

鉱山地域におけるトンネル掘削ずりの管理手法に関する検討

Segregated Muck Disposal for the Tunnel in Mine Areas

服部修一¹・太田岳洋²・木谷日出男³

Shuichi HATTORI, Takehiro OHTA, Hideo KIYA

At excavation sites near mine areas, pollution of surface and ground waters caused by inflow of acid water and dissolution of heavy metals from the sites becomes serious issues. The rock mass in the areas tends to be rich in heavy metal sulfide minerals. As the Hakkouda Tunnel passes through mineralized zones, we studied methods for evaluating the possibility of acid water generated from the host rocks. Then controlled mucking system was established and the bank structure for the disposal sites was examined in order to prevent the contamination by the acid water. The results are as follows. (1) The factors of the evaluation are the sulfur content and magnetic susceptibility of the rocks and pH of the elution water after one hour of simplified leaching-test. (2) The muck banks cut off from the ground water and rainfall by applying geomembrane and capping sheet.

Key Words: water pollution, sulfide minerals, sulfur, magnetic susceptibility, simplified leaching-test, muck bank

1. はじめに

鉱山や廃鉱から流出する酸性で重金属に富んだ鉱毒水による周辺環境への影響が従来より問題となっているが、同様の事象として地山掘削に伴う酸性水の発生や重金属類の溶出などが近年報告されている¹⁾²⁾³⁾。そのため、鉱山地域に近接して計画されるトンネルにおいて、トンネル湧水とともに多量の掘削ずりからの酸性水や重金属含有水の流出が予想される場合には、その処理が重要な課題となっている。

東北新幹線八甲田トンネルは、七戸・新青森間に位置する全長 26.455 km の長大山岳トンネルであり、トンネル周辺には大小の旧金属鉱山が存在するため、トンネル全域にわたり鉱化作用を受けた岩石（以下、鉱化変質岩と呼ぶ）が分布する。鉱化変質岩は黄鉄鉱などの硫化鉱物を多く含むため、掘削ずりに含まれる硫化鉱物が地下水中や空気中の酸素と反応して酸性水を発生させるとともに、重金属類を溶出させて、周辺環境に影響を及ぼす可能性がある。そのため、本トンネルのルート決定にあたっては、特に土捨場からの酸性水の発生とそれに伴う重金属の溶出による周辺の環境汚染を防止することが重要な課題とされ、種々の検討が行われた⁴⁾⁵⁾。

一方、高速運転を前提とする新幹線建設においては線形の制約条件が厳しいことから、路線に占めるトンネルの割合が高く、事業費に占めるトンネル建設費の割合が高くなる。そのため、経済的なトンネルの建設が要求される社会的背景があり、これと周辺環境の保全を確保するという要求を同時に実現することが建設を進めるうえで必要となる。

これらの社会的な背景から、八甲田トンネルでは事前調査段階から鉱化変質岩の分布や地球化学的な特徴

¹ 正会員 日本鉄道建設公団 盛岡支社

² 博士(理学) (財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部

³ 正会員 博士(工学) (財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部

を把握することに努めるとともに、その成果から酸性水の発生等の問題が予想されるずりと問題のないずりを分別することにより、問題発生の可能性のあるずりを確実に経済的に処理する方法が検討された。

本論文では、八甲田トンネル建設を通じて得られた知見をもとに、鉱山地帯に近接するトンネルの掘削ずり処理について、環境への影響の可能性のある鉱化変質岩の判定方法、鉱化変質岩を含むずりの処理方法について述べる。なお、本トンネルには鉱化変質岩以外にも泥岩が分布する。泥岩に含まれる黄鉄鉱についても酸性水が発生する可能性があることが知られている³⁾⁶⁾⁷⁾が、これについては別の機会に報告する。

2. 岩石から発生する酸性水問題に関する事例

岩石から酸性水が発生して周辺環境に悪影響を与えた土木工事としては、青森県内の農業用ロックフィルダム建設事業の事例がある。これは、融雪期に多量の表流水の流入に伴ない、鉱化作用を受けた第三系の粘板岩と珪岩からなる堤体の盛り立て材料から酸性水が発生し、上水道水源に基準以上のマンガンイオンが混入した事例¹⁾である。さらに、発電用ダム湖の貯留水が酸性化し、アルミニウムの溶出により淡青色になった事例²⁾や、工業団地の調整池造成中に調整池底面で強酸性水が発生した事例³⁾、等が報告されている。

