

透水・浸透問題

にし がき まこと
西 垣 誠*

1. はじめに

この10年間における浸透に関する研究は、1979年までの研究が実際の土木工事に応用され始めた、非常に重要な期間であったと考えられる。すなわち、社会的にも、地下水保全等の環境問題に注意が払われるようになり、従来の概算から厳密な設計へ移行しなければならなくなって来たため、1970年代に開発された有限要素法による数値解析法が極めて頻繁に利用されるようになってきている。

また、浸透問題も多岐にわたり、表一に示すように、

表一 浸透に関する問題

(1) 地盤および土構造物の安定問題	(a) 掘削地の安定
	(b) 堤体、ダム の浸透解析
	(c) 斜面の浸透解析
(2) 広域地下水	(a) 地下水保全
	(b) 地盤沈下
	(c) 地下水汚染
(3) エネルギー問題	(a) 石油備蓄
	(b) 天然ガス備蓄
	(c) 圧縮空気の貯蔵
	(d) 温水・冷水の地下貯留
	(e) 地熱発電
	(f) 放射性廃棄物の地層処分

表二 浸透に関する研究の動向

(1) 調査・試験法	(a) 室内試験	○透水試験法の改良
		○粘土の透水試験
(b) 原位置試験	(a) 室内試験	○岩の透水試験
		○不飽和土の透水試験
(b) 原位置試験	(a) 室内試験	○不飽和土の pF 試験
		○土中の移流拡散試験
(a) 数値解析	(a) 室内試験	○透気試験
		○単孔式透水試験法の改良
(b) 同定解析	(a) 室内試験	○多孔式揚水試験法の改良
		○流向流速試験
(b) 同定解析	(a) 室内試験	○長期地下水位計測システム
		○岩盤内の透水試験
(a) 数値解析	(a) 室内試験	○トレーサー試験
		○三次元飽和-不飽和浸透解析
(b) 同定解析	(a) 室内試験	○移流・分散解析
		○非混合流体の浸透解析
(a) 数値解析	(a) 室内試験	○浸透・変形・熱解析
		○割れ目系岩盤内の浸透解析
(b) 同定解析	(a) 室内試験	○疑似三次元解析
		○帯水層定数の平面的分布の逆解析
(a) 数値解析	(a) 室内試験	○多層帯水層定数の同定解析
		○不飽和浸透特性の同定解析
(b) 同定解析	(a) 室内試験	○移流・分散係数の同定問題
		○割れ目系岩盤の浸透特性の同定

*岡山大学助教授 工学部土木工学科

従来より一層複雑な現象を取り扱わねばならなくなっている。工学の研究はニーズに対応してなされることが多く、研究の動向も問題を解決する方向になされている。研究の動向をおおまかに整理すると表一2のようになる。ここでは各問題について検討し論議する。

2. 浸透に関する問題

2.1 地盤および土構造物の安定問題

表一1に挙げられた問題は古くから課題として言われている問題である。特に掘削地の安定解析は昔から設計者が頻繁に遭遇している問題であるが、砂の破壊に関する構成式や変形した多孔体内の非ダルシー状態での浸透理論が確立していないため厳密な予測までには至っていない。しかし、掘削によりどの程度の湧水流量が出るか、あるいは水圧が作用するかについては、有限要素法による鉛直二次元あるいは軸対称浸透解析が簡単に行えるようになったため、地盤の透水性の調査が十分になされていれば、多層地盤でも予測できるようになってきている。また、この種の浸透性破壊現象に関しても、近年、大深度地下掘削によって再注目されるようになったために^{1),2)}、今後の研究の蓄積が期待される。さらに、浸透と変形をカップリングした解析も開発されており、一層精度の良い予測手法が次の10年間には確立されると考えられる。

堤体・ダム の浸透解析の問題に関しての研究報告は、1969~1979年代に比較するとやや減少している。ロックフィルダムやアースダムの建設が少なくなったためであろう。しかし、堤体の浸透破壊は洪水によってしばしば起きており、本質的な解決は何もなされていない。堤体やロックフィルダムの浸透解析は1970年代の後半に三次元の飽和-不飽和浸透解析が可能となり設計に用いられている。しかし、不飽和土の浸透特性の調査法や試験方法に関する研究が遅れているため、厳密な予測が可能になるまでにはまだまだ時間を要する。

過去の浸透破壊に関する研究については長瀬が極めて綿密な整理を行っている³⁾。それによると、浸透による地中浸食を定量的に取り扱うことが難しいことに大きな問題点がある。また実際に堤体の浸透破壊予知ができて、長い堤防のすべてを調査することはできない。したがって、宇野が推進している評価法⁴⁾が極めて有効であると考えられる。

