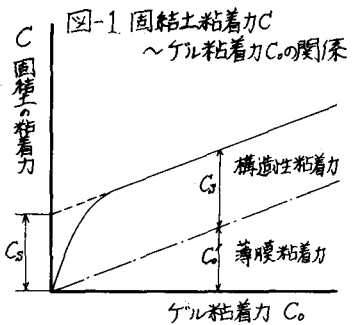


早稲田大学理工学部 正員 森 麟  
 東京都土木技術研究所 正員 杉本 隆男

1. はじめに

粗粒材が比較的軟かいバインダーにより結合されているものには、薬液注入したときの固結土、アスファルト合材、粘土を含む粗粒土などがあり、これらにとってその強度の構成メカニズムの解明は重要なことである。筆者らは、ゲル状の薬液注入剤などで砂と結合した場合の固結土の強度について研究<sup>(1,2)</sup>し、その強度、特に粘着力の構成メカニズムの大部分を明らかにできたものと考えている。

我々の研究によると、砂とゲル状バインダーで固めた場合の粘着力  $C$  は、ゲル状バインダー自身の粘着力  $C_0$  の数倍から20倍近くまで拡大され、 $C$  と  $C_0$  の間には図-1に示すような関係が成立する。そして固結土の粘着力  $C$  は、(1)バインダー自身の粘着力  $C_0$  と比例関係にある薄膜粘着力  $C'_0$  と、(2)  $C_0$  の弱い領域で急激な増加をしてそれ以後一定値となる構造性粘着力  $C_G$  の2つの要素から構成されていることと明らかにした。この薄膜粘着力  $C'_0$  はゲル状バインダーが砂の表面に強く付着し、さらに間ギャク中で薄膜状になるための強度増加で砂の内部マサツ角には全く無関係である。一方、構造性粘着力  $C_G$  はせん断時のダイレイタンスによりゲル状バインダーが引張状態となるために発生する負圧  $U$ 、およびゲル状バインダーで固定された砂がある限度以内の有効圧下で保持している大きなマサツ角  $\phi$  に関係があり  $C_G = U \tan \phi$  なるマサツ抵抗の性格をもつものであろうことを推定した。



粘土ペーストがバインダーになっている粗粒土の粘着力構成内容も基本的には上述のゲル状バインダーで固結した土の場合と同様であると考えられるので、その手法を用いて粘土を含む粗粒土(砂に粘土ペーストを混合した土)の粘着力について調べた結果を報告する。

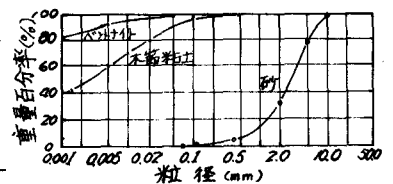
2. 試料 供試体 および実験方法

実験に用いた砂は、荒川中流産のもので実験の都合上、粒径0.075~2.00、および2.00~4.80mmの粒径にフルイ分けた。これらの比重は2.68、および2.69であった。また使用した粘土はベントナイトおよび木節粘土で、これらの物理的性質は表-1、図-2に示すとおりである。供試体は、表乾状態の砂にあらかじめ所定の含水量に練っておいた粘土ペーストを一定の割合で混合し、粒径0.075~2.00mmの砂を用いる場合には直径3.50cm、高さ7.00cmのモールドに、粒径2.00~4.80mmの砂を用いる場合には直径5.00cm、高さ10.00cmのモールドに、ニーディング荷重+静荷重をかけた締め固めた。

