

地盤沈下の模型実験(I)

村山 朔郎・柴田 徹・山本 順一

AN EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE SUBSIDENCE OF GROUND (I)

*by Dr. Eng. Sakuro MURAYAMA, Dr. Eng. Toru SHIBATA and
Junichi YAMAMOTO*

Synopsis

This is a report of hydraulic experimental research on the subsidence of ground due to pumping up the ground water. The following experiments have been performed by the large scale model: (1) Measuring the variation of pore water pressure and the settlement of aquiclude during the drawdown test from aquifer. (2) Measuring the variation of pore water pressure and the rebound of aquiclude during the recharge test into aquifer. (3) Measuring the behaviour of each layer during the repetition of drawdown. The variations of the coefficient of consolidation of clay layer during the consolidation process have been also studied experimentally.

1. 緒 論

地下水の揚水による地下水圧の低下と地盤沈下との関係、あるいは地下注水による地下水圧の上昇と地盤隆起との関係については、もっぱら現地を対象として観測・測量が行なわれ、それに基づいて種々の解析法が提案されてきた。しかし現地の地下構造やその物理的性質については不明な点が多く、また各種水理観測の条件が制約されるために十分な実験を行なうことが難かしく、ここに模型実験の重要性が認められるわけである。

すでに速水、赤井氏らによつて被圧地下水の水理実験の可能性について検討され、十分実用に耐えることが明らかにされている¹⁾²⁾ので、著者らは実際の地盤構成に類似の土層構成を有する大型実験槽を完成し、現地の実情に近い条件のもとに実験を行なつた。実験項目としては

- (1) 被圧地下水位の低下による地盤沈下量及び間ゲキ水圧の測定。
- (2) 被圧地下水還元による粘土地盤の膨潤及び間ゲキ水圧の測定。
- (3) 被圧地下水位の繰り返し変化による地盤沈下量の測定。

であつて、更に潮汐変化による地盤沈下についても実験を行なつたがその結果の報告は別の機会にゆずる。

2. 実験装置

地盤沈下の模型実験を行なうに際して、まずその土層構成が問題となるが、本実験においては現地盤の第1粘土層の厚さを30m、被圧帯水砂層の厚さを10mとみなし、これに対応して粘土層厚さを約1.2m、被圧帯水砂層厚さを0.4mとする2層の土質構成をもつ実験土槽を計画した。被圧地下水位の変化と、潮汐変化が地盤沈下にどのように影響するかをみるための実験装置としては、土槽に附属した被圧地下水位変化装置及び潮汐変化装置を設けた。また防潮堤の沈下状態を調べるため、粘土層上に模型防潮堤を設置したほか、揚水井を設けて揚水による被圧地下水位の変化についても実験が可能ならしめた。

これらの設備をもつた実験土槽は、実験開始前の安定状態として、被圧地下水位と潮汐変化装置の水位を

同一水面に保ち、水位差により粘土層内に水の移動が生じない状態をとつた。

実験土槽と附属装置 土槽は Fig. 1, 2 に示すような、床版と三方の側壁を鉄筋コンクリートで、一方を建築用ブロックで仕切つた内面防水モルタル仕上げの、長さ 5 m、巾 2.7 m、高さ 2.3 m の矩形槽である。土槽の下部には被圧帯水層として厚さ 40 cm の砂層があり、一側壁からは 4 本の 1" パイプを通じて被圧地下水水位変化装置へ連結されている。

