

泥岩掘削残土からの酸性水・有害元素溶出持続性評価

防災技術研究部 地質
研究室長 太田岳洋

1. はじめに

わが国には山間部、平野部を問わず普遍的にイオウ、ヒ素、重金属元素を含む海成泥質堆積物が分布している。泥質堆積物中のイオウは黄鉄鉱として堆積物中に存在し、ヒ素や重金属元素は黄鉄鉱中の不純物として含まれていることが多いが、この黄鉄鉱は酸化すると分解し、酸性水や重金属元素が溶出することが知られている。黄鉄鉱などの酸化・分解にともなう環境汚染は廃鉱およびその周辺などで大きな社会問題となり、近年は土木工事でも懸念されるようになった。最近ではトンネル工事でも「土壌汚染対策法」(2003年2月施行)に準拠した残土処分が求められている。今後、都市部の大深度地下開発や整備新幹線などの鉄道建設の際に多量の泥質堆積物が掘削されることが予想され、堆積物由来の有害物質の溶出による周辺の地下水や河川水の汚染、構造物の劣化などが懸念される。一方、このような開発工事は鉄道などの社会基盤を整備する上で、いまだ必要な工事であるとともに、公共事業費の低減などの社会的要請を考慮すると、泥質堆積物を掘削した場合に必要な有害物質汚染対策を効率的に実施することも強く望まれている。

しかし、泥質堆積物に起因する環境汚染の原因となる酸性水やヒ素、重金属元素の溶出挙動には不明な点が多く、例えば中和作用を考慮した有害物質溶出現象の持続性は明らかではない。このような有害物質の溶出挙動と持続性を明らかにすることにより、泥質堆積物掘削時の環境保全を考慮した残土処分や建設された構造物維持管理を、より効果的かつ経済的に行うことが可能となる。そこで本報告では、既設の残土処分地浸出水の水質調査、溶出試験および理論計算に基づいてイオウ、ヒ素、重金属元素の溶出挙動モデルを構築し、泥質堆積物残土処分地からの酸性水の溶出持続性に関する評価手法について検討した結果を述べる。

2. 残土処分地からの浸出水水質の時間変化

東北地方の新第三紀中新世の泥岩を主な掘削残土とする掘削残土処分地からの浸出水の水質の経時的な変化の例を図1に示す。図に示すように、大局的にはpHの低下にともなう電気伝導率が増大する。また、累積流量の増加にしたがいpHは中性に収束し、電気伝導率も低下する。金属元素はあまり高い濃度を示していないが、累積流量の増加にともなう電気伝導率の低下とともに、濃度が減少する傾向がある。このような浸出水の水質の時間変化は、泥質堆積物に一般的に含まれている黄鉄鉱

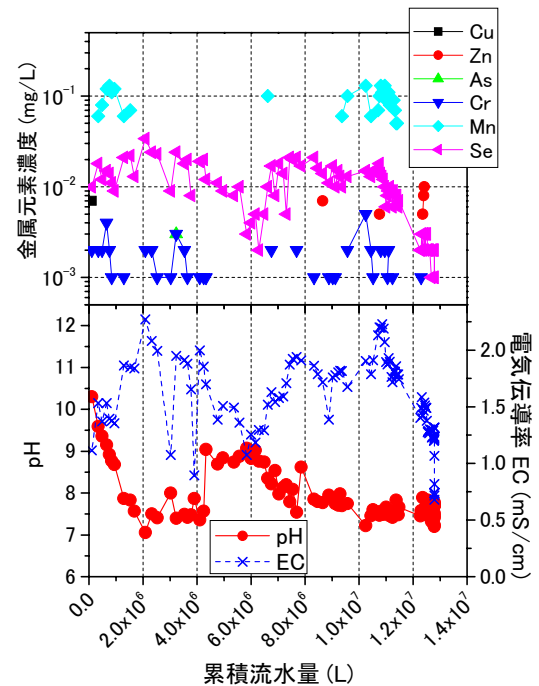


図1 残土処分地からの浸出水の水質の時間変化

の分解による酸性化と斜長石、方解石の分解による中和作用の結果と考えられる。図 1 に示すように、金属元素の濃度変化が pH や電気伝導率の変化に対応することから、泥質掘削残土からの金属元素も黄鉄鉱や斜長石、方解石が分解することにより溶出すると推定される。

