

火山灰質土の間隙構造を考慮した透水係数の評価

Evaluation of particle breakage on volcanic grounds for construction of snow dumping site

株式会社四国ボーリング工業 ○正員 木村 充宏 (Mitsuhiro Kimura)
 上山試錐工業株式会社 正員 中田 隆文 (Takafumi Nakata)
 宮浦興業株式会社 正員 宮浦 征宏 (Masahiro Miyaura)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 横浜 勝司 (Shouji Yokohama)

1. はじめに

これまで筆者らは、北海道に堆積する火砕流堆積物で構成される段丘に計画する雪堆積場の建設に伴い、種々の透水試験を実施して火山灰質土の透水係数を検討してきた結果、火山灰質土の透水性能は、砂～礫程度の透水性を有していることを示してきた^{1)~3)}。さらに火山灰質土の透水係数は、Creager式⁴⁾やHazen式⁵⁾などに代表されているような粒径による相関性は低く、間隙比と細粒分含有率が透水係数の推定に重要な指標であることを示してきた^{2),3)}。

本研究では、噴出起源を同一とする火砕流堆積物と降下テフラの透水性を評価するために、火山灰質土の大きな特徴である砂や粘性土などと異なる間隙構造⁶⁾に着目して透水性を議論している。

2. 火山灰質粗粒土の間隙構造

一連の研究成果から著者らは、構成粒子が多孔質な性質を持つような火山灰質土では、間隙比の値が高くなるため、粒子内に間隙などの内部構造を有していない通常の土とは同義な形では間隙比を扱えないとしている⁶⁾。

そこで、粒子内に間隙を有する火山灰質粗粒土の間隙の定量的な評価として提案された間隙構造モデルを図-1⁶⁾に示す。図から、火山灰質粗粒土の間隙は、粒子間の間隙比と粒子内の間隙比に区分できる。ここで、本論では前者を間隙比(e_{inter})、後者を内間隙比(e_{intra})と称している。さらに通水可能な内間隙として、開口内間隙比($e_{intra-o}$)、通水が不可の間隙を閉塞内間隙比($e_{intra-c}$)として

いる。これらのパラメータを用いて全間隙比 e と内間隙比 e_{intra} は式(1)と式(2)で表すことができる。

$$e = e_{inter} + e_{intra} \quad (1)$$

$$e_{intra} = e_{intra-o} + e_{intra-c} \quad (2)$$

3. 対象とした火山灰質土の物理的性質

本研究で対象とした火山灰質土は、支笏カルデラを噴出起源とする火砕流堆積物(Spfl)と降下テフラ(Spfa)である。比較のために豊浦砂に関する試験も実施している。表-1には、Spfl、Spfaおよび豊浦砂の物理的性質を示し、図-2には粒径加積曲線を示している。また表-1には、火山灰質土の粒子をすり鉢中で粉砕した土粒子の密度 $\rho_{s\text{ crush}}$ を示している。なお ρ_s と $\rho_{s\text{ crush}}$ の差は、閉塞内間隙 $e_{intra-c}$ の存在を示すものである。ただし豊浦砂については、 $e_{intra-c} = 0$ として評価している。

表-1からSpfaの ρ_s は、Spflおよび豊浦砂の ρ_s と比較すると遥かに小さい。また $\rho_{s\text{ crush}}$ は、SpflおよびSpfaともに粒子を粉砕しない ρ_s より高い値を示している。このことは、火山灰質土の構成粒子内の $e_{intra-c}$ の存在を示唆している。ただし ρ_s と $\rho_{s\text{ crush}}$ の差はSpflよりSpfaの方が大きく、Spfaの方が閉塞された空隙が大きいと推察される。

図-2に示す粒径加積曲線では、火山灰質土は豊浦砂

表-1 Spfl、Spfa および豊浦砂の物理的性質

火山灰記号		Spfl	Spfa	豊浦砂
ρ_s	g/cm ³	2.53	2.22	2.65
$\rho_{s\text{ crush}}$	g/cm ³	2.60	2.82	—
D_{50}	mm	0.32	1.20	0.18
F_c	%	27	1	0

