

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH
INSTITUTE MINISTRY OF TRANSPORTATION, JAPAN

第4巻 1号 Vol. 4 No. 1

(通巻第12号)

- 上の三軸圧縮試験 (第1報).....中瀬明男・岸 正平・勝野 克
- ビショップの安全計算法とそのプログラミング.....中瀬明男・紙山一雄
- 荷重除去に伴なう粘土の膨張について.....藤下利男

1965年2月

運輸省港湾技術研究所



土の三軸圧縮試験（第1報）

目 次

1. ま え が き	1
2. 試 験 装 置	3
2.1 概 要	3
2.2 三軸圧縮室	4
2.3 載荷装置	5
2.4 定圧装置	5
2.5 間ゲキ水圧測定装置	6
2.6 体積変化測定装置	8
2.7 空気抜き装置	8
2.8 附 属 部 品	9
2.9 附 属 器 具	9
(1) 給 油 機	10
(2) 側方ヒズミ指示器	10
(3) 試料成形セット用器具	10
2.10 試験計器の検定	14
(1) プルーピングリングの検定	14
(2) マノメーターの検定	14
3. 粘土の圧密非排水試験	15
3.1 概 要	15
3.2 供試体のセット	15
3.3 供試体の圧密	16
3.4 供試体の圧縮	17
4. 試験データの整理	20
4.1 強度常数 c' ϕ'	20
4.2 レンデュリックの応力経路	20
5. 粘土の三軸圧縮試験結果の検討	24
5.1 概 要	24
5.2 ϕ' および A_f と I_p との関係	24
5.3 地盤の非排水強さの推定	24
5.4 強度常数に対する繰り返しの影響	26
6. あ と が き	27
参 考 文 献	27

Rebound of Saturated Clay on Removal of Confining Pressure

Toshio FUJISHITA*

Saturated clays rebound when a part of confining pressure is removed. Strength of soils in over-consolidated state is smaller than that before the removal of a consolidation pressure. In practice, rebound of soil is likely to take place when a soil sample is left for long time after sampling or when a part of surface loading is removed in a pre-loading work.

The present paper reports the rebound of saturated clays observed in consolidation tests. Amount of rebound is investigated statistically for 390 specimens of alluvial clays in Japan. In addition to the investigation in conventional consolidation tests, the behaviour of unloaded saturated clays in long term consolidation tests is observed. Effect of remoulding on rebound characteristics is also studied.

As the result of investigation it is found that, when a soil sample is allowed to rebound completely under no confining pressure, an unconfined compression strength is reduced to about 50% of in-situ strength. Considering the rebound characteristics of soils, remarks on soil tests and sampling techniques are given.

*Chief, Soil Test and Investigation Section, Soil and Structure Division

荷重除去に伴う粘土の膨張について

藤 下 利 男*

1. 概 説

ある応力のもとで土塊が平衡状態にある場合、その拘束応力を減少せしめれば、土塊は膨張する。これは圧密試験における荷重除去の際に認められていることであり、実際問題としては、地盤より採取した試料を放置したり、根切りあるいは切り取りによって土被り重量を除去する際におこる現象である。

粘性土のセン断強さは、その土が正規圧密されているか、または過圧密状態にあるかによって、その大きさが異なるが、いずれの場合でも間ゲキ比との間に固有の関係が存在する。¹⁾ すなわち一般に間ゲキ比が大きくなるとセン断強さは減少する。土が膨張するという事は、間ゲキ比が増すことであるから、荷重除去による土の膨張は土のセン断強さの減少を伴う。したがって、荷重除去に伴う土の膨張は、土質工学における安定問題に対して重要な関連をもっている。

BishopおよびBjerrum²⁾は、土質工学における安定問題を短期安定と長期安定の二通りに分類し、切り取りなどの場合には施工後長時間経過した場合について、有効応力の概念を用いて安定性を検討すべきであると提案している。この提案は、切り取り後の間ゲキ比の変化に着目しているものであるが、これをいいかえれば、切り取りによる土の膨張によってセン断強さが減少した後の安定を検討せよということになる。

一方、地盤より採取した試料のセン断試験においては、試料が膨張していれば、原位置における土のセン断強さを過小評価することになる。地中より採取した試料のセン断強さ、特に一軸圧縮強さの減少の原因としては、採取に伴う練り返し効果が一般に指摘されていた。しかし著者は練り返し効果とともに、荷重除去による土の膨張もセン断強さ測定誤差の大きな原因であることに着目し、試料の膨張を少くするための新型のサンプラーを考案した。³⁾

試料採取における拘束応力の除去がセン断強さにかかに影響するかについては、SkemptonおよびSowa⁴⁾が飽和した粘土について実験的研究を行っている。この実験

においては、三軸圧縮試験機を用いて地中における応力状態を考えて非等方圧密を行い、そのまま非排水セン断を行った場合と、圧密終了後、非排水条件のもとで軸荷重を除去してのち、再び軸荷重を加えて非排水セン断した場合の強さを比較している。この実験によって、SkemptonおよびSowaは、試料採取に伴う荷重除去は、含水比の変化が無ければ、非排水強さに影響を与えないと述べている。

この実験においては、非排水条件ということから、荷重除去の際の試料の体積変化は測定していないが、間ゲキ水圧の測定を行っており、荷重除去の際には必ず負の間ゲキ水圧が発生することが認められた。この負の間ゲキ水圧の大きさは、平均圧密応力の80%程度であると報告されている。

地中よりとり出した試料の間ゲキ比が負であるということは、排水条件のもとに放置すれば、水または空気を土中に吸いこむことを意味する。また間ゲキ水が溶存ガスを多量に含む場合には、土中にガスが発生して、試料が膨張するという事も考えられる。

試料採取によって、間ゲキ水中に溶解しているガスが気化すれば、試料の飽和度は減少し、間ゲキ比は大きくなる。地中より採取した試料の飽和度の測定結果を図-1に示す。この図に示した試料は何れも水面下にあるもので、飽和していると考えられる土である。しかし図よりわかるように、いくつかの場合においては、飽和度が深度の増大とともに減少する傾向を示している。この傾向は、上に述べたように、負の間ゲキ水圧の大きさが、地中の平均圧密応力に比例するということから説明できると思われる。すなわち、深いところにあった試料ほど、試料採取による負の間ゲキ水圧が大きく、したがって、気化するガスの体積も大きいということになる。

錦海湾の粘土の場合には、径75mmのサンプラーチューブを用いて試料を採取しているが、採取後サンプラーチューブを空气中に放置した場合の膨張の大きさと速さはかなり大きいもので、30分間に生じたサンプラーチューブの端よりの粘土のはみ出し量は4mmに達した。

図-1に示した飽和度の深度分布の傾向、およびSkemptonとSowaの実験結果から考えて、地盤より採取した粘性土試料が膨張することは明らかである。実際問題

*構造部 土質試験課長

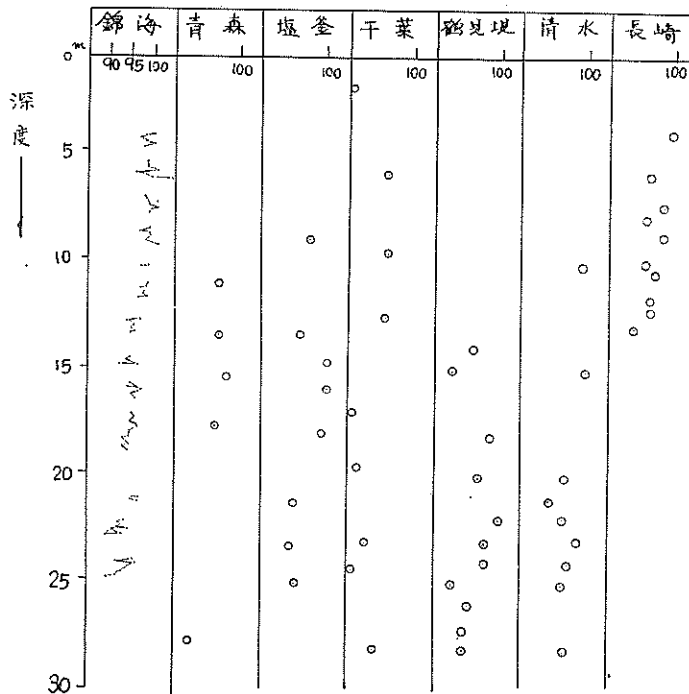
における土の膨張の影響のうち、前に述べた長期安定問題においては、有効応力による土の強度常数を用いることによって、一応解決されているが、土のせん断強さ、特に一軸圧縮強さの減少についてはまだ定量的に解明されていない。

