

日本応用地質学会東北支部
第14回研究発表会
特別講演(2)

PRESENTATION
掘削ずりによる環境汚染の
調査・対策の考え方について

応用地質株式会社東北支社 門間聖子
平成18年7月7日

講演内容

1. 掘削ずりによる汚染の法的取扱い
2. 掘削ずりによる汚染の特徴
3. 調査・対策の考え方
4. 今後の展望 - 共同研究の紹介 -

2

1. 掘削ずりによる汚染の 法的取扱い

土壤汚染対策法における
自然的原因による汚染の考え方

3

法における土壤汚染の定義(1)

- 法における「土壤汚染」とは、環境基本法(平成5年法律第91号)第2条第3項に規定する、人の活動に伴って生ずる土壤の汚染に限定されるものであり、**自然的原因により有害物質が含まれる土壤については、本法の対象とならない。**

「土壤汚染対策法の施行について」(平成15年2月4日 環水土第20号 環境省環境管理局水環境部長通知、以下「施行通知」という。)の「第1 法の目的」で述べられている。

4

法における土壤汚染の定義(2)

- 専ら**自然的原因**により高濃度の特定有害物質を含む土壤又は水面土砂が、**同様の土壤又は水底土砂の存する周辺の地域**において盛土や海面埋立等により**土地の造成に用いられた場合には、造成された土地は自然的原因により指定基準に適合しないものと解する。**したがって、**法の適用対象とならず、また、造成行為は汚染原因行為には該当しない。**

「土壤汚染対策法の施行について」(平成15年2月4日 環水土第20号 環境省環境管理司水環境部長通知、以下「施行通知」という。)の「第5 汚染の除去等の措置命令 2. 汚染原因者に対する措置命令」で述べられている。

5

法における土壤汚染の定義(3)

- **重金属を含む掘削ずり**
専ら自然的原因により高濃度の特定有害物質を含む土壤
- 同様の土壤の存する周辺の地域において土地の造成に用いられた場合には……
掘削ずりを同様の地質の分布域に盛り立てる場合は法の適用対象とならず、また、**造成行為は汚染原因行為には該当しない**

6

施行通知に示される搬出時の留意事項

- 自然的原因によるものであると判断され、法の適用とならない場合にも、指定基準に適合しない状態にある土壤が**当該土地の外に搬出され、不適切に処分等されることは適当ではなく、法に基づく措置とは別に、当該土壤に係る適切な対応が図られることが望ましい。**
- そのため、土地の所有者等が、**そのような土壤を自然的原因により土壤中に特定有害物質が含まれる地域の外に搬出する際には、都道府県と相談して適切に措置がなされるよう指導することとされたい。**

このため、調査地で検出される有害物質が自然的原因と見なされる場合でも、その土壤を**外部に搬出する場合には、法に基づく措置とは別に、適切な対応が求められる。**この場合、相談先は都道府県となっていることから、県の環境部局に相談し、指導を受けることが望ましい。

7

重金属等を含む掘削ずりの法的取扱いの整理

- 自然的原因により有害物質が含まれる土壤は、**土壤汚染対策法の対象とならない。**
- 自然的原因により高濃度の有害物質を含む土壤や水面土砂で周辺を造成した場合、**造成された土地は法の対象とならず、造成行為も汚染原因行為にならない。**
- しかし、**地域の外に搬出する場合には、適切な処理が求められる。**
(ただし法的な拘束力はない。)

8

条例トピック < 福島県 >

- **福島県は、県条例** (福島県産業廃棄物等の処理の適正化に関する条例) **で汚染土壌の扱いを独自に定めているので注意が必要。**
- **汚染された土壌** (法に準拠した県独自の基準により判定、自然・人為に関わらず) は、**管理型・遮断型処分場やセメント原料化等で処分。**
 - 施工現場より搬出する場合は、不溶化等の処理が必要との指導あり。
 - 「工事現場における汚染土壌の取り扱いについて」という通知が土木部長より土木部出先機関に出されている。

