

## 濃尾平野地盤沈下に対する安全地下水頭の研究

STUDY ON THE DESIRABLE GROUNDWATER LEVEL PREVENTING  
LAND SUBSIDENCE OF THE NŌBI PLAIN

植 下 協\*・佐 藤 健\*\*

By Kano UESHITA and Takeshi SATŌ

## 1. ま え が き

地下水の過剰揚水により生じている地盤沈下問題を解決するには、地盤沈下が停止するまで揚水量を削減することが必要である。揚水規制<sup>1)</sup>する場合、どこまで地下水の汲み上げを削減すれば地盤沈下を止めることができるのか事前評価することが、各地の地盤沈下地域において重要な問題となっている<sup>2)</sup>。

地盤沈下停止に必要な揚水管理の規制値については、和達の式<sup>3)</sup>をはじめとするいくつかの経験的方法<sup>4),5)</sup>が提案されているが、各地の地下水状態の履歴を含めた地盤状態に基づく地盤工学的的方法についてはいまだ確立されていない。

近年の大型計算機の普及と数値計算法の進歩により、広域地下水の動向を把握するために、差分法、有限要素法を利用した広域地下水流動のシミュレーション計算が行われるようになりつつあり<sup>6)</sup>、過剰揚水によって生じる地盤沈下現象も、これら数値計算の中に組み込んで検討することができる。

しかし、計算点を多数設けて広域地下水流動の非定常 3 次元シミュレーション計算を行うことは、計算機容量との関係もあって、一般にはきわめて困難である。筆者らの取り組んだ濃尾地下水盆地における地下水流動のシミュレーション計算<sup>7)</sup>においても、計算機(名古屋大学大型計算機 FACOM 230-75)の容量の制約により、広大な濃尾地下水盆地を 3 次元的に含むためには圧密層を多数の要素に分割する(圧密層からの地下水絞り出しの時間的遅滞効果が正確に再現できる)ことは犠牲にせざるを得なかった。

前報<sup>8)</sup>の濃尾地下水盆地 3 次元モデルによる広域地下水流動のシミュレーション計算では、濃尾地下水盆地の地下

水状態の全体的動向の把握に主眼を置き、この平野の異状に低下している被圧地下水頭状態を、昭和 60 年時点で圧密沈下停止に必要と考えられる G.L. -10m の状態まで回復させるには、地盤沈下地域の地下水汲み上げ量を、昭和 51 年の約半分に削減する必要があることを一応の結論として得た。

しかし、この安全地下水頭の地盤工学的裏付けや観測井の地下水位に着目して被圧地下水を管理することの筆者らの考えについては、前報<sup>8)</sup>では十分に述べ得なかった。そこで、濃尾地下水盆地での地下水利用の安全規準としての「被圧地下水は G.L. -10m 程度の地下水頭状態で使用すべきである」という筆者らの提案と、被圧地下水頭 G.L. -10m 程度が濃尾平野において地盤沈下を防ぎ、地震時の地盤災害を考慮しても妥当な値であることを本文によって説明したい。

2. 地盤沈下地域における安全地下水頭の  
考え方

地盤沈下地域における安全地下水管理基準値として、和達<sup>3)</sup>の提案した標準水圧はよく知られている。和達の提案した方法は、観測井で計測された地下水位と地盤沈下速度の関係より、地盤沈下速度が零となる地下水位を探し出す方法で、和達はその関係を利用して、大阪市における地盤沈下停止に必要な帯水層の地下水頭状態として、ほぼ地表面下 10 数メートルを提案した。また、地盤沈下観測井で計測された地層別累計地盤収縮量と帯水層の地下水頭との関係に基づいて、地盤沈下が生じないような地下水頭を探し出す方法も提案されている<sup>9)</sup>。しかし、いずれの方法も経験的方法であり、地盤の複雑さや地盤が過去に受けた力学的履歴の影響を考慮していないため、これらの方法を利用して地盤沈下停止に必要な地下水頭を探し出すことが不可能なこともあることは、すでに指摘されている<sup>9)</sup>。

\* 正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科

\*\* 正会員 工修 名古屋大学助手 大学院工学研究科

線形計画法を利用して、広域地下水取水計画を行った報告<sup>5),7)</sup>もあるが、それらの方法に基づいて最適揚水計画を考える場合も、低限界水頭<sup>7)</sup>なる1つの地下水管理目標値をいかに決定するかは、重要な問題である。ここで、低限界水頭<sup>7)</sup>とは、圧密理論に基づき、地盤沈下量のある値まで許容したときに決まる帯水層の地下水頭値と理解され、先述の地盤沈下を止めるための安全水頭の考え方<sup>3),4)</sup>とは、若干意味が異なっている。

東京都、濃尾平野で試算された地盤沈下による経済的損失費用<sup>8),9)</sup>の莫大であることを考慮すれば、臨海低平地盤沈下地域における地下水管理目標の第1条件は、地盤沈下を起こさせないことであると考えられる。筆者らは、濃尾平野の臨海低平地で現在進行中の地盤沈下を止めることのできる地下水頭状態が、濃尾平野の安全地下水頭の第一の条件であると考えた。