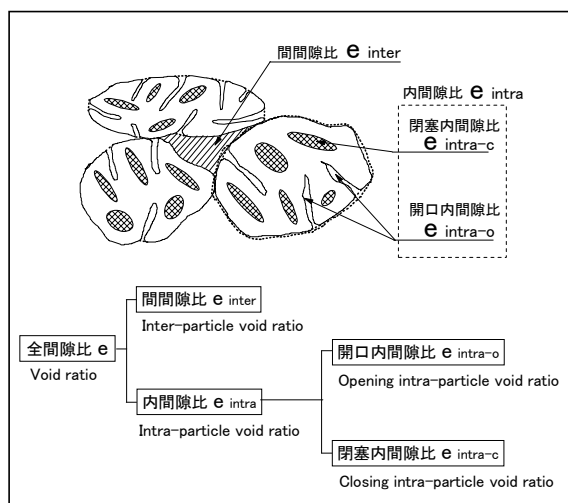


図-1 火山灰質土の間隙構造モデル⁵⁾

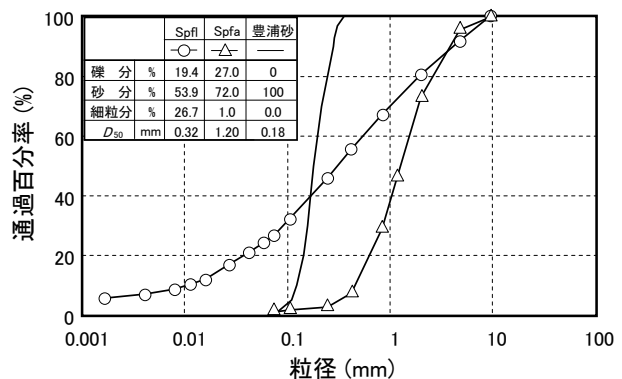


図-2 粒径加積曲線

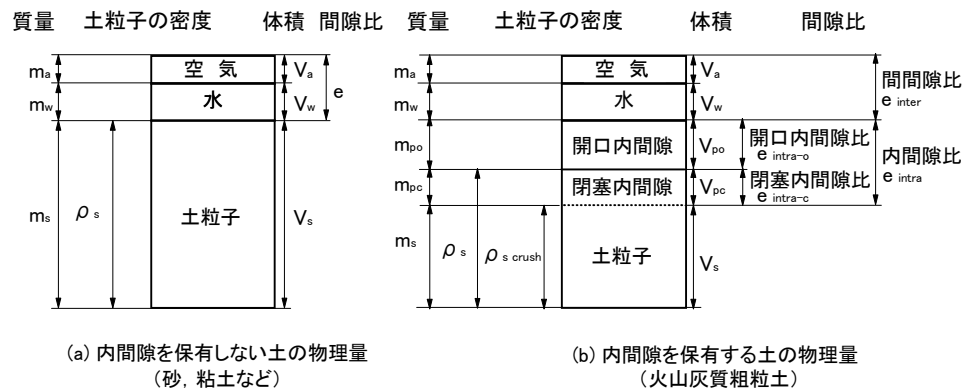


図-3 砂や粘土などの内間隙を有しない土と火山灰質土の基本的物理量

と比較すると粗粒である。またSpfaはSpflと比較すると礫分含有量が大きく細粒分含有率が小さい。このことから、前述した粒子内の閉塞された空隙量は、軽石内に多く有していることが推察される。

4. 実施した室内試験

4.1 間隙比の測定

本研究では、火山灰質土に対して間隙比の簡易的な測定試験⁶⁾を実施した。試験の目的として、間隙比と内間隙の分担率を把握するため供試体内の体積変化から各々の間隙比の推定を試みている。

