

締固めた凝灰岩の特異な透水性について

鳥 山 暁 司 *

On The Unique Properties of Permeability of Compacted Tuff Koushi TORIYAMA

Synopsis The permeability tests were performed on compacted tuff using triaxial cells and the unique properties of permeability were confirmed in succession with last year.

The coefficient of permeability k was decreased usually with increment of consolidation pressure σ_{3c}' . But k of some specimen was increased with increment of σ_{3c}' and k of some specimen was decreased with application of buck pressure u_b . Moreover, percolated water of some specimen became muddy. Piping test was performed using perforated plate at flowout side. From this test, the risk of piping is not observed in case that hydraulic gradient is equal or smaller than 10.

1. ま え が き

山陰地方には大山や三瓶山などの火山があり、このため各種の凝灰岩が火山周辺に分布している。これらの地域にダムや道路、その他の盛土工事を行う場合には凝灰岩系の材料も利用することになる。これらの締固めた凝灰岩の剪断特性については別報¹⁾に示したとおりである。また締固めた凝灰岩の透水性についても別報²⁾に示したとおりである。この結果、剪断特性については一般の砂質土と同様の傾向にあり、大きな特異性は認められなかった。しかし透水性については圧密圧力 σ_{3c}' が増加するにもかかわらず、透水係数 k が増加する供試体や、逆に σ_{3c}' を一定にして背圧 u_b を加えて飽和度を増加させても、 k が減少する供試体が多数存在した。さらに透水試験中に流出水に濁りが生じる供試体もあり、一般の砂質土とはその透水性が大きく異なる傾向を示した。この特異な傾向が昨年度の実験のみに何らかの原因で生じたのか、あるいは実験に用いた凝灰岩の固有な性質なのかを明らかにするため、再度、透水試験を行った。この結

果、締固めた凝灰岩の透水性の特異な傾向は今年度も存在し、これは固有の傾向と考えられるにいたったので、その結果をここに報告する。

2. 実 験 方 法

実験に用いた試料土は昨年度と同様に農林水産省中国四国農政局管内で建設中のNダムのランダム材の角礫凝灰岩である。実験にはこの5 mmふるい通過分を用いた。この材料の物理的性質は表-1に示す。

搬入された材料の自然含水比 $w=13\sim 15\%$ である。透水試験は含水比 $w=8\sim 22\%$ で行った。このため、5 mmふるい通過後の材料は必要に応じて、加水あるいは室内で徐々に乾燥して所定の含水比に調整し、ビニール袋に密封して、1週間以上置いた後、実験に用いた。まさ土や普通の粘性土では w_{opt} の数%湿潤側までは、含水比調整して置いた場合、試料内の含水比が上下で変化することはない。ところが、凝灰岩材料では w_{opt} の乾燥側の試料土でも、底近くの含水比がかなり増加しており、1~2週間の静置期間中に重力によって、間隙水が移動したことを示しており、一般の砂質土に比べて特異な含水特性を有している。

* 農村工学講座

供試体は直径5 cmのモールドに試料土を入れ、この上に直径4.6 cmの木の棒をおき、棒の上端を標準締固め用ランマーで突き固めて作製した。締固めは4層10回および5層30回とした。締固め含水比は8~22%の範囲とした。標準締固めでの締固め含水比 w と乾燥密度 ρ_d 曲線および各締固めでの $w \sim \rho_d$ 関係を図-1に示す。4層10回締固めでは w_{opt} 近くの含水比では $\rho_d \doteq \rho_{dmax}$ となるが、乾燥側と湿潤側では標準締固めより大きな ρ_d となっている。とくに w_{opt} の湿潤側では S_r が100%を越えている。これは締固め中に試料土から間隙水が絞りだされたことになる。

