地盤材料の破砕特性に関する研究

On the particle breakage of geomaterials

山口卓洋¹, 井上和香奈¹, Hossain Md. Shahin², 中井照夫³

- 1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・E-mail: originalsin-of-aj.@docomo.ne.jp
- 2 名古屋工業大学大学院・都市社会工学科・准教授
- 3 名古屋工業大学大学院・都市社会工学科・特命教授

概 要

地盤材料に用いられる粒状体は様々な状況下で破砕を生じる。粒子破砕を生じると粒度分布や粒子形状といった粒子特性が不可逆的に変化し,破砕後の粒状体の応力-ひずみ特性は破砕前とは大きく異なると考えられる。本稿では材料の破砕性に着目し,水砕スラグを用いた三軸圧縮試験を行い,密度,拘束応力,ひずみ量が粒子破砕量におよぼす影響について検討を行った。その結果,破砕量は密度,拘束応力,ひずみ量それぞれの影響を受けることが分かった。また,粒子破砕は広い意味でのボンディング効果の消失ととらえ,ボンディング効果を考慮できる既存の構成モデル¹⁾を発展させ,破砕性を有する地盤材料の構成モデルの提案を行った。提案モデルを用いた解析結果より,試験の傾向を表現することができた。

キーワード: 粒子破砕, 破砕量, 構成モデル

1. はじめに

地盤材料に用いられる粒状体は様々な状況下で破砕を 生じる。例えば,石灰質砂や火山灰といった破砕性土は, 比較的低い拘束圧下でも粒子破砕を生じる。非破砕性土の 場合でも,打込み杭の先端や土石流など高い応力条件下で は破砕を生じうることが知られている。また最近では、石 炭灰や発泡灰ガラス,水砕スラグといった産業副産物の再 生材料がしばしば地盤材料と用いられているが,これらの リサイクル材料は多孔質粒子からなるため高い破砕性を 示すことが指摘されている。 粒子破砕の進行に伴い, 粒度 分布や粒子形状といった土の粒子特性が不可逆的に変化 し, 圧縮特性の増加やピーク強度の低下を生じる。よって 破砕後の土の応力 - ひずみ特性は破砕前とは大きく異な ると考えられる。それは室内試験での破砕性地盤材料の評 価によって明らかにされてきた。したがって、現場では破 砕性土や非破砕性土にかかわらず, 粒子破砕は発生するも のだと認識した上で、十分な対策を講じなければならない。 そのためには,数値解析による力学挙動の予測が必要不可 欠である。今日ではコンピュータの性能の向上に伴い数値 解析が広く普及しているが,その解析結果の信頼性は用い る構成モデルに依存する。つまり、地盤材料の構成モデル は上述したような粒子破砕の影響を適切に記述できなけ ればならない。しかし、Cam Clay モデルをはじめとする 従来の地盤材料の弾塑性モデルは, 粒子破砕の影響を直接 的には考慮していない。そこで、著者らの研究グループで

は主に応力変化に起因する粒子破砕現象を考慮した構成 モデルを提案している²⁾。本研究では,破砕性を示す粒状 体の一例として水砕スラグを用いた三軸圧縮試験を実施 し,密度,拘束応力,ひずみ量が粒子破砕量におよぼす影 響について検討した。そして,試験で得られた結果をもと に既存の構成モデルの改良を試みた。

2. 試験概要

2.1 試料

試験に用いた試料は、1.2mm 以下に粒度調整し、24 時 間炉乾燥した水砕スラグである。水砕スラグは、製鉄過程 で、鉄鋼石とコークス、石灰石等を溶融して銑鉄を分離し た溶融スラグを急冷することにより³⁾生成される産業副産 物である。急冷処理されることにより粒子内に放出しきれ ないガスが気泡として残るため⁴⁾多孔質の角ばった粒子形 状をしているのが特徴である。Table-1 に試験に用いた水 砕スラグの物理特性を、Fig.1 に粒度分布を示す。Table-1 より、水砕スラグの粒子密度は一般的な砂質土(2.6×10³ ~2.8×10³kg/m³)と同程度であることが分かる。また、Fig.1 より、粒度組成は大部分が粗砂(1.2~0.85mm)、中砂(0.85 ~0.25mm) 成分から成り、粒径の大きい粒子が多いことが 分かる。

