

## 粘土・砂の飽和混合土の圧密特性

## Consolidation properties of saturated clay-sand mixed soils

おに つか かつ ただ\* よし たけ しげ き  
鬼 塚 克 忠\* 吉 武 茂 樹\*\*

## 1. はじめに

圧密試験を行い、沈下量、沈下速度を求めようとする対象地盤の土は必ずしも細粒土(74 $\mu$ m以下の粘土, シルト)とは限らない。一般には、図-1のようにかなり粗粒土(74 $\mu$ m以上の砂, 礫)を含んでいる場合が多い。このような土の圧密沈下の算定にあたり、土木技術者は苦慮することがしばしばある。土の圧密特性は含有する細粒土と粗粒土の混合比率や各々の物理的特性値によってかなり異なるものと考えられる。著者らは、細粒土あるいは粘性土として有明粘土と市販のカオリンを用い、これらに粗粒土の豊浦砂と石粉(粒度的にはシルトであるが物理的・力学的諸性質は砂質土)を加えた飽和混合土に所定の先行圧密応力を負荷し、この混合土供試体について標準圧密試験を実施した<sup>1),2)</sup>。初めに、飽和混合土の土構造概念図を表し、砂の混合率が増すと混合土供試体内の粘土粒子間の間隙比が急増することを示す。続いて、圧密試験で求められた混合土の圧密降伏応力、圧縮指数、膨張指数、二次圧密係数、体積圧縮係数、圧密係数、透水係数などの圧密特性と砂の混合率、混合材料の物理的特性との関係について結果と考察を述べる。

## 2. 試料と試験方法

粘性土として佐賀大学構内で採取した有明粘土と市販のカオリン、砂質土として豊浦砂、市販の石粉(炭酸カルシウム)を用いた。これらの試料の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-2に示した。カオリンは有明粘土に比べ粒径はかなり小さいが、活性度は有明粘土の約10分の1と非活性的である。石粉は豊浦砂の粒径の10分の1であり、両者の粒径加積曲線は相似である。前者の石粉は粒度的にはシルトに属するが、非塑性的であり物理的・力学的には砂質土の特性を有する。豊浦砂の粒径は混合する有明粘土とカオリンに比べかなり大きい。特にカオリンと豊浦砂の混合土の粒径加積曲線はかなりの段差ができ、自然の土のそれとは多少異なっている。そこで混合土の粒径加積曲線の段差が小さくなるように、粒径が2種類の粘土と比較してあまり異

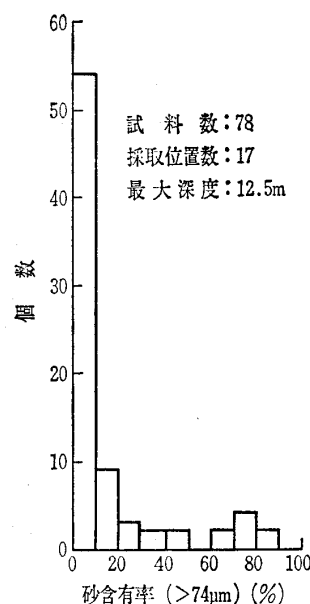
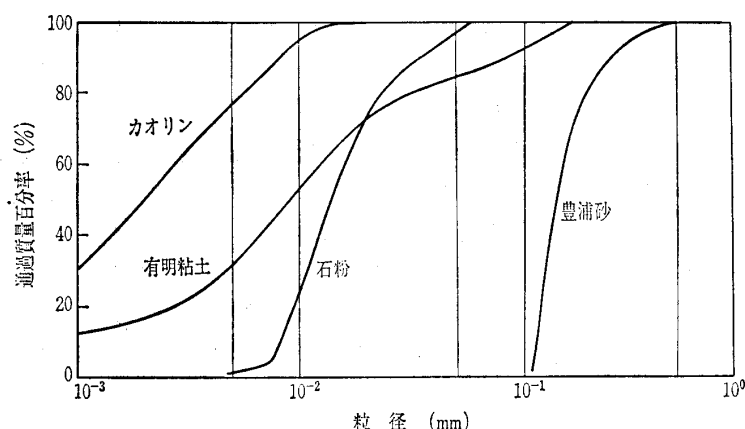
図-1 佐賀市採取土の砂(>74 $\mu$ m)含有率の度数分布

図-2 試料の粒径加積曲線

ならない石粉も砂として採用した。用いた有明粘土は粗粒分(>74 $\mu$ m)を11%含むが、この有明粘土とカオリンを以降、粘土と呼ぶことにする。豊浦砂と石粉を砂と呼ぶ。

有明粘土とカオリンの各粘土に、豊浦砂と石粉の砂を別個に全乾燥質量の0, 20, 40, 60, 80, 100%になるように加えた。有明粘土は自然含水状態の湿潤試料、カオリンは液性限界以上の含水状態の試料であり、これらに豊浦砂や石粉を加え、十分に練返して混合した。粘土2種類、砂2種類で計4種類の組合せである。高さ5cmのカラーを取付けた直径6cm、高さ2cmの圧密リングの中にこれらの

\*佐賀大学助教授 理工学部土木工学科

\*\*佐賀大学助手 理工学部土木工学科

表一 試料の物理的性質

試料	比重 $G_s$	粒度分布 (%)			$D_{50}$ (mm)	均等係数 $U_c$	液性限界 $w_L$ (%)	塑性限界 $w_p$ (%)	塑性指数 $I_p$ (%)	活性度 $A$
		砂分	シルト分	粘土分						
有明粘土	2.61	11	57	32	0.010	—	136	50	86	5.1
カオリン	2.71	0	24	76	0.002	—	61	35	26	0.5
豊浦砂	2.64	100	0	0	0.150	1.4	—	—	—	—
石粉	2.65	0	99	1	0.015	2.0	—	—	—	—

