

講座

土中水の不飽和流動

3. 不飽和流の解析(解析例)

おおにし ゆう ぞう* にし がき まこと
大 西 有 三* 西 垣 誠**

3.3 解析例

この節の目的は、不飽和流の解析がどのように実行され、使用されているかを明らかにすることである。しかし、研究分野によって視点が異なるため、過去に発表された論文の中から土質工学と関連の深い飽和-不飽和浸透流の話題を選んで紹介する。

3.2.2でも述べたように、不飽和浸透流のみに関する理論解析の例は分かりやすい適切なものがほとんどないので紹介を割愛する。数値解析の手法を用いた研究の動向を理解するための手助けとして、Freeze¹⁰⁾ (フリーズ)の作成した表を修正し、不飽和流から飽和-不飽和流へと研究の対象が移り変わるさまを年代順に表-3.3に示した。ここに示す解析例の大部分は研究段階で得られたものであり、土質工学における実用性という面ではまだ不十分であり、今後更に手法の実用化に向けての努力が必要であろう。

3.3.1 差分法による解析の例

(a) 一次元問題

不飽和流の数値解析は、一次元問題を対象とした研究を礎として進歩してきた。Klute¹⁾ (クルート)が初めて差分法による数値解析で一次元不飽和流の問題を解いて以来、均質な地盤、層状地盤、ヒステリシス効果の考慮へと解析の範囲が広がってきたことは表-3.3に見られるとおりである。しかし、飽和浸透流の影響を考える前の一次元不飽和浸透解析の経緯については1969年のFreeze¹⁰⁾の論文が詳しく説明を加えているし、解析例も多数引用しているのでここでは省略する。

最近の一次元飽和-不飽和浸透流に関する研究は、実験結果と解析結果を対比させ、基本方程式の特性や数値解法の精度を検討するものが多い。Giesel (ギーゼル)ら¹⁵⁾はVachaud (ヴァショ)とThony²⁸⁾ (ソーニ)による実測値(図-3.12)を用いて、地表から一定流量の雨水の浸入(2時間の間、100cm/d)があるという条件で地盤中の水分の移動を解析している。図-3.13はその結果で、ヒステリシスの効果を考慮に入れると妥当な答を得るとしているが、計算は最初の3時間分しか行われていない。Haverkamp(ハヴァカンプ)ら²⁹⁾も同じように数値解析と実験の

結果を比較し、六つの異なった差分法解析手法の解の精度を検討して数値シミュレーションの妥当性を証明している。このように一次元飽和-不飽和浸透流解析は土の透水特性曲線を求めるための基礎的な作業、高次元の浸透解析の基本チェックとして大きな役割を占めつつある傾向にある。

(b) 二次元・三次元問題

二次元の飽和-不飽和浸透流の問題を最初に数値解析したのはRubin⁹⁾ (ルービン)である。このときから差分法を効率よく利用するための解法の研究が非常な勢いで始められる。RubinはADIP法を採用したが、Verma(ヴァーマ)とBrutsaert¹¹⁾ (ブラットサールト)は二次元問題で水位の変動に不飽和領域がどのような影響を与えるかを調

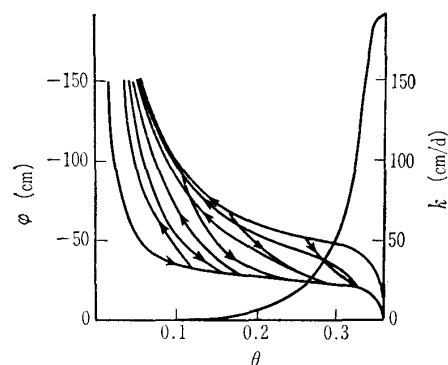


図-3.12 実測された砂の透水特性曲線(VachaudとThony²⁸⁾による)

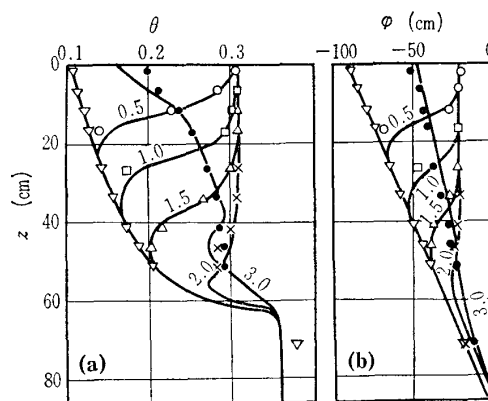


図-3.13 一定雨量浸入時の地中の含水率分布と水圧変化
実線は計算値、図中のマークは実測値を表す。

▽: $t=0$, ○: $t=0.5$, □: $t=1.0$
△: $t=1.5$, ◇: $t=2.0$, ●: $t=3.0$

(単位: 時間)

*京都大学助教授 工学部交通土木学科

**岡山大学助手 工学部土木工学科

表-3.3

著者名	項 目	次 元				地 盤				ヒステリシス		初 期 条 件		解 析 手 法	
		一 次 元		二次元	三次元	等 方 性			異方性	考慮しない	考慮する	特定値あるいは分布値を与える	平衡状態または定常状態	差 分 法*	有限要素法
		水平流	鉛直流			均質	層状	不均質							
Klute ¹⁾	(1952)	○				○				○		○		○	
Day & Luthin ²⁾	(1956)		○			○				○		○		○	
Youngs ³⁾	(1957)		○			○				○		○		○	
Philip ⁴⁾	(1957)	○	○			○				○		○		○	
Hanks & Bowers ⁵⁾	(1962)	○	○				○			○		○		○	
Whisler & Klute ⁶⁾	(1965)		○			○					○		○	○	
Remson et al. ⁷⁾	(1965)		○			○				○		○		○	
Rubin ⁸⁾	(1967)		○			○					○	○		○	
Rubin ⁹⁾	(1968)		○			○					○	○	○	○	
Freeze ¹⁰⁾	(1969)			○		○	○			○		○		ADIP	
Verma & Brutsaert ¹¹⁾	(1970)			○		○	○			○		○		ADI	
Guitjens & Luthin ¹²⁾	(1971)			○		○					○		○	ガウス・ザイデル	
Freeze ¹³⁾	(1971)			○	○	○	○	○	○		○		○	LSOR	
Freeze ¹⁴⁾	(1971)			○	○	○		○	○		○		○	LSOR	
Giesel et al. ¹⁵⁾	(1973)		○			○					○		○	○	
Neuman ¹⁶⁾	(1973)			○		○		○		○			○		○
Neuman ¹⁷⁾	(1974)			○		○		○		○			○		○
Luthin et al. ¹⁸⁾	(1975)			○		○					○		○	ADI	
Segal ¹⁹⁾	(1976)				○	○				○			○		○
赤井・大西・西垣 ²⁰⁾	(1977)			○		○					○		○		○
Hoa et al. ²¹⁾	(1977)		○	○		○					○		○		○
駒田 ²²⁾	(1978)			○		○		○	○	○			○		○
Frind & Verge ²³⁾	(1978)				○	○	○				○		○		○
駒田・大町 ²⁴⁾	(1978)				○	○		○		○			○		○
Vauclin et al. ²⁵⁾	(1979)			○		○					○		○	ADI	
赤井・大西・西垣 ²⁶⁾	(1979)				○	○					○		○		○
Stephens & Neuman ²⁷⁾	(1980)			○		○					○		○		○

