

過圧密土の強度特性とダイレタンシーに関する基礎的実験

伊 藤 驍・金 沢 徳 雄

On the Strength and Volume Change Behaviour of
Overconsolidated Bentonite Soils

Takeshi ITO and Norio KANAZAWA
(昭和53年10月31日受理)

1 結 言

土の体積変化は粘土で顕著なため、粘土は土木材料として極めて扱いにくいものになっている。土の体積変化は圧密不等沈下やヒーピング等土木構造物を構築する場合、いくつかの設計上の問題点が残されているがこれはぜひ知っておかなければならない基本的事柄の一つである。この体積変化にはダイレタンシーによるものと圧密によるものとの2通りがある。これらは土の締固まり状態によって複雑な変化を示し特に土の過圧密比がこれに与える影響が大きいと考えられている。

土の体積変化のうち、体積膨張や膨潤については土の物理化学的性質特にマイクロな粘土鉱物の表面吸着水層の挙動とマクロな力学的性質の両面から、この機構を明らかにしていくことが重要視され、近年これに関する研究¹⁾が発表されるようになった。

本研究では、水と界面活性が顕著であり従って体積変化の著しいベントナイトと静止状態では全く体積変化を示さない豊浦標準砂の双方を混合調整し、この土に一定のエネルギーを与えて締固めた後、過圧密状態にし、荷重を順序徐荷することにより生ずる膨潤性クリープ挙動を観測した。このクリープ挙動はいわば土のレオロジー的性質の基礎をなすものであるが、これは内部土粒子の応力解放や塑性流動及び粘土鉱物の鉱物粒子自体の水和に基づく粒子間反発力の総和に依るものと解釈できるので、本文ではこれを内部土粒子のせん断変形即ちダイレタンシーと見做して取扱うことにした。

この研究は混合土のダイレタンシーが過圧密比や時間に如何にどの程度影響されるかを調べ解析を行なうため、その予備的基礎実験で得られた結果の一部をここに整理し検討を試みたものである。

2 実験用土

本実験に用いた試料は豊浦標準砂とベントナイト(クニゲルー3V)の混合土である。ダイレタンシーの観測については、豊浦標準砂(以下Tと略記)とベントナイト(Bと略記)を重量比で1:1($B_{50}-T_{50}$)に混合したもの($I_p \approx 350$)を用いた。これは地盤を通常砂質土と粘性土の2つに大別して考えることより、これらの両極端の性質をもつ中間的存在の土の膨潤変形・強度特性に関する報告例が少ないためである。この他に強度試験用として $B_{20}-T_{80}$ 、 $B_{10}-T_{90}$ の試料も使用した。

3 実験方法

3-1 締固め

土の締固めは、JIS-A-120呼び名1.1-aに従って行ない、コンパクションのエネルギーロスはないものとし、各試料に対するエネルギー($E_c=5.63\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$)は一定とした。試料の含水調整は任意に行ない、任意の締固め密度(γ_d)になった試料をトリマーで整形した。圧密・膨潤試験用試料は $h=2.0\text{cm}$ 、 $\phi=6.0\text{cm}$ とし、圧密・膨潤試験における締固め反力の影響をさけるため24時間静置した。また一軸圧縮試験用としては $h=11.5\pm 0.25\text{cm}$ 、 $\phi=5.0\pm 0.15\text{cm}$ に整形した。

3-2 圧密・膨潤試験

これには通常のエドメータを使い次の3通りの試験を行なった。

(1) $\gamma_{d,max}90\%$ 以内で締固めた試料の24時間毎の載荷試験及び徐荷による膨潤試験。

(2)各種の γ_d の試料に対し、先行荷重 $P_c=12.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $P_c=6.4\text{kg}/\text{cm}^2$ を載荷し以下24時間毎に順序徐

序徐荷による膨潤試験。

(3)同一種類の試料に対し $P_c=6.4$, $P_c=3.2$, $P_c=1.6$, $P_c=0.8\text{kg/cm}^2$ を載荷し以下24時間毎に順序徐荷による膨潤試験。

以上の試験における観測時間等は JIS-A-1217-60 に従い、過圧密比による変化を調べた。ここで言う過圧密比 (以下 OCR と略記) とは、混合土の降状応力 (P_y : kg/cm^2) が 1.5 以下であったので (図-6 参照), これ以上の載荷重による先行圧密荷重 ($P_c \cdot \max$) を現在の圧密荷重 (P_c) で割った値とした。

