渫土砂を利用する場合、排泥池内には水が溜まっているため、杵堤開削などにより水位を低下させなければならない。
- ・本施工で大規模な混合を行う前に、現地試験で小規模な混合を必ず行い、築堤盛土材としての品質を確認する必要がある。

今後は、工事データを収集し、以下の点を整理し、現場に即したマニュアルに改善して行く予定である。

- ・粒度調整の適用土質と適正範囲の幅を検証する。
- ・計画時において、室内と現地の精度の高い配合割合の設定方法を検討する。

参考文献

- 1) 北海道開発局石狩川開発建設部工務課：混合土利用マニュアル(案)，平成 15 年 3 月。
- 2) 国土開発技術研究センター：河川土工マニュアル，第 3 章 3.1.3 堤体材料の選定，pp.68～76，平成 5 年 6 月。
- 3) 北海道開発局開発土木研究所：北海道における不良土対策マニュアル(案)，第 3 章不良土の調査と判定，pp.11～17，昭和 60 年 2 月。
- 4) 建設省河川局監修：改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，日本河川協会，第 17 章第 2 節河川堤防の土質調査，pp.401，平成 9 年 10 月。
- 5) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，平成 14 年 7 月。
- 6) 北海道開発局：漏水対策工設計施工指針(案)，昭和 59 年 1 月。
- 7) 地盤工学会：土質試験の方法と解説(第一回改訂版)，第 6 編第 2 章土の透水試験，pp.311～347，平成 12 年 4 月。
- 8) 日本道路協会：道路土工 施工指針，3-3-2 土質条件，pp.47，昭和 61 年 11 月。
- 9) 建設大臣官房技術調査室監修：建設発生土利用技術マニュアル(第 2 版)，土木研究センター，3.土質区分基準および土質区分判定のための調査，pp.23～29，平成 9 年 10 月。

建設発生土に含まれる重金属流出に関する検討

橋本祥司 北海道開発土木研究所 地質研究室

伊東佳彦 同 上

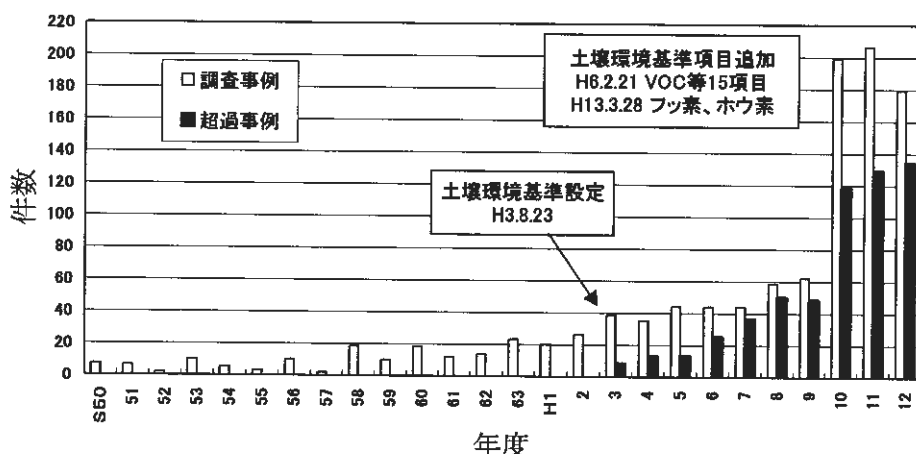
田本修一 同 上

1. はじめに

建設工事に係わる環境問題としては、騒音、振動、粉塵、地盤沈下などが一般に認識され、汚染土砂による環境汚染は鉱山地周辺の限られた地域の問題として扱われる場合が多かった。しかし、近年、土壌・地下水汚染に係わる社会的な関心は高まる傾向にあり、環境省調査による土壌汚染判明事例の年度別の推移を観ると、図－1に示すように、平成10年度以降、汚染判明事例数は急激に増加していることが分かる。

有害物質による地盤汚染は、放置すると人の健康被害や汚染拡散などの環境問題に発展する可能性があることから、汚染土砂を扱う土木建設現場では、汚染評価や汚染土砂処理対策工の選定などを、独自に検討し対処している現状にある。

本報告書は、建設工事における汚染土砂処理対策フローの構築に向け、土壌汚染等に係わる環境基準の整理および基準に基づく対策工法などに関する基礎的な考え方および問題点等について取りまとめたものである。



図－1 汚染判明事例数の推移（平成12年環境省調査）

2. 土壌・地下水汚染と発生要因について

土壌・地下水汚染とは、土壌中および地下水中に存在する有害物質の量が、人の健康・自然環境を阻害するレベルを超過した状態をいう。対象物質は、鉛、ヒ素などの重金属類やトリクロロエチレンなどの揮発性有機化合物、農薬類である。その発生要因は、大きく「人為的要因」と「自然的要因」に区分でき、前者は何らかの生産活動に伴い使用された化学物質の不適切な取り扱いによる地下への浸入、後者はもともと岩石に蓄積されている微量元素による汚染である。「人為的要因」による汚染は、電気機械、金属製品の製造、化学工場などにおいて、有害物質を含む原材料、薬品等の保管・製造過程における漏出、不適切な排水による地下への浸透、廃棄物の埋め立て処分等が原因で発生しており、土壌汚染の問題の多くは、この「人為的要因」が原因である。

一方、「自然的要因」による汚染は、自然界に存在するカドミウム、鉛、六価クロム、砒素、水銀、セレンが対象とされる。従って、自然由来の汚染地盤は、それらの物質が濃集する鉱床周辺や変質

Shoji HASHIMOTO, Yoshihiko ITO, Shuichi TAMOTO

〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号

TEL:011-841-1775 FAX:011-842-9173

の影響を受けた火山岩、海成の堆積岩が分布する特定の地域で認められる場合が多い。また、これらの地域では、黄鉄鉱などの硫化鉱物が存在する場合があります。土木工事などによる掘削で、これらの岩石や土砂が空気と水が豊富に供給される環境に曝されると、化学的風化作用の影響で酸性水を浸出し、環境汚染やコンクリート構造物の劣化などを引き起こす可能性がある。

3. 汚染土砂の評価基準について

人為的あるいは自然的要因で発生した有害物質による地盤汚染は蓄積性が高く、長期にわたり持続する特徴を有しており、放置すると人の健康や自然環境を損ねる可能性がある。そのため、人の健康を保護し生活環境を保全する上で維持することが望ましい基準として有害物質の溶出量や濃度、含有量が定められている。また、これらの基準は、汚染地盤の評価や汚染対策における到達目標でもある。以下に各種環境基準の概要について述べる。

(a) 土壌環境基準（土壌の汚染に係る環境基準 平成3年環境庁）

雨や地下水を介した有害物質の摂取による健康被害および汚染拡散の防止を目的とする。この基準は、地下水飲用による健康被害を想定しており、有害物質が雨水・地下水に溶け出す濃度、溶出量（mg/L）を基準としている。表－1に対象物質と基準値を示す。

(b) 土壌含有基準（土壌汚染対策法 平成14年環境省）

飛散による有害物質の直接摂取による健康被害および汚染拡散の防止を目的とする。この基準は、飛散等による有害物質の直接摂取による健康被害を想定しており、含有量（mg/kg）を基準としている。対象物質は表－1に示す水銀、カドミウム等の9項目である。

(c) 地下水環境基準（地下水の水質汚濁に係わる環境基準 平成9年環境庁）

地下水の汚染状況を把握し、汚染物質の摂取回避、汚染拡散の防止を目的とする。この基準は、汚染物質の存在を明らかにし、汚染物質の摂取回避を目的としている。重金属、揮発性有機化合物などが対象とされている。対象物質と基準値を表－1に示す。

さて、これら3つの環境基準に共通している考え方は、有害物質の長期的な摂取による健康被害を考慮している点である。表－1の左に、濃度を基準とする土壌・地下水環境基準と水道法による水道水質基準の健康に関連する項目、水質汚濁防止法による有害物質に係わる排水基準について対象項目および基準値を取りまとめた。

表から、土壌・地下水環境基準が水道水質基準と同レベルで、排水基準よりも10倍厳しい基準であることが分かる。飲料水の基準を示す「水道水質基準」は、生涯にわたる連続的な摂取をしても人の健康に影響が生じない水準を基に安全性を十分考慮して設定された基準である。「土壌・地下水環境基準」についても、有害物質の摂取による健康被害を想定していることから、その基準値は、この「水道水質基準」と同レベルである。

例えば、「環境基準値を超えた有害物質を含む土砂」というと、かなり深刻な環境汚染をイメージするが、言い換えると「水道水質基準」を満足しない飲用には適さない水が浸出する恐れがある土砂ということである。すなわち、「土壌環境基準値」は、かなり安全側にある環境基準と考えることができる。

