

破碎性地盤材料の力学特性に及ぼす密度の影響

福岡大学工学部 学生会員 ○下釜 洋 安河内 聡

福岡大学工学部 正 会 員 佐藤研一 山田正太郎 藤川拓朗

1. はじめに

砂の力学特性は密度や粒度分布など様々な影響を受けることが知られている。実験的に明らかにされた砂の材料特性を元に、数値解析の分野では、その力学特性を表現可能な構成モデルが開発されるに至っている¹⁾。一方で、これまで杭の先端部のように高い応力状態に達するような場所では、粒子破碎の影響が懸念されてきたが、これらのモデルを非破碎性材料に対し適用することは必ずしもされてこなかった。そこで本研究では、最終的に破碎性材料に対し弾塑性力学の適用を図ることを視野に入れ、その第一段階として、三軸試験により、破碎性材料の力学特性を把握することを目指す。特に、供試体の密度が破碎性材料のせん断に及ぼす影響に着目する。

2. 実験概要

2-1 実験試料 実験は、破碎性の小さい材料として豊浦砂を用い、破碎性の大きい実際の砂の替わりに、比較的粒子破碎の生じやすい溶融スラグを用いた。溶融スラグは5mm以下にふるい分けして用いている。図-1に各試料の粒度分布、物理特性を示す。スラグは豊浦標準砂よりも粒径が大きいものの、両者とも比較的均等粒径であるといえる。

2-2 実験方法及び条件 三軸試験の供試体作成方法及び試験条件を表-1に示す。実験には、直径 $\phi=75\text{mm}$ 、高さ $H=150\text{mm}$ の供試体を用いた。比較的密詰めの供試体は空中落下法で作成

表-1 実験条件

番号	試料	供試体 作成条件	有効拘束 圧(kPa)	背圧 (kPa)	排水 条件	初期の D ₀	せん断開 始時のD _r
a	豊浦砂	空中落下法	294	98	排水	77.2%	79.4%
b						51.7%	54.8%
c						27.3%	31.2%
d						6.2%	12.0%
e	Moist Placement	-9.6%				-1.0%	
f		85.1%				89.4%	
g		78.4%				83.7%	
h		63.0%				71.4%	
i	スラグ	Moist Placement			-3.4%	15.0%	
j					-21.0%	1.8%	
k					非排水	75.3%	78.0%
l						58.0%	61.0%
m	27.9%	33.1%					
n	22.8%	28.1%					
o	-10.3%	-1.6%					
p	102.8%	107.4%					
q	スラグ	空中落下法	80.3%	86.5%			
r			62.1%	70.1%			
s			5.7%	30.4%			
t			-13.7%	6.0%			

し、比較的緩詰めの供試体は試料を含水比5%程度に湿らせる Moist Placement 法で作成した。炭酸ガス、脱気水を通した後、背圧 $\sigma_{BP}=98\text{kPa}$ を載荷し、飽和させた。いずれの供試体も B 値は 0.96 以上である。せん断試験は有効拘束圧 294kPa で、初期密度を変えて行った。破碎性砂は圧密過程において大きく密度が変化するため、表中には試験開始時（圧密前）の相対密度 D_{r0} とせん断開始時（圧密後）の相対密度 D_r を示している。粒子破碎が生じることで試験中に最大間隙比・最小間隙比も変わるものと考えられるが、ここでは、試験開始前の最大・最小間隙比に対する相対密度を記した。最大間隙比を上回るような緩い試料の中にはあるが、Moist Placement 法ではこのような試料を作成することも可能である。

3. 実験結果

3-1 排水せん断試験結果 図-2に豊浦砂の、図-3にスラグの排水せん断試験結果を示す。図-2の豊浦砂の挙動は、大きく分けて以下の3つのタイプに分けることができる。

Type A：軸差応力でピークを生じ、大きく体積膨張するもの (a, b)

Type B：軸差応力でピークを生じず、僅かに体積膨張するもの (c, d)

