

1. まえがき 土の安定処理を含めた基礎工法に際して、土の性質を正しく把握することが必要であることはいうまでもない。土は水分を含む土粒子の集合体であり、土粒子の性質や含水量によつて性質等が著しく変化することが知られている。特に土粒子のうち粘土分の量や性質が著しい影響を与えたり、この粘土粒子と水との相互作用が土の性質を決定づけていると考えられる。

一般に、自然土の性質は土の材質に固有な性質(一次的性質)と環境条件によつて与えられる性質(間接的性質、土の構造等)の相対によつて規定されている。土の性質とそれを支配する要因との関係と明らかにする目的で、ここでは、まず土の材質等の一次的性質が土の物理的性質に与える影響を知るために、種々の粘土鉱物に非活性粒子を加えた人工的配合粘土土を用いて一連の実験を行つた。

ここでは、その一端として、土のコンシステンシーと粒度組成(粘土分の含有量)との間の関係について明らかにした実験結果を報告する。

2. 実験試料・鉱物組成分析及び実験方法。 実験試料は比較的純粋と思

われる市販されている試料を用いた。

(1) 粘性土(粘土鉱物種)として3種類

- A) ベントナイト、クニゲル^{300メッシュ} 国華化学鉱業 山形左沢産
- B) ベントナイト、穂高印^{300メッシュ} 豊順洋行 群馬県碓氷郡産
- C) ベントナイト、妙義印^{200メッシュ} 豊順洋行 群馬県碓氷郡産

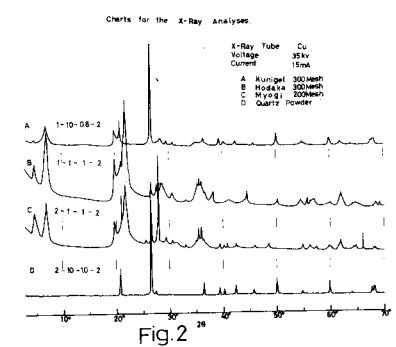
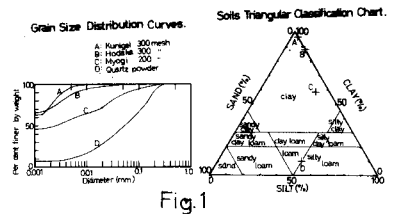
(2) 砂質土(非粘土粒子)として

- D) 石英粉、くら石英 藤井鉱業 愛知県藤岡鉱山産

上記4試料の物性は Table 1, Fig. 1 に示した。4試料の構成鉱物を調べるため、X線回折、示差熱分析を行い結果をFig. 2 に示した。X線回折の実験試料は風乾のまま、すりつぶし粉末で行った。3種ベントナイトの構成粘土鉱物はス:1型で主要成分は粘土鉱物として、モンモリロナイトを含み、非粘土鉱物としてクリストバライト、あるいはクリストバライトと石英、長石などを含んでいる。モンモリロナイトの(001)格子面間隔は約12.5Åを示し、一層しか層間水が含まれていないNa系モンモリロナイトであり、又、一部にモンモリロナイト系の加水状態を異にするものがある。長周期粘土が含まれている。(060)格子面間隔は約1.50Åで2-8面体型である。クリストバライトが多く含まれるのは穂高印、妙義印であり、クニゲルには石英と微量の長石が含まれている。石英粉は石英と主成分と微量の長石を含んでいる。(2X)X(6)

Table 1

	Kunigel 300メッシュ	Hosoya 300メッシュ	Myogi 200メッシュ	Quartz Powder
Gs	2847	2,695	2,635	2,673
Grain Size Distribution				
2000	420	74	100	100
75	100	100	92	56.8
Sand	0	0	8.0	4.05
Fine silt	4.0	12.5	34.0	5.00
Clay	96.0	87.5	58.0	9.5
Finer than 2 μ	74.5	71.0	48.0	7.0
Major clay classification	Clay	Clay	Clay	Clay or Silt (Ca)
Atterberg limit				
W _L	596.0	425.0	213.5	
W _p	39.4	42.9	35.1	
I _p	556.6	382.1	178.4	
I _f	84.0	475	36.2	