試験は、直径50mm、高さ50mm(体積100cc)のステンレス製の円筒管に供試体を設置後、約40cc/hrの流量となるよう脱気水を供給して供試体を毛管飽和させながら通水を行った。この時点供試体内の飽和状態、すなわち間隙および内間隙が飽和したとみなしている。さらに、重力排水を与えて経時的に供試体の重量を測定することで含水比 w の変化を求めた。供試体の作製は、空中落下法(AP法)により作製し、落下高さを変えることで供試体密度の調整を計っている。なお、重力排水後1日後における w から $S_r=100\%$ と仮定して、 ρ_s と w の関係($e_{\text{intra-o}}=\rho_s \times w$)から算出した⁶⁾。

4.2 透水試験

透水試験は、三軸試験機で飽和度を管理して実施している。供試体の飽和段階ではトップキャップおよびペデスタルから接続されている2本の2重管ビュレットからバックプレッシャーを供給している。透水試験時には供試体にバックプレッシャーを供給した状態で所定の動水勾配において変水位型の透水試験を実施した。

供試体は、24時間炉乾燥させた試料を所定の高さからAP法により作成された。供試体は直径100mm、高さ200mmの円筒形である。試料堆積後、CO₂、脱気水、196kPaのバックプレッシャーの供給により供試体を飽和させた。間隙圧係数B値が0.96に達したことが確認された後有効圧密圧力 $\sigma'_c=49\text{kPa}$ での等方圧密が行われた。圧密中の体積変化は供試体からの排水量をビュレットにて読取ること確認しており、圧密による体積ひずみ変化率が $1.0 \times 10^{-4}\%/min$ 未満になった時点で圧密終了とした。

5. 考察

5.1 間隙構造の定量化

(1) 火山灰質粗粒土の基本的物理量

図-3には、火山灰質粗粒土のような内間隙を保有する軽石の基本的な物理量の関係を示している。また表-2には、粒径毎の ρ_s の値を示している。

図中には、砂や粘土などの内間隙を保有しないと考えられる土の物理量の関係も示している。図示のように内間隙を有さない土は、空気、水、土粒子の三相からなるが、内間隙が存在する火山灰質粗粒土の場合は、それ以外に土粒子内に開口内間隙の体積 V_{po} と閉塞内間隙の体積 V_{pc} が含まれる。

ここで、全間隙比 e および開口内間隙比 $e_{\text{intra-o}}$ の評価は、前述した間隙比測定試験から求める。また、閉塞内間隙比 $e_{\text{intra-c}}$ は V_{pc} を考慮すると式(3)で示される。

$$e_{\text{intra-c}} = \frac{\rho_{s\text{ crush}} - \rho_s}{\rho_s} \quad (3)$$

(2) 閉塞内間隙比 $e_{\text{intra-c}}$ の定量化

図-4は、 $e_{\text{intra-c}}$ を求めるため、Spfl、Spfaの各粒径区分における ρ_s を示したものである。図より、火山灰質粗粒土の ρ_s は粒径毎に変化が生じていることがわかる。さらに、その変化はSpflよりSpfaの方が顕著である。

これは火山灰質土では、粒径毎の V_{pc} の大きさに起因するが、粒度組成の相違から、Spfaの方が大きいことを示している。

そこで $e_{\text{intra-c}}$ の算出は、式(3)による各粒径ごとの閉塞内間隙比から残留率を考慮することで算出した⁶⁾。その結果、SpflとSpfaの $e_{\text{intra-c}}$ は表-3に示す値となり、Spfaの $e_{\text{intra-c}}$ の方が遥かに高いことが示された。

(3) 間隙比測定試験による全間隙比 e および開口内間隙比 $e_{\text{intra-o}}$ の関係

図-5には、間隙比測定試験より求めた全間隙比 e および開口内間隙比 $e_{\text{intra-o}}$ と乾燥密度 ρ_d の関係を示した。

図は乾燥密度 ρ_d に対する e と $e_{\text{intra-o}}$ 、 $e_{\text{intra-c}}$ の関係として表示している。図より、 ρ_d の減少によって e_{inter} は一義的に増加することがわかる。一方、 $e_{\text{intra-o}}$ も同様に増加している。なお、ここでのSpfl、Spfaの e 、および $e_{\text{intra-o}}$ の関係を式(4a)、(4b)、 e_{inter} と ρ_d の関係は、式(5)、(5b)

