

地盤沈下の模型実験(Ⅱ)

村山 朔郎・松尾 稔

AN EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE SUBSIDENCE OF GROUND (II)

by Dr. Eng. Sakuro MURAYAMA and Minoru MATSUO

Synopsis

In some cities and industrial areas developed on coastal alluvial plains, the ground subsidences caused by pumping of enormous volume of water are remarkable at present, and these phenomena become the object of public attention in Japan.

In this paper some results obtained by the large scale model tests in the laboratory which have been performed in order to make clear the characteristics and the mechanism of the ground subsidence are described. Main objects of experiments are as follows ;

(1) Measuring the variation of pore water pressure and settlement of the aquifers and the aquicludes caused by the following variation of the artesian pressure in the aquifers, viz. lowering, recovering or their repeating. (2) Measuring the variation of pore water pressure of the aquicludes by changing the surface water level.

1. 緒 言

わが国では、その立地条件から大商工業地帯のほとんどが沿海の堆積地盤上に発達してきた。その結果地盤沈下による種々の大きな社会問題、すなわち土木建築構造物の被害はもちろん、沈下による相対的な潮位上昇、高潮問題などが生じており、地盤沈下機構の解明にともなう抜本的な対策が強く望まれるようになってきた。

地盤沈下の原因としては、地殻変動、自重による地層の収縮、極氷の融解にともなう潮位上昇による相対的な沈下など自然的原因も考えられるが、被圧帯水砂層中からの地下水の大量揚水に起因する粘土層の圧密沈下に比較すると、火山、地震などの特別な活動地域を除けば一般に微々たるものである。すでに被圧地下水の水理実験の可能性については検討され、十分実用に耐えることが明らかにされているので^{1,2)}、著者らは主として被圧地下水水位低下による粘土層の圧密沈下の立場にたつて従来から実験的研究を進めてきたが、この一部はすでに京大防災年報第4号に発表した³⁾ので、ここではその後新しく製作した鋼製の実験土槽を用いて行なっている模型実験から得られた結果を示し、これに2、3の考察を加えた。実験内容は以下に示すとおりである。

- (1) 被圧地下水水位を低下または回復させて放置した場合の沈下と間ゲキ水圧の挙動について。
- (2) 1時間周期で地下水水位をくり返し変動させ、さらにその変動量を種々に変えた場合の沈下と間ゲキ水圧の挙動について。
- (3) 24時間周期で地表面上の自由水位をくり返し変動させた場合の沈下と間ゲキ水圧の挙動について。

2. 実験施設

(a) 実験土槽と付属装置

実験土槽は **Fig. 1** に示すように内径約2m、高さ約1.5mの鋼製、完全水密の円筒形のものである。土槽側面には高さ方向に3ヶ所、計6ヶの注排水口が設けられていて、これが被圧地下水位変化装置に接続されるようになっている。また土槽内外面にはさび止め塗装、上塗りラッカー塗装がほどこしてあり、土槽底部には多孔板と焼結合金製フィルターがとりつけられてあって、これから真空圧密装置に接続されるようになっている。

実験土槽内の土試料に対して被圧を与える目的で設けた被圧水位変化装置は、幅120cm、高さ36cm、奥行30cmの磨鉄板製立方体水槽を20cmの間隔で13段に配置したものである。この装置は1つの水槽を上下に移動させるものではないので、任意にまた連続的に被圧を変化させることはできないが、この反面ほとんど瞬間的に被圧を変えうる特徴がある。さらに実験中一定であるべき水圧が変動すると正確な測定ができないので、高水槽を1ヶ設け、これによって各被圧水供給槽部に給水し、被圧供給槽内部に設けられた余水吐に *overflow* させて、常に被圧水位が一定に保たれるようにした。

真空圧密装置としてはナッシュ型1段真空ポンプを使用した。このポンプは吸入口径40mm、最大真空度760mmHg、排気量1.5m³/min.のものであり、これは3.7kw閉鎖防滴電動機1台により駆動される。

(b) 土質構成と測定装置

実験土槽は3基あるが、現在までに使用しているのはこのうち2基である。説明の便宜上これを *Tank A*、*Tank B* と名付けておく。

Tank A には **Fig. 2** に示すように被圧帯水層として砂を25cm厚に敷き、その上部に粘性土を80cmの厚さにつめた。なお土槽底部にはフィルター的な意味もかねて同じ砂をつめた。砂層の充てんに際しては空気の混入をさけるため土槽に水をはってこの中に投入し、真空圧密装置で底部から何度もひいて、十分に水締めしながら所定の高さに敷きならした。ついでこの砂層の湿潤密度と乾燥密度を測定して、後に述べる沈下測定桿を設置し、砂層上に粘性土を充てんしていった。この際水の中に粘性土のかたまりを入れて踏み固めるような方法では、十分な飽和が得がたく、下部の砂層も乱される上に自然地盤の堆積過程および堆積状態と著しく異なる恐れがあるので、いったん粉にした粘性土を水の中に投入して泥状にし、真空圧密装置によって適当に圧密を促進しながら充てんしていった。そして約1ヶ月後、後述の間ゲキ水圧計と沈下測定桿を図のように所定の位置に埋設し、さらに実験開始まで5ヶ月間放置した。

Tank B においては **Fig. 3** に示すように被圧帯水砂層を2層設けた。帯水砂層を2層にしたのは、実際の場合単一帯水層のみから揚水することはまれであって、できるだけ多くの揚水量を確保するために2つ以上の帯水層より同時に揚水できるようにストレーナーを切るのが普通であるから、同時揚水による各帯水層内の被圧低下による影響、あるいは一方の帯水層のみが被圧低下した場合の影響などを究明するためである。土試料の充てんは先に述べた *Tank A* の場合と同様に行なったが、上部粘性土層の充てんに際しては

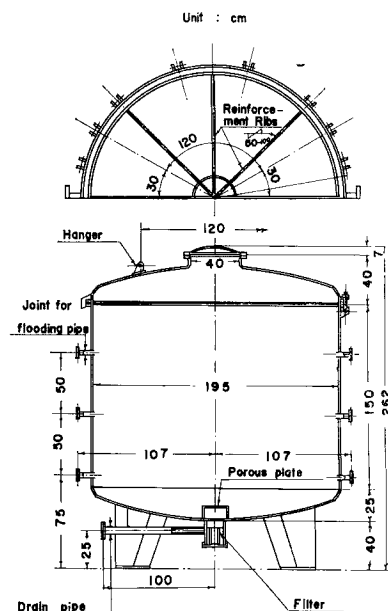
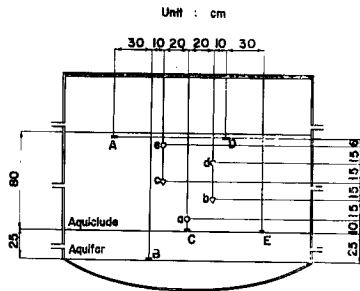
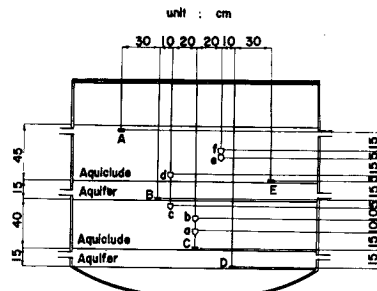


Fig. 1 Tank for experiment.



