

不飽和土における圧縮性に関する2,3の実験的考察

その他（別言語等） のタイトル	Some Experimental Considerations on the Compressibility in Unsaturated Soil
著者	沢田 義男, 中田 雅夫, 朝日 秀定
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	8
号	3
ページ	533-541
発行年	1976-01-30
URL	http://hdl.handle.net/10258/3610

不飽和土における圧縮性に関する 2, 3 の実験的考察

沢田義男, 中田雅夫*, 朝日秀定

Some Experimental Considerations on the Compressibility in Unsaturated Soil

Yoshio Sawada, Masao Nakata and Hideyasu Asahi

Abstract

Although the validity of Terzaghi's principle for saturated soils is well established and has proved invariable in the prediction of the behaviour of such soils, still we often must deal with unsaturated ones and yet we have only a few study reports on such soils. The authors did some experiments on such soils using oedmeter, then measured the degree of saturation at $pF=0$.

The results of our investigation are summerized as follows:

- 1) Soils at more than the degree of 90% saturation may be recognized as the saturated one.
- 2) At lower applied pressure than the consolidation yield stress, soils particles are bonded together and held the stability by the action of high curvature menisci at the grain contact points, and compressibility is not affected by density. After the consolidation yield, compressibility linearly corresponds very well to dry density.
- 3) At lower applied stress than the consolidation yield stress, the value of creep speed ratio in soil with less degree of 80% saturation is very small, but greatly increases after the consolidation yield. In soils more than 90% saturation, the value of creep ratio is large, and is not much affected by applied stress.

I. はじめに

従来の土の圧縮性についての実験、調査は、Terzaghi 理論の仮定より出発していることから土試料は飽和状

態にあるものが対象とされている。不飽和土の圧縮性については、Bishop の有効応力の提案¹⁾, Barden²⁾, 鳥山と沢田³⁾等の圧密方程式, 吉見と Osterberg⁴⁾や Jennings⁵⁾の研究などが知られるが、いまだ不飽和土の取扱いははっきりしていない。筆者等は不飽和土として考えられる範囲と圧縮特性を知る目的で種々の飽和度の土試料に対し圧密

表-1 試料粘土の物性

比重	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	均等係数
2.71	44.7	29.7	3.94

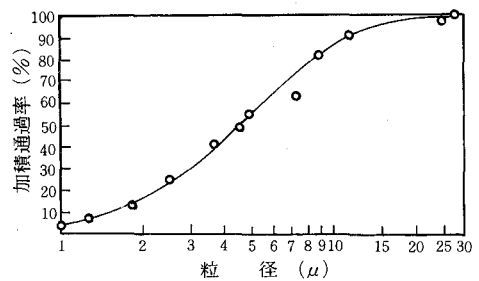


図-1 粒径加積曲線

* 現 三井建設

試験を行なった。なお実験はあくまでも攪乱試料についてであり、結果もこの範囲のものである。

II. 試 料

II-1 原試料

本実験に用いた原試料は市販カオリン粘土で鉱物組成はすでに前号⁶⁾に述べた。この他の物理性等は表-1, 図-1に示した通りである。なお塑性限界の測定にあたりころがす速さはASTMに従って1分間に90往復とした。

II-2 供試体

必要とする飽和度の圧縮試験供試体を得るために供試体作成に先立って締固め試験を行なった。タンパーはトリマーを改造したもので仕事量は $2.7 \text{ (cm}^3\text{-kg/cm}^3)$ である。供試体作成、締固め試験は相対湿度100%の箱の内で行なった。原試料を数段階の含水比にして水分の蒸発を防ぐためにビニール袋に入れ1週間放置したものをを用いた。各含水比各々5ヶの平均を図-2に示すが締固めによる再現性は非常によかった。又、目的の飽和度の供試体は含水比を定め上記の締固め曲線により作成した。