3-3 一軸圧縮試験

この試験の試料土は $B_{50}-T_{50}$, $B_{20}-T_{80}$, $B_{10}-T_{90}$ の 3 種類である。各試料を締固めた後, W_i の異なった試料の一軸圧縮破壊試験を行ない, その強度の 1/2 相当量に対する変形係数 E_{50} を求めた。

4 実験結果と考察

4-1 ベントナイト含有量による土の強度

締固めた土の密度 (γ_d) はベントナイトの混合割合が多くなるとその最大乾燥密度 ($\gamma_{d,\max}$) は小さくなり最適含水比 (W_{opt}) は逆に大きな値を示す傾向が見られたが, 一軸圧縮強度 (qu : kg/cm^2) は必ずしもこの $\gamma_{d,\max}$ とは一致せず, 本実験ではベントナイト含有率の高い試料ほど大きな qu が得られた。図-1 では応力 (σ) と軸ヒズミ (ϵ) の関係を示しているが, この試料 ($B_{50}-T_{50}$) では低い含水比 (W) でより大きな qu を示しその最大値は $\gamma_{d,\max}$ と一致しなかった。これは粒子間結合力の無い豊浦標準砂がベントナイトにより膠結されその粘着強度が増大したことによるものと考えられる。そして W が増すにつれ塑性流動的粘伸性が増加しヒズミは著大になったが強度は低下した。これは W が増加することにより粒子間のマサツ抵抗力がスベリ抵抗力に移行したためである。一方図-2 によると $B_{20}-T_{80}$ の試料は W が小さいと弾性的変形を示し, qu の最大値は図-1 の試料と異なり低い W で見られず, W のやや増加したものにみられこれが $\gamma_{d,\max}$ とほぼ一致していた。しかし図-3 の $B_{10}-T_{90}$ では W が高くなるにつれ強度が増し, $B_{50}-T_{50}$ とは逆になっている。これは砂粒子を十分結合させるベントナイト量が不足したこと, そして, ある程度の含水状態にならないと強度を発揮しない性質を有することによ