また、土壌・地下水環境基準にはpHの規定はないが、水質基準の性状に関連する項目および生活環境項目（海域外）に係わる排水基準では5.8～8.6とされている。

表－１ 各種環境基準の一覧

項目	mg/L				項目	mg/kg
	土壌環境基準	地下水環境基準	水道水質基準 (健康関連)	排水基準 (有害物質)		
カドミウム	0.01	0.01	0.01	0.10	水銀	15
全シアン	検出されないこと	検出されないこと	0.01	1	カドミウム	150
有機磷	検出されないこと	—	—	1	鉛	150
鉛	0.01	0.01	0.05	0.10	砒素	150
六価クロム	0.05	0.05	0.05	0.50	六価クロム	250
ヒ素	0.01	0.01	0.01	0.10	ふっ素	4000
総水銀	0.0005	0.0005	0.0005	0.005	ほう素	4000
アルキル水銀	検出されないこと	検出されないこと	—	検出されないこと	セレン	150
PCB	検出されないこと	検出されないこと	—	0.003	シアン	50
ジクロロメタン	0.02	0.02	0.02	0.20		
四塩化炭素	0.002	0.002	0.002	0.02		
1,2-ジクロロエタン	0.004	0.004	0.004	0.04		
1,1-ジクロロエチレン	0.02	0.02	0.02	0.20		
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.04	0.04	0.04	0.40		
1,1,1-トリクロロエタン	1	1	—	3.00		
1,1,2-トリクロロエタン	0.006	0.006	0.006	0.06		
トリクロロエチレン	0.03	0.03	0.03	0.30		
テトラクロロエチレン	0.01	0.01	0.01	0.10		
1,3-ジクロロプロペン	0.002	0.002	0.002	0.02		
チウラム	0.006	0.006	0.006	0.06		
シマジン	0.003	0.003	0.003	0.03		
チオベンカルブ	0.02	0.02	0.02	0.20		
ベンゼン	0.01	0.01	0.01	0.10		
セレン	0.01	0.01	0.01	0.10		
硝酸性窒素・亜硝酸性窒素	—	10	10	10		
フッ素	0.80	0.80	0.80	生活環境		
ホウ素	1	1	—	—		
総トリハロメタン	—	—	0.10	—		
クロロホルム	—	—	0.06	—		
ブロモジクロロメタン	—	—	0.03	—		
ジブロモクロロメタン	—	—	0.10	—		
ブロモホルム	—	—	0.09	—		
大腸菌群数	—	—	検出されないこと	生活環境		
一般細菌	—	—	集落数100/ml	—		

４．地盤の汚染調査

調査の目的は、対象地盤における汚染発生の有無を判定し、対策工の選定に必要な情報を取得することにある。調査の進め方は、「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準」に従うのが一般的である。

１）資料調査：汚染可能性の有無を確認

既存資料から、対象地の土地利用の履歴、有害物質使用状況、鉱床分布状況、地質状況などを調査し、地盤汚染の可能性を確認する。

２）概況調査：対象地周辺の汚染状況を把握

土壌・地下水調査等を行い対象地および周辺の汚染状況を確認する。

３）詳細調査：対象地盤の汚染評価

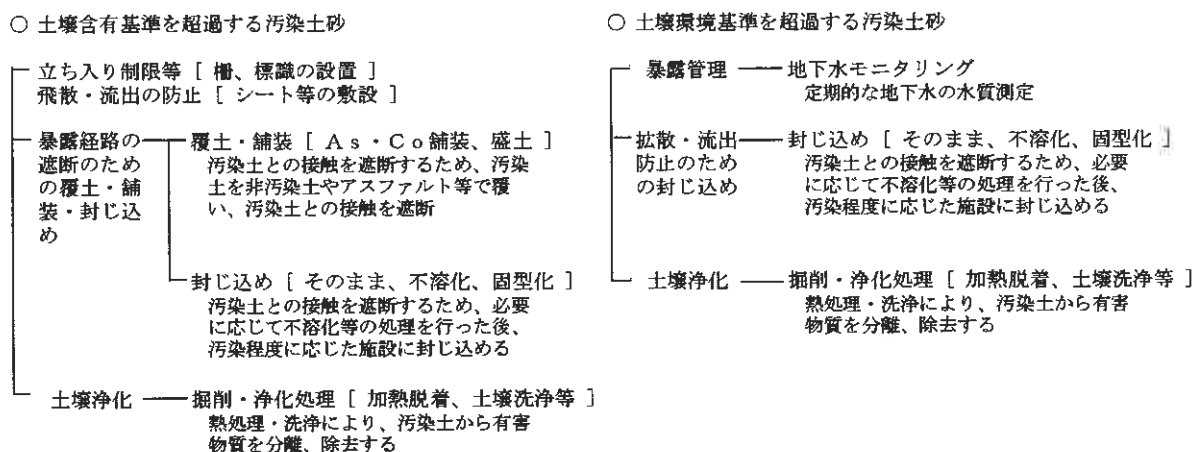
ボーリング調査等により対象地盤の汚染状況を詳細に把握し、対策が必要な地質およびその範囲を設定する。

5. 汚染土砂対策

調査の結果、対象地盤に環境基準を超過する汚染物質が存在し、汚染拡散の可能性が認められる場合には、それらは適切な方法により処理しなければならない。汚染土砂処理対策の基本は、有害物質の飛散防止および雨水、地下水を介した浸透防止である。

対策の手法例を図－2に示す。図の左は土壌含有基準を超過する汚染土砂を対象とした飛散防止手法、右は土壌環境基準を超過する汚染土砂を対象とした浸透防止手法である。具体的には、覆土、舗装、封じ込め施設等に汚染土砂を封じ込める方法、加熱脱着、土壌洗浄などにより汚染土砂を浄化する方法がある。

建設工事で問題となる汚染地盤は自然由来によるものが多く、従って対象物質は重金属に限定される。以下に重金属による汚染土砂対策で適用可能とされる「封じ込め工」、「土壌洗浄工」の概要について述べる。



図－2 対策手法例

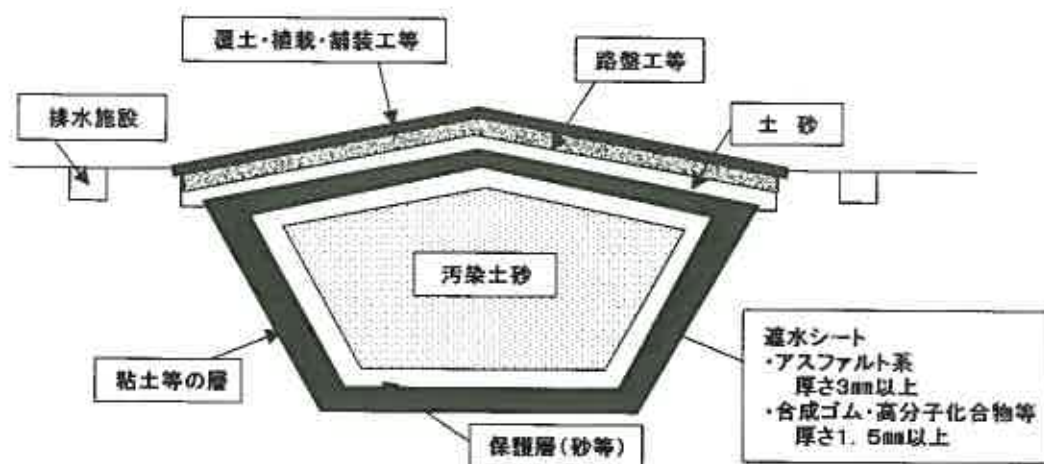
5－1 封じ込め工

封じ込め工とは、汚染土砂を一般環境から隔離し、暴露、地下水、雨水などによる汚染拡散を防止する技術である。土壌含有基準を超過する土砂は、覆土・舗装工による暴露経路の遮断、土壌環境基準を超過する土砂は、遮水工・遮断工により雨水の浸入、地下への浸透を防止する。この時、遮水工、遮断工の判定は、表－2に定める基準値（溶出量値Ⅱ）に従う。すなわち、土壌環境基準を超過し溶出量値Ⅱ以下のものは「遮水工」に、溶出量値Ⅱを超える土砂は、「遮断工」が適用される。ちなみに、溶出量値Ⅱは、環境基準値の30倍、10倍、また、「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」の「特別産業廃棄物の埋め立処分に係る判定基準」の指定下水汚泥の判定値と同じである。図－3に遮水工の構造例を示す。

表－2 封じ込め対策選定基準

項 目	環境基準値	検液1Lにつき
		溶出量値Ⅱ
カドミウム	0.01mg	0.3mg
全シアン	検出されないこと	1mg
有機燐	検出されないこと	1mg
鉛	0.01mg	0.3mg
六価クロム	0.05mg	1.5mg
ヒ素	0.01mg	0.3mg
総水銀	0.0005mg	0.005mg
アルキル水銀	検出されないこと	検出されないこと
P C B	検出されないこと	0.003mg
チウラム	0.006mg	0.06mg
シマジン	0.003mg	0.03mg
チオベンカルブ	0.02mg	0.2mg
セレン	0.01mg	0.3mg

