

濃尾平野の地盤沈下とその解析

くお 桑 原 桑原 桑原
 とおる 徹* 桑原 徹*
 いた 板 橋 桑原 板橋
 ばし 橋 桑原 板橋
 かず 一 桑原 一
 お 雄*** 桑原 雄***
 うえ 植 桑原 植下
 した 下 桑原 植下
 か の う 協**

1. まえがき

今日、日本における地盤沈下地域は19地域(21都道府県)に達し、さらにその徴候のある地域を含めると、39地域(32都道府県)が地盤沈下の恐怖にさらされている¹⁾。

そのなかでも、濃尾平野の地盤沈下問題は、日本一のゼロメートル地域(平均満潮位以下の面積 478 km², 平均潮位以下の面積 250 km²)をかかえ、年々低まる河川や海岸の堤防に台風時の危険を感じ、豪雨時には内水排除が追いつかずに多くの浸水被害を出すに至っている。

このような事態にあつて、関係行政機関は、その対策に全力を傾けているが、その対策を効果的なものとするために、東海三県地盤沈下調査会、愛知県地盤沈下研究会、三重県地盤沈下調査研究会などが組織され、濃尾平野の地盤沈下問題に関する調査と研究を行なっている。

筆者の桑原(地質学)と植下(土質工学)は、これらの調査会、研究会に協力しながら、ともに濃尾平野の地盤沈下問題に取り組み、板橋はこれらの作業に協力してきた。

以下には、筆者らが担当した調査研究に基づき、濃尾平野地盤沈下の近況と、その解析の状況をご報告したい。

2. 濃尾平野の地盤構造と今日までの沈下

濃尾平野地盤の成立ちについては、すでに2, 3の報告を行なってきたが^{2), 3)}, その南部地域の東西断面を示すと図-1のようである。最上部に南陽層と呼ばれるチュウ積層が西部で厚さ50m程度タイ積している。その下に海成粘土を主体とした洪積層の熱田層が平野全域に厚さ20~80mでタイ積している。西部では南陽層とこの熱田層との間に砂と粘土からなる厚さ10mほどの濃尾層と10~20mほどのレキ層(第一レキ層と呼ぶ)がある。また熱田層の下部にも第二レキ層と呼ばれるレキ層がこの断面全体にわたり5~10mの厚さで分布している。その下には粘土層と砂レキ層を間にはさむ2~3枚の海成粘土層からなる海部累層とレキ層(第三レキ層と呼ぶ)がある。つぎに淡水成粘土層と砂レキ層がかなり複雑な互層をなす後八事期層, 砂レキ

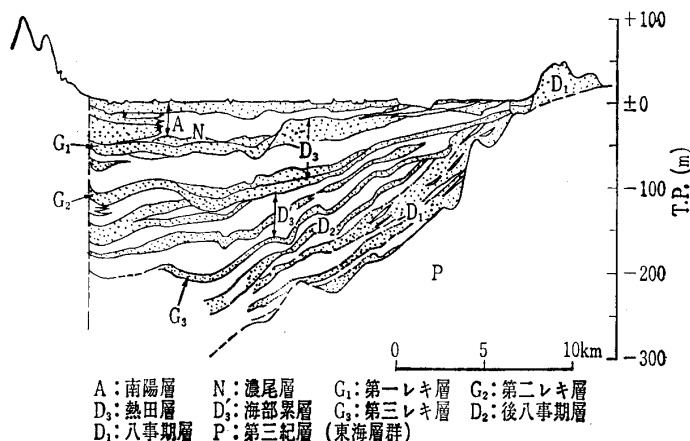


図-1 濃尾平野南部の東西断面

層の優勢な八事期層がある。八事期層の下位には東海層群が存在するが、深部の情報は乏しく、詳細な地層区分を行ない得るほどの資料は得られていない。

濃尾平野東縁の丘陵地を構成し、地表に露出している東海層群は西に傾き、濃尾平野地域では、地下深く没している。八事期層, 後八事期層も東部では、地表付近にあるが、西部ではやはり T.P. -200~300m まで沈んでいる。その上部にある海部累層や熱田層, 南陽層も西部ほど厚く、深部に達している。これは濃尾平野地域の基盤の傾動運動を示すもので、各地層の傾きから、この傾動速度および弥富付近の沈下速度を算出し、その結果を示すと表-1のようになる。すなわち、傾動沈下速度は、平野の西部で1 mm/年程度であり、後述する近年の地表沈下速度に比べれば、かなり小さい値である。