透水試験はすべて三軸セルで行った。供試体を三軸セルにセット後、拘束圧 $\sigma_{3c} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を加えて約1日間、動水勾配7~8で透水後、そのまま透水試験を行った。透水試験は全て変水頭透水試験とした。 $\sigma_{3c} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ で透水後、圧密圧力 $\sigma_{3c}' = \sigma_{3c} - u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に保って、 σ_{3c} と u_b を徐々に増加して $\sigma_{3c} = 2.0$, $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ とした。この状態で約16時間置いた後、約8時間、透水試験を行った。その後、 $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に保って、 σ_{3c} を4.0, 6.0 kgf/cm^2 に増し、約16時間置いた後、約8時間透水試験をした。さらに σ_{3c} を4.0, 2.0 kgf/cm^2 に減圧して透水試験を行った。最後に $\sigma_{3c} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $u_b = 0$ に減圧して透水試験を行った。各圧力段階に1日を要したため、1供試体の実験に9日を要した。

締固め含水比 w と透水試験後の含水比 w' の関係を図-2に示す。 w が8~10%以下の供試体を除いて、 w の増加とともに w' が減少しており、次式の関係が成り立つ。

$$4 \text{ 層}10 \text{ 回 } w' = 28.20 - 0.423 w \quad (r = -0.951)$$

$$5 \text{ 層}30 \text{ 回 } w' = 23.91 - 0.307 w \quad (r = -0.922)$$

w_{opt} の乾燥側では飽和度が高まったことにより、含水比が増加しており、 w_{opt} の湿潤側では締固め飽和度が100%に近く、かつ、軟弱な状態となっているためか、圧密されて含水比が減少している。

3. 透水試験結果について

透水試験結果の例を図-3に示す。図-3(a)は $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に保って u_b を0から1.0 kgf/cm^2 に増圧すると、 k が増加し、 σ_{3c}' を1.0から5.0 kgf/cm^2 に増加すると k が減少する標準的なタイプ1の例である。これは35本中24本で生じた。図-3(b)は σ_{3c}' が1.0から5.0 kgf/cm^2 に増加した場合、 k も増加する例でタイプ2である。これは7本で生じた。図-3(c)は $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に保って u_b を0から1.0 kgf/cm^2 に増加した

場合、 k が減少するタイプ3の例で4本で生じた。タイプ2では透水試験中の k の増加により、増圧時の k より減圧時の k の方が大きく、タイプ3では逆の結果となっている。圧密により間隙比が減少するから、増圧時の k の方が減圧時の k より大きいのが一般的であるが、タイプ1においても増圧時の k より減圧時の k の方が大きい供試体が2本、減圧時の k の一部が増圧時の k より大きい供試体が9本あった。このことはタイプ1においてもタイプ2のように透水中に k が増加する作用が存在していることを示している。

締固め含水比 w と透水係数 k の関係を図-4に示す。いずれも $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を作用し、図-4(a)は増圧時

表-1 試料土の物理的性質

液性限界	NP
塑性限界	NP
礫分	13%
砂分	66%
シルト分	13%
粘土分	8%
土粒子の比重	2.666
最適含水比	18.0%
最大乾燥密度	1.691 g/cm^3

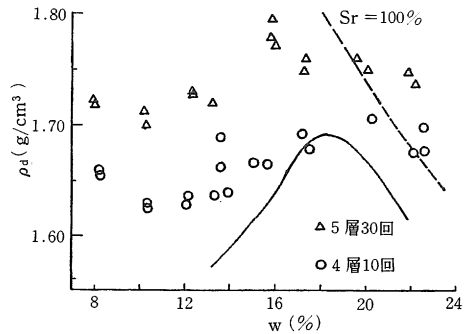


図-1 供試体の締固め含水比と乾燥密度の関係

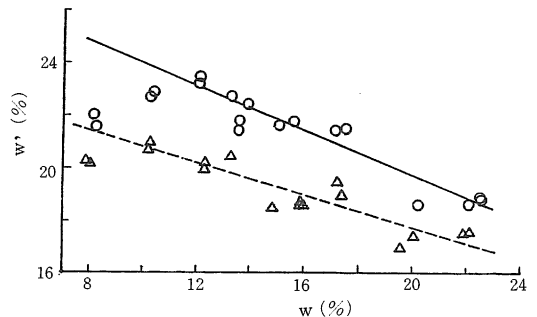


図-2 締固め含水比と実験後の含水比の関係

の $\sigma_{3c} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、図-4 (b)は $\sigma_{3c} = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、
 図-4 (c)は減圧時の $\sigma_{3c} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合である。
 ばらつきは大きい、 w の増加とともに k は減少傾向に
 ある、 $w \sim \log k$ 関係に直線関係が成り立つとすると

