

施工時における迅速な酸性土評価手法の開発

森 下 智 貴 三 浦 俊 彦

日笠山 徹 巳 勝 又 新
(エンジニアリング本部)

Development of A Rapid Method for Evaluating Acid Soil during Construction

Tomotaka Morishita Toshihiko Miura

Tetsumi Higasayama Arata Katsumata

Abstract

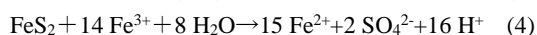
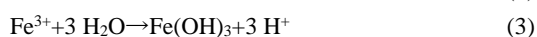
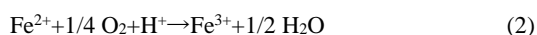
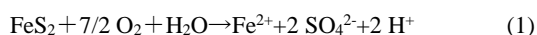
Excavated soil may contain pyrite. When such soil is exposed to the atmosphere, it reacts with oxygen and gradually decreases its pH. If the soil pH decreases, there is a risk that acidic water will spread into the surrounding environment. Two test methods exist for evaluating acidic soil: the acidification potential test and the long-term outdoor exposure test. The former is a common method; however, the oxidizing power of the reagent is excessive. The latter simulates on-site conditions but is difficult to apply owing to the extended test period. Therefore, we conducted "accelerated oxidation tests." In this study, we report on the characteristics of accelerated oxidation testing and examples of its applications.

概 要

掘削工事において、地山に黄鉄鉱が含まれることがある。その場合、掘削土は大気に暴露されると酸素と反応して pH が徐々に低下することがある。酸性化した土砂に水が接すると、水質汚濁防止法に基づく排水基準を満足しない pH の酸性水が発生するので対策が必要となる。掘削土が酸性化するかどうかを評価する試験方法は、酸性化可能性試験と土研式雨水暴露試験がある。前者は最も一般的な試験方法だが、試薬の酸化力が過剰であるため、施工中に酸性化しない土砂も酸性化すると評価する可能性がある。後者は、現場条件を模擬した試験方法であるが、試験期間が 1 年と長いため現場適用が難しい。そこで、筆者らは土研式雨水暴露試験の pH 環境を 25 日の加熱養生で再現できる「促進酸化試験」を開発した。本報では、酸性化特性を考慮した促進酸化試験の検討内容、促進酸化試験により施工時の中和材配合率を最適化した事例、および施工時の適用性について報告する。

1. はじめに

黄鉄鉱(FeS_2)は、海成堆積岩地域や変質帯地域に分布しており、地盤中は還元環境のため安定しているが、掘削工事などで大気中に暴露された場合、酸素と反応して徐々に硫酸酸性となる。酸性化した黄鉄鉱を含む土砂に雨水や地下水が接触することで、硫酸イオンや水素イオンが溶解して酸性水が発生する。その反応は以下の化学反応式で示される²⁾。また、酸性化に伴って重金属溶出量が増加する可能性があることも報告されている³⁾。



山岳トンネル工事では、掘削ズリは盛土材料として利用される場合が多く、施工前にズリが酸性化するかどうかを判定して適切な対策をとる必要がある。酸性水の発生の判定方法として、「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル (2023年版) ⁴⁾」では短期溶出試験の検液の pH と酸性化可能性試験の pH

が目安として設定されている。一般的に使用されるのは比較的簡便な方法である酸性化可能性試験であり、pH が 3.5 以下となる場合に対策が必要な酸性土と判定される。同試験は、2 mm 以下に粉碎した掘削ズリに過酸化水素水を添加して加熱することで、黄鉄鉱を強制的に酸化させた溶液の pH を測定する方法である。一方で、長期的に現場で掘削ズリから酸性水が発生するかどうかを判定する手法として土研式雨水暴露試験⁴⁾がある。土研式雨水暴露試験は、ワグネルポットに掘削ズリを入れ、屋外に暴露した状態で放置し、降雨の浸出水を採水・分析して pH、重金属等濃度の変化を把握する試験である。現場に近い地盤環境を再現できる試験方法であるが、評価に 1 年程度かかるため実施が難しい場合がある。