*差分法における解法（ADI 法など）については文献(40)(41)を参照のこと。

べるために、ADI 法をはじめいくつかの数値解析手法の妥当性を検討した。その結果、水面の位置が変動し、かつ浸出点の位置が正確に予測できないことなどの問題があることから差分法の解の収束性が大きな論点として持ち上がった。その後ニュートン・ラフソン法やガウス消去法の改良が行われ、Brutsaert³⁰⁾、Brandt(ブランド)³¹⁾、Bresler(ブレスラー)³²⁾によって差分法による浸透解析が種々の問題に適用されていった。

Guitjens (グィティエンス) と Luthin (ルーシン)¹²⁾は滞水層からの水の汲上げと回復に伴う地下水面の変動をヒステリシス効果も含めて解析した。彼らはガウス・ザイデル法による反復解法を採用し、水位回復にはヒステリシスの影響がほとんどないことを示した。

1971年には Freeze¹³⁾が差分法を用いた飽和-不飽和浸透流解析の集大成ともいえる論文を発表した。彼の論文は二次元および三次元モデルの解析の例を示しているが、用いられている土の透水特性も図-3.14に示すように非常に

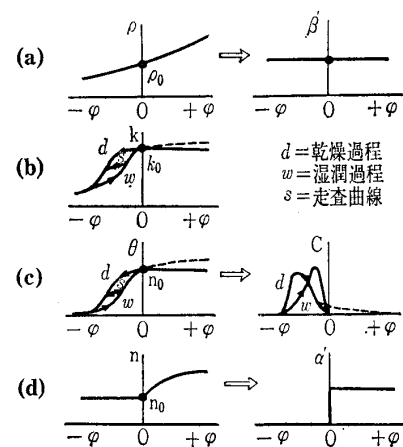
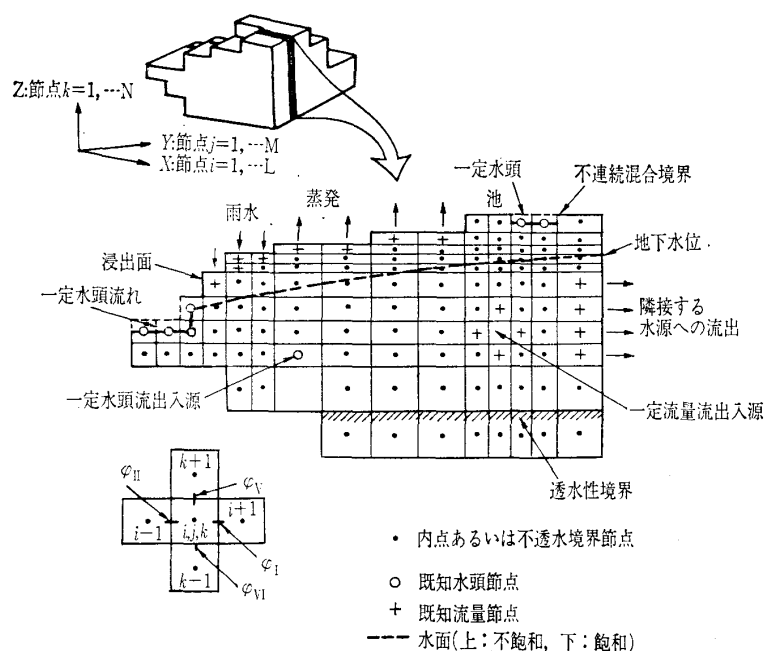


図-3.14 浸透解析時の入力関数の概念図

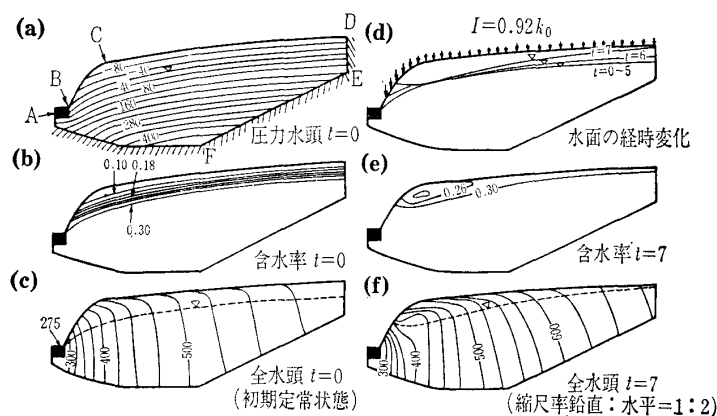
- (a) 水の密度 $\rho(\phi)$ と水の圧縮率 β'
 (b) 透水特性曲線
 (c) 含水率 $\theta(\phi)$ と比水分容量 $c(\omega)$
 (d) 間隙率 $n(\phi)$ と土の鉛直方向圧縮率 α'



図—3.15 LSOR 法における数値解析用メッシュ例(可能な境界条件はすべて概念的に表示されている)

般性に富んでおり、以後の研究に大きな示唆を与えた。注目すべき点は、解析にヒステリシス効果を導入し、また地盤の間隙の変化(すなわち変形性)を間隙水圧との関係でとらえようとしており、圧縮性地盤の浸透解析への芽生えと考えられる。ただし、この時点では地盤の変形に関して鉛直方向のみを考慮しているため、土質工学の分野で遭遇するような局所的な問題には適用を制限される。

Freeze¹³⁾は数値解法として LSOR 法を使用した。そのときのメッシュ分割と境界条件を示した概念図を図—3.15に表示する。解が収束しない時には前の回の計算ステップに帰り、時間間隔を小さくして解を得るような工夫をこらしている。図—3.16は解析の一例で、あるなだらかな斜面