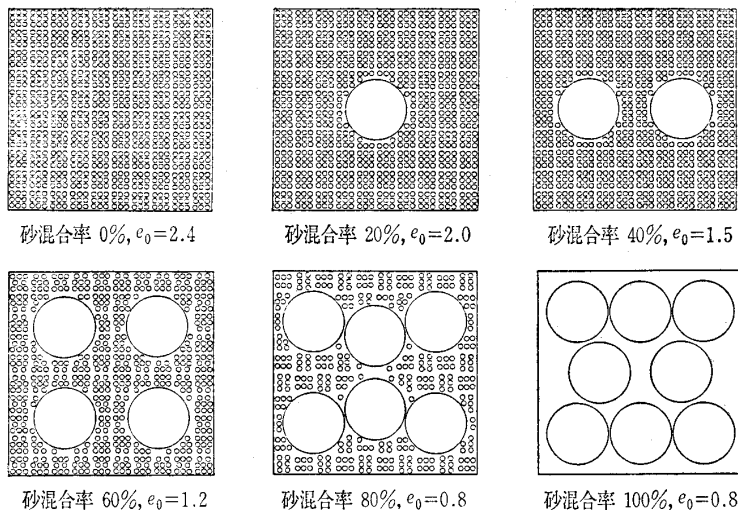
試料を緩く詰め、0.1, 0.2, 0.4, 0.8 kgf/cm<sup>2</sup> の圧密荷重を各段階 1 日間加えた。最終段階の沈下が安定した後、上部のカラーを取除き、リングからはみ出ている試料を切取って高さ 2 cm の供試体とした。この  $p_0=0.8$  kgf/cm<sup>2</sup> の先行圧密応力を受けた供試体について標準圧密試験を行った。なお、先行圧密後の全供試体の飽和度の平均値は 95.7 %、その範囲は 87.7~100.3 % であった。

### 3. 混合土の間隙と砂混合率の関係

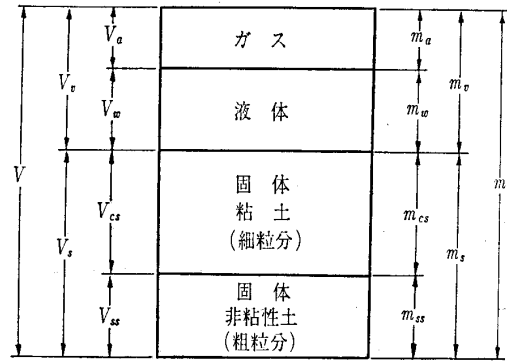
混合土中の粘土と砂の粒径の大きさ、これらの粒子の混合の割合、充填の度合、間隙の大きさと分布をおおまかに、かつ可視的に表現することを試みた。そこで次のような仮定のもとに単純化した土構造の概念図を描いてみた。粒子は均一粒径の球であり、その粒径は  $D_{50}$  (50% 通過粒径) に等しいと考える。4 試料の  $D_{50}$  は、有明粘土 0.010 mm, カオリン 0.002 mm, 豊浦砂 0.150 mm, 石粉 0.015 mm である。

図一 3 に有明粘土と豊浦砂の混合土の土構造モデル図を示した。これは先行圧密応力  $p_0=0.8$  kgf/cm<sup>2</sup> まで載荷して作成した混合土供試体の初期状態に対応する。大きい球が豊浦砂、小さい球が有明粘土を表し、その粒径比は  $D_{50}$  比と同じ 15 対 1 になるように描いている。同図の正方形の面積から球の総面積を差し引いた空白部分が土の間隙を表す。

図から分かるように、砂の混合率が大きくなるほど粘土粒子間での間隙が大きくなる。次にこれを定量的に表すことにする。図一 4 に土粒子を粘土粒子と砂粒子に分けた 4 相モデル<sup>3)</sup> を示している。砂分 (非粘着成分) を考慮せず粘土分 (粘着成分) のみに注目して間隙比を求めると



図一 3 有明粘土豊浦砂混合土の間隙比  $e_0$  の変化を示す土構造概念図



図一 4 4 相モデル

$$e_c = \frac{V_v}{V_{cs}} = e \frac{\rho_{cs}}{\rho_s} \frac{1}{1-\beta} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $e = V_v/V_s$ , 通常の間隙比

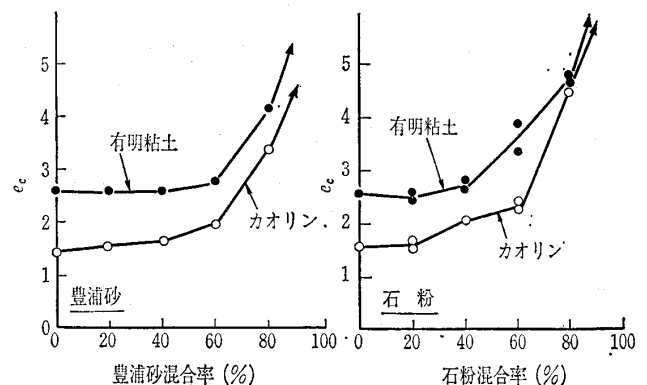
$\rho_{cs}$ : 粘土粒子の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_s$ : 混合土粒子の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$\beta = m_{ss}/m_s$ , 混合土粒子に占める砂粒子の割合, 混合率