土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針および運用基準（平成11年）



図－3 遮水工構造例

遮水工は、廃棄物処理の命令（昭和 52 年）に規定する「管理型最終処分場」に準拠した構造で、雨水の浸入を防止したもの（排水処理施設はなくてもよい）とされており「管理型処分」と言われる。地表の遮水対策は、覆土、植栽工、アスファルトなどによる舗装工を施工し、覆土の厚さは 50～60cm 上を基本とするが、植栽する場合には樹木等の種類にもよるが、1.5～2m 程度の厚さが必要である。

また、遮水シートは透水性が低く、作業や長期間の使用で破損等を生じないものを選定する必要がある。詳細を図－4 に示す。

遮水工の構造は、基礎地盤、遮水層、保護層から成り、遮水層はシートと粘土層、アスファルト層とシート、二重のシートによる二重構造とされる。二重シートを用いる場合には、車両走行等による衝撃などで双方のシートが同時に損傷することを防止する目的で、不織布その他のものをシートの間に設置する必要がある。

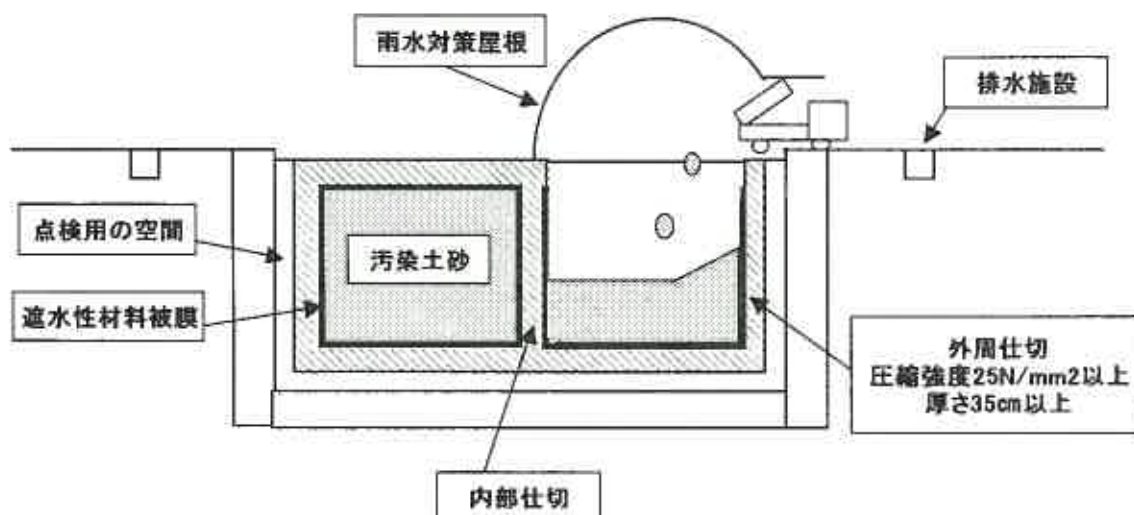


図－4 遮水工詳細図

一方、溶出量値Ⅱを超える極めて汚染レベルが高い土砂は遮断工による封じ込めとなる。「遮断工」の構造は、廃棄物処理の命令に規定する「遮断型最終処分場」に準拠した構造を持つものとされる。図－5 に構造例を示す。外周仕切りは厚さ 35cm 上の鉄筋コンクリート構造とし、施設内に雨水が流入しない構造とする。

しかし、汚染レベルの高い土砂についても、不溶化あるいは固化処理を行い溶出量値Ⅱ以下に低減された場合には、遮水工による工法の適用が可能となる。固化処理は汚染土砂を固形化して有害

物質を安定化させる技術、不溶化処理有害物質をは化学的に難溶性の物質に変化させる技術で、封じ込め工の補助的な手段として用いられることが多い。また、工事中の環境保全、対策完成後の効果確認などを目的に、定期的に対象地周辺の土壌・地下水調査（モニタリング）を実施する必要がある。特に、封じ込め対策では、有害物質が施設内に存在している状態なので、施設の適切な管理が求められる。



図一 5 遮断工構造例

5-2 土壌洗浄

一般に重金属等の物質は土表面に多く存在しており、そのため、比表面積の相対的に大きい細粒分において重金属含有量が高い。従って、汚染土砂を分級することで処理対策土量の減量化が可能になる。洗浄プラントを用いる汚染土砂の浄化処理は、汚染濃度の高い細粒分を分級（ふるい分け）することで、汚染土砂を健全土と汚染土に区別する工法である。健全な土はそのまま再利用可能で、汚染土は封じ込め等適切な処分が必要とされる。適用可能な土質は、シルトおよび粘土分の少ない砂質土に限定される。

6. 建設工事における汚染土砂対策

土壌・地下水汚染に対する社会的関心が高まる中、建設工事で発生する汚染土砂は適切に処理しなければならない。しかし、汚染土砂を扱う現場では、独自に汚染土砂の評価や対策工法の検討を行っている現状にあり画一的な汚染土砂対策フローの策定が望まれるところである。

汚染土砂対策フローは、環境保全の観点から、前述の「土壌環境基準」や「土壌含有基準」などの環境基準や「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準」などを基本とすることが妥当と考えられる。しかし、環境省制定のこれらの基準は、いわゆる「土壌」を対象としたものであり、土や岩など様々な物質を扱う土木工事では、評価法等について詳細の検討が必要と考えられる。本研究における検討課題について以下に述べる。

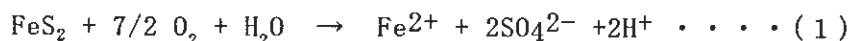
6-1 岩石の汚染評価手法の確立

「土壌」を対象とした環境基準による溶出試験は公定法と呼ばれ、試料は土塊、団粒を粗破した後、2mm目のふるいを通過したものと規定されている。公定法は土壌を対象とした試験方法である

が、現状ではほとんどの掘削土砂に適用されており、岩石の汚染評価も公定法が用いられている。しかし、公定法による溶出試験では、たとえ堅固な岩石も 2mm 以下に粉碎されたものが試料として用いられるため、汚染評価が過大に見積もられる可能性が考えられる。また、岩石は風化の影響を受け、掘削時は新鮮な岩石でも徐々に破壊されルーズな状態になり細片化するものもある。このように、「土壌」を対象とした公定法では、岩石の性状を正確に反映した溶出結果を得られない可能性が考えられる。従って、岩石の汚染評価を適切に行うためには、岩石の性質や風化の影響等を考慮した溶出試験方法を検討し確立する必要があるものと考えられる。

6-2 化学的風化作用の影響と酸性水の浸出

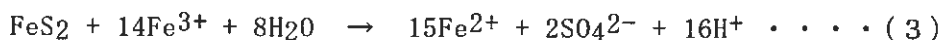
鉛、砒素等の有害金属を含有する鉱床周辺や新第三紀の泥岩には、黄鉄鉱などの硫化鉱物が存在する場合があります。土木工事などによる掘削で、それらの岩石や土砂が空気と水が豊富に供給される環境に曝されると、化学的風化作用の影響で浸出水が酸性化し、含有する有害物質が放出される可能性がある。黄鉄鉱の酸化メカニズムを化学式で示すと以下のようになる。



黄鉄鉱 (FeS_2) が酸素を溶存する雨水や地下水による酸化作用で、二価の鉄イオン (Fe^{2+}) と硫酸イオン (SO_4^{2-}) 水素イオン (H^+) を生成する。



二価の鉄イオンは、地中に棲息する鉄酸化細菌の働きでさらに酸化し、三価の鉄イオン (Fe^{3+}) が生成する。



三価の鉄イオンは水酸化鉄として沈殿するが再び黄鉄鉱と反応し、二価の鉄と硫酸イオンを再生する。(1) の式と比較すると 8 倍の水素イオンが生成され酸性化が促進していることが分かる。

黄鉄鉱は本来水に溶けにくい鉱物であるが、そこに酸素 (O_2) が供給されることで溶けやすくなる。つまり、酸素を含まない地中に存在する限り問題はないが、土木工事等でそれらの土砂が地表に曝されると急激に化学的風化作用が進行するため、浸出水が酸性化する可能性が生じる。

図-6 はこの現象を化学的に再現した試験結果である。図は、公定法による溶出水の pH (横軸) と過酸化水素水処理により強制的に黄鉄鉱の酸化・分解を促した溶出水の pH (縦軸) を比較したものである。試料は黄鉄鉱を含有する新第三紀鮮新世の火山岩からなるボーリングコアを用いた。図から、ほぼ全試料の pH が強制酸化後に低下し、中には 3

