

1. はじめに 地盤改良工法のひとつとして生石灰杭による工法が用いられている。生石灰による改良効果は含水比の低下, 膨張効果が主なものとされているが, 生石灰の反応熱による周辺地盤の高温圧密による改良効果が指摘されているが, いまだ十分には明らかにされていない。このため, 加熱ドレーンによる地盤改良を想定した模型実験が実施されている(足立・村上, 1998)。本報告は提案する粘土の熱弾粘塑性モデルを用いて模型実験の土・水・熱連成解析を行い, ドレーンによる地中加熱が周辺軟弱粘土の圧密変形挙動に与える影響と高温加熱の改良効果について検討している。

2. 加熱ドレーン圧密実験 模型実験は足立ら(1998)によって実施されたものであり, 加熱ドレーン圧密実験装置を図1に示している。模型ドレーンは多孔性合成樹脂製であり, 中心に加熱用ヒーターと温度センサーが内蔵されている。また, 地中温度測定のために5つの熱電対が埋設されている。鉛直応力 49 kPa で一次元圧密された粘土に厚さ 25mm の鋼製載荷板を介して 49 kPa の圧密圧力を載荷し, ヒーター温度を 80 に上昇させている。圧密中は, 沈下量と地中温度の経時変化が測定されている。

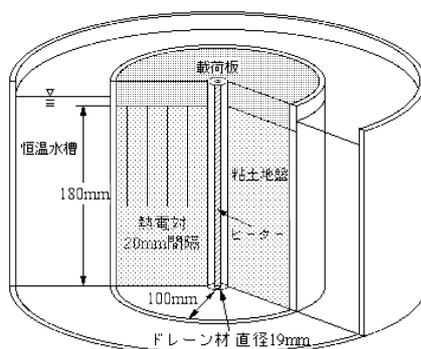


図1 加熱ドレーン圧密実験装置 (足立・村上, 1998)

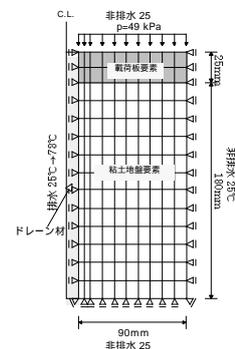


図2 解析メッシュ

3. 熱弾粘塑性モデルによる土・水・熱連成解析 解析に提案する熱弾粘塑性モデルと土・水・熱連成圧密解析法を用いているが, ここでは K_0 圧密粘土を対象としているので次式の流動関数 F とひずみ関数 f を用いている。

$$F = \mu \ln \frac{1}{\delta} \left[1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v \right) \right] \exp \left(\frac{f - h_0}{\mu} + \delta v_p \right) - \frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v \left(-v^{vp} \right) = 0$$

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p}{p_0} + \frac{\alpha_a - 1}{\alpha_a - 1} \ln \frac{M_a + (\alpha_a - 1)\eta}{M_a + (\alpha_a - 1)\eta_0} + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1 + e_0} (T - T_0), \eta < \eta_0$$

$$= \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p}{p_0} + \frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \ln \frac{M_a + (1 - \alpha_p)\eta_0}{M_a + (1 - \alpha_p)\eta} + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1 + e_0} (T - T_0), \eta < \eta_0$$

粘土と載荷板を 140 個の軸対称要素に分割している。要素分割と荷重・排水・温度の境界条件を図2に示す。初期状態は鉛直応力 49 kPa, $K_0=0.51$, 初期温度 25 であり, 載荷重, ドレーン温度(ドレーン・粘土境界面温度)は実験における値と一致させている。解析は室温ドレーン(ドレーンを加熱しない場合)と加熱・冷却ドレーン(加熱する場合)の2ケースである。加熱するケースでは圧密終了後にドレーンの加熱を停止させた冷却時の解析も行っている。用いた解析パラメータを表1に示す。