示差熱分析では、モンモリロナイトの発熱ピークは全体的に高温側に生じている。クコゲルは湿度が高い状態、穂高印、妙義印は共に湿度が低い状態で測定した。これらのものは、いずれも構造破壊による吸熱ピークが生じたのち一度基線に復したのちに発熱ピークが生ずるA型あるいはC型ベントナイトである。(2X)(X)(X)

コンシステンシー限界値は試料調整、測定方法等により影響を受けることはいうまでもない。測定者による個人差もまぬかれないだろう。従って実験において調整・測定方法等を安定した条件の下で行うよう努力した。

配合試料の調整 4試料を乾燥重量に基く重量比でTable 2に示すように配合した。ここでいう配合比PはベントナイトをA、石英物をBとし

$$P(\%) = \frac{A \text{の乾燥重量}}{A \text{の乾燥重量} + B \text{の乾燥重量}} \times 100$$
 で表わされる。

配合した試料はビニール袋に入れ、かくはん混合したのち密封して保存した。実験を行う順に袋より必要量を取り出し、一定水量を試料に均等にいきわたるよう注水し、一定時間よく練り混ぜたのち湿布をかぶせこのかき混ぜ時間はWinslow and Gates⁽⁹⁾の実験結果より24時間を望ましいと考えられたが、本実験では12時間を標準とした。

測定に当り器具はJIS規格に規定されている方法に従った。

3. 実験結果

1) 液性限界 W_L とPについて Fig. 4 各配合土の W_L はそれぞれベントナイトの W_L に依り、また配合量は比例してほぼ直線的に変化する。

若干60%を境いと直線の勾配が異なるようである。

2) 塑性限界 W_p とPについて Fig. 5 各配合土ともほぼ直線的な変化を示すがSample I, IIはそれぞれ40と30%付近で折れまがり、Sample IIの折れまがりは認められぬ。Sample Iの W_p は W_L とPの関係とは逆にSample II, IIIよりも低い値を示すことが注目される。また、Sample I, IIにおいてPが30~40%以下では、Pの減少に伴い、 W_p 値が逆に増大することも注目される。

W_L -P, W_p -Pにみられる直線関係は材料に用いたベントナイトの限界値の配合量から求められる比例値よりも一般に低い値を示している。

3) 塑性指数 I_p とPについて Fig. 6 各配合土の W_L と W_p より求めた I_p とPの関係は単純な直線関係を示すとはいえないが、 W_L 値の変化量にくらべ、 W_p 値の変化量がわずかにあるため、ほとんど W_L 値に左右され、ほぼ直線的な関係が得られる。ここで

Sample Iはクコゲル/石英粉。 Sample IIは穂高印/穂高印+石英粉。 Sample IIIは妙義印/妙義印+石英粉である。

Charts for the Thermal Analyses. Heating Rate 20°C/min

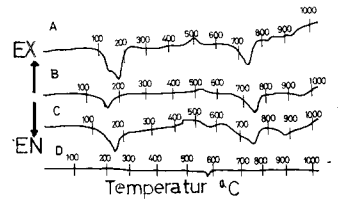


Fig. 3

Table 2

Sample I	Sample II	Sample III
kunigel	hodaka	myogi
ku + qp	ho + qp	myo + qp
100	100	100
95	95	95
90	90	90
85	85	85
80	80	80
75	75	75
70	70	70
60	60	60
50	50	50
40	40	40
30	30	30
20	20	20
10	10	10
0	0	0

