

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04597

研究課題名(和文) 杭基礎を利用した地中熱ヒートポンプシステムの熱-流体-力学挙動に関する解析的検討

研究課題名(英文) Numerical study for thermo-hydro-mechanical behavior of ground source heat pump system using pile foundation

研究代表者

木元 小百合 (Kimoto, Sayuri)

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：70362457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、杭基礎を利用した地中熱利用ヒートポンプシステム(エネルギーパイル)利用時の、地盤と構造物(杭基礎)の熱膨張、流体の熱膨張と移動、土骨格変形の連成挙動を考慮した熱-流体-力学連成解析手法を開発した。杭体(鉄筋コンクリート)は熱-弾性体ソリッド要素、地盤は土骨格を熱-弾粘塑性体とし三相系材料としてモデル化した。また開発した解析手法を用いて、Lalouiら(2006)による実証試験の再現解析を参考にして、モデル作成と材料定数の決定を行い、沖積粘土層に杭基礎を設置した場合の地中熱利用時の基本的な力学挙動について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内で地中熱を利用したヒートポンプシステムの導入事例が増えつつあり、今後も利用促進が期待される。わが国の軟弱粘性土地盤で利用する場合、加熱-冷却に伴う杭基礎の熱膨潤と圧縮、粘性土の温度上昇による圧密沈下など、杭基礎-地盤の複雑な相互作用による支持力低下や地盤変形が懸念されるが、本研究で開発した手法によりわが国でエネルギーパイルを利用する場合の地盤変形挙動の予測が可能であり、エネルギーパイルの普及促進に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, a thermo-fluid-mechanics coupled analysis method was developed, in which the thermal expansion of the ground and the structure (pile foundation), the thermal expansion and fluid flow, and the coupled behavior of soil skeleton deformation when using a geothermal heat pump system (energy pile) using pile foundation are investigated. The pile (reinforced concrete) was modeled as a thermo-elastic solid element, and the ground was modeled as a three-phase material with the soil skeleton as a thermo-elasto-viscoplastic body. In addition, using the developed analysis method, the basic mechanical behavior when using geothermal heat when the pile foundation was installed in the alluvial clay layer, was investigated. The ground model the material constants were determined referring to the reproduction analysis of the demonstration test by Laloui et al (2006).

研究分野：地盤力学、地盤工学

キーワード：地中熱 杭基礎 熱弾粘塑性 粘性土 数値解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国内で地中熱を利用したヒートポンプシステムの導入事例が増えつつあり、今後も利用促進が期待される。中でも、熱交換器として杭基礎を利用する地中熱利用ヒートポンプシステム(エネルギーパイル)は、地中熱交換井を別に設置するよりもイニシャルコストを低減でき、普及が進んでいる。地中熱利用の技術は欧州で先行的に技術確立されており、住宅用だけでなく、学校、空港などの大型ビルにおいて杭基礎やトンネル孔を利用した地中熱利用が進められている。しかし、特にわが国の軟弱粘性土地盤で利用する場合、加熱-冷却に伴う杭基礎の熱膨潤と圧縮、粘性土の温度上昇による圧密沈下など、杭基礎-地盤の複雑な相互作用による支持力低下や地盤変形が懸念される。

本研究で対象とする杭基礎を利用した地中熱利用ヒートポンプシステム(エネルギーパイル)の構成図を図1に示す。杭基礎の周囲や内部に熱交換用のパイプを設置し、熱媒体として不凍液を循環させることにより地中から熱を採る。地下水面上部の不飽和帯の熱伝導率は間隙空気の影響により極めて小さいため、地中の温度は外気温に比べると年間を通して変化が小さい。そのため夏は冷熱源、冬は温熱源として利用することにより、外気から熱を採るよりも効率的に冷暖房ができる。

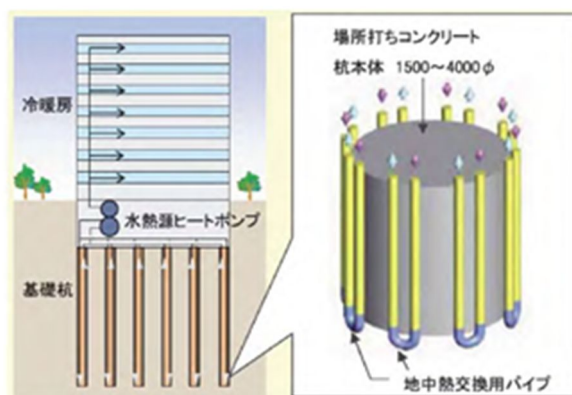


図1 エネルギーパイルの構造 (環境省, 2015)