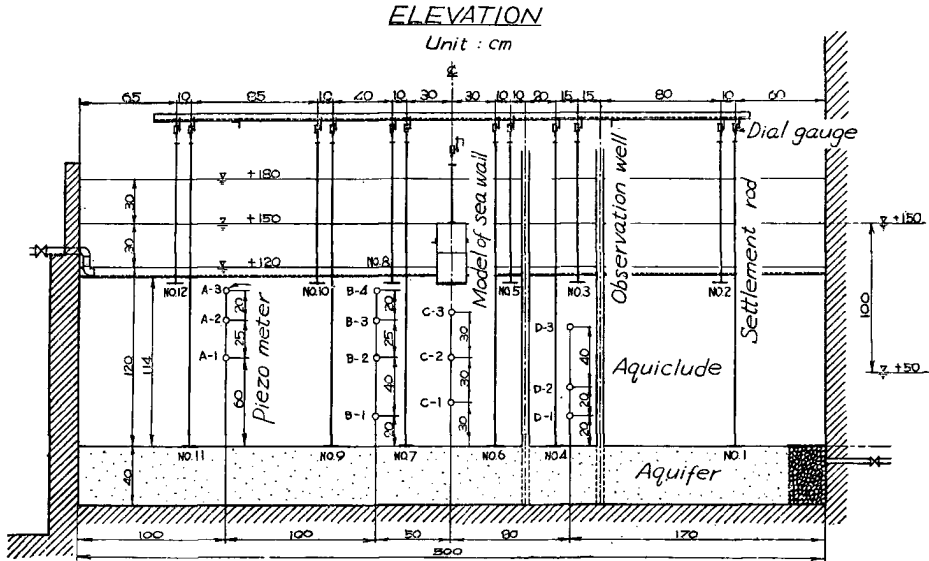


Fig. 1 Setup for tests : Elevation

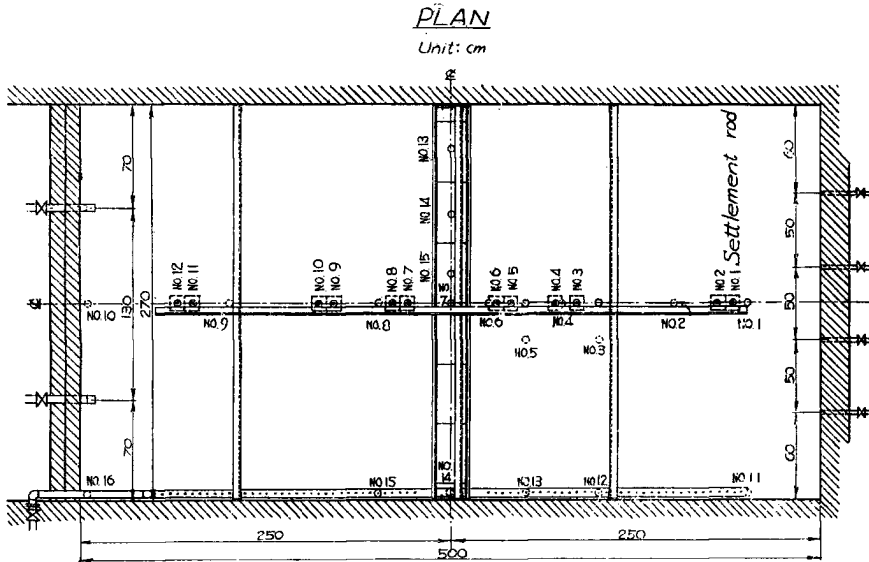


Fig. 2 Setup for tests : Plan

土槽に砂層を填充する際には、あらかじめ水を張っておき、その中へ空気が混入しないようにして砂を投入し、40cm 厚さに敷きならした。この砂層の上に粘土を1層が 10~15cm の厚さに締固めて所定の厚さまで積み重ねていったが、この場合も砂層と同様に空気の混入をさけるため、粘土の表面まで常に水位があるように留意した。

被圧地下水水位変化装置は 70×70cm の水面を有する木製水槽で、直径 3.5cm の溢流口が 4 個並べられており、ゴム栓のさしかえにより被圧帯水層上面より +150cm から +50cm まで 1.0m の範囲にわたって、被圧地下水水位を 10cm ごとに与えることが可能である。この水槽の水位は内径 5mm のビニール・パイプでピエゾメーターに結ばれ、水位調節の正確を期するようにした。

なお粘土層の上には Fig. 1, 2, 3 に示したように模型防潮堤が土槽の長手方向に直角に中央部に設けられている。この模型防潮堤は 20×20×40cm のコンクリートブロックを 2 段に積み重ねたもので、2 段 6 組が並べられており、その底面における荷重強度は 0.09kg/cm² である。

測定装置 砂層と粘土層の沈下量を測定するため、Fig. 1 に示したごとく砂層上端面及び粘土層の表面より 5cm の深さに各々 6 カ所、計 12 コの測定装置を、実験土槽の長手方向に中央 1 列に設置した。沈下棒は内径 15mm のアルミ管で沈下板として 10×10cm のアルミ板が取り付けられてあり、その外管として 1" の塩化ビニール管を用いて上層部の摩擦の影響を除くようにした。なお沈下量の測定は 1/100mm のダイヤルゲージを用いて行なつた。

粘土層内の間ゲキ水圧分布とその推移を測定するため、Fig. 1 に示した間ゲキ水圧測定用チップを A, B, C, D の 4 グループにおいて深さ方向に 3~4 コ、計 13 コ埋め込んだ。そのチップは銅製二重管の先端に固定されており、外管は三方コックをへて水銀マンオメーターに導き、内管は設置時の送水用として使用した後、コックで閉塞してある。以上 13 コの銅管チップを 1 コの測定盤に集めて、粘土層内各点の間ゲキ水圧変動を測定した。

