

# 加熱ドレーン改良地盤の圧密変形メカニズム

足立格一郎<sup>1</sup>・村上睦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph.D. 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)

<sup>2</sup>工修 北海道開発局 室蘭開発建設部 (〒051-0023 北海道室蘭市入江町 1-14)

生石灰杭改良地盤は、生石灰の反応熱により長期間高温圧密状態にあり、あたかも加熱したドレーンにより圧密されている状況にある。しかし、高温環境が地盤の圧密挙動や改良効果に与える影響については未だ明確にされていない。本研究では、改良される実地盤を想定した模型実験を行い、加熱ドレーンによる周辺粘土地盤の圧密変形挙動を把握すると共に、温度と透水性の変化に着目した地盤のモデル化を行い、中空円筒圧密解析ならびに応力-浸透-熱移動連成解析による検討を加え、加熱ドレーン改良地盤内には圧密過程の異なる領域が存在することを明らかにした。

*Key Words : heated drain, high temperature, soft clay, consolidation, model test, zoning of the rate of consolidation, radial dissipation analysis, finite element analysis*

## 1. はじめに

近年、経済活動の発展に伴って、人工的に温度履歴を受ける粘性土地盤が増えてきている。身近なところでは、ごみ埋め立て処分に伴い周辺地盤が長期間高温化するといった問題<sup>1)</sup>や、高レベル放射性廃棄物の地中埋設処理に伴い、廃棄物の緩衝材となる粘土質物質やその周辺地盤が、放射性廃棄物の崩壊熱により長期間高温環境にさらされるといった問題<sup>2)</sup>が指摘されてきており、高温環境が周辺地盤へ与える影響を明確にすることは、地球環境的にみても、重要な問題となってきている。

生石灰杭による地盤改良施工地盤もその一例であり、生石灰の反応熱によって、周辺地盤はある期間高温圧密状態となり<sup>3)</sup>、あたかも加熱したバーチカルドレーンによって圧密されているかのような状況下にある。

生石灰杭工法とは軟弱地盤改良工法の一つであり、その強度増加のメカニズムについては、従来、生石灰杭の膨張圧による圧密効果、ならびに消化吸水反応と毛管吸水による含水比低下がもたらす間隙比の低下により、粘性土の強度増加が生じると考えられており、この考え方に従った設計法が用いられている。

しかし、生石灰杭が周辺の粘性土地盤に及ぼす作用や効果については、各種の研究や実績があるにもかかわらず、未だ完全に明らかにされていない点もある。その一つに、温度による周辺地盤への影響が挙げられる。生石灰杭は消化吸水反応時に発熱し、生石灰杭打設地盤内は高温圧密状態となり、改良効果として考えられている

含水比の低下といった要因に及ぼす高温による影響、すなわち、高温圧密による疑似圧密促進効果といったものがどの程度影響しているのか明らかにされていない。

一方、実験室内においても、近年、高温環境下における粘性土の力学挙動に関して各方面で様々な研究が行われてきている。これらの研究から、軟弱粘性土を高温環境のもとで圧密すると圧密が促進するといった報告<sup>4)</sup>や、高温で再構成された粘性土は、年代効果を有する自然堆積粘性土に類似した強度特性を示すという報告<sup>5)</sup>がなされており、生石灰杭の消化吸水反応による発熱が、圧密促進や強度増加といった地盤改良を促進する要因の一つとなっていると思われる。

そこで、本研究では、加熱ドレーンによる地中加熱が、周辺の粘性土地盤の圧密変形挙動にどのような影響を与えるかという点に着目し、模型実験や数値計算を通じて、そのメカニズムについて一考察を行った。まず、ドレーン圧密、すなわち、変形が平均的に  $K_0$ ・等鉛直ひずみ、かつ排水が求心方向排水条件の場合の圧密変形メカニズムに、温度がどのような影響を及ぼすか、模型実験を通じて検討した。また、高温環境下での標準圧密試験を行い、圧密パラメータの温度依存性についても検討した。そして、温度による透水性の変化に着目した加熱ドレーン圧密地盤のモデル化を行い、中空円筒圧密理論を用いて解析するとともに、高温環境下の圧密現象を、応力・変形問題、浸透問題、熱問題が互いに連成した数値解析による検討を加えた。

## 2. 模型実験

### (1) 用いた試料と人工粘土地盤の作製

本研究で用いた試料は、東京都江戸川区小松川で採取した不攪乱東京沖積粘土（有楽町層下部層粘土：採取深度12.0～17.0m）である。表-1にその物理特性を示す。この自然粘土を420 $\mu$ mのふるいを用いて粗粒分等を除去した後、 $2w_L$ の含水比で十分攪拌し、スラリー状とした。モールド（ $\phi$ 200mm $\times$ H400mm）にこのスラリー試料を満たし、脱気後、恒温水槽で圧密圧力（圧密時間）9.8(24h) $\rightarrow$ 29.4(24h) $\rightarrow$ 49.0kPa（一次圧密終了迄:3t法で確認）の段階的荷重を行ない、一次的に圧密し、人工粘土地盤を作製した。作製した人工地盤の物理特性を表-2に示す。

### (2) 加熱ドレーン圧密実験

本実験に用いた人工粘土地盤を含む加熱ドレーン圧密実験装置を図-1に示す。作製した人工地盤の中心部を外径19mmで先端に刃先を持つチューブを用いてくり抜き、そこに加熱用ヒーターおよび温度センサーを内蔵したドレーン材を静的に挿入した。ドレーン材は、パールコンと呼ばれる合成樹脂製硬質多孔体から成り、耐熱性・耐食性に優れた透水性材料である。空孔径約100 $\mu$ m、空孔率35%、圧縮強度3.4MPa以上の材料特性を持っており、人工地盤の変形に対しては剛な物質と見なすことができる。なお、ドレーン材は設置前に蒸留水にて完全に飽和させ、設置作業中も飽和度が下がらないように留意した。次に、この人工地盤中の図-1に示す位置に地中温度測定用の熱電対を設置した。

以上の準備をすませた後、中心部に $\phi$ 20mmの穴（ドレーン材部分）を持つ厚さ25mmの鋼製載荷版をセットし、 $\sigma_v=98$ kPaにて圧密した。粘土内周面のみを排水面とし、ドレーン温度を80 $^{\circ}$ Cに、他の外周面を恒温水槽にて25 $^{\circ}$ C一定に設定することにより、透水性の低い粘土地盤に加熱ドレーンを打設した改良地盤をモデル化し再現した。圧密中は、沈下量と地中温度の経時的变化を測定した。3t法にて一次圧密終了を確認した後、含水比試験、CIU三軸圧縮試験を行い、加熱ドレーン圧密後の物理特性・力学特性について検討した。また、比較のためドレーンを加熱しない場合についても同様の試験を行った。各試験ケースを表-3に示す。