現実的に考えれば、土の一軸圧縮強さを過小評価することは、安定問題における安全側の誤差を与えるものである。しかし土の膨張の影響の少いと思われるサウン

ディングの結果との比較、および、試料採取の技術の改良の問題などを考えれば、土の膨張および、それに伴う一軸圧縮強さの減少の問題の定量的解明が必要である。

荷重除去に伴う土の膨張の問題の究明の第一部として、これまで著者の研究室で行われた土の力学試験結果のうち、特に膨張と関係のあるものをまとめて以下に報告する。

飽和度 S_r (%)



図一 1 深度と飽和度 S_r の関係

2. 圧密試験における膨張

2. 1 標準的圧密試験における膨張

(1) 間ゲキ比と応力の関係

土の圧密試験方法は、日本工業規格 JIS A 1217 (1960) に規定されている。ここに標準的試験というのは、日本工業規格に従って行う24時間載荷の圧密試験をいう。

圧密試験において、ある応力で圧密を終了したのちその応力を減少せしめると、土は膨張する。ただしある応力変化に対応する膨張量は、同じ応力変化で生ずる圧縮量よりはるかに小さい。

粘性土のせん断強さは、圧密が進行する程大きくなる。圧密応力と間ゲキ比および非排水強さの関係を図一2に示す。図一2(a)の a b c 曲線は正規圧密状態を示すものであり、間ゲキ比 e と圧密応力 p の対数は、この領域内では一般に直線的関係にある。図一2(b)に示すように、圧密応力と土の非排水強さ c_u は、正規圧密の領域では直線的関係にあるため、この領域では間ゲキ比 e と $\log c_u$ も直線的関係にあり、その傾度は $e \sim \log p$ の関係におけるものと等しい。図一2に示す a 点は、b 点まで圧密したのち、応力を減少させ、土を膨張せしめた状態を示すもので、過圧密状態にある土では、 e と $\log p$ の関係は正規圧密領域におけるものと異なり、直線的でない。した

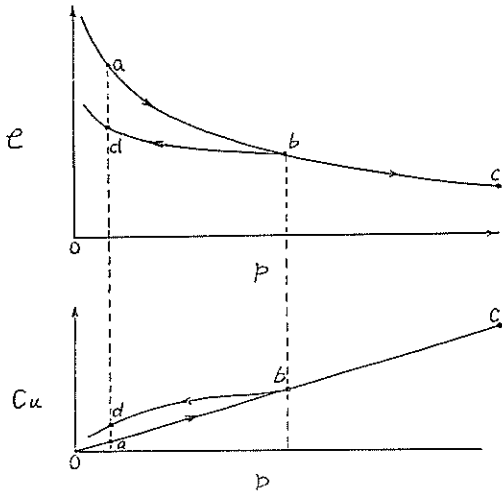


図-2 圧密応力と間ゲキ比および非排水強さの関係

がって、間ゲキ比と非排水強さの対数 $\log c_u$ の関係も直線的ではない。過圧密の程度を表すには、過圧密比を用いる。たとえば図-2のd点の状態の土の過圧密比は p_d/p_a である。この過圧密比は、さきに著者らの提唱した⁵⁾ CN比の逆数である。

間ゲキ比と圧密応力および非排水強さの対数の関係を図-3に示す。図に示す間ゲキ比 e_r は、 p_m なる応力で圧密してから段階的に応力を全部取り除いた場合、土が膨張を終わった時の間ゲキ比である。正規圧密状態にお

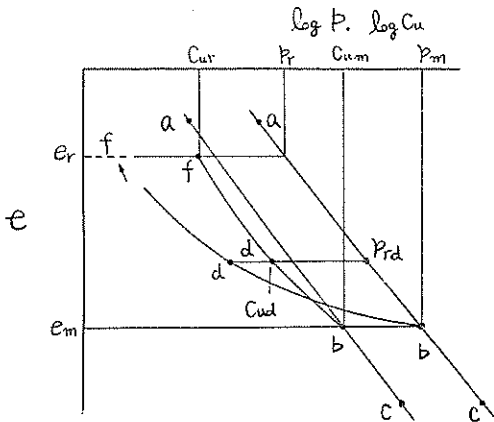


図-3 間ゲキ比と圧密応力および非排水強さの関係

ける $e \sim \log p$ 線上で、 e_r に対応する圧密応力を p_r とする。 $e \sim \log p$ 線の傾度 C_c が等しい場合には、 p_r/p_m の比は荷重除去による膨張量の大きさに比例する。図において、 $e \sim \log c_u$ 関係の過圧密状態の曲線 bdf が、正規圧密状態の $e \sim \log c_u$ の関係に一致すれば、 p_m から全荷

重を除去した後の非排水強さの減少率は p_r/p_m に等しい。しかし、種々の過圧密比の下で同じ間ゲキ比をもつ土の非排水強さが等しくないということは実験的に知られていることである。これはボシユレフの規準における有効摩擦角¹⁾ ϕ_r が $\phi_r > 0$ であるということである。

過圧密状態における $e \sim c_u$ の関係は、一般に図-3の bdf 曲線に示すようになる。荷重除去の途中段階においても上に述べた p_r の考え方を用いると、 c_{ur}/c_{um} と p_r/p_m の関係は一般に図-4に示すような傾向をもつ。荷重除去の途中段階においては、たとえば図-3のd点の場合には p_{rd}/p_m の比と c_{ud}/c_{um} の比をプロットしたものである。図-4にみるように、除荷の途中段階では、 c_{ur}/c_{um} 比は p_r/p_m 比よりかなり大きいのが、全荷重を除去したのちの両者の値はかなり近いものとなる。いいかえれば荷重を除去する際に、一部の荷重を残しておけば非排水強さの減少割合は相対的に小さいということである。

(2) 圧密試験における p_r/p_m 比

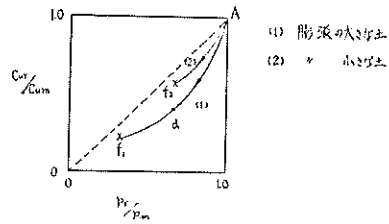


図-4 p_r/p_m c_{ur}/c_{um} の関係

前に説明したように、全荷重を除去して平衡状態に至った場合、非排水強さの減少の割合 c_{ur}/c_{um} は p_r/p_m の比を以て近似的に表わすことができる。

図-5に示す p_r/p_m の頻度分布は、我が国の港

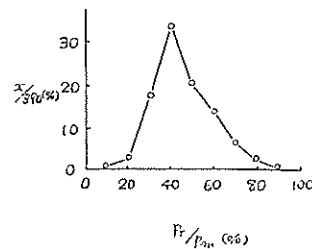


図-5 試料390種における p_r/p_m の頻度分布

湾地帯における粘性土の390試料について行った圧密試験によるものである。なお、これ等の圧密試験における最大圧密応力 p_m は $9^k\text{g}/\text{cm}^2$ である。

