

沿岸域堆積岩における物質移行試験について TRACER TESTING IN A SEDIMENTARY ROCK ALONG COAST

阿部泰典*, 須山泰宏*, 田中真弓*, 塩釜幸弘*

Yasunori ABE, Yasuhiro SUYAMA, Mayumi TANAKA and Yukihiko SHIOGAMA

In a repository of high-level radioactive waste, it is necessary to estimate the migration properties of material dissolved in a ground water in a rock mass for the safety assessment. The result of a tracer testing in an actual site could contribute to modeling of hydrogeological structure or input of parameter for transport analysis. An *in-situ* test was conducted in a sedimentary rock using the developed equipment for tracer testing. From the result, 1) hydrogeological structure, 2) flow path and 3) diffusion coefficient and dispersivity could be estimated comparing with the results of an electromagnetic and resistivity tomography or a diffusion-advection analysis.

Key Words: rock mass, tracer test, sedimentary rock

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、安全評価上天然バリアである岩盤内の地下水流動と共に、地下水に溶解した物質の移行特性をサイト特性調査段階から把握しておくことが重要である。物質移行特性に関する実際の現象に近いモデル化やパラメータの取得を行うためには、原位置で実スケールでのトレーサー試験が有効な方法である。トレーサー試験はこれまで、多孔質媒体でモデル化できる地盤や亀裂性岩盤の単一亀裂を対象とした実施例¹⁾が多く、堆積岩を対象とした事例は少なかった。

筆者らは、原位置におけるトレーサー試験を含む「物質移行総合評価システム」を開発中である。本システムは、ボーリング孔間の地盤や岩盤を対象に、①「連続波型の電磁波トモグラフィ」を用い、透水特性を表現する水理地質構造を精度良く把握することによって、評価対象とすべき水みちを明らかにし、②「サイナソイダル透水試験(水理試験)」及び③「原位置物質移行試験」にて、その水みちの透水・物質移行特性を精度良く把握し、それらのデータを④「3次元物質移行解析コード」を用いて、総合的に評価するものである。本システムにより、評価対象とすべき水みちの特定、透水・物質移行特性の把握、及び解析・評価を総合的に行うことができる。

今回は、そのシステムのうち、原位置におけるボーリング孔を利用して多区間での同時測定が可能な物質移行試験装置の適用性確認試験を堆積岩サイトにおいて実施した。その結果、1) 複数の区間でトレーサー試験を実施することによる透水試験では得られない水理場に関する情報の取得、2) 電磁波、比抵抗トモグラフィを併用し、トレーサーを追跡することによる流動経路の把握、3) 物質移行解析結果との比較による減衰係数や分散長といった物質移行パラメータの決定、を行える可能性が確認できた。本報告では、この中で試験方法と試験結果について主に述べる。

* 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所

2. 試験概要

(1) 試験孔レイアウト

今回、試験のために4本のボーリング孔を図-1に示す間隔で直線上に削孔した。削孔深度はNo.1,2,4孔で40m、No.3孔では36.5mで、No.1,2,3孔にはφ100mmの、No.4孔にはφ75mmの塩ビケーシングが設置してある。No.1孔は深度17.15mから5m毎に5カ所、70cmのストレーナーが切っており、周辺岩盤と塩ビケーシングの間はストレーナーを含む1m区間は珪砂で、その他はベントナイトペレットで埋め戻されている。No.2孔はNo.1孔と同様にストレーナーが設置されており、No.3孔はストレーナーの位置が深度11.15mから5m毎に5カ所、70cmのストレーナーが切ってある。本報告においては、No.1,2,3孔の各5カ所のストレーナーについて、