- 増圧時 $\sigma_{3c} = 2.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
 4層10回 $\log k = -3.94 - 0.0493 w$ ($r = -0.629$)
 5層30回 $\log k = -3.30 - 0.0968 w$ ($r = -0.875$)
 $\sigma_{3c} = 6.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
 4層10回 $\log k = -4.65 - 0.0203 w$ ($r = -0.313$)
 5層30回 $\log k = -3.39 - 0.104 w$ ($r = -0.868$)

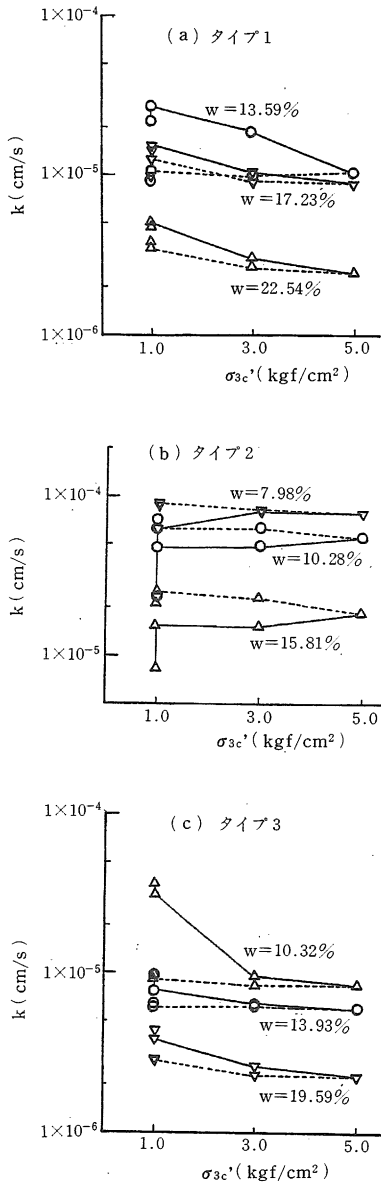


図-3 圧密圧力による透水係数の変化
 (実線：増圧時、点線：減圧時)

減圧時 $\sigma_{3c} = 2.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

4層10回 $\log k = -4.71 - 0.0135 w$ ($r = -0.239$)
 5層30回 $\log k = -3.56 - 0.0880 w$ ($r = -0.829$)
 となり、5層30回の締固めでは $\log k \sim w$ 関係はほぼ直
 線で表されるが、4層10回ではばらつきが大きく、相関
 性は小さい、また、実験の進行とともに相関係数 r が減
 少している、これは実験の進行とともにタイプ1~タイ
 プ3の存在のため、 k のばらつきが大きくなることによ
 る。