筆者らの対象とした濃尾平野では、濃尾地下水盆全体の地下水状態把握を目標として、図-1に示すように近年かなりの数の観測井<sup>10)</sup>が設置されており、地盤沈下停止に必要な安全水頭を地下水管理規準値として、観測井で安全を確かめながら地下水を利用することが可能と考えている。

1964年新潟地震<sup>11)</sup>の際、地表付近に存在する飽和砂

層からの噴水、噴砂現象が多数確認された。しかし1968年十勝沖地震<sup>12)</sup>の際には、地表付近の飽和砂層の液状化に加え、地割れに伴って被圧地下水が噴き出し、地表構造物に被害を及ぼした例が報告され、大崎<sup>13)</sup>も新潟地震の際問題となった液状化現象とは異なって、地割れから生ずる噴砂、噴水現象のあることを、広範な過去の震害調査記録に基づいて指摘している。

1968年十勝沖地震の際の被圧地下水の噴き出しは、震害調査報告<sup>12)</sup>にも示されているように、それら被害地域には自噴井があったことから、被圧地下水頭はかなり高い状態にあったと考えられ、地震動により被圧地下水帯を覆っていた地盤に亀裂が生じた結果、その亀裂部分から地下水頭の高い被圧地下水が、地表付近の砂、小石等を巻き込んで地上に噴き上げたものと理解される。

よって、地下水管理の目標値としての安全水頭については、被圧地下水の噴水、噴砂等に対する地震時地盤の安定性に対する配慮も必要であり、地盤沈下を止めるための被圧地下水の安全水頭は高いばかりがよいのではなく、地震時の被圧地下水の噴砂、噴水等による地盤災害防止という面も考慮して、妥当な値(地盤沈下を生じさせない範囲で、地表面よりもある程度低い被圧地下水頭値)で地下水の管理と利用を行うべきであると考えている。

### 3. 1次元浸透流解析による安全地下水頭決定の方法と考え方

過剰揚水による広域地盤沈下問題を取り扱う場合、地盤の変形状態は、各地点では、ほぼ鉛直方向の1次元のとみなすことができるので、圧密層中の地下水の流れを揚水によって地下水頭が低下した砂礫層に向う鉛直方向1次元流とすると、飽和地盤中の地下水連続式は、次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $h, u$  はいま考えている飽和地盤内のある要素における地下水頭と地盤要素の変位量、 $k_z$  は鉛直方向透水係数、 $z$  は T.P. (平均海面) を基準として鉛直上方に正とした座標を示している。

図-2 に鉛直1次元浸透流解析を行う場合の基準座標と各水頭との関係を示したが、一般に被圧地下水頭は観測井による井戸水位として計測されており、これら観測井水位を、水頭として物理的に矛盾なく浸透流解析に利用できるように、今回の計算では、T.P. を基準に上向きを正とした座標を用いることとした。

飽和地盤中における力のつり合い式は、骨格が弾性体であると仮定すると、

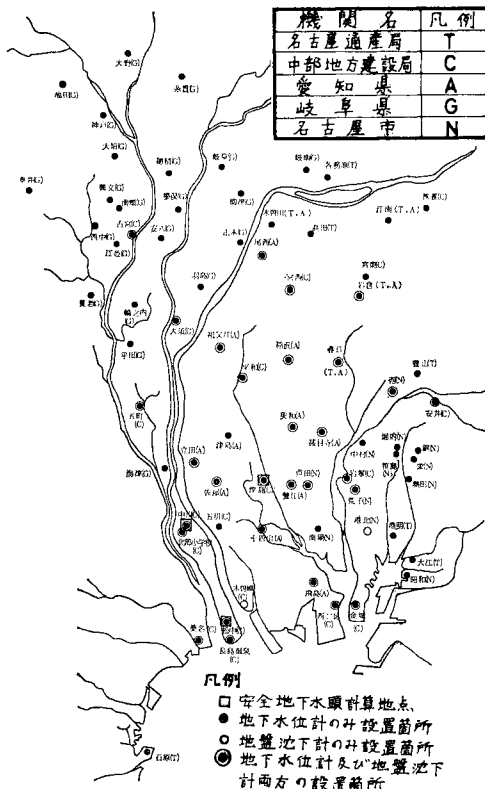
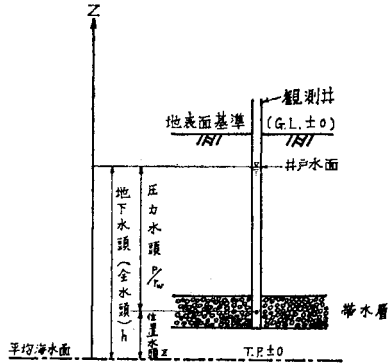


図-1 濃尾平野における観測井の配置図<sup>10)</sup>ならびに安全地下水頭計算地点



注：濃尾平野では、地表面が平均海面下にくるゼロメートル地域も広範囲に存在するが、 $z$  軸は平均海面を基準として、上方に正をとる約束を一貫して用いた。

図-2 鉛直1次元浸透流解析における基準座標と各地下水頭の関係

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ E \frac{\partial u}{\partial z} + r_w(h-z) \right\} + f = 0 \dots\dots\dots (2)$$

となる<sup>14)</sup>。ここで、 $E$  は側方完全拘束状態での骨格の弾性係数、 $r_w$  は水の単位体積重量、 $f$  は物体力で地下水水位以下の飽和地盤中では、土の飽和単位体積重量  $\gamma_{sat}$  となる。

