

## 北海道火山灰土の地盤工学的特性

## Geotechnical Properties of Volcanic Ash Soils in Hokkaido

三 浦 清 一 (みうら せいいち)

北海道大学大学院教授 工学研究科

八 木 一 善 (やぎ かずよし)

㈱地崎工業 土木部 技術課長

## 1. はじめに

北海道には、第四紀火山によって生成された火山砕屑物が広域に分布し、いわゆる火山灰地盤は軽石、火山灰、スコリアの一次あるいは二次堆積物で構成されている。火山砕屑物は噴火様式によって降下火砕堆積物 (fa) と火砕流堆積物 (軽石流堆積物: fl) に大別できるが、地盤工学的性質は噴火様式、堆積条件や堆積環境だけではなく、主体となる粒子の特性によっても変化している。

本報告では、まず北海道火山灰土の代表的な物理的性質を示した。ついで粗粒な火山灰土は破碎性を有し、その力学的性質は通常の砂とは異なる<sup>1),2)</sup>ことが明らかにされている。さらに  $N$  値と内部摩擦角、見かけの粘着力の関係を調べ、粒子破碎の影響について考察した。また北海道周辺で生じた地震により自然地盤や盛土の液状化被害が多発していることから、被災した火山灰土の液状化特性についても示した。なお、結果を得た室内試験の方法は、すべて地盤工学会基準に準じている。

## 2. 北海道火山灰土の物理的性質

北海道には多数の第四紀火山が存在し、それらから噴出した火山灰土は火山名、噴出年代、噴火様式により記号化されている<sup>3)</sup>。

表-1に、代表的な火山灰土の物理的性質を示す。なお、物理的性質のデータは風化あるいは二次堆積によるローム化したものを除去し、 $F_c \leq 50\%$ の粗粒な火山灰土について整理している。

北海道火山灰土の物理的性質は、火山灰記号によって区分すると特徴を見出すことができる。例えば、Spfa-1やMa-1のような多孔質な軽石を主体とする火山灰土では、土粒子の密度や湿潤・乾燥密度が極めて小さな値となり、自然含水比や間隙比は逆に高い値となる。これは多孔質な軽石に多くの粒子内間隙が存在するためである。また多孔質で風化しているほど粒子は脆弱であり、破碎性土としての力学的特異性を強く示すようになる。

一方、Ko-dやSpfa-7のように粒子内間隙が乏しく粒子に重鉱物を含む場合は、自然含水比や間隙比が低く土粒子の密度は砂より高い値となることもある。このような火山灰土の粒子は十分な硬度をもっている。

火山から空中放出された後に堆積した降下火砕堆積物は、ほとんど固結しておらず空中運搬時の粒径淘汰により細粒分が少なくなる。その傾向は火山に近くなるほど顕著であり、 $F_c$ が5%以下になることも珍しくはない。

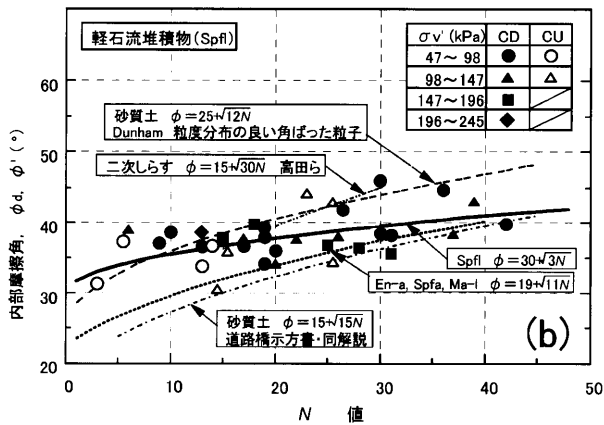
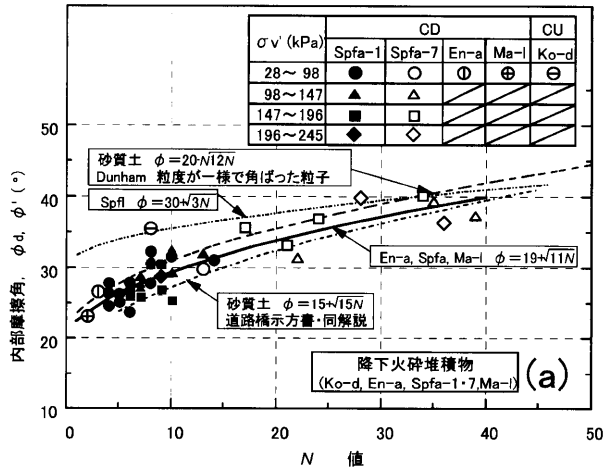
一方、火山から軽石、スコリア、火山灰が高熱および混合状態で流下堆積した火砕流堆積物では細粒分が増加し、深い位置では溶結作用によってやや固結している。

