事前圧密された粘土の沈下特性

竹内恒治

1 まえがき

プレローディング工法は、軟弱地盤改良工法の1つとして現在よく使用されている。この工法の基本的概念は「土塊を荷重によってひとたび圧縮したならば、その荷重を取り除いたとしても圧縮量のごくわずかしか膨張しないし、さらに同じ荷重を再載荷した時に生じる圧縮量は初期のものに比べ非常に小さい。」という粘土の特性に基づいている。

この工法は予圧密工法ともいわれるように、構造物の建設前に構造物の荷重と同程度か、あるいは大きい荷重を盛土などによって載荷し、圧密沈下を促進させ、かつ、地盤の強度を増加させる。そして、これらの値が期待している値になるのを確認してから荷重を除去し、構造物を建設するという工法である。したがって、この工法によれば、構造物を安全に築造でき、建設後に生じる地盤沈下を抑制することができる。ところが、このような圧密－膨張－再圧密を含む地盤の挙動のうち、再圧密過程における圧密特性については不明確な点が多い。

今回、事前圧密が再載荷後の二次圧密係数にどのような影響をおよぼすか、研究したものを報告する

2 試料及び供試体

2-1 試料

試料として宇部岬より採取した粘土（以下宇部岬粘土とする）及び、カオリン粘土とモンモリロナイトを4対1に混同させた試料の2種類を用いた。この2種類の試料の物理的性質は表-1に示すとおりである。

表-1　試料の物理的性質

試料	W_L	W_P	I_P	C_c	G_s
宇部岬粘土	46.9(%)	25.5(%)	21.4	0.44	2.711
混合試料	80.6(%)	30.8(%)	49.8	0.502	2.685

2-2 供試体

420(μm)フルイを通過させた宇部岬粘土の含水比を約90%にし十分撹乱する。その試料を真空装置に入れ内部の気泡を十分に追い出したのち、圧密容器に入れσ_c=39.2(kpa)で24時間圧密する。圧密後の供試体は、高さ2cm, 直径6cmの円板形に整形する。

カオリン粘土とモンモリロナイトを塑性指数が、約50%になるよう4対1の割合で混合する。尚、カオリン粘土は420(μm)のフルイを通過させた自然乾燥状態のものを使用した。この混合試料を含水比が約85%になるように脱気水を加え、十分撹乱したのち一昼夜放置する。その試料を宇部岬粘土と同様に真空脱気を行いσ_c=39.2(kpa)で24時間圧密する。圧密後の供試体は高さ2(cm), 直径6(cm)に整形する

3 実験方法

供試体底部を非排水状態にして予圧密を行う。予圧密は、σ=39.2(kpa), 78.4(kpa)の2段階行い、載荷時間はそれぞれ24時間ずつとし、圧密沈下量を測定する。ここで予圧密を行う理由は、供試体の撹乱の影響を少なくするためである。

予圧密後、供試体底部の間隙水圧を測定しながら載荷-除荷-再載荷を行う。なお、プレロード除荷時の決定については、間隙水圧が載荷荷重の約1%まで減少した時に除荷を行う。再載荷時は、除荷したとき生じた負の間隙水圧が消散した時点で決定する。

載荷-除荷-再載荷過程について圧密量を測定し載荷, 再載荷過程について間隙水圧を測定する。

再載荷荷重はσ_f=117.6(kpa)とし、載荷荷重(プレロード)は過圧密比σ/σ_fにより決定する。

4 実験結果及び考察

4-1 載荷-除荷-再載荷過程における沈下ひずみ及び間隙水圧について

図-1に宇部岬粘土，図-2にカオリン粘土とモンモリロナイトの混合試料（以下混合試料とする）の載荷-除荷-再載荷過程における沈下ひずみと経過時間の関係を示した。尚，再載荷荷重σ_fを117.6(kpa)で一定とし，過圧密比を1.0から2.0までの範囲で変化させて行なった。ここではそのうち1.2より2.0まで0.2ずつの間隔で変化させたときの結果を示した。図中において比較のため117.6(kpa)の荷重を載荷した後除荷を行なわない場合の結果を点線で示している。また除荷時の有効応力$\bar{\sigma}$はプレロードσ_pに等しくなるので，今後，過圧密比σ_p/σ_fを$\bar{\sigma}/\sigma_f$と表しこれを有効過圧密比と呼ぶことにする。

図-1，2においては，いずれの場合もプレロード載荷過程においては有効過圧密比が大きいほど沈下ひずみが大きくなっている。また両者を比較すると有効過圧密比が等しいとき載荷過程の沈下ひずみは，混合試料の方が大きくなっている。