濃尾平野南部の水準測量による地盤沈下量ならびに濃尾平野全域の地下水揚水量の経年変化を図-2に示す。昭和6年から昭和23年の間の急激な沈下は東南海地震によるものと推定されており⁴⁾, この地震の影響を除けば濃尾平野南部は昭和35年ころまで年平均1~2 cmの沈下量を示しているに過ぎない。しかし、その後、昭和48年にいたるまで、沈下速度は地下水揚水量の増大に対応して急激に増し、沈下激甚地では、昭和48年の年間沈下量が20 cmを越えるにいたった。昭和49年以降は、地下水揚水規制の強化⁵⁾, 経済界の不況, 気象条件などによる地下水揚水量の低減効果があつて、昭和49, 50年と沈下速度は鈍化している。

* 理博 名城大学教授 理工学部地学教室
 ** 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学教室
 *** 名古屋大学助手 工学部土木工学教室

表-1 濃尾平野の傾動沈下速度

対 象	形成時代×10 ⁴ B. P.	傾 動 量	変 位 量 (弥富町付近)	平均傾動速度	平均沈下速度
熱 田 面	3.5	2.5×10 ⁻³	60 m	7×10 ⁻⁹ /y	1.7mm/y
八 事 面	30~70	4×10 ⁻³	300 m	4×10 ⁻⁹ /y	1~0.4mm/y
唐山層基度面	80±	20×10 ⁻³	450 m	2.5×10 ⁻⁹ /y	0.5±mm/y
東海層群基底面	400± (200±)		2,000 m		0.5±mm/y (1.0±)

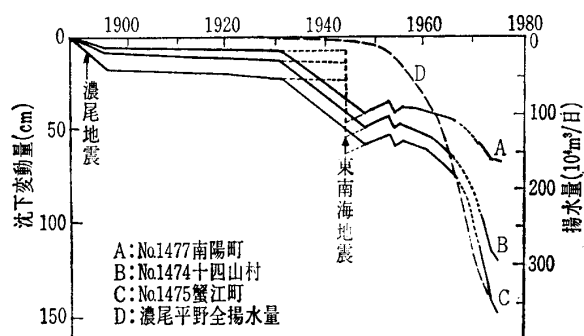


図-2 濃尾平野南部における1888~1975年の地盤変動ならびに濃尾平野全域からの総揚水量の増加 (飯田原図⁶⁾に加筆)

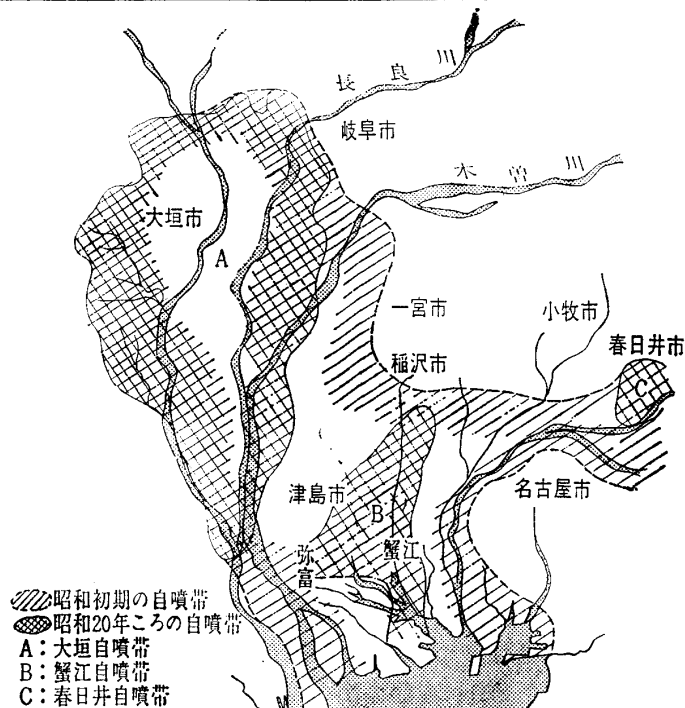


図-4 濃尾平野における以前の自噴帯

図-3は、昭和36年2月から昭和50年11月までの最近約15年間の累積沈下等量線図を示している。15年間の最大累積沈下量は、長良川河口部の長島町における147cmであり、沈下の大きな地区は、この長島町南部を中心とする木曾川河口地域と、やや内陸にあたる蟹江町、津島市、佐屋町にまたがる地区とである。

