準三次元モデルによる新潟県六日町の地盤沈下予測*

谷中隆明**・前川統一郎***・永野多美雄**

An Estimation of the Amount of Land Subsidence at Muika-machi in Niigata Prefecture by a Quasi Three-dimensional Model*

Takaaki YANAKA**・Toichiro MAEKAWA***・Tamio NAGANO**

ABSTRACT

The land subsidence at Muika-machi and its outskirts was analyzed by a quasi three-dimensional model using finite element method. Parameters were decided by geological data, hydraulic data, pumping volume of groundwater, etc. These data were investigated at the site in detail. Calculated values of hydraulic head and the amount of land subsidence were in good agreement with measured values. An estimation of future subsidence by this model showed that the zone of the large amount of land subsidence will spread over the whole town. This distribution is quite unlike the conventional pattern which showed that maximum subsidence was located in the northern extremity of this town. This change is caused by the latest increase in wells at the center of this town.

1. はじめに

20世紀初期以来日本で生じた著しい地盤沈下は、主に工業用水、農業用水、水道用水あるいは水溶性天然ガス採取のための地下水の過剰揚水によるものであった（例えば環境庁水質保全局企画課、1978）。様々な対策の結果、これらの多くの地域では、1970年代ころから地盤沈下は鎮静化の傾向をたどってい

る。しかし、1960年代から本州の日本海側に位置する豪雪地域では、地下水を散水して融雪するいわゆる消雪パイプが急速に普及し、最近では、豪雪の冬期に一部の都市で著しい地盤沈下を生じるようになってきた。新潟県六日町盆地の中心に位置する六日町もその中の1つである。当町では、1975年に水準測量を開始して以来、1988年現在で累計沈下量の最大値は383mmを記録している（新潟県環境保健部公害対策課、1988）。また、1983年9月から1年間には、当地域でのこれまでの最高値92mmの沈下量を記録した（新潟県生活環境部公害規制課、1985）。これは、環境庁が昭和59年度に集計した全国の年間地盤沈下量のうち新潟県上越市の値に次いで第2位

* 日本地下水学会昭和63年度秋季講演会で発表（1988.10）

** 新潟県衛生公害研究所 Niigata Prefectural Research Laboratory for Health and Environment

*** 国際航業株式会社 Kokusai Kogyo Co. Ltd.

の記録であった。六日町では、市街地の北部及び西部で建物に数十センチメートルの抜け上がりや、著しいひび割れ等を生じている。しかし、この地域の地盤沈下解析は、岩田ら（1986）が、ボーリング調査による採取試料の土質試験をもとに、鉛直1次元モデルを用いて1年を1パルスとする繰り返し圧密による地層収縮量の予測計算を1地点について実施しているのみである。そこで、筆者らは、六日町及びその周辺地区について現地調査による地質・水理データ、揚水量データ等をもとに準三次元モデルによる地盤沈下予測計算を広範囲に実施し、当地区における今後の地盤沈下量分布について新たな知見を得たので報告する。なお、計算モデルの作成は、前報（谷中ほか、1989. 以下、前報という）で示した当地域の諸調査報告及び地下水流動状況に関する定性的な知見に基づいておこなった。

2. 計算モデル

2.1 計算対象地区

地盤沈下予測計算を行う地区の範囲は、地盤沈下が顕著に認められる地区（図-1参照）及びその地区の地下水流動の影響範囲（前報図-10、図-11参照）等を考慮して、図-2のように定めた。

2.2 帯水層と加圧層の区分モデル

加圧層の3次元分布については、前報で既に示した。計算対象地区内で揚水の対象となっている帯水層は、軟弱地層の分布地区では主にBG1層、その他の地区ではBG1層に連続する不圧帯水層である。BG2層からの揚水は、わずか2本の井戸があるのみで、無視し得る。AG層からの揚水もわずかにあるが、この帯水層については水頭、透水係数等の水理データが得られていない。そこで、BG1層上部のAC1、AG、AC2の各層をまとめて1つの加圧層とした。また、帯水層はBG1層1層とし、BG1層下部は不透水層とした。以上の地層モデルの模式図を図-3に示す。