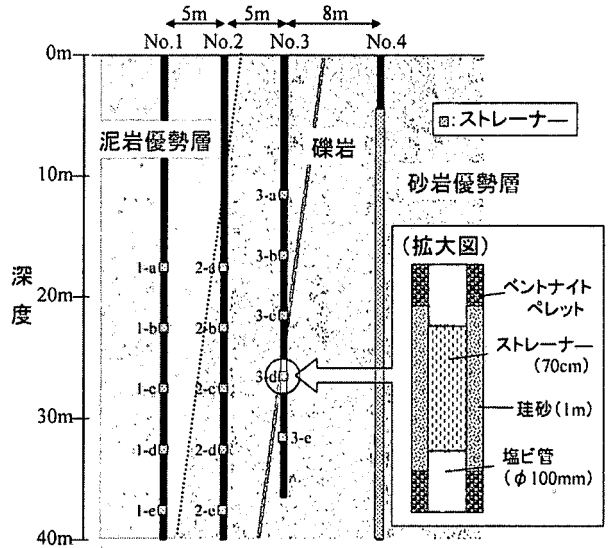


図-1 試験孔配置図

浅い深度から順に1-a, 1-b, …, 3-d, 3-eと呼ぶことにする(図-1参照)。No.4孔は深度4.5mから40mまで連続してストレーナーが切っており、周辺岩盤と塩ビケーシングの間は珪砂のみで埋め戻されている。

試験サイトの地質は第三系の砂岩泥岩互層で薄い礫岩層を挟在する。地層の走向方向はボーリング孔の配列方向にほぼ直交する方向で、70~80度の高角で傾斜しており、No.1孔側で泥岩優勢層が、No.4孔側で砂岩優勢層が分布している。削孔はコアボーリングで行ったが、微小な亀裂が多く入っており、全区間にわたって健全なコアを採取することは困難であった。相対的に砂岩部は泥岩部に比べRQDが小さくなっている(図-2参照)。また、地下水位は、ほぼGL-3mに位置していた。

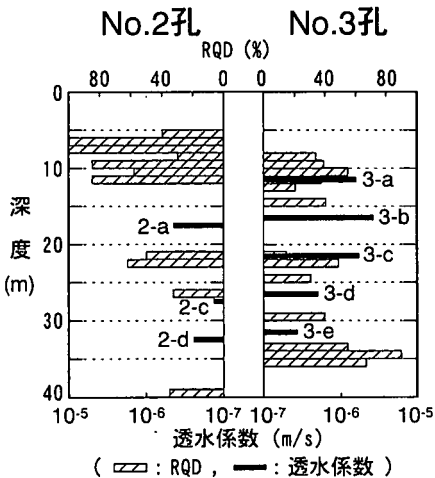


図-2 試験孔の水理地質

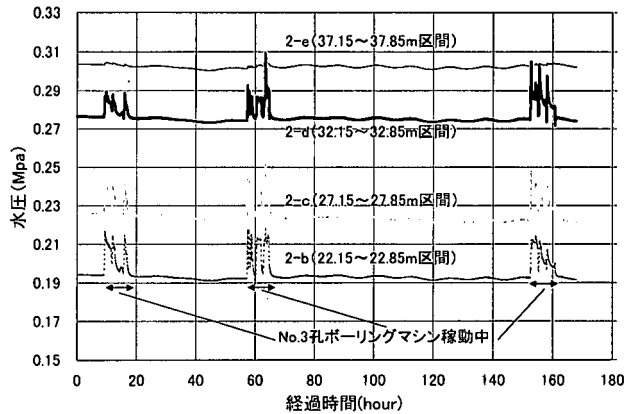


図-3 No.2孔の圧力モニタリング結果

(2) 試験サイトの水理地質

試験前にサイト周辺の間隙水圧を把握するため、No.2孔の深部4区間(2-b~2-e)において対象区間をバツカーで閉塞し、圧力モニタリングを実施した。図-3にモニタリング結果を示す。No.2孔におけるモニ

タリングは No.1 孔, No.3 孔の削孔中に実施したため, 削孔の影響による間隙水圧の乱れがモニタリング結果に表れている. この影響は No.3 孔削孔時のみに見られ, No.1 孔削孔時には見られなかったことから No.1 孔と No.2 孔は水理的に連続していない事が分かった. また, 一番深いストレーナー位置の 2-e では削孔の影響は見られないため, この深度においては, No.1 孔, No.3 孔のいずれとも連続性は少ないと判断した. 各モニタリング区間における間隙水圧の値は, 削孔の影響のないところを見ると潮汐の影響による変動が見られるが, ほぼ深度毎に大きくなっていることがわかる.