上式の  $e$  に初期間隙比を代入し、豊浦砂、石粉の混合率  $\beta$  と粘土分のみの間隙比  $e_c$  の関係を求めると 図一 5 のようになる。試験に用いた有明粘土は前記のように 74 $\mu$ m 以上の粗粒分を 11% 含むが、図一 3 では  $D_{50}=0.010$  mm の均一粒径から成る粘土と仮定して土構造図を描いた。さらにここでは、粘土に豊浦砂や石粉を加えることによって  $e_c$  がどのように変化するかを調べている。そこで、図一 5 の  $e_c$  の算定にあたっては 11% の粗粒分を無視し有明粘土はすべて粘土分であると考えた。混合率が小さい範囲では  $e_c$  はあまり変化しないが、混合率が 60% を越えると  $e_c$  は急増する。これは、先に示した図一 3 で述べた粘土粒子間の

間隙比 - 混合率の関係、すなわち砂の混合率が大きいほど粘土粒子間での間隙が大きくなることとよく対



図一 5 混合土の  $e_c$  と豊浦砂、石粉混合率

応している。混合土に占める砂の割合が60%を越えると、粘土粒子間の間隙が増し、後述のように土の力学的特性の1つである透水性は増大し砂の性質を呈することが分かる。一般に、土は74 $\mu$ m以上の砂分の含有率が85%以上であれば砂の性質を有し、60%以上であれば砂質土の性質を有する<sup>4)</sup>とされているが、混合土の力学的特性は粘土分のみ注目した間隙比 $e_c$ に大きく影響を受けることが推察できる。

#### 4. $e$ -log $p$ 曲線

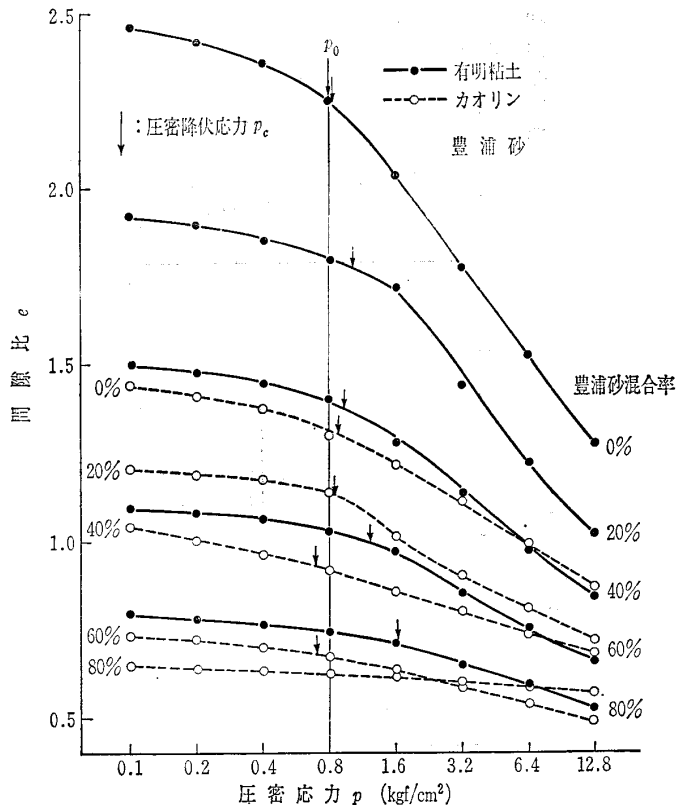
##### 4.1 圧密降伏応力

図—6, 7は $p_0=0.8$  kgf/cm<sup>2</sup>の先行圧密応力を受けた混合土の $e$ -log  $p$  曲線である。試料や混合率(全乾燥質量に占める豊浦砂, 石粉の乾燥質量の割合, %)が異なるにもかかわらず、 $e$ -log  $p$  曲線群は過圧密領域では交差せず正規圧密領域で直線となる。

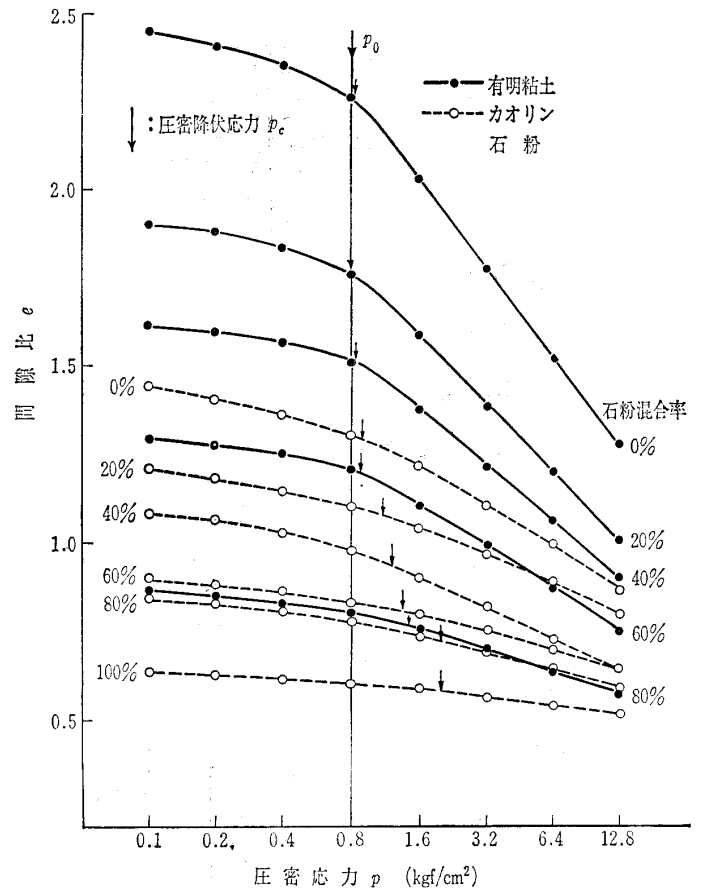
豊浦砂, 石粉の混合率が多くなるにつれて全体がフラットになり、明確な変曲点が見られなくなる。三笠の方法<sup>5)</sup>で求めた圧密降伏応力 $p_c$ と先行圧密応力 $p_0$ (=0.8 kgf/cm<sup>2</sup>)の比を混合率に対してプロットしたのが図—8である。圧密降伏応力と先行圧密応力の差は混合率が大きくなるほど大である。特に豊浦砂, 石粉の混合率が60%を越えると $p_c$ は大きく求まり、正確な値は得られにくい。図解法による圧密降伏応力決定の適用限界は自然の土においてもおよそ砂の混合率60%と言えよう。