Table 1 に黄鉄鉱を含む土砂の評価手法を示す。酸性化可能性試験は安全側の評価であり、pH が 3.5 以下となり酸性土と判定された場合であっても施工時に必ず酸性水が発生するとは限らない⁴⁾。そのため、土研式雨水暴露試験を実施する時間がなく、酸性化可能性試験のみで酸性土を評価する場合は、対策が過剰となる可能性がある。そこで、施工時における酸性土の pH を評価することを目的

Table 1 黄鉄鉱を含む土砂の評価手法
Evaluation Method for Soil Containing Pyrite

試験	酸性化可能性試験	土研式雨水暴露試験	促進酸化試験
方法	試料は粉碎で2mm以下に調整。試験管内で試料と過酸化水素水を加熱して強制的に酸化した状態の懸濁液pHを測定する。	試料は10～40mmに調整。試料をポットに入れて屋外に暴露させる。降雨が浸透して回収された浸出水のpHを定期的に測定する。	試料は0.5～2mmに調整。試料を専用容器に入れ、60℃の恒温槽で25日間養生する。試料を回収して液固比2.5で懸濁液pHを測定する。
長所	短期間（数日）で評価可能	現場での長期的なpHが評価可能	比較的短時間で評価できる 現場での長期的なpHが評価可能
短所	酸化力が強く、過度に安全側の評価となる場合がある	試験期間が長期となる（1年程度）	—

として、短時間で土研式雨水暴露試験と同程度のpH環境を再現できる促進酸化試験を開発した。

本報では、酸性化特性を考慮した促進酸化試験の検討内容、促進酸化試験により施工時の中和材配合率を最適化した事例、および施工時の適用性について報告する。

2. 促進酸化試験の開発

2.1 目標設定

長期的な酸性化評価として、短時間で土研式雨水暴露試験の結果を再現できる室内試験方法とすることを目標とした。本方法は促進酸化試験と呼称する。

2.2 測定原理

2.2.1 試料の酸化促進 一般的に、温度が高いほど酸化が進行することが知られている⁹⁾。そこで、試料を加熱養生することにより土研式雨水暴露試験と同等まで酸化を促進させたのち、試料を取り出してpHを測定する手法を考えた。

2.2.2 促進酸化試験容器 式(1)で示すように黄鉄鉱の酸化反応には酸素と水が必要である。恒温槽で加熱すると水分が蒸発して試料が乾燥するため、酸化の進行が抑制されることが想定された。そこで、恒温槽内で湿润状態を維持するため、Fig. 1に示すカラム①に水を入れ、その上部にポリエステルメッシュを挟み、試料を乗せた(Photo 1)。この状態で加熱養生して蒸発した水が試料に供給される仕組みとした⁹⁾。測定方法の詳細は4.2.4にて後述する。

2.2.3 試験の評価 開発した試験方法による酸化時のpHが土研式雨水暴露試験で得られる長期的なpHと同程度であることを確認するため、Table 2に示す土丹、頁岩、凝灰岩で土研式雨水暴露試験と促進酸化試験を実施して結果を比較した。

3. 試料と実験方法

3.1 促進酸化試験の試験方法検討

3.1.1 試料 現場から採取した土丹、頁岩、凝灰岩を使用した。各試料のpH測定結果をTable 2に示す。酸化していない状態の土壌pHは土丹、頁岩で中性を示し、凝

