

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：82629

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760448

研究課題名(和文) 粒子の弾塑性変形と破砕に着目した多孔質粒状体の強度変形特性と地盤調査法の提案

研究課題名(英文) Strength and deformation properties of porous granular material and proposing of ground investigation method with focusing on elast-plastic deformation and crushing of its particle

研究代表者

吉川 直孝 (Kikkawa, Naotaka)

独立行政法人労働安全衛生総合研究所・建設安全研究グループ・研究員

研究者番号：60575140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：細粒火山灰土(軽石)の微視的な特性(マイクロCTスキャン、単粒子破砕試験等)からより巨視的な特性(コーン貫入試験等)を評価するため、一連の実験及び解析を実施し、下記の結果を得た。軽石粒子の破砕強度が、他の砂粒子(例えば、石英系の砂である豊浦砂)に比べ著しく小さいことを明らかにした。軽石のコーン貫入時の先端抵抗も豊浦砂に比べ著しく小さく、それは粒子の破砕強度の小ささに起因していた。軽石及び豊浦砂のコーン貫入時の規準化先端抵抗と周面摩擦比をRobertsonの土質分類図にプロットしたところ、軽石と豊浦砂との相違が確認でき、軽石層をRobertsonの土質分類図から判別できる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the macro-properties from the micro-properties of pumice sand, a series of experimental tests and simulations were performed. As a result, the crushing strength of pumice sand particle was much smaller than that of the other sand particle (e.g. silica sand such as Toyoura sand). The tip resistance of pumice sand during cone penetrating was also much smaller than that of Toyoura sand, it was because of much small particle crushing strength. The normalized tip resistance and ratio of sleeve friction of pumice sand and Toyoura sand were plotted on the Robertson's soil classification figure and both are distinguished easily and it is supposed to judge if the pumice sand layer were existing on a site with the Robertson's soil classification figure.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：軽石 コーン貫入試験 個別要素法 画像解析

1. 研究開始当初の背景

細粒火山灰土(ここでは「軽石」という。)は火山地帯に必ずといっていいほど存在する。火山が噴火した際、まず軽石が空中に噴き上げられ、風に乗って遠く飛ばされ、地表に堆積するからである。例えば、鹿児島県の桜島、北海道の有珠山、関東の浅間山などが有名であり、日本各地に軽石は存在する。厚いところでは1~2mも堆積している。空からの降下物であるため、そこに緩い斜面があれば斜面と平行に堆積する。これが大きな災害を引き起こす要因となる。

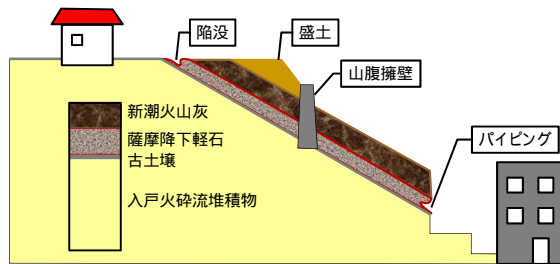


図-1 宇宿町崩壊地模式断面図

1976年6月25日、鹿児島市宇宿町の斜面が高さ約30m、幅約50mにわたってくずれ落ち、がけ下の民家5棟を押しつぶして9人の死者を出した。図-1のように、この斜面には軽石層があり、軽石は粗粒なため、地下水の透水層となっていた。それに対し軽石層直下の古土壌は不透水層となり、軽石層最下部は常に水で洗われ、粘土化が促進されていた。台地上では団地開発に伴って軽石層を露出させ、雨水の浸透を許していた。同時に、斜面下では、ベンチカットして宅地を造成する際、軽石層を露出させ、浸透した地下水の出口を作ってしまった。軽石は粒子内部に間隙が多く水に浮くため、容易に流出してしまい、台地下でパイピングが発生、粘土化した部分がすべり面となって、軽石層がすべった。

このように、火山地帯の土砂崩壊災害には軽石層が起因になっている可能性が高い。そこで、軽石層の有無を地盤調査で明らかにすることで、事前に災害を防げる可能性がある。また、現在所属している機関では、労働災害調査の際に、土質や地盤強度を特定する必要があり、地盤調査法としてコーン貫入試験を採用している。

