

締固め土の透水係数への背圧と圧密圧力の影響 (II)

鳥 山 暁 司*

The Influence of Back Pressure and Consolidation Stress on the
Coefficient of permeability of Compacted Soils (II)

Koushi Toriyama

Synopsis

The influence of back pressure and consolidation stress on the coefficient of permeability of compacted soils are investigated with laboratory works using compacted decomposed granite soil and the mixture of decomposed granite soil and clayey soil. Moreover, it is compared with which method is better for the saturation of soils, the vacuum adsorption for three hours and the percolation of water for seven days. From these experiments, the following results are obtained.

- (1) The vacuum adsorption is better method for the saturation of soils than the percolation of water.
- (2) The application of back pressure $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ is very effective method for saturation of soils. In this case, initial method of saturation is scarcely significant for the coefficient of permeability.
- (3) The decrement of permeability of soils wet side of w_{opt} by consolidation is greater than that of soils dry side of w_{opt} .
- (4) The properties of permeability of mixed soil is not similar to that of sandy soil or clayey soil.

1. ま え が き

締固め土の透水試験は主としてフィルダム遮水材料について行われる。フィルダム遮水ゾーンは遮水機能が最も重要である。従来の透水試験はモールドで締固めた状態で透水試験器にセットし、透水試験を行うものが多い。透水係数は締固め含水比によって、2~4オーダーの変動があるためか、透水係数の実験条件による変化はほとんど検討されていない。室内実験では透水係数の変動幅は大きい、実際のフィルダム遮水ゾーンの透水係数が2倍あるいは3倍となれば、漏水量の顕著な増加をもたらす、フィルダム管理上、大きな問題になる。遮水材料を締固めた後の遮水ゾーンの大きな変化は盛土荷重の増加と、貯水池湛水後の遮水ゾーン内の間隙圧の増加であ

る。これらについては三軸セルを用いての透水試験結果を別に報告した⁽¹⁾。その結果より、貯水位上昇を三軸供試体背圧 u_b の増加で近似し、圧密圧力 σ_{3c}' が一定の場合、 u_b の増加とともに k は2~20倍の増加を生じる。 k の増加の大きな供試体は締固め含水比が最適含水比 w_{opt} の湿潤側で間隙空気が孤立気泡として存在する場合で、この孤立気泡の排除がなされないためと考えられた。さらに、 σ_{3c}' を1.0から6.0 kgf/cm² に増圧すると、 k は1/3から1/5に減少することを示した。

透水試験は前述のようにモールドに締固めた試料土をそのまま透水試験に用いる。このため、圧密圧力を作用することも、背圧を加えることも一般にはできない。圧密圧力を加えないことは k が大きめとなり、背圧を加えないことは k を小さめに与えることになる。これがどの程度 k に影響するかは全く実験による検討が行われ

* 農村工学講座

ていない。ここでは標準締固めモードでの標準的な透水試験と、三軸供試体での透水試験を行い、両者の比較を行う。さらに透水試験の規準では真空ポンプで供試体を脱気後、透水試験を行うとしているが、真空の代りに供試体に7日間の通水を行って脱気した場合の両者の飽和度を高める効果についての比較を行う。

2. 試料土と実験方法

試料土は前報(1)に用いたまさ土(M100)およびまさ土に藤の森粘土を8:2で混合した土(M80)である。まさ土のみでは透水係数が大きすぎるため、 $k = 1 \times 10^{-5}$ cm/secを確保する目的で、まさ土に藤の森粘土を混合した。さらに透水係数を小さくするため、まさ土と藤の森粘土の5:5の混合土(M50)も用いた。試料土の物理的性質を表-1に示す。また締固め曲線を図-1に示す。図中にはM100とM80の $S_r = 100\%$ での $\rho_d \sim w$ 関係も示す。

