

揚水による地盤変動の室内実験と その数値シミュレーションによる検討

EXPERIMENTS OF LAND SUBSIDENCE BY PUMPING IN
LABORATORY AND THEIR NUMERICAL SIMULATIONS

佐 藤 邦 明*

By Kuniaki SATO

1. ま え が き

昨今、水資源需給関係の悪化に伴い地下水揚水による地盤沈下が全国的に拡大の傾向にあり、その議論が再び活発になってきている。周知のように、地盤沈下現象は古くて新しい問題であり、われわれの知る範囲ですでに昭和の初期から半世紀に及んでいる。

最近では、地下水の挙動や適正揚水量の予測に関連して、しばしば地下水・地盤沈下数値シミュレーションが実施されるようになってきている。実際の地下水シミュレーションはその実施にあたってはいくつかの経験・技巧を要するが、それらの中で①地盤・地山のモデル化、②境界・初期条件の設定、③水理定数の選定に関する事は最も注意を要する事柄である。地下水シミュレーション手法がわが国に導入されてから、まだ日が浅く、昨今急激に広まってきたこともあって、計算上の精度やモデルの妥当性の検討が既知の条件下で実験・実測に基づいて十分実証されたとはいえない難い経緯・現状にある。

本論文はこうした背景にあって、地盤のモデル化、初期・境界条件、水理パラメーターの明確にわかった室内大型人工地盤によって、揚水による地下水（被圧）の挙動および地盤変動の性質を実験的に明らかにし、これらにより得られた諸結果と数値シミュレーションを人工地盤中の揚水実験に適用した結果と比較・検討している。実験は長さ 4 m、幅 4 m、厚さ 0.5 m の人工の地盤に難透水層一層（最下層が被圧帯水層、中間層が難透水層、および最上層が不被圧層であり、被圧帯水層から揚水すると、そこで水頭低下が生じ、一種の載荷層である）をもつ場合、および二層の場合、さらに難透水層が平面的に分散・介在している場合について行われた。それぞれ 3 種の場合について、5 本の揚水井模型を設け、揚水の仕方・順序をいくつか段階的に変化させ、観測井によ

て揚水帯水層中の水頭平面分布・経時変化を測定した。また、地盤変動は地盤上に固定されたダイヤルゲージによって経時的に多点で計測された。

周知のように、地下水と地盤沈下の科学的な関係は、Terzaghi の圧密理論に端を発し、西大阪の地盤沈下メカニズムの究明が和達 (1940)¹⁾によってなされ、今日まで多くの調査・研究がなされてきた。

従来、井戸揚水による地盤沈下の室内実験として速水・赤井 (1956)²⁾のものが知られている。この研究では長さ 5 m、幅 2.7 m、高さ 1.5 m の矩形水槽中に川砂帯水層と粘土質ローム層を設け、4 本の揚水井で揚水・注水による水頭・地盤変動を測っており、興味深い結果を得ている。また、井戸揚水による実験ではないが、村山・松尾 (1964)³⁾は内径 2 m、高さ 1.5 m の円筒水槽中に累層地盤を作り、境界水圧変動による粘土層中の間隙水圧の実験的経時変化を圧密理論によって検討している。

本研究ではこれらの従来の研究とは違った観点から、特に平面的広がりのある 3 種の累層地盤に揚水井が分散してあるような場合に揚水・水頭変化と沈下の関係に注目して実験を行い、水頭・沈下の数値シミュレーションと比較・検討することに力点を置いたつもりである。

2. 実 験

帯水層中で揚水した場合、帯水層中の間隙水圧は低下し、それに起因して難透水層から帯水層への絞り出しが生じ、結果的に地盤の総厚さは収縮する。この地盤収縮は、揚水井の配置・分布密度と深度に関係をもつことになる。また、収縮量は時間的に変化し、地盤自体の力学的性質のみならず、揚水量や透水係数など、水理条件、定数にも関係するはずである。このような現象を室内実験によって再現できるものであろうか。この点を含めて、本実験の目的は次のように列挙される。

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部地盤水理実験施設

- ① 人工地盤中の地下水挙動と地盤変動の再現性
- ② 地下水揚水の仕方・順序と地盤変動の平面分布・応答性
- ③ 地盤沈下と水頭低下量の関係、および鉛直断面内の水頭と地盤変動の分布
- ④ 地下水・地盤変動数値シミュレーションの実験結果への適用性

上述の4点に着目して実験が人工地盤中で行われる。地盤変動が地盤の地質層序と難透水層の分布に依存することは明らかであり、次の3つの人工地盤に対して揚水実験が遂行された。

- ① 三層地盤：最下層が帯水層、中間が難透水層、最上層が載荷層の場合
- ② 五層地盤：最下層が帯水層、上層に向かい難透水層、帯水層、難透水層、最上層が載荷層の層序の場合
- ③ 難透水層の離散的分散介在地盤：帯水層中に離散的に分散して難透水層が存在する地盤であり、水理的には上述①、②と違って、不被圧地盤中に板状複数個の難透水層が分散して介在する地盤である。

上述の3種の人工地盤に5本の揚水井模型を設定して、次に示すように、一井揚水から順次揚水井本数を追加しつつ、その間の帯水層中の水頭分布・経時変化、およびダイヤルゲージによる地盤変動が計測された。