### (3) ドレーン圧密終了後の地盤に対する試験

#### a) 含水比分布測定

ドレーン圧密終了後、ドレーンの加熱を止め、載荷重を2kPaまで除荷し人工粘土地盤を冷却させた（この間約20分：飽和条件下）。圧密容器から慎重に取り出した試料に対し、ドレーン周面から同心円上に1cm刻みに、

表-1 不攪乱試料の物理特性

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 液性限界 $w_L$ (%)              | 51.3 |
| 塑性限界 $w_p$ (%)              | 27.3 |
| 塑性指数 $I_p$                  | 24.0 |
| 土粒子密度 $\rho_s$ ( $g/cm^3$ ) | 2.65 |

表-2 作製した人工地盤の物理特性

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 含水比 $w$ (%)                      | 50.2 |
| 初期間隙比 $e$                        | 1.33 |
| 湿潤単位体積重量 $\gamma_t$ ( $kN/m^3$ ) | 16.8 |

表-3 実験ケース

|                        | 加熱ドレーン<br>圧密実験 | 非加熱(室温)<br>ドレーン圧密実験 |
|------------------------|----------------|---------------------|
| 試験 No.                 | HD             | RD                  |
| 圧密圧力(kPa)              | 98             | 98                  |
| ドレーン温度( $^{\circ}$ C)  | 80             | 25                  |
| 粘土外周面温度( $^{\circ}$ C) | 25             | 25                  |
| 圧密終了条件                 | 3t             | 3t                  |

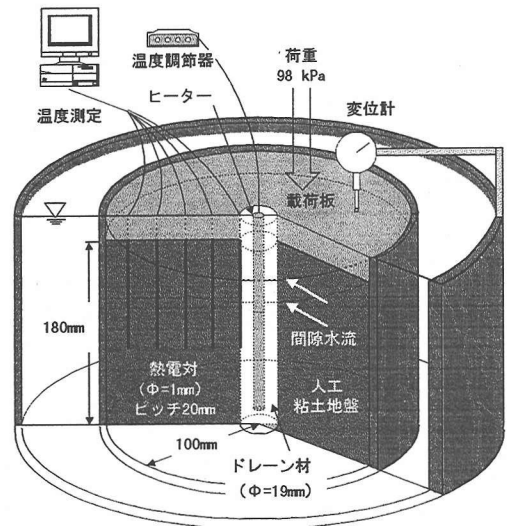


図-1 加熱ドレーン圧密実験装置

深度方向には2cm刻みに試料を切り出し、含水比測定試験を行い、加熱ドレーンにより生じる高温環境が改良地盤の含水比分布特性に与える影響について検討した。また、この結果を用いて空隙比やひずみを算定した。

#### b) 等方圧密非排水三軸圧縮試験

ドレーン温度の違いが周辺地盤のせん断強度に与える影響について検討するため、等方圧密非排水三軸圧縮試験（CIU試験）を実施した。排水面側と非排水面側での強度分布について考察するため、ドレーン周面から同心円上に異なる位置（中心位置： $r=20, 70$ mm）にて供試体

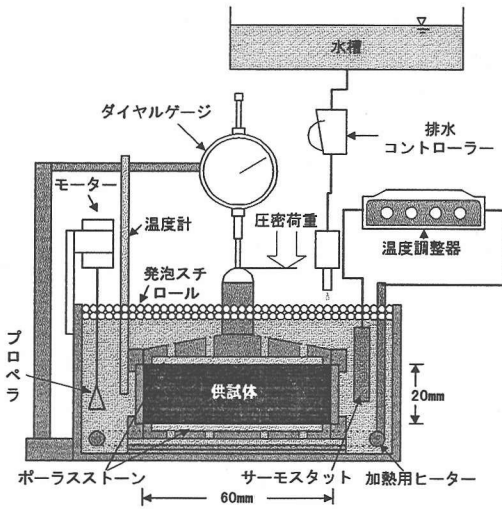


図-2 温度別標準圧密試験装置

( $\phi=35\text{mm}$ ,  $h=70\text{mm}$ )を含水比試料と同じ手法で採取し、CIU試験を実施した。有効拘束圧はドレーン圧密時の有効土被り圧から $K_0=0.55$ を用いて算定し、正規圧密状態供試体を $\sigma'_v=68.6\text{kPa}$ 、過圧密状態供試体を $\sigma'_v=34.3\text{kPa}$ とした。载荷はひずみ速度一定条件で行い、ひずみ速度は軸ひずみが $0.1\%/min$ とした。

#### (4) 温度別標準圧密試験

加熱ドレーン改良地盤内には、半径方向に温度勾配が生じることが予想される。そこで、作製した人工粘土地盤に対し加熱される温度を想定した温度別標準圧密試験を行い、高温環境による圧密特性の変化について検討した。試験機には、通常の標準圧密試験機を図-2に示すように改良し、粘土外周面の温度が所定の温度となるようにした。設定温度は、加熱ドレーン圧密時の温度境界条件から $25^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $55^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$ とし、室温条件( $25^\circ\text{C}$ )の場合は標準圧密試験機をそのまま使用した。

### 3. 試験結果と考察

#### (1) 加熱ドレーン圧密地盤の力学特性

##### a) 沈下量-時間関係

図-3は、加熱ドレーン圧密実験における沈下量の経時的变化を示したものである。比較のため、ドレーンを加熱しない場合の結果を室温ドレーンとして示した。これを見ると、ドレーン加熱によって、室温時と比べ、90%圧密終了時間は約半分に短縮され、全沈下量も約15%増大する傾向にあり、加熱ドレーン改良地盤は、圧密が促進される傾向にあることがわかる。

