

土構造に着目した混合土の一次元圧縮特性

大嶺 聖*・落合英俊**

本論文では、混合土の土構造に着目し、砂と粘土の混合土の応力-ひずみ関係を予測する手法を検討した。混合土は粗粒子骨格とマトリックス（細粒子と水から成る部分）がある割合で混在した状態にあると見なされ、このときの粗粒子骨格の体積含有率を粗粒子同士の間隙比を評価することにより算定した。提案された混合土の応力と間隙比の関係および体積圧縮係数を低塑性および高塑性の細粒分を含む二種類の混合土の実験結果と比較することにより、その妥当性を示した。

Keywords : sand-clay mixed soil, stress-void ratio relationship, compression property, consolidation test, soil structure

1. ま え が き

砂や粘土などの力学特性については、これまで多くの研究が行われているが、実際の地盤には砂と粘土の中間的な粒度を持つ土も少なくない。このような土は砂と粘土の中間的な力学的性質を有しており、その特性を解明することは、土質工学における重要な課題の一つである。

中間土の力学特性を明らかにするために、砂と粘土の混合土を用いて、その力学特性に関する実験的研究が行われている。それらは、粒度やコンシステンシーに着目して、混合土の圧密特性と強度特性について調べた研究が多い。圧縮特性について、鬼塚と吉武¹⁾は、混合土の圧縮指数と塑性指数の関係がほぼ直線関係で表されることを明らかにしている。福江ら^{2),3)}は、細粒分含有率が減少し粗粒子同士の骨格が形成されると混合土の圧縮特性が大きく変化することに着目して、混合土の新たな評価法を提案している。また、強度特性について、中瀬と亀井^{4),5)}は、塑性指数の減少とともに非排水強度異方向性が大きくなることを明らかにしている。Lupiniら⁶⁾および Skempton⁷⁾は、残留強度と粘土分含有率に密接な関係のあることを示している。これらの研究は、混合土の圧縮特性および強度特性が粒度とコンシステンシー特性の影響を受けることなど、定性的に貴重な成果を示しているが、混合土の応力-ひずみ関係を定量的に評価するまでには至っていない。

著者らは、これまで二種類の材料からなる混合体の応力-ひずみ関係を予測する手法を検討し、その考え方を混合土の一次元圧縮特性へ適用することを試みてきた⁸⁾⁻¹⁰⁾。すなわち、混合土を粗粒子骨格とマトリックス（細粒子と水から成る部分）がある割合で混在した材料と

見なし、仕事量の考えを用いて一次元圧縮状態におけるその応力-ひずみ関係を考察した。ここでは、粗粒子骨格の体積含有率を実験結果を用いて定めていたため、その合理的な算定法が課題であった。本論文は、混合土の土構造を微視的に観察し、粗粒子同士の接触割合を評価することにより粗粒子骨格の体積含有率の算定を行い、一次元圧縮における混合土の応力-ひずみ関係を求めた。提案された混合土の応力-間隙比関係および体積圧縮係数を二種類の混合土の実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。

2. 混合土の土構造と間隙量の算定

(1) 混合土の土構造

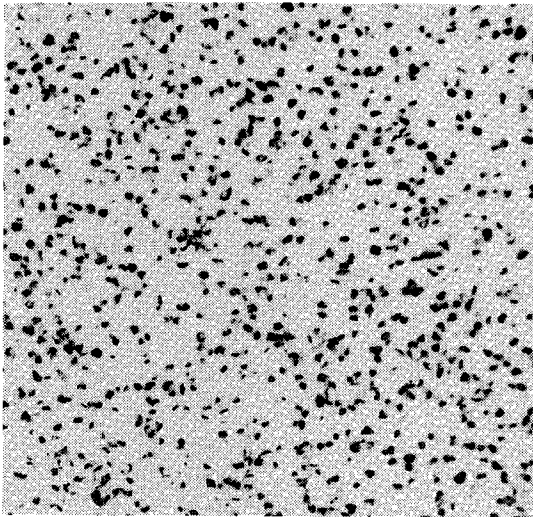
細粒分の卓越する混合土は、混合土中の粗粒子が互いに接触していない状態にあると見なすことにより、その挙動をマトリックスの特性から予測することができる¹¹⁾⁻¹⁵⁾。細粒分含有率が少なくなると粗粒子同士の接触割合が増加するので、その影響を考慮しなければならない。そのためには、まず、混合土がどのような状態にあるのかを何らかの方法により確かめることが必要である。ここでは、混合土供試体の微視的観察に基づき、その土構造について考察する。

写真-1は、豊浦砂とカオリンの混合土をスラリー状態で十分練り返し、圧密圧力 1.6 kgf/cm² の下で一次元圧密させた供試体の水平断面を示したものである。(a)は細粒分含有率 $F=80\%$ 、(b)は $F=60\%$ の場合である。混合土中の粗粒子同士の接触状態を明瞭にするために、豊浦砂は墨で色付したものをを用いた。このような微視的な土粒子配列の観察から、砂と粘土の混合土は、次のような土構造を持つと考えられる。

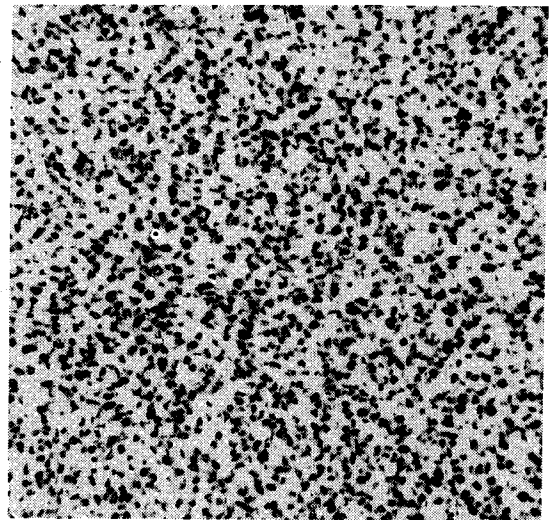
- ① 混合土中には粗粒子同士が互いに接触しているものと接触していないものが混在し、これらが比較的ランダムに分布している。

* 正会員 工修 福岡大学助手 工学部土木工学科
(〒814-01 福岡市城南区七隈 8-19-1)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木工学科