供試体よりの脱気方法として真空を作用させる場合と7日間の通水を行う場合の実験は標準モードを用いて行った。標準モード壁面にグリースを十分に塗った後、標準締固め第1法で突固めて供試体を作製した。モードを透水試験器にセットした後、3時間、真空ポンプで吸引した。土質試験法では気泡がほとんど出なくなるまでとしているが、実験条件をそろえるため3時間とした。真空吸引後、脱気水を底部より給水し、上部より吸引して供試体に通水した。以後、これを真空とよぶ。7日間通水方法では、モードを透水試験器にセット後、水頭差約100cm(動水こう配 $\div 8$)で7日間、底部より給水、上部より排水、排気して飽和度を高めた。この後、前報(1)と同じ背圧負荷装置を用いて、変水頭透水試験により透水係数 k への背圧 u_b の影響を実験した。実験ではまず $u_b = 0$ で k を測定し、以後、 $u_b = 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 4.0, 2.0, 1.0$ と背圧を変えて k を測定し、最後に $u_b = 0$ として k を測定した。

三軸セルでの透水試験方法は前報(1)に示したとおりである。実験はM80試料土について、背圧 u_b を0から6.0 kgf/cm² まで変えた場合と、圧密圧力 σ_{vc}' を1.0から6.0 kgf/cm² に変えた場合を行った。M50試料土についても比較のために実験を行った。M100試料土の三軸セルでの透水試験については前報(1)でのまさ土の実験結果として示しているののでここでは示さない。

3. 標準モードでの透水試験結果

標準モードでは脱気方法による透水係数 k と背圧 u_b 作用の影響を実験した。図-2は締固め含水比 w が

ほぼ等しい供試体に真空と通水を行った後、背圧を作用させた場合の $k \sim u$ 関係を示す。透水係数は供試体によるばらつきがあるため、図-2のように一致しない。初期の $u_b = 0$ での透水係数を k_0 、 $u_b = 1.0$ kgf/cm² に増圧した場合の透水係数を k_1 とすると、M100では真空での $k_1/k_0 = 1.02 \sim 1.25$ 、通水では $w = 19.7\%$ を除くと $k_1/k_0 = 1.10 \sim 1.57$ で通水供試体の方が背圧の作用による透水係数の増加が大きい。通水の $w = 19.7\%$ では、 $k_1/k_0 = 3.2$ である。このことから、真空を3時間作用させた方が飽和度を高めるためにやや有効といえる。特に $w = 19.8\%$ の真空では $k_1/k_0 = 1.15$ で通水供試体に比べて締固め含水比の高い供試体では、真空の有効性が大きい。次に、M80では、真空で $k_1/k_0 = 1.05 \sim 1.77$ 、通水では1.44 \sim 5.26で通水供試体の方が背圧の作用による k の増加が大きい。細粒分の増加により、間隙中の孤立気泡の排出は困難となるが、今回の実験に用いた試料土では真空の作用は有効である。ただし、土質試験法の規定のように、気泡がほとんど出なくなる程

表-1：試料土の物理的性質

試料土名	M100	M80	M50
砂分(%)	82.1	67.5	45.6
シルト分(%)	8.9	20.5	37.9
粘土分(%)	9.0	12.0	16.5
G_s	2.665	2.667	2.674
w_{opt} (%)	15.4	16.0	18.0
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.815	1.805	1.751