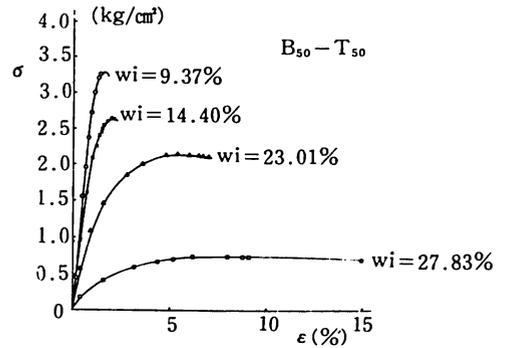


図-1 $B_{50}-T_{50}$ の一軸圧縮試験

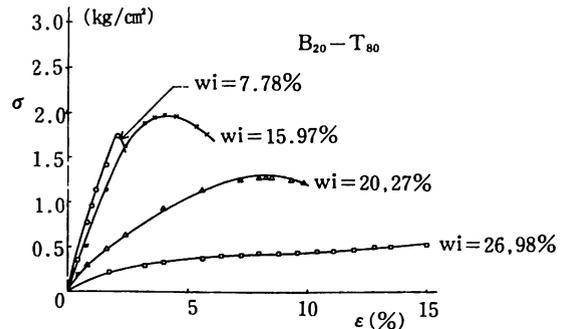


図-2 $B_{20}-T_{80}$ の一軸圧縮試験

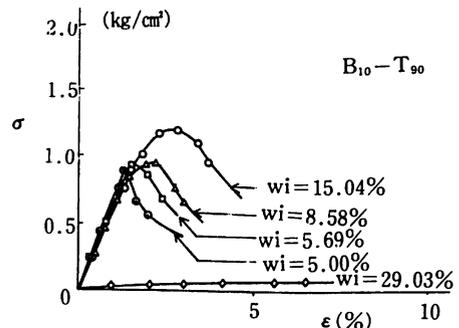


図-3 $B_{10}-T_{90}$ の一軸圧縮試験

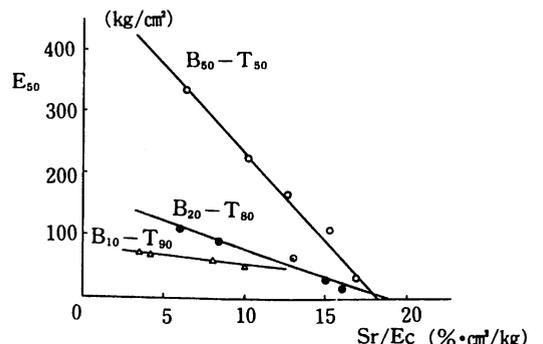


図-4 ベントナイトの含有量による強度変化

過圧密土の強度特性とダイレタンシーに関する基礎的実験

るもので、Wが砂・粘土系の結合力に大きな影響力を持っていたことが理解できる。そしてこれらいずれの試料においてもWが25%以上になるとεが15%に達しても降伏点は見い出せず、quとWの関係もコーン支持力試験²⁾等で得られている土の強度

$$qu = A \cdot \exp(-BW) \quad (A, B: \text{試料定数})$$

を満足せず、この関係が一意的に適用できる範囲は低含水領域に限定されていた。従って高含水領域も含めた試料全体の特徴を把握するためには別のパラメータを考察する必要があった。

以上のようにγ_dとquの関係は通常自然土から仲々得にくい興味ある事柄が見い出されたが、これと共に従来行なわれていた試料の強度を直接γ_dと結びつける考え方には無理がある事も判明した。例えばγ_dはWの増加に伴い増加しやがて減少していくが、このW~γ_d関係は二次曲線である。曲線の上では一つのγ_dは二つの異なるWで表現されることになるためγ_dが同一でもquは明らかに異なる。従って、γ_dは土の強度を評価するパラメータとしては適当でない。そこで同一試料でWが変わった場合の強度の連続性を検討するため、qu/2から得られる土の変形係数E₅₀ (kg/cm²)と、Wや間ゲキ比(e)を考慮した飽和度(Sr:%)及び締固めエネルギー(E_c: kg·cm/cm³)を用いることによりこれらの関係を描いてみた。それが図-4である。これは単位荷重当りによる試料の変形のし易さを表示する一つのパラメータであるが、図から見られるように、ベントナイトの含有率による強さの傾向は次式のように、

$$E_{50} = -a \left(\frac{Sr}{Ec} \right) + b$$

で表現されE₅₀がquに代る良好な値であることがわかった。これによると、試料中にベントナイトが多くなると、a, bという定数も大きくなる。従って図-1, 図-3で相矛盾するような傾向を示したB₅₀-T₅₀とB₁₀-T₉₀は、共にa, bという定数で規定され、これら定数で整理できることになる。しかもこの式によれば、ベントナイトの含有量が定まり、あるWで締固めた土から、E₅₀がどの位になるか直ちに予測されることになる。

