

高有機質土の二次圧密沈下促進に及ぼす 加熱の効果

及川 洋¹・荻野俊寛²

¹正会員 工博 秋田大学教授 工学資源学部土木環境工学科 (010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

²正会員 工修 秋田大学助手 工学資源学部土木環境工学科 (010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

本文は、高有機質土の二次圧密沈下促進に及ぼす加熱の効果について実験的検討を行ったもので、高有機質土も加熱されるとその二次圧密は促進され、沈下量は大きく増大すること、その程度は無機質粘性土に比べて桁違いに大きいこと、加熱後に試料温度を元に戻すことによって二次圧密沈下は著しく低減されること、などが示されている。

Key Words: peat, secondary compression, heating, promotion of consolidation

1. はじめに

Edil and Fox¹⁾は、二次圧密中の高有機質土を加熱するとその沈下は大きく促進することを実験的に明らかにした上で、地盤を加熱することはプレローディング工法の工期短縮に極めて有効であることを示している。二次圧密沈下が加熱によって促進することは無機質粘性土においては比較的早くから知られており、現在でも多くの研究がなされている^{2), 3)}。しかし、高有機質土の二次圧密沈下促進に及ぼす加熱の効果を調べた研究は著者らの知る限りでは Edil らの研究のみである。彼らは、単位加熱温度当たりのひずみ速度の増分は加熱温度や圧密圧力の大きさには無関係であること、加熱後に試料温度を元に戻すことによって高有機質土特有の顕著な二次圧密沈下は著しく低減することなど、極めて有益な成果を報告している。しかし、加熱によって二次圧密沈下がどれほど促進されるかの基本的事項については検討していない。

本研究は加熱による高有機質土の二次圧密沈下の促進量や、加熱中の沈下と時間の関係、冷却後の沈下挙動などについて若干の実験的検討を行ったものである。

2. 試料および実験方法

実験に用いた試料は秋田市郊外から採取した高有機質土で、その物性は自然含水比 $\approx 509\%-577\%$ 、有機物含有量(強熱減量値) $\approx 50.3\%-51.9\%$ 、土粒子密度 ≈ 1.84

1.92g/cm^3 、分解度(水洗法) $\approx 74.3\%$ である。

実験においては供試体の一様性および再現性を得るため、採取試料は多量の含水比のもとで練り返され、 19.6kPa の圧力で48時間一次的に予圧密したものから直径6cm、高さ2cmの供試体を切り出している。

実験は通常の標準圧密試験機を用いたものであるが、試験中の供試体温度をコントロールできるように、圧密容器はステンレス製の水槽に入れてある。水槽内の水温は自動温度調整器の付いたヒーターとクーラーの組み合わせで $5^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ の範囲で任意にコントロールできる。その精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ である。

行った実験は次の2種類である。

実験A：二次圧密中の供試体を加熱する圧密試験。

まず、作成した供試体と圧密リングおよび載荷板のなじみをよくするため、全ての供試体を 20°C の水槽内で再び $p_{\sigma}=19.6\text{kPa}$ の圧力で24時間再圧密し、この状態を実験開始時の供試体とした。これらの供試体にプレロード相当荷重として所定の荷重(以下、単に載荷重 Δp と記す)を載荷し、24時間放置後に供試体温度を 40°C あるいは 60°C 、 80°C に上昇させ48時間の沈下挙動を測定した。その後、供試体温度を再び 20°C に戻し、更に一週間の沈下挙動を測定した。このような実験を載荷重 $\Delta p=0\text{ kPa}$ 、 19.6kPa 、 39.2kPa および 58.8kPa の4種類のもとで行った。

なお、水槽内の水温を 20°C から 40°C まで上昇させるのに約10分、 60°C で約20分、 80°C で約40分を必要としていた。供試体温度もほぼこれらの時間で所定の温度に達

していることは後節に示す。加熱後の供試体の冷却は水槽内の水を手早く入れ替えることで行っている。

実験B：定温供試体に対する標準圧密試験。

供試体温度を 20°C、40°C、60°Cあるいは 80°Cの一定に保った状態での標準圧密試験である。すなわち、供試体と圧密リングおよび載荷板のなじみをよくするための再圧密過程($p_0=19.6\text{kPa}$ 、再圧密時間:24 時間)をそれぞれ 20°C、40°C、60°Cおよび 80°Cの水槽内で行い、実験開始時の供試体とした。その後、荷重を一旦除荷し、それぞれの供試体温度を保ったまま通常の 24 時間段階荷重の圧密試験を行った。

