

概 要

粘土の初期構造の違いが土の変形特性（圧密変形）にどんな影響を及ぼすかをしらべてみようとしたものである。土粒子の配列だけを違えた供試体を得るために（密度、飽和度を一定）、締固め時の含水比を乾燥側と湿潤側（ W_{opt} を中心にして両側）にとつて突固め、人工的に粘土構造を変える方法をとつた。ここで得られた粘土構造は、乾燥側では綿毛構造のもので、湿潤側では部分的に定向配列した分散構造のものであると考える。粘土は市販カオリンを用い、液条件として 0.0001 モルの NaCl を加えた。

圧密に関する検討事項として、(1)段階荷重下で起る粘土構造の変化、(2)粘土構造の立場からみた圧密降伏応力の意味、(3)浸透圧に起因する膨張圧についての Van't Hoff 理論の適用性吟味。の 3 点にしぼつた。

工学的にはよく知られている土の力学挙動や各種現象の中で本質的にはまだ十分説明されていない問題が沢山ある。筆者は、粘土構造の立場からそれらの問題を少しずつ説明してみようと考えている。

今回の報告は、それに関する最初の試みである。

I 粘土構造の違い供試体の作成

人工的に粘土の構造を変える方法として、(a)液相の塩条件（たとえば塩の種類や濃度）を変えるか、(b)締固めにおける突固め時の含水比を変えるか、あるいは両者を組合せるかによつて比較的容易に違った構造の粘土供試体を得られる。本実験では(b)の方法によつた。

市販カオリンの突固めによる含水比-密度曲線を決定するために、締固めエネルギーを 4 種に変え、（一層当り 140 回、130 回、100 回および 80 回、3 層仕上げ、CBR モールド）、どのエネルギーのものを選ぶかを検討した。高エネルギーによるか、低エネルギーによるかで初期の粘土構造は異なり、また含水比の選び方で構造の違いの幅が異なる。結局 JISA1210 に相当するもの（ランマー 4.5 Kg、落下高 300 mm の自動突固めで、CBR モールドに各層 137 回、3 層）を選んだ。それによる締固め含水比-密度曲線は図-1 のようである。同一の乾燥密度で、乾燥側と湿潤側の供試体を得るために、 $\gamma_d = 1.51 \text{ g/cm}^3$ となる含水比 $W(\text{dry}) = 17.5\%$ 、 $W(\text{wet}) = 25.0\%$ をそれぞれきめた。

モールド内の締固め密度は、場所ごとにかなり違った値であるので、各層からいくつもの供試体を取り出し、その中から $\gamma_d = 1.51 \text{ g/cm}^3$ に近似のものを選んだ。

II 圧密試験におけるいくつかの処理

圧密試験は通常用いられている固定リング型のもので、載荷の方法、測定時間間隔等は JIS で規定される方法によつた。本実験で特に留意したことは、供試体の飽和、飽和に伴う膨張、および液の条件等である。供試体を飽和させるために、至密装置にセットしたまま水浸箱の液（ 1×10^{-4} モルの NaCl）に 4 日間浸した。その露サクションに伴う供試体の膨張が生ずる。特に乾燥側供試体は著

しい。その影響を防ぐ方法として、(a)膨張を起させないよう圧密応力を加える、(b)膨張を自由に起させて後、圧密応力をじょじょに加えて変位がゼロになるように圧縮する、の二つの場合を考えたが、飽和を容易にすることおよびもとの粘土構造を壊すことの少ない方法として、(b)の方法によつた。

■ 実験結果と考察

■ - 1 段階荷重下で起る粘土構造の変化

初期の構造が綿毛構造である場合、 $p > p_y$ (p_y は圧密降伏応力) の圧密応力下では、edge-to-face の土粒子配列が壊れて、定向配列に変わり、応力の増加に従つて粒子間距離を縮めていき、ついには分散構造であつた粘土の場合の圧縮過程と同じ過程を辿ることがわかつている。

また定向配列に近い分散構造の圧縮割合は、圧密応力の小さいときも大きいときも変わらず、しかも圧縮指数 (C_c) は、綿毛構造の場合の p_y を超える応力下の C_c よりも小さい値を示すことも知られている。

図 - 2 は、乾燥側の供試体 (綿毛構造) と湿潤側の供試体 (部分的に定向配列の分散構造) についての $e - \log p$ 曲線を示す。結果は、上述のことをよく反映している。

また、図 - 3 に示した $mv - \log p$ 関係でもその様相がわかる。図 - 3 において、edge-to-face 配列のよく発達した綿毛構造のほど (p_y 以下の応力下) で体積圧縮係数が小さく (圧密弾性係数が大きい)。 p_y を超した応力下では $mv - \log p$ は粘土の初期構造に関係なく、次第に収束してくる。

粘土構造の変化の様子を知るのに Kozeny-Carman の細粒土に対する透水係数を求める理論式を変形して、粘土の構造係数 $K_o \cdot S$ を求め、それを物指しとすることがよく行なわれている。

