

三次元浸透-変形連成解析法による帯水層地中熱利用実証試験の再現解析

大阪産業大学 正会員 ○木元小百合

大阪産業大学 非会員 山下大海 亀井湧馬

1. はじめに

地中熱は地下約 200 メートルまでの地球の表層近くに太陽エネルギーによって蓄えられている熱エネルギーである。地中熱の利用はヨーロッパやアメリカで導入・普及が進んでいる。しかし、我が国では掘削費などの初期コストが高いことなどにより、普及が遅れているのが実情である。エネルギー源となる表層の地盤特性が欧米諸国と異なることも、普及促進に向けて重要な課題である。地中熱の利用方式や規模は種々あるが、近年、大阪府内ではグランフロント大阪および此花区舞洲で帯水層からの揚水を利用する帯水層蓄熱方式の実施事例がある^{1),2)}。本検討では、弾粘塑性構成式を用いた三次元浸透-変形連成解析を用いて地中熱利用時の地盤変形挙動について考察する。

2. 数値解析手法

高田(2012)³⁾、Oka et al.(2016)⁴⁾による弾粘塑性浸透-変形連成解析法を用いた。本解析手法は有限変形理論に基づく水-土連成解析有限要素法である。地盤の構成式には内部構造変化を考慮した弾粘塑性構成式を用いており、正規圧密および過圧密粘土の自然堆積状態における挙動を表現することができる。

3. 解析モデル

2016~2018年にJR大阪駅のグランフロント大阪にて実施された帯水層蓄熱利用システムの実証試験を解析対象とした。実証試験では第2洪積砂礫層(Dg2層)を対象として熱源井構築の試験が行われた¹⁾。なお実証試験では揚水還水による有意な地盤沈下は計測されていない。解析モデルを図1、図2に示す。解析領域は幅190m、奥行100m、高さ50mとし、地層構成は上からAc層(沖積粘性土層、22.5m)、Dg1層(第一砂礫層、10m)、Dc層(洪積粘性土、7.5m)、Dg2層(第二砂礫層、10m)である。地下水面は地表面にあるとし、水圧は初期を静水圧として境界は全て

排水境界(水圧固定)としている。地盤の構成式はAc層とDc層は弾粘塑性構成式、Dg1とDg2層は弾性構成式を用いた。材料パラメータは、大阪駅新北ビル施工時の大規模掘削解析³⁾に用いられたものを使用した(表1、表2)。

解析は揚水対象層と揚水条件を変えて表3に示す6ケース実施した。本検討では、揚水・還水は図2に示すように砂礫層内の間隙水圧(鉛直方向に2節点)を所定の量だけ減圧・増圧することで模擬している。Case0は実証試験に近い条件としたものであり、間隙水圧計測データを参考に揚水・還水圧力を $\pm 30\text{kPa}$ とした。Case1, Case2は還水による地盤変形抑制効果を検討するため、Case1は揚水のみ、Case2a~2cは揚水井と還水井の水平距離をそれぞれ120m, 70m, 50mとした。地盤変形挙動をみるため圧力条件は $\pm 200\text{kPa}$ とした。Case3は揚水対象層をDg1層とした。

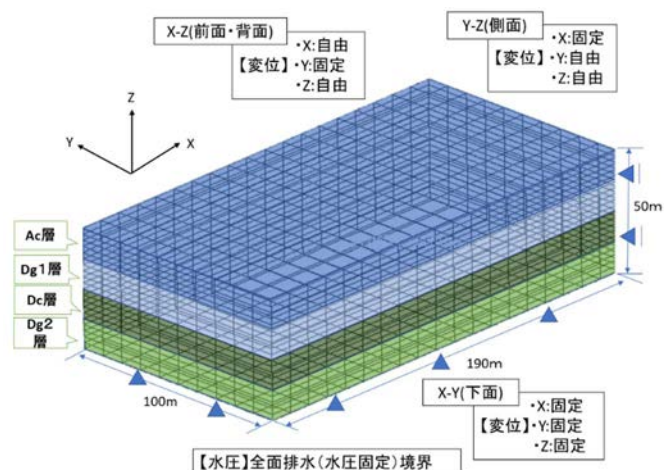


図1 解析モデル(全体図)



図2 解析モデル(y=50m断面図, Case2b)

キーワード 地中熱, 帯水層, 数値解析

連絡先 〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1 大阪産業大学工学部 都市創造工学科

表 1 Ac 層と Dc 層の材料定数

弾粘塑性材料		Ac層	Dc層
単位体積重量 (kN/m ³)	γ	17.0	16.0
初期間隙比	e_0	1.26	1.50
せん断弾性係数(KPa)	G	6180	7200
透水係数(m/s)	k	1.08×10^{-7}	3.46×10^{-8}
圧縮係数	λ	0.295	0.402
膨張指数	κ	0.0384	0.0400
過圧密比	OCR	1.22	1.76
ダイレンタンシー係数	M^*_m	1.22	0.776
破壊応力比	M^*_f	1.102	0.776
粘塑性パラメータ	m'	20.38	15.00
粘塑性パラメータ(1/s)	C	5.0×10^{-14}	1.6×10^{-12}
内部構造パラメータ(kPa)	$\sigma'_{maf}/\sigma'_{mai}$	0.522	0.381
内部構造パラメータ	β	5.5	25