9

2. 掘削ずりによる汚染の特徴

土壌汚染との違いと
自然的原因かどうかの判定方法

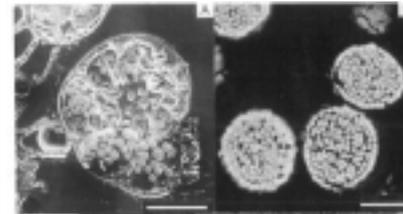
10

掘削ずりにおける「自然的原因」とは

- **自然的原因 地質にもともと含まれている**
例えば・・・
 - 火山性地質分布域、鉍山地帯 熱水変質、鉍化変質等の変質作用により、重金属が濃集。
 - 海成の泥岩 堆積過程で微細な黄鉄鉍が生成される(海水中の硫酸イオンに起因。微化石の内部を置換することもある)。この黄鉄鉍に砒素等が伴う場合がある。
 - ふっ素、ほう素 火山灰(ふっ素)、粘土鉍物(ふっ素・ほう素)、海底堆積物(ほう素)等に濃集。

11

トピック < フランボイダル黄鉄鉍 >



博多湾シルト層中の
フランボイダル黄鉄鉍^[1]
A: 有孔虫の内部に濃集するフランボイダル黄鉄鉍 (スケールバーは100 μm)
B: E P M A 組成像 (スケールバーは10 μm)

[1] 島田允亮(2003): ヒ素に汚染された地下水の起源と問題点. 資源地質, 53(2), p.161-172.

12

掘削ずりによる汚染の特徴(1)

- 検出される物質に限られる。
 - 砒素、鉛、ふっ素、ほう素、水銀、カドミウム、セレン、六価クロムに限られる。
六価クロム: 鉱物中には三価で存在。蛇紋岩分布域で地下水から検出された事例があるため対象となった。
- 有害物質を含む範囲が、地質構造や堆積構造等に関連している。
- 二次的に含まれることもある。有害物質を含む地質が……
 - 浸食を受けて下流河川に堆積 河川堆積物から有害物質が検出される
 - 破碎されて礫として取り込まれる 礫岩から有害物質が検出される ……など

13

掘削ずりによる汚染の特徴(2)

- 含有量は少ないが、溶出量が基準を超過。
 - 人為的な物質と比較して、化学的に不安定な場合が多い。含有量は微量でも、水に溶出し、溶出量基準を超過する場合が多い。
- 溶出量は、溶出量基準の概ね10倍以下。
 - 強い鉱化変質を受けた箇所等では高い溶出量を示す場合があるが、通常は溶出量基準を若干超える程度であることが多い。
 - 自然的原因による重金属等の蓄積であっても、pH等の条件が人為的要因により異常となった場合は溶出量が高くなる可能性がある。

14

掘削ずりによる汚染の特徴(3)

- 硫化鉱物(主として黄鉄鉱)の酸化により、溶出が促進される場合がある(化学的風化)。
 - 目安 硫黄含有量が1~2%以上
 - 目安 地盤工学会基準のpH(H₂O₂)試験を行うと、pHが大きく低下する
- このような地質は、掘削され新たに空気(酸素)に触れると重金属を含む酸性水を発生する可能性がある。

15

硫化鉱物の酸化溶出のメカニズム

硫化鉱物(黄鉄鉱)の酸化



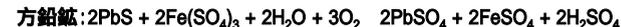
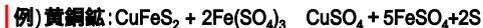
生成した硫酸が各種鉱石を溶解

鉄酸化バクテリアがこの過程を促進させる場合もある

硫酸第一鉄の酸化



硫酸第二鉄が各種硫化鉱を溶解



重金属類を含む酸性水の発生

空気に触れた発生土が、時間を置いて重金属を溶出し始める

16

掘削ずりによる汚染の特徴(4)