図-5によれば p_r/p_m 比は40%近くのものが多い。すなわち、試料を採取して拘束応力を取り除き、完

全に吸水膨張をゆるせば、非排水強さは原位置におけるものの約半分に減少するものが多いということになる。実際には、採取した試料を長時間膨張させるにまかせておくことはなく、コアパレルなどで或る程度の拘束応力を加えておく。したがって、上に示した非排水強さの減少率が現実的なものではないとしても、図-5の試験結果は非排水強さの減少が無視することのできない問題であることを意味するものであろう。なお測定した p_r/p_m の比と塑性指数 I_p 、または圧縮指数 C_c との間には明瞭な相関性は認められなかった。しかし我が国のチュ

ウ積粘土が粘土鉱物的にみて、いづれも同じものである⁶⁾ということを考えれば、図-5の結果は我が国の粘性土についての一般的傾向を示すものと考えて、さしつかえないと思われる。

圧密試験における間ゲキ比の変化は、供試体の厚さの変化によって測定するが、最大圧密応力 p_m で圧密を終了したときの供試体厚さ h_m と全荷重除去をしたときの膨張量 Δh_m の比 $-\Delta h_m/h_m$ の頻度分布を図-6に示す。また除荷前に生じた全圧縮量 ΣS と膨張量の比の頻度分布を図-7に示す。

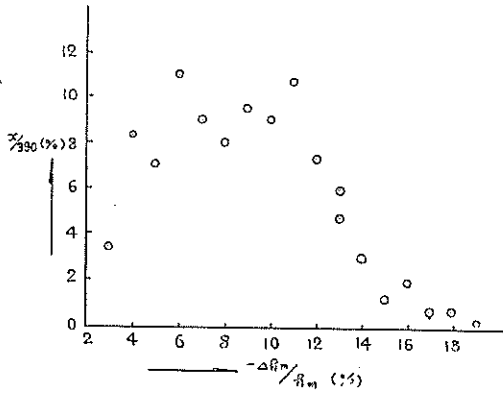


図-6 膨張前の供試体厚さと膨張量の比の頻度分布

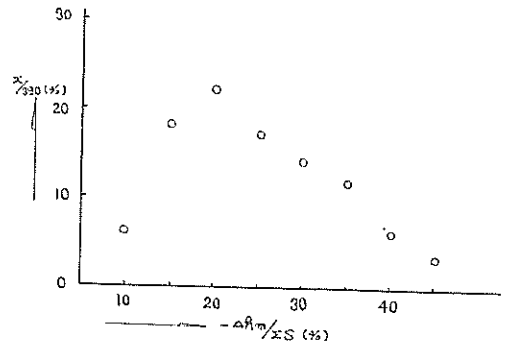


図-7 最大沈下量と膨張量の比の分布

(3) 載荷除荷の繰り返し試験結果

錦海湾のチュウ積粘土を用いて、繰り返し圧密試験を

表-1 応力段階表

応力 ₀ (%)	膨張	$P_m=3.014$	〃	$P_m=6.027$	〃	$P_m=9.041$	〃
9.041							
6.027	100%					1.72×10^{-1}	2.82×10^{-1}
	50%					1.32 〃	2.00 〃
3.014	100%			1.24×10^{-1}	2.31×10^{-1}	6.54×10^{-2}	9.30×10^{-2}
	50%			1.23 〃	1.78 〃	6.09 〃	8.97 〃
0.753	100%	7.62×10^{-2}	1.04×10^{-1}	4.00×10^{-2}	5.57×10^{-2}	2.22 〃	2.77 〃
	50%	7.99×10^{-2}	8.98×10^{-2}	3.86 〃	5.37×10^{-2}	2.28 〃	2.73 〃
0.377	100%	3.19 〃	4.03 〃	1.79 〃	2.03×10^{-2}	9.03×10^{-3}	1.89 〃
	50%	2.81 〃	3.80 〃	1.37 〃	1.98 〃	9.46 〃	1.85 〃
0.151	100%	1.64 〃	1.83 〃	7.29×10^{-3}	1.49 〃	6.89 〃	1.97 〃
	50%	1.44 〃	2.00 〃	7.44 〃	1.42 〃	6.36 〃	1.96 〃
0.075	100%	1.87 〃	3.28 〃	4.02×10^{-2}	1.12 〃		
	50%	1.64 〃	3.45 〃	3.88 〃	9.56 〃		
0	100%	7.82×10^{-1}	8.48×10^{-1}	8.48×10^{-1}	2.45 〃	5.26 〃	4.61×10^{-1}
	50%	6.76 〃	8.15 〃	7.66×10^{-1}	2.36 〃	5.18 〃	4.43 〃