3. 泥質堆積物掘削残土からの溶出現象に関する実験的検討

泥質堆積物からの酸性水や重金属などの溶出挙動を明らかにするために、次の 2 種類の溶出試験を行った。まず、泥質堆積物と水の平衡状態における溶出現象を把握するためにバッチ式溶出試験を行った。さらに、水の流れのある場における溶出現象を再現したカラム式溶出試験を行った。

3.1 バッチ式溶出試験による検討

バッチ式溶出試験における泥質堆積物の溶出水の pH および電気伝導率 (EC) の時間変化を図 2 に示す。試験を行った 6 試料のうち 1 試料の溶出水でのみ排水基準 (pH<5.8) よりも酸性を示した。この試料の溶出水では、7 日後までに pH が急激に低下し、28 日以降はほぼ一定の値を示した。他の試料の溶出水も 7 日後までは pH の下降あるいは上昇などの変化が見られるが、それ以降はほぼ一定の値となる。また、EC は全試料において時間の経過にともない上昇するが、上昇する速度は徐々に低下する傾向がみられる。

3.2 カラム式溶出試験による検討

図 3 に pH と EC の時間変化を示す。EC は 24 時間経過後まで上昇し、その後急減して、56 日経過後には初期の 1/10 の値となる。また pH は 1~7 日後まで上昇し、その後ほぼ 8.0 前後で一定の値を示した。

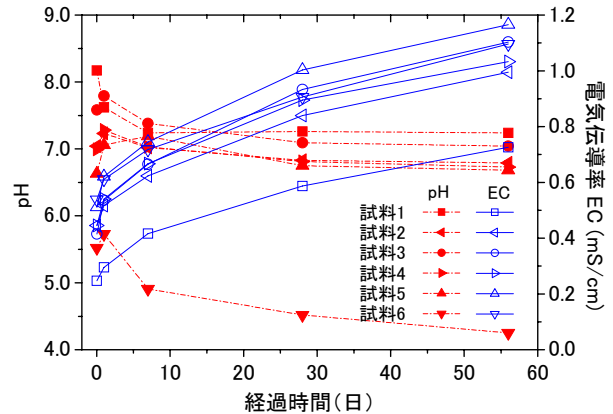


図 2 バッチ式溶出試験における溶出水の pH と EC の時間変化

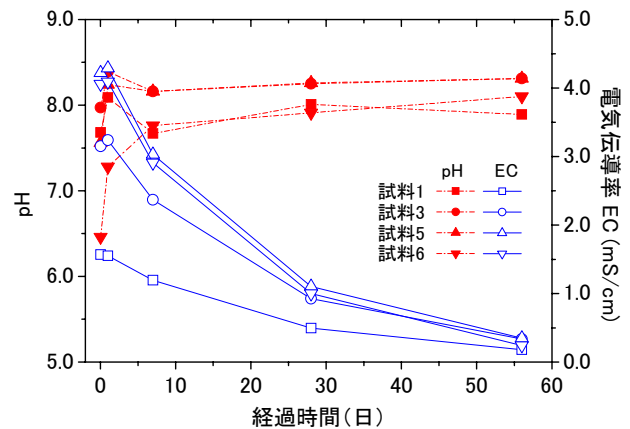


図 3 カラム式溶出試験における溶出水の pH と EC の時間変化

4. 熱力学解析による溶出現象のモデル化

掘削残土処分地からの浸出水の水質の予測には、熱力学に基づいた理論計算によるシミュレーションが有効である。シミュレーションを行う際には、反応鉱物の種類、表面積、反応条件等をモデル化する必要がある。そこで、反応モデルを検証するために、前述の溶出試験結果について、熱力学にもとづいた地球化学解析コード PHREEQC¹⁾を用いたシミュレーションを試みた。

4.1 バッチ式溶出試験結果の再現

図 2 中の試料 6 を用いたバッチ式溶出試験について、シミュレーションを行った。溶出試験において反応モデルとして、泥質堆積物に含まれている黄鉄鉱、斜長石、方解石の分解を設定した。計算結果を図 4 に示す。計算から得られた溶出水の pH の値と時間変化の傾向は、溶出試験における実測結果と類似する (図 4 (a))。また、溶出試験の際には溶出水のイオン濃度を測定する

ことができなため、イオン濃度の総和と相関がある EC の実測値の変化と計算で求めたイオン濃度の時間変化を比較することにより、シミュレーション結果の再現性を検討した (図 4 (b))。図から明らかなように、計算から求められた Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} および Fe の濃度の時間変化は、溶出試験で実測された EC の時間変化と同様の傾向を示す。また、56 日後の溶出水における各イオン濃度の計算値が、溶出試験の溶出水における濃度と同程度であることを確認した。