A, B, C, D, E : Settlement rods
a, b, c, d, e : Piezo meters

Fig. 2 Soil profile and position of measuring apparatus.



A, B, C, D, E : Settlement rods
a, b, c, d, e, f : Piezo meters

Fig. 3 Soil profile and position of measuring apparatus.

下部粘性土層のみがかたくなる恐れがあったので真空圧密は行なわなかった。その結果5ヶ月後になっても自重沈下は小さく、結果的にみて非常に柔らかい状態の粘性土層となった。

沈下量の測定には、上下に 20mm×20mm と 50mm×50mm のアルミ板をとりつけた内径 10mm のアルミ管を、外径 20mm の塩化ビニールパイプの中に通した沈下測定棒を用い、土槽壁に固定したアングルとの間にとりつけた 1/100mm 読みのダイヤルゲージによって測定した。また粘性土層中の間ゲキ水圧の測定には、内径 1mm のストレーナーを上下段20ヶづつ切っである外径 16mm のヘッドの内部にガラスフィルターを設置するように設計した間ゲキ水圧測定用チップに外径 9mm の外管をとりつけ、その内部に外径 3mm の内管を設けて、これを水銀マンノメーターに導びいた。外管はチップと管の内部を完全に水で満たすためのものであり、実験時にはコックで閉塞してある。配管はすべて銅パイプを用い、測定にはゼロ点法を採用した。

(c) 土質試料

砂は桂川において採取したもので、これを 2.5mm のふるいにかけて通過したものをを用いた。その粒径加積曲線は Fig. 4 に示すとおりであり、充てん時の湿潤密度、乾燥密度はそれぞれ 1.80~1.84, 1.40~1.45 g/cm³ であった。また粘性土は堺港の埋め立て地の海底より採取したもので、粒径加積曲線は Fig. 4 に示してある。これは粘土分25%, シルト分45%, 砂分30%の粘土質ロームで、比重 2.62, 飽和度100%, 液性限界55.8%, 塑性限界31.5%, 塑性指数24.3%であり、含水比は43.0%, (Tank A), 42.8% (Tank B の上部粘性土層) であった。一連の実験が終了した後、シンウォルサンフラーで採取した粘性土試料について、圧密試験の結果得られた間ゲキ比~荷重強度曲線を示すと Fig. 5 のようになる。また圧密係数~荷重強度、透水係数~荷重強度の関係は Fig. 6 に示すようになった。なお試料は Tank A については表面より約 40cm, Tank B については約 30cm の深さより採取したもので、Tank B の下部粘性土層について

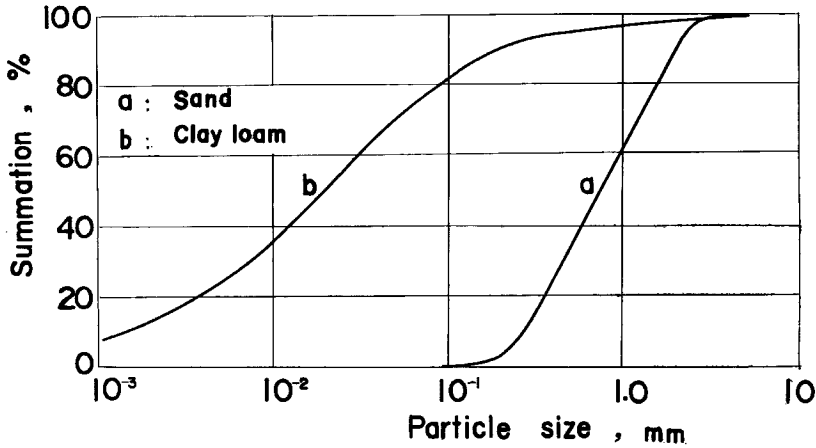


Fig. 4 Grain size distribution curves.

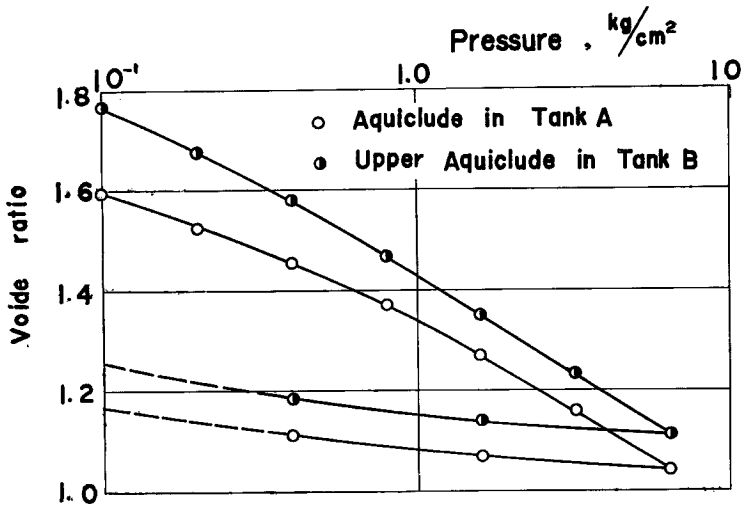


Fig. 5 Void ratio vs. logarithm of pressure curve.