3. 実験結果と考察

(1)加熱および冷却による沈下曲線の変化

実験A(二次圧密中の供試体を加熱する圧密試験)の結果の一例として、供試体温度 $T=20^\circ\text{C}$ 、載荷重 $\Delta p=39.2\text{kPa}$ (圧密圧力 $p=58.8\text{kPa}$) のもとで二次圧密状態にある供試体を 40°C、60°Cおよび 80°Cに加熱した場合の沈下曲線(圧縮ひずみ-時間曲線)を図-1に示した。図には加熱しない供試体の沈下曲線も同時に示してある。図に見られるように、加熱によって圧縮ひずみは急激に増大し、その程度は加熱温度が高いものほど大きい。図において、40°C、60°Cおよび 80°Cで 48 時間加熱後の供試体の沈下量は加熱しない供試体の沈下が図に見られる速度勾配をもって以後も進行するとした場合のおおよそ 6 年後、1 万年後および 3 億年後の沈下量に相当する。

加熱によって、なぜ、圧縮ひずみがこれほど増大するのかについては必ずしも明確になっているわけではない。加熱による含有間隙水の粘性の低下、土粒子間吸着水層の減少、およびそれらに伴う土粒子間結合力の低下などが大きな要因として考えられている³⁾。しかし、これだけの要因で図に見られるような圧縮ひずみの増大が本当に生ずるのかも捨てがたい疑問である。これに関連した興味深いデータとして、Edil らは、加熱によって供試体内には相応の過剰間隙水圧が発生することを報告している。彼らは、加熱によってなぜ過剰間隙水圧が発生するのか、その消散が以後の圧縮ひずみの増大にどれほど寄与しているのかなどについては言及していないが、加熱による過剰間隙水圧の発生およびその消散も加熱による圧縮ひずみの増大に大きく寄与しているものと推定される。メカニズムの解明は今後の検討課題である。

ともあれ、図-1に見られるように、用いた高有機質土も加熱されるとその二次圧密沈下は大きく促進する。この結果は Middleton peat (米国) に対する Edil らの実験結果および無機質粘性土に対する多くの研究者の実験結果と定性的に一致する。

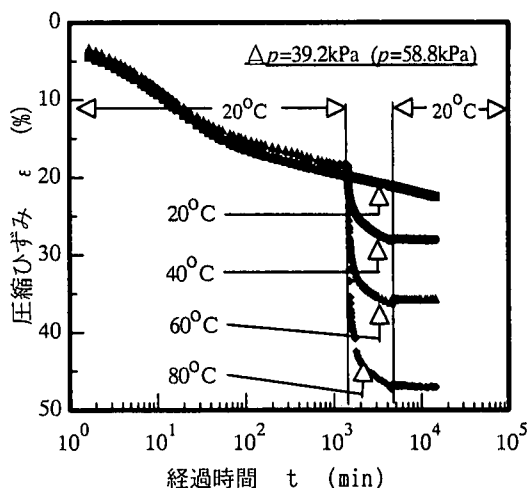


図-1 加熱および冷却による沈下曲線の変化

ところで、無機質粘性土の場合、供試体温度が一定になった後の沈下速度(二次圧密係数)は加熱温度によらずほぼ一定で、加熱しない供試体の沈下速度にほぼ等しくなるといわれている^{3),4)}。本実験では加熱温度 40°C、60°Cおよび 80°Cに対してそれぞれ約 10 分後、約 20 分後および約 40 分後に供試体温度は一定になっているはずであるから、これらの時間後の沈下曲線は加熱しない供試体の沈下曲線と平行にならなければならないことになる。しかし、図-1に見られるように、用いた高有機質土の場合、供試体温度が既に一定になっていると思われる時間が過ぎててもなお大きな沈下速度を示している。Edil らも 30 分以内に供試体温度を一定にできる装置を用いて Peat 供試体を一週間加熱した沈下曲線を示しているが、加熱後一週間が過ぎててもその沈下速度は加熱しない供試体の沈下速度より遙かに大きい。すなわち、無機質粘性土、高有機質土ともに加熱によって沈下は促進するものの、加熱中の沈下挙動は多少異なるようである。本実験では 48 時間の加熱後に供試体温度を 20°Cに戻している。図-1にはその際の僅かな膨張が見られる。しかし、その後の再沈下は殆ど見られない。すなわち、Edil らも指摘するように、高有機質土特有の長期にわたる顕著な二次圧密沈下は加熱後の試料温度を元に戻すことによってほぼゼロにまで低減できる可能性が図-1には示唆されている。冷却後の沈下挙動に関しては後節で再度検討する。