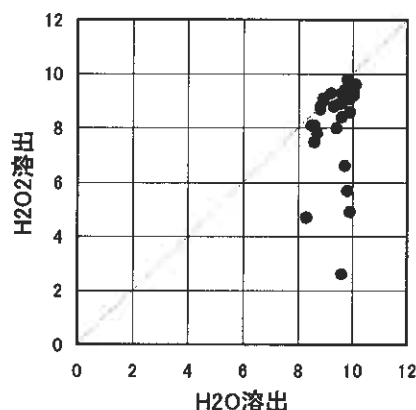
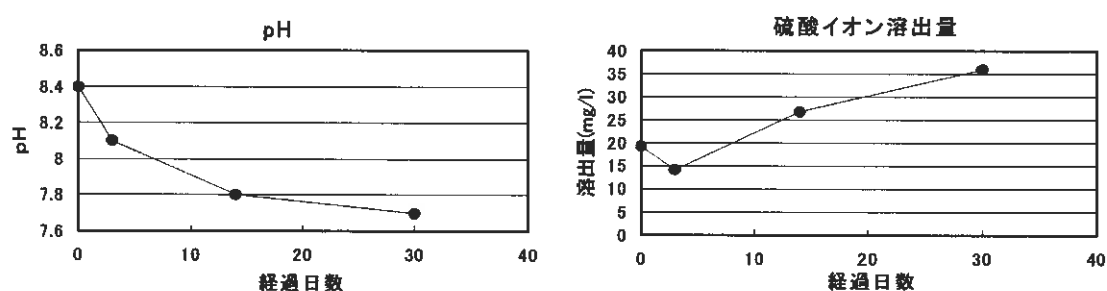


図-6 風化作用に伴う pH の変化

以下の強酸性を示す試験結果も得られた。ただし、過酸化水素水処理溶出による試験結果は、化学的風化作用の将来的な影響を再現したもので、自然環境下における風化の進行速度やその影響については解明されていない。そこで、自然状態における化学的風化作用の進行過程を把握する目的で自然酸化試験を実施した。試験は、黄鉄鉱を含有する試料を水中に放置しそこに酸素を送り続けその水溶液の pH や含有成分の溶出量を 3 日、14 日、30 日経過毎に測定したものである。試験結果を図－7 に示す。試験に供した試料の pH は当初 8.4 で、過酸化水素水処理後は 2.8 まで低下している。

試験の結果、図に示すように pH は徐々に低下し、硫酸イオンの増加傾向も確認できる。この現象は、前述の化学式 1) の反応が生じていることを示すものである。この化学的風化作用に伴う溶出水の酸性化は、公定法による溶出試験では正確に把握できない可能性が高い。酸性水の浸出は環境汚染に加えコンクリート構造物の劣化を引き起こす恐れがある。従って、化学的風化作用の進行過程やその影響を考慮した溶出試験方法および汚染評価手法について検討を進める必要があると考えられる。



図－7 自然酸化試験結果

7. おわりに

汚染土砂の処理は環境問題に発展する可能性があることから、適切に処理しなければならない。しかし、現状では、現場毎に汚染評価や対策工の検討を行っており、画一的な処理対策フローの確立が求められるものである。処理対策フローについては、環境省策定の環境基準値や対策指針等が基本になるものと考えられるが、土木工事で扱う土砂は土や岩など様々で、特に、岩石の汚染評価手法や化学的風化作用の影響は環境基準に定められている公定法による溶出試験では正確に反映されているとは考えがたい。溶出試験は、たとえ同じ試料でも、検液の調整方法 (pH)、混合液の量比、振とう方法および時間、ろ過方法などの条件の違いでその結果に差異が生じる。従って、地盤の汚染評価を適切に実施するためには、岩石の風化や有害物質の溶出実態を考慮した適切な試験方法の確立が求められるものである。

参考文献

- 1) 環境庁水質保全局；土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準，平成 11 年 3 月
- 2) 環境省中央環境審議会；今後の土壌環境保全対策の在り方について（答申），平成 14 年 1 月
- 3) 環境省環境管理局水環境部；平成 12 年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要，平成 14 年 2 月
- 4) 地盤工学会；土壌・地下水汚染の調査・予測・対策，平成 14 年 5 月

中性無機改良材（S T－エコロ）による建設発生土の改良

小野田ケミコ（株）竹内雄三¹⁾，竹田敏彦²⁾，佐藤勝義³⁾

1. はじめに

循環型社会の形成を目指して建設廃棄物のリサイクルが進められている中で，建設廃棄物のリサイクル率は，平成7年度の58%から平成12年度では85%になり，アスファルト塊やコンクリート塊が100%に近いリサイクル率を達成してきている¹⁾。

一方，建設汚泥は，平成7年度の14%から平成12年度では41%まで伸びてきているが，未だに半数以上はリサイクルされずに処分されてきている¹⁾。

この理由として，次のことが挙げられる。

- 1) 建設汚泥が産業廃棄物として取り扱われているため，リサイクルする場合には，法規制に従って個別指定等の条件を満足する必要があること。
- 2) 建設汚泥以外の泥土を盛土等にリサイクルするにあたり，含水比や強度の関係でそのまま利用することができず，何らかの改良が必要であること。
- 3) 従来から多く用いられているセメント・石灰系の改良材を添加した改良土が強アルカリ性であることから，使用場所での環境条件等の制約があること。

当社では，シールド工事等から発生する建設汚泥や，開削工事等から発生する泥土のリサイクルを促進するために，新たに開発した中性無機改良材（S T－エコロ）を用いて，使用場所での環境保全に配慮した改良土を製造することを提案している。

本稿では，中性無機改良材の特徴と各種の建設発生土に適用した事例について紹介する。

2. 中性無機改良材（S T－エコロ）の特徴

2. 1 中性無機改良材の構成

この中性無機改良材は，アルカリ性の液体と酸性の粉体で構成するもので，主な成分，比重およびpHは，表－1に示すとおりである。

表－1 中性無機改良材の構成

改良材名称	種別	主な成分	真比重	pH
S T－エコロ	液体	珪酸ナトリウム，珪酸カリウム	約1.40	約13
	粉体	過磷酸石灰	約2.35	約3

表－1に示す液体は，家庭用洗剤や食品の添加材として使用されているものであり，粉体は化学肥料として一般に使用されているものである。この液体と粉体をそれぞれ10L（14kg）：9kgの割合で混合するとpH7となり，短時間でゲル化するが硬化時の発熱はない。改良土のpHによっては，両者の割合を変化させることにより，改良土のpHをある程度の範囲で調整することが可能である。

1) Yuzo TAKEUCHI 東京都荒川区東日暮里3-11-17 技術設計部 TEL:03-5615-7036 FAX:03-5615-7025
2) Toshihiko TAKEDA 札幌市中央区北3条西1-1 札幌支店 TEL:011-219-6560 FAX:011-219-7887
3) Katsuyoshi SATO 東京都荒川区東日暮里3-11-17 技術設計部 TEL:03-5615-7036 FAX:03-5615-7025

2. 2 改良土の環境に対する影響

1 m³の泥水シールド発生土に対し、改良材を液体 10L (14kg)、粉体 9kg、計 23kg の割合で添加・混練した改良土の振とう溶出水の化学分析を実施した。溶出水は、環境庁告示第 13 号にしたがって改良土を 2.5L の蒸留水を入れたポリ容器（容量 5L）内に重量体積比 10%（乾燥重量）の試料を加えた後、振とう機により 6 時間連続振とうを行ない、18 時間静置して懸濁物を沈殿させ、上澄水を孔径 1.2 μm のガラス繊維濾紙を用いて濾過した濾液を採取したものである。表-2 に振とう溶出水の化学分析結果を示す。表中の溶出水 A は泥水シールド発生土の改良土の、溶出水 B は畑土の振とう溶出水であり、河川水は昭和 17 年から 34 年の比較的汚染の小さい時の日本全国 225 河川の平均化学組成²⁾である。

表-2 改良土の振とう溶出水化学分析の結果

	pH	EC μ S/cm	TOC mg/L	SiO ₂ mg/L	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ Mg/L	Al ³⁺ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ Mg/L
溶出水 A	7.52	198	9.06	11.0	4.4	11.7	26.2	0.02	60.0	0.28
溶出水 B	7.00	33	2.97	6.6	2.1	16.5	1.0	0	10.0	0.12
河川水 ²⁾	—	150~ 200	—	19.0	6.7	1.2	8.8	—	10.6	0.02

改良土の溶出水 A と畑土の溶出水 B を比較してみると、pH はほぼ中性であり、K⁺以外の成分は溶出水 A の値が上回っており、Ca²⁺が約 26 倍、電気伝導率 EC および SO₄²⁻が約 6 倍、全有機炭素 TOC が約 3 倍、SiO₂、Na⁺、PO₄³⁻が約 2 倍の値で、Al³⁺はほとんど検出されていない。この結果から、改良土の振とう溶出水は畑土のそれよりも溶出する濃度が大きい成分があることが分かったが、別に実施した植物の生育阻害試験において、改良土が植物の生育を阻害するとはいえないという結果を得ている。

