

沈下要因を総合評価した長崎県諫早干拓地の地盤沈下予測

棚橋由彦* ・ 藤田道浩** ・ 土肥孝史***
武政剛弘**** ・ 後藤恵之輔* ・ 古本勝弘*

A Prediction Model of Land Subsidence Synthetically Evaluated All Factors for the Isahaya Polder in Nagasaki Prefecture

by

Yoshihiko TANABASHI*, Michihiro FUJITA**, Takashi DOI***
Takehiro TAKEMASA****, Keinosuke GOTOH* and Katsuhiko FURUMOTO*

Naturally speaking, the land subsidence has been caused due to dead load (for example, embankment, building and polder dyke), repeated load (for example, traffic and oceanic tide) and over-pumping groundwater.

In the Isahaya polder in Nagasaki prefecture, the land subsidence has been observed since in 1970s.

This paper completes an iterative quasi-three-dimensional finite element model for heterogeneous multiaquifer systems and evaluates the land subsidence due to only over-pumping groundwater using one-dimensional consolidation finite element model for the Isahaya polder. The calculated values of land subsidence have been sufficiently agreed with the observed values in inland. However, the difference has been apparent especially near the shore.

Therefore, this paper proposes a prediction model of land subsidence synthetically evaluated all factors mentioned above except of traffic load. It has been clarified that the proposed model reasonably predicts the land subsidence in the Isahaya polder, as the result of the comparison with calculated and observed values.

1. はじめに

我が国では、地下水の過剰揚水に伴う広域地盤沈下が古くから問題となっており、関東北部、濃尾平野、大阪平野、筑紫平野などは国の重要施策地域となっており、それに対する地下水シミュレーションを含む水理・沈下解析が進められている。

一般に地盤沈下の要因として(1)構造物築造など静的荷重に伴う局所的な2次元・3次元圧密沈下、(2)潮汐、

交通荷重に伴う繰返し荷重に起因する圧密沈下、(3)軟弱地盤層下位にある滞水層からの過剰揚水に伴う被圧地下水水位低下によりもたらされる水頭勾配と有効応力増加による広域的な圧密沈下が挙げられる。

よって、この3つの要因を総合的に評価して沈下量を算定する必要がある。交通荷重による繰返し圧密沈下要因は、未だ十分解明されていないため、ここでは要因から除外する。潮汐振動については、繰返し圧密

平成3年4月30日受理

*社会開発工学科 (Dept. of Civil Engineering)

**土木工学専攻修士課程 (Graduate Student, a master's course in Civil Eng.)

***清水建設(株)本社 東京都中央区京橋 (Shimizu Construction Co., Ltd.)

****地域共同研究センター (Cooperative Research Center, Nagasaki Univ.)

沈下の解析に必要な土質パラメーターが得られていないため、実測と計算結果の沈下量差から、反復計算により不確定パラメーターを決定した。これをもとに近年農業用水だけでなく工業用水の需要増加が見られ、揚水量が増加の傾向にある諫早干拓地の地盤沈下将来予測を行う。

2. モデル地区の概要

諫早干拓地は、森山町と諫早市の一部を含み、東西を有明川と本明川支流半造川、南北を山地と有明海に

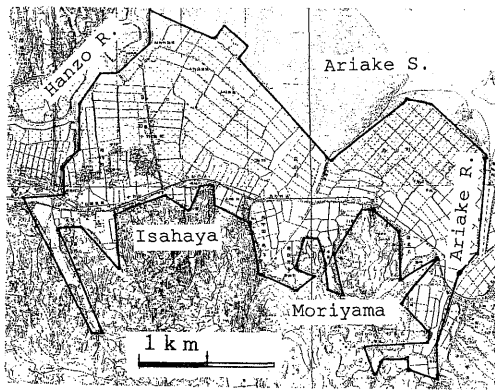


Fig.1 Plan View of Isahaya Polder

囲まれた約10km²の干拓地で造成されている (Fig. 1)。

長崎県諫早・北高地区水理地質図¹⁾によれば、地層構成は、表層に砂層(1~2m)その下に有明粘土(10~24m)が堆積しており、滞水層は3層である。基盤岩(砂岩、頁岩)は、標高-200m~380mに分布する盆状構造をなしている。このモデル地区の大半は水田で占められている。この水田は古くは、1697年から干拓によって造成されてきたものであり、国営諫早干拓事業の大幅な干拓増加に伴い、現在の大規模な干拓地となっている。この地区は水田の水源を供給する山地も狭く、有明川・半造川は流路の短い感潮河川である。そのため、湧水や浅井戸による浅層地下水の利用から、水中ポンプを用いた深層地下水位の低下やそれに伴う塩水化や地盤沈下現象が近年問題となっている。現在、工業用水の取水、簡易水道の供給、農家の取水といった地下水の供給は、深度の大きいポンプが多く用いられており、したがって全体のストレナーの位置も深くなる傾向にある。1.の沈下要因³⁾では、水中ポンプを用いた深層地下水位の低下を主たる対象としている。

