

地下水位回復に伴う地盤隆起を対象とした非線形有限要素解析

徳島大学 学生会員 ○松井雄揮, 徳島大学大学院 学生会員 日下拓也
 徳島大学大学院 正会員 渦岡良介, 徳島大学大学院 正会員 鈴木 壽

1. はじめに

近年, 地下水位回復が原因と考えられる地盤隆起現象が報告されており, 地盤隆起が鉄道や上下水道網等の地中施設や構造物の基礎工の安定性および安全性に与える影響が懸念される。そのため, 地盤隆起のメカニズムの解明および予測手法の開発が必要となっている。地盤隆起メカニズムの解明のために行われた遠心模型実験¹⁾では, 地下水位低下時の定常状態において, 深度方向に間隙水圧が非線形に分布することが報告されている。これは, 地盤の深度方向の透水係数の変化が原因であると考えられる。そこで, 本研究では透水係数の変化率が異なる3つのケースに対し, 一次元非線形有限要素解析を実施し, その挙動を調べたので, その結果を報告する。

2. 解析手法

本解析は, 渦岡ら²⁾が開発した弾塑性圧密解析プログラムに, 新たに間隙水圧依存型の透水係数の変化を考慮した。式(1), (2)に有限要素法に用いた支配方程式³⁾を, 式(3)~(9)に地盤の弾塑性モデル²⁾を示す。

$$\text{釣合い式} \quad G^s = \int_0^H \frac{\partial \delta u}{\partial z} (\sigma' - p^w) dz - \int_0^H \delta u p b dz - [\delta u \bar{t}]_{z_t} = 0 \quad (1)$$

$$\text{連続式} \quad G^w = \int_0^H \frac{\partial p^w}{\partial z} \frac{k}{\gamma^w} \left(-\frac{\partial p^w}{\partial z} + \rho^w b \right) dz - \int_0^H \delta p^w \varepsilon dz - [\delta p^w \bar{q}]_{z_q} = 0 \quad (2)$$

弾塑性モデルの構成内容

$$\text{弾性構成式} \quad \sigma = \sigma_0 \exp \left[-\frac{1+e_0}{k} \varepsilon^e \right] \quad (3) \quad \text{塑性硬化則} \quad \sigma_c = \sigma_{c0} \exp \left[-\frac{1+e_0}{\lambda-k} \varepsilon^p \right] \quad (4)$$

$$\text{降伏関数} \quad f(\sigma, \sigma_c) = \sigma_c - \sigma \leq 0 \quad (5) \quad \text{負荷・除荷条件} \quad d\gamma \geq 0, f(\sigma, \sigma_c) \leq 0, d\gamma \cdot f(\sigma, \sigma_c) \quad (6)$$

$$\text{ひずみの加算分解} \quad \varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (7) \quad \text{塑性適合条件} \quad d\gamma \cdot df(\sigma, \sigma_c) = 0 \quad (f(\sigma, \sigma_c) = 0) \quad (8)$$

$$\text{塑性流れ則} \quad d\varepsilon^p = d\gamma \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (9)$$

多段階載荷・除荷圧密試験より求めた間隙比 e に依存した透水係数 k の実験式を式(10)に示す。ここで, k_0 は1.0と一定, A_k は $e - \ln k$ 関係における傾き, B_k は $e - \ln k$ 関係における $k=1.0$ 時の間隙比である。

$$\text{実験式} \quad k = k_0 \cdot \exp \left(\frac{e - B_k}{A_k} \right) \quad (10)$$

3. 解析条件

今回用いた地盤モデルおよび解析パラメータは図-1に示す。

解析手順は最初に, 自重解析を行い, その結果を初期値とする。その後, 地盤モデルの底面部分の圧力境界を, 水位低下時には初期の $98(\text{kN}/\text{m}^2)$ から $0(\text{kN}/\text{m}^2)$ に, 水位回復時には $0(\text{kN}/\text{m}^2)$ から $98(\text{kN}/\text{m}^2)$ に変化させる。変化後は, 地盤の変動が安定するまで圧力を一定とした。

