

締固めた凝灰岩の透水性

鳥 山 暁 司*

Permeability of Compacted Tuff

Koushi TORIYAMA

Synopsis The permeability tests were performed on compacted tuff using triaxial cells and the effects of consolidation pressure σ'_{sc} and back pressure u_b for coefficient of permeability k were experimented.

From these tests, the following results are obtained that k of 47% specimen is decreased with increment of σ'_{sc} , but k of 34% specimen is increased with increment of σ'_{sc} and k of 19% specimen is decreased with increment of u_b from 0 to 1.0kgf/cm² on condition of $\sigma'_{sc} = 1.0\text{kgf/cm}^2$. Moreover, the relation between k and compacted moisture content or void ratio is different from that of normal sand or cohesive soil. It is considered that these results are come from the migration of soil particles in soil.

1. ま え が き

締固め土の透水試験はフィルダム遮水材料を中心にしておこなわれてきた。この結果、最適含水比 w_{opt} の湿潤側の k は w_{opt} の乾燥側の k の 10^{-2} 程度の小さな値となる⁽²⁾。このため、遮水ゾーンの締固めは w_{opt} のやや湿潤側で施工されてきた。室内透水試験ではモールドに試料土を締固め、これに定水頭あるいは変水頭透水試験が行われる。この方法では圧密圧力や間隙圧、すなわち、背圧 u_b の透水係数への影響を実験することはできない。そこで、三軸セルに供試体をセットし、圧密圧力 σ'_{sc} や背圧 u_b を変えて、締固め土の透水係数の変化を求めた⁽³⁾。この結果、 $u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ を加えると、大部分の供試体では k が 2~3 倍に増加し、場合によっては k が 10 倍以上に増加する。圧密圧力 σ'_{sc} を 1.0 から 5.0kgf/cm² に増加した場合、 k は 1/2~1/3 に減少する供試体が多かった。

我が国では火山が多く、火山周辺にフィルダムを築堤する場合、凝灰岩の類を遮水材料の混合用粗粒材や半透水材料として使用する例がある。中国四国農政局管内の

Nダムも大山よりの角礫凝灰岩を上記の目的で使用している。遮水材料としては角礫凝灰岩と粘性土を 8 : 2 に混合し、半透水ゾーンには角礫凝灰岩のみを使用している。角礫凝灰岩と粘性土の混合土の透水性については別報^{(4),(5)}に示した。角礫凝灰岩のみでも細粒分をかなり含み、透水係数が $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 前後と推定された。そこで、半透水材料とされる角礫凝灰岩の透水性を三軸セルで $\sigma'_{sc} = 1.0 \sim 5.0\text{kgf/cm}^2$ に変え、 $u_b = 0$ と 1.0kgf/cm^2 とした場合については実験したところ、特異な傾向を示した。これより角礫凝灰岩のみでは細粒分を十分に含んでいても、遮水材料としては不適當であること、浸透流に対して土の構造がある種の不安定性を示すと考えられることを報告する。

2. 試料土及び実験方法

透水試験に用いた試料土は上述の角礫凝灰岩である。掘削により完全に分解して礫混り砂質土となっている。実験には自然含水比のままの試料土の 5mm ふるい通過分を用いた。これは透水試験を三軸セルで行い、供試体直径 5.0cm、高さ 12.5cm のためである。実験に用いた試料土の物理的性質は表-1 に示す。

* 農村工学講座

表-1: 試料土の物理的性質

液性限界	NP
塑性限界	NP
礫分	14%
砂分	66%
シルト分	12%
粘土分	8%
W_{opt}	17.0%
ρ_{dmax}	1.739g/cm ³

試料土の自然含水比は14~15%であった。したがって、これより低含水比とする場合は室内で徐々に乾燥させた後、また、高含水比とする場合は加水して十分に混合した後、1週間以上密閉して静置した後、実験に用いた。含水比は4種に調整した。この平均含水比を表-2に示す。この場合、含水比が約19%の試料土では混合水の一部が重力によって降下し、試料土の下部の含水比が高くなってしまった。