表 2 Dg1 層と Dg2 層の材料定数

		Dg1層	Dg2層
単位体積重量(kN/m ³)	γ	20.0	20.0
ヤング率(kPa)	E	150000	150000
ポアソン比	ν	0.270	0.280
透水係数(m/s)	k	3.05×10^{-3}	4.54×10^{-6}

表 3 解析ケース

	対象層	圧力条件		距離	沈下量
Case0	Dg2	揚水・還水	30kPa	120m	0.0271cm
Case1	Dg2	揚水	200kPa	-	0.5079cm
Case2a	Dg2	揚水・還水	200kPa	120m	0.5080cm
Case2b	Dg2	揚水・還水	200kPa	70m	0.4961cm
Case2c	Dg2	揚水・還水	200kPa	50m	0.4499cm
Case3	Dg1	揚水・還水	30kPa	120m	0.6090cm

4. 解析結果

図 3, 図 4, 図 5 に Case2b の間隙水圧, 平均有効応力, 体積ひずみ (すべて y=50m 断面) を示す。図 6 に地表面および Ac 層下部の沈下量時刻歴を示す。変形は主に Ac 層で生じている。図 7, 図 8 に揚水対象層を Dg1 とした Case3 の体積ひずみ分布と Ac 層下部要素の間隙水圧と平均有効応力の時刻歴を示す。また表 3 に全ケースの揚水箇所直上の地表面沈下量を示す。井戸間の距離を小さくするほど沈下量は抑制されている。また揚水対象を Dg1 層とした場合でも沈下量は 0.6cm 程度と小さい。

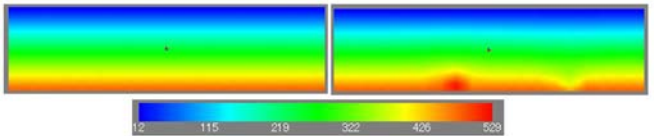


図 3 間隙水圧:Case2b (左:初期, 右:15 日後, kPa)

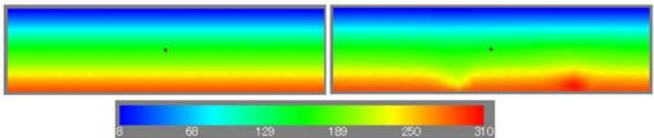


図 4 平均有効応力:Case2b (左:初期, 右:15 日後, kPa)

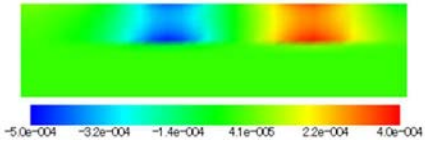


図 5 体積ひずみ:Case2b (15 日後, 圧縮正)

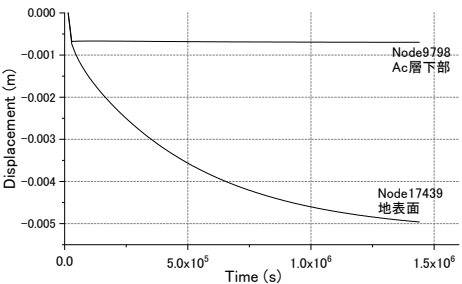


図 6 沈下量時刻歴:Case2b

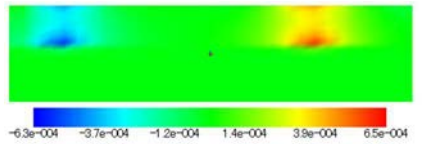


図 7 体積ひずみ:Case3 (15 日後, 圧縮正)

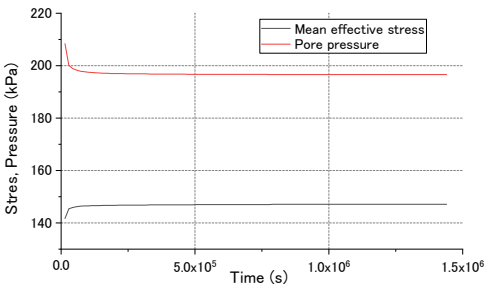


図 8 間隙水圧と平均有効応力時刻歴:Case3 (Ac 層)

5. おわりに

浸透-変形連成解析により帯水層蓄熱利用時の地盤変形挙動について検討した。Dg2 層を熱源井とする場合は Ac 層の間隙水圧変化は小さく, 変形量も最大で 0.5cm 程度となった。また Dg1 層で揚水する場合でも揚水圧力 30kPa (水位変動 3m 程度) であれば Ac 層の有効応力変化は 10kPa 以下であり地表面沈下量は小さい結果となった。

本研究は科研費 (基盤研究 C, 22K04321) の助成を受けたものである。

参考文献

1) 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会議: 検討報告書, 平成31年2月。
2) 武野, 大島, 天満, 中尾, 中曽: 大阪市舞洲の被圧帯水層の地下水位変動による洪積粘土層の繰返し圧密挙動と沈下予測, Kansai Geo-Symposium 2019, p.7-12, 2019。
3) 高田直明: 地盤改良を考慮した軟弱地盤における大規模掘削の弾粘塑性解析, 京都大学博士学位論文, 2012。
4) Oka, F., Takada, N., Shimono, K., Higo, Y., Kimoto, S., A large-scale excavation in soft Holocene deposit and its elastoviscoplastic analysis, Acta Geotechnica, 2016。