各ドレーン圧密時の二次圧密速度 $C_\alpha$ を以下の関係式を用いてそれぞれ求めてみた。

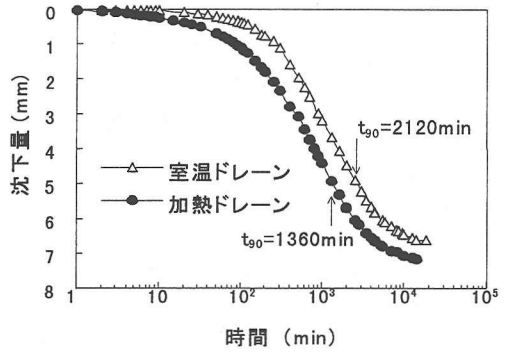


図-3 沈下量の経時的变化

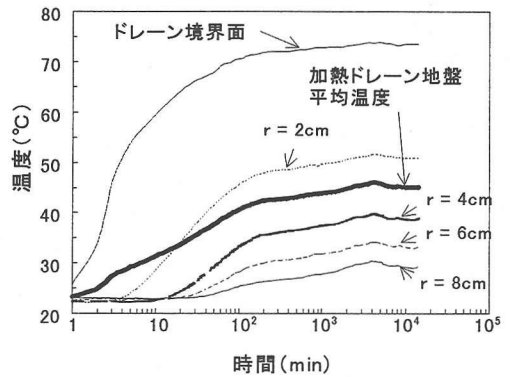


図-4 地中温度の経時的变化

$$C_\alpha = \Delta \varepsilon / \Delta \log t \quad (1)$$

$C_\alpha$ は過圧密領域・正規圧密領域を問わず、圧縮指数 $C_c$ と一義的な関係があり、通常の粘性土ではほぼ $C_\alpha/C_c = 0.05 \pm 0.02$ という関係が成り立つ<sup>6)</sup>とされており、二次圧密速度の大きい粘土は圧縮性が大きいといえる。ドレーン圧密時の各 $C_\alpha$ を比較してみると、非加熱時に比べ、加熱ドレーンは約2倍強の値を示しており、加熱ドレーン圧密時においては、同じ圧密圧力におけるドレーン非加熱時に比べ一次圧密のみならず二次圧密も促進されているといえる。

これらの圧密促進度を一次圧密終了時間、沈下量、二次圧密速度の関係で示すと、以下のように表わされる。

- ・ 90%圧密終了時間( $\sqrt{t}$ 法) :  $t_{90}(\text{高温}) \doteq 0.5 \cdot t_{90}(\text{室温})$
- ・ 一次圧密終了時間(3t法) :  $t_f(\text{高温}) \doteq 0.8 \cdot t_f(\text{室温})$
- ・ 体積変化量 :  $\Delta e(\text{高温}) \doteq 1.15 \cdot \Delta e(\text{室温})$
- ・ 二次圧密速度 :  $C_\alpha(\text{高温}) \doteq 2.0 \cdot C_\alpha(\text{室温})$

##### b) 温度-時間関係

図-4は地盤内温度の経時的变化を示したものである。これを見ると、改良地盤はドレーン近傍から徐々に加熱

され、定常状態においては地盤内で異なる温度条件下で圧密されていることがわかる。

(2) 圧密終了後の改良地盤内における特性分布

図-5 にドレーン圧密終了後の改良地盤の諸特性の半径方向分布を示す。間隙比やひずみは、試料中央高さにおける含水比に基づいて算出した。

a) 間隙比分布

飽和土 ( $S_r=100\%$ ) の間隙比  $e$  は、含水比  $w$ 、土粒子密度  $\rho_s$ 、水の密度  $\rho_w$  を用いて、以下の式で表わされる。

$$e = \frac{w}{100} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2)$$

間隙比分布形状を見ると、ドレーンの温度が高いほど、また、排水面に近いほど間隙比が低下している。また、加熱時には間隙比が大きく変化するゾーンが半径方向に拡大している。これは、加熱により圧密が促進される領域が半径方向に拡大することを示し、加熱ドレーン近傍ほど圧密が促進されることを示している。つまり、地盤内に生じる温度勾配がもたらす透水性の変化が主要因となり、非加熱時に比べ圧密が加速される領域が半径方向に広がるものと思われる。

一方、同じ材料の粘土であれば、通常、圧密応力が増加するほど間隙比が減少する。よって、粘土地盤内に間隙比の変化が生じるということは、地盤内に見かけ上の圧密応力の分担現象が起こっていることを意味している。上載荷重が一定であることを考慮すれば、見かけ上の応力分担による間隙比の減少は、二次圧密効果による間隙比の減少として捉えることができ、加熱ドレーン圧密地盤内では、非加熱時に比べドレーン近傍において高い二次圧密効果が生じているものと思われる。

間隙比の減少による見かけ上の応力分担の比すなわち過圧密比を、ドレーン圧密前の人工地盤に対して行った標準圧密試験から得られた  $e-\log p$  曲線から推定すると、排水面側には、非排水面側に対して、非加熱時で約 2.1 倍、加熱時で約 3.5 倍の応力に相当する過圧密効果が発生したことになる。また、ドレーン加熱時には、室温時に比べ、約 1.7 倍の応力に相当する過圧密効果が排水面側粘土に生じていることになる。

b) ひずみ分布

ドレーン圧密後の体積ひずみ  $\varepsilon_v$ 、および半径方向ひずみ  $\varepsilon_r$  を、間隙比および鉛直ひずみ  $\varepsilon_z$  (実測値) を用い、円周方向ひずみ  $\varepsilon_t = \varepsilon_r$  として、以下に示す式を用い算出した。なお、 $\varepsilon_z$ 、 $\varepsilon_r$  は縮少を正とし、 $\varepsilon_v$  は体積減少を正とした。

$$\varepsilon_v(\%) = \ln \left( \frac{1+e_0}{1+e} \right) \times 100 \quad (3)$$

