

沿岸域堆積岩における物質移行特性の数値解析的検討

ANALYTICAL STUDY OF TRACER TESTS IN A SEDIMENTARY ROCK ALONG COAST

須山泰宏*, 升元一彦*, 阿部泰典*, 戸井田克*

Yasuhiro SUYAMA, Kazuhiko MASUMOTO, Yasunori ABE, and Masaru TOIDA

At the safety assessment for a repository of high-level radioactive waste in a deep underground, it is important to investigate the transport properties of solutes in a rock mass on-site. As it is very difficult to investigate transport properties of solutes in a sedimentary rock on-site, "The integrated assessment system for transport of solutes" was developed. This system includes electromagnetic frequency tomography technique, hydraulic test technique, tracer test technique, and transport analysis technique of solutes.

To assess the result of tracer tests in a sedimentary rock along coast on-site, transport analysis technique of solutes which is one of this system was applied for analytical studies. These results suggest that analytical studies can estimate geological anisotropy and a hydrogeological model using the tracer tests information on-site.

Key Words: safety assessment, rock mass, tracer test, transport of solutes, sedimentary rock

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の最終処分施設建設地選定に際しては、安全評価に基づく検討が必要と考えられ、その過程で核種移行解析は重要な役割を担っている。精度の高い核種移行解析を実施するためには、原位置試験において岩盤の物質移行特性を取得することが必要である。しかしながら、これらの試験は花崗岩¹⁾での実績は比較的豊富だが、堆積岩においては実施事例が少ないのが現状である。そこで筆者らは、堆積岩を対象に、原位置試験から物質移行特性を取得するため、トモグラフィ、水理試験、物質移行試験及び物質移行解析という各要素技術をトータルシステムとして機能させる「物質移行総合評価システム」の開発を進めている。今回、沿岸域堆積岩(砂岩泥岩の互層)サイトにおいて実施した物質移行試験結果²⁾を、本システムの一つである「3次元物質移行解析コード」を用いて、数値解析的に検討した結果、対象岩盤の地質構造的異方性、及び水理地質構造モデルの推定に関する知見が得られたので、報告する。

2. 物質移行試験の概要

物質移行試験は、海岸沿いの砂岩泥岩の互層からなる岩盤(第三紀堆積岩)を対象に実施した。地層の走向は、ほぼ東西方向を示しており、北に70~80°の高角で傾斜している。地下水位はほぼGL-3.0mに位置しており、岩盤の一軸圧縮強度は数N/mm²~数十N/mm²である。物質移行試験に用いたボーリング孔は、長さ約35m、孔径φ150mmであり、試験区間にはφ100mmのストレーナー(長さ1m)を設置している。

物質移行試験は、2つのボーリング孔間(No.2孔とNo.3孔)で実施した(図-1参照)。物質移行試験区間は、事前の調査(コア観察、孔間応答試験等)で水

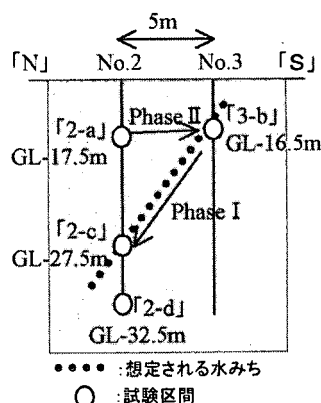


図-1 物質移行試験位置

* 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所

みちと考えられる区間 (Phase I) とそれとほぼ直交する区間 (Phase II) で実施した。Phase I は、一定濃度のトレーサーを連続的に注水井 3-b から注水 ($\Delta H=10\text{m}$) し、水みちと考えられる観測井 2-c と近傍の観測井 2-d で観測を行った。また、Phase II は、一定濃度のトレーサーを連続的に注水井 2-a から注水 ($\Delta H=12\text{m}$) し、揚水井 3-b で揚水 ($\Delta H=-2\text{m}$) し観測を行った。トレーサーには非吸着性の塩水 (NaCl) を使用し、塩水の濃度比 (c/c_0) はボーリング孔内で測定した電気伝導度を基に、求めた。それぞれの試験結果 (観測井の圧力応答、トレーサー移動状況) を図-2~4 に示す。図-2 より、観測井の全水頭が試験当初減少しており、注水により水理場が多少変化していることが伺える。また、図-3 より、注水終了後も僅かながらトレーサー濃度が上昇しており、これはバックグラウンド自体の変化が原因の一つと考えられる²⁾。