に示している。

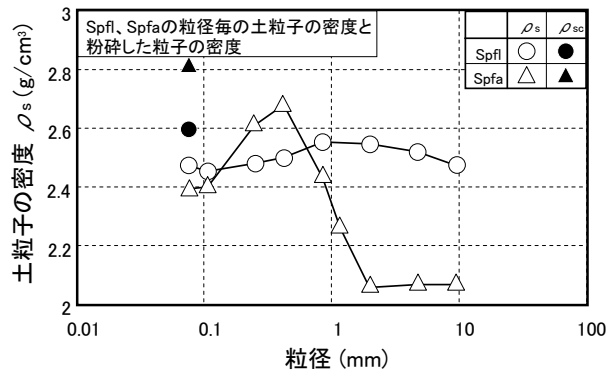


図-4 Spfl および Spfa の粒径毎の土粒子の密度

表-2 駒岡火山灰土の粒径毎の土粒子の密度

粒径の範囲	各粒径の土粒子の密度	
D(mm)	Spfl	Spfa
4.750~9.500	2.473	2.069
2.000~4.750	2.520	2.067
1.180~2.000	—	2.057
0.850~1.180	—	2.260
0.850~2.000	2.547	—
0.425~0.850	2.553	2.260
0.250~0.425	2.500	2.429
0.106~0.250	2.481	2.610
0.075~0.106	2.453	2.401
0.075 以下	2.473	2.394

表-3 Spfl と Spfa の閉塞内間隙

	$e_{\text{intra-c}}$
Spfl	0.040
Spfa	0.282

$$e = 1.78 \times \rho_d^{-0.652} \quad (\text{Spfl}) \quad (4a)$$

$$e = 1.41 \times \rho_d^{-1.280} \quad (\text{Spfa}) \quad (4b)$$

$$e_{\text{intra-o}} = 1.49 \times \rho_d^{-0.195} \quad (\text{Spfl}) \quad (5a)$$

$$e_{\text{intra-o}} = 1.15 \times \rho_d^{-0.921} \quad (\text{Spfa}) \quad (5b)$$

(4) 間隙比 e_{inter} の評価

これまで土の透水性を議論する場合には、粒径による評価とともに間隙比^{7)~9)}や締固め度⁸⁾などの指標に基づき評価してきた。しかしながら、火山灰質土の透水係数を間隙比で議論する場合には、砂や粘性土などと間隙構造が同じでないため、これまで述べてきた間隙比による評価を用いることが妥当と考える。