2. 研究の目的

静的コーン貫入試験(地盤工学会, 2004)は、地盤の深さ方向に連続的にコーン3成分(先端抵抗値, 周面摩擦, 間隙水圧)を計測し、それらの値から土質分類, 相対密度, せん断抵抗角, 液状化強度比を求める地盤調査法であり、情報量, 汎用性ともに高い。

しかしながら、軽石のコーン先端抵抗値は、相対密度の大小に依存せず、値も小さい(Wesley et al., 1999)。また、コーン3成分を

用いたRobertson(1990)の土質分類チャートに軽石の項目はなく、軽石の先端抵抗値が小さいために本来砂質土である箇所をシルト質土と誤ることが報告されている(武居ら, 1994)。このように国内外で新たな評価法の必要性が言及されているが、軽石層を判別できるまでに至っていない。

本研究では、軽石を用いてコーン貫入試験および三軸試験を行う。また、スキャンした軽石砂粒子のデータから、個別要素法(Distinct Element Method: DEM)により、多孔質粒子をシミュレートし、粒子の破碎挙動を理解する。このように、実験・解析の両面から、多孔質粒状体の挙動の理解とコーン貫入試験結果の解釈方法を提案する。Robertson(1990)の土質分類チャート上で軽石の範囲を記載することが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、軽石のコーン貫入特性を把握するため、種々の実験・解析を実施した。以下に、用いた試料とそれらの方法について述べる。

本研究で用いた試料は、軽石と豊浦砂である。日本の軽石(ここでは「軽石」という。)は、鹿児島県南部大隅半島に位置する鹿屋市根木原地区から採取したものである。同軽石はおよそ2万5千年以上前に始良カルデラが大噴火を起こした際、爆発によって空中高く飛散し大隅半島に降下堆積したものである。降下軽石層とも呼ばれ規則正しく成層している。

ニュージーランドの軽石(ここでは「NZ軽石」という。)は、Taupo Volcanic Zoneと呼ばれる火山帯域から採取し分級したものである。

表-1 軽石、NZ軽石及び豊浦砂の物性値

	土粒子の密度 (g/cm ³)	最大 乾燥 単位 体積 重量 (kN/m ³)	最小 乾燥 単位 体積 重量 (kN/m ³)
軽石 (0.15-0.3mm)	2.489	6.406	4.336
NZ軽石 (-1.18mm)	2.340	6.950	5.650
豊浦砂	2.640	16.14	13.10

軽石、NZ軽石及び豊浦砂の物性値を表-1に示す。

弾性波速度測定試験、三軸圧縮試験、繰返し非排水三軸試験、コーン貫入試験の場合、

豊浦砂の粒度分布と同様になるよう、粒径0.15~0.3mmの軽石を用いた。軽石は豊浦砂と気乾状態で同等の粒度分布となるよう調整した。ただし、ふるいの上で水洗いし粒度分布をもとめると、細粒分を多く含むことが明らかとなっている。

一方、マイクロCTスキャン、単粒子破碎試験の場合、比較的大きい粒子でなければ試験を実施することが困難なため、粒径0.85~2.0mmの軽石及びNZ軽石を用いた。単粒子破碎試験では同粒径の軽石粒子から無作為に30個の粒子を抽出し試験に供した。

(1) マイクロCTスキャンの画像解析

研究協力者である Prof. Pender と Dr. Orense の協力のもと、ニュージーランドのオークランド大学が保有するマイクロCTスキャン装置を用いて、0.85mm~2.0mmの粒径を有する粒子1つをマイクロCTスキャン装置にセットし、粒子の断面画像を取得した。軽石粒子を計3個、NZ軽石粒子は計30個ほどスキャンした。解像度は8 μ m/voxelであり、粒子内部の間隙構造も可視化できる。得られた画像は、密度の濃淡画像であるため、閾値を設けることにより、固体と液気体に2値化できる。2値化画像から、粒子のかさばりの密度、粒子形状等を3次的に解析した。