供試体は直径5.0cm、高さ12.5cmのモールドに試料土を入れ、この上に直径4.6cm、長さ20cmの木の棒をのせ、これを標準突固め用ランマーで打撃することによって締固めた。締固めは3層7回、4層15回、5層30回、5層50回とした。この方法による締固め含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係を図-1に示す。図中には標準締固め試験法での3層25回(E_c)と3層50回($2E_c$)の w ~ ρ_d 曲線を実線と点線で示した。この図より、3層7回はゆるい締固め4層15回はほぼ標準締固めに、5層30回と5層50回は密な締固めになる。5層30回と5層50回では $w > 16\%$ において、 ρ_d が締固め試験に比べて大きくなっている。これは高含水比においては締固め中にモールドから水がにじみ出しており、締固めにより飽和度が100%近くになったためである。

締固めた供試体を三軸セルにセットし、直ちに拘束圧 $\sigma_3 = 1.0\text{kgf/cm}^2$ で圧密を行い、動水勾配7~8で約1日間透水した後、変水頭透水試験を行った。本実験では流入量と流出量を別々に測定するため、水もれ等に対しては十分なチェックができた。

透水試験はまず $\sigma_3 = 1.0\text{kgf/cm}^2$ 、背圧 $u_b = 0$ の条件で行う。この後、 $\sigma'_{3c} = \sigma_3 - u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に保って $\sigma_3 = 2.0$ 、 $u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に増圧し、約12時間置いた後、透水試験を行う。次いで、 $u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に保ったまま、 $\sigma_3 = 4.0$ 、 6.0kgf/cm^2 に増圧し、それぞれ12時間以上圧密を行った後、透水試験を行った。次いで $u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ のまま $\sigma_3 = 4.0$ 、 2.0kgf/cm^2 に減圧し、透水試験を行った。最後に $\sigma_3 = 1.0\text{kgf/cm}^2$ 、 $u_b = 0$ にして透水試験を行い、実験を終了した。1供試体の実験には約2週間を要した。

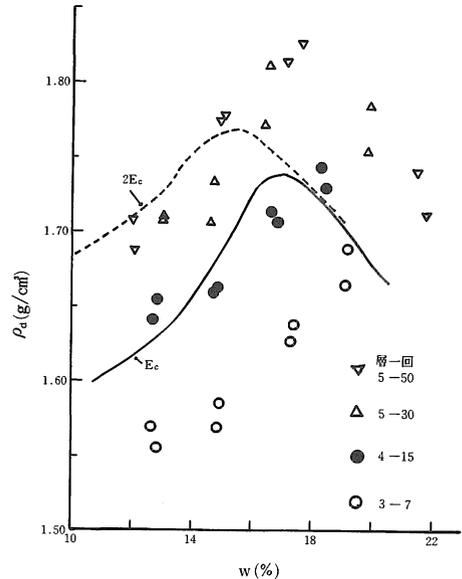


図-1: 締固め曲線と供試体の含水比-乾燥密度の関係

表-2: 試料土の平均含水比

TKA	14.86%
TKB	12.68%
TKC	16.99%
TKD	19.49%

3. 透水試験の結果

三軸セルによる透水試験の利点は圧密圧力や背圧を調整できることである。このうち $\sigma'_{3c} = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に保って u_b を1.0から5.0kgf/cm²に変化させても透水係数 k への影響は小さい。このため、今回は $u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に保って σ'_{3c} を1.0から5.0kgf/cm²に増減した場合の k の変化のみを実験した。

今まで行った透水試験では $\sigma'_{3c} = 1.0\text{kgf/cm}^2$ で $u_b = 0$ から1.0kgf/cm²にすると、 k は2~10倍程度に増加する。次いで $u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に保って $\sigma'_{3c} = 1.0$ から5.0kgf/cm²に増圧すると k は減少する。さらに $\sigma'_{3c} = 5.0$ から1.0kgf/cm²まで減圧すると k はやや増加したり、わずかに減少する傾向を示した。今回の締固めた凝灰岩でも図-2に示すように標準的な k と σ'_{3c} の関係を示す供試体が32本中15本あった。透水係数 k の大きさは締固め含水比 w と締固め回数によって異なるが、 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ の範囲にある。