また、トンネル掘削に伴い残土を処理した事例としては、掘削ずり全量を盛土の路体材に使用し、表面を防水シート・吹付けコンクリートで遮水する構造とした事例⁸⁾、あるいは掘削ずり全量を処理プラントを有する企業まで運搬し、その処理を委託した事例⁹⁾¹⁰⁾が報告されている。

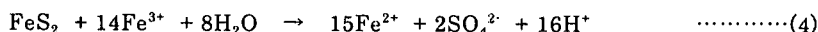
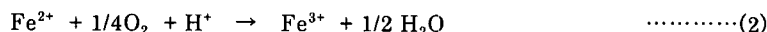
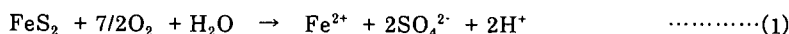
3. 計画段階における鉱化変質岩に関する検討

3. 1 トンネル周辺の地質

八甲田トンネル周辺の地質は、下位より新第三系の金ヶ沢層、四沢層、和田川層、市ノ渡層、および貫入岩類、第四系の八甲田火山起源の火砕流堆積物からなる。金ヶ沢層は主にプロピライト化した安山岩質溶岩・火砕岩、泥岩からなる。四沢層は泥岩、安山岩質溶岩・火砕岩、デイサイト、玄武岩質溶岩・火砕岩からなる。和田川層は玄武岩溶岩、火山円礫岩、凝灰角礫岩、凝灰岩、デイサイト、泥岩、安山岩からなる。市ノ渡層は主に砂岩、凝灰岩からなる。このうち、鉱化変質岩が分布する可能性があるのは、金ヶ沢層～和田川層および貫入岩類である。

3. 2 鉱化変質岩からの酸性水発生の機構

鉱化変質岩中に含まれる硫化鉱物のうち最も多量に含まれる黄鉄鉱 (FeS_2) の酸化過程は、以下の化学反応式で表される¹¹⁾。



すなわち、岩石中の黄鉄鉱が雨水・地下水およびそれらに溶存する酸素により二価の鉄と硫酸イオンに分解され、生成した二価の鉄が三価の鉄にさらに酸化される(式(1)、(2))。次に、三価の鉄が水酸化物として沈殿する(式(3))とともに、強力な酸化剤として働き黄鉄鉱の酸化を促進し、さらに硫酸イオンと水素イオンを発生させる(式(4))。

3. 3 鉱化変質岩の溶出特性の検討

(1) 土捨て場モデル試験

鉱化変質岩を含むずり（以下、鉱化ずりという）の処理方法の検討のため、八甲田トンネル近傍のトンネル掘削ずり等についてモデル土捨て場を構築し、自然状態下に暴露された場合の盛土からの滲出水の pH、電気伝導率、重金属含有量の経時変化を長期的に測定した¹²⁾。

モデル試験には、A：近傍のトンネルの掘削ずり、B：唐川調査坑（八甲田トンネル中央部の鉱化作用を受

けた区間の調査坑)の掘削ずり、
C：近傍の鉱山の掘削ずりの3
種類の材料を使用した。

モデル土捨て場は、それぞれの
材料で面積約 10 m²、厚さ約
40cm の盛土を構築し、試料 A、
B については、①試験材料のみ
の「標準型」、②材料表面に覆
土・張芝した「覆土型」、③試験材料底部に砂利を
敷く「盲溝型」の3タイプを作成した。試料Cに
ついては、④材料表面に覆土・張芝し試験材料底
部に砂利を敷く「覆土盲溝型」、⑤④に加え材料に
石灰石碎石層(厚さ 5cm)を挟んだ「中和型」の
2タイプを作成した。

土捨て場モデル試験の結果を表-1に示す。この
結果から、①硫黄含有量2%程度の鉱化ずりの場
合は酸性水の発生は認められないこと、②多量に
硫黄を含む鉱化ずりの場合では、覆土や盲溝によ
る効果や石灰岩碎石による中和効果は小さいこと、
が明らかとなった。

(2) 簡易溶出試験

酸性水を発生させる可能性の高い岩相を把握す
ることを目的として、トンネル周辺で地表から 20
～35m の短尺ボーリングを9本行い、金ヶ沢層、
四沢層、和田川層の各層の代表的な岩相を採取し、