はその上部に帯水砂層が存在するためサンプリングは行なわなかった。

3. 被圧地下水位変化試験

(a) 被圧地下水位変化による地盤沈下と地盤隆起

各地層の水圧が静水圧に一致している安定状態において、帯水砂層の水圧が急激に低下するとこの砂層に隣接する粘土層中には過剰間ゲキ水圧が発生し、粘土層は圧密される。この場合の間ゲキ水圧の変化はつぎの圧密の基本式を用いて解くことができる。

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

ここに u は過剰間ゲキ水圧、 C_v は圧密係数、 z は粘土層表面からの深さである。

実験に際してはまず始めに Tank A, Tank B において, 被圧水位変化装置により帯水砂層に与えた被圧水位と同じ水頭をもつだけの自由水を地表面上に満し, 粘性土層内の間ゲキ水圧が静水圧に達した後に被圧水位を最初の位置からそれぞれ Tank A では下部注排水口の位置まで 125cm, Tank B では上部帯水層のみについて中央の注排水口の位置まで 85cm だけ低下させ, この状態に保った。この場合の各粘性土層内の間ゲキ水圧の分布は Fig. 7, Fig. 8 に示すとおりであり, これ

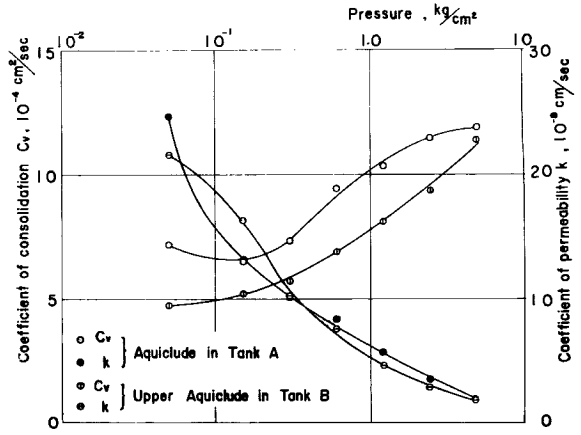


Fig. 6 Coefficient of consolidation or coefficient of permeability vs. logarithm of pressure curves.

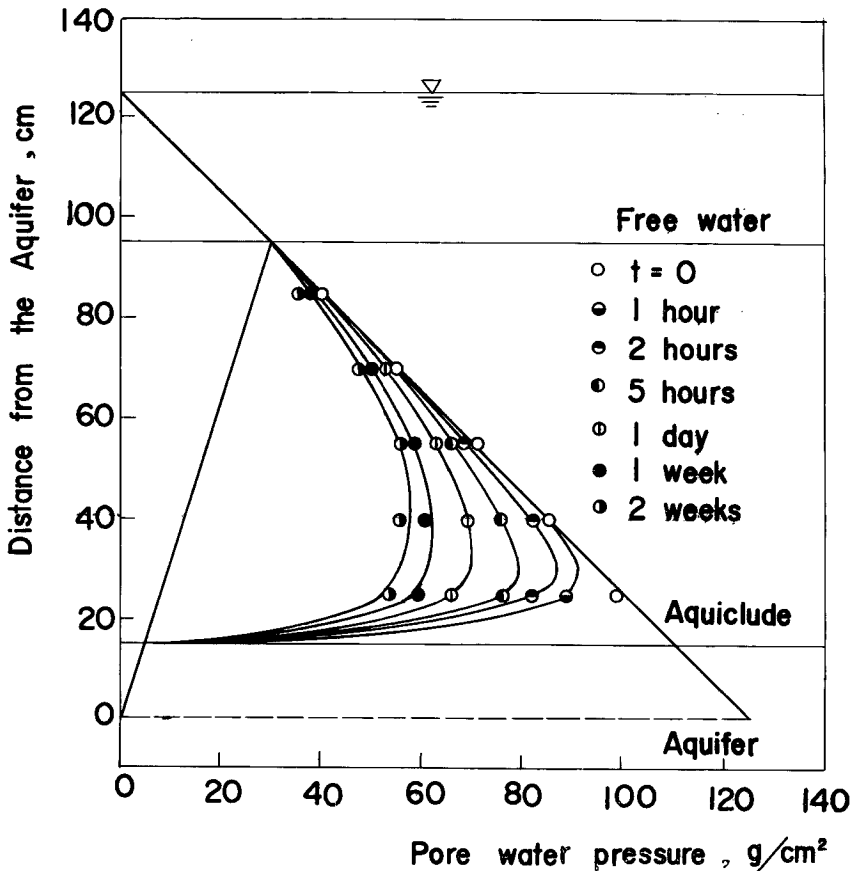


Fig. 7 Measured results of pore water pressure after the artesian head in the aquifer was lowered.

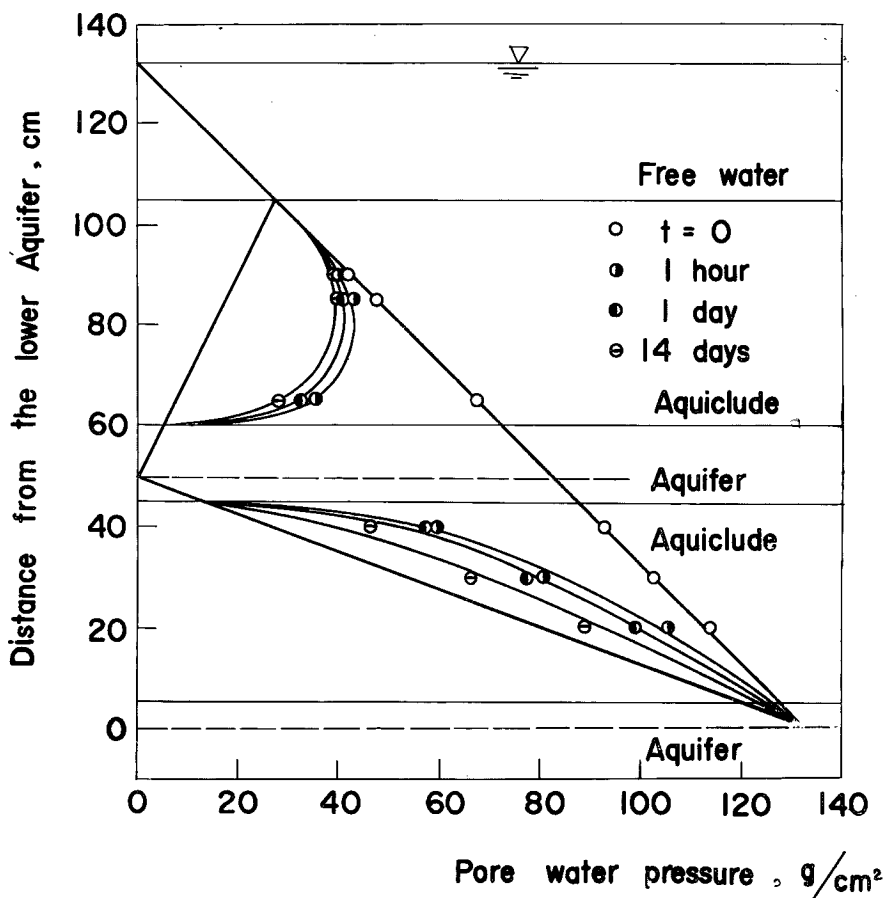


Fig. 8 Measured results of pore water pressure after the artesian head in the upper aquifer was lowered.