3. 地下水シミュレーションモデル

(1)解析方法

地下水の運動を滞水層で水平、加圧層で垂直として取り扱う準三次元多滞水層系では、 i 番目の滞水層の地下水流の基本式は、次式で示される²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_i \frac{\partial h_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(T_i \frac{\partial h_i}{\partial z}) + (\frac{k'}{b'})_i (h_{i-1} - h_i) + Q_i - S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここに、 h_i :被圧地下水頭、 T_i :透水量係数、 S_i :貯留係数、 Q_i :揚水量または涵養量、 k' :加圧層の透水係数、 b' :加圧層の厚層であり、添字 i は i 番目の滞水層または、加圧層を表す。式(1)の近似解を $h = \sum H_i \cdot \phi_i \dots$ (2)とおき、式(1)と境界条件(式省略)にGalerkin法を適用し、近似式を導くと、

$$[A]\{H\} + [B]\{\frac{dH}{dt}\} + \{F\} = 0 \quad (3)$$

$[A],[B]$ は $n \times n$ (n :接点数)のマトリックスである。式(3)の時間微分項を後退差分とすると、節点の水頭値を未知数とする連立一次方程式を得る。換言すれば、式(1)は重み付き残差法により、有限要素定式化がなされる³⁾。

(2)解析モデル

解析対象地区を節点332、要素293に分割する。境界条件は本明川、半造川に接する接点を水頭一定または可変、山麓と接する節点を不透水境界としている。地層構成の平面分布は資料(1)を参考に、解析地域を18ブロックに分けてそれぞれのブロック毎に地層構成、パラメーター入力を行っており、鉛直分布は、盆状構造をシミュレートしている。Fig.2に示す干拓地でないハッチ部の領域は、特に降雨浸透能の大きい地域である。また、各層の水理パラメーターは観測井A,B,C (Fig.2参照)の柱状図と圧密試験結果から決定した。

(3)揚水

揚水井の平面分布と揚水強度(及び井戸の深度)は、長崎県の地下水利用実態調査表と別途行ったヒアリング調査結果を参考に、メッシュ図にプロットし、隣接する節点に等価配分し、Fig.2のような揚水井分布を作成した。なお、Fig.2は取水期(6月から10月)のそれであり、農閑期(11月から5月)のそれは図を省略している。

4. 地下水シミュレーション結果と考察

(1)降雨のみを考慮した解析

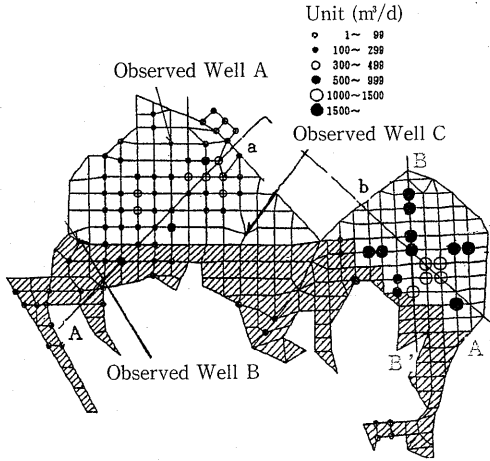


Fig. 2 Finite Element Network with Location and Strength of Pumping Wells

この解析対象地区では、降雨観測データが乏しく観測井A,B,Cのみについて、1986年3月以降のものしかない。したがって、近隣する諫早市の気象月報の降雨記録を用い、1984年～1989年の5年5ヶ月間を対象にこれを入力する。

降雨のみを入力した地下水変動をFig. 3に示す。Fig. 3より滞水層の水頭は降雨との時間遅れが小さく、降雨に対して比較的敏感に反応していることが分かる。特に、1985年や1988年の降雨量ピーク時における地下水位の上昇は顕著に表れている。