- 粒径や岩質により溶出性が異なる。
 - 掘削ずりに混入する岩塊は、土壌と異なり粒径が大きい。このため、単位体積あたりの成分量が同じでも、比表面積が小さくなるので土壌よりも成分は溶出しにくくなる。
 - このような理由から、岩石を2mm以下に粉砕して土壌汚染対策法に則った試験を行うと、実際のずりから溶出する場合より過大な溶出量となる可能性がある。(しかし、現実には岩石も2mm以下に粉砕して分析・評価せよというのが環境省の見解。)
 - 一方で、スレーキングし易い岩とそうでない岩とでは時間の経過とともに溶出性に違いが出てくる。

掘削ずりの対策を検討する場合には、以上のような汚染の特徴を理解することが重要！

自然的原因かどうかの判定方法

- 先に示した特徴を踏まえて、自然的原因かどうかの判定方法が「施行通知」の別紙1で示されている。
 - 「土壌溶出量基準に適合しない場合」と「土壌含有量基準に適合しない場合」のそれぞれに判定項目が設定されている。

土壌溶出量基準に適合しない場合	<ul style="list-style-type: none"> ・特定有害物質の種類 ・含有量の範囲 ・分布特性
土壌含有量基準に適合しない場合	<ul style="list-style-type: none"> ・特定有害物質の種類 ・バックグラウンド濃度との比較 ・化合物形態 ・分布特性

18

溶出量基準に適合しない場合 特定有害物質の種類

- 「砒素、鉛、ふっ素、ほう素、水銀、カドミウム、セレン又は六価クロム」の8種類のいずれかであること。
- 上記の場合にも、土地の履歴、周辺の同様な事例、周辺の地質的状况、海域との関係等の状況を総合的に勘案し、次の事項を踏まえつつ判断する必要がある。
 - 砒素、鉛、ふっ素及びほう素については、自然的原因により土壌溶出量基準に適合しない可能性が高いこと。
 - 溶出量が土壌溶出量基準の10倍を超える場合は、人為的原因である可能性が比較的高くなり、自然的原因であるかどうかの判断材料の一つとなり得ること。しかし、その場合も、専ら自然的原因であることもあることに留意する必要があること。

19

溶出量基準に適合しない場合 含有量の範囲

- 特定有害物質の含有量が概ね次の表に示す濃度の範囲内にあることとする。
 - その際の含有量の測定方法は、土壌汚染状況調査における含有量調査の測定方法によらず、全量分析による(底質調査法などの分析方法)。
 - 表に示す濃度の範囲を超える場合でも、バックグラウンド濃度との比較又は化合物形態等の確認から、自然的原因によるものと確認できる場合には、自然的原因によるものと判断する。
 - 土壌汚染状況調査における含有量の測定方法により、上限値の目安を超えた場合には、人為的原因によるものと判断する。
 - 表の上限値の目安は、全国主要10都市で採取した市街地の土壌中の特定有害物質の含有量の調査結果を統計解析して求めた値(平均値+3)であるので、鉱脈・鉱床の分布地帯等の地質条件によっては、この上限値の目安を超える場合があり得ることに留意する必要がある。

20

特定有害物質の含有量の範囲

元素	地殻と岩石中の有害元素の平均含有量 (mg/kg)								上限値 の目安
	地殻	超塩基性岩	玄武岩	花崗閃緑岩	花崗岩	砂岩	頁岩	石灰岩	
砒素	1.8	1	2	2	1.5	1	15	2.5	39
ほう素	10	5	5	20	15	35	100	10	100
カドミウム	0.2	0.13	0.2	0.2	0.2	0.05	0.2	0.1	1.4
鉛	100	2000	200	20	4	35	100	10	
ふっ素	625	100	400	-	735	270	740	330	700
水銀	0.08	0.012	0.08	0.08	0.08	0.03	0.5	0.05	1.4
鉛	12.5	0.1	5	15	20	7	20	8	140
セレン	0.05	-	0.05	-	0.05	0.05	0.6	0.08	2.0