斜面の浸透解析に関しては本特集号の「斜面災害と予知・予測」の所で詳しく述べられるので、ここでは浸透に関することだけに触れる。二次元の斜面への降雨の浸透解析も非常に容易になっている。浸透により土の強度が弱くなったり浸透水圧が発生して斜面崩壊が生じる現象の実験や解析もなされている⁵⁾。しかし、この解析手法を実際の斜面に拡張すると、斜面の初期の強度分布や含水比分布あるいは浸透特性等のデータを得るための調査法がまだ

土質工学40年の歩み

確立されていないため、実用は困難である。

2.2 広域地下水

地下水利用による地下水位の低下や地下水の塩水化あるいは、地盤沈下現象等に関する研究も、解析手法と調査法に分けられる。この種の問題は水資源学の分野で地下水保全や地下ダムについての研究が従来よりなされてきた⁶⁾。地盤沈下の解析に関しては、1979年より以前にはほぼ確立されている⁷⁾。しかし、その後粘土層の貯留性も考慮した研究報告もなされ、極めて長期の調査研究の集大成がこの10年間になされた⁸⁾。

地下水汚染に関しては我が国では地下水の塩水化が主たるテーマであったが、今日ではトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの有機塩素化合物の地下水への混入による汚染問題が生じている。地下水汚染の解析法としては、不飽和領域の吸着まで考慮した混合流体としての塩水化現象の解析手法が開発され、放射性廃棄物の地層処分といった全地球的な問題と重なって、三次元の解析までが今日では可能となっている⁹⁾。しかし、この種の問題も実際に汚染現場付近の地下水流動を解明しようとしても、汚染物質の移動を支配するパラメーターである分散係数や拡散係数はもとより帯水層定数すら定まっていないのが現状である。

2.3 エネルギー問題

この10年間の浸透問題が過去と大きく異なっているのは、新しいエネルギーに関する浸透問題が生じた所にあるといっても過言ではない。無論、石油備蓄に関しては、以前より研究されていたが、実際に施工し、その時の地下水の挙動を計測したのはこの10年間である¹⁰⁾。また、このときの技術を基に実際に我が国で3箇所での石油備蓄のための工事が進められている。一方、天然ガスの備蓄計画もなされ、岩盤内での浸透と圧縮気体の移動が新しい問題となっている。これと同じ考え方が圧縮空気の貯蔵であり、これに関しても実際にボーリング試験が行われている。

放射性廃棄物の地層処分問題は、浸透だけでなく、熱、物質移動、温度応力まで多相のカップリング問題で多くの研究課題を含んでいる興味深いテーマである。

このようにエネルギーに関する浸透問題によって岩盤内の浸透が急に着目されるようになって来た。割れ目内の浸透特性の評価や、割れ目のパターン化など、種々のモデルが開発されている。しかし、岩盤内の浸透は、トンネル掘削工事において昔からかかわってきた問題であるが、今なお解決できない問題である。

3. 浸透に関する研究の動向

3.1 室内試験

浸透に関する室内試験は、この10年間に、変水位透水試験の際の試料の飽和のさせ方に少し改良があった程度で¹¹⁾、本質的には大きな変化は見られない。一方、不飽和土の透

水試験法に関しては、浸透解析によって飽和・不飽和解析が可能となったため、従来の方法の改良や新しい試験方法が提案されるようになってきた^{12),13)}。また、岩の透水試験に関して、 10^{-9} cm/s 程度の極めて透水性の低い透水係数まで計測する試験や、割れ目内の透水係数を求める試験などが我が国でも実施されるようになってきた¹⁴⁾。

3.2 原位置試験

浸透に関する原位置での調査法に関しては、土質工学会で「原位置透水試験に関する研究委員会」が設けられ、1985年にこれに対するシンポジウムが開催され、多くの新しい地下水調査法が提案された¹⁵⁾。その他、大深度掘削に対応した多層地盤の浸透特性の同定や広域地下水の流向流速の計測、あるいは、原位置における不飽和浸透特性の計測法、さらに、水みちを求めるためにラドンをトレースする試験などが開発され、今後大いに利用されることを期待する。地下水の採水法および測圧に関してはスウェーデンやカナダのシステムが岩盤内の調査に導入されようとしている¹⁶⁾。また、最近になって、電気探査法や地中レーダーによる地盤内の水みちの探査技術が開発されている。

岩盤内の透水試験はルジオン試験が主流であるが、試験結果の判定方法や診断方法に関する研究も行われている。特に、岩盤に関しては放射性廃棄物の地層処分と関連して、欧米で新しい試験法が開発されている¹⁷⁾。例えば、ボーリング孔内の連続性を評価する試験や、それを発展させた Sinusoidal (シヌソイダル) 法等がある。