(2) 単粒子破碎試験

軽石粒子30個に対して、単粒子破碎試験を実施した。単粒子破碎試験は、上下の載荷板により、粒子1個を圧縮し破碎させる試験であり、圧縮時の荷重と変位の関係が得られる。

山口大学が所有する単粒子破碎試験機を用いて同試験を実施した。載荷板上に最も安定な状態となるように1つの粒子を設置し、上下の載荷板で同粒子を圧縮し破碎させる。載荷中の荷重および変位を計測し、粒子の破碎強度を求めた。試験方法は加登(2004)に詳しい。

(3) 要素試験

ベンダー/エクステンダーエレメント試験を実施し、軽石と豊浦砂のP波及びS波速度(V_p , V_s)を計測した。2枚の圧電素子を用い、結線方法を変えることにより、P波およびS波を比較的容易に送受信できる。測定方法は吉川ら(2013)に詳しい。

また、軽石に対して、静的(三軸圧縮試験、等圧密試験)、動的(繰返し非排水三軸試験)な要素試験を実施した。

今回実施した静的試験は、圧密排水三軸圧縮試験及び等圧密試験である。試験前後の粒度分布を計測し、軽石の粒子破碎の程度を初期粒度分布との相違から検討している(図-2参照)。供試体作製後の初期状態での乾燥単位体積重量は5.65kN/m³である。これは、相対密度 $D_r=72\%$ である。負圧-20kN/m²を載荷し自立させるとより密になり、乾燥単位体積

重量 $\gamma_d=5.70\sim5.72$ kN/m³(相対密度 $D_r=74\sim75\%$)となった。

繰返し非排水三軸試験は、地盤工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法(JGS 0541)」に準拠し実施した。有効拘束圧100kN/m²(背圧100kN/m²)とした。圧密前の乾燥単位体積重量は、 $\gamma_d=5.41\sim5.48$ kN/m³(相対密度 $D_r=61\sim65\%$)であり、有効拘束圧100kN/m²の圧密後、乾燥単位体積重量は、 $\gamma_d=5.72\sim5.86$ kN/m³(相対密度 $D_r=75\sim80\%$)であり、静的な試験の密度と同等である。繰返し荷重の載荷周波数は0.1Hzとした。

(4) DEM解析

CTスキャン画像を基にDEMのプログラム上で軽石粒子(ここでは「DEM軽石粒子」という。)を表現した。DEM軽石粒子に対して、DEMのプログラム上で単粒子破碎試験を実施した。

(5) 遠心模型実験装置を用いたコーン貫入試験

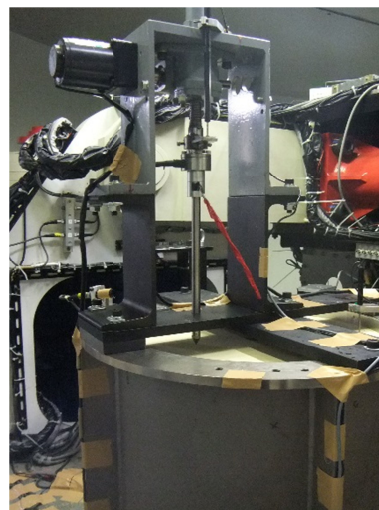


図-2 遠心模型実験装置を用いたコーン貫入試験

豊浦砂及び軽石に対してコーン貫入試験を実施した(図-2参照)。各試料を用いて、高さ50cm、直径49cmの円筒形の土槽内に地盤を作製した。同地盤を遠心模型実験装置により50Gまで載荷した状態で、コーン(直径15mm)を計4箇所に入力した。コーン貫入中、先端抵抗と周面摩擦を計測した。豊浦砂の乾燥単位体積重量は、 $\gamma_d=15.8$ kN/m³(相対密度 $D_r=90\%$)とした。軽石の乾燥単位体積重量は、1Gにおいて $\gamma_d=5.64$ kN/m³($D_r=72\%$)、50G載荷後 $\gamma_d=6.00$ kN/m³($D_r=86\%$)となった。コーンの貫入速度は50G場の実地盤換算で20.0mm/secとした。