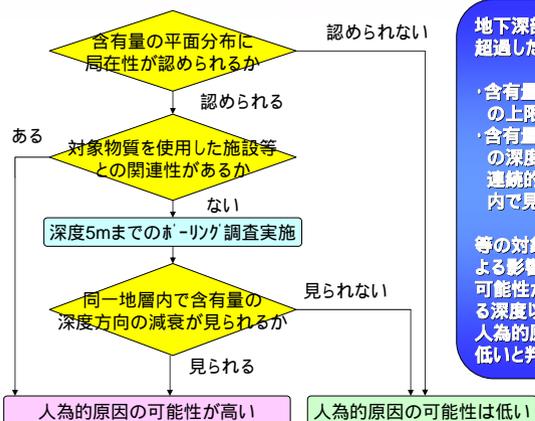
21

溶出量基準に適合しない場合 分布特性

- 特定有害物質の含有量の分布に、当該特定有害物質の使用履歴のある場所等との関連性を示す局在性が認められないこととする。
 - 含有量は、測定条件による変化を受けがたいため判断指標に採用された。
 - この時の含有量分析方法は、方法を統一すれば全量分析でなくとも良い(傾向が把握できればよいので)。

22

含有量基準に適合しない場合



地下深部で溶出が基準超過した場合:

- ・含有量が自然的レベルの上限值以下である
- ・含有量あるいは溶出量の深度方向の明らかな連続的低下が同一地層内で見られない

等の対象物質の浸透による影響を受けている可能性が低いと判断できる深度以深については、人為的原因の可能性は低いと判断してよい。

23

3. 調査・対策の考え方

主にトンネル掘削ずりを対象として

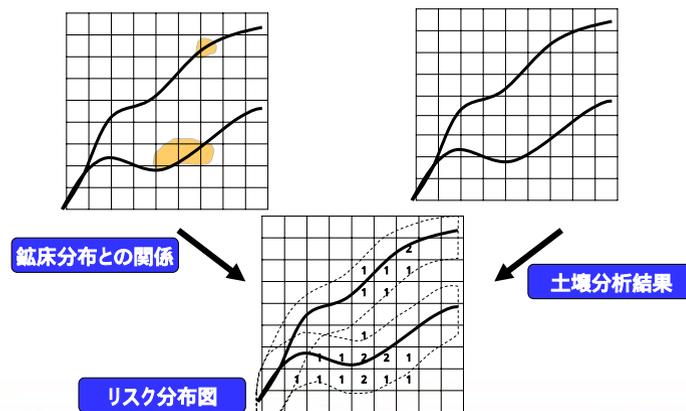
24

調査の考え方

- 基本的には、地盤工学的な調査と同じ流れ。その中で、重金属による汚染リスクに対する着眼点をプラスする。
 - 概査段階：ルート選定の際、地形・地質条件に加え、鉱山や酸性河川、温泉変質といった変質帯とその徴候、海成泥岩等をリスクと捉え、評価する。
 - 精査段階：地表地質踏査で変質帯や海成泥岩の分布を把握すると共に、露頭試料やボーリングコア試料でそれらに含まれる重金属や硫化鉱物の量、溶出特性を評価する。
 - 設計段階：汚染レベルと掘削ずり発生量、ずりの性状を考慮して処理対策方法を検討する。場合によっては、施工中のずり判別方法を検討する。また、施工中・供用後のモニタリングを計画する。

25

概査段階 路線選定段階のリスク評価の例



26

トピック < 広域リスク評価に使える資料 >

- 「日本の地球化学図」
(独立行政法人産業技術総合研究所より出版)
 - 河川堆積物試料が上流域に分布する地質を代表すると仮定。
 - 河川の本支流の合流点付近の河川堆積物試料を分析。
 - 試料採取密度は10 × 10kmに1試料とし、総数3,024試料の分析値に基づき日本全土の主成分及び微量元素濃度マップを作成。
 - 分析方法は、全量分析による。