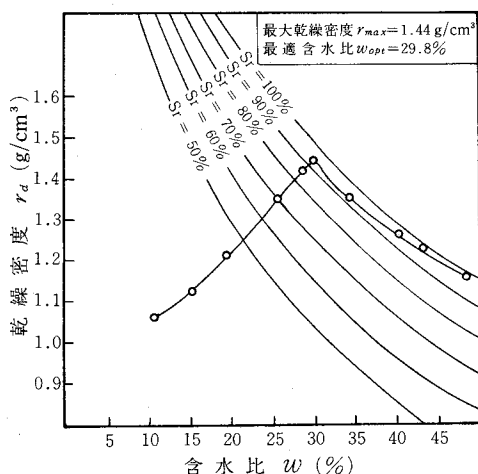


図-2 締固め曲線

III. 実 験

III-1 一軸拘束圧縮試験

一軸拘束圧縮試験は標準圧密試験によった。試験中の供試体からの水分蒸発を防ぐため、圧密箱へ湿った脱脂綿を入れ、加圧板を湿った布で覆い更に圧密箱全体をビニール袋に入れた。この結果比含水比の変化量は

$$(|\Delta w|/w) \times 100 < 0.5$$

但し、 w : 含水比, Δw : 含水比変化量

であった。実験は土質工学会セン断試験法委員会案に従い、初期沈下観測はビデオコーダーによった。

III-2 Collapseの観測

上記の試験と同様の試験中、0.2, 0.8および 6.4 kg/cm^2 の圧力下で浸水させこの時生ずる急

激な沈下を観測した。

III-3 毛管力の測定

毛管力は $pF = 0$ の状態で0となると見て、 $pF = 0$ の状態を砂柱法により測定した。すなわち水面より連続して1 cmの高さにある原試料土の自然吸水状態での含水比、間ゲキ比を測定した。

IV. 考 察

IV-1 e-log P 曲線および圧縮性

初期間ゲキ比は図-2の締めめ曲線より予想される通り最適含水比 $w_{opt} = 29.8\%$ の飽和度 $Sr = 90\%$ 付近で最小値を示している。飽和度 $Sr = 100\%$ の供試体は液性限界 ($w_L = 44.7\%$) の含水比で締めめてあり、初期間ゲキ比は飽和度50%の供試体と同じ $e = 1.19$ となった。e-log P

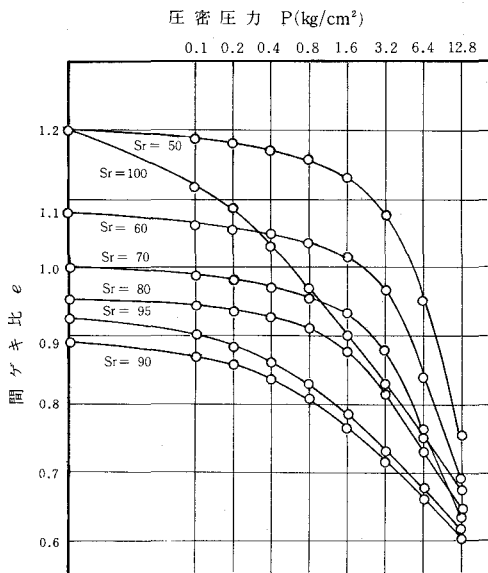


図-3 e-log P 曲線

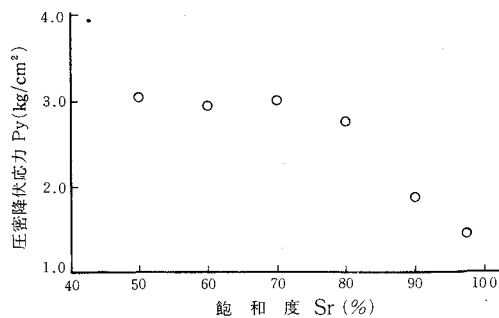


図-4 飽和度-圧密降伏応力

曲線(図-3)をみると曲率の大小、すなわち圧密試験での降伏応力の存在の明確さで飽和度80%以下のものと90%以上のものに分けることができる。そこで飽和度 Sr と圧密降伏応力 P_y の関係を図-4に示す。飽和度80%以下のものは、その初期間ゲキ比の大きさにかかわらずいづれも圧密降伏応力は 3 kg/cm^2 付近であ