##### 4.2 圧縮指数と膨張指数

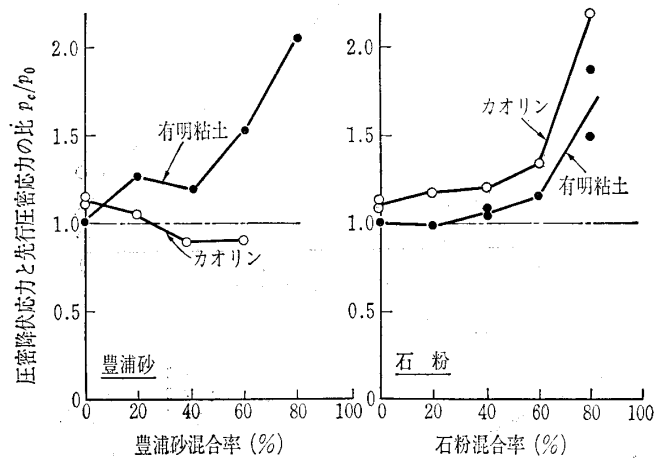
正規圧密領域における $e$ -log  $p$  曲線の傾きを示す圧縮指



図—6 豊浦砂を含む混合土の $e$ -log  $p$  曲線



図—7 石粉を含む混合土の $e$ -log  $p$  曲線



図—8 圧密降伏応力・先行圧密応力比と豊浦砂, 石粉混合率

数 $C_c$ は図—9に示すように豊浦砂, 石粉の混合率が増えると直線的に減少する。カオリンの混合土の圧縮指数は有明粘土の混合土の約半分である。砂が豊浦砂, 石粉であれば混合土の圧縮指数はほとんど変らない。これらの圧縮指数を塑性指数 $I_p$ に対してプロットすると、図—10のように塑性指数の減少とともに小さくなる。なお、豊浦砂および石粉のコンシステンシーはNPであるが、便宜的に $I_p=0$ と考えて図—10にプロットしている。