(1) 実験装置

本実験は、(1) 三層地盤、(2) 五層地盤、(3) 難透水層の離散的分散介在地盤、の場合に分け、別々に行われた。それぞれの場合について、実験装置・方法は同様であるが、実験内容が目的に応じて若干違ってくる。

a) 三層地盤の場合⁴⁾

すべての実験は図-1に示したように、長さ7m、幅5m、深さ0.5mの平面水槽の中で行われた。本水槽はレール付きの可動計測ステージをもち、一端にオーバーフローがあって水槽内の境界水位を一定に保つことができ、揚水された水はスクリーニング後循環使用される。

図-2(a)が三層地盤の揚水実験のための人工地盤断面であり、最下部の帯水層の厚さは0.1m、難透水層の厚さは0.06m、最上部載荷層厚さは0.05mである。

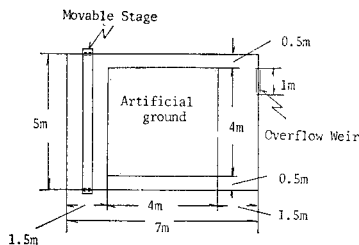


図-1 実験水槽の概略

人工地盤は作成の都合上、通常のコンクリートテストピース（高さ0.3m、直径0.15m）を2列に直立配置して、地盤の周辺土留壁（必要地盤厚さに応じて壁高さはテストピースを2段重ねにして調節）として、その中に作られる。テストピースの間はすべて5mm程度の間隙が作られ、地下水の境界条件を与える周辺貯留部の水は自由に帯水層に浸透でき、難透水層（粘土層に相当）へはビニールシートにより直接横流入しないよう止水される。図-2(b)は揚水井、観測井およびダイヤルゲージ

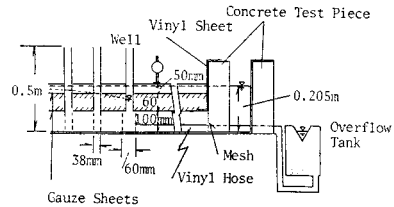


図-2(a) 三層地盤の実験

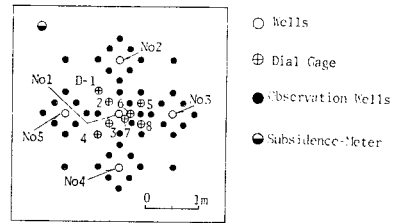


図-2(b) 三層地盤の計測位置

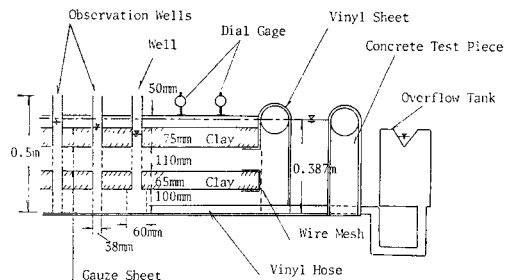
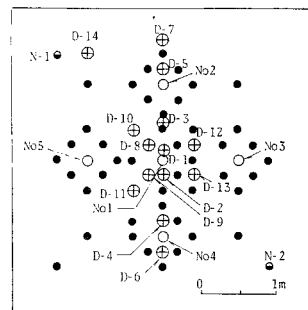


図-3(a) 五層地盤の実験



- Wells
- ⊕ Dial Gage
- Observation Wells
- Subsidence-Meter

図-3(b) 五層地盤の計測位置

ジ (精度 1/100 mm) の配置である。揚水井ほどの人工地盤の場合も同じものであり、井戸模型は透水性帯水層の厚さ部分に小孔 (周辺に金網を巻いた空隙率 50% のストレーナ) をもつ塩化ビニール管 (直径 60 mm) である。揚水はストレーナを通じて、下流のオーバーフロータンク (5本の揚水井に対応して5個) に導かれ、オーバーフロータンクの昇降によって、揚水量が調節される。余談であるが、予備実験の段階で小型揚水ポンプを用いたが、水位一定で揚水することは困難であった。

沈下量の測定はすべてダイヤルゲージによったが、一辺 30 mm の薄鉄片を地盤上に密着させた上に点支持させ、ゲージ自体は水頭観測井管にアームで固定させた。水頭観測井は帯水層中にストレーナをもつ内径 38 mm の塩化ビニール管であり、沈下に伴うネガティブフリクションによる沈下への影響を考慮して、管周辺に薄く油を塗って、地盤と管の摩擦を小さくするよう努めた。さらに、水頭測定は特に本実験で工夫された2本の電極をもつセンサー棒を用い、観測井上部から挿入し、電極が水面に接すると信号 (ブザー) を発する装置を用い、測水深の精度を上げるようにした。

b) 五層地盤の場合⁵⁾

五層地盤の場合、図-3 (a) のように難透水層が二層である。最下部と中間の帯水層はそれぞれ 0.1 m, 0.11 m であり、難透水層は下部が 0.065 m, 上部が 0.075 m である。また、揚水井、観測井、およびダイヤルゲージの位置は図-3 (b) のようであって、観測井の配置は三層地盤の場合と同じである。装置の内容は a) の三層地盤の場合と大差ない。

c) 難透水層の離散的分散介在地盤⁶⁾

この実験は上述の三層、五層地盤の場合と大きく違っている。つまり、図-4 (a) のように厚さ 0.3 m の一様細粒地盤中に厚さ、規模の違った矩形難透水層が地盤表

面から 0.1 m の深さに分散して介在するものである。一般に、被圧帯水層中の間隙水圧が低下したとき、その上部、あるいは下部の難透水層が絞り出し現象に起因して、地盤が圧密・収縮するわけであるが、このような地盤でも揚水によって地盤沈下が生じるか否かを調べようとしたものであり、部分被圧した難透水層の水頭低下による絞り出しと重力排水による地盤沈下がみられる。本実験の場合には自然圧密量を測ることが難しいため、十分に自然圧密が終了した数か月後に実験を開始した。

