

十勝火砕流堆積物の力学特性と粒子破碎性が透水性能に及ぼす影響

Mechanical behavior and permeability of Tokachi volcanic soil and its evaluation

室蘭工業大学大学院 ○学生員 林 雅徳 (Masanori Hayashi)
 室蘭工業大学大学院 正 員 川村志麻 (Shima Kawamura)

1. はじめに

北海道では、新第三紀から第四紀にかけて激しい火山活動が起こり、その噴火に伴って火山砕屑物（降下火砕堆積物(*f_a*)または火砕流堆積物(*f_l*))が広範囲に亘り、生成されている。このような火山灰質土は、有用な工学材料として利用されてきているが、透水性能²⁾など未解明な点も未だ多い。本研究では、調査データの少ない十勝岳を噴出源とする十勝火砕流堆積物(Tok)を対象として、静的三軸圧縮試験と透水試験を行い、圧密・せん断過程によって起こる粒子破碎が力学特性に及ぼす影響を調査した。また、道内3地点の粒子破碎性の異なる火山灰質土を用いた透水試験を行い、粒子破碎が透水性能に及ぼす影響を明らかにした。



図-1 試料の採取位置

2. 用いた試料と物理特性と試験方法

2.1 用いた試料と物理特性

本研究が対象とした火山灰質土は、美瑛町より採取した、富良野盆地に130万年前頃堆積したとされる¹⁾十勝火砕流堆積物(Tok)の美瑛火山灰質土(BIEI VOLCANIC SOIL)、苫小牧市柏原より採取した支笏カルデラの噴出物(Spfa-1)の柏原火山灰質土(KASHIWABARA VOLCANIC SOIL)と中標津町当幌より採取した摩周カルデラの噴出物(Ma-1)の当幌火山灰質土(TOUHORO VOLCANIC SOIL)である。試料の採取場所を図-1、火山灰質土の粒径加積曲線を図-2、示標特性を表-1に示す。比較のために豊浦砂のものを併記している。なお、当幌火山灰質土では、粒子破碎の影響をより詳細に検討するために、9.5mmに粒度調整した試料を用いている。

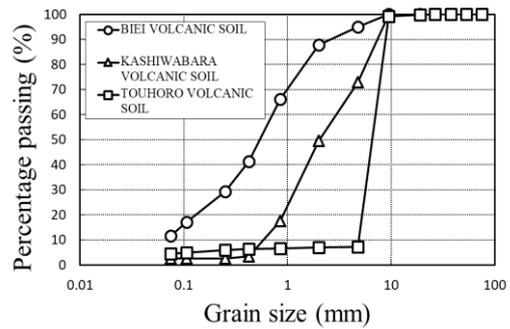


図-2 試料の粒径加積曲線

表-1 試料の示標特性

SAMPLE NAME	ρ_s g/cm ³	ρ_d g/cm ³		D_{50} mm	U_c	F_c %
		max	min			
BIEI	2.51	1.56	1.16	0.56	14.5	11.6
KASHIWABARA	2.34	0.62	0.46	2.00	4.83	2.59
TOUHORO	2.48	0.52	0.46	6.60	1.42	4.37
TOYOURA SAND	2.64	1.64	1.34	0.18	1.60	0

図と表から、3種類の火山灰質土は通常の砂より土粒子の密度が低いことがわかる。美瑛火山灰質土は自然状態でも比較的多くの細粒分 $F_c(75\mu\text{m以下})$ を含むのに対し、柏原、当幌火山灰質土は2~4%程度と少ない。また、当幌火山灰質土においては9.5mmでの粒度調整により、粗粒分が多くなっている。

次に、各試料の締固め特性について調べてみた。採用した締固めエネルギー E_c は、締固め試験(JIS A 1210:2009)³⁾のA法($E_c=550\text{kJ/m}^3$)と、 550kJ/m^3 の6分の1に設定した場合(透水試験時、 $0.17E_c$)の2パターンである。得られた結果を図-3、図-4、図-5に示す。図より、各火山灰質土の締固め密度は、通常の土より飽和度の低い点でピーク値を示し、締固めエネルギーが低くなると最適含水比は湿潤側へと移行していることがわかる。なお、図-3中の最適含水比 w_{opt} の値は締固めエネルギー $0.17E_c$ の時のものである。