今回の透水試験での最も特異な k と σ'_{3c} の関係を図-3に示す。この傾向が32本中11本の供試体で生じた。これらの供試体では $\sigma'_{3c} = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に保って u_b から0から1.0kgf/cm²に増加すると、 k が増加するのは従来と同じ傾向である。しかし、その後、 $u_b = 1.0\text{kgf/cm}^2$ に保って σ'_{3c} を

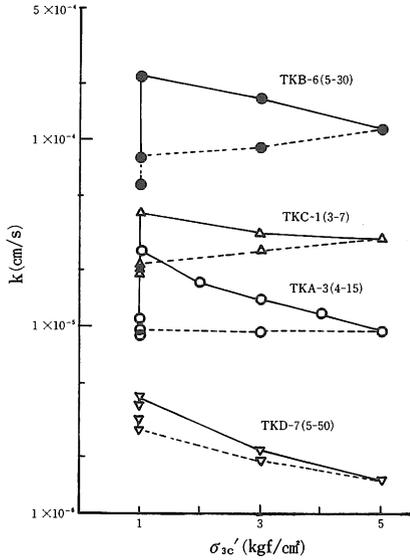


図-2：標準的な透水係数と圧密圧力の関係

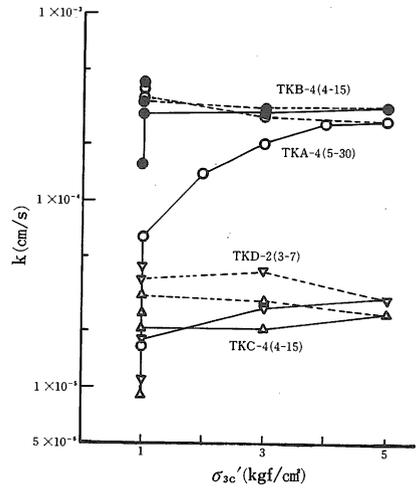


図-3：圧密圧力の増加時に透水係数の増加した例

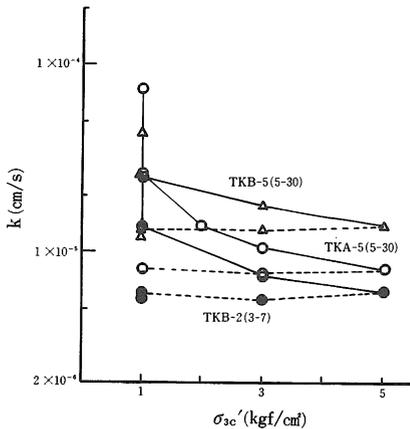


図-4： $\sigma'_{sc}=1.0\text{kgf/cm}^2$ で背圧 u_b を0から 1.0kgf/cm^2 へ増加時に透水係数の減少した例

1.0~5.0kgf/cm²に増加した場合、kは図のように増加している。 $u_b=1.0\text{kgf/cm}^2$ で σ'_{sc} を1.0から5.0kgf/cm²に増加した場合、透水係数は1.0~5.0倍となっている。すなわち、図-3の供試体では圧密による間隙比の減少にもかかわらず、透水係数が増加する特異な傾向を示している。

圧密圧力 $\sigma'_{sc}=1.0\text{kgf/cm}^2$ に保って u_b を0から 1.0kgf/cm^2 に増加すると、一般には透水係数は増加する。しかし図-4に示すように、この逆の傾向を示す供試体が32本中6本で生じた。これらは u_b を0~ 1.0kgf/cm^2 に増加すると、kは0.77~0.35倍に減少している。透水係数の小さな粘性土は u_b を0~ 1.0kgf/cm^2 に増加する場合、 σ'_{sc} と u_b の