砂ないし砂質土の k と間隙比 e の関係は Kozeny
 Carman の式が成り立つとされている。

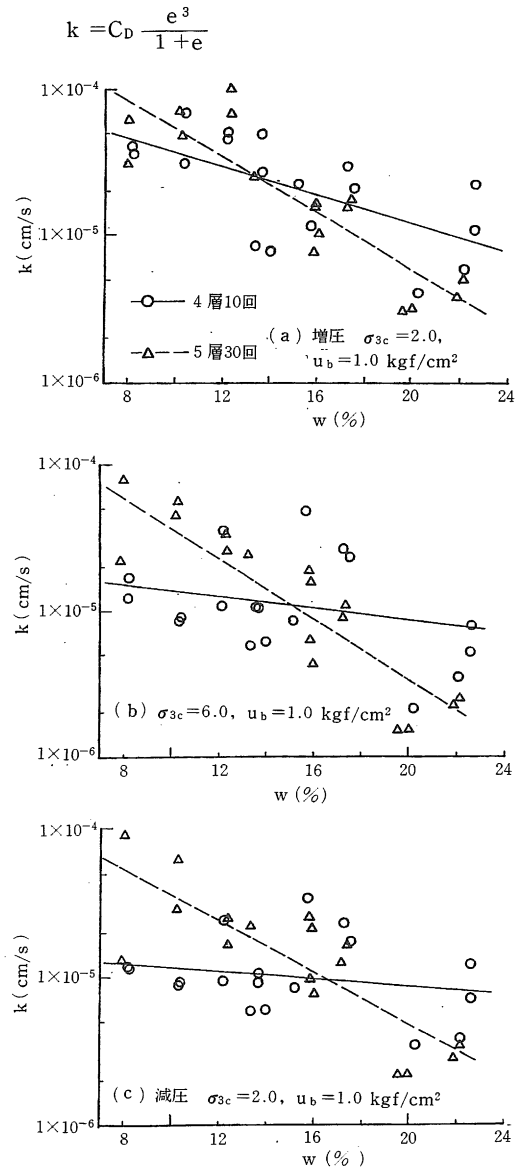


図-4 締固め含水比と透水係数の関係

ここに C_D : 砂の粒径, 水の粘性係数, 流れの経路, その他に関係する係数.

$\log k$ と e の関係を図-5 に示す. この図より, 同一間隙比では締めめ仕事量の多い5層30回の k の方が大きくなっている. $\log k \sim e$ 関係に直線関係がなりたつとすると

増圧時 $\sigma_{3c} = 2.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

4層10回 $\log k = -8.36 + 6.11 e \quad (r = 0.409)$

5層30回 $\log k = -10.7 + 11.3 e \quad (r = 0.583)$

$\sigma_{3c} = 6.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

4層10回 $\log k = -4.45 - 0.722 e \quad (r = -0.076)$

5層30回 $\log k = -11.1 + 1.16 e \quad (r = 0.525)$

減圧時 $\sigma_{3c} = 2.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

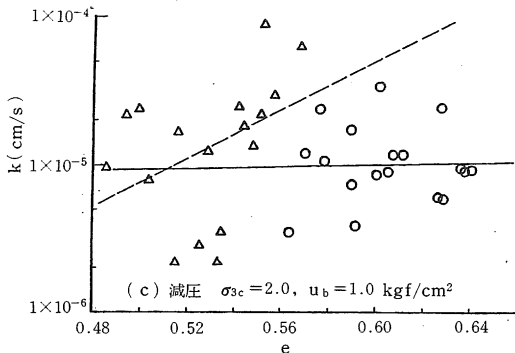
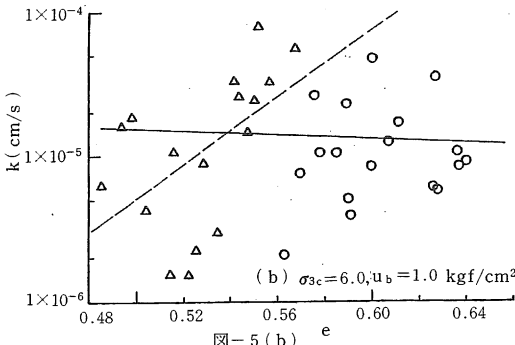
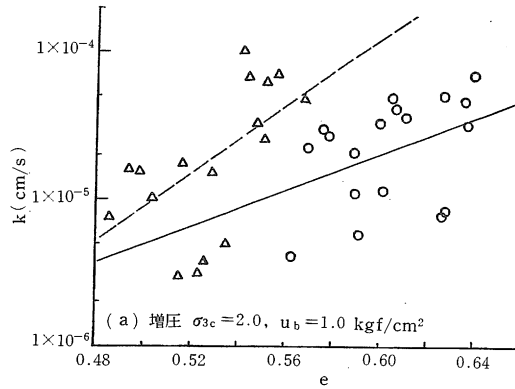


図-5 締めめ間隙比と透水係数の関係

4層10回 $\log k = -5.19 + 0.325 e \quad (r = 0.030)$

5層30回 $\log k = -9.26 + 8.28 e \quad (r = 0.414)$

となり, 4層10回の $\sigma_{3c} = 6.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ と減圧時の $\sigma_{3c} = 2.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には $\log k$ と e の相関性は認められない, また, 他の場合も相関性は小さく, 締めめた凝灰岩の $k \sim e$ 関係には一定の傾向は認められない.