(2)加熱による沈下の促進量

上記したように、高有機質土も加熱されるとその二次圧密は促進され、沈下量は大きく増大する。しかし、これを定量的に検討した報告例は無い。一方、無機質粘性

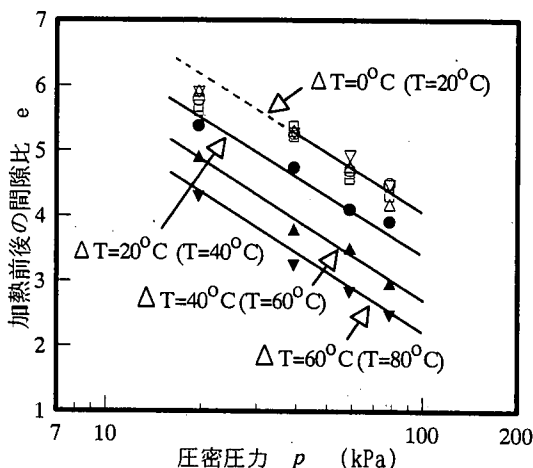


図-2 加熱前後の間隙比

土の場合、加熱による温度の上昇量 ΔT とそれに伴う間隙比の減少量 Δe は圧密圧力 p の大きさには無関係に次式で表されることが知られている^{2), 5), 6)}。

$$\Delta e = C_\beta \cdot \Delta T \quad (1)$$

ここに、 C_β は温度係数(単位: $1/^\circ\text{C}$)と呼ばれ、上³⁾はカオリン粘土に対して0.00077、有明粘土に対して0.00086、清水・神戸⁵⁾は藤の森粘土に対して0.00084、また、藤原⁶⁾は沖縄粘土に対して0.00039などの値を報告している。ここでは、式(1)が高有機質土に対しても成立するのか、成立するとした場合の温度係数はいかなる値を示すのかなどについて検討する。

図-2は実験Aにおけるデータで、各圧密圧力のもとでの加熱前と加熱後の間隙比をそれぞれの圧密圧力に対してプロットしたものである。図によれば、 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ の $e\text{-log } p$ 関係は p が小さい範囲でカーブしている様子が見え、全体を一本の直線で近似することは困難であるが、 p が大きい範囲($p > 39.2\text{ kPa}$)は一本の直線で近似してよいであろう。一方、加熱後の $e\text{-log } p$ 関係は加熱温度ごとに一本の直線で近似でき、加熱温度が高いものほど下方に位置している。また、それらは加熱しない供試体の $e\text{-log } p$ 関係の直線部分とほぼ平行である。これらの線が平行であれば温度の上昇量 ΔT とそれに伴う間隙比の減少量 Δe は圧密圧力の大きさには無関係となることはいうまでもない。すなわち、図-2はある圧力以上の範囲で高有機質土にも式(1)が適用できる可能性を示唆している。

さて、図-2から各圧密圧力のもとでの ΔT と Δe を読みとり、両者の関係をプロットしたのが図-3である。先にも述べたように、本実験における加熱時間は48時間であり、この間にも加熱しない供試体の間隙比は減少す