表-1 粘土の物理的性質

	比重	L.L. (%)	P.L. (%)	P.I. (%)
ベントナイト	2.65	309	59	250
木節粘土	2.68	60	21	39

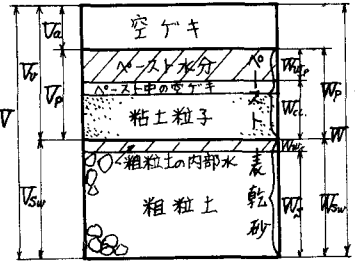
図-2 粘土と砂の粒度



供試体と作製する上で、供試体作製前後の表乾砂、および粘土ペ

ストの含水状態が変わらないものとする、混合土を模型的に、表乾砂という土粒子、粘土ペーストという間ゲキ流体、および間ゲキ空気との相乗より成るものとなることが出来る(図-3)。そこで、供試体中の表乾砂の密度 $\gamma_s$ 、粘土ペーストと表乾砂の重量比 $W_m$ 、および表乾砂間ゲキを占める粘土水の割合(体積比) $S_r$ は、一般に土の性質を示すことばを用いれば、乾燥密度、含水比、および飽和度に相当することになる。そこで $\gamma_s$ 、 $S_r$ が所定の値となるように混合比 $W_m$ を算定して表乾砂および粘土ペーストを混合し供試体を作製した。このようにして作製した供試体の非排水状態の粘着力 $C$ を三軸圧縮試験(U試験)して求めた。また、粘土ペーストの粘着力 $C_0$ はその含水量を変化させたものを室内ベン・セン断試験して求めた。

図-3. 混合土模型図



$$\gamma'_s = \frac{W_s W}{V}, \quad S_r = \frac{V_p}{V_s}, \quad W_m = \frac{W_p}{W_{sw}}$$

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 粘着力 $C$ に対する飽和度 $S_r$ の影響

粒径 $2.00 \sim 4.80 \text{ mm}$ の表乾砂とベントナイトペーストを用い表乾砂密度 $\gamma'_s$ を一定( $\gamma'_s = 1.50 \text{ g/cm}^3$ )にして表乾砂の間ゲキに対するベントナイトペーストの割合が $90, 75, \text{ および } 60\%$ となるように作製した供試体の粘着力 $C$ とベントナイトペースト自身の粘着力 $C_0$ の関係は、図-4に示すとおりである。これらの関係は、いずれの $S_r$ に対しても図-1に示す関係と同様であることを、砂と粘土ペーストの混合土粘着力もゲル状バインダーで固結した砂の粘着力と同様な要素から構成されているものと思われる。そこで直線的増加をしている粘着力を薄膜粘着力 $C_0$ 、直線部分と延長して縦軸との交点で示される値を構造性粘着力 $C_s$ と呼ぶことにすれば、 $C_0$ および $C_s$ のいずれも $S_r$ の低いもの程小さいことが分る。 $S_r$ が小さいほど砂粒子をとりまく粘土ペーストが不十分になって、薄膜粘着力 $C_0$ としての増加が生じにくくなり、また、セン断時に発生する負圧 $U$ も小さくなるため構造性粘着力 $C_s$ として大きくなりえないためと考えられる。

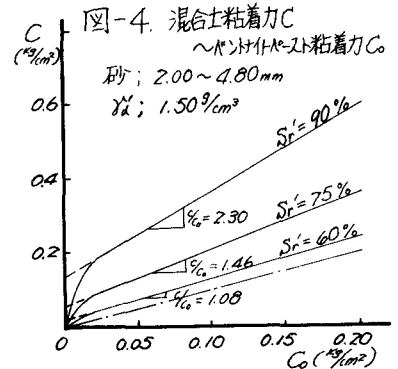
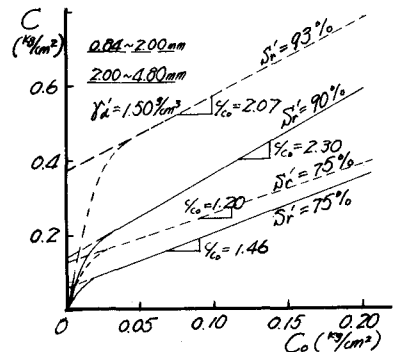


図-5. 粒径の相違による比較

$\gamma'_s$ および $S_r$ をほぼ同一にして、表乾砂の粒径を変えた場合の相違を調べた結果を図-5に示す。この図から、いずれの $S_r$ に対しても、粒径 $2.00 \sim 4.80 \text{ mm}$ の砂を用いた場合よりも粒径 $0.04 \sim 2.00 \text{ mm}$ の砂を用いた場合の方が $C_0$ は大きいことが分る。これは、2板のガラス板の間に水をはさんで板を垂直な方向に引張った場合に、板間隙の狭いもの程大きな負圧を示す現象と同様に、粒径の小さいものの方が粒子間の平均間隔が狭いために負圧が大きくなるためと考えられる。一方、直線部分の傾きは、いずれの $S_r$ においても粒径の違いによる差はあまり顕著でない