4. 結果と考察 図3, 4は, 沈下量, 粘土内温度の経時変化に

表1 パラメータ表

粘土地盤要素パラメータ	
圧縮指数	0.144
膨潤指数	0.016
ボアソン比	0.34
破壊応力比 M	1.167
初期間隙比 e_0	1.32
二次圧縮係数 μ	1.79×10^{-3}
基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ (1/min)	1.68×10^{-7}
内部拘束ひずみ速度	1.0×10^{-5}
初期履歴変数 h_0	0.0065
基準透水係数(鉛直方向) k_{v0} (cm/min)	6.0×10^{-6}
基準透水係数(半径方向) k_{r0} (cm/min)	6.0×10^{-6}
透水性変化指数(鉛直方向) C_{vz}	1.045
透水性変化指数(半径方向) C_{vr}	1.045
熱透水性変化指数 A	0.0295
熱圧縮係数 λ_p	6.0×10^{-4}
熱膨潤係数 κ_p	2.3×10^{-5}
基準履歴変数 $\bar{\lambda}$	0.030
土粒子の密度 ρ_s (kg/cm ³)	2.67×10^{-3}
土粒子の比熱 C_s (kcal/kg · °C)	0.25
土粒子の熱膨張係数 a_s (1/°C)	5.0×10^{-6}
土粒子の熱伝導係数(鉛直方向) K_{sz} (kcal/cm · min · °C)	3.0×10^{-4}
土粒子の熱伝導係数(半径方向) K_{sr} (kcal/cm · min · °C)	3.0×10^{-4}
間隙水の密度 ρ_w (kg/cm ³)	1.00×10^{-3}
間隙水の比熱 C_w (kcal/kg · °C)	1.00
間隙水の熱膨張係数 a_w (1/°C)	2.2×10^{-4}
間隙水の熱伝導係数 K_w (kcal/cm · min · °C)	8.4×10^{-5}
載荷板要素パラメータ	
弾性定数 E (kgf/cm ²)	2.13×10^6
比熱 C (kcal/kg · °C)	5.113
熱膨張係数 a (1/°C)	3.54×10^{-6}
熱伝導係数 K (kcal/cm · min · °C)	7.15×10^{-3}

キーワード: 熱弾粘塑性モデル, 熱連成圧密解析, 加熱ドレーン, 高温圧密, 地盤改良

連絡先: 吹田市山田丘 2-1, TEL 06-6879-7624, FAX 06-6879-7629

ついて解析結果と実験結果を示したものである。提案モデルの熱圧縮係数は加熱圧密試験から求められるものであるが今回の実験ではこれが与えられていないため、図3の加熱ドレーン実験結果と解析結果の比較から求めている。求められた値は類似の粘土の熱圧縮係数と同程度の値となっている。