2.3 計算式

前報で示したように、六日町では降雪期に帯水層の水頭低下が著しいため、地下水流動を計算するにあたり、帯水層に沿った流ればかりでなく上部の加圧層を通じた漏水も考慮しなければならない。そこ

図-1 地盤沈下量分布(単位: mm)

1980年9月から1985年9月

Fig. 1 The distribution of the amount of land subsidence (unit: mm)

(from September, 1980 to September, 1985)

で、帯水層の地下水流動方程式として漏水を考慮した準三次元モデル式(Bredehoeft & Pinder, 1970; Shibasaki et al., 1971; 鎌田ほか、1973)を用いることにした。すなわち、

$$S\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = T\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) - Q - \frac{k'}{b'}(h-H) \quad (1)$$

ここで、S: 帯水層の貯留係数、h: 帯水量の水頭、t: 時間、T: 帯水層の透水量係数、x, y: 水平方向の位置座標、Q: 揚水量及び地表からのかん養量、k': 加圧層の透水係数、b': 加圧層の厚さ、H: 不圧帯水層の水位とした。なお、前報によれば加圧層からの絞り出し量は、当地域の地下水流動量に占める割合が非常に小さいことから、計算上無視した。加圧層における水平方向の地下水流動は、鉛直方向に比べて一般に非常に小さいことから、加圧層の地下水流動方程式としてテルツァギーの圧密理論に基づく鉛直1次元モデル式を用いた。すなわち、

$$\frac{\partial h'}{\partial t} = \frac{k'}{Ss'}\left(\frac{\partial^2 h'}{\partial z^2}\right) \quad (2)$$

ここで、h': 加圧層の間隙水圧 Ss': 加圧層の比貯留率、z: 鉛直方向の位置座標とした。

図-2 境界条件及び定水頭節点

— 透水境界 — 不透水境界
● 定水頭節点 数値：水頭（標高 m）

Fig. 2 Boundary condition and points of constant hydraulic head — permeable boundary line — impermeable boundary line hydraulic head value : hydraulic head (altitude:m)

以上の式を用いて未知数を求めるための計算手法として、有限要素法を用いた。なお、水平方向の要素分割は、長方形メッシュ（東西約278m、南北約232m）を用いた。また、鉛直方向の要素分割は等間隔で12とした。いずれの計算も、計算時間のステップは1カ月とした。

加圧層の圧密度は、次式からもとめた。

$$s = \sum \Delta h_i' \cdot \Delta m_i' \cdot Ss' \quad (3)$$

ここで、 s ：圧密度、 $\Delta h_i'$ ：間隙水圧変化量、 $\Delta m_i'$ ：層厚とした。

3. 境界条件及び初期条件

3.1 境界条件

帯水層の水頭を計算するための境界条件を、図-2のように定めた。すなわち、東西の山地に沿った境界は、低地に比べて地下水の流動が一般に非常に小さいことから不透水層とした。また、北部の境界は、前報に示したように等水頭線と直交することから、不透水層とした。扇状地の扇頂部、登川、高棚川、岩井沢川等の支流河川及び計算領域の南端及び北端に位置する魚野川沿いでは、降雪期及び非降雪期ともに地下水の水頭がほとんど変動しないことから、近傍の節点を定水頭とした。定水頭節点と各点に与えた水頭標高を図-2に示す。

加圧層を通じての漏水量を算定するためには、加圧層上部の不圧水位が必要である。しかし当地区では、不圧水位の実測値が得られていない。そこで、当地区の場合、不圧水位は被圧水頭に比べて年間の