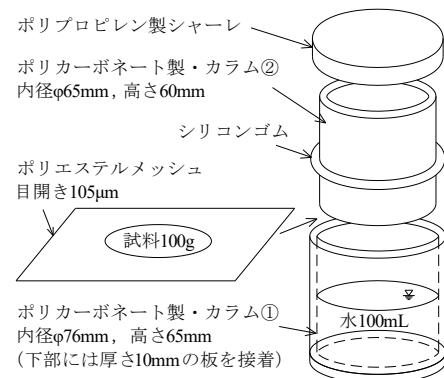


Fig. 1 促進酸化試験容器
Experimental Container

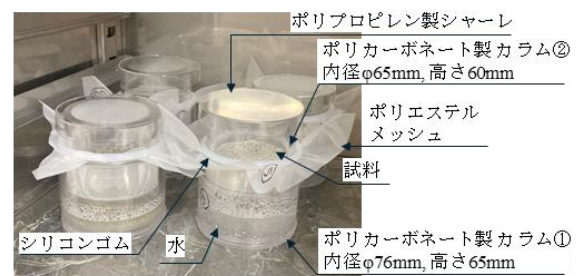


Photo 1 促進酸化試験における加熱養生状況
Heat Curing during Accelerated Oxidation Tests

Table 2 試料の初期pHと酸性化可能性試験pH
Initial Soil pH and Acidification Potential Test pH

	土丹	頁岩	凝灰岩	安山岩
初期 pH	6.5	7.2	11.1	7.8
酸性化可能性試験	2.5	2.2	2.5	2.2

灰岩はアルカリ性を示した。酸性化可能性試験の結果、すべてpHが3.5以下であったことから全試料が酸性土と判定された。

3.1.2 実験方法

(1) 土研式雨水暴露試験

Photo 2に実施状況を示す。1/5,000 aのワグネルポットにガラスビーズを敷き、その上部に粒径を10～40 mmとした試料を100 mmの厚さで充填し、屋外に設置した。降雨後にタンクから回収した浸出水のpHを測定した。

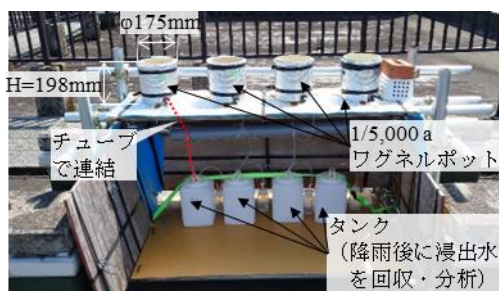


Photo 2 土研式雨水暴露試験実施状況

Situation of Long-Term Outdoor Exposure Test

Table 3 XRFで測定した安山岩の硫黄含有率
Sulfur Content of Andesite Measured by XRF

試料	硫黄含有率 (%)
安山岩	7.48
安山岩 : 5号珪砂 = 1 : 2	2.96
安山岩 : 5号珪砂 = 1 : 4	1.92
5号珪砂	0.01

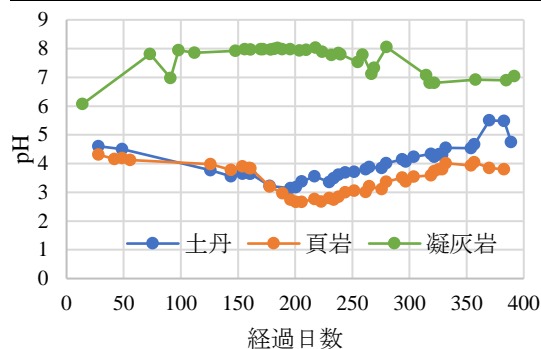


Fig. 2 土研式雨水暴露試験結果

Results of Long-Term Outdoor Exposure Test

(2) 酸化条件の設定

1) 養生温度の設定試験 供試試料は、均質化して容器に入れるため風乾後に粉砕して粒径を2mm以下とした。養生温度の設定試験として、供試試料をFig. 1の促進酸化試験容器に入れて恒温槽にて15, 30, 45, 60, 75℃で25日養生した。その後、JGS 0211の方法に準じて液固比5で土壤懸濁液のpHを測定した。

2) 養生期間の設定試験 試料は風乾後、粒径2mm以下に粉砕して促進酸化試験容器に入れた。60℃の恒温槽で12.5, 25, 50日養生した。養生後には1)と同様の方法でpHを測定した。また、後述する前処理した試料の促進酸化試験と結果を比較した。

(3) 前処理方法の検討 試料の酸化を促進させるため、試料の前処理条件を検討した。粒径はふるい分けで0.5~2mmの画分とした。供試する試料の初期含水比は加水して10%に調整した。前処理した試料をFig. 1の促進酸化試験容器に入れ、恒温槽にて60℃で5, 12.5, 25日養生した後、pHを測定した。pHの測定は、土壤環境分析法⁷⁾に示された方法により液固比2.5で静置した土壤懸濁液を測定した。