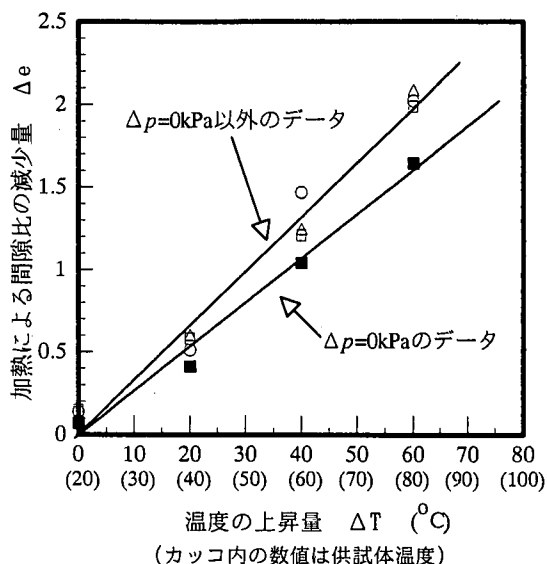


図-3 ΔT と Δe の関係

る。そのため、図には加熱温度 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ($T=20^\circ\text{C}$)軸にも間隙比の減少量があらわれている。したがって、 ΔT と Δe の関係は本来 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 軸上に切片を持つ関係式で表されるべきものと思われる。しかし、図に見られるように、この量(切片)は比較的小さい。そこで、実用上の立場からこれを無視すると、図に見られるように高有機質土においても式(1)は成り立つ。

ところで、図-3に見られる ΔT と Δe の直線関係は、載荷重 $\Delta p=0\text{ kPa}$ のものだけが他のものと明らかに異なっている。この理由は次節に述べるが、直線関係の勾配としての温度係数 C_β (単位: $1/^\circ\text{C}$)として、載荷重 $\Delta p=0\text{ kPa}$ の供試体に対して0.027、その他の Δp をもつ供試体に対して0.030が得られた。Middleton peatに対するEdillらの研究においては ΔT と Δe の関係は議論されていないが、彼らが示した図においては、温度を 14°C から 60°C に上げた場合、間隙比が4.25から2.5まで減少したデータを読みとることができる。この場合 $C_\beta=0.038$ となり、本実験で用いた高有機質土の C_β 値と近似した値が得られる。これらの値($C_\beta=0.027\sim 0.038$)は無機質粘性土に対して報告されている値($C_\beta=0.00039\sim 0.00086$)に比べて桁違いに大きい。すなわち、無機質粘性土より高有機質土の方が加熱の効果を受けやすいといえる。

(3) 加熱の効果に及ぼす圧密圧力の影響

図-3に示したように、本実験に用いた高有機質土の温度係数 C_β は載荷重 $\Delta p=0\text{ kPa}$ ($p=19.6\text{ kPa}$)のものだけが他のものと明らかに異なっている。 $\Delta p=0\text{ kPa}$ の実験はブ