増加速度が大きすぎると、内部の間隙圧の増加が遅れるため、一部、圧縮が生じて透水係数が減少する場合があったが、今回の場合、 $k=1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ であるから、上述の原因は考えられない。これは図-3の逆の現象が生じていると考えられる。

締固め含水比 w と透水係数 k の関係を各締固め回数ごとに初期の $\sigma'_{sc}=1.0$ 、 $u_b=0$ 、 $\sigma'_{sc}=2.0$ 、 $u_b=1.0$ および $\sigma'_{sc}=6.0$ 、 $u_b=1.0\text{kgf/cm}^2$ の場合を図-5(a)~(d)に示す。一般の締固め土では w の増加とともに k が減少するが、締固めが3層7回の供試体では $\sigma'_{sc}=1.0$ 、 $u_b=0$ と $\sigma'_{sc}=2.0$ 、 $u_b=1.0\text{kgf/cm}^2$ の k は w にほぼ無関係に $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ の範囲にあり、 $\sigma'_{sc}=6.0$ 、 $u_b=1.0\text{kgf/cm}^2$ の k は w の増加とともに大きくなっている。図-1の $w \sim \rho_d$ 関係より、3層7回では w の増加とともに ρ_d が大きくなり、 e が小さくなっている。したがって、 k は e の減少にもかかわらず、おおきくなっている。これは $w=17 \sim 19\%$ の供試体では図-3のように、 σ'_{sc} の増加にもかかわらず k が増加しているためである。締固めを4層15回とすると、図-5(b)のように低含水比での k がやや小さくなっている。5層30回では低含水比の k が $1 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ の範囲にばらつき、全体としては w の増加とともに k が減少する傾向となっている。5層50回では $w=12 \sim 16\%$ での $k=1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ と $w=17 \sim 22\%$ の $k=1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ に大きく分れ、全体としては k は w の増加とともに減少している。5層30回と5層50回の供試体では、図-1より $w=17\%$ で最大乾燥密度が生じており、最適含水比の乾燥側の k が湿潤側の k より大きい一般の傾向に合っている。これらの場合も、図より $\sigma'_{sc}=1.0$ の k より