被圧帯水砂層の被圧水頭を測定するために外径 8mm、長さ 70mm の銅管に多数の孔をあけ、これを真鍮網で包んだチップに内径 5mm のビニール管を連結し、砂層上面より 10cm 深さに挿入した。その配置は Fig. 2 に示したとおりである。

土質試料 実験槽の土質構成は Fig. 1 に示したごとく砂層と粘土層よりなっている。砂は木津川産のものを約 3mm フルイにかけて使用した。その粒径加積曲線を Fig. 4 に示す。この砂は土槽に填充した状態において、乾燥密度：1.55g/cm³、比重：2.56 であつた。

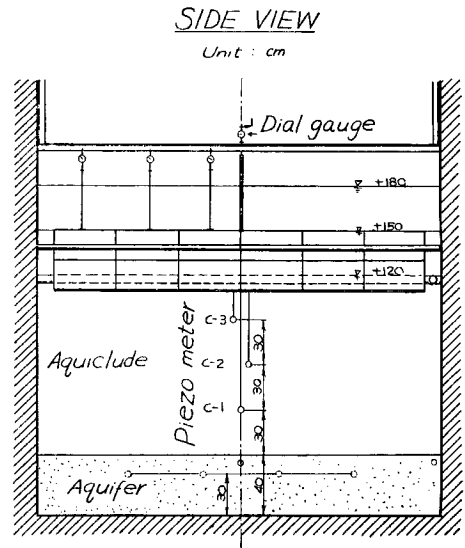


Fig. 3 Setup for tests : Side view

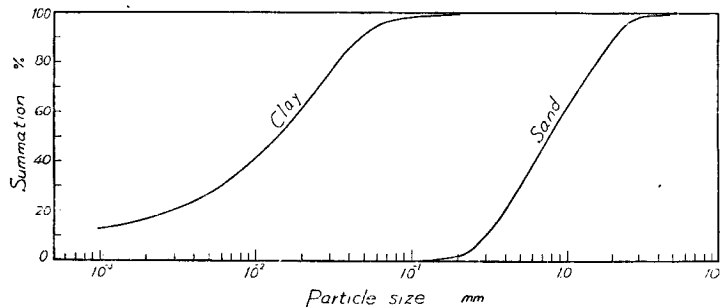


Fig. 4 Grain size distributions

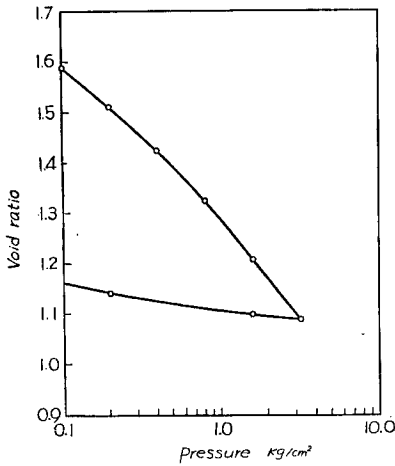


Fig. 5 Void ratio vs. logarithm of pressure curve

粘土は大阪府堺港の埋め立て予定地の海底より採取したもので、その粒径加積曲線を Fig. 4 に示すごとくシルト質粘土ロームである。土槽に填充後サンプリングして試験を行なった結果、含水比：64.4%，比重：2.65，単位重量：1.68g/cm³，飽和度：100%，LL；87.2% PL；27.1%であつた。

3. 以下に述べる一連の実験を行なう前に、粘土層表面より 20cm 深さの試料を採取して圧密試験を実施して得た $e \sim \log p$ 曲線を Fig. 5 に示す。また圧密試験から求めた圧密係数 C_v ，透水係数 k を圧密荷重強度 p との関係として Fig. 6 に示す。

3. 被圧地下水水位低下による沈下

被圧地下水水位を急激に低下せしめて、その状態を長期間持続すると、被圧帯水砂層の上に存在する粘土層は圧密沈下を生ずる。この現象の理論解を約7カ月間の実験結果と

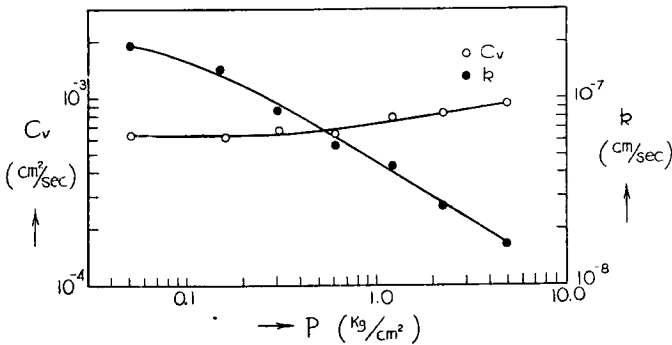


Fig. 6 Coefficient of consolidation or coefficient of permeability vs. logarithm of pressure curves

