

粒子破碎に着目した砂の一次元圧縮モデルの検討

九州大学大学院 学○松原 寛之

九州大学大学院 F 落合 英俊 正 安福 規之

九州大学大学院 正 大嶺 聖 正 山田 正太郎

1. はじめに

破碎性地盤では、粒子破碎およびそれに伴う粒子の再配列により、圧縮・沈下が生じることが指摘されている。粒子破碎現象に影響を及ぼす因子は様々なものが挙げられるが、特に単粒子強度や粒子形状などのミクロ的な粒子の特性が、地盤全体の挙動に深く関わっていると考えられる。本研究では、破碎性の異なる材料を用いた一次元圧縮試験を実施し、単粒子強度、粒子形状、粒度分布、間隙比、応力レベルに着目し、粒子破碎の影響を考慮した破碎性土の一次元圧縮モデルについて検討する。

2. 破碎性地盤における体積圧縮

図-1は、破碎性の卓越した砂の $e \sim \log \sigma_v$ 関係の概念図を示したものである。地盤全体としての間隙比の変化 Δe を①粒子破碎に起因した Δe_c と②粒子破碎に起因しない Δe_s の重ねあわせとして式(1)のように考える。ただし、 Δe_s については、 $e \sim \log \sigma_v$ 曲線の初期の接線勾配 C_1 をもとに式(2)により計算する。

$$\Delta e = \Delta e_c + \Delta e_s \quad \cdots \text{式(1)} \quad \Delta e_s = C_1 \times \Delta(\log \sigma_v) \quad \cdots \text{式(2)}$$

3. 破碎性の指標

粒子破碎の程度を評価する指標として、単位体積当たりの表面積増加量 ΔS (cm^2/cm^3)を導入した。 ΔS は供試体になされた仕事とよい相関がある。 ΔS は式(3)で求められる表面積 S (cm^2/cm^3)の増加量である。式(3)において、 f は各粒径の試料の残留率、 $d_m = \sqrt{(d_1 \times d_2)}$ (d_1 および d_2 は隣り合うふり目(cm))、 e はそのときの間隙比である。

$$S = \sum f \cdot \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(4/3)\pi(d_m/2)^3} \cdot \frac{1}{1+e} \quad \cdots \text{式(3)}$$

4. 粒子破碎に影響を及ぼす諸特性

4-1. 初期間隙比 e_0 初期間隙比 e_0 が大きいくほど、土粒子間の接触点数が少なくなり、土粒子間の接触点一つにかかる力が大きくなるため粒子破碎は生じやすくなる。

4-2. 粒子形状 粒子形状について、「扁平な粒子ほど粒子破碎が生じやすい」ことが知られている。ここでは、粒子形状を表わすパラメータを S_s として式(4)のように考える。

$$S_s = \sqrt[3]{\frac{l_2}{l_1} \times \frac{l_3}{l_2} \times \frac{l_1}{l_3}} \quad \cdots \text{式(4)}$$

ただし、図-2に示すように $l_1 > l_2 > l_3$ である。この S_s は常に $0 < S_s \leq 1$ を満たし、粒子が正多面体であるとき $S_s = 1$ となる。つまり S_s が1に比べて小さいほど粒子破碎は生じやすくなる。

4-3. 単粒子強度 σ_{sf} 一次元圧縮試験における鉛直応力 σ_v を単粒子強度 σ_{sf} で除した値を応力のパラメータとし、この値が大きくなると粒子破碎が生じやすくなると考える。

5. 粒子破碎パラメータCの導入

粒子破碎に影響する要因には、内的なもの(単粒子強度、粒径、粒子形状、粒度分布、間隙比など)と外的なもの(応力レベル、応力経路、載荷時間など)があり、このような諸因子を含んだパラメータが必要となる。ここで、単粒子強度、粒子形状、初期間隙比、鉛直応力に着目した粒子破碎パラメータCを式(5)のように定義する。

$$C = \frac{\sigma_v}{\sigma_{sf}} \cdot e_0 \cdot \frac{1}{S_s} \cdot \frac{1}{D_{50}} \quad \cdots \text{式(5)}$$