### 2. 研究の目的

本研究では、粘性土地盤におけるエネルギーパイルの杭基礎-地盤系の力学挙動を数値解析により再現することを目的とする。まず、地盤と構造物、流体中の熱移動、流体の移動、土骨格の変形の連成挙動を取り扱うため、不飽和熱-流体-力学連成解析手法を開発した。土の変形挙動は粘性土の場合、時間依存性と温度依存性を有するため、土骨格の構成式として温度依存性を考慮した粘性土の弾粘塑性モデルを用いた。まず、開発した解析手法の検証のため簡易な1次元モデルを用いて熱伝導方程式の理論解と一致することを確認した。次に、既往の実証試験を参考に地中熱利用時の再現解析を行った。地盤や杭、温度・荷重条件を変化させて、杭基礎-地盤系の熱力学挙動に与える影響要因について検証し、基本的な知見を整理する。

### 3. 研究の方法

杭基礎を利用した地中熱利用ヒートポンプシステム(エネルギーパイル)利用時の、地盤と構造物(杭基礎)の熱膨張、流体の熱膨張と移動、土骨格変形の連成挙動を考慮した熱-流体-力学連成解析手法を開発した。本解析コードは Akaki, Kimoto, and Oka (2016)<sup>1)</sup>に、流体を考慮しないソリッド要素と熱応力を導入して拡張したものである。杭体(鉄筋コンクリート)は熱-弾

性体ソリッド要素、地盤は土骨格を熱-弾粘塑性体とし三相系材料としてモデル化した。熱粘塑性ひずみについては圧密降伏応力の温度依存性によって考慮した。地盤は不飽和状態を扱えるよう空気-水-土三相系材料とし、熱伝導については混合体の平均的な比熱、熱伝導係数を用いて一相系材料として扱っている。

定式化に用いた支配方程式は各相の運動量保存則、各相の質量保存則、全体相の熱エネルギー保存則、構成式である。離散化は有限変形理論に基づき updated Lagrangian 法を採用し、空間離散化は有限要素法による。上述の定式化に基づいて数値解析法を開発した。まず1次元モデルで熱伝導理論解と一致することを確認した。次に、Laloui et al.<sup>2)</sup>による実証試験の再現解析を参考にして、モデル作成と材料定数の決定を行い、沖積粘土層に杭基礎を設置した場合の地中熱利用時(温度上昇時)の力学挙動について考察した。杭頭の拘束条件をフリーとした場合と変位固定とした場合について結果を比較した。

#### 4. 研究成果

図2に解析モデルを示す。地盤は沖積粘土層(Ac層)とし、杭基礎は長さ26m、半径0.5mとした。初期有効応力は $K_0=0.5$ として自重で与え、初期静水圧を仮定した。地盤の初期温度は地表面を10(283K)とし、地温勾配を0.03 /mとした。夏期の地中熱利用時を想定し、杭要素の温度を22 上昇させた。杭頭の変位境界条件を、フリー(Case 1)および変位固定(Case 2)として比較した。地盤の材料定数は、既往のJR大阪駅付近の大規模掘削に用いられた沖積粘土層の材料パラメータ<sup>3)</sup>を用いた。表2に杭材料(鉄筋コンクリート)の弾性定数を、表3に各物質の熱に関する材料定数<sup>2)</sup>を示す。なお今回の解析では土粒子と水の熱膨張は考慮していない。

図3に初期および11.6日後の温度のコンター図を示す。図4に両ケースの温度上昇による杭の鉛直応力増加量の深度分布を示す。杭頭を拘束なしとしたCase1では杭内部では応力増加がみられるが値は小さい。杭頭の変位を固定したCase2では地表面近くから杭内部で鉛直応力の増加がみられる。図5にCase1の杭頭の鉛直変位の時刻歴を示す。杭頭フリーとした場合、温度膨張により約0.5mmの変位が生じている。