27

トピック < 広域リスク評価に使える資料 >

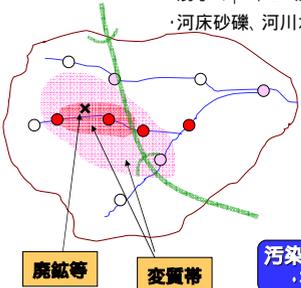
- 「土壌・地質汚染評価基本図」(姉崎、仙台)
(独立行政法人産業技術総合研究所より出版)
 - 5万分の1地質図幅に基づき、各時代の土壌・堆積物・岩石を採取。
 - 試料採取密度は4km²に最低1点。また、4～8km²に1点ボーリング調査を実施し、深度別に複数試料を採取。
 - 採取試料は鉱物同定、蛍光X線分析による全量分析、溶出量・含有量試験を実施。
 - さらに、試料の風化程度や重金属を吸着する粘土鉱物の含有状況も把握。

28

精査段階 調査手法の一例

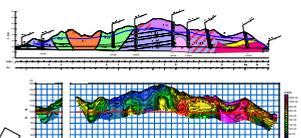
広域的な調査

- ・地表地質踏査
- ・湧水のpH、EC測定
- ・河床砂礫、河川水の分析



原因地質の特定

- ・ボーリング調査
- ・物理探査

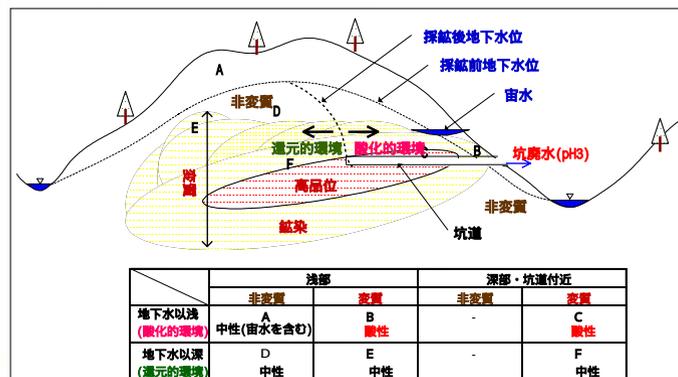


汚染物質の存在形態・存在量の把握

- ・コア溶出、含有量分析
- ・鉱物分析(顕微鏡観察、X線回折分析)
- ・元素分析(蛍光X線)
- ・孔内水の水質分析

変質、酸化・還元状況による溶出性の違い(1)

(休廃止鉱山廃水(概念図))



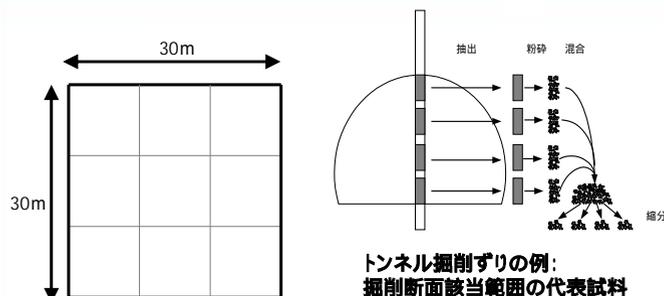
変質、酸化・還元状況による溶出性の違い(2)

例) pHとEh(酸化還元電位) の違いによる砒素の存在 形態の変化

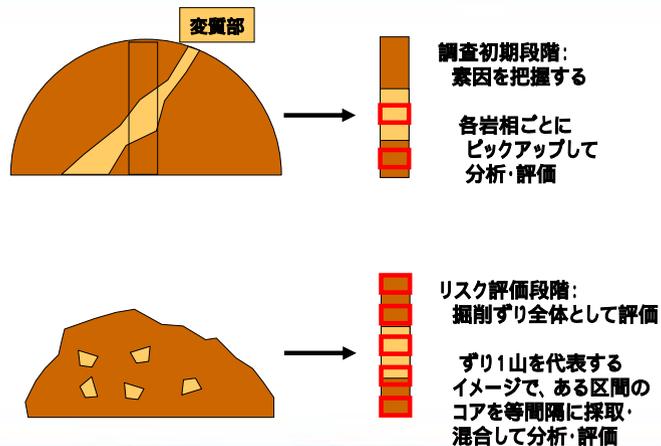


地盤内での、化学的な砒素の存在形態を表した図。
砒素(As)と、砒素の挙動に関連の深い鉄(Fe)、硫黄(S)、水素(H)、酸素(O)との関係が、pHと酸化還元状態(Eh:酸化還元電位)によりどのように変化するかを表している。
(出典: after Vink, 1998)