ここで K_o は、土の毛管の断面形状と水の流れる方向の毛管わい曲度によつてきまるとされるもので、 S は粘土粒子の比表面積である。

構造係数は、対象となる土の透水係数 K と間ゲキ e 比を知ることによつて $(\frac{1}{k} \cdot \frac{e^3}{1+e})^{1/2}$ から得られる。

圧縮過程の各段階で、構造係数を求め、 $e - k_o \cdot S$

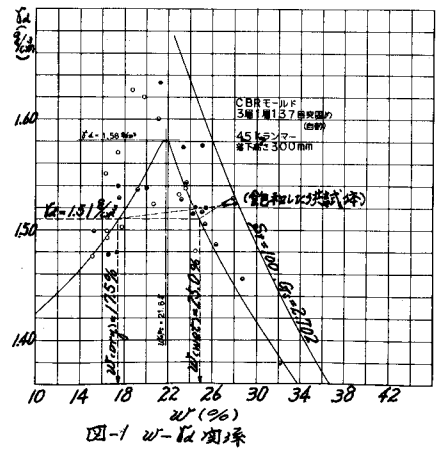


図-1 w-LL 関係

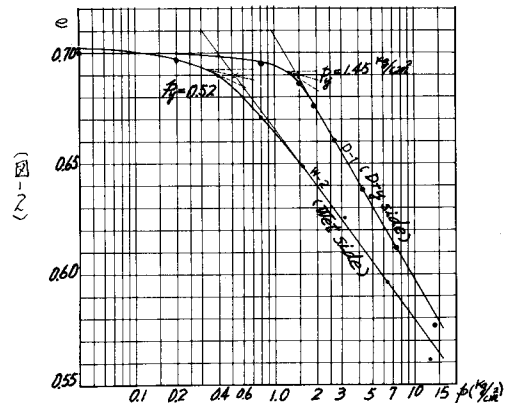


図-2

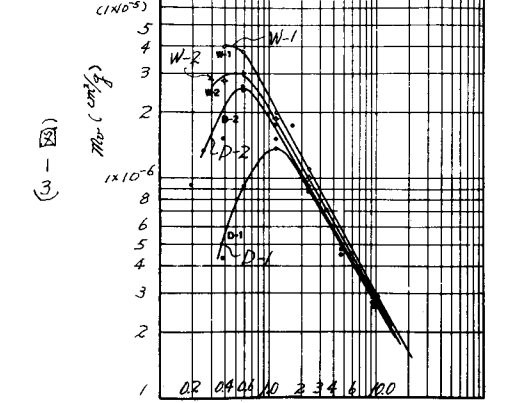


図-3

の関係で示したのが図-4である。

(注) (横)

一連の圧縮過程を通じて、 $K_0 \cdot S$ は4段階に区分できる。各段階における場合は、綿毛構造の場合と分散構造の場合とは異なるが、 p_y 以下での第Ⅰ領域、 p_y を超した直後に起る土粒子再配列の第Ⅱ領域、構造そのものは変わらないで土粒子間の距離を縮める第Ⅲ領域、および土粒子がかなり接近して界面二重層が互に干渉し合う状態になると思える第Ⅳ領域の4領域に区別できるようである。

■-2 圧密降伏応力

圧密降伏応力 p_y は「圧密における圧力と圧密量の関係が、圧力の増加によつて弾性域から塑性域に移るときの圧力をいう」と定義されている(土質工学会、委員会案)。もともと先行圧密荷重と呼ばれているように土の応力履歴の指標とされていて、その意味で用いられている

多くの正規圧密粘土や一部の過圧密粘土は、応力履歴として取扱つた方が都合がよいことが

多い。しかし、たとえば関東ロームやリーチングの影響を受けた粘土などでは、その堆積の位置とそれらが有している p_y の値とからみて土かぶり圧力による応力履歴とはとうてい考えられないものもある。ここでは p_y の内部要因と考えられるいくつかの原因を上げて圧密降伏応力を考えてみよう。

土粒子間に働く結合力によつて区分してみると； (a) 土粒子界面の電静的な理由による粒子間力 (Van der Waals 引力あるいは Coulomb 引力)、(b) 土粒子間を接着するセメンテーション物質による結合力、の二種の原因が考えられる。

この場合後者の結合力を一たん除外し、(a) の原因だけを問題にしてみる。

粒子間力 (特に粒子間ケン引力) は； (i) 土-水系がもつ個有のけん引力、と (ii) 土粒子配列のあり方と粒子相互の接近距離、とが主なファクターとなる。すなわち系の決つた土では、粘土構造そのもののあり方が結合力に重要な関係をもつ。考えられるいくつかの構造モデルのうち綿毛構造を作っている土粒子配列、すなわち *edge-to-face* 配列で、しかも *edge* と *face* の距離が接近している (たとえば $10\text{\AA}$ 近くまで) ものでは、かなり大きい結合力が発揮される。(このような結合を特にリンク結合と呼んでいる)。