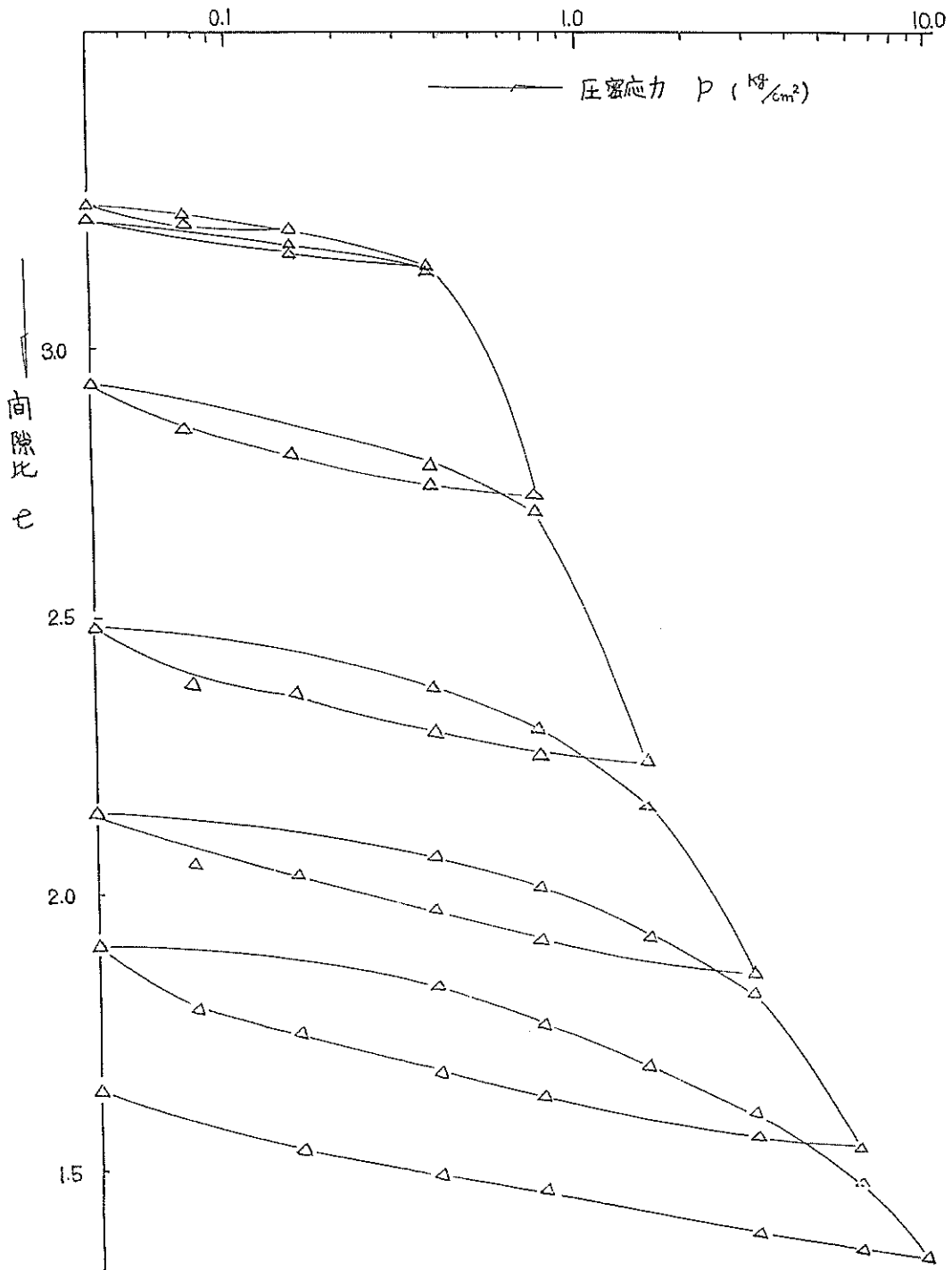


図-8 繰返し圧密試験における間ゲキ比と圧密応力の関係

行った。この試料の諸指数は次の通りである。

$$w=115\% \quad w_1=121\% \quad w_r=46\%$$

荷重段階表を表-1に示す。

表-2 繰返し圧密試験における膨張の計算結果

	載荷応力 (kg/cm^2)	除荷応力 (kg/cm^2)
1	0.076	0
2	0.076 0.151	0.076 0
3	0.151 0.377 0.753	0.151 0
4	0.151 0.377 1.507	0.377 0.151 0.076 0 0.753 0.377 0.151
5	0.377 0.753 1.507 3.014	0.076 0 0.753 0.377 0.151
6	0.377 0.753 1.507 3.014 0.377 0.753 1.507 3.014	0.076 0 3.014 0.753 0.377
7	6.027 0.377 0.753 1.507 3.014	0.151 0.076 0 6.027 3.014 0.753
8	6.027 9.041	0.377 1.507 0

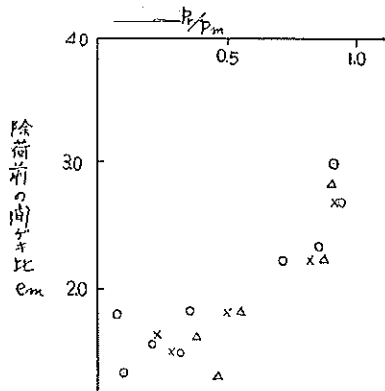


図-9 除荷前の間ゲキ比と p_r/p_m 比の関係

この試験によって得た間ゲキ比と圧密応力との関係を図-8に示す。また膨張に関する計算を表-2(ab)に示す。 p_r/p_m 比と、除荷前の圧密応力 p_m および間ゲキ比 e_m の関係を図-9 (ab) に示す。

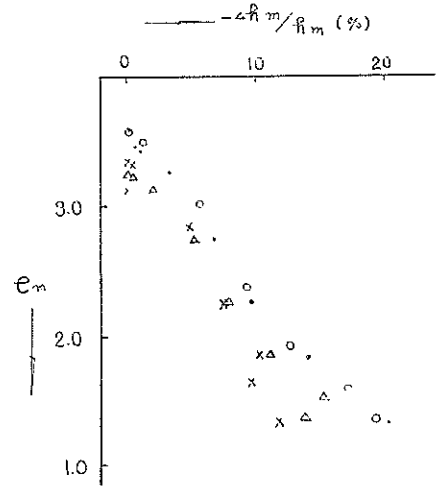


図-10 e_m と $-\Delta h_m/h_m$ の関係

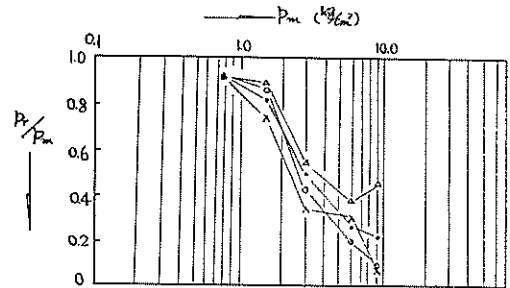


図-9(b) 除荷前の応力 p_m と p_r/p_m の関係

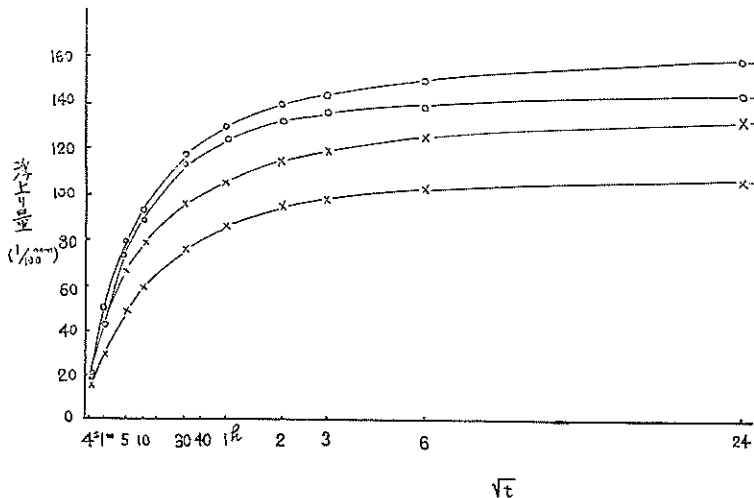


図-11 膨張量と時間の関係

この結果、荷重の増加によって膨張の影響は著しくなり、ほとんど対数目盛りで直線的な変化を示した。したがって、深い位置に推積している土ほど膨張による強度減少ははげしくなる。各応力段階で圧密が終了時の供試体厚さと膨張量との関係を図-10に示す。

膨張量は p_m 附近で供試体厚さの約20%を示している。荷重除去の際の膨張の時間的関係は、載荷の際のものと同様である。一例を図-11に示す。概説に述べたように、試料採取の際の膨張には、溶存ガスの気化および空気の吸い込みなどが行われるものと考えられるが、図-11に示す圧密試験における膨張では、供試体は水中にあるた

め、空気の吸い込みはない。しかし、圧密試験で除荷を行うたびに、土の間ゲキ水中では溶存ガスの気化が行われているものと思われる。

2.2 長期載荷試験における膨張

普通の圧密試験では24時間載荷を基準としている。しかし自然の堆積層は長年月の間に沈積したもので、圧密応力はきわめて長時間加えられている。この載荷時間の相異が除荷に伴う膨張におよぼす影響を調べるため、載荷時間を30分から60日間の範囲に変化させた圧密試験を行った。使用した試料は稲永-5-13181で $w=70\%$ 、 $w_L=81\%$ 、 $w_P=31\%$ 、 $S_r=99\%$ であった。