濃尾地下水盆における被圧地下水汲み上げの主要な帯水層（第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層）での地下水頭値は、地下水の汲み上げ状況とその帯水層の涵養条件に支配されているが、それらの値は、近年その数が増加しつつある観測井により実測できるので、以下で述べる1次元浸透流モデルでは、帯水層の地下水頭値を既知条件として与えることによって、粘土層における間隙水圧状態とそれに基づく圧縮・膨張を計算した。

筆者らのここで取り扱う地盤沈下は、被圧地下水頭の低下によって生ずる粘土層からの地下水絞り出し現象であり、地表面における外力  $T$  による圧密沈下の影響はないものとし、地表付近の不圧地下水については、雨水、河川水等によって涵養されやすく、その地下水頭値は常に地表面付近にある場合（濃尾平野の場合）を考える。以上のことから、地表面では、

$$\left. \begin{aligned} T &= 0 \\ h &= \text{const.} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

の境界条件を仮定した。

第3帯水層以深は、それより浅い地盤よりかなり固いので基盤と考えて、第3帯水層下面の境界では、

$$\left. \begin{aligned} u &= 0 \\ k_z \frac{\partial h}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

の境界条件を仮定した。

次に、濃尾平野では地下水過剰揚水による地盤沈下がさほど激しくなかった昭和25年当時では、粘土層からの地下水絞り出しはほとんど生じておらず、各帯水層は

ある程度の自噴状態を示す状態にあったと考え、昭和25年の粘土層内の地下水頭分布を、そのような第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層の地下水頭値から推定し、粘土層内の地下水頭に関する初期条件とし、このときの地盤沈下量を零とした。

なお、これら帯水層の地下水頭に関する条件設定と粘土層内地下水頭分布に関する初期条件の与え方等については、4.(2)において詳述する。

式(1),(2)を境界条件式(3),(4)に基づいて、Galerkin法により解く方法は、すでに報告<sup>14)</sup>されているが、筆者らの今回の計算では、Gurtin<sup>15)</sup>により導かれた汎関数を利用して、次式で有限要素法に離散化した<sup>16),(17)</sup>。

$$II = \int_L \left\{ -\frac{1}{2} r_w k_z * \frac{\partial h}{\partial z} * \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{1}{2} E \frac{\partial u}{\partial z} * \frac{\partial u}{\partial z} + r_w(h-z) * \frac{\partial u}{\partial z} - f * u \right\} dL \dots (5)$$

ここで、 $*$  はたたみ込み積分<sup>15)</sup>を示し、 $L$  は解析対象の地盤厚さを示す。

式(5)に基づき有限要素法に離散化する場合、筆者らは、1つの有限要素内の地盤変位  $u$  と地下水頭  $h$  を、次のような線形式で近似した（図-3参照）。

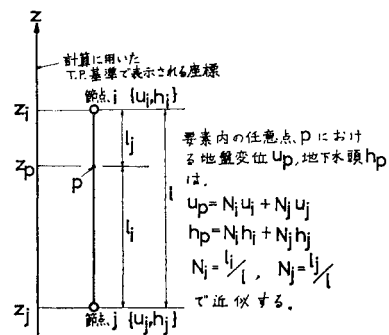
$$\left. \begin{aligned} u &= [N_i, 0, N_j, 0] \{X\}^e \\ h &= [0, N_i, 0, N_j] \{X\}^e \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $N_i, N_j$  は1次元有限要素を構成する節点座標から求まる無次元量で形状関数とよばれるものである。また、 $\{X\}^e$  は1次元有限要素を構成する2つの節点における地盤変位と地下水頭のベクトルを示し、その並び方は、

$$\{X\}^{eT} = \{u_i, h_i, u_j, h_j\} \dots\dots\dots (7)$$

となっている。ここで、 $\{X\}^{eT}$  は  $\{X\}^e$  の転置行列を示し、 $u_i, u_j$  は1次元有限要素の2つの節点  $i, j$  における地盤変位、 $h_i, h_j$  は節点  $i, j$  における地下水頭値を示している。

汎関数を利用して有限要素法に離散化する方法の説明



(注： $\{u_i, h_i\}$  は、節点  $i$  における地盤変位  $u_i$  と地下水頭  $h_i$  を示す。

図-3 1次元有限要素法に離散化するために仮定された形状関数の説明図

は文献 18) に詳しいが、今回筆者らが利用した汎関数式 (5) に基づいて有限要素法に離散化する、

$$\sum_{n=1}^N [Q]_n \cdot \{X\} + \sum_{n=1}^N [K]_n * \{X\} + \sum_{n=1}^N \{F\}_n = 0 \dots\dots (8)$$

となる。ここに、 $N$  は解析対象地盤内の全要素数、 $n$  は要素番号、 $\sum_{n=1}^N$  は解析対象地盤内の全要素についての重ね合せを示しており、 $[Q]_n$  は  $n$  番目の有限要素に与えられる弾性係数に関するマトリックス、 $[K]_n$  は  $n$  番目の有限要素に与える透水係数に関するマトリ