ので、薄膜粘着力  $C_0$  は膜厚の変化にあまり敏感でないことが分る。

### 3.3. 粘着力 $C$ に対する粘土の種類の影響

粒径  $0.075 \sim 200 \mu\text{m}$  の表乾砂に対して、ベントナイトペーストを混合した場合と木節粘土ペーストを混合した場合の相違を調べた結果、図-6 のようになった。粘土ペーストの粘着力  $C_0$  が同一であってもベントナイトペーストを混合したものの方が木節粘土ペーストを混合したものより  $C_0$  は大きい。これは、ベントナイトの方が木節粘土より粒径が全体として細かく均一であるために、そのペーストとしての性状がゲル状物質に近いため砂粒子との付着性が高く、セリ断時に大きな負圧を発生しうるのでと考えられる。また、直線部分の傾きがほぼ等しいことから、薄膜粘着力  $C_0$  は粘土の種類にはあまり影響を受けないものと考えられる。

### 3.4. 粘着力 $C$ に対する砂の密度の影響

図-7 は、ベントナイトペーストを用いた場合における3種類の砂に対して  $\gamma_s$  が異なる場合の  $C \sim C_0$  関係を比較したものである。この図から、 $\gamma_s$  が違っても同一  $C_0$  であれば直線部分の傾きがほぼ等しいことが分る。このことは、薄膜粘着力  $C_0$  が  $\gamma_s$  の影響をあまり受けないことを示し、3.2 で述べた膜厚に対する結果と同じ意味をもっている。図-7 から  $\gamma_s$  をパラメータとして  $C_s \sim \beta'$  の関係をプロットしたのが図-8 である。この図から、 $\gamma_s$  の大きいもの程  $C_s$  は大きいことが分る。一般に砂の間ゲキ比が小さいもの程内部でサツ角は大きいので、図-8 の結果は構造性粘着力  $C_s$  の構成要素にマサツ角が関係していることを示すものといえよう。

## 4. 構造性粘着力 $C_s$ の構成機構について

粘土を含む粗粒土の粘着力の中、構造性粘着力のしめる割合は大きいので、この構成機構を知ることは重要なことである。ゲル状バインダーで固結した砂の粘着力の研究から  $C_s$  は負圧とある有効圧力以下で作用する非常に大きなマサツ係数の積として表わしている<sup>2)</sup>。その研究においては直接砂粒子間の有効圧が測定できないので引張試験で求めた負圧を用いて、この大きなマサツ係数を求めている。今回の試料で圧密非排水試験を行い間ゲキ圧を測定し、砂粒子間の有効応力を求めたとすれば包絡線は、図-9 に示すように原土に近くなるほど勾配の急な曲線となるはずである。そこで測定された間ゲキ負圧が全て有効に

