



# 富士山周辺における「スコリア」の地盤工学的特性

西岡, 孝尚  
澁谷, 啓

---

(Citation)

地盤工学ジャーナル, 9(3):397-415

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2014 公益社団法人 地盤工学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003312>



## 富士山周辺における「スコリア」の地盤工学的特性

西岡 孝尚<sup>1</sup>, 澁谷 啓<sup>2</sup>

1 協和設計株式会社 本社 設計部

2 神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻

### 概 要

特殊土に位置づけられる火山灰質粗粒土のうちスコリアは、これまで十分な報告がなく、その工学的性質に関して十分議論されていないため、地盤材料としての適否の判断が難しい。そこで本論文では、富士山の東部山麓地域に広く分布する「スコリア」と称される火山砕屑物を用いて、盛土や構造物の裏込め材など道路土工への利用を目的として、その土質性状の把握と工学的性質を原位置および室内試験により詳細に検討した。一連の調査・試験の結果から、当該地域に分布する「スコリア」は、透水性、圧縮性、せん断強度のいずれの側面からも砂礫材料と同等あるいはそれ以上の水理・力学特性を示すことがわかった。例えば、スコリアを所定の締固め度で施工すれば、盛土として十分な安定性が得られるばかりでなく、飽和化による沈下等の変状は発生しないことがわかった。一方、単位体積質量が  $1.0\text{Mg/m}^3$  前後と小さく、粒子の破碎性が顕著なため、施工時の粒子破碎による粒度分布の変化により結果的に所定の締固め度を満足せず、盛土の性能低下が生じる可能性がある。

キーワード：スコリア，火山灰質粗粒土，特殊土，富士火山，盛土材料

### 1. はじめに

特殊土に位置づけられる火山灰質粗粒土のうちテフラの一種であるスコリアについては、これまで報告事例が少なく、その工学的性質に関して十分な議論がなされてきたとは必ずしも言い得ない。すなわち、ある一定の工学的評価や判断を行えるだけの研究事例がないか、もしくは紹介がなされていないのが現状である。

わが国で特殊土と称される土は、①災害を受けやすい土、②扱いにくい土、施工性の悪い土、③教科書や試験法に一般に書かれている性状とかなり異なる物性を示す土、という3つの概念から特徴づけられている<sup>1)</sup>。代表的な特殊土として、泥炭などの「高有機質土」、関東ロームなどの「火山灰質細粒土」、しらすや降下軽石などの「火山灰質粗粒土」、まさ土などの「風化残積土」が挙げられる。

土木工事における個別対応の必要性や自然災害に対する脆弱性から、関東ロームやしらす、まさ土などの特殊土は、これまでより非常に多くの研究がなされ、その対策事例も数々紹介されている。実際、これらの特殊土の土工に関わる際には、その研究事例からある一定の評価や判断を行うことが可能である。

ここで「火山灰質粗粒土」は火山灰、軽石、スコリアなどの火山砕屑物の一次および二次堆積物で、細粒分含有

率が50%以上となっていないものを称している。土質分類では砂質土や礫質土に分類され、粘性をほとんど有しない。湿潤密度は小さく  $1.0\text{Mg/m}^3$  以下を示すこともあり、軽量で、粒子が破碎しやすいなどの特徴を有している<sup>2)3)</sup>。いずれも多く研究成果があるが、その大部分がしらすと軽石に関わるものである。

スコリアに関するまとまった報告は、日下部、前田、萩原らによるものがある。前田ら<sup>4)</sup>は、ケーソン基礎底面に分布する密なスコリア層において大型載荷試験を実施し、原位置のなかで乱スコリアにおける内部摩擦角の応力依存性やせん断変形に伴う粒子破碎の発生および異方性など、その強度特性について報告している。また、日下部ら<sup>7)</sup>は、上記のサイトにて採取したなかで乱および再構成かく乱試料を用いて、三軸および平面ひずみ圧縮試験を行い、粘着力の変化を含むスコリアの強度・変形特性について報告している。さらに、日下部ら<sup>8)</sup>は、同サイトにおいて、なかで乱ないしかく乱試料を用いた縮尺模型を作製し遠心装置による大型載荷試験の再現実験を行い、荷重・沈下挙動、破壊メカニズムについて、原位置と室内試験の直接的な比較からその再現の精度について報告している。

しかしながらこれらの研究で対象としている地盤は、箱根火山噴出物である換算N値70以上、相対密度120%以上、原位置での間隙比が1を越える半固結から固結状

のスコリア層であって、試料の対象深度も深さ 20~27m と深部にある。また、このような堅固な地盤では、その力学特性が過去の応力履歴や環境の変化による土の構造特性に影響される可能性が高く、かつ、圧密や膠結を伴う続生作用で強度増加が発生している。このことはこれらの研究が、主にケーソンなどコンクリート構造物の基礎地盤の評価に主眼を置いたものであるためである。

一方、一般的な土木施工で頻繁である切土や盛土などの土工に関連して、スコリアを建設材料として取り扱う場合がある。この際、例えば道路盛土の設計において、その基本スタンスを定めることに、現状、戸惑いがある。すなわち、スコリアを盛土材として利用する場合、その強度・締固め・沈下・透水等の各特性に関するまとまった報告がなく、地盤材料としての適否の判断が難しい。つまり、取り扱いが困難な土材料であり、設計段階から地盤改良など十分な配慮が必要であるのか、それともそのような課題はなく通常の一般的な土と同等に扱えるのか、設計や施工において留意すべき事項が何であるのかなど、その扱いに対して、すぐには着想できない。直接的な土材料の試験を実施しないで、ある一定の工学的評価や判断を行う場合、スコリアについて十分な地盤工学的知見があるとは言い得ない。

そこで筆者らは本研究において、富士山周辺に分布する完新統のスコリアの工学的特性を調べ、地盤材料としての適用性とその課題や問題点を明らかにし、スコリアに対する工学的評価や判断の指標を示すこととした。

富士山に代表されるわが国の火山地帯とその周辺に多量に分布するスコリアは、自然災害に対して脆弱であり、写真-1 に示すように、降雨等による浸食や土砂流出、斜面崩壊など、多くの被害を発生させている。地表に堆積したスコリアは、原位置での単位体積密度が小さく軽量で、浸食を受けやすい。また、細粒分が少なく透水性が高い。養分量も少なく、そのため植物の生育が悪く、浸食に弱い特徴を有する。すなわち、ある条件下では、特殊土として前述①の災害を受けやすい地盤に該当する。



スコリア等の火山灰質土を対象とする伊豆大島の土石流災害 (Google 災害マップ 2013.10.17 撮影 より)

写真-1 スコリアの災害事例

一方、特殊土の特徴である②の土木施工時の問題点や

課題の有無、および③の特殊な土質特性の有無については、上述のようにこれまで十分な報告や議論がなされてきたとは必ずしも言えない。それぞれの利用や適用は、その都度、個別に対応が図られてきたものとする。

本研究は、これら未だはっきりと、その地盤工学的な特性が位置づけられているとはいえない富士山を起源とする「スコリア」について、各種の室内試験や物理探査手法等を用いた原位置試験によって、対象とする地盤の土質性状の把握を試みたものである。また、国土環境の維持と発展を背景とする多様な社会的要求に応じるために、道路土工に対する信頼性設計の適用が求められており、この観点からも考察をする。

さらに、本稿で明らかにするスコリアの地盤工学的特性は、いわゆる乱した試料として、土の再利用を主たる目的としていることから、今後研究を予定している基礎工学や斜面安定問題との関連から、不かく乱状態の力学特性についてもある程度明らかにすることにより、その方向性を提示している。

## 2. 対象とする「スコリア」の分布と研究の目的

### 2.1 研究の背景となる道路事業

伊豆半島のつけ根にあたる静岡県三島市から、裾野市、御殿場市、さらに小山町にかけての地域は、古来、箱根山を境とする東西交通の主要である。本地域は、一般国道 1 号や高規格幹線道路である東名高速道路や新東名高速道路が通過し、一般国道 138 号や 246 号などの幹線道路は、これら広域ネットワークラインと連結して静岡県東部地域の道路ネットワークを担う重要路線である<sup>9)</sup>。これらの幹線道路は、本地域における生活及び経済活動を支えとともに、富士箱根伊豆国立公園周辺における観光道路として重要な役割を任っている<sup>10)</sup>。

しかし、このような特徴から物流や観光交通が集中するとともに、地域の生活交通も混在して、交差点を中心とした交通渋滞の解消や沿道環境の改善が大きな課題となっている<sup>11)</sup>。また、南海トラフ巨大地震などの大災害に対して、広域的な道路啓開との連携<sup>12)</sup>や緊急輸送路および代替路線としての機能が求められている。これらの課題を解決して地域のニーズに応えるため、現在、図 1 に示すように、国土交通省において須走道路・御殿場バイパス、裾野バイパスなどの道路整備が進められている。

これらの道路計画地は富士火山の東部山麓に位置し、その裾野を取り囲むように計画されていることから、道路土工における地盤特性の研究が喫緊の課題となっている。

### 2.2 対象とする「スコリア」層の分布

富士火山は日本列島最大の玄武岩からなる第四紀成層火山である。最近 10 万年間の活動期における総噴出量は



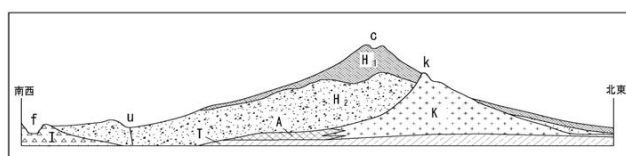
400km<sup>3</sup> を超え<sup>13)</sup>て巨大である。富士火山形成史については津屋弘達による一連の地質学的・岩石学的研究によりその全体像が示されている。津屋(1940, 1968, 1971 など)の層序で最も重要な点は、富士山を古富士火山と新富士火山に区分したことである<sup>14)</sup>。図2に示すように、富士火山の形成史は、約10万年前～約1万年前までの古富士の時代と約1万年前以降の新富士の時代に<sup>15)</sup>大きく区分される。



図1 周辺の道路計画事業

古富士火山の噴出物で高く成層圏まで吹き上げられた火山灰は、偏西風により運ばれ関東平野を広く覆った。この火山灰層を一般的に関東ロームと称している。

一方、本論文で対象とする「スコリア」層は、いずれも新富士火山由来のものであり、富士火山を起源とする降下堆積物や泥流堆積物等の二次堆積物である。



c 富士山頂, H1 新富士火山, H2 古富士火山, K 小御岳火山,  
k 小御岳, A 愛鷹火山の一部,  
I 第四紀層, T 新第三紀層, f 富士川, u 潤井川

図2 富士山の模式的な断面図(津屋,1940 を一部修正)<sup>16)</sup>

## 2.3 対象試料の地質的分類

### 1 採取試料

試料は図3に示す3地域から採取した。それぞれの試料は採取した地域から便宜的に、採取地A「御殿場」、採取地B「小山」、採取地C「富士砂防」と呼称する。表1に各試料の採取状況を整理した。また、それぞれの試料の外観を写真-2に示す。

採取地A「御殿場」と採取地B「小山」では、それぞれの試料を採取深度により区別して試料番号①および②で示す。以降、試料番号①を試料①、試料番号②を試料②と称する。

「御殿場」および「小山」では、表土を取り除いた表層部とその下位の深度1～3m付近の地盤からそれぞれ試料を採取した。これらいずれの地点でも表層には締りの緩いスコリアが分布している。これを試料①とした。試料①の下位に分布し、若干締りが良くなるスコリア層を試料②とし、試料①と区別した。

ここで採取地A「御殿場」試料①および②と、採取地B「小山」試料②は、いずれも褐色を呈するスコリアである。採取地B「小山」試料①は黒色を呈するスコリアで、この地域の表層部に特徴的に分布している。「富士砂防」は灰色を呈し、スコリアに比べて重く、砂分が若干多い。

採取した試料は、いずれもそれぞれの地域で広く分布することがわかっており、各エリアを代表できる試料として採取した。採取試料は外観上大きなばらつきは認められない。特に、スコリアは降下堆積物であり、広い範囲に比較的均質に堆積したことが伺えるものである。採取試料とこれより分別した試験試料に外観上の相違はなく、それぞれの試験結果がそれぞれの試料を代表するものとする。

表1 対象とする試料の諸元

採取地	呼称	試料番号	地質分類	採取状況
A	「御殿場」	①	スコリア	深度0.3～0.8m
		②	スコリア	深度1～2m
B	「小山」	①	宝永スコリア	表土下
		②	スコリア	深度2.5m付近
C	「富士砂防」	—	扇状地性堆積物	床固工の堆砂土



図3 試料採取地

### 2 対象試料の地質的分類

新富士火山の活動では、3200～2200年前、山頂火口の噴火によって粗粒で厚いテフラ(湯船第1・第2スコリアなど)が堆積している。2600～2900年前には東斜面で大規模な山体崩壊が発生し、現在の御殿場市方面へ岩屑なだれが流下して堆積している(御殿場岩屑なだれ堆積地・御殿場泥流)。2200年前以降は、多数の側火山が噴火し、