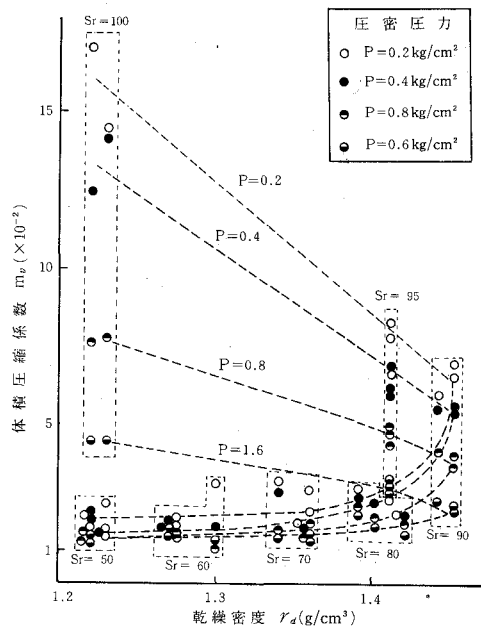


図-5 乾燥密度-体積圧縮係数

る。これに対し含水比では飽和度 80% のものより 1.8% しか高くない上に最も供試体中間ゲキ比の低い飽和度 95% のものでは圧密降伏応力は 1.5 kg/cm^2 前後に低下している。更に $e\text{-log}P$ 曲線の形状を定量的に考察してみる。先づ圧密降伏応力以前と思われる圧密圧力 $0.2\sim 1.6 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で乾燥密度 γ_d と体積圧縮係数 m_v について図-5 に示したが、飽和度 80% 以下の供試体についてはそれらの乾燥密度、圧密圧力にかかわらず体積圧縮係数値およびその変化量共に小さく、飽和度 90% 以上のものとはその傾向を異にしている。次に乾燥密度と圧密降伏応力以上における圧縮性をまとめた形の圧縮指数 C_c との関係を図-6 に示したが、図から分かるように飽和度 90% で圧縮性に最小値を示し、乾燥密度と符合している。すなわち圧密降伏応力以下では圧縮性は乾燥密度に大きく影響はされないが、圧密降伏応力以上で影響が大きいことがわかる。又これらを裏づける意味で西田氏らによって圧縮指数と初期間ゲキ比の間に直線性があることが報告⁷⁾ されていることから初期間ゲキ比の高い供試体について試験を行ったがその結果を図-7 に示す。飽和度 90, 95% のものは明らかに乾燥密度（間ゲキ比）と

圧縮指数との間に直線関係がみられ又飽和度 90% が変曲点に位置していることが示されている。又乾燥密度が同じでも飽和度によってその圧縮性が飽和度 90% を境にして異ることがわかる。体積圧縮係数についても同じ結果が得られた。

IV-2 Collapse と圧縮性の関係

Jennings によれば不飽和土では土粒子同士の接触部にメニスカスを生じ、これによる内部の負圧により土粒子接触部にせん断抵抗を生じしめその構造が保たれていると考えられたが、このメニスカスを解消することにより土粒子相互を結び合せ粒子構造を保つ力を消失させうとの考えから荷重下の不飽和土に侵水をさせ、この結果生じる急激な沈下が Collapse として報告されている⁵⁾。逆に考えれば飽和度 100% の状態ではメニスカスは存在しないので土の構造の