図-3 地層及び地下水モデルの概念図

Fig. 3 Outline of layers and a model of groundwater

変動が小さいと考えられること、また加圧層の連続性は実際には完全ではないと予想されることから、不圧水位として非降雪期のBG1層の水頭（前報図-10参照）を用いた。

加圧層の間隙水圧を計算するための境界条件のうち、加圧層上部の境界は前述の不圧水位（定常値）を用い、加圧層下部の境界は(1)式で得られた被圧帯水層の水頭の計算値を用いた。

3.2 初期条件

計算開始年月は、揚水量等のデータが得られた1980年4月とした。計算対象地区の帯水層の水頭は、降雪期には10m前後の低下を示すが、非降雪期には毎年ほとんど同じ水頭に回復する。そこで、計算開始時における帯水層の水頭の地域分布として、一斉測水調査における非降雪期の測定値を用いた。また、加圧層の間隙水圧計算を行うにあたり、6年間のならし計算を行い、その結果から得られた水圧分布を1980年4月の加圧層内の初期間隙水圧とした。

4. 固定パラメータ

4.1 帯水層及び加圧層の層厚

被圧帯水層の層厚は、前報図-4に示したBG1層の層厚分布図によった。また、BG1層に連続する不圧帯水層については、BG1層の最大層厚の60mを代入した。加圧層の層厚は、地質柱状図及び電気検層図から判定したAC1層及びAC2層の層厚の合計とした。加圧層の層厚分布を図-4に示す。破線は、加圧層の分布範囲の境界を示す。加圧層の分布範囲と六日町市街地の範囲はほぼ一致し、市街地中心部は上越線と魚野川左岸の間に位置する。加圧層は、市街地の西部で厚くなる。

4.2 揚水量及び地表からの地下水かん養量

揚水量データは、アンケート調査による集計値をもとに1980年4月から1986年3月までのBG1層についての算定値を用いた（前報参照）。

地表からの地下水かん養源としては、降雨、融雪水及び水田等の灌がい水がある。融雪水量は、気温上昇に伴う融雪及び積雪上への降雨による融雪を考慮して、日降水量及び気温のデータをもとに計算した。降雨、融雪水及び灌がい水による地下水かん養量は、角屋ら（1967）による補給能モデルによって

図-4 加圧層の層厚分布（単位：m）

—— 加圧層の分布境界

Fig. 4 Distribution of the thickness of confining layers (unit:m)—— outline of confining layers

計算した。なお、加圧層が分布する地区では、地表からの地下水かん養は無いものとした。補給モデルで地下水かん養量を計算するには、上限補給能(f_u)、下限補給能(f_c)、圃場含水量(W_c)、飽和含水量(W_s)及び初期含水量(W_o)が必要である。しかし、当地域ではこれらの諸量を実測していないので、関東北部における値（環境庁水質保全局企画課、1984） $f_u=0.80\text{mm/hr}$ 、 $f_c=0.30\text{mm/hr}$ 、 $W_c=25\text{mm}$ 、 $W_s=60\text{mm}$ 、 $W_o=25\text{mm}$ を用いた。なお、調査対象地区では、平地に占める水田の割合は約37%である。そこで、調査地域の各メッシュ毎に水田が37%分布するものとして、この地区では、灌がい期（4～8月）に土壌の含水量が常に圃場含水量に保たれるとした。また、地表からの可能蒸発散量は、Thorntwaite法（例えば山本、1983, pp.297-298）によって求めた。

降雨、融雪水及び灌がい水として地表に供給された水を前述の計算方法に基づいて地下水かん養量、直接流出量、蒸発散量に分け、1980年4月から1986年3月までの6年分について毎月の値を求めた。そ

の結果、年間の地下水かん養量は6年間の平均で約560mmであった。この値は、年間降水量の6年間の平均値2797mmの20%に相当する。また、年間のかん養量を1日平均値に換算すると1.6mmであり、この値は、金子(1973)による新潟平野各地域の地下水水収支の値と同程度である。地下水かん養量は、融雪水と灌がい水の両面からの供給により、毎年4月前後に最大値に達する。融雪期(3, 4, 5月)の地下水かん養量は、年間値の50%に達する。一方、地下水の需要が飛躍的に増大する厳冬期(1, 2月)の地下水かん養量は、年間の地下水かん養量の4%に満たない。