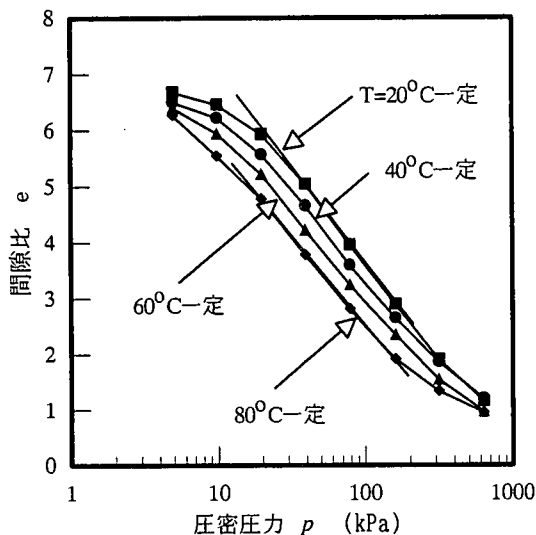


図-4 温度の異なる供試体の e - $\log p$ 曲線

レロード荷重が無い状態での地盤の加熱を想定したものであるが、以下ではこの結果の理由について検討するとともに、加熱の効果に及ぼす圧密圧力の影響について検討する。

図-4は実験B（定温供試体に対する標準圧密試験）から得られた e - $\log p$ 曲線群である。無機質粘性土に対する同様な実験によれば、高温供試体の e - $\log p$ 曲線ほど下方に位置し、その曲線は正規圧密領域において温度によらずほぼ平行になることが知られている。図-4においても、高温供試体の e - $\log p$ 曲線ほど下方に位置し、その曲線は過圧密領域と思われる領域では平行でないものの、正規圧密領域のある圧力範囲で温度によらずほぼ平行になっている。 e - $\log p$ 曲線が平行であれば ΔT と Δe の関係は圧密圧力の影響を受けないことは先にも述べたとおりである。すなわち、正規圧密領域における C_β は圧密圧力の影響を受けないが、過圧密領域における C_β は圧密圧力の影響を受けることになる。大石⁷⁾も無機質粘性土に対する実験において、加熱による間隙比の減少量は正規圧密土では圧密圧力に無関係に一定となるが、過圧密土では過圧密比に応じて小さくなることを報告している。本実験における載荷重 $\Delta p=0\text{kPa}$ ($p=19.6\text{kPa}$) の供試体は図-2あるいは図-4に見られるように僅かに過圧密領域に入っている。このことが図-3において載荷重 $\Delta p=0\text{kPa}$ の供試体の温度係数 C_β が他の Δp をもつ供試体の温度係数と異なった理由であると判断される。したがって、もし地盤が正規圧密状態であれば、 $\Delta p=0\text{kPa}$ の状態、すなわち、プレロード荷重の無い状態での地盤の加熱も、構造物施行前の地盤の事前圧密（プレローディング）としては極めて有効であることが推察される。

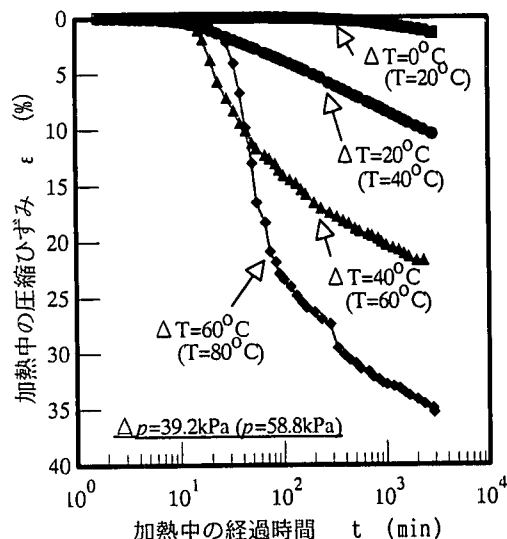


図-5 加熱中の沈下曲線

ところで、図-4においては、正規圧密領域でも圧密圧力の大きい範囲（図においては $p>100\text{kPa}$ ）において e - $\log p$ 曲線群の平行性が見られなくなっている。このような報告はこれまで皆無であり、同じ実験を何度か繰り返したが、結果は全く同じであった。しかし、この結果はむしろ当然であり、次のように説明されよう。すなわち、図-4に見られるように、用いた高有機質土の場合、温度 20°C の供試体の間隙比は圧密圧力の増大に応じて約1近くまで減少している。一方、 e - $\log p$ 曲線群がほぼ平行な圧力領域における温度 20°C と 80°C の供試体の間隙比の差は約1.3ある。したがって、この間隙比の差を保ったまま圧密圧力が大きくなった場合、温度 80°C の供試体の間隙比はマイナスになってしまう。これはあり得ないことであり、正規圧密領域でも圧密圧力の大きい領域において温度の異なる供試体の e - $\log p$ 曲線群の平行性がなくなった図-4の実験結果は十分理解できる。すなわち、式(1)には圧密圧力に関した適用範囲があること、また、あまり大きい載荷重のもとでの加熱はむしろその効果が薄れること、などが分かる。この適用圧力範囲は高有機質土の種類によっても異なることが予想され、その種類と圧力範囲については今後の検討課題である。

(4) 加熱中の沈下と時間の関係

ここでは加熱中の沈下と時間の関係について検討する。

図-5は、図-1に示した沈下曲線の中から加熱中の曲線のみを取り出したもので、圧縮ひずみは加熱開始時の供試体高さに対するひずみで表し、経過時間を加熱開始時からとっている。図によれば、加熱温度の低い曲線はクリープ的であるものの、加熱温度の高い曲線は逆S

