

地下水位変動を受ける洪積粘土層の繰返し圧密特性を考慮した沈下予測

大阪市立大学大学院 ○学 天満脩平 学 末吉拳一 正 大島昭彦
基礎地盤コンサルタンツ(株) 正 久保田耕司 笹尾憲一

1. まえがき

オープンループ型の帯水層蓄熱利用システム (ATES) では、帯水層に対して 2 本 1 組の井戸 (熱源井) を設置し、夏季に井戸 A から地下水を揚水して冷房に用い、温排熱を地下水に与えて井戸 B に還水する (温蓄熱)、冬季は蓄熱した井戸 B の地下水を揚水して暖房に用い、冷排熱を地下水に与えて井戸 A に還水する (冷蓄熱)、これを繰り返すことで、大幅な CO₂ 削減と省エネルギー及びヒートアイランド対策とすることを想定している。この考えの下、大阪市北区うめきた 2 期地区で熱源井構築の実証実験を行っている¹⁾²⁾。ただし、揚水・還水によって帯水層の地下水位が変動するため、地盤沈下リスクの回避が必要となる。

そこで、昨年度のうめきた 2 期地区³⁾に引き続き、尼崎市築地で洪積粘土 Ma12 層をサンプリングして地下水位変動による荷重を与えた繰返し圧密試験によって沈下予測を行った。ただし、今回は繰返し載荷時間の影響を調べ、実地盤と圧密供試体の圧密時間の相似則 (H^2 則) を考慮した⁴⁾。本稿では、尼崎 Ma12 層の沈下予測結果、及び繰返し載荷時間の影響をうめきた洪積粘土 (Ma12, Ma11, Ma10) 層にも適用して沈下予測を行った結果を報告する。

2. 尼崎 Ma12 層の繰返し載荷時間とひずみの関係

尼崎 Ma12 層 (層厚 17.15m) に対して、まず、繰返し載荷時間 $\Delta t = 12$ 分 (載荷 6 分, 除荷 6 分) の繰返し圧密試験を深度方向に 9 ケース (約 2m 間隔) 実施した。次に、 Δt を 6, 12, 30, 60 分に変えた繰返し圧密試験を 2 シリーズ実施した。各ケースとも有効土被り圧 p_0 の下で、想定した地下水位変動量 $\Delta WL = \pm 2, 4, 6, 8, 10$ m による繰返し荷重 $\Delta p = \pm 19.6, 39.2, 58.9, 78.5, 98.1$ kN/m² を与えて 100 回繰返した。各ケースの試験条件の詳細は文献 4) を参照されたい。

図-1 に繰返し載荷時間 Δt を変えた 2 シリーズの繰返し圧密試験結果から得られた ΔWL 毎の Δt と繰返し回数 $N=100$ 回目におけるひずみ ε_f との関係を示す (文献 4) からデータを一部修正)。各 ΔWL とともに Δt が長くなるほどひずみが大きくなる様子がよく分かる。この関係を ΔWL 毎に一次の回帰線 (図の実線) で近似した。

ここで、本システムによる地下水の季節間利用では、240 日サイクル (揚水 120 日, 還水 120 日) で荷重変動が生じる。したがって、圧密試験供試体の繰返し載荷時間 Δt_m は、実地盤 (Ma12 層) の載荷時間 $\Delta t_p (=240$ 日) に対して H^2 則を適用すると以下となる。

$$\Delta t_m = (H_m/H_p)^2 \times \Delta t_p = (H_m/H_p)^2 \times 240 \times 24 \times 60 \text{ (分)} \quad (1)$$

しかし、深度方向に行った 9 ケースの繰返し圧密試験は $\Delta t_m = 12$ 分なので、 H^2 則を満足していない。そこで、各ケースの供試体の平均深度から排水面深度 (粘土層中央より上は第 1 洪積砂礫 (Dg1) 層下面 26.10m, 下は第 2 洪積砂礫 (Dg12) 層上面 43.25m) までを排水距離 H_p とし、供試体の排水距離 $H_m = 0.01$ m に対して式(1)の H^2 則を適用して、表-1 に示す各ケースの換算時間 Δt_m を求めた。さらに、図-1 の回帰線を用いて ΔWL ごとに 12 分に対する Δt_m のひずみ ε_f 比率を求めると表-1 に示すようになる。 ε_f 比率は ΔWL によって若干変動したが、大差なかったため、その平均値とした。排水面に近いほど Δt_m が大きくなるので、 ε_f 比率が大きくなる。よって、各ケースの ΔWL ごとの 12 分の ε_f にこの ε_f 比率を乗じて Δt_m における ε_f を求めた。