5. 内挿検定による諸パラメータの決定

5.1 帯水層の水頭分布計算のための内挿検定

帯水層の透水係数は、BG1層の透水係数分布図(前報図-5参照)から読み取った値を暫定値とした。内挿検定の結果、帯水層の透水係数の最終的な値は、暫定値に対し最大で5倍の修正値に留まった。加圧層の透水係数は、 $5 \times 10^{-2} \text{m/day}$ ($5.8 \times 10^{-7} \text{m/s}$)として一律に与えた。これはシルト並の値であり、粘土の一般的な値の約1,000倍に相当する非常に大きな値である(Freeze & Cherry, 1979)。貯留係数は被圧帯水層の場合、比貯留率と層厚の積として与えられる。比貯留率は、 $5 \times 10^{-4} 1/\text{m}$ を一律に与えた。この値は、砂層の一般的な値に比べて、10倍から数十倍大きな値である(Domenico & Mifflin, 1965)。不圧帯水層の貯留係数は、地層の有効間隙率に等しい。有効間隙率としては、砂れきの一般的な値0.16を一律に与えた(山本, 1983, 13p.)。

以上の諸パラメータ及び4で述べた固定パラメータを用いて、1980年4月から1986年3月までの6年間について、帯水層の水頭の計算値と実測値を比較した結果を図-5及び図-6に示す。実測値は、前報の図-10及び図-11に示した一斉測水による値である。水頭の地域分布について、計算値と実測値は概ね良く一致している。また、図-7に、市街地中央部にある六日町1号井(六日町役場前)の実測値と計算値の時系列変化の比較を示す。他に、調査地域内の3井についても実測値と計算値の比較を行ったが、六日町1号井同様、両者は非常によく一致した。これらの結果から、帯水層の地下水流動に関する当計算のモデルは、ほぼ妥当と考えられる。

図-5 計算水頭と実測水頭の分布比較(1985年11月)
—— 計算値 ---- 実測値

Fig. 5 Comparison of distributions between calculated hydraulic head and measured hydraulic head (November, 1985)

—— calculated ---- measured

図-6 計算水頭と実測水頭の分布比較(1986年1月)
—— 計算値 ---- 実測値

Fig. 6 Comparison of distributions between calculated hydraulic head and measured hydraulic head (November, 1986)

—— calculated ---- measured

図-7 観測井水位についての計算値と実測値の比較

●—● 計算値 ○—○ 実測値

Fig. 7 Comparison of water level in a observation well between calculated value and measured value

●—● calculated ○—○ measured

なお、上記のモデルでは、加圧層の透水係数として非常に大きな値が与えられている。しかし、次項に示すように、加圧層の収縮量計算の際には、加圧層の透水係数として粘土層の一般的な値を与えて内挿検定で良好な結果を得ている。このことは、加圧層に透水性の大きな部分があることを示唆する。その例として、前報でも述べたように、AC2層の不連続部分、あるいはAC2層を貫通している約2,000本の井戸と地層との間隙等が考えられる。

5.2 加圧層の収縮量計算のための内挿検定

加圧層にかかる有効応力が圧密降伏応力以上のとき、加圧層の透水係数及び比貯留率を、それぞれ Freeze & Cherry (1979) 及び Domenico & Mifflin (1965) による粘土層の値の範囲内で設定した。また、市街地中央部にある観測井の地層収縮量記録によれば、BG1層の水頭が上昇するときBG1層上部の加圧層にわずかながら膨張が認められることから、加圧層にかかる有効応力が圧密降伏応力以下のとき、比貯留率を前者の1/10とした。各水準点における年間地盤沈下量実測値とその地点における加圧層の年間収縮量の計算値の比較結果の一部を、図-8に示す。両者は非常に良く一致している。また、同じく