4～6週間後に簡易溶出試験を実施した。試験方法は、「JGS 0211-2000 土懸濁液の pH 試験方法」¹³⁾に準拠
し、10mm 以下に粉碎した試料 100g と蒸留水 500g をポリビンに入れ、3分間振とうさせた後静置し、浸漬
10分後、7、14、30(28)、42、56日後の溶出水の pH を測定した。

この試験結果を図-1に示す。ここに、30日後に酸性を示す試料は10分後の溶出水の pH がすべて6以
下を示し、10分後の pH が6以上のものは酸性化していない。この結果に基づき計画段階においては、10
分後の溶出水 pH の値を酸性水発生の有無を判断する重要な指標と位置づけた。

4. 鉱化ずりの処理方法の検討

山岳トンネルの掘削ずりは一般的に「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」の産業廃棄物にはあらず、
建設残土として埋立や造成などに有効利用される場合が多い。八甲田トンネルの場合、両坑口の工区をのぞ
く4箇所(の工区はいずれも国有林野内に斜路の坑口及び工事基地を設置することとなる。また豪雪地域にあ
り遠距離の土捨ては困難なことから、国有林野内の川沿いの低地に土捨て場を設置し、ずりを処理する必要があ
った。さらに、国有林野の貸付を受けトンネル工事完了後返還する等の条件から、返還後種々の問題が発生
しない土捨て場設備にすることが求められる。特に鉱化ずりの処理については、いったん酸性水が発生すると
長期間処理を続けなければならない事態が想定されることから、施工段階での十分な対策、つまり酸性水を
発生させない処理方法を開発する必要がある。

鉱化ずりからの酸性水発生を防止するには、次のような処理方法が考えられる。

表-1 土捨て場モデル試験結果

材料	S 含有量 wt%	試験 期間	タイプ	溶出水 pH			重金属類
				初年度の 上限～下限	最終年度の 上限～下限	最低 値	
A	2.0	1984 ～ 1994	①②③	8.6～6.6	8.0～6.3	5.9	環境基準 を下回る。
B	2.3	"	①②③	8.5～7.2	8.6～6.7	6.6	"
C	15.6	1989 ～ 1997	④	2.6～1.9	2.3～1.7	1.0	環境基準 を超える。
			⑤	2.7～2.2	2.8～2.1	1.2	

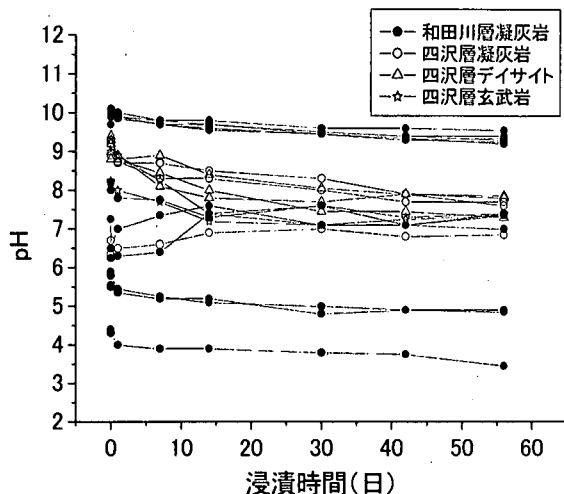
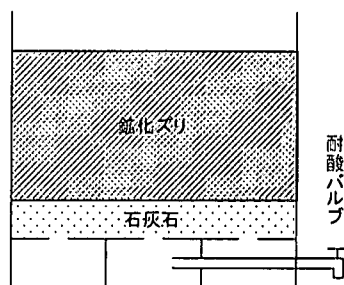


図-1 簡易溶出試験時の pH 経時変化
(短尺ボーリング試料)

- ①酸化を防止するため還元状態を保つ「還元状態維持型」
- ②選鉱設備で有害成分を除去後土捨する「処理プラント型」
- ③酸性水を石灰岩等で中和する「中和処理型」
- ④産業廃棄物処理技術を応用し、鉱化ずりを地下水・雨水・空気と遮断する「管理型」

このうち、①については還元環境に鉱化ずりを処理する方法として、十分な深さの海底に投棄することが考えられるが、事例などもなく現実的ではないと判断した。また、②については、八甲田トンネルのように掘削延長が長く、かつ多量の処理を必要とする点で経済的に困難であると考えた。そこで、上記③、④について以下の検討を行った。



(側面図)