揚水井、観測井およびダイヤルゲージの配置は図-4 (b) のようであり、特に帯水層自体の水位低下による地盤変動が計測できるか否かも2点 (図中、ダイヤルゲージ D-8, D-10) で測られた。

次に、実験に用いられた帯水層は粒径の揃った平均径が $d_m=3.5$ mm, 平均透水係数 $k=0.039$ m/s, 平均空隙率 $\lambda=0.39$ の細粒砕石である。長期揚水のため、浸透層の目詰り防止を配慮して、比較的透水係数の大きい細粒砕石を用いたわけで、いくつかの予備実験の後に選定したものである。また、難透水層はカオリン粘土 (商品名「米」Engel hard ASP 100) であり、実験によって初期含水比 130~160% のものを用いた。

(2) 実験方法と揚水量

本実験はその規模が大きいため、人工地盤と計測装置の埋め込みに労力と注意を要する。どの人工地盤における実験も方法・手順は同様であり、大きな違いはおのこの地盤に対する揚水量の配分にもたせてある。

まず、地盤は写真-1 でわかるように、初めに地盤周辺にテストピースを2列に直立させて間隙をもつ安定した土留壁を作る。その後、観測井を直立させるスタンド脚を所要の配置に整え、自然沈下計を設けて帯水層を一樣に打設する。さらに、その上部にガーゼシート (多孔質の布で粘土のような微粉粒を通しにくいもの) を敷き、帯水層と同質の細粒砕石を打設して載荷層とする。

このような一連の作業が終了すると、地盤上にダイヤ

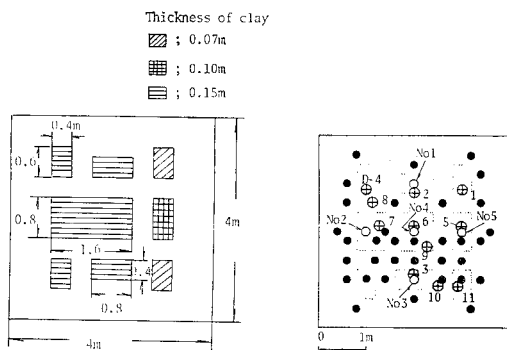


図-4 (a) 難透水層の離散的分散介在地盤 (全層厚さ 0.3 m, 地盤表面より 0.1 m 下に難透水層埋没)

図-4 (b) 難透水層の離散介在地盤の計測位置 (図中の記号は図-3 (b) と同じ)

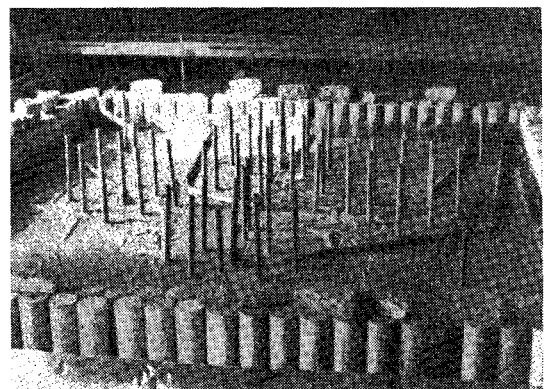


写真-1 人工地盤打設前の様子と揚水井

ルゲージ支持のための薄鉄片を密着させ、ダイヤルゲージを固定する。その後、人工地盤の周辺貯水部に徐々に水を注水し、1か月程度、帯水層中に水が飽和したまま自然圧密を促進させる。もともと人工難透水層が軟弱であるため、初期数日で急激な圧密沈下が生じる。写真-2は実験中の計測機器の配置と全景である。

ある揚水ステップから次のそれに移るまでの期間は一応沈下量がほぼ一定になる時点を実測値から判断して決めた。

揚水実験における揚水の仕方・順序は表-1のように、3種類地盤について違っている。表中、たとえば、三層地盤の場合に注目すると、No. 1井をまず揚水し、次いでNo. 2井の揚水を追加するといったような揚水の仕方・順序である。これらの場合、揚水の継続時間が長いので、一定オーバーフローによる揚水であっても、時

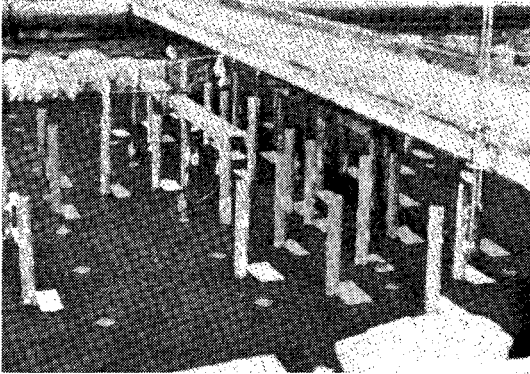


写真-2 実験中の計測装置の配置と全景

表-1 各揚水井の揚水量

地盤	揚水ステップ	揚水量 (cm³/s = 10⁻⁶ m³/s)				
		Q No.1	Q No.2	Q No.3	Q No.4	Q No.5
三層地盤	1	348.0 (410.4)				
	2	323.2 (305.4)	244.7 (125.9)			
	3	313.9 (291.6)	158.4 (123.4)		259.1 (234.9)	
	4	277.3	82.8	152.7	250.5	
五層地盤	1	593.2 (580.9)				
	2	572.6 (560.8)	566.3 (563.2)			
	3	565.9 (558.0)	566.2 (564.4)		568.7 (560.9)	
	4	552.8 (552.1)	563.7 (553.0)	550.1 (540.0)	559.9 (540.5)	
	5	553.1 (550.6)	549.5 (540.9)	556.8 (555.7)	546.6 (538.2)	517.5 (527.0)
難透水層の離散的分散介在地盤	1	512.6				
	2			416.3	455.3	
	3				397.6	112.4
	4	498.6			365.8	
	5	488.5		67.2	213.7	
	6	193.2	94.3	135.8	195.7	191.5