土における水分移動は、粒径や締固め度にも依存す

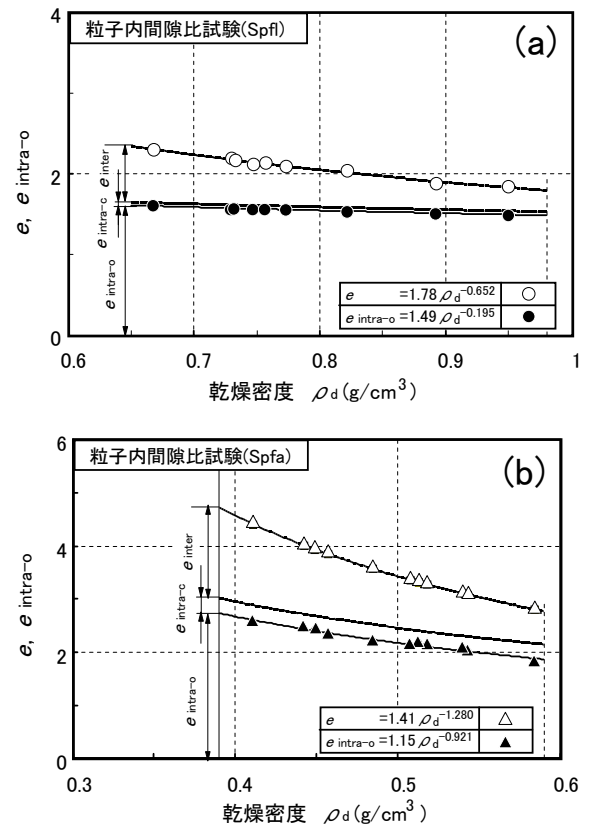


図-5 乾燥密度と各間隙比の関係

(a) Spfl、(b) Spfa

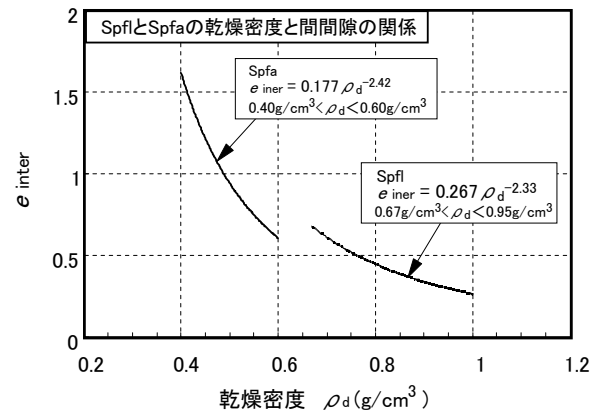


図-6 乾燥密度と中間隙比の関係

るが、状態量である間隙中を通水することが前提である。火山灰質土の場合、飽和状態における通水可能な間隙比は間隙比 e_{inter} であると推察される。そこで図-5に示した間隙比測定試験結果から得られた e_{inter} と ρ_d の関係を図-6に示す。図-6から、 e_{inter} は ρ_d の増加とともに小さくなるが、Spfl より Spfa の方が顕著である。両者の関係を定式化すると式(6a)、(6b)のような関係である。ただし、式(6a)、(6b)については、間隙比測定試験を実施した密度の範囲 (Spfl : $0.67\text{g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 0.95\text{g/cm}^3$ 、Spfa : $0.40\text{g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 0.60\text{g/cm}^3$) とする。

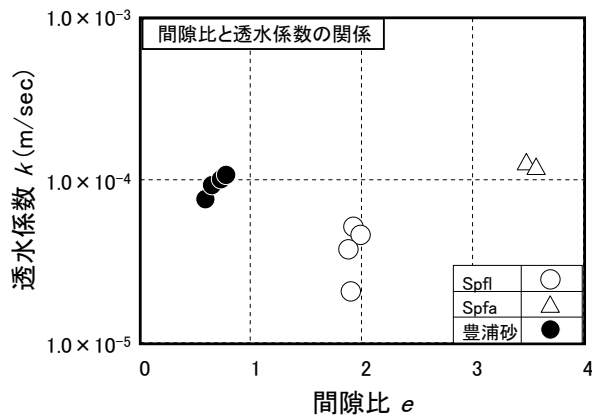


図-7 全間隙比と透水係数の関係

$$e_{\text{inter}} = 1.18 \times \rho_d^{-2.420} \quad (\text{Spfl}) \quad (6a)$$

$$e_{\text{inter}} = 0.27 \times \rho_d^{-2.330} \quad (\text{Spfa}) \quad (6b)$$

5.2 火山灰質土の間隙構造を考慮した透水係数の評価

図-7には、式(4)により算出した全間隙比 e と透水係数 k の関係を示した。なお図中には豊浦砂の試験結果も示している。

図から、火山灰質土の Spfl、Spfa および豊浦砂の k は、 $10^{-4} \sim 10^{-5}(\text{m/sec})$ オーダーにあり火山灰質土の透水性が比較的高いことを示している。間隙比 e については、比較した試料の中で最も透水性が低い Spfl の間隙比が豊浦砂の e より大きい結果となっている。

このような結果から、全間隙比 e による評価では、透水は間隙の大きさに依存するという仮定においては合理的な k の判定は難しいものと判断される。

そこで図-8には、火山灰質土の間隙比 e_{inter} と透水係数 k の関係を示している。図中には豊浦砂の k も示しているが、豊浦砂の e_{inter} については、内間隙比 $e_{\text{intra}} = 0$ として全間隙 e により評価している。