その時, 圧力境界の変化は1500秒経過するごとに行い, 圧力は $0.0196(\text{kN}/\text{m}^2)$ ずつ増加または減

地表面: 応力境界, $i = 0(\text{kN}/\text{m}^2)$		地表面: 圧力境界, $\bar{p}^w = 0(\text{kN}/\text{m}^2)$		排水条件: 両面排水
初期間隙比 e_0	2.4771	初期応力 $\sigma_0(\text{kN}/\text{m}^2)$	-0.0207	1.2m × 5要素
初期間隙率 n_0	0.7124	膨潤指数 k	0.016	
土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.758	圧密降伏応力 $\sigma_{c0}(\text{kN}/\text{m}^2)$	-0.027	
間隙水の密度 $\rho_w(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.0	圧縮指数 λ	0.16	
間隙水の単位体積重量 $\gamma_w(\text{kN}/\text{m}^3)$	9.8	単位質量あたりの力 $b(\text{m}/\text{s}^2)$	-9.8	
透水係数 $k(\text{m}/\text{s})$	1.53×10^{-8}	層厚(m)	10	
底面: 変位境界, $\bar{u} = 0(\text{m})$		底面: 圧力境界, $\bar{p}^w = 98(\text{kN}/\text{m}^2)$		0.8m × 5要素

図-1 解析時の入力パラメータ

少させ、計算ステップ 5000 回で圧力変化を完了するようにした。なお、透水係数の変化率は図-2 に示すように、式(10)の A_k 、 B_k を変えることで決定した。今回は Case1 を透水係数の変化が大きいもの、Case2 を変化が小さいもの、Case3 を一定のものとした。また、各ケースの初期値は同じとした。

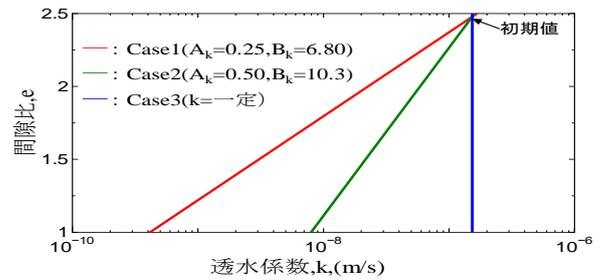


図-2 透水係数のパラメータ

4. 解析結果

図-3(1)~(3)に地下水位回復における間隙水圧等時線を示す。透水係数の変化が一定である Case3 では、圧密完了時に間隙水圧がすべて消散しているのに対し、透水係数が増える Case1、2 では間隙水圧が残量し、深度方向における間隙水圧が非線形分布になることが確認できた。そして、間隙水圧は透水係数の変化率が大きいほど残留する結果となった。また、地下水位回復の最終状態において、水位を低下前まで戻すと、どのケースにおいても以前と同じ間隙水圧となった。図-4(1)~(3)に示す地下水位変動時の時間-沈下関係においては、透水係数の変化率が大きいほど、沈下や隆起の地盤変動量が少なく、地盤変動が安定するまでに必要な時間が長くなる結果となった。