$$C_c = 0.10 + 0.80 \left( \frac{I_p}{100} \right) \dots \dots \dots (2)$$

次に圧縮指数を先行圧密応力( $p_0=0.8$  kgf/cm<sup>2</sup>)と等し

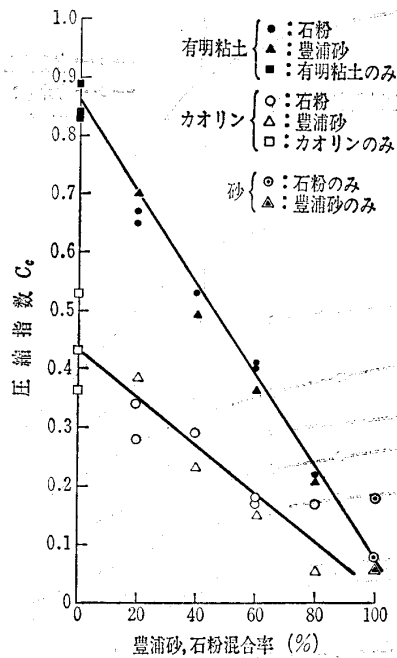


図-9 圧縮指数と豊浦砂, 石粉混合率

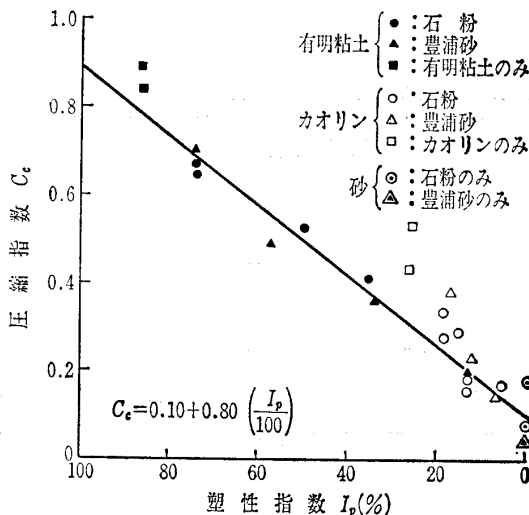


図-10 圧縮指数と塑性指数

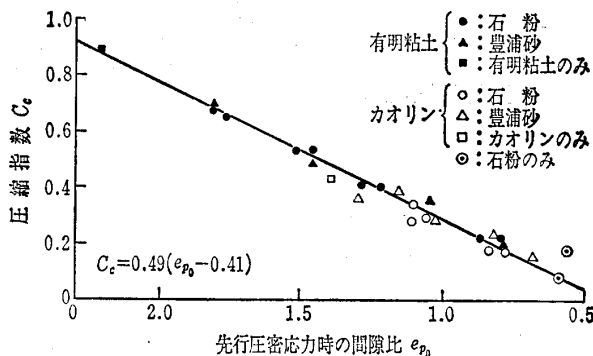


図-11 圧縮指数と先行圧密応力時の間隙比

い圧密荷重時の間隙比  $e_{p0}$  に対して整理すると, 試料の違いにかかわらず図-11のように一本の直線になる。

$$C_c = 0.49(e_{p0} - 0.41) \dots\dots\dots (3)$$

著者らは既に別途, 乱さない有明粘土の圧縮指数と自然間隙比  $e_n$  の関係<sup>6)</sup> を数多いデーターの統計処理により求

めているが, 有明粘土の関係式と式(3)は完全に一致している。人工的に混合した土と自然堆積土の間隙比 ( $e_{p0}$ ,  $e_n$ ) と圧縮指数  $C_c$  の関係が同一であることは極めて興味ある事実と言える。上式は先行圧密応力に対応する初期間隙比  $e_{p0}$  が求まると圧縮指数が定まることを表している。すなわち, ある土の先行圧密応力および土の種類 (砂, 粘土, 混合土など) や状態 (含水量, 密度, 土構造など) に応じて間隙比  $e_{p0}$  は定まり, 図-12の模式図に見られるように, この  $e_{p0}$  の値によって正規圧密領域における  $e$ - $\log p$  の関係は必然的に決まるのである。

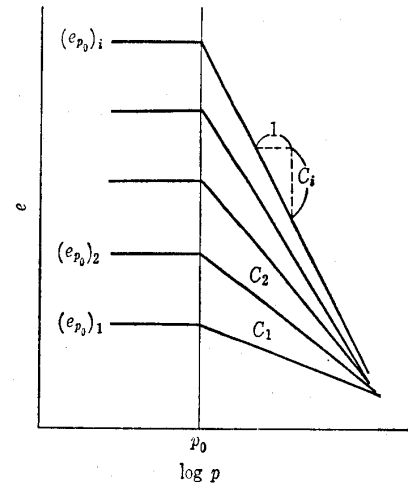


図-12 先行圧密応力・間隙比, 圧縮指数の関係

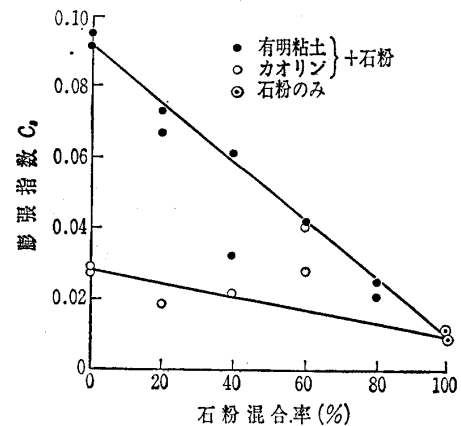


図-13 膨張指数と石粉混合率

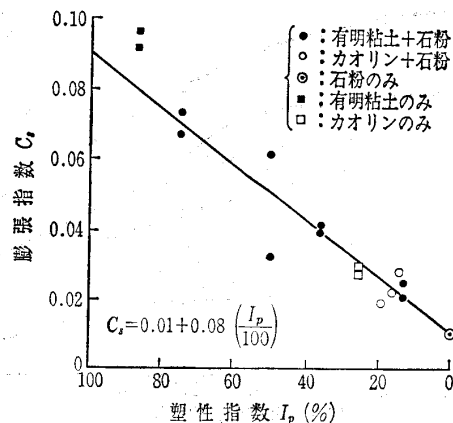


図-14 膨張指数と塑性指数

$e$ - $\log p$  曲線の除荷曲線の傾き  $C_s$  は砂の混合率の増加とともに小さくなる。図-13に示すように粘土がカオリンの場合は若干ばらつくものの、ほぼ圧縮指数の10分の1である。

$$C_s = 0.10 C_c \dots\dots\dots(4)$$

これらの膨張指数  $C_s$  と塑性指数の関係とを求めると、図-14のように

$$C_s = 0.01 + 0.08 \left( \frac{I_p}{100} \right) \dots\dots\dots(5)$$

となる。

## 5. 圧密沈下量と $\log t$ の関係

圧密沈下量  $d$  と  $\log t$  の関係を示すと図-15のようになる。豊浦砂の混合率が60%を越えると圧密沈下量が  $\log t$  に比例し直線関係となる。これは圧密荷重によりわずかな秒で一次圧密が終了し、引続き二次圧密が生じることを意味している。それ故、豊浦砂、石粉の混合率が60%を越える試料について、テルツァーギの圧密理論を適用することは無意味であり、得られた圧密係数  $c_v$  や透水係数  $k$  は信頼できない。

次に各試料の各荷重段階における圧密沈下量  $d$  と  $\log t$  のデータより二次圧密係数  $C_\alpha$  を求めた。 $C_\alpha$  は

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} = \frac{1}{h_0} (1 + e_0) \frac{\Delta d}{\Delta \log t} \dots\dots\dots(6)$$

で定義される。二次圧密係数は図-16のように、有明粘土の混合土で  $C_\alpha = 0 \sim 0.040$ 、カオリンの混合土で  $C_\alpha = 0 \sim 0.010$  の値を有し、粒径は大きい活性度の高い有明粘土の方がカオリンより平均4倍ほど大きい。

二次圧密係数  $C_\alpha$  は圧縮指数  $C_c$  と同様砂の混合率の増加とともに減少する。 $C_\alpha$  と  $C_c$  の関係は

$$\text{有明粘土の混合土で } C_\alpha \approx 0.040 C_c \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{カオリンの混合土で } C_\alpha \approx 0.020 C_c \dots\dots\dots(8)$$