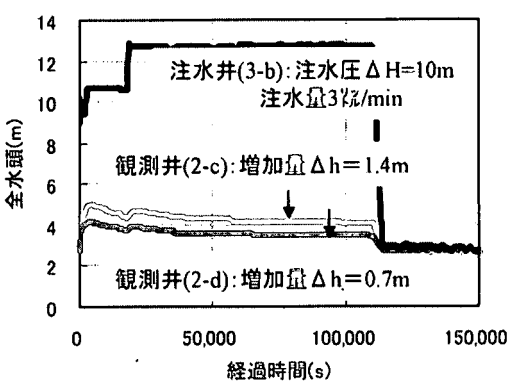


図-2 Phase I での観測井の圧力応答

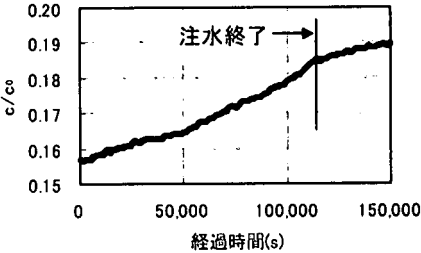


図-3 Phase I のトレーサー移動状況

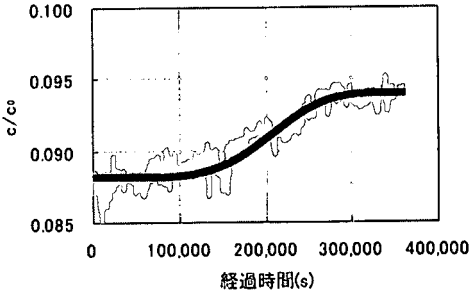


図-4 Phase II でのトレーサー移動状況

3. 地下水流動解析及び物質移行解析による数値解析的検討

(1) 目的及び検討方法

物質移行総合評価システムの各要素技術で明らかにできることを確認するため、原位置における物質移行試験結果を数値解析的に検討し、地質構造モデル及び水理地質構造モデルの推定を試みた。ここで、地質構造モデルは、地下水流動に影響を及ぼすと考えられる地質学的要素をモデル化したものであり、水理地質構造モデルは地質構造モデルに水理学的情報を付加したものである。今回、水理地質構造モデルは、対象領域が堆積岩であるため、多孔質媒体でモデル化した。

モデル化は3段階に分けて実施した。第1段階では Phase I の圧力応答の結果で地質構造モデルを絞り込み、第2段階では Phase I の注水量及びトレーサー移動状況により水理地質構造モデルの推定を行い、そして第3段階では Phase II の注水量・揚水量及びトレーサー移動状況により第1段階及び第2段階で推定した水理地質構造モデルの検証を行った。水理地質構造モデルの推定にあたり、数値解析的検討の妥当性を確認するのが目的であるため、透水係数 k については、感度解析的に1オーダー毎にケースを設定した。

(2) モデル化対象領域及び解析対象領域

モデル化対象領域は試験エリア近傍とした (図-5 参照)。また、モデル化対象領域には自然の地下水流動がない (動水勾配がない) と仮定した。そのため解析対象領域は、解析コードにおけるモデル化 (モデルの異方性の設定) のし易さを考慮し、図-5 に示すようにモデル化対象領域を X-Z 断面で約

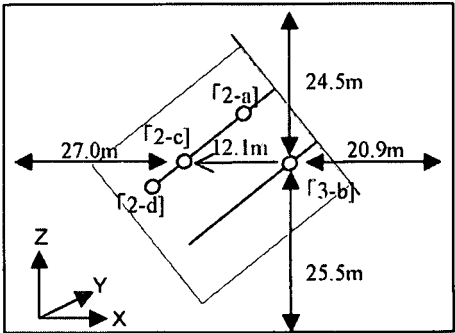


図-5 モデル化対象領域及び解析対象領域

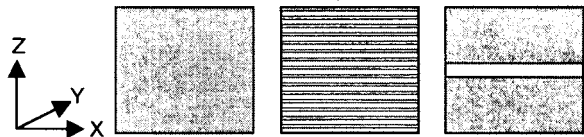
65° 時計回りに回転させて設定した。解析対象領域はX方向 60m, Y方向 40m, Z方向 50m とし、モデル化対象領域を含んでいる。地下水流動解析及び物質移行解析には、今回、海外での使用実績が豊富な Visual MODFLOW (waterloo hydrogeologic 社製) を使用した。