3.2 促進酸化試験を使用した中和材配合試験

3.2.1 試料 試験に使用した安山岩は、Table 2に示す通り、酸性化可能性試験のpHが2.2であるため酸性土と判定された。中和材は太平洋セメント株式会社のデナイトを使用した⁸⁾。デナイトは粉体であり、JGS 0211の方法で測定した懸濁液pHは10.0を示した。

3.2.2 実験方法

(1) 酸性化可能性試験による中和材配合試験 安山岩は風乾、粉砕し、2mmふるいを通過させて供試した。中和材を安山岩に60, 90, 120 kg/m³で添加して十分攪拌混合し、酸性化可能性試験の結果がpH6となる中和材の配合率を設定した。また、酸性土の硫黄含有率が変化した場合を想定して5号珪砂で希釈した試料を1:2, 1:4の割合となるよう作成し、同様に試験を実施した。Table 3に蛍光X線(XRF)で測定した試料の硫黄含有率を示す。

(2) 促進酸化試験による中和材配合試験 試料は全岩粉砕して0.5~2mmとした。粒度調整した試料に0, 10, 30, 50, 100 kg/m³で中和材を配合し、恒温槽にて60℃で12.5, 25, 50, 100日養生後、pHを測定した。pHは、液固比2.5で懸濁状態とした状態で測定した。中和材の配合率設定は、促進酸化試験のpH測定結果が平衡となった養生期間でpHが6.0となる配合とした。

4. 実験結果

4.1 土研式雨水暴露試験

土研式雨水暴露試験の実験結果をFig. 2に示す。グラフは、実験開始日を0日として表示した。土丹、頁岩は初回の採水でpHが4~5まで低下しており、その後150日までpH4前後で推移した。pHは150日以降でさらに低下して200日付近で最も低かった。それ以降、pHは徐々に上昇する傾向が見られた。凝灰岩は、初回の採水でpH6程度を示したが、その後、pHは7~8で推移した。

土研式雨水暴露試験の結果から、土丹、頁岩は施工時に酸性化する酸性土、凝灰岩は酸性化可能性試験で酸性土と判断されるが施工時は酸性化しないと評価した。

4.2 酸化特性を考慮した促進酸化試験方法の検討

4.2.1 養生温度と養生期間の検討 Fig. 3に養生温度の設定試験の結果を示す。土丹のpHは養生温度が高くなるにつれて酸化が進んでpHが低下し、60℃以降はpH4で一定となった。凝灰岩は養生温度に関わらずpH8~9で推移してpHの低下は確認されなかった。よって、土丹と凝灰岩は土研式雨水暴露試験と同様の傾向を示していた。一方で、頁岩のpHは、養生温度が高くなってもほとんど低下しなかった。土研式雨水暴露試験では頁岩のpHは最大2.7まで低下しており、結果が一致しなかった。

頁岩はX線回折の結果、カルサイト(CaCO₃)やドロマイト(MgCa(CO₃)₂)など炭酸塩が含まれており、pHが低下しなかった要因は、頁岩に含まれる炭酸塩と試験方法の相違と考えた。黄鉄鉱の酸化で発生する硫酸は試料に含ま

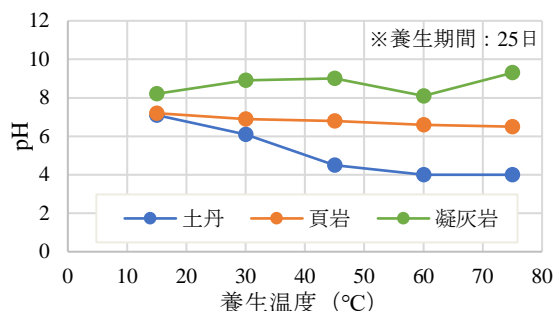
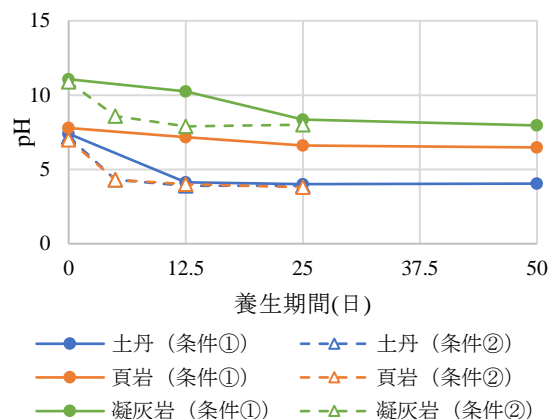