(a) $F=80\%$



(b) $F=60\%$

写真-1 混合土の土構造

② 混合土中に占める粗粒子骨格およびマトリックスの体積割合(体積含有率)は、細粒分含有率に依存する。

③ 細粒分含有率の減少とともに互いに接触している粗粒子の割合が増え、次第に粗粒子骨格のみで構成される状態に近づいていく。

これらのことから、混合土の土構造は、粗粒子骨格とマトリックスがある割合で混在している状態にあることが確認される。また、粗粒子骨格の中にも細粒子が含まれていることも認められる。このような混合土の構成模式図は図-1のように示すことができる。柴田^{16),17)}は、締固めた砂と粘土の混合土が、同様な土構造を持つことを電子顕微鏡観察により確かめている。

種々の粒径の粒子を含む土の構造については、これまでいくつか提案されているが¹⁸⁾、CollinsとMcGown¹⁹⁾は電子顕微鏡観察から自然粘性土はさらに複雑な構造を持つと報告している。ここでは、繰り返した混合土を対象に以下考察を進める。

(2) 間隙量の表示

上述した混合土の土構造に着目して、これまで次のような間隙量を導入してきた¹⁰⁾。

i) 粗粒子骨格に含まれる細粒子も間隙と見なしたときの間隙比(粗粒子骨格の間隙比)：

$$e_s = \frac{V'_v + V'_{sc}}{V_{ss}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 V'_v 、 V'_{sc} および V_{ss} は、それぞれ粗粒子骨格における間隙、細粒子および粗粒子の体積である。

ii) マトリックスの間隙比：

$$e_c = \frac{V''_v}{V''_{sc}} \dots \dots \dots (2)$$

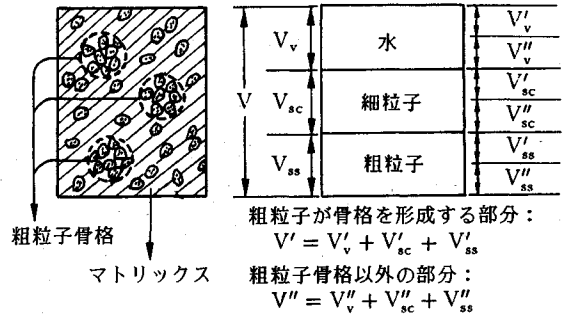


図-1 混合土の構成模式図

ここで、 V''_v および V''_{sc} は、それぞれマトリックスにおける間隙および細粒子の体積である。

iii) 粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比：

$$r = \frac{V'_{sc}}{V'_{ss}} \dots \dots \dots (3)$$

iv) 粗粒子骨格の体積含有率：

$$R = \frac{V'}{V} = \frac{V'_v + V'_{sc} + V'_{ss}}{V_v + V_{sc} + V_{ss}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 V' および V は、それぞれ粗粒子骨格および混合土の体積、 V_v 、 V_{sc} および V_{ss} は、それぞれ混合土における間隙、細粒子および粗粒子の体積である。

v) 混合土の細粒分含有率：

$$F = \frac{V_{sc}}{V_{ss} + V_{sc}} \times 100(\%) \dots \dots \dots (5)$$

vi) マトリックスの体積含有率：

$$f_c = \frac{V''_v + V''_{sc}}{V}$$

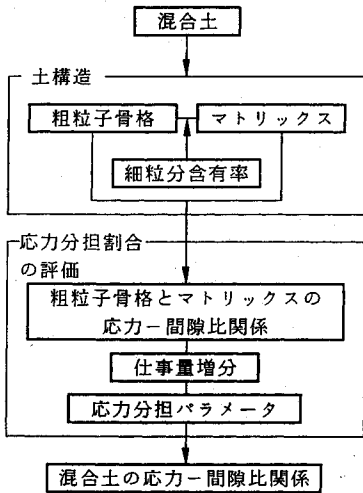


図-2 混凝土の応力-間隙比関係を求めるための基本的な考え方

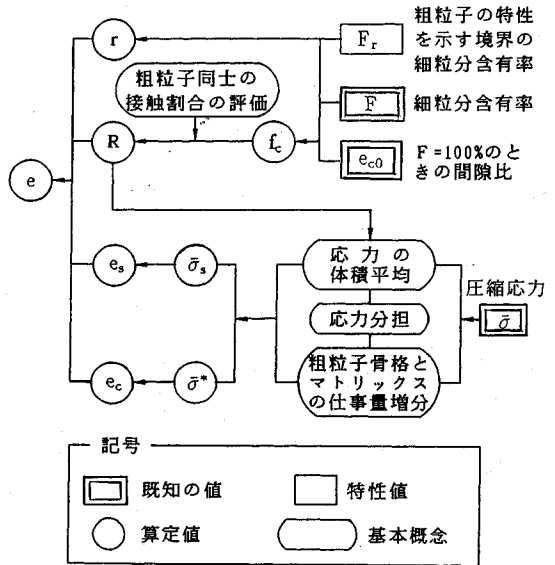


図-3 $e=f(r, R, e_s, e_c)$ におけるパラメータ間の関係

$$e = \frac{1+e_c}{1+e_s} \frac{1+e_s-R\{e_s+r(100/F-1)\}}{100/F+e_c} \dots\dots\dots (6)$$

なお、添字 v, sc, ss はそれぞれ混凝土中の間隙(水)、細粒子および粗粒子を、また、添字 s, c はそれぞれ混凝土中の粗粒子骨格およびマトリックスを表す。

vii) 混凝土の間隙比：

式(1)~(5)を用いると、混凝土の間隙比は、次のように表される。

$$e = \frac{V_v}{V_{ss}+V_{sc}} = \frac{F/100}{\frac{r}{1+e_s}R + \frac{1}{1+e_c}f_c} - 1 \dots\dots\dots (7)$$

式(7)の分母は粗粒子骨格中に含まれる細粒子の割合(= $r/(1+e_s)$) およびマトリックスに含まれる細粒子の割合(= $1/(1+e_c)$) にそれぞれの体積含有率 R および f_c を掛けた値(体積に関する平均値)で表されている。このことは、混凝土の間隙比が粗粒子骨格とマトリックスの間隙比およびそれらの体積含有率を評価することによって求められることを意味している。

3. 一次元圧縮状態における応力-間隙比関係

(1) 基本的な考え方

混凝土の応力-間隙比関係を求めるための基本的な考え方を図-2に示す。2. で述べたように混凝土の土構造は、粗粒子骨格とマトリックスがある割合で混在している状態にあり、それらの体積含有率は、細粒分含有率を用いて算定されるものとする。一方、混凝土内部では、応力が分布しているものと考え、このときの混凝土の応力分担割合を、二種混合体の応力-ひずみ関係¹⁰⁾を求め