Liquid Limit vs Mixture Proportion

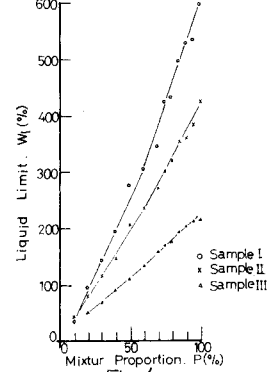


Fig. 4

Plasticity Index vs Mixture Proportion

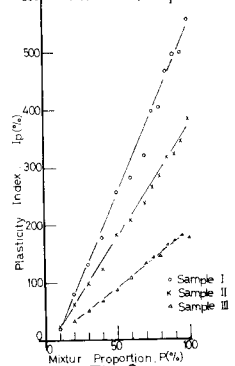


Fig. 6

Plastic Limit vs Mixture proportion

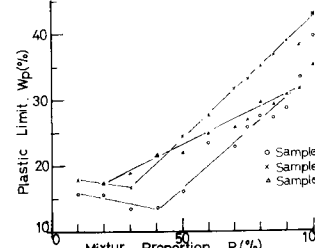
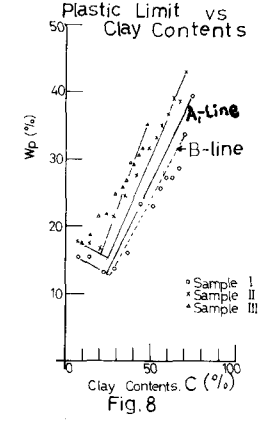
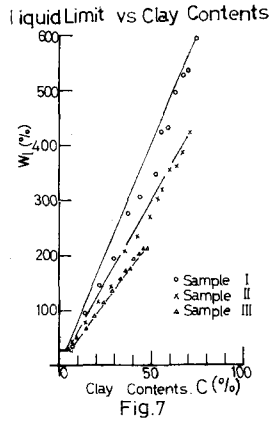


Fig. 5

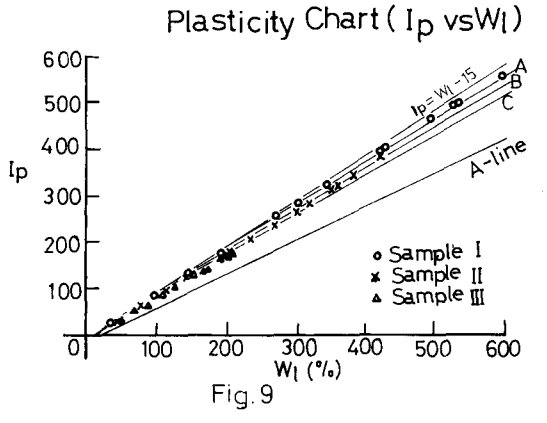
4) W_L と粘土含有量 C の関係について、Fig. 7 同一組成の粘土を含有する粘性土の「アッターベル」限界はその粘土含有量に比例して変化する（セードとWoodward⁽⁷⁾）によつて確かめられている。SeedとWoodwardは粘土粒子のみが示す W_L を W_{CL} とすれば、その粘土粒子の含有量が $C\%$ で土の W_L は、 $W_L = \frac{C}{100} \cdot W_{CL}$ と示すことができ、粘土粒子が多量に含まれている場合は、非粘土質粗粒子が粘土粒子からなるMatrix中に浮かんだ状態となり、限界値は同一粘土種では粘土量のみによつて決定されることを示している。しかし、粘土粒子が少ないうちは、粗粒子どうしの接合がホリ限界値は粘土含有量のみによつて直接決定されないと考えられる。Seed'sは非粘土質粗粒子がゆるくつまとしたときの間げき量 e と含水した粘土粒子がしめる容積が一致するときの粘土粒子の量（乾燥重量） X は次式で与えられる。

$$X = 100 \cdot \frac{1}{G_{sc} \left(\frac{1}{G_{sc}} + \frac{W_{CL}}{100} \right)}$$
 ここで G_{sc} は粘土の真比重、 G_{sg} は非粘土質粗粒子の真比重である。この時の混合土中の粘土含有量を限界粘土含有量 C_{fv} とすれば、 $C_{fv} = X / (Y + X) \cdot 100 (\%)$ と与えられる。ここで Y は非粘土質粗粒子の乾燥重量。従つて、 W_L と C の直線関係は $C \geq C_{fv}$ の場合に成り立つことになる。本実験に用いた試料について、 C_{fv} を求めてみると、Sample Iで $W_{CL} = 800$ で C_{fv} は 3.46、Sample IIで $W_{CL} = 574.6$ で C_{fv} は 4.50、Sample IIIで $W_{CL} = 444.8$ で C_{fv} は 5.84 となり Fig. 7 ではいずれも直線関係が成り立つことになる。