D_{50} は平均粒径であり、表面積増加量 ΔS が粒径 d_m の逆数に比例することを考慮している。図-3は、材料特性の異なる3種類の砂を用

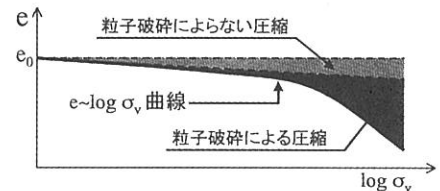
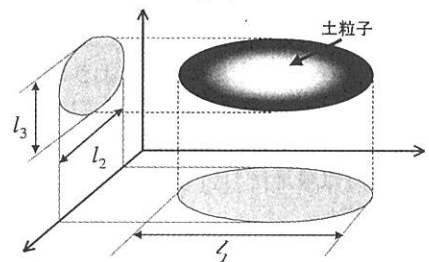
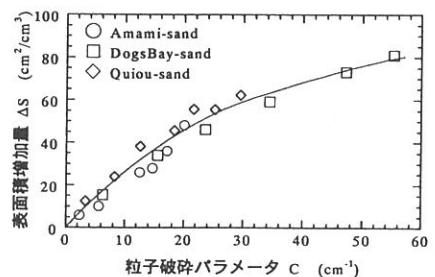
図-1 $e \sim \log \sigma_v$ 関係の概念図

図-2 粒子形状の定義

図-3 $\Delta S \sim C$ 関係

いた一次元圧縮試験結果である。この図より、 $\Delta S \sim C$ 関係は材料によらず一義的であると言える。

6. 一次元圧縮モデル

6-1. 粒度分布の仮定 粒子破碎が生じると、その粒径加積曲線は「粒径が小さくなる方向」へ変化する。つまり比較的大きな粒径の粒子数は減少し、逆に小さな粒径の粒子数は増加する。また、それらの中間の粒径の粒子数は変化しない、と考えることができる（図-4）。そこで、地盤をこのような3つの粒径の粒子からなると仮定すると、式(6)が成り立つ（ダッシュ() は破碎後を表わす）。

$$|\Delta f_1| = |\Delta f_3| \quad \text{つまり、} \quad f_1 - f_1' = f_3' - f_3 \quad \cdots \text{式(6)}$$

図-5 は一次元圧縮試験後のふるい分け結果である。この図は粒径が D_{50} 以上の減少量と D_{20} 以下の増加量はほぼ等しいことを示しており、よって3つの粒径の境界は D_{50} , D_{20} がよいと考える。また、それぞれの粒径は相乗平均により式(7)のように決定する。

$$D_1 = \sqrt{D_{100} \times D_{50}}, D_2 = \sqrt{D_{50} \times D_{20}}, D_3 = \sqrt{D_{20} \times D_0} \quad \cdots \text{式(7)}$$

このように仮定したモデル土の表面積増加量 ΔS は、式(3)より、

$$\Delta S = S - S_{\infty}$$

$$= \left(\frac{f_1'}{e_0+1} - \frac{f_1}{e_0+1} \right) \cdot \frac{6}{D_1} + \left(\frac{f_2'}{e_0+1} - \frac{f_2}{e_0+1} \right) \cdot \frac{6}{D_2} + \left(\frac{f_3'}{e_0+1} - \frac{f_3}{e_0+1} \right) \cdot \frac{6}{D_3} \quad \cdots \text{式(8)}$$

と表わすことができる。

6-2. 粒子の再配列の仮定 このモデルにおいて、大きな粒子が破碎すると必ず中くらいの粒子に、中くらいの粒子が破碎すると必ず小さな粒子になると考える（大きな粒子→小さな粒子は考えない）。さらに、破碎した粒子は全て間隙に入り込むとすると、図-4 の黒く塗った分だけ間隙が減少するので、粒子破碎に起因した間隙比の変化(図の斜線部分) Δe_c は式(9)のように表わすことができる。

$$\Delta e_c = |\Delta f_1| + |\Delta f_3| = 2 \times \Delta f_1 = 2 \times (f_1 - f_1') \quad \cdots \text{式(9)}$$