比較検討した。

まず Fig. 7 に示すごとく、厚さ $2H$ の粘土層下にある被圧帯水砂層の水位が h から Δh だけ低下した場合に、粘土層の圧密沈下について考察すると、この場合には

$$\left. \begin{aligned} u(x,0) &= \frac{x}{2H} \cdot \Delta h \cdot \gamma_w \\ u(0,t) &= 0 \\ u(2H,t) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

なる初期、境界条件に対して

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2)$$

を解けばよい。

ただし u ；間ゲキ水圧， x ；粘土層表面からの深さ， γ_w ；水の単位重量， C_v ；圧密係数である。

(2) 式を (1) の条件を用いて解くと、間ゲキ水圧 $u(x,t)$ あるいは圧密度 $U(t)$ として衆知の関係が得られるが、その結果を用いて実験データを解析してみると後述するように圧密係数が圧密の

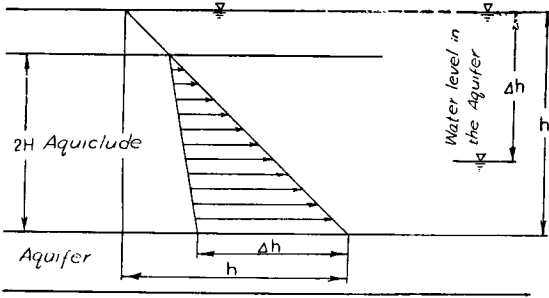


Fig. 7 Section through consolidating layer, showing hydraulic boundary conditions

進行とともに変化するので、必ずしも現象をよく説明できないことが明らかとなつた。そのためにここでは Schiffman, R. L. の方法⁹⁾に従つて圧密係数 C_v が時間とともに推移する場合を考察する。

この方法は Fig. 8 に示すように C_v が時間とともに段階的に減少するとして解くもので、 i 番目の時間

区隔に対する基礎式は

$$\frac{\partial u_i}{\partial \bar{t}} = C_{vi} \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

であり、(1)式の初期、境界条件に対応して

$$\left. \begin{aligned} u_i(z, 0) &= u_{i-1}(z, t_i), & 0 \leq z \leq 2H \\ u_i(0, \bar{t}) &= 0, & 0 \leq \bar{t} < \infty \\ u_i(2H, \bar{t}) &= 0, & 0 \leq \bar{t} < \infty \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

ただし $\bar{t} = t - t_i$ である。

(4)の条件を用いて(3)式を解いた結果は

$$\left. \begin{aligned} u(z, T') &= \frac{2}{\pi} \cdot \Delta h \cdot \gamma_w \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{m} \cdot \exp\left(-m^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot T'\right) \cdot \sin \frac{m\pi z}{2H} \\ U(T') &= 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{1}{m^2} \cdot \exp\left(-m^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot T'\right) \\ T' &= \frac{1}{H^2} [(C_{v1}t_1 + C_{v2}(t_2 - t_1) + C_{v3}(t_3 - t_2) + \dots + C_{vn}(t - t_n))] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

ただし

$$t_1 = (t_2 - t_1) = (t_3 - t_2) = \dots = (t - t_n) = \bar{t}$$

とすると

$$T' = \frac{\bar{t}}{H^2} (C_{v1} + C_{v2} + C_{v3} + \dots + C_{vn})$$

となる。

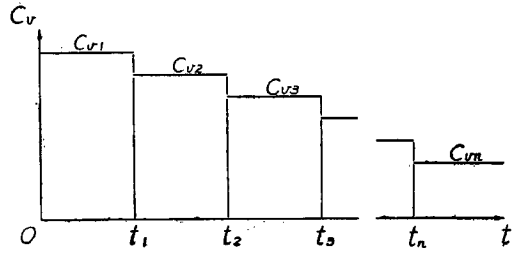


Fig. 8 Segmental time approximation for coefficient of consolidation (After Schiffman, R. L.)