テフラや溶岩流が噴出して、一部で火砕流が発生している。この際に堆積した降下火砕物あるいはこれを起源とする二次堆積物が、「御殿場」および「小山」の試料②に該当すると考えられる。

歴史時代に起きた最近の代表的な噴火は、1707(宝永4)年12月の宝永噴火である。山頂に近い南東山腹の宝永火口より噴出したマグマの総量は $0.7 \text{ km}^3$ と推定され、そのすべてがスコリア(宝永スコリア)や火山灰などの降下火砕物である<sup>16)</sup>。御殿場市や小山町では厚さ数10cm~2m以上に及ぶ降下火砕物が堆積し、これが現在、この地域の表層を広く覆うスコリアである。黒色を呈する外観から「小山」の試料①がこれに該当すると考えられる。

富士山頂の剣ヶ峰北側の標高3,690mを源頭部とする延長約2.2km、最大幅約550m、最大深さ約150m、崩壊土量7,500万 $\text{m}^3$ の巨大な崩壊地は「大沢崩れ」と呼ばれ、その下流に広大な大沢扇状地を形成している。

大沢崩れで崩落した土砂は、降雨や融雪により土石流となって流下し下流での土砂災害をもたらすことから、国土交通省では富士山砂防事業として床固工や導流堤などを設置して、土砂災害の防止を図っている<sup>17)</sup>。「富士砂防」と呼称する試料は、この大沢扇状地において床固工に堆積した土を採取したものである。よって、この試料は厳密にはスコリアではなく、富士火山山体の溶岩等が侵食され運搬・堆積した扇状地性堆積物に相当する。タイトルのスコリアの名称に「」を付したのは、この試料も研究の対象としたことに理由がある。

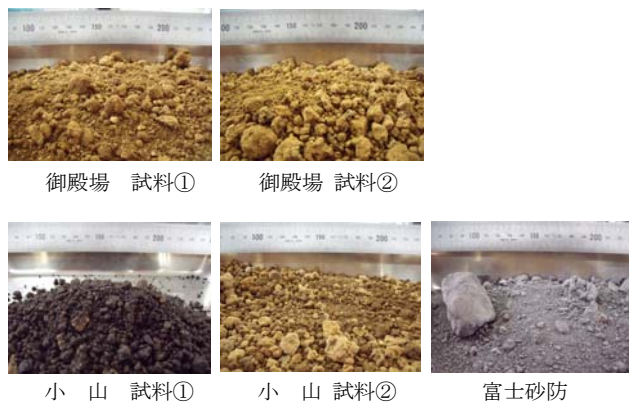


写真-2 試験試料の外観

## 2.4 研究の目的

本研究は、富士火山の東部山麓で進められている道路整備に伴い、周辺で多量に分布する完新統の「スコリア」を道路建設に利用するに際し、その地盤工学的特性を詳細に把握することを目的とした。

前述の道路計画にあたり、道路盛土の材料採取地として、富士山麓の御殿場、小山および大沢扇状地が計画されている。よって、その土材料を用いて室内試験を実施し、工学的特性を調べ、地盤材料としての適用性とその課題や問題点を明らかにしたものである。加えて、我が国におけるス

コリア分布地として、御殿場、小山を取り上げ、今後、本研究の幅広い利用に供するため、スコリアに対する工学的評価や判断の指標を示すこととした。

ここではいずれも、スコリアの地盤工学的特性は、いわゆる乱した試料として、土の再利用を主たる目的としたものである。

## 3. 試験の内容と結果の利用

### 3.1 試験の内容

室内で実施した物理・水理試験は、土粒子の密度試験、土の含水比試験、土の粒度試験、土の液性・塑性限界試験および透水試験である。また、力学試験として、突固めによる土の締固め試験、土の圧密試験、室内水浸沈下試験、土の圧密定圧一面せん断試験および土の三軸圧縮試験を実施した。各試験は地盤工学会「地盤材料試験の方法と解説」(2009)を参考に、JIS規格およびJGS規格に準じて実施した。力学試験では、巨礫の影響を極力排除するために、粒度試験における通過質量百分率70%程度以下の粒度で供試体が構成できるように、最大粒径4.75mmで調整した。但し、土の圧密定圧一面せん断試験では直径6cmの供試体の許容最大粒径は0.85mmと規定されており、本試験は $D_{\max}=4.75\text{mm}$ の試料を用いたため、得られる $\phi$ は $3^\circ$ 程度大きめに測定される可能性があり<sup>2)</sup>、注意が必要である。

さらに、X線回析結果を用いてそれぞれの試料の主要鉱物を同定するために蛍光X線分析を実施した<sup>18)19)</sup>。

原位置試験は採取地A「御殿場」にて、物理探査手法の一つである高精度表面波探査<sup>20)21)</sup>と現場密度試験を実施した。

### 3.2 結果の利用

試料採取地周辺では、いくつかの道路計画があることを先に記載した。これらの地域では表層に広く分布するスコリアが多く、建設現場において土工の対象となることがわかっている。道路土工としては盛土および切土が対象で、土工掘削により発生するスコリアを用いて盛土を構築する場合、材料としての適否が工事コストや施工の可否を左右することとなる。

例えば、御殿場バイパス西区間仁杉ジャンクションの道路計画では、最大高さ12m、土量25万 $\text{m}^3$ となる比較的規模の大きな盛土工事が計画されている。また、その他の工事区間でも多くの盛土計画がある。よって、スコリアを盛土材料として利用する場合の課題や問題点の有無を事前に把握し、工事計画に反映させることは大きな意味がある。盛土材料としての適性が高い場合、その利用に大きな価値がある。

同様に、大沢崩れ等により発生している扇状地性堆積物やこれに類似する堆積物も本地域に大量に分布している。盛土材料としての適用が容易であるならば、その活用は材料確保の面から円滑な道路工事の進捗に寄与す

る。

また、先のジャンクションの盛土計画地では、表層に N 値 3 程度のスコリアが層厚 3m 前後で分布している。スコリアの下位は粘土混じり砂礫を主とする半固結状の堆積物である。よって、盛土の安定は直下の地盤であるスコリアの強度などの土質特性に左右される。

以上のことから、ここでは「スコリア」に対する試験結果をもとに、計画の盛土の安定性ならびに盛土材料としての適用性を検討した。

## 4. 試験の結果

### 4.1 室内試験の結果

各試料の試験結果を表 2 に一覧で示す。

表 3 に文献 2) p.991 に示されている火山灰質粗粒土の物理的性質を示し、これに今回の試験値を加えて対比した。本表ではスコリアに関するデータが、北海道の支笏の報告のみであることがわかる。

#### 1 自然含水比

土の自然含水比は現場で採取した試料の試験室搬入時の含水比である。

「御殿場」「小山」のスコリア試料（以下、「御殿場」「小山」の試料を「スコリア試料」と呼ぶ）は 40～61% であるが、「富士砂防」は 6.6% と低く、違いがある。これは前者のスコリアが火山噴火に伴い堆積した多孔質材料であり、後者は溶岩等の風化侵食による生成物であることに起因していると考えられる。

スコリア試料では「小山」試料①が 40% と、「御殿場」試料①および②と「小山」試料②の 54～61% に対し、小さい値を示した。「小山」試料①は黒色を呈するスコリアで、宝永噴火により放出されたもので、「御殿場」試料①および②と「小山」試料②との間に違いが認められる。

#### 2 土粒子密度

密度試験値は、「御殿場」「小山」のスコリア試料で  $\rho_s=2.58\sim2.67\text{Mg/m}^3$  であるのに対し、「富士砂防」は  $2.91\text{Mg/m}^3$  と重い。通常のシリカが主成分の土粒子の密度が  $2.6\sim2.7\text{Mg/m}^3$  であることを勘案すると、「富士砂防」は重質であると言える。

「御殿場」と「小山」のスコリア試料では、「小山」試料①が  $\rho_s=2.58\text{Mg/m}^3$  と他のスコリア試料に比べ若干小さく、上記の自然含水比と同様に違いが認められる。

#### 3 粒度特性

図 4 に各試料の粒径加積曲線を示す。本図では、土材料の適性判定要素として最も大きな要因である粒度分布は、上記と同様に「御殿場」および「小山」のスコリア試料と「富士砂防」で違いがある。前者では礫分 45～67%、砂分 25～40%、細粒分 9～17% に対し、後者は礫分 35%、

砂分 61%、細粒分 4% で、後者は礫分と砂分の含有が前者と逆で、細粒分が非常に少ない。均等係数も「富士砂防」では  $U_c=8$  と 10 以下で粒度分布は良好とは言えないが、「御殿場」「小山」は  $U_c=26\sim63$  で粒度分布は良い。

一方、スコリア試料では「御殿場」試料①と「小山」試料②で、粒度分布が非常に似通っている。両者の採取位置は直線距離で約 6km 離れているが、いずれも富士火山において同時期の噴出起源を持つことが推察される結果となった。

宝永スコリアに該当する「小山」試料①は、やはり礫分が 67% と他のスコリアより多く相違する結果となった。

### 4 締固め特性と粒子破碎の発生

締固め試験は A-c 法にて実施した。スコリアはせん断履歴により粒子破碎が発生する<sup>9)7)8)</sup>ため、締固め後にも粒度試験を行ない、締固め履歴のない新鮮な試料を基本に、破碎の影響を確認した。表 2 には締固め後の粒度試験結果を併記している。締固め試験は 19mm ふるい通過試料で行なっているため、締固め後の最大粒径は括弧書きとしている。

図 5 に各試料の 1 回締固め後の粒径加積曲線を示す。また、図 6 に締固め前後の粒径加積曲線を示す。図 7 に締固め曲線を示し、図中に最適含水比と最大乾燥密度を掲示した。

表 2 に示したように粒子破碎の評価には細粒分含有率の変化量  $\Delta F_c$  を用いた。スコリア試料ではいずれも  $\Delta F_c$  の増加がみられ、粒子破碎の発生が確認された。「御殿場」では試料①と②では違いがなく、 $\Delta F_c=6.3\%$  および 6.6% である。「小山」の試料①と②は  $\Delta F_c=2.6\%$  および 1.9% で、「御殿場」は「小山」に比べ粒子が破碎しやすいようである。「小山」試料①は黒色を呈する特徴的なスコリアであるが、試料②とは顕著な違いはみられない。地質分類で違いはないが、「御殿場」と「小山」というエリアで若干の差異がある。

一方、地質特性からある程度その挙動が想定されたが、「富士砂防」では  $\Delta F_c=0.0\%$  という結果が出た。「富士砂防」の試料では、粒子破碎の発生は認められなかった。

締固め特性は、「御殿場」で最適含水比  $W_{opt}=48\sim50\%$ 、最大乾燥密度  $\rho_{dmax}=1.00\sim1.05\text{Mg/m}^3$ 、「小山」では  $W_{opt}=44\sim46\%$ 、 $\rho_{dmax}=1.09\sim1.11\text{Mg/m}^3$  で、両者に大きな違いはないものの、「御殿場」で若干、最適含水比が湿潤側で、最大乾燥密度が軽量である。黒色スコリアである「小山」試料①とそれ以外のスコリアには、大きな違いは認められなかった。

一方、「富士砂防」では  $W_{opt}=12.9\%$ 、 $\rho_{dmax}=1.97\text{Mg/m}^3$  で、「御殿場」「小山」とは締固め特性でも大きな違いがある。「御殿場」「小山」は細粒質土のような締固め曲線を示し、最適含水比が大きいほど最大乾燥密度は小さくなる。「富士砂防」は砂質土に類似した締固め曲線を示し、両者は明らかに別の土材料であると言える。



表2 室内試験結果一覧表

区分		御殿場 試料①		御殿場 試料②		小 山 試料①		小 山 試料②		富士砂防	
土粒子密度 $\rho_s(\text{Mg/m}^3)$		2.664		2.676		2.584		2.645		2.913	
自然含水比 $w(\%)$		61.3		53.9		39.9		55.0		6.6	
粒度特性	締固め前・後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後
	礫分(%)	44.8	37.4	53.6	44.1	66.7	60.3	44.6	38.2	35.0	29.4
	砂分(%)	39.9	41.1	37.4	40.3	24.5	28.4	38.4	42.9	60.8	65.9
	細粒分(%)	15.2	21.5	9.0	15.6	8.8	11.3	17.0	18.9	4.2	4.7
	最大粒径(mm)	25.4	(19.0)	25.4	(19.0)	19.0	(19.0)	19.0	(19.0)	38.1	(19.0)
	平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	1.5		2.3		3.0		1.6		1.1	
	均等係数 $U_c$	63.0		36.0		26.0		55.6		8.3	
曲率係数 $U_c'$		2.5		2.8		5.5		2.7		1.0	
細粒分含有率増分 $\Delta F_c(\%)$		6.3		6.6		2.6		1.9		0.0	
締固め特性	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	49.5		48.0		45.6		44.2		12.9	
	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{Mg/m}^3)$	1.001		1.051		1.086		1.105		1.974	
透水特性	試験方法	変水位		定水位		定水位		変水位		定水位	
	試験時の締固め度 $D_c(\%)$	82.7		94.6		89.3		87.0		91.5	
	透水係数 $k_{15}(\text{m/s})$	$2.79 \times 10^{-7}$		$2.37 \times 10^{-5}$		$3.42 \times 10^{-4}$		$2.54 \times 10^{-7}$		$1.41 \times 10^{-4}$	