図から、Spfl、Spfa および豊浦砂の k は、 e_{inter} の大きさに順じてその透水性が評価されていることを示している。このことから火山灰質土の k は、粒子内の間隙を考慮することで、間隙比による評価が可能になることが示唆されている。ただし、本研究で用いたデータ数は限られており、今後の研究によりその精度を高めていく必要があると考える。

6. まとめ

①同一噴出起源の火砕流堆積物 (Spfl) と降下テフラ (Spfa) の火山灰質土の粒径毎の土粒子の密度 ρ_s を評価した結果、Spfl に比べ Spfa の方が粒径毎の ρ_s の変化が顕著である。

②Spfl と Spfa の間隙構造を評価した結果、閉塞内間隙比は降下テフラである Spfa の方が大きい。これは、礫分含有量の影響であることが想定され、閉塞内空隙は軽石内に多く存在することを示唆している。

③飽和状態における火山灰質土の透水係数は、豊浦砂の透水係数と同レベルにある。また、その透水係数は、

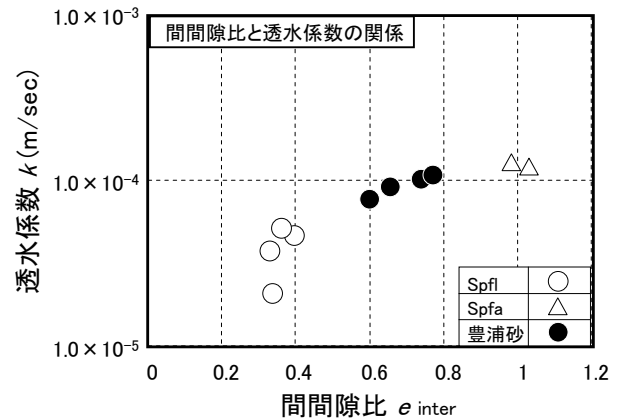


図-8 間隙比と透水係数の関係

$10^{-4} \sim 10^{-5} \text{m/sec}$ オーダーである。

③火山灰質土および豊浦砂の透水係数 k を全間隙 e で評価した結果、 k の大きさは e の大きさに依存しない。

④透水係数を火山灰質土の間隙構造を考慮した間隙比 e_{inter} で評価した結果、 k の大きさは e の大きさに依存することから e_{inter} による合理的な評価が可能であることが示唆された。

【参考文献】

- 1) 中田隆文・宮浦征宏・横浜勝司：雪堆積場の建設を目的とした火山灰地盤の透水性評価、地盤環境および防災における地域資源の活用に関するシンポジウム、地盤工学会九州支部、pp.43-48, 2010.
- 2) 木村充宏・中田隆文・宮浦征宏・横浜勝司：火山灰地盤の透水性に及ぼす細粒分の影響、第45回地盤工学研究発表会講演集、pp.927-928, 2010.
- 3) 宮浦征宏・中田隆文・木村充宏・横浜勝司：細粒分含有量を考慮した火山灰地盤の透水係数の合理的判定手法、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.65, 3-129, pp.257-258, 2010.
- 4) Creager, W.P., J.D. Justin and J. Hind : Chap.16 soil tests and their utilization, Engineering for dams, Vol. III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, pp.645-654, 1944.
- 5) Hazen, A. : Some physical properties of sand and gravel with special reference to their use in filtration, 24th Ann. Rep., Mass. State Board of Health, Boston, 1893.
- 6) 中田隆文・三浦清一：火山灰質粗粒土の粒子破碎による間隙構造の変化と定量化に関する研究、土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, pp.224-236, 2007.
- 7) 福田光治・宇野尚雄：透水係数に関する粒度分布と間隙指標、土木学会論文集、No.561/III-38, pp.193-204, 1997.
- 8) 森田悠紀雄・坪田邦治・西垣誠・小松満：粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数の推定方法、土と基礎、Vol.53, No.7, pp.5-7, 2005.
- 9) 横浜勝司・三浦清一・山木正彦：粗粒火山灰土の飽和透水係数に及ぼす間隙比および細粒分の影響、第44回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.693-694, 2009.