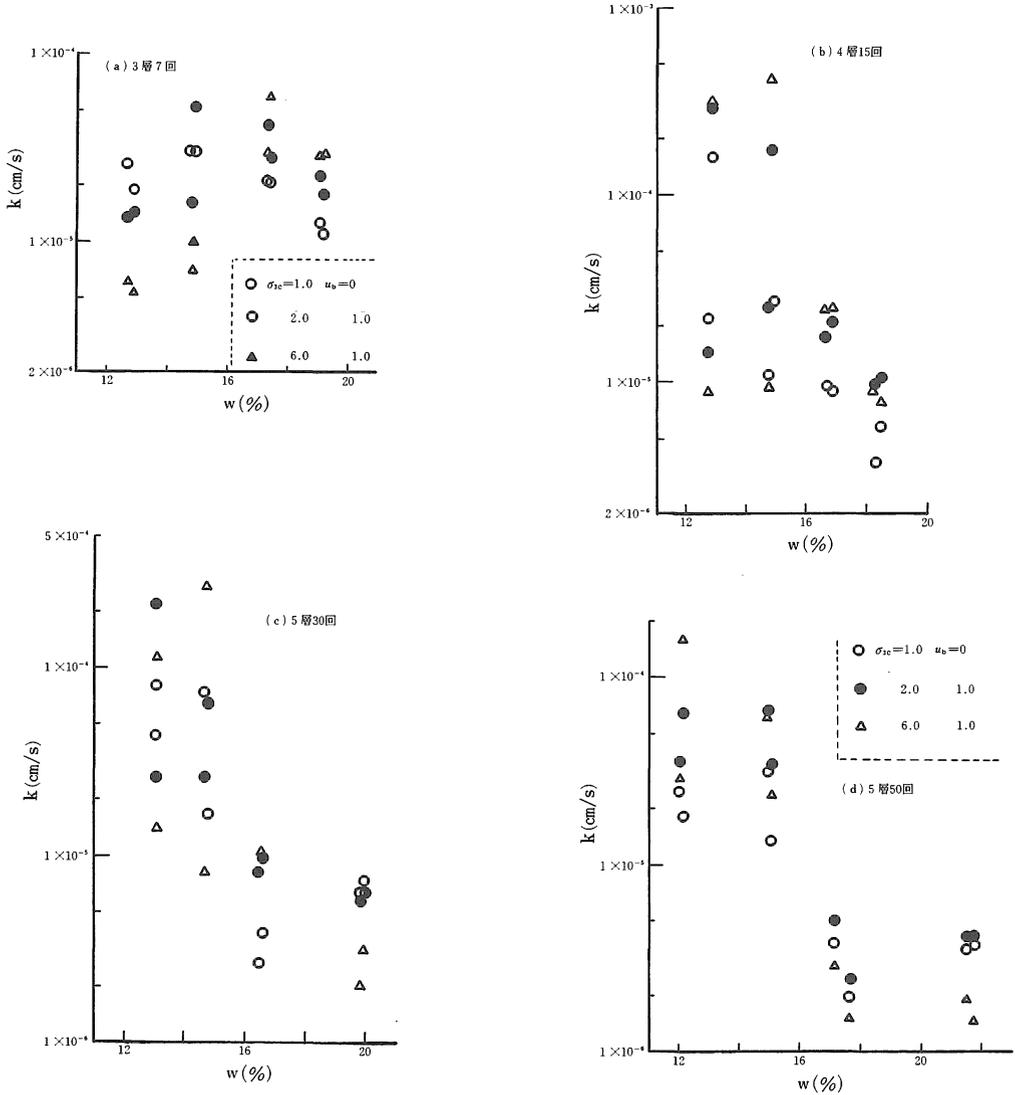


図-5：締固め含水比と透水係数の関係

$\sigma'_{3c}=5.0 \text{ kgf/cm}^2$ の k の方が大きい供試体が存在している。

間隙比 e と透水係数 k の関係を各 σ'_{3c} と u_b について図-6 (a)~(d) に示す。これらの図で白ぬきの印は σ'_{3c} を 1.0 から 6.0 kgf/cm^2 への増圧過程での k を、黒ぬりの印は σ'_{3c} を 6.0 から 1.0 kgf/cm^2 までの減圧過程の k を示す。砂質土では間隙比の増加とともに k が増加するのが一般的であるが、試料土の凝灰岩は細粒分が 20% 存在すること、 σ'_{3c} が増大するにもかかわらず k も大きくなる供試体が存在するなど、一般の砂質土と性質が異なるため、 $k \sim e$ 関係にはっきりした傾向が認められない。

4. 考 察

締固めた凝灰岩を三軸セルで圧密圧力を変えて透水試験を行い、透水係数を求めた。この結果、特異な現象は σ'_{3c} が増加した場合、 k も増加する供試体が 32 本中 11 本で生じたこと、 $\sigma'_{3c}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に保って u_b を 0 から 1.0 kgf/cm^2 に増加したとき、 k が減少する供試体が 6 本生じたことである。これら特異な減少を生じた供試体は 32 本中 17 本となり、全体の 50% 以上となるから、実験の間違いとは考えられない。

締固めた粘性土で $\sigma'_{3c}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に保って、 u_b を 0 から 1.0 kgf/cm^2 に増加する場合、 k が減少する供試体があっ