ックス、 $\{F\}_n$  は  $n$  番目有限要素の物体力と各節点の位置水頭から求まる列ベクトル、 $\{X\}$  は未知量ベクトルで、解析対象の全領域に設けられた有限要素格子点における地盤変位と地下水頭に関する列ベクトルを示し、その並び方は前述のとおりである。

式 (8) における列ベクトル  $\{F\}_n$  を構成している物体力、位置水頭の時間的変化は、帯水層の被圧地下水頭低下の変化に比べてきわめて小さいことを考慮して、式 (8) を差分近似を用いて漸化式の形で表示すれば、

$$\sum_{n=1}^N \left\{ [Q]_n + \frac{\Delta t}{2} [K]_n \right\} \{X\}_{t+\Delta t} = \sum_{n=1}^N \left\{ [Q]_n - \frac{\Delta t}{2} [K]_n \right\} \{X\}_t \dots\dots (9)$$

となる。ここで、 $\{X\}_{t+\Delta t}$  は  $t + \Delta t$  時刻における解析対象地盤内のすべての節点における地盤変位と地下水頭に関する未知量ベクトルを示している。

上式 (9) を用いて実際の計算を行う場合の計算時間の刻み  $\Delta t$  については、計算結果が意味をもつための収束判定条件式を提案した報告<sup>19)</sup>もあるが、今回の濃尾地盤沈下地域での計算では、一応、 $\Delta t$  を変えた予備計算を行い、解の安定性と計算に要する時間から考えて、大部分の計算については 0.05 年刻みで行うこととした。

#### 4. 濃尾平野地盤沈下地域での適用とその結果

##### (1) 地盤のモデル化と土質定数の与え方

濃尾平野地盤沈下地域の代表的観測井地点 (図-1 に示す松中、中川、津島の 3 つの観測井地点) で安全水頭を算出した。これら計算地点は現在でも地盤沈下が進行している地域にあり、その帯水層の地下水頭状態は観測井によって近年計測されており、地盤状態や土質定数が

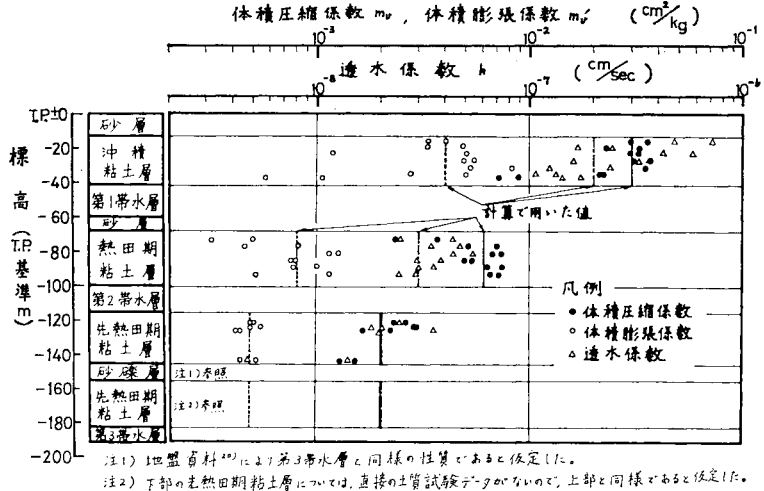


図-4 松中観測井地点のモデル柱状図と各粘土層における標準圧密試験結果

ボーリング結果、土質試験結果に基づいてかなり知り得ること、さらに地層別の地盤収縮量もこれら観測井地点では計測されており、筆者らの方法により得られた計算結果の妥当性を判定できることなどから、これら 3 地点で安全地下水頭を計算することとした。

図-4 に松中観測井地点のモデル柱状図を示したが、観測井設置時に行われたボーリング調査に基づく土質柱状図からだけでは、砂礫層の水平方向のつながりが不明で、帯水層、圧密層の判別も困難であったので、この平野内の数多くのボーリング資料に地質学的考察を加えて作成された地盤断面図<sup>20)</sup>も参考にして、これら地点の取水帯水層と圧密層を識別して地盤構造のモデル化を行った。

また、観測井深度よりも深いところの地盤のモデル化に際しても上述の地盤断面図<sup>20)</sup>を利用した。

なお、粘土層内には 1~2m ごとに間隙水圧伝播の計算点となる有限要素格子点を設け、粘土層からの地下水絞り出しの時間的遅れ (図-6 参照) が十分に再現できるように配慮した。

粘土層内の間隙水圧を低下させる方式の圧密試験より得られた体積圧縮係数、透水係数を通常の荷重荷方式圧密試験の体積圧縮係数、透水係数と比較した研究<sup>21)</sup>もあるが、工学的にみた場合には、両者の相違はそれほど大きくはないとする報告<sup>22), 23)</sup>もあり、ここでは、一応、各観測井地点の相当する粘土層で行われた標準圧密試験結果に基づいて、モデル化された各圧密層の体積圧縮係数、体積膨張係数と透水係数を推定することとした (図-4 参照)。

砂層の透水係数は、粒度分析試験より得られた有効径より Hazen の式に基づいて推定した。砂層の側方拘束状態での弾性係数は、吉中<sup>24)</sup>による  $N$  値とボーリング