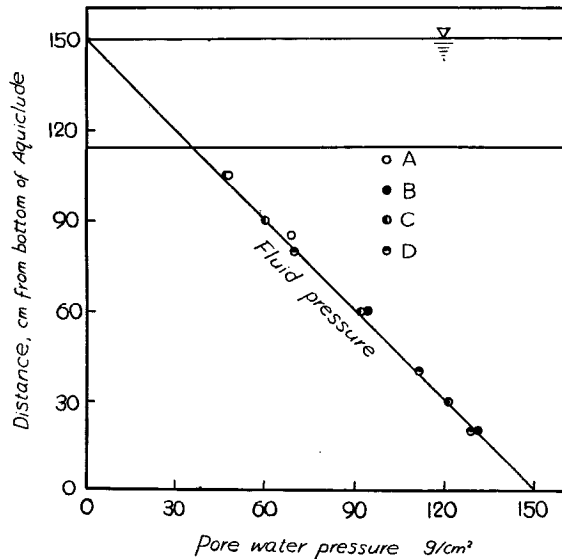


Fig. 9 Distribution of pore water pressures

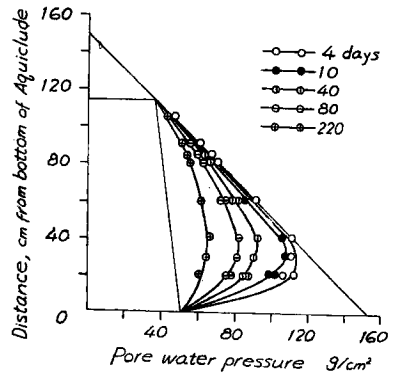


Fig. 10 Results of pore water pressure measurements

実験は $2H=115\text{cm}$, $h=150\text{cm}$, $\Delta h=100\text{cm}$ として、粘土層の圧密沈下量及び間ゲキ水圧の推移を約7カ月間にわたって観測した。

まず被圧地下水位を低下させる直前の間ゲキ水圧の深さ方向の分布を調べると、Fig. 9 に示すごとく静水圧分布に一致して、間ゲキ水圧計が正しく働いていることを確認できる。

Fig. 10 は被圧地下水位低下後4日、10日、40日、80日、220日経過時における間ゲキ水圧の分布をプロットしたものであつて、厚い粘土層の圧密過程をよく説明していると思われる。

次に Fig. 10 の結果から、各経過時間における圧密度 U を求めるわけであるが、それは例えば Fig. 11 において $\triangle ABC$ から斜線部分を差引いた面積と $\triangle ABC$ との面積比として表わせるから容易に計算することができる。かくして求めた U を経過日数に対してプロットすると Fig. 12 が得られるので、この図と(5)式から圧密係数 C_v の時間的推移を得る。

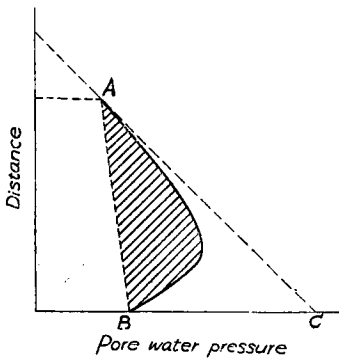


Fig. 11 Sketch showing the pore water pressure distribution used to obtain the degree of consolidation

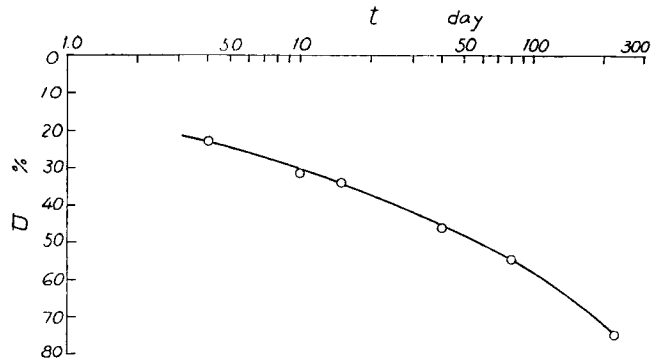


Fig. 12 Degree of consolidation vs. duration of test curve

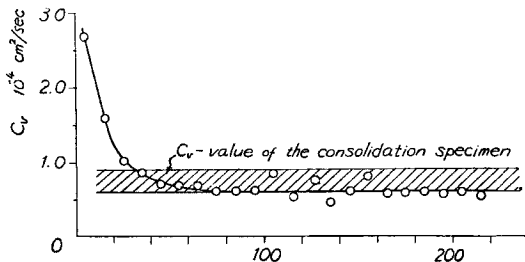


Fig. 13 Variations of coefficient of consolidation with time

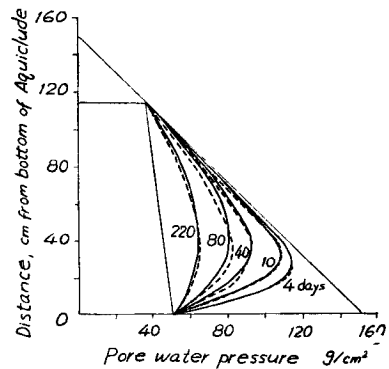


Fig. 14 Distribution of pore water pressures. Note: The broken lines represent actually measured pore water pressures, and full lines represent computed lines from Eq. (5)