また、観測井Bは観測井Aより地下水位差が約0.2m表れている。この原因として観測井Bが観測井Aよりも降雨浸透能の大きい地域に近いためと考えられる

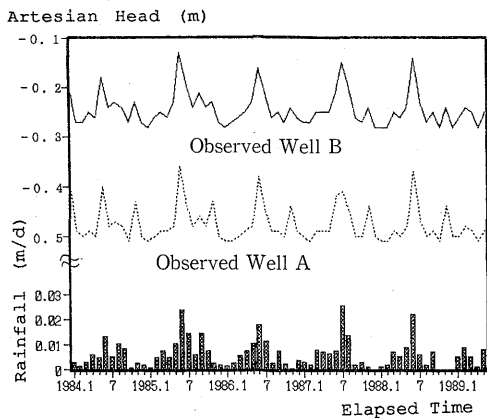


Fig. 3 Variation of Artesian Head due to Rainfall only

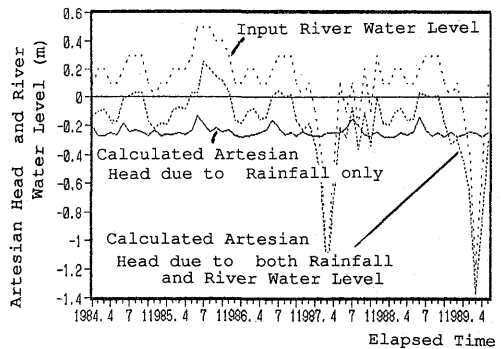
(Fig. 2参照)。

(2)降雨及び河川水位を考慮した解析

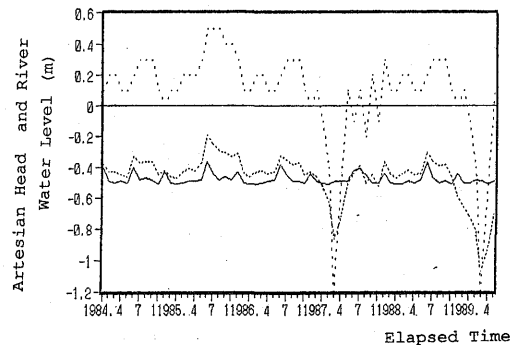
(1)の解析の入力データに河川水位変動の影響を考慮し河川水位のデータを加えた解析を行う。

河川水位の情報は、境界条件である半造川の不知火橋における河川水位の観測値（建設省長崎耕地事務所提供資料）に依った。(2)の結果の一例として、観測井A,Bの地下水変動をFig. 4に示す。観測井Aは河川に近いので、(1)の結果と比較すると河川水位変動の影響が顕著に表れている。観測井Bでは、観測井Aに比べると河川から離れているので、河川水位の変動よりも雨量の経時的変化による影響が強く表れている。

また、河川水位変動に対しても、(1)の結果と同様、解析結果の水頭は時間遅れも少なく、よく反応していることがうかがえる。



(a) at Observed Well, A



(b) at Observed Well, B

Fig. 4 Variation of Calculated Artesian Head due to both Rainfall and River Water Level

(3)揚水量の経時変化を考慮した解析

揚水量の経時変化は、農業揚水においては取水期(6~10月)の5ヶ月間と、農閑期(11~5月)の7ヶ月間の2つのパターンで表す。工業用水や簡易水道の揚水は年間を通じ等しいものとする。なお、揚水量の経年変化のデータがないため取水期に降雨が多かった年は揚水量は少ないものと考えられるので、降雨量を重みとする年間揚水量の経年変化を想定した。

降雨量の変化に伴う取水期の揚水量を1986年の揚水を基準にTable 1のように仮定する。

調整揚水強度を Q_i とする

$$Q_i = \eta q_i \quad \eta = R_{86}/R_i$$

q_i : 各年の揚水強度

R_i : 各年取水期間中の雨量

R_{86} : 1986年取水期間中の雨量 (1225mm)

Table 1 Assumed Correlation between Pumping Strength and Rainfall

	R_i (mm)	η
1984	1147	1.0
1985	1971	0.6
1986	1225	1.0
1987	1531	0.8
1988	1114	1.1

Fig. 5に、観測井Bの被圧地下水頭の計算値と実測値の経年変化を、Fig. 6にA-A'断面 (Fig. 2参照)における取水期と農閑期の地下水位プロフィールを、Fig. 7(a), (b)にそれぞれ解析領域全体の取水期(1988年10月)と農閑期(1989年5月)の地下水位コンターを示す。

取水期の地下水位のオーダーとしては最大約1.5mと実測値のそれとあまり大差ない結果が得られている (Fig. 5)。しかし、取水期から農閑期へと地下水が回復する過程において計算値では急激な回復をみせているのに対して、実測値では次の年の地下水位低下期まで緩やかな回復をしている。この最大の原因は、揚水量の経時変化を取水期と農閑期の2期間を想定したことにあるものと考えられる。実際には農閑期に入ってから多少ずつではあるが取水が行われているものと考えられる。この問題を解消するためには、揚水量の経年変化の資料と揚水量の経時変化を月単位で入力する必要がある。

降雨と揚水とも入力した、観測井Aの地下水位変動 (Fig. 5) の計算値 (図中実線) からは地下水位は取水停止期には毎年ほぼ同じ水位まで回復しているが、1989年のそれは、1988年より始められた工業用水の取

水の影響により水位低下が見られる。1986年4月より計測が開始された観測井Aの実測値 (図中波線) と比較すると、計算値は毎年同じような動向を示しているのに対し実測値は水位変動の差が大きい。

A-A'断面の水位変動図 (Fig. 6) では、農業用水で占められるb-A'断面の、取水期には最大4~5m低下しているが取水停止期には基準水位まで回復している。これに対して、A-a断面では農業用水のほか、生活用水や工業用水としても用いられているので、取水停止期の回復が鈍っていることが分かる。

(4)水位変動予測

Fig. 8に、観測井A (Fig. 2参照)における水位変動予測の経時変化を示す。(I)の区間は1986年4月~1989年5月における各揚水井の取水量、降雨、河川変動の諸条件を考慮したものである。(II)の区間は主要な揚水井の揚水量データを新たに入力したが、資料の不足から1989年4月以降の降雨、河川変動のデータは1987年5月~1989年4月の条件が現状のまま繰返すと考え、