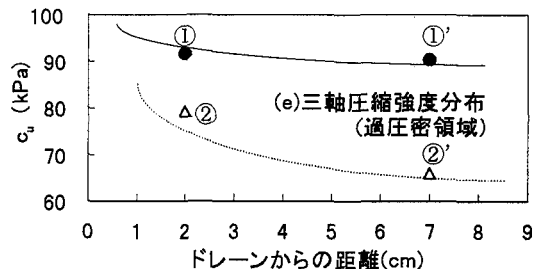
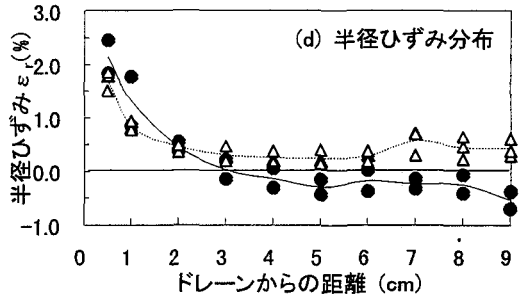
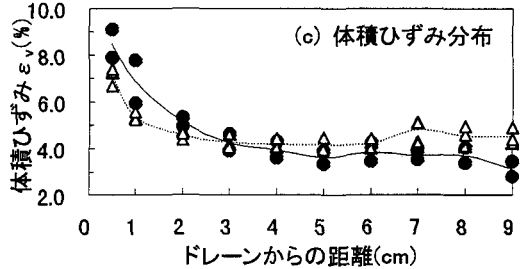
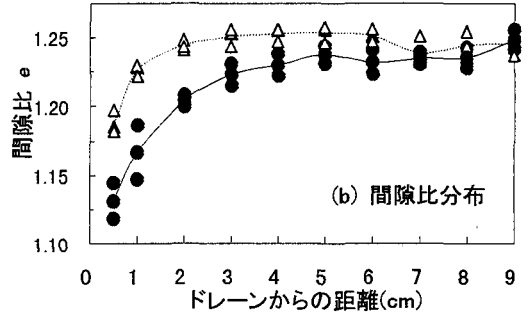
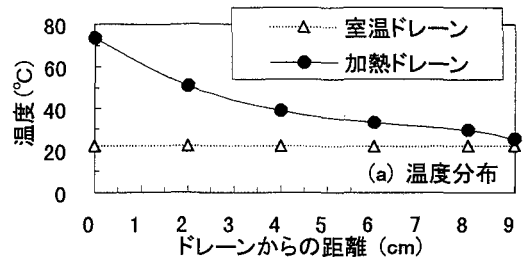


図-5 圧密終了後の改良地盤内諸特性分布図

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_v - \varepsilon_z) \quad (4)$$

ひずみ分布を見ると、両ひずみとも排水面側のひずみが大きく、排水面から遠ざかるほど小さくなっている。また、半径ひずみについては、半径方向に対して一定値である  $\varepsilon_r$  が関与するため、室温ドレーンでは全て正の半径ひずみが生じているが、高温ドレーンは、排水面から遠ざかるに従い、負の半径ひずみが生じていることがわかる。半径ひずみの非一様分布は、半径方向応力に相当する過圧密効果が半径方向に非一様に分布することを示しているものと思われる。

### c) 非排水せん断強度分布

図-6(a) は正規圧密領域と考えられる  $\sigma'_c = 68.6 \text{ kPa}$  で、図-6(b) は過圧密領域と考えられる  $\sigma'_c = 34.3 \text{ kPa}$  で行った CIU 試験結果を軸差応力と軸ひずみの関係で示したものである。これを見ると、正規圧密領域ではそれほど挙動に明確な差が見られないが、過圧密領域では、ドレーン温度が高いほど、また、排水面に近い試料ほどピーク強度が大きく、かつ低ひずみ領域での弾性係数が大きくなっていることがわかる。含水比試験結果の項でも述べたが、この現象は、ドレーンの温度が高いほど、また、排水面に近い粘土ほど、間隙水圧の消散が促進され、一次圧密が早期に終了し、いわゆる二次圧密の卓越した高位な骨格構造が形成されていることを示していると思われる。

この過圧密領域における非排水せん断強度の半径方向分布を示したものが前出の図-5(a) である。通常、過圧密領域においては、粘土が持つ固有の骨格構造が保持され、構造の違いがせん断強度に大きく影響する。このことから、最も高温状態となる加熱ドレーン近傍の粘土ほど高位な骨格構造を有しているものと思われる。

### (3) 温度と圧密特性との関係

ドレーン圧密時においては、粘土は大部分正規圧密領域で圧密されていることになる。そこで、正規圧密領域における圧密係数および透水係数の温度依存性について検討した。

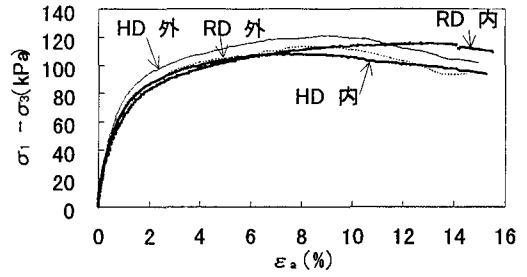
#### a) 圧密係数の温度依存性

図-7 は、温度別標準圧密試験結果から得られた、正規圧密領域における圧密係数  $c_v$  ( $\text{cm}^2/\text{day}$ ) と温度  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) の関係を示したものである。圧密係数  $c_v$  は高温時ほど大きく、温度と圧密係数の比  $c_v/T$  を平均圧密圧力  $p$  ( $\text{kPa}$ ) についてまとめると、以下の関係式を得る。

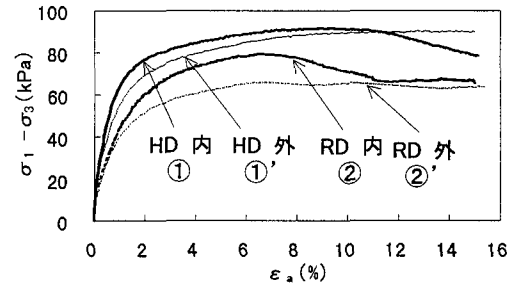
$$\frac{c_v}{T} = 0.0001p + 1 \quad (5)$$

#### b) 透水係数の温度依存性

図-8 は、温度別標準圧密試験結果から得られた、正規圧密領域における各温度の間隙比と透水係数の関係



(a) 正規圧密領域



(b) 過圧密領域

図-6 CIU 試験における軸差応力-軸ひずみ関係

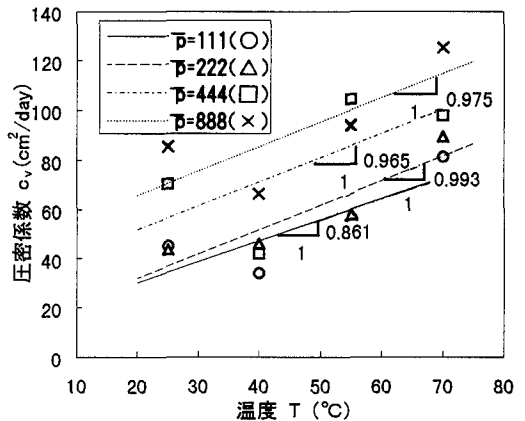


図-7 圧密係数と温度との関係

を示したものである。この結果は荻島他<sup>7)</sup>が行った直接透水試験から得られた各温度の  $e$ - $\log k$  関係とほぼ同様の傾向を示しており、標準圧密試験から間接的に算出した透水係数を、実際の圧密挙動を支配する透水係数として評価してもよいものと考えられる。