表3 火山灰質粗粒土の物理的性質と今回の試験値の対比 文献2)p.991に加筆

	種別/火山灰		火山灰 記号	$w_n$ (%)	$\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$F_c$ (%)	$G_c$ (%)	$\rho_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	採取地 (俗称)
北海道	Pfa Sfa	樽 前	Ta-a, b, c	10～40	2.6～2.8	0～20	10～80	1.1～1.6	1.0～1.3	千歳市, 早来町, 苫小牧市, 日高町
		恵 庭	En-a	50～110	2.6～3.0	0～30	0～60	1.1～1.6	0.6～1.1	
		支 笏	Spfa-1	30～150	2.1～2.6	0～20	20～80	0.7～1.6	0.4～1.0	札幌市, 千歳市, 苫小牧市, 日高町
			Spfa-7	20～40	2.7～3.0	0～20	10～50	1.4～1.9	1.1～1.5	
		駒ヶ岳	Ko-d	20～50	2.5～2.9	0～10	0～30	1.7～1.8	1.4～1.5	南茅部町, 森町, 八雲町
		摩 周	Ma-0	70～170	2.1～2.6	0～30	20～80	0.8～1.4	0.2～0.8	中標津町
	Pfl	支 笏	Spfl	20～80	2.1～2.5	10～50	0～30	1.1～1.6	0.7～1.3	札幌市, 千歳市, 苫小牧市
		ク ャ ロ	Kc-4	10～50	2.4～2.5	20～50	0～40	1.2～1.7	1.0～1.5	北見市, 別海町
東北	Pfl	十 和 田	To-H	25～50	2.6～2.7	15～30	15～30	…	…	青森県 (十和田しらす)
		肘 折 尾 花 沢	Hj-H	15～40	2.4～2.7	0～35	0～30	…	…	山形県 (肘折しらす)
関東	Pfa	赤 城 山	Ag-KP	180～220	2.6～2.8	4～8	40～70	0.9～1.1	0.3～0.4	栃木県 (軽沼土)
東海※	Sfa	富 士 山	御殿場	54～61	2.6～2.7	9～15	45～54	1.0～1.1	0.6～0.7	静岡県御殿場市 (褐色スコリア)
			小山	40	2.6	9	67	…	…	静岡県小山町 (黒色スコリア)
				55	2.7	17	45	…	…	静岡県小山町 (褐色スコリア)
中国	Pfa	大 山	DAP2	115	2.5	40	…	…	…	鳥取県 (大山荒田軽石 2)
			DMP	120～150	Ave. 2.62	30	0～5	…	…	鳥取県 (大山松江軽石)
九州	Pfa	霧 島 御 池	Kr-M	85	2.5	…	40～100	0.8	0.4	宮崎県都城市 (御池ぼら・日向土)
	Pfa	桜 島	Sz-2	…	2.4～2.5	…	20～100	…	0.2～0.6	始良郡福山町 (安永ぼら)
	Pfa	始 良	A-0s	55～71	2.5	4	50～60	1.0～1.1	0.6～0.7	鹿児島県鹿屋市 (大隅降下軽石)
	Pfl		A-Ito	15～50	2.3～2.5	10～40	0～20	1.0～1.7	…	鹿児島県 (一次しらす)
				20～70	2.4～2.6			1.0～1.8	…	鹿児島県 (二次しらす)

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 (火砕流堆積物)

 $w_n$ : 自然含水比  $\rho_s$ : 土粒子の密度  $F_c$ : 細粒分含有率  $G_c$ : 礫分含有率  $\rho_t$ : 湿潤密度  $\rho_d$ : 乾燥密度

※文献 2) に今回追記した。

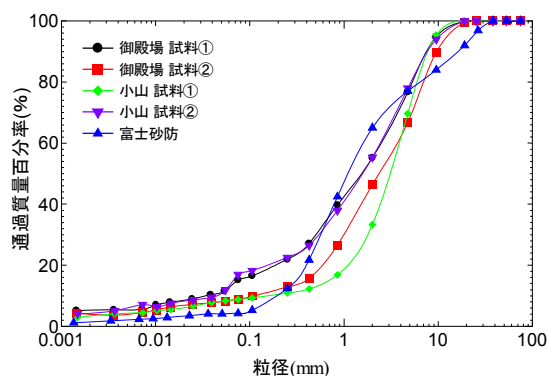


図4 粒径加積曲線

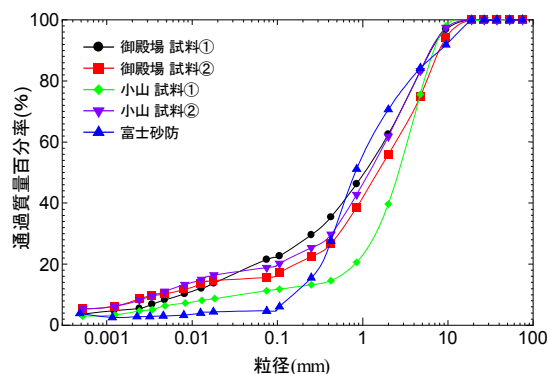


図5 締固め後の粒径加積曲線

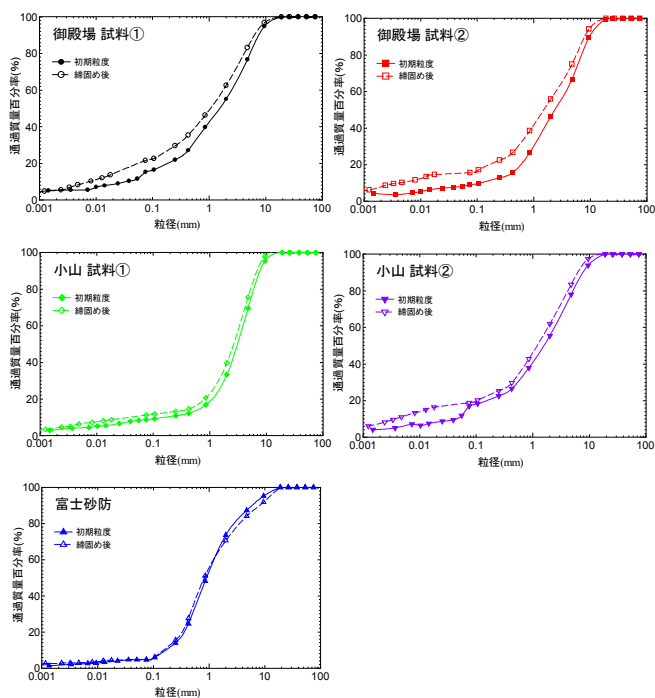


図6 締固め前後の粒径加積曲線

## 5 圧密特性

圧密試験は、試験試料を最適含水比に調整し、締固め度(Dc)90%で作製した供試体（直径 60mm、高さ 20mm、最大粒径 4.75mm）を用い、圧密圧力を 4.9～1,256kPa の 9 段階で載荷し実施した。

圧密特性は、スコリア試料における各エリアの、いずれも試料②について調べた。「御殿場」で圧縮指数  $C_c=0.323$ 、「小山」では  $C_c=0.121$  を示した。

一般に、粘土の圧縮指数は 1 に近い値であるため、いずれも砂に近い圧縮特性を有すると言え、粒度特性から想定される結果と整合的である。

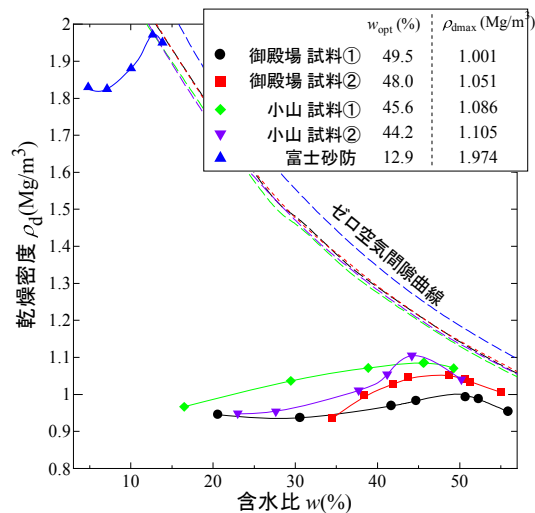


図7 締固め曲線

## 6 透水性

締固め後の透水特性を知るために室内透水試験を行った。「富士砂防」の試料は、透水係数  $k=1.4 \times 10^{-4} m/s$  で、砂あるいは砂礫相当の透水性を有し、排水能力に優れた土であると評価できる。

スコリア試料は  $k=3.4 \times 10^{-4} \sim 2.8 \times 10^{-7} m/s$  の範囲でばらつきがみられるが、「小山」試料①の黒色スコリアが  $k=3.4 \times 10^{-4} m/s$  で最も透水係数が高い。黒色スコリアは褐色スコリア試料に比べ礫分が多く細粒分が少ない特徴がある。一方、各試料の締固め前の細粒分含有率は、透水係数の低い「御殿場」試料①と「小山」試料②で、それぞれ  $F_c=15\%$ 、 $17\%$  と他の試料より大きい。また、粒子破砕により礫分は減少し細粒分が増加している。透水性の差はこの影響と考えられ、礫質土であっても細粒分の含有の差が透水性に違いを生じさせている。

また、上記のように「御殿場」試料②は「小山」試料②に対し圧密しやすいことがわかったが、透水性も前者が  $k=2.37 \times 10^{-5} m/s$  を、後者が  $k=2.54 \times 10^{-7} m/s$  を示し、それぞれの結果に整合している。

## 7 水浸沈下

水浸沈下試験は、一定の拘束圧下で締固め度の違いが水浸沈下にどの程度の影響を及ぼすかを調べたものである。

水浸試験は、供試体の作製の手順や試験条件は一面せん断試験に準じ、小型の一面せん断試験機を用いて実施した。締固め度  $D_c=75, 85, 90\%$  の試料をそれぞれ拘束圧 50kPa



を与え約 1 時間放置した後、せん断箱内に水を満たして試料を水浸させ、4 時間ほど沈下量の経時変化を観察した。試験結果を表 4 および図 8 に示す。

試験の結果、採取場所によらず、締固め度 90%以上で締固めた場合、水浸による沈下はほとんど生じない材料であることがわかった。

表4 室内水浸試験結果

締固め度 $D_c(\%)$	沈下量の割合(%)				
	御殿場 試料①	御殿場 試料②	小山 試料①	小山 試料②	富士砂防
75	1.8	1.9	5.5	3.4	2.3
85	0.6	1.1	1.2	2.3	0.9
90	0.6	1.0	0.8	1.8	1.4

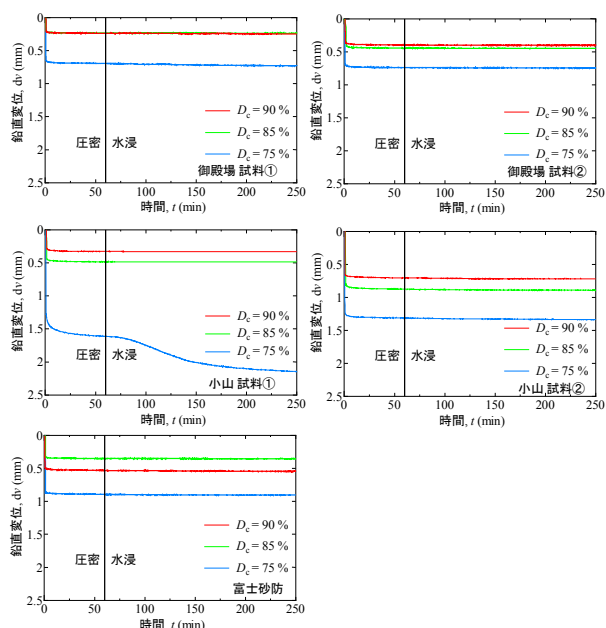


図8 水浸試験結果図

## 8 一面せん断試験

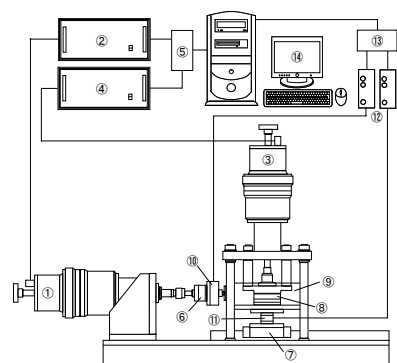
一面せん断試験は、試験機、試験方法が比較的簡便であり、実地盤で想定される一次元圧密、平面ひずみ条件を満足するため、原地盤の強度を求めるためには三軸圧縮試験よりも実用性の高い試験とされている。本研究での定圧一面せん断試験は、地盤工学会基準 JGS0561「土の圧密定圧一面せん断試験方法」に準じて実施した。