3. 濃尾平野における地下水の状態

昭和初期には、濃尾平野は図-4に示すようにほぼ全域に自噴帯があった。そして昭和20年ころまでは大垣自噴帯、春日井自噴帯、蟹江自噴帯が残存し、名古屋市域でも第三紀層まで達する深井戸では自噴するのが普通であった。しかし、図-2に示すような昭和30年代からの地下水揚水量の急増は、これらの自噴帯を消滅させ、現在では著しい水位低下域が出現するに至っている。

昭和48年度に、環境庁、建設省、愛知県、岐阜県、三重県、名古屋市などによって行われた濃尾平野地域の揚水量実態調査資料の中の単層取水井の水位資料で各井戸の開削時の水位記録を利用し、各帯水層の水位分布および水位低下速度分布を求めてみると、図-5~8のようになった⁶⁾。

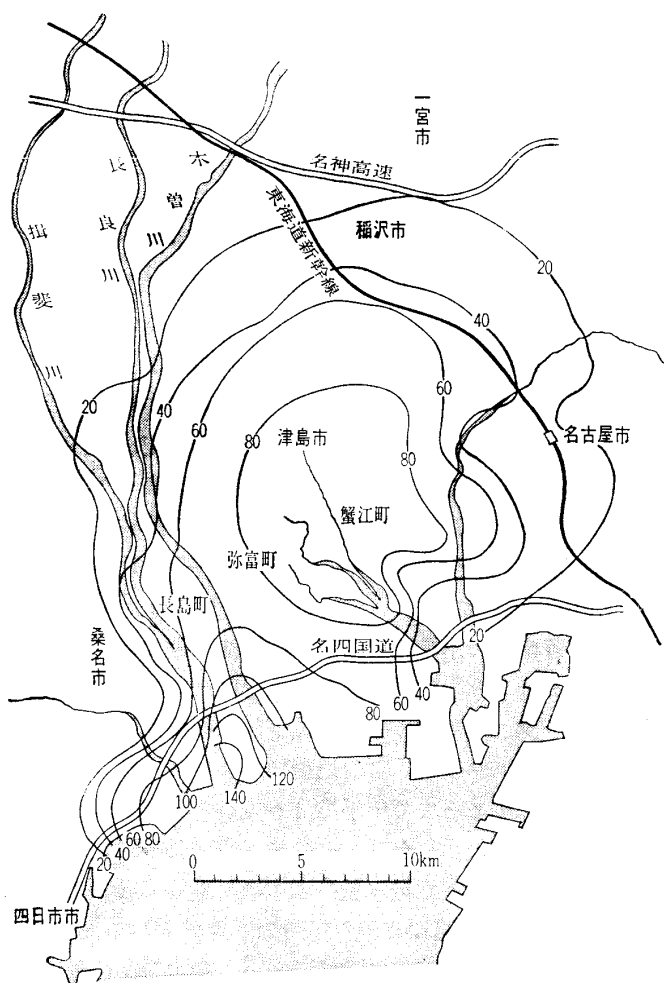


図-3 最近15年間 (昭和36年2月~50年11月)の累積沈下量等量線図 (単位, cm)

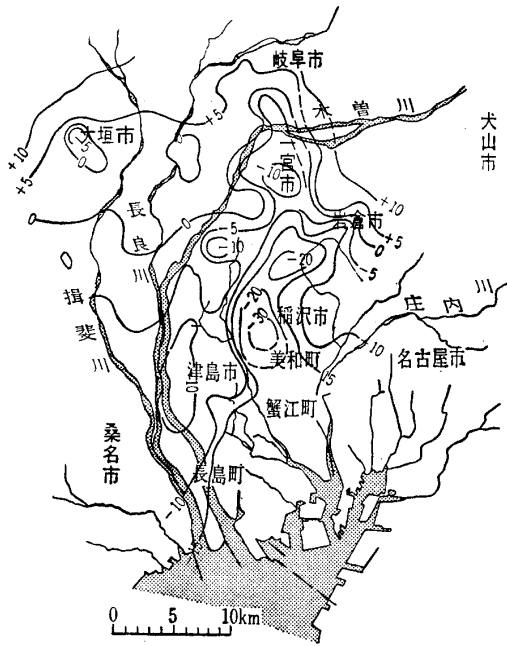


図-5 昭和48年の第一帯水層水位分布図 (T.P.基準, m)