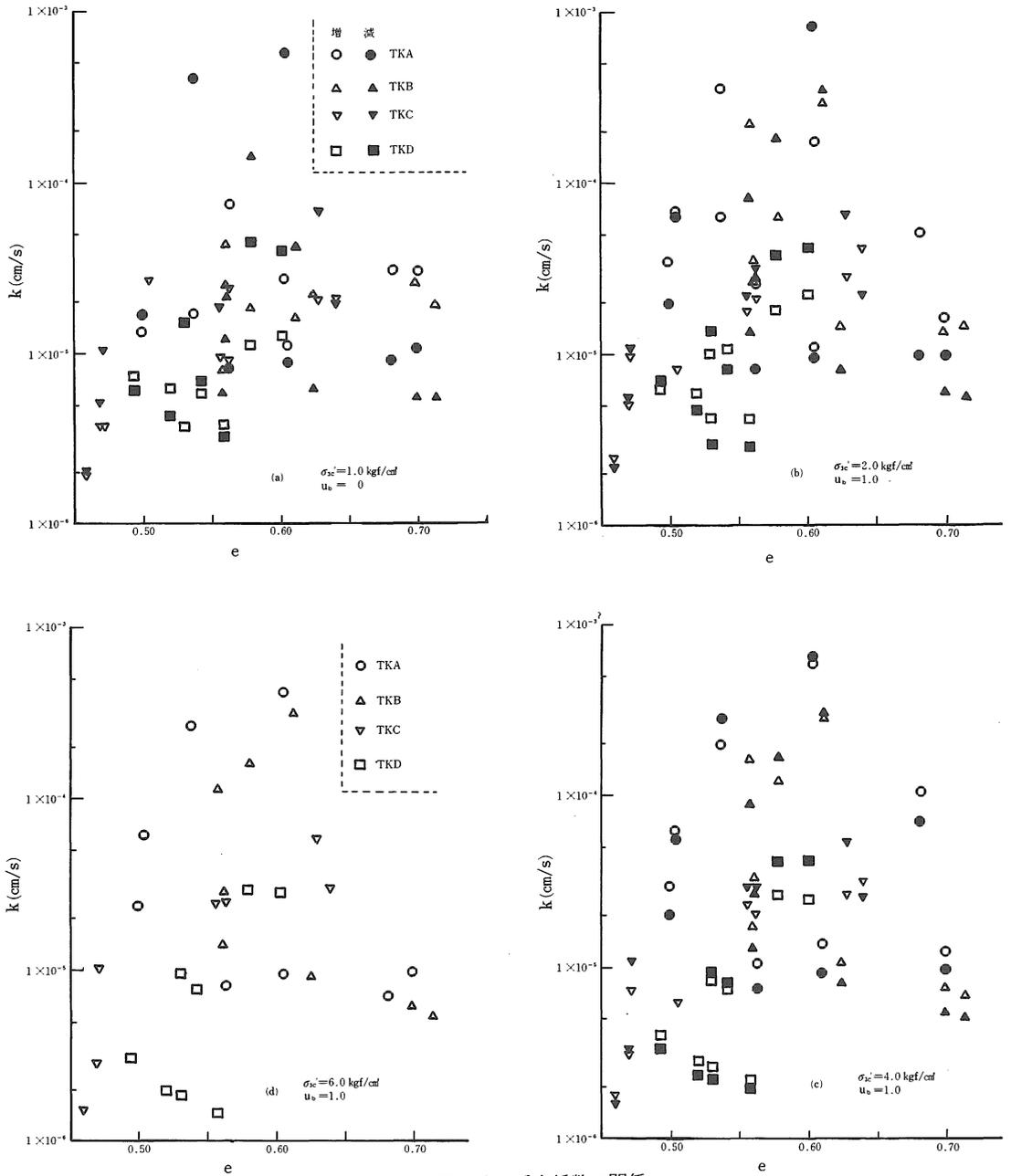


図-6：間隙比と透水係数の関係

た。これは前述のとおり、外から加える σ'_{3c} と u_b の差を1.0kgf/cm²に保っても、 σ'_{3c} と u_b を急速に増加すると、外からの背圧が供試体内に十分に伝達しない。したがって、供試体内は非排水(非吸水)状態で σ'_{3c} が増加したのと同様になり、不飽和土では有効応力が増加し、間隙比が減少し、透水係数が低下したものと考えられる。本実験に

