

# サクシオンプレート法によるベントナイト・砂混合土粒子の水和性

伊 藤 驍

Hydration of Mixed Soils of Bentonite and Sand by  
Suction Plate Method

Takeshi ITO

(昭和51年10月31日受理)

## 1. 緒 言

ベントナイトは古くからボーリング用泥水材料として他の材料と混合して用いられてきている。これは、ベントナイトは水のある程度吸収すると凝集して膜を成しそれ以上水を通さず、坑井壁面にmud cakeを形成して、崩壊を防ぐ等の利点があるためである。このような粘土の鉱物学的安定性について、近年多くの研究をみるようになったが<sup>1)</sup>、各種の土粒子混合物の土質工学的究明については余り類例がない。ベントナイトとか砂の混合土の物性を知ることは自然たい積土の性状を理解する上に、重要な事柄の一つとなっているが<sup>2)</sup>、さらに人工的に混合することによって、構成土粒子個々のもつ特性とは異なった新しい性質を解明する上にも重要なことであり、これによって土の強度特性を改良し力学的に安定した土を作ることも期待できる。

これまで土の力学的性質を表わす場合、土と水の相互関係は特に飽気帯よりも下位の領域の挙動を説明するにも留まるのが大半であった。周知のように土は水の増減によって著しく影響を受けるが、乾燥～不飽和領域側の土が水分を吸収していく過程の研究は粉体工学<sup>3)</sup>や土壌物理学等の分野に委ねられていた。しかし環境変化に対応する土・水系の挙動については、土質工学者にとっても極めて興味深いことと考えられている。土のコンシステンシー、透水性、構造抵抗のような諸性質は殆んどすべて土粒子の水分保持力によって決定されている。

そこで本研究では、不飽和領域の土が、水を吸う性質をサクシオンプレート法により求め、この試験材料としてベントナイト及び豊浦標準砂の微粉末を色々混合させたものを用い、それについて併せて土質実験も行なった。本文はこれら材料の水分保持力の意味を実験結果により明らかにしさらにベントナイト系混合土粒子の材料力学的基礎資料を得るために種々検討した概要をとりまとめたものである。

## 2. 装置・試験方法

粘土鉱物等の微粉末の吸水性を調べる装置は従来種々提案されている。しかもそれらは大い適用範囲が限られている。土粒子のサクシオン圧が小さい場合にはフロイドリツヒ吸水装置が適用できるので、本研究ではこれにより、飽和していない粉体の吸水量の測定を行なった。図1はその装置の略図を示している。本来この装置は膨潤度を測定するために作製されている。

試料はベントナイト(クニゲル3-V)及びこれに、豊浦標準砂(74 $\mu$ 以下に粉碎したもの)を以下に示すような割合で混入し、それぞれの初期含水比を求めて、さらに湿潤箱に入れて養生し、経時変化に応じた含水比の試料を作製した。試料の番号はベントナイトの含有率(重量比)に応じてB<sub>100</sub>, B<sub>75</sub>, B<sub>50</sub>, B<sub>25</sub>, B<sub>0</sub>とし、B<sub>0</sub>は豊浦標準砂のみの試料とした。このような試料を予め毛管水位が調節されたガラスフィルター(サクシオンプレート(3))上のろ紙(2)の上に1gセットした(図1参照)。試料(1)がプレート下部の水を吸い上げる力を以ってサクシオン圧と呼んでいるが、本装置には圧力測定装置が具備されていないので、試料のサクシオン作用は、ここでは水平毛管(4)の水位の差によりその移動水量を以って表わすこととした。