孔内弾性係数の関係,あるいは植下<sup>6)</sup>による深度とボーリング孔内弾性係数の関係を利用して推定した。

帯水層の弾性係数  $E_G$  は,揚水試験から求めた比貯留量  $s_G$  より,

$$E_G = \frac{\gamma_w}{s_G} \dots\dots\dots(10)$$

として推定した。

松中観測井地点で行われた粘土層の圧密試験,吸水膨張試験の結果によれば,沖積粘土層,熱田期粘土層,先熱田期粘土層における体積圧縮係数と体積膨張係数は図-4のような結果となり,筆者らは,一応図-4の結果を参考にして粘土層骨組の弾性係数を推定した。そして,実際の数値計算に際しては,圧密層内の各有限要素ごとに,地下水頭が上昇する過程にあるか低下する過程にあるか,各計算ステップごとに判別して,地下水頭低下状態にある要素では圧密試験から求めた体積圧縮係数(図-4の実線)に基づく弾性係数を用い,地下水頭上昇過程にある要素では体積膨張係数(図-4の破線)に基づく弾性係数を用い,粘土層の非可逆的効果を考慮した。

なお,砂層,礫層における弾性係数は,地下水頭上昇時も地下水頭低下時と同じ値を示すと仮定した。

## (2) 帯水層の地下水頭条件と粘土層内の初期条件の与え方

濃尾地下水盆での取水層としてモデル化された第1帯水層,第2帯水層,第3帯水層の地下水頭状態については,観測井による実測値の得られる期間はそれら実測値に基づいて計算条件を決定した。なお,図-5に示すように帯水層の実測地下水頭値は,夏期に低下,冬期に上昇するほぼ1年周期の変動を繰り返しながら平均的水頭値が変化する傾向を示すが,今回の筆者らの計算では,昭和25年以降,長期にわたる帯水層の被圧地下水頭低下によって,粘土層内地下水頭状態が平均的にどのように変化し,地盤沈下がどのように進行してきたかを大局的に把握して,将来の平均的安全水頭を探し出すことを第1の目標としたので,計算条件として与える帯水層の地下水頭値には,これら実測値にみられる季節変動は考慮せず,各年の地下水頭の平均値によって計算を進めることとした。

図-5の松中観測井は第1帯水層,第2帯水層の水位しか測定していないので,第3帯水層については直接知り得ない。松中地点でのモデル計算にあたっては,広域的研究<sup>6)</sup>を参考にして,第3帯水層は第2帯水層と同じ水頭状態にあると仮定して計算をした。

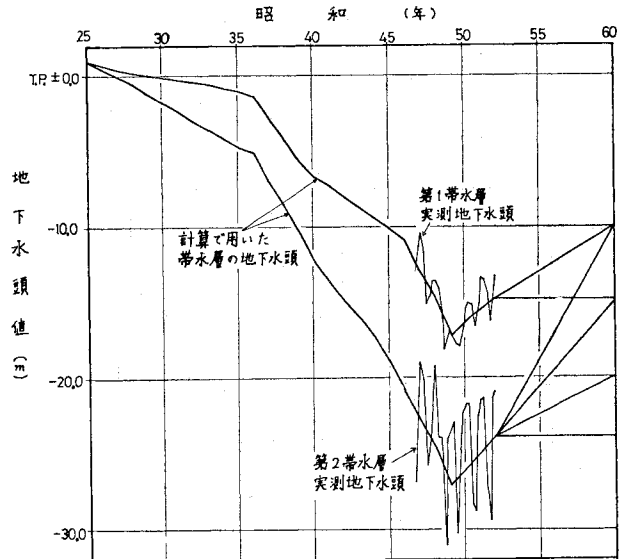


図-5 松中地点の計算に用いた第1帯水層,第2帯水層の地下水頭値

観測井により,直接,実測値の知り得ない期間の帯水層の地下水頭値は,濃尾地下水盆3次元水収支モデル<sup>6)</sup>から得られる計算結果と観測井付近における過去の井戸資料を参考にして推定した。

昭和25年当時の被圧地下水頭低下量は,当時の井戸資料によれば年間およそ10数cmであり,地下水の過剰揚水による粘土層内地下水頭低下による地盤沈下はほとんど生じていなかったこと<sup>29)</sup>から考えると,昭和25年当時は粘土層内からの地下水絞り出しはわずかで,大部分は濃尾平野上流側からの地下水の水平方向涵養だけによって地盤沈下地域の地下水は涵養されていたと推察できる。よって,筆者らは昭和25年における粘土層内地下水頭分布は,その粘土層上下面の帯水層の水頭値を結ぶ直線的分布であるとして計算の初期条件とした。

## (3) 計算結果とその妥当性の検討

前述した方法に基づいて計算に必要な土質定数と初期条件を決定し,帯水層の地下水頭値の平均的変動傾向を各計算ステップごとに追跡しつつ,昭和25年から昭和52年までの各圧密層における圧密脱水・吸水膨張の計算を松中観測井地点で行ったところ,地下水頭分布の経年変化として図-6,地盤沈下量の推移として図-7のような結果が得られた。図-7には,これら計算結果の妥当性をチェックするために,計算地点付近に設置されている水準点(K35-17)の沈下状況と,この観測井に設置された沈下計による地盤収縮量(地表面からG.L.-150mまで)も示した。実測値として利用したK35-17水準点の水準測量は昭和36年2月より,観測井地点