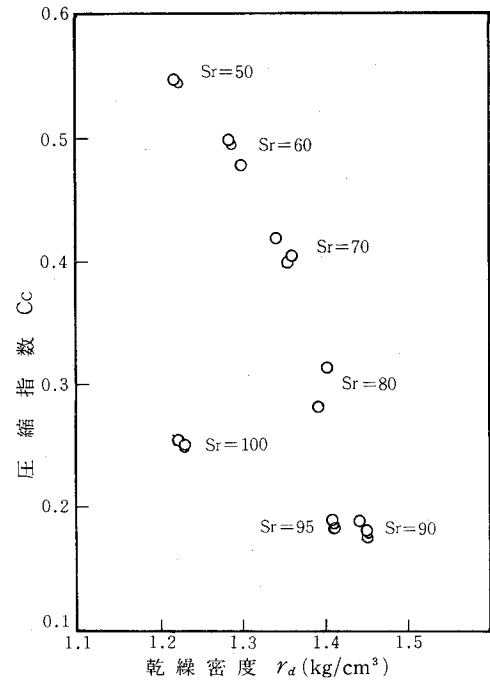


図-6 乾燥密度—圧縮指数

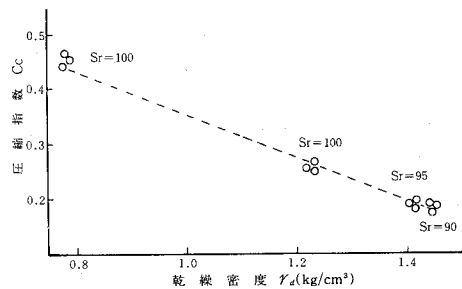


図-7 乾燥密度—圧縮指数（高飽和度部）

崩壊による体積変化はないと云うことになる。そこで種々の飽和度の供試体に対し、0.2, 0.8 および 1.6kg/cm²の圧密圧力の下に 24 時間載荷後、侵水させ、Collapse を生ぜしめた。沈下は 1 時間前後で終了したが結果の間ゲキ比の減少を図—8 に示す。間ゲキの減少は飽和度 70% 以下で顕著であり、80% のものでは極めて小さく、90% 以上の試料ではみられなかった。不飽和土の Collapse を生ぜしめた圧密圧力に対応する Collapse 以前の間ゲキ比が、対応する完全飽和土の間ゲキ比より高い場合に Collapse によって至る間ゲキ比が完全飽和土のそれに近いのは、完全飽和土の粒子構造がその圧密圧力について飽和度の粒子構造より安定であることを示すと考えられる。Lambe⁸⁾は縮固めた試料の配向の度合が含水比の高いものの方が大きいことを示しているが、つまりこのことは侵水によって Collapse が生じた結果はその荷重に対応した安定状態に落ち着くと云うことになる。なお配向の有無については飽和度 95, 100% の試料について縮固め方向と平行および直角方向についてそれぞれ一面セン断試験を垂直荷重 0.2kg/cm² で行ない、結果を表—2 に示すが、縮固め方向のセン断抵抗が大きいことから縮固め方向と直角方向に配向されていることがうかがわれる。又飽和度 90% および 95% のものは Collapse を示さないことから、この点についてもこれらは飽和度 100% の試料と同様の性質を示している。次に不飽和土の Collapse を負圧によって保持される土粒子構造の崩壊によるとすると完全飽和土では負圧は 0 であると考え、水分ポテンシャル $pF = 0$ の状態で含水比および飽和度を測定した。結果を表—3 に示す。この結果より飽和度 90% 以上では負圧そのものが極めて小さいか又は無いと考えられる。吉見と Osterberg⁹⁾は不飽和シルト質粘土の通気性を測定し飽和度 92% で通気性が著しく低下することを報告している。このことから完全飽和状態に近くなると空気はエンドラプドエアになり吸水のための空間を作れない状態にあると考えられる。