図—3.16 多量の雨が降ったときの飽和-不飽和領域の反応
(a, b, c) 初期定常状態 (d) 水平変動
(e, f) 最終状態での含水率と全水頭分布

を想定し、地表に降雨があったときの状況を示したものである。図—3.16の(a)(b)(c)は地表面で圧力 -100 cm という条件を設定したときの定常状態を計算した結果である。図—3.16(d)は更に降雨強度 1.5 cm/h, 降雨強度 $I=0.92k_0$ (k_0 は飽和透水係数) で7時間雨が降り続いたときの状況を示したもので、降雨により地下水位が上昇するのに5時間の遅れが生じていることが分かる。図—3.16(b)と(e)の比較では、不飽和領域での含水比の急激な変化を、図—3.16(c)と(f)の比較では、流れのパターンの大きな変化と浸出点の位置の移動を見ることができる。その他の解析例として二次元問題では宙水のある場合、降雨強度の変化する場合などが解説されている。また三次元問題として2層系地盤中に設けられた井戸からの揚水によりどのような影響が浸透流に起こるかを検討した例が示されている。

つづいて同じくFreeze¹⁴⁾によって発表された論文は、土質工学になじみの深いフィルダム内の浸透流を二次元・三次元的に LSOR 法を用いて解析したものである。ここで実施された飽和-不飽和浸透流解析によると、一般には自由水面が流線にならないという重要な結果を得ている。すなわち、不飽和領域においても多量の水の流動があり、従来の飽和解析で得られる自由水面とはかなり形の異なったものが求められることを表している。以下にその内容について説明を加える。

図—3.17は解析に必要な土の特性である。図—3.17(a)は Liakopoulous (リアコポーロス)¹²⁾による砂の実測データ、図—3.17(b)は土の違いによる特性の変化を概念的に表したもので、図—3.17(c)はダムの解析に用いられた入力データである。Air entry value ϕ_0 (間隙水圧は0から ϕ_0 の間では負になるが、飽和度は100%を保つ)は今回の解析では無視されている。

図—3.18は図—3.17(c)の透水特性曲線を用い、初期含水比 $\theta_0=0.30$ で、ロック部とコア部の透水係数比が4:1という条件を設定したときのダムの定常解である。 $\theta_0=0.30$ の線が図—3.18(b)で自由水面と異なっているのは、懸水帯(Capillary fringe)が存在することを表している。最も注目すべき結果は図—3.18(c)で流線の多くが自由水面と交差し、不飽和領域での水の流れが示されている点であろう。図—3.19は同じ断面で従来の飽和浸透流の解析結果と比較したものである。砂質土すなわち透水性の良い土の特性を飽和-不飽和浸透解析に使用したほうが従来の飽和浸透解析の手法の結果とよく一致することが図—3.19(b)より判明する。

フィルダムの浸透の定常状態を解析した例を図—3.20に示す。一般的な傾向は二次元解析によって把握されるものとほぼ同じである。

講 座

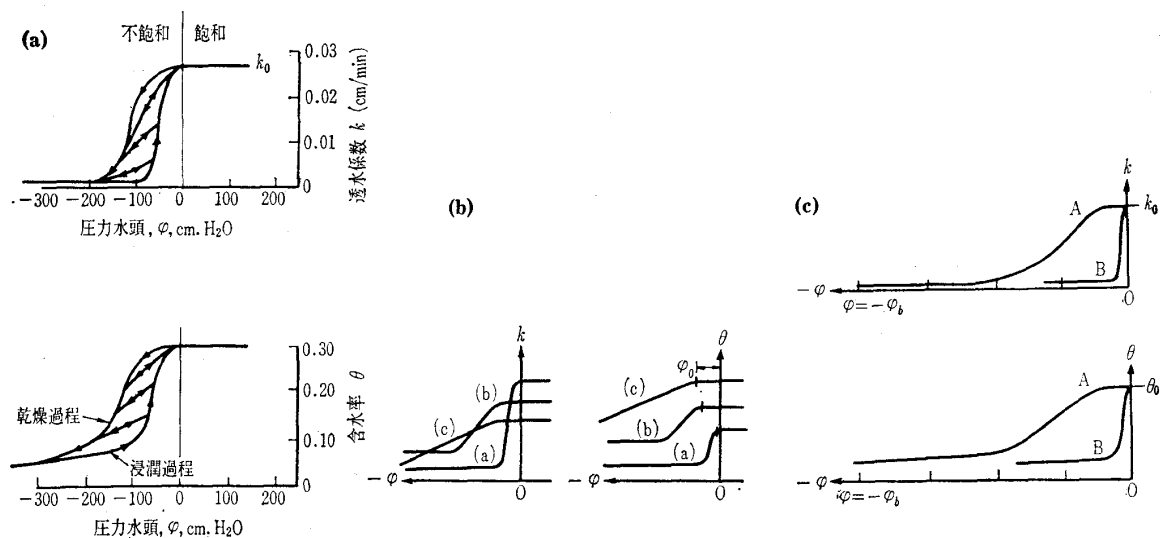


図-3.17

- (a) デルモンテ砂の透水特性曲線
 (b) 仮想の土に対する透水特性曲線
 (a)砂 (b)シルト質砂 (c)シルト質粘土
 (c) 計算に用いたA, B 2種類の透水特性曲線