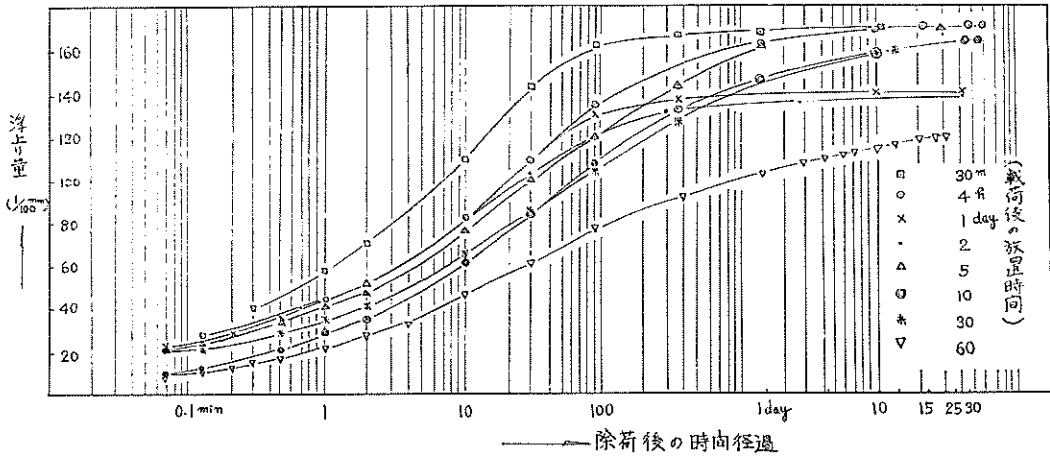


図-12 除荷後の膨張

載荷時間を変化させた圧密試験における、除荷後の膨張の状態を図-12に示す。図からわかるように、膨張の時間的進行の状態は、圧密の進行状態と同様である。

ここで注目されることは、除荷後20秒程度のきわめて短い時間内に生ずる膨張量の大きさが、圧密載荷時間にはほぼ反比例していることである。

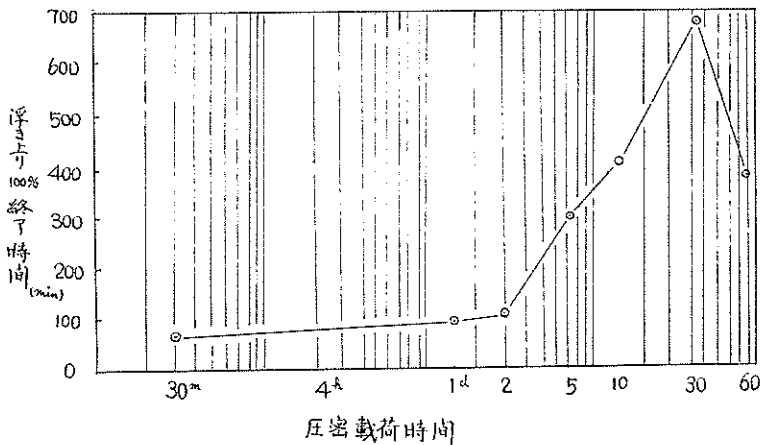


図-13 圧密載荷時間と膨張終了時間の関係

除荷による膨張が一応終了するまでの時間を、圧密荷重時間に対してプロットしたものを図-13に示す。これによれば、荷重時間が2時間以下であれば、膨張は100分程度で終了しているが、それ以上の荷重時間のものに対しては、膨張に要する時間は増大し、30日間圧密

したもので膨張を終了するのに650分を要している。なお、図-13で60日間の荷重時間に対する膨張時間が400分と小さくなっているが、この原因は明瞭でない。

膨張量と圧密荷重時間の関係を図-14に示す。

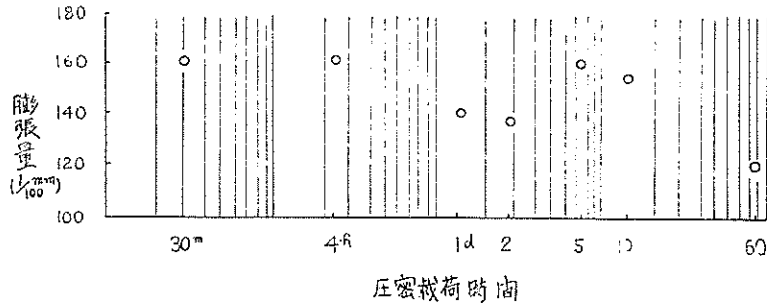


図-14 圧密荷重時間と膨張量の関係

この図によれば荷重時間が長くなると膨張量がわずかに減少する傾向がみられるが、この実験に用いた程度の荷重時間の範囲内では、膨張量は荷重時間に影響されないとえよう。

2.3 膨張に対する練り返しの影響

根切りおよび地盤改良などを行う際には土を練り返すことが多い。特にサンドドレーン、コンポーザー、パイプフローテーション等は砂柱を自然地盤中に打込むので、土を練り返す傾向が強い。これらの方法によって練り返された土が再圧密によって固められ、その後荷重を除去した場合にこの練り返したことが、どれ程膨張に関する諸事項に影響を与えるかは検討の必要がある。この問題を調べるため同一試料を用いて自然状態と練り返し

た状態にある土について一連の実験を実施した。使用した試料は鋼管 No. 3-10104で、 $w=96\%$ 、 $w_L=121\%$ 、 $w_P=45\%$ 、 $S_r=95\%$ であった。

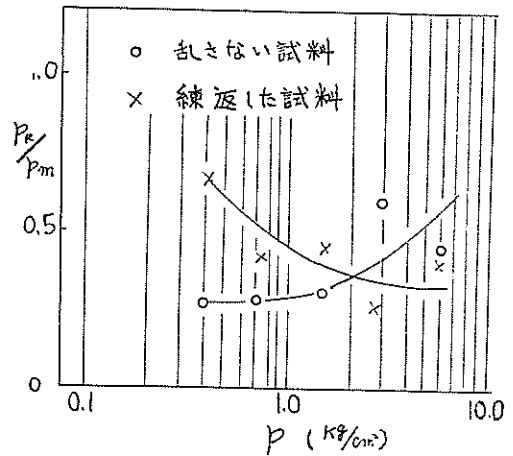


図-16 p_r/p_m と荷重の関係

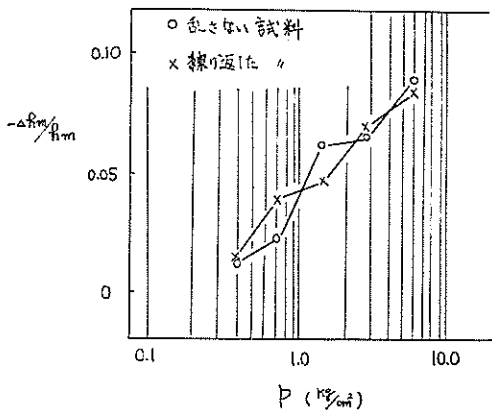
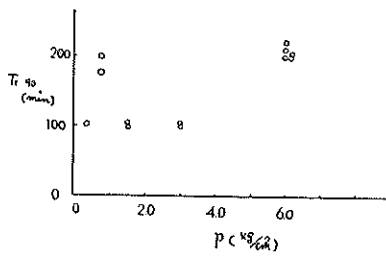


図-15 乱さない試料と練り返した試料の膨張量の比較

図-15は除荷前の供試体厚さと浮き上り量との比を圧密応力の対数に対してプロットしたものである。これによると両者の差はほとんどみられず、練り返した土を再び圧密することにより、同様の膨張を発生するという結果を得た。図-16は p_r/p_m と $\log p$ との関係を示したものである。この図によれば p と p_r/p_m 比の関係は両者で多少の差がある。

図-17は膨張時間を圧密応力の対数に対してプロットしたものである。



図一17 膨張時間と圧密応力の関係

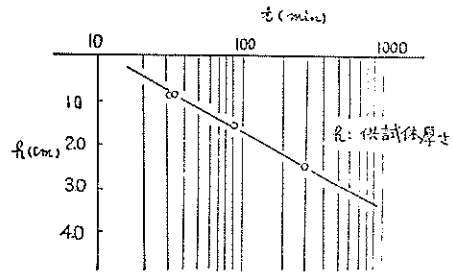
この図によれば、膨張時間に対しては、繰り返しの影響は明らかでない。

以上の事により繰り返した事によっては、膨張に関する特性は変化が見られず、自然状態とほぼ同様の傾向を示すものと考えられる。

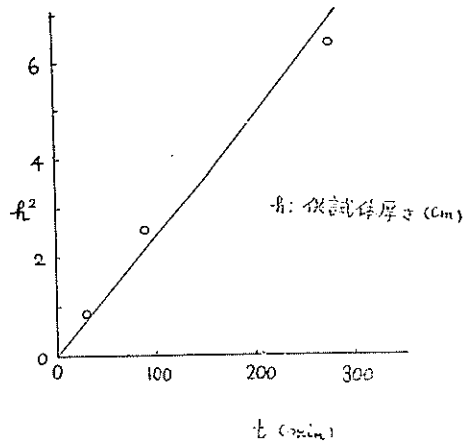
2.4 膨張と層厚、所要時間および諸係数との関係について

膨張がほぼ落着くに必要な時間は、前にも述べたところであるが、これは土の種類、溶存ガスの発生状況および間ゲキ水の移動速度等によって異ると考えられる。膨張機構を大別して考えると間ゲキ水の移動を伴わない膨張は割合短時間に終り、水の移動が生ずる膨張は透水係数と表面水の供給状況および排水長に左右されるのではないと思われる。膨張量については前項までにふれてきたところであるが、時間については、そのきめ方が割合困難である。ここでは圧密沈下終了時間計算法の logt 法を適用して整理をした。

