

海底火山「福徳岡ノ場」の噴火で沖縄県沿岸に漂着した軽石の一面せん断特性

北海道大学大学院 正会員 ○渡部要一
 北海道大学大学院 小林 華
 港湾空港技術研究所 正会員 森川嘉之
 国交省港湾局（前 沖縄総合事務局） 石原正豊
 沖縄総合事務局 嶋倉康夫

1. はじめに

小笠原諸島の海底火山「福徳岡ノ場」は2021年8月に噴火し、大量の軽石が噴出した。海流に乗って漂流した軽石は、遠く離れた南西諸島各地の海岸に漂着しており、回収した軽石の処分が大きな課題となっている。軽石の有効利用方法が提案されている¹⁾が、さらに地盤材料として幅広く利用するためには、基本的な力学特性を把握しておくことが重要である。本研究では、直応力をパラメータとした一連の一面せん断試験を実施し、せん断強度定数やダイレーション特性と、それらに与える粒子破碎の影響について詳細に調べた。

2. 軽石試料と試験条件

対象とした試料は、運天港（沖縄県今帰仁村および名護市）に漂着した軽石である（写真-1）。漂流時の摩擦により表面は丸みを帯び、内部は発砲したスポンジ状の間隙構造になっている。粒子を細かく破碎すると閉塞した間隙が減り、土粒子密度は真の密度に近づいて増加するが、本研究では、細粒分（0.075mm以下）の土粒子の密度 2.476g/cm^3 が真の密度に近い値であるとした。以下の試験では、破碎させることなく9.5mmふるいを通した試料を使用した。

一面せん断試験の条件と供試体情報を表-1に示す。試験名の数字はせん断前に作用させた直応力（50, 100, 200, 300, 400kPa）で、末尾のaは最初に実施した試験シリーズ、末尾のbは再現性を確認するためや追加条件で後から実施した試験シリーズである。直径60mmの一面せん断試験箱の中に粒子破碎しない程度に密に詰めて、高さ約25mmの供試体を作製した。直応力を作用させ、沈下が終了したことを確認した後、上せん断箱と下せん断箱の隙間を0.2mmとし、定体積状態でせん断変位速度 0.2mm/min を与え、直応力とせん断応力を計測した。

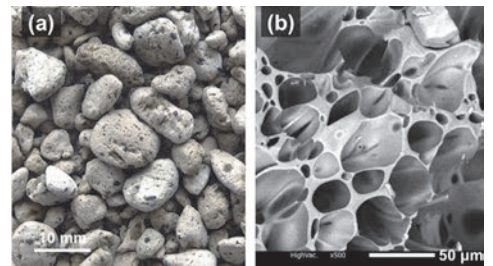


写真-1 軽石: (a)外観写真; (b)破断面SEM画像

表-1 試験条件と供試体の情報

試験ケース	直応力 σ (kPa)	含水比 (%)	乾燥密度初期状態 (g/cm^3)	乾燥密度せん断時 (g/cm^3)
DS50a	50	17.4	0.371	0.385
DS50b	50	11.3	0.380	0.391
DS100a	100	17.1	0.364	0.385
DS100b	100	11.2	0.383	0.396
DS200a	200	16.0	0.360	0.389
DS200b	200	12.0	0.364	0.389
DS300b	300	13.3	0.356	0.397
DS400a	400	13.1	0.375	0.418
DS400b	400	12.5	0.378	0.419