注：ただし、カッコ内数値は実験終了時の揚水量

間とともに若干揚水量そのものが目盛りなどのため減少した(表-1 中カッコ内の数値)。これらの揚水順序は、なるべく揚水による地盤沈下がダイヤルゲージの集中配置した場所で、しかも適切に現われ、かつ地下水頭分布と沈下の関係が特徴的に現われるよう配慮して決めたわけである。

なお、本実験はすべて秋から冬期にかけて室温が大きく変化しない時期に行われ、室内への日光の直射を避けるよう暗幕を張って実施した。

3. 実験結果と地下水・地盤変動シミュレーションの比較・検討

(1) 実験結果

三層、五層地盤、および難透水層の離散的分散介在地盤のいずれの場合にも、揚水量、地盤変動、地下水頭は経時的に測定されたために実験結果は非常に多い。したがって、本論文では代表的で、かつ特徴的な結果のみを述べ、地下水・地盤変動シミュレーションの適用・解析結果と比較・検討することとした。

図-5は三層地盤の各揚水ステップにおける沈下の経時変化を代表的な測定点(図中ダイヤルゲージ番号に対

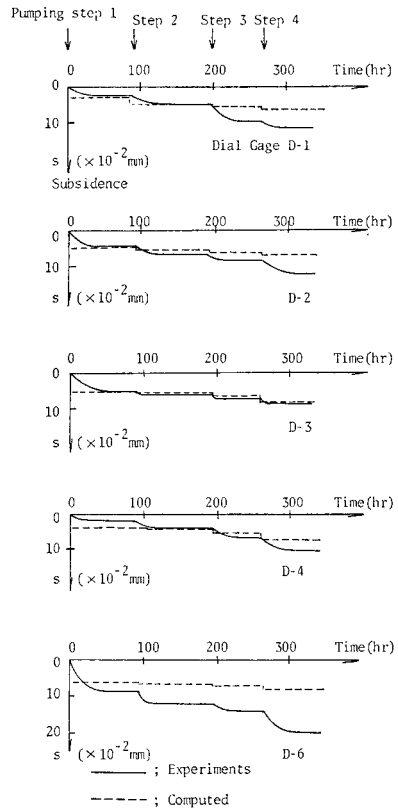


図-5 三層地盤の沈下経時変化

応)について示したもので、自然圧密度は除去した純粋な揚水のみによる沈下量である。ある程度予想されることであるが、各揚水ステップ(表-1 参照)直後に地下水頭が低下するため、沈下は急激に起こり、数日で沈下は非常にゆっくりとしたものになってしまう。ここで、地下水頭の揚水に伴う低下量は井内が最大であり、井戸によって違うが、49~161 mm の範囲にあった。揚水井周辺の水頭低下量の平面分布は次に述べる五層地盤の場合(図-6 参照)と同様であり、揚水井から0.2 m も離れると水頭低下量は井内のそれに比べて、3分の1程度以下と急激に小さくなる。

次に、五層地盤の場合、等水頭低下量の平面分布と地盤内の2断面における水頭分布が図-6 に示してある。図中、(a)~(e) はそれぞれ揚水ステップ 1~5 (表-1 参照)までに対応し、地下水シミュレーション計算結果(後述)と合わせて示してある。本実験のいずれについてもいえることであるが、帯水層の透水係数がもともと大きいために、各揚水ステップの遷移時の地下水時間変動は数分で非定常から定常状態に至る。したがって、三層

地盤の場合も含め、ほとんど定常水頭分布形とみてよい。等水頭低下量の分布そのものは予期された形態であり、シミュレーション結果とほぼ一致を与えているとみてよからう。さらに、五層地盤の沈下経時変化を測定ダイヤルゲージ番号に対応させて図-5 の三層地盤の場合と同様に示したものが、図-7 であり、自然圧密度は除去している。揚水ステップが遷移するごとに、地盤沈下は急激に起こっており、時間とともに減少している。

図-8 は五層地盤の場合の揚水量の経時変化であり、透水係数が比較的大きく、粒径が整っているにもかかわらず、揚水時間の少ない No. 5 を除けば、目詰りのため揚水量が時間とともに減少している。図-9 は、五層地盤の場合の帯水層揚水量配分を示したもので、揚水井には上・下部2層の帯水層とともにストレーナが設けてあるわけで、上部帯水層(層厚さ 110 mm)からの揚水量 Q_2 と下部帯水層(層厚さ 100 mm)の揚水量 Q_1 の和が全揚水量となるはずである。五層地盤の場合、2 帯水層中からの全揚水量配分がどうなっているかを知る必要があり、各揚水井の揚水量と流れが定常となった実験