発生形態に応じた調査の必要性



変質部の評価の考え方



33

汚染のメカニズムに応じた試験(1)

■ 法における溶出試験

環境庁告示第18号に基づく溶出試験

50g程度の試料に10倍量の蒸留水(塩酸でpH調整)を加え、
常温・常圧で6時間振り混ぜる

30分静置し、上澄み液を分析

空気に触れて酸化が進行し溶出が促進されるような状況
(将来的な溶出可能性)を予見できない

34

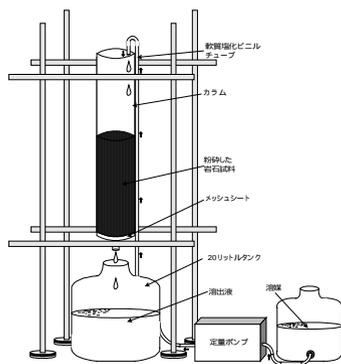
汚染のメカニズムに応じた試験(2)

■ 将来的な溶出可能性を探る試験の例

カラム通水による溶出試験

硫化鉱物を含む発生土が空気と水に曝され、酸化が進行し、やがて重金属を含む酸性水が生ずる状況を室内で再現する

溶媒に過酸化水素水を使用
酸化を短時間に促進



35

汚染のメカニズムに応じた試験(3)

● 試料は粒度を0.5～2mmに調整し、1kgをカラムに充填。

● 溶媒は、強制的に酸化を進行させるため、3%の過酸化水素水を塩酸でpH=5(現地の降雨のpH)に調整したものをを用いた。

● この溶媒を、試料1kgあたり約1000ml/日で上方より散布。

● 2日通水・5日休止を1サイクルとして降雨と晴天が繰り返す状況を再現。



36

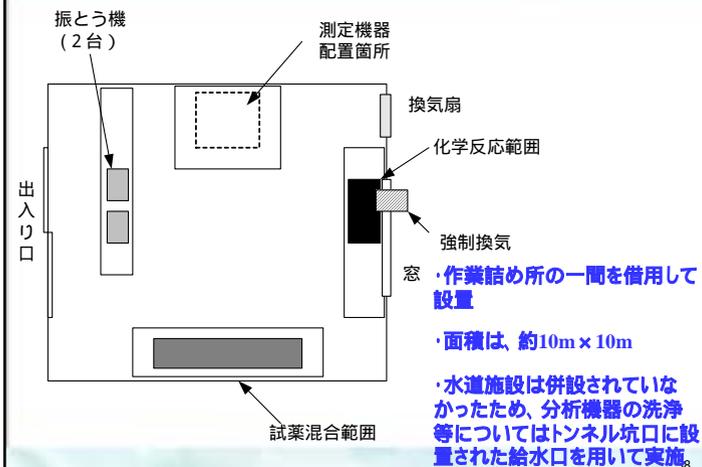
トンネル施工中の判別試験事例



トンネル坑口付近の置き場に搬出された掘削スリについて、約100m³毎に5点均等混合法に従い試料を採取した。試料採取は各点100g程度無作為で行なったが、セメント等が付着した部分は意図的に除いた。

37

トンネル施工中の判別試験事例



トンネル施工中の判別試験事例



対策の考え方

- 自然的原因により基準を超過した土壌の取り扱いについて、法の条文では明記されていない。
- 補足として「施行通知」の別紙1で触れているが、ここでは「適切な措置」と述べるに留まっている。
- 一方、法が適用とならない土壌を建設工事に取り扱う場合のガイドラインとして、「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)」(平成15年7月、独立行政法人土木研究所、以下「遭遇マニュアル」という。)が公表されている。
- 遭遇マニュアルの岩石版を鋭意作成中(後述)。