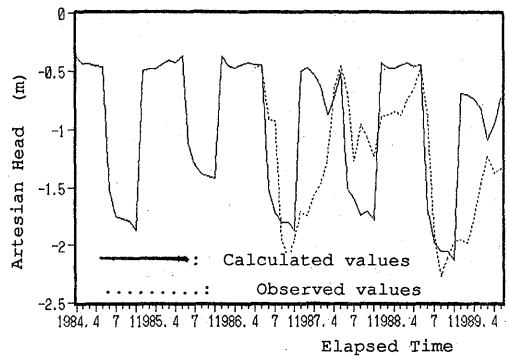


Fig. 5 Variation of Calculated and Observed Artesian Head at Observed Well B

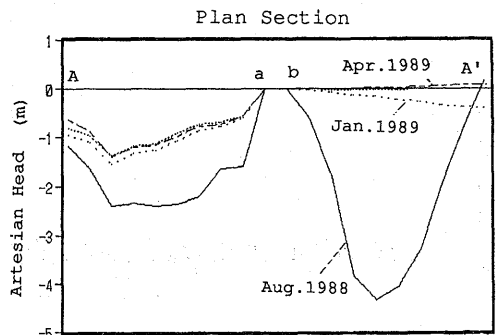
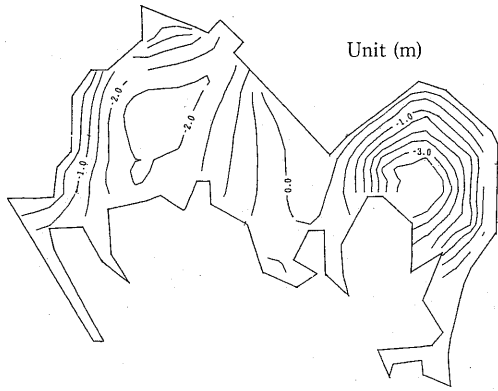
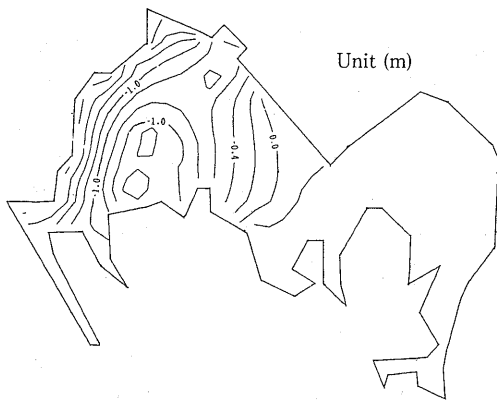


Fig. 6 Longitudinal profile of Artesian Head



(a) Over-Pumping Period (Oct. 1988)



(b) Steady-Pumping Period (May 1989)

Fig. 7 Plan profile of Calculated Artesian Head

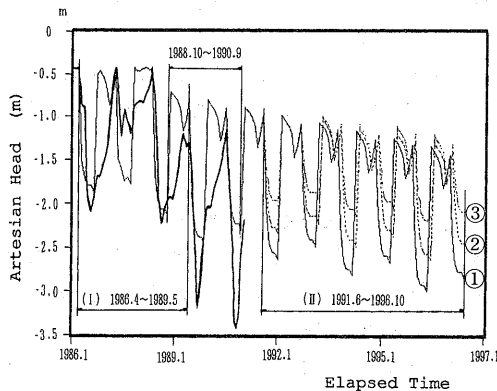


Fig. 8 Comparison between Calculated and Observed Artesian Head Variation of observed well A

1995年5月までの地下水変動を予測したものである。取水量を現状のまま(100%)としたものが①, また80%, 60%に抑制し, 他の条件は同じとしたものがそれぞれ②, ③である。

5. 沈下要因を総合評価した地盤沈下予測

5. 1 広域地盤沈下シミュレーションモデル

(1)地盤沈下シミュレーションモデル

広域地盤沈下は沈下勾配が極めて小さいこと, 水頭変化を伴うことを勘案すれば, Gibson, Davisらの一次元圧密方程式(4)に支配されるとみなせる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad (4)$$

ここに, $u = \gamma_w h$ は過剰間隙水圧, σ_z は鉛直全応力, $C_v = k/m_v \gamma_w$ は圧密係数である。式(4)を有限要素により定式化し,

$$[K]\{\dot{r}\} + [P]\{r\} = \{R\} \quad (5)$$

を得る。ここに, $[K]$ は全体速度勾配行列, $[P]$ は全体体積ひずみ速度行列, $\{R\}$ は全体応力履歴ベクトル, $\{r\}$ は全体水圧勾配ベクトルである。式(5)に, 水理境界条件と初期間隙水圧分布を設定し, 地下水位の変動解析で得られた時間-地下水位関係を入力すれば, 要素 k の任意時間($t_0 + j\Delta t$)における水頭変化量 Δh_k は, $\Delta h_k = \Delta u_k / \gamma_w$ から求まる。各要素の地盤沈下量 ΔS_k は次式により評価できる。

$$\Delta S_k = \begin{cases} m_{vc} \cdot \Delta \delta \cdot \Delta h_k (\Delta h_k \geq 0) \\ m_{vs} \cdot \Delta \delta \cdot \Delta h_k (\Delta h_k < 0) \end{cases} \quad (6)$$