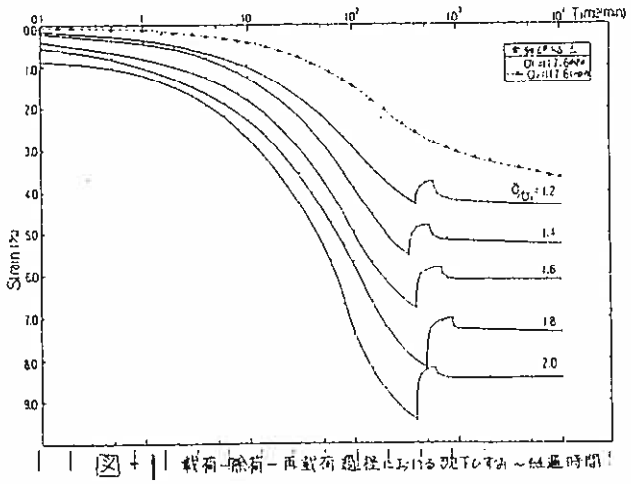


図-1 載荷-除荷-再載荷過程における沈下ひずみ～経過時間

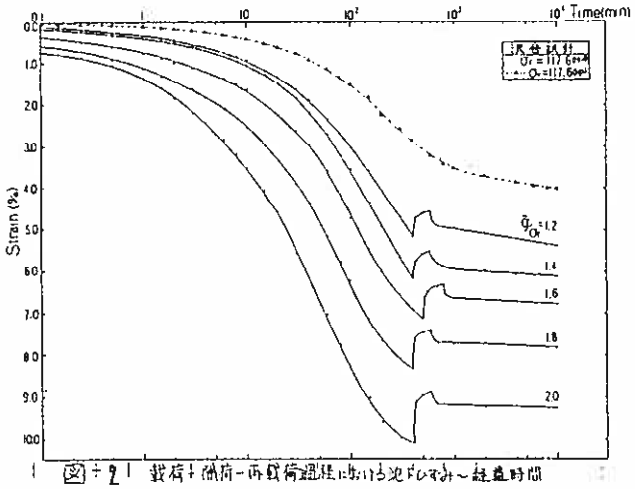
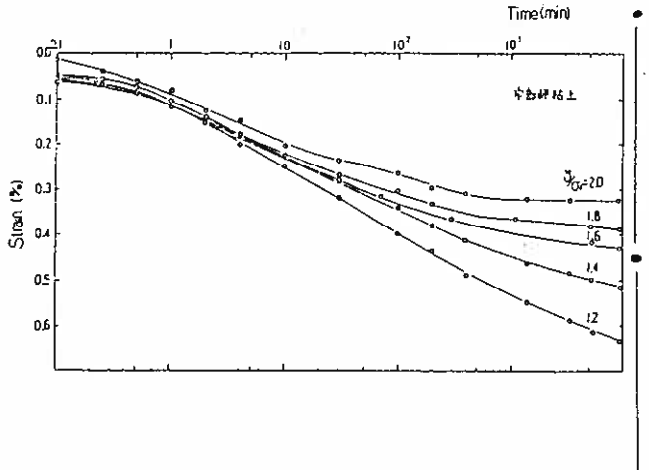


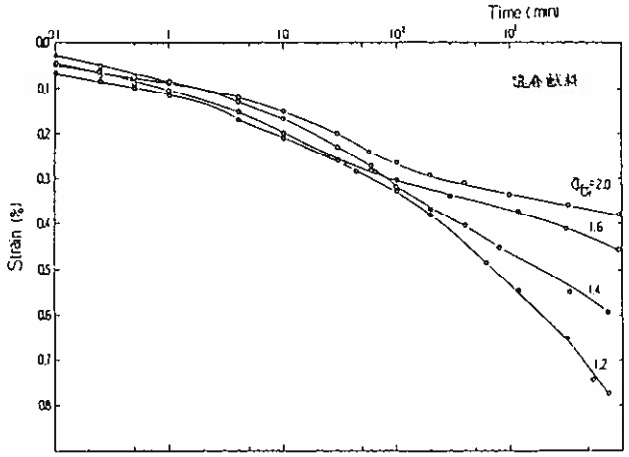
図-2 載荷-除荷-再載荷過程における沈下ひずみ～経過時間

図-3 図-4は再載荷した後の沈下ひずみと経過時間の関係を示した。両方の試料とも100(min)くらいまではいずれの有効圧密比の場合もほぼ同じ勾配で沈下が生じているが100(min)を過ぎると勾配にかなり差が生じるようになり有効過圧密比が大きいほど沈下ひずみは小さくなっている。一方 図-5 図-6に示した過剰間隙水圧の消散過程をみると多少ばらつきはあるもののどの有効圧密比の場合においてもほぼ同一の経路をたどって消散しており，消散に要する時間は約100(min)となっている。以上のことから再載荷後約100(min)で一次圧密が終了し二次圧密が生じ始めていると考えられる。