4-2 通常圧密とダイレタンシー

この実験は通常圧密過程を経た後、再び逆に段階的に徐荷し体積変化がいかになるかを調べたもので図-5にその様子が描かれている。この土は初期

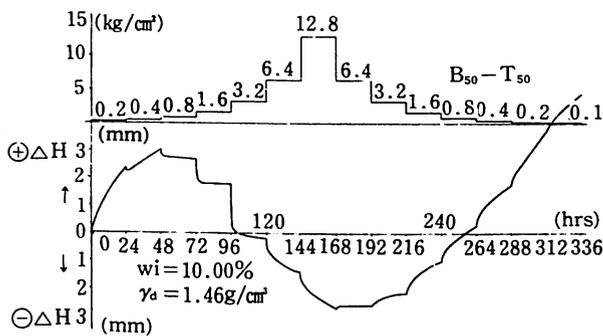


図-5 圧密膨潤試験

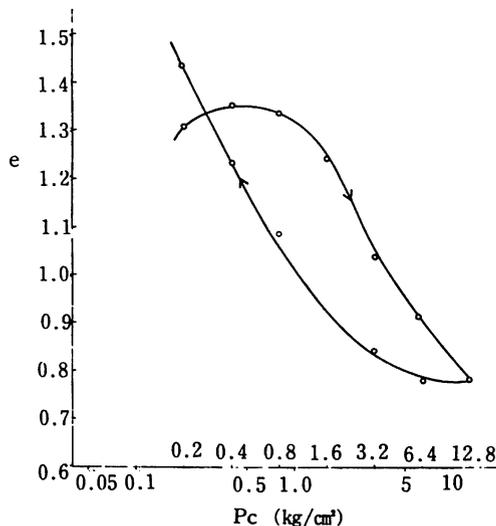


図-6 e~logPc関係図

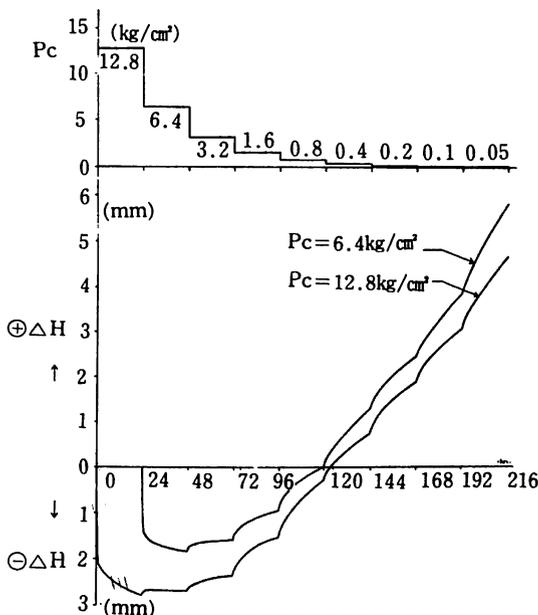


図-7 初期のPcの差異による膨潤試験

含水比 (W_i) が小さく、 γ_d も小さいことから、かなり緊密な試料であることが推定できる。図からわかるように載荷段階の $P_c=0.2\sim 0.4\text{kg/cm}^2$ では膨潤を示し、 0.8kg/cm^2 でほぼ平衡状態に達し、 3.2kg/cm^2 で、原体積をやや下回った。 $6.4\sim 12.8\text{kg/cm}^2$ では完全に圧密状態に入るが、徐荷段階の方をみると 6.4kg/cm^2 では応力解放のリバウンドのみと考えられ、体積変化は微少である。しかし上載荷重が 3.2kg/cm^2 以下になると非線形性ダイレタンシーがみられ、 0.8kg/cm^2 では再び原体積に復元している。このような体積ヒズミの履歴を間ゲキ比 (e) の変化によって調べたのが図-6 である。小さな荷重に対してこの混合土のダイレタンシーは極めて鋭敏であり、 e の変化は P_c の減少により急増している様子がよくわかる。これよりダイレタンシーを土の内部エネルギーであると仮定すれば、最大荷重 ($P_c\cdot\text{max}$) から遠ざかるにつれ $e\sim\log P_c$ 履歴におけるループの変化が著しいことから、その量的変化を支配する過圧密比 (OCR) を用いれば、今後この現象を解明するのにより有効であるように思われる。

4-3 応力レベルによるダイレタンシー

通常圧密の荷重を経ないで、先行荷重 $P_c=12.8\text{kg/cm}^2$ 、 $P_c=6.4\text{kg/cm}^2$ の2通りで先ず過圧密し、24時間毎に徐荷していくと図-7 に示すようにやはり 0.8kg/cm^2 付近で原体積に復元している。図では応力レベルによって若干の差異はみられるが、前記の通常圧密履歴を受けた場合でも 0.8kg/cm^2 付近で原体積に戻った。これはダイレタンシーが $P_c\cdot\text{max}$ もさることながら、むしろ OCR に強く支配されていることを示すもので、 $P_c\cdot\text{max}$ が大きいと $\ominus\Delta H$ が増大するため体積復元にはそれだけ時間を要するが、同一 OCR では回復ヒズミ量に著しい特徴的差異は余り見うけられない。一応の傾向として $P_c\cdot\text{max}$ の差異、 W_i の差異が認められる。これを示したのが図-8 であるが、これは一例であり、全てがこのように類型化できる訳ではなかった。むしろ OCR によって明瞭な傾向が読み取れた。それを示したのが、図-9 である。ここでは OCR による段階的変化が判明するが、これは、OCR が大きければ大きい程、ダイレタンシー効果が著しいことを示すもので、小さな上載荷重に対しては、ベントナイト質の土は極めて鋭敏な変形挙動を示すことが表わされている。図-10、図-11 は $P_c\cdot\text{max}$ を2種類として W_i の差異による変化を各々について調べたものである。ベントナイトの膨潤は水との界面活性によって強く影