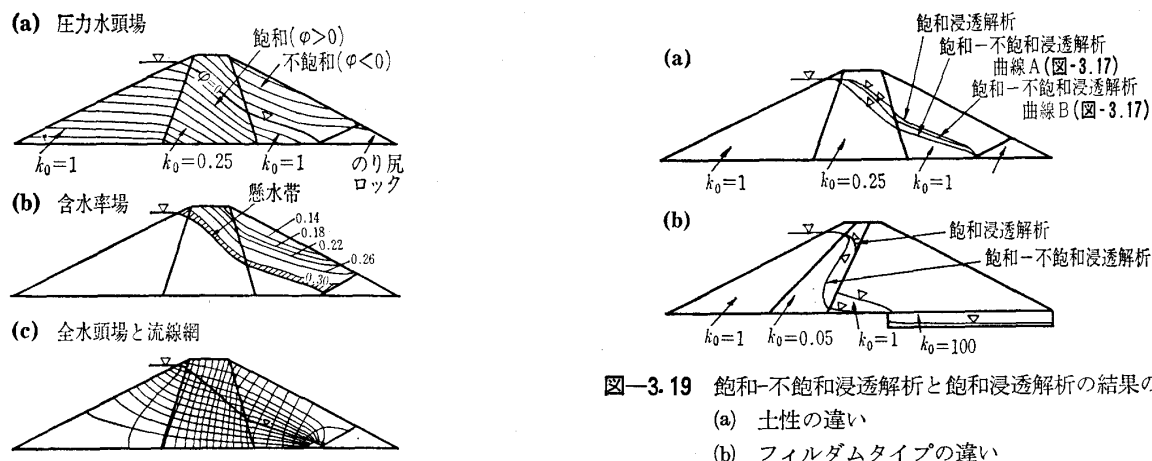


図-3.18 フィルダムの飽和-不飽和浸透解析結果

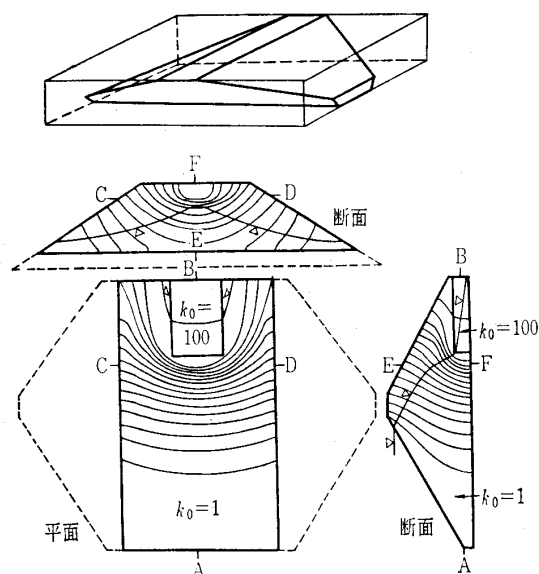
ダム浸透解析では定常状態とともに非定常浸透挙動の追跡も非常に重要視される。図-3.21(a)は水位を瞬時にある位置まで上昇させたときの自由水面の推移と時間との関係を表したもので、この時は初期条件としてダム頂部で含水率 $\theta=0.20$ 、底部で 0.28 、飽和部分は 0.30 を設定している。図-3.21(b)は $t=100$ 秒のときの含水率と全水頭の分布を描いたもので、最大の水頭勾配が浸潤線の前の方の高含水部分で生じることを示している。ここで、図-3.21のダム断面を利用して、初期条件が浸透流の非定常挙動にどのような効果を与えるかを検討する。ダムの中では初期の含水率を一定とし、 0.25 と 0.285 を与える。図-3.22は図-3.21(a)のある切断面AB上における自由水面の位置と時間との関係を求めたものである。予想されるように、初期に土が湿潤して含水率の高いほど水位の変動は速く進

図-3.19 飽和-不飽和浸透解析と飽和浸透解析の結果の比較

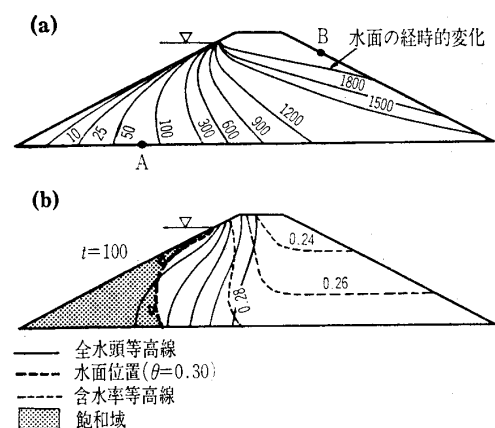
- (a) 土性の違い
 (b) フィルダムタイプの違い

む。図に示すとおり、急激な変化を示す初期の部分と浸出点に到達するまでの間に線形的な変化をする期間がある。浸潤面が浸出点に到着すると変化は緩やかになり、定常状態へと漸移に移行する。

Freezeの解析例はいずれも手法の可能性を示したもので、解の精度、計算時間など実用性についての検討は行われていない。そこでLuthinら¹⁸⁾は井戸の模型実験を実施することにより、二次元差分法による解(ADI法利用)がどの程度信頼できるか検証を行った。井戸の模型は約 15° 角ぐらゐの扇形のタンクに砂を入れたものからなっており、中に多数の間隙水圧測定用の計器を埋め込んだ。定常状態での実験と解析の結果の対比を図-3.23に示す。解析結果が実験結果と一致していない部分、特に井戸の近傍では、水頭の変化が急激であるにもかかわらず差分解析用メッシュが十分細かく設定されていなかったことがその原因と思わ