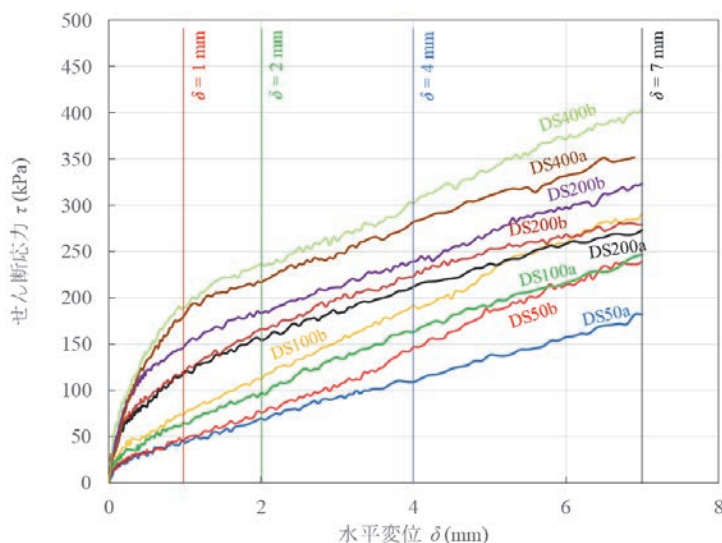


図-1 せん断応力と水平変位の関係

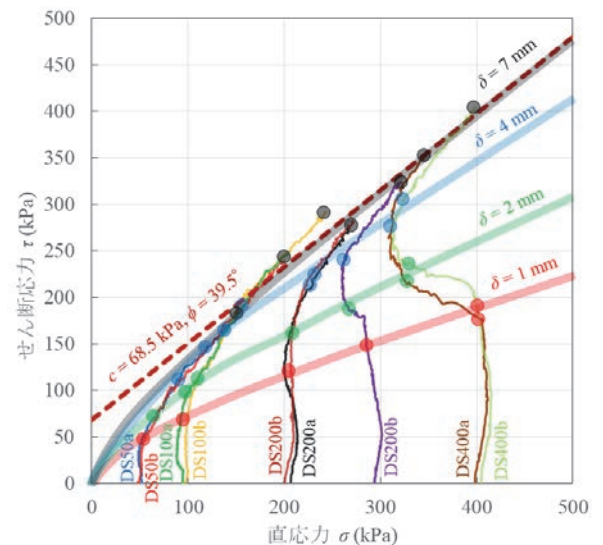


図-2 せん断応力と直応力の関係 (応力経路)

キーワード 軽石, せん断強さ, せん断抵抗角

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究院 TEL 011-706-6193

3. 試験結果と考察

せん断応力と水平変位の関係を図-1に示す。直応力が高い試験ほど降伏応力が増加し、かつ、降伏時の水平変位が大きくなる。降伏後はせん断応力が変位とともに増加するひずみ硬化型の挙動となるが、滑らかな曲線ではなく、ギザギザの関係が得られた。これはせん断に伴う粒子破碎に起因したものであると考えられる。

せん断応力と直応力との関係（応力経路）を図-2に示す。図中には水平変位1.0, 2.0, 4.0, 7.0mmに対応する点を示し、それぞれの変位での点を結ぶ曲線を示した。これらは、各変位時点で破壊を定義した場合の破壊規準線と見なせる。変位1.0mmまでの応力経路は上方に向かって変化しているため、降伏前の弾性的な挙動と解釈できるように見えるが、図-1に示したDS50～DS200では変位1.0mmですでに降伏しているため、実際は、粒子の再配置や破碎による圧縮とダイレーションによる膨張とが相殺している状態と考えられる。直応力が高いDS400では、変位1.0mmを過ぎると著しい直応力の低下が見られ、粒子破碎による体積収縮の影響が強く表れているが、変位が3.0mmを超えると直応力が増加に転じ、粒子破碎の影響よりもダイレーションの影響が優勢になったと理解できる。DS300でもDS400ほどではないが、類似の挙動が認められる。

各変位時点で定義した破壊規準線は上に凸な曲線になっており、粒子破碎に起因する応力依存性の典型的な傾向である。設計を想定してクーロンの破壊規準線を設定するのであれば、対象となる応力レベルや、破壊を定義する変位レベルに合わせて、見かけの粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ を設定する必要がある。図中には変位7.0mm時点で定義したクーロンの破壊規準線として、 $c=68.5\text{kPa}$ 、 $\phi=39.5^\circ$ の直線を示した。

