

トレーサー試験

Tracer Test

細 谷 真 一 (ほそや しんいち)

(株)ダイヤモンドコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部

1. トレーサー試験とは

トレーサー試験とは、物質の移動をトレーサー（追跡子）によってトレース（追跡）する試験である。ボーリング孔を利用したトレーサー試験の概念を図—1に示す。

トレーサー試験は、原理が単純であるために古くから行われており、西暦90年頃に、Tachonitis という国の王 Philippus によって池に投げ入れられたもみ殻が、地中を通してヨルダン川に注いでいる泉に現れた、という記録がユダヤ民族の歴史書の中に見られる²⁾。

地盤工学分野で実施されてきた原位置トレーサー試験の目的を分類すると、次のようになる¹⁾。

(1) 水みちの連続性評価

水みちが連続していると考えられる場合に、その上流側にトレーサーを投入し、下流側でトレーサーを観測すると、その連続性が評価できる。地すべり地の水みち確認、ダム基礎岩盤の漏水経路把握などが具体的な例である。

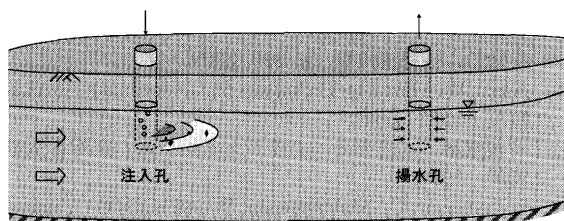
(2) 地下水の流動方向や流動速度の評価

地下水の流動方向や、汚染物質の移動時間を予測するために必要な地下水流速（平均間隙流速）を求める。土壌・地下水汚染の実態把握などが具体的な例である。

(3) 物質移行特性の評価

分散長や有効間隙率のような物質移行特性を求める。地下水汚染対策の設計、地層処分施設の安全性評価などが具体的な例である。

調査対象地盤の上流側で水位や圧力を変化させたとき、それが下流側で観測できたとしても、圧力伝播ではその間の地下水の流れを直接見ているのではない。これに対して、トレーサーの移動が下流側で観測できれば、その間を地下水が流れていることが確かめられ、トレーサーの速度から地下水の速度を求めることができる。これがトレーサー試験の意義である。

図—1 ボーリング孔を利用したトレーサー試験の概念¹⁾

2. トレーサー試験の試験方法

ボーリング孔を利用する原位置トレーサー試験は、地盤へのトレーサーの投入／注入方法と採水／揚水方法に基づいて、表—1に示す4種類の典型的な試験方法に分類することができる。同表では、投入と採水は水圧をできるだけ変化させない方法、注入と揚水は水圧を変化させる強制的な方法进行している。

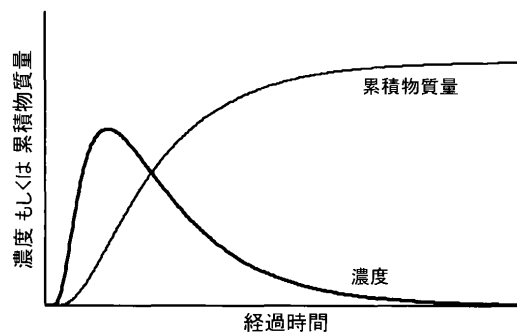
トレーサー試験を実施する場の圧力条件だけではなく、トレーサーとして使用する物質を決めることも試験方法の重要な要素である。トレーサーとしての一般的な要件は以下のとおりである。

- 水の密度や粘度を大きく変化させないこと
- 化学的に安定であること（分解、反応し難い）
- 検出が容易であること
- 自然状態の濃度（バックグラウンド）が低いこと
- 無害であること

良く利用されるトレーサーは、塩化ナトリウム、臭化カリウム、ヨウ化カリウムのようなハロゲン化物やウランのような染料である。最近では、分析機器の高精度化、ナノテクノロジーの応用などによって、ますます多様なトレーサーが使用されるようになってきている。

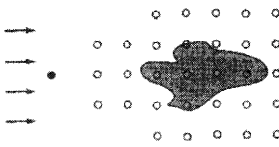
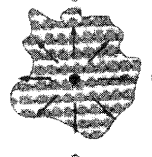
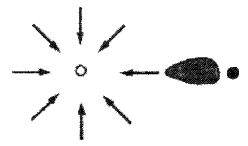
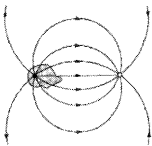
3. トレーサー試験の解析方法

トレーサー試験を実施して、下流側でトレーサーが検出されると、図—2のように経過時間と濃度あるいは累積物質量の関係（ブレイクスルーカーブ）を描くことができる。トレーサー試験の解析では、ブレイクスルーカーブから解析解や数値解析によって地下水流速（平均間隙流速）や分散係数が推定される場合が多い。最近では、地盤の不均質性を考慮した評価も行われている。