Table-1 水砕スラグの物理特性							
Density of slag	Liquid	Plastic	Maximum	Minimum			
particles	limit	limit	void raio	void ratio			
$\rho_{\rm s}({\rm kg/m^3})$	$w_L(\%)$	$w_p(\%)$	e _{max}	e_{min}			
2.89×10^{3}	Non-Plastic	Non-Plastic	1.387	0.924			



Fig.1 水砕スラグの粒度分布

2.2 試験方法

実施した試験は、三軸試験機による等方圧密試験および 平均有効応力一定の排水三軸圧縮せん断試験である。供試 体寸法は直径 5cm, 高さ 10cm で,供試体作製方法は水中 落下法とした。試験は、応力制御で等方圧密を行い、ひず み制御にて平均有効応力一定条件でせん断を行った。供試 体の下面からのみ排水を許し、供試体には 98kPa の背圧を 一定で作用させる。等方圧密試験は等方応力状態での破砕 性を把握する目的で,供試体密度を変えて行った。排水三 軸圧縮せん断試験は異方応力状態での破砕性を把握する 目的で供試体密度, 拘束応力, せん断する偏差ひずみを変 えて行った。Table-2 に水砕スラグの相対密度 - 間隙比関 係を Table-3 に実施した試験パターンを示す。試験名につ いて, 例えば, 排水三軸圧縮せん断試験において密な供試 体(Dr=80%)を平均有効応力 p=588(kPa)まで等方圧密 した後, 偏差ひずみが 30% 程度になるまでせん断した試験 を S-D-588-30 とする。また、Fig.2 に行った試験の応力経 路の模式図を示す。

Table-2	水砕ス	ラ	グの	相対密度	-	間隙比関係
---------	-----	---	----	------	---	-------

	Dense	Loose
Relative density Dr(%)	80	30
Void ratio e	1.017	1.249

Table-3 試験パターン								
試験名	試験内容 供試体密度 p(kPa) Ed(9)		\mathcal{E}_{d} (%)	プロット				
C-D-588	Consolidation	Dense	588					
C-L-588	Consolidation	Loose	588					
S-D-588-30	Shear	Dense	588	30				
S-L-588-30	Shear	Loose	588	30	-			
S-L-588-10	Shear	Loose	588	10				
S-L-58.8-30	Shear	Loose	58.8	30				

(p:平均有効応力, &: 偏差ひずみ)



2.3 粒子破砕の判断と破砕量 Br の定義

試験後に粒子破砕が生じているか否かの判断方法につ いて述べる。Fig.3 にリングせん断試験における Dog's bay 砂の粒度変化(Coop et al. 2004)⁵⁾を示す。Fig.3 より, せ ん断の進行に伴い粒子破砕を生じ, 粒度分布が変化してい る様子が分かる。粒子破砕を生じても最大粒径は変化せず 細粒分含有率が増加する。これは、大きな粒子は粒子内に 弱部を多く含むため破砕しやすいが,破砕した粒子に囲ま れ等方的な応力状態に近づくためである。その結果, 粒子 破砕を生じると粒径加積曲線は Fig.3 に示すように左にシ フトし、それ以上粒度が変化しない限界を迎える。この他 にも石油コークスの一次元繰返し圧縮試験(Bard 1993; Biarez and Hicher 1994)⁶で同様の結果が報告されている。 そこで本研究では、試験により Fig.3 に示すように粒径加 積曲線が左にシフトしていれば粒子破砕を生じていると 考える。また, Fig.4 に試験前後の粒径加積曲線の変化を 模式的に示しているが,これらで囲む斜線部の面積を破砕 量 Br (Relative breakage)⁷⁾と定義し,各試験の粒子破砕現 象を定量的に比較する。ここで, 粒径加積曲線の作成方法 は以下の通りとした。①24 時間炉乾燥した試料を 0.85, 0.25, 0.075mm の3段階のふるいで3分間ふるい, 各ふる いの残留質量を求める。20.075mm~1.2mm の粒径(mm) に対する通過質量百分率 (%)を計算する。③横軸に対数目 盛でふるいの目開きに対する粒径(mm)を縦軸に算術目盛 で通過質量百分率(%)をとりプロットを直線で結ぶ。