となる。なお同様な関係式として、そうら層に対して、 $C_\alpha$

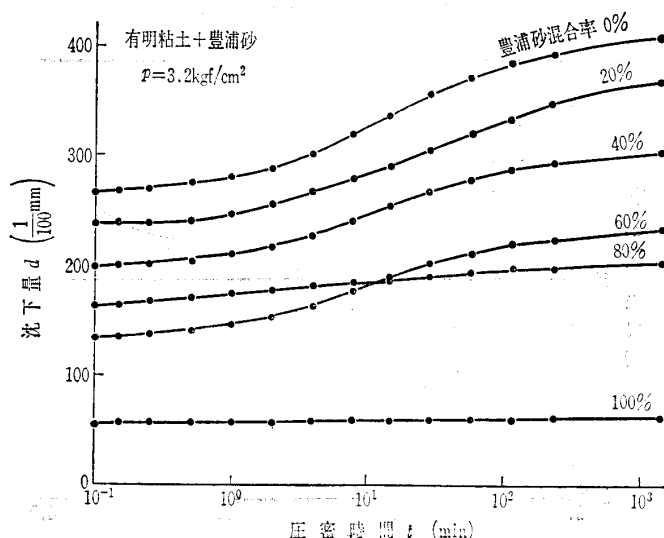


図-15 圧密沈下量と圧密時間

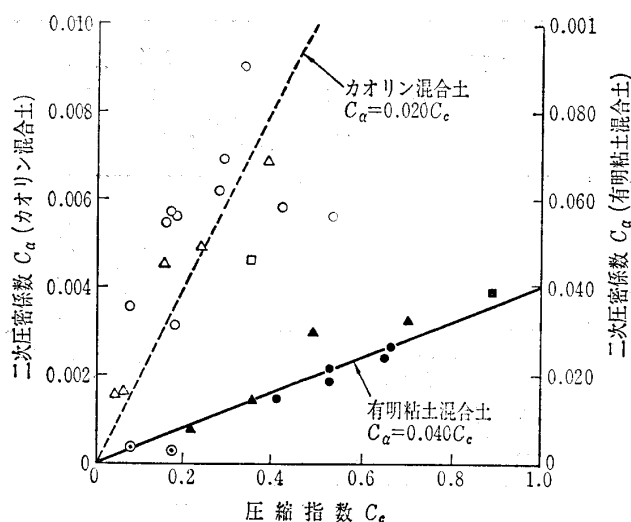


図-16 二次圧密係数と圧縮指数

$= 0.059 C_c^{0.7}$ 、川崎粘土と豊浦砂の混合土に対して  $C_\alpha = 0.073 C_c^{0.9}$  などがある。

## 6. 体積圧縮係数

図-17は圧密圧力  $p = 0.32, 0.64 \text{ kgf/cm}^2$  における体積圧縮係数  $m_v$  と豊浦砂の混合率との関係を示す。両試料とも豊浦砂の混合率が高くなると  $m_v$  は減少していく。有明粘土の混合土では豊浦砂の混合率が80%を、カオリンの混合土では同混合率が60%を越えるとその傾向が著しい。これらの混合率以上の砂を含有すると、その混合土の圧縮特性は砂自体のそれと類似してくることが分かる<sup>1), 2), 9)</sup>。

次に混合土の体積圧縮係数と平均間隙比  $e$  の関係を示したのが図-18である。ここで、平均間隙比  $e$  はある圧密荷重による載荷の前と後の間隙比の平均値である。圧密荷重が圧密降伏応力より大きい正規圧密領域では直線関係にあり、間隙比の減少とともに  $m_v$  は直線的に小さくなる。砂

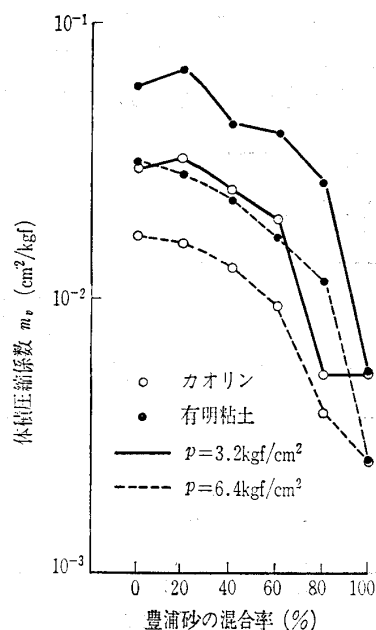


図-17 体積圧縮係数と豊浦砂混合率

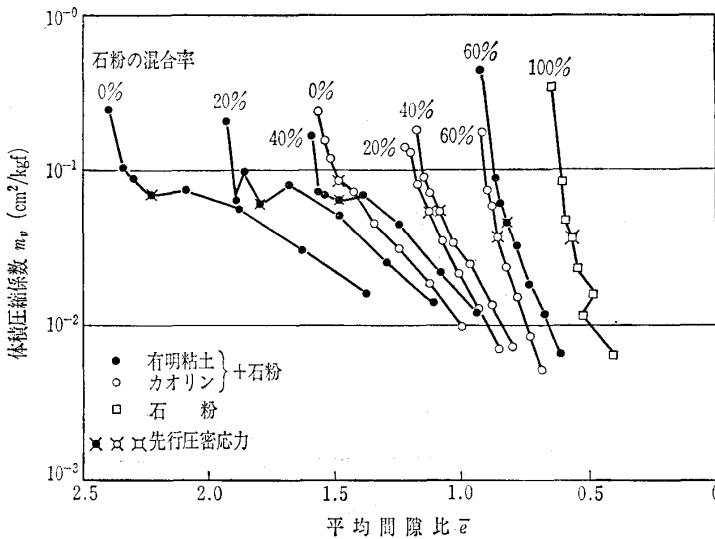


図-18 体積圧縮係数と平均空隙比

の混合率が大きいほど直線の傾きは大きく、わずかに締めるだけで圧縮性が小さくなる。 $m_v$ と平均空隙比の関係は含まれる砂が豊浦砂、石粉の違いに関係なく同一である。同図より次のことが分かる。同じ空隙比のとき、砂の混合率が大きいほど、 $m_v$ は大となる。空隙が同じでも全土粒子に占める砂（非粘性材料）の比率が高いほど、多量の水が脱けやすいことを意味している。また同じ $m_v$ の値を示す空隙比は、砂の混合率が大きいものほど小さいことも分かる。