計算を行った他の8地点の水準点についても、実測値と計算値は、図-8と同様に非常に良く一致した。近年、最も地盤沈下が著しかった1984年の揚水実績に基づく年間地盤沈下量の計算値を、図-9に示す。最大沈下地点は、市街地の北端に位置する。

6. 地盤沈下量分布の予測

6.1 揚水量の設定条件

降雪期における六日町の地下水揚水量は、大部分が消雪用であるため、揚水量は降雪量によって大きく左右される。そこで、消雪用以外の用途の揚水量は1986年の値を用い、消雪用のみを降雪の条件に応じて変化させた。

前報で示したように、筆者らは消雪用地下水の揚水量を

$$\text{揚水能力 (m}^3/\text{hr)} \times \text{揚水ポンプ稼働係数 (hr/cm)} \\ \times \text{日降雪量の月間累計値 (cm)}$$

から求めている。そこで、揚水能力は1986年3月現在のものを用い、降雪量のデータは①1980年から1986年までの平均値(累計1,432cm)②近年最大の豪雪であった1983年12月から1984年にかけてのもの(累計1,910cm)を用いて、2通りの消雪用地下水

図-8 各水準点の地盤沈下量についての計算値と実測値の比較

基準：1980年9月 ——— 計算値 ——— 実測値
点A, B, C, D, E, の位置は図1に示す。

Fig. 8 Comparison of the amount of land subsidence at each bench-mark between calculated value and measured value

starting point : November, 1980

—— calculated ——— measured

Locations of A, B, C, D and E are shown in Fig. 1

揚水量の設定値とした。

6.2 予測計算結果

前項で示した揚水量の条件①及び②の場合の計算結果を、それぞれ図-10及び図-11に示す。図-9の地盤沈下量分布のパターンと比較すると、いずれも沈下量が最大である地点が南下し、さらに広域化している。特に、揚水条件②の場合は、地盤沈下量70mmを超える地区が市街地のほぼ全域に及ぶことを示している。このような結果が得られた理由としては、1984年の豪雪以降、六日町の市街地中央部で井戸の新設が相次ぎ、揚水能力が年間で約30%増加した一方、従来、最大沈下量を示していた地点は、3%の増加に留まったことがあげられる。したがって、今後節水等により揚水量の抑制を図らなければ、豪雪の年には現在よりも広域で大きな地盤沈下を生じる恐れがある。特に、市街地の西部は、軟弱な加圧層が最も厚く、しかも水田から宅地へと移り変わり始めたばかりで、圧密が進んでいないと予想されることから、今後の推移が注目される。

図-9 実揚水量による年間地盤沈下量計算値
1983年9月から1984年9月 ; mm

Fig. 9 The amount of land subsidence in a year which is calculated from practical pumping volume from November, 1983 to November, 1984 ; mm

7. おわりに

- 以上の解析によって、次のことが明らかになった。
- (1)六日町及びその周辺地区について現地調査による地質・水理データ、揚水量データ等をもとに、準三次元モデルを用いて、有限要素法による地盤沈下シミュレーションを行った。帯水層の水頭及び地盤沈下量の分布について、計算値は実測値と良く一致したことから、モデル及び諸パラメータの設定は適切であったと考えられる。
 - (2)当モデルを用いて、今後の地盤沈下量分布を予測したところ、地盤沈下量分布のパターンは、従来市街地の北端に最大値があったものと大きく異なり、地盤沈下量の大きい地域が市街地中央部全体に広がる結果が得られた。そのため、今後、揚水量を抑制する対策を講じなければ、従来と同じ降雪量でも従来よりも大きな地盤沈下を生じることが予想される。
 - (3)市街地の西部は、次第に宅地化されているが、

