

粘土ライナーの透水試験と遮水性能の評価について

Hydraulic Conductivity Test and Barrier Performance Evaluation of Clay Liners

勝見 武 (かつみ たけし)

京都大学助教授 大学院地球環境学堂

嘉門 雅史 (かもん まさし)

京都大学教授 大学院地球環境学堂

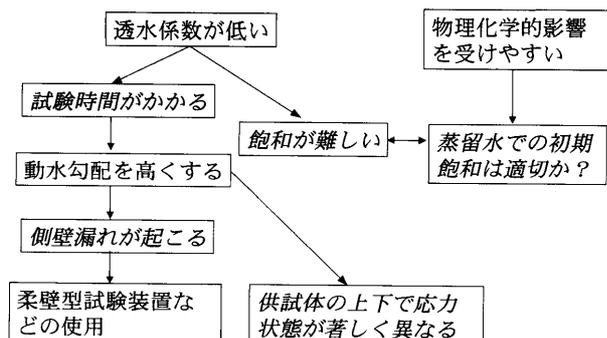
1. $k < 1 \times 10^{-7}$ cm/s は不透水か？

土質力学の教科書には、透水係数 1×10^{-7} cm/s 以下の土は実質的に「不透水」とする図が掲載されているものが多い。難透水性材料の透水係数を求めるには「圧密試験」を行えばよいとしているものもある。一方、欧米主要国のレギュレーションでは、廃棄物処分場の遮水工には粘土ライナーを用い、その透水係数は 10^{-7} cm/s 以下とすることが規定されている。我が国でも透水係数 10^{-7} cm/s 以下を仕様とした粘土ライナーの遮水工をもつ処分場がいくつか建設されている。透水係数 10^{-9} cm/s 程度が得られるジオシンセティッククレイライナー (GCL) の適用も始まっている。また、放射性廃棄物地中処分の人工バリアの透水係数として $10^{-10} \sim 10^{-11}$ cm/s レベルの議論が進められている。

地盤工学がその対象領域を広げ、廃棄物処分や土壌・地下水汚染対策などの環境問題への取組みを進めている現状を考えると、そろそろ、透水係数 10^{-7} cm/s 以下を不透水とはせず、難透水性土質材料として透水係数・遮水性能を評価する枠組みを示すべき時機と考えられる。

2. 問題点の整理

難透水性の土質材料の透水試験を行う際の問題点を図一に整理した。透水試験の実行を難しくしているのは、透水係数が低いことと、主体となる構成材料の粘土が物理化学的影響に敏感なことに起因する。したがって、低透水性であるため初期飽和が難しいことに加え、廃棄物浸出水に対する遮水性能を評価する際の初期飽和に蒸留水や脱イオン水を使うことの是非が問題となる。また、



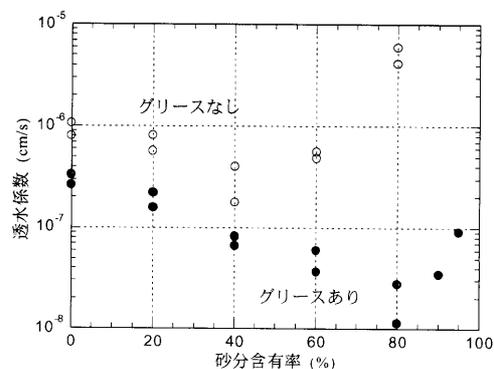
図一 難透水性土質材料の透水試験における問題点の整理

透水係数が低いため、所要の試験終了条件を満たすためには長時間を要する。しかし、試験時間の短縮のために動水勾配を大きくし過ぎると側壁漏れが生じ、また、供試体の上下での有効応力の差違が無視し得なくなり、要素試験とみなせなくなる。

3. 試験装置と方法

試験装置は柔壁型（三軸試験装置を含む）と剛壁型とに大別される。柔壁型装置は供試体側面をメンブレンで覆い、作用水頭圧よりも大きなセル圧をかけることにより、メンブレンを供試体側面に密着させて側壁漏れを防ぐ機構である。ASTM では、難透水性材料の試験には柔壁型装置を用いることとされている。しかし、柔壁型装置は側壁漏れ防止に完璧というわけではなく、ソイルセメントやアスファルトコンクリートのように固い材料を試験した場合、メンブレンが供試体側面に十分に食い込まないため側壁漏れを生じた例があるが、図二のようにグリースの塗布などによって解決が図られる^{1),2)}。

一方、剛壁型透水試験装置は機構上、側壁漏れが起こりやすい。しかし、樹脂等の側壁処理を施すことによって側壁漏れはかなり回避できるようなのである。もう一点、剛壁型装置の短所は、柔壁型装置ではセル圧の調節によって供試体に作用する有効応力を制御できるが、剛壁型では供試体への作用応力を制御できない。しかし、供試体の圧縮性が低ければ有効応力の大小が透水係数に及ぼす影響は無視しうるほど小さいと考えられるので、ソイルセメントや高密度のベントナイト混合土などの比較的



図二 ソイルセメント供試体の透水係数の例¹⁾ (横軸の砂分含有率の増加に伴い、供試体側面が粗になり側壁漏れが起こりやすくなるが (○)、グリースを塗布することにより回避できている (●))