ここに, m_{vc} は地下水位下降時($\Delta h_k \geq 0$)の体積圧縮係数, m_{vs} は地下水位上昇時($\Delta h_k < 0$)すなわち膨潤時の体積圧縮係数であり, $\Delta \delta$ は要素の長さである。任意時刻からの時間刻み幅 Δt の多層地盤の沈下量 ΔS_j は式(6) ΔS_k の k が1から p (要素数)までの総和である。よって, $t = (t_0 + j\Delta t)$ 時間後の地盤沈下量 S は ΔS_j の j が1から m_t までの総和から求められる(m_t は最終設定時間を t_f とすると, $t_0 + m_t \Delta t = t_f$ から求まる整数である)。これにより広域地盤沈下予測シミュレーションモデルを作成する。

(2)解析モデル及び各種パラメーター

広域地盤沈下予測を行うにあたり, 地下水変動解析での解析対象地区を粘土層の厚さ別にブロック分けし, その粘土層を2mずつにスライスしてメッシュを作成した(Table 2)。粘土層の各種土質パラメーターの同定については観測井Bからサンプリングした粘土層の圧密試験結果をベースに, 観測井Bの沈下実測値と計

算値の対比からパラメーターの範囲内で、最も対応が良いものを採用した。以上設定したモデルに地下水変動結果より得られた水頭を入力して広域地盤沈下予測を行う。

Table 2 Input parameters for confined bed (Ariake clay layer)

Depth z(m)	Coefficient of permiability k (m/d)	Void Ratio e	Coefficient of volume com- pressibility m_v (m ² /d)
2	0.127×10^{-4}	2.98	0.588×10^{-1}
4	0.120×10^{-4}	2.83	0.410×10^{-1}
6	0.115×10^{-4}	2.72	0.313×10^{-1}
8	0.080×10^{-4}	2.68	0.260×10^{-1}
10	0.035×10^{-4}	2.62	0.224×10^{-1}
12	0.990×10^{-5}	2.56	0.196×10^{-1}
14	0.955×10^{-5}	2.50	0.174×10^{-1}

(3)解析結果

1986年4月から1989年5月の間の揚水に伴う広域地盤沈下解析を行った結果はFig. 9である。同期間に行った諫早市小野地区の実測累積沈下量 (Fig. 10) と比較すると、解析対象地区の内陸部において実測沈下量とほぼ一致するものの、海岸沿いで実測は海に向かってかなり内陸からなだらかに沈下量が大きくなっているが、計算値では逆の沈下勾配を得ている⁴⁾。

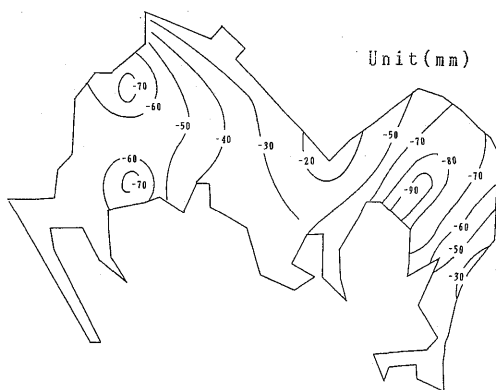


Fig. 9 Plan Profile of Calculated Land Subsidence Values (during Apr. 1986 to May 1989)

5. 2 堤防による沈下量の算定

静的載荷に伴う局所的な圧密沈下現象として干拓堤防による沈下が考えられる。

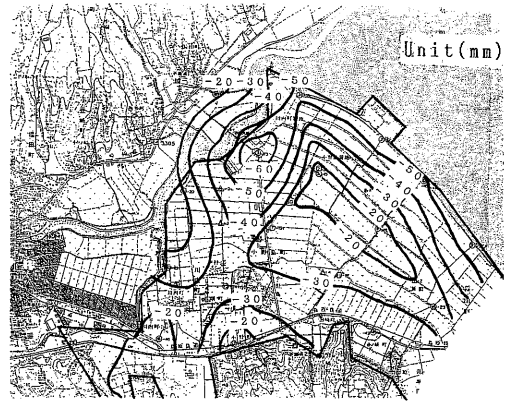


Fig. 10 Plan Profile of Observed Land Subsidence Values (during Apr. 1986 to May 1989)

諫早市小野地区では農地干拓のため潮受け堤防を建設し、1972 (昭和47) 年に完成されている。完成後、激しい沈下のため過去数回の嵩揚げ工事を行っているが、現在も年間10mm程度の沈下を続けている。堤体重量による圧密沈下量は広範囲にわたって大きな影響を及ぼすと考えられないのでここでは、簡易計算を行う。解析方法は、次のようである。

$$S_f = \frac{e_0}{1+e_0} \cdot H \cdot \log \frac{\sigma'_z + \Delta\sigma_z}{\sigma'_z} \quad (5)$$

S_f : 最終沈下量 e_0 : 初期間隙比
 H : 粘土層厚 σ'_z : 有効土被り圧
 $\Delta\sigma_z$: 堤体による地盤内鉛直増加応力