図-10 地盤沈下量予測(Ⅰ)
揚水能力：1985年4月から1986年3月
降雪量：1980年から1986年までの平均値

Fig. 10 Estimation of the amount of land subsidence (1)
rate of pumping volume : from April, 1985 to
March, 1986 snow fall : average of 1980 to 1986
snow fall : average of 1980 to 1986

圧密が進んでいないと予想される軟弱な加圧層が最も厚く分布することから、今後の推移が注目される。

謝 辭

当解析を進めるにあたり、解析の機会を与えていただいた新潟県環境保健部公害対策課長をはじめ担当者の方々、ご指導をいただいた新潟県衛生公害研究所大山征也環境科学科長、国立公害研究所水質土壌環境部陶野郁雄博士、新潟大学積雪地域災害研究センター青木 滋教授に感謝します。

参考文献

- 岩田 敏・陶野郁雄・桑田文夫(1986):新潟県六日町に
おける消雪用揚水に伴う地盤沈下とその解析、土と基礎、
34-11, 73~78.

図-11 地盤沈下量予測(Ⅱ)
揚水能力：1985年4月から1986年3月
降雪量：1983年12月から1984年3月

Fig. 11 Estimation of the amount of land subsidence (2)
rate of pumping volume : from April, 1985 to
March, 1986
snow fall : December, 1983 to March, 1984

- 角屋 睦・豊国永次・丈達俊夫（1967）：山地小流域河川の低水位解析(2)、京大防災研年報、10-B、147～154。
- 金子 良（1973）：「水文学講座12・農業水文学」共立出版、202～212。
- 鎌田 烈・村上雅博・原田和彦（1973）：準三次元帯水層モデルによる地盤沈下の解析、地球科学、27-4、131～140。
- 環境庁水質保全企画課（1978）：「公害と防止対策 地下水と地盤沈下対策」、白亜書房、8～46。
- 環境庁水質保全企画課（1984）：「昭和58年度 関東平野北部地域地盤沈下広域対策調査報告書」、132p。
- 新潟県生活環境部公害規制課（1985）：「南魚沼地区の地盤沈下(9)」、16p。
- 新潟県環境保健部公害対策課（1988）：「南魚沼地区の地盤沈下(12)」、20p。
- 谷中隆明・永野多美雄・山崎興樹・水谷宣明（1989）：新潟県六日町盆地の地下水流動、地下水学会誌 31-3、

143~153.

山本莊毅 (1983) : 「新版地下水調査法」、古今書院, 13p., 297~298.

Bredehoeft, J.D. and G.F.Pinder (1970) : Digital Analysis of Areal Flow in Multiaquifer Groundwater Systems — a Quasi Three-dimensional Model —. *Water Resources Research*, 6-3, 883~888.

Domenco, P.A. and M.D.Mifflin (1965) : Water from Low-permeability Sediments and Land Subsidence. *Water Resources Research*, 1-4, 563~576.

Freeze, R.A. and J.A. Cherry (1979) : Groundwater. Prentice-Hall New Jersey, 29p.

Shibasaki, T., A. Kamata and M. Wada (1971) : Application of the Water Balance Simulation for Predicting Land Subsidence — a Digital Computer Approach —. *IAH Memories*, 9, 1~97.

(受付: 1989年3月1日、受理: 1989年5月29日)

和 文 要 約

六日町及びその周辺地区について、準三次元モデルを用いて有限要素法による地盤沈下解析を行った。パラメータは、現地での詳細な調査による地質・水理データ、揚水量データ等をもとに決定された。帯水量の水頭及び地盤沈下量の分布について、計算値は実測値と良く一致した。当モデルを用いて今後の地盤沈下量分布を予測したところ、地盤沈下量分布のパターンは、地盤沈下量の大きい地域が市街地中央部全体に広がる結果が得られた。この分布は、従来市街地の北端に最大値があったものと大きく異なる。この変化は、最近の市街地中央部での井戸の増加に起因している。