改良土が盛土等に利用される現場において、改良材成分が系外に排出されるのが降雨時であり、溶出試験のような厳しい条件での溶出は起こらず、相当に希釈されることを考慮する必要がある。このことから、排水基準が環境基準の 10 倍の希釈を期待して定められている考え方を適用して、溶出水 A の結果を河川水の平均濃度と比較してみると、次のようなことがいえる。

全有機炭素 TOC は、改良材が無機物質であるため極めて小さい値で、Al³⁺の濃度も微量である。また、SiO₂ および Na⁺については、溶出水 A の値が河川水の平均濃度を下回っている。

溶出水 A は河川水に対し、電気伝導度 EC についてはほぼ同等であり、Ca²⁺は約 3 倍、SO₄²⁻は約 6 倍、K⁺は約 10 倍、PO₄³⁻は約 14 倍になっており、降雨時を考慮して希釈倍率を 10 倍程度とすれば、PO₄³⁻がこれを僅かに上回るのみである。

以上のことから、中性無機改良材を添加した改良土が、周辺の環境に影響を及ぼすことはないものと考えられる。

2. 3 中性無機改良材の反応形態

この改良材の液体と粉体の化学反応は急速であることから、固化に至る反応形態は推定に拠らざるを得ないが、次のようであると考えている。

【改良材の成分】液体：珪酸ナトリウム (Na₂O・nSiO₂・mH₂O)、珪酸カリウム (K₂O・nSiO₂・mH₂O)

粉体：過燐酸石灰 (CaH₄(PO₄)₂+CaSO₄)

【反応形態】 Na₂O・nSiO₂・mH₂O+K₂O・nSiO₂・mH₂O+CaH₄(PO₄)₂+CaSO₄+nH₂O

→ Na₂HPO₄・12H₂O+K₂HPO₄・12H₂O+CaHPO₄+SiO₂・mH₂O+CaSO₄・nH₂O

このように、改良材の各成分が土粒子の持つ水分と反応し、不溶性のゲルと一部結晶水を持つ石膏を形成するとともにシリカゲルを形成する。改良土は、シリカゲル ($\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$) がバインダーとなって土粒子および土中の水分を抱き込むように固化するものと考えている。

3. 中性無機改良材による泥土改良

3. 1 改良土の強度の目安

改良土を土質材料として利用する場合の品質区分は、原則としてコーン指数を指標としており、品質区分と適用用途標準の一般的な関係は表-3に示すとおりである³⁾。

表-3 処理土の品質区分と適用用途標準の関係³⁾

用途 区分	品質基準 qc(kN/m ²)	工作物の 埋め戻し	道路路床 盛土	構造物の 裏込め	道路路体 盛土	高規格防 堤	一般防 堤	宅地成 造	公園緑地 造成
		評価 付帯条件	評価 付帯条件	評価 付帯条件	評価 付帯条件	評価 付帯条件	評価 付帯条件	評価 付帯条件	評価 付帯条件
第1種 処理土	固結強度が高く 礫、砂状を呈するもの	◎ 最大 粒径注意	◎ 最大 粒径注意	◎ 最大 粒径注意	◎ 最大 粒径注意	◎ 最大 粒径注意	◎ 最大 粒径注意	◎ 最大 粒径注意	◎ 最大 粒径注意
第2種 処理土	800 以上	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
第3種 処理土	400 以上	○ 施工 上の工夫	○ 施工 上の工夫	○ 施工 上の工夫	◎	◎	◎	◎	◎
第4種 処理土	200 以上	×	×	×	○ 施工 上の工夫	×	○ 施工 上の工夫	○ 施工 上の工夫	○ 施工 上の工夫

【評価】◎：そのまま利用が可能なもの，○：施工上の工夫をすれば利用可能なもの，×：利用が不適なもの

表-3に示すように、土質材料としての強度から見れば、コーン指数が 800kN/m² 以上の第2種処理土であれば用途に制約がなく、コーン指数が 400kN/m² 以上の第3種処理土も制約が少ない。しかし、コーン指数が 200kN/m² 以上の第4種処理土では用途が限定されるとともに施工上の工夫が必要になる。このことから、改良土の用途を考慮すれば、改良土の強度は、第3種改良土のコーン指数 400kN/m² 以上を確保する必要がある。

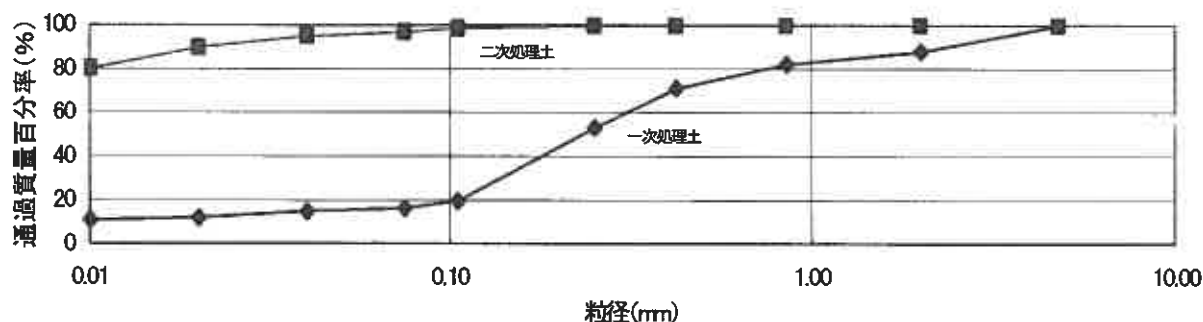
また、標準仕様のダンプトラックに山積みができず人がその上を歩けない状態のものを泥状の状態といい、コーン指数が概ね 200kN/m² 以下が指標となっている⁴⁾。

したがって、改良土のコーン指数は、改良場所から搬出する時点では 200kN/m² 以上が必要であり、利用場所到着時点では 400kN/m² 以上が必要である。

さらに、利用場所での建設機械のトラフィカビリティーを勘案すると、走行に必要なコーン指数は湿地ブルドーザーで 300kN/m² 以上、15t 級普通ブルドーザーで 500kN/m² 以上、21t 級普通ブルドーザーで 700kN/m² 以上⁵⁾であり、利用先の施工条件に対応した改良土の強度を確保する必要がある。

3. 2 泥水シールド発生土の改良

泥水シールド発生土は、シールド機から排泥ラインを通して振動篩に供給され、砂分を主体とした一次処理土として排出される。一次処理土以外の泥水は、液体サイクロンによって 75μm 以下の細粒分に分級されフィルタープレスにより脱水された二次処理土として排出される。図-1に、一次処理土と二次処理土の粒径加積曲線の例を示す。また、表-4に一次処理土と二次処理土の含水比とコーン指数の実績値の例を示す。



図－１ 一次処理土と二次処理土の粒径加積曲線の例

図－１に示すように、一次処理土は大部分が砂分であるが、砂粒子表面に付着した泥水や泥水に溶け込まない粘土塊とともに排出されるため、 $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分を20%近く含んでおり、二次処理土のほとんどは $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分で構成されている。

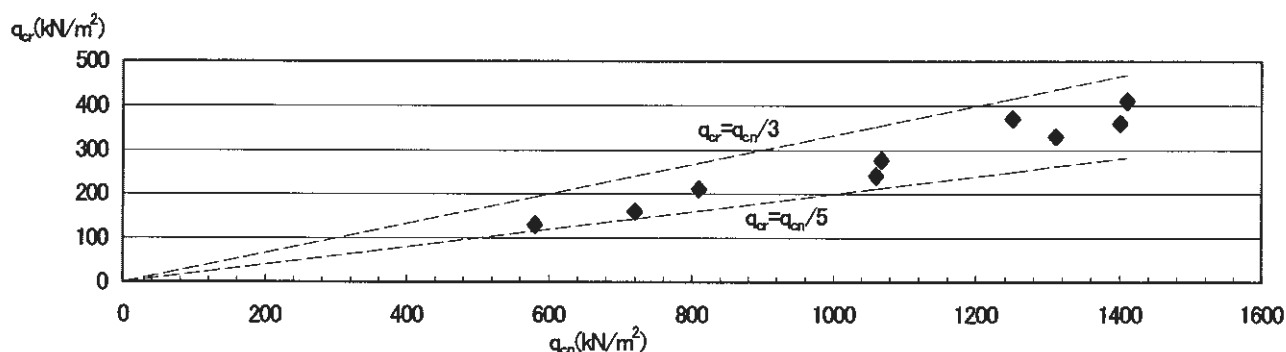
表－４ 一次処理土と二次処理土の含水比とコーン指数の実績値の例

	含水比 (%)			コーン指数 (kN/m^2)		
	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値
一次処理土	22.9	42.6	32.8	30	340	134
二次処理土	31.7	53.6	42.2	580	1300	932

一次処理土は、緩い砂質土であるが前述のように土粒子表面に付着した泥水や泥水に溶け込まない粘土塊を含むため、含水比が23～43%で砂質土としては大きく、コーン指数は $30\sim 340\text{kN/m}^2$ と小さい値になっている。