地盤全体の間隙比 $e' = e_0 - \Delta e$ であるから、式(1)~式(9)より、

$$e' = e_0 - \frac{(e_0+1) \cdot \Delta S + A \cdot \Delta e_s}{\Delta S + A + \frac{B}{e_0+1}} \quad \cdots \text{式(10) が得られる。}$$

ただし、 $A = 3 \times \left(\frac{1}{D_3} - \frac{1}{D_1} \right)$ $B = 6 \times \left(\frac{f_1}{D_1} + \frac{f_2}{D_2} + \frac{f_3}{D_3} \right)$ である。

ΔS の値は先に示した粒子破碎パラメータ C から図-3 によって求めることができるため、 C に必要な材料定数 (σ_{sf} , e_0 , S_s , D_{50}) および初期の粒度分布が知れば、任意の応力レベル σ_v における間隙比 e' が予測できることとなる。モデルのフローを図-6 に示す。

7. 実験結果との比較

図-7, 8 は材料特性の異なる2種類の砂についての一次元圧縮試験 ($D_r = 40\%$, 載荷速度 0.1 mm/min) の結果とモデルによる $e \sim \log \sigma_v$ 関係を示したものである。各試料の材料特性は表-1 に示す。これらよりモデルによる計算値はおおむね合致しているといえる。

表-1 試料の材料特性

	比重	e_0	$D_{50} \text{ (mm)}$	$D_{20} \text{ (mm)}$	$\sigma_{sf} \text{ (MPa)}$	形状係数
Amami-sand	2.75	1.37	0.47	0.31	22.9	0.52
DogsBay-sand	2.72	1.45	0.35	0.25	16.3	0.38
Quiou-sand	2.70	1.08	0.74	0.49	6.9	0.59

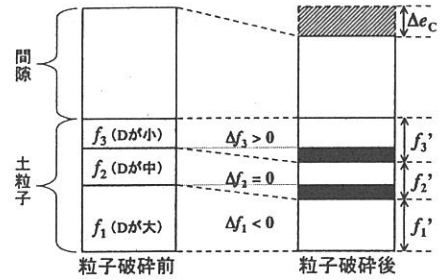


図-4 粒子破碎モデル

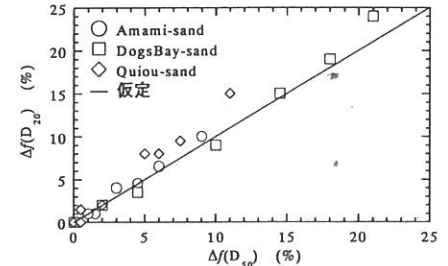


図-5 $\Delta f(D_{20}) \sim \Delta f(D_{50})$ 関係

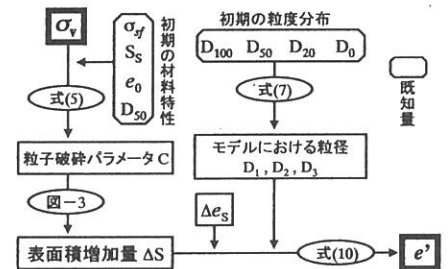


図-6 モデルのフロー

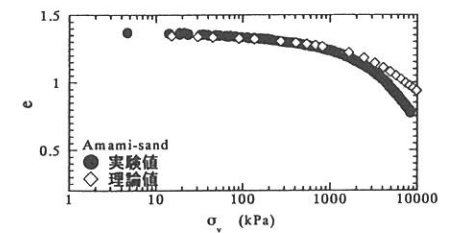


図-7 Amami 砂

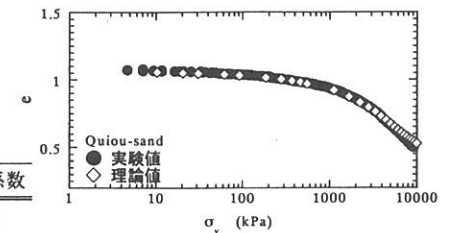


図-8 Quiou 砂