表—2 セン断試験結果

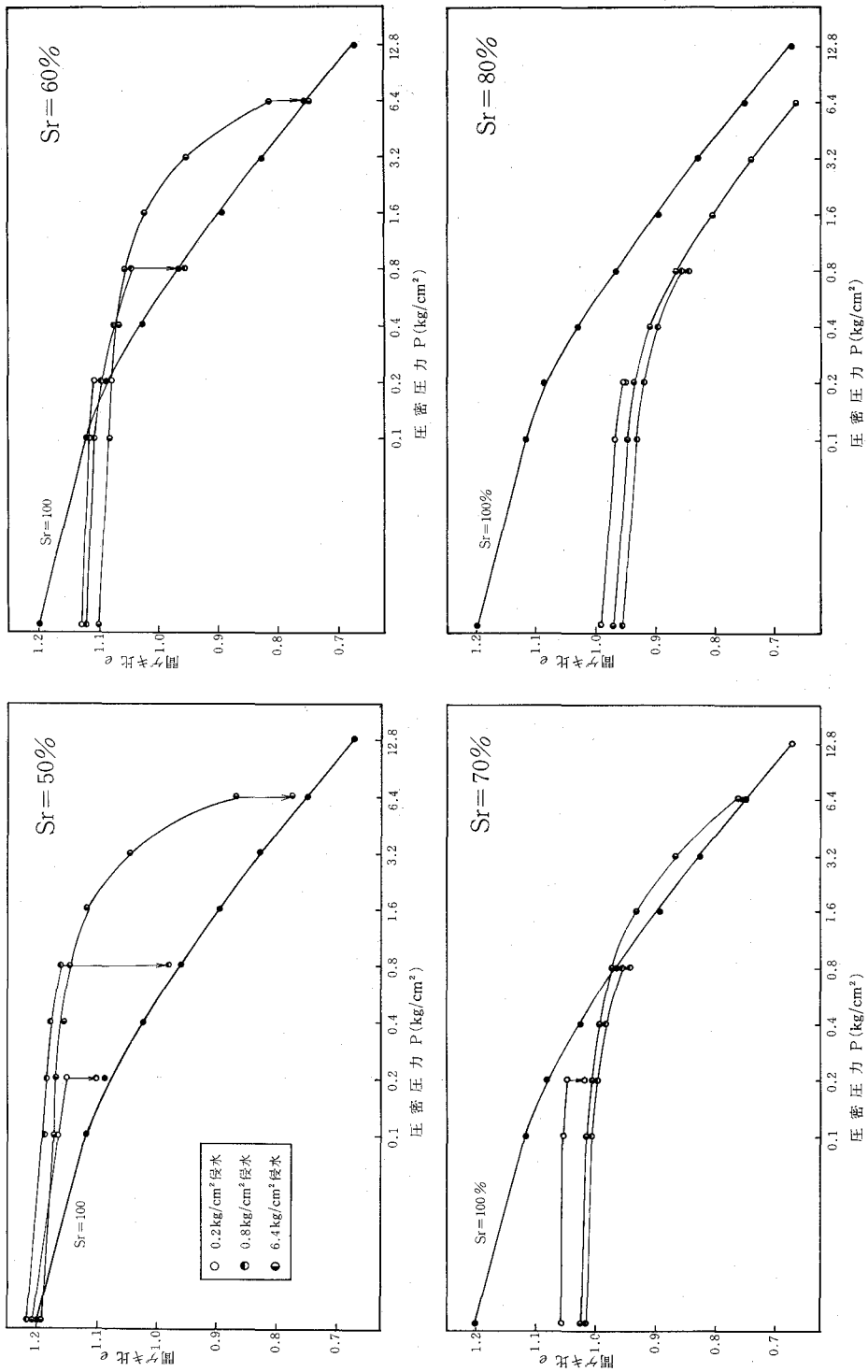
含水比 (%) (間ゲキ比 (%))	32.5 (95)	44.5 (100)
縮固めと平行方向セン断抵抗 (g/cm ²)	71.5	20.0
縮固めと直角方向セン断抵抗 (g/cm ²)	61.9	18.2