上記の諸条件のうち供試体の厚さを変化させて、膨張時間がいかなる変化を示すかについて実験を行った。その結果を図一18(a, b)に示す。図一18(a)は供試体厚さと膨張に要する時間をプロットしたもので、厚さが増

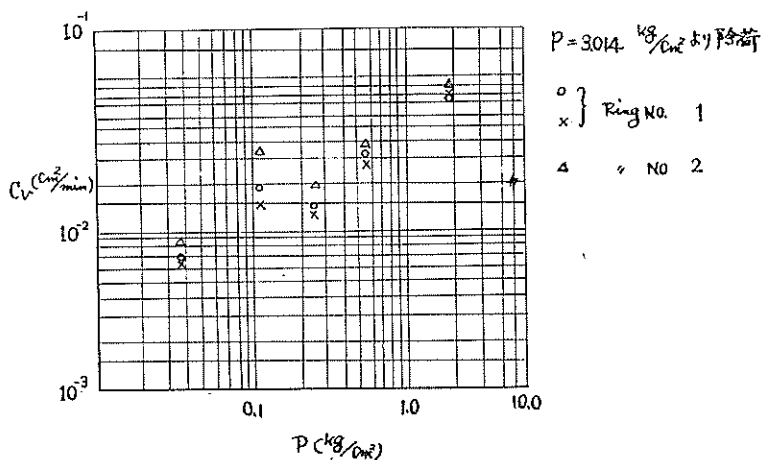


図一18(a) 供試体厚さと膨張に要する時間の関係



図一18(b) 供試体厚さの2乗と膨張に要する時間の関係

大すれば時間は対数目盛りで直線となる。図一18(b)は膨張に要する時間を供試体厚さの2乗に対してプロットしたもので、図に見る通り膨張時間と供試体厚さの2乗は直線関係にある。この結果によれば、膨張の時間的進行については圧密沈下の場合と同様の考え方をしてもよ



図一19(a) 降荷応力と c_v の関係

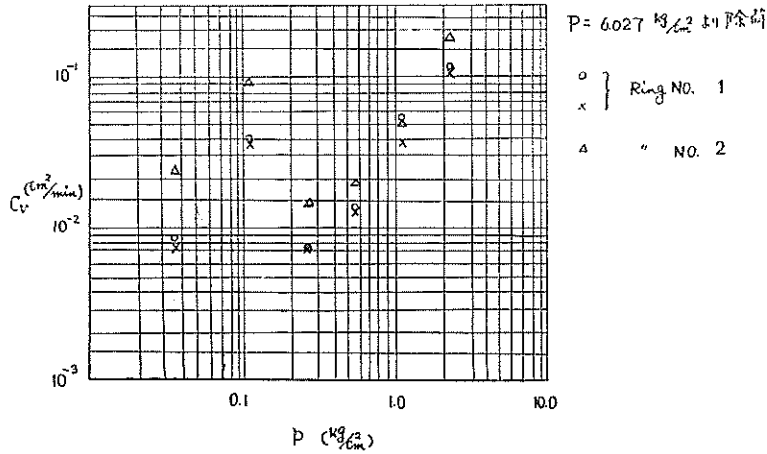


図-19(b) 降荷応力と c_v の関係

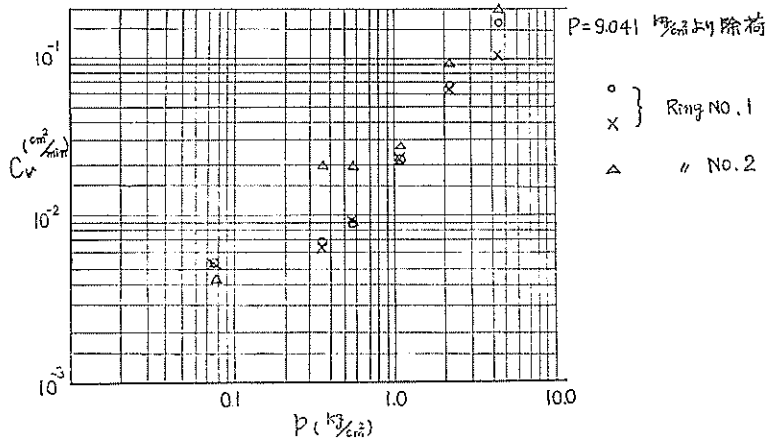


図-19(b) 降荷応力と c_v の関係

いものと思われる。

圧密試験における除荷後の浮き上り曲線は、先に記したごとく圧密沈下曲線に類似しているので、膨張が100%終るためには割合に長時間を必要とするが、膨張の50%は比較的短時間内に生ずる。いかえれば膨張が終了する時間よりはるかに短い時間を経過した時でも膨張の影響はかなり大きく表われるということになる。これらのことを究明するために沈下時の諸係数計算と同様の方法によって圧密係数 c_v 、体積圧縮係数 m_v の計算を行った。錦海湾の土における計算結果を図-19(a), (b), (c)および表-3に示す。

粘性土の大部分がシルトである名古屋の試料の c_v 計算結果を表-4に示す。

図-19に示す試験は同一試料で繰り返し試験をしたも

ので、 $p_m=9.0, 6.0, 3.0 \text{ kg/cm}^2$ のおのおのより段階的に除荷した場合について計算を行った。これによると c_v は応力を除いた直後が大きく、残留している応力が小さくなるにしたがって小さくなっている。一例として計算した c_v の最大値を用いて層厚1m当たりの浮き上り量を計算すると次の様になる。

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{1}{c_v} H^2 T & c_v &= 0.15 \text{ cm}^2/\text{min} \\
 & & \text{層厚} &: h=100 \text{ cm} \\
 &= \frac{50 \times 50 \times 0.21}{0.15 \times 1440} & \text{最大排水長} &: H=50 \text{ cm} \\
 & & \text{時間係数} &: T=0.21 (U=50\%) \\
 & & &= 2.4 \text{ day}
 \end{aligned}$$