図-2 室内溶出試験

(1) 中和処理型

酸性河川水の中和処理方法として、河川水に石灰岩碎石や炭酸カルシウム粉末を投入して中和する手法がある。これにしたがい鉱化ずり盛土に酸性化を中和する能力のある石灰岩等を敷設、混合することで、鉱化ずりから発生した酸性水を盛土内で中和する処理法が考えられる。

石灰岩碎石や炭酸カルシウム粉末による中和能力を検証するため、室内溶出試験を実施

した。試験方法は、18 リットルのポリタンクに前述の土捨場モデル試験で用いたC試料(硫黄含有量 15.6%の鉱化ずり)と石灰岩碎石(径 5~25mm)または炭酸カルシウム(石灰岩 74 μ m 以下の粉末)を入れ(図-2)、乾湿を5サイクル(1サイクル; ポリタンクに蒸留水 10 リットルを注入し一日経過後、排水バルブを開放し水質を分析後2週間放置する。)繰り返し、pHの変化を測定した。試験結果を表-2に示す。

試験の結果、炭酸カルシウム粉末については顕著な中和効果が認められた。ただし、炭酸カルシウム粉末は中和剤としては非常に高価であり、多量の処理量との関係から経済的に困難であると判断した。

次に、石灰岩碎石では鉱化ずりに対して相当多量の碎石を投入する必要があるが、その場合も中和の効果が現れるまでに時間を要することがわかった。さらに、土捨場の容量が限られていることや、石灰岩碎石表面に酸性水との反応による石膏の皮膜が生成し、以降の反応が進まなくなること¹³⁾、等から石灰岩碎石を用いる方法についても適切ではないと判断した。

(2) 管理型

鉱化ずりからの酸性水の発生を防止するため、酸素を溶存する降水や地下水と鉱化ずりとを遮断する構造あるいは機能を有する土捨場とすることを前提として技術的検討を進めた。産業廃棄物処理の技術の進歩に伴い、特に地下水との遮断については遮水シートなどの開発により確実性が高く¹⁵⁾、費用の面からも現実的な方法が開発されている。さらに、この観点から数ヶ所の管理型処分場の滲出水について資料調査等を行った結果では、八甲田トンネルでも溶出の可能性のある重金属類は検出されなかったことが報告されている¹⁶⁾。

以上の検討に加え、実用化された事例に関する技術的な性能比較の結果として、八甲田トンネルにおける鉱化ずりの処理は、二重のゴムまたは低密度ポリエチレンシートで鉱化ずり底面と側面を覆い、表面は粘性土でキャッピングする構造の管理型土捨場とした。ただし、事前調査段階での問題発生に関する地球化学的な検討結果の知見や、発生する掘削ずりの量的な関係による経済性も考慮し、明らかに環境への影響の可能性がないずりは十分な技術的判定方法による分別を前提として一般型の土捨場に処分し、鉱化ずりのみを管理型に処分することとした。

表-2 室内溶出試験結果

試料名	中和材および投入量*	サイクル毎の pH				
		1	2	3	4	5
A	なし	2.2	2.4	2.4	2.5	2.5
B	石灰岩 100%	2.6	2.8	3.0	3.1	3.3
C	石灰岩 200%	2.8	3.3	4.4	6.2	6.3
D	炭酸カルシウム 50%	6.8	7.2	7.1	7.5	7.4

※石灰岩碎石、炭酸カルシウム粉末の投入量で、鉱化ずり試料に含まれる硫化物の全硫黄量を CaSO_4 として中和するのに必要な反応式から求めた CaCO_3 の理論的な量を 100%とした量

5. 鉱化変質岩の判定方法に関する検討

5. 1 鉱化変質岩判定の基本的考え方と当初の判定方法

トンネル工事の実情から、掘削ずりを分別する判定方法の基本的な条件を、次の3項目とした。

- (1) 切羽ごとに掘削ずりを細かく分別することは工事の実態上不可能なため、一日の掘削ずり全量を単位として管理する。
- (2) 判定に日数を要すると、その日数分の容量の貯積場（ずりびん）が必要となるため、24 時間以内に判定結果が得られる必要がある。
- (3) 一日の掘削中に地質が急変することもあることから、常時水平先進ボーリングにより、あらかじめ前方の地質を確認する。