Fig. 13 はその計算の結果得られた圧密係数と経過時間の関係を示したもので、 C_v の値は初期には減少するが、ある程度時間が経過すればほぼ一定とみてよいことがわかる。図中、斜線で示した範囲は、この土槽から採取した粘土試料を用いて行なつた標準圧密試験の結果得られた Fig. 6 の C_v 値を示したもので、ある程度圧密が進行後の C_v は斜線で示した範囲に入るようである。ところで圧密係数の値は $C_v = k/m_v \cdot \gamma_{w0}$ （ここに k ；透水係数、 m_v ；体積圧縮係数）であらわれ、 k 、 m_v ともに圧密が進むにつれて小さくなるが、圧密初期においては k の減少率が m_v のそれと比較して大きいために C_v が減少すると考えられる。

Fig. 14 は Fig. 13 の C_v を使用し、(5) 式を用いて間ゲキ水圧分布の推移を計算したものの例であつて、実線は理論曲線を、点線は Fig. 10 の実測値をあらわしている。理論と実測値はかなりよい一致を示しているが、 $C_v =$ 一定として求めた理論曲線ではかかる一致はみられなかつた。

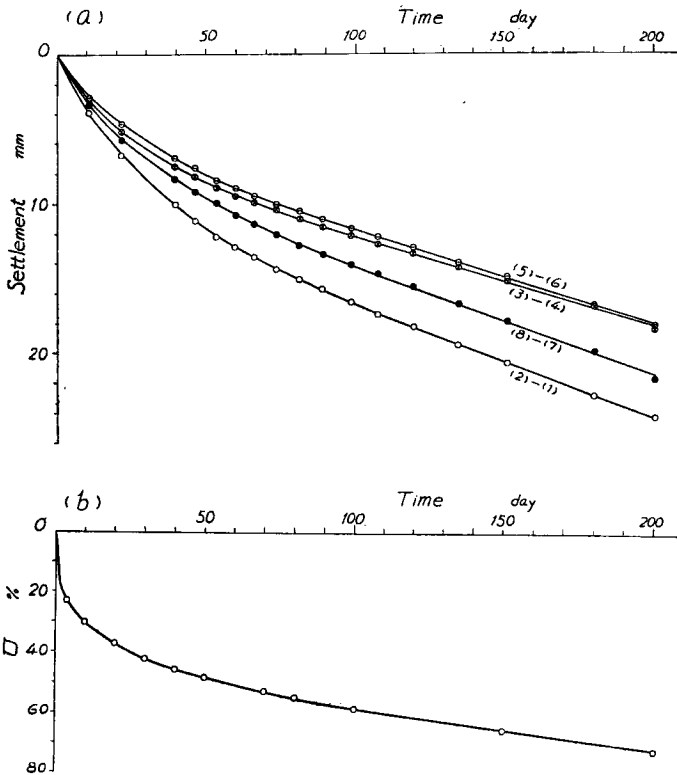


Fig. 15 (a) Settlement vs. time curves
(b) Degree of consolidation vs. time curve

Fig. 15 (a) (b) は沈下量の時間的推移及び間ゲキ水圧分布から求めた圧密度～時間関係を示している。図 (a) (b) の曲線は類似の傾向を有しているが、両者を重ね合わせて完全に一致させることができないのは、粘土の圧密における二次的時間効果 (secondary time effect) 等によるものと考えられる。

4. 被圧地下水還元による膨潤

被圧地下水位を上昇せしめると粘土層が膨潤するために、地盤沈下対策としては有効な方法であるとされている。

実験は、前節で述べた被圧地下水水位低下試験を経過時間220日で中止し、その状態から被圧地下水を 100cm 上昇せしめ(すなわち被圧地下水位と潮汐水位が一致する。Fig. 7 参照) その状態を約3カ月持続した場合の間ゲキ水圧分布及び粘土層の膨潤量を測定した。

Fig. 16 は被圧地下水水位上昇後1日、4日、12日、30日、86日経過時における間ゲキ水圧分布をプロットしたもので、Fig. 10 と対照すれば厚い粘土層の圧密回復過程をよくあらわしている。この図から3. で述べたのと同じ方法によつて圧密度を求め、さらに圧密係数 C_v の推移を調べると Fig. 17 に示すごとく、初期には急激に減少するが程度時間経過後はほぼ一定となり、Fig. 13 の場合と類似の傾向を有している。ただし Fig. 13 の被圧地下水水位低下の場合に比較すると約5倍の C_v 値を示すことが明らかである。