Fig. 3 養生温度の設定試験の結果
pH Measurement Results for Samples Aged at Different Temperatures



条件① 養生温度の設定試験：粒径0-2 mm，風乾状態
条件② 促進酸化試験：粒径0.5-2 mm，初期含水比 $w=10\%$

Fig. 4 養生期間の設定試験の結果
Result of Accelerated Oxidation Tests with Different Curing Periods

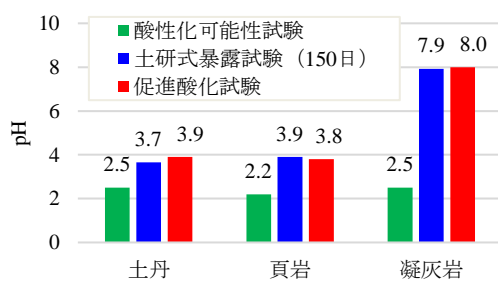


Fig. 5 各試験の酸性化評価結果
Evaluation Results of Acidic Soil in Each Test

れる炭酸塩を溶解する。養生温度の設定試験では、水蒸気が土粒子に接触するが、流水が無い場合溶出したカルシウムイオン(Ca^{2+})が土粒子表面に残存する。この Ca^{2+} と硫酸が反応して中性塩の石膏となり土粒子表面を覆う⁹⁾。その影響で、pHが酸性化しなかった。これに対して、土研式暴露試験では、降雨が土粒子の表面を流れるため、 Ca^{2+} が土粒子表面に残存せず、石膏が形成されないことから、硫酸の影響でpHが低下したと考えられる。なお、試料の土粒子の粒径を比較すると、養生温度の設定試験は粒径の範囲が0~2 mmであり、土研式暴露試験の10~40 mmと比べると見かけの比表面積が大きい。そのため、

土粒子の質量当りの炭酸塩が反応する割合が大きくなり炭酸塩の反応が顕著になったと推測した。

4.2.2 前処理工程およびpH測定方法の検討 酸化に伴うカルシウムの土粒子への残存を抑制するため、ふるい分けにより0~0.5 mmの画分を排除して試料の見掛けの比表面積を小さくした。また、残存するカルシウムイオン濃度を低減させて酸化反応を促進させるために、試料に加水して初期含水比を10%に調整した後、促進酸化試験容器に入れて60°Cで加熱した。

Fig. 4に60°Cの養生期間を変化させた試験結果を示す。試験は条件①養生温度の設定試験：粒径を0~2 mmとし、風乾状態で供試するケースでpH測定の液固比は5とした。条件②促進酸化試験：粒径を0.5~2 mmとし、初期含水比を $w=10\%$ で供試するケースでpH測定の液固比は2.5とした。pH測定方法は、条件①養生温度の設定試験では酸化後の試料について一般的に使用される液固比5のJGS 0211の方法を使用した。条件②促進酸化試験は、液固比が2.5と比較的小さい土壤環境分析法⁷⁾の方法を適用して硫酸の相対的な溶出量が高くなる状態のpHを評価した。

土丹の12.5日以降のpHは条件①、条件②で同様であった。凝灰岩は条件①の25日養生でpH 8.0となるが、条件②では5日、12.5日養生でそれぞれpH 8.6、pH 8.0となり条件②の方が酸化速度は大きくなった。頁岩では条件①において50日養生でもpH 6.5と中性を示したが、条件②において5日、12.5日養生でそれぞれpH 4.3、pH 4.0となった。前処理工程を追加することで、 Ca^{2+} の影響が軽減され、頁岩でも酸化が促進されてpHが低下したと判断した。