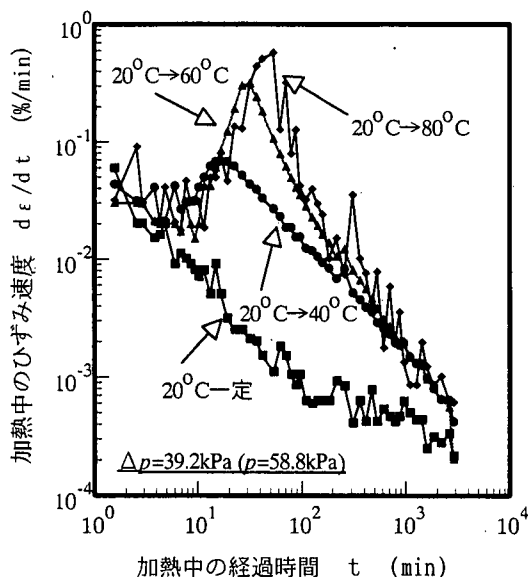


図-6 加熱中のひずみ速度の時間的変化

字型を示しており、Terzaghi の圧密理論を準用して圧密速度に関する情報が得られるように見える。しかし、加熱中の沈下と時間の関係に Terzaghi の圧密理論を準用することは困難であることを以下に示す。

図-6は加熱中のひずみ速度($d\epsilon/dt$)の時間的変化を示したもので、図-5のデータに対応している。図には加熱しない供試体の同じ時間帯でのひずみ速度の時間的変化も示されている。図によれば、いずれの供試体も加熱直前のひずみ速度は約0.04%/min前後であり、加熱しない場合には時間と共に直線的に減少していく。一方、加熱した場合のひずみ速度は加熱と同時に上昇し始め、加熱温度40°C、60°Cおよび80°Cに対してそれぞれ約15分後、約30分後および約55分後に速度の最大値を示し、以後は時間とともに減少する挙動を示している。Terzaghiの圧密理論では載荷直後のひずみ速度が最も大きく、以後は時間とともに減少するから、図に示されるような速度挙動を示す加熱中の沈下と時間の関係に Terzaghi の圧密理論を準用することは困難であることが分かる。加熱中の沈下の時間的推移をいかなる手段で予測するかは実用上重要な問題であるが、現時点では適切な手段は見あたらない。この件に関しても今後の研究課題と言わざるを得ない。

なお、図-6において、ひずみ速度が最大値を示した上記の各時間は水槽内の水温が設定値に達した時間より若干長い程度である。すなわち、加熱中の水槽内水温と供試体温度との時間的ずれは差ほど大きいものでないことが図-6からうかがえる。

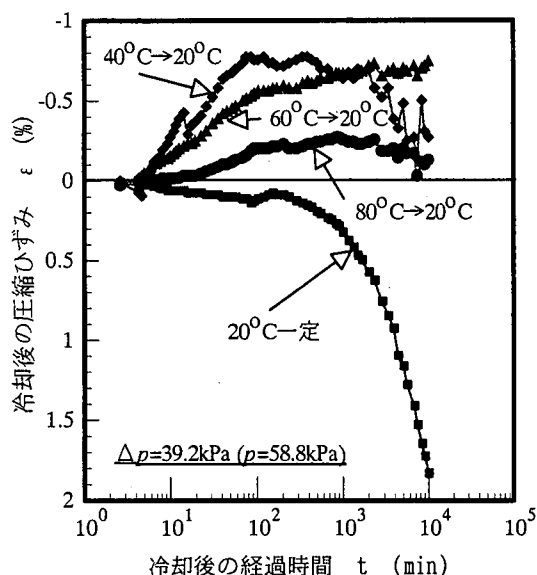


図-7 冷却後の沈下曲線

(5) 冷却後の沈下挙動

Edil らは 60°Cで一週間加熱した供試体を室温(14°C)まで冷却し、その状態で9週間の沈下挙動を調べている。彼らが示したデータには冷却時の膨張やその後の再沈下は全く認められない。本実験においても、図-1に示したように、供試体の冷却時に僅かな膨張は見られたものの、その後の再沈下は認められず、二次圧密係数としてはゼロである。すなわち、加熱後の試料を冷却することによって高有機質土特有な顕著な二次圧密沈下はほぼ完全に無くなったように見える。しかし、冷却後の沈下挙動を詳細に検討すると以下のようである。