図 9 に一面せん断試験機概略図を示す。

供試体の作製の手順や試験条件は、以下の通りである。

- ・地山で採取した試料を自然乾燥後、ふるい分けて最大粒径 4.75mm 未満の試料を用意した。
- ・供試体作製時の初期乾燥密度 ( $\rho_{di}$ ) は、最大粒径 19.0mm の試料を用いた締固め試験 (A 法; 10 cm モールド) から得られた最大乾燥密度に基づき、見かけ上の締固め度 ( $D_c$ ) を 85%, 90%, 95% とした。
- ・供試体作製に必要な試料は以下のように計量した。  
必要量 = 供試体体積 × 初期乾燥密度  
供試体体積 113.1cm<sup>3</sup> (直径 60mm, 高さ 40mm)

- ・供試体作製のモールド(直径 60mm)に計量した試料を入れ、同一密度となるように静的締固め装置を用いて締固めた。(写真-3)
- ・供試体作製のモールドから、せん断箱に供試体をセットした。



- ①: 水平载荷用直接ドライブモーター ⑧: せん断箱  
②: 水平载荷用ドライブユニット ⑨: 水浸箱  
③: 鉛直载荷用直接ドライブモーター ⑩: 水平荷重用ロードセル  
④: 鉛直载荷用ドライブユニット ⑪: 鉛直荷重用ロードセル  
⑤: シリアル通信ボード ⑫: ストレインアンプ  
⑥: スライドユニット ⑬: AD変換ボード  
⑦: リニアローラウェイ ⑭: パーソナルコンピュータ

図 9 一面せん断試験機概略図



写真-3 静的締固め装置

一面せん断試験は表 5 に示す試験条件で実施した。鉛直応力は 50kPa, 100kPa, 200kPa の 3 ケースとし、圧密過程前に供試体を水浸させることにより飽和させた。圧密時の応力载荷速度は 5kPa/min とし、3t 法により圧密の終了を確認した。せん断時におけるせん断箱の隙間は 1.0mm とし、せん断過程は、定圧条件の下、せん断速度 0.1 mm/min で水平せん断変位 6.0 mm まで行った。

試験は見かけ上の締固め度 ( $D_c$ ) 毎に 3 つの拘束圧条件で実施し、破壊時の最大せん断応力点の平均からそれぞれの試料のせん断強度定数 ( $c, \phi$ ) を求めた。

結果の一覧を表 6 に示す。飽和試料の締固め度と内部摩擦角および粘着力の関係を図 10 にまとめた。また、 $D_c=90\%$ でのせん断中の体積変化の様子を図 11 に示す。本図の沿直変位は-が圧縮、+が膨張を示す。図 12 には同じく  $D_c=90\%$ でのせん断応力とせん断変位の関係を示す。

表5 一面せん断試験の試験条件

一面せん断試験	試験条件	
	試料状態	攪乱試料
	3種類の締固め度, $D_c$	85%, 90%, 95%
	初期含水比	最適含水比 (OMC)
	鉛直応力	50, 100, 200 kPa
	せん断隙間	1.0mm
	せん断速度	0.1mm/min

表6 一面せん断試験結果一覧表

締固め度 $D_c$ (%)	内部摩擦角 $\phi$	御殿場 試料①	御殿場 試料②	小山 試料①	小山 試料②	富士砂防
85	$\phi$ (°)	38.6	38.3	40.3	38.3	37.2
	c (kPa)	9.6	22.3	8.5	19.9	9.7
90	$\phi$ (°)	38.8	38.2	41.7	40.4	40.4
	c (kPa)	10.6	22.9	13.4	24.8	16.8
95	$\phi$ (°)	40.0	38.6	43.8	42.5	43.1
	c (kPa)	9.2	29.8	16.0	22.2	21.8

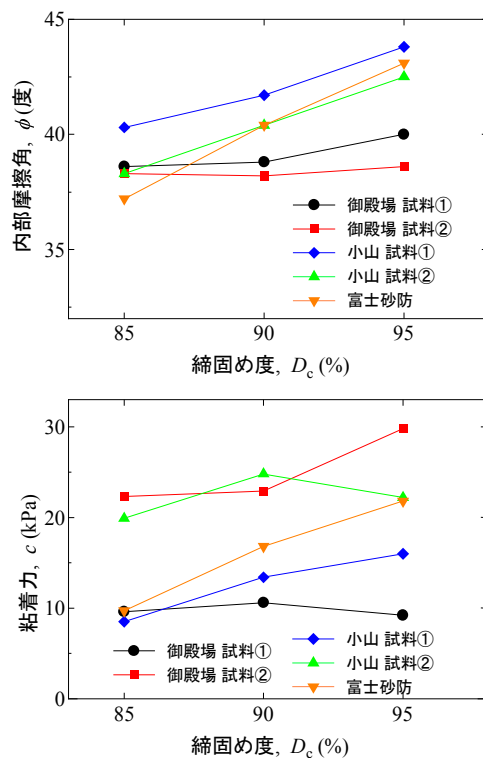


図10 一面せん断試験での締固め度と強度定数の関係

試験の結果、対象試料はいずれも  $D_c=85\%$  以上で内部摩擦角  $\phi > 35^\circ$  を示し、一般的な礫質土と同等、あるいはそれ以上の値を示した。試験値は粒度試験結果に基づく粒度特性から想定される強度特性と整合的で、前述のように  $3^\circ$  程度過大に評価している可能性はあるものの、概ね試験値は信頼できるものとする。  $D_c=90\%$  では「御殿場」を除き、 $\phi$  は概ね  $40^\circ$  を示した。「御殿場」では  $38^\circ$  にとどまっている。当然、締固め度が大きくなるほど  $\phi$  は大きくなるが、「御殿場」は「小山」と比べその傾向は小さく、 $D_c=85\%$  と  $D_c=90\%$  では  $\phi$  にほとんど変化がない。 $D_c=95\%$  でようやく締固めの効果が出ている。「御殿場」

は「小山」に比べ粒子破碎の発生が大きいことからその影響が伺える。

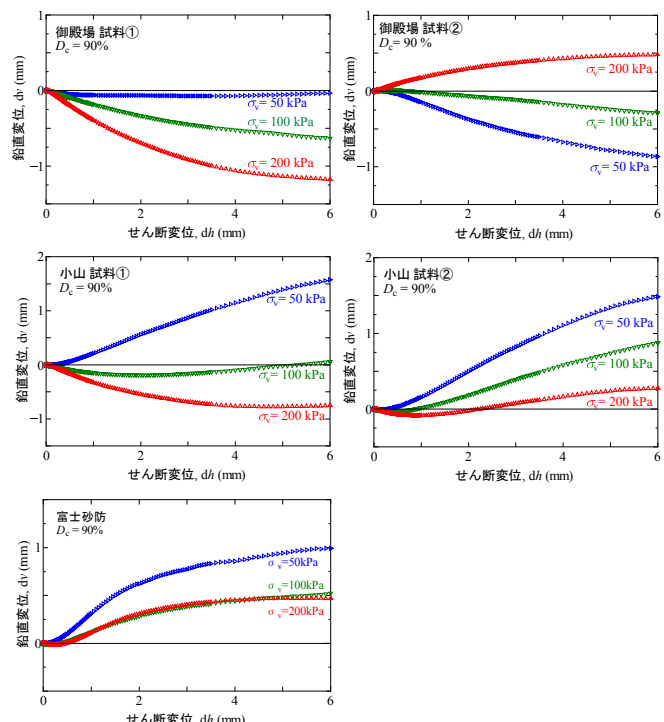


図11 一面せん断試験におけるせん断変位と鉛直変位の関係

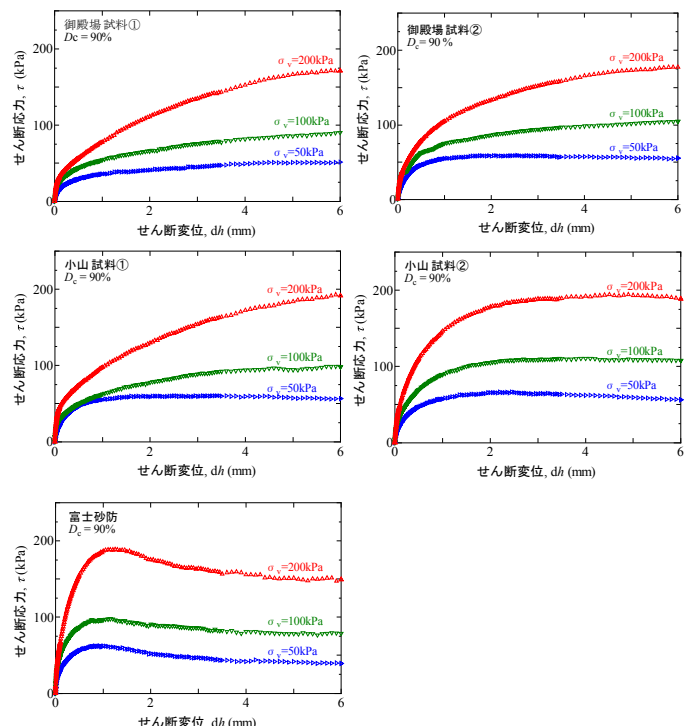


図12 一面せん断試験におけるせん断応力とせん断変位の関係

いずれの試料も粘着力  $c$  が発生し、 $D_c=85\%$  以上で  $c > 8$  kPa を示した。 $D_c=90\%$  では全試料で  $c > 10$  kPa となった。 $\phi$  と同様に締固め度が大きくなるほど大きくなる傾向にあるが、必ずしも右肩上がりグラフではない。 $D_c=85\%$  から  $D_c=90\%$  での変化は、全試料で  $c$  の増加がみられる一

方、 $D_c=90\%$  から  $D_c=95\%$  の変化は「御殿場」試料①や「小山」試料②では低下している。内部摩擦角と同様に、粒子破碎の影響も考えられるが、粒子破碎の大きい「御殿場」試料②では右肩上がりに増加している。「御殿場」試料①や「小山」試料②には、締固め前の状態において細粒分含有率が他の試料より大きい共通の特徴がみられる。

これらのことから、スコリアにおいては、内部摩擦角で締固めに伴う粒子破碎の影響が、粘着力では締固め前の細粒分含有率が、締固めに伴う強度の発現に影響を及ぼしていると考ええる。すなわち、粒子破碎の大きな材料（本研究試料では  $\Delta F_c > 6\%$ ）や締固め前の細粒分含有率が大きな材料（本研究試料では  $F_c > 15\%$ ）では、ある一定の範囲における締固め度の向上が必ずしも強度の増加には結びつかない傾向がある。

スコリア試料では、「小山」試料①の黒色スコリアが最も  $\phi$  が大きく、「御殿場」試料①および②は「小山」に比べ小さい。所定の締固め度ではダイレイタンシー効果が大きく、特に「小山」では正のダイレイタンシーが生じるケースが多い。c は「小山」試料②および「御殿場」試料②がそれぞれの試料①より大きく、再構成試料であるにも関わらず、試料の採取深度がより深い試料で大きい傾向にある。これは上記の締固め前の細粒分含有率と締固めに伴う c の変化に同じで、試料の初期状態が影響していると考えられる。

せん断変位とせん断応力の関係では、「富士砂防」で明瞭なピーク強度が認められるのに対して、スコリア試料では変位に伴いせん断応力が横ばい、ないし漸増を示し、明瞭なピークは発生していない。

### 9 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験は、試験機の構造上供試体が自立する必要があるため、ここでは、供試体が自立し、含水比や締固め度の調整などで試験値の信頼性が確保できる「富士砂防」の試験結果について取り上げる。

「富士砂防」と呼称する試料は、富士山体の溶岩等が侵食され運搬・堆積した扇状地性堆積物であり、本研究の目的の一つである道路盛土への適用性を、強度特性について確認するために実施した。

表7 三軸圧縮試験の試験条件

項目	試験の条件	三軸圧縮試験
試料条件	試料状態	乱した試料
	飽和状態	飽和
圧密条件	荷重速度 (kPa/min)	5.0
	応力比	1.0 (等方圧密)
	圧密終了条件	3t 法によって決定
単調荷重条件	排水条件	排水
	せん断速度 (%/min)	0.1
	荷重終了条件	軸ひずみ $\varepsilon_a = 15\%$ まで

試験は、最適含水比にて締固め度  $D_c=90\%$  となるように供試体を作製し、飽和化させた後に実施した。供試体を三軸セ

ル内に設置した後、セルを組み立て、水を注入して初期等方圧密状態とした。本試験は飽和供試体を対象としており、12時間程度通水した後に二重負圧および背圧(200kPa)を供試体に与えることで、供試体の飽和化を図っている。供試体は高さ10cm、直径5cm、最大粒径4.75mm のものを用いた。表7に試験条件を示した。