簡易計算より最終沈下量 S_f は、堤体直下では97.7mmの沈下量が見込まれる。堤体直下から10m, 20mと離れるにつれて19.5cm, 3.9cmと沈下量が減少し、堤体直下から30m離れたところでは沈下量がゼロとなる (Fig. 11)。堤体直下の時間—最終沈下量曲線を Fig. 12に示す。1986年4月から1989年5月の3年間で38mm, 1986年4月から1995年5月の9年間では103mmの沈下量と計算された。

5. 3 潮汐による繰返し圧密沈下

潮汐の干満に応じて地下水位が変動することでわずかながらも沈下し、また有明粘土の繰返し圧密沈下による沈下量は静的圧密の約2倍との報告もあることから、その累積を考えると無視できない。

諫早干拓地では潮汐による被圧地下水位の観測はなされていない。そこで諫早干拓地と同様の沖積粘土で構成される愛媛県西条市での潮汐の影響を受ける被圧

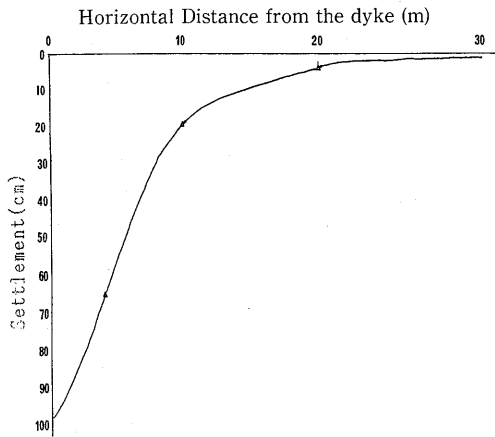


Fig. 11 Longitudinal Profile of Calculated Subsidence due to Polder Dyke

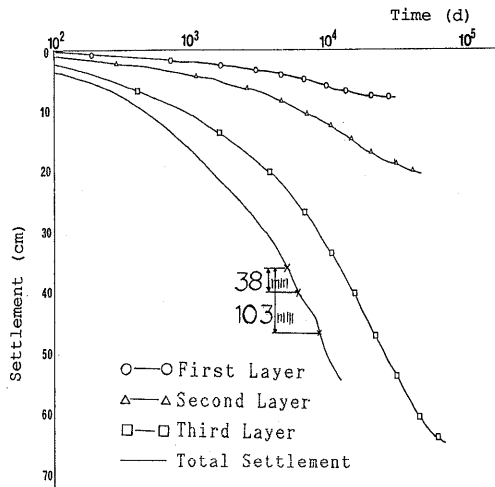


Fig. 12 Calculated Time-Settlement Curves under Center of Polder Dyke

地下水の水頭観測結果⁹⁾と比較し、このモデル地区にも同様の地下水位変動があるものと仮定し (Fig. 13)、それによる繰返し圧密沈下量の計算を行った。

繰返し圧密の計算に用いる圧縮指数 C_c 、膨張指数 C_s については、資料も乏しく文献⁹⁾の有明粘土の繰返し圧密のデータ (Fig. 14) より繰返し関数 N のべき関数として表わせると仮定し、以下の式とした。

$$C_c' = C_c \times A_c \times N^{Bc} \quad (6)$$

$$C_s' = C_s \times A_s \times N^{Bs} \quad (7)$$

C_c : 静的圧密時の圧縮指数

C_s : 静的圧密時の膨張指数

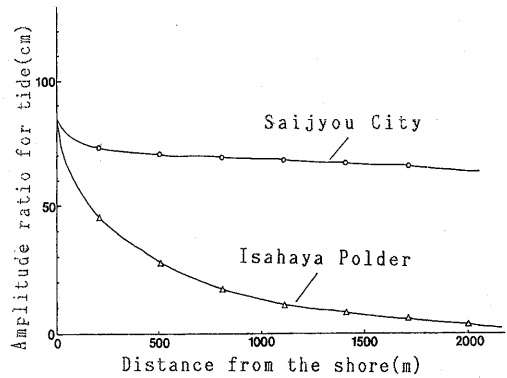


Fig. 13 Logitudinal profile of Artesian Head's Amplitude due to Oceanic tide

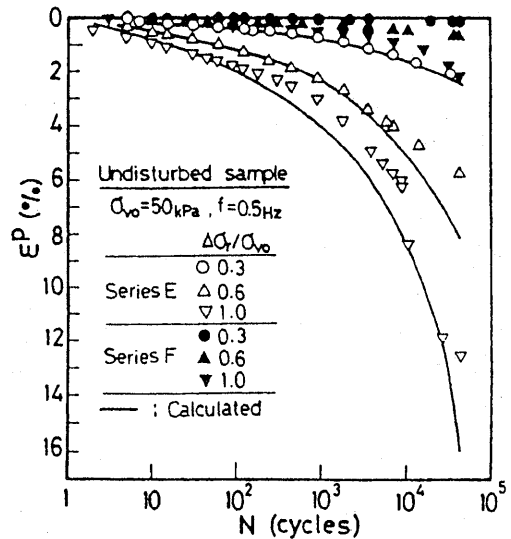


Fig. 14 Relationship Cycle Number, N versus Plastic Strain, e_p under Repeated Consolidation Tests (Hirao and Yasuhara ; 1984)