## 7. 圧密係数, 透水係数

先に述べたように豊浦砂、石粉の混合率が60%を越えると、標準圧密試験より求めた圧密係数 $c_v' (=r \cdot 305(\bar{h})^2/t_{90})$ 、透水係数 $k$ の値は信頼できない。そこで豊浦砂、石粉の混合率0~60%の混合土について考察する。圧密係数はこれら砂の混合率の増加とともに大きくなる。圧密係数と平均空隙比の関係を見ると、図-19に示すように特に有明粘土の混合土の場合は、先行圧密応力を越えると圧密係数は平均空隙比の減少とともに小さくなり、その後ほぼ一定値に

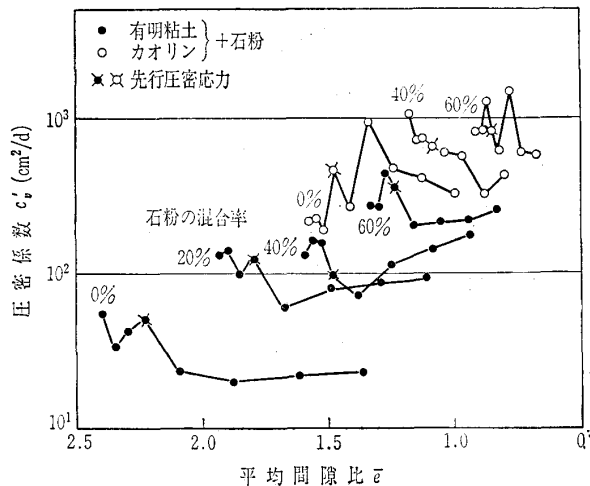


図-19 圧密係数と平均空隙比

落ち着く。有明粘土の混合土の圧密係数は $c_v' = 2 \sim 10^1 \sim 5 \times 10^2 (\text{cm}^2/\text{d})$ 、カオリンの混合土の場合は $c_v' = 2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3 (\text{cm}^2/\text{d})$ である。カオリンの混合土の方が4~10倍大きい。粒径は小さいが活性度の低いカオリンでは電気化学的な作用が小さく吸着水の厚さが薄いため $c_v'$ は大きくなるのである。

透水係数も豊浦砂、石粉の混合率の増加につれて大きくなる。透水係数の値は有明粘土の混合土で、 $k = 3 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 、カオリンの混合土で $k = 2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ である。カオリン混合土の方が約7倍大きい。透水係数と平均空隙比の関係は、体積圧縮係数の場合と同様に正規圧密領域では直線関係にある。図-20にその一例を示した。土の種類や砂混合率の違いにかかわらず、 $\log k - e$ 曲線群はほとんど交わることなく位置する。豊浦砂、石粉の混合率が大きいほど、直線の傾きは大きい。すなわち、砂分を多く含むほど、

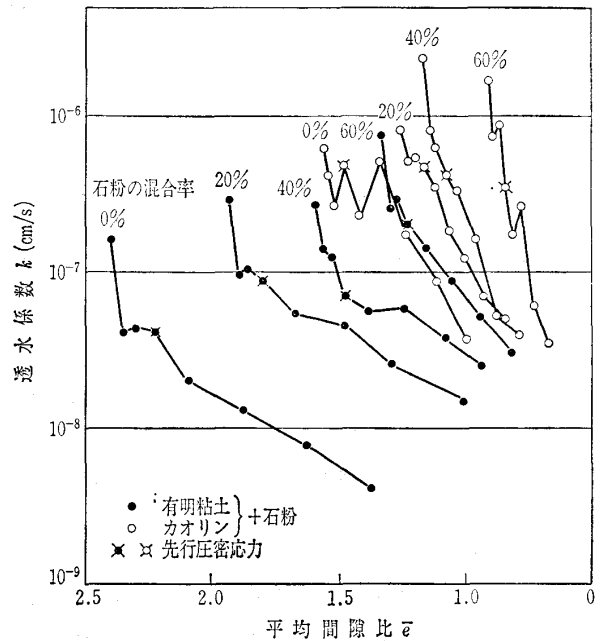


図-20 透水係数と平均空隙比

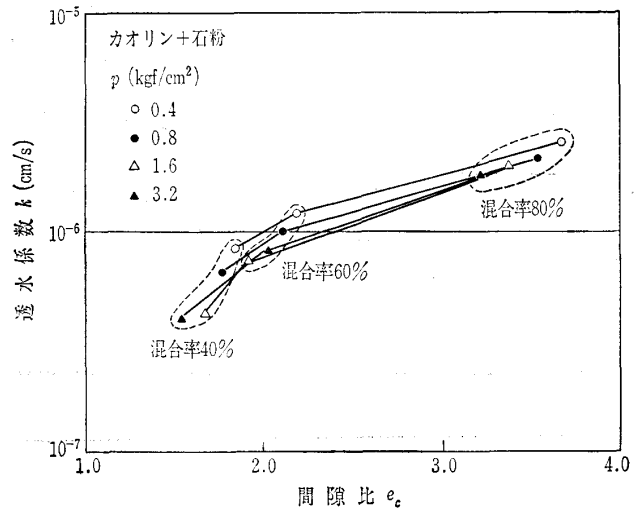


図-21 透水係数と空隙比 $e_e$ の関係

わずかな間隙比の変化で透水係数は大きく変わる。透水係数と平均間隙比の関係は含まれる豊浦砂、石粉の違いに影響されない。また同図より、同一間隙比の場合、砂の混合率が大きいほど透水係数は大きいこと、同一透水係数を有する混合土の場合、混合率が大きいほど平均間隙比は小さいことなどが分かる。