表8に供試体の状態とそれぞれの試験結果を一覧で示す。

表8 三軸圧縮試験結果

平均有効主応力 $p'$ (kPa)	100	200	300
試験前含水比 $w_o(\%)$	12.1	12.1	12.4
最大偏差応力 $q_{max}$ (kPa)	287	566	772
乾燥密度 $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.809	1.804	1.767
締固め度 $D_c$ (%)	91.7	91.4	89.5
有効粘着力 $c'$ (kPa)	15.5		
有効内部摩擦角 $\phi'$ (°)	33.2		

図13は、軸ひずみ  $\varepsilon_a = 15.0\%$  の時のモールの有効応力円である。本図より締固め後の試料の強度定数として、内部摩擦角  $\phi' = 33.2^\circ$ 、 $c' = 15.5$  kPa の結果を得た。

図14は、単調荷重時に得られた軸ひずみ  $\varepsilon_a$  と偏差応力  $q$  の関係である。有効主応力の増加に従い、圧縮強度は増加している。また、いずれの拘束圧においても明瞭なピーク強度が確認できた。

図15は、単調荷重中の体積ひずみ  $\varepsilon_v$  と軸ひずみ  $\varepsilon_a$  の関係である。せん断の初期段階にて圧縮され、その後、軸ひずみの増加とともに膨張している。

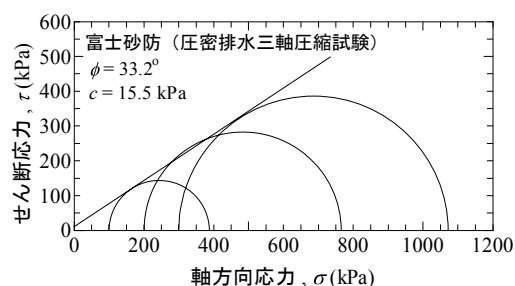


図13 「富士砂防」モールの応力円(軸ひずみ  $\varepsilon_a = 15.0\%$ )

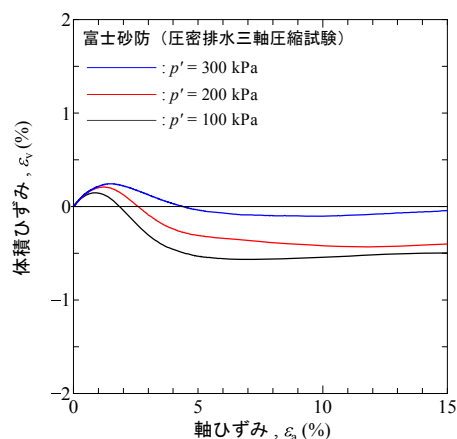
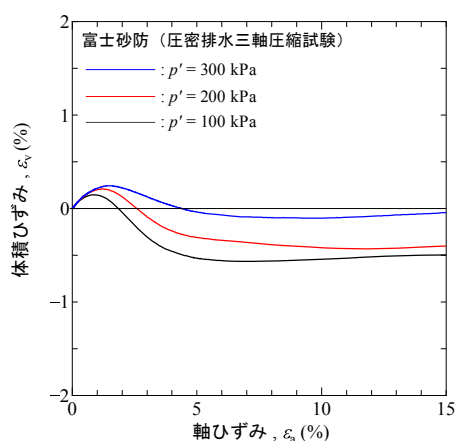


図14 「富士砂防」軸ひずみ  $\varepsilon_a$  と偏差応力  $q$  の関係

図15 単調載荷中の体積ひずみ $\varepsilon_v$ と軸ひずみ $\varepsilon_a$ の関係

#### 4.2 室内試験結果の評価と考察

全体的に、粒度特性など物理試験結果から想定される水理・力学特性と、それぞれの力学試験の試験値は整合的で、試験の手順や方法などで大きな問題はないと評価できる。実施した試験項目は多岐にわたるものの、対象とした試験試料は5試料で多くはないが、それぞれの試験結果のばらつきは概して大きくなく、ばらつきがある場合でもその要因は明らかで、この点からも試験値の信頼性は高いものと考えられる。これらを前提とし、以下、それぞれの試験値についての考察を行う。

表9にスコリアの採取地における物性の相違を示す。また、表10に黒色スコリアと褐色スコリアにおける物性の相違を示す。いずれも相違のある内容についてのみ示し、その相違は相対的なものである。また、「富士砂防」については対象外とし、あくまでスコリア試料についてまとめている。

表9 スコリアの採取地における物性の相違

相違のある物性	採取地における相違内容
締固め試験の最適含水比	「御殿場」がやや湿潤
締固め試験の最大乾燥密度	「御殿場」が若干軽量
粒子破碎の発生	「御殿場」の方が破碎されやすい
圧密特性	「御殿場」の方が圧密しやすい
締固めに伴う内部摩擦角の変化	「小山」は締固めに伴い単純に増大

表10 黒色スコリアと褐色スコリアにおける物性の相違

相違のある物性	相違内容
自然含水比	黒色スコリアの方が小さい
土粒子の密度	黒色スコリアの方が小さい
粒度分布	黒色スコリアの方が礫分多い
透水係数	黒色スコリアの方が高い
最適含水比と自然含水比の関係	黒色スコリア $W < W_{opt}$ 褐色スコリア $W > W_{opt}$

粒子が多孔質であるスコリア試料は、自然含水比 40～61%で、同じ富士火山の噴出物ではあるが、溶岩等を起源とする「富士砂防」6.6%に比べ高い値を示した。表3

に示した日本各地の火山灰質粗粒土に対してはその傾向の範囲にあるが、特殊土に数えられるしらすやまさ土に対し高く、火山灰質細粒土である関東ロームなどに比べ低くなっている。ここで、黒色スコリアである「小山」試料①は40%で他の褐色を呈するスコリア試料54～61%に対し小さい特徴がある。以下、「小山」試料①を「黒色スコリア」、「御殿場」試料①および②、「小山」試料②を「褐色スコリア」と称する。

スコリア試料の最適含水比は44～50%で、最大乾燥密度1.00～1.11Mg/m<sup>3</sup>である。北海道の火山灰土では最適含水比が25%を超える場合、含水比の低下によって最大乾燥密度が著しく増加する相関関係が知られているが<sup>22)</sup>、スコリアにおいてもこの相関関係が適用できる結果であった。

最適含水比と最大乾燥密度に関しては、黒色スコリアと褐色スコリアで大きな違いはないが、黒色スコリアが自然含水比<最適含水比であるのに対し、褐色スコリアは自然含水比>最適含水比となっている。褐色スコリアは自然含水比が最適含水比に対し湿潤側であるため、盛土の施工管理に課題がある結果となった。一方で、黒色スコリアや「富士砂防」は乾燥側である。

スコリアの大きな特徴として、単位体積質量が1.0Mg/m<sup>3</sup>程度と小さいことが挙げられるが、「富士砂防」は反対に2.0Mg/m<sup>3</sup>程度で、スコリア試料と「富士砂防」で大きな違いがある。「富士砂防」では土粒子の密度も2.91 Mg/m<sup>3</sup>と大きい。

流水による淘汰が少なく多孔質で脆弱な角張った粒子形状の土材料では、水浸に伴って沈下や強度低下が発生することが知られている<sup>23)24)</sup>。スコリアもこれらの土材料に非常に類似した性質を有することから、水浸に伴って沈下が発生し、盛土構築後に有害な沈下や破壊が生じることが十分に予想された。

しかし、室内試験の結果、スコリア試料にて締固めの前後で $\Delta F_c$ の増加がみられ、粒子破碎の発生が確認されたものの、締固め度90%以上で締固めた場合、水浸による沈下はほとんど生じない材料であることがわかった。

「富士砂防」も同様に締固め度90%以上で水浸による沈下はほとんど生じない。盛土構築後に地下水の変化が生じこれが飽和した場合でも、所定の締固め度を確保することで、沈下等の変状には結びつかないことがわかった。

粒度特性は、黒色スコリアが礫分67%、細粒分9%に対し、褐色スコリアが礫分45～54%、細粒分9～17%で、わずかな違いがある。「富士砂防」は砂分61%、細粒分4%で砂分が多くなっている。スコリア試料では締固めにより粒子破碎が発生し、細粒分が増加して、透水特性に影響を与えることが推定される。黒色スコリアの透水係数は10<sup>-4</sup>m/sオーダーであるのに対し、褐色スコリアは10<sup>-5</sup>～10<sup>-7</sup> m/sオーダーを示すが、いずれも細粒分含有率の大小に相関がある。

ここで注目すべきは、細粒分の差が透水特性に与える



影響の程度である。例えば、「小山」試料①（黒色スコリア）と「小山」試料②（褐色スコリア）の  $F_c$  の差はわずかに 8% であるのに対して、透水係数が  $10^{-4}$  m/s オーダーから  $10^{-7}$  m/s オーダーに変化している点である。

一面せん断試験では、いずれの対象土も締固め度 90% で締固めた場合、 $\phi > 38^\circ$  と  $c > 10$  kPa を有し、盛土材料として十分な強度を有することがわかった。一般的な礫質土と同等かそれ以上で評価できる。道路土工盛土工指針では締固めた砂質土の基準値を  $\phi = 25^\circ$ ,  $c = 30$  kPa 以下で示している<sup>25)</sup>が、せん断強度でこれを上回る。同様に関東ロームは基準値  $\phi = 20^\circ$ ,  $c = 10$  kPa 以下を示し、火山灰質土として関東ローム以上の強度を有する。

一方、締固め度 85~95% における  $\phi$  と  $c$  の変化を見た場合、スコリア試料では、締固め度の向上が必ずしも強度の増加には結びつかない傾向が見受けられた。これはスコリアにおいて締固めに伴う粒子破碎の影響が、内部摩擦角の発現に影響を与えているためであろう。また、粘着力では締固め前の細粒分含有の影響が考えられる。本研究では、粒子が破碎しやすい材料 ( $\Delta F_c > 6\%$ ) や締固め前の細粒分含有率が高い材料 ( $F_c > 15\%$ ) でこの傾向が認められた。すなわち、所定の締固め度を確保することで、十分な強度の発現と仕様設計における砂質土ないし礫質土の強度が担保できると考えられるが、材料の特性に見合った締固め度や締固め方法を適用する必要があることが示唆された。

「富士砂防」の試料ではこのような傾向は認められない。しなしながら、「富士砂防」では、三軸圧縮試験による強度定数と一面せん断試験による強度定数に違いが見受けられた。一面せん断は  $D_c = 90\%$  で  $\phi = 40.4^\circ$ ,  $c = 16.8$  kPa を得たのに対し、三軸では  $\phi' = 33.2^\circ$ ,  $c' = 15.5$  kPa と、 $\phi$  が小さい。この傾向はスコリア試料についても認められる可能性が高く、また、前述のように一面せん断試験では  $\phi$  を  $3^\circ$  程度過大に評価している可能性があり、強度定数の取り扱いには実際の破壊・変形モードを想定した注意が必要であろう。

### 4.3 盛土材料としての適性

スコリア試料について「御殿場」と「小山」というエリアの違いや、宝永噴火により噴出された黒色スコリアと、それ以前の噴出物である褐色スコリアとの地質的な違いに基づく土質特性の相違について前述した。

そもそも本試験を立案した時点では、色調や原位置での締まり具合などから、物理特性等でいくつかの小さくはない相違が生じると考えた。当然、「御殿場」と「小山」ではエリアが違うため、力学面など大きな相違が生じると考えた。

しかしながら、分布地や噴出時期に基づくいくつかの相違は認められるものの、それらは根本的なものではなく、ある程度俯瞰的に見た場合、基本的にはほぼ同様な物理特性と力学特性を示していると考えられる。

すなわち、いずれのスコリア試料も、物理特性（粒度分布、粒子径、土粒子の密度など）から判断すると砂礫材料に近く、透水性、圧縮性、せん断強度のいずれの側面からも砂礫材料と同等あるいはそれ以上の水理・力学特性を示す。細粒分含有率は 9~17% と低く、水浸沈下はほとんど生じておらず、所定の締固め度 ( $D_c = 90\%$  以上) で施工することで、降雨や地下水位の変動で施工後盛土が飽和しても沈下等の変状は発生しないと予測できる。一面せん断試験の結果からも締固め度  $D_c = 85\%$  以上で、内部摩擦角  $\phi 38 \sim 40^\circ$ 、粘着力  $c = 8 \sim 22$  kPa でみかけの粘着力を有し、砂礫相当の C1 材料（構造物裏込め材料の区分<sup>26)</sup>）として十分な強度を有することがわかる。

これらのことから、最適含水比に基づき適切な方法や手順により締固めが行われることを前提とし、盛土材料としての適用が可能である。

一方、通常の砂礫の工学的特性と大きく異なる点が二つある。一つは、単位体積質量が  $1.0 \text{ Mg/m}^3$  前後と小さいこと、もう一つは粒子破碎性が顕著（とりわけ「御殿場」において）な点である。