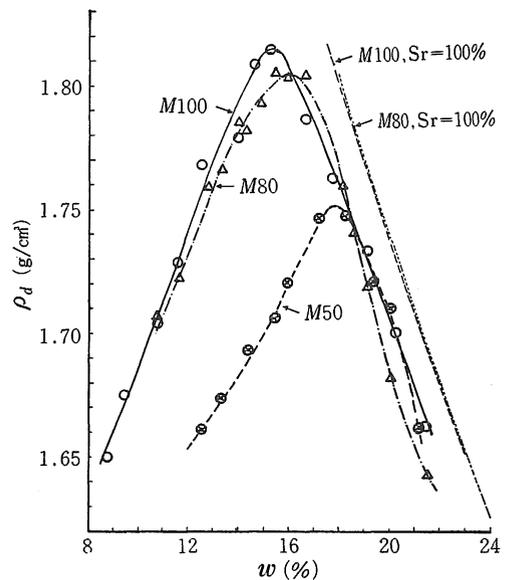


図-1：試料土の締固め特性

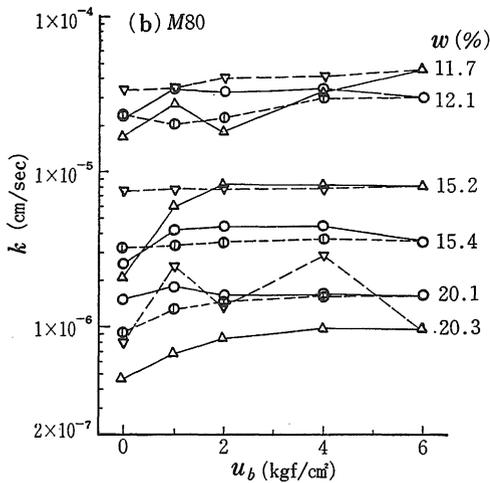
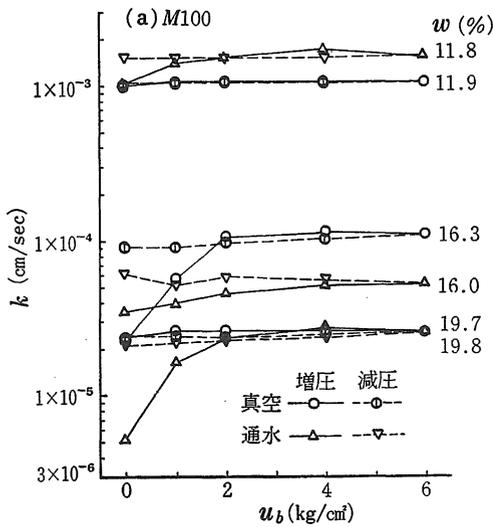


図-2：標準モールドでの透水係数への背圧の影響

度では不十分である。

背圧 u_b の増圧過程と減圧過程の透水係数の大小は図-2のように供試体によって異なるが、 $u_b \geq 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ では差は小さい。しかし、 $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ と $u_b = 0$ では初期に比べて減圧時の k の方が大きく、 $u_b = 0$ では減圧後の透水係数 k_0' と初期の k_0 の比、 k_0'/k_0 は M100 で 1.05~4.07, M80 では 1.38~4.19 となっている。これは透水試験中に間隙中の孤立気泡が徐々に間隙水に溶解し、排除されて飽和度が高まったためと考えられる。実験前の締め含水比は M100 で 7.8~19.8% であったものが、透水試験後、17.0~22.4% となり、 w_{opt} の乾燥側では含水比が 20% に増加しているのに対して、 w_{opt}

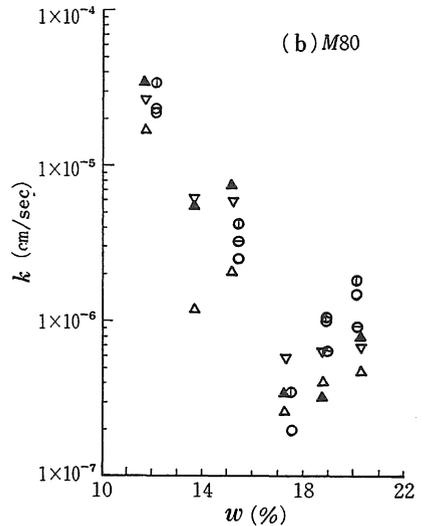
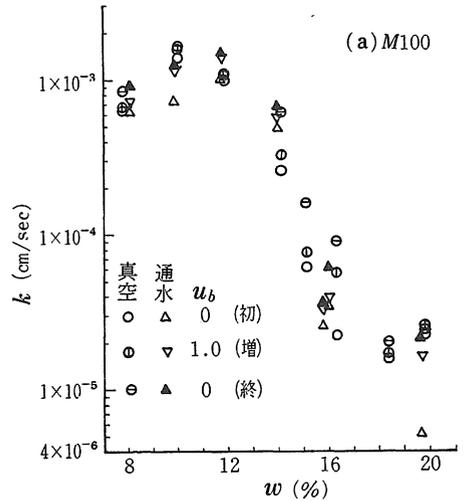