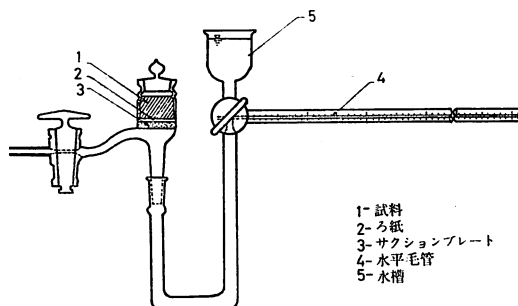


図1 フロイドリツヒ吸水装置

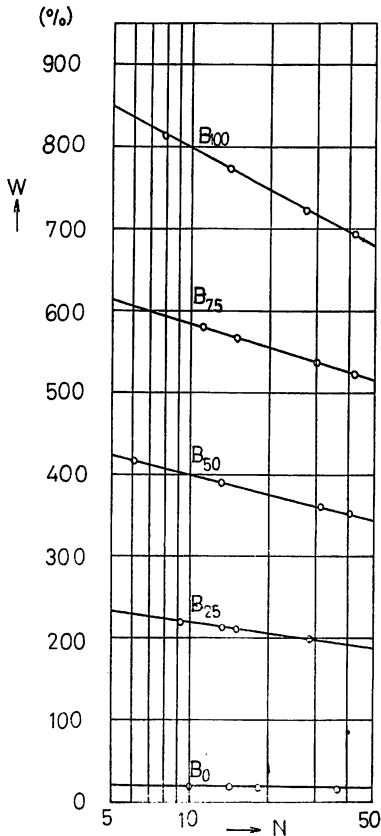


図2 流動曲線

3. 結果及び考察

図2は各試料についてコンシステンシーを調べるために描いた流動曲線である。これを見ると、ベントナイトは著しく含水比(W)が高く、豊浦砂の10数倍にも達している。これより混合土の含水比は基本的にこのベントナイトの含有率(Bc)に依存していることが容易に判明する。この含水比と落下回数(N)の関係は

$$W = -I_p \cdot \log N + C_1 \quad (1)$$

と表現され、定数C<sub>1</sub>、流動指数I<sub>p</sub>は、構成土のベントナイトの含有量によって定まる値である。土に結合される水の量はN=25における液性限界(W<sub>L</sub>)によって特徴づけられる。この試料における塑性限界(W<sub>P</sub>)は、余り大きく変化しなかった。これらの関係による土の塑性指数(I<sub>p</sub>)とベントナイトの含有率との間には図

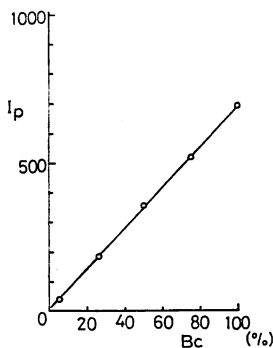


図3 I<sub>p</sub>とBcの関係

3に示す如く、明りょうな線形の関係がある。この場合も構成土の鉱物組成特に膨潤性粘土の多少によって土の構造抵抗を示すI<sub>p</sub>に大きな影響を与えている様子がわかる。I<sub>p</sub>は土の力学的性質を判定する重要なfactorであるが、I<sub>p</sub>が大きく、W<sub>P</sub>が小さいことは土の構造抵抗が粘着力に大きく依存していることを示すもので、ベントナイトを含むような試料では水分保持力が高く、従って高いW<sub>L</sub>の点まで強度を維持するなど、本試料では全てベントナイトの含有率がこれら諸性質を規定している。このようなことは、自然たい積土の組成や含水量が粘土組成や粒度と密接な関係をもっていることを示唆するものであり、粘土の鉱物学的安定性を調べる上で重要なポイントと考えられる。上の関係を対数表示すると次式となる。

$$\log I_p = \log C_2 + n_1 \log B_c \quad (2)$$

ここで豊浦砂混合土に対し、C<sub>2</sub>, n<sub>1</sub>を図から定めると、I<sub>p</sub>とB<sub>c</sub>との関係は結局次の直線で表わされることが確認された。

$$I_p = 6.91 B_c^{0.994} \quad (3)$$

式中C<sub>2</sub>の値は、粘土の種類による係数で、n<sub>1</sub>はその指数である。このような性質を調べたものにSeedらの研究がある<sup>4)</sup>。それによれば、C<sub>2</sub>が材料の種類によって変わり、それが土の膨潤や活性度と密接なつながりをもっていることを指摘している。Skempton<sup>5)</sup>は、I<sub>p</sub>と粘土混合率の観点より、これらは原点を通る直線で表示されることを強調した。ところが人工的に配合した土は原点を通らず修正した形が必要とされた。本研究では図示のように、殆んど原点付近を通っている。ベントナイトの含有率は、土の活性を示す指標と考えられ、これにより、直線の勾配が決定されている。彼らの実験では自然土と室内実験用の試料の測定値に、差異が生じているが、これは米英の違いや模擬試料が適切でなかったことに依るもので、両者のアプローチが今後の課題になると考えられる。