さらに、分別のための判定基準については、3 章に述べた以下の検討結果を基本とした。

- (1) 岩石の硫黄含有量が 2.0wt%程度の場合、土捨て場モデル試験で長期間にわたり酸性水などの滲出は認められない(表-1)。
- (2) 簡易溶出試験においては 10 分後の溶出水の pH が 6.0 以下を示す場合に長期的な溶出水の酸性化が認められた(図-1)。

この結果に基づき、工事開始当初は岩石の硫黄含有量が 2.0wt%以上、あるいは簡易溶出試験の 10 分後溶出水 pH が 6.0 以下を示す岩石を含む残土を鉱化ずりとして管理型土捨て場に処理することとした。なお、この判定方法および基準値については以下に述べるように施工実績により検証するとともに、修正を行った。

5. 2 施工実績に基づく判定方法の検証

(1) 簡易溶出試験による判定

斜路トンネル掘削時に切羽から採取された試料では、10 分後の溶出水の pH が 6.0 を下回る試料は認められなかった。一方、10 分後に pH が 8.0 以上を示し、56 日後に pH が 5.0 以下となる試料が認められた(図-3)。この原因として、3.3(2)で述べたボーリング試料は、すでに化学的風化作用により黄鉄鉱の酸化と方解石等の緩衝鉱物の溶脱¹⁷⁾が進んだ岩石試料であったのに対し、トンネル内の試料はほぼ新鮮な岩石と考えられる点が可能性としてあげられる。斜路トンネル試料の試験結果においても地表からの深度の浅い場所の試料の 10 分後の溶出水 pH は比較的低く、深部に掘り進むに従い高くなる傾向が見られた(図-4)。また、切羽から採取した試料の簡易溶出試験における pH 測定では 10 分後の測定値は安定せず、1 時間後で安定した測定が可能であることがわかった。

そこで、1 時間後溶出水の pH をみると、6.0 以下を示す試料は 56 日後に酸性を示す(図-3)。

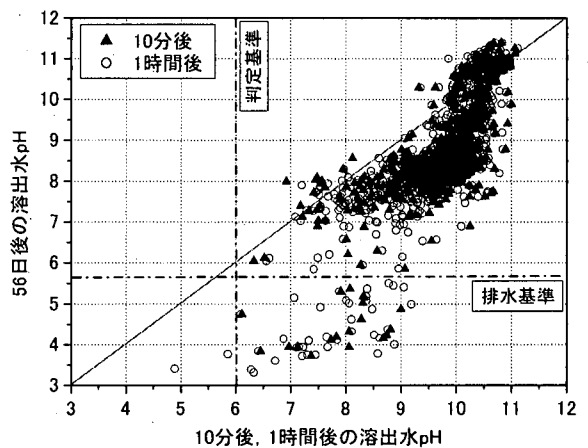


図-3 10 分後 pH, 1 時間後 pH と 56 日後 pH の関係

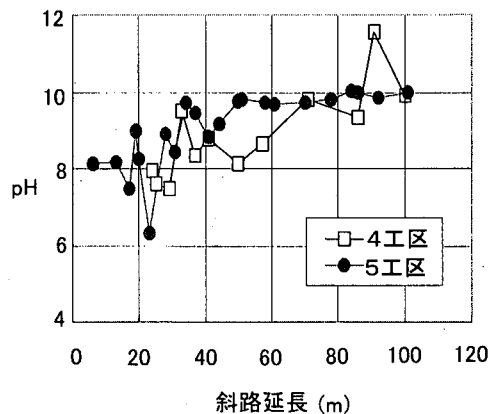


図-4 斜路掘削と 10 分後溶出水 pH

このことから、1 時間後の pH により酸性化の有無が評価可能である。

(2) 硫黄含有量による判定

岩石からの酸性水発生の原因となる黄鉄鉱の主成分である硫黄の含有量による判定指標を検討した。前述したように土捨て場モデル試験結果から、トンネルの掘さく開始当初は、硫黄含有量 2.0wt% を基準値として、それ以上の残土を管理型に、それ未満を一般型に区分した。

八甲田トンネルの切羽試料のうち、泥岩以外の試料に関する硫黄含有量と簡易溶出試験 56 日後の溶出水の pH の関係を図-5 に示す。56 日後 pH が 5.8 以下を示す試料は硫黄含有量 2.0wt% 以上のものがほとんどで、2.0wt% 以下で pH 5.8 以下となるものは 1,821 試料中 7 試料(0.4%) である。このことから、硫黄含有率 2.0wt% は基準値として妥当な値と判断できる。