図-3：標準モールドでの透水係数への締め含水比の影響

の湿潤側では含水比はほとんど変化していない。同様に M80 でも、透水試験後の含水比は締め含水比に無関係に 17~21% となり、 w_{opt} の乾燥側で含水比が大きく増加している。

締め含水比 w と透水係数 k の関係を図-3, 4 に示す。図-3 は標準モールドで初期の $u_b = 0$ と $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に増圧した場合および最後の $u_b = 0$ に減圧した場合の $k-w$ 関係である。M100 では $w = 8 \sim 20\%$ で $k = 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ であり、M80 では $w = 12 \sim 20\%$ で $k = 3 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ である。わずかの粘土を加えることによって、まぎ土の透水係数

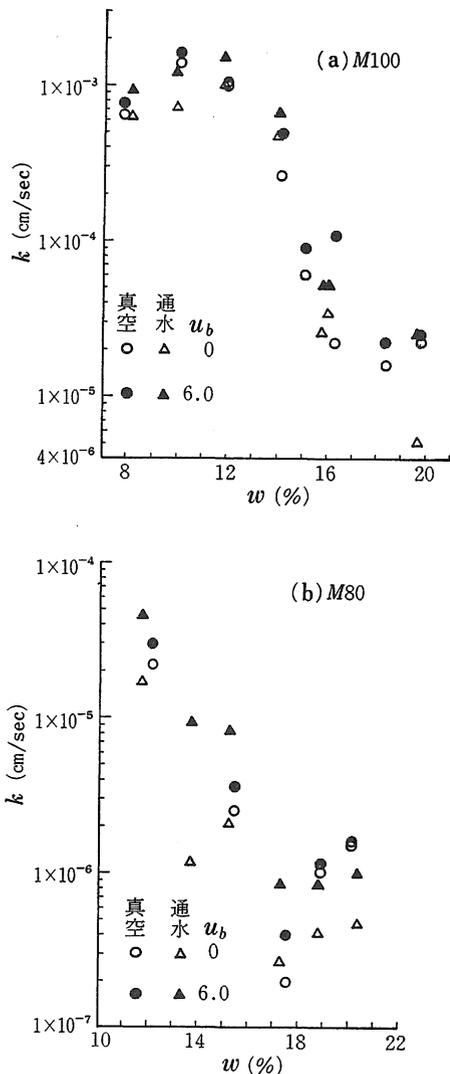


図-4：透水係数と含水比の関係への背圧の影響

は2オーダー減少している。図-4は初期の $u_b = 0$ と $u_b = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ とした場合の $k \sim w$ 関係である。図-3との比較から $u_b = 1.0$ と 6.0 kgf/cm^2 での k にはほとんど差がない。このことから、透水係数の測定には背圧 $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を加えればよいことがわかる。

4. 三軸供試体での透水試験結果

まさ土M100の三軸供試体での透水試験は前報(1)で示した。そこでは $w = 10 \sim 23\%$, $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ で $k = 2 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ であり、 $u_b = 1.0$ および 6.0 kgf/cm^2 で $k = 5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ で、 σ_{3c}'