図—3.20 下端に排水プランケットを持つフィルダムの三次元飽和-不飽和定常浸透解析結果

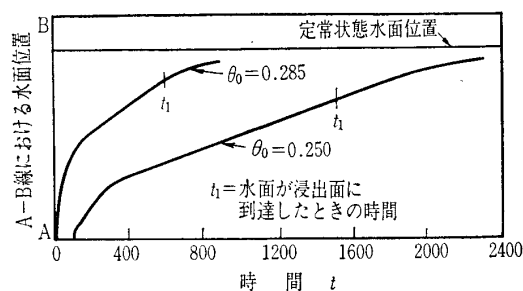


図—3.21 均一なフィルダムの浸透解析

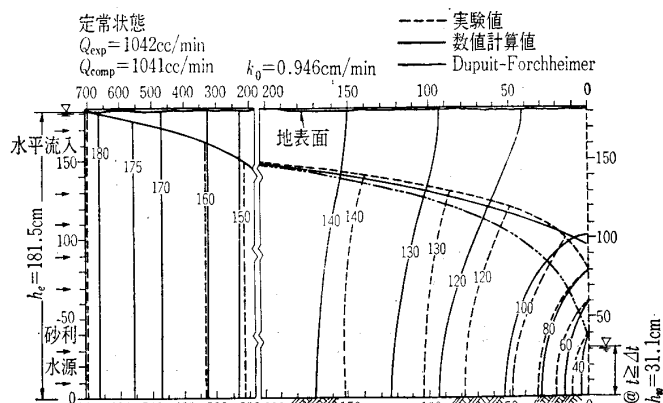
- (a) 自由水面の移行
(b) $t=100$ 時における水頭と含水率分布

れる。流量に関してはほぼ満足した結果が得られているが、非定常浸透時の挙動は水面上の不飽和領域の特性に強い支配を受けるとしている。

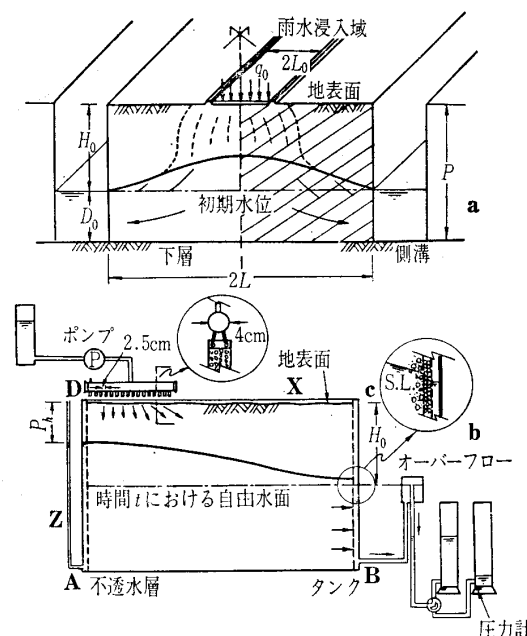
Vauclin (ヴォークリン) ら²⁵⁾は実用上非常に興味深い報告を行っている。彼らは、地表からの雨水の流入が浅い地下水面の変動にどのような影響を与えるかを予測できる数値モデルを開発する目的で図—3.24に示すような砂モデル(長さ3 m, 高さ2 m, 幅5 cm)を用いて実験を行い、土の特性を逆算する手法を示し図—3.25を得ている。この図の特徴は、要素試験を行わず、差分解析用のメッシュを用いて実験の実測データから直接いくつかの透水特性値を導き出していることである。この方法を進めれば原位置においても同様な手順で地盤の特性値を逆算できる可能性がある。このような土の特性値を用いて、従来の飽和浸透流解析とADI法による飽和-不飽和浸透流解析の両者による数値計算を実施し、浅い地下水面の移動を予測するとき不飽和領域を無視すると大きな誤差を招くと結論付けている。



図—3.22 浸潤面の進行速度に与える初期含水率の影響



図—3.23 模型実験の実測値と計算値, 解析値 (Dupuit-Forchheimer 式) の比較



図—3.24 実験条件と実験装置

3.3.2 有限要素法による解析の例

有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析は表—3.3で見るとおり Neuman (ノイマン)^{16), 17)}によって始められた。この時点には既に差分法を用いて二次元・三次元解析が行われつつあったので、有限要素法は一次元問題にはほとんど適用されることはなかった。Neuman も一次元解析については自明のこととして何も言及していない。したがって、ここでは一次元問題の解析例は省略する。

Neuman は飽和-不飽和浸透流の基本式をガラーキン法

講座

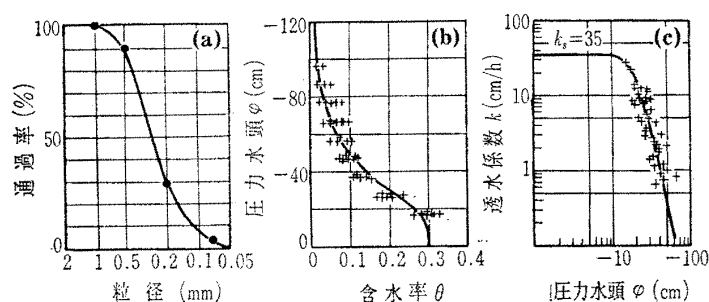


図-3.25 実測値から逆算された結果

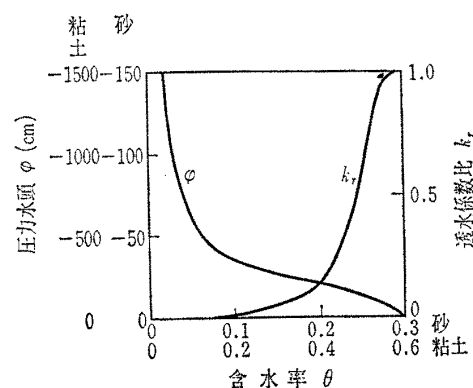


図-3.26 標準的な土の透水特性曲線

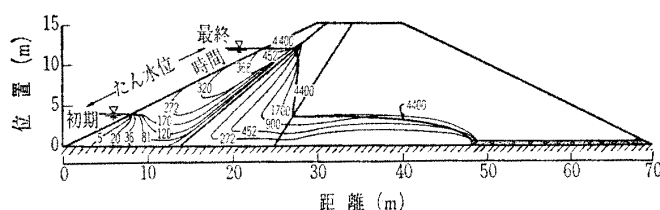


図-3.27 フィルダムの非定常時の水面移動

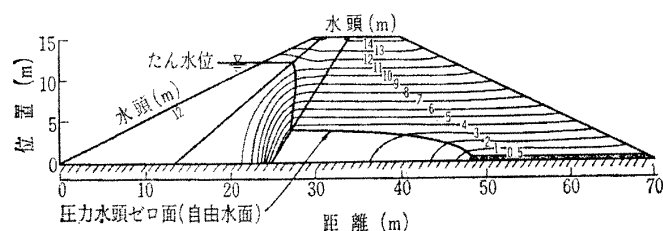


図-3.28 解析で得られたフィルダム内水頭分布

に基づく有限要素法の定式化や時間積分の方法について詳細に検討を加え、フィルダム内の浸透、丘陵地の谷の周辺地下水、井戸の揚水に関する三つの例題を示している。ここでは差分法を用いた Freeze¹⁴⁾ のダム解析結果と対比させる意味でフィルダムの例を引用する。

従来の解析手法ではダムの水位が上昇するときの堤体内の浸透解析は容易ではなかった。しかし、飽和-不飽和浸透流解析手法では上昇時も下降時も全く同じ取扱いで計算することができる。解析に用いられた土の透水特性曲線の典型的なものを図-3.26に示す。ダムのシェル部分は砂質土とし、透水係数は水平方向 0.5 cm/ユニット、鉛直方向 0.1

cm/ユニット（ユニットとは単位時間を意味する）と異方性も加味している。粘性土からなるコア部分の透水係数は水平方向 10^{-4} cm/ユニット、鉛直方向 10^{-3} cm/ユニットと仮定し、地表からの蒸発と比貯留係数は考慮しない。初期値として砂質土は $\theta_0 = 0.255$ 、粘性土は 0.598 という値を採用し、 $t=0$ 時に水位を 4 m 瞬時に上昇させる。その後 $t=182$ 時に 24 ユニットごとに 1 m の割で水位を順次上昇させるという条件に変更する。このときの自由水面($\phi=0$)の変化を示したものが図-3.27である。水面は非常に複雑な形状を示しており、従来の手法では解析不可能であったことは明らかである。もちろん、水位の上昇時に不飽和領域の特性を無視することが水面形状の決定に大きな誤差を招くことは言うまでもない。

ダムの水位上昇に伴いコアの上流側部分に水がたまり、下流側へは不飽和領域を通じて水が排出される。 $t=4400$ ユニット時に $\phi=0$ の線はほぼ定常状態に落ち着き、飽和領域でも変化が見られなくなるが不飽和領域では非定常状態が継続している。図-3.28 は $t=4400$ 時の水頭分布である。不飽和領域で鉛直方向に勾配があるということは平衡状態に至っていないことを示している。