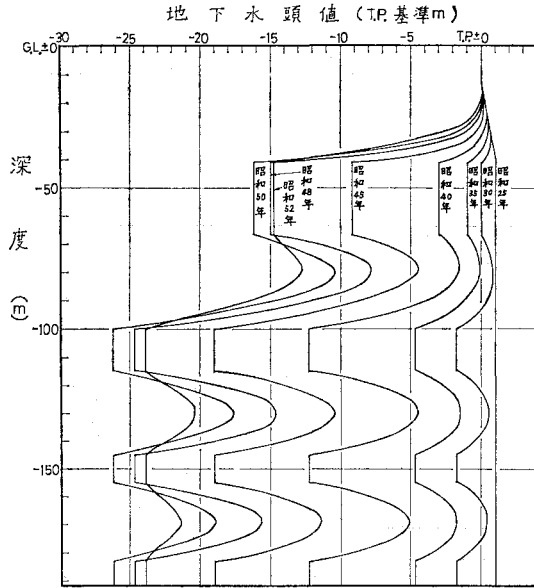


図-6 松中地点における地下水頭値の計算経年変化

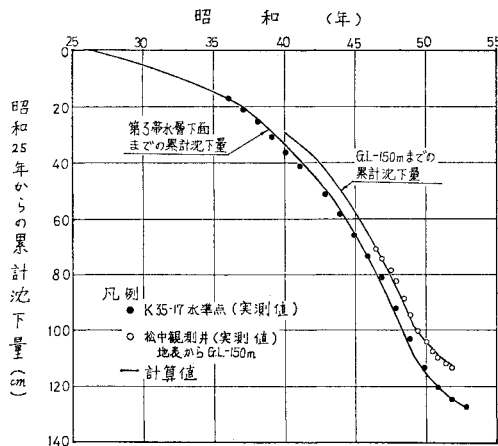


図-7 松中地点における計算地盤沈下量と実測値との比較

の地盤収縮量は昭和46年6月より計測が開始されているので、図-7に示した実測値は計測開始年月に相当する計算結果の位置に実測累計地盤沈下量の基準を移動させて示してある。図-7によれば、計算結果はこれら松中観測井付近の実際の地盤沈下の推移をよく再現していると判断することができる。

昭和46年1月と昭和53年6月に松中観測井付近の沖積粘土層内で実測されている間隙水圧<sup>26)</sup>、<sup>27)</sup>と今回の計算間隙水圧分布の比較を図-8に示した。図-8によれば、沖積粘土層内の計算間隙水圧分布は実測間隙水圧分布とよく一致していることがわかる。

今回の「地盤沈下地帯での安全地下水頭」算出用の鉛直1次元圧密モデルでの地層のモデル化、土質定数の選

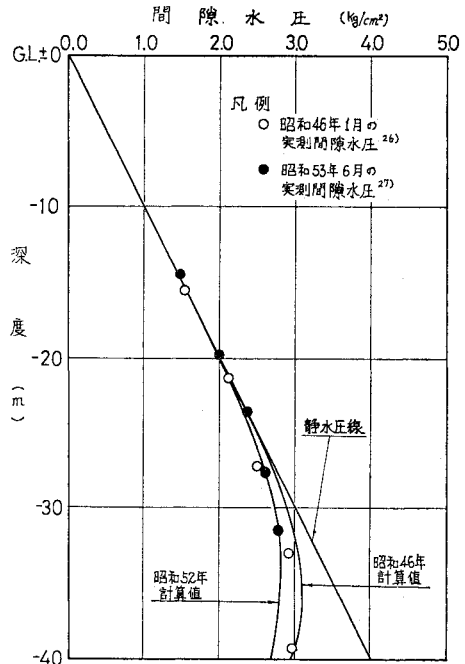


図-8 松中地点付近における沖積粘土層内の計算間隙水圧と実測間隙水圧の比較

定は、可能な限り、観測井設置時の土質調査資料に基づき、不足する部分については、付近での調査資料からの推定値を用いて、まず原案モデルを組んだ。次に、図-7に示すような長期間の地盤沈下量ならびに地層別収縮量の実測データと比較しながら、必要に応じ、モデルの定数ならびに各帯水層の水頭変化の条件を、実際と思われる範囲で修正した。ただし、松中観測井地点の場合には、モデルの土質定数としては、図-4に示す土質試験結果の平均値を用いることでよい結果を得ている。そのような内挿検定で、図-7程度に実測沈下量の再現ができるモデルであることを確認した後、図-5の将来水位の仮定に基づき将来予測計算を行うわけである。

なお、中川、津島観測井地点での計算地盤沈下量と各観測井で実測された地盤収縮量、付近の水準点の沈下状況についても図-7と同様の比較を行っているが、計算値と実測値は、松中地点の場合と同様に、かなりよい一致を示している。

### 5. 濃尾平野地盤沈下地域の安全地下水頭の計算

図-6,8に示した粘土層における間隙水圧分布から理解されるが、粘土層と帯水層の透水性に大きな差があることから、一般に圧密層における過剰間隙水圧の消散速度はきわめて遅く、過去の過剰揚水による帯水層の地下

水頭低下に対し、粘土層内の地下水頭の低下はかなり遅れており、昭和 52 年時点においても、なお圧密層内の各深さでは過去の帯水層の水圧低下に起因する過剰間隙水の脱水が生じ続けている。