Type C：軸差応力でピークを生じず、体積圧縮し続けるもの (e)

Type A は密詰めの砂試料にみられる典型的な挙動であり、Type B は緩詰めの砂試料にみられる典型的な挙動である。さて、これらのタイプ分けを基本に図-4のスラグの挙動をしてみる。(f, g)は Type B の挙動であり、(h, i, j)は Type C の挙動である。つまり、軸差応力のピークが見られると同時に、大きく膨張する Type A の挙動が見られない。スラグの最も密な供試体 (f) のせん断開始時の相対密度は 89.4%であり、供試体が密な状態にないために、Type A の挙動が現れないわけではない。したがって、排水せん断時に、典型的な密詰めの砂の挙動が見られないという点を、破碎性材料のせん断時の特徴として挙げることができる。また、同じ Type C の挙動であっても、スラグの(i, j)は豊浦砂の(e)に比べ、明らかに大きな体積圧縮を示しており、この点も特徴的である。全般的に見て、同じ相対密度でも、スラグの方があたかも緩い状態にあるかのような挙動を生じていると言える。

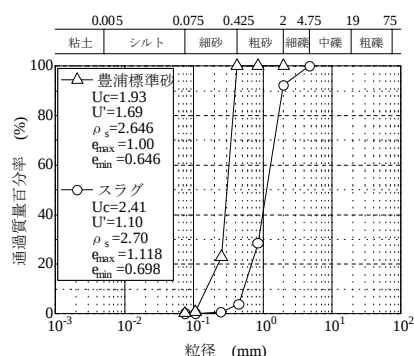


図-1 粒度分布図

3-2 非排水せん断試験結果 図-4に豊浦砂の、図-5にスラグの非排水せん断試験結果を示す。先ほどと同様に、図-4の豊浦砂のせん断挙動をタイプ分けすると、次の3つのタイプがある。

Type D: 試験開始時から硬化し続けるもの (k, l)

Type E: 原点に向かって一旦軟化し、変相線に達した後硬化する挙動を示すもの (m, n)

Type F: 原点付近まで軟化し、場合によっては液状化するもの (o)

一方の図-5に示すスラグの非排水せん断挙動でも、同様に3つのタイプの挙動が見られる。しかし、豊浦砂のkの挙動と、スラグのpの挙動を比較した場合、相対密度で比較すればスラグの方が密な状態にあるにもかかわらず、硬化の仕方は緩やかである。緩詰め試料では、同じType Fの挙動でも、豊浦砂では液状化してしまうような場合(o)がある一方で、スラグでは、軟化し原点に向かってはいるもの(s, t)はあっても、完全に原点に突っ込んでしまうような挙動は見られない。つまり、極端に緩い砂の挙動や、極端に密な砂の挙動が現れない点を非排水せん断時の破砕性材料の特徴として挙げるができる。

3-3 粒子破砕が及ぼす影響 破砕性材料のせん断挙動に極端に密な砂の挙動が現れないという点は排水せん断、非排水せん断共に言える特徴である。一方で、破砕性材料のせん断挙動に非破砕性材料では見られないような緩い砂の挙動が見られるという点は排水せん断時に限られた特徴で、非排水せん断時にはむしろ非破砕性材料よりも密な砂の挙動が現れている。改めて実験結果を眺めると、すべての破砕性材料の結果が同じDrの非破砕性材料の挙動よりも緩い砂の挙動が現れているのに対し、緩い砂の非排水せん断挙動だけは破砕性材料の方が密な挙動を示している。これは、排水せん断では必ず p' - q 平面上で1:3の傾きで有効応力経路が増加するのにに対し、緩詰め試料の非排水せん断では有効応力経路は原点へ向かって変化することに起因する。つまり、緩詰め試料の非排水せん断では、せん断中に顕著な粒子破砕を生じていないと考えられ、せん断中に粒子破砕が生じる場合には実際のDrよりもあたかも緩い砂の挙動が現れるものと考えられる。緩詰め状態にあるスラグの非排水せん断挙動で、実際のDrよりもあたかも密な砂の挙動が生じたのは、圧縮中に粒子破砕が生じた影響が現れたものと考えられる。