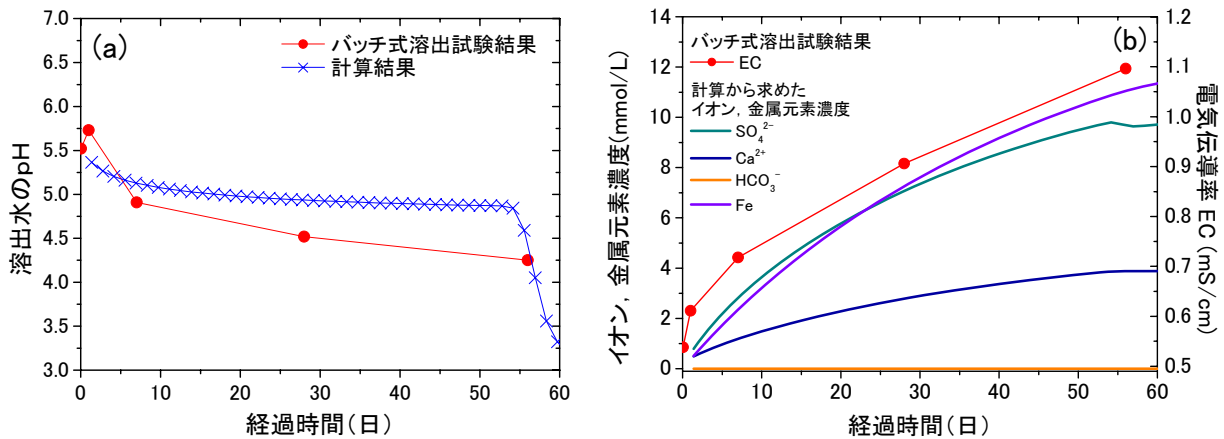


図 4 モデル計算によるバッチ式溶出試験における水質変化の再現結果

4.2 カラム式溶出試験結果の再現

カラム式溶出試験のシミュレーションは、バッチ式の場合と同様に図 2 の試料 6 について試みた。反応モデルはバッチ式と同様に設定した。また、カラム内の水の流速を溶出試験時の実測から約 $3 \times 10^{-7} \text{m/s}$ とした。

図 5 (a) に示すように、pH に関しては絶対値が溶出試験の実測値とやや異なるが、通水初期に上昇しその後一定値となる傾向はほぼ再現できている。また、計算された Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 濃度の時間変化を溶出試験における EC の時間変化と比較すると、ほぼ類似した傾向を示しており (図 5 (b))、解析によりカラム式溶出試験の結果をおおむね再現できたと考えられる。

以上に述べた熱力学解析による溶出試験のシミュレーション結果から、掘削残土処分地のような水の流れのある場における水と泥質堆積物の反応過程と浸出水の水質の時間変化を、PHREEQC を用いた解析により実用に供する程度の精度で推定することができると判断した。