透水係数は、間隙比が大きく温度が高いほど増大する傾向を示し、 $e$ - $\log k$  関係における傾き  $C_k$  は温度によらずほぼ一定であることがわかる。このような  $e$ - $\log k$  関係は、Taylor の概念をもとに以下のように表わすことができる。

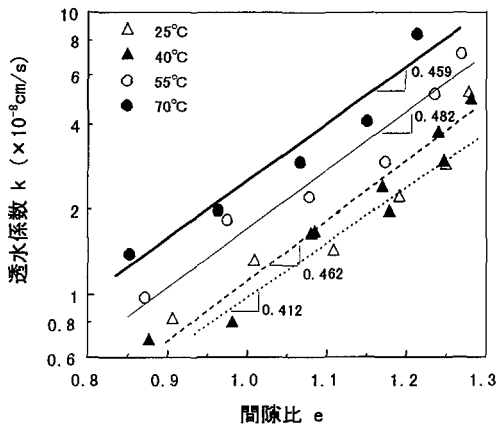


図-8 e-logk 関係に与える温度の影響

$$k = k_0(T) \cdot \exp\left\{\frac{(e - e_0)}{0.434C_k}\right\} = k_0(T) \cdot \exp\left\{\frac{(e - e_0)}{\lambda_k}\right\} \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_k = 0.434C_k$  である。温度によって各空隙比に対する透水係数の値が異なるという特性は、上式における  $k_0(T)$  に温度依存性を定義することによって表わされると思われる。村田他<sup>9)</sup>は、この  $k_0$  の値を Cozeny-Carman の式における空隙比の項を除いたものと同等と評価し、以下のような関係式が成り立つものと仮定している。

$$k_0(T) = C' \cdot \frac{\gamma_w(T)}{\eta(T)} = \frac{C' \cdot g}{\nu(T)} \quad (7)$$

ここで、 $C' = C \times D_s^2$  であり、土粒子の大きさ ( $D_s$ ) によって決まる [L<sup>2</sup>] のディメンションを持つ定数である。C は土粒子の配列に関する係数であるので、C' は土の構造を反映した係数であると言える。また  $\gamma_w(T)$  は水の単位体積重量、 $\eta(T)$  は水の粘性係数、 $g$  は重力加速度、 $\nu(T)$  は水の動粘性係数である。

式(6)の  $k_0$  値に式(7)を代入することで、温度依存性を考慮した空隙比と透水係数の関係として次式を得る。

$$k = k_0(T) \cdot \exp\left\{\frac{(e - e_0)}{\lambda_k}\right\} = C' \cdot \frac{g}{\nu(T)} \cdot \exp\left\{\frac{(e - e_0)}{\lambda_k}\right\} \quad (8)$$

このように、温度と圧密特性の間には、それぞれ一義的な関係が存在する。加熱ドレーン圧密のような高温環境下での粘土の圧密変形は、上式に示したような温度に依存する圧密係数や透水性の変化に大きく支配されるものと思われる。

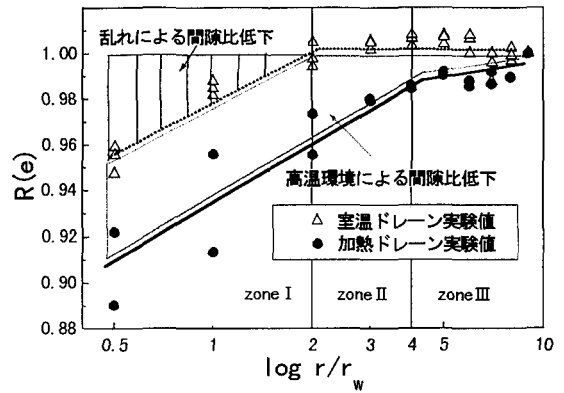


図-9 空隙比低下率による領域化

#### 4. 中空円筒圧密モデルによる検討

##### (1) 加熱ドレーン改良地盤内の領域化

以上述べたように、加熱ドレーン圧密地盤では、加熱される温度により、圧密過程の異なる領域が存在するものと思われる。そこで、加熱ドレーン圧密地盤内を、加熱される温度を中心に、圧密係数および e-logk 関係に着目して圧密地盤内を領域化することにした。

図-9 は、縦軸に空隙比低下率  $R(e)$ 、横軸にドレーン径で正規化した半径を対数表示したものである。 $R(e)$  は、非排水面側の空隙比を 1 とした時の各領域の空隙比低下率を示したものである。尾上<sup>9)</sup>は、室温条件における  $R(e) - \log(r/r_w)$  関係において傾きを持つ領域が、ドレーン打設による乱れなどにより空隙比が低下する領域と考えている。よって、室温ドレーン圧密地盤において傾きを有する領域は、ドレーン打設等の乱れにより空隙比が低下する領域であると考えられる。これに対し、加熱ドレーン圧密地盤では、空隙比の低下領域が半径方向に拡大していることがわかる。温度条件以外の境界条件が非加熱時と同じであることから、この空隙比の低下は高温環境により生じるものと思われる。

図-9 における関係と加熱される温度を考慮すれば、各領域の空隙比の変化は、先ほど示した温度別の e-logk 関係に従うものと予想されることから、加熱ドレーン圧密地盤内には、図-10 に示すような、温度および e-logk 関係の異なる 3 つの領域が存在するものと考えられる。

最も排水面に近い zone I は、正規化半径 2 以内に存在し、50~70°C に加熱され、空隙比の変化に乱れと高温環境が作用すると思われる領域であり、正規化半径において 2~4 の粘土中間部に位置する zone II は 40~50°C に加熱され、空隙比の変化に高温環境が影響すると思われる領域、正規化半径 4 以上の非排水面側に存在する