らの図は厚い粘性土層の圧密過程をよく表わしているといえる。しかしながら C_v を標準圧密試験の圧密初期の段階から得られた一定値と仮定すると、圧密の基本式から求めた各経過時間における圧密度は Fig. 7, Fig. 8 から求めた圧密度と一致しなかった。例えば Fig. 7 の場合について実測値と理論値を比較すると Fig. 9 のようになる。ただし図中の理論値は Terzaghi と Frölich の提案したつぎの近似式⁴⁾を用いて計算したものである。

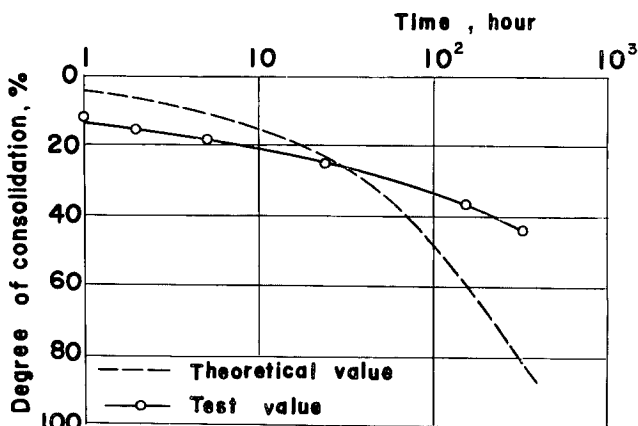


Fig. 9 Comparison of theoretical degree of consolidation with test results.

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq T \leq \frac{1}{3} : U = \frac{2}{3} \sqrt{3T} \\ \frac{1}{3} \leq T \leq \infty : U = 1 - \frac{1}{3} e^{-(1-3T)} \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここに U は圧密度, T は時間係数, e は自然対数の底であって, (2)式の圧密度と(1)式から得られる厳密解との差はごく小さい。**Fig. 9** より経過時間の小さい間では実測の圧密度は C_v を一定とした計算値よりも大きい, 圧密終了に要する時間は実際の場合の方が計算値よりもはるかに大きいことがわかる。同様の傾向が他の場合にも認められた。これは C_v が一定ではなく, 圧密経過時間の小さい段階で急激に減少することに主たる原因があると思われ, C_v が時間とともに段階的に減少するという Schiffman の方法⁵⁾にしたがって計算値を補正すると, 両者がかなりよい一致をみせることはすでに発表した^{3), 6), 7)}。

また Tank A において, 間ゲキ水圧計 a, b, c (これらの符号と埋設深度は **Fig. 2** に示した) について, 間ゲキ水圧を経過時間に対して描くと **Fig. 10** のようになる。帯水砂層に近い位置ほどその間ゲキ水

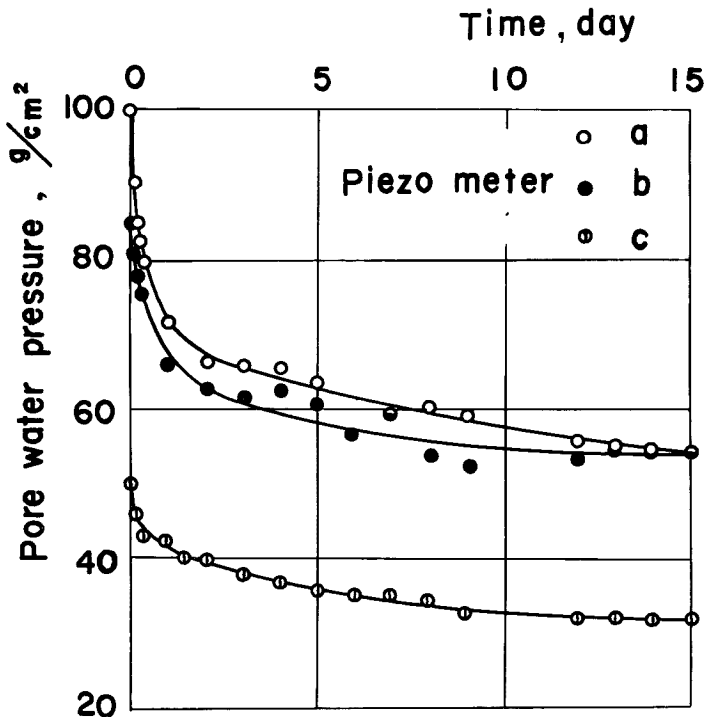


Fig. 10 Variations of pore water pressure with time.

圧の変化量が大きいことは自明のことであり, **Fig. 7** をみても明らかである。また沈下量~時間関係も当然の帰結として **Fig. 10** に類似の曲線となったが, ここでは省略する。

つぎに2週間経過後被圧水位をもとの位置に復元した。この場合の粘性土層中の間ゲキ水圧の分布は Tank A, Tank B に対してそれぞれ **Fig. 11**, **Fig. 12** に示されている。これらの図は粘性土層の膨潤の過程をよく表わしているが, 被圧水位低下による圧密過程に比較して間ゲキ水圧の復元が非常に早いことがわかる。すなわち圧密の過程では2週間の時間を要したものが, 膨潤の過程では被圧水位回復後1ないし4日目にすでにほぼ完全に静水圧状態に回復している。また図は省略するが, これらの図から推察されるよ

うに膨潤量（隆起量）は被圧水位回復後、経過時間の小さい初期の部分で急激に生じ、量的にもかなり大きくなった。このように初期の部分で急激に生じるという傾向はすでに発表した長期試験の結果においても認められた^{3),6)}。なお残留変位量は *Tank A* の粘性土層では約20%, *Tank B* の上部粘性土層では約35%, 下部粘性土層では約15%程度であった。