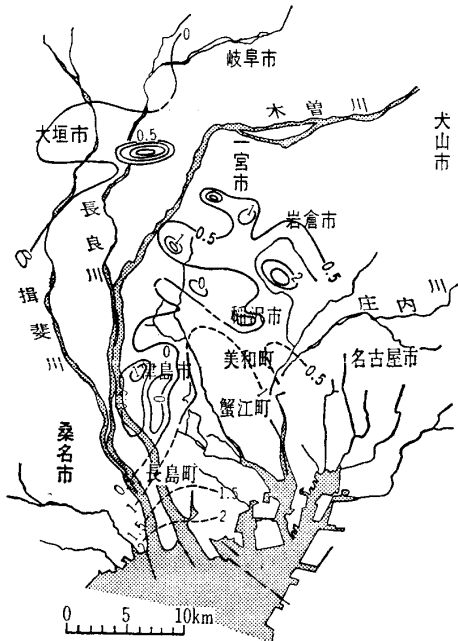


図-6 昭和36~48年の第一帯水層水位低下速度分布図 (単位, m/年)

図-5と図-6に第一帯水層(第一レキ層)の水位分布および水位低下速度分布を示すが、第一帯水層の水位は扇状地からはんらん原に移行するところ、すなわち地下水が被圧化する地域で急激な地下水位の低下を生じている。特に、犬山扇状地では、この傾向が顕著である。また、濃尾平野の北西の揖斐川沿いの地域とその扇状地の付近は地下水位の低下はなく、この地域の第一帯水層への地下水供給能力が大きいことを示している。このような地下水供給能力があるにもかかわらず、津島市付近では過剰揚水のため地下水位はT.P. -30mにまで低下している。岩倉市、稲沢市、美和町にかけて、揚水量はさほど大きくはないが、水位低下の激しい地域がある。これは、この地域の第一レキ層相当層が薄層であり、埋没丘状を呈する部分で地下水

の供給能力が低いと解釈される。水位低下速度は、上述した理由により、稲沢市付近で、2.0m/年と大きな値を示している。また、長島町南端付近でも2.0m/年となっていて、地下水が海水と平衡していないことを示しており、第一帯水層は一応海水とはしゃ断状態であることを示唆している。

図-7と図-8に第二帯水層(第二レキ層)の水位分布と水位低下速度分布を示すが、第二帯水層も全体的には第一帯水層と類似の傾向が認められるが、その特徴は稲沢市東方と名古屋駅付近でT.P. -40mの低水位となっており、帯水層深度から考えてほとんど枯渇状態に近づいている。したがって、これらの地域の井戸はさらに深い滞水層に水源を求め、年々深井戸が増大し続けていた。これらの水位分布は埋没地形の影響も受けており、帯水層も薄く、地下

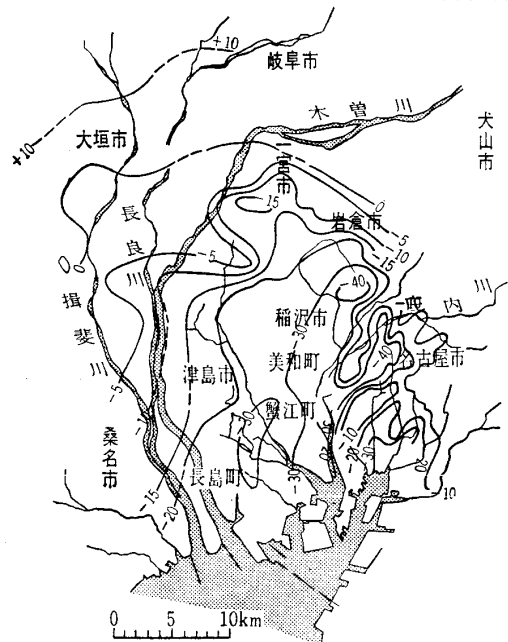


図-7 昭和48年の第二帯水層水位分布図 (T.P.基準, m)