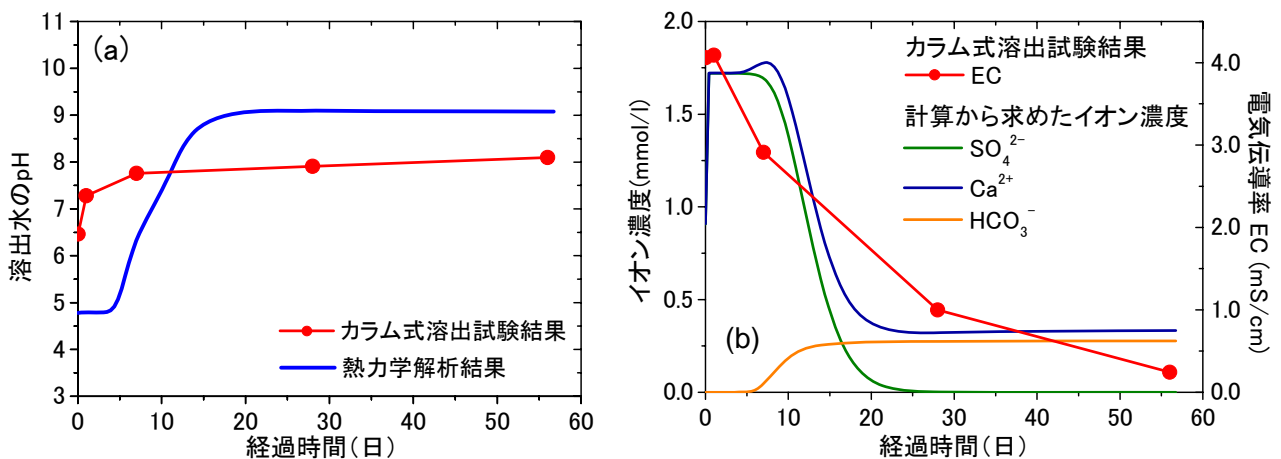


図 5 モデル計算によるカラム式溶出試験における水質変化の再現結果

4.3 熱力学解析による再現結果から求めた溶出モデル

熱力学解析による溶出試験のシミュレーションでは、水-泥質堆積物間の反応をモデル化した。その結果、いずれの溶出試験結果についても解析により溶出試験の結果が再現されたことから、計算時に設定した反応モデル（黄鉄鉱、斜長石、方解石の分解）は妥当であると考えられる。

5. 泥質堆積物残土処分地からの酸性水溶出の持続性評価

一般に有害元素の溶出は酸性水において顕著であるため、泥質堆積物の残土処分地からの有害元素の溶出に関する危険性については、残土処分地からの酸性溶出水の溶出の可能性および持続性を予測することにより評価できると考えられる。

図2の試料6のような泥質堆積物が処分された仮想的な処分地からの溶出水の水質の時間変化について、PHREEQCを用いた試算を行った。反応モデルは4.3に示したモデルとした。仮想的な残土処分地は、水の流れを一方方向と仮定して延長50mの一次元モデルとし、内部の水の流速を 10^{-5}m/s とした。

図6に計算した仮想的な残土処分地からの溶出水の水質変化の予測結果を、pHと各イオン濃度の変化過程として示す。溶出水のpHは約2,000日後まで約8.3で一定値を示す。その後2,500日後までの間に緩やかに約9.1まで上昇し、その後一定となる。SO₄²⁻とCa²⁺の濃度はpHの変化と対応するように変化し、溶出開始直後に急増し、その後2,000日まで一定の濃度を示す。そして2,000日から2,500日にかけて減少する。特にSO₄²⁻は2,500日後にほぼ0mmol/lとなる。この結果から、今回検討した仮想的な処分地では、溶出開始から2,500日後までに残土中の黄鉄鉱が分解し、その後は方解石や斜長石の分解のみが生じると推定される。一般に泥質堆積物では、重金属元素などは黄鉄鉱中に不純物として含まれているため、これらの有害元素の溶出も2,500日後に黄鉄鉱の分解が終了する時点で停止すると考えられる。

6. まとめ

泥質堆積物を埋め立てた残土処分地の周辺環境への影響を把握するために、残土処分地の水質調査、溶出試験、理論計算を行い、溶出持続性について検討し、以下のことが明らかとなった。

- 1) 既設の残土処分地からの浸出水における金属元素濃度等は経過時間とともに低下する。
- 2) 泥質堆積物の溶出は、黄鉄鉱、方解石、斜長石の分解と石膏の析出・分解でモデル化できる。
- 3) 溶出現象の反応をモデル化した熱力学的な解析により、溶出試験結果が再現できる。

以上の結果に基づいて、仮想的な残土処分地からの浸出水水質の時間変化について熱力学的な試算を行い、長期的な予測ができることを確認した。

引用文献

- 1) Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J: Water-Resources Investigations Report 99-4259, U.S.G.S., 312p., 1999

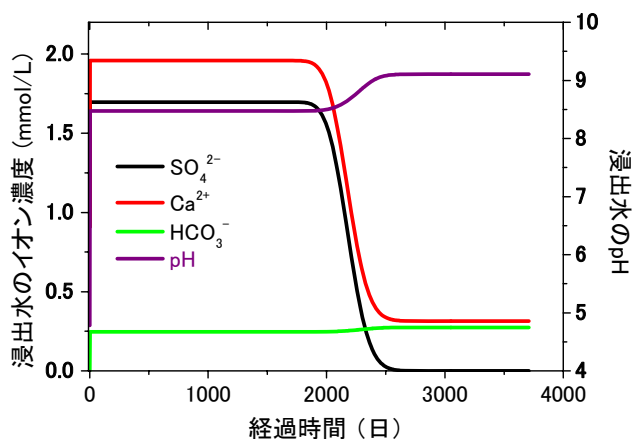


図6 仮想的な残土処分地からの溶出水の水質変化の予測結果