5) W_p と C の関係について、Fig. 8. W_L と C の関係と異なるのは Sample I と III は逆の値を示し、Sample I は粒子間の相互作用の結果、ベントナイトそのものが示す W_p 値の比例値よりも低い値が得られている。従つて単純比例を示す A 線の上に近く、それよりも低い比例関係を示す B 線の上にその値が分布している。 W_L と C の関係と同様、 W_p と C の関係も C_{fv} 値の考えを導入することができる。粘土粒子のみが示す W_p を W_{pL} とすれば、Sample I で $W_{pL} = 52.9$ で C_{fv} は 25.40、Sample II で $W_{pL} = 64.6$ で C_{fv} は 23.46、Sample III で $W_{pL} = 73.1$ で C_{fv} は 21.22 となる。 C_{fv} は約 20~30% の範囲にある。Sample I, II の場合にはこの C_{fv} 値に相当する点で W_p と C の直線は折れまがり、 C が C_{fv} 値以下になると、 W_p は非粘土質粗粒子の相互作用の影響によつて逆に増加している。

6) I_p と W_L の関係について、Fig. 9. Casagrande の塑性図上で粘土含有量の変化すると図上の位置がどのように変化するかを示すため、 $W_p - C$ の結果から W_{pL} は 52.9~73.1 の範囲にあり、また、 W_p についての C_{fv} は 25.4~21.22 の範囲にあることから、これらの平均値として $W_{pL} = 62$ 、 $C_{fv} = 24$ を採用して理論的に塑性図上で C の変化に対応する位置変化を図示すると、各試料についてこの直線 (Fig. 9 の中の A, B, C, の各線) は $I_p = W_L - 15$ の直線と交差



する臭で折れる線が示される。粘土含有量が増すと折線に沿って右上へ移動する。各折臭の位置は20~30%の粘土含有量付近にある。各Sampleについてえられた実験値はこの理論式から求められた直線上にほがのつてくる。ここでAは $\gamma = \frac{G}{V} / \gamma = \frac{G}{V} + \text{石英物}$ 。Bは $\frac{\text{粘高性}}{\text{粘高性} + \text{石英物}}$ 。Cは $\frac{\text{砂高性}}{\text{砂高性} + \text{石英物}}$ である。

7) I_p と C の関係について, Fig. 10.

粘土質の特性を示す方法として重要なのが Skempton (8) の定義した粘土の液性である。これを Fig. 10 に示すとはが Sample I 場合は $A_c = 7$ 前後, Sample II は $A_c = 5$ 前後, Sample III は $A_c = 4$ 前後の値を示し, Skempton の分類に従って Group 5 の Active なものに属する。これがよく注意してみると, 各 Sample の直線は W_p のときの C_{fv} 値に相当する 30% 付近でおさまがっていることが注目される。

4. おすい

W_p 値は粘土含有量の変化に応じて, 粘土含有量までほが直線関係が存在する。したがって W_p については Sample I, II にみられるように, C が 25% 前後で直線がおさまがっている。この折臭の意味するものとして, 土のコンシステンシー特性は W_p などについては粘土限界含有量 C_{fv} が重要な意義をもつていふことが指摘されるよう。

又, W_p 値はいずれも粘土粒子そのものの示す値の配合分に応じた比例値より低い値を示すのは, 異種粒子の配合による減殺効果にもほがくものであると考えられる。

終りに, この研究にあたり御指導いただいた岐阜大学工学部土木科・宇野尚雄助教授, 名城大学理工学部地学教室・桑原徹助教授, 日本道路公団・藤井俊介氏に末筆ながら深く謝意を表すものであります。

参考文献

1. 土質工学会 (1965) 土質試験法.
2. 須藤俊男 (1964) 粘土鉱物 岩波全書.
3. 日本粘土学会 (1967) 粘土ハンドブック 技報堂.
4. 粘土研究会 (1963) 粘土科学の進歩(4) 技報堂.
5. 松本謙三 (1962) 土の物理的試験値の個人差について(続報) 土と基礎 51, 11~15.
6. Grim, R.E (1968) Clay Mineralogy McGraw-Hill.
7. Seed, H.B. and Woodward, R.J. (1964). Fundamental Aspects of the Atterberg Limits. Proc. Amer. Soc. Civil Eng., (SM6) 75~105
8. Skempton, A.W (1953). The Colloidal "Activity" of clays. Pro. 3rd Int. Conf. Soil Mech and Found. Eng. 1, 57~61
9. Winslow, J.D and Gates, G.R. Effect of Soil Rehydration on Atterberg Limit. Material Research and Standards, ASTM, Philadelphia, Pa. Vol. 3, March, 1963. 205~210.