る場合と同様に仕事量の考えを用いて評価する。また、粗粒子骨格およびマトリックスのそれぞれの応力-間隙比関係を用いることにより、混凝土の応力-間隙比関係が誘導される。

したがって、混凝土の応力-ひずみ関係を求めるためには、混凝土内の応力分担割合の評価に加えて、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率の算定が必要となる。

(2) 応力と間隙比の関係

混凝土の間隙比は、式(7)で示されるように6つのパラメータ F, r, R, f_c, e_s, e_c を用いて表される。これらのパラメータのうち、細粒分含有率 F は既知の値である。また、後述するように、 R (粗粒子骨格の体積含有率)と f_c (マトリックスの体積含有率)は一義的な関係がある。したがって、混凝土の間隙比は、4つのパラメータ r, R, e_s, e_c を用いて表されることになる。図-3は、 $e=f(r, R, e_s, e_c)$ におけるパラメータ間の関係を示したものである。すなわち、粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比 r は、細粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r を用いて表される。また、マトリックスの体積含有率 f_c は、 F, F_r および $F=100\%$ のときの間隙比 e_{c0} を用いて求められ、このときの粗粒子骨格の体積含有率 R と f_c の関係が、粗粒子同士の接触割合を評価することにより算定される。一方、粗粒子骨格の間隙比 e_s とマトリックスの間隙比 e_c は、それぞれに加わる応力に依存するが、それらは、応力の体積平均および粗粒子骨格とマトリックスの仕事量増分の考えを用いて応力分担割合を評価することにより求められる。つまり、混凝土の応力と間隙比は、粗粒子骨格およびマトリックスのそれぞれの応力-間隙比関係を用いて関係付けられ

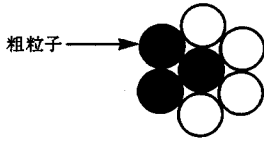


図-4 粗粒子同士の接触の評価

る。以下にそれらのパラメータの算定法について述べる。

a) 粗粒子骨格中の粗粒子と細粒子の体積比： r

混合土中の細粒子は、マトリックスを形成する以外に粗粒子骨格中にも含まれる。ここでは、粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比 r が、細粒分含有率 F によらず一定である場合について考える。細粒分含有率が減少すると混合土中に占める粗粒子骨格の割合が増加し、 F がある値以下になると混合土が粗粒子骨格のみで構成される状態に近づく。この状態において、混合土は、粗粒子と類似した特性を示すものと考えられ、このときの境界の細粒分含有率を F_r とする。混合土が粗粒子骨格のみ ($R=1$) で構成されるとき、 $V_{sc}^* = V_{sc}$ 、 $V_{ss}^* = V_{ss}$ であるので、このときの r は、式(4)、(5)より次のように求められる。

$$r = \frac{1}{100/F_r - 1} ; F \geq F_r \dots\dots\dots (8)$$

b) マトリックスの体積含有率： f_c

細粒分含有率が減少すると混合土中に占める粗粒子の割合が増加し、マトリックスの体積含有率は減少する。このとき、マトリックス部分には、互いに接触していない粗粒子が含まれるが、マトリックスの体積含有率は、このような粗粒子の量と無関係に決まるものとする。すなわち、互いに接触していない粗粒子の数は無視できるほどは少ないと考え、 $V_{ss}^* = 0$ 、 $V_{ss} = V'$ とおくと、マトリックスの体積含有率は、式(2)、(3)、(5)および(8)を用いて、次のように表される。

$$f_c = 1 - \frac{1}{1 + (1 + e_{c0}) \{ 1 / (100/F - 1) - 1 / (100/F_r - 1) \}} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 e_{c0} は $F=100\%$ の場合の間隙比であり、マトリックスの間隙比 e_c が近似的に e_{c0} と等しいとした。 f_c は F が大きいほど、または、 e_{c0} が大きいほど大きな値を取り、 $F=F_r$ の場合には $f_c=0$ 、 $F=100\%$ の場合には $f_c=1$ となる。

c) 粗粒子骨格の体積含有率： R

粗粒子骨格の体積含有率 R と上述したマトリックスの体積含有率 f_c の関係を求めるために、混合土中の粗粒子同士の接触割合について検討する。

写真-1で示されるように、混合土中には、互いに接触している粗粒子と接触していない粗粒子が混在している。このような粗粒子同士の接触を、図-4に示すような一つの粗粒子を中心に、6個の円で囲まれた領域で考える。図中の黒い部分は粗粒子であり、白い部分はマト

リックスを表す。このとき、中心にある粗粒子が接触することのできる粗粒子の個数は、最大6個である。粗粒子の配置が、二項分布に従うものとするれば、任意の位置に粗粒子が入る確率は、 $1-f_c$ 、マトリックスである確率は、 f_c である。したがって、 n 個の粗粒子が接触する確率は、次のように表される。

$$P_n = C_n f_c^{7-n} (1-f_c)^n \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 C_n は、粗粒子が n 個接触するときの組合せ数を表す。三個以上の粗粒子が少なくとも互いに二点以上で接触している場合を粗粒子が骨格を形成している状態であると考え、 $n \geq 3$ の場合の C_n の値は、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= 6 \\ C_4 &= 18 \\ C_5 &= 15 \\ C_6 &= 6 \\ C_7 &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

n 個の粗粒子が接触している状態にある粗粒子骨格の体積含有率を R_n とする。このとき、 R_n は、図-3の領域で n 個の粗粒子が占める割合 ($n/7$) に式(10)の確率 P_n を掛けることにより、次のように表される。

$$R_n = \frac{n}{7} C_n f_c^{7-n} (1-f_c)^n \dots\dots\dots (12)$$

したがって、粗粒子骨格の体積含有率 R は、 $n \geq 3$ の場合の R_n の和として、次式のように表される。

$$R = \sum_{n=3}^7 R_n = \sum_{n=3}^7 \frac{n}{7} C_n f_c^{7-n} (1-f_c)^n \dots\dots\dots (13)$$

式(13)における R と f_c の関係を図-5に示す。 R は、 f_c の減少に伴い次第に増加し、 $f_c=1$ のとき $R=0$ 、 $f_c=0$ のとき $R=1$ となる。このような R と f_c の関係は、図に示すように、次の簡単な二次関数で近似することができる。

$$R = (1-f_c)^2 \dots\dots\dots (14)$$

f_c は、式(9)で示されるように F と e_{c0} を用いて表されるので、 e_{c0} が決まれば、任意の F に対する R の値が求められる。式(14)を用いて、ランダムに配置した粗粒子の分布状態を求めた例を図-6に示す。図は、写真-1(b)の $F=60\%$ の場合に相当する。式(14)は、二次元的な粗粒子の接触を考えて導いたものであり、三次元的な接触については考慮していないが、少なくとも写真-1で示されるような粗粒子同士の接触状態を近似的に表すことができる。