4. まとめ 本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 破砕性材料では、排水せん断試験時に、どのような密度でも実際のDrよりもあたかも緩い砂の挙動が現れる。
- 2) 破砕性材料では、非排水せん断試験時に、密な試料では実際のDrよりもあたかも緩い砂の挙動を示すが、密度が低下するほどその傾向は消え、極端に緩い試料ではむしろ実際のDrよりもあたかも密な砂の挙動が現れる。
- 2) せん断中に粒子破砕が生じると実際のDrよりもあたかも緩い砂の挙動を示す。(緩詰め砂の非排水せん断挙動のようにせん断中に顕著な粒子破砕が生じにくい状況では、場合によっては圧縮中に粒子破砕が生じた影響が現れ、むしろ実際のDrよりもあたかも密な砂の挙動を示す)

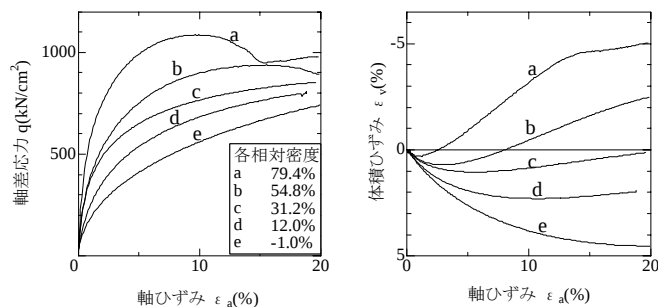


図-2 排水試験結果 (豊浦砂)

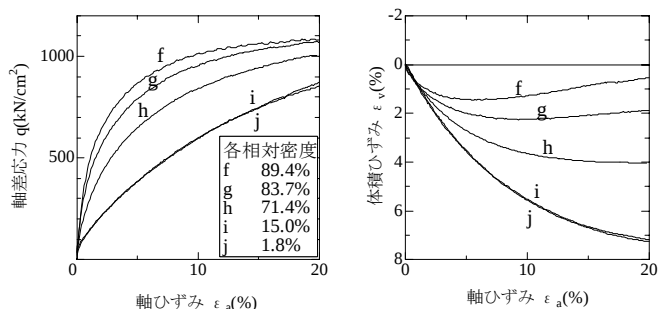


図-3 排水試験結果 (スラグ)

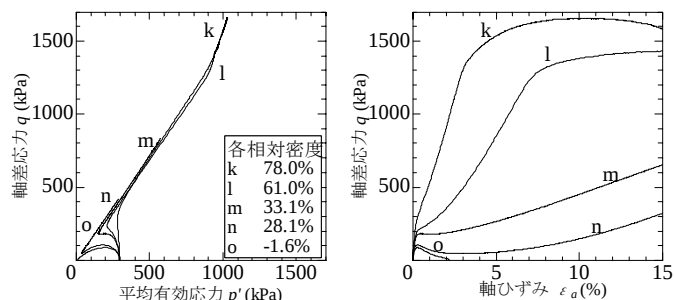


図-4 非排水試験結果 (豊浦砂)

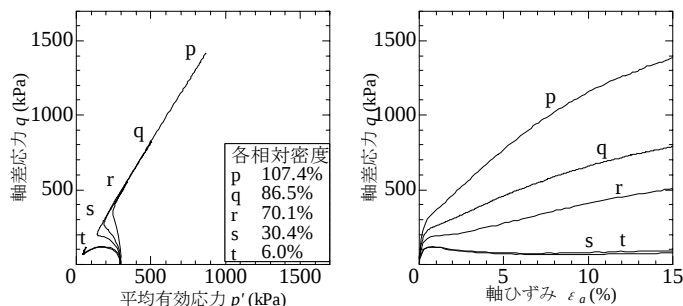


図-5 非排水試験結果 (スラグ)