透水試験後の含水比 w' と $\log k$ の関係を図-6 に示す. $w' \sim \log k$ の直線関係を仮定すると

増圧時 $\sigma_{3c} = 2.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

4層10回 $\log k = -7.59 + 0.136 w' \quad (r = 0.594)$

5層30回 $\log k = -11.7 + 0.363 w' \quad (r = 0.922)$

$\sigma_{3c} = 6.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

4層10回 $\log k = -7.51 + 0.118 w' \quad (r = 0.544)$

5層30回 $\log k = -12.3 + 0.386 w' \quad (r = 0.905)$

減圧時 $\sigma_{3c} = 2.0, u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

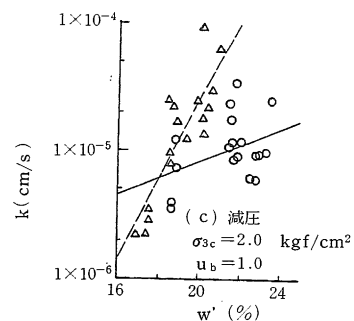
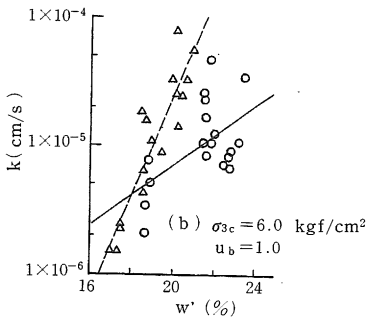
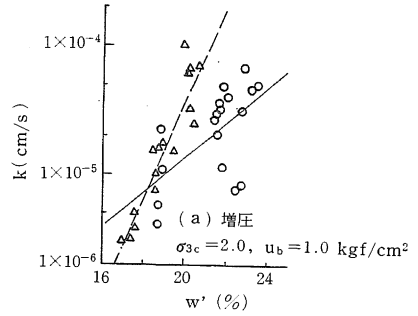


図-6 実験後の含水比と透水係数の関係

4層10回 $\log k = -6.33 + 0.0643w'$ ($r = 0.372$)

5層30回 $\log k = -10.8 + 0.311w'$ ($r = 0.820$)

5層30回締固めでは相関性は良いが4層10回では相関性は良くない。また、透水試験の経過とともに r が減少しており、ばらつきが増加している。

締固めた凝灰岩では透水係数 k と締固め含水比、間隙比、透水後の含水比との関係はいずれもばらつきが大きい。これは $k \sim \sigma_{3c}'$ 関係が一定していないためである。これ以外にも、透水試験中、浸透水に濁りが生じた供試体が10本あった。このことはコロイド粒子が流亡したことを示している。透水試験中のタイプ2、タイプ3の透水係数の異常な傾向は浸透水によって土粒子が移動して、浸透路が拉がれば k が大きくなり、土粒子が間隙の一部を塞げば k が減少すると考えられる。このことは浸透により、土粒子の流亡、即ちパイピングの発生の可能性を示すものである。

3. パイピング試験について

パイピングの実験方法は規格化されたものはない。ここでは流出側のポーラス・ストーンの代わりに、10mm格子点ごとに直径5mmの孔をあけたアクリル板を用いた。試料土の最大粒径は4.76mmであるから、土粒子と水は自由に流出可能である。

実験は内径10cmのモールドに試料土を標準締固め法で3層25回または3層12回で突き固めて、そのまま透水試験器にセットした。供試体諸元を表-2に示す。

実験ではまず試料土を飽和させるために、限界動水勾配より小さな動水勾配で約1日間の上向き透水を行った。この場合、初期の浸透水は全て濁っていた。しかし時間の経過とともに濁りは消えた。この濁りの状態は透水試験において生じた濁りと似ており、凝灰岩中の軽い微粒子が非常に流亡しやすいことを示している。この際の流出土総量は非常に少ないので粒度分析はしていない。ついで、下向き浸透流を与える供試体の場合は透水試験器を反転し、上向き浸透流を与える場合はそのままにして実験を行った。