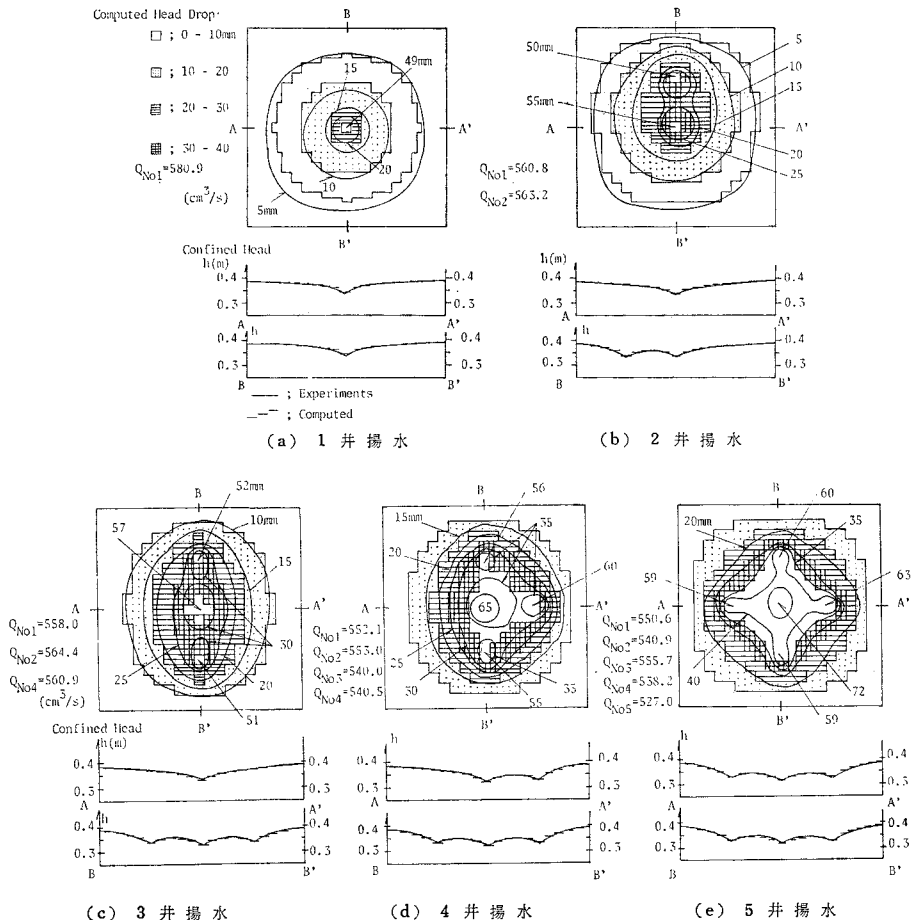


図-6 五層地盤の場合の実験等水頭低下量分布(上図)と断面水頭形状(下図)

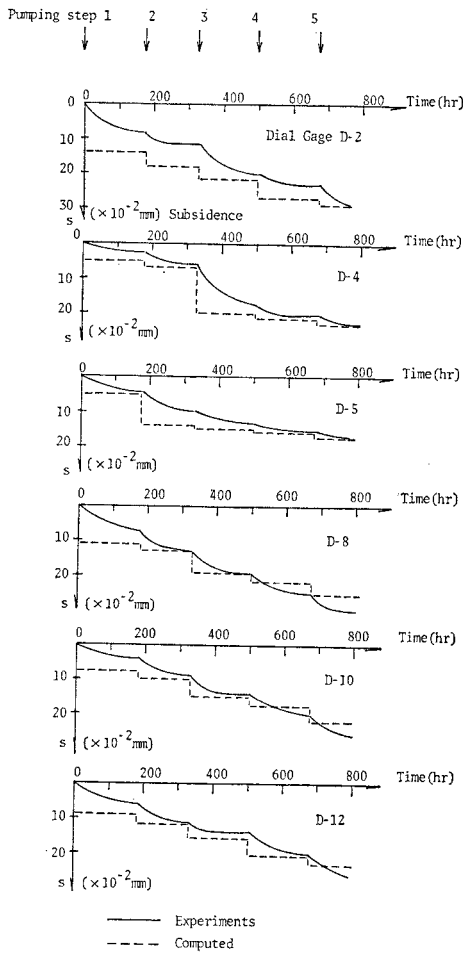


図-7 五層地盤の沈下経時変化

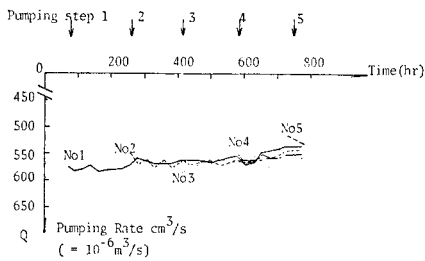


図-8 五層地盤の場合の揚水量の経時変化

終了時に、各揚水井の上部帯水層と下部帯水層にある2ストレーナの間水密ゴムパッカー（事前に水密性について試験されたもので、分流ビニール管をもつ）を設けて、 Q_1 と Q_2 をそれぞれ同一井内水位のもとで分流させて計量した。被圧帯水層からの2層揚水であるから $Q_1 = m(Q_1 + Q_2)$ が成り立ち、定数 m はそれぞれの帯水層厚さ比に等しくなることが実験的に証明されており、興味深いと思われる。