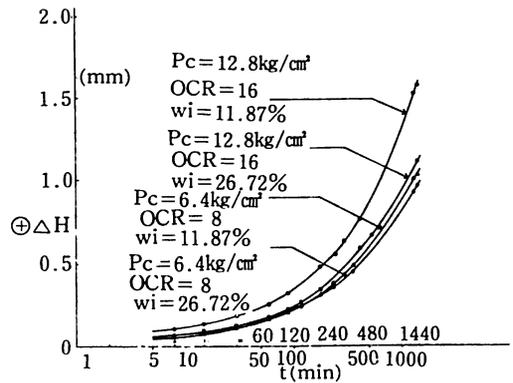


図-8 P_c と W_i の差異による体積変化

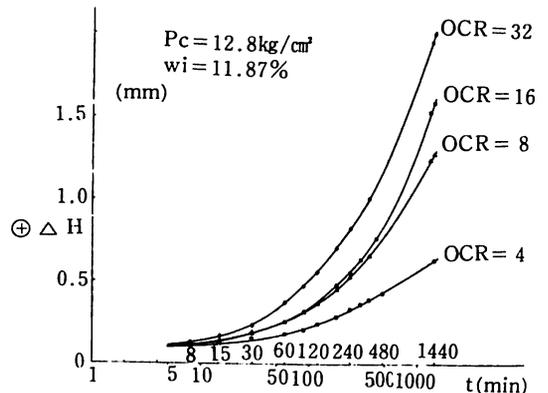


図-9 過圧密比 (OCR) の差異による体積変化

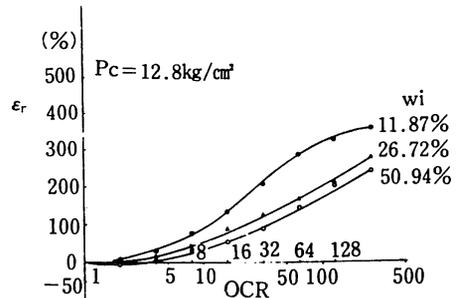


図-10 $P_c=12.8\text{ (kg/cm}^2)$ に対する各 w_i による体積変化と OCR

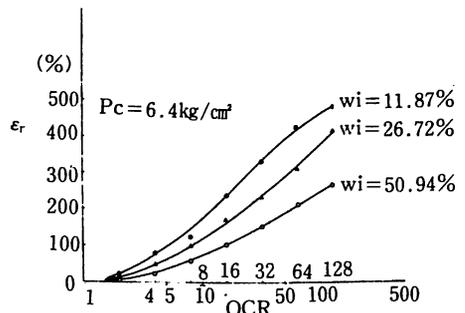


図-11 $P_c=6.4\text{ (kg/cm}^2)$ に対する各 w_i による体積変化と OCR

過圧密土の強度特性とダイレタンシーに関する基礎的実験

響を受けるものであるから、 W_i が小さいことは、同一OCRでも間ゲキ体積の占める割合が大きいためそれだけ水和反応による体積変化も大きくなる。

これがダイレタンシーの要因となって、図示のような典型的特徴が現われたものと思われる。この場合、 $\epsilon_r(\%) = [\{\Delta H - (\Delta H_n)\} / \Delta H] \times 100$ とし、 ΔH は $P_c \cdot \max$ による原体積からの変化量、 ΔH_n は n 番目に徐荷した時の値である。図-10によれば、 $W_i = 50.94\%$ の試料は、OCR=2において尚圧密が進行し ϵ_r が負の値になっている。また $P_c = 12.8$ の場合の ϵ_r は $P_c = 6.4$ の場合より W_i に拘らず一様に小さくなっているが、これは初期の ΔH が $P_c = 12.8$ で大きかったため、このことを除けば、各 W_i に対しほぼ類似の傾向を示し、 $P_c \cdot \max$ による差異はOCR $\sim \epsilon_r$ 関係では特別見当らない。ただ $W_i = 11.87\%$ のような小さな W_i に対しては共に $\epsilon_r \sim$ OCR関係がややS字型になっていたことが注目される。