Fig.3 リングせん断試験における Dog's bay 砂の粒度変化



試験結果と考察

ここでは密度,拘束応力,偏差ひずみの違いに着目し, これらがせん断時の応力 - ひずみ関係や破砕量におよぼ す影響を考察する。Fig.5 に *q/p-ɛ_d-ɛ_v*関係を Fig.6 に破砕量 *Br* を示す。Fig.5 は縦軸に応力比と体積ひずみ,横軸に偏 差ひずみをとっている。

はじめに, 密度の違いに着目する。Fig.5, Fig.6 の S-D-588-30(青・Dr = 80%)とS-L-588-30(赤・Dr = 30%) を比較する。これらは、同じ拘束応力(p=588kPa)でせん断 した結果である。Fig.5 より,相対密度の高い S-D-588-30 (青・Dr =80%) は相対密度の低い S-L-588-30 (赤・Dr =30%)に比べピーク強度が高く、ひずみ軟化を生じてい ることが分かる。体積ひずみはせん断初期において圧縮傾 向にあるが、せん断の進行に伴い膨張に転じている。一方 で,密度の低い S-L-588-30 (赤・Dr=30%) はひずみ硬化 を生じており、体積圧縮のみを生じている。これらは、一 般的な砂にみられる,密度がせん断特性におよぼす影響と 同様である。また、Fig.6 より、破砕量は密度の低い S-L-588-30 (赤・Dr = 30%) の方が大きいことが分かる。 同図の C-D-588 (白・Dr=80%) と C-L-588 (灰・Dr=30%) は拘束応力 p=588kPa まで等方圧密した結果であるが、こ れらにおいても同様の傾向がみられた。これは、密度の低 い方が粒子同士の接触点が少なく,各接触点に作用する応 力が大きくなり、破砕が起こりやすいためと考えられる。 また,等方圧密による破砕量とせん断による破砕量を比較 すると、同じ拘束応力下ではせん断に起因する破砕量が大 きいことが分かる。このことから、粒子破砕は等方的な応 力状態よりもせん断ひずみが生じる異方的な応力状態で 顕著になると考えられる。これは、等方圧密試験および三

軸圧縮試験におけるチャタフーチー川砂の粒度分布の変化 (Vesić and Clough 1968)⁸⁾と同様の傾向である。

次に, 拘束応力の違いに着目する。Fig.5, Fig.6 の S-L-588-30 (赤・p=588kPa) と S-L-58.8-30 (緑・p=58.8kPa) を比較する。これらは同じ相対密度(Dr=30%)でせん断した 結果である。Fig.5より, 拘束応力の低い S-L-58.8-30 (緑・ p=58.8kPa) は拘束応力の高い S-L-588-30 (赤・p=588kPa) よりもピーク応力比が高いことが分かる。また、体積ひず みはせん断初期より圧縮傾向にあるがすぐに膨張に転じ ている。一方で、拘束応力の高い S-L-588-30 (赤・p= 588kPa)は圧縮のみを生じている。これは、同じ間隙比の 試料では拘束応力の小さい時,相対的に密な状態となるた めで、粒子破砕の生じない砂のせん断でも観察されるが、 ここでは特にその差が顕著である。ここで、Fig.6 の粒子 破砕量をみると, 破砕量は拘束応力の大きい S-L-588-30 (赤・p=588kPa)の方が大きく、拘束応力の影響に加え て粒子破砕量が応力 - ひずみ挙動に影響していることが 分かる。拘束応力の大きい方が各粒子の接触点に作用する 応力が高くなることで,破砕を生じやすい応力状態になる ためこのような結果が得られたと考えられる。