一軸圧縮試験に使用する供試体の高さは、普通8cm

表—3 膨張時の c_v 計算結果

Sample NO	p	$\pm \Delta S$	ΣS	$\frac{-\Delta h_m}{\Delta S}$	$\frac{-\Delta h_m}{\Sigma S}$	h	$\frac{-\Delta h_m}{h_m}$	e	P_r	P_r/P_m	$P_r/90$
錦海湾 S-16-12134	0					2.000		3.264			
	0.075	11.0	11.0			1.989		3.241			0.058
	0	-8.0	3.0	0.73	0.73	1.997	0.40	3.258	0.05	0.67	
	0.151	20.2	20.2			1.977		3.215			0.100
	0	-17.7	5.5	0.88	0.76	1.995	0.90	3.253	0.058	0.38	
	0.377	50.1	55.6			1.944		3.145			0.282
	0	-42.5	13.1	0.85	0.77	1.987	2.18	3.236	0.09	0.24	
	0.753	238.8	251.9			1.748		2.727			
	0	-95.8	156.1	0.40	0.38	1.844	5.48	2.931	0.69	0.92	
	1.507	325.0	481.1			1.519		2.239			0.066
	0	-120.5	360.1	0.37	0.25	1.639	7.94	2.494	1.23	0.82	
	3.020	307.5	668.1			1.332		1.840			0.70
	0	-149.5	518.6	0.49	0.22	1.481	11.21	2.158	1.50	0.50	
	6.027	289.6	817.2			1.183		1.522			1.20
	0	-183.2	634.0	0.63	0.22	1.366	15.50	1.312	1.68	0.28	
	9.040	276.9	910.9			1.089		1.322			3.25
0	-152.7	758.2	0.55	0.17	1.242	14.02	1.648	1.96	0.22		

$\pm \Delta S$ 沈下量 および浮上量

$-\Delta h_m$ 浮上量

h_m 除荷前の供試体厚

表—4 稲永試料の圧密諸係数計算表

載荷後放置時間	C_v (cm^2/min)	m_v (cm^2/kg)	k (cm/min)	$P_m=6027$
30 m	4.83×10^{-1}	1.80×10^{-2}	8.69×10^{-3}	"
4 h	1.22	1.82×10^{-2}	2.23 "	"
1 day	1.39	7.58×10^{-3}	1.05 "	"
2	1.75	1.50×10^{-2}	2.63 "	"
5	1.14	1.89×10^{-2}	2.15 "	"
10	8.57×10^{-2}	1.80×10^{-2}	1.54 "	"
30	1.36	1.81×10^{-2}	2.46 "	"
60	9.49×10^{-2}	1.31×10^{-2}	1.24 "	"

であるから、上と同様の計算を行うと22.4分で50%の膨張を終了することになる。

一軸圧縮試験の供試体は囲りを拘束されていないので、実際の膨張時間は更に短いことが考えられる。土質試験を行う際には、試料を現地より実験室に運搬してから試験を行うのが普通である。試料は地中より採取した直後にシールをするが、これの良否、保存時間および方

法によっては膨張が生じ、土質試験結果にきわめて大きな影響をおよぼしていることが考えられる。故に非圧密非排水セン断試験を行う試料については充分なる注意が必要であるとともに、なるべく現地において、採取直後にセン断試験を行うことが望ましい。

また試験をする場合でも、一本の供試体の試験が終わってから次の試料を押し出して成型するよう心がけるべき

である。

層厚 1 m 当たりの膨張量を、圧密試験における除荷時の浮き上り時に計算した体積圧縮係数 m_v より計算すると、 p が 9 kg/cm^2 の場合は

$$-S = m_v \Delta p \cdot H = 0.018 \times 100 \times 9.0 = 16.2 \text{ cm}$$

$$m_v = 0.018 \text{ cm}^2/\text{kg} \quad H = 1.00 \text{ m}$$

$$\Delta p = 9.0 \text{ kg/cm}^2$$

この計算に用いた m_v の計算結果を表一5および図一20に示す。

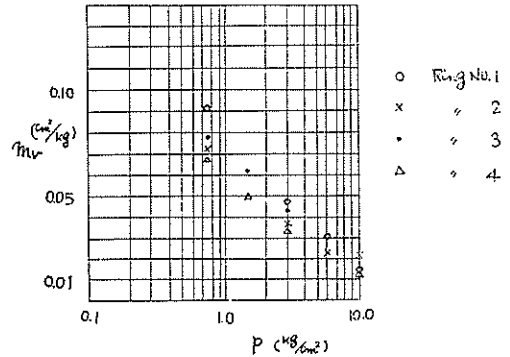
$P = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の時の m_v の式は

$$m_v = -\frac{0.049}{\log(10-1)} \log p + 0.064$$

表一5 錦海試料の m_v 計算表

p (kg/cm^2)	m_v (cm^2/kg)			
	1	2	3	4
0.753	9.18×10^{-2}	7.28×10^{-2}	7.70×10^{-2}	6.82×10^{-2}
1.507	8.45×10^{-2}	1.04×10^{-1}	6.33×10^{-2}	5.00×10^{-2}
3.014	4.64×10^{-2}	3.70×10^{-2}	4.29×10^{-2}	3.44×10^{-2}
6.027	3.12×10^{-2}	2.36×10^{-2}	2.88×10^{-2}	2.13×10^{-2}
9.041	1.55×10^{-2}	2.25×10^{-2}	2.17×10^{-2}	1.33×10^{-2}

この結果、膨張量はかなり大きいものであることがわかった。

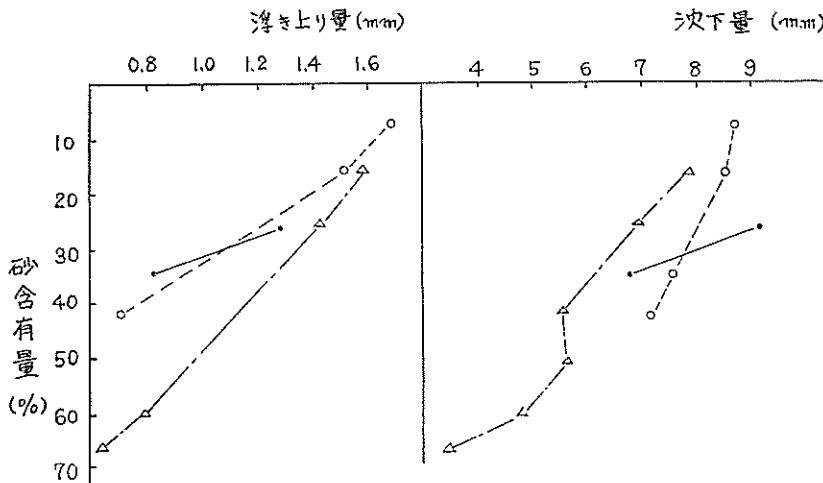


図一20 除去荷重と m_v の関係

2.5 砂含有量の膨張におよぼす影響

粘性土において、砂の含有量が変化すると圧密特性に変化を与える⁷⁾が、これと同様に膨張特性に対しても影響を与える事が考えられる。この影響を究明するために一連の実験を行った。使用した粘土は福山港の堆積粘土で、これに秋田港の砂を混合して、砂含有量を10~70%の内で10%毎に変化させた試料を作って試験を行った。

砂混合比(%)と圧縮量の関係を図一21(a)に示す。また砂混合比と浮き上り量を図一21(b)に示す。



図一21(a) 砂含有量と沈下量の関係

図一21(b) 砂含有量と浮き上り量の関係

これによると圧縮量も浮き上り量ともに砂の含有量が多くなるにしたがって値が少くなっている。浮き上り量と沈下量の比を砂混合比に対してプロットしたものを図一22に示す。また p_r/p_m と砂含有量の関係を図一23に示す。

図一23にみられるように、 $p_r/p_m = 0.3 \sim 0.4$ と比較的狭い範囲内に分布している。したがって今回実験した砂混比が70%程度までの試料においては、膨張による強度減少は砂含有量によって大きく変ることはないと言えらる。 c_v は砂混合比が60~70%でかなりの変化を示し、そ