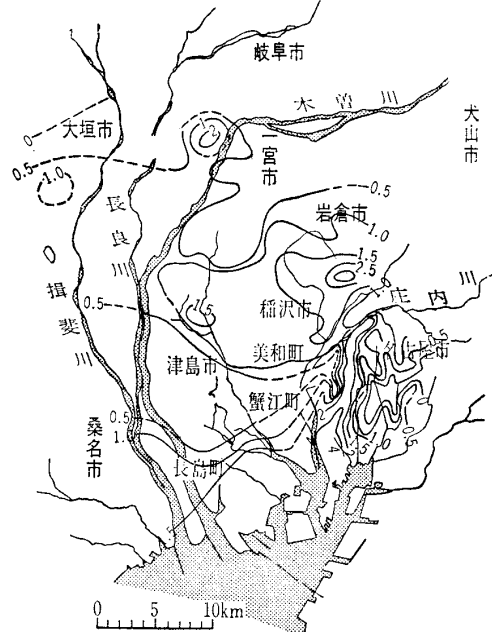


図-8 昭和36~48年の第二帯水層水位低下速度分布図 (単位, m/年)

水供給も困難な埋没地形の尾根の部分が一般に水位の谷の部分に対応している。

第一帯水層と第二帯水層を比較すると、水位低下量および低下速度とも第二帯水層のほうが大きくなっており、水位低下域も広がっている。これらの現象は第一帯水層に比べ第二帯水層の地下水供給能力の低さに起因するものと考えられる。

4. 深層土質調査の結果

深層の土質状態を知るために、飛島観測井設置時に得たサンプリング試料（サンプリングは、約50mまでは固定ピストンサンプラーにより、50m以深ではワイヤーラインコアパレルにより行なった）の物理試験、圧密試験、非排水三軸圧縮試験を行なった。また、現地ではボーリング孔を利用し、砂層の変形係数を求めるため、深さ G.L. -22.0 m, -43.0 m, -80.0 m の砂層で KKT 横方向載荷試験を行なった。

各深度から採取した粘土試料の塑性図上の位置を図-9に示す。つぎに、圧密試験に基づく圧密降伏荷重と有効上載圧との関係を図-10に示す。図-10によると、チュウ積粘土層、熱田層の粘土層、海部累層の粘土層の一部では、処女圧密あるいはそれに近い状態となっているが、それ以外