なお、Lafeber²⁰⁾は、混合土の土構造を定量的に評価するために、粗粒子同士の接触割合を確率の考えを用いて算定し、実際に測定した値との比較を行っているが、粗粒子骨格の体積含有率については述べていない。

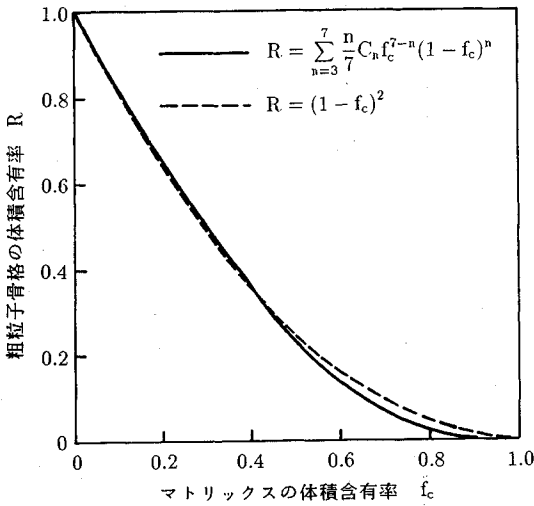


図-5 粗粒子骨格の体積含有率とマトリックスの体積含有率の関係

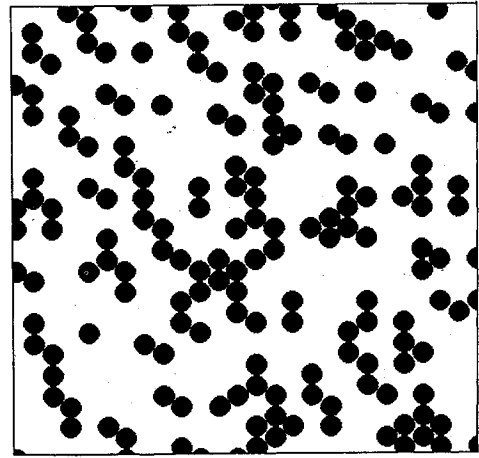


図-6 粗粒子の分布状態の例 (F=60%)

d) 粗粒子骨格とマトリックスの間隙比： e_s, e_c
粗粒子骨格およびマトリックスの応力と間隙比の関係は、一般に用いられている $e - \log \sigma$ の直線関係が成立するものとして、次式を用いる。

$$e_s = N_s - C_{cs} \log \bar{\sigma}_s \quad (15)$$

$$e_c = N_c - C_c^* \log \bar{\sigma}^* \quad (16)$$

ここで、 N_s および N_c は、 $\bar{\sigma} = 1 \text{ MN/m}^2$ における $F=0$ および 100% のときの間隙比の値、 C_{cs} および C_c^* は、 $F=0$ および 100% のときの圧縮指数、 $\bar{\sigma}_s$ および $\bar{\sigma}^*$ は、粗粒子骨格およびマトリックスの応力を表す。このとき、混合土の応力は、粗粒子骨格とマトリックスの体積についての平均値として次のように表されるものとする。

$$\bar{\sigma} = R\bar{\sigma}_s + (1-R)\bar{\sigma}^* \quad (17)$$

さらに、粗粒子骨格とマトリックスの応力分担割合を表すパラメータ $b (= d\bar{\sigma}_s / d\bar{\sigma}^*)$ を導入すると、粗粒子骨格およびマトリックスの応力は、それぞれ次のように表される。

$$\bar{\sigma}_s = \frac{b}{(b-1)R+1} \bar{\sigma} = B_s \bar{\sigma} \quad (18)$$

$$\bar{\sigma}^* = \frac{1}{(b-1)R+1} \bar{\sigma} = B^* \bar{\sigma} \quad (19)$$

ここで、 $B_s = b / \{(b-1)R+1\}$

$$B^* = 1 / \{(b-1)R+1\}$$

すなわち、粗粒子骨格とマトリックスの応力は、応力分担パラメータと粗粒子骨格の体積含有率を用いて表される。等方弾性材料から成る二種混合体については、介在物とマトリックスの単位体積当りの仕事量増分が等しいと仮定して求められる弾性係数の値と実験結果がほぼ一致することが確かめられている¹⁰⁾。したがって、ここで

も、この仮定を用いることとする。

粗粒子骨格の体積ひずみ増分を $d\bar{\epsilon}_{sv}$ 、マトリックスのひずみ増分を $d\bar{\epsilon}_v^*$ とすると、粗粒子骨格およびマトリックスの仕事量増分は、それぞれ次のように表される。

$$dW_s = \bar{\sigma}_s d\bar{\epsilon}_{sv} = m_{vs} \bar{\sigma}_s d\bar{\sigma}_s \quad (20)$$

$$dW^* = \bar{\sigma}^* d\bar{\epsilon}_v^* = m_v^* \bar{\sigma}^* d\bar{\sigma}^* \quad (21)$$

ここで、 m_{vs} および m_v^* は、それぞれ粗粒子骨格およびマトリックスの体積圧縮係数であり、 $e - \log \sigma$ の直線関係を用いると、それぞれ次のように表される。

$$m_{vs} = 0.435 C_{cs} / \{ \bar{\sigma}_s (1 + N_s - C_{cs} \log \bar{\sigma}_s) \}$$

$$m_v^* = 0.435 C_c^* / \{ \bar{\sigma}^* (1 + N_c - C_c^* \log \bar{\sigma}^*) \}$$

上述の仮定より、 $dW_s = dW^*$ とすると、応力分担パラメータ b は、粗粒子骨格およびマトリックスの体積圧縮係数を用いて次のように表される。

$$b = \left(\frac{m_v^*}{m_{vs}} \right)^{1/2} \quad (22)$$

m_{vs} および m_v^* は、応力に依存するが、 m_{vs} と m_v^* の比は、応力の依存度が小さいので、このときの b の値を一定と見なす。したがって、式(18)、(19)を式(15)、(16)に代入することにより、粗粒子骨格およびマトリックスの間隙比は、それぞれ次のように求められる。

$$e_s = N_s - C_{cs} \log (B_s \bar{\sigma}) \quad (23)$$

$$e_c = N_c - C_c^* \log (B^* \bar{\sigma}) \quad (24)$$

以上のことから、混合土の応力と間隙比の関係は、式(7)に式(8)、(9)、(14)、(23) および (24) を代入することにより求められる。

(3) 体積圧縮係数

一次元圧縮状態における応力-間隙比関係は、体積圧縮係数 $m_v (= d\bar{\epsilon}_v / d\bar{\sigma})$ を用いて評価される。図-2に示した基本的な考え方に基づくと、混合土の体積圧縮係数は、粗粒子骨格およびマトリックスの体積圧縮係数を用