(3) 火成岩を対象とする帯磁率による判定

黒鉱地域の火成岩は、熱水変質作用を受けると一般に帯磁率が低くなり、硫黄濃度が増加する¹⁸⁾¹⁹⁾。その原因の一つとして、磁鉄鉱が黄鉄鉱などの硫黄に富み磁性の弱い鉱物へと変質することが考えられている¹⁸⁾。帯磁率は市販の帯磁率計により簡便にかつ短時間で精度良く測定できるので、帯磁率を鉱化変質岩の判定指標とすることができれば、有効な判定手法となる。そこで、火成岩の酸性水溶出能力と帯磁率の関係を把握するために、トンネル切羽から採取した試料について帯磁率と全岩硫黄含有量および簡易溶出試験 56 日後溶出水 pH の関係をそれぞれ図-6、図-7 に示す。溶出試験により酸性水溶出の可能性が考えられた硫黄濃度 2.0wt% 以上の岩石は、いずれも帯磁率が $50 \times 10^{-6} \text{ emu/cm}^3$ 以下であった(図-6)。また溶出水が排水基準の pH 5.8 以下となる試料の帯磁率は $3 \times 10^{-6} \text{ emu/cm}^3$ 以下であった(図-7)。

この結果から、八甲田トンネル周辺に分布する火成岩については、帯磁率が $50 \times 10^{-6} \text{ emu/cm}^3$ 以上を示

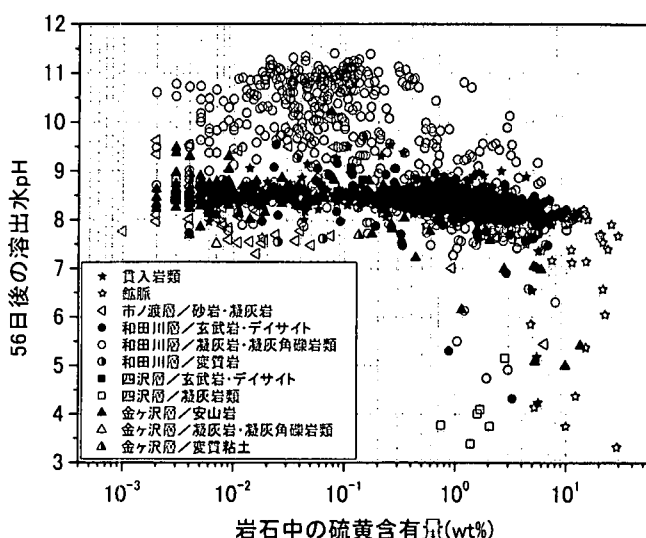


図-5 岩石中の硫黄含有量と 56 日後溶出水 pH の関係

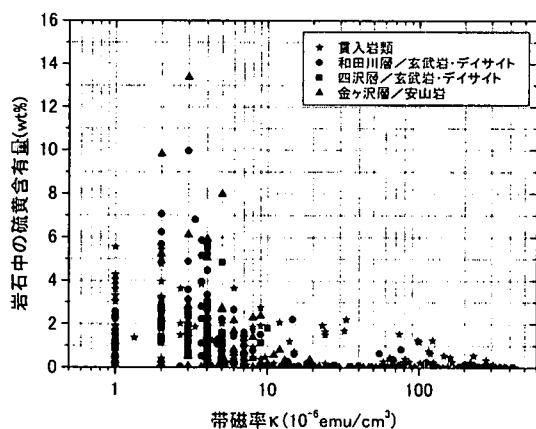


図-6 帯磁率と硫黄含有量の関係

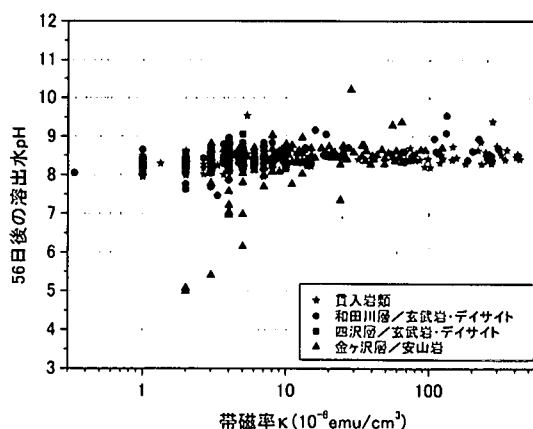


図-7 帯磁率と 56 日後溶出水 pH の関係

す場合は、鉱化変質作用を受けていないと判定することができる。

5. 3 八甲田トンネルにおける岩石判定フロー

以上に述べてきた検討結果をもとに、八甲田トンネルにおける鉱化変質岩の判定項目、判定基準を以下のように決定した。また、それぞれの判定項目に要する時間などを考慮して、図-8に示すような判定フローにより、掘削ずりの判定を行うこととした。