図-10 は地盤中の一断面における水頭分布と地盤沈下のプロファイルである。両者は分布の細部についてま

で一致していないが、全体的にはよく合致している。

図-11 は三層、および五層地盤の場合について、ダイヤルゲージによる実験最終沈下量 s とその点の水頭低下量 dh の関係を示したものである。これらの関係が室内実験で明らかにされたことは意義深いものと考えられるが、 dh がある値にならないと、 s が現われないという興味深い関係が読み取れる。この理由は粘土層中の吸着水的作用によるものであり、粘土のごとき微粒土中の浸透流はもともと特異な流れの性格をもち、ある固有の水頭低下量に対応した始動動水勾配にならないと粘土層からの絞り出し排水は生じないことを意味し、沈下が現われないわけである。

さらに、難透水層の離

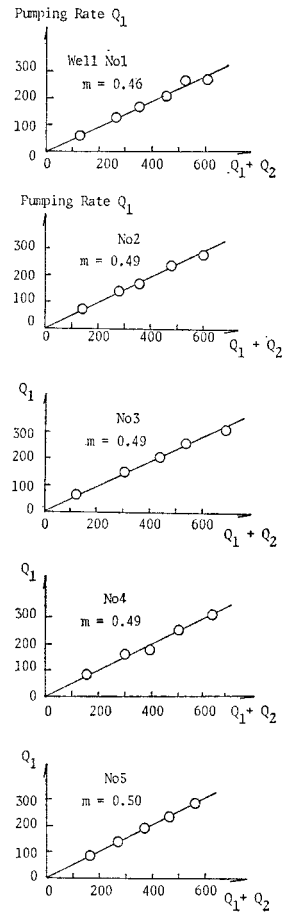


図-9 五層地盤の場合の二層帯水層揚水量配分

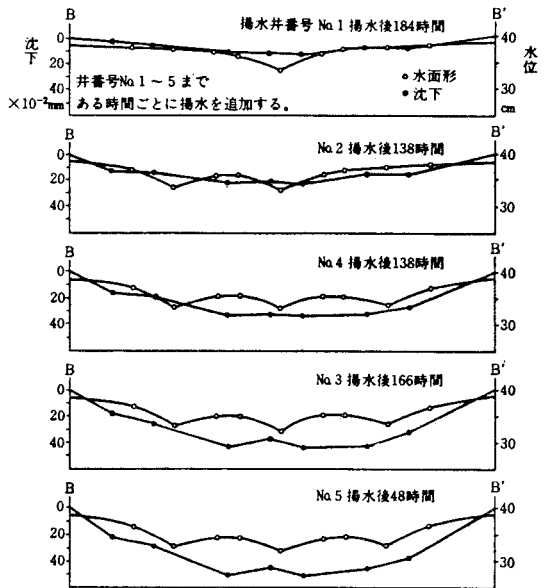


図-10 五層地盤の断面内水頭分布と地盤沈下分布の関係

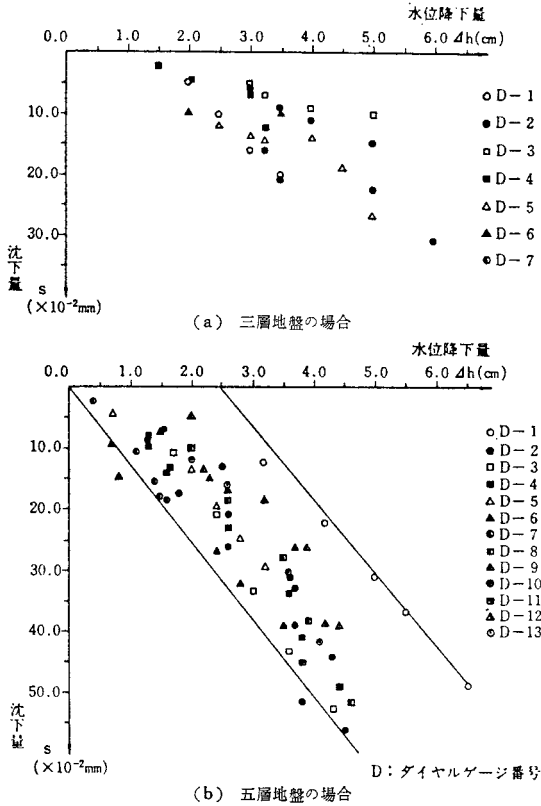


図-11 水頭低下量と実験最終沈下量の関係

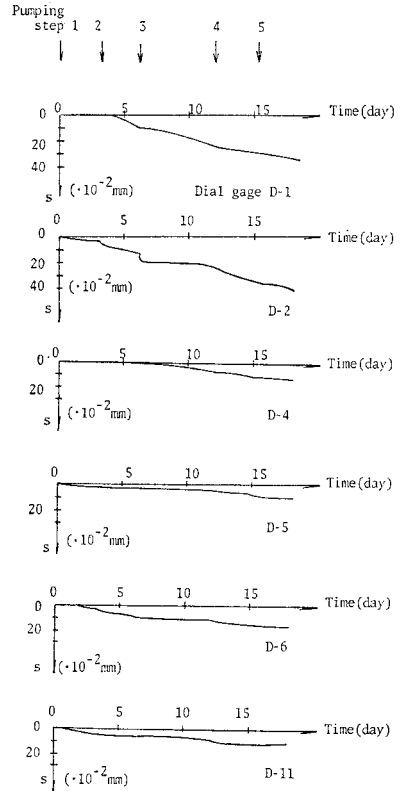


図-13 難透水層の離散的分散介在地盤の地盤変動経時変化

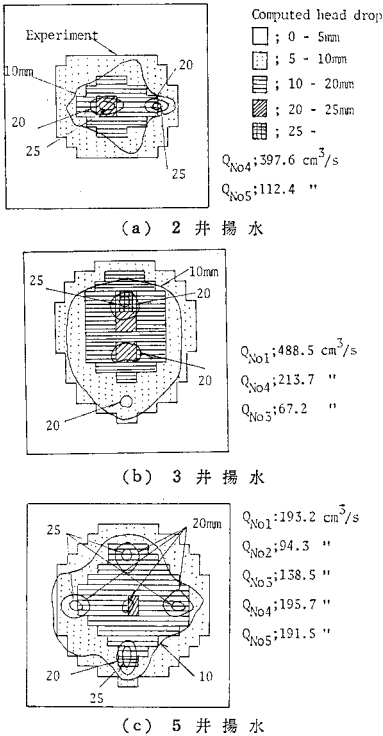


図-12 難透水層の離散的分散介在地盤の等水位・水頭分布

散的分散介在地盤における等水位・水頭分布、および地盤変動経時変化を示したものがそれぞれ 図-12, 13 である。すでに述べたように、この場合は三層、五層地盤の場合とまったく違い、被圧・不被圧地下水混在した地下水であるから、等水位・水頭分布はいくぶん平面的にゆがみ、偏った分布となっている。また地盤変動自体も各揚水ステップ(表-1 参照)ごとの遷移時の変動傾向が各ダイヤルゲージでかなり不安定であり、沈下の傾向はあるものの特異なものとなっている。つまり、被圧帯水部分の水頭低下による難透水層からの被圧絞り出し排水とともに離散的に分散した難透水層周辺の水位低下による重力排水が加わっているものと思われる。

(2) 地下水・地盤変動シミュレーションによる検討

上述した代表的な実験結果を中心に、実験と同一諸条件における地下水位・水頭、および地盤変動の数値シミュレーションを行い、実験結果と計算のそれらと比較・検討してみよう。

周知のように、一般に平面二次元地下水流は連続式と Darcy 則によって、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W \dots (1)$$

で表わされる。ここで、 x, y ：座標、 T_x, T_y ： x, y 座標の広義の透水量係数（透水係数 k と帯水層厚さ b 、または水位 h の積）、 h ：水位・水頭、 t ：時間、 S ：貯留係数、 W ：帯水層からの単位面積換算揚水量（注水の場合は流入量）や帯水層への水頭変化による流入出力（難透水層からの絞り出しによる流入や帯水層間の難透水層を通る漏水などを含む）である。