浸透流解析においては浸出点の取り扱いに注意を要することはよく知られている。飽和-不飽和浸透流の解析でも

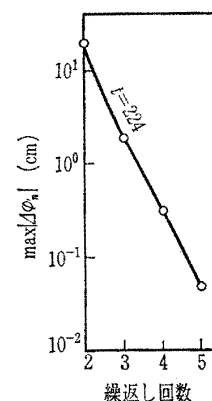


図-3.29 数値解の収束性

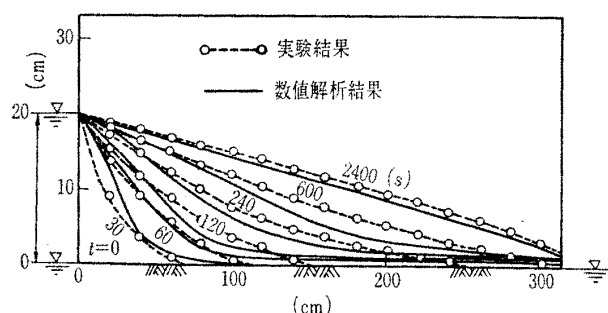


図-3.30 初期水位があるときの水面形の変化

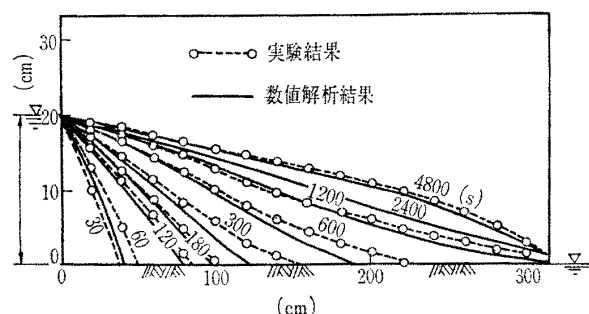


図-3.31 初期水位がないときの水面形の変化

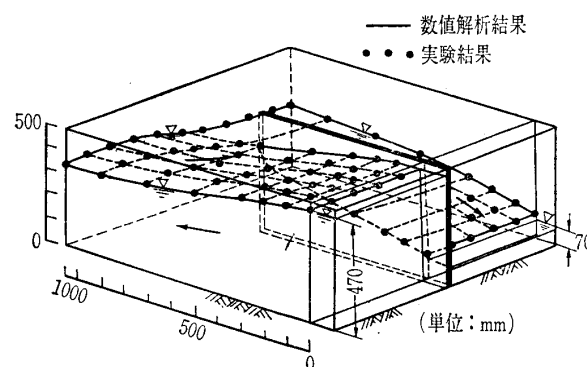
正しい浸出点の位置を求めるには繰り返し計算を行わなければならないが、通常 10 回以下の繰返しで解が収束する。図—3.27 のフィルダムの例では節点での水頭の変化の最大値が 0.01 cm 以下になるような条件を与えているが、そのときの収束パターンは図—3.29 のようになっている。

Neuman の報告は Freeze と同じように有限要素法の適用範囲を示すにとどまっておらず、解の検証を行っていない。赤井ら²⁰⁾は Neuman が示した手法を基にし、基本方程式をもっと一般的なものに拡張して有限要素法により定式化した。更にヒステリシスの効果も考慮したうえで実験結果と数値解の結果を比較、検討した。図—3.30 と図—3.31 に示すように両者は良く一致している。図—3.30 は透水性基盤で初期水位がある場合、図—3.31 は不透水性基盤で初期水位がない場合であるが、基盤の特性により浸透の初期の形態は大きな影響を受ける。すなわち、初期水位がある場合には、浸透流は上に凹形に進行して行くが、初期水位がない場合には、浸透流は上に凸形に進行する。このような浸透形態の相違に対して、飽和-不飽和浸透流解析手法では、それぞれ異なった初期条件・境界条件を入力データとするだけで実験結果を良く表現することができることが判明した。一方、Hoa (ホア) ら²¹⁾も解析解と実験値を比較する作業を行っている。彼らは主としてヒステリシス効果が浸透流に及ぼす影響を検討しており、ヒステリシス効果を考慮に入れるほうが精度のよい解析解を得ることができると結論づけている。

有限要素法による飽和-不飽和浸透解析手法を実用的に利用している例として駒田²²⁾を中心とした電力中央研究所の業績があげられる。彼らはフィルダム内の浸透流の挙動を予測するための基本的な定数の求め方、使用方法について現場との関連を十分に考えながら解析を進めている。その一つの例が駒田ら³³⁾による高瀬ダムの解析である。高瀬ダムは中央しゃ水壁型のロックフィルダムであるが、そのダムの築堤時に数多くの計器を埋設し、盛立時およびたん水過程でのダムの力学的、水理学的挙動を把握しようとした。実測で得られた結果を数値解析結果と比較したところ、解析手法の適用性が確認されたと報告されている。

Stephens (ステフェンス) と Neuman²⁷⁾はボーリング孔を利用した孔内透水試験に飽和-不飽和浸透解析を適用している。地下水位より上にある地盤の透水係数を求めるのに、注水により不飽和領域に水を流して試験を行うことがある。この場合、実験の結果を解釈する目的でいくつかの経験式が提案されているが、そのいずれもが飽和流の挙動のみに注目して不飽和領域内の水の流れを考慮していない。そこで彼らは有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析を用い、4 種類の代表的な土の特性を想定して数値解析を行い孔内注水試験による水の挙動を推定し、より正確な定数を決定する方法を提案した。

以上のように有限要素法による手法は広い範囲で用いら



図—3.32 実験結果と数値解析結果の比較

れているが、特筆すべきことは三次元解析が多く行われるようになってきたことである。飽和-不飽和浸透流の解析を三次元的に初めて行ったのは Segol (セゴール)¹⁹⁾であるが、全く研究的な意図しかなかった。1978年に Frind (フリンド) と Verge (ヴァージ)²³⁾が広域地下水の挙動を解析するのに三次元有限要素法が思ったより経済的であり、精度もよいという報告を行って以来、二次元と三次元の問題が解析対象として同格に扱われるようになった。駒田と大町²⁴⁾はこの手法をダムのう回浸透の解析に適用し、ダムの設計に必要な手順であると説明している。赤井ら²⁶⁾は砂を用いた三次元模型実験を実施し、数値解析の結果が非常に精度で実験結果と一致することを確かめた。図—3.32はそのときの結果の一例を示している。ダムなどで見られるう回浸透の三次元模型で計測された自由水面の位置と数値計算の結果を比較したものである。

3.4 今後の課題

電子計算機の大規模化、高速化に伴い数値解析の重要性が今後ますます増大することは明らかである。しかし、このような数値解析の精度の向上と比例して、浸透という物理現象をより正確に表現できる基本式の開発や、正しい定数(入力データ)の把握がなされなければならないはずであるがまだ十分とは言えない。特にここで述べた飽和-不飽和領域を一体化した解析を今後更に進歩させるに当たっては、不飽和土中の水の動きを十分理解しなければならない。そのためには実験室内だけでなく、原位置においても多くの実験、計測を実施し精度の高いデータを蓄積する必要がある。