よって、第 1 帯水層、第 2 帯水層、第 3 帯水層の地下水頭値を昭和 52 年時点の現状に維持しても、これら粘土層からの地下水絞り出しが継続し、地盤沈下はなお進行することが予想される。そこで、図-5 に示すように、各帯水層の地下水頭値を昭和 60 年まで現状維持とした場合、または、各種の回復速度で水位を上昇させた場合の昭和 52 年から昭和 60 年までの累計地盤沈下量と、昭和 60 年時点の地盤沈下速度を計算し、地盤沈下停止に必要な安全地下水頭を探し出す作業を試みた。

図-5 に示した松中観測井における実測地下水頭値にみられるように、地下水汲み上げ状況と地下水の涵養状況が各帯水層で異なるため、昭和 52 年時点の第 1 帯水層、第 2 帯水層、第 3 帯水層には地下水頭値の差がみられる。将来の地下水管理条件として、各帯水層間に地下水頭差を設けて、各帯水層間の鉛直浸透涵養を図りつつ地下水管理を行うことも考えられるが、筆者らは、将来の地下水管理目標を、一応、各帯水層、各地域とも共通の地下水頭規制値で考えることを試みた。

なお、昭和 60 年時点における地下水頭の回復目標値が、昭和 52 年現在における地下水頭値より低くなる場合（濃尾地盤沈下地域では、図-5 に示した実測地下水頭にみられるように、第 1 帯水層の水頭値は他の帯水層の水頭値に比べかなり高い値となっている）には、地下水頭の高いそれら帯水層の水頭値は現状のままとし、回復目標地下水頭値に比べ水頭の低い帯水層における地下

水頭を目標地下水頭値まで回復させる条件で安全水頭の試算を行った。

図-9 に、先述の松中、中川、津島の各観測井地点における第 1 帯水層、第 2 帯水層、第 3 帯水層の地下水頭を、昭和 60 年時点でそれぞれ 図-9 の横軸の各地下水頭値まで直線的に回復させたときに、昭和 52 年から昭和 60 年の間に見込まれる累計地盤沈下量（図-9 の上図）と昭和 60 年 1 年間の地盤沈下速度（図-9 の下図）を示した。なお、図-9 の横軸に示した地下水頭値は、対象地点の地盤面を基準とした値で示してある。

図-9 の計算結果によれば、地盤沈下地域のこれら各観測井で、昭和 60 年を目標に被圧地下水頭状態を G.L. -10 m 程度まで回復させれば、昭和 52 年から昭和 60 年までの間に 4~7 cm 程度の累計地盤沈下量はなお見込まれるが、地盤沈下停止の目標年度とした昭和 60 年には現在進行中の地盤沈下はほぼ停止することがわかる。

図-9 の結果より、濃尾地盤沈下地域における地盤沈下の激甚地といわれているこれら地域の地盤沈下を停止させるのに必要な被圧地下水頭状態として、G.L. -10 m 程度が一応確認されたわけである。なお、G.L. -10 m を被圧地下水利用の管理目標とすれば、1 年周期の地下水位変動（従来、大きいところで  $\pm 5$  m 程度）を考慮しても、地震時の噴水・噴砂<sup>12),13)</sup>を生じない適当な値であると判断した。

## 6. む す び

地下水管理の方法に対する筆者らの考えと、濃尾沈下地域における地下水管理の規準値としての安全水頭について、地盤工学的立場から検討し提案を行った。以上の研究の要点をまとめると以下のようになる。

(1) 臨海低平地盤沈下地域における地下水適正利用のあり方として、観測井で安全地下水位を確めながら利用することが考えられる。そのときの地下水管理基準値の具備すべき条件として、地盤沈下を生じさせないとともに、地震時の噴砂、噴水に対しても安全であることが必要である。

(2) 地盤沈下地域で行われた地盤調査や観測井による実測地下水頭値等に基づき、沈下域での鉛直 1 次元浸透流解析を行って、地盤沈下停止に必要な安全地下水頭を決定する方法を提案した。

(3) 筆者らの方法に基づいて地盤沈下停止に必要な安全水頭を計算する際に必要となる土質定数の推定方法、帯水層の地下水頭に関する計算条件、粘土層内地下水頭の初期条件の与え方等を濃尾地盤沈下地域における適用例によって示し、これら方法によって得られる計算

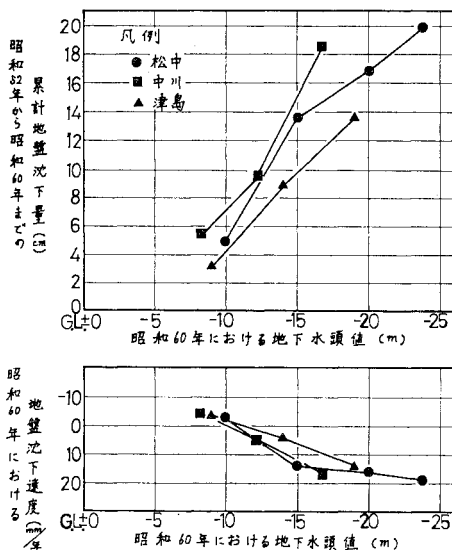


図-9 昭和 52 年から 60 年までの累計地盤沈下量と昭和 60 年における地盤沈下速度の予測

結果の妥当性を各種実測結果と比較して検証した。

(4) 濃尾地盤沈下地域の地盤沈下停止に必要な安全地下水頭を、筆者らの提案した方法に基づいて計算したところ、地表面下 10 m 程度が得られ、この値は地震時地盤安定の面からもほぼ妥当な値と考えられ、前報<sup>6)</sup>で前提として研究を進めた安全地下水頭 G.L. -10 m の地盤工学的裏付けを示した。