3.3 数値解析

(a) 浸透問題

浸透問題の解析は、複素関数を用いた解析から差分法、有限要素法による解析へと変化している。この数値解析手法は、与えられた条件に対しての境界値問題を解き現象を予測する解析(正解析)と、観測された現象から対象としている場の特性を予測する解析(逆解析)に分かれて進歩した。正解析に関しては1980年代には本質的な進歩があまりなかったと言える。すなわち、三次元の飽和-不飽和浸透解析等の基本的なコードは、1970年代末に既に開発されていた。しかし、最近になって、三次元解析の必要性が増したため、この問題を簡単にする方法として、SSOR 法¹⁸⁾やMCG法、あるいはPCG法などの記憶容量を少なくする技術が開発されており⁹⁾、大型計算機ではなく、EWS程度でも三次元問題の解析が可能になっている。出力も陰線処理され、カラーの鳥瞰図で表現できるようになっている。ただ、複雑な三次元の地盤条件や境界条件を入力するにはまだ膨大なマンパワーが必要である。さらに肝心なことは、モデル化ができるだけの正確な地盤条件の調査がなされた例が極めて少ないため、モデルそのものに対する信頼性があまりない。

二次元や掘削地の軸対称解析はマイクロコンピュータによっても今日では可能になっており、現象の検討に多く

利用されてきたことは、80年代の成果と考えられる。

逆解析法は、80年代に飛躍的に進歩した分野である。当初は広域地下水の地下水位分布の計測結果から帯水層定数の分布を求める方法が主流であったが、多層帯水層の複数の透水係数や貯留係数の逆解析まで可能になっている¹⁹⁾。また、実際に揚水試験のように帯水層にインパクトを与え、その反応を計測し、その結果より複数層の帯水層定数を逆解析する手法や、不飽和領域の水分特性の変動を計測した結果から不飽和土の浸透特性を同定する手法等が開発されている。

(b) その他

浸透が関係する問題は多様化している。新しい問題が生まれて来たためでもあるが、浸透と変形の連成解析から浸透—変形—熱の連成解析へと拡張されている。浸透と変形は圧密問題と同じであるが、地下水流動による沈下や破壊は視点が少し異なっている。浸透—変形—熱は一般の土木にはあまり関係ないが、乾燥収縮や凍上現象などはこの範疇の課題である。この三つのカップリングはやはり高レベル放射性廃棄物の処分や地熱発電に関連する研究課題である。

浸透と物質移動に関しても、土壌学や地下水汚染の分野で精力的に研究が進められ、特性曲線法やEL法（オイリアン—ラグランジアン法）²⁰⁾等の解法が開発され、シャープに濃度が変形する移流拡散問題の解析手法が提案されている。

水と空気の間浸透に関しては、不飽和領域も考慮し、透水係数、透気係数の飽和度依存性を考慮した解析手法²¹⁾が開発されている。降雨の地中への浸透や堤体への浸透を厳密に予測するには、この解析方法にたよらねばならない。また、圧縮空気や天然ガスの地下貯蔵の漏気あるいは防止工法の効果を予測するのもこの解析方法が有力である。石油備蓄も、水—油—ガスの3相系の浸透を解かねばならないが、まだ、そこまで解析するには至っていない。

岩盤内の浸透を連続体中の浸透として解析するか不連続体（割れ目系）中の浸透として解析するかは論議の余地があるが、不連続体として割れ目系モデルの解析が行えるようになったのもこの10年かも知れない。このような取扱いによって岩盤の割れ目の評価が本質的に変化し、クラックテンソルと透水係数の関係が論じられるようになり、割れ目の方向、長さ、幅の分布を計測して、それをモデル化して、割れ目系の浸透を説明するようになって来た²²⁾。

4. 今後の課題

今後の研究課題は10年前に赤井らが指摘した内容²³⁾と本質的にあまり変化していない。いろいろな解析方法や調査手法が研究されても、多くの課題を残している。日常の設計である根切り工事のための排水設計にしても、実際に1本の井戸からの揚水量や井戸干渉を適確に予測することが

表—3 透水・浸透に関する今後の課題

調査	○原位置における不飽和浸透特性の調査法
	○斜面安定、水位、飽和度の分布計測
	○割れ目系岩盤の浸透特性の調査法
解析法	○水みち調査法
	○物質移動に関する物性調査法
	○透気係数の調査法
	○地盤の三次元モデル化法
	○マイクロコンピュータによる三次元解析
施工法	○境界条件の逆解析
	○浸透—変形—熱—物質移動の三次元カップリング解析
	○不確定データ下の解析法
	○排水工法（根切り工事、斜面、トンネル掘削）
	○復土工法（地下環境保全）
	○地下水問題取扱いのエキスパートシステム
	○止水工法（グラウト工法、大深度掘削）