表-1 試料の示標特性

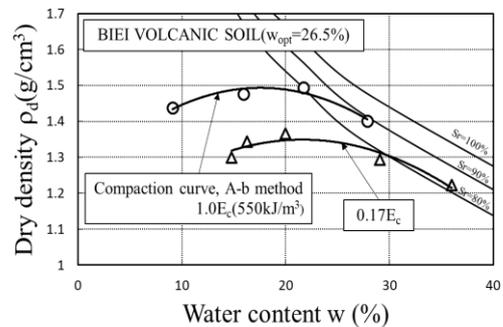


図-3 美瑛火山灰質土の締固め曲線

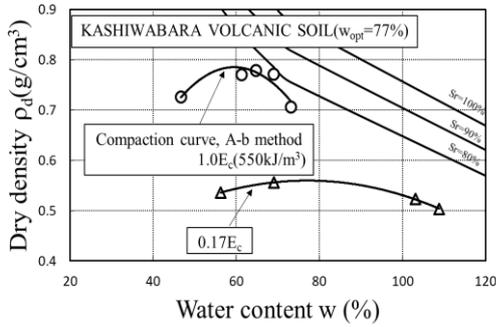


図-4 柏原火山灰質土の締固め曲線

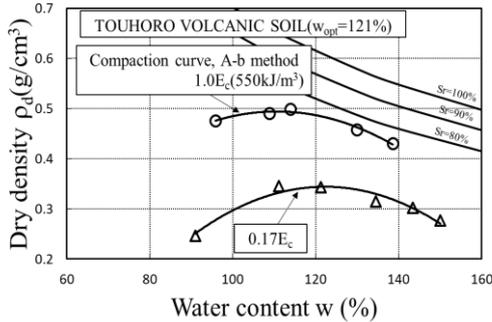


図-5 当幌火山灰質土の締固め曲線

2.2 三軸圧縮試験方法と透水試験方法

次に静的三軸圧縮試験（圧密非排水試験 CU，圧密排水試験 CD）の試験方法について示す。各試験では，圧密応力 $\sigma'_c = 49, 98\text{kPa}$ の下で試験を行っている。供試体は空中落下法により作製し，直径 70mm，高さ 170mm の円柱形の三軸供試体(図-6 参照)を準備した。試験は，円柱供試体をセル内に設置し，有効拘束圧 $\sigma'_3 = 19.6\text{kPa}$ のもと，供試体に脱気水を供給し，その後，196kPa のバックプレッシャーを与えることにより飽和化を図った。所定の有効拘束圧の下で圧密し，軸ひずみ速度 0.25%/min で三軸圧縮試験を実施した。なお，試験は供試体の軸ひずみが 15%に達するまで行った。本研究における応力，ひずみ，有効平均主応力 p' ，軸差応力 q は次のように定義している。

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3$$

$$q = |\sigma'_1 - \sigma'_3|$$

透水試験は，基本的に JIS A 1218:2009⁴⁾の「土の透水試験方法」に準拠し，定水位の条件で行っている。図-7 は本研究で用いた定水位透水試験装置（パイピング試験装置）の概略図を示したものである。給水層の高さを変えることにより所定の動水勾配を与えることができるようになっている。透水試験時の動水勾配 i については限界動水勾配 i_c を算定した結果，美瑛火山灰質土，柏原火山灰質土，当幌火山灰質土の i_c はそれぞれ 0.90, 0.45, 0.28 であったため，それを超えないように設定した。具体的には美瑛火山灰質土で $i=0.8$ ，柏原，当幌火山灰質土で $i=0.2$ で試験を行った。

前述の締固め試験の結果に基づき，所定の含水比に調整した火山灰質土を透水試験装置に直径 150mm，高さ 125mm となるように締固めて準備した。締固めは基本

的に締固め試験の B 法に準じて行ったが，前述のように締固めエネルギーはランマーの高さを調整して 550kJ/m^3 の 6 分の 1 に設定している。試験装置上部まで通水した後，定水位透水条件下で透水係数を測定した。

2.3 粒子破碎の評価

各試験が終了した後，ふるい分け試験によって試験前後の粒度変化を調べた。本研究では，細粒分の増加量 ΔF_c によって粒子破碎量を評価している。 ΔF_c は非常に簡単に求まり，工学的意義も明確である。また，粒子破碎を表現するのに有効な指標であることがすでに示されている⁵⁾⁶⁾。ただし，粒子の割裂などの構成粒子の破碎形態をすべて表現できない点に注意は必要である⁷⁾。

以下では，美瑛火山灰質土においては静的三軸圧縮試験と透水試験を，柏原・当幌火山灰質土においては透水試験を行った。なお，柏原火山灰質土，当幌火山灰質土の三軸力学特性は既報に詳しい^{5) 6)}。