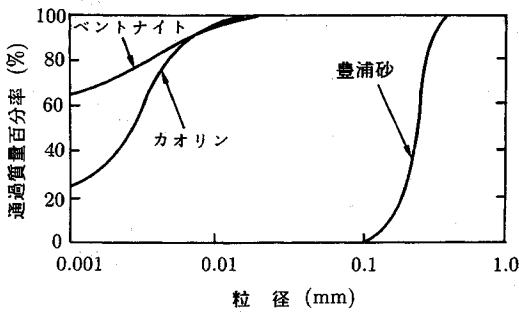


図-7 試料の粒径加積曲線

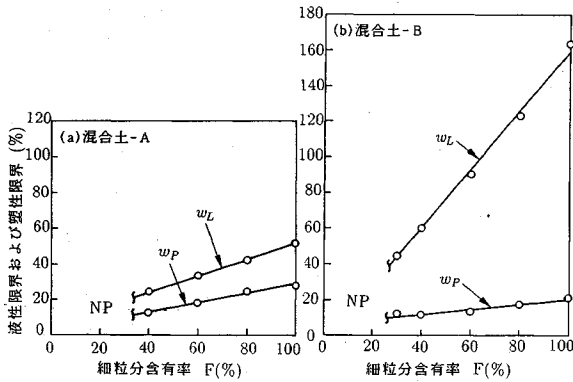


図-8 試料の液性限界および塑性限界と細粒分含有率の関係

表-1 試料の物理特性

(a) 混合土-A

sample	clay (%)	silt (%)	sand (%)	w _L (%)	w _P (%)	I _P
A-1*	80	20	0	51.6	28.0	23.6
A-2	64	16	20	41.9	24.3	17.6
A-3	48	12	40	33.2	18.3	14.9
A-4	32	8	60	24.0	12.7	11.3
A-5	24	6	70	-	-	NP
A-6	16	4	80	-	-	NP
A-7	8	2	90	-	-	NP
A-8**	0	0	100	-	-	NP

* Kaolin, ** Toyoura sand

(b) 混合土-B

sample	clay (%)	silt (%)	sand (%)	w _L (%)	w _P (%)	I _P
B-1*	72	28	0	163.8	20.9	142.9
B-2	57	23	20	123.4	16.5	106.9
B-3	43	17	40	89.6	12.7	76.9
B-4	29	11	60	60.0	11.5	48.5
B-5	22	8	70	45.6	12.0	33.6
B-6	15	5	80	-	-	NP
B-7	8	2	90	-	-	NP
B-8**	0	0	100	-	-	NP

* Kaolin and Bentonite, ** Toyoura sand

いて次のように表される。

$$m_v = \frac{Rbm_{vs} + f_c m_v^*}{(b-1)R + 1} \dots (25)$$

式(25)は、混合土が粗粒子骨格のみ(R=1)の場合、 $m_v = m_{vs}$ となり、マトリックスのみ($f_c=1$)の場合、 $m_v = m_v^*$ となる。

4. 提案式の検証

(1) 試料および実験方法

試料は、420 μm ふるい通過の豊浦砂および市販のカオリンとベントナイトである。これらの試料の粒径加積曲線を図-7に示す。豊浦砂の粒径は、カオリンとベントナイトに比べてかなり大きい。本論文では、粒径の大きく異なる砂と粘土の混合土を対象としているため、提案式の検証としてこのような材料を用いた。

用いた混合土は、次に示す2種類である。

混合土-A: 豊浦砂($G_s=2.65$)に細粒分としてカオリン($G_s=2.70$)を混合した試料

混合土-B: 豊浦砂に細粒分として重量比で1:1に配合したカオリンとベントナイト($G_s=2.50$)を混合した試料

混合土-Aは低塑性の細粒分を、混合土-Bは高塑性の

細粒分を含む混合土であり、それぞれ圧縮性が大きく異なる。混合土の細粒分含有率 F は、いずれも0, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100%の計8種類である。これらの試料の物理特性を表-1に、液性限界および塑性限界と細粒分含有率の関係を図-8に示す。試料の液性限界および塑性限界は、 F が約30%程度までは F の減少とともに直線的に減少する。なお、Seedら²⁾も、多くの混合土について、このような関係があることを報告している。試料は、液性限界の約2倍の含水比のカオリンに豊浦砂を混入して十分攪拌し、内径15 cm、高さ25 cmの予圧密容器を用いて、所定の鉛直圧密圧力(混合土-A: 0.7 kgf/cm², 混合土-B: 0.5 kgf/cm²)の下で圧密させた。その後、試料を直径6 cm、高さ2 cmに切り出して、供試体を作成した。ただし、 $F=10\%$ の場合には、試料の乱れの影響を考慮して、圧密リングにカラーを取り付けたまま圧密リング内で試料を圧密させ、その後、上部の余分な試料を切り取り供試体を作成した。また、 $F=0\%$ の粗粒子のみの場合については、試料を入れた漏斗を圧密リング中央に立て、漏斗を静かに持ち上げた後、上部の余分な試料を切り取り、緩詰め供試体を作成した。いずれの供試体についても、荷重増分比=1の標準圧密試験を行った。