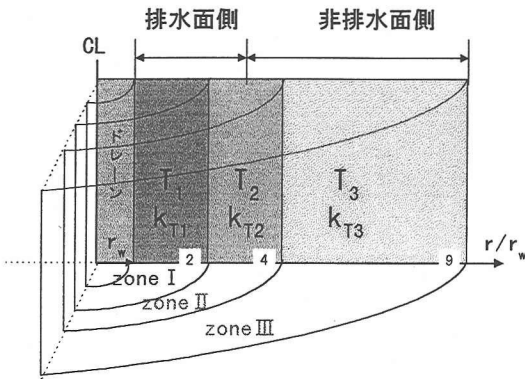


図-10 加熱ドレーン地盤内の領域図

zone IIIは、間隙比の変化に高温環境が作用するが zone IIほどその影響が大きくない領域、という3つの領域が存在するものと思われる。

(2) 中空円筒圧密モデル

領域化した加熱ドレーン改良地盤に、Barron の中空円筒圧密モデルを拡張した2領域モデルを適用し、各領域の圧密挙動を検討してみることにする。粘土内に異なる圧密領域が存在するような圧密問題については、Hansbo<sup>10)</sup> や尾上他<sup>11)</sup> によって研究がなされてきている。Hansbo は、ドレーン打設によって生じる攪乱帯を考慮し、ドレーン圧密地盤を図-11 のような2つの領域に分類し、Barron の中空円筒圧密モデルを拡張している。Hansbo の考え方によれば、平均圧密度Uは、各領域の圧密係数  $c_w$ 、透水係数  $k_h$  および領域半径比を用いて以下のような式によって表わされる。

$$U = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{\mu_{sw}}\right) = 1 - \exp\left(\frac{-8}{\mu_{sw}} \cdot \frac{c_h \cdot t}{r_e^2}\right) \quad (9)$$

ここで、

$$\mu_{sw} = \mu_s + \mu_w$$

$$\begin{aligned} \mu_s &= \frac{n^2}{n^2 - 1} \left( \ln \frac{n}{s} + \eta \cdot \ln s - \frac{3}{4} \right) \\ &+ \frac{s^2}{n^2 - 1} \left( 1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) \\ &+ \eta \cdot \frac{s^2 - 1}{n^2 - 1} \left( \frac{s^2 + 1}{4n^2} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$\mu_w = \pi z(2l - z) + \frac{k_h}{q_w} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\eta = \frac{k_h}{k_{hs}}, \quad q_w = \pi r_w^2 k_w, \quad n = \frac{r_e}{r_w}, \quad s = \frac{r_s}{r_w}$$

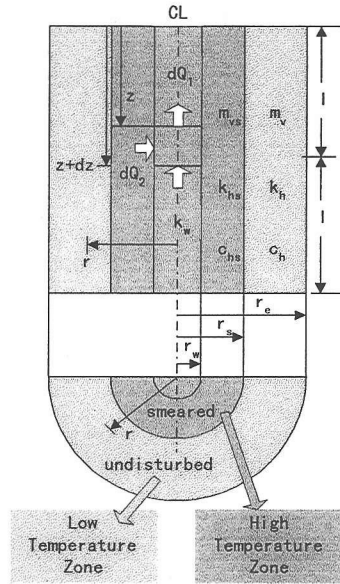


図-11 2領域モデルの適用

式(9)は、Barron の圧密方程式と同形である。つまり、Barron の圧密方程式において、ドレーン圧密地盤内に透水係数の異なる攪乱領域、不攪乱領域の2つの領域を設定したものとして捉えることができる。

そこで、この攪乱領域を「加熱により透水係数に変化する領域」と置き換えることによって、同様の考え方をを用いて加熱圧密領域を有するドレーン圧密問題を検討することができると思われる。すなわち、図-10 で示した各領域に温度依存性を考慮した圧密係数および透水係数と間隙比の関係を適用させることにより、異なる温度により圧密される各領域の挙動を説明できると考え、排水面側および非排水面側においてこの圧密モデルを適用し、その挙動を検討してみることにした。

(3) 検討結果と考察

図-12 は、中空円筒圧密モデルにより検討した結果を圧密度と時間の関係として示したものである。これを見ると、解析した地盤の平均沈下量は実験値をうまく説明していることがわかる。この結果は、言い換えれば、加熱ドレーン圧密地盤内には、大きく分けて排水面側と非排水面側に、さらにその内部を形成する圧密速度の異なる3つの領域が存在することを示しており、温度と透水係数の関数として地盤をモデル化することによって、各領域の挙動を考慮した加熱ドレーン圧密挙動を簡易的に説明することができるといえる。また、排水面側の粘土は非排水面側の粘土に比べ早期に一次圧密が終了し、加熱ドレーン圧密地盤内に圧密速度の異なる領域が存在する

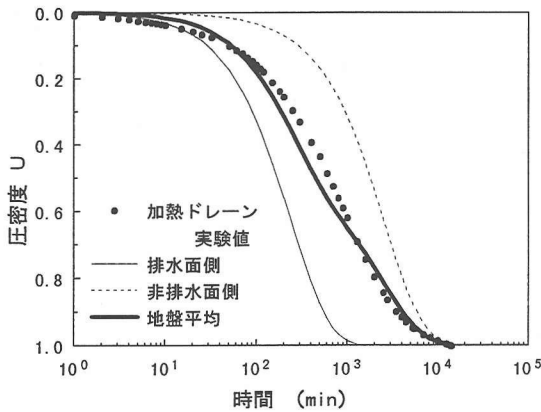


図-12 圧密度-時間関係における解析結果と実験値との比較

ことがわかる。加熱ドレーン圧密においては、この圧密速度の差が顕著となり、圧密速度の異なる領域が形成され、圧密後の不均一な体積変化を生じさせる原因になっていると思われる。

### 5. 応力-浸透-熱移動連成解析による検討

加熱ドレーン圧密地盤内の圧密過程における粘土の内部挙動、および中空円筒圧密モデルによって示された地盤内の各領域の存在と図-10 で示した圧密モデルの妥当性を評価するため、応力-浸透-熱移動連成解析手法を用いて検討した。

応力-浸透-熱移動連成解析手法は、藤木他<sup>1,2)</sup>や大西他<sup>1,3)</sup>などによって示されている。藤木他は、圧密現象を応力変形問題と浸透問題の連成問題として定式化したBiotの圧密方程式で表すことができるとし、このBiotの圧密方程式にさらに熱問題を組み入れることによって表わされるものとしている。そして、土の構成則として関口・太田モデルを適用し、応力-浸透-熱移動連成問題における支配方程式を導いている。本解析もこれらの研究に従い、構成則に関口・太田モデルを適用し、以下に示す解析条件の下で実験のシミュレーションを行った。

#### (1) 計算モデル

解析に用いた有限要素分割モデルを図-13 に示す。解析は軸対象条件で行い、実験時と同様の境界条件を持たせるため、粘土の内周と外周の水平方向変位ならびに底面の鉛直方向変位を固定し、鉛直等ひずみ条件とした。排水面は粘土内周面（ドレーンとの境界面）のみとし、载荷は実験時と同様に瞬間载荷( $p=98\text{kPa}$ )とし、剛な载荷板を介して鉛直方向荷重のみを作用させた。解析に用いた材料定数を表-4 に示す。パラメーターは、飯塚他の

