

第Ⅲ部門

地下水位変動に伴う経年的地盤沈下メカニズムの推定

神戸大学 ○ 学生員 籠橋 慶太
 神戸大学 学生員 島本恵梨子
 神戸大学 正会員 飯塚敦, 河井克之

1. はじめに

積雪が多い地方では消雪を目的とした地下水の利用が行われている。そのため、冬期に地下水位が低下し、その後、地下水位が回復するという地下水位変動が生じる。この地下水位変動に伴って経年的な地盤沈下が生じている。このような経年的に地盤沈下が継続する現象を通常の圧密沈下計算で説明することは容易ではない。本研究では、豊岡盆地の事例を取り上げ、地下水位変動に伴う地盤沈下のメカニズムを考察する。

2. 地盤沈下メカニズムの要因

豊岡盆地の2地点（豊岡と新田：図-1）における地盤沈下とそのときの地下水位変動の様子を図-2に示す。17年間で、豊岡では約14cm、新田では約24cm累積沈下量が観測された。通常の圧密沈下解析の結果の一例が図-3である¹⁾。1965年に地下水揚水が始まったと考えられているが、1991年まで地下水変動が観察されていないので、その期間の地下水位変動を図中に示すように仮定している。地下水位変動の計測開始以前に約32.8~34.9m深の帯水層が過度に被圧していると考えない限り、このような地下水位変動分布の仮定の差異にかかわらず地盤沈下の経年的継続をうまく説明することはできない。通常の圧密解析では考慮されていない何か別の要因が影響していると予想される。

そこで、1998年と2007年、1991年と2004年の時期の異なるボーリングによる土質調査データを調べ、比較してみた。図-4に豊岡と新田の2地点における過圧密比OCRの深度分布、沈下粘土層の $e\text{-log}p$ 関係を示す。必ずしも同一の粘土層における土質調査データの比較が行われているわけではない上に、ばらつきも大きい。総じて、以下のようなことが言えよう。1) 時間経過に伴って、過圧密比OCRの上昇が見られる。特に、豊岡地点で顕著である。これは、地下水位変動

という荷重・除荷の繰返しに伴って、粘土層の先行圧密圧力が增大していることを意味し、粘土層の塑性降伏が進行しているものと解釈できる（「繰返し塑性」と呼ぶ）。2) 時間経過を経て、ほぼ同一の粘土層と考えられる $e\text{-log}p$ 関係の正規降伏曲線が下方に移動している。特に、新田地点で顕著である。これは、地下水位変動という荷重・除荷の繰返しに伴って、粘土層の間隙構造が崩れていっていると推察され、構造破壊による圧縮軟化が生じていると推察される（「構造破壊」と呼ぶ）。

上記の繰返し塑性と構造破壊が、長期にわたる地下水位変動によって生じているのではないかと予想されるが、その度合いは、同じ豊岡盆地内であっても、円山川をはさんで右岸（新田）と左岸（豊岡）で異なるようである。増田による地質学的層相解析によると¹⁾、円山川左岸側では、古来、円山川の氾濫、堆積の繰返しに見舞われた痕跡が多いが、対岸の右岸側では、その影響が小さく、長期にわたる沈降による堆積が卓越しているとされている。沈降堆積が卓越すると、その粘土層はより嵩高い構造となるであろう。このことは、新田地点において、地下水位変動に伴って構造破壊が卓越しているとの推定と整合する。

以上より、地下水位変動に伴う継続的な地盤沈下の発生は、揚水開始初期における帯水層の被圧の他に、粘土層における繰返し塑性の累積と構造破壊の進行によるものと推定される。弾塑性理論によれば、繰返し塑性は下負荷面、構造破壊の進行は上負荷面を導入することによって考慮することができよう。

3. 一次元弾塑性沈下解析

浅岡らによる上負荷面（正規降伏面との相似比 R^* ）²⁾と橋口らによる下負荷面（上負荷面との相似比 R ）³⁾を考える。それぞれの発展則は以下の様に表わされる。