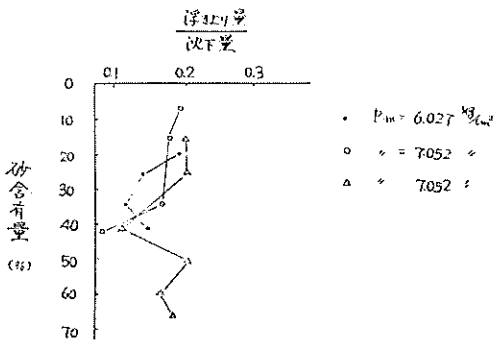


図-22 砂含有量と $\frac{\text{浮き上がり量}}{\text{沈下量}}$ の関係

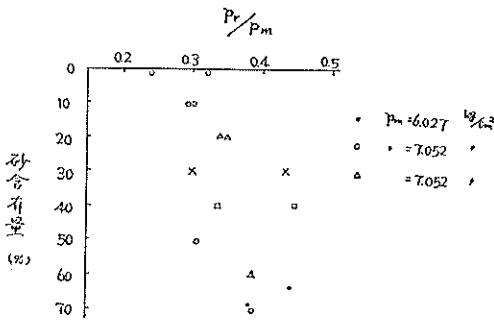


図-23 P_r/P_m と砂含有量の関係

れより少ない混合比のものに比して約5~6倍の大きさを示している。したがって膨張についての特性は、砂混合比60~70%の付近でかなり変わってきていると考えられる。しかし、完全に砂としての性質を示すのは砂混合比85%ぐらいからであり、したがってこの付近まで同様の傾向を示すものと考えられる。

2. 6 膨張の防止について

圧密試験における圧密応力~間ゲキ比曲線の形からも知られているように、応力を除去する際、残留応力が最大応力 p_m の50%以下にならなければ、明瞭な間ゲキ比の変化は生じない。したがってCN比⁵⁾が、0.5以下になると徐々に膨張の影響が起こり、0.3以下になると間ゲキ比の増大が著しくなり、したがって強度も著しく減少する。したがって実際に載荷重を圧密後除去する際に、原位置強度を除荷前の大きさの90%に維持させるために必要な荷重は、CN比の考えを用いて推定できる。 $C_{ur}/C_{um}=90\%$ にするために、近似的に P_r/P_m が90%であることが必要と仮定して390種の圧密試験結果について考察してみた。その結果は図-24に示すようにCN比は0.1~0.3の間にはほぼ平均に分布している。CN比0.3以上はまれであるし、0.1以下もほとんどないことから、

原位置の強度の90%を発揮せしめるためには、除荷の際も最大荷重の10~30%だけは残しておくべきであると考えられる。

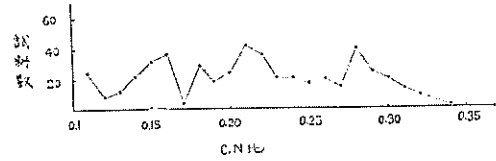


図-24 p_{90} に規制するために必要なCN比

同一試料について上述の規制荷重を検討すると図-25のようになる。使用した試料は錦海-S-16-12134で $w=115\%$, $w_L=121\%$, $w_P=46\%$, $S_r=98.7\%$ であった。ここに p_{r90} は $p_r/p_m=90\%$ とするに必要な実際の残留圧密応力を表わしている。

この図より、圧密応力には関係なく、規制応力は最大応力の25~30%となることがわかる。

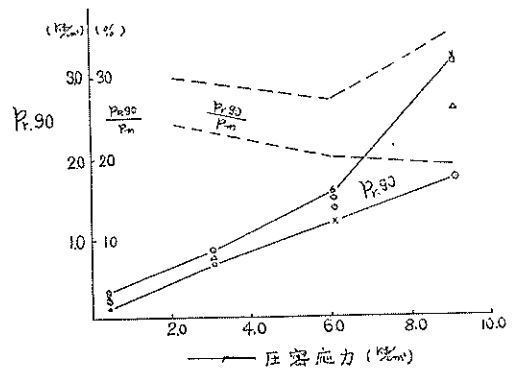


図-25 圧密応力と規制応力の関係

地盤改良工事においては、圧密終了後に載荷重を除去することが多い。地表面近くでは土被り重量が小さいため、載荷と除荷の大きさがほぼ等しく、したがって P_r/P_m 比が小さく載荷除去による原位置の強さの減少が著しいと考えられる。一方深度が大きくなると、土被り重量が大きいため、全圧密応力に対する載荷重または除去荷重の比は小さい。したがって p_r/p_m は大きく膨張による原位置強さの減少は非常に小さいものと思われる。

3. まとめ

3. 1 膨張量と時間

完全に膨張が終了した場合には、土の強さは原状態のもの約半分になる可能性がある。

この強さの減少は設計においてはきわめて大きい問題である。普通多く用いられる一軸圧縮試験について考え

ると、約20分の間に50%近くの膨張が生ずることになる。すなわち、この場合には強さの減少が比較的早く行われるということになる。したがって試験の準備作業を速に行い、試料採取後もできるだけ早く、かつ完全なシールを行う必要がある。

3. 2 地盤改良および根切りにおける膨張の問題

サンドドレーンなどで、圧密終了後地表面上の載荷重を除去する時は、膨張のためにせん断強さが減少する可能性は、地表面近くのみであり、深さが大きければ問題にならない。一方膨張によるせん断強さの減少を実際上防止するための残留荷重については、最大圧密荷重の10~30%である。今 10 t/m^2 の荷重を行ったと考えると、

$$p_{\text{res}}=0.3 \quad p_{\text{max}}=3\text{ t/m}^2$$

この 3 t/m^2 を土被り重量に換算すると、

$$h=\frac{p}{\gamma}=3/1.8=1.6\text{ m}$$

となり、1.6m以下ではほとんどせん断強さは減少しないことになり、プレローディングは有効に働くという結果になる。

3. 3 試料採取にけおる問題

試料採取において、試料が人工的に練り返しをうける問題については、種々の改良を加えることにより徐々に解決されつつある。これとは別に、現在のところ大きくとり上げられてはいないが、試料採取において土の膨張を助成するような方法、特に試料に負圧を与えることはさげねばならない。シルト分の多い試料においては、透水係数も大きいので、この膨張については特に注意が必要である。

3. 4 土質試験と膨張の問題

土質試験は、一般に室内実験が主であり、現地において試験されることはまれである。したがって試料採取後3~6日の後に試験が行われるのが普通である。この間に或程度の膨張が進むことが十分に考えられ、圧密をしないで行う種類の試験においては充分な検討を加える必要がある。特に一軸圧縮試験においては、土の膨張によ

る強さの減少の程度が大きいと思われる。したがって、一軸圧縮試験はできるだけ現地で行い、膨張による強さの減少を防止しなければならない。

4. あとがき

以上に報告した土の膨張に関する実験的研究は、1963年以前に構造部土性研究室で行われたものについて、とりまとめたものである。非常に多くの室内土質試験が行われたが、これら試験に従事した、河口隆明、小川富美子、石渡恵子、藤原敏子、長谷川春子の諸氏に、感謝する次第である。

また本報告をまとめるにあたり、構造部久保浩一、中瀬明男両室長から有益な討論を加えていただいた。ここにあわせて感謝の意を表する。

参考文献

1. Hvorslev, M. J.: Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays, Proc. ASCE Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960
2. Bishop, A. W. and Bjerrum, L.: The Relevance of the Triaxial Test to the Solution of Stability Problems. Proc. ASCE. Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960
3. 藤下利男: 軟弱地盤におけるボーリング, 山海堂, 1963
4. Skempton A. W. and Sowa. V.: The behaviour of saturated clays during sampling and testing, Geotechnique, Vol. 13, No. 4. 1963
5. 石井靖丸, 倉田進, 藤下利男: 粘土の限界CN比に関する研究, 運研報告 Vol. 9, 1958
6. 竹中華之介: 粘土の含水比と強度の関係について, 土と基礎, Vol. 11, No. 3 1963
7. 倉田進, 藤下利男: 粘土と砂の混合土の工学的性質に関する研究, 運研報告, Vol. 11, No. 9, 1961

(昭和40年2月1日受付)