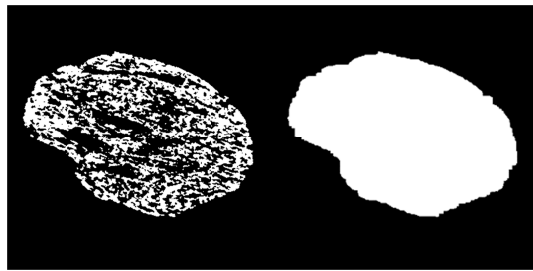
4. 研究成果

(1) マイクロCTスキャンの画像解析¹⁾

水平断面画像を図-3に示す。同図(a)より、NZ軽石粒子が内部に間隙を多く有する多孔

質の粒子であることがわかる。同図(b)は、粒子内部の間隙を固体として表現した画像である。同画像を用いて、粒子のかさばりの体積を算出した。

図-4は、NZ 軽石粒子 30 個に対して、粒子のかさばりの密度とその頻度を示したヒストグラムである。同図から、軽石粒子のかさばりの密度は 0.89g/cm^3 となり、水の密度 (1.0g/cm^3) よりも小さい。つまり、軽石粒子は水に浮く。



(a) (b)

図-3 NZ 軽石粒子の断面画像

(a)2 値化画像, (b)粒子のかさばり

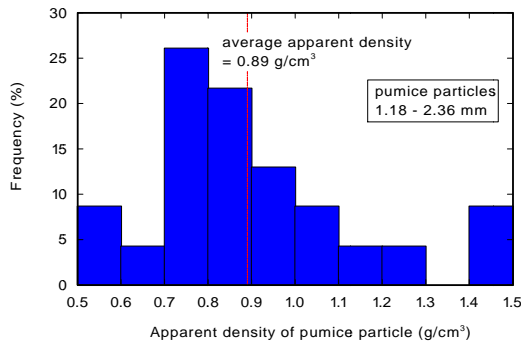


図-4 粒子のかさばりの密度とその頻度

(2) 単粒子破砕試験

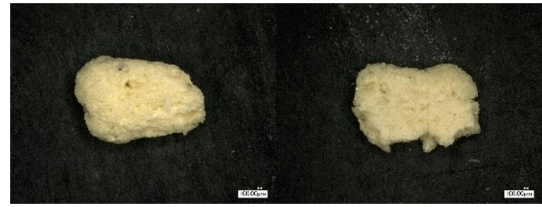
単粒子破砕試験前後の粒子を顕微鏡にて観察したところ、図-5 のように粒子が破砕することなく、押し潰されるように変形していることがわかる。

粒子の半径ほど変位させるまでに示した最大の荷重を破砕荷重とし、単粒子破砕強度を次式(1)により求めた。

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_0^2} \quad (1)$$

ここで、 σ_f : 単粒子破砕強度 (MN/m^2)、 F_f : 粒子の半径ほど変位させるまでに示した最大の荷重 (N)、 d_0 : 上下の載荷板が粒子に接触し始めた時の上下の載荷板の距離 (mm) である。

軽石粒子と他の粒子の σ_f と粒径の関係を図-6 に示す。軽石粒子の σ_f は 30 個の平均値を示した。同図から軽石粒子の強度は他の粒子に比べ著しく小さいことがわかる。



(a) 試験前 (b) 試験後

図-5 単粒子破砕試験前後の軽石粒子

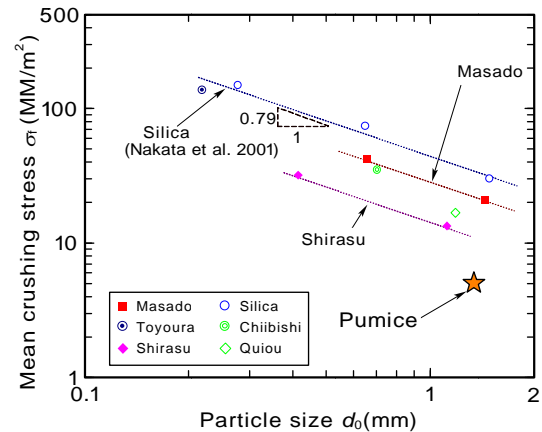


図-6 単粒子破砕強度と粒径の関係

(3) 要素試験^{2),3),5)}

軽石と豊浦砂の弾性波速度等の比較を表-2 に示す。同表から軽石の V_p 、 V_s は豊浦砂の 0.6 倍である。同表に示す弾性波速度は、次項の DEM 解析にて使用する。