できない。地下水位低下のために排水した水を下水道に処理する費用が200円/m³程度かかる時代になってもオーダーでしか透水係数が評価されていない。また、トンネル掘削時の湧水量の軽減や斜面安定等のための水抜き工法の設計も岩盤内の三次元浸透であるため、現時点では簡易設計している段階である。浸透問題が多様化するにつれて、今後の課題がますます増えている。表—3に今後の課題を整理した。特に、進歩した解析手法に対応する原位置調査法の一層の改良が今後最も必要である。また、精度の良い調査により逆に乱立する解析手法の淘汰が行われる時代が来なければならない。次の11年後は21世紀だ。その時にどれだけ解決しているか大いに期待する。

参考文献

- 1) 杉井・佐藤・宇野・山田：浸透破壊の発生プロセスと土の不均質性、土と基礎、Vol.37, No.6, pp.17~22, 1989.
- 2) 西垣・梅田・上山：地盤掘削地におけるボイリング、パイピング現象の2, 3の考察、土と基礎、Vol.37, No.6, pp.69~74, 1989.
- 3) 長瀬迪夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生条件、応用地質年報、No.9, pp.43~124, 1987.
- 4) 宇野・森杉・杉井・中野：被災事例に基づく河川堤防の安定性評価、土木学会論文集、第400号、III-10, pp.161~170, 1988.
- 5) 八木・矢田部・山本：雨水浸透による斜面崩壊、土木学会論文集、No.330, pp.107~114, 1983.
- 6) 石崎勝義：地下ダムと地下水かん養、土と基礎、Vol.31, No.3, pp.5~9, 1983.
- 7) 柴崎達雄編：地下水盆の管理、東海大学出版会、1976.
- 8) 東海三県地盤沈下調査会：濃尾平野の地盤沈下と地下水、名古屋大学出版会、1985.
- 9) Pini, G., G. Gambolati : 3-D Finite Element Transport Models by Upwind Preconditioned Conjugate Gradients, Proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Water Resources, Vol.2, pp.35~43, 1988.
- 10) 百田・藤城・青木・花村：降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討、土木学会論文集、第376号、VI-6, pp.74~82, 1987.
- 11) 河野・西垣：室内透水試験法に関する2, 3の考察、土質学会論文報告集、Vol.22, No.4, pp.181~190, 1982.
- 12) 河野・西垣：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究、土木学会論文集、第307号、pp.59~69, 1981.
- 13) 宇野・佐藤・杉井・柘植：加圧型の不飽和透水試験法の考察、第24回土質工学研究発表会概要集、pp.606~607, 1989.
- 14) 青木・里・中尾：岩石の透水係数の測定法に関する一考察、土木学会年次学術講演会講演概要集、第3部、Vol.41, pp.

土質工学40年の歩み

- 375~376, 1986.
- 15) 土質工学会：原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム, 1985.
- 16) Mineo, H., Hori, M. and Ebara, M.: Experimental study on seepage and dispersion of seawater in fractured rock, International Congress of Rock Mechanics, Vol. 1, pp. 191~194, 1987.
- 17) 岡村 甫編著：土木計測, 新体系土木工学, 技報堂出版, pp. 183~189, 1988.
- 18) Huyakorn, P.S. et al.: A three-dimensional finite element model for simulating water flow in variably saturated porous media, Water Res. Res., Vol. 22, No. 13, pp. 1790~1808, 1986.
- 19) 中屋・大西・西垣・岸本：FEM による準三次元地下水逆解析手法の開発, 土質工学会, 原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム, pp. 139~146, 1984.
- 20) Neuman, S. P.: A Eulerian-Lagrangian Numerical Scheme for the Dispersion-Convection Equation Using Conjugate Space-Time Grids, Journal of Computational Physics, Vol. 41, pp. 270~294, 1981.
- 21) 河野・西垣・浅間：有限要素法による水と空気の二相浸透流解析, 第19回土質工学研究発表会, pp. 1371~1374, 1984.
- 22) Long, J.C.S. et al.: Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Res. Res., Vol. 18, No. 13, pp. 645~658, 1982.
- 23) 赤井・大西：土の中の水の動き, 土と基礎, Vol. 27, No. 13, pp. 17~20, 1979.

(原稿受理 1989. 8. 31)