表-1 代表的な北海道火山灰土の物理的性質 ( $F_c \leq 50\%$ のもの)

	火 山	火山灰記号	$\omega_n$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$F_c$ (%)	礫分含有率 (%)	$\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e$	
降下火砕堆積物	樽 前	Ta-a	Pfa	10~30	2.6~2.8	0~10	10~60	1.2~1.5	1.0~1.3	1.0~2.0
		Ta-b	Pfa	30~40	2.7~2.8	0~10	60~80	----	----	----
		Ta-c	Pfa	10~40	2.7~2.8	0~20	10~60	1.4~1.6	1.0~1.3	1.0~2.0
		Ta-d	Pfa	140~210	2.4~2.7	0~10	70~90	0.9~1.3	0.3~0.6	3.0~8.0
	恵 庭	En-a	Pfa	50~110	2.6~3.0	0~30	0~60	1.1~1.6	0.6~1.1	1.5~4.0
		クッタラ	Kt-1	Pfa	40~90	2.4~2.8	0~10	10~40	1.4~1.8	0.6~1.3
	支 笏	Spfa-1	Pfa	30~150	2.1~2.6	0~20	20~80	0.7~1.6	0.4~1.0	1.0~5.0
		Spfa-7	Sfa	20~40	2.7~3.0	0~20	10~50	1.4~1.9	1.1~1.5	1.0~1.5
		Spfa-10	Pfa	30~70	2.7~2.9	0~20	0~10	1.6~1.8	0.9~1.3	1.0~2.0
	有 珠	Us-b	Pfa	10~70	2.6~2.8	0~30	10~70	----	----	----
駒ヶ岳	Ko-d	Pfa	20~50	2.5~2.9	0~10	0~30	1.7~1.8	1.4~1.5	0.5~1.0	
摩 周	Ma-1	Pfa	70~170	2.1~2.6	0~30	20~80	0.8~1.4	0.2~0.8	2.0~7.0	
火砕流堆積物	銭亀女那川	Z-M	Pfl	20~40	2.7~2.8	20~50	0~20	1.9~2.0	1.5~1.6	0.5~1.0
	支 笏	Spfl	Pfl	20~80	2.1~2.5	10~50	0~30	1.1~1.6	0.7~1.3	1.0~4.0
	洞 爺	Toya	Pfl	10~50	2.3~2.7	20~50	0~20	1.2~1.8	1.0~1.4	0.5~2.0
	クッタラ	Kt	Pfl	10~90	2.3~2.8	0~50	0~40	----	----	----
	十勝三又	Tok	Pfl	20~40	2.4~2.5	20~50	10~30	1.4~1.5	1.0~1.2	0.5~1.0
	屈斜路	Kcfl	Pfl	10~50	2.4~2.7	20~50	0~40	1.2~1.7	1.0~1.5	0.5~2.0

Pfa: Pumice fall deposit (降下軽石) Sfa: Scoria fall deposit (降下スコリア) Pfl: Pumice flow deposit (軽石流堆積物)