正規圧密過程において、明瞭な圧密降伏点のみられるのは、*edge-to-face* 配列のよく発達している綿毛構造をもつた粘土の場合である(図-2参照)。この場合 p_y の大きさは、リンク結合の大きさであると解釈できる。したがつて圧密降伏応力を決めるおもな因子は； (i) 土-水系の物質、(ii) 土粒子の配列様式、(iii) 系全体における粒子配向の度合、(iv) 粒子間の接近距離、である。

(備考) 定向配列構造をもつた粘土の場合、その粘土の過圧密過程において表われる圧密降伏応力は、上述の *edge-to-face* 配列の場合のそれとは機構上意味を異にする。土の圧縮性の問題を工学的に取扱う上では、あえて区別する必要はないが、各種の力学挙動や土性を問題とする場合には、圧密降伏応力の意味を区別して考える必要があろう。

図-2の正規圧密過程における降伏点、図-3の mv の変換点、および図-4における $K_0 \cdot S$ の第Ⅰ領域から第Ⅱ領域への移り変わり点、などは上述したリンク結合とその結合が壊れて土粒子の再配が起つていく様子をよく情報している。

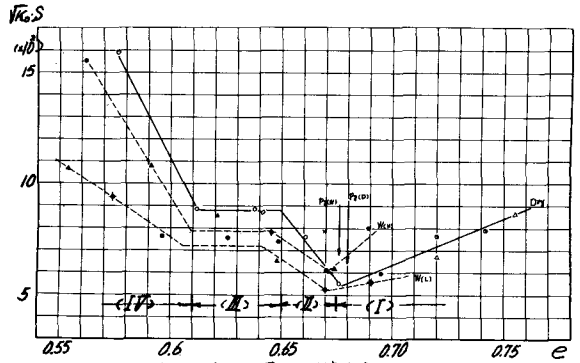


図-4 圧縮過程中的構造変化

Ⅱ - 3. 膨張圧に関する Van't Hoff 理論の吟味

土の膨張の原因を分類すると表-1 のようである。

飽和粘土の圧縮に対する

膨張を考える場合、表中

の(A)か、(B)、(b)のいずれ

かあるいは両者による。

安定な結晶をもつカオ

リン質粘土のような土を

考えると、(B)、(b)だけが膨

張圧の原因となる。

表-1 土の膨張圧力の原因

(A)土粒子の結晶……………たとえば、モンモリナイ質粘土でみられるような結晶層間への水の浸入による(いわゆる膨潤)	
(B)土粒子-水系の界面……………	(a)不飽和粘土の場合のサクシオンによる(物理的原因) (b)界面の静電的な原因による
	(i)二重層内・外に生ずる浸透圧に起因する (ii)同種イオンの最接近に伴う反発力に起因する

また土の圧密における粒子間の距離を考えてみると、(B)、(b)のうち(i)の原因による膨張圧が最も一般性をもつ。定向配列した粒子間に生ずる膨張圧((B)、(b)、(i)の原因によるとして)を求めるのは、二重層内のイオン濃度、 C_c 、と二重層外のイオン濃度(自由水の塩濃)とを函数として理論的に算出する Van't Hoff の近似数がよく用いられている。

図-5は、一価のカチオンをもつ塩、 $NaCl$ の濃度を 5×10^{-4} から 1×10^{-5} まで変えた場合の、カチオン濃度 C_c の分布(粒子表面からの距離を函数として)の膨張圧 P とを示す。

P に関する Van't Hoff の式は、 $P = RT(C_c - 3C_o)$ で表わされる。

式中 R はガス常数、 T は絶対温度である。 P を Kg/cm^2 の単位で表わすには、 $0.848 \times (273 + t_c) [C_c - 3C_o]$ 、 t_c 測定時温度、で換算される。また C_c は距離を函数として：

$C_c = \pi/2 Z_i^2 \cdot B(d + X_o)^2 \cdot 10^{-16}$ から求められる。 Z_i : イオン価数
 B : 温度と誘電常数とからきまる常数 ($10^{15} cm/mole$)
 d : 二板の粘土粒子の中間距離($\text{\AA}$)、 $X_o : Z_i$ と電荷密度による補正值、($1 \sim 4 \text{\AA}$)。

図-5 からわかるように、 d が $10 \sim 20 \text{\AA}$ は P は塩濃度による差が少く、 d が大きくなるに従つて塩濃度の影響が大きい。

図-6は、実際の膨張曲線に Van't Hoff の理論値を重ねてみたものである。

粒子間距離の算出にあつて、($d = 100w/S$)、比表面積 S の正確な値を得られなかつたために、実測した膨張圧の一つを基準に選び、任意の d における P がいくらであるかを求めたのが、曲線Ⅱであり各段階の膨張量から粒子間距離を求め、 d の増加量に応じて低減する膨張圧を求めたのが、曲線Ⅰである。