4.2.3 各試験の比較 Fig. 5に各試験の酸性化評価結果を示す。土研式雨水暴露試験は150日経過時、促進酸化試験は条件②の12.5日養生のpHを示す。酸性化可能性試験は、土丹、頁岩、凝灰岩の全て試料でpHが最も低くなった。全ての試料で酸性化して対策が必要な酸性土と判断され、安全側の評価といえる。一方で、凝灰岩は酸性化可能性試験に従うと対策が必要と判断されるが、土研式雨水暴露試験、促進酸化試験では、それぞれpH 7.9、pH 8.0のため酸性化せず対策の必要が無いと評価される。促進酸化試験と土研式雨水暴露試験のpHはほぼ一致しており、促進酸化試験は土研式雨水暴露試験に比べて、10~12倍程度の酸化促進効果があると考えられる。養生日数は12.5日で概ね一定となったが、試料を十分に加熱養生させるために、養生期間を25日と設定した。

4.2.4 試験手順 各試験から設定した促進酸化試験の手順を次に示す。

(1) 試料調整

- ・ 風乾した試料を2 mm以下に粉砕し、0.5 mmふるい残留試料を供試試料とする。
- ・ 加水により供試試料の含水比を10 %に調整する。

(2) 養生

- ・ Fig. 1のカラム①に水を100 mL入れる。
- ・ ポリエステルメッシュに試料を100 g乗せ、カラム①の上部にかぶせたのち、カラム②をポリエステル

メッシュごととカラム①に挿入する。ポリエステルメッシュ端部をシリコンゴムで留める。

- ・ 上部にポリプロピレン製シャーレを固定せず乗せる。
- ・ 恒温槽に入れ60°Cで25日加熱養生する。
- ・ 状況を観察し、水が減少していれば適宜注水する。

(3) pH測定

- ・ 養生後の試料を50 mLの試験管に10 g分取する。
- ・ 水を25 mL入れ約10回転倒混和して1時間静置する。
- ・ 測定前に振り混ぜ、懸濁液のpHを測定する。

5. 酸性土の中和材配合試験への適用

5.1 酸性土による酸性水拡散抑制のための中和材配合

酸性化対策として中和材の添加が検討されるケースがある。ここでは、酸性土への中和材配合率を検討することを目的として促進酸化試験による配合率設計を実施した。また、酸性化可能性試験でも配合率検討を実施して両試験を比較した。水質汚染防止法に基づくpHの排水基準は5.8～8.6の範囲であるため、設定される中和材配合率は、酸化時のpHが6.0以上となる配合率とした。

5.2 酸性化可能性試験による中和材配合率

Fig. 6に酸性化可能性試験による中和材を配合した試料の酸性化時のpHを示す。安山岩は、中和材60, 90, 120 kg/m³の配合で、それぞれのpHは2.3, 5.8, 9.7となった。

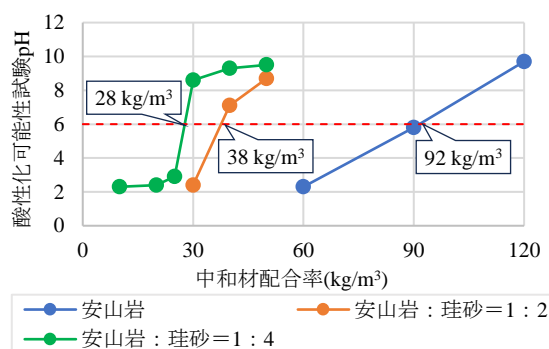


Fig. 6 酸性化可能性試験による中和材を配合した試料の酸性化時のpH

pH of Samples Containing Neutralizing Agents by Acidification Potential Test

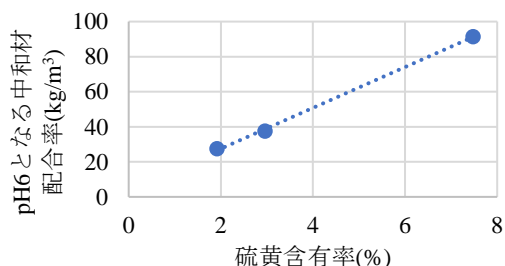


Fig. 7 XRF測定の硫黄含有率と酸性化可能性試験による中和材配合率

Sulfur Content Measured by XRF and Neutralizing Agent Dosage by Acidification Potential Test