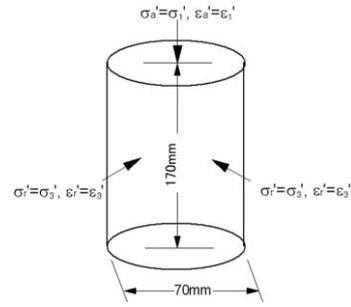


図-6 応力，ひずみの定義

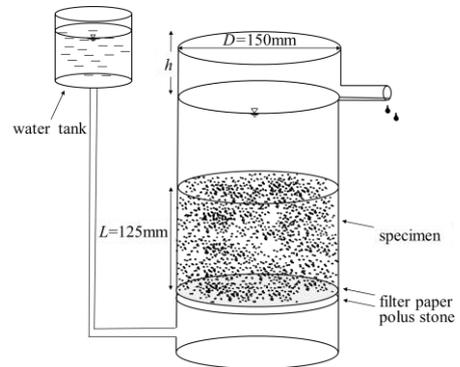


図-7 定水位透水試験機の概略図

3. 試験結果と考察

3.1 三軸圧縮試験結果

図-8(a), (b) に CU 試験での美瑛火山灰質土と豊浦砂の主応力比-主ひずみの関係を示す。図-8 から，豊浦砂はすべての有効拘束圧において破壊時の主応力比がほぼ一定となるが，美瑛火山灰質土は有効拘束圧が増加することによって破壊時の主応力比が低下していることがわかる。これは有効拘束圧の増加に伴う粒子破碎に起因したものであろう。なお，CD 試験においても同様な結果が得られている。

次に非排水試験における有効応力経路を圧密応力 σ'_c で正規化した p' - q 関係を図-9 に示す。図から，美瑛火山灰質土においては負のダイレイタンスーから正のダイ

レイタンシーに転じて破壊に至っていることがわかる。

試験中の粒子破砕量を定量的に評価するために、試験前後でふるい分け試験を行った。図-10 に試験前後の粒径加積曲線を示す。図より、9.5mm 以下のすべての土粒子径の通過質量百分率に変化(増加)が現れており、粒子破砕が起こっていることが明らかである。なお、図-10 中には、三軸圧縮試験前後での ΔF_c も併記している。図-11 に破壊時の有効平均主応力 p_r' と細粒分含有率の増加量 ΔF_c (0.075mm 以下の土粒子の増加量)の関係を、図-12 に有効平均主応力 p_r' と内部摩擦角 ϕ_d の関係を示す。破壊時の有効平均主応力の増加に伴って ΔF_c は増加し、せん断抵抗角 ϕ_d 、 ϕ' は減少していることがわかる。また、他の道内火山灰質土⁷⁾と比較すると、森火山灰質土では粒子破砕量が少なく、中標津火山灰質土では粒子破砕量が多く、美瑛火山灰質土ではその中程度の粒子破砕性を示していることがわかる。

以上のことから、既往の研究結果と同様、美瑛火山灰質土においても、粒子破砕が物理・力学挙動に与える影響は大きいことが明らかとされた。

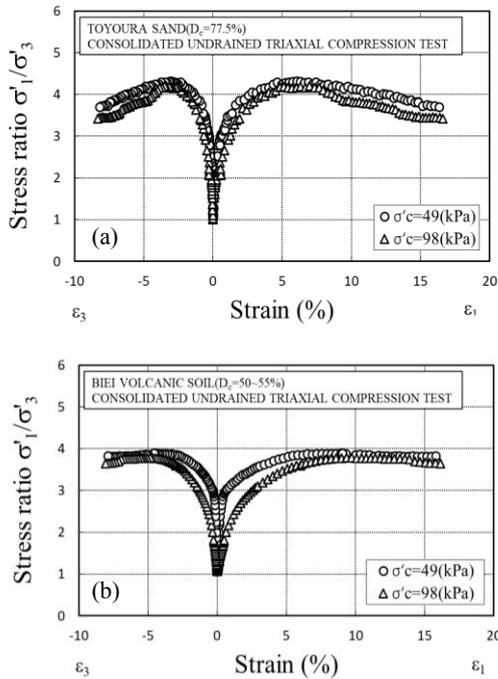


図-8 三軸圧縮試験の主応力比—主ひずみ関係 (a)豊浦砂(b)美瑛火山灰質土(非排水試験)