$$\dot{R}^* = \frac{a}{D} (R^*)^b (1-R^*)^c \|\dot{\epsilon}^p\| \quad (1)$$

$$\dot{R} = -\frac{m}{D} \ln R \|\dot{\epsilon}^p\| \quad (2)$$

ここに a, b, c は収縮速度を制御するパラメータ, m は下負荷面の膨張速度を制御するパラメータ, D はダイレイタンス係数, $\dot{\epsilon}^p$ は塑性ひずみ速度テンソルである. 上負荷面の発展則のパラメータ a, b, c と下負荷面の発展則のパラメータ m をフィッティングパラメータとして解析を行う. なお正規降伏面には関口・太田モデル⁴⁾を用いる. 豊岡と新田の両地点のボーリングデータから, 表層から帯水砂層までの地層を一次元有限要素モデルで表し, 地表の水位を一定に保ったまま, 帯水層の水位を計測された地下水変動に伴って変化させる計算を行った. 計算の詳細は別報に譲るが⁵⁾, 最終的な結果を示すと図-5となる. 地下水変動が顕著となる2005年11月から2007年10月までの期間の結果である. 下負荷面を導入することによって繰返し塑性の累積を考慮すると, 地下水変動に伴う地盤の沈下と回復の様子をうまく説明することができる. しかしその後の継続沈下は説明できない. 上負荷面を導入することによって構造破壊の進行を考慮すると, 構造破壊の進行が卓越していると考えられる新田地点では, その後の継続沈下もうまく説明できるが, 豊岡地点での継続沈下はうまく未だ説明できない. 豊岡地点では帯水層の初期の被圧が影響しているのかもしれないが, 揚水開始以前にどれほど被圧していたのか, データがないために推察の域を出ない.

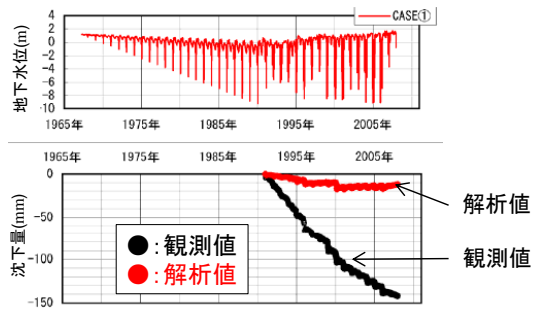


図-3 一次元 FEM 圧密沈下解析結果

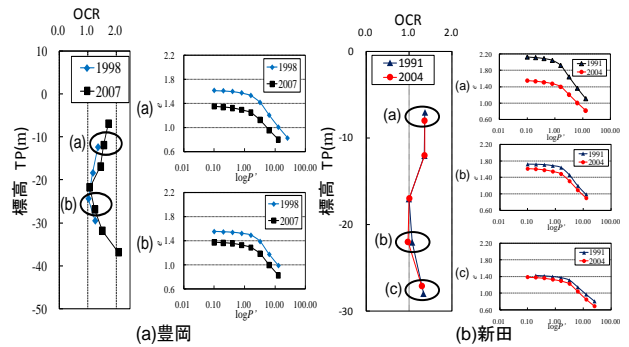


図-4 過圧密比 OCR 分布と沈下粘土層の e - $\log p$ 関係

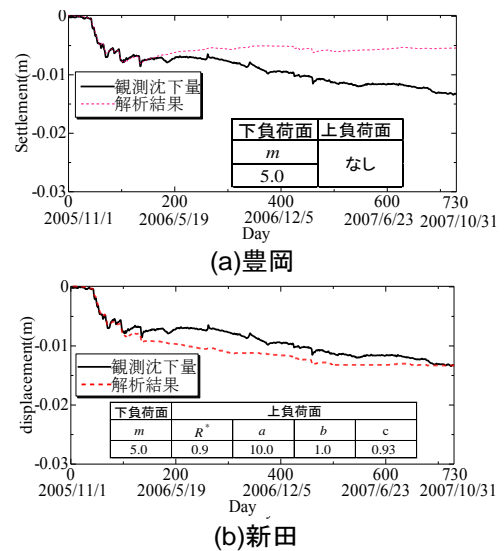


図-5 解析結果



図-1 豊岡盆地の地図

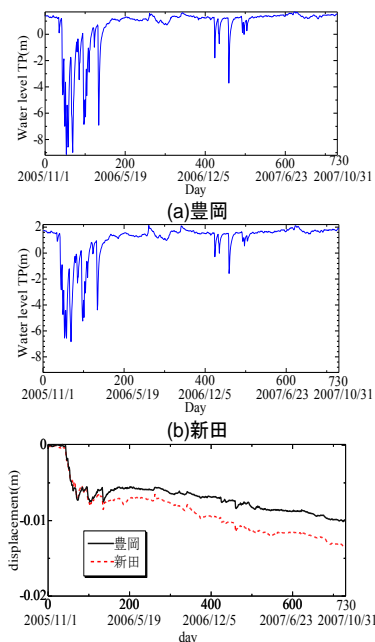


図-2 観測地下水位, 沈下量

参考文献

- 1) 兵庫県, 「豊岡地盤沈下対策検討委員会」, 2009
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, No.40, Vol.2, pp.99-110, 2000
- 3) 橋口公一, 弾塑性論の新体系-下負荷面の概念, 2007
- 4) Sekiguch, H., Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clay, 9th ICSMFE, Tokyo, Proc. specialty session 9, pp.229~238, 1977
- 5) 島本恵梨子, 地下水位変動に伴う地盤挙動の解釈, 第45回地盤工学研究発表会, 2010