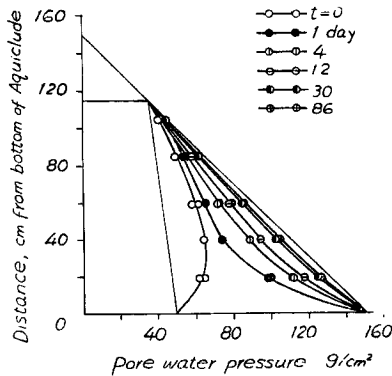


Fig. 16 Distribution of pore water pressures

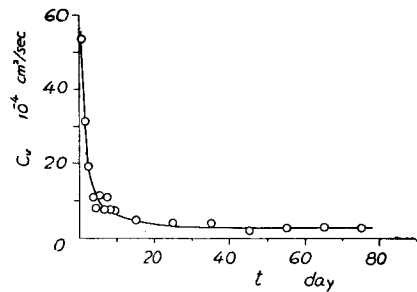


Fig. 17 Variations of coefficient of consolidation with time

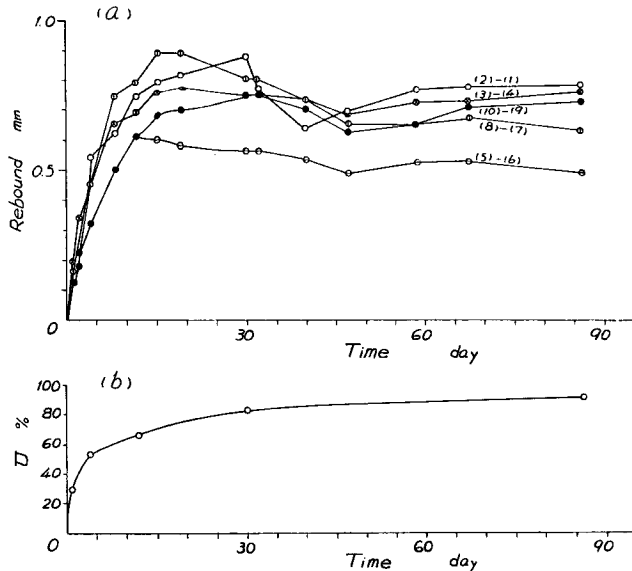


Fig. 18 (a) Rebound vs. time curves
(b) Degree of consolidation vs. time curve

Fig. 18 (a) (b) は膨潤量の時間的推移及び間ゲキ水圧分布から求めた圧密度～時間関係を示している。上述したように C_v 値は被圧を下げた場合に比較して約5倍の大きさであるために、粘土層膨潤の終了も非常に速いことがわかる。Fig. 18 (a) を $\log t$ 法によつて整理すると100% 膨潤時間は20日程度であつた。

5. 被圧地下水位の繰り返し変化による沈下

実際地盤における被圧地下水位の変化は非常に複雑であるが、実験は最も単純化した形として、2. に述べた装置により被圧地下水位の繰り返し変化を与えた。すなわち被圧地下水位と潮汐水位とを一致させた安定状態を考へて、これを帯水層上面 +150cm にとり、この状態から被圧地下水位のみを低下させたもので

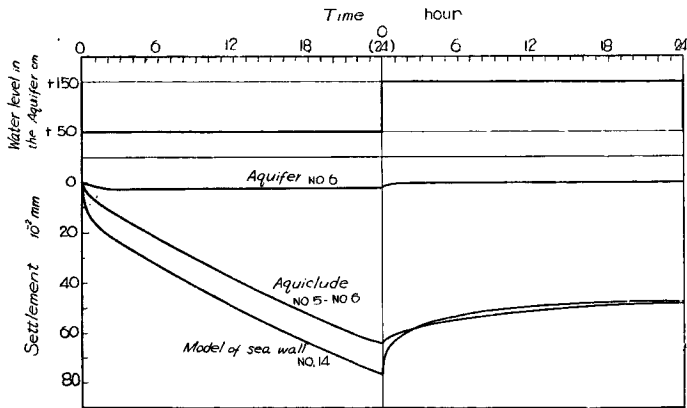


Fig. 19 Settlement vs. time curves

その低下量は装置の最大能力 100cm とした。土槽内の粘土層、砂層と被圧地下水位との関係は Fig. 1 に示した通りである。

被圧地下水位の繰り返し変化は Fig. 19に示すごとく、一定時間ごとに継続的に 100cm の被圧水位の低下とその回復を与えることにし、繰り返しの1サイクルに要する時間を48時間、120分、60分、40分、20分の5種類に変えて実験を行なつた。