さて、土粒子が水を吸い込む現象として、土の内部に負の間ゲキ圧が存在するいわゆる浸透現象や毛管現象が考えられる。これらは浸透サクシヨ、毛管サクシヨと呼ばれるが、豊浦砂のようなものに対しては専ら毛管サクシヨが作用し、ベントナイト分に対してはむしろ浸透サクシヨによる水の吸い込みが著しいと考えられる。さらにベントナイトは水和による吸い込み現象が強いため、これによる鉱物シートの薄膜サクシヨが生じていることも当然考えられる。毛管サクシヨは砂質土特有のものであるが、これは土粒子中の空気、水曲界面における圧力差に依存する現象であって、砂はこの現象によって体積増加を引き起こさない。この点が砂の水分

保持力を考える場合、粘土と最も異なった点である。砂の水分保持力は土粒子表面の吸着力によるものであって水の吸収量はその毛管を逆に空白にする力に等しく毛管半径の大きさに相当すると考えてよい。従って吸水量は砂の場合、毛管の等価半径に相当する。

一方粘性土の場合は、水の吸収には膨潤現象を伴って体積変化を起こすことが特徴である。そしてその水分保持力は膨潤力に等しいとする考え方がある。即ちサクシオンは、膨潤圧に等しいとする考え方である。そうすると膨潤性に富んだ鉱物組成を持つことが混合土の水分保持力の条件となってくる。この考え方は本実験の結果からみると極めて妥当なものと考えられる。以上から混合土粒子の水分保持力は鉱物組成や様々な粒子配列下における毛管即ち粒度組成によって決定され、それが膨潤力と毛管力に支配されていると理解される。土粒子が砂質であるか粘土質であるかによって土の性質が著しく異なることは例えば  $W_L$  をみても明らかであるが、混合土粒子がどの程度の飽和含水比 ( $W_{sat}$ ) をもつのかを次に考察してみる。Casagrandeはこれについて

$$W_{sat} = \sqrt{15.2(W_L - 16.3) + 9} \quad (4)$$

を提案した。これは  $W_L$  が 16.3 より大きい場合に適用されるが本実験のデータを基にして  $B_c$  毎の変化を示すと図4の如くとなる。図から、明りょうな線形関係のあることがわかるが、これを式示すと概略次のようになる。

$$W_{sat} = 10.4\sqrt{B_c} \quad (5)$$

(4)、(5)式は等値であるから、 $B_c$  と  $W_L$  の関係を描くと図5のようになる。図の中に実験値と計算値の双方を示したが、これらの関係は非常によく近似している。Seed<sup>4)</sup>らも粘土含有率との関係から同じような結果を得ている。