 $\omega_n$ : 自然含水比  $\rho_s$ : 土粒子の密度  $F_c$ : 細粒分含有率  $\rho_t$ : 湿潤密度  $\rho_d$ : 乾燥密度  $e$ : 間隙比



図一 1 N値と $\phi$ の関係；(a)降下火砕堆積物，(b)軽石流堆積物

### 3. 北海道火山灰土のせん断特性とN値

図一 1 に、乱さない火山灰土に対する排水・非排水三軸圧縮試験による内部摩擦角  $\phi_d, \phi'$  と N 値との相関<sup>2)</sup>を示す。図には、砂地盤<sup>4)</sup>やしらす地盤<sup>5)</sup>の関係も示した。

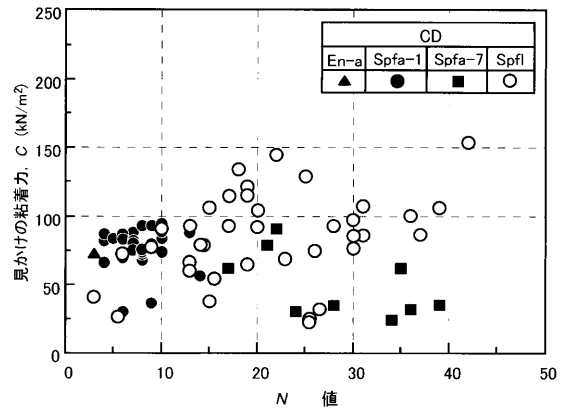
降下火砕堆積物の N 値は、粒子が硬い降下スコリア Spfa-7 を除くと大半が 10 以下の値である。また、多くは破碎性土であるにもかかわらず  $\phi$  と N 値の関係は砂地盤のそれと大差がない。この理由は三軸圧縮試験と標準貫入試験の際に粒子破碎が生じ、 $\phi$  と N 値に及ぼす両者の影響が低減されているためと考えられている<sup>2)</sup>。

一方、軽石流堆積物の Spfl は浅い深度で N 値が 15 以下となるが、溶結作用による固結の影響により深度（あるいは有効土被り圧  $\sigma'_v$ ）が増加すると N 値が 15 以上の値となる。また N 値が低くなると、砂地盤の場合よりも  $\phi$  の値が高くなることが理解できる。なお、北海道火山灰土に関する N 値と  $\phi$  の関係は次式で整理することができる。

$$\text{降下火砕堆積物} : \phi = 19 + \sqrt{11N} \quad (0 < N \leq 40) \quad \dots(1)$$

$$\text{軽石流堆積物} : \phi = 30 + \sqrt{3N} \quad (0 < N \leq 40) \quad \dots(2)$$

図一 2 は、排水三軸圧縮試験結果による見かけの粘着力  $c$  と N 値の関係<sup>2)</sup>である。固結効果を有する Spfl では N 値が高くなるほど  $c$  が増加する。しかし、降下軽石 En-a と Spfa-1 では固結の程度が低いにもかかわらず低い N 値で高い  $c$  値が示される。この理由は、破碎



図一 2 北海道火山灰土の N 値と  $c$  の関係

表一 2 代表的な北海道火山灰土の液状化事例

地震名	M	地点	液状化した火山灰土
1968年十勝沖地震	7.9	札幌市	軽石流Spfl(盛土)
1993年釧路沖地震	7.8	釧路市	軽石流Kcfl二次堆積(盛土)
		標茶町	軽石流(盛土)
1993年北海道南西沖地震	7.8	森町 七飯町	降下軽石・火砕流(駒ヶ岳起源 自然堆積)
1994年北海道東方沖地震	8.1	標茶町	軽石流(盛土)
		中標津町	降下軽石Ma-l(自然堆積)
		端野町	軽石流Kcfl(盛土)
2003年十勝沖地震	8.0	札幌市	軽石流Spfl(盛土)
		端野町	軽石流Kcfl(盛土)