本研究の数値計算はすべて名古屋大学大型計算機 FACOM 230-75 によった。

最後に、本研究を行うにあたり貴重な資料を提供して下さった東海三県地盤沈下調査会ならびにその関係機関の方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 植下 協：濃尾平野の地盤沈下と揚水規制，土木学会誌，Vol. 61, No. 4, pp. 31~36, 1976.
- 2) 山本莊毅：日本の地盤沈下，土と基礎，Vol. 25, No. 6, pp. 13~19, 1977.
- 3) 和達清夫：地盤沈下研究の回顧，土と基礎，Vol. 24, No. 11, pp. 87~92, 1976.
- 4) 水収支研究グループ：地下水盆の管理 [理論と実際]，東海大学出版会，pp. 68~72, 1976.
- 5) 佐藤邦明・渡辺邦夫：地下水の適正揚水システムに関する研究，水資源に関するシンポジウム，土木学会，pp. 506~511, 1977.
- 6) 植下 協・佐藤 健：濃尾平野の適正揚水量に関する研究，土木学会論文報告集，第 287 号，pp. 51~60, 1979.
- 7) 上田年比古・神野健二・長野益徳：広領域地下水からの最適井戸取水について，土木学会論文報告集，第 283 号，pp. 33~43, 1979.
- 8) 水収支研究グループ：地下水資源学，共立出版，pp. 312~314, 1973.
- 9) 成瀬聖慈・宮崎朝生：地盤沈下による社会的損失の一考察，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書 (第二報)，愛知県環境部，pp. 201~217, 昭和 51 年 7 月.
- 10) 東海三県地盤沈下調査会：昭和 53 年における濃尾平野の地盤沈下の状況，p. 13, 昭和 54 年 6 月.
- 11) 土木学会新潟震災調査委員会：昭和 39 年新潟地震震害調査報告，土木学会，1966.
- 12) 土質工学会震害調査委員会：1968 年十勝沖地震による地盤震害調査概報，土と基礎，Vol. 16, No. 9, pp. 5~17, 1968.
- 13) 大崎順彦：震害調査委員会，土と基礎，Vol. 17, No. 12, pp. 90~92, 1969.
- 14) 赤井浩一・大西有三・安川郁夫：パーティカルドレーン工法の設計法に関する検討報告書，防災研究会，pp. 109~125, 昭和 53 年 3 月.
- 15) Gurtin, M.E. : Variational Principles for Linear Initial-Value Problems, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 22, No. 3, pp. 252~256, 1964.
- 16) Sandhu, R.S. and E.L. Wilson : Finite-Element Analysis of Seepage in Elastic Media, Proc. A.S.C.E., EM 3, pp. 641~652, 1969.
- 17) Yokoo, Y., K. Yamagata and H. Nagaoka : Finite Element Method Applied to Biot's Consolidation Theory, Soils and Foundations, Vol. 11, No. 1, pp. 29~46, 1971.
- 18) 久保田敬一・河野伊一郎・宇野尚雄：透水一設計へのアプローチ，土質工学基礎叢書 2，鹿島出版会，pp. 57~62, 昭和 51 年.
- 19) Desai, C.S. : Analysis and Evaluation of some Finite Element Schemes for Flow through Rigid and Deformable Media, International Conference on Finite Elements in Water Resources, pp. 155~179, 1976.
- 20) 桑原 徹：濃尾傾動盆地の発生と地下の第四系，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書，愛知県環境部，pp. 111~182, 昭和 50 年 3 月.
- 21) 佐々木 伸：中立応力低下による圧密促進に関する研究，京都大学学位論文，pp. 7~27, 昭和 50 年 10 月.
- 22) 網干寿夫・吉國 洋：軟弱地盤の真空排水工法に関する二，三の実験的研究，第 19 回土木学会年次学術講演会第 3 部，pp. 45-1~45-3, 1964.
- 23) 三笠正人：第 9 回土質工学研究発表会講演要旨および一般報告，土と基礎，Vol. 22, No. 10, p. 19, 1974.
- 24) 吉中龍之進：横方向地盤反力係数，土木技術資料，Vol. 10, No. 1, pp. 32~37, 1968.
- 25) 名古屋大学地盤変動研究グループ：伊勢湾北部地域地盤沈下調査研究報告書，昭和 42 年 3 月.
- 26) 建設省中部地方建設局木曾川下流工事事務所：地盤沈下対策調査報告書，pp. 128~135, 昭和 48 年 3 月.
- 27) 農林水産省東海農政局木曾岬干拓建設事務所・(株)応用地質調査事務所：木曾岬地区堤防沈下対策検討業務報告書 (土質調査)，pp. 24~28, 昭和 53 年 9 月.

(1979. 7. 19・受付)