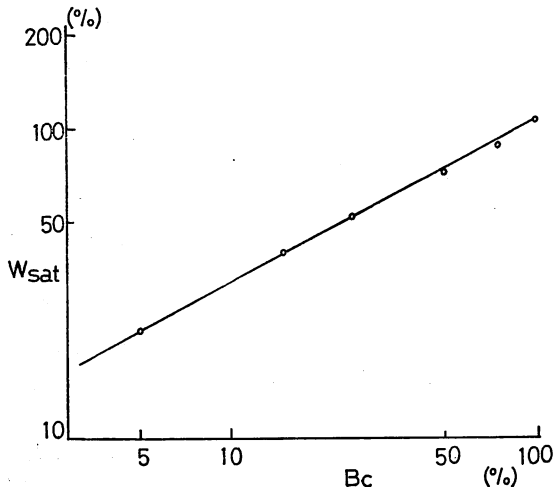


図4  $W_{sat}$ と $B_c$ の関係

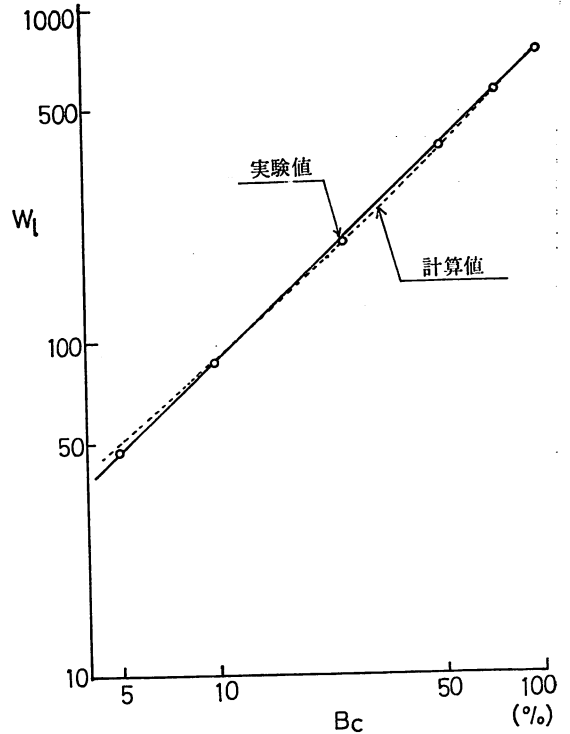


図5  $W_L$ と $B_c$ の関係

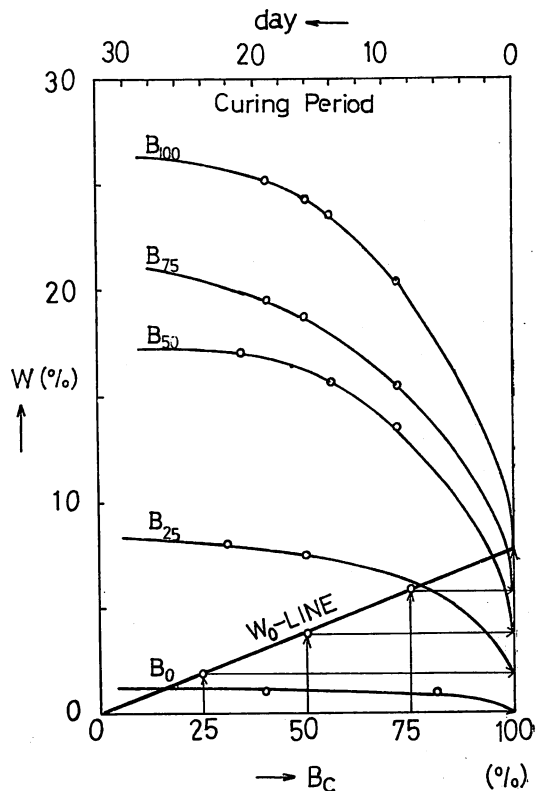


図6  $B_c$ 毎の $W_0$ とその養生変化

実験値の直線は次式に示される。

$$W_L = 10.7B_0^{0.916} \quad (6)$$

(5)式からベントナイトの量がわかれば、飽和状態になるまでの含水比が計算されるが(6)式によると、多量に吸水し過飽和状態になってその強度をそう失するまでの値が計算される。

次に実際の吸水量をサクシヨンプレート法により決定する。 $B_0$ 毎の初期含水比 ( $W_0$ ) 及びこれらを湿気箱にて養生した場合の含水比の変化を図6にまとめて示した。豊浦砂の場合は初期に吸着水が若干みられるだけであとは殆んど変化していない。 $B_0$ が大きくなれば、それに対応して吸水量も段階的に経時変化していくが、平衡状態に達するまでには  $B_{50}$  以上はかなりの時日を要するものと思われる。この試料の初期含水比における吸水量と時間の関係を示せば図7のようになる。この図をみると  $B_0$  は最初の数分間に吸水すればあとは全く吸水していない。これに対しベントナイトを含むものは、時間の平方根に比例して吸水量 ( $Q$ ) が増加している。この中で  $B_{25}$  は順位が逆転しているが、これは砂分が多いため吸水の連絡通路が多数存在していることによるもので、その後はベントナイト量が少ないから余り吸水していない。このような変化について実験式を作ってみると短時間内ではこれらは一般に次のような関係にあるようである。