表—3 $pF = 0$ 状態

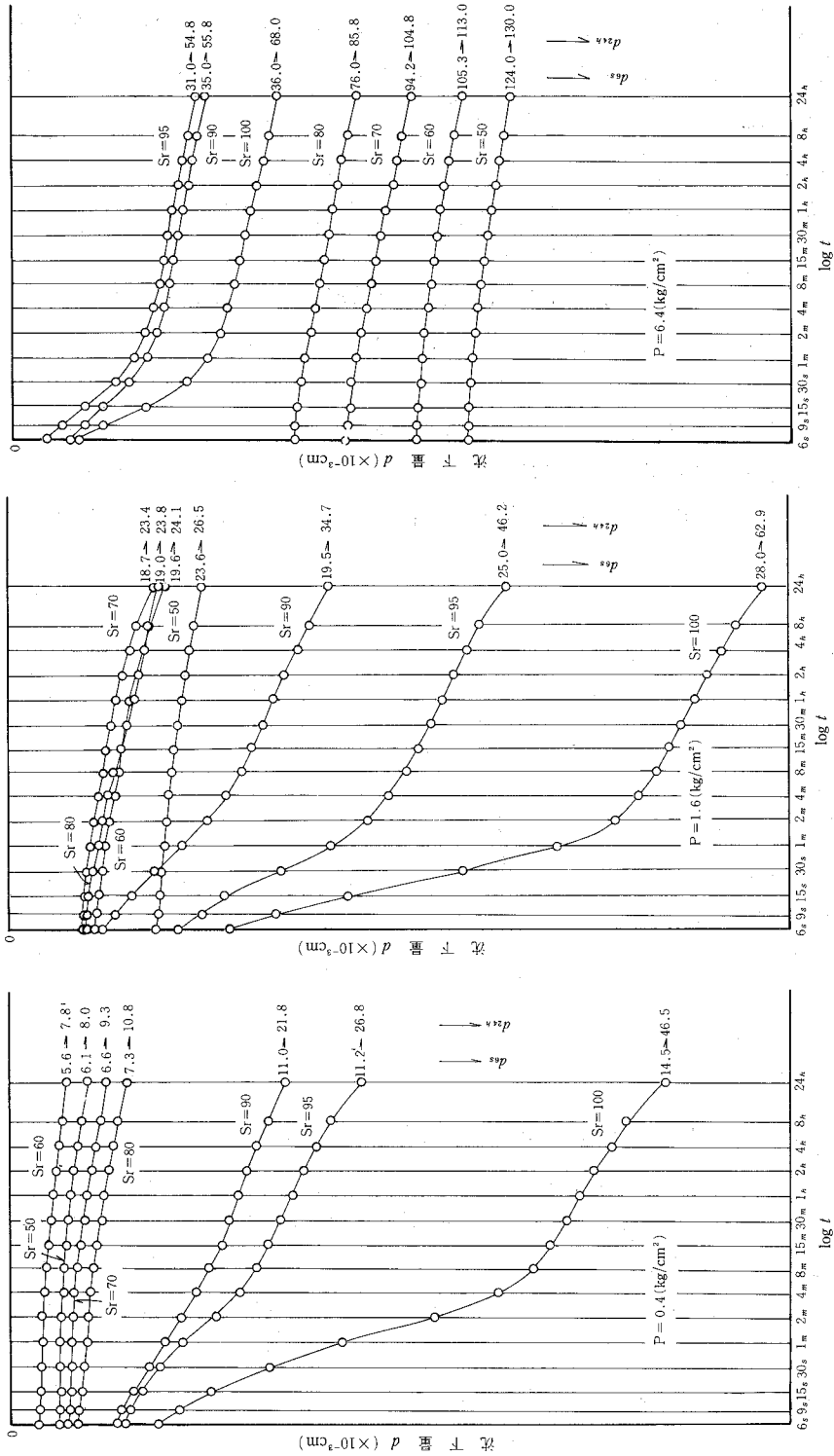
含水比 (%)	73.1	81.5	75.6
飽和度 (%)	91.3	92.8	93.1

表—4 圧密排水による含水比変化と完全飽和にいたる間ゲキ比

初期飽和度 (%)	50	60	70	80	90	95	100
初期含水比 (%)	21.1	24.0	25.6	28.0	29.8	32.5	44.5
含水比変化量 (%)	-0.2	-0.1	0	-0.4	-3.0	-4.9	-13.2
完全飽和にいたる間ゲキ比 (%)	0.60	0.64	0.71	0.81	0.80	0.87	
完全飽和にいたる圧密圧力 (kg/cm ²)	不可	不可	12.8	6.4	0.8	0.4	