すなわち、図-7は図-1に示した沈下曲線の中から冷却後の沈下曲線を拡大して示したもので、圧縮ひずみは冷却開始時の供試体高さに対するひずみで表し、経過時間を冷却開始時からとっている。図には加熱も冷却もしない供試体の同じ時間帯での沈下曲線も示してある。図によれば、冷却開始後、供試体は徐々に膨張し、ある経過時間後に再び沈下する挙動を見ることができる。すなわち、加熱後の冷却によっても高有機質土の二次圧密沈下は完全には阻止出来ないことが分かる。しかし、膨張量は1%以下と小さく、また、再沈下速度も、視覚的判断ではあるが、加熱も冷却も受けていない供試体の同じ時間帯での速度に比べて極めて小さい。すなわち、加熱後の試料を冷却することによって高有機質土の二次圧密沈下はかなり低減できる。しかし、その定量的評価のためには更に長期にわたる実験的検討が必要であり、この件に関しても今後の検討課題である。

4. まとめ

本研究は高有機質土の二次圧密沈下促進に及ぼす加熱の効果について実験的検討を行ったもので、主な結果をまとめると以下のようである。

- (1) 高有機質土も加熱されるとその二次圧密は促進され、沈下量は大きく増大する。
- (2) 加熱による温度の上昇量とそれに伴う間隙比の減少量の間には無機質粘性土と同様の直線式が認められ、直線式の勾配である温度係数(C_β)として0.030(正規圧密状態)が得られた。
- (3) この C_β 値は無機質粘性土に対して報告されている C_β 値(0.00039~0.00086)に比べて桁違いに大きかったことから、高有機質土の方が無機質粘性土より加熱の効果を受けやすいと結論された。
- (4) 沈下速度に関しては、80°Cで48時間加熱後の供試体の沈下量が加熱しない供試体の約3億年後の沈下量に相当するようなデータも得られた。
- (5) 加熱後の試料温度を元に戻すことによって高有機質土特有の長期にわたる二次圧密沈下は大幅に低減できる可能性が示唆された。

なお、地盤を広範囲に加熱することが現実問題として可能かどうかは、この種の研究を進める上では事前に検討しておくべき重要な課題である。加熱の行為は地盤の凍結工法の逆の行為であり、加熱の範囲を橋台下部やその周辺に限定すれば技術的な問題は無いと考えられる。問題は加熱の費用対効果であろう。その意味においても、加熱の効果を明らかにしておくことは意義あるものと判断される。例えば、プレロード荷重の無い状態での過圧

密土の圧密促進効果、あるいはプレロード荷重の載荷と同時に加熱した場合の促進効果など、その効果の更なる解明は今後の検討課題である。

参考文献

- 1) Edill, T.B. and Fox, P.J. : Field test of thermal precompression, *Proceedings of Settlement '94, ASCE, Geotechnical Special Publication*, No.40, pp.1274-1286, 1994.
- 2) 上俊二, 藤原東雄, 勝村雅子 : 二次圧密時に温度効果を受けた粘土の圧密特性, 土木学会論文集, No.554/Ⅲ-37, pp.47-55, 1996.
- 3) 足立格一郎, 清水正喜, 藤原東雄, 風間秀彦, 森脇武夫, 赤木寛一, 東畑郁生, 土田孝, 藤木広一 : 軟弱粘土の高温環境下での挙動解明に関する総合的研究, 平成7年度科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書, pp.1-110, 1996.
- 4) Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I. and Ohishi, K.: Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.170-183, 1993.
- 5) 清水正喜, 神戸砂織 : 加熱による粘性土の二次圧縮促進の定量的評価, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, pp.326-327, 1997.
- 6) 藤原東雄, 上俊二, 谷村幸志, 出尾陽一 : 温度効果を受けた粘土の圧密特性(その2), 第34回地盤工学研究発表会概要集, pp.479-480, 1999.
- 7) 大石幹太, 東畑郁生, 岩下裕一 : 高温環境で行った粘土の三軸せん断試験. 第29回土質工学研究発表会概要集, pp.635-638, 1994.

(2000. 4. 12 受付)

PROMOTION OF SECONDARY COMPRESSION OF PEAT BY HEATING

Hiroshi OIKAWA and Toshihiro OGINO

Laboratory oedometer tests were conducted to investigate the effects of heating on promotion of secondary compression of peat. From the test results, it was confirmed that the rate of settlement of peat in the range of secondary compression was increased drastically by heating. Effect of heating on settlement promotion is incredibly larger for peat than for clay. After cooling the specimen, resettlement followed by small rebound was observed. The rate of resettlement, however, was so small that the long term compression tendency of peat could be reduced upon cooling