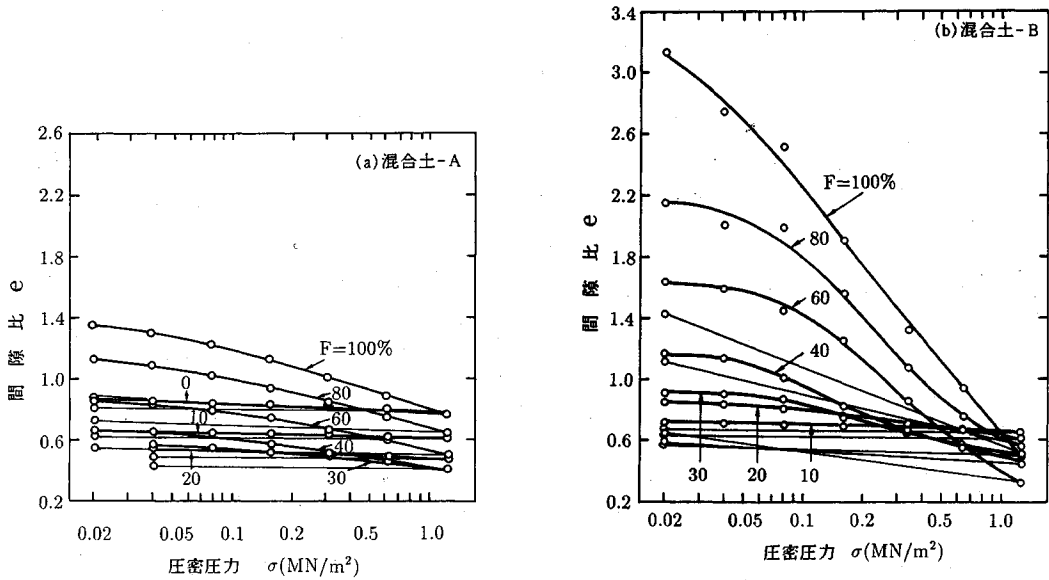


図-9 混合土の間隙比と圧密圧力の関係

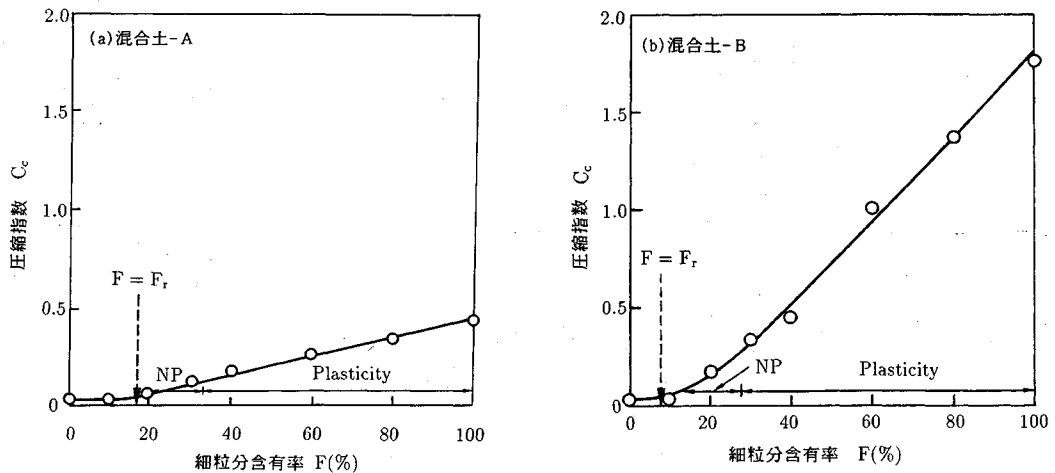


図-10 混合土の圧縮指数と細粒含有率の関係

(2) 一次元圧縮特性

標準圧密試験の結果より得られた混合土の間隙比と圧密圧力の関係を図-9に示す。図(a)は、混合土-Aを、図(b)は、混合土-Bの場合を示したものである。 $e-\log\sigma$ 曲線の後半部分の傾きにより求めた混合土の圧縮指数 C_c と細粒含有率 F の関係を図-10に示す。 C_c は、いずれの混合土においても、 F がある値までは、 F の減少とともに著しく減少する。ここで用いた試料は粒径の大きく異なる砂と粘土の混合土であるが、砂、シルトおよび粘土の混合土である有明粘土と珪砂の混合試料を用いた場合でも同様な傾向が示されている²²⁾。また、図で示されるように、 F がある値以下になると、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていく。このときの境界

が、 $f_c=0$ となるときの細粒含有率 F_r に相当する。すなわち、混合土の圧縮特性は、 $F > F_r$ の範囲では、細粒含有率の影響を受け、大きく変化するが、 $F < F_r$ の範囲では、その影響は無視できるほど小さくなる。また、図中で示されるように、非塑性(Non-plastic)の領域は、 F が約30%以下であるので、 F_r の値は、土が塑性か非塑性かで決まるものではなく、次に示す粗粒子骨格の間隙比によって決定されるものとする。

混合土の間隙比と細粒含有率の関係を図-11に示す。図中の直線は、 $R=1(f_c=0)$ の場合の $e-F$ 関係を示したものであり、式(7)において、粗粒子骨格の間隙比 e_s が $F=0\%$ のときの間隙比 e_{s0} に等しいとして求めた。 F_r は、この直線と実験結果より得られた $e-F$ 関係

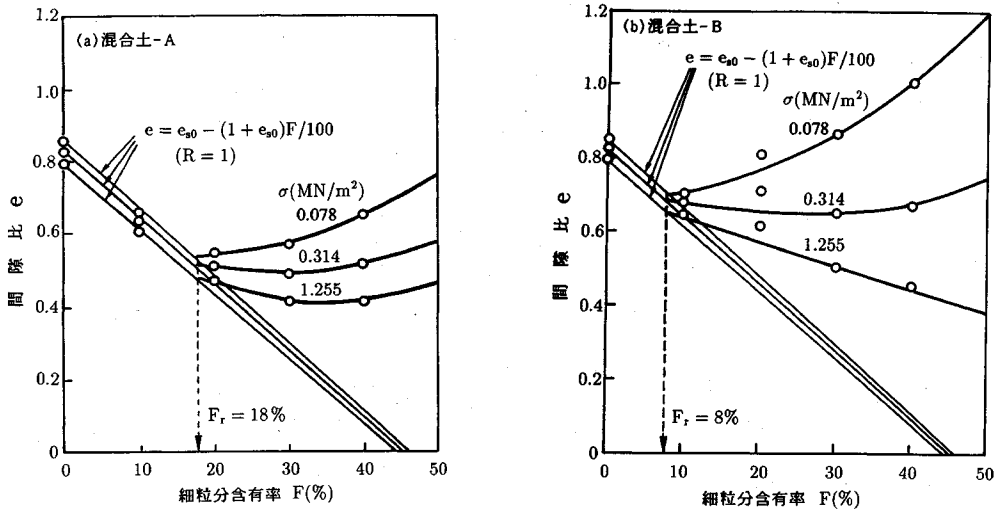


図-11 混合土の間隙比と細粒分含有率の関係 (F_r の決定)

