

関西大学工学部 正員 西田一彦
 関西大学工学部 正員 青山千彰

1. まえがき

締固めの土は含水比や、締固め仕事量に応じて種々の構造を形成するものとされている。多くの研究者は最適含水比の乾燥ほらびに湿潤側で明らかに土粒子西列が異なることを指摘し、それと圧縮性、透水性などの工学的性質との関連性を明らかにしている。しかし、これらの研究は、いづれも土粒子自身の西列に注目したものであり、土塊内の間ゲキ構造に着目したものは少ない。土の性質は、土粒子の方向性とともに土塊内の土粒子の集合状態や間ゲキ構造にも密接な関係をもつものと考えられる。そこで、本報告は、まず水分吸着装置によって土塊の水分吸着特性を明らかにした後、水銀の表面張力を利用したポロシメーターを用いて、締固め過程における間ゲキ径の分布を明らかにしたものである。

2. 試料および実験方法

実験に用いた試料は、宝塚市中山の流紋岩質凝灰岩の風化土で空気乾燥後、 74μ 以下のものを供試土として使用した。その基本的性質は、比重が2.68、液性限界77.3%、塑性限界46.6%である。また、X線回折と示差熱分析の結果、主は含有鉱物は石英、ハロサイト、結晶度の悪いカオリナイトであった。締固めは、直径1.4cmのガラス製モルドと重量2.7gのランマーを用い、仕事量は 5.6cm^3 にはるように落差26.5cm、3層15回で非降り返し法により行った。図-2に締固めの曲線を示す。ここでモルドを極端に小さくしたのは、後述の水分吸着実験と間ゲキ径測定実験に用いる測定容器が非常に小さく、容器におさまる大きさに整形する際、土の構造を乱さないように考慮したためである。締固め後、試料はそれぞれのモルドに入れた状態で凍結乾燥を行った。吸着実験には栗田化学K.K製水分吸着装置を使用し、水蒸気圧を飽和蒸気圧まで増大するときの吸着量、ならびに飽和蒸気圧から減圧するときの吸着量を求めた。温度は 30°C と 40°C の2つの場合について行ない、BETプロットにより水分分子による比表面積を算定し、飽和蒸気圧下の最大吸着量を比表面積で割って平均水膜厚さの算定を行った。ポロシメーターはCARLO ERBA社製AG65を使用した。その原理は、水銀の表面張力($480\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}$)が非常に大きく、加圧しなければ毛細管中に侵入しない性質を利用したものである。真空脱気した多孔性物質の細孔内へ水銀の表面張力に打ち勝つ、水銀を圧入するために必要な絶対圧力を P とし、細孔半径 r の円形断面を仮定すると、その関係は次式で表わされる。 $P r = -2\sigma \cos\theta$ 。ここで σ は水銀の表面張力、 θ は接触角($\theta=140^\circ$)であるため上式は簡単に $P r = 75000$ で表わされる。従ってAG65型では圧力が $0.14(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2})$ から $800(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2})$ まで変化するため、測定孔径の範囲は約 $50\mu\sim 90\text{\AA}$ である。測定は低圧と高圧の2段階で行なった。低圧測定は、大気圧を吸入圧として利用するもので、図-1のポロシメーター試料容器(ディラトメーター)内を真空状態にした後、水銀を満たし、空気を入れるにつれて水銀面が低下するのをカセットメーターで読みとる方法である。高圧測定は、油圧装置で $800\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ まで加圧し、水銀吸入量を電氣的に読みとる方法である。水銀吸入試験後、試料中には、少なくとも大気圧分と水銀高さ分の圧力で保持された水銀が残留するため、偏光装置をとりつけた金属顕微鏡による撮影を行なった。なお、締固めの試料は、凍結乾燥、水分吸着実験、間ゲキ径測定実験を通じて、 $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{torr}$ の真空度で実験されるため、最終の間ゲキ径測定の際、間ゲキ中には構造水を除いて、全く水分はないと考えられる。

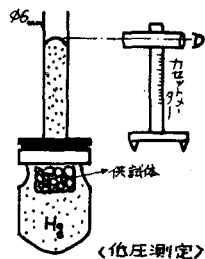


図-1 ディラトメーター

3. 結果

吸着実験結果を図-2に示す。横軸に含水比をとり、縦軸に比表面積、平均水膜厚さ、間ゲキ量をとったものである。図中番号は下図の疎固の曲線の試料番号に対応している。比表面積は最も乾燥側で8%となり、それより含水比が増すに従って最適含水比で最高値21%を示すまで増大する。さらに含水比が増すと比表面積は急激な減少を示した後、再び増大し約17%あたりでほぼ一定となり漸次減少してゆく。次に平均水膜厚さは比表面積とは逆に、最適含水比まで徐々に減少し、最小値13Åを示した後、急に厚くなり33Åの最高値を示す。さらに含水比が増すと再び薄くなり約15Åあたりで一定となった後、厚くなってゆく。この様に比表面積、平均水膜厚さとも最適含水比よりわずかに湿潤側に移行した地点で急激な変化が見られることは、透水性にも関連するものと考えられる。