破碎性の高い材料の場合、現場において所定の締固め度で締固めても、材料の粒度分布が試験時のそれと異なるため、結果、所定の締固め度を満足せずに降雨時に水浸沈下等の性能問題が顕在化した事例がある。したがって、本材料を盛土材として利用する際には、盛土工事の適切な方法や手順を決定するために、施工の初期段階を試験盛土工事とし、実際締固めに用いる重機にて粒子の破碎性とその結果生じる物性値の変化を確認して、締固め管理の方法を定める必要がある。

また、本試験では、細粒分含有率  $F_c$  が 15% を超える試料で透水係数が  $10^{-7}$  m/s のオーダーを示し、難透水な状態となることがわかった。これは上記の粒子破碎の影響も加味され、より破碎性が高い状態で施工が進んだ場合、盛土構築後の地下水の流入による間隙水圧の発生など、排水特性に弱点が生じることを示唆している。さらに、全体的な傾向として自然含水比が最適含水比を上回っていることから、施工時の含水比の管理が難しく、かつ、所定の締固め度と強度を確保できない場合がある。

次に、「富士砂防」について述べる。

土質分類は礫質土で細粒分含有率は 4.2% と小さく、均等係数が  $U_c = 8$  と 10 以下で粒度分布は良好であるとは言えない。一方、締固めが容易で標準プロクターによる締固めにより最大乾燥密度は  $1.97 \text{ Mg/m}^3$  と十分に大きくなる。一面せん断試験の結果は締固め度  $D_c = 85\%$  以上で、内部摩擦角  $\phi 37^\circ$ 、粘着力  $c = 10$  kPa で砂礫相当の強度を有する。さらにスコリア試料と違い、締固めによる粒子破碎の懸念はほとんどない。また、透水係数は  $10^{-4}$  m/s オーダーで透水性に優れている。水の浸透による沈下量の割合は 1% 前後で小さく、盛土材料として十分な適性を有していると言える。最適含水比は自然含水比よりも湿潤側であり、施工管理も難しくはない。

以上の事柄から、「富士砂防」の材料は、盛土材料としての適性が非常に高く、最適含水比による十分な締固め管理を行うなどの他には、施工管理に顕著な課題は見当たらない。一方、スコリア試料は、盛土材料としての適性は高いものの、施工時における含水比の管理や施工機械と粒子破碎の影響に課題があることがわかった。

#### 4.4 原位置試験の結果

現位置におけるスコリアの性状を知るために、表面波探査と砂置換法による土の密度試験を行った。試験位置の平面図を図16に示す。試験地は室内試験の試料採取地A「御殿場」である。本図には「御殿場」試料①と試料②の採取位置についても示した。

図17に表面波探査結果図を示す。採取地A「御殿場」では、表層1～2m付近にスコリアが分布し、S波速度値 $V_s=120\sim 160\text{m/s}$ である。これは換算N値 $=2\sim 5$  [ $V_s=97.0N^{0.314}$ ]<sup>27)</sup>に相当し、ゆるい状態にある。スコリアの下位は洪新統で、礫質土よりなる。深度2～3m付近はS波速度値 $V_s=180\sim 280\text{m/s}$ で、換算N値 $=7\sim 30$ に該当する。耐震設計上の基盤面となる $V_s=300\text{m/s}$ の上面は深度3～4m付近に認められる。

現場密度試験は、表層のスコリアあるいはその二次堆積物に該当する試料①の採取地で、含水比 $w=63.7\%$ 、湿潤密度 $\rho_t=1.033\text{Mg/m}^3$ 、乾燥密度 $\rho_d=0.631\text{Mg/m}^3$ 、試料①より深く、若干締りが良いスコリアである試料②の採取地で、含水比 $w=45.3\%$ 、湿潤密度 $\rho_t=1.080\text{Mg/m}^3$ 、乾燥密度 $\rho_d=0.743\text{Mg/m}^3$ の結果を得た。いずれも一般の土に比べ非常に小さな密度であるが、浅層にあるスコリアほどより小さいことがわかった。

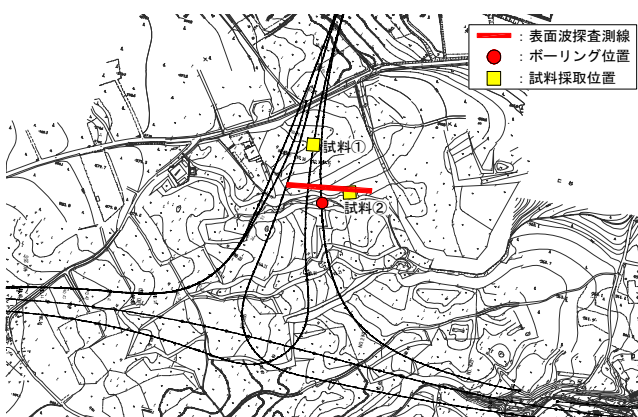


図16 原位置試験位置図

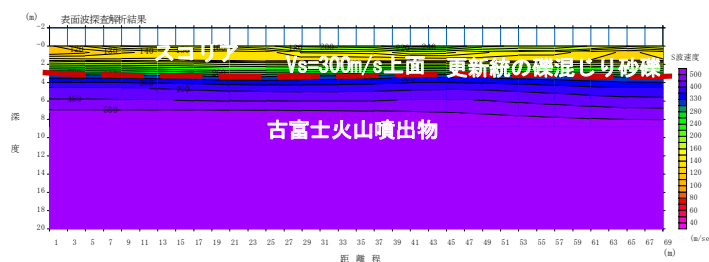


図17 表面波探査結果図

#### 4.5 原位置試験結果の評価と考察

表面波探査測線近傍のボーリング柱状図を図18に示した。柱状図との対比では、表層から層厚1.5mで分布するスコリアは、S波速度値 $V_s=120\sim 160\text{m/s}$ を示し、一定の成層構造を有し、顕著な側方への変化は認められない。これは採取した試験試料が本地域の表層地質を代表できると考える一つの証左でもある。一方、深度2～6mの中間層は、N値にばらつきがあり工学的な評価が難しい。しかし、探査結果を用いると、 $V_s=300\text{m/s}$ の上面が深度3～4m付近に認められ、これを耐震設計上の基盤面<sup>28)</sup>と判断することができる。スコリアの下位の洪新統は、深度とともに $V_s$ 値が増し、より続成作用の進んだ地盤となっている。

表11に現場密度試験と室内締固め試験の結果の対比を示す。これによると、スコリアの原位置における含水比は、試料①の採取地では、締固め試験による最適含水比に対し湿潤側を示した。試料②の採取地では、締固め試験による最適含水比に対し、わずかに乾燥側を示している。しかし、室内試験の自然含水比は $w=53.9\%$ で $W_{opt}=48.0\%$ に対し湿潤側である。試験値のばらつきが考えられるが、傾向として最適含水比に対し湿潤側にある。

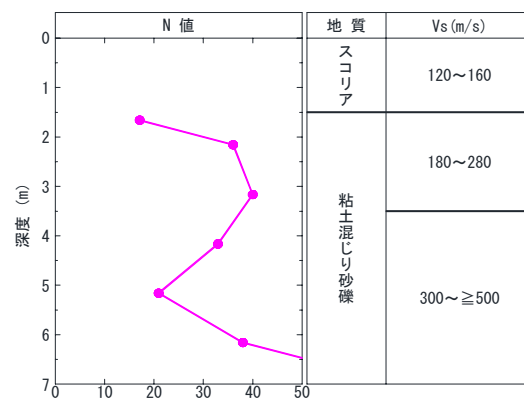


図18 表面波探査周辺のボーリング柱状図

表11 現場密度試験と締固め試験の対比

試料番号	現場密度試験		締固め試験	
	含水比 $w$ (%)	乾燥密度 $\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ )	最適含水比 $W_{opt}$ (%)	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ ( $\text{Mg/m}^3$ )
試料①	63.7	0.631	49.5	1.001
試料②	45.3	0.743	48.0	1.051

原位置の乾燥密度は、締固め試験による最大乾燥密度に比べいずれも小さく、試料①では4割近くの差がある。原位置の湿潤密度が、締固め試験による最大乾燥密度とほぼ同じという結果であり、スコリアの原位置における締り具合は緩く、S波速度やN値から推定される状態に整合的である。

本稿のはじめにスコリアは斜面災害などの対象となる脆弱な地質であることを記述したが、このように、原位置において締りが緩かつ密度が小さいことが、その素因であり、例えば、砂防堰堤の設計などでは水の単位体

積重量を  $11.77\text{kN/m}^2$  とする<sup>29)</sup>ことなどを勘案すると、その密度は小さく、スコリアが容易に浸食されることが伺えるものである。

## 5. 「スコリア」の工学的特性について

スコリアはその成因から多孔質の粒子構造を持つ材料であり、粒子間の間隙に加え、粒子内にも空隙を有する。そのため水分を保持して自然含水比は比較的高く、一方で単位体積重量が非常に小さい特徴がある。また、火山降下物では、河川等による研磨や運搬作用の影響がほとんどなく、粒子の形状や粒径は変化に富んでいる。

本研究で対象とした「御殿場」「小山」「富士砂防」の材料は、X線回析の結果、いずれも斜長石や輝石を主要な造岩鉱物とする富士火山特有の玄武岩質であることがわかっている。このことは礫分や  $2\text{mm}$  以下の試料のどちらも変わらず、造岩鉱物はほぼ同じである。この点から土材料としての物性の違いはそれぞれの試料の粒子構造の違いによるものと考えられる。

本研究の「スコリア」はいずれも礫質土の土材料である。ここで粒子に発泡構造を持つ「御殿場」「小山」のスコリア試料は、最適含水比で締固めを行った場合でもその最大乾燥密度は  $\rho_{d\max}=1.00\sim 1.11\text{Mg/m}^3$  と小さく、現場密度試験による湿潤密度は  $\rho_t=1.03\sim 1.08\text{Mg/m}^3$  で、いずれも軽量である。これに対して、溶岩等の岩石が侵食作用により運搬・破碎されて堆積した「富士砂防」では土粒子の密度が  $2.91\text{Mg/m}^3$  と重く、 $\rho_{d\max}=1.97\text{Mg/m}^3$  で一般的な土材料の値を示した。

富士山麓の小山町周辺では、表層に堆積した宝永スコリア（黒色スコリア）が降雨により流出して国道を通行止めにするなど防災上の課題となっているが、土粒子密度が小さく、降雨により流されやすいことに素因のあることがわかる。

「御殿場」「小山」および「富士砂防」の「スコリア」を締固め再構成した土の強度は、一面せん断試験で  $\phi > 35^\circ$ 、 $D_c=90\%$  以上では  $\phi \approx 40^\circ$  を示した。また、粘着力  $c$  も発生し、 $D_c=90\%$  以上では  $c > 10\text{kPa}$  を示している。道路土工盛土工指針によると、設計時に用いる土質定数として、関東ロームを締固め、盛土材として利用する場合の値は、単位体積重量  $14\text{kN/m}^3$ 、 $\phi=20^\circ$ 、 $c \leq 10\text{kPa}$  を例示している。これと対比する場合、いずれも関東ローム以上の強度を有することがわかる。さらにここで「御殿場」「小山」のスコリア試料と「富士砂防」では、一面せん断試験の結果に基づく限り、盛土材料としての強度特性に大きな違いがなかった。通常、盛土材として一般的に用いられる砂材料は、設計上の強度定数として  $\phi=30^\circ$ 、 $c=0$  とする場合が多いが、「スコリア」の再構成試料は仮に  $3^\circ$  程度過大に評価されていたとしても、これと比較して十分な強度を発現することが期待できる。

ところで、「御殿場」および「小山」のスコリア試料と

「富士砂防」で以下の違いが判明している。

土の単位重量の相違は上記した通りであるが、「御殿場」「小山」では締固めによる粒子破碎が確認された。また、細粒分のわずかな増加により、透水性が  $10^{-4}\text{m/s}$  オーダーから  $10^{-7}\text{m/s}$  オーダーへと大きく変化する特徴がみられる。さらに、褐色スコリアでは自然含水比が最適含水比を  $6\sim 10\%$  程度上回る。一方、「富士砂防」はこれらの傾向になく、富士山麓エリアでスコリア特有のものと考えられる。

これらのことから、「御殿場」「小山」に分布するスコリアの盛土への適用にあたっては、施工時の含水比と締固めによる粒子破碎の影響によって、物理特性および力学特性にやや大きな変化が生じる可能性があることがわかった。スコリアは盛土材として通常の砂質土以上、礫質土相当の良質な材料であるが、細粒分含有率のばらつきや粒子破碎の影響により透水特性に変化が生じることがある。また、十分な強度を発現させ品質を安定させるためには、施工時の含水比の調整が必要である。よって、十分な施工管理を行うことで盛土材としての利用が可能なた土材料であると言える。

施工時の含水比の調整では、黒色スコリアの自然含水比が最適含水比に対して乾燥側であるため、自然含水比の高い褐色スコリアとブレンドして、締固め時の含水比を調整する対策が可能である。また、「富士砂防」の自然含水比も褐色スコリアに対し乾燥側であり、その利用が考えられる。さらに、コスト面での課題があるが、強度の発現を目的とするのではなく、含水比の調整を目的としたセメント添加などの方法もある。