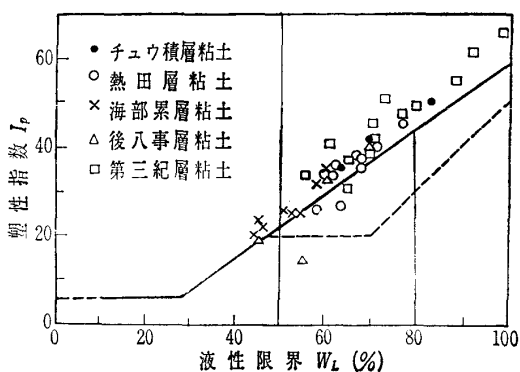


図-9 飛島における各採取粘土の塑性図上の位置

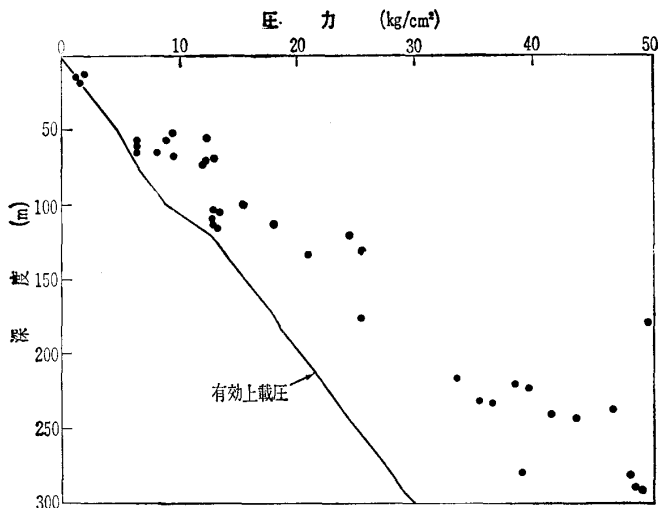


図-10 圧密降伏荷重と有効上載圧の関係

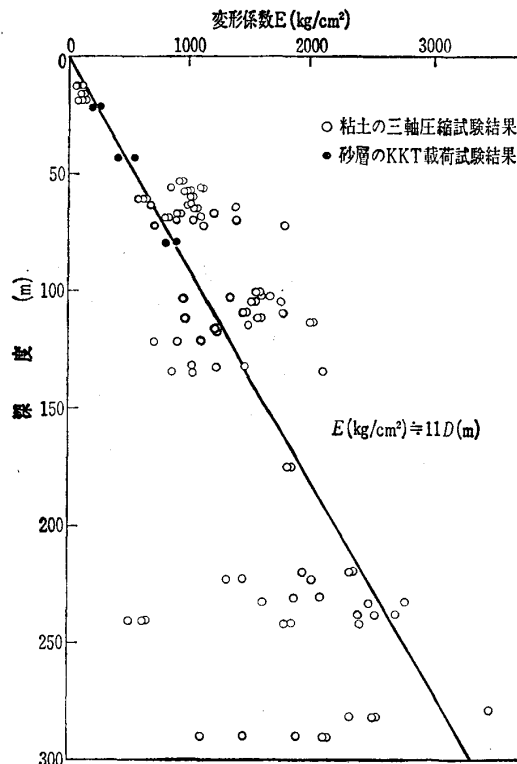


図-11 深度と変形係数の関係

外はかなりの過圧密状態であることがわかる。

図-11は、試料の採取深度と変形係数の関係を示している。KKT 横方向載荷試験による砂層の変形係数（ポアソン比 0.33 と仮定¹¹⁾）は深さとの間につきの関係⁷⁾が成り立つと推定される。

$$E = 11D \dots\dots\dots(1)$$

E : 地盤の変形係数 (kg/cm²)

D : 深さ (m)

粘土の三軸圧縮試験から求めた変形係数も深度 200m までは、この関係に近い傾向を示しているが、200m より深い試料の変形係数は、この関係よりも低く、バラツキも大きい。これは、試料採取時の乱れの影響が深いところで大きいと思われる。

5. 濃尾平野における地盤沈下量の解析と将来予測

沈下解析を正確に行なうためには、解析の対象となる地盤の構造、各地層の土質定数、各帯水層の水位と水位変動速度などが正確には握られなければならない。

地盤構造は図-1に示すように、東海層群より浅い部分については濃尾平野全域に対してかなりはっきりわかっている。

圧密計算に必要な基礎資料が熱田層まではかなりは握されていること、図-10で示したように熱田層より深いところの粘土層はかなり過圧密状態であり、また地下水位低下による荷重増加率が小さいことなどを考慮して、今回の沈

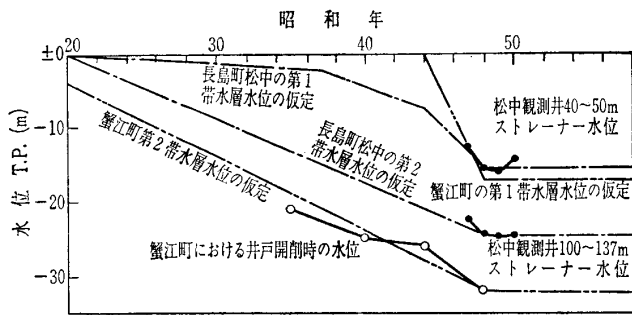


図-12 長島町松中ならびに蟹江町の地下水位の状態

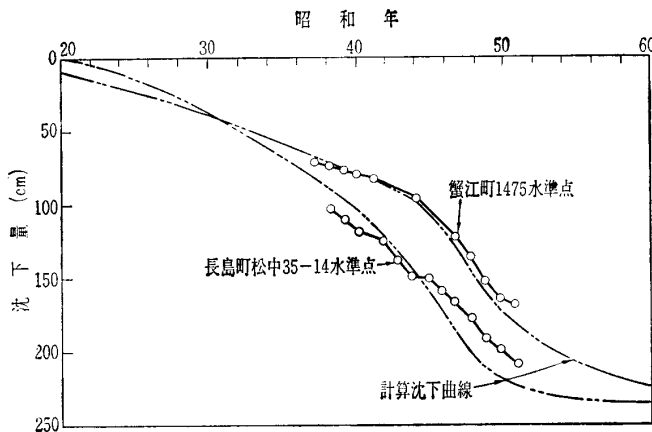


図-13 長島町松中と蟹江町における実測沈下曲線と計算沈下曲線の比較

下解析の対象は熱田層下部粘土層までとした。

帯水層は熱田層以浅にある第一および第二レキ層を考えた。これら両帯水層の水位は、年々低下しているため、粘土層に作用する荷重も年々増加する。したがって、漸増荷重による圧密沈下解析が必要となる。