40

「遭遇マニュアル」による対策の考え方

- このマニュアルにおいては、自然的原因により基準を超える特定有害物質を含む土壌を一体となる地域以外の土地へ搬出する場合には、次の方法で処分することとしている。

「搬出する汚染土壌の処分方法」(環境省告示第20号)に定められる方法により処分する。

「土壌汚染対策法施行規則」(平成14年12月26日 環境省令第29号)第28条に定められる汚染の除去等の措置に準じた以下の汚染拡大防止措置を講じる。

ア 最終処分場・埋立地への処分

イ 汚染土壌浄化施設における浄化処理

ウ セメント工場等におけるセメント原料等としての利用

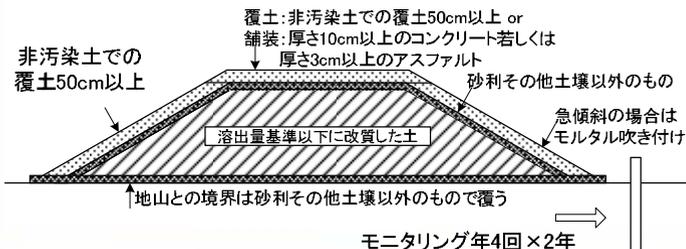
ア 遮水工封じ込め

イ 不溶化埋戻し

41

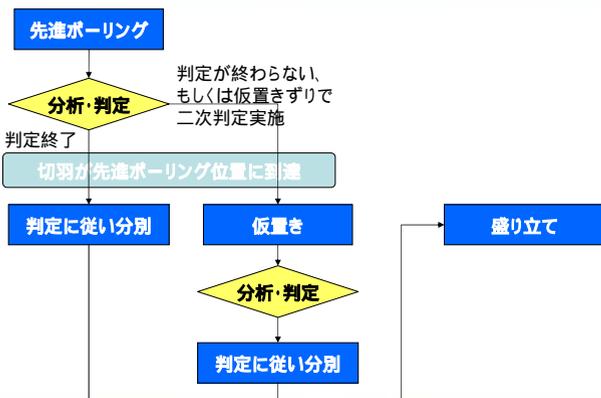
盛土内封じ込めの例(遭遇マニュアルより)

- 対象: 第2溶出量基準以下の土壌を溶出量基準以下に不溶化したもの
- 措置: 不溶化埋め戻し + 盛土



42

最近のトンネル掘削ずり対策の流れ



43

トンネル掘削ずり対策 新しい発想

- 従来: 岩ずりは径が大きく、粉体や液体の薬剤混合による処理は困難なことから、二重遮水シートによる封じ込め、あるいは石灰石との交互敷き均しといった方法しか考えられなかった。
- 最近: 変質等により軟質な部分が多く、篩い分けすることにより細粒分として粉体・液体の不溶化剤との混合による処理工法を適用した事例が出始めている。

44

トンネル掘削ずり対策 新しい発想



- スケルトンバケットである径以上の岩塊を除去。(事例では100mm以上を除去)



- バックホウで細粒のずりを混合機に投入。

45

トンネル掘削ずり対策 新しい発想



- 混合機の状況(奥がずり投入口)



- 混合機内部。

46

トンネル掘削ずり対策 新しい発想



- 不溶化された掘削ずりは、大きい粒径のずりと混合され、盛り立て場所へ運搬、盛土施工。

掘削ずり対策工法も、徐々にではあるが新しい工法が出始めている。

47

今後の展望

「岩石由来の環境汚染
対策研究グループ」の
研究内容紹介

48

共同研究の動機と研究メンバー

岩石に由来する環境汚染に関する共同研究

問題: 岩盤掘削面、掘削ズリ、廃棄岩から溶出する重金属による環境汚染
原因: 汚染源としての岩盤・岩石の評価法、汚染発生の予測法、汚染のモニタリング手法・対策手法が未確立
要請: 重金属類による汚染発生の回避と防止
現状: 岩盤・岩石に関しての環境汚染の観点からの試験方法が未研究