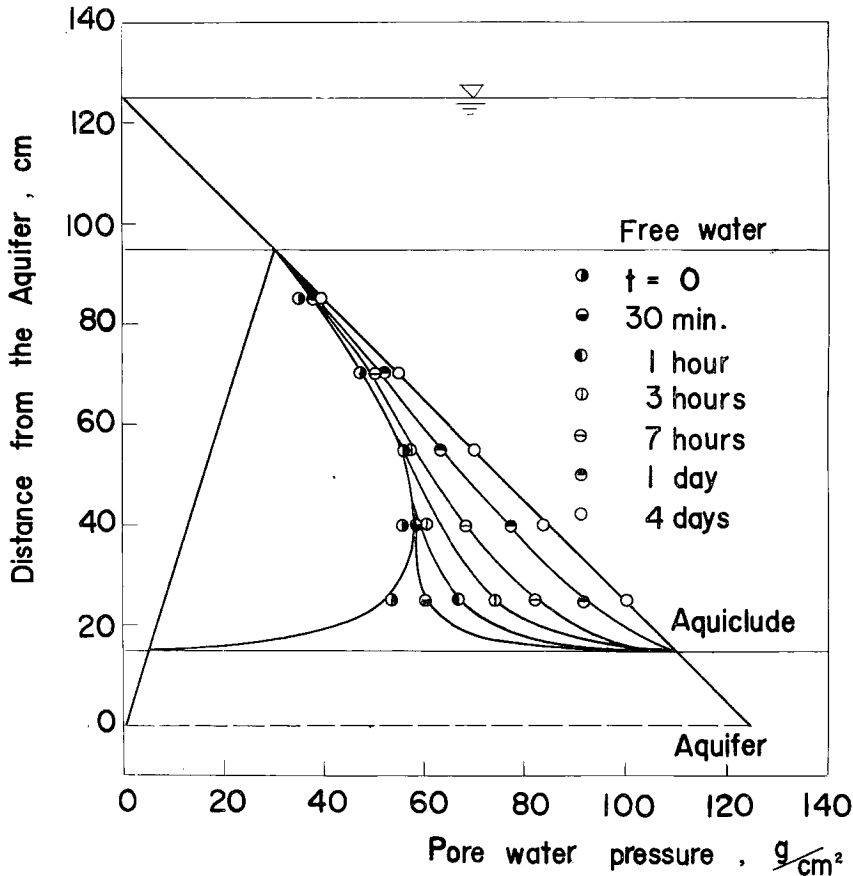


Fig. 11 Measured results of pore water pressure after the artesian head in the aquifer was recovered.

上記の一連の試験の終了後、*Tank B* において上下帯水砂層の被圧水位を自由水位に一致させた状態からともにその注排水口の位置で 80cm だけ低下させた。この場合の各粘性土層の間ゲキ水圧の時間的な分布曲線は **Fig. 13** のようになる。測定値に少しばらつきがみられ、特に下部粘性土層内の間ゲキ水圧分布曲線がややゆがんだ形となっているが、上下帯水砂層の水圧が同時に低下した場合の隣接粘性土層の圧密進行過程をよく表わしているといえる。なお鉛直方向の圧縮量は **Fig. 8** の場合に比較して、被圧低下 2 日後で上部粘性土層では約 $\frac{1}{2}$ となったが、下部粘性土層では先に圧密がある程度進んだにもかかわらず約 4 倍の大きな圧縮量を生じた。

(b) 被圧地下水位のくり返し変化による地盤沈下

現地盤においてはくり返し揚水や自然現象のために、被圧地下水水位は時間的または季節的に変動するのが

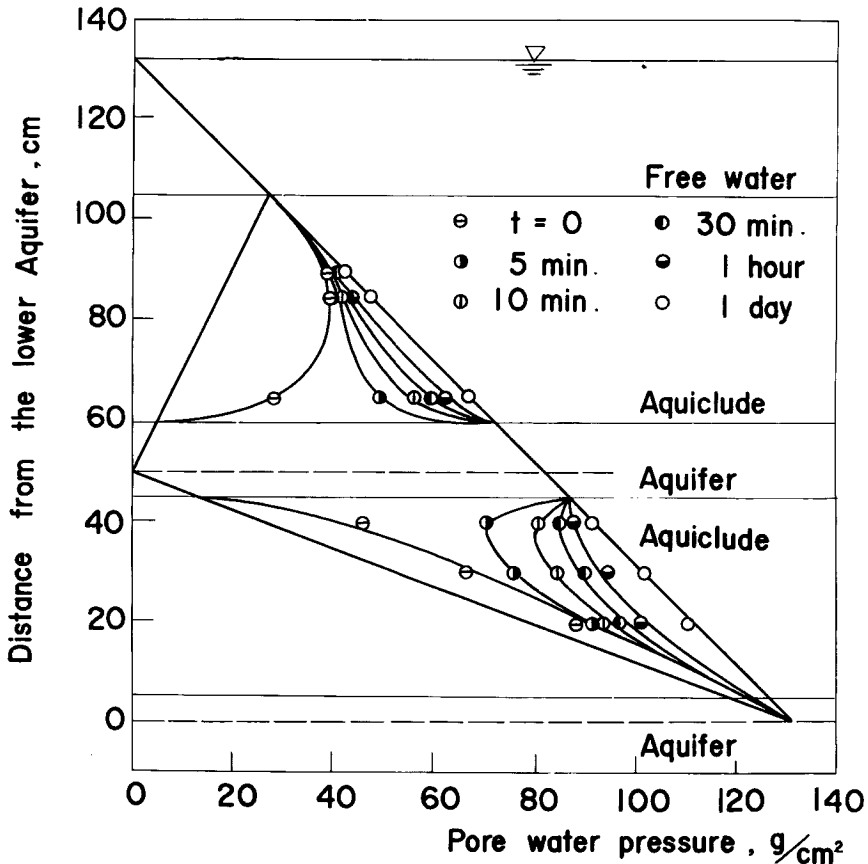


Fig. 12 Measured results of pore water pressure after the artesian head in the upper aquifer was recovered.

普通である。したがって被圧地下水位のくり返し変動が地盤沈下におよぼす効果を調べることは非常に重要な意義をもっている。

被圧地下水位の変動量を一定にして周期を変えた場合の実験的研究の結果はすでに発表したの^{3), 6), 7)}, ここでは同一周期に対して被圧地下水位の変動量を変化させた場合の実験結果を示す。すなわち Tank A においてくり返し周期を2時間とし、被圧地下水位の変動量を20, 40, 60, 80, 100, 120cmの6段階に選び、それぞれ3.5ないし4周期にわたって試験を実施した。なお試験の順序は20cm→120cmとした。

被圧地下水位を自由水位に一致させた安定状態から、下部注排水口の位置で100cmおよび120cmだけくり返し変動させた場合の沈下量～時間関係を図示すると Fig. 14, Fig. 15 のようになる。ここに沈下量とは Fig. 2 に示した各理設沈下桿によって得られた測定値にもとづいて算出した各層の鉛直方向の圧縮量であり、Fig. 15 には参考のために先に行なった被圧地下水位低下試験 (Fig. 7 にそのときの間ゲキ水圧分布曲線を示した) での沈下量～時間曲線の初期の部分をかき加えてある。これらの図からわかるように砂層がほぼ弾性的な挙動を示しているのに対し、粘性土層では明らかに各周期ごとに残留変位を生じており、しかもこの程度のくり返し回数では各周期ごとの圧密過程における沈下速度はほぼ一定であった。このような傾向は被圧地下水位の変動量が80cm以下の場合にも認められた。また図は省略するが、被圧地下水