二次処理土は、 75μ 以下の細粒分で構成され、フィルタープレスにより脱水されるためケーキ生成時の含水比が32～54%で粘性土としては小さく、コーン指数は $580\sim 1300\text{kN/m}^2$ で大きい値を示している。

しかし、図－２に示すように二次処理土を解砕した場合のコーン指数(q_{cr})は、脱水ケーキ生成時のコーン指数(q_{cm})の $1/3\sim 1/5$ に減少するという極めて鋭敏な性質を示す⁹⁾ため、多くの場合には二次処理土をそのまま盛土等に利用することができず、利用する場合には何らかの改良が必要となる。



図－２ 二次処理土のケーキ生成時と解砕した場合のコーン指数の関係

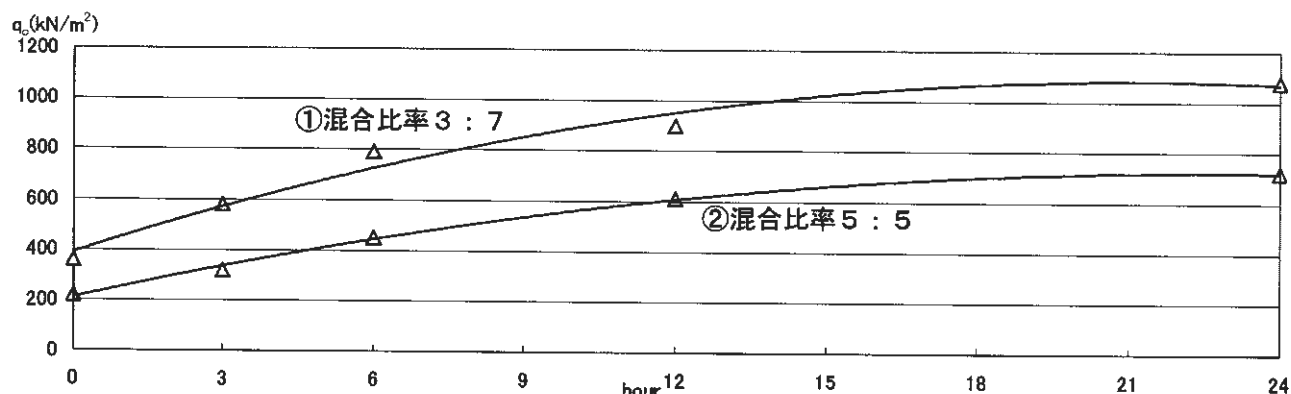
図－３に、一次処理土と二次処理土の混合土に中性無機改良材を添加・混練した改良土のコーン指数(q_c)の経時変化の例を示す。これに用いた一次処理土と二次処理土の混合比率およびおのおのの含水比とコーン指数は、表－５に示すとおりである。また、改良材添加量は、表－６に示すとおりである。

表－５ 一次処理土と二次処理土の混合比率等

	混合比率	含 水 比	コーン指数
一次処理土	①30%, ②50%	32.5%	180 kN/m ²
二次処理土	①70%, ②50%	44.0%	910 kN/m ²

表－６ 改良材添加量（混合土 1 m³あたり）

	添加量 I	合計添加量
液体改良材	14kg (10 L)	23kg
粉体改良材	9kg	



図－３ 泥水シールド改良土のコーン指数の経時変化例

泥水シールド発生土の一次処理土と二次処理土の混合土に中性無機改良材を添加・混練した改良土は、改良材添加直後に 200～400kN/m² レベルになり、3 時間程度で 400～600kN/m² レベルまで急激に増加する。その後徐々に増加するが、24 時間程度で概ね収束する傾向があり、従来多用されてきたセメント・石灰系の改良材と異なり、早期に強度が発現し収束する特徴がある。

また、一次処理土と二次処理土の混合比率が 5 : 5 では 3 : 7 に比べて強度レベルが小さく、一次処理土量が増加すると改良土のコーン指数が低下する傾向がある。このことは、二次処理土に含まれる水は土粒子に包含されているのに対し、一次処理土に含まれる水のほとんどが表面水であることから、これと反応するために改良材が多く消費され、改良土のコーン指数が低下するものと考えている。

表－７に、泥水シールドの発生土と改良土の性状の実績値例を示す。これは埼玉県鉄道の鉄道トンネルにおいて、延長約 190m 間、改良土量約 14,000m³、発生土 1 m³あたりの改良材添加量が液体 12L (17kg)、粉体 10kg、計 27kg の時のデータである。改良土のコーン指数は、改良材添加後 1 時間以内の測定値であり、400kN/m² 以上を確保することで管理した。

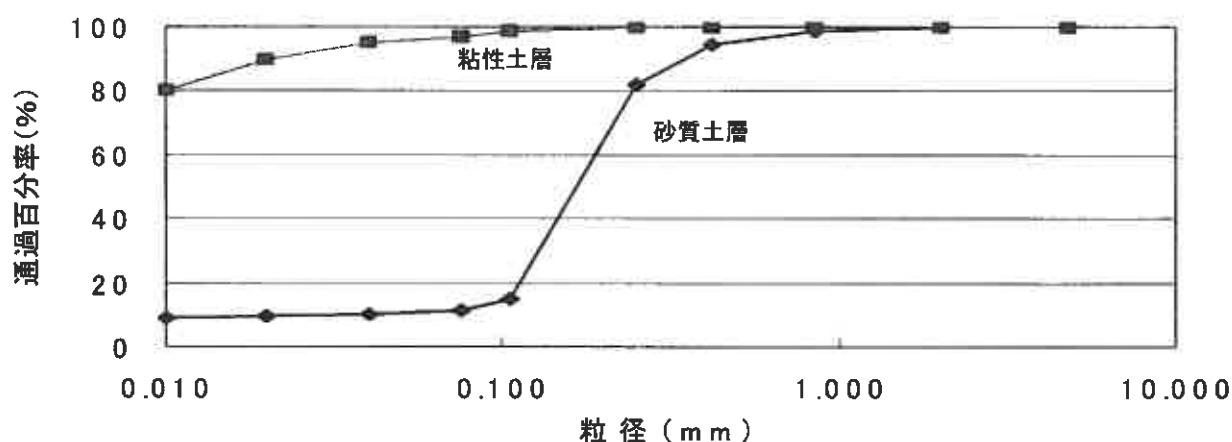
表－７ 泥水シールド発生土と改良土の性状の実績値例

	一次処理土		二次処理土		改 良 土	
	範 囲	平均値	範 囲	平均値	範 囲	平均値
発生土量比率	15～45%	29%	85～55%	71%	—	—
pH	7.10～8.40	7.83	6.73～8.49	7.92	7.19～8.52	7.91
含 水 比	30.1～41.8%	35.1%	39.7～48.7%	45.0%	32.1～45.6%	38.1%
コーン指数	80～290kN/m ²	170kN/m ²	610～890kN/m ²	700kN/m ²	400～420kN/m ²	410kN/m ²

３．３ 泥土圧シールド発生土の改良

泥土圧シールド発生土は、掘削土をシールド機のチャンバー内で塑性流動化させるために、粘性土層では加水され、砂質土層では作泥材を注入されたものが排出される。

図－４に、泥土圧シールドの掘進対象土層とした粘性土層と砂質土層の粒径加積曲線の例を示す。なお、粘性土層は名古屋市東部、砂質土層は千葉県北部の洪積層の土層である。



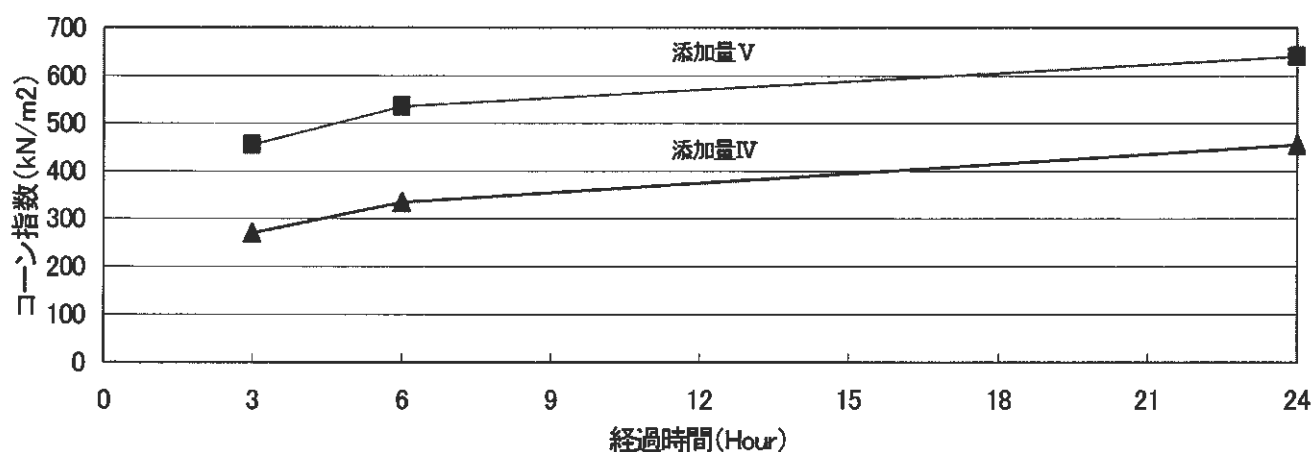
図－４ 泥土圧シールド掘進対象土の砂質土層と粘性土層の粒径加積曲線の例

この粘性土は、細粒分含有率が93.4%、含水比69.2%でスランプ13cmになる。また、砂質土は細粒分含有率が11.2%、含水比44.4%でスランプ10cmになる。