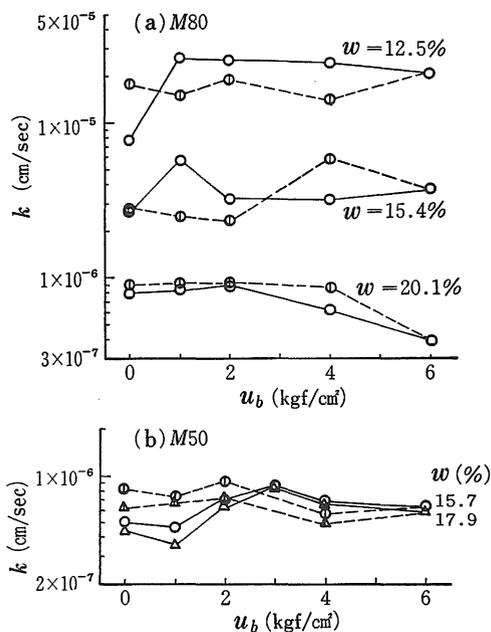


図-5：三軸供試体での透水係数と背圧の関係 ($\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

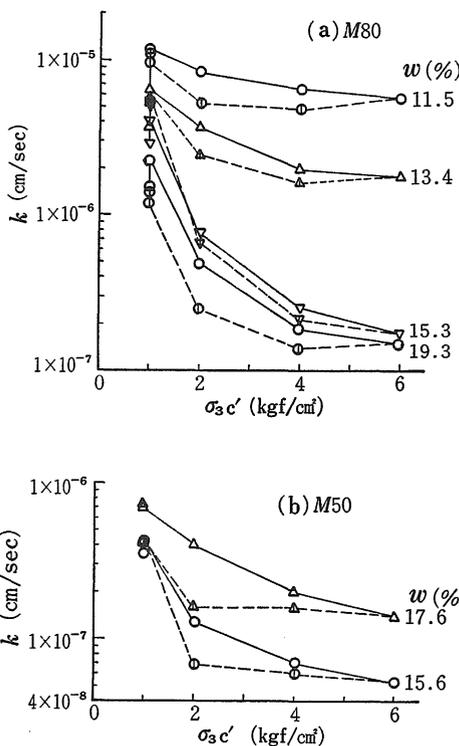


図-6：三軸供試体での透水係数の関係 ($u_b = 0$ or 1.0 kgf/cm^2)

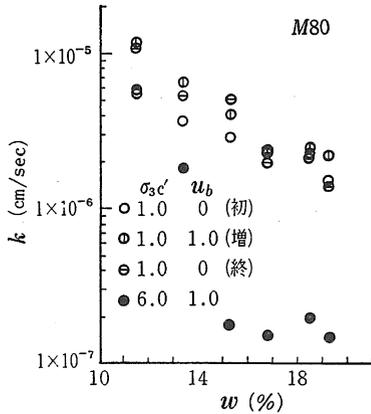


図-7：三軸供試体の透水係数と締め固め含水比への圧密圧力の影響

を1.0から6.0 kgf/cm²に増圧することによって、 k は1/3~1/5になった。

試料土M80とM50の圧密圧力 $\sigma_{3c}' = \sigma_{3c} - u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での背圧 u_b と透水係数の関係を図-5に示す。図中の実線は増圧、点線は減圧過程を示す。M80とM50では u_b による k の大きな変化は認められず、M80では初期の $u_b = 0$ での k_0 に対して、それ以後の $u_b = 1.0 \sim 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ での k は3.3~1/2倍である。またM50では0.8~1.9倍である。M50では他試料と異なり、 $u_b = 0$ から 1.0 kgf/cm^2 に増圧した場合に、 k がやや減少している。このM50の $k \sim u_b$ 関係は藤の森粘土の⁽¹⁾関係に類似しており、 $u_b = 0$ から 1.0 kgf/cm^2 への増圧時の k の減少の原因としては、 u_b を増加するとともに周圧 σ_{3c} も増加するが、この場合に、 u_b の供試体内への伝達が遅れ、内部でやや圧密が生じた可能性が考えられる。