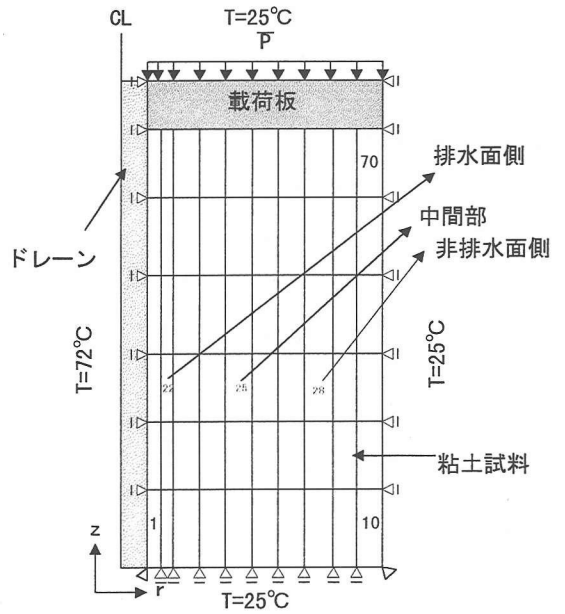


図-13 解析モデル

表-4 解析に用いたパラメータ

|                                      | HD                   | RD  |
|--------------------------------------|----------------------|---|
| 圧縮指数 $\lambda=0.434C_c$              |                      | 0.144   |
| 膨潤指数 $\kappa=0.434C_s$               |                      | 0.016   |
| $\sin \phi'$                         |                      | 0.488   |
| 限界状態パラメーター M                         |                      | 1.167   |
| 非可逆比 $\Lambda$                       |                      | 0.889   |
| ダイレイタンシー係数 D                         | 0.044                | 0.040   |
| ポアソン比 $\nu'$                         |                      | 0.34  |
| 初期間隙比 $e_i$                          | 1.320                | 1.344   |
| 先行圧密応力 $\sigma_{vm}'$ (kPa)          |                      | 49  |
| 圧密降伏応力に対する間隙比 $e_0$                  | 1.206                | 1.232   |
| 初期鉛直方向応力 $\sigma_{v1}'$ (kPa)        |                      | 2.94  |
| 静止土圧係数 $K_0$                         |                      | 0.51  |
| 過圧密領域における静止土圧係数 $K_1$                | 1.80                 | 1.76  |
| 二次圧縮指数 $\alpha$                      | $8.2 \times 10^{-4}$ | $3.6 \times 10^{-4}$  |
| 基準体積ひずみ速度 $v_0$ (1/s)                | $1.0 \times 10^{-8}$ | $2.8 \times 10^{-9}$  |
| 基準透水係数 $k_0$ (cm/s)                  | $5.9 \times 10^{-8}$ | $3.0 \times 10^{-8}$  |
| e-log k 関係の傾き $\lambda_k$            |                      | 0.454   |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |                      | 2.650   |
| 土粒子の熱線膨張率 $\alpha_s$ (1/K)           |                      | $8.0 \times 10^{-7}$  |
| 土粒子の比熱 $C_{ps}$ (J/g·K)              |                      | 0.84  |
| 土粒子の熱伝導率 $\kappa_s$ (J/s·cm·K)       |                      | 0.084   |
| 水の密度 $\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> )   |                      | 0.9998(0°C)~<br>0.9583(100°C)                                   |
| 水の粘性係数 $\eta$ (Pa·s)                 |                      | $1.792 \times 10^{-3}$ (0°C)~<br>$0.282 \times 10^{-3}$ (100°C) |
| 水の熱膨張率 $\beta_T$ (1/K)               |                      | $5.0 \times 10^{-4}$  |
| 水の比熱 $C_{pw}$ (J/g·K)                |                      | 4.2   |
| 水の熱伝導率 $\kappa_w$ (J/s·cm·K)         |                      | $5.92 \times 10^{-4}$   |



研究結果<sup>14)</sup>を参考にして、ドレーン圧密を行う前の基準試料における塑性指数や標準圧密試験結果を用いて決定した。パラメーターの決定に際して、解析の初期条件として、まず応力状態は、試料作成終了時、すなわち49kPaの荷重で一次元圧密終了時の状態とし、初期間隙比や $K_0$ 値等を算出した。透水係数 $k$ の決定に用いる圧密係数 $c_v$ は、各ドレーン圧密実験で得られた時間-沈下曲線を $\sqrt{t}$ 法で逆解析して求めた値を用いている。同様に、二次圧縮指数 $\alpha$ は、ドレーン圧密実験値から直接算出した二次圧密速度を $C_\alpha$ として、基準体積ひずみ速度 $v_0$ は、各ドレーン圧密実験で得られた時間-沈下曲線を $\sqrt{t}$ 法で逆解析して求めた90%圧密終了時間 $t_{90}$ を $t_c$ として算出した。

## (2) 解析結果と考察

図-14は、連成解析結果を圧密度と時間の関係について示したものである。これを見ると、領域化した中空円筒圧密モデルによる解析結果は連成解析結果とほぼ同様な挙動を示していることがわかる。これは、加熱ドレーン圧密地盤内には、図-10で領域化したZoneが存在することを示すと同時に、地盤を温度と透水係数の関数としてモデル化することによって、応力-浸透-熱移動問題における相互作用を間接的に表現しているものと判断できる。

また、図-15は解析結果による加熱ドレーン圧密中の各領域の応力経路図を示したものである。これを見ると、加熱ドレーン圧密地盤は、平均的に $K_0$ 変形しているにも関わらず、排水面側ほど $K_0$ より大きな応力比で圧密されているという傾向にあることがわかる。これは、加熱ドレーン改良地盤内で圧密過程が異なる領域が存在することを示すものであり、排水面側の粘土ほど大きな応力比に相当する過圧密効果が作用し、一次圧密が促進され、二次圧密が卓越したような挙動を示していると考えられる。

## 6. まとめ

本研究で得られた主要な知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 加熱ドレーン圧密地盤は非加熱時と比べ圧密が促進される。これは、地盤内に生じる温度勾配がもたらす透水性の変化により、非加熱時に比べ圧密が加速される領域が半径方向に拡大することに起因するものであり、この圧密速度の差が加熱ドレーン圧密変形挙動を支配すると思われる。
- (2) 加熱ドレーン圧密地盤は、平均的に $K_0$ 変形しているにも関わらず、排水面側ほど $K_0$ より大きな応力比で