表-2 弾性波速度試験結果

	P 波速度 V_p m/sec	S 波速度 V_s m/sec
軽石	245	163
豊浦砂	403	254

図-7 に軽石と豊浦砂 (Fukushima and Tatsuoka (1984)) の軸差応力と軸ひずみの関係、体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。豊浦砂のデータは、Fukushima and Tatsuoka (1984) から読み取った。拘束圧 29.4kPa 時の間隙比 $e_{0.3}$ は、 $0.829\sim 0.835$ である。相対密度を揃えなかった理由は、軽石と豊浦砂では最大最小乾燥単位体積重量、間隙比が大きく異なり、相対密度を揃えたとして意味をなさないからである。それよりは、より最大最小乾燥単位体積重量、間隙比が近くなる条件で比較を行った。つまり、軽石については相対密度が比較的大きい状態、豊浦砂については相対密度が比較的小さい状態である。

図-7 上図から、軽石は、軸ひずみの増加とともにほぼ一直線上に軸差応力が上昇している。拘束圧約 100kPa において、軸ひずみ

10%程度まで豊浦砂の軸差応力が大きい。拘束圧約 200kPa では軸ひずみ 15%程度まで、拘束圧約 400kPa では軸ひずみ 19%程度まで豊浦砂の軸差応力が大きい。

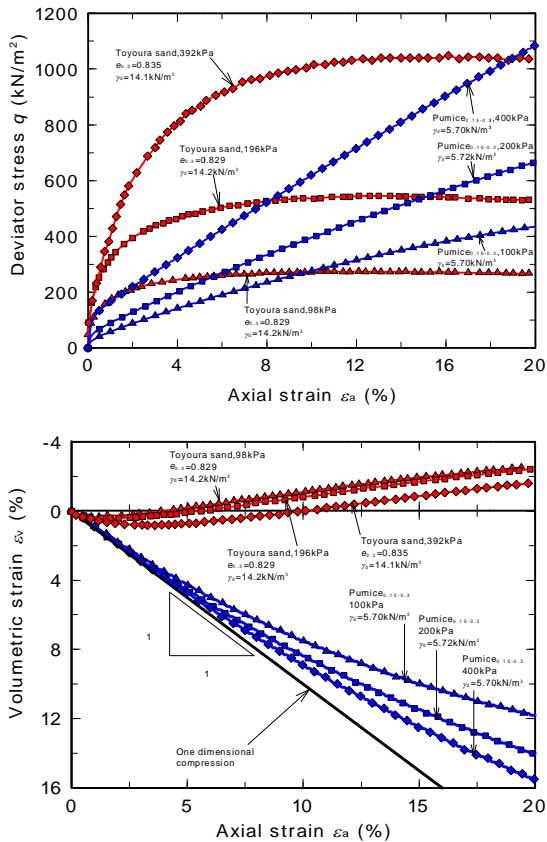


図-7 豊浦砂と軽石 (0.15 ~ 0.3mm) の応力ひずみ関係 (圧密排水三軸圧縮試験)