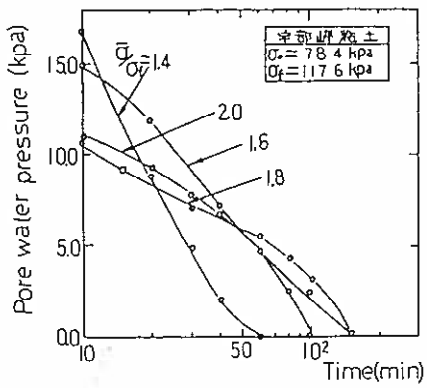
以上のことより再載荷後の沈下ひずみε_α～経過時間log曲線に与える事前圧密の影響は、一次圧密過程より二次圧密過程において顕著に表われるといえる。



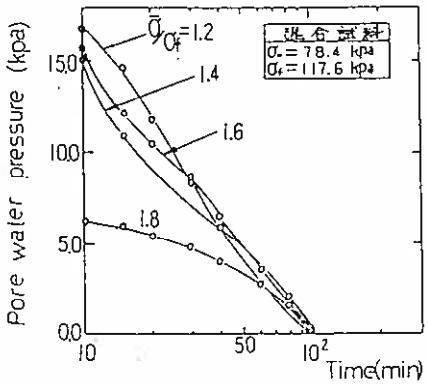
〈図-3 再載荷後の沈下ひずみ~経過時間〉



〈図-4 再載荷後の沈下ひずみ~経過時間〉



〈図-5 再載荷過程の間隙水圧~経過時間〉



〈図-6 再載荷過程の間隙水圧~経過時間〉

4-2 二次圧密係数と有効過圧密の関係

ここでは二次圧密係数 ε_α を次式のように定義する。

$$\varepsilon_\alpha = \frac{d\varepsilon}{d\log t} \quad \text{-----} (1)$$

これは 4-1 節の図-1，図-2 における再載荷後の直線部分の勾配として表され、ここではプレロード載荷時からの経過時間が 10^3(min)から 10^4(min) までの値を用いた。

この二次圧密係数 ε_α と有効過圧密比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ の関係を図-7，図-8 に示した。有効過圧密比が 1.0 から 1.4 の間で二次圧密係数は急激に減少するが、その後は緩やかになり、$\bar{\sigma}/\sigma_f$ が約 2.0 ではほぼ一定値に収束している。この $\varepsilon_\alpha \sim \bar{\sigma}/\sigma_f$ の関係を次式で表わすことにする。

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{\alpha + \beta\,\bar{\sigma}/\sigma_f} \quad \text{------} (2)$$

(1)式の定数 α 及び β の値を求めるため式(2)を変形すると次式のようになる

$$\frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{\varepsilon_\alpha} = \alpha + \beta\,\bar{\sigma}/\sigma_f \quad \text{----} (3)$$

(3)式により $\bar{\sigma}/\sigma_f$ と $\frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{\varepsilon_\alpha}$ の関係を図-9，図-10 に示す。図中の直線はそれぞれの点を最小二乗法によって直線近似したものである。従って α は、直線と縦軸の切片，β は直線の勾配となり次のように表される

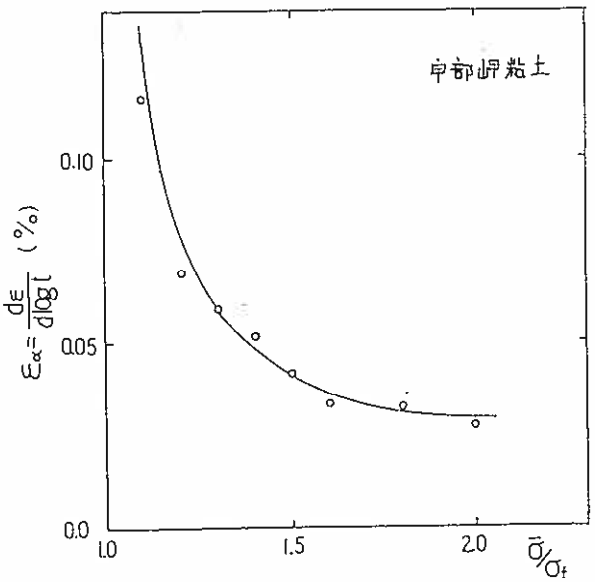
宇部岬粘土

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{-68.3 + 69.9\,\bar{\sigma}/\sigma_f} \quad \text{----} (4)$$