ここでスコリアは、 $D_c=85\sim 95\%$  の範囲においては、締固め度の向上が必ずしも強度の増加には結びつかない傾向があることを記しておく。これは締固めに伴う粒子破碎の影響が内部摩擦角の発現に影響を与え、粘着力は締固め前の細粒分含有の影響が認められる。本研究では、粒子が破碎しやすい材料 ( $\Delta F_c > 6\%$ ) や締固め前の細粒分含有率が高い材料 ( $F_c > 15\%$ ) でこの傾向が認められた。すなわち、所定の締固め度を確保することで、十分な強度の発現と仕様設計における砂質土ないし礫質土の強度が担保できると考えられるが、材料の特性に見合った締固め度や締固め方法を適用する必要がある。

これについては試験盛土により、工事の適切な方法や手順を決定することが重要である。緩い状態のスコリアを転圧する場合の撒き出し厚さと実際締固めに用いる重機のトラフィカビリティーを確認した上で、締固めによる粒子の破碎性とその結果生じる物性値の変化を把握し、粒子破碎を予め勘案した締固め管理値の設定が有効である。施工現場における日々の含水比管理の徹底と併せた管理が重要である。



## 6. 道路土工への活用例

近年、地震や豪雨による盛土被害が多数発生し、社会経済に大きな影響を及ぼす事例が増加した。一方で、従来から土構造物である盛土では、土質の多様性や復旧の容易性等から、耐震設計等に対する取り組みが遅れていた。そのため、災害時における道路のネットワーク機能を確保するために、道路土工においては盛土工指針を改定し、安全性、供用性、修復性の観点から盛土の要求性能を道路の重要度に基づいて担保させることとしている。設計では、常時、降雨時、地震時の作用を考慮して安定照査を行うよう規定している。特に、地震動の作用に対しては、十分な排水処理機能を有する盛土構造と入念な締め固めによる施工を前提として、レベル 1 地震動に対する照査を行えばレベル 2 地震動に対する照査を省略してよいとしている。これはこれまでの経験上、レベル 1 地震動に対して安全性と供用性が担保されていれば、レベル 2 地震で万が一盛土が損傷したとしても影響は限定的であったことがその背景にある。

実施した室内試験の結果を用い、本研究で対象とするエリアに計画されている道路盛土の円弧すべり面法を用いた安定計算を行った。盛土材として設定した土質定数を表 12 に示す。

表12 盛土材の土質定数

使用材料	地盤定数	$\gamma$	$\phi$	$c$
スコリア	CASE1	11kN/m <sup>3</sup>	38°	8 kN/m <sup>2</sup>
「富士砂防」	CASE2-1	20kN/m <sup>3</sup>	37°	10 kN/m <sup>2</sup>
	CASE2-2	20kN/m <sup>3</sup>	33°	15 kN/m <sup>2</sup>

土質定数は 2 ケースを想定し、CASE1 は盛土にスコリアを用い、CASE2 は「富士砂防」の材料を用いることを考えた。「富士砂防」では一面せん断試験値を CASE2-1 とし、三軸圧縮試験値を CASE2-2 とした。その際、盛土直下の基礎地盤は、同じくスコリアの一面せん断試験結果を参考として表面波探査結果等から、 $\gamma=11$  kN/m<sup>3</sup>、 $\phi=38^\circ$ として、粘着力を考慮しないものとした。同様に盛土直下の地盤について、所定の安全率を満足されるために必要な強度を逆算し、 $c$ - $\phi$  関係図を作成した。逆算時の安全率は常時  $F_s=1.20$ 、地震時  $F_s=1.00$  である。

ここで、図 18 のボーリングや図 17 の表面波探査実施箇所近傍での盛土計画高さは約 12m である。基礎地盤は直下にスコリアとその二次堆積物（「御殿場」試料①や試料②）、および更新統の礫質土が分布する。その下位は半固結状の古富士火山噴出物( $N$ 値 $\geq 50$ )が分布する。

図 19 は CASE1 地震時の安定計算結果図である。表 13 に最小安全率の計算結果を示す。また、図 20 に所定の安全率を満足させるために必要な盛土直下の基礎地盤の強度定数の組合せ、 $c$ - $\phi$  関係図を示した。本図にはスコリア試料の一面せん断試験に基づく  $\phi=38^\circ$ 、 $c=8$  kPa についてもプロットしている。

計算の結果、盛土材としてスコリアや「富士砂防」の材料を用い、締固め度  $D_c=85\%$  以上にて施工することで、地震時を含め盛土の安定を十分確保できることがわかった。

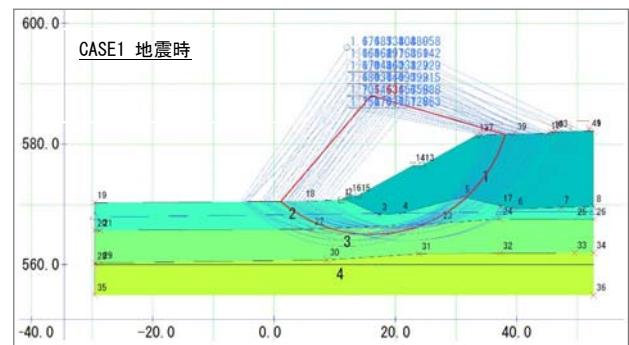


図19 円弧すべり法による盛土の安定計算結果例

表13 円弧すべり最小安全率の計算結果

使用材料	地盤定数	最小安全率 $F_s$	
		常時	地震時
スコリア	CASE1	2.11	1.63
「富士砂防」	CASE2-1	1.80	1.41
	CASE2-2	1.81	1.43

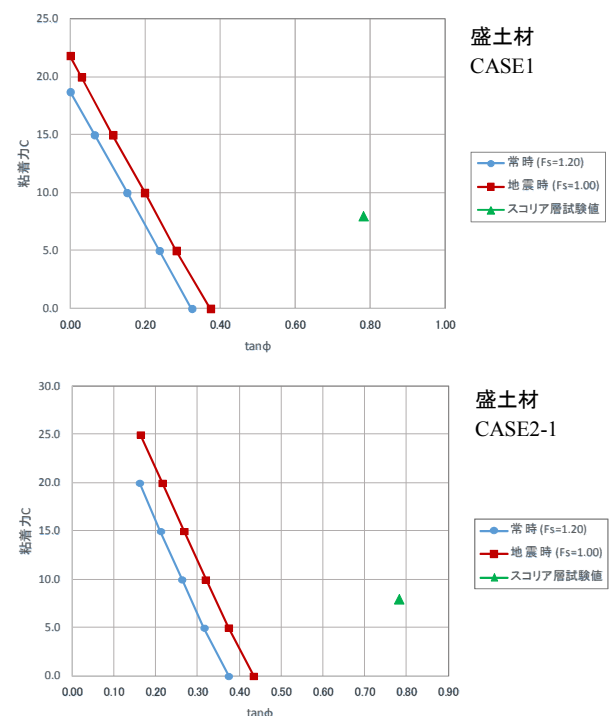


図 20 所定の安全率を満足する盛土基礎地盤の  $c$ - $\phi$  関係図

盛土基礎地盤においても図 20 に示した  $c$ 、 $\phi$  の組み合わせから、砂質土の一般的な強度があれば、盛土の安定に何ら支障がないことがわかった。

今回実施した表面波探査や現場密度試験の結果、さらに室内におけるせん断強度試験の結果から、基礎地盤となるスコリア層においては、砂の  $\phi=30^\circ$  以上の強度は見込



めるものと判断でき、盛土の安定に支障はない。

また、水浸沈下試験の結果、スコリアは水浸による沈下はほとんど生じない材料であることが判明しており、この傾向は基礎地盤における盛土荷重載荷後の状態に対応していると考えられる。

「スコリア」の盛土材への適性は前述した通りであり、対象地周辺で豊富に得られる土材料をそのまま盛土材として適用できる。スコリア材を用いたスコリア層上への盛土は施工管理に伴う課題に対応すれば、他に大きな問題はない。その際の留意事項は前述したが、スコリアの特徴である軽量さから、これを構造物の裏込め材として用い、土圧の軽減および耐震性の向上を図るなどの利用が適宜にかなっている。

## 7. まとめ

ここでは本論文で研究の対象とした「スコリア」のうち、「御殿場」「小山」のスコリア試料の特性について取りまとめるものである。

特殊土に位置づけられる火山灰質粗粒土のうちスコリアは、いくつかの災害事例の報告はあるものの、その工学的性質に関して十分議論されていないため、例えばスコリアを盛土材として利用する場合、その強度や締固め、あるいは沈下特性などに関する地盤材料としての適否の判断が難しいものとなっていた。

そこで筆者らは、富士山麓に広く分布するスコリアを用い、土質性状の把握と工学的性質を原位置および室内試験により詳細に検討して、道路土工のうち盛土材としての適用性について取りまとめを行なった。

その結果、これまでははっきりと示されてこなかったスコリアの土質特性や盛土材としての適用性について、いくつかの新たな知見や結果を得ることができた。これらの知見や結果を用いることで、今後、道路建設などにおけるスコリアの利用についての便宜が図れるものと考ええる。

以下、スコリアの土質特性、ならびに盛土材料としての特性および利用上の課題について取りまとめる。

### 7.1 スコリアの土質特性

#### 1 土質分類

新富士火山噴出物である富士山麓に分布するスコリアは、宝永噴火により放出された黒色を呈する宝永スコリアとそれ以前の噴出物で褐色を呈するスコリアがある。

黒色スコリアは礫分 67%、細粒分 9%に対し、褐色スコリアは礫分 45~54%、細粒分 9~17%で、わずかな違いがあるものの、いずれも礫質土に分類される。

#### 2 自然含水比と締固め特性

黒色スコリアは自然含水比 40%で、褐色スコリア 54~61%に対し小さい。

最適含水比と最大乾燥密度は、黒色スコリアと褐色スコリアで大きな違いはなく、最適含水比 44~50%、最大乾燥密度 1.00~1.11Mg/m<sup>3</sup>である。いずれも最適含水比が大きいほど最大乾燥密度は小さい。

黒色スコリアは自然含水比<最適含水比であるが、褐色スコリアは自然含水比>最適含水比で、自然含水比が最適含水比に対し湿潤である。盛土の締固め時の含水比に関する施工管理に課題がある。

### 3 単位体積質量

スコリアの単位体積質量は 1.0Mg/m<sup>3</sup>程度と小さい。

褐色スコリアでは原位置における湿潤密度が 1.03~1.08Mg/m<sup>3</sup>、乾燥密度が 0.63~0.74Mg/m<sup>3</sup>で、いずれも一般の土に比べ非常に小さな密度である。

### 4 粒子破碎と沈下特性

スコリアはせん断履歴により粒子破碎が生じる特徴があるが、対象試料でも同様に締固めの前後で細粒分含有率の増加がみられ、粒子破碎の発生が確認された。「御殿場」で  $\Delta F_c=6.3\sim6.6\%$ 、「小山」で  $\Delta F_c=1.9\sim2.6\%$ を示し、エリアで若干の差異がみられる。

水浸に伴う沈下は、締固め度 90%以上で締固めた場合、沈下量の割合が 0.6~1.8%で、ほとんど生じない。盛土構築後に地下水の変化が生じ盛土が飽和した場合でも、所定の締固め度を確保することで、沈下等の変状には結びつかないことがわかった。

圧縮指数  $C_c=0.12\sim0.32$ を示し、砂に近い圧縮特性を有する。

### 5 透水性

スコリアの締固め土の透水係数は  $k=3.4\times10^{-4}\sim2.8\times10^{-7}\text{m/s}$ とばらつきが大きく、締固めにより粒子破碎が発生し細粒分が増加して、透水特性に影響を与えることが推察される。

黒色スコリアの透水係数は  $10^{-4}\text{m/s}$  オーダーで、褐色スコリアは  $10^{-5}\sim10^{-7}\text{m/s}$  オーダーを示すが、いずれも細粒分含有率の大小と相関がある。

### 6 強度特性

一面せん断試験による再構成試料の強度は、 $D_c=85\%$ 以上で内部摩擦角  $\phi>35^\circ$ 、場合により  $\phi>40^\circ$ を示す。また、粘着力  $c$ を有し、黒色スコリアで  $c=8\sim13\text{kPa}$ 、褐色スコリアで  $c=9\sim24\text{kPa}$ を示した。

ここで、締固め度の増加に伴う  $c$ 、 $\phi$ の変化から、スコリアでは、 $\phi$ で締固めに伴う粒子破碎の影響が、 $c$ では締固め前の細粒分含有率が、締固めに伴う強度の発現に影響を及ぼすことがわかった。すなわち、粒子破碎の大きな材料 ( $\Delta F_c>6\%$ )や締固め前の細粒分含有率が大きな材料 ( $F_c>15\%$ )では、ある一定の範囲における締固め度の向上が必ずしも強度の増加には結びつかない傾向がある