漸増荷重条件に対する一次元圧密方程式は、(2)式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + R(z, t) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 u は過剰間ゲキ水圧、 C_v は圧密係数、 $R(z, t)$ は荷重増加速度を示す。シフマン (Schiffman)⁹⁾ は任意の荷重増加速度および定率漸増荷重の場合について、ラム (Lumb)⁹⁾ は定率漸増荷重の場合についてその解を与えている。

桑原¹⁰⁾ は、この考えに従って、濃尾平野の多数の地点で地盤沈下量の解析と沈下予測を行なったが、その例を紹介すれば、図-12、13のようである。図-12は長島町松中の水準点35-14地点と蟹江町的水準点1475地点における地盤沈下量を計算するための地下水位状態の仮定を示しており、図-13にその仮定による計算結果と実測沈下量との比較を示している。図-12の仮定では、地下水位の状態が、昭和48年以降一定値になると仮定しているが、昭和49・50年の地下水位状態はむしろ回復の傾向を示したことによる差異が図-13における実測沈下量の予測以上の鈍化にあらわれている。

6. 濃尾平野の地盤沈下と温泉との関係

濃尾平野地盤沈下地帯には、1,000~2,000mの深層地下水をくみ上げている温泉がかなりあり、かねがねこれら温泉と地盤沈下との因果関係が問題視されてきた。ある温泉の近くの地盤沈下観測井では、昭和41年以来、地表面からG.L. -153m の間の圧縮量、G.L. -153m から G.L. -267m の間の圧縮量が観測されている。また、観測井の近くに水準点があるので、この水準点の沈下量との差によりG.L. -267m 以深の地層の圧縮量が得られる。これらによると、昭和41年から昭和48年までの8年間の圧縮量は、地表面からG.L. -153m で 65.0 cm、G.L. -153m から G.L. -267m で 5.5 cm、G.L. -267m 以深で 8.6 cm である。

この温泉は、掘削当時は自噴する程度の水圧をもっていたというが、くみ上げるに従い水圧は低下し、現在は数十メートルの水位低下が生じているとのことである。ただし、泉源井戸のストレーナーの位置で数十メートルの水位低下が生じていても、地盤の深部で、その圧力低下がどのように伝ばし、分布しているかを明示することはむずかしい。しかし、深部地下水のかん養速度は地下水のくみ上げ速度に比べ、きわめて遅いので、長い将来を考えれば深部の水圧は低下する一方であることが容易に推定される。

地盤の間ゲキを埋めている水が抜かれ、その圧力低下が伝ばすれば、地盤は収縮せざるをえない。この地盤の収縮量を計算するためには、地盤の弾性係数(ヤング率とポアソン比)と圧力低下の状態を知らねばならない。

飛鳥観測井で得られた関係式(1)を示すような地盤はホル(Holl)によれば、ポアソン比は0.33である¹¹⁾。側方拘束の場合の深度 z_1 から z_2 までの鉛直方向のみの一次元圧縮量 S は次式により計算できる。

$$S = \frac{1-\mu-2\mu^2}{1-\mu} \int_{z_1}^{z_2} \frac{4p}{E} dz \dots \dots \dots (3)$$

E に(1)式の関係、 μ に0.33を代入し、 $4p$ は各深度で同一の圧力変化であると仮定すると、(3)式はつぎのようになる。

$$S = 14.114p \log_{10} \frac{z_2}{z_1} \dots \dots \dots (4)$$

G.L. -153m から G.L. -267m までの圧縮量 S_2 は(4)式より

$$S_2 = 3.41 4p \dots \dots \dots (5)$$

となる。いま8年間の平均的水位低下を16m(2m/年)とすれば、 $S_2 = 5.5$ cm となる。

つぎに、G.L. -267m から G.L. -1500m までの圧縮量 S_3 は、(4)式より

$$S_3 = 10.58 4p \dots \dots \dots (6)$$

となり、8年間の平均的水位低下を8m(1m/年)とすれば、 $S_3 = 8.5$ cm となる。

これらの計算では、地盤の変形係数と地盤内における平

均的水位低下とに推定値が用いられているが、これらの仮定はきわめてありうべき範囲の数値であり、その計算結果は、前述の計測値とよく対応している。したがって、このような地盤圧縮の原理を否定して、温泉水のくみ上げが地盤沈下と無関係であるということとはできないと思われる。

