

京都大学工学部	学生員	○高田	直明
京都大学大学院	フェロー	岡	二三生
京都大学大学院	正会員	木元	小百合
京都大学大学院	学生員	肥後	陽介

1. はじめに 熱が粘土に及ぼす影響は地球環境問題や、エネルギー問題といった観点から非常に重要な問題である。また粘土地盤は熱を与えられて温度が上昇し、それに伴って発生する過剰間隙水圧が消散することにより地盤が圧密する（温度圧密）ことが知られている¹⁾。このようなことを背景として本研究では、熱-水-土連成有限要素法²⁾を用いて温度圧密のシミュレーションを行い、プレロードによる圧密との比較を行なった。

2. 温度変化による過剰間隙水圧発生と透水係数の変化 本研究では温度変化によって発生する過剰間隙水圧を式（1）で表わし¹⁾、透水係数の変化を式（2）で表わした³⁾。

$$\Delta u = \frac{n\Delta\theta(\alpha_s - \alpha_w) + \alpha_{st}\Delta\theta}{m_v} \quad \dots(1) \quad k = \frac{K\gamma_w(\theta)}{\mu(\theta)} \quad \dots(2)$$

なお式中の n は間隙率、 θ は温度、 α_s は温度変化による土粒子の体積膨張率、 α_w は温度変化による水分子の体積膨張率、 α_{st} は温度による内部構造変化の物理化学的係数、 m_v は土骨格の体積圧縮係数、 k は透水係数、 K は材料固有の透水係数、 $\mu(\theta)$ は温度による水の単位堆積重量、 $\gamma_w(\theta)$ は動粘性係数を表わす。

3. 解析条件 解析に用いた境界条件を図1に示す。対称性を考慮し、実際考えているモデルの半分で解析を行なった。縦15m×横45mの飽和粘土地盤を仮定し、縦15×横24の360要素とした。粘土は弾粘塑性体としてモデル化している²⁾。熱源を2本地盤に貫入し、1年間地盤に熱を与え続けた。また、温度圧密との比較には、熱源の代わりに図2に示すような境界条件において、プレロードを1年間載荷し、その間の地盤の挙動をシミュレーションした。なお熱源の温度は60℃とし、プレロードの大きさは1年後の沈下量がほぼ一致する150kPaとした。また、解析に用いたパラメータを表1に示す。

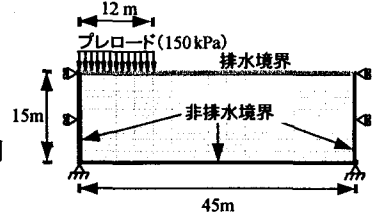
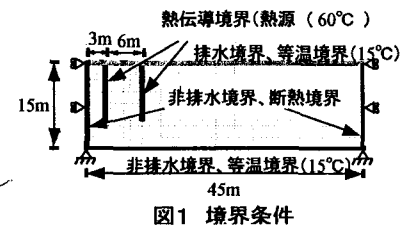
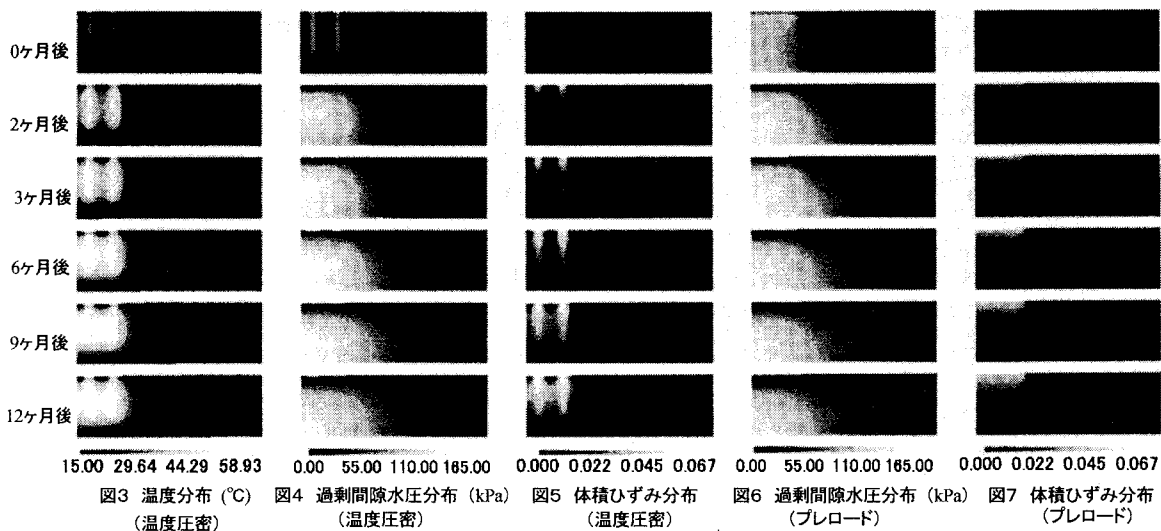