と言える。

## 7 スコリアの特性（まとめ）

富士山麓に分布するスコリアは「御殿場」と「小山」というエリアや、黒色スコリアと褐色スコリアの地質の違いなどから、土質特性でもいくつかの相違はあるものの、その変化は大きくはないものであった。これはその主な成因が水成材料でないことにも起因している。

よって、本研究における一連の試験の結果を、スコリアにおける基本的な物理特性と力学特性として表 14 に一覧表として示すこととした。

表14 スコリアの特性一覧表

項 目	特 性	備 考
粒度組成	礫質土	礫分 45～67%, 砂分 25～40%, 細粒分 9～17%
自然含水比	w=40～61%	室内試験
締固め特性	最適含水比 w <sub>opt</sub> =44～51%	ρ <sub>dmax</sub> =1.00～1.11Mg/m <sup>3</sup>
	締固めにより 粒子破碎あり	細粒分含有率増分 ΔFc=1.9～6.6%
圧密特性	圧縮沈下のみ	圧縮指数 Cc=0.12～0.32
透水係数	3.4×10 <sup>-4</sup> ～ 2.8×10 <sup>-7</sup> m/s	細粒分含有率により 顕著に変化する
水浸沈下	水浸による沈下は ほとんど生じない	締固め度 90%以上
強度特性 (一面せん断)	φ=38～41°※ c=8～24 kPa	再構成試料 締固め度 D <sub>c</sub> =85～90%
乾燥密度	ρ <sub>d</sub> =0.63～0.74Mg/m <sup>3</sup>	原位置

※3° 程度過大に評価している可能性があるため、注意が必要である。

## 7.2 スコリアの盛土材料としての特性と課題

- スコリアは物理特性から判断すると砂礫材料に近く、透水性、圧縮性、せん断強度のいずれの側面からも砂礫材料と同等あるいはそれ以上の水理・力学特性を示す。
- 細粒分含有率は 9～17%と低く、水浸沈下はほとんど生じず、所定の締固め度（D<sub>c</sub>=90%以上）で施工することで、降雨や地下水位の変動により施工後盛土が飽和しても沈下等の変状は発生しないと予測できる。
- 一面せん断試験の結果では、締固め度 D<sub>c</sub>=85%以上で、内部摩擦角 φ38～40°程度、粘着力 c=8～20 kPa 程度のみかけの粘着力を有し、砂礫相当の材料として十分な強度を有する。
- よって、適切な施工管理により所定の締固め度を確保した盛土の構築がなされることを前提に、盛土材料としての適用性が高い材料であると言える。
- 一方、通常の砂礫の工学的特性と大きく異なる点が二つある。一つは、単位体積質量が 1.0Mg/m<sup>3</sup> 前

後と小さいことである。

- 粒子に発泡構造を持つスコリアは、最適含水比で締固めを行った場合でもその最大乾燥密度は ρ<sub>dmax</sub>=1.00～1.11Mg/m<sup>3</sup> と小さく、軽量である。そのため、降雨や表流水による浸食に弱く、法面に露出する場合には表面浸食を受ける可能性が高い。よって、覆土や土羽土による保護を確実に行う必要がある。
- もう一つは粒子の破碎性が顕著な点である。そのため、粒子破碎による粒度分布の変化により結果的に所定の締固め度を満足せず、盛土の性能低下が生じる可能性がある。すなわち、締固めに伴う粒子破碎が内部摩擦角の発現に影響を与える可能性があり、締固め度の向上が必ずしも強度の増加には結びつかない傾向がある。
- また、細粒分含有率が 15%を超える場合に透水係数が 10<sup>-7</sup>m/s オーダーを示し、難透水な状態となる。すなわち、粒子破碎が生じる状態で施工が進んだ場合、細粒分含有率が大きくなり、そのため透水性の低下から排水特性に弱点が生じて、盛土構築後、地下水の流入による間隙水圧の発生と盛土の変状につながる可能性が考えられる。
- 所定の締固め度を確保することで、十分な強度の発現や性能の確保が期待できるが、材料の特性に見合った締固め度や締固め方法を適用する必要がある。
- したがって、施工の初期段階を試験盛土とし、締固めに用いる重機にて粒子破碎とその結果生じる物性値の変化を確認して、締固め管理の方法を定める必要がある。また、当該地における全体的な傾向として自然含水比が最適含水比を上回っていることから、施工時の含水比の管理が難しく、かつ、所定の締固め度と強度を確保できない場合があり、試験施工による確認が重要である。
- スコリアは盛土材料としての適用性は高いものの、施工時における含水比の管理や、施工機械の選定ならびに施工方法に基づく粒子破碎の発生とその影響に課題がある。

## 8. 今後の課題

ここで紹介した試験結果の事例に基づくスコリアの地盤工学的特性は、いわゆる乱した試料として土の再利用を主たる目的としたものである。不かく乱状態の特性については、盛土計画箇所の基礎地盤の安定確認として行った物理探査等にとどまっている。

スコリアは火山噴出による堆積やその後の移動により再堆積した地盤においても、時間の経過とともに圧縮・圧密・膠結作用によって、続成作用が進み、強度が増加して行く。これら自然堆積地盤の支持力や破壊特性、さ

らに強度特性を知ることが、構造物基礎を計画する上で欠かすことのできない研究である。

ここで、スコリアは相対密度が 100%を超える密な状態で堆積している場合があり、不攪乱状態で 100kPa 程度の粘着力を有する事例報告もされており<sup>17)</sup>、非常に良質な支持地盤となり得る。通常、道路構造物であればその支持力を評価する上で 3 倍の安全率を考えている。また、その際に評価する強度定数は、粘土であれば粘着力を、砂や砂礫であれば内部摩擦角を設定するのみで、 $c$  および  $\phi$  の両者を同時に見込むケースは多くはない。そのため、強度の評価に対してはあまりセンシティブな問題とはならない。しかし、切土等の斜面安定問題は、現位置における土の評価に非常に密接に依存しており、計画安全率  $F_s=1.20$  に代表されるようにその許容範囲が 20%とセンシティブなものである。

スコリア層が厚く堆積する斜面を道路切土する場合、その安定勾配を地盤工学的手法で定めるには、現位置におけるスコリアの強度を知る必要がある。不飽和状態にある自然斜面の安定は、サクシオン効果によるわずかなみかけの粘着力が斜面の安定性を大きく左右することが知られており<sup>30)</sup>、降雨に伴う飽和度の上昇による粘着力の減少が斜面の安定に与える影響を評価して、検討を加える必要がある。また、切土面の安定は、応力解放による緩みの影響や膠結作用による強度が切土後の風化侵食により減少するなどの要因も大きい。

今後、スコリアの現位置における地盤強度の評価を行い、切土工で問題となるスコリアの特性を明らかにしたいと考えている。

## 謝辞

本研究にあたり、神戸大学大学院工学研究科の片岡沙都紀先生、澁谷研究室の三浦みなみさん、橋本真基君、古宮雅之君はじめ多くの学生諸氏の協力をいただきました。また、協和設計㈱本下稔、坪本正彦、渡邊浩幸に多くの尽力をいただきました。国土交通省沼津河川国道事務所様には貴重なフィールドの提供をいただきました。これら関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 日本の特殊土 土質基礎工学ライブラリー10 土質工学会編 1975.12
- 地盤材料試験の方法と解説 社団法人地盤工学会 2009.11 pp.678-680, pp.988, pp.991
- 兵動正幸, 三浦清一, 八木一善, 荒牧憲隆, 高田誠, 北村良介: 火山灰質土—その性質と設計施工—3.火山灰質粗粒土の工学的性質 土と基礎, 53-11(574) 2005.11
- 八木一善, 三浦清一, 松本和正: 北海道の火山灰質粗粒土の物理的性質と液状化 第44回地盤工学研究発表会 2009.8
- 火山灰質土の性質とその設計・施工シンポジウム (八戸) 1995.10
- 前田良刀, 日下部治, 大内正敏: 密なスコリア層における大型三次元基礎の支持力特性, 土木学会論文集, №430, pp.97-106, 1991.
- 日下部治, 前田良刀, 大内正敏, 萩原敏行: 不攪乱スコリアの強度・変形特性と攪乱の影響, 土木学会論文集, №439/III-17, pp.69-78, 1991.12
- 日下部治, 萩原敏行, 前田良刀, 大内正敏: 不攪乱試料を用いた支持力遠心実験と現場載荷試験との比較, 土木学会論文集, №457/III-21, pp.107-116, 1992.12
- 国土交通省 中部地方整備局 沼津河川国道事務所: 一般国道246号裾野バイパス バンフレット
- 国土交通省 中部地方整備局 沼津河川国道事務所 HP
- 国土交通省 中部地方整備局 沼津河川国道事務所: 一般国道138号須走道路・御殿場バイパス バンフレット 2011.11
- 国土交通省 中部地方整備局 沼津河川国道事務所 HP 巨大地震を想定した伊豆地域道路啓開検討協議会: 伊豆地域における道路啓開基本方針 ~伊豆版「くしの歯作戦」~ 2013.3
- 高橋正樹, 小見波正修, 根本靖彦, 長谷川有希絵, 永井, 田中, 西, 安井: 富士火山噴出物の全岩化学組成—分析データ847個の総括— 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要 №38 pp.117-166 2003
- 山元孝広, 石塚吉浩, 高田亮: 富士火山南西山麓の地表及び地下地質: 噴出物の新層序と化学組成変化 富士火山 荒牧重雄, 藤井敏嗣, 中田節也, 宮地直道編集, 山梨県環境科学研究所, pp.97-118 2007
- 国土地理院: 火山土地条件図「富士山」について 2003.11
- 宮地直道: 新富士火山の活動史 地質学雑誌, Vol.94, №6, pp.433-452
- 国土交通省 中部地方整備局 富士砂防事務所 HP
- 古宮雅之, 臼井亮太, 堀田崇由, 片岡沙都紀, 金兼洙, 澁谷啓: 富士山麓に分布する火山灰質スコリアの物理特性および透水性, 地盤工学会, 第48回地盤工学研究発表会, 2013
- 橋本真基, 季俊憲, 忠野祐介, 臼井亮太, 金兼洙, 澁谷啓: 富士山麓に分布する火山灰質スコリアの変形・強度特性, 地盤工学会, 第48回地盤工学研究発表会, 2013
- 西岡孝尚, 渡邊浩幸, 三浦みなみ, 河野祐斗, 高田昌典, 橋本真基, 澁谷啓: 火山灰質土地盤の工学的特性評価のための表面波探査, 地盤工学会, 第48回地盤工学研究発表会, 2013
- 林宏一, 鈴木晴彦, 斉藤秀樹: 人工震源を用いた表面波探査の開発とその土地質調査への適用, 応用地質技術年報, №21, 2001
- 松本和正, 八木一善, 三浦清一, 池田晃一: 北海道火山灰土の物理的性質と締固め特性, 土木学会第60回年次学術講演会, 2007.3
- 後藤恵之輔, 山中稔, 小川鉄平, Abdelhadi Monther: 火山成粗粒土の水浸に伴う圧縮及びせん断特性の変化について, 長崎大学工学部研究報告 第27巻 第49号, 1997.7
- 三浦清一, 八木一善: 火山灰質土粒状体の圧密・せん断における粒子破碎とその評価, 土木学会論文集, №561/III-38, pp.257-269, 1997.3
- 道路土工盛土工指針(平成22年度版) 公益社団法人日本道路協会 p.101 2010.4
- 設計便覧(案)第3編道路編 国土交通省近畿地方整備局 p.3-7 2012
- Tsuneo Imai, Keiji Tonouchi: Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus, Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, 1982
- 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 公益社団法人日本道路協会 2012.3
- 土石流・流木対策設計技術指針解説 国土技術政策総合研究所資料 国土交通省国土技術政策総合研究所 p.6 2007.3
- 川尻峻三: 室内試験による不飽和地盤挙動の評価に関する研究, 神戸大学大学院工学研究科博士論文, 2011.1

(2013. 11. 28 受付)

---

## Geotechnical characteristics of “Scoria” around Mt. Fuji

Takahisa NISHIOKA<sup>1</sup> and Satoru SHIBUYA<sup>2</sup>

1 KYOWA SEKKEI Co., Ltd.

2 Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University

### Abstract

In the literature, research dealing with geotechnical engineering properties of scoria is scarce. Therefore, it involves some difficulty in discussing the adequacy of scoria to use as a fill material. In this paper, the engineering properties of scoria sampled in areas around Mt. Fuji were in detail examined by in-situ and laboratory tests. Bearing in mind the use of it for fill material, the scoria around Mt. Fuji could be equivalent to, even superior to, natural sandy/gravelly soils in terms of permeability, residual settlement on wetting and the shear strength. For example, when using the scoria as a fill material, we see no problems in terms of not only the stability but also the residual subsidence of the embankment. Since the scoria is light in weight at around 1.0Mg/m<sup>3</sup> by showing significant crushability, care should be taken against the control of compaction work. The quality of embankment may be degraded when over-compaction is seen.

Key words: Scoria, Volcanic ash quality coarse-grained soil, Unusual soil, Fuji volcano, Fill material