最後に、偏差ひずみの違いに着目する。Fig.6 の S-L-588-30(赤・ ϵ_d =30%)とS-L-588-10(黒・ ϵ_d =10%) を比較する。これらは同じ相対密度(Dr=30%),拘束応力(p=588kPa)でせん断した結果である。q/p- ϵ_d - ϵ_v 関係について S-L-588-10はS-L-588-30(赤・ ϵ_d =30%)と概ね同様の挙 動を示しており偏差ひずみ 10%程でピーク強度を迎えて いることを確認している。Fig.6 より、破砕量は偏差ひず みの大きいS-L-588-30(赤・ ϵ_d =30%)の方が大きいこと が分かる。つまり、ピーク強度に到達して以降、応力状態 が平衡している残留応力状態で偏差ひずみの増加により 破砕量が増加している。これは、Fig.3 にみられる傾向と 同様の結果である。偏差ひずみが大きくなれば、せん断帯 周辺において粒子の引っかかりに起因する破砕が多くな るためこのような結果になったと考えられる。

以上から,密度・拘束圧・ひずみ量の違いによる水砕ス ラグのせん断特性は,一般的な砂のそれと同様であること が分かった。また,破砕量は,密度・拘束圧・ひずみ量の 影響を受け,それぞれの要因のみにより一義的に決定しな いと考えられる。





4. 粒子破砕を考慮した構成モデルを用いた解析

4.1 粒子破砕を考慮した1次元弾塑性モデル

粒子破砕を考慮した構成モデルについて述べる。式(1) は本研究グループが提案している密度効果及びボンディ ング効果を考慮した 1 次元弾塑性モデルの間隙比増分~ 応力増分関係である。

$$d(-e) = d(-e)^{p} + d(-e)^{e} = \left\{\frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} + \kappa\right\} \frac{d\sigma}{\sigma}$$
(1)

ここに $G(\rho)$ は密度, $Q(\omega)$ はボンディングの関数であ る。粒子破砕は、広い意味でのボンディング特性の消失と 考え Q(ω)の項を応用し、粒子破砕の影響を表現する。ま た, Fig.3 より粒子破砕に伴う粒径加積曲線の変化には限 界(限界粒度)があることが分かる。そこで、粒子破砕を 生じて限界粒度に至る粒状体の粒度変化をボンディング 特性ωの消失と捉え状態変数ωの発展則を規定する。式(2) に従来の発展則を、式(3)に改良した発展則を示す。ここ で、B,Dはそれぞれ粒子破砕に関するパラメータである。 従来の発展則は粒子破砕に伴う粒度変化を応力のみで規 定していた。しかしながら,試験結果より粒子破砕量(粒 径加積曲線の変化量) は応力だけでなく密度, ひずみ量の 影響を受け、それらの要因が複合して影響するものと考え られる。そこで、改良した発展則はωの発展則を応力と塑 性ひずみがなす仕事で規定した。ここでは、 一次元モデル について説明しているが,修正応力 tiiに基づく応力パラメ ータを用いtii空間で流れ則を仮定するだけで,中間主応力 や異方性の影響を考慮しつつ容易に一次元モデルを多次 元モデルに拡張することができる⁹。

 $\begin{cases} if \quad \omega < 0 \quad \omega = 0 \\ else \quad d\omega = -D \cdot \sigma d\varepsilon^{p} \end{cases}$ (3)

4.2 解析概要

解析は、豊浦砂(e_{max} =0.922, e_{min} =0.645)のパラメータを用 いた等方圧密試験および側圧一定の三軸圧縮せん断試験 を想定して行った。Table-4 に豊浦砂の相対密度 - 間隙比 関係を Table-5 に解析パラメータを示す。また Fig.7 に解析 パターンの応力経路の模式図を示す。なお、解析名につい ては Table-3 に示す試験名と同様である。例えば、密 (Dr = 80%) な共試体を想定し、平均有効応力 p =588(kPa)まで等 方圧密した後、偏差ひずみが 30%程度になるまで側圧一定 でせん断した解析を S-D-588-30 とする。