実験は下向きまたは上向き浸透流を一定動水勾配で50~100分以上与えた後、動水勾配を段階的に増加して行った。実験では流出水量と流出土砂量を測定した。動水勾配 i 、透水係数 k の経時変化を図-7に示す。透水初期に k が増加するが、その後、 k は急激に減少した後、一定値に近づいている。

初期の飽和過程およびパイピング試験開始後の経過時間ごとの土粒子の流出速さを図-7に示す。図-7は供試体の断面積78.5cm²当たりの土砂の流出速さ $\Delta w_s /$

表-2 パイピング試験供試体の諸元

No	w_0 %	ρ_d g/cm ³	e	w' %	浸透流の方向
TP-1	14.60	1.577	0.690	23.25	下向き
TP-2	14.60	1.592	0.675	22.60	上向き
TP-3	14.46	1.541	0.730	24.18	下向き
TP-4	14.50	1.518	0.757	23.92	下向き
TP-5	14.63	1.545	0.725	24.22	上向き

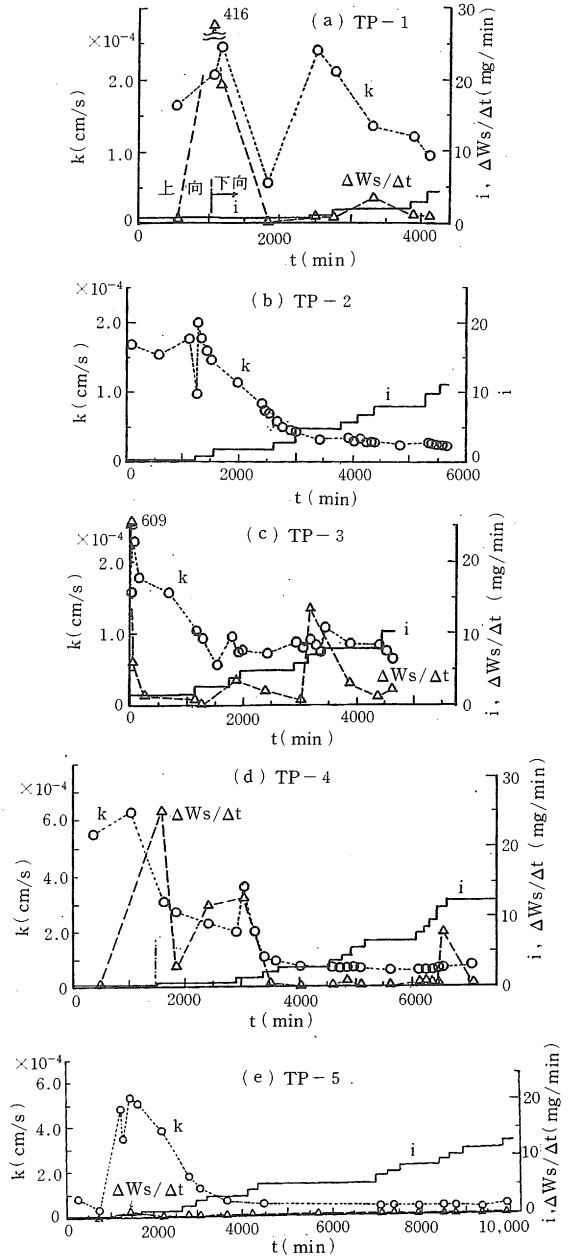


図-7 動水勾配、透水係数、土砂の流出速さの経時変化

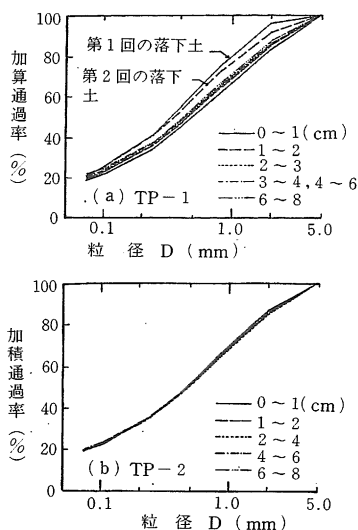


図-8 流出面からの距離による試料土の粒度分布の变化

Δt を示している。上向きの浸透流のみの TP-2, TP-5 では濁った水が流出するのみである。初期の濁りが濃い場合でも $\Delta w_s/\Delta t$ は 1 mg/min 程度で、1 日経過すれば 0.1~0.2 mg/min となり、流出水の濁りも認められなくなる。