- ①肉眼鑑定：切羽に鉱脈・鉱石がある場合は管理型とする。
- ②帯磁率： $50 \times 10^{-6} \text{ emu/cm}^3$ 以上を示す火成岩は一般型とする。
- ③簡易溶出試験：1時間後の溶出水 pH が 6.0 以下を示す岩石は管理型とする。
- ④硫黄含有量：2.0wt%以上を管理型、2.0wt% 未満を一般型とする。

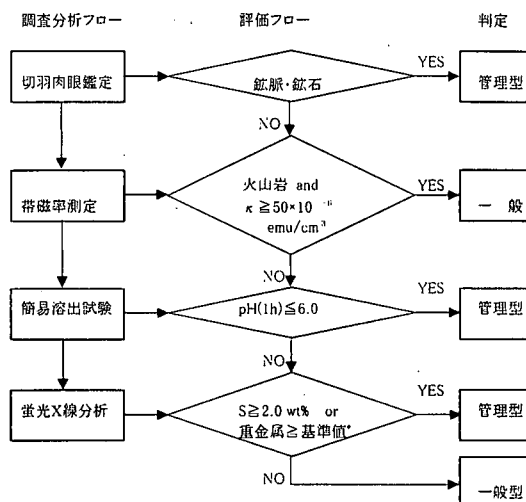
5. 4 岩石判定を考慮した掘削ずり管理

図-8に示した岩石の判定フローでは、測定器の故障などがなければ24時間以内に掘削ずりを判定することが可能である。そこで、図-9に示すように、トンネル坑口付近のずり貯積場所（ずりびん）を2区画に区分して2日分のずりを貯留し、岩石の判定後にずりを土捨て場に運搬することにより、鉱化ずりを管理型の土捨て場に確実に処分するよう管理を行っている。

6. まとめ

八甲田トンネルにおける実績を基に、鉱山地域周辺に分布する酸性水発生の可能性のある鉱化変質岩の判定手法、鉱化ずりの処分方法および掘削ずり管理手法について検討を行った。その結果は、以下のとおりである。

- (1)酸性水溶出の可能性のある鉱化変質岩は、岩石の硫黄含有量、簡易溶出試験における1時間後の溶出水 pH により判定することが可能であり、本トンネルでは硫黄含有量 2.0wt%以上あるいは pH 6.0 以下を示す岩石を管理型に区分している。
- (2)八甲田トンネルに分布する火成岩は、実績から帯磁率が $50 \times 10^{-6} \text{ emu/cm}^3$ 以上であれば、酸性水溶出の可能性はないと判定される。
- (3) 鉱化ずりを処理する土捨て場は、鉱化ずりを降水や地下水と接触させないように遮水工を施した管理型が適当と考えられる。
- (4) 上記の鉱化変質岩の判定手法では、ほぼ24時間以内に判定結果が得られるので、坑口付近のずり貯積場