N : 繰返し回数

実測と広域地盤沈下の計算値との違いと同等になるような値を沈下解析プログラムにより反復計算を行い求めた結果、繰返し圧密パラメーターは次の値を得た。

$$A_c = 0.001 \quad B_c = 1.360$$

$$A_s = 0.001 \quad B_s = 1.120$$

5. 4 沈下量の総合評価

水位変動による広域地盤沈下、堤防による局所沈下、潮汐による繰返し圧密沈下の3つの要因を考慮した

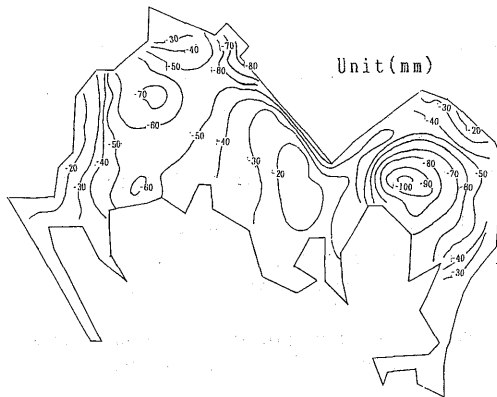


Fig. 15 Plane Profile of Calculated Subsidence
Evaluated All Factors (duration Apr. 1986
to May 1989)

1986年4月から1989年5月までの3ヶ年の計算累積沈下量コンターとしてFig. 15を得た。

Fig. 10 の実測累積沈下量コンターと比較してみると、内陸から海方向に向かって沈下量が増加し、その値も海岸近傍で-50mmとほぼ同程度である。また、内陸部、半道川近くの沈下量-70mmラインの位置もほぼ同じである。上部突端では多少異なっているが、これは海に接する面が多いので、地下水位がより大きな潮汐振動の影響を受けているためと思われる。内陸部において-20mm沈下ラインの位置が多少ずれているが、少ないデータから算定したわりに実測に近いコンターが描けているといえるであろう。このことからこの解析に用いたパラメーターはほぼ妥当だといえる。

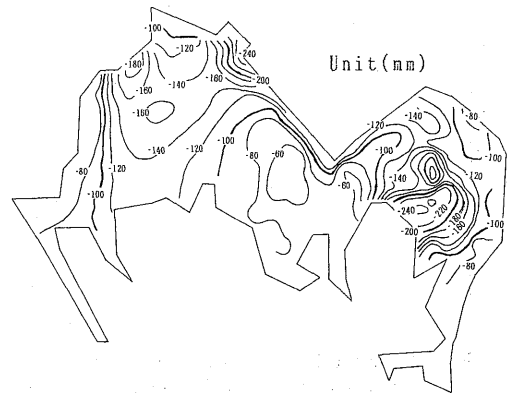
よって以上のようにして同定した解析に所要のパラメーターを用い、解析対象地区の総合的な地盤沈下量の1995年3月における沈下状況を予測する。

6. 広域地盤沈下の将来予測

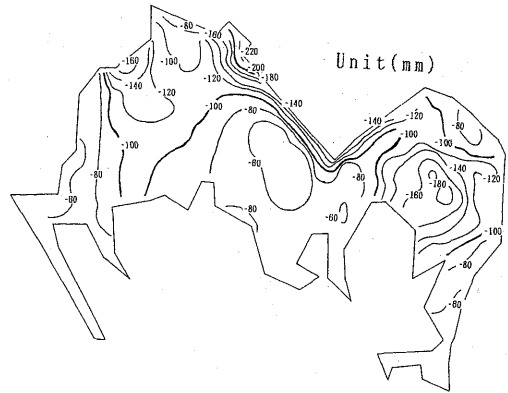
地下水変動解析の予測結果である①(100%揚水)を用いた1986年4月~1995年3月の9年間における累積沈下予測コンター (Fig. 16(a))を示す。Fig. 15の1986年4月から1989年3月の約3年間の累積沈下量と比較して、ほぼ倍以上と予測される。また揚水量を80%、60%に抑制すれば、農業用水の取水量が激しい森山地区では沈下量が240mmからそれぞれ180mm、140mmとなり、最大25%、42%ほど減少することができる (Fig. 16 (b), (c)参照)。

Fig. 17に、B-B' 測線 (Fig. 2 参照) における将来沈下予測値の縦断面図を、Fig. 18に観測井Bにおける

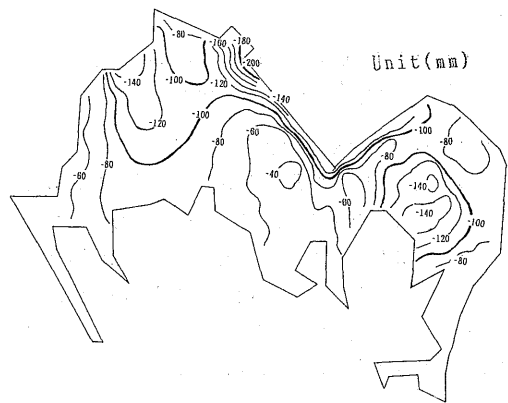
将来沈下予測値の経時変化を示しておく。森山町 (Fig. 17 参照) では、農業用水のみの揚水であり、その揚水強度は大 (Fig. 2参照) なので、揚水抑制が効果的であ