このような W_i による差異をさらに詳しく調べてみると、例えば図-12のようになる。この図は $P_c \cdot \max$ と W_i を変えたものの原体積からヒズミ($\epsilon : \%$)の変化を描いているがこの場合の ϵ は $h = 20.0\text{mm}$ の様な試料が、圧密後原体積に対し徐荷によりいかに膨潤するか $\epsilon = (\Delta H_n / h) \times 100$ で表わしたものである。図をみると $P_c \cdot \max = 12.8$ に対し、各試料の W_i が変わってもほぼ平行に一樣なダイレタンシーが起こっている。このことは、 W_i や応力比又はOCRが定まれば、ダイレタンシーは $P_c \cdot \max$ に依存しないことを意味するものと考えられる。これは前述の図-8の説明と何ら矛盾するものではない。またこの図によると、 $\epsilon = 0\%$ の P_c の値は W_i が小さいもので大きい、この値は先の $B_{50}-T_{50}$ の一軸圧縮試験による $qu/2$ にほぼ相当している。従って、 $\epsilon = 0\%$ の値は各 W_i におけるその土の降伏値(P_y)と何らかの関係をもつ物理量を表わすものではないかと思われる。これについては尚データを積み重ねた検討を要するが、初期に15%も縮小した土($W_i = 26.72\%$)が 0.8kg/cm^2 の上載荷重があるにも拘らず原体積に復元しやがてこれを超越していることは驚異に値する。しかも $\epsilon = 0\%$ に到達するのはいずれもOCRが8以上であり、 $\epsilon = 0$ のOCR値が W_i で異なっている。従って各 W_i における $\epsilon = 0$ のOCR値はその土のダイレタンシー効果を定める一つの指標になっていると考えられこれらの詳細な関連づけは今後の研究課題の一つになると思われる。