供試体作製時の初期乾燥密度、ならびに、せん断時の乾燥密度と作用させた直応力の関係を図-3に示す。直応力200kPaを境にして、それよりも直応力が低いとせん断時の乾燥密度は 0.39g/cm^3 前後でほぼ一定であるが、直応力が高いと、乾燥密度が増加する傾向が見られ、直応力400kPaのケースでは、せん断時の乾燥密度は 0.42 まで増加した。直応力の値に加え、密度増加も強度増加に影響していると考えられる。

せん断応力と変位の関係（図-1）に見られたギザギザの線や、せん断応力と直応力の関係（図-2）で高い直応力の試験に見られた急激な直応力の低下傾向などは、いずれも粒子破碎の影響であると考えられる。そこで、試験前後にふるい分け試験を実施して得た粒径分布を図-4に示す。いずれのケースでも試験後に2.0mm未満の小さな粒子が増加した。DS300bやDS400bでその傾向が著しく、特に、高い直応力のDS400bでは粒子破碎が顕著である。

4. まとめ

本研究では、「福徳岡ノ場」の噴火に由来する漂着軽石に対して、直応力400kPaまでの範囲で一連の一面せん断試験を実施した。その結果、全体としてはダイレーション傾向が優勢でひずみ硬化型の挙動を示すが、200kPaより高い直応力の下では粒子破碎の影響に注意する必要があること、粒子破碎に起因した応力依存性が強い材料であるため、応力レベルや変位（ひずみ）レベルに合わせたせん断強度定数の設定が必要であることなどの知見が得られた。

参考文献

- 1) 沖縄総合事務局 (2022): 中城湾港泡瀬地区における軽石埋立処分手順. <http://www.ogb.go.jp/kaiken/minato/pumice>

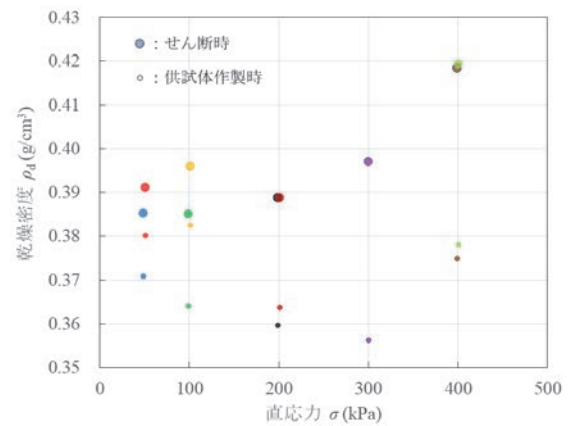


図-3 供試体作製時・せん断試験後の乾燥密度と直応力の関係

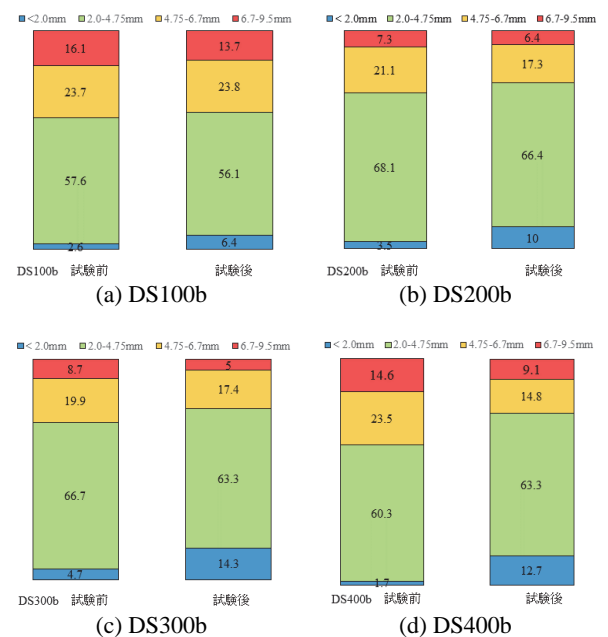


図-4 試験前後の粒径分布の変化