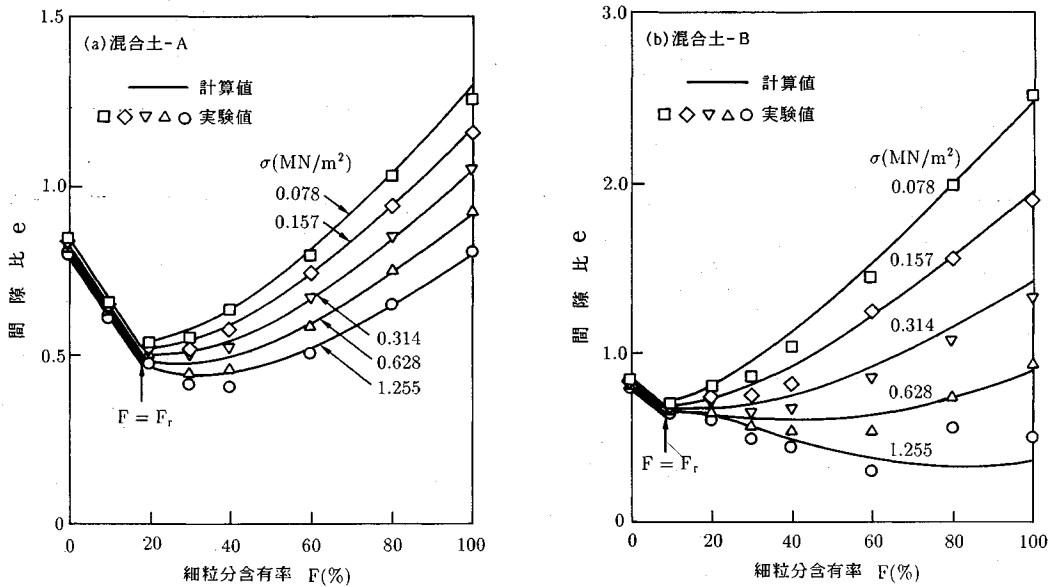


図-12 混合土の間隙比と細粒分含有率の関係 (計算結果と実験結果の比較)

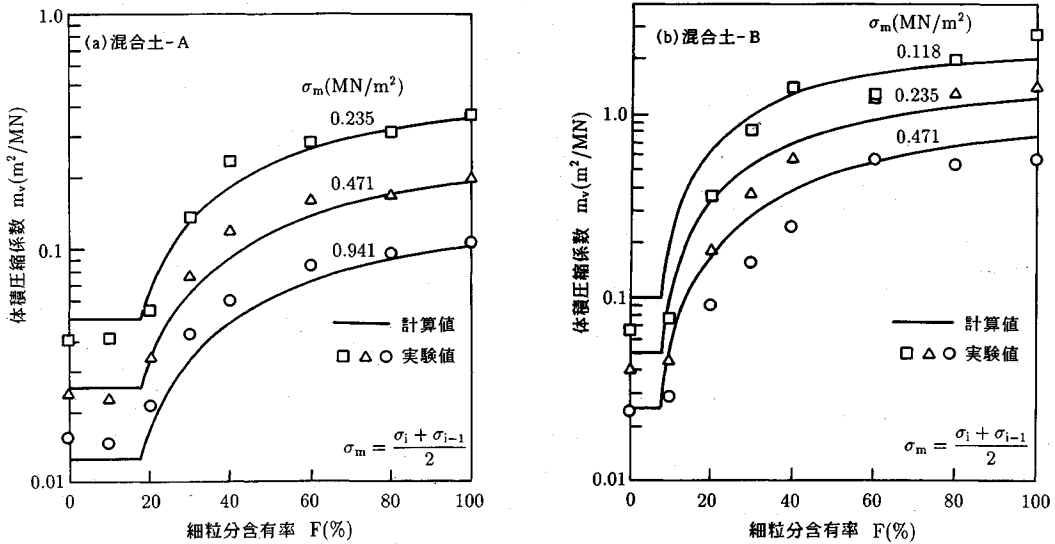
との交点で表される。図より、 F_r は、混合土-Aの場合、約18%、混合土-Bの場合、約8%であり、高塑性の細粒分を含む混合土ほど小さな値を示す。

混合土が粗粒子のみの特性に近づくときの境界の細粒分含有率について、倉田ら²³⁾は、標準圧密試験と一面せん断試験の結果から、Trollope²⁴⁾らは、三軸圧縮試験の結果から、また、Skempton⁷⁾は、リングせん断試験の結果から、いずれも約20%程度であると報告している。また、福江ら³⁾および八尾と平田²⁵⁾は、このような境界となる細粒分含有率は、圧密圧力にも依存することを指摘している。本実験で用いた混合土に限れば、 F_r

の値は、約10~20%の範囲にあり、圧密圧力にはほとんど依存しないことが明らかとなった。

(3) 実験結果との比較

混合土の間隙比と細粒分含有率の関係について、計算結果と実験結果の比較を図-12に示す。図(a)は、混合土-Aを、図(b)は、混合土-Bの場合を示したものである。混合土-Aの場合の間隙比は、いずれの圧密圧力においても細粒分含有率の減少に伴い著しく減少し、 $F=20\sim40\%$ の間で最小値を取る。各圧密圧力に対して求めた計算結果は、実験結果とよい一致を示す。また、混合土-Bの場合の間隙比と細粒分含有率の関係は、圧



図—13 混合土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係 (計算結果と実験結果の比較)

密圧力によって大きく異なり、圧密圧力が増加するほど F の減少に伴う間隙比の変化の割合は小さくなる。計算結果は、このような混合土の特性を表現することができる。

混合土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係について、計算結果と実験結果の比較を図—13(a), (b) に示す。いずれの混合土の場合も体積圧縮係数は、同一の圧密圧力で、 F の減少に伴い次第に減少し、 $F < F_c$ となると $F = 0\%$ の場合の値に近づいていく。このような傾向は、図—10 に示す混合土の圧縮指数と細粒分含有率の関係と一致する。式(25)を用いて求めた計算結果は、いずれの混合土に対しても、実験結果と比較的良好一致を示す。

以上のことから、混合土内の粗粒子同士の接触割合および応力分担割合を評価することにより求められた混合土の応力と間隙比の関係および体積圧縮係数の計算結果は、実験結果をよく表すことができる。

5. まとめ

混合土の土構造に着目し、混合土の一次元圧縮状態における応力-間隙比関係について検討した。本論文で得られた主な結論は、次のとおりである。

- 1) 混合土の供試体断面の微視的観察から、混合土は、粗粒子骨格とマトリックス(細粒子と水から成る部分)がある割合で混在している土構造を有することが明らかとなった。
- 2) 混合土の圧縮指数 C_c は、細粒分含有率 F がある値までは、 F の減少とともに著しく減少し、それ以下になると、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていく。
- 3) 混合土の圧縮特性が粗粒子のみの特性に近づくこと