3. 尼崎 Ma12 層の地下水位変動による沈下予測

まず、Ma12 層の上面の Dg1 層, 下面の Dg2 層の地下水位低下による沈下量を段階載荷圧密試験による圧縮曲線

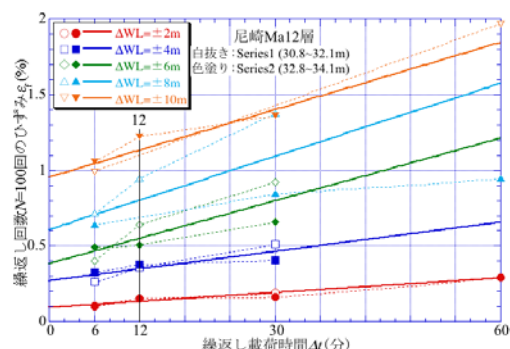


図-1 繰返し載荷時間 Δt とひずみ ε_f の関係

表-1 H^2 則による換算時間とひずみ ε_f 比率

Case	供試体 深度(m)	排水距離 H_p (m)	換算時間 Δt_m (分)	ひずみ ε_f 比率(%)
1	26.7~27.1	0.80	54.0	185
2	28.9~29.0	2.85	4.25	84
3	30.9~31.0	4.85	1.47	79
4	32.8~33.0	6.80	0.75	77
5	34.7~35.0	8.40	0.49	77
6	36.4~36.7	6.70	0.77	77
7	38.0~38.3	5.10	1.33	78
8	39.7~40.0	3.40	2.99	82
9	42.2~42.5	0.90	42.7	162

Key Words: 帯水層, 地下水位低下, 洪積粘土, 繰返し圧密, 時間効果, 沈下量

〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 TEL 06-6605-2996 FAX 06-6605-2726

を直接用いて求めた。これは地下水位低下を持続した場合の静的な最終沈下量となる。次に、先の深度方向9ケースの繰返し圧密試験の Δt_m における ε_f を用いて地下水位変動による沈下量を求めた。

図-2(1), (3)にそれぞれ Dg1, Dg2 層の地下水位変動による Ma12 層の繰返し圧密挙動を考慮した沈下量を, 図-2(2), (4)に静的な地下水位低下による沈下量との比較を示す。Dg1, Dg2 層で, $\Delta WL = \pm 2m$ で 1~1.5cm 程度の沈下量で, ほぼ弾性的な挙動を示している。 ΔWL が大きくなると, 繰返しによる沈下量の振幅が大きくなり, 沈下量が蓄積していき塑性的な挙動を示している。Dg2 層では ΔWL が $\pm 8m$ を超えると, 繰返しの沈下量が静的な沈下量を超える。

3. うめきた洪積粘土層の地下水位変動による沈下予測

うめきた洪積粘土 Ma12 (層厚 5.75m), Ma11U 層 (同 5.10m), Ma11L 層 (同 2.55m), Ma10 層 (同 17.40m) でも 12 分載荷の繰返し圧密試験を実施し, 図-1 の回帰線がうめきた洪積粘土でも成り立つと仮定し, H^2 則を考慮した沈下予測を行った。なお, Ma12, Ma11U, Ma11L, Ma10 層の換算時間 Δt_m はそれぞれ 4.18, 5.31, 21.3, 0.46 分, ひずみ ε_f 比率は 84, 87, 119, 77%となった。ここでは紙面の都合で Dg3 層の地下水位変動 (Ma11L, Ma10 層対象) の結果は省いた。

図-3(1), (3)にそれぞれ Dg1, Dg2 層の地下水位変動による繰返し圧密挙動を考慮した沈下量を, 図-2(2), (4)に静的な地下水位低下による沈下量との比較を示す。Dg1 層では Ma12 層の, Dg2 層では Ma12 層と Ma11U 層の沈下量を示している。先の尼崎よりも ΔWL を少し大きく設定しているが, 沈下傾向は同様である。Dg2 層では ΔWL が $\pm 10m$ を超えると, 繰返しの沈下量が静的な沈下量を超えるようになる。

実際のうめきた現場では Dg2 層を対象に熱源井が設置され, 100t/h の揚水量で熱源井での地下水位低下量が 2m 程度であった。図-3(3), (4)の結果から, 100 回の繰返しでも 5mm 程度のごく小さな沈下量と予測される。

最後に, 本研究は, 環境省 CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の「帯水層蓄熱のための低コスト高性能熱源井とヒートポンプのシステム化に関する技術開発」(研究代表者: 中曾康壽)で行ったことを付記する。

参考文献

- 1) 河合・他: 大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討, 第 52 回地盤工学研究発表会, No.1066, 2017.
- 2) 前田・他: 大阪市域における地盤沈下に配慮した帯水層蓄熱利用システムの適用実験, 第 53 回地盤工学研究発表会(投稿中), 2018.
- 3) 大島・他: うめきた粘土層の地下水位変動による繰返し圧密挙動を考慮した沈下量予測, 土木学会第 72 回年次学術講演会, III-407, 2017.
- 4) 天満・他: 尼崎市築地の洪積粘土 Ma12 層の繰返し圧密挙動, 第 53 回地盤工学研究発表会(投稿中), 2018.