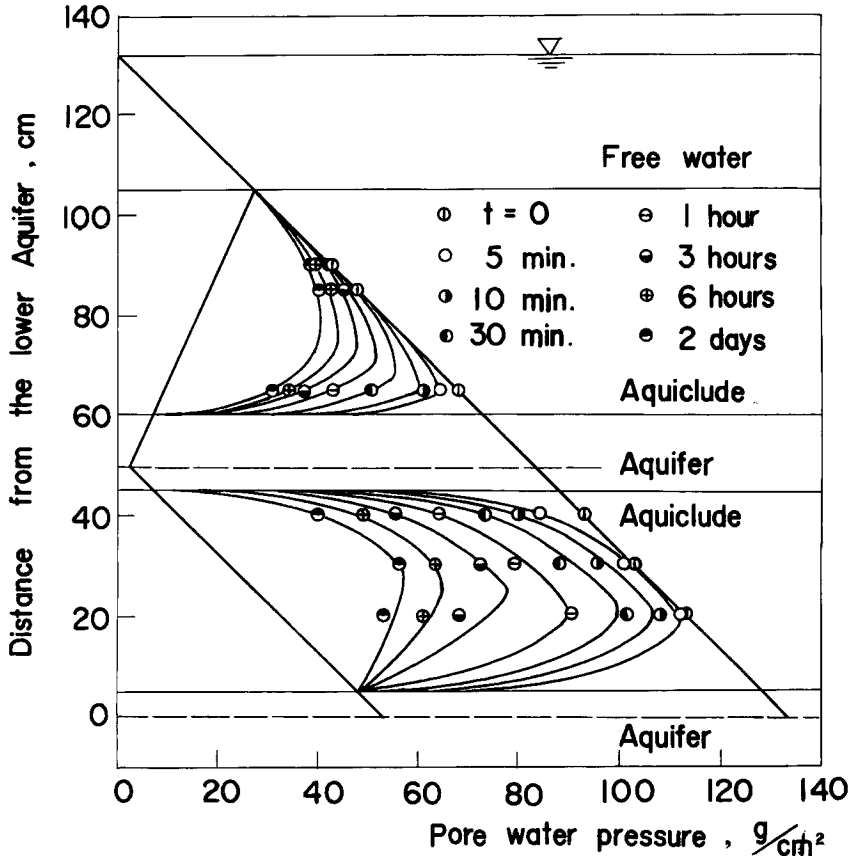


Fig. 13 Measured results of pore water pressure after the artesian heads in the upper and the lower aquifers were lowered.

位の変動量が大きいほど同一くり返し回数に対する沈下量は大きくなった。

なお Fig. 14, Fig. 15 において被圧地下水位低下，回復の各周期の沈下量および隆起量の頂点が低下，回復の瞬間より 5～10 分間右にずれているが，これは主としてつぎの原因によるものと思われる。すなわち被圧地下水位を低下させたとき，砂層ではその低下水位に相当する沈下量の大部分がほとんど瞬間的に生ずるのに対し，粘性土層の沈下には時間的なおくれがあるために，沈下の初期の段階では粘性土層が砂層の沈下に追随できず，かえって鉛直方向にのびる結果となる。また被圧地下水位回復の場合にはこれとまったく逆の現象がおこり，回復の初期においてはかえって粘性土層が圧縮されるものと考えられる。

4. 自由水面の変化が地盤沈下におよぼす影響

粘性土層上に自由水があり，この自由水の水位変動が地盤に影響をおよぼし，これが重大な問題となる場合がある。例えば潮汐の干満が臨海地域の地盤沈下の原因の 1 つになるとすれば，これが防潮堤の沈下をひきおこし，臨海都市に重大な影響を与えることになる。ここでは粘性土層上の自由水面の変動が粘性土層の圧密沈下におよぼす影響を調べるために，Tank B において帯水砂層の被圧水位をもとのままに保っておき，上部粘性土層上の自由水位を 24 時間間隔で安定状態から 20cm だけ低下，回復させた。このときの粘性

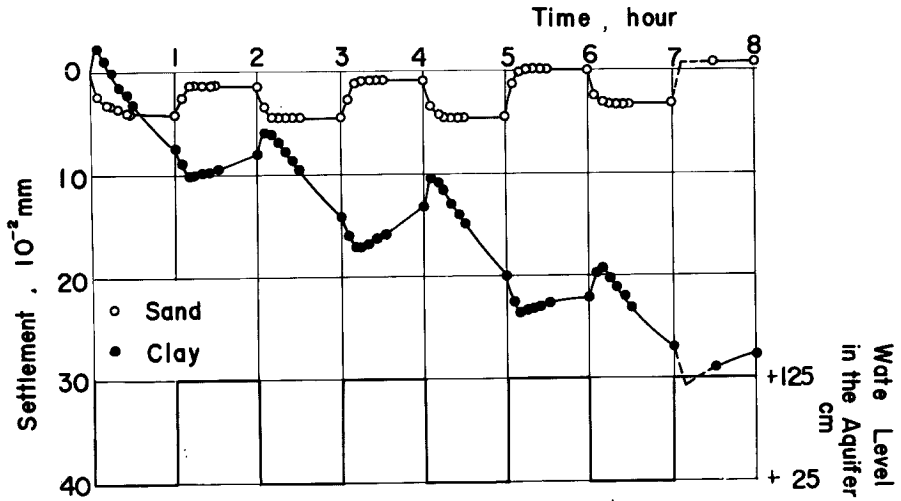


Fig. 14 Behavior of the subsidence due to repetitional drawdown of the artesian head.