図－５に、上記の粘性土に中性無機改良材を添加・混練した改良土コーン指数の経時変化の例を示す。なお、これに用いた添加量は、表－８に示すとおりである。

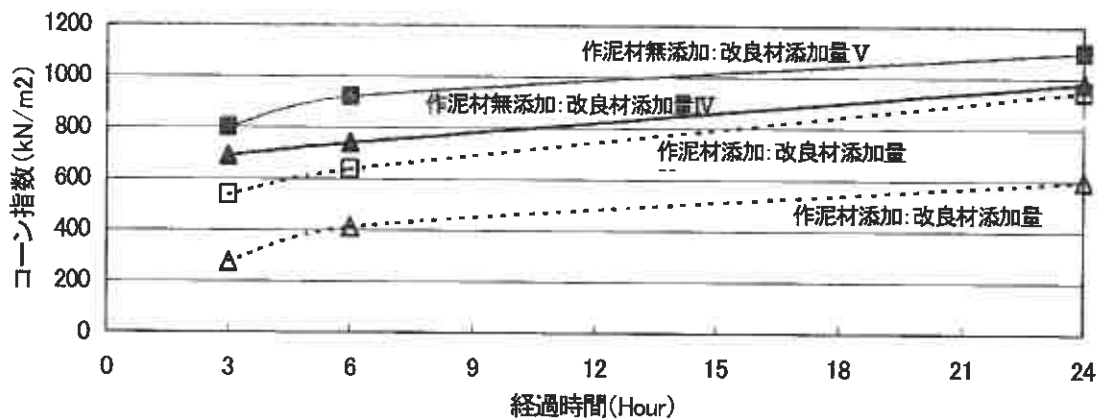
表－８ 泥土圧シールド発生土の改良に用いた改良材添加量（発生土1m³あたり）

	添加量Ⅳ	添加量Ⅴ
液体改良材	56kg (40L)	70kg (50L)
粉体改良材	36kg	45kg
計	92kg	115kg



図－５ 泥土圧シールド発生土（粘性土）の改良土コーン指数の経時変化の例

図－６に上記の砂質土単体および作泥材を添加したものに中性無機改良材を添加・混練した改良土コーン指数の経時変化の例を示す。砂質土に添加した作泥材は、セルロース系高分子材料3.75kgを1000Lの水に溶解したものを、掘削土に対し体積比で25%の量を注入したもので、これにより発生土は含水比41.8%、スランプ13.0cmになる。



図－6 泥土圧シールド発生土（砂質土）の改良土コーン指数経時変化の例

図－5に示すように、含水比 69.2%まで加水してスランプ 13cm にした粘性土では、改良土のコーン指数は改良材添加後 3 時間で、改良材添加量Ⅳでは 250 kN/m²程度、改良材添加量Ⅴでは 450kN/m²程度となり、改良材添加後 24 時間で、改良材添加量Ⅳでは 450 kN/m²程度、改良材添加量Ⅴでは 650kN/m²程度となる。

したがって、改良土をコーン指数 400kN/m² 以上で使用する場合には、改良材添加量Ⅴでは改良後 3 時間程度経過すれば良いが、添加量Ⅳでは改良後 24 時間程度経過する必要がある。

また、図－6に示すように、作泥材を添加せずに含水比 44.4%まで加水してスランプ 10cm にした砂質土では、改良土のコーン指数は改良材添加後 3 時間で、改良材添加量Ⅳでは 700 kN/m²程度、改良材添加量Ⅴでは 800kN/m²程度となり、改良材添加後 24 時間で、改良材添加量Ⅳでは 1000 kN/m²程度、改良材添加量Ⅴでは 1100kN/m²程度となる。一方、作泥材を添加して含水比 41.8%，スランプ 13cm にした砂質土では、改良土のコーン指数は改良材添加後 3 時間で、改良材添加量Ⅳでは 300 kN/m²程度、改良材添加量Ⅴでは 550kN/m²程度となり、改良材添加後 24 時間で、改良材添加量Ⅳでは 600 kN/m²程度、改良材添加量Ⅴでは 900kN/m²程度となっており、作泥材無添加で加水のみの発生土に比べ、同様の改良材添加量で改良土のコーン指数は低いレベルとなる。

したがって、改良土をコーン指数 400kN/m² 以上で使用する場合には、改良材添加量Ⅴでは改良後 3 時間程度経過すれば良いが、添加量Ⅳでは改良後 6 時間程度経過する必要がある。

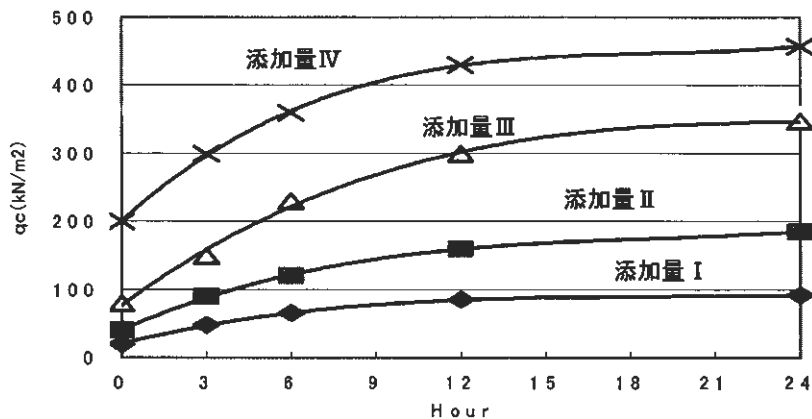
以上のことから、泥土圧シールド発生土は粘性土に対する加水および砂質土に対する作泥材の添加により、含水比が増加するため、この水分と反応する改良材が多く消費されることから、改良土のコーン指数を確保するためには、泥水シールド発生土よりも改良材添加量が多くなる傾向がある。

3. 4 高含水比粘性土の改良

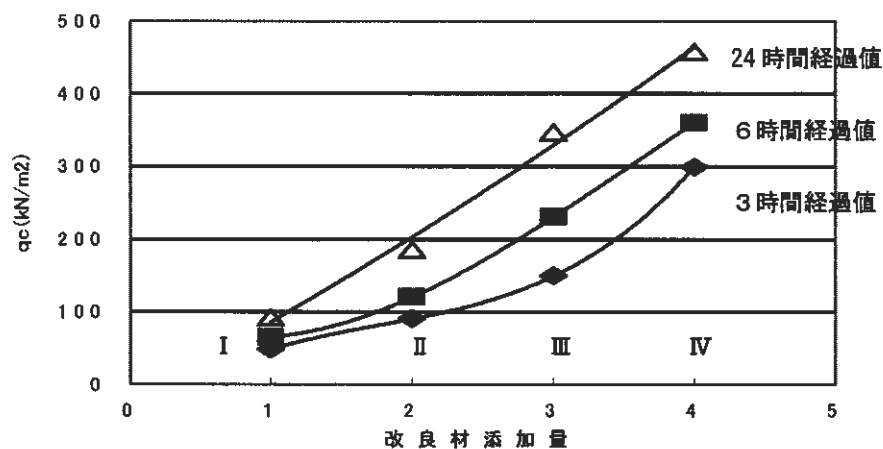
開削工事等からの発生土で改良を必要とするものは、砂質土よりも含水比が大きく細粒分を多く含む粘性土が多い。図－7に細粒分含有率 70%，含水比 61%の粘性土に、数種類の添加量の中性無機改良材を添加・混練した改良土のコーン指数の経時変化を示す。また、図－8に改良材添加量と改良土コーン指数の関係を示す。なお、これに用いた改良材添加量Ⅰ～Ⅳは、表－9に示すとおりである。

表－9 改良材添加量（発生土 1 m³あたり）

	添加量Ⅰ	添加量Ⅱ	添加量Ⅲ	添加量Ⅳ
液体改良材	14kg (10L)	28kg (20L)	42kg (30L)	56kg (40L)
粉体改良材	9kg	18kg	27kg	36kg
計	23kg	46kg	69kg	92kg