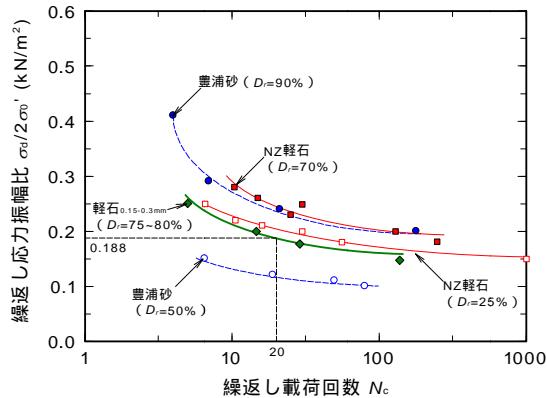


図-8 繰返し応力振幅比と繰返し载荷回数との関係

一方、図-7 下図から、豊浦砂は軸ひずみの増加とともに体積膨張を呈しているのに対し、軽石は収縮一方の挙動を呈している。さらに、同図には $\epsilon_v/\epsilon_a=1$ の線を示している。この線上に体積ひずみと軸ひずみの関係がある場合、それは側方ひずみが0のまま、軸方向に圧縮されていることを示す。軽石の挙動を見ると、軸ひずみ 5%まで、同線上に体積

ひずみと軸ひずみの関係が位置しており、載荷初期に軸方向のみに圧縮されていることがわかる。豊浦砂は緩い密度の供試体ではバルジ型に変形することが知られているが、軽石はこのようにほとんど軸方向のみに圧縮されるため、著しく圧縮性の卓越する材料であることがわかる。

繰返し非排水三軸試験から、軽石、NZ 軽石及び豊浦砂の繰返し応力振幅比と繰返し载荷回数との関係を図-8 に示す。同図から、軽石の繰返し応力振幅比は豊浦砂に比べ小さい値を示している。

(4) DEM 解析

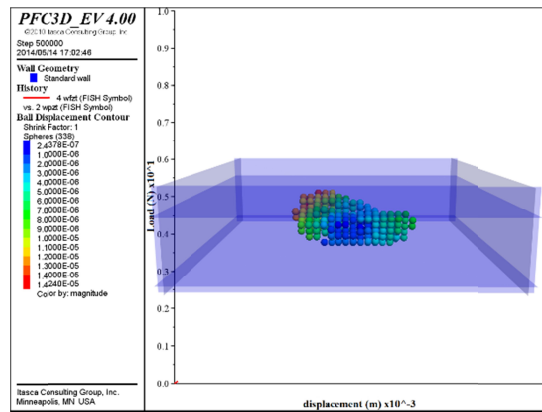


図-9 DEM による軽石粒子の表現

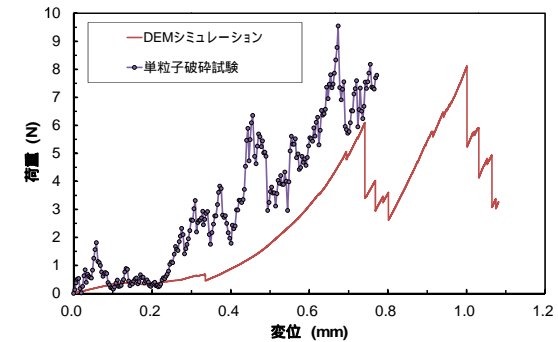


図-10 DEM 軽石粒子に対する単粒子破砕試験時の荷重と変位の関係

CT スキャンにより得られた軽石粒子の 3次元画像から、DEM のプログラム上で軽石粒子を 3 次的に表現した。図-9 に DEM により表現された軽石粒子を示す。球要素 338 個を用い、各球要素間の接触面には、線形ばねを適用した。また、各球要素の接触面にボンドを付加した。ボンドは、球要素間を結合させるような働きがあり、引張応力、せん断応力、曲げモーメントに抵抗する。球要素及びボンドの線形ばねは、軽石の弾性波速度 (V_p , V_s) から算出した。また、ボンドの強度は単粒子破砕強度から決定した。

CT スキャンにより得られた軽石粒子の固体部分の体積と DEM により表現された軽石粒子の球要素の体積は同等となるようにし

た。また、CT スキャンにより得られた画像を基に球要素の位置を決定しているため、粒子内部の間隙の位置もおおよそ再現されている。

単粒子破砕試験と同様に、DEM 軽石粒子に対して上下の載荷板により圧縮し、その時の荷重と変位の関係をもとめた。図-10 に荷重と変位の関係を示す。DEM 軽石粒子による荷重変位関係と単粒子破砕試験による同関係がよく一致しており、DEM により粒子の破砕挙動を表現できることが示唆された。