圧密圧力 $\sigma_{3c}' = \sigma_{3c} - u_b$ と透水係数の関係を図-6に、透水係数と締め固め含水比の関係を図-7に示す。M80では $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ のもとで、 $\sigma_{3c}' = 1.0$ と 6.0 kgf/cm^2 での透水係数の比 k_1/k_6 は w_{opt} の乾燥側では2~4であるが、 w_{opt} の湿潤側では $k_1/k_6 = 15 \sim 23$ であり、圧密による透水係数の減少は w_{opt} の乾燥側と湿潤側で大きく異なっている。M50は $w = w_{opt}$ と乾燥側のみで行ったが、 $k_1/k_6 = 5 \sim 7$ であり、M80より圧密による透水係数の減少割合が大きい。しかるに藤の森粘土では $k_1/k_6 = 3 \sim 5$ である。これらの結果から、砂質土に適度に粘土を混合した場合に、圧密による透水係数の減少が最も有効に行える混合率が存在する可能性がある。しかし、図-6(a)、図-7より明らかなように、 σ_{3c}' を6.0から1.0 kgf/cm²に減圧すると、M80の透水係数は初期値に近い値に回復している。これはM80の

w_{opt} の湿潤側供試体の含水比が実験前後でほとんど変化しておらず、除荷とともに吸水・膨張が生じているものと考えられる。

標準モールドでの透水係数 k_P と三軸供試体の透水係数 k_T を比較すると、M100では $k_P = 1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ であるが、 $k_T = 5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ で、 $k_P/k_T \approx 2$ である。M80では、 w_{opt} の乾燥側では $k_P \geq k_T$ であるが、 w_{opt} の湿潤側では $k_P < k_T$ となり、 $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ で圧密を行ったにもかかわらず、三軸供試体の k_T の方が大きい。しかし、 $\sigma_{3c}' = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ での k_T は k_P より小さい。標準モールドでは、供試体上下にポーラス・ストーンがあり、これを上下から固定しているため、透水試験中の体積膨張は生じえない。これに対して、三軸セルでは供試体は自由に体積変化を生じうる。まさ土と藤の森粘土は標準的な砂質土と粘性土であるが、これを混合した場合、透水性に対して特異な性質をもった可能性がある。混合土はフィルダム遮水材料としてよく用いられており、今後、混合土の透水係数についてさらに検討を加える必要がある。

5. あとがき

まさ土およびまさ土と藤の森粘土の混合土を用いて透水試験を行い、次の結果を得た。

(1) 標準モールドを用いての透水試験において、3時間の真空を作用させた場合、7日間の通水よりも飽和度を高めるのに有効である。

(2) 透水試験において、背圧 u_b を 1.0 kgf/cm^2 加えることは飽和度を高めるのに非常に有効である。 u_b をこれ以上大きくしても効果は小さい。 $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を加えれば、初期の飽和度を高める方法はいずれでもよい。

(3) 最適含水比 w_{opt} の湿潤側の方が圧密によって透水係数の減少割合が大きい。まさ土では圧密圧力 $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を加えると、 k は1/2程度になる。これに対して、 w_{opt} の湿潤側混合土M80では、 $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での圧密の効果が認められない。

(4) 混合土M80では、 $\sigma_{3c}' = 1.0$ から 6.0 kgf/cm^2 への圧密で k は1/15~1/23に減少しているが、除荷とともに初期の透水係数に回復し、過圧密の効果が認められない。砂質土に少量の粘性土を混合した場合、従来とは異った透水特性をもつことも考えられ、今後の課題である。

透水係数はわずかの条件の相違によって大きく変動し、また時間的にも変化する。このため、フィルダムの応力-変形解析法は非常に進歩し、材料の力学特性の実

験も多く行われているが、透水特性についての実験的研究は非常に少ない。遮水ゾーンは設計透水係数を確保することが最も重要である。いかなる条件の場合、いかなる状態になるかを実験的に解明することが、漏水量の測定記録を検討する際に必要となる。さらに遮水ゾーン材料として混合土を用いることが多い近年の状況では、混合土の透水性についての検討も重要である。これらについては今後、実験を行う予定である。

なお、本実験を行うに際しては、昭和59年度農業施設工学研究室専攻生の福島真二、今岡幸男、多久和泰正、嘉本史紀の諸君に多大の協力を得ました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 鳥山昶司：農士論集，113，51～56，1984.