きの境界の細粒分含有率は約 10~20% の範囲にあり、高塑性の細粒分を含む混合土ほど、この値は小さくなる。

4) 混合土内の粗粒子同士の接触割合および応力分担割合を評価することにより求められた混合土の応力と間隙比の関係および体積圧縮係数の計算結果は、低塑性および高塑性の細粒分を含む二種類の混合土の実験結果をよく表すことができる。

5) 提案式により、混合土の圧縮特性を細粒子およびマトリックスの特性から予測することができる。

3. で述べた混合土の応力-ひずみ関係を求めるための基本的な考え方は、一次元圧縮に限らず一般的な応力状態の場合にも適用することができる。混合土のせん断特性への拡張についても検討しているので^{26), 27)}、今後、改めて詳細に報告したい。

最後に、日頃ご援助をいただいている福岡大学工学部 吉田 信夫教授、本研究について有益な助言をいただいた九州大学工学部 林 重徳助教授、大谷 順助手ならびに梅崎 健夫助手に感謝します。また、実験に協力していただいた九州大学水工土木学卒論生 北尾 秀光氏(現 清水建設(株))に感謝します。

参考文献

- 1) 鬼塚克忠・吉武茂樹：粘土・砂の飽和混合土の圧密特性、土と基礎、第34巻、第7号、pp. 73~79, 1986年。
- 2) 福江正治・大草重康：砂と粘土の混合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年。
- 3) Fukue, M., Okusa, S. and Nakamura, T.: Consolidation of sand-clay mixtures, ASTM, STP., No. 892, pp. 627~641, 1986.
- 4) Nakase, A. and Kamei, T.: Undrained shear strength an isotropy of normally consolidated cohesive soils, Soils and

- Foundations, Vol.23, No.1, pp.91~101, 1983.
- 5) Nakase, A. and Kamei, T.: Undrained shear strength of remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.29~40, 1988.
 - 6) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. : The drained residual strength of cohesive soils, *Géotechnique*, Vol.31, No.2, pp.181~213, 1981.
 - 7) Skempton, A.W.: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3~18, 1985.
 - 8) 大嶺 聖・落合英俊：異なる弾性係数を持つ二種混合体の応力-ひずみ関係, 九州大学工学集報, 第64巻, 第6号, pp.525~532, 1991年.
 - 9) 大嶺 聖・落合英俊：砂と粘土の混合土の一次元圧縮特性, 九大工学集報, 第64巻, 第4号, pp.225~235, 1991年.
 - 10) 大嶺 聖・落合英俊：二種混合体の応力-ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用, 土木学会論文集, No.448/III-19, pp.121~130, 1992年.
 - 11) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫：砂と粘土の混合土の圧縮特性に関する一考察, 九州大学工学集報, 第61巻, 第6号, pp.747~753, 1988年.
 - 12) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫・満石孝司：混合土のせん断特性に及ぼす細粒分の影響, 第24回土質工学会研究発表会, pp.693~696, 1989年.
 - 13) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫・満石孝司：細粒分の卓越する混合土の強度・変形特性, 第25回土質工学会研究発表会, pp.607~610, 1990年.
 - 14) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫：異質材料による混合土のせん断特性, 土木学会第45回年次学術講演会, pp.192~193, 1990年.
 - 15) Omine, K., Ochiai, H., Hayashi, S., Umezaki, T. and Otani, J.: Shear Properties of Clay-Sand Composite Soils, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu Univ.*, vol.49, No.4, pp.213~228, 1989.
 - 16) 柴田英明：電子顕微鏡観察による締め固めた砂・粘土混合土の構造についての一考察, 第18回土質工学会研究発表会, pp.1433~1436, 1983年.
 - 17) 柴田英明：砂・粘土混合土の締め固め後の構造に関する一提案, 土と基礎, 第34巻, 第12号, pp.17~22, 1986年.
 - 18) 大草重康：新しい土質力学II, 森北出版, 1976.
 - 19) Collins, K. and McGown, A. : The form and function of microfabric features in a variety of natural soils, *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.223~254, 1974.
 - 20) Lafeber, D. : Soil structure concepts, *Engineering Geology*, pp.261~290, 1966.
 - 21) Bolton Seed, H., Richard J. Woodward and Raymond Lundgren *Fundamental Aspects of the Atterberg Limits*, ASCE, SM6, pp.75~105, 1964.
 - 22) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫：混合土の圧密特性に関する一考察, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.398~399, 1989年.
 - 23) 倉田 進・藤下利夫：砂と粘土の工学的性質に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第9号, pp.389~424, 1960年.
 - 24) Trollope, D.H. and Zafar, S.M.: A study of the shear strength of saturated sand, and sand/clay mixtures, in triaxial compression, *Proc. 2nd Australia-Newzealand Conf. SMFE.*, pp.7~16, 1965.
 - 25) 八尾真太郎・平田茂良：中間土の強度発現機構に関する考察(その2), 第25回土質工学会研究発表会, pp.701~704, 1990年.
 - 26) 大嶺 聖・落合英俊：混合土の非排水三軸圧縮状態における応力-ひずみ関係, 九州大学工学集報, 第65巻, 第2号, pp.97~104, 1992年.
 - 27) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・北尾秀光：三軸圧縮応力状態における中間土の応力-ひずみ関係, 第27回土質工学会研究発表会, pp.735~738, 1992年.

(1992.4.8 受付)

ONE-DIMENSIONAL COMPRESSION PROPERTIES OF SAND-CLAY MIXED SOILS BASED ON SOIL STRUCTURE

Kiyoshi OMINE and Hidetoshi OCHIAI

Abstract : The stress-strain behavior of soils which have intermediate properties of sand and clay depends on the properties of the particles and its grain size distribution. The mechanical properties of sand and clay have been investigated in detail. However the mechanical properties of sand-clay mixed soils have not been sufficiently clarified. In this study, a method for predicting the stress-void ratio relationship of sand-clay mixed soils is proposed by taking into consideration of soil structure. The soil structure is regarded as consisting of skeleton of coarse particles and matrix constituted by fine particles and water. The stress in the mixture is evaluated by using the strain energy of the mixture. The stress-void ratio relationship and coefficient of volume compressibility of the mixtures are derived by using the proposed method. Its validity is confirmed from the experimental results of two types of the mixtures.