Table-4 豊浦砂の相対密度 - 間隙比関係

	Dense	Loose
Relative density Dr(%)	80	30
Void ratio e	0.700	0.839

Table-5 解析パラメータ

材料パラメータおよび共通の構成パラメータ								
λ	κ		Ν	v	а		b	ω_0
0.070	0.0045		1.10	0.20		50	10	0.20
	粒子破砕に関するパラメータ							
粒子破	粒子破砕 従来の構成モデルを					改良	した構成	モデを
なしの想	なしの場合 用いる場合					用いる場	合	
$B=0.001, t_{\rm NI}(\rm bs)=1$			s)=19.6(kP	a)		D=0.25		



4.3 解析結果と考察

ここでは、従来のモデルと改良したモデルを用いた解析 結果を比較検討する。従来のモデルを用いた解析結果は、 Fig.8(a)に q/p- ε_{d} - ε_{v} 関係を(b)に ω - t_{N1} 関係を Fig.10(a)に $\Delta \omega$ を示す。改良したモデルを用いた解析結果は、Fig.9(a)に q/p- ε_{d} - ε_{v} 関係を(b)に ω - t_{N1} 関係を Fig.10(b)に $\Delta \omega$ を示す。 q/p- ε_{d} - ε_{v} 関係は縦軸に応力比と体積ひずみ、横軸に偏差ひ ずみをとっている。破線は粒子破砕を生じない場合を実線 は粒子破砕を生じる場合の解析結果である。また、 ω - t_{N1} 関係は縦軸に ω を横軸に t_{N1} をとっている。ここで、 t_{N1} は 降伏曲面の大きさを表す修正応力パラメータである。した がって、 ω - t_{N1} 関係は降伏曲面の大きさに対する粒子破砕 の進行具合(ω の変化の程度)を表している。



Fig.8 従来のモデルでの解析

また、Δωはボンディングの初期値ω,から現在のωまでの 変化量を表し、実際の試験における破砕量 Br に相当する 値である。さらに、密度、応力、偏差ひずみが破砕量にお よぼす影響を定性的に比較するため Fig.10(c)に試験から 得られた破砕量 Br を示す。

はじめに密度の違いに着目する。S-D-588-30(青・ Dr=80%)とS-L-588-30(赤・Dr=30%)を比較する。これ らは、同じ側圧(σ_r=588kPa)でせん断した結果である。 Fig.8(a)の S-D-588-30(青・Dr=80%)とS-L-588-30(赤・ Dr=30%)より、従来のモデルでは相対密度の高い



改良したモデルでの解析

Fig.9





Fig.10 Δωと破砕量 Br の比較

また、Fig.10(a)の C-D-588 (白・Dr=80%) と C-L-588 (灰・Dr=30%) は拘束応力 p=588kPa まで等方圧密した結果で あるが、従来のモデルでは、これらに密度の違いによる差 はみられない。同図(a)の S-D-588-30 (青・Dr=80%) と S-L-588-30 (赤・Dr=30%) より、従来のモデルでは相対 密度の高い S-D-588-30 (青・Dr=80%)の方が $\Delta \omega$ は大きい。 これらは、従来のモデルでは ω の変化量が応力の最大値に 依存するためである。一方で、同図(b)の改良したモデルは、 C-D-588 (白・Dr=80%) と C-L-588 (灰・Dr=30%) また は S-D-588-30 (青・Dr=80%) と S-L-588-30 (赤・Dr=30%) より、相対密度の低い方の $\Delta \omega$ が大きく、同図(c)の試験結 果の傾向と一致している。