上記の透水係数は圧密試験より算定したものであり、すでに述べたように砂の混合率が60%を越えるとその値は信頼できない。そこで別途、各荷重で圧密した混合土供試体について、圧密箱の底板につないだビューレットを用いて変水位透水試験を行った。このようにして得られた透水係数を、粘土分のみに注目して求めた間隙比  $e_c$  に対してプロットすると図-21となる。砂の混合率が増えると  $e_c$  が大きくなることを先に記したが、 $e_c$  が増えるほど透水係数が大きくなることが同図より分かる。圧密係数も  $e_c$  に対し同様な関係を有することが推察できる。混合土のこれらの力学的特性に間隙比  $e_c$  が大きく関与していると言える。

なお、混合土の砂（豊浦砂、石粉）の粒径の大小にかかわらず同様な圧密特性が得られているので、粒径加積曲線における段差の圧密特性に及ぼす影響は少ないと考えられる。

## 8. 結 論

有明粘土および市販のカオリンに豊浦砂および石粉を所定の混合率になるように混合、練返しを行い、圧密容器内で一定の先行圧密応力を加えた。この飽和混合土について標準圧密試験を実施し、混合土の圧密特性と砂（豊浦砂、石粉）の混合率、試料の物理的性質との関係について考察した。試験結果と考察をまとめると次のとおりである。

1) 土粒子を  $D_{50}$  の均等球で表し混合土の土構造図を描くと、砂（豊浦砂、石粉）の混合率が大きくなるほど粘土粒子間の間隙が大きくなることが分かる。砂分を無視して粘土粒子のみに着目して求めた間隙比  $e_c$  は砂の混合率が60%を越えると急増する。このことは、一般に、砂の混合率が60%を越えると混合土が砂の特性を有することと対応している。

2) 図解法により圧密降伏応力を求める方法の適用限界は砂の混合率60%である。

3) 混合土の圧縮指数  $C_c$  と膨張指数  $C_s$  は砂の混合率が増えると減少し、これらの両指数は塑性指数と直線的な関係にあり、 $C_c = 0.10 + 0.80 \left( \frac{I_p}{100} \right)$ ,  $C_s = 0.01 + 0.08 \left( \frac{I_p}{100} \right)$  で表される。両者の関係は  $C_s = 0.10 \cdot C_c$  である。

4) 圧縮指数は先行圧密応力時の間隙比  $e_{p0}$  に対して  $C_c = 0.49(e_{p0} - 0.41)$  の関係にある。この式は自然地盤の有明粘土について別途得られたものと同一である。正規圧密領域における  $e$ - $\log p$  曲線の傾きは先行圧密応力に対応する間隙比の値で定まる。

5) 砂の混合率が60%を越えると、圧密量の大部分を二次圧密が占めテルツァーギの圧密理論は適用できない。

6) 二次圧密係数  $C_a$  は活性度の高い有明粘土を含む混合土の方がカオリンを含むものより平均4倍ほど大きい。二次圧密係数は圧縮指数と比例関係にあり、有明粘土の混合土の場合  $C_a = 0.040 C_c$ , カオリン混合土の場合  $C_a = 0.020 C_c$  である。

7) 体積圧縮係数は、砂の混合率が有明粘土の混合土で80%、カオリンの混合土で60%を越えると急減する。これらの砂混合率を越えると混合土の圧縮特性は砂のそれと類似する。

8) 圧密係数、透水係数については、粒径は大きい活性度の高い有明粘土を含む混合土の方がカオリンの混合土より小さい。両係数は土の活性に影響を受ける。

9) 以上1)~8)は混合土中の砂が豊浦砂、石粉のいかんにかかわらず言える。粒度ではシルトに属するが非塑性材料の石粉は混合土の圧密特性に関しては砂として挙動する。

最後に、本報告の実験の一部を担当していただいた本学卒業者、仙頭伸昭君（現在、谷川建設㈱）に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 鬼塚克忠・吉武茂樹：砂・粘土混合土の圧縮特性，昭和52年度土木学会西部支部研究会発表講演集，pp. 93~94, 1978.
- 2) 鬼塚克忠・吉武茂樹：粘土・砂の飽和混合土の圧密特性，土木学会第40回年次学術講演会，第Ⅲ部門，pp. 541~542, 1985.
- 3) 福江正治・大草重康：砂と粘土の工学的性質の新しい評価方法について，東海大学紀要，海洋学部，第14号，pp. 247~261, 1981.
- 4) 倉田 進・藤下利男：砂と粘土の混合土の工学的性質に関する研究，運輸技術研究所報告，第11巻，第9号，pp. 389~424, 1961.
- 5) 土質工学会：土質試験法，土の圧密試験方法（案），pp. 414~422, 1981.
- 6) 鬼塚克忠・吉武茂樹：有明粘土の圧縮指数と物理的諸性質の相関，土と基礎，Vol. 33, No. 4, pp. 67~69, 1985.
- 7) 安原一哉：2. そうら層，九州・沖縄の特殊土，土質工学会九州支部編，九州大学出版会，pp. 11~22, 1983.
- 8) 中瀬明男・中ノ堂裕文・日下部治・野村 浩：混合土の圧密特性について，第13回土質工学研究発表会講演集，土質工学会，pp. 213~216, 1978.
- 9) 中村六史：有明粘土地盤の工学的特性と調査・施工例，低平地防災技術研究報告，No. 1，佐賀大学理工学部土木工学科，建設工学科，pp. 23~73, 1984.

（原稿受理 1985.9.12）