通常、多くの地下水シミュレーションは式(1)を差分化して、計算領域周辺および内部で所要の条件を与えて解くというもので、有限要素法などによっても計算され得るが、ここでは差分化による計算を行う。地下水シミュレーションにかかわる方法論はすでによく知られているので、また現地への適用例もかなりあるので他書に譲る^{8),9)}。実際の現地への地下水シミュレーションの適用に際しては、式(1)を適用して揚水による水位・水頭の計算に加え、水頭低下量と難透水層（たとえば、粘土層）の体積圧縮率を用いて、最終地下量を計算することが多い。本実験に対しても、上述の場合と同様に水位・水頭と最終沈下量を実験で得られた水理定数と所定の条件のもとで計算する。

次に、本実験における3つの人工地盤から揚水した場合に対する地下水シミュレーション適用手順、水理定数および条件について述べる。まず、三層地盤の場合、最下層の帯水層（一様厚さ 0.05 m）に式(1)が適用され、境界条件となる周辺水位 $H=0.205$ m とし、人工地盤長さ 4 m、幅 4 m をそれぞれ $\Delta x=\Delta y=0.2$ m の差分メッシュに分割して、事前に実験によって得られた $T_x=T_y=1.950 \times 10^{-3}$ m²/s、 $S=7.0 \times 10^{-7}$ を与えて、表-1 に示した揚水量に対して計算する。その際、式(1)中の W は揚水量のほかにも最上載荷層から難透水層を通して帯水層へ入る漏水量と難透水層自体の水頭低下による圧密絞り出し量を含むことになる。実際の現地へ地下水シミュレーションを適用する際はこれら漏水量や絞り出し量は大切となるが、本実験のような場合、圧密絞り出し量は、沈下量が図-5 からわかるように極めて小さく、漏水量も帯水層中の水頭低下が揚水井周辺に限られ、かつ難透水層の透水係数 6.5×10^{-8} m/s（サンプリングによる透水実験値）も帯水層の値 0.039 m/s に比べ十分小さいため、表-1 に示した揚水量の測定誤差の中にあることが計算の結果より判明した。したがって、本実験のすべてに依ることであるが、揚水量に比べ漏水量や絞り出し量が極めて小さいため、実験上も計算上もこれらの量的評価はし得なかった。

次に、五層地盤の場合は式(1)をそれぞれ2つの帯水層に同時に適用し、それぞれの帯水層の揚水量配分は図-9 に基づき、合成水頭 h を計算する。その場合、 $H=0.387$ m、二帯水層ともに $S=6.9 \times 10^{-7}$ であり、上述し

たように漏水量はそれぞれの帯水層間の水頭差と載荷層のそれより流入するとし、絞り出し量は無視し（計算は考慮したのもも行ったが）、計算を行った。しかし、揚水量に比べ小さいため、漏水・絞り出し量は実験との比較において量的評価はできなかった。

さらに、難透水層の離散的分散介在地盤の場合は、離散した難透水層からの絞り出しや重力排水は無視し、帯水層そのものが場所的に被圧と不被圧とからなっているとみて、被圧の部分は式(1)中 $T_x=T_y=bk$ 、 b ：被圧帯水層の厚さ、とおいて h を計算し、不被圧の部分では h をそのまま用いた。境界水位 $H=0.3$ m、 $S=0.29$ であった。