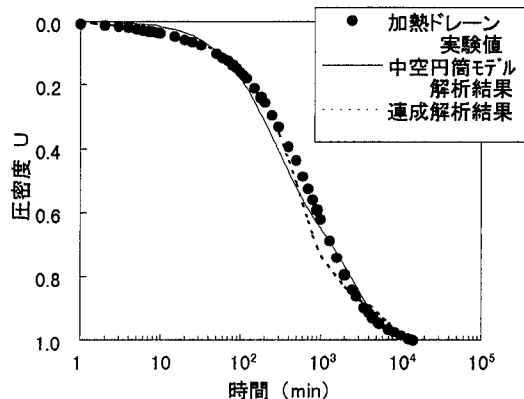


図-14 圧密度-時間関係における解析結果の比較

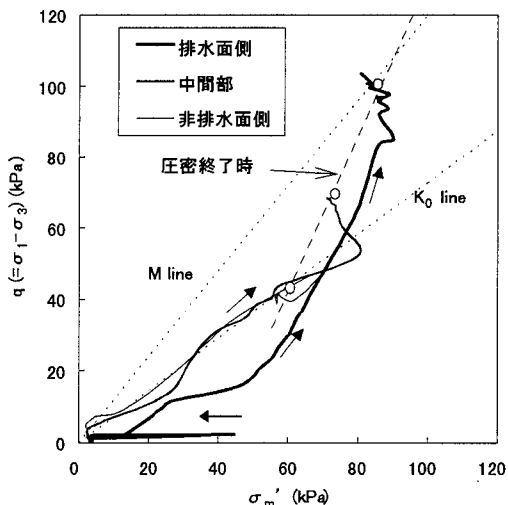


図-15 応力経路図

圧密されている。言い換えれば、排水面側において見かけ上の応力集中に相当する過圧密効果が加熱により促進されていることとなり、最終的に半径方向に間隙比やひずみの不均一な分布を生じさせる原因となる。

- (3) 加熱により生じる温度勾配により、圧密地盤内に圧密係数・透水係数の異なる領域が形成される。特に、排水面周辺では地盤内で最大の圧密係数・透水係数を生じるようになり、早期に一次圧密が終了し、二次圧密量の卓越した骨格構造を形成するようになる。
- (4) 圧密係数および透水係数と温度との間に、一義的な関係が成立する。加熱ドレーン圧密地盤内における各粘土の圧密挙動は、温度に依存する圧密係数および透水係数に支配される。
- (5) 加熱ドレーン圧密地盤を間隙比低下率に基づいて領

域化し、さらにそれを加熱により透水係数が変化する領域と変化しない領域に置きかえた2領域モデルを考えた(図-11)。この2領域中空円筒圧密モデルに、温度依存性を考慮した圧密係数や  $e$ - $\log k$  関係を適応させることにより、加熱ドレーン圧密挙動を適切に説明できることが示された。

本研究では、加熱ドレーン改良地盤で生じる高温環境が、周辺地盤の圧密挙動に大きな影響を与えることを示した。生石灰杭改良地盤のみならず、近年その使用が急増している CDM 工法による改良地盤においても、周辺地盤が高温環境に置かれるという報告もされてきており、今後、高温環境が生じる地盤の挙動解析には、高温環境による影響を積極的に取り入れていく必要があると思われる。

#### 参考文献

- 1) 清水恵助, 蝦名普吉, 斎藤征剛, 山本憲史: 東京湾におけるごみ埋立地盤の土質工学的研究(その7) —ごみ埋立地盤の地中温度について—, 第 23 回土質工学研究発表会概要集, pp.13~16, 1988.
- 2) Carl-Olof Morfeldt: Problems of underground disposal of waste, Bulletin IAEG/AIGL, NO.39, pp.8~33,1989.
- 3) 木次恭一, 下田正雄, 鈴木孝一, 竹田敏彦, 足立格一郎, 中島武道: 生石灰杭の発熱による改良地盤の温度上昇について, 第 26 回土質工学研究発表会概要集, pp.2075~2076,1991.
- 4) 清水正喜, 前野仁, 岩成敬介: 粘性土の高温下での圧密挙動, 第 25 回土質工学研究発表会概要集, pp.319~320, 1990.
- 5) 土田孝, 小林正樹, 水上純一: 高温再圧密による年代効果の再現性について, 第 24 回土質工学研究発表会概要集, pp.605~608, 1989.
- 6) Mesri,G. and Godlewski,P.M.: Time- and stress-compressibility interrelationship, J.Geotech.Eng., ASCE, 103, No.5, pp.417-430,1977.
- 7) 荻島達也, 東畑郁生, 古本一司: 粘土の透水係数・せん断強度に及ぼす温度の影響, 第 30 回土質工学研究発表会概要集, pp.1107~1110, 1995.
- 8) 村田均, 藤木広一: 加熱による圧密促進効果に関する実験的研究, 土木学会第 49 回年次学術講演会概要集, pp.266~267,1994.
- 9) 尾上篤生: バーチカルドレーン周辺の攪乱帯の透水係数について, 第 26 回土質工学研究発表会概要集, pp.2015~2016,1991.
- 10) Hansbo,S.: Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains, Proc.of the. 10th ICSMFE, Vol.3, pp.677~682, 1980.
- 11) Onoue,A.: Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear consideration, Soils and Foundations, Vol.28, No.4, pp.165~174,1988.
- 12) 藤木広一, 村田均: 加熱による圧密促進効果についての数値解析, 土木学会第 49 回年次学術講演会概要集, pp.268~269,1994.
- 13) 大西有三, 柴田裕章, 小林晃: 有限要素法による応力-浸透-熱移動連成問題解析手法, 土木学会論文集, 第 370 号, pp.151~158,1986.
- 14) Iizuka,A. and Ohta,H.: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, NO.3, pp.71~87, Sept. 1987.

(1997. 3. 11 受付)

## CONSOLIDATION MECHANISM OF CLAYEY GROUND UNDER HEATED-DRAIN CONSOLIDATION

Kakuichiro ADACHI and Mutsumi MURAKAMI

Soft clays treated by the lime columns undergo high-temperature consolidation for long period. However, the influence of high temperature on soft clay is not well studied yet.

In the present study, experimental study on the heated-drain consolidation is conducted by model equipment in the laboratory. Results of the experimental study are analysed by①radial-zoning of soft clay for heated-drain consolidation, and②coupled hydro-thermo-mechanical analysis. After the study, heated drain is found to accelerate the consolidation and create stronger structure of clays. In addition, clays near the drain are found to undergo secondary consolidation.