(5) 遠心模型実験装置を用いたコーン貫入試験

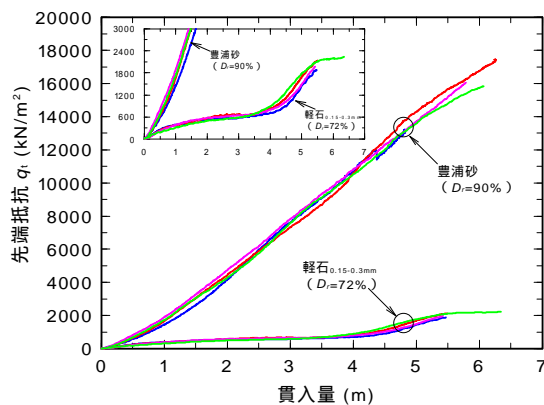


図-11 先端抵抗と貫入量との関係

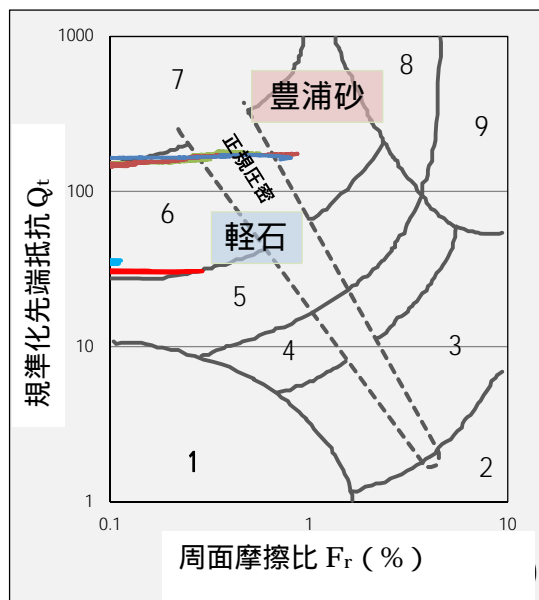


図-12 基準化先端抵抗と基準化周面摩擦比の関係

コーン貫入中の先端抵抗と貫入量の関係を図-11 に示す。豊浦砂、軽石ともに貫入量の増加とともに先端抵抗も上昇している。しかしながら、軽石の先端抵抗の値は著しく小さく、貫入量 5.0m の時、豊浦砂の 0.12 倍程度である。

規準化先端抵抗と周面摩擦比の関係を図

-12 に示す。同図から、豊浦砂、軽石ともに分類 6「シルト質砂～きれいな砂」に属すが、豊浦砂はより規準化先端抵抗が高く、軽石はより周面摩擦比が小さいため、分類 6 を細分化することにより、軽石層を判別することが可能になると示唆される。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計2件)

- 1) Kikkawa, N., Orense, R.P. and Pender, M.J.: Observations on microstructure of pumice particles using computed tomography, *Canadian Geotechnical Journal*, Vo. 50, pp. 1109-1117, 2013.
- 2) 吉川直孝, Pender, M.J. and Orense, R.P.: 粒子の弾塑性変形と破砕に着目した多孔質粒状体の強度変形特性と地盤調査法の提案, 平成 24 年版建設業安全衛生年鑑, p.88, 2012.

(学会発表)(計3件)

- 3) Kikkawa, N., Pender, M.J. and Orense, R.P.: Comparison of the geotechnical properties of pumice sand from Japan and New Zealand, Proc. Of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2nd ~ 6th September 2013.
- 4) Kikkawa, N., Pender, M.J. and Orense, R.P.: Micro-properties of pumice particles using computed tomography, Experimental Micromechanics for Geomaterials – Joint Workshop of the ISSMGE TC101-TC105, HongKong, 23rd ~ 24th May 2013.
- 5) 吉川直孝, 伊藤和也, 堀智仁, 三田地利之, Pender, M.J. and Orense, R.P.: 軽石の力学特性, 第9回地盤工学会関東支部発表会, 東京都, 2012年10月5日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉川直孝 (KIKKAWA, Naotaka)
 独立行政法人労働安全衛生総合研究所・建設安全研究グループ・研究員
 研究者番号: 60575140