次に側圧(応力)の違いに着目する。S-L-588-30(赤・ σ_r =588kPa)とS-L-58.8-30(緑・ σ_r =58.8kPa)を比較する。 これらは同じ相対密度(Dr=30%)でせん断した結果である。 Fig.8(a)のS-L-588-30(赤・ σ_r =588kPa)とS-L-58.8-30(緑・ σ_r =58.8kPa)より,従来のモデルではS-L-588-30(赤・ σ_r =588kPa)に比べS-L-58.8-30(緑・ σ_r =58.8kPa)は実線 と破線に差がなく,粒子破砕の影響が小さいことが分かる。 これは、同図(b)より、S-L-58.8-30(緑・ σ_r =58.8kPa)のの の減少量が小さいためである。Fig.9(a)、(b)より、改良したモデルにおいても同様の傾向がみられる。また、Fig.10(a)、(b)のS-L-588-30(赤・ σ_r =58.8kPa)とS-L-58.8-30(緑・ σ_r =58.8kPa)より、 $\Delta \omega$ は側圧の高いS-L-588-30(赤・ σ_r =588kPa)の方が大きく、従来のモデル、改良したモデル ともに同図(c)の試験結果の傾向と一致している。

最後に、偏差ひずみの違いに着目する。Fig.10 の S-L-588-30 (赤・ ϵ_d =30%)とS-L-588-10 (黒・ ϵ_d =10%) を比較する。これらは同じ相対密度(Dr=30%),同じ側圧(σ , =588kPa)でせん断した結果である。Fig.10(a)のS-L-588-30 (赤・ ϵ_d =30%)とS-L-588-10 (黒・ ϵ_d =10%)より、従来 のモデルでは偏差ひずみの違いによって $\Delta \omega$ に差はみられ ない。これは、従来のモデルは $\Delta \omega$ の変化を応力のみで規 定しており、ひずみ量に依存しないためである。一方で同 図(b)より、改良したモデルは偏差ひずみの小さい S-L-588-10 (黒・ ϵ_d =10%)よりも偏差ひずみの大きい S-L-588-30 (赤・ ϵ_d =30%)の $\Delta \omega$ が大きく、同図(c)の試験 結果の傾向と一致している。これは、改良したモデルは $\Delta \omega$ の変化が、応力だけでなく、塑性ひずみ増分に依存するた めである。つまり、残留応力状態であっても塑性ひずみの 増加に伴い $\Delta \omega$ が大きくなる。

以上から,従来のモデルでは,応力の違いによる破砕量 の増加傾向は表現できているが,密度,ひずみ量の影響を 表現できていないことが分かる。一方で,改良したモデル は,密度,拘束応力,ひずみ量が粒子破砕量におよぼす影 響について適切に表現できている。

5. まとめ

試験により,粒子破砕量は,密度,応力,ひずみ量の影響を受けることが分かった。また,試験結果より,既存の 状態変数ωの発展則を応力,塑性ひずみ増分がなす仕事で 規定することにより試験結果の傾向を表現することがで きた。

参考文献

- 1) Teruo Nakai. et al.: S&F, Vol.51, No.6, 1129-1148, 2011.
- 鈴木裕大,菊本統,中井照夫,H.M. Shahin,京川裕之: 粒子破 砕の影響を考慮した土の応力ひずみ関係の合理的なモデル化, 第45回地盤工学研究発表会,講演集(CD-ROM), 2010.
- 3) 松田博,中川雅夫,篠崎晴彦:建設・産業副産物の地盤工学的有効 利用 9.鉄鋼スラグ,土と基礎, pp. 40-47,
- 4) (財)沿岸開発技術センター, 繊鋼スラグ協会:港湾工事用水 砕スラグ利用手引書, 1989.
- Coop, M.R., Sorensen, K.K., Bodas Freitas, T. and Georgoutsos, G.: Particle breakage during shearing of carbonate sand, Géotechnique, 54(3), 157-163, 2004.
- Bard, E.: Comportement des materiaux granulaires secs et a liant hydrocarbone, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1993.
- Hardin: Crushing of soil particles, Journal of Geotechnical Engineering(1985) Vol.111 pp.1177~1192
- Vesić, A.S. and Clough, G.W.: Behavior of granular materials under high stresses, J. of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of the ASCE, SM3, 661-688, 1968.
- 9) Teruo Nakai. et al.: S&F, Vol.51, No.6, 1149-1168, 2011.