*:土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針(環境省)の含有量参考値

図-8 岩石判定フロー

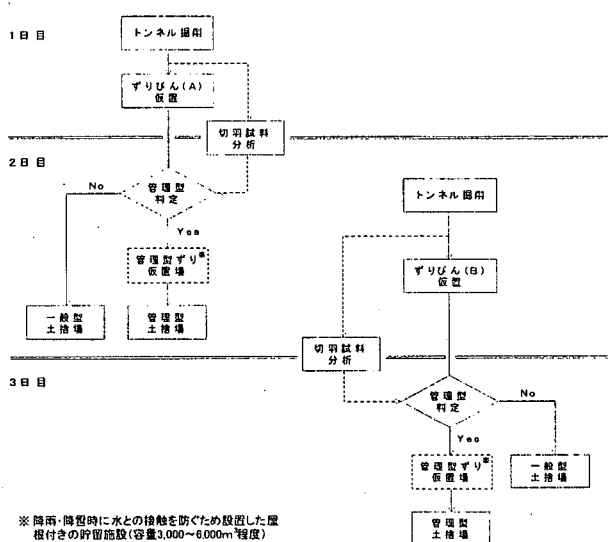


図-9 掘削ずり管理フロー

所(ずりびん)を2区画に区分することによって、鉍化ずりを確実に管理型土捨て場に処分することができる。

上記に示した岩石の判定基準値については、今後もデータの蓄積を進めたうえで技術的な評価を加え、さらにその成果に基づいた適切な値とするよう継続的に検討を行っていく計画である。なお、八甲田地域以外の鉍山地域への上記基準値の適用については、地域ごとの岩石の特徴を考慮して慎重に検討すべきであるが、今後の同様な条件下の地域における建設残土の合理的な処理方法の確立に、本論に述べた考え方や成果が貢献できるものと期待する。

本研究を進めるにあたり、技術上の問題点を調査、審議いただいた八甲田トンネル技術委員会（委員長須田熙八戸工業大学教授）の委員の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 東北農政局平川農業水利事業所：平川事業誌、pp531-537, 1989
- 2) 五十嵐敏文・大山隆弘：黄鉄鉍の酸化に伴う貯水池水質の酸性化とアルミニウムの溶出、応用地質、vol. 38, no. 5, pp244-251, 1997
- 3) 尾崎哲司・下垣久・塩月隆久・吉田恒夫：堆積性泥岩に起因する強酸性水の発生とその対策について、土木学会論文集、no. 624/Ⅲ-47, pp. 283-291, 1999
- 4) 加納博・宮城一男・由井俊三・小島貞雄：東北新幹線「八甲田トンネルルート」における水質汚染問題について、青森市新幹線水資源汚染対策専門委員会、1979
- 5) 由井俊三・宮城一男・加納博：東北新幹線「八甲田トンネルルート」の地質学的諸問題、日本地質学会東北支部会報、no. 10, pp5-6, 1980
- 6) 桜本勇治：海成泥質岩が酸性水を発生させる可能性について、地下水技術、vol. 36, no. 4 pp. 29-33, 1994
- 7) 下垣久・大山隆弘・中川加明一郎：堆積性軟岩地帯での建設工事に伴う強酸性水生成とその挙動、電力土木、no. 564, pp. 60-66, 1996
- 8) 原田勇雄：オロフレトンネルの設計施工-鉍化変質帯のトンネル施工例、土と基礎、vol. 37, no. 9, 1989
- 9) 佐々木祐三・田中栄：旧鉍山地域におけるトンネル工事について-東北自動車道亀田山トンネル-、日本道路公団技術情報、no. 77, 1985
- 10) 佐々木祐三：東北自動車道・亀田山トンネルの鉍山廃坑・重金属対策、日本道路公団技術情報、no. 81, 1986
- 11) W・スタム・J・J・モーガン：一般水質化学(下)、共立出版、p504, 1974
- 12) 北川隆・野々村政一：陸上世界最長トンネルの調査坑試験報告、トンネルと地下、vol. 28, 10, pp. 7-18, 1997
- 13) 地盤工学会：土質試験の方法と解説-第一回改訂版-、地盤工学会、pp. 159-165, 2000
- 14) 後藤達夫・梅津芳生・浅部喜幸：玉川温泉水の石灰岩による中和反応試験研究、工業用水、no. 299, pp. 40-66, 1993
- 15) 嶋谷孝・黒岩正夫：廃棄物最終処分場における遮水技術、土木学会誌、vol. 83, no. 4, pp. 14-16, 1998
- 16) 安原昭夫：廃棄物処分場の浸出水に含まれる化学成分、土木学会誌、vol. 85, no. 1, pp. 77-80, 2000
- 17) 千木良雅弘：風化と崩壊、近未来社、pp. 107-129, 1995
- 18) 橋口博宣・臼井恒：黒鉍鉍床の広域探査における探査標的限定の一方法-硫黄ハローと帯磁率ハローについて-、鉍山地質、vol. 25, pp. 293-301, 1975
- 19) 石川洋平・沢口俊美・岩谷伸一・堀内正俊：黒鉍鉍床の下盤石英安山岩溶岩による探査標的へのアプローチその活動様式と深沢鉍床の変質鉍化ハローの追跡-、鉍山地質、vol. 26, pp. 105-117, 1976