用いた締固めた凝灰岩では $k = 1 \times 10^{-5}$ cm/sと締固めた粘性土より10~100倍の大きな透水係数である。また実験では内部圧密を避けるため、 σ_{3c} を1.0kgf/cm²に保って u_b を0.7~0.8kgf/cm²に増加し、30分ほどおいた後、 σ'_{3c} を1.2~1.5kgf/cm²に増加し、 $u_b = 1.0$ kgf/cm²にする。その後30分ほどして $\sigma_{3c} = 2.0$ kgf/cm²としている。したがって、この間に

供試体内部で圧密が生じたとは考えられない。したがって、 σ'_{3c} の増加時の k の増加と u_b を0から1.0kgf/cm²に増加したときの k の減少は同じ現象が逆方向に生じたと考えた方がよい。

締固めた凝灰岩の透水試験での特徴は一部供試体で浸透水に濁りが生じたことである。これは軽い微細な粒子が流出してきたことによる。これは浸透流による土粒子の移動が生じている証拠と考えてよい。浸透水が濁らない場合でも、土粒子が流動している可能性は大きい。この際、浸透水の流路から土粒子が流動し、流路を拡張するように移動する場合と、流路の一部を移動した粒子が塞ぐ場合が考えられる。前者の場合は σ'_{3c} の増加した場合に k が増加した供試体に、後者は u_b が0から1.0kgf/cm²に増加した場合に k が減少した供試体に相当する。

図-2の標準的な $k \sim \sigma'_{3c}$ 関係を示した供試体でも、 $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に保って、 σ'_{3c} を1.0~5.0kgf/cm²に増加した場合の透水係数の減少は0.14~0.97と k が大きく減少する供試体から、ほとんど減少しない供試体まで存在しており、さらに $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ にして、 σ'_{3c} を1.0から6.0kgf/cm²への増圧過程と σ'_{3c} が6.0から1.0kgf/cm²への減圧過程での k の比も0.11~1.4と減圧時の k の方が増圧時の k より大きい供試体も存在している。このことは標準的な $k \sim \sigma'_{3c}$ 関係を生じた供試体にも内部での土粒子の移動の可能性を示している。

このような土粒子の移動が顕著に生じた場合には、パイピングの発生の可能性が生じる。実験に用いた材料はフィルダムの半透水材料であり、半透水ゾーン内の浸透流はほとんど生じないと考えられるから、パイピングの危険性は考えられない。しかし、凝灰岩を一般の盛土材料として利用する場合もあり、このような場合には地山からの浸透水や降雨による浸透水によるパイピングの可能性についても検討の必要がある。これは今後に残された問題である。

5. あとがき

締固めた角礫凝灰岩の透水試験を行い、次の結果を得た。

- (1) 供試体の約47%は標準的な $k \sim \sigma'_{3c}$ の関係を示す。
- (2) 供試体の約34%は σ'_{3c} の増加にもかかわらず、 k が増加する。
- (3) 供試体の約19%は u_b を0から1.0kgf/cm²に増加しても k が減少する。
- (4) 締固め含水比 w と k の関係は一般的な w の増加による k の減少とはならない。
- (5) 間隙比 e と k の関係では、 e の増加による k の増加は必ずしも生じていない。

これらは透水試験中に土中での土粒子の移動が原因のように考えられる。これが一部供試体の浸透水の濁りとして現われた。これらの現象はパイピングや長期透水での透水係数の変化にも関係するはずである。これらは角礫凝灰岩を盛土材料として利用する場合の長期安定問題とも関係しており、今後の研究課題である。

なお、本実験を行うにあたっては平成2年度の島根大学農学部農業施設工学研究室専攻生の土居 修君、森尾昭彦君、山田吉輝君に多大のご協力を賜りました。記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) Lambe, T. W.: Proc. ASCE, Jour. Soil Mech. Found. Div., 84-2: paper 1655, 1958.
- (2) 宇梶文雄：フィルダム技術ノート 材料の基本と実際, 日刊工業新聞社, 88-100, 1979.
- (3) 鳥山昶司：農土論集, 113:51-56, 1984.
- (4) 鳥山昶司：農土論集, 147:45-52, 1990.
- (5) 鳥山昶司：島根大農研報, 24:191-198, 1990.