Fig. 20 は繰り返し周期の異なる試験結果を沈下量～時間曲線にまとめ、静的試験結果（被圧地下水位を急激に低下せしめてその状態を長期間継続したもので、3. に述べたものに相当する）と比較したものである。この場合、繰り返し、静的いずれの試験も被圧水位の低下量は $\Delta h=100\text{cm}$ としたので、静的試験

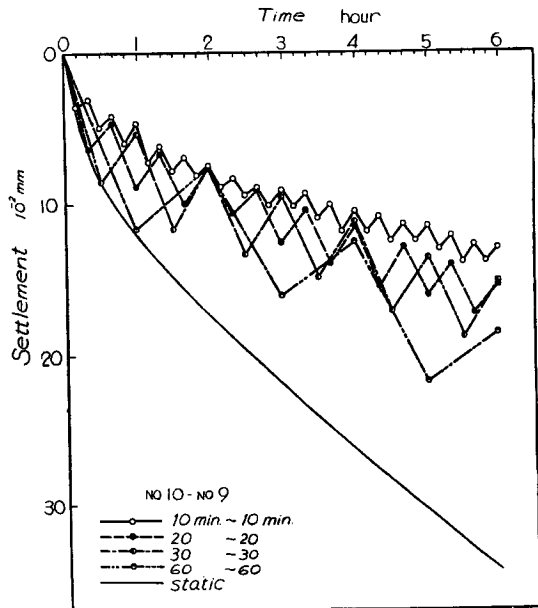


Fig. 20 Settlement vs. time curves

では沈下量回復の機会が与えられないために繰り返しの場合よりも大きい沈下量を示している。

Fig. 21 は沈下量～繰り返し回数関係を示し、この図から繰り返し周期の長いものほど沈下量が大きくなることがわかる。この原因は、短時間周期の揚水が粘土層内への先行圧密応力の増進速度を低下させるためである。なお被圧水位を一定量低下させることは、単位時間の揚水量を一定とすることと考えられ、従って同一量の水を必要とする場合にはその揚水方式によつても沈下速度をかえることがありうるわけで、揚水と揚水休止とを反覆するときには、反覆周期を短縮した方が初期の沈下速度を小さくすることになる。

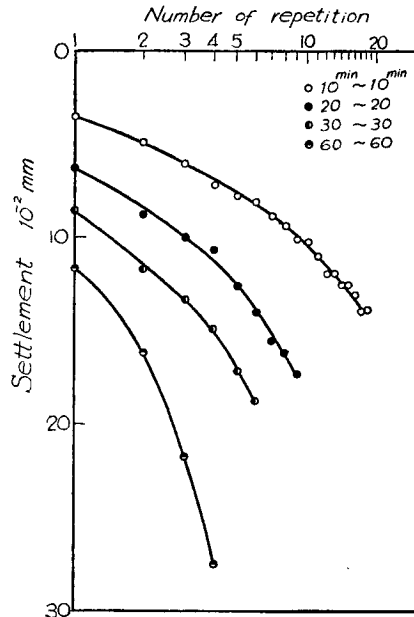


Fig. 21 Settlement vs. number of repetition curves

6. 結 び

被圧地下水位の変動によつて惹起される地盤沈下の解明に必要な基礎資料をうるために、大規模な模型実験を行なつた。

被圧地下水位を急激に低下せしめてその状態を持続する場合には、粘土層の沈下量並びに間ゲキ水圧の実測値が理論値とよく合うことを示した。ただし、粘土層がかなり厚くて圧密が長期にわたる場合には、圧密の進行とともに圧密係数 C_v の値が減少するとして解析すべきことを強調した。この C_v 値に関しては、地下水を還元して粘土地盤を膨潤せしめる場合も同様の特性があることを示した。

被圧地下水位が繰り返し変化するときの地盤沈下については実測資料を述べたにとどまつたが、その解析結果は検討中であるので別の機会に報告したいと思う。

この研究の一部は大阪府港湾課の委託によつて行なつたものであり、多大の御援助を得た近藤市三郎氏に厚く御礼申し上げる。また実験に協力された所員矢木昭雄及び大学院生高野耕輔の両君の労を謝したい。

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, 京大防災研究所創立5周年記念論文集, 昭和31年11月, pp. 67-74.
- 2) 速水頌一郎, 赤井浩一: 被圧地下圧の変動と地盤沈下に関する水理実験Ⅱ, 京大防災研究所年報, 昭和32年12月, pp. 26-40.
- 3) Schiffman, R. L.: Consolidation of Soil Under Time-Dependent Loading and Varying Permeability, Proceedings of Highway Research Board, Vol. 37, 1958, pp. 584-617.