飽和-不飽和浸透流の数値解析には差分法と有限要素法だけが使われているわけではない。Cooley (クーリー)³⁴⁾によって始められ、Narasimhan (ナラシムハン) ら³⁵⁾³⁶⁾によって頻繁に利用されている手法に IFDM (Integrated Finite Difference Method) がある。これは差分法と有限要素法の間位置する手法で計算効率がよいといわれているが一般的に用いられるまでに至っていない。その他、浸透解析では積分方程式、境界要素法などが新しい手法と

講 座

して研究が進められている。

前節で説明した飽和-不飽和浸透解析はまだいわゆる単相系(剛体地盤内を水と空気の混合体が流れると仮定している)の問題を対象にしているが、地盤の変形や破壊現象を浸透と結びつけて考えるには多相系の問題、すなわち土の骨格構造と水の相互作用の問題を検討しなければならない。その先鞭は Richards (リチャーズ)³⁷⁾がつけており、Narasimhan³⁸⁾はこれを圧密との関連において不飽和領域まで拡張し、一次元の問題を解析した。大西と村上³⁹⁾は Biot (ビオ) の方程式に基づいて飽和-不飽和状態における一般的な多相系の問題の基本式を提示した。このように、不飽和土の変形や強度を論ずる必要が生まれ、不飽和状態での「有効応力の原理」の検討という大きな作業過程が改めて認識されている。このような研究成果の上に、自然あるいは人工斜面の安定問題、地盤の液状化やパイピングの解析などが可能になり、やがては実用的にも設計・施工に役立ちうるものとする。

多相系の問題としては上記のもの以外に温度の影響を考慮したものも考えられる (Sophocleous (ソフォクレス)³⁹⁾)。また、空気と水を一つの混相流と考える従来の立場から脱却して、空気と水をおのおの独立した相として考察する多相系の問題もある。空気と水を別々に扱う方法は既に一次元不飽和流の解析にとりいれられつつあるが、土質工学的には斜面に雨水が浸入する場合の空気の挙動やシールド工事の圧気工法のときの圧力空気の挙動を調査するのに極めて有効と考えられるので、早急な多次元問題への拡張が望まれている。

浸透流に関する解析で最近非常に重要視されている問題に地下水の汚染がある。社会的にも環境条件の悪化を憂える声が多い中で、地盤内の汚染の広がりや浸透水の挙動を正しく把握できるような手法を確立することが強く要求されている。このような要求に答えるためにも、三次元解析のような高度な技法が容易に一般に使用できるような工夫が必要であろう。

最後に、電子計算機による計算プログラムがブラックボックス化していく傾向にあるため、ともすれば数値計算万能といった風潮が生まれやすくなっている。しかし、数値計算というものはあくまでも綿密な研究のもとに打ち立てられた基本式を入力データに基づいて解いているにすぎないということを今一度認識し直し、出力データが示す物理的な意味を十分理解しながら解析を進めていくように常に心掛けるべきであろう。

参 考 文 献

- 1) Klute, A.: Some Theoretical Aspects of the Flow of Water in Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 16, pp. 144-148, 1952.
- 2) Day, R.D. and Luthin, J.N.: A Numerical Solution of the Differential Equation of Flow for a Vertical Drainage Problem, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 20, pp. 443-447, 1956.
- 3) Youngs, E.G.: Moisture Profiles during Vertical Infiltration, Soil Science, Vol. 84, pp. 283-290, 1957.
- 4) Philip, J.R.: The Theory of Infiltration, 1. The Infiltration Equation and Its Solution, Soil Science, Vol. 83, pp. 345-357, 1957.
- 5) Hanks, R.J. and Bowers, S.A.: Numerical Solution of the Moisture Flow Equation for Infiltration into Layered Soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 26, pp. 530-534, 1962.
- 6) Whisler, F.D. and Klute, A.: The Numerical Analysis of Infiltration, considering hysteresis, into a Vertical Soil Column at Equilibrium under Gravity, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 29, pp. 489-494, 1965.
- 7) Remson, I., Drake, R.L., McNary, S.S. and Wallo, E. M.: Vertical Drainage of an Unsaturated Soil, Hydraul. Div., Proc. Am. Soc. Civil Engrs., 91, HY 1, pp. 55-74, 1965.
- 8) Rubin, J.: Numerical Method for Analyzing Hysteresis-Affected, Post-infiltration Redistribution of Soil Moisture, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 31, pp. 13-20, 1967.
- 9) Rubin, J.: Theoretical Analysis of Two-Dimensional, Transient Flow of Water in Unsaturated and Partly Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32, pp. 607-615, 1968.
- 10) Freeze, R.A.: The Mechanism of Natural Groundwater Recharge and Discharge, 1: One-Dimensional, Vertical, Unsteady, Unsaturated Flow above a Recharging or Discharging Ground-water Flow System, Water Resour. Res., Vol. 5, pp. 153-171, 1969.
- 11) Verma, R.D. and Brutsaert, W.: Unconfined Aquifer Seepage by Capillary Flow Theory, Jour. Hydro. Div., ASCE, Vol. 96, pp. 1331-1344, 1970.
- 12) Guitjens, M. and Luthin, J.N.: Effect of Hysteresis on Drawdown and Recovery of a Water Table in an Aquifer, Soil Science, 88, pp. 215-223, 1971.
- 13) Freeze, R.A.: Three-Dimensional, Transient, Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin, Water Resour. Res., Vol. 7, pp. 347-363, 1971.
- 14) Freeze, R.A.: Influence of the Unsaturated Flow Domain on Seepage through Earth Dams, Water Resour. Res., Vol. 7, No. 4, pp. 929-941, 1971.
- 15) Giesel, W., Renger, M. and Strebel, O.: Numerical Treatment of the Unsaturated Water Flow Equation: Comparison of Experimental and Computed Results, Water Resour. Res., Vol. 9, No. 1, pp. 174-177, 1973.
- 16) Neuman, S.P.: Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., ASCE HY, Vol. 99, No. 12, pp. 2233-2250, 1973.
- 17) Neuman, S.P.: Galerkin Method of Analyzing Non-steady Flow in Saturated-Unsaturated Porous Media, Finite Element Method in Flow Problems, John Wiley & Sons, Chap. 19, 1974.
- 18) Luthin, J.M., Orhun, A. and Taylor, G.S.: Coupled Saturated-Unsaturated Transient Flow in Porous Media: Experimental and Numeric Model, Water Resour. Res., Vol. 11, No. 6, pp. 973-978, 1975.
- 19) Segol, G.: A Three-Dimensional Galerkin Finite Element Model of the Analysis of Contaminant Transport in Saturated-Unsaturated Porous Media, Int'l Conf. on Finite Elements in Water Resources, N.S.F., Princeton, pp. 123-145, 1976.
- 20) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No. 264, pp. 87-96, 1977.
- 21) Hoa, N.T., Gaudu, R. and Thirriot, C.: Influence of the Hysteresis Effect on Transient Flows in Saturated-Unsaturated Porous Media, Water Resour. Res., Vol. 13, No. 6, pp. 992-996, 1977.
- 22) 駒田広也: 飽和-不飽和土中の非定常浸透流解析, 電力中央