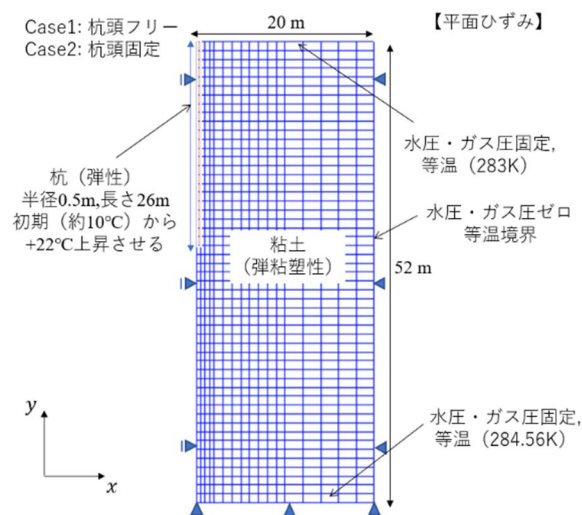


図2 解析モデル

表 1 Ac 層の材料定数

弾粘塑性材料		Ac層
せん断弾性係数(KPa)	$G_0/\sigma'_{m0}$	165
透水係数(m/s)	$k$	$1.08 \times 10^{-7}$
圧縮係数	$\lambda$	0.295
膨張指数	$\kappa$	0.0384
初期間隙比	$e_0$	1.26
過圧密比	$OCR$	1.22
ダイレンタンスー係数	$M^*_m$	1.22
破壊応力比	$M^*_f$	1.102
粘塑性パラメーター	$m'$	20.38
粘塑性パラメーター(1/s)	$C$	$5.0 \times 10^{-14}$
内部構造パラメータ(kPa)	$\sigma'_{maj}/\sigma'_{mai}$	0.522
内部構造パラメーター	$\beta$	5.5
温度依存性パラメータ	$\alpha_T$	0.15

表 2 杭体の弾性定数

弾性材料		杭
Lameの定数(MPa)	$\lambda$	7839
Lameの定数(MPa)	$\mu$	14313

表 3 熱に関する材料定数

		土粒子	水	杭
比熱 (kJ/tK)	$c$	800	4200	800
熱伝導係数(kW/mK)	$\lambda$	1.90E-3	0.58E-3	2.00E-3
熱膨張係数 (1/K)	$\beta^{\theta p}$	-	-	1.00E-5

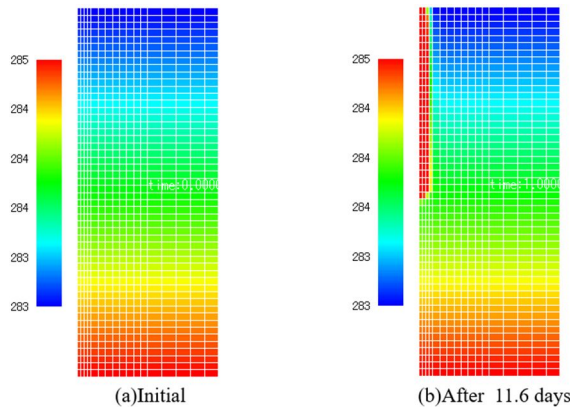


図 3 温度分布 (Case2)

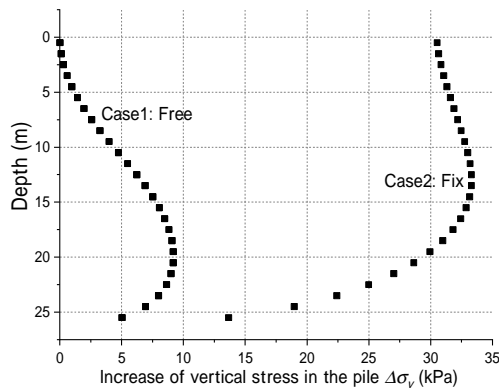


図 4 杭の鉛直応力増加量の深度分布

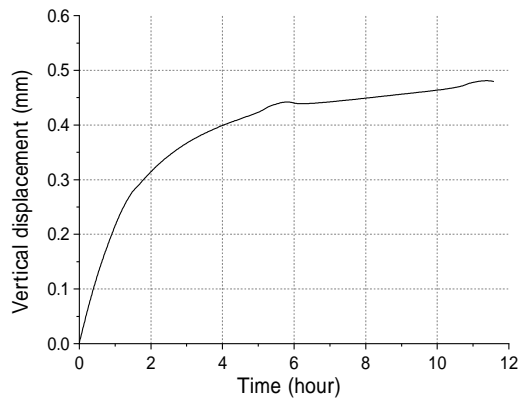


図 5 杭頭の鉛直変位 (Case1)

以上のように、本研究では、杭基礎を利用した地中熱利用ヒートポンプシステム(エネルギーパイル)利用時の、地盤と構造物(杭基礎)の熱膨張、流体の熱膨張と移動、土骨格変形の連成

挙動を考慮した熱-流体-力学連成解析手法を開発した。また開発した解析手法を用いて、Lalouiら(2006)による実証試験の再現解析を参考にして、モデル作成と材料定数の決定を行い、沖積粘土層に杭基礎を設置した場合の地中熱利用時の基本的な力学挙動について検討した。今後は土粒子と水の熱膨張を導入し、粘性土の温度圧密が杭の支持力に与える影響について検討する必要がある。

#### 引用文献

- 1) Akaki, T., Kimoto, S. and Oka, F.: *Int. J. Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol.40, pp. 2207-2237, 2016.
- 2) Laloui, L., Nuth, M, Vulliet, L., Experimental and numerical investigation of the behavior of a heat exchanger pile, *Int. J. Num. and Ana. Methods in Geomechanics*, 30, 763-781, 2006
- 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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木元小百合
2. 発表標題 杭基礎を利用した地中熱利用時の熱-流体-力学挙動に関する数値解析
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------