すべての差分計算法はよく知られた ADI 法 (alternating direction implicit method) によった。この計算法は安定性や精度上優れていることが知られている。

沈下量 s の計算は、 $s=b'm_v \omega \Delta h$ 、 b' ：難透水層厚、 m_v ：体積圧縮率、 ω ：水の単位重量、 Δh ：水頭低下量、より実験のダイヤルゲージの位置で行われる。いまの3つの人工地盤に対して、難透水層の m_v はサンプリング試験でかなり場所によりばらつく値をとったが、平均的に $m_v=6.6 \times 10^{-1}$ cm²/kg、図-11 の全実験では 0.67 cm²/kg である。

なお、本実験ではいずれの地盤の場合も揚水開始後 5～6 分経過すると流れはほとんど定常に近づくので、実験と計算の水位・水頭分布の比較は定常の場合に限られる。したがって、計算は式(1)中 $S \partial h / \partial t=0$ とおいた場合の値しか本論には示していない。

上述の諸計算の結果は実験のそれらと比較して、図-5, 6, 7 および 12 に示されている。いずれも地下水位・水頭の実験結果は計算のそれらとよい一致を示しているものと判読される。つまり、従来の地下水シミュレーションは室内実験結果と比較して十分有効であることが判明した。しかし、地盤変動については必ずしも満足できるものとはいえない。その理由は人工地盤の作成上、難透水層の均質な打設がなされなかった可能性がある。

4. 結 論

地盤沈下は古くて新しい問題であり、Terzaghi の圧密理論をはじめとして、多数の研究・実測・調査が行われてきたが、水理的な立場から地下水揚水量・水頭と地盤変動を実験的に解明しようとした研究は少なく、同時に、最近において研究された例はあまり知られていない。このような観点から、本実験が行われ、地下水シミュレーション結果と比較・検討された。その結論は次のように要約される。

実際の揚水地盤における地下水と地盤変動の室内実験

による再現性は、本実験のごとく、かなり大型の人工地盤を用いれば、評価し得るものといえる。本実験の成果は予備的ないくつかの地盤について実験を試みた後に得られたもので、小規模の地盤モデルでは境界条件に制約され、本研究で設定したごとき目的は達成しにくいことが確認された。

次に、揚水の仕方・順序と地盤変動の平面的分布・応答性については、揚水による地下水頭の等水頭分布とほとんど同様な分布・広がりで地盤沈下が生じることが明らかとなり、揚水井の配置と揚水量に地盤沈下が依存することがはっきりと実証された。このことは現地で揚水を行う際、揚水井の配置・揚水の仕方を地盤沈下対策上どうすればよいかの問題にも新しい知見を与えてくれよう。また、揚水水頭低下量と地盤沈下の関係についてある固有の水頭低下量を超えないと地盤沈下の発生がみられない、一種の始動水頭低下量の存在が本揚水実験でも確認され、水頭低下量が小さいと最終沈下量は水頭低下量に比例すると考えてもよいこともわかった。これらのことは従来の理論の現地への適用に関して、一層詳細な配慮の必要性を説いている。

さらに、最近しばしば現地に適用されている地下水・地盤変動シミュレーション手法は人工地盤中の揚水実験についても応用され、実用上の精度で十分納得できる結果を与えることが実証された。しかし、既知の地盤・地層に対しても土質試験で事前に得た水理・土質定数のみを用いてシミュレーションを完結させることは無理な面

があり、やはりシミュレーション運用上の内挿検定による修正が不可欠であろうという結論を得た。

最後に、本研究は、埼玉大学工学部地盤水理実験施設が埼玉県と共同して地盤沈下・地下水資源の研究を進めているものの中で、昭和 50, 51, 52 年の 3 年間で得られた成果の実験研究の一部をまとめたものである。記して、埼玉県環境部の各位および埼玉大学工学部 関陽太郎教授、渡辺邦夫助手に心よりお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 和達清夫：西大阪の地盤沈下について（第2報），災害研報告，No. 3, 1940.
- 2) 速水頌一郎・赤井浩一：被圧地下水の揚注水による地下水圧の変動と地盤沈下に関する水理実験，京大防災研究所創立5周年記念論文集，pp. 1~8, 昭和31年11月.
- 3) 村山朔郎・松尾 稔：地盤沈下の模型実験（Ⅱ），京大防災研年報，第7号，pp. 1~14, 昭和39年3月.
- 4) 埼玉県・埼玉大学工学部：地盤沈下・地下水位観測成果および研究年報，pp. 12~15, 昭和51年4月.
- 5) 埼玉県・埼玉大学工学部：地盤沈下・地下水位観測成果および研究年報，pp. 17~20, 昭和52年4月.
- 6) 埼玉県・埼玉大学工学部：地盤沈下・地下水位観測成果および研究年報，pp. 29~33, 昭和53年4月.
- 7) 佐藤邦明：地盤沈下をおこさない地下水のくみ揚げは可能か—地盤中の微速浸透流の役割—，科学，Vol. 50, 岩波，pp. 499~507, 1980.
- 8) 柴崎達雄：地下水盆の管理，東海大出版会，pp. 115~130, 1976. および，前出文献5），pp. 8~15 参照.
- 9) 環境庁水質保全局企画課：地盤沈下予測手法調査報告書，昭和51年3月.

(1980.9.1・受付)