図2 境界条件

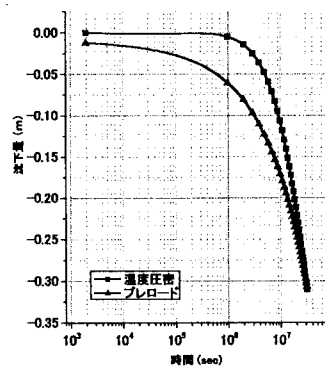
表1 解析に用いたパラメータ

圧縮指数	λ	0.191
膨潤指数	K	0.043
初期間隙比	e_0	1.10
初期圧密応力	σ'_{vm}	392 (kPa)
先行圧密応力	σ'_{mv}	392 (kPa)
静止土圧係数	K_0	1.0
粘性パラメータ	m'	24.3
粘性パラメータ	$C(\theta r)$	5.8×10^{-10} (1/s)
変相応力比	M'_{vm}	1.14
せん断弾性係数	G	17700 (kPa)
透水係数	$k = k_s = k_y$	1.63×10^{-9} (m/s)
基準温度	θ_r	15.0
比熱容量	C	938 (J/kg · °C)
熱伝導率	k_s	1.16 (W/m · °C)
温度による粘土粒子の体積膨張係数	α_s	0.35×10^{-4}
温度による内部構造変化の物理化学的係数	α_{st}	-0.50×10^{-4} (1/s)
弾粘塑性パラメータ	α	0.15
内部構造パラメータ	σ'_{mv}	170 (kPa)
内部構造パラメータ	β	10.0



えられ、それに伴って過剰間隙水圧も消散し始めるが、12ヶ月後においても依然過剰間隙水圧は残留している（図4）ため、更に地盤は圧密されると考えられる。プレロードによる圧密と比較してみると、今回プレロードは瞬間載荷としており、圧密開始直後に盛土直下の地盤全体に過剰間隙水圧が発生している。それに対して温度圧密は圧密開始直後は地盤に熱があまり伝播しておらず、土粒子及び水粒子の膨張はほとんど起こっていないと予想され、その結果過剰間隙水圧が熱源周辺のみにはしか発生していない。図5、6を見てみると温度圧密の場合は圧密開始6ヶ月前後で過剰間隙水圧がピークに達しているのに対して、プレロードの場合は2ヶ月前後でピークを迎えている。そのためその消散も遅れ、図8に示すように、圧密を開始して始めのうちは、プレロードによる圧密の方が沈下のスピードが速くなっている。また図6、7に示す体積ひずみを見てみると、温度圧密の場合は熱源を中心にその分布が広がっていくのに対してプレロードによる圧密による場合は盛土直下から広がっていることが分かる。

5. まとめ 本研究では熱-水-土連成有限要素法を用いて温度圧密のシミュレーションを行い、プレロードによる圧密との比較を行なった。その結果、過剰間隙水圧の発生メカニズムの違いを確認できた。今回地下15mは等温境界（15℃）とし、また土の自重を考慮せず、地盤の初期の応力状態が均一として解析を行なった。しかし等温境界に関してはその部分に地下水が流れている特別な場合は考えられなくもないが、より実際の地盤を考えるために今後は深い地盤を想定し、土の自重を考慮に入れて解析を行う必要がある。またプレロードと熱源を組み合わせるとより大きな圧密効果が期待できるため、組み合わせで地盤を圧密させる場合についても検討していきたい。



モデル左上端から12mの幅における地表の全節点の沈下量を平均。

図8 平均沈下量

参考文献 1) Campanella, R.G. and Mitchell, J.K. : Influence of temperature variations on soil behavior, *ASCE, J. of SMFE*, Vol.94, No. 3, pp. 709-734, 1968. 2) 岡二三生, 肥後陽介, 金榮錫, 井村雄一, 木元小百合 : 弾-熱粘塑性構成式を用いた熱-水-土連成有限要素法と飽和粘土の変形解析, *応用力学論文集*, Vol. 6, pp. 427-436, 2003. 3) Yashima, A., Leroueil, S., Oka, F. and Guntoro, I. : modelling temperature and strain rate dependent behavior of clays : one dimensional consolidation, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.2, 1998.