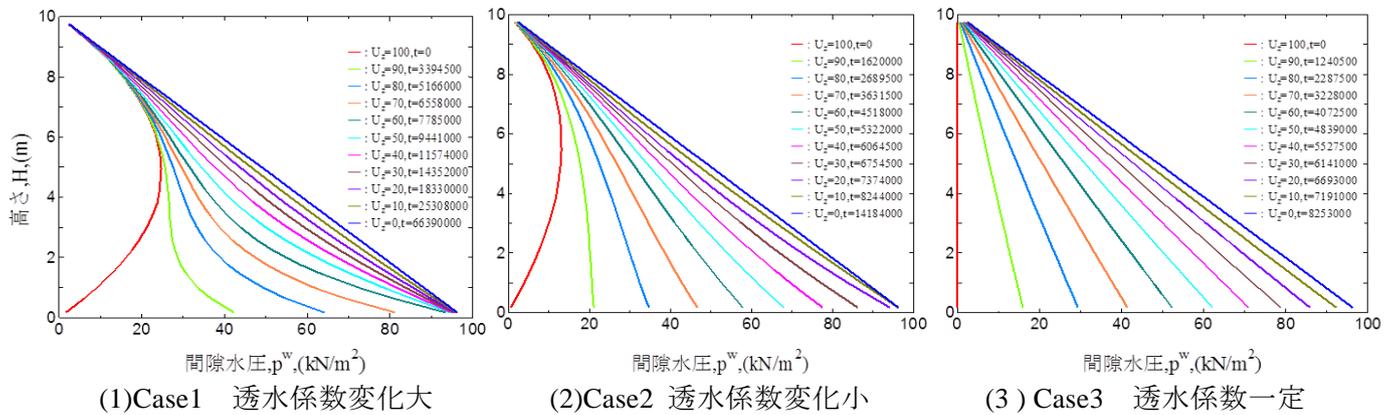


図-3 地下水位回復における間隙水圧等時線

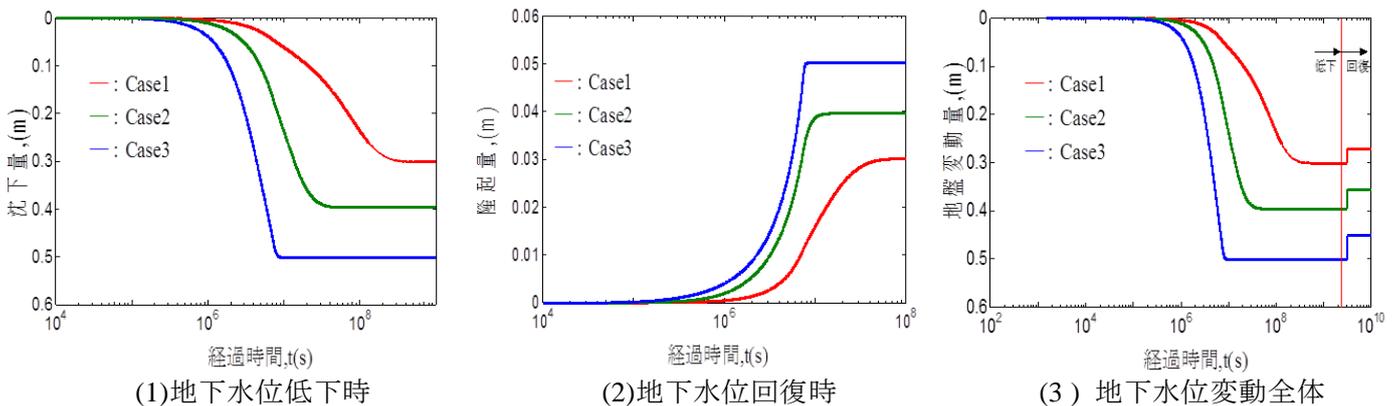


図-4 地下水位変動時の時間-沈下関係

5. まとめ

地盤内の透水係数の変化率の違いによって、間隙水圧の残留量や地盤変動量、地盤変動に要する時間が変化する事がわかった。実地盤において層厚が厚い場合では、深さ方向に透水係数が異なる場合が多い。そのため、実地盤の地盤隆起解析精度を向上させるためには透水係数を考慮する必要があると言える。

参考文献

- 1) 山城大, 地下水位回復に伴う地盤隆起に関する遠心模型実験, 徳島大学, pp.29~30, 2011
- 2) 山川優樹, 宮田喜壽, 渦岡良介, 地盤工学会会誌 vol.58, No.9, 地盤工学会, pp.93~98, 2010
- 3) 山川優樹, 宮田喜壽, 渦岡良介, 地盤工学会会誌 vol.58, No.7, 地盤工学会, pp.54~62, 2010