$B_0$  に対し

$$Q = \frac{\sqrt{t}}{a + b\sqrt{t}} \quad (a, b : \text{定数}) \quad (7-a)$$

$B_{25}$  以上では

$$Q = \alpha\sqrt{t} \quad (\alpha : \text{定数}) \quad (7-b)$$

土粒子の吸水傾向を長時間に亘って観測すれば概ね図8のようである。この図によれば、時間を大きくとると、いずれは  $B_0$  の大きさ順に配列することがわかる。今回は各  $B_0$  における含水比の異なったものの関係を省略したが、 $B_0 \sim \sqrt{t}$  の関係は、モンモリロナイトを使った場合の膨潤圧との時間関係<sup>6)</sup>にも非常によく類似しており、今後は違った材料についてさらに検討してみてもこれらの関係を明確にしてみたいと考えている。

以上から、 $B_0$  の差異による吸水量の変化は、同じ含水比を持たない粘土と砂の混合によるものであるから当然水の移動は高ポテンシャルの点から低ポテンシャル点へ流れることになる。従ってこの場合水は最初砂から粘土へ流れ、やがて粘土が水和し、鉱物シート間に水がはさまれていく。それによって膨潤性に富むベントナイトは、鉱物シートが水を含んで膨潤する。この膨潤の仕方は砂の含有量と関係し、本実験では砂の量が少くなる

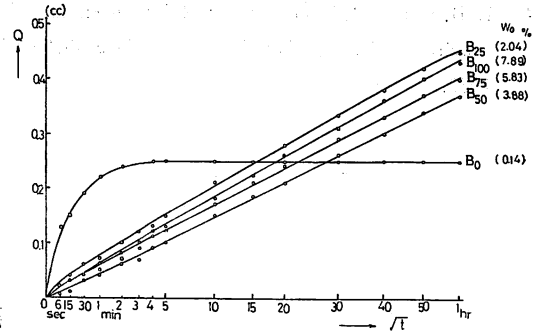


図7 初期の吸水量と時間の関係

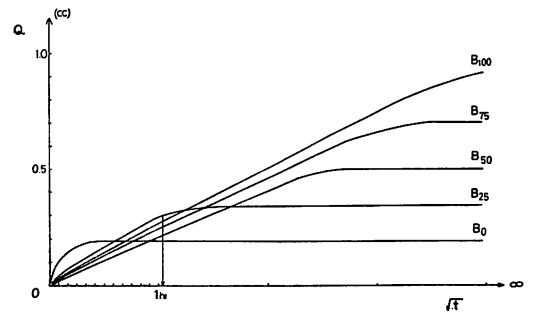


図8 長期に亘る吸水量と時間の関係

と、時間的な遅れを伴って吸水量が徐々に増している。その機構は概ね上述の通りと考えられる。

#### 4. むすび

以上、砂及びベントナイト及びこれら混合土粒子における吸水量の変化について述べ、コンシステンシーの観点による考察も述べた。実験は現在も継続中であるが、これまで得られた結果によって概略吸水性の傾向はつかめたものと思われる。土粒子の吸水過程については、ラングミュア式とかBET式さらにポアズイユの式など、適用されるが、今後、この方面での量的研究の必要性も感ずるので、さらにデータを集積して解析を進め膨潤との関わりについてもさらに究明したいと考えている。

なお、実験を行うに当たり、本学学生桜田良治君に手伝って頂いた。

付記：本研究の一部は、「文部省科学研究費」によって遂行されたことをここに記す。

#### 参考文献

- 1) 例えば井上, 奥田: 材料, Vol. 25, No. 274, 648—652, 1976.
- 2) 松井, 伊藤: 土木学会論文報告集, No. 242, 41—51, 1975.
- 3) 若林: 粉体工学, 43—52, 1971. 10.

- 4) H. B. Seed, R. J. Woodward & R. Lundgren; Jr. Soil Mech. Found. Div. (ASCE), Vol. 88, No. SM3, 53-87 1962.
- 5) A. W. Skempton; Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1. 57-61, 1953.
- 6) 伊藤, 堀部: 日鉱春季大会, 25-26, 1976. 3.