No.2 孔の浅部 4 区間 (2-a~2-d) 及び, No.3 孔の全区間 (3-a~3-e) においてルジオン試験を実施した結果, 透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{m/s}$ であった (図-2 参照). 今回のボーリングでは, コア回収時に破損したコアがあったため, RQD は, 正確な原位置での亀裂状態を完全に反映しているとは言えず, 透水係数との相関は認められない. No.3 孔でのルジオン試験実施中に, No.2 孔の区間 2-c, 2-d において間隙水圧の変化をモニタリングしており, No.3 孔 3-b 区間試験時における No.2 孔 2-c 区間での圧力応答が最も大きかった.

(3) 試験サイト周辺の水質

ボーリング終了後, 各孔においてサンプラーによる採水を行い水質分析を行った. 水質組成については, トリリニアダイアグラムで No.4 孔がやや海水型に位置するが, その他の 3 孔はいずれも淡水型に位置することから, No.4 孔はやや海水の影響を受けていることがわかった²⁾. 図-4 に削孔後からトレーサー試験前までの電気伝導度 (EC) の経時変化を示す. 電気伝導度は, 海水が 20mS/cm 以上, 周辺地下水 (井戸水) は 0.4mS/cm であることから, 孔内水に海水は殆ど混合していないことがわかる. また, 図-4 から No.3,4 孔は 0.6mS/cm , 1.0mS/cm でほぼ安定していたのに対して, No.1,2 孔は経時的に上昇傾向にあった. この上昇は, 両孔における Na イオンの増加に起因しており, この理由としては埋め戻しに使用したベントナイトペレットの Na が溶出した事が考えられる.

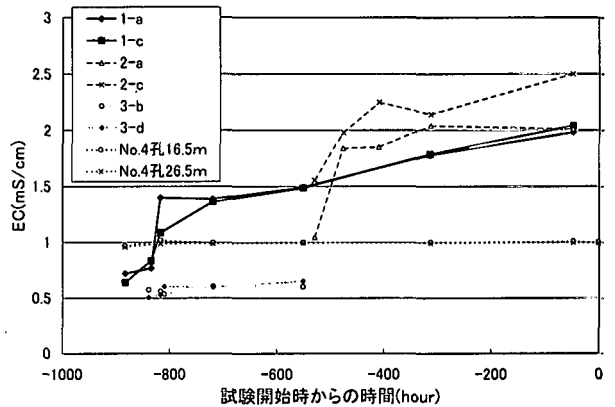


図-4 試験前の電気伝導度推移

3. 物質移行試験

(1) 試験装置の概要

今回の試験に用いた試験装置を図-5 に示す. ゾンデは投入用・観測用・揚水用の 3 種類で, いずれのゾンデもエアパッカーで閉塞した投入・観測区間に EC センサー及び圧力センサーを設置しており, トレーサーの移行状況は EC 値の変化によって把握できる. 本装置の特徴は, 地上からの送水ポン