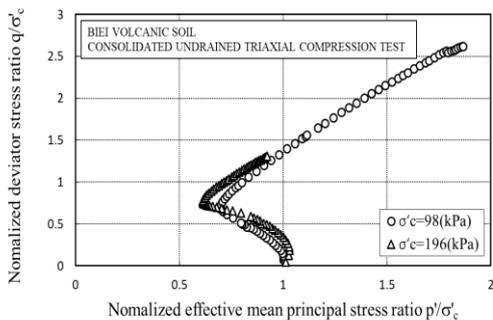


図-9 美瑛火山灰質土の非排水試験での有効応力経路

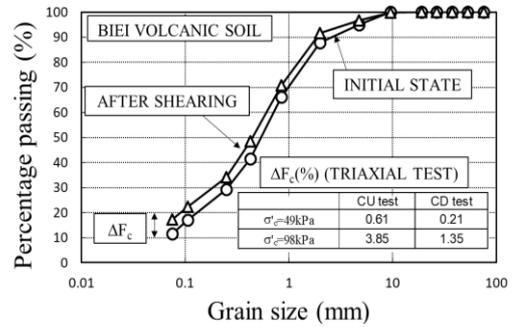


図-10 試験前後の粒径加積曲線

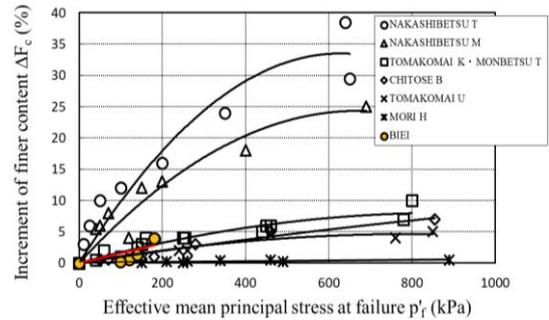


図-11 破壊時の有効平均主応力 p_r' と細粒分含有率の増加量 ΔF_c の関係

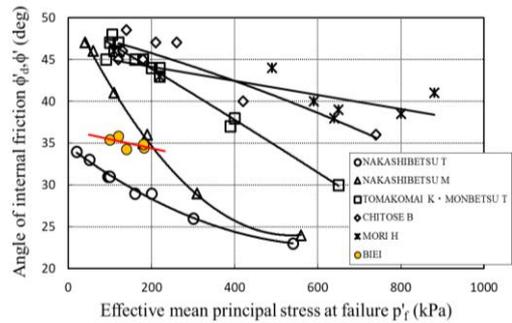


図-12 破壊時の有効平均主応力 p_r' と内部摩擦角 ϕ_d の関係

3.2 透水試験結果

前述のように、美瑛火山灰質土においても粒子破砕が力学特性に影響を及ぼすことが明らかとされた。ここではさらに、透水性に関しての粒子破砕の影響を考察する。締め固め試験の結果によれば、美瑛、柏原、当幌火山灰質土の最適含水比はそれぞれ $w_{opt}=26.5\%$ 、 $w_{opt}=75\%$ 、 $w_{opt}=121\%$ であり、最適含水比に対する含水比 w_i が $w_i/w_{opt}<0.9$ 、 $0.9<w_i/w_{opt}<1.1$ 、 $w_i/w_{opt}>1.1$ になる条件下で締め固めて透水試験を行った。

図-13(a), (b), (c) に3種類の火山灰質土における正規化した含水比と透水係数の関係と締め固め試験の関係を示す。なお、美瑛火山灰質土では湿潤側と乾燥側において透水能力が変化したため、試験毎に動水勾配を変化させている。比較のため、三軸圧縮試験装置を用いた透水試験(いずれのデータも動水勾配 $i=8.9$)を併記している。

図から、柏原火山灰質土では、含水比の増加とともに透水係数は減少し、湿潤側においては著しく透水性が低くなっている。通常の粗粒材で見られる反転(下限値)は認められない。これは粒子破砕に伴って増加する細粒

分によって間隙構造の密実化が進行途中であり、試験の範囲内では透水係数の回復は現れなかったと推察される。

一方、美瑛火山灰質土と当幌火山灰質土においては通常の粗粒土と同様に、湿潤側で透水係数の下限値が現れている。美瑛火山灰質土については、表-2 に示すように、粒子破砕量が少ないため、粒子破砕後、通常の粒状体の挙動に移行したものと考えられる。また、当幌火山灰質土では粒子破砕が卓越するものの、間隙構造が大きく（写真-1 参照）、増加した細粒分が流失したことにより透水係数が回復したと考えられる。特に、火山灰質土では非塑性の材料も多いことから、細粒土の流失ともなう透水性能の変化には十分な注意が必要である⁸⁾。

表-2 透水試験前後の粒子破砕量 $\Delta F_c(\%)$

SAMPLE NAME \ CONDITION	$w_i/w_{opt}<0.9$		$0.9<w_i/w_{opt}<1.1$	$w_i/w_{opt}>1.1$		
	2.34	1.96	2.17	1.05		
KASHIWABARA	5.48		5.60	8.25	6.06	4.12
TOUHORO	9.46		5.94, 2.63	8.35	8.60	13.37