上述の比表面積と平均水膜厚さ、最大吸着量の関係を図-3でプロットしたものが図-3である。図より明らかはとうり比表面積が増大すると平均水膜厚さが減少する傾向が見られ従来の結果と同様である。また、比表面積と最大吸着量との関係は比例関係にあるため、図-2において最適含水比よりわずかに湿潤側の地点では比表面積が減少して最大吸着量が減少しているにもかかわらず平均水膜厚さは厚くなっている。

水銀貫入試験結果を図-5および図-4に示す。まず図-5は、単位重量あたりの間ゲキ量をプロットしたものである。間ゲキ量は、乾燥側より最適含水比まで減少した後、平均水膜厚さが最大となる地点でわずかに増大し、さらに含水比が増すと再び減少した後、急激な増加を示す傾向が見られる。これは平均水膜厚さの曲線の傾向と非常によく類似している。次に図-4は横軸に間ゲキ半径、縦軸に間ゲキ体積率をとった間ゲキ半径加積曲線である。乾燥側においては、大小の間ゲキが一緒に分布し、含水比が大きくなるにつれ曲線は上方へ、つまり全体にわたり間ゲキ半径は小さく方へと移行している。ところが、最適含水比になると、中程度(0.1μから10μ)の間ゲキは消失し超ミクロ(0.1μ以下)な間ゲキと粗大(10μ以上)な間ゲキに極端に分離する。そして湿潤側では最適含水比よりわずかに大きな含水比までは超ミクロの間ゲキが増加すると同時に粗大な間ゲキは減少している。さらに含水比が増すと、再び粗大間ゲキが増え、超ミクロは間ゲキが減少してゆく傾向を示している。また、図-5の疎固の曲線において、乾燥密度がほぼ等しくなるNo.3とNo.5を比較した場合、同じ間ゲキを持つ試料でも乾燥側と湿潤側では間ゲキ径の分布が全く異なっていることが明らかである。

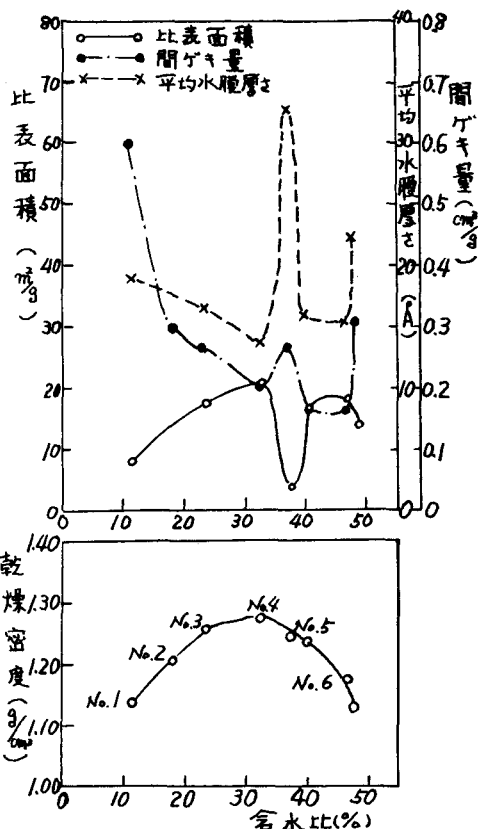


図-2 吸着実験結果 (30℃)

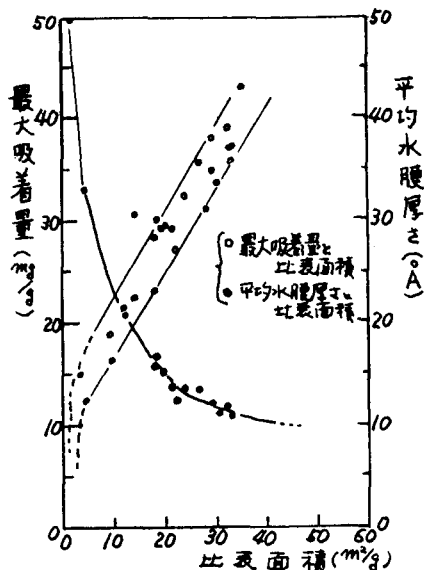


図-3 比表面積と平均水膜厚さ、最大吸着量との関係 (30℃と40℃について)