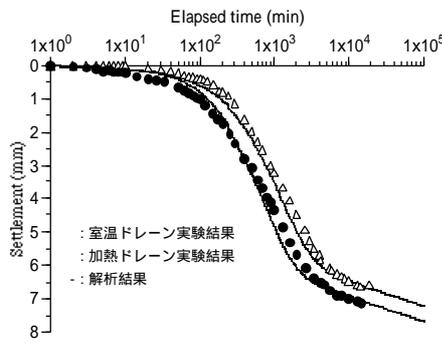


図3 沈下曲線

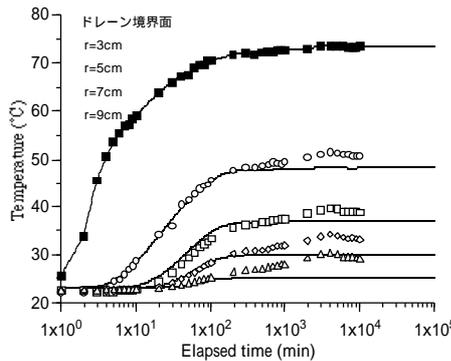


図4 温度経時変化

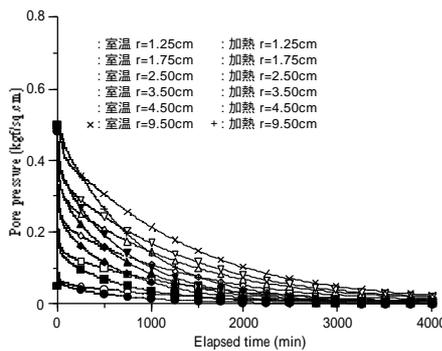


図5 間隙水圧経時変化

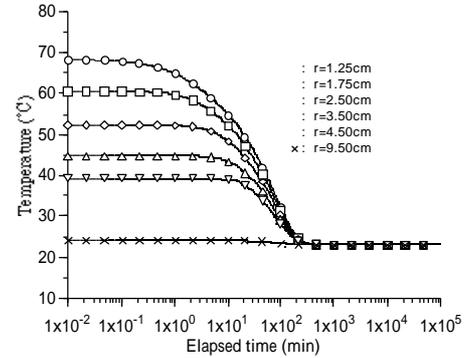


図7 冷却時温度経時変化

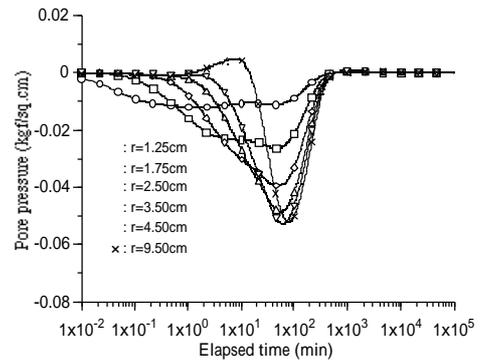


図8 冷却時間隙水圧経時変化

図5には間隙水圧の経時変化（解析結果）を示している。実験結果から加熱によって圧密沈下量が増加し、圧密が促進されることが分かるが、解析結果はこれら実験挙動をよく説明している。図6は粘土内の温度分布（解析結果）を示しているが、熱伝導係数の大きな鋼製載荷板に接する粘土で温度上昇が速いことが分かる。図7, 8は冷却時の粘土内温度と間隙水圧の経時変化（解析結果）を示したものであるが、温度の低下とともに粘土に負の間隙水圧が発生する。図9は、粘土の応力・時間・熱負荷履歴を表す指標として用いている履歴変数（粘性体積ひずみ）の粘土内分布を示したものである。加熱・冷却ドレーンのケースにおけるドレーン周辺粘土は履歴変数の値が大きく、過圧密化していることが分かる。

5. まとめ 提案する粘土の熱弾粘塑性モデルを用いて加熱ドレーン圧密実験の土・水・熱連成解析を行い、ドレーンによる地中加熱によって圧密沈下量が増加し、圧密が促進されること、加熱・冷却という熱負荷履歴によって改良効果が得られることを示した。

参考文献

- 1) 足立・村上, “加熱ドレーン改良地盤の圧密変形メカニズム”, 土木学会論文集 No.596/III, pp.39-48, 1998.6
- 2) 阿部・富江・寺西, “粘土の熱弾粘塑性モデル”, 第33回地盤工学研究発表会概要集, pp. 489-490, 1998年7月

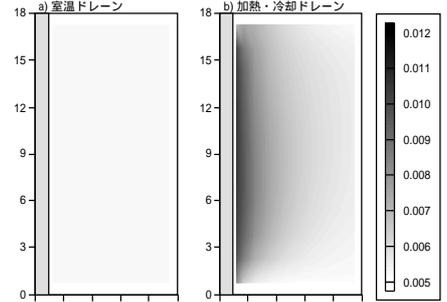


図9 履歴変数分布

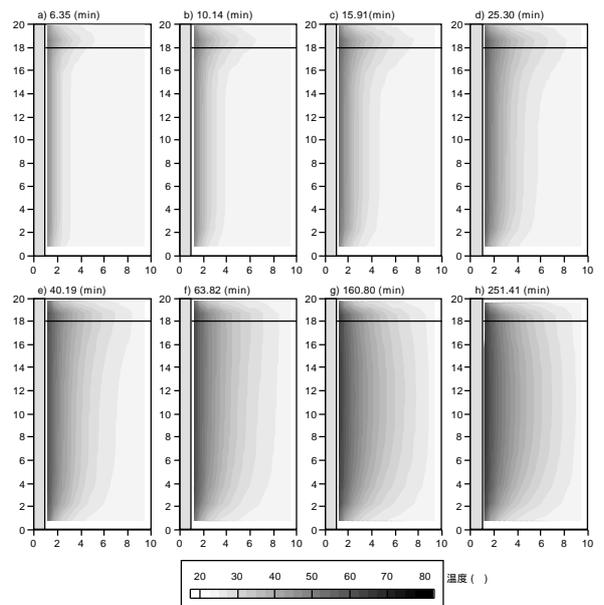


図6 温度分布経時変化