(3) 地質構造モデルの絞込み (第1段階)

1) 地質構造モデル
地質構造モデルでは、モデル化対象領域が堆積岩であるため、Phase I の水みちを図-6 に示すようにモデル化した。「A 等方・均質モデル」はモデル化対象領域がほぼ等方・均質である場合 (水みちが顕著でない場合)、「B 異方性モデル」はモデル化対象領域に砂岩層と泥岩層が層状に堆積したため、透水異方性が生じている場合、及び「C 薄層モデル」はモデル化対象領域に薄い高透水層 (1m 厚、ストレーナー長) が存在している場合である。

2) 物性値の設定及び解析条件の設定
地下水流動解析に用いた物性値は、原位置試験及びコアサンプルによる室内試験結果等を基に有効間隙率 $n_e = 0.2$ 、比貯留係数 $S_s = 10^{-6} 1/m$ (圧縮率より算定) とし、透水係数 k は地質構造モデルの評価のためパラメータとし、 $10^{-9} m/s \sim 10^{-4} m/s$ の範囲とした。試験ケースを表 1 に示す。本ケースにおいて透水性のコントラストの影響を確認する場合には、コントラストが 3 オーダー以内とした。

解析にあたり、上部境界及び側方境界は、固定水頭境界 (透水境界条件)、下部境界は、不透水境界条件とした。



A 等方・均質 B 異方性 C 薄層
図-6 Phase I での水みちの地質構造モデル

3) 解析結果
モデルの絞込みは、2 つの観測井 2-c, 2-d での全水頭増加量 Δh を用いて実施した (図-3 矢印部)。一例として、観測井 (2-c) における C 薄層モデルの全水頭増加量 Δh の結果を図-7 に示す。同図より、全水頭増加量 Δh はほぼ定常状態に達しているときの値をプロットしているため、同条件における透水係数 k の絶対値の違いによる全水頭増加量 Δh の変化は見られなかった。これらの結果は A 等方・均質モデル、B 異方性モデルにおいても同様である。各モデルの最小値と最大値の幅として整理した結果を図-8, 9 に示す。同図中に実際の観測値の全水頭増加量 Δh を示している。これらの図より、観測井 2-c と 2-d の全水頭増加量 Δh を模擬できたのは、C 薄層モデルのみであった。C 薄層モデルでしか実際の観測値を模擬できなかった理由は、圧力伝搬状況のイメージ (図-10 参照) から以下のよ

表-1 試験ケース

A等方・均質モデル	B異方性モデル		C薄層モデル	
	XY面方向	Z方向	薄層部	周辺岩盤部
10 ⁻⁹ m/s	10 ⁻⁶ m/s	10 ⁻⁹ m/s	10 ⁻⁶ m/s	10 ⁻⁹ m/s
10 ⁻⁸ m/s		10 ⁻⁸ m/s		10 ⁻⁸ m/s
10 ⁻⁷ m/s		10 ⁻⁷ m/s		10 ⁻⁷ m/s
10 ⁻⁶ m/s	10 ⁻⁵ m/s	10 ⁻⁸ m/s	10 ⁻⁵ m/s	10 ⁻⁸ m/s
10 ⁻⁵ m/s		10 ⁻⁷ m/s		10 ⁻⁷ m/s
		10 ⁻⁶ m/s		10 ⁻⁶ m/s
	10 ⁻⁴ m/s	10 ⁻⁷ m/s	10 ⁻⁴ m/s	10 ⁻⁷ m/s
		10 ⁻⁶ m/s		10 ⁻⁶ m/s
		10 ⁻⁵ m/s		10 ⁻⁵ m/s

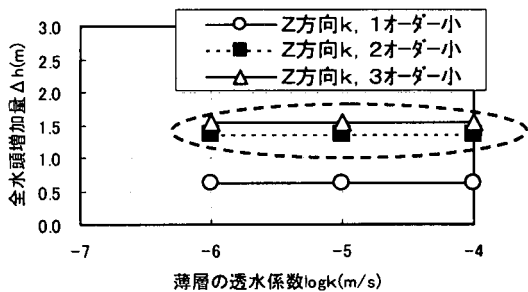


図-7 C 薄層モデルの全水頭増加量 Δh (観測井 2-c)