下向き浸透流を与えた場合、実験装置を上下反転した直後の数分間に孔直上の土砂が落下するが、10分程度経過すると落下量も減少する。その後、流出土砂も徐々に減少する。実験後の観察では孔直上に半球状のくぼみが生じており、アーチ作用により、孔径より小さな土粒子の落下が阻止されている。流出水は時間の経過とともに濁りがなくなり、時々、土砂が落下する以外には濁りは認められなくなる。しかし、流出水には微量のコロイド粒子が含まれているため、わずかに乾土が存在した。3層25回締固めた下向き浸透流の TP-1 と上向きの TP-2 の流出面からの距離による材料の粒度分布および TP-1 の初期の落下土の粒度分布を図-8 に示す。供試体内の 74 μm 以上の粒度分布の差は認められないが、落下土では 2.0 mm 以上の粒子の落下割合が少なくなっており、孔直上は砂ないし礫によってアーチ作用が生じていると考えられる。落下土量 W_s は下向きの TP-1 で $W_s=42.63\text{g}$ 、TP-3 で $W_s=22.95\text{g}$ 、TP-4 で $W_s=45.80\text{g}$ 、上向きでは TP-2 は測定できず、TP-5 で $W_s=1.11\text{g}$ であり、供試体の乾土質量に対して TP-1 で 2.41%、TP-3 で 1.49%、TP-4 で 3.02%、TP-5 で 0.07% である。

本実験での試料土の最大粒径は 4.76 mm であり、孔の直径は 5.0 mm であるから、全粒子が流失可能であるが、

動水勾配 $i > 10$ を与えても、土粒子の流亡が止まった。このことから一般の浸透流に対してはパイピングの危険性はないものと考えられる。ただし、盛土初期の浸透流に濁りの生じる可能性は十分に考えられる。

5. あとがき

締固めた凝灰岩の透水試験を昨年度と同様に行った。さらにパイピングの可能性について検討した。この結果、

(1) 透水係数 k と圧密圧力 σ_{3c}' の関係には σ_{3c}' の増加とともに k が減少する一般的な傾向の他に、 σ_{3c}' の増加にもかかわらず k が増加する供試体や、背圧 u_b が作用しても k が減少する異常な傾向を示す供試体が存在する。

(2) 締固め含水比 w の増加とともに k は減少し、実験後の含水比 w' とともに k は増加する傾向にあるがばらつきは大きい。間隙比 e と k の相関性は小さい。これらの関係には締固め仕事量も影響する。

(3) 自由境界を有する浸透では初期の流出水は濁りが生じる。これが三軸セルでの透水試験に際しても、時々、濁りを生じた原因である。これらは濾紙を通して流出してきたことから、コロイド粒子と考えられる。

(4) 上向き浸透流では動水勾配 10 まではパイピングの心配はない。下向き浸透流では初期に土粒子が落下するが、直上の砂粒子によるアーチ作用により、動水勾配 10 まではパイピングの発生の心配はない。

本年度と昨年度の実験結果より、締固めた凝灰岩では浸透水により土粒子が移動するためか、透水係数の変動が生じやすい。このため、透水係数を締固め含水比、締固め間隙比または締固め密度等から予測することは困難である。さらに浸透水に濁りが生じる可能性があるが、これはパイピングとは無関係に凝灰岩中の軽い微小粒子が流出してきたもので、時間の経過とともに濁りは消える。この結果より、最大粒径と同じ間隙に対しては動水勾配 10 までは上下方向とも、パイピングの発生の心配はない。締固めた凝灰岩には軽い粒子も含まれており、また、乱した状態では粘着力がないため、降雨等の表面流による侵食に対する配慮がより重要であろう。

なお、本実験を行うには平成3年度島根大学農学部農業施設工学研究室の専攻生の奈良井 剛君、遠藤直之君、上中別府哲也君に多大のご協力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 島山暁司：島根大農研報，25：113-118，1991。
- 2) 島山暁司：島根大農研報，25：107-112，1991。