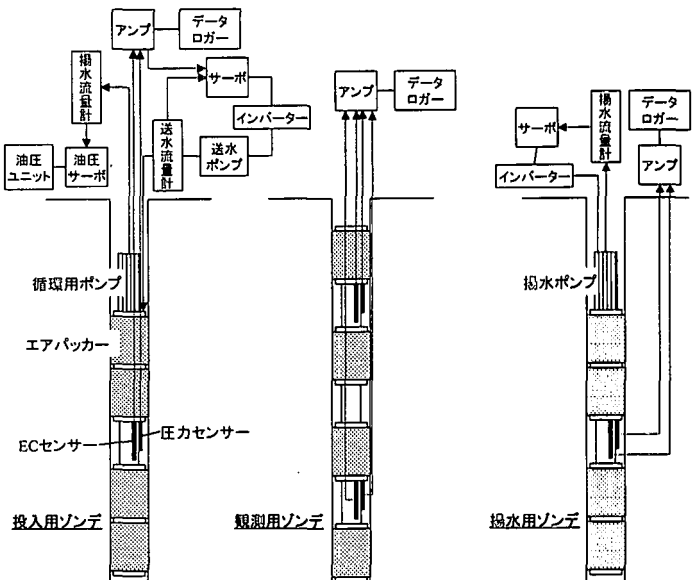


図-5 試験装置

プに加えて、投入用ゾンデの投入区間近傍に循環用の揚水ポンプが設置されていることである。この揚水ポンプにより、投入区間の圧力を間隙水圧以下を含む任意の値に設定できるため、投入区間の圧力を間隙水圧に保ったままトレーサーを循環させ、投入区間内が目標濃度に到達次第、投入圧力に変えることができる³⁾。このことにより、目標トレーサー濃度への迅速な切り替えが行え、明瞭な移行フロントが実現できる。また、投入用ゾンデと揚水用ゾンデを併用し、投入側と観測側の動水勾配を大きくすることで、トレーサーの回収率を高めることができる。

(2) 試験方法

試験は、削孔時の間隙水圧変動から、水理的に連続していると考えられる No.2-No.3 孔間で Phase I, Phase II として 2 回実施した (図-6 参照)。Phase I ではルジオン試験時に圧力応答が大きかった 3-b 区間と 2-c, 2-d 区間を対象とし、投入ゾンデと観測ゾンデを用いて試験を行った。投入圧は 3-b 区間の間隙水圧+水頭 10m を目標とした。Phase II では、試験距離が最短のパスのうち、透水性の大きい 3-b 区間と 2-a 区間を対象とし、より多くのトレーサー回収を目的に投入ゾンデと揚水ゾンデを用いた。投入圧は 2-a 区間の間隙水圧+水頭 12m を目標とした。揚水量は、水理場の安定性から投入量と同じ量であることが理想であるが、回収率を上げるため、周辺地下水位を急激に低下させない最大揚水圧として 3-b 区間の間隙水圧-水頭 2m と設定した。表-1 に試験条件を整理した。Phase I 終了後、塩水投入区間に水道水を一週間投入し、さらに 2 ヶ月後に Phase II を実施した。また、トレーサーには EC を 18mS/cm に調節した非吸着性の NaCl 溶液 (NaCl 濃度 10,000ppm 相当) を用いた。

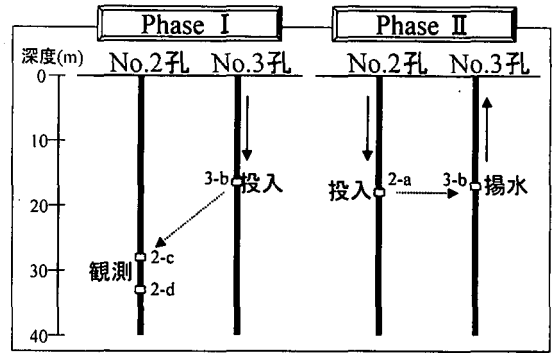


図-6 投入方法

表-1 試験条件

	投入位置	観測位置	圧力 関連項目						E C 関連項目			
			投入側圧力水頭 (m)			観測・揚水側圧力水頭 (m)			動水勾配	トレーサー投入量 (L)	投入時間 (hour)	EC変化量 (mS/cm)
			開始時	終了時	変化	開始時	終了時	変化				
Phase I	3-b	2-c	13.2	23.2	10.0	24.2	25.6	1.4	0.71	5900	31	0.46
		2-d				29.2	29.9	0.7				0.60
Phase II	2-a	3-b	14.2	26.2	12.0	15.7	12.0	-3.7	2.59	3500	147	0.1

(3) 試験結果

図-7 に試験区間における電気伝導度の経時変化図を示す。Phase I では、2-c 区間では投入後約 1 時間で EC の上昇が見られたが、2-d 区間では投入時間中に顕著な EC 上昇は見られなかった。Phase I は、EC 値は上昇中であったが、トレーサーの周辺環境へ及ぼす影響を考慮し試験を終了した。また、投入終了後も 2-c 区間では EC の上昇が多少ではあるが継続しており、これは、ベントナイトベレット溶出による影響と思われる。