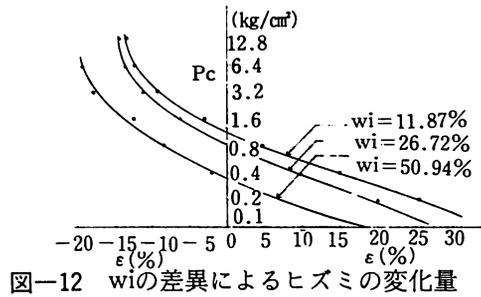


図-12 w_i の差異によるヒズミの変化量

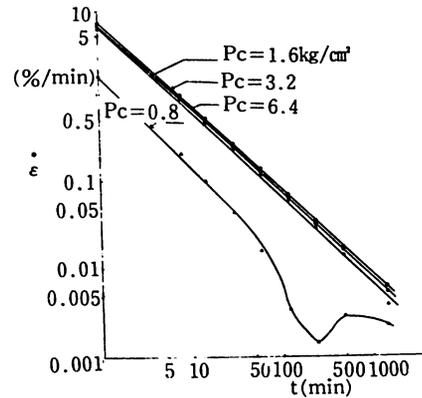


図-13 圧密過程におけるヒズミ速度($\dot{\epsilon}$)の変化

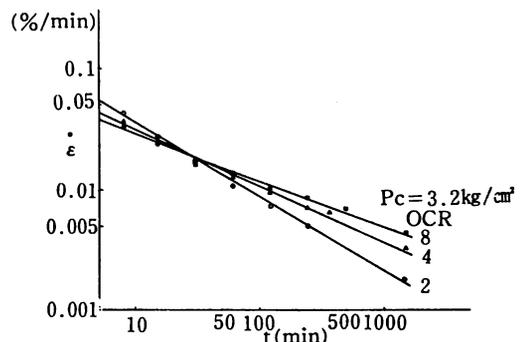


図-14 OCRの差異による $\dot{\epsilon}$ の変化

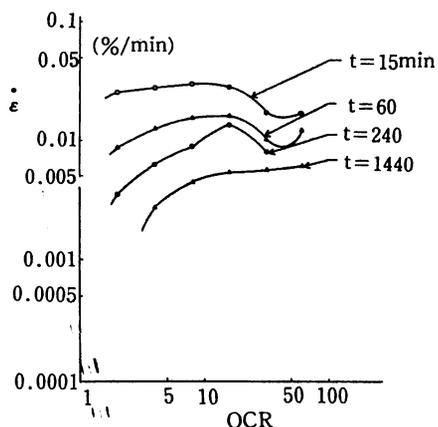


図-15 各時間におけるOCRと $\dot{\epsilon}$ の関係

4-4 各種の応力レベルによるダイレタンシー

次に同一の W_i をもち同一の γ_d をもつ $B_{50}-T_{50}$ の試料土に初期の $P_c \cdot \max$ を変化させたら、圧密～ダイレタンシー関係はどうなるのかを調べてみた。先ず図-13は各 $P_c \cdot \max$ に対する圧密ヒズミ速度 $\dot{\epsilon}/t = \dot{\epsilon} (\%/min)$ と時間の関係をプロットしたものである。 $P_c = 1.6 \sim 6.4$ のものについては一様に明瞭な直線関係が成立するが、この範囲のものに対しては特別応力レベルによる差異は見当らない。しかし $P_c = 0.8$ では、圧密後60分ほどで $\dot{\epsilon}$ が減少し、4時間後から逆に増加を示し、ついにダイレタンシーをみた。この種の変化については Tavenas³⁾ にも報告しているが、特に $\log_{10} \dot{\epsilon} \sim \log_{10} t$ の直線関係を基にして Mitchell らの提案した式⁴⁾ の妥当性を検討している。

以上のような応力レベルの相違による特性がつかみにくいことから、一つの試料に対する OCR の差異による変化をみたのが図-14である。この OCR の範囲内ではダイレタンシーはいわば速度勾配の差として特徴が表わされている。この速度勾配はクリープ破壊現象における荷重効果として把握されるものでここではこれが OCR によって規定されている。即ち OCR が大きいと緩い勾配であることより、ダイレタンシーの収束時間が長かつ又 OCR の大きいものがダイレタンシー効果の大きいことが示されている。

一方、 $\log_{10} \dot{\epsilon}$ と $\log_{10} OCR$ の関係を各時間における変化として調べてみると同一条件下の試料については、図-15のような結果となった。一応時間の小さい時の $\dot{\epsilon}$ は OCR に無関係に大きくなることがわかる。しかし前記の Mitchell らの提案をこの試料や試験結果だけで検証するには、基準時間におけるカーブの直線性を認めがたいため、また本実験のように極めて膨潤性に富み、軟弱な領域まで変化する土のようなものに対しては、未だ問題が残されているように思われる。なおこのダイレタンシーは土の間ゲキ水圧とも密接な関係がある⁵⁾ ので、吸着水層の挙動の解明と併せて考察することがさらに必要なことと思われる。

5 結 び

ベントナイトを含む土の強度特性と圧密・膨潤による体積変化について若干検討を加えた。ダイレタンシーについて言えば、 W_i の変化や OCR によるダ

イレタンシー効果は評価できるが、 W_i や OCR が定まれば、ダイレタンシーは $P_c \cdot \max$ に依存しないことも確認された。本文では一連の実験結果の一部について傾向推測を列挙したが、各種の地盤災害と密接な関係をもつベントナイト質の土のダイレタンシーの性質については余り把握されていないのでこれを解析的に究明する一資料としてここでは特徴的事柄を述べるに留めた。

一軸試験では、土の強度の表示式として有効な関係を見出すことができたが、これがダイレタンシーのいかなる要因と関わりがあるか目下検討を進めている。なお、実験を遂行するに当たり、本学々生鈴木博君の努力に負うところが大きかった。記して謝意を表す。

文 献

- 1) 例えば, Mesri, G. & Olson, R. E. . Géotechnique, 21, NO.4, 341-352, 1971.
- 2) 谷口; 土と基礎, Vol.26, NO.9, 35-40, 1978
- 3) Tavenas, F., Lerouel S., La Rochelle, P., and Roy, M.: Can. Geotech. J., Vol.15, 402-423, 1978
- 4) Singh, A. & Mitchell, J.K.: ASCE, Vol.94, NO. SM1, 21-46, 1968
- 5) Mesri, G., Ullrich, C.R. & Choi, Y.K.: Géotechnique, 28, NO.3, 281-307, 1978