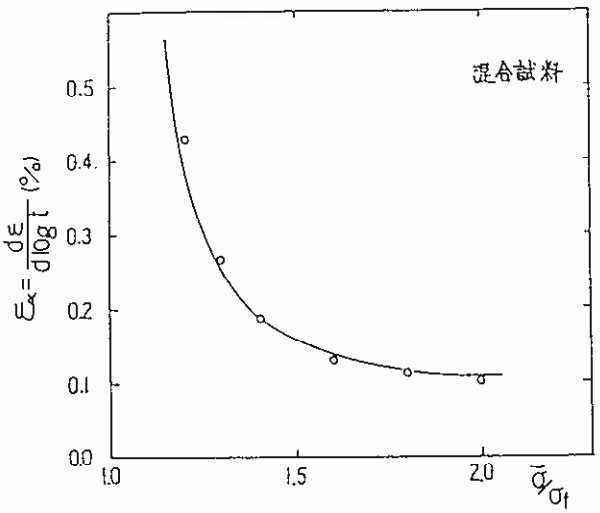
混合試料

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{-22.9 + 21.7\,\bar{\sigma}/\sigma_f} \quad \text{----} (5)$$

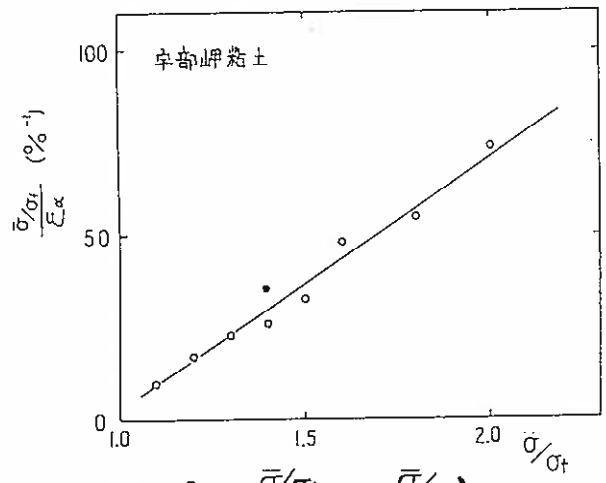
(4)式，(5)式で表わされる曲線を図-7，図-8 に示した。実測値はほぼこの曲線上に載っていることから、有効過圧密比と二次圧密係数の関係は、(4)，(5)式で表わされる。



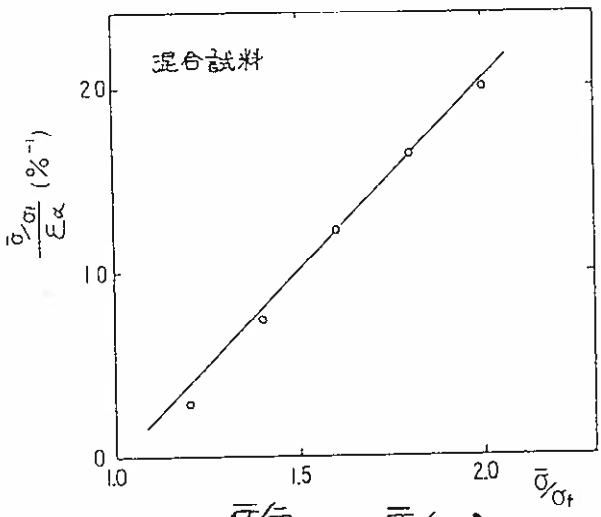
〈図-7 二次圧密係数~有効過密比〉



〈図-8 二次圧密係数~有効過圧密比〉



〈図-9 $\frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{\varepsilon_\alpha} \sim \bar{\sigma}/\sigma_f$〉



〈図-10 $\frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{\varepsilon_\alpha} \sim \bar{\sigma}/\sigma_f$〉

4-3 塑性指数と二次圧密係数の関係

粘土の物理的性質が異なる場合の有効過圧密比と二次圧密係数の関係を検討する。そこで既に、二次圧密係数と有効過圧密比の関係が明らかな広島粘土，宇部粘土，カオリン粘土について比較する。この3種類の粘土についての物理的性質を表-2に示す。

これら5種類の粘土の有効過圧密比と二次圧密係数の関係を図-11に示す。

表-2 試料の物理的性質

試料	W_L	W_P	I_P	C_c	G_s
カオリン粘土	53.5%	28.5%	25.0	0.31	2.718
宇部粘土	61.0%	28.5%	33.0	0.52	2.670
広島粘土	100.0%	58.2%	41.8	0.699	2.650

