地下水位低下とかんがい用水の調査に関する一考察

岡山大学工学部　正員　○　河野伊一郎
同　上　正員　西垣　誠

1．調査，解析の方法について

掘削等の建設工事に伴う地下水位低下によって，かんがい用水がどのような影響を受けるのか，すなわち，かんがい用水の増分をどの程度確保すべきか，という問題がもち上がる。この問題に対しては，(1) 建設工事（揚水や湧水）によって周辺の地下水位低下の量と範囲がどうなるのか，(2) その地下水位低下によって減水深がどう変るか，という２つの問題を考えなければならない。

しかし，(1) と (2) の問題を別々に取り扱うことは実際上正しくない。すなわち，地下水位低下によって減水深が増減（地下水かん養量が増減）すれば，それによって地下水位低下が逆に影響を受けるからである。したがってこの問題を同時に解析するためには，厳密には３次元浸透流解析が必要となってくる。その解析は，初期条件，境界条件が複雑ゆえに一般に理論式を用いて行うことはできないことが多い。そこで有限要素法や差分法を用いた数値解析が行われる。しかし３次元浸透流の数値解析は，その対象範囲が大きくなると莫大な計算量となるばかりでなく，境界条件の精度（透水に関する調査の精度）に問題がある。さらに，非定常浸透流問題として取り扱う必要がある場合には，飽和のみならず不飽和浸透流解析が含まれることになる。したがって３次元解析が精度上からいつも better な方法とはいえないのが現状であろう。

そこで，地下水位低下については平面２次元地下水流として解析し，その結果（地下水位低下量の分布図）にもとづいて，減水深の問題を取り扱うという順序がとられることが多い。この場合に，地下水位の低下によって減水深が増大するという問題に関して，危険側（減水深や地下水位低下量をやや大きく見積ることになる）を判定することになる。

2．平面２次元地下水流解析について

井戸からの揚水やそれに準ずる条件での湧水に起因する地下水位低下は，比較的狭い対象領域に対しては，いわゆる井戸理論（Theis，Thiem の理論）を用いて計算することもできよう。

しかし，一般に河川改修や大規模掘削による地下水位低下の計算は，境界条件が満足されるためには数値解析が行われることが好ましい。この場合，精度上の問題は，滞水層定数と地下水かん養量に関するインプットデーターである。滞水層定数は，ボーリング試料や揚水試験の結果から推定されるが，多くの場合，対象領域全体に亙って精度よく把握するのはしばしば至難の業といわざるを得ない。さらに，地下水のかん養機構やかん養量については，現段階では調査法すら明確でない。そこで，地下水シミュレーションにおいて，トライアルにモデルの修正を行うという方法がとられる。すなわち，現状の地下水位分布やその変動に合うような地下水モデルが作られる。３次元地下水シミュレーションになると，２次元の場合よりモデルの修正が複雑になるため，いつも精度の高いモデルになるという保障はないと考えられる。現在，筆者らのところでは，平面２次元地下水シミュレーションを一歩すすめて，準３次元シミュレーションプログラムを開発した。[1] このモデルでは，準水層の鉛直方向の層序が考慮できるように改良したものである。

3．鉛直浸透流解析について

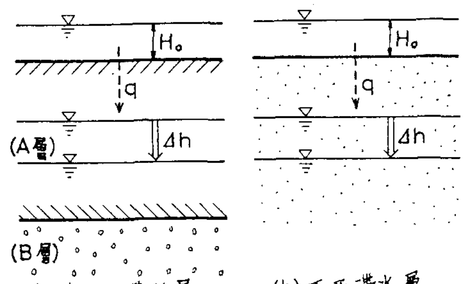
（A）鉛直浸透流解析で最も条件が簡単なものは，１次元・飽和・定常の鉛直浸透流である。

この場合，図－１（a）のように被圧滞水層中への鉛直浸透流については，地下水位低下によって減水深が増大するが，図－１（b）のように単一層（不圧滞水層）の場合には，数式上，地下水位が低下することによって減水深が小さくなる。後者については，地下水位が低下すると鉛直浸透流が減少するという不可解な現象となる。

この点については，鉛直浸透流によって低下した地下水位が影響を受けず，そのままの状態が保たれるという条件が必要であることに注意すべきである。

このような問題が生じた場合には，平面２次元地下水シミュレーションにおける地下水かん養量の増分を考慮した再計算，すなわち，地下水シミュレーションの修正がなされなければならない。