性火山灰土のせん断強度を応力円解析で評価すると応力が高くなるほど粒子破碎によって応力円は小さくなり、 $\phi$  の低減と  $c$  の過大評価が生ずるためと考えられる。

このように、北海道火山灰土には室内および原位置試験時に粒子破碎が生じるものがあり、その力学特性の評価において粒子破碎は無視できない問題となっている。

### 4. 北海道火山灰土の液状化事例と動的力学特性

表一 2 は火山灰土の代表的な液状化事例を示している。火山灰土の液状化は Spfl や Kcfl などの軽石流堆積物による盛土で多発したが、摩周降下軽石 Ma-l の自然堆積地盤でも液状化は生じた。その被害は沢地形を埋め立てた場合に著しくなるが、被害の詳細は既報<sup>3)</sup>で記されている。

表一 3 に、液状化発生箇所から採取した火山灰土の物理的・示標的性質を示す。駒ヶ岳起源の火山灰土を除くと、土粒子の密度は  $2.5 \text{ g/cm}^3$  以下である。また液状化した降下軽石の粒子は脆く、粒子破碎が生じやすいものであった。さらに、軽石流堆積物に含まれる  $75 \mu\text{m}$  以下の粒子は粘土分が乏しくシルト分が卓越する。これは、あまり風化していない軽石流堆積物の特徴であり、原位置試料や試料に含まれる細粒分は非塑性になることがほとんどである。

次に図一 3 は、液状化した摩周降下軽石 Ma-l、支笏および屈斜路軽石流堆積物 Spfl, Kcfl の再構成供試体に関する液状化強度を表している。図中には、比較のため

表-3 液状化した北海道火山灰土の物理的性質

地震名 地点	1993年北海道南西沖地震		1994年北海道東方沖地震		2003年十勝沖地震	
	森町赤井川		標茶町茅沼	中標津町市街	札幌市清田	端野町協和
火山灰土	駒ヶ岳火砕流 (自然堆積)	駒ヶ岳降下軽石 (自然堆積)	火砕流堆積物 (盛土)	摩周降下軽石 Ma-1 (自然堆積)	支笏軽石流 Spfl (沢部盛土)	屈斜路軽石流 Kcfl (沢部盛土)
自然含水比 $w_0$ (%)	11.8	23.7	---	---	51.7	20.0~61.4
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.73	2.84	2.38	2.34	2.28	2.48
50% 粒径 $D_{50}$ (mm)	0.19	0.65	0.30	4.0	0.20	0.31
礫分 (%)	0	10.0	1.0	64.0	15.6	11.6
砂分 (%)	76.0	86.3	93.3	35.8	57.5	69.5
シルト分 (%)	13.0	3.7	5.7	0.2	18.4	16.6
粘土分 (%)	11.0				8.5	2.3
液性限界 $w_l$ (%)	---	---	---	---	68.1	56.1
塑性指数 $I_p$	---	---	---	---	N.P.	N.P.

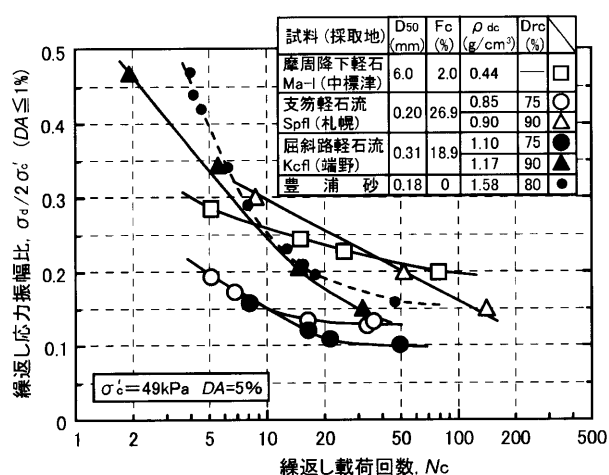


図-3 液状化した北海道火山灰土の液状化強度線

に相対密度が80%の密な豊浦砂に関する結果もプロットしている。なお、これらの繰返し非排水三軸試験（有効拘束圧  $\sigma'_c = 49$  kPa）の結果は、両振幅軸ひずみ  $DA$  が5%のものについて示している。