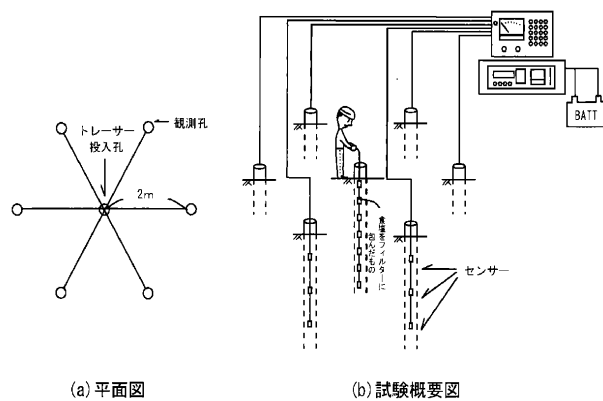
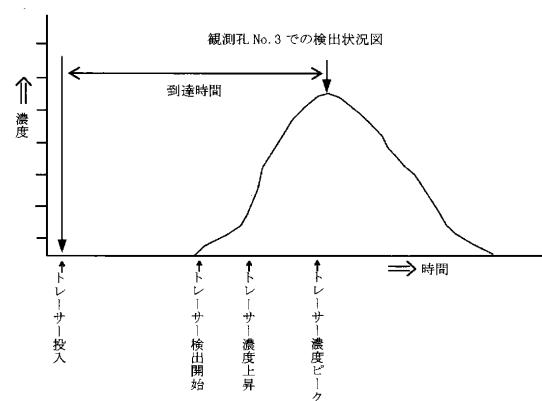


図—2 ブレイクスルーカーブの例

表—1 水理条件に基づくボーリング孔を用いた原位置トレーサー試験の分類¹⁾

試験方法	トレーサーの投入/注入	地下水の採水/揚水	試験イメージ	長所	短所
自然動水勾配試験	投入	採水		①自然の(乱さない)地下水流動条件で地下水流速・流速、物質移行特性の評価が可能 ②2次元的评价が可能(複数孔によるトレーサー観測) ③横分散の評価が可能	①試験時間が長い ②事前調査によって、精度の良い地下水流向の把握が必要(帯れ目系岩盤では要注意) ③複数の観測孔が必要 ④試験後にトレーサーが残留する
放射状分散試験	注入	採水		①トレーサーを注入するため、試験の制御が比較的容易 ②分散長の推定に適している ③トレーサー物質が1種類でよい(収束試験との比較) ④2次元的评价が可能(複数孔によるトレーサー観測)	①帯れ目系岩盤や不均質な多孔質地盤では、トレーサーが観測孔間を通過する可能性がある ②試験後にトレーサーが残留する ③多くの水が必要になる(目詰まりの心配もある)
放射状収束試験	投入	揚水		①地下水を揚水するため、試験の制御が比較的容易 ②2次元的评价が可能(複数孔によるトレーサー投入) ③試験後にトレーサーが残留しにくい	①トレーサーを投入するため、理論解を適用しにくい(井戸条件に依存) ②分散長の推定精度が低い ③2次元的评价には複数のトレーサー物質が必要 ④トレーサーの希釈が大きい
ダイポール試験	注入	揚水		①孔間の地下水流速を大きいので、トレーサーが到達しやすい(透水性が低い場合、孔間距離が長い場合に有利) ②試験後にトレーサーが残留しにくい	①トレーサーの希釈が大きい(高濃度のトレーサーを投入する必要がある) ②試験範囲が明確ではない(結果的には2孔間の平均的な評価になる) ③多くの水が必要になる(目詰まりの心配もある)

注釈 ●がトレーサー投入・注入孔。○が観測孔。矢印が地下水の流動方向、網掛けがトレーサーの移動領域(トレーサーブリューム)を表す

図—3 トレーサー試験の実施例³⁾図—4 観測孔の濃度変化の例³⁾

4. トレーサー試験の実施例

トレーサー試験の実施例として、地下水汚染の対策検討において行われた自然動水勾配試験を紹介する³⁾。

この試験の目的は、礫層中の地下水の流向と流速を測定することである。トレーサーは、フィルターに包んだ食塩を孔内で溶解させて地盤に投入した(図—3 参照)。これを、周辺に配置した6孔の観測孔において、電気伝導度の変化として観測した。観測孔における濃度変化の例を図—4に示す。トレーサーの到達時間から地下水流速が、トレーサーが到達した観測孔の方向から地下水の流向が決定された。

トレーサー試験によって得られた地下水流速は、透水係数、動水勾配、有効間隙率(文献値)から計算した値に比べてかなり大きく、この例ではトレーサー試験が有効であったと考えられる。

その他の実施例、試験方法、解析方法の詳しい解説は参考文献^{1), 2), 4)}を参照していただきたい。

5. ま と め

トレーサー試験は、地盤中の物質移動を直接測定する技術として、地盤工学分野でもニーズが高いにもかかわらず、実施・評価が難しいため、まだ実施例が少ない。今後、試験方法や解析方法の整理が進み、より使いやすい技術となるとともに、実施例が増えて、その有効性がより広く認識されることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 日本地下水学会 原位置トレーサー試験に関するワーキンググループ：地下水のトレーサー試験 地下水の動きを知る、技報堂出版，p. 396, 2009.
 - 2) Käss, W.: *Tracing Technique in Geohydrology*, BALKE-MA, p. 581, 1998.
 - 3) 各務原地下水研究会：よみがえる地下水，京都自然史研究所，1994.
 - 4) Leibundgut, C., Maloszewski, P. and Külls C.: *Tracers in Hydrology*, WILEY-BLACKWELL, p. 415, 2009.
- (原稿受理 2011.6.10)