乾燥側、最適含水比、湿潤側の典型的

は間ゲキ形写真を写真-1, 2, 3に示す。

水銀で満たされた間ゲキは偏光撮影のため

の黒色に写っている。三日月の分類

によれば、乾燥側では、粉体からアグリ

ゲートへの移行過程のため、間ゲキ形状

が非常に不規則な形となり、個別粒状構造

と粒状薄膜構造の二つの特徴が観察さ

れる。最適含水比では間ゲキの輪郭が明

瞭となり、一体結合構造をとっている。さらに湿潤側になると、含水量が

増すため一体結合構造は分離し、

4. 考察

水分吸着実験と水銀侵入試験結果より締固め過程における間ゲキ径の注

意は以下のように考えられる。乾燥側では、水のメ

カスによって抱束された土粒子が、締固められ、しだいに、土塊として

の密度を高めてゆくため、比表面積は順次増大し、間ゲキ量は減少して

ゆく。そして、間ゲキ径の分布は初期段階で数10μmの粗大の間ゲキが主

であった後、密度が増すにつれ、粗大の間ゲキの小さなへ移行する特徴

を示している。最適含水比では、比表面積は最大となり、水膜厚さ、間ゲ

キ量はほぼ最小値となる。ところが間ゲキ半径の分布は、乾燥側と比較し

て、0.1μmから20μmの中程度の間ゲキが消失し、粗大の間ゲキと超ミク

ロな間ゲキの両極端は分布状態になっている。これは、土粒子が、この契

機で、アグリゲートを形成し、間ゲキがアグリゲート内間ゲキとアグリゲ

ート間間ゲキに分離するものと考えられる。湿潤側では、最適含水比よりや

すかに含水比が増した地実で、平均水膜厚さが急激に増加している。また

この地実では間ゲキ半径の分布を見ると超ミクロなアグリゲート内間ゲキ

が大部分をしめている。この間ゲキでは、間ゲキの内壁が非常に接近して

いるため透達性が高く、間ゲキに入れた水分子は、入口付近で抱束され凝化

する。したがって単分子形成する蒸気圧下では、十分に全間ゲキの内壁に

吸着できなかったため、比表面積が小さく測定され、凝化した抱束水の量だけ

実際より厚く測定されと考えられる。このことは、透水係数が最小となる

原因に、動きにくい水の層厚が厚いことを裏づけるものである。さらに、湿潤側になると、比表面積は最大値よ

りわずかに低い値まで回復した後、順次減少してゆく。そして間ゲキ径の分布は、粗大の間ゲキが増加し、超ミ

クロな間ゲキが減少する傾向を示している。ここで興味あるのは、乾燥密度が下がっても、0.1μmから10μmの

中程度の間ゲキが再び現われてこは、とである。この土の場合、締固め過程における土の構造は、単純に間ゲ

キが減少し、再び増加するのではなく、乾燥側の粉体状態から、湿潤側のアグリゲート構造をもつ土へと極端

に変化するものであることが明らかにされた。

5. 参考文献

1) 西田・佐々木・青山 (1974), 厚化土の工法と物理特性と体積変化について, 第2回国土学会年次学術講演会要集, P319~P324.

2) アーサー・ラリオン・松尾新一郎 (1973) 土の構造, 山海堂, P242~P243

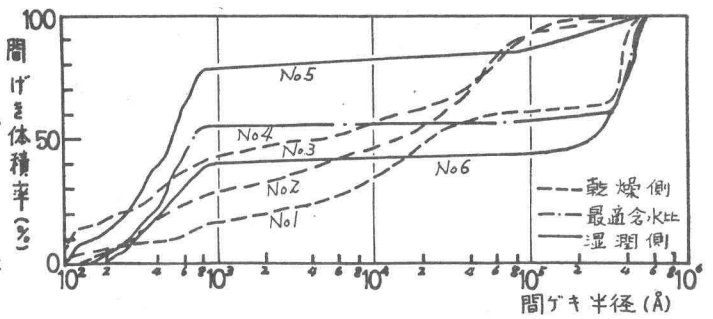


図-4 間ゲキ半径加積曲線

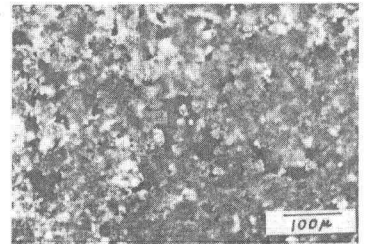


写真-1 乾燥側 (No. 1)

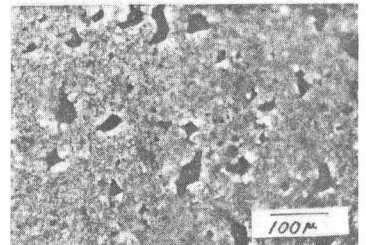


写真-2 最適含水比 (No. 2)

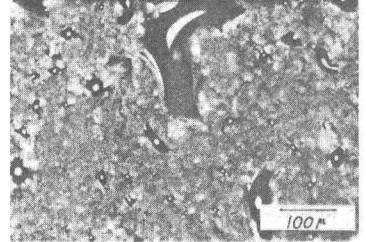


写真-3 湿潤側 (No. 3)