- 研究所報告, No. 377015, 1978.
- 23) Frind, E.O. and Verge, M.J.: Three-Dimensional Modeling of Groundwater Flow Systems, *Water Resour. Res.*, Vol. 14, No. 5, pp. 844-856, 1978.
 - 24) 駒田広也・大町達夫: フィルダムの三次元浸透流解析, *大ダム*, No. 86, pp. 1-15, 1978.
 - 25) Vauclin, M., Khanji, D. and Vachaud, G.: Experimental and Numerical Study of a Transient, Two-Dimensional Unsaturated-Saturated Water Table Recharge Problem, *Water Resour. Res.*, Vol. 15, No. 5, pp. 1089-1101, 1979.
 - 26) Akai, K., Ohnishi, Y. and Nishigaki, M.: Finite Element Analysis of Three-Dimensional Flows in Saturated-Unsaturated Soil, 3rd Int'l Conf. on Numerical Methods in Geomech., Aachen, 1979.
 - 27) Stephens, D.B. and Neuman, S.P.: Free Surface and Saturated-Unsaturated Analyses of Bore hole Infiltration Tests above the Water Table, 3rd Int'l Conf. on F.E. in Water Resources, Univ. of Mississippi, Oxford, 1980.
 - 28) Vachaud, G. and Thony, J.L.: Hysteresis during Infiltration and Redistribution in a Soil Column at Different Initial Water Contents, *Water Resour. Res.*, Vol. 7, No. 1, pp. 111-127, 1977.
 - 29) Haverkamp, R., Vauclin, M., Touma, J., Wierenga, P. J. and Vachaud, G.: A Comparison of Numerical Simulation Models for One-Dimensional Infiltration, *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, Vol. 41, No. 2, pp. 285-294, 1977.
 - 30) Brutsaert, W.F.: A Functional Iteration Technique for Solving the Richards Equation Applied to two-Dimensional Infiltration Problems, 52nd Annual Meeting of AGU, Washington D.C., 1971.
 - 31) Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J. and Goldberg, D.: Infiltration from a Trickle Source: 1. Mathematical Model. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 35, No. 5, 1971.
 - 32) Bresler, E., Heller, J., Diner, N., Ben-Asher, U., Brandt, A. and Goldberg, D.: Infiltration from a Trickle Source: 2, Experimental data and Theoretical Predictions, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 35, No. 5, 1971.
 - 33) 駒田広也・西岡利道・松尾和俊: 高瀬ダム湛水過程の浸透流に関する実測値と解析値との比較検討, 電力中央研究所報告, No. 380010, 1980.
 - 34) Cooley, R.: A Finite Difference Method for Unsteady Flow in Variably Saturated Porous Media, *Water Resour. Res.*, Vol. 7, No. 6, pp. 1607-1625, 1971.
 - 35) Narasimhan, T.N. and Witherspoon, P.A.: An Integrated Finite Difference Method for Analyzing Fluid Flow in Porous Media, *Water Resour. Res.*, Vol. 12, No. 1, pp. 57-64, 1976.
 - 36) Narasimhan, T.N.: The Significance of the Storage Parameter in Saturated-Unsaturated Groundwater Flow, *Water Resour. Res.*, Vol. 15, No. 3, pp. 569-576, 1979.
 - 37) Richards, B.G.: Theoretical Transient Behavior of Saturated and Unsaturated Soils under Load and Changing Moisture Conditions, CSIRO, Australia Div. Appl. Geomech., Tech-Paper No. 16, pp. 1-23, 1973.
 - 38) 大西有三・村上 毅: 有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析, 土木学会論文報告集, No. 298, pp. 87-96, 1980.
 - 39) Sophocleous, M.: Analysis of Water and Heat Flow in Unsaturated-Saturated Porous Media, *Water Resour. Res.*, Vol. 15, No. 5, pp. 1195-1206, 1979.
 - 40) 土木学会編: 土木工学における数値解析/基礎編, サイエンス社, 1974.
 - 41) Remson, I., Hornberger, G.M. and Molz, F.J.: Numerical Methods in Subsurface Hydrology. Wiley-Interscience N.Y., 1971.
 - 42) Liakopoulous, A.C.: Retention and Distribution of Moisture in Soils after Infiltration has ceased, *Bull. Int. Ass. Sci. Hydrol.*, 10, pp. 58-69, 1965.

(原稿受理 1981.2.4)

書籍紹介

「フィルダムの基礎地盤

—堆積地盤の取扱い要領—

宇梶文雄著

標記の本が、昭和56年6月に発行された。著者は、愛知用水公団ならびに水資源開発公団で、多くのフィルダム建設にあたってこられた土質技術者で、土質工学会のためにも多くの貢献をしてこられた方（学会功労章受章者）である。

著者は、昭和30年から50年代初めにかけて建設された牧尾ダム、東郷ダム、佐布里ダム、初立ダム、駒場ダム、中里ダム、寺内ダムなどに関係された豊富な経験から、それらの具体的データを用いて、後輩のために貴重な実績を伝承すべく、堆積地盤をフィルダムの基礎とする場合の工学的な取扱いをよく整理して述べておられる。

この著書の構成は次のようである。

1. 堆積地盤の把握
 - 1.1 地盤とダムの基礎
 - 1.2 地盤の判別要領
 - 1.3 地盤の区分実例
2. 堆積地盤の調査
 - 2.1 地盤の必要条件
 - 2.2 地盤の調査要領
 - 2.3 地盤の調査実例
3. 堆積地盤の対策
 - 3.1 地盤の対策要領
 - 3.2 地盤の対策実例

なお、この著書は、宇梶氏が、昭和54年に、同じ発行所から出版された「フィルダム技術ノート—材料の基本と実際—」の姉妹篇といえるものであろう。

フィルダム技術者の座右の書として活用されることをお奨めする次第である。

(植下)

A 5判 200ページ

定 価 3,000 円 昭和56年 6 月 5 日発行

発 行 日刊工業新聞社