図—8 Collapse



図一 9 沈下— $\log t$ 線図

次に圧密による排水の有無および沈下に伴う間ゲキ比の減少による完全飽和状態の出現等について表一4の様な測定および計算結果を得た。この表より飽和土80%以下では圧縮によって排出されるのは大部分空気であることは疑いないと考えられる。

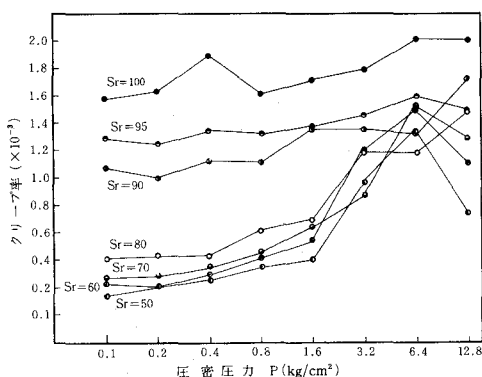
IV-3 時間-沈下

荷重後の経時的沈下の様子を図一9に示す。図に示したものは圧密力が0.4, 1.6および6.4 kg/cm²のものであるが、ビデオコーダーの観測によると飽和度80%のものまでは、0.5秒以内で一次圧密を終了しており、図示されるのは二次圧密部分で、飽和度90%以上の試料とは経時的沈下の様相は非常に異っている。次に二次圧密部の直線的傾きについて

$$k = \epsilon / d \log t$$

とクリープ率 k を定義する。但しここで ϵ : 圧縮ヒズミ, t : 時間 (分) である。

圧密圧力とクリープ率の関係を図一10に示す。この図では経時的沈下の様子が一層はっきりし飽和度80%以下と90%以上における相違が顕著である。又飽和度50~80%のものは降伏応力を越えた3.2kg/cm²以上でクリープ率が飽和度90%以上のものと同程度まで増している。このことも先の侵水によって生ずるCollapseと同様、沈下による飽和度の上昇に伴うメニスカス内の負圧の減少により、粒子間のミクロなせん断抵抗の減少又は消失によるスベリが、塑性遅れ (plastic lag) を生み出していると考えられる。当然飽和度の高い90%以上のものでは圧密圧力の低い段階からクリープが大きく顕れるわけである。



図一10 圧密圧力-クリープ率

V. ま と め

以上述べてきたことをまとめると次の様になる。

- 1) 飽和度90%以上の土は完全飽和土として取り扱う。
- 2) 圧密降伏応力以下の圧密圧力では土粒子はメニスカス発生による負圧で粒子間が安定を保ち、圧縮性は乾燥密度による差はない。又圧密降伏応力の圧密圧力では圧縮性は乾燥密度の変化とは直線的対応関係にあり、締め固め曲線とその傾向は一致する。
- 3) クリープ率は飽和度80%以下のものは、圧密降伏応力以下で小さく、圧密降伏応力以上で大きくなるが、飽和度90%以上のものは、荷重度に関係なく一様に大きい。

〔日本鉱業会北海道支部研究発表講演会 (1975年6月, 札幌) にて発表〕

(昭和50年5月20日受理)

参 考 文 献

- 1) A.W. Bishop: Pore Pressure and Suction in Soils, 38 (1961)
- 2) L. Barden: Geotechniq, **15** (4), 267(1965)
- 3) K. Toriyama and T. Sawada: Soils & Foundations, 8, (1968)
- 4) Y. Yoshimi and O. Osterberg: Proc. ASCE, **89** (SM4), (1963)
- 5) Jennings, J.E. & J.B. Burland: Geotechnique, **12** (2), 125(1962)
- 6) 沢田義男, 朝日秀定: 室蘭工業大学研究報告, **8** (2), 287, (1974)
- 7) 西田義親: 土木学会論文集, **43**, 48 (1957)
- 8) T.W. Lambe: Proc. ASCE, **84** (SM2), 24 (1958)
- 9) 柴田 徹 : 土木学会論文集, **69**, 29 (1960)