7. むすび

昭和48年までの地盤沈下経過により、その将来の沈下進行がきわめて心配された濃尾平野も、昭和49・50年と沈下速度が鈍化し、最悪の事態は回避されそうな一段落状態となっている。しかし、濃尾平野は広大なゼロメートル地域を擁し、そのような低地の宅地化もある程度進んでおり、一方ではすでに豪雨時の排水が困難であることと、台風時の危険を考えれば、沈下の鈍化のみで安心することは許されず、沈下の停止を早急に実現しなければならない。

そのため、濃尾平野における許容揚水量を求め、その許容値まで現在の揚水量を削減することが、この地域における一つの課題である。この許容揚水量を求める作業も行なっているが¹²⁾、ここではページ数の都合で割愛した。

なお、濃尾平野の地盤沈下問題では、桑原・植下は東海三県地盤沈下調査会(会長：飯田汲事名大名誉教授)、愛知県地盤沈下研究会(会長：飯田汲事名大名誉教授)、三重県地盤沈下調査研究会(会長：荒木慶雄三重大学教授)に関係の方々のお世話になり、また植下は文部省科学研究費(「沿海低地帯の地盤沈下の実態と災害の解明」、代表者：松沢勲名大名誉教授)のお世話になった。また日ごろ、これらの

作業を進めるため、名城大学、名古屋大学の学生達の協力も得ている。記して、感謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会ニュース部会：地下水問題の実態と課題，土と基礎，Vol. 23, No. 8, 昭和50年8月，pp. 83~85.
- 2) 桑原徹：濃尾平野の形成過程と名古屋付近の地盤，土と基礎，Vol. 18, No. 10, 昭和45年10月，pp. 46~54.
- 3) 桑原徹：濃尾盆地と傾動地塊運動，第四紀研究，7, 昭和43年，pp. 235~247.
- 4) 飯田汲事：濃尾平野南部地域の地盤沈下の実態とその解析，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書，昭和50年3月，愛知県環境部，pp. 19~38.
- 5) 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, 昭和51年4月，pp. 31~36.
- 6) 桑原徹：濃尾平野における地下水利用の実態，地盤沈下の実態とその対策に関する調査報告書(第二報)，昭和51年7月，愛知県環境部，pp. 33~75.
- 7) 植下協：濃尾平野の地盤沈下対策に関する考察，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書，昭和50年3月，愛知県環境部，pp. 241~322.
- 8) Schiffman, R.L. : Consolidation of Soil under Time Dependent Loading and Varying Permeability, Proc. H.R.B., 1958, pp. 584~617.
- 9) Lumb, P. : Rate of Settlement of a Clay Layer due to a Gradually Applied Load, Civil. Engg. and Public Works Rev. 1963, Vol. 58, No. 680, pp. 315~317.
- 10) 桑原徹：濃尾平野地域の沈下予測(第二報)，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書(昭和50年度)，昭和51年7月，愛知県環境部，pp. 109~149
- 11) Harr, M.E. : Foundation of Theoretical Soil Mechanics, McGraw-Hill Book Co., 1966, pp. 109~110.
- 12) 植下協・板橋一雄・棚橋斉：濃尾平野地盤沈下の解析，土木学会第31回年次学術講演会概要集Ⅲ，昭和51年10月，pp. 183~184.

(原稿受理 1976. 9. 13)

『設計施工基準集(設計編)』3部作

編集・発行 土質工学会

- | | | |
|---------------|------------------------|-------------|
| ○ 土 工〔第1回改訂版〕 | 定価 3,500円 | 会員特価 2,700円 |
| | 送料(1冊) 240円 B5判 444ページ | |
| ○ 地 中 構 造 物 | 定価 1,600円 | 会員特価 1,200円 |
| | 送料(1冊) 200円 B5判 107ページ | |
| ○ 構 造 物 基 礎 | 定価 6,000円 | 会員特価 4,700円 |
| | 送料(1冊) 320円 B5判 882ページ | |

申込み先 社団法人 土質工学会

東京都港区西新橋1丁目13番5号(東亜別館)

〒105 ☎(03) 502-6256~9

郵便振替 東京 4-40786