そのため、酸性化可能性試験でpH 6.0を目標とする場合、中和材の配合率は92 kg/m³となる。一方、含有する黄鉄鉱の含有率が低い場合を想定した安山岩：5号珪砂が1:2および1:4に希釈した試料は、中和材配合後のpHが6となるためにそれぞれ38, 28 kg/m³となる。珪砂が増えると、中和材添加量は小さくなる傾向を示すことから、珪砂混合による黄鉄鉱含有率の増減を実験で再現できることが分かった。なお、XRFにより測定した試料の硫黄含有率と中和に必要な配合率は、Fig 7で示すように直線で表される。現場においてハンドヘルド型の蛍光X線装置を使うことで硫黄含有率が比較的簡易に測定することができるため、適宜、硫黄含有率を測定することで中和材配合率を最適化できると考えられる。

5.3 促進酸化試験による中和材配合率

Fig. 8に中和材を配合した試料の促進酸化試験結果を示す。配合なし(0 kg/m³)の試料は初期においてpH 7.8であり、養生日数が25, 50, 100日でそれぞれpHは4.1, 3.5, 3.4となっており、養生日数25日以降で概ね一定となった。中和材を配合した試料は25日養生後もpHが低下する傾向にあった。Fig. 9は養生日数ごとの中和材配合率とpHの関係を整理した結果である。50日と100日養生でpHが

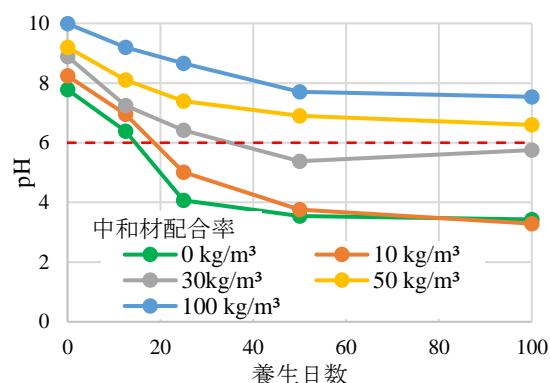


Fig. 8 促進酸化試験による中和材配合試験結果
Results of Amount of Neutralizing Agent Using Accelerated Oxidation Test

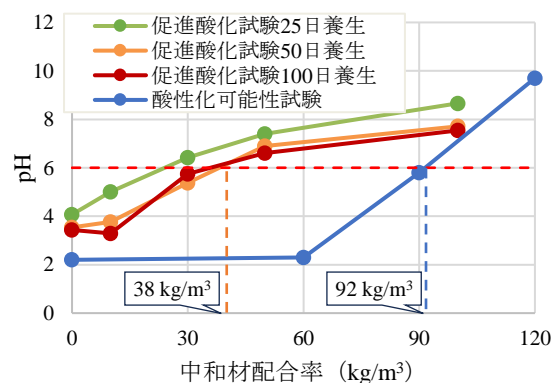


Fig. 9 酸性化可能性試験と促進酸化試験による中和材配合試験結果

Amount of Neutralizing Agent Added Using Acidification Potential Test and Accelerated Oxidation Test

概ね同程度となり、試料の酸化は 50 日で概ね平衡に達したものと推察される。そのため、50 日養生の pH から pH が 6.0 となる配合率である 38 kg/m^3 を必要配合率と評価した。促進酸化試験による配合率は、土砂の仮置時、施工時の酸性水対策として有効であると考えられる。中和材を配合した試料は、配合しない試料と比べて pH が一定となる養生日数が長期間となった。酸性土の酸化により生成した硫酸イオンが中和材のアルカリ成分との反応により消費されたためと考えられる。酸性土に中和材を配合する場合は比較的緩慢に酸性化が進行すると推察される。そのため、中和材の配合設計に促進酸化試験を使用する場合は、養生期間を 25 日と固定せず、長期的な pH 変化を測定して一定となる養生期間を確認することが望ましい。

一方で、酸性化可能性試験で pH 6.0 となる配合率は 92 kg/m^3 であり、約 2 倍以上の差があった。酸性化可能性試験は現段階で酸性化における最大リスクの評価法として考えられるので、供用後の盛土から長期的に流出する酸性水対策の配合として有効である。