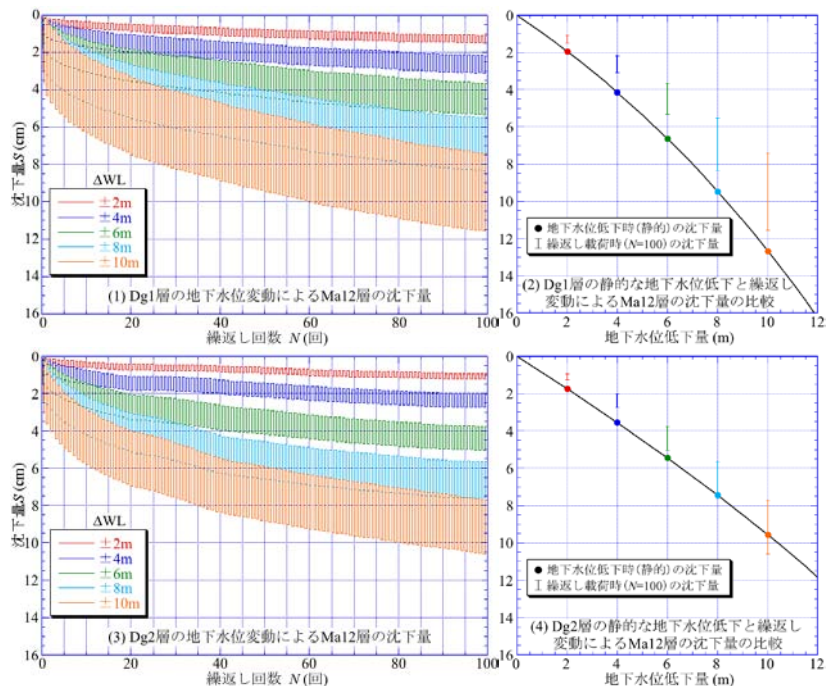


図-2 尼崎 Ma12 層の地下水位変動による繰返し圧密挙動を考慮した沈下量と静的な地下水位低下による沈下量の比較

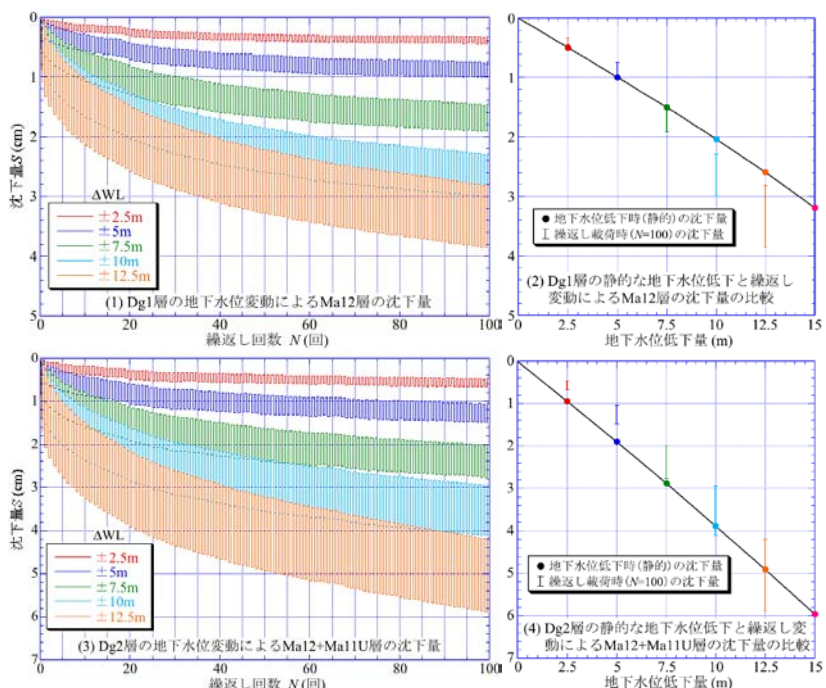


図-3 うめきた洪積粘土層の地下水位変動による繰返し圧密挙動を考慮した沈下量と静的な地下水位低下による沈下量の比較