うに考えられる。A等方・均質モデルでは、圧力伝搬は均等に行われており、注入孔周辺にしか伝播していない。B異方性モデル・C薄層モデルは、XY方向に顕著に圧力伝播をしており、そのため観測点 2-c において、ほぼ実際の観測値を模擬できたと考えられる。しかし、B異方性モデルでは、解析メッシュ毎に異方性があるため、Z方向に圧力が伝播した場合、XY方向に地下水が流れるため、Z方向には十分に圧力が伝わらない。それと比較し、C薄層モデルでは、XY（薄層）方向に圧力が伝播した後、Z方向に均質に圧力が伝わるため圧力増加範囲が全般的に広がっている。そのため観測点 2-d においても圧力応答を模擬できたと考えられる。第1段階の検討結果、C薄層モデルが最も適した地質構造モデルであるといえる。

(4) 水理地質構造モデルの推定（第2段階）

1) 水理地質構造モデル

第1段階で選定された地質構造モデルの薄層部、周辺岩盤部の透水係数 k 及び、薄層部の厚さを対象に水理地質構造モデルの推定を行った。具体的な推定としては、2つの観測点 2-c、2-d で、全水頭増加量 Δh の模擬が可能だったケース（図-7 点線部、表-1 網掛けの6ケース）にて、物質移行解析を実施し、結果を比較検討した。

2) 物質移行解析結果

地下水流動解析の物性値及び解析条件は、第1段階と同じとした。また、物質移行解析においては、非吸着性のトレーサーを用いているため、遅延係数は1.0とした。また、分散長は0m（移流のみ）～12m（試験区間のスケール）の範囲とした。

物質移行解析を実施した結果、薄層部の透水係数 $k = 10^{-6} \text{m/s}$ と 10^{-5}m/s のケースでは、トレーサーが試験期間内に到達せず、4 ケースを検討対象から除外した。残りの2 ケースは、試験期間中にトレーサーが到達したが、到達量が多過ぎ、実際の観測値を全く模擬できなかった（図-11 薄層部1mのケース）。この原因として、水みちとなる薄層部の幅（ストレナー長の1m）が厚く、到達量が多くなるためと考え、薄層部の幅を変化させ、トレーサー移動状況の確認を行った。薄層部の厚さを減少させると、それに応じて薄層部の透水量係数も減少するため、到達するトレーサー量は減少する。ただし、薄層部を薄くしすぎると、周辺岩盤部の透水係数 $k = 10^{-6} \text{m/s}$ の場合に第1段階で検討した全水頭増加量 Δh が満足しなくなる（値が小さくなる）ため、最終的な推定は、薄層部の透水係数 $k = 10^{-4} \text{m/s}$ 、周辺岩盤部の透水係数 $k = 10^{-7} \text{m/s}$ のケースとした。薄層部の厚さを変化させて、物質移行解析を実施した結果、トレーサー移動状況及び注水井の注水量（実測値 $3 \text{ m}^3/\text{min}$ ）をほぼ模擬で

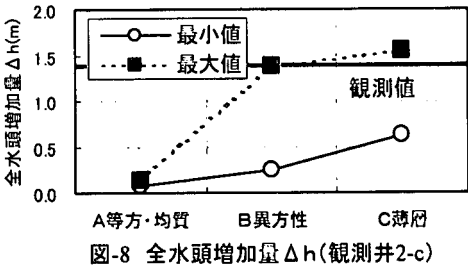


図-8 全水頭増加量 Δh (観測井2-c)

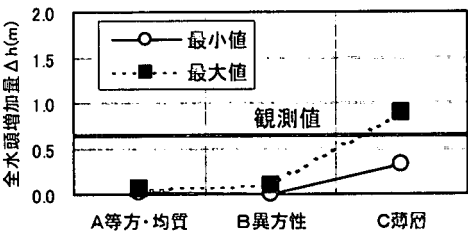


図-9 全水頭増加量 Δh (観測井2-d)

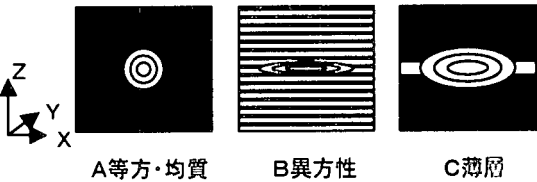


図-10 各モデルの圧力伝播状況イメージ(定常状態)