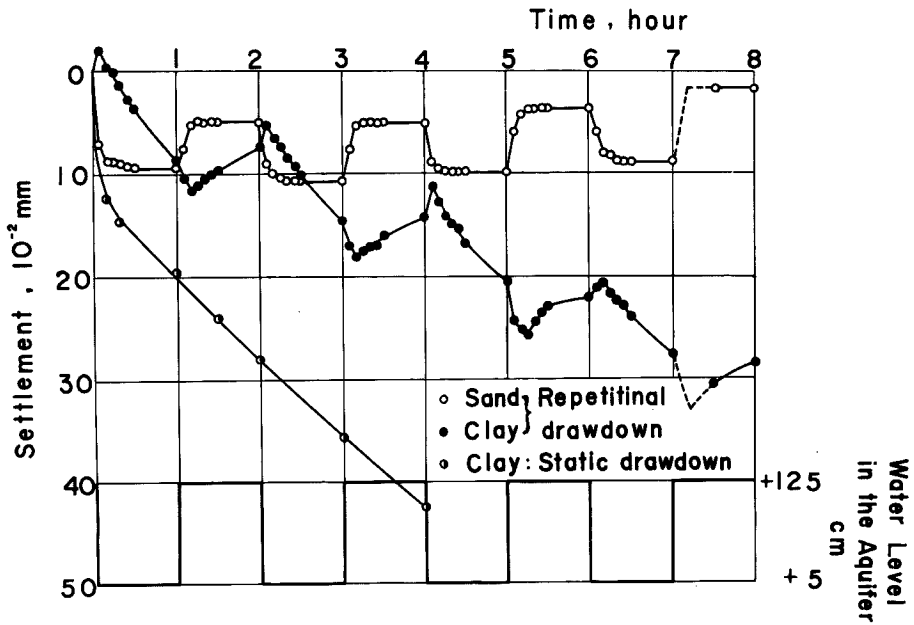


Fig. 15 Behavior of the subsidence due to repetitional drawdown of the artesian head.

土層中の間ゲキ水圧の分布を測定したが、**Fig. 16** は自由水位を低下したときの間ゲキ水圧分布の1例を示している。

いま自由水位を安定状態から急激に低下させた場合の間ゲキ水圧分布について調べてみる⁹⁾。**Fig. 17** において折線 $a_0c_0d_0e_0f_0$ は安定状態における鉛直全応力線を表わしている。ここに水の単位体積重量を γ_w 、水面から上部粘性土層上面までの深さを z_0 、上部粘性土層、上部砂層、下部粘性土層の湿潤密度と層厚をそれぞれ $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ および z_1, z_2, z_3 とすると、 c_0d_0 線は $\gamma_w z_0 + \gamma_1(z - z_0)$ 、 d_0e_0 線は $\gamma_w z_1 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2(z - z_0 - z_1)$ 、 e_0f_0 線は $\gamma_w z_0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3(z - z_0 - z_1 - z_2)$ を示している。また直線 $a_0c_0d_0e_0f_0$ は静水圧分布線である。したがって有効応力は上部粘性土層については三角形 $c_0d_0d_0$ 、上部砂層については台形 $d_0e_0e_0d_0$ 、下部粘性土層については台形 $e_0f_0f_0e_0$ で表わされる。もし自由水面が a_0 の位置から b_1b_0 の位置に急激に低下したとすると、全応力線は折線 $b_1c_1d_1e_1f_1$ で与えられる。ここに $\overline{a_0c_0}/\overline{b_1c_1}$ 、 $\overline{c_0d_0}/\overline{c_1d_1}$ 、 $\overline{d_0e_0}/\overline{d_1e_1}$ 、 $\overline{e_0f_0}/\overline{e_1f_1}$ である。ところで粘性土の有効応力は載荷重が変化しても瞬間的には変化することができないものである。何故なら粘性土の間ゲキ比が瞬間的には変化しえないからである。したがって折線 $b_1c_1d_1e_1f_1$ で表わされる全応力中、上部粘性土層、下部粘性土層のこの瞬間の有効応力はそれぞれ三角形 $c_0d_0d_0$ に合同な三角形 $c_1d_1d_1$ 、台形 $e_0f_0f_0e_0$ に合同な台形 $e_1f_1f_1e_1$ で表わされる。また上部砂層の有効応力面については

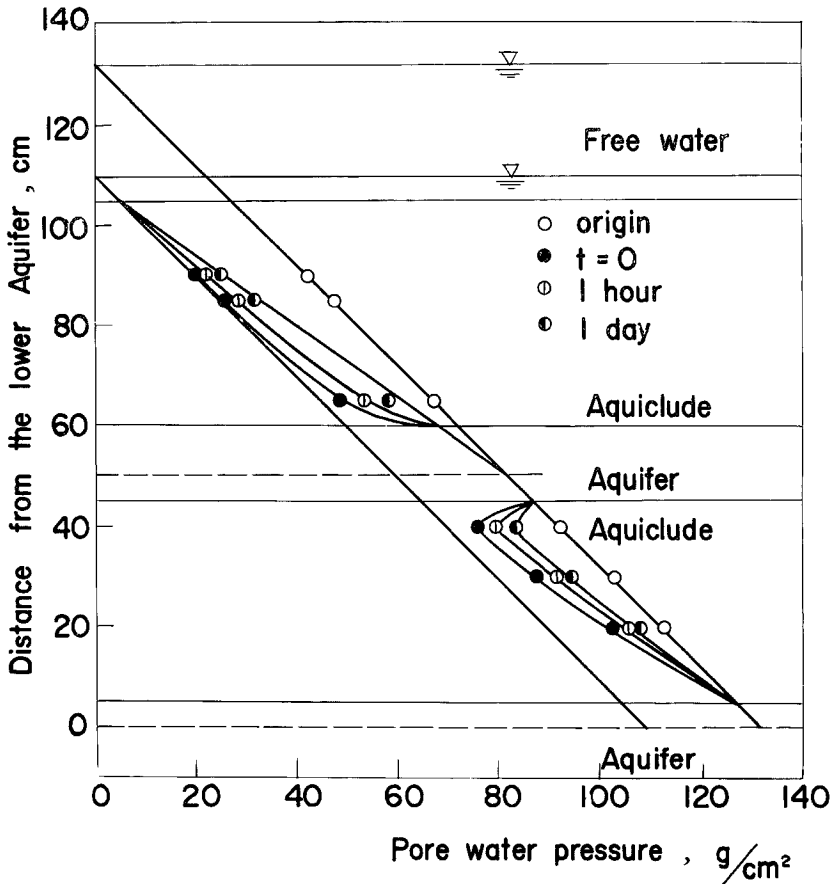


Fig. 16 Measured results of pore water pressure after the level free water surface was lowered.