同図には、4-2節の(2)式を用いて得た双曲線も付している。いずれの場合も(2)式で求められた双曲線は、実測値とほぼ一致している。ここでそれぞれの粘土における双曲線の定数αおよびβを表-3に示す

二次圧密係数と有効過圧密比の関係は粘土によって異なっている。

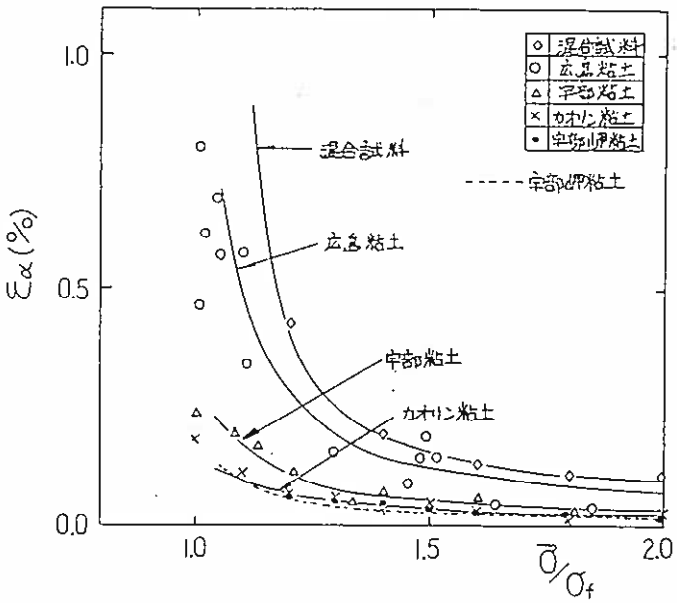


図-11 二次圧密係数~有効過圧密比の比較

表-3 定数 α, β

試料	α	β
宇部岬粘土	-68.3	69.9
カオリン粘土	-53.2	58.4
宇部粘土	-38.2	45.5
広島粘土	-25.4	24.8
混合試料	-22.9	21.7

そこで、塑性指数と二次圧密係数の関係を図-12に示した。塑性指数I_Pが20から30の間では有効過圧密比が二次圧密係数に及ぼす影響は少ないがI_P=40以上になると有効過圧密比が異なると二次圧密係数は大きく変化している。事前圧密することによって再載荷後の二次圧密沈下は塑性指数が少さいほど、また有効過圧密比が大きいほど小さい。

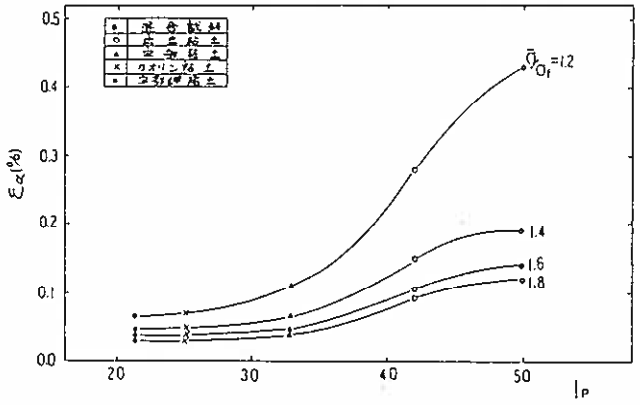


図-12 二次圧密係数と塑性指数の関係

5 結論

事前圧密工法の基礎的実験を行った結果、載荷－除荷－再載荷過程の沈下、膨張、間隙水圧のデータから明らかになったことを以下に示す

1、再載荷過程において発生する過剰間隙水圧の消散時間は有効過圧密比に関係なく一定である。また再載荷後の沈下ひずみεと経過時間 log t の勾配も、過剰間隙水圧が消散するまでは、有効過圧密比に関係なくほぼ一定になっている。このことより、再載荷過程における事前圧密の影響が顕著になるのは二次圧密過程である

2、有効過圧密比と二次圧密係数の関係は双曲線で近似できる

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\bar{\sigma}/\sigma_f}{\alpha + \beta\,\bar{\sigma}/\sigma_f}$$

α, β ：定数
ε_α ：二次圧密係数
$\bar{\sigma}/\sigma_f$ ：有効過圧密比

3、事前圧密後の二次圧密係数は、塑性指数が20から30ならば小さく、有効過圧密比の変化による影響は少ない。また塑性指数が50付近になると有効過圧密比が小さいと、二次圧密係数は急激に増大する。しかし、有効過圧密比が大きい（約2.0）ときは塑性指数に関係なく二次圧密係数は小さい。