写真-1 透水試験中の様子：(左から)美瑛火山灰質土、柏原火山灰質土、当幌火山灰質土

4. まとめ

一連の試験から、次の結論を得た。

- (1) 既往の研究結果と同様、美瑛火山灰質土においても、粒子破砕が物理・力学挙動に与える影響は大きい。
- (2) 火山灰質土の透水性能は、粒子破砕の影響と骨格構造との関係によって変化する。その評価に当たっては十分な注意が必要である。

謝辞：本研究の実施に当たり、元室蘭工業大学 丹野蒼太、幾原拓央、本学4年生 岸田航平各君の協力を得た。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 実務家のための火山灰質土-特徴と設計・施工、被災事例-, 地盤工学会北海道支部, 2010.
- 2) 横浜勝司, 高橋寛子, 三浦清一: 粗粒火山灰土の飽和透水係数に関する粒径の影響, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1071-1072, 2008.
- 3) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-, pp.373-385, 2009.
- 4) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-, pp.449-459, 2009.
- 5) 三浦清一, 八木一善, 川村志麻: 北海道火山性粗粒土の静的及び動的力学挙動と粒子破砕, 土木学会論文集 No.547/III-36, pp.159-170, 1996.
- 6) 三浦清一, 八木一善, 川村志麻: 破砕性粗粒火山灰土の繰返し非排水変形-強度特性に及ぼす応力履歴の影響, 土木学会論文集 No.547/III-36, pp.221-229, 1996.
- 7) 川村志麻, 三浦清一: 北海道に分布する風化残積土の物理・力学挙動とその工学的評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.2, pp.159-170, 2018.
- 8) Dao M. H., S. Kawamura and S. Matsumura: Internal erosion of volcanic coarse grained soils and its evaluation, International Journal of GEOMATE, Vol.13 Iss.38, pp.165-173, 2017.

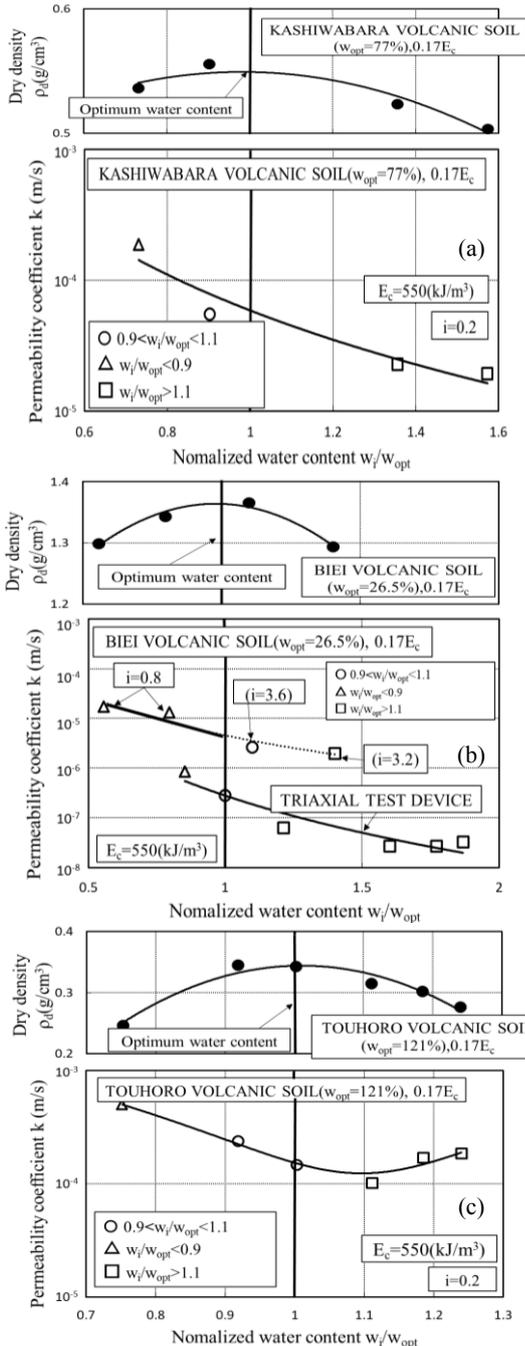


図-13 正規化した含水比と透水係数の関係と締固め曲線との関係：(a) 柏原火山灰質土, (b) 美瑛火山灰質土, (c) 当幌火山灰質土