6. 施工時における促進酸化試験の提案

土研式雨水暴露試験を実施せず、酸性化可能性試験のみで酸性土を判定している場合は、施工時に中和装置の配置、中和材の検討、日常的な水質モニタリングなど流出対策が過剰となる。一方、Fig. 10に示すように掘削土の促進酸化試験を実施して酸性化する傾向がなければ、施工中は酸性化しないと判断でき、定期的な水質モニタリングによる最小限の対策で十分であると判断できる。そのため、一般土砂と同様に施工することで、工期短縮、経費削減に寄与できる可能性がある。なお、サンプリングのバラツキを考慮するため、促進酸化試験は施工中、掘削土量に応じて複数回実施するものとする。

7. まとめ

酸性土が施工時に酸性化する可能性を評価する促進酸化試験を開発した。本報で得られた内容を以下に示す。

- 1) 酸性土は加熱養生により酸性化が促進され、酸性化を評価する温度は 60°C 、期間は 25 日と設定した。
- 2) 酸性土にドロマイトのような硫酸を中和する鉱物が含まれる場合、粒径 0.5 mm 以下の画分を排除、初期含水比を 10 % 程度に調整することで酸化が促進された。
- 3) 本稿で実験した試料について促進酸化試験は、土研式雨水暴露試験の 150 日経過時の pH を 12.5 日で再現できた。土研式雨水暴露試験が未実施の場合、促進酸化試験を実施することで施工時の酸性水発生リスクを早期かつ合理的に判定できると考える。
- 4) 促進酸化試験による酸性土の中和材配合率の設定方法を示した。施工時、供用時など目的に応じて試験方法を選択して、配合率設定を行うことが望ましい。

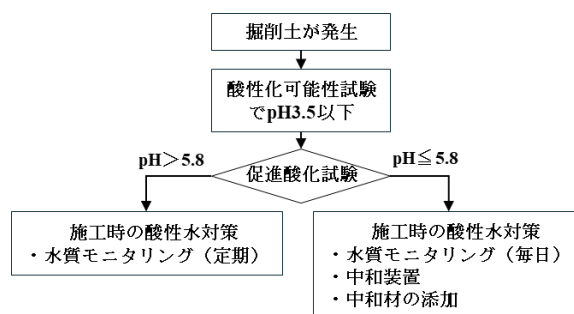


Fig. 10 促進酸化試験による掘削土管理の例
Example of Flow of Acid Soil Management during Construction Using Accelerated Oxidation Test

謝辞

促進酸化試験は宮崎大学伊藤健一准教授との共同研究により開発しました。中和材配合試験では太平洋セメント株式会社に材料提供と一部実験を実施頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 五十嵐敏文，他：黄鉄鉱を含む堆積岩の溶出水酸性化ポテンシャルに関する実験的検討，応用地質，第42巻，第4号，pp.214-221，2001
- 2) 服部修一，他：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，トンネル工学研究論文・報告集，第12巻，pp.53-60，2002
- 3) 品川俊介，他：岩石に含まれる自然由来重金属等の溶出特性評価方法，土木技術資料52-6，pp.10-13，2010.6
- 4) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル改訂委員会：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（2023年版），2023
- 5) 佐野博昭，他：積算温度方式を導入した土の酸性以降速度の評価手法に関する研究，土木学会論文集，No.687，pp.95-105，2001.9
- 6) 小谷護留，他：土壌の酸性化特性試験方法の開発，第64回粘土科学討論会講演要旨集，pp.55-56，2021
- 7) 土壌環境分析法編集委員会：土壌環境分析法，土壌の酸性化特性試験方法の開発，博友社，pp.195-196，2012.5
- 8) 松山祐介，他：新規不溶化材「デナイト®」の開発，太平洋セメント研究報告，第153号，pp.57-63，2007
- 9) 大山隆弘，他：堆積性軟岩の化学的風化特性の検討ー化学的風化のメカニズムと風化速度，風化への微生物の影響ー，電力中央研究所報告，U38，70p.，2000