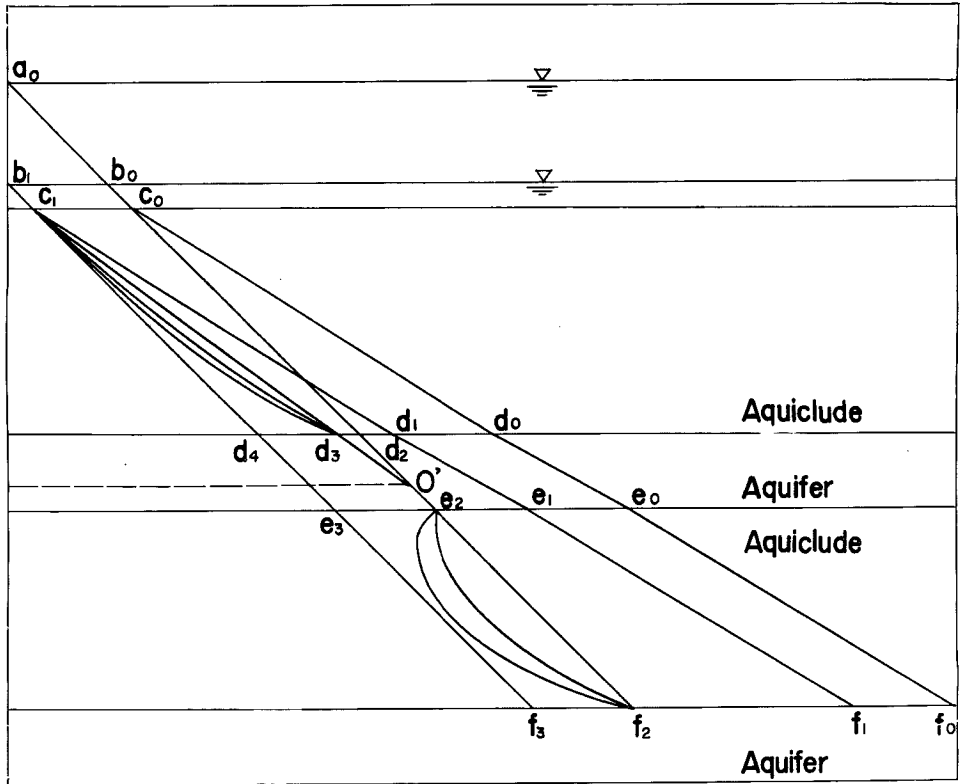


Fig. 17 Distribution of pore water pressure after the level of free water surface is lowered.

多少問題があるが、一応瞬間的には台形 $d_3e_3e_0d_0$ に合同な台形 $d_1e_1e_0d_1$ となると考えておいてよいであろう。故にこの瞬間の間ゲキ水圧分布線は直線 $b_1c_1d_1e_1f_1$ になると考えられ、そしてこれが初期間ゲキ水圧分布線である。しかしながら帯水砂層への水の供給が自由に保たれているとすると、帯水砂層の瞬間的な膨張によってつぎの瞬間には帯水砂層の被圧水位は d_1 から d_3 の位置へ、 e_3 から e_2 の位置へ、 f_3 から f_2 の位置へ回復する。したがって有効応力の最終分布面は、上部粘性土層に対しては三角形 $c_1d_3d_1$ 、下部粘性土層に対しては台形 $e_2f_2f_1e_1$ となり、 O' の位置を被圧水位変化装置につながれている注排水口の位置とすると、終期間ゲキ水圧分布線は折線 $c_1d_3O'e_2f_2$ で与えられることになる。そこで粘性土層中の間ゲキ水圧は終期間ゲキ水圧分布線にむかって曲線 c_1d_3 、 e_2f_2 にそって時間の経過とともに増加し、これにしたがって粘性土層は有効応力の減少、すなわち三角形 $c_1d_1e_3$ 、台形 $e_3f_3f_2e_2$ に相当する量だけ膨潤することになる。また自由水面を a_0 の位置に復元した場合には、以上とはまったく逆の過程により圧密現象を生ずることは明白である。

Fig. 16 は上に述べた過程をよく説明しているといえる。この図で自由水位を 20cm 低下させた直後における間ゲキ水圧分布線が初期間ゲキ水圧分布線に一致せず、これより右方に位置しているのは、自由水位の低下に要した約15分間の間にある程度の膨潤が進んだためであると考えられる。また上部粘性土層においては1日後に完全に終期間ゲキ水圧分布線に一致するまでに膨潤しているが、下部粘性土層においてはまだこの分布線に達しなかった。なお自由水面の位置をもとの位置に復元した場合には、この復元の直後(所要

時間約15分)に間ゲキ水圧分布線はすでに静水圧分布線に一致した。

自由水位の変化が被圧地下水位の変化におよぼす影響、自由水位のくり返し変化が粘性土層の沈下量～時間関係に与える影響なども調べているが、現在解析検討中であるので別の機会に報告したいと思う。

5. 結 語

地盤は必ずしも不沈のものではなく、自然に生ずる沈下も若干あるが、地下水の揚水を原因とする人為的な沈下量はこれに比較して格段に大きく、また激しい。本論文では地盤沈下の特性や沈下機構を解明するために従来から行なってきた大型模型実験による結果を示した。これを要約すると、

- (1) 帯水砂層の被圧地下水位を低下、回復させた場合に測定された隣接粘性土層中の間ゲキ水圧分布の推移は、粘性土層の圧密、膨潤の過程をよく表わしたが、これから求めた圧密度～時間関係は $C_v =$ 一定、として求めた理論曲線と一致しなかった。また圧密の過程にくらべて膨潤の過程における間ゲキ水圧の復元はかなり早かった。
- (2) 被圧地下水位を反復低下させると、砂層がほぼ弾性的な挙動を示すのに対し、粘性土層では残留変位を生じ、またくり返し回数が増加しても各周期における沈下速度はあまり変らなかつた。
- (3) 粘性土層上の自由水位を低下させた場合に測定された粘性土層中の間ゲキ水圧の挙動は理論的に考えられる場合にかなりよく一致した。

なお本研究は昭和36年度文部省機関研究費による研究の一部である。また本研究所柴田徹助教授に適切な御協力をいただいたことを記して、謝意を表すものである。

参 考 文 献

- 1) 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、京都大学防災研究所創立5周年記念論文集、1956、pp. 67～74.
- 2) 速水頌一郎、赤井浩一：被圧地下水の変動と地盤沈下に関する水理実験Ⅱ、京都大学防災研究所年報1957、pp. 26～40.
- 3) 村山朔郎、柴田徹、山本順一：地盤沈下の模型実験(Ⅰ)、京都大学防災研究所年報第4号、1961、pp. 11～20.
- 4) Terzaghi and Frölich; Theorie der Setzung von Tonschichten, 1935、堀武男訳；粘土層の沈下1943、pp. 64～68.
- 5) Schiffman, R. L. ; Consolidation of Soil Under Time-Dependent Loading and Varying Permeability, Proceedings of Highway Research Board, Vol. 37, 1958, pp. 584～617.
- 6) 村山朔郎；地盤沈下について、海岸工学の最近の進歩、土木学会関西支部、1961、pp. 99～122.
- 7) Murayama, S. and Matsuo, M. ; On the Ground Subsidence, Proceedings of the Second Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1963, pp. 220～222.