図-6. 粘土の種類の影響

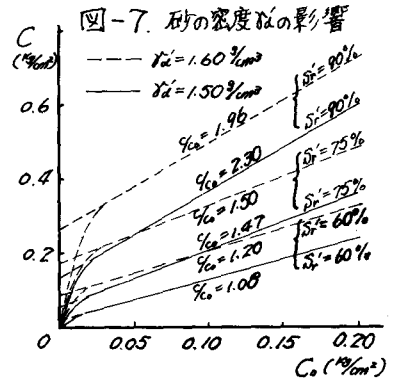
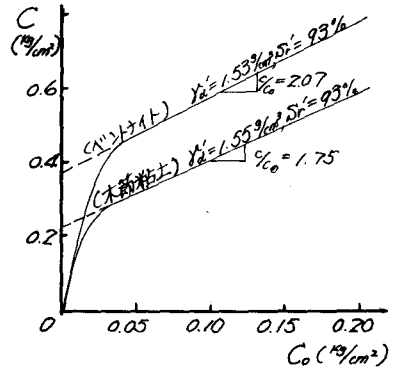
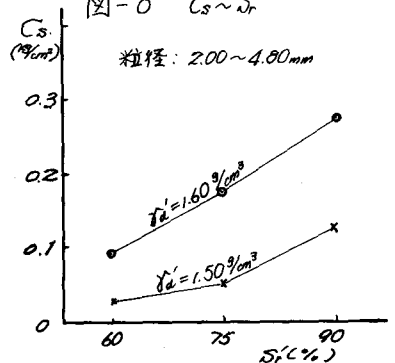
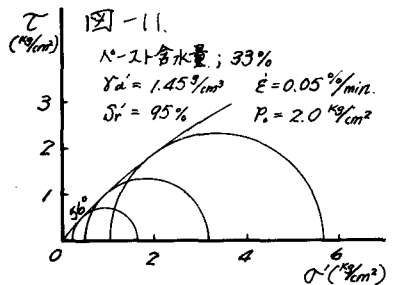
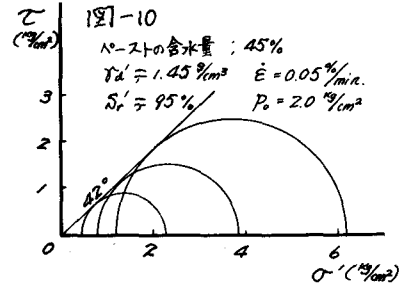
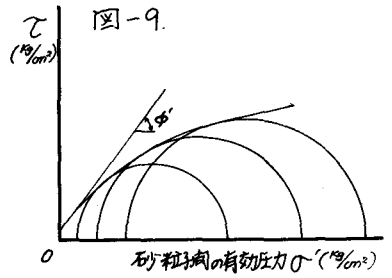


図-8  $C_s \sim \beta'$



砂粒子に働くものとして木節粘土を含む粗粒土のCU試験をした結果、図-10、11が得られたが図-9のように原更近くで急勾配にならない。これは供試体の真の飽和度が99, 96%で飽和度がや、低い上に、測定された負の間ゲキ圧が粘土ペースト中の負圧であるために砂粒子に作用する真の有効圧はもっと小さいはずである。さらに側圧の小さいモール円ほどこの影響を大きく受けるので真の包絡線は図-9に示すように原更に近くなるほど勾配の急な曲線となるように思われる。 $\phi$ が大きくなるのは粘土ペーストで砂粒子が固定されてダイレイタンス効果ごとくに大きくなるためである。



以上のことから、粘土と結合した砂の場合の構造性粘着力  $C_s$  も、ゲル状バインダーで結合した砂の場合と同様に  $C_s = U \tan \phi$  なる関係が成立すると考えられる。

## 5. まとめ

以上の実験結果から粘土を含む粗粒土の粘着力について次のようなことが分った。

- (1) 粘土を含む粗粒土の粘着力は、ゲル状バインダーで固結された砂の粘着力と同様に、基本的には薄膜粘着力  $C'_0$  と構造性粘着力  $C_s$  から構成される。
- (2) 直線部分の傾きは  $\phi$  が高いものほど大きくなり、膜厚、および粘土の種類にはあまり影響をうけない。
- (3) 構造性粘着力  $C_s$  は、ゲル状バインダーで固めた砂の場合と同様に、有効圧のある大きさまで持っている特殊なマサツ係数  $\tan \phi$  と、ダイレイタンスに起因する粘土ペースト中の間ゲキ負圧の一部  $U$  との積になるものと考えられる。

この研究結果は、粘土分水量がかなり高くペースト状になっている場合のものであるので、粘土分水量が小さい混合土についてはこの粘着力のメカニズムを適用できない。

## 参考文献

- 1) 森麟, 佐藤勝久: 結合剤による土の強度増加機構, 土と基礎, Vol.16, No.12 pp.3~9, 1968
- 2) 森麟, 伊藤雅夫: 結合剤で固結された土の構造性粘着力, 土と基礎, Vol.17, No.6, pp.7~14, 1969.
- 3) 佐藤, 平井, 花村: レオロジーとその応用 p.286 (共立社)
- 4) Rowe, P.W.: The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Roy. Soc. London, A, Vol.269, 1962, pp.500~527.