（B）次に，かんがい用水の減水深に近いと考えられる鉛直飽和非定常浸透流について，図－２について考えてみよう。かんがい用水は，干し上った田畑に湛水をしたときに生ずる鉛直浸透流が問題となり，初期の減水深は大きく，次第に減少し，一定に近づくという現象が観測されている。



(a) 被圧滞水層　(b) 不圧滞水層

図－１　１次元飽和鉛直浸透流モデル

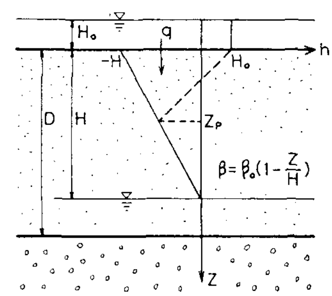
地下水面までの深さ：H，透水係数：k，有効間げき率：$\beta = \beta_0(1 - z/H)$，β_0：地表面での湛水前の有効間げき率であり，地下のβは深さzの関数とする。これはある程度調査可能である。

最初（$t<0$）は地表湛水がなく，$t \geqq 0$において，H_0の湛水が生じ，これからの鉛直浸透量をqとする。

運動の式はDarcy則から，$q = k(H_0+H)/z$ ------------(1)

連続の式は，$q = \beta_0\left(1 - \dfrac{z}{H}\right)\dfrac{dz}{dt}$ ------------(2)

両式(1),(2)から，$\beta_0\left(1 - \dfrac{z}{H}\right)\dfrac{dz}{dt} = k\dfrac{H_0+H}{z}$ ------------(3)



図－２　非定常鉛直浸透流モデル

式(3)を駆使することにより種々の定量的考察が可能である。

（a）$t \sim z$の関係

$t \leqq t_0\left(=\dfrac{\beta_0 H}{6k}\right)$ ：$\left(\dfrac{6k}{\beta_0 H}\right)t = \left\{3\left(\dfrac{z}{H}\right)^2 - 2\left(\dfrac{z}{H}\right)^3\right\}$　　$t > t_0$ ： $z = H$

（b）$t \sim Q$の関係　　Q：全浸透量（$=\int q\,dt$）

$t < t_0$ ：$\left(\dfrac{6k}{\beta_0 H}\right)t = 3\left(\dfrac{2Q}{\beta_0 H}\right) + 2\left(1 - \dfrac{2Q}{\beta_0 H}\right)\sqrt{1-\left(\dfrac{2Q}{\beta_0 H}\right)} - 2$　　$t \geqq t_0$ ：$\left(\dfrac{6k}{\beta_0 H}\right)t = 3\left(\dfrac{2Q}{\beta_0 H}\right) - 2$

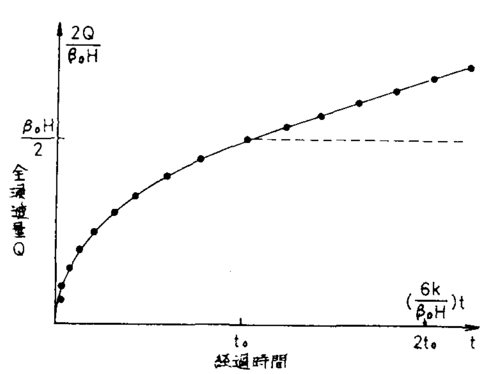
（c）$t \sim q$の関係

$\left(\dfrac{6k}{\beta_0 H}\right)t = 3\left(\dfrac{k}{q}\right)^2 - 2\left(\dfrac{k}{q}\right)^3$

４．あとがき

以上，概説したような手法（基本的考え方）を用いて岡山市内のある河川改修工事に伴う地下水位低下とそれによる減水深の変化，かんがい用水問題を調査した。現在も調査は進行中であるので，結論は断定できないがほぼよい結果が得られたのではないかと考えている。

エントラプトエアーの問題，地表面に生ずるクラックの影響など残された問題も決して少なくないと思う。



図－３　$t \sim Q$の関係図

〔参考文献〕1) 河野他：有限要素法による広域地下水の準3次元浸透解析，土木学会年次講演会（S.57），PP. 531～532.