論文

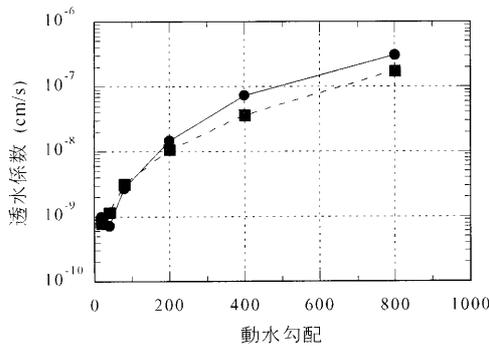


図-3 動水勾配と透水係数の関係 (ベントナイト混合土)⁵⁾

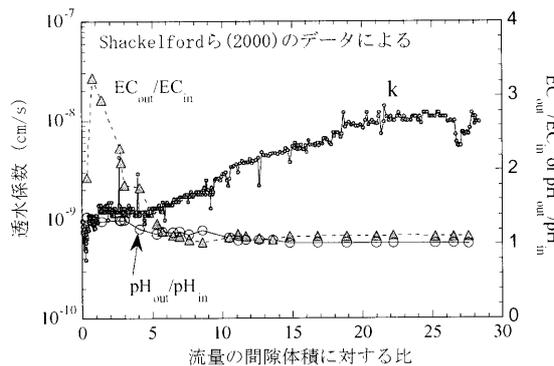


図-4 0.012 mol/L CaCl₂ 溶液に対する GCL の透水試験結果⁶⁾

固い材料は、側壁漏れの回避が保証できるなら剛壁型装置は十分使用に耐えうると考えられる。

化学物質溶液を透水させる場合、粘土表面の拡散電気二重層の発達が増害されるため、透水に寄与する間隙体積は増加し、透水係数は増加する。しかし、柔壁型装置を用いた場合、セル圧が供試体を圧縮するため透水係数が増加せず、危険側評価を与えうる例も示されている³⁾。このような場合は、剛壁型装置の方が原位置に近い状況を再現できると考えられる。

圧密試験から透水係数を算出する方法はインデックス試験にとどめるべきで、材料のスクリーニング等には適用しうるが、性能評価や設計目的としては無理があると考えられる。

4. 試験条件

供試体のサイズ、セル圧・拘束圧、初期飽和の方法、動水勾配、試験継続時間、等がクリティカルな試験条件である。供試体寸法については、現地採取したサンプルの場合、直径30 cm 以上あれば品質の空間的ばらつきを考慮しうるとされている⁴⁾。セル圧や拘束圧は、現地の条件等を考慮して設定すればよい。動水勾配が著しく大きいと図-3のように浸透力によって細粒分が流失し、透水係数が増加した例がある⁵⁾。ASTM では標準締めモールドサイズ (高さ116 mm) の供試体で動水勾配30以下としており、これは供試体上下の有効応力の差を34 kPa 以下にすることと等価である。よって、GCL のように薄い材料では動水勾配を大きくしても差し支え

ない⁶⁾。このことは必ずしも、現地の層厚を無視して、薄い供試体に大きな動水勾配をかけてもよいということではない。厚い遮水層は、ある程度の厚さのある供試体で実験すべきである⁷⁾。

試験終了のための判断条件として ASTM 規格では、(1)流入量と流出量がほぼ等しくなること (相対差が25%以内)、(2)透水係数値が安定すること (計測値4回以上について25~50%以内の変動) とされている。さらに、廃棄物浸出水など物理化学的・化学的影響の考慮が必要な場合には、(3)供試体の間隙の体積の2倍の流出量を得ること、(4)流出量と流入水の化学特性がほぼ等しくなること、等により、化学物質と粘土との反応のやり取りが十分に進んだことを保証する必要がある。なお、(3)の「供試体の間隙」を全間隙とするか、水和水など透水に寄与しない間隙水の体積を除外するか議論が必要であろう。図-4は、GCLに低濃度のCaCl₂溶液を透水させた場合の実験結果である。間隙体積の5倍分の流出量を得るまでは透水係数は10⁻⁹ cm/sで落ち着いているが、実はこの間、流出水と流入水の電気伝導度は等しくなっていない。流出量が間隙体積の5倍を超えたところでようやく電気伝導度は等しくなり、同時に透水係数が増加し始めている。なお、この実験で間隙体積5倍の流量を得るのにおよそ1年を要したが、このような長期の試験を個別の設計目的で実施することは非現実的であり、各機関で行われている試験結果の集約化と有効活用が求められよう。

参考文献

- 1) 勝見 武・渡部允人・住永 巖・深川良一: 連続地中壁に適用されるソイルセメントの遮水性能と配合条件, 材料, Vol. 51, No. 1, pp. 19~24, 2002.
- 2) Bowders, J. J., Neupane, D. and Loehr, J. E.: Sidewall leakage in hydraulic conductivity testing of asphalt concrete specimens, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 25, No. 2, pp. 210~214, 2002.
- 3) Bowders, J. J. and Daniel, D. E.: Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 12, pp. 1432~1448, 1987.
- 4) Benson, C. H.: Liners and covers for waste containment, *Creation of New Geo-Environment, Fourth Kansai International Geotechnical Forum*, JGS Kansai Branch, pp. 1~40, 2000.
- 5) Imamura, S., Sueoka, T., and Kamon, M.: Long term stability of bentonite/sand mixtures at L. L. R. W. storage, *Environmental Geotechnics*, M. Kamon (ed.), Balkema, pp. 545~550, 1996.
- 6) Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B. and Lin, L.: Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquid, *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier, Vol. 18, Nos. 2~3, pp. 133~161, 2000.
- 7) Kamon, M. and Katsumi, T. (2001): Clay liners for waste containment, *Clay Science for Engineering*, K. Adachi and M. Fukue (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 29~45, 2001.

(原稿受理 2003.2.24)