共同研究者

土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チーム
 応用地質㈱、三信建設工業㈱、住鉱コンサルタント㈱、
 大成建設㈱、日本工営㈱

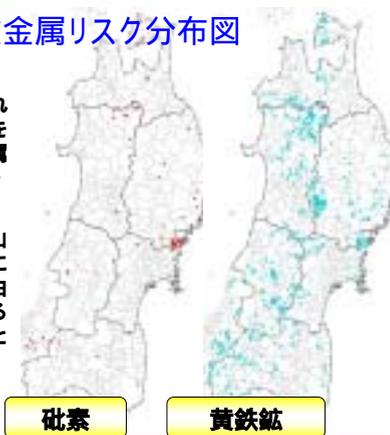
49

共同研究の成果

成果 重金属リスク分布図

日本鉱産誌等の資料に記載された鉱山の情報を基に鉱山の位置を推定し、産出鉱石に含まれる金属（砒素、水銀、クロム、銅・鉛・亜鉛）ごとに位置を示したもの。

これらの鉱山の周辺では、鉱山の稼行によるズリや選鉱や精錬による鉱滓が存在するほか、自然由来の重金属が高い濃度で存在する可能性がある。潜在的リスクとして捉えられる。



50

共同研究の成果

成果 溶出機構の把握

岩石中の重金属の溶出について適切な評価を行うため、様々な岩石を用いて粒径、溶媒条件を変えた溶出試験を実施。

溶媒の違いによる溶出特性：

溶出状況は溶媒や酸の種類（塩酸、硫酸、炭酸カルシウム、水酸化カルシウム）、溶液のpH、元素の種類により異なり、溶媒と岩石の反応及び溶液中の反応を考慮しないと溶出量の予測はできない。

岩石の酸化ポテンシャルと長期溶出リスク：

長期的な溶出の予測を行う上で、硫黄含有量、硫黄の形態（黄鉄鉱か硫酸態か）、カルシウムの含有量（緩衝）等に注目することが重要。

暴露試験による長期溶出試験方法の検討（実施中）：

実際のずりに近い粗粒試料を暴露し、浸出水を経時的に分析。

51

共同研究の成果

成果 岩石による環境汚染への対応マニュアル

計画段階での調査によりリスクを低減する（避ける）手法を整理する。

岩石の成因及び岩石特有の溶出機構を考慮した調査・評価方法を選定する。

含まれる有害物質の種類や溶出機構が多岐にわたり、一義的な試験方法や判断基準の確立が難しいため、リスク判定の基本的な手順の構築方法を提案する。

鋭意執筆中！！

章	項
1. 総説	1.1 本マニュアルの目的
	1.2 適用範囲
	1.3 用語の定義
2. 自然的原因による環境汚染	2.1 自然界における有害物質
	2.2 汚染リスクの分布状況
	2.3 汚染現象の種類
	2.4 環境に係わる各種法制度と基準値
	2.5 自然的原因による汚染かどうかの判定
3. 事業の段階ごとの対応	3.1 対応の基本的な流れ
	3.2 概算段階における対応
	3.3 調査段階における対応
	3.4 対策の設計
	3.5 施工段階における対応
	3.6 管理段階における対応
4. 調査・試験の方法	4.1 調査手法
	4.2 分析手法
5. 対策技術	5.1 処置技術
	5.2 モニタリング技術

52

調査のあり方 ~地質調査+ でリスクの予察を

- 土研マニュアルが後ろ盾となる。（「遭遇マニュアル」が既に行政の拠り所となっている。）
- 重金属リスク図（共同研究成果）、地球化学図等の広域的なリスク情報を基に調査の提案を行う。
- 「寝た子を起こすのではないか（昔は知らずにやっていたものを・・・）」への反論

盛土してしまってから、重金属が溶出して周辺環境を汚染した事例が複数ある。行政としては、「知らなかった」では済まされない時代。

- 通常的地質調査+ で、重金属の分析を提案。まずは、代表地質ごとに1試料から実施し、素因を把握。