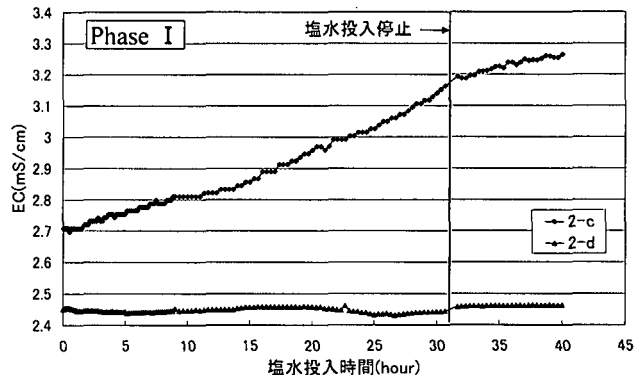


図-7 トレーサー試験結果 (その1)

Phase IIでは、投入後約 50 時間後から EC が上昇を開始し、約 120 時間後に EC 値が 1.7 mS/cm 付近で安定した値に到達した。この時点で、トレーサー（18mS/cm）と周辺地下水（1.58mS/cm）が混入した結果、EC が平衡に到達したと仮定すると、3-b 区間におけるトレーサーの混入率は全体の揚水量の 0.6% となる。これがトレーサーの回収量に相当するため、投入トレーサー量に対する比率を求めると、トレーサー回収率としては約 1.6% となり、(2-a→3-b) 区間におけるトレーサー回収は、揚水用ゾンデを用いても困難であったことがわかる。また、Phase II の値に変動があるのは、揚水を行っているため試験区間に水の流れが生じていることが影響していると考えられる。

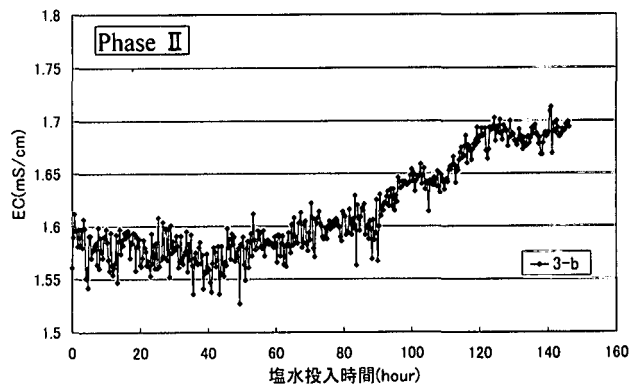


図-7 トレーサー試験結果（その2）

今回の試験結果からサイトの水理地質構造を以下に考察する。Phase I において、2-c 区間における圧力応答は水頭で 1.4m に対し、2-d 区間は水頭で 0.7m と 1/2 であるが、2-c 区間の破過曲線では投入後 1 時間で上昇を開始しているのに対し、2-d 区間では全く変化が見られない。また、Phase II の (2-a→3-b) 区間は、Phase I の (3-b→2-c) 区間に比べ、投入・観測区間の動水勾配は約 4 倍であるにもかかわらず、EC の上昇量は小さかった。これらのことから、3-b 区間と 2-c 区間の間には、水理的に連続した高透水構造が考えられ、これは地層の傾きの方向と一致していることから、堆積構造に沿った連続的な亀裂群の存在等が考えられる。また、当サイトでは、全体を均質な水理場としては想定出来ないことがわかった。

4. おわりに

今回は、原位置におけるボーリング孔を利用する物質移行試験装置を開発し、堆積岩サイトにおいて適用性確認試験を行った。その結果、低透水性の堆積岩においても、物質移行特性を取得するための基礎となるデータが取得できることがわかった。今後は、本結果と電磁波・比抵抗トモグラフィの併用による、より詳細なトレーサーの流動経路の把握、及び、物質移行解析結果との比較による物質移行パラメータの決定についても検討して行く予定である。

参考文献

- 1) 内田雅大, 澤田淳, 高原弘幸, 渡辺邦夫: 釜石原位置試験場 KH-7 孔, KH-8 孔間におけるトレーサー試験, 第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.181-186, 1994.
- 2) 戸井田克, 升元一彦, 田中真弓: 沿岸域堆積岩中に賦存する地下水の水質について, 日本地下水学会 2000 年秋季講演会, pp.174-175, 2000.
- 3) 塩釜幸弘, 渥美博行, 安井信吾, 阿部泰典: 岩盤における孔間透水試験装置について, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集共通セッション, pp.264-265, 2000.