(a) 100% pumping



(b) 80% pumping



(c) 60% pumping

Fig. 16 Plane Profile of Predicted Subsidence
Evaluated All Factors (duration Apr. 1986
to Mar. 1995)

るが、諫早地区は Fig. 18 にみられるように、森山町に比べ揚水強度が小さく (Fig. 2 参照)、年間を通じて取水する工業用水の占める割合が大きいため、揚水抑制の効果は森山町ほど効果が上がらないのが判明した。

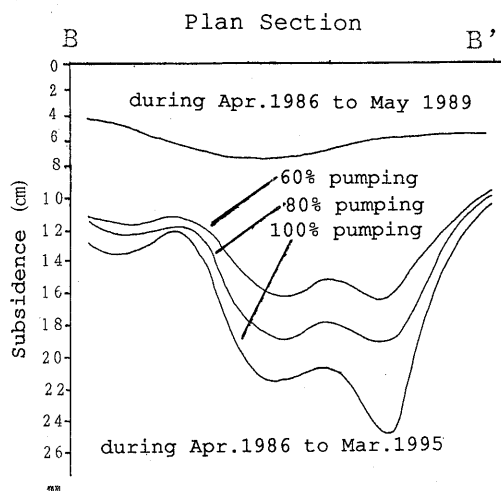


Fig. 17 Longitudinal Profile of Predicted Land Subsidence Evaluated All Factors

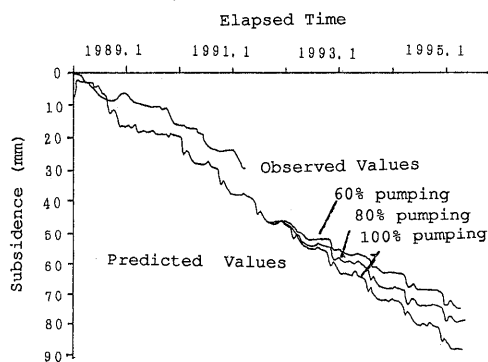


Fig. 18 Predicted Time-Settlement Curves at Observed Well B

7. 結論

今回の解析により、課題であった海測に緩く沈下している実測コンターの傾向は、地盤沈下の要因を地下水変動による沈下に加え、潮汐振動の及ぼす地下水位振幅による繰返し圧密、沿岸の堤体重量による静的圧密沈下とすることでほぼ解決したといえる。内陸部の実測コンターと計算コンターの違いが多少みられるが、土質定数や土層構成など地盤情報が乏しくパラメーターの同定が容易でなく、実測と比較できる小野地区

について考えると、この程度の差はいたしかたないと思われる。

今後この地域 (特に諫早地区) では、工業用の揚水量の増大が予想されるので、地盤沈下も一層激しくなるものと懸念される。よってより多くの地盤情報や地下水位の実測データを収集することにより、一層精度の高い地下水変動解析、また繰返し圧密効果の解析を行い、地盤沈下の将来予測の精度を上げていく必要がある。さらには沈下量抑制のために適正揚水量の把握に努める所存である。

謝辞

本研究は、平成元年度、2年度にわたり、長崎県の受託研究費の補助を得て行った。大柳孝史 (現西部建設㈱)、岡部義雄 (現鉄建建設㈱)、田中真治 (現飛鳥建設㈱)、村川康孝 (現日本国土開発㈱) 各君には、卒業研究として調査、解析に協力頂いた。

本研究にあたり、長崎県保健環境部公害規制課、諫早市環境保全課の方々には貴重な資料を提供いただいた。また、岡山大学工学部西垣誠助教授、国立環境研陶野郁雄氏からはプログラムの提供と御教示を賜った。ここに記して深謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 地質調査書; 水理地質図 (長崎県諫早・北高地区), 1978
- 2) 佐藤邦明・関陽太郎・坪井澄雄・藤崎克博; 埼玉県平野部における適正地下水揚水量の検討, 土と基礎, Vol. 34, No. 11, 1986
- 3) 河野伊一郎・西垣 誠; 有限要素法による広域地下水の準三次元浸透解析 (その手法とプログラム解説), 1980
- 4) 村川康孝・田中真治・棚橋由彦・後藤恵之輔; 諫早干拓地の揚水による地下水変動解析と広域地盤沈下予測, 平成元年度土木学会西部支部研究発表会講演概要, P. 456-457, 1990
- 5) 古本勝弘・武政剛弘・薦田広章・一ノ瀬和雄・藤川佳彦; 潮汐の影響を受ける被圧地下水の水頭観測とその解析, 長崎大学工学部研究報告, 第14巻, 23号, 1982
- 6) 平尾和年・安原一哉; 繰返し荷重を受ける過圧密粘土の圧密特性, 土木学会第39回年講III-98, 1984