Spfl と Kcfl は液状化発生箇所にて採取しているが、Ma-1 は被災箇所から数 km 離れた切土面で採取した。その Ma-1 層の原位置の乾燥密度は  $0.34 \sim 0.54$  g/cm<sup>3</sup> の範囲にあるため、供試体の圧密後の密度  $\rho_{dc}$  を  $0.44$  g/cm<sup>3</sup> と定めている。Spfl と Kcfl については、圧密後の相対密度  $D_{rc}$  が75%と90%になるよう供試体を作製した。ただし、いずれの火山灰土も現在の最大・最小密度試験で適用できる粒度の範囲外であるため、相対密度は参考値である。

原位置密度状態にある Ma-1 は、液状化強度が密な豊浦砂よりもやや高くなる。ただし、Ma-1 は細粒分が乏しく粗粒な軽石であるため、メンブレンペネトレーションの影響によって液状化強度が過大に評価<sup>2)</sup>されている可能性もある。

一方、軽石流堆積物の液状化強度は  $D_{rc} = 90\%$  の場合に Kcfl で密な豊浦砂とほぼ同等、Spfl では豊浦砂よりもやや高くなる。しかし、わずかな  $\rho_{dc}$  の低下によって液状化強度は著しく低下し、相対密度75%に相当する両火山灰土の液状化強度は豊浦砂よりもかなり低いものとなる。このような傾向は鹿児島ものしらす ( $D_{50} = 0.17$

mm,  $F_c = 35\%$ ) に関する試験結果<sup>6)</sup>でも示されている。したがって軽石流堆積物を用いた盛土では、締固め密度の管理基準値の設定が耐震性を考慮する上で重要なポイントとなる。

## 5. まとめ

北海道に分布する火山灰土について、その物理的性質と力学的性質の特徴について述べた。示したデータは  $F_c$  が50%以下になる粗粒土に関するものであるが、風化物あるいは二次堆積物には細粒な火山灰土も存在するために、それらの地盤工学的特性は極めて変化に富んでいる。

火山灰土の物理的性質は、火山噴出の際の条件（噴火様式）、粒子の多孔質性および含有鉱物の影響を大きく受ける。また力学的性質では、試験時に生ずる粒子破碎や軽石流堆積物が保有する固結効果の影響が顕著に現れる。これらの要因が、火山性地盤の工学的特性を特異的なものにしていく。

また地震が多発した北海道では、火山灰土の耐震性能評価が緊急の課題となっている。特に軽石流堆積物の盛土は液状化被害が多いことから、軽石や非塑性細粒分を含む火山灰土の動的力学特性を把握しておく必要がある。

## 参考文献

- 1) Miura, S., Yagi, K. and Asonuma, T.: Deformation-strength evaluation of crushable volcanic soils by laboratory and in-situ testing, Soils and Foundations, Vol. 43, No. 4, pp. 47~57, 2003.
- 2) 八木一善・三浦清一: 破碎性火山灰地盤の力学特性の評価, 土木学会論文集, No. 757/III-66, pp. 221~234, 2004.
- 3) 北海道火山灰土の性質と利用に関する研究委員会: 実務者のための火山灰土, 地盤工学会北海道支部, 2004.
- 4) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 2004.
- 5) 高田 誠・北村良介・北田貴光: 二次しらす地盤の力学特性の評価, 土木学会論文集, No. 561/III-38, pp. 237~244, 1997.
- 6) 兵動正幸・荒牧憲隆・岡林 巧・中田幸男・村田秀一: 破碎性土の定常状態と液状化強度, 土木学会論文集, No. 554/III-37, pp. 197~209, 1996.

(原稿受理 2005.1.7)