図－７ 改良土コーン指数の経時変化（高含水比粘性土）の例

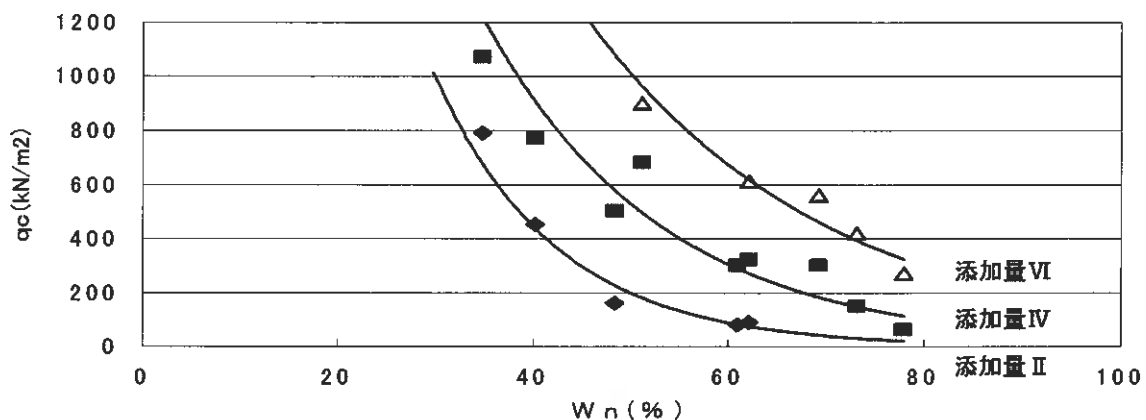


図－８ 改良材添加量と改良土コーン指数（高含水比粘性土）の例

図－７において、改良土のコーン指数は、改良材添加直後から時間経過とともに増加し、24 時間程度で収束する。また、改良材添加量が大きくなると、初期の強度が大きくなりその後の強度増加も大きくなる。これらのことは、泥水シールド発生土を改良する場合と同様の傾向である。

図－８において、改良材の添加量の増加にしたがって、改良土のコーン指数が大きくなり、経時変化の幅も大きくなる。この発生土の場合には、添加量Ⅳで改良後直ちに標準仕様のダンプトラックで運搬が可能な $qc \geq 200 \text{ kN/m}^2$ となり、24 時間で盛土が可能な $qc \geq 400 \text{ kN/m}^2$ となる。

図－９に、細粒分含有率 72～97%の発生土（粘性土）の含水比（ W_n ）と改良土のコーン指数（ qc ）の 3 時間経過値の関係を示す。



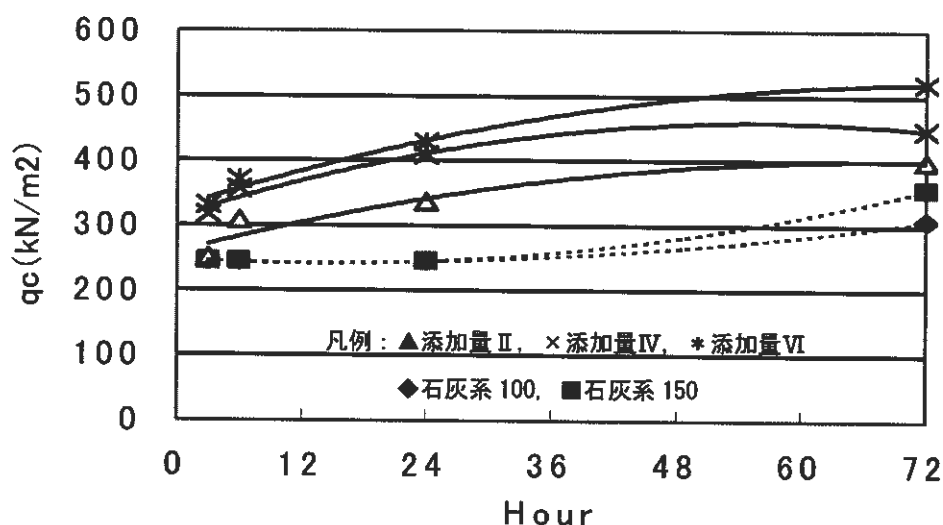
図－９ 発生土（粘性土）の含水比（ W_n ）と改良土のコーン指数（ qc ）の 3 時間経過値の関係

図－9において、改良土のコーン指数（qc）は、発生土の細粒分含有率に幅があるため多少のばらつきはあるが、発生土の含水比が増加すると改良土のコーン指数が低下することが明らかである。これらのデータを用いて、粘性土の含水比によって目標とする改良土の強度を確保するための改良材添加量を推定することができる。

3. 5 高含水比有機質土の改良

高含水比有機質土に中性無機改良材を添加して改良土のコーン指数の経時変化を把握するとともに、石灰系改良材を添加した場合との比較試験を実施した。この試験に用いた有機質土は千葉県中央部の浅層部に存在するもので、公園の造成に用いるため植生を考慮して中性無機改良材の適用を計画しているものである。

図－10に改良土のコーン指数の経時変化を示す。また、表－10に有機質土の主な性状を、表－11にこれに用いた改良材添加量を示す。



図－10 改良土コーン指数の経時変化（高含水比有機質土）の例

表－10 有機質土の主な性状

	湿潤密度 (g/cm³)	乾燥密度 (g/cm³)	自然含水比 (%)	間隙比	飽和度 (%)	強熱減量 (%)	コーン指数 (kN/m²)	pH
有機質土	1.024	0.194	427.8	4.97	99.7	53.8	245	6.23

表－11 有機質土の改良に用いた改良材添加量（発生土 1 m³あたり）

	中性無機改良材			石灰系改良材	
	添加量Ⅱ	添加量Ⅳ	添加量Ⅵ	石灰系 100	石灰系 150
液体改良材	28kg (20L)	56kg (40L)	84kg (60L)	—	—
粉体改良材	18kg	36kg	54kg	100kg	150kg
計	46kg	92kg	138kg	100kg	150kg

図－10において石灰系改良材を添加した改良土は、24 時間経過時点で強度増加は認められず、また 72 時間経過時点においても qc 値は 400 kN/m² に達していない。

一方、中性無機改良材では、改良材添加直後から改良土のコーン指数が増加し、72 時間経過値が添加量Ⅱ（液体と粉体の合計量 46kg/m³）では 400 kN/m² になり、添加量Ⅵ（合計量 138kg/m³）では 500 kN/m² を上回っている。

前述の高含水比粘性土の改良土では、図－7に示すようにコーン指数はおおむね 24 時間程度で収束する傾向があったが、この有機質土では 72 時間程度まで強度が増加している。これは、この土の有機物含有量が多く (53.8%)、含水比が極めて大きい (427.8%) ことから、改良材が土中に包含する水分と反応する時間が多く費やされることによるものと考えられる。また、この有機質土の pH は 6.23 であり、石灰系改良材を添加した改良土の pH が 12.8～13.2 になるのに対し、中性無機改良材を添加した改良土では 6.12～6.23 とほとんど変化がない。

したがって、中性無機改良材は、高含水比有機質土に対して改良土の pH を変化させることなく、石灰系改良材よりもはるかに少ない添加量で改良土の強度を増加させることができることが明らかである。

4. まとめ

以上述べてきた結果をまとめると次のようである。

- 1) 中性無機改良材 (S T-エコロ) は、短時間で所要の強度を持つ中性の改良土にすることができる。
- 2) 中性無機改良材を添加した改良土の振とう溶出水の化学分析の結果、改良土が周辺環境に影響を及ぼすことはないものと考えられる。
- 3) 泥水シールド発生土の一次処理土と二次処理土の混合土に対して、中性無機改良材は、少量の添加量で短時間に盛土に利用可能な強度の改良土にすることができる。また、一次処理土量の比率が増加すると改良土の強度が低下する傾向がある。
- 4) 泥土圧シールド発生土に対しては、粘性土に対する加水および砂質土に対する作泥材の添加により含水比が増加するため、改良土の強度を確保するためには泥水シールド発生土よりも改良材添加量が多くなる傾向がある。
- 5) 高含水比泥土に対しては、発生土の含水比が増加すると改良土の強度は低下するため、含水比に応じた添加量の選定が必要である。
- 6) 高含水比有機質土に対しては、石灰系改良材よりもはるかに少ない添加量で中性の改良土にすることができる。

参考文献

- 1) 五団体合同安全公害対策本部編、建設副産物リサイクルの手引き、五団体安全公害対策本部、平成 15 年 1 月
- 2) 半谷高久、小倉紀雄著：第 3 版水質調査法、丸善、p. 60 (出典：小林純、1960)、2000。
- 3) (財) 先端建設技術センター編：建設汚泥リサイクル指針、pp. 39-41、1990. 10
- 4) (財) 先端建設技術センター編：建設汚泥リサイクル指針、p. 11、1990. 10
- 5) (社) 日本道路協会編、道路土工施工指針、丸善、p. 47、昭和 61 年 11 月
- 6) 石徳博行、岩崎光美、竹内雄三：泥水シールド発生土の有効利用システム、地質と調査、pp. 20-25、2000. 3