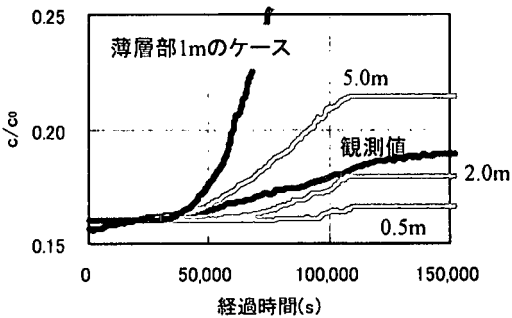


図-11 Phase I での物質移行解析結果(観測井2-c)

きたのは、薄層部の厚さが 12.5cm のケース（注水量の解析値 8 $\mu\text{L}/\text{min}$ ）であった。薄層部の厚さ 12.5cm の物質移行解析結果を図-11 に示す。以上より、分散長 0.5m から 5.0m の範囲で実際の観測結果を網羅することができた。しかし、実際の観測結果は、トレーサの注入終了後も徐々に増加しており、バックグラウンドとしてのトレーサ濃度（電気伝導度）の変化が生じていると考えられるため、分散長の特定は行わなかった。

(5) 水理地質構造モデルの検証（第3段階）

(4)で推定した水理地質構造モデルを検証するため、物質移行解析を実施し、Phase II の試験結果（注水量・揚水量及びトレーサ移動状況）との比較を行った。

物性値及び解析条件は、これまでと同様である。注水量及び揚水量の観測値と解析結果を比較したものを表-2 に示す。同表より、注水量はほぼ一致しており、また、揚水量は解析結果が2 倍程度の値を示しているが、ほぼ妥当な値であると考えられる。トレーサ移動状況については、一例として、分散長 5m の結果を図-12 に示すが、両者の結果は完全には一致しなかった。観測値と解析結果の大きな違いは、観測値では注入部のトレーサ濃度よりかなり低い値でピークが確認されているが、解析結果は継続して増加傾向を示していることである。解析結果が異なる結果を示した原因として、今回推定した水理地質構造モデルでは、注入部 2-a はほぼ均質な場であると考えているため、トレーサはほぼ同心円状に拡散し、揚水部 3-b のトレーサ濃度は、試験を継続すれば投入しているトレーサ濃度まで上昇することになるためと考えられる。

表-2 Phase II での注水量・揚水量

	注水量(2-a)	揚水量(3-b)
観測値	0.38 $\mu\text{L}/\text{min}$	1.0 $\mu\text{L}/\text{min}$
解析値	0.36 $\mu\text{L}/\text{min}$	2.4 $\mu\text{L}/\text{min}$

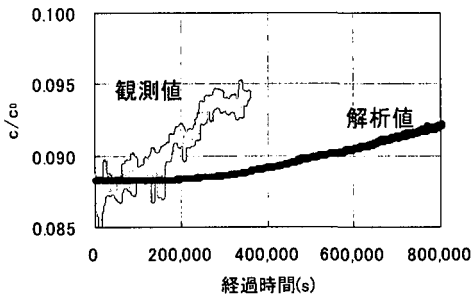


図-12 Phase II での物質移行解析結果(揚水井3-b)

4. 考察

数値解析検討の結果、地下水流動の水理応答結果に加え、物質移行試験のトレーサ移動状況を考慮することで、より効果的に水理地質構造モデルの推定ができたと考えられる。しかし、Phase II のトレーサ移動状況を模擬できなかったことから考えると、今回の数値解析的検討では、モデル化対象領域の評価が十分に行えなかったものと判断される。その原因としては、Phase I の区間のみで推定を行ったため、他の区間の水みちを十分に評価できなかったことが考えられ、数値解析的検討のみで水理場を評価することには限界があり、トータルシステムとして水みちを評価することが必要と考えられる。また、透水性が低い岩盤を対象とする場合、動水勾配を大きくすることによる水理場の変化や、試験期間が長期間にわたるため僅かなバックグラウンドの変動も解析で考慮することが必要であろう。

今後、今回の数値解析的検討結果を踏まえ、「物質移行総合評価システム」のさらなる高度化を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 内田雅大, 澤田淳: スウェーデン HRL の長期揚水試験とトレーサ試験の評価 2. 三次元亀裂ネットワークモデルによる解析とその結果, 第9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 157-162, 1994.
- 2) 阿部泰典, 須山泰宏, 田中真弓, 塩釜幸弘: 沿岸堆積岩における物質移行試験について, 第31 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2001.