

砂粒子の粒径に着目した破碎特性と一次元圧縮中の粒子の破碎状態

山口大学工学部 正 員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一
 中央復建コンサルタンツ(株) 正 員 足立 剛
 山口大学大学院 学生員 ○原田 孝行 加登 文学

1. まえがき 一般に砂のような粒状体では拘束圧の増加に伴いダイレイタンシー量の変化や強度低下を引き起こすことが知られている。また、そのような力学特性の変化は、供試体内の粒子が破碎していることに起因していることが明らかにされている。そのため、個々の粒子の破碎特性や供試体内における粒子形状の変化を把握することは¹⁾、粒状体の力学特性における拘束圧依存性を解明するのに有効であると言える。本研究は、砂を構成している単粒子の破碎特性を実験的に明らかにするとともに一次元圧縮試験中の粒子破碎との比較検討を行うものである。

2. 試験方法 用いた試料は三河珪砂鉱山で採掘された珪砂であり粒径を0.25～0.30mm($G_s=2.648$, $e_{max}=1.088$, $e_{min}=0.666$), 0.60～0.71mm($G_s=2.659$, $e_{max}=0.968$, $e_{min}=0.659$), 1.40～1.70mm($G_s=2.639$, $e_{max}=0.881$, $e_{min}=0.632$)に粒度調整したものである。単粒子破碎試験は、試験装置の上盤を固定、下盤を載荷速度0.1(mm/min)一定で上昇させることにより粒子を破碎させるものである。一次元圧縮試験はそれぞれの粒径の粒子を用い初期間隙比 $e_0=0.666$ の供試体で試験を行った。

3. 結果と考察 図-1, 2 は破碎強度と初期粒径の関係を示したものである。第1破碎強度 σ_c は単粒子破碎試験において、最初に荷重が減少したときの荷重(最初に角がかかる破碎が生じたときの荷重に対応)を粒径の2乗で除したものである。また最大破碎強度 σ_f は、荷重—変位関係における最大荷重(粒子が完全に壊れる破碎のときの荷重に対応)を粒径の2乗で除したものである。図-1をみると各プロットは全体的に右下がりの傾向にあり、 d_0 が増加すると破碎強度が減少することがわかる。図-2も同様に右下がりとなっており図-1と同じような傾向を示している。また第1破碎強度のばらつきが最大破碎荷重のそれと比べて大きいことがわかる。図-3は、粒子が破碎しない確率と破碎強度 σ_c , σ_f との関係をそれぞれ示したものである。粒子が破碎しない確率 P_s は、Gumbell(1958)が提案した式(1)を用いている。

$$P_s = 1 - \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \dots (1)$$

ここで N は試験を行った全個数であり、 i は破碎強度を昇順に並べたときのその順番を表している。 P_s - σ_c 関係の各点はその応力で角が全くかけていない粒子が全体の P_s であることを意味しており、 P_s - σ_f 関係の各点はその応力で最大破碎強度を示すような破碎を起こしていない粒子が全体の P_s であることを示している。具体的には、粒子にかかる応力が25MPaのとき粒子の角がかかる破碎の生じない確率は0.2程度、粒子が完全に壊れる破碎の生じない確率は0.5程度であることがわかる。

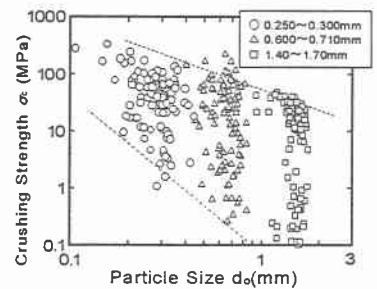


図-1 第1破碎強度—粒径関係

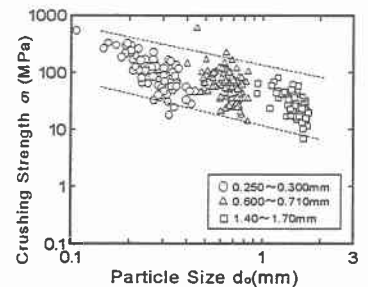


図-2 最大破碎強度—粒径関係

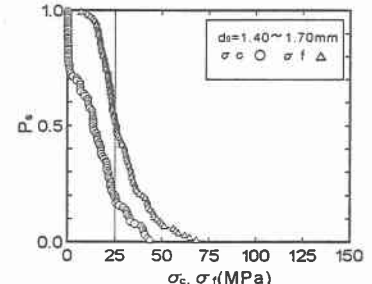


図-3 破碎しない確率—破碎強度関係

図-4 は 1.40～1.70mm の粒子における一次元圧縮試験より得られた結果を間隙比と鉛直応力関係で示したものである。鉛直応力の増加に伴い間隙比が減少する挙動がみられ、 $e-\log \sigma_v$ 関係において 10MPa 付近に明確な折れ曲がり点が存在することがわかる。ここで、一次元圧縮中の粒子の破碎状況を把握するために、 $e-\log \sigma_v$ 曲線の曲がり始まる点の鉛直応力(図上 A 点付近)、圧縮降伏応力(図上 B 点付近)、曲がり終わる点の鉛直応力(図上 C 点)、C 点を大きく超える応力(D 点付近)とし、各点まで鉛直応力を载荷する試験を行った。

図-5 は各点において試験を中断し、ふるい分析を行なった結果の粒径加積曲線について示している。ここで試験前の試料の最小ふるい目と、その 1/2 のふるい目に着目し、図-6 に示すように、それらの通過率をそれぞれ B_f, B_{f50} と定義する。また本研究では、一次元圧縮中の粒子破碎と単粒子の破碎特性との関連性を検討するために、一次元圧縮中の単粒子に作用する応力 σ_{sp} を式(2)より算出した。

$$\sigma_{sp} = \frac{F_{sp}}{d^2} (\text{MPa/個}) \cdot (2) \quad F_{sp} = \sigma_v \cdot \left(3 \sqrt{\frac{(1+e)\pi}{6}} \right)^2 d^2 (\text{MPa/個}) \cdot (3)$$

ここで F_{sp} は最大主応力を単位面積あたりの粒子個数で除して得られる粒子 1 個に作用する力であり、式(3)のように、間隙比と鉛直応力を用いて表すことができる。ここで $1-B_f, 1-B_{f50}$ と σ_{sp} との関係を図-3 上にプロットしたものが図-7 である。A,B,C 点の $1-B_f$ は $P_s-\sigma_c$ 関係のラインとよい対応を示しており、 $1-B_{f50}$ に着目すると、 $P_s-\sigma_f$ 関係により対応がみられる。試験前の最小のふるい目に残っている粒子は第 1 破碎強度には達していないと考えられ、1/2 のふるい目以上にある粒子は第 1 破碎強度には達しているが、最大破碎強度には達していないとおおむね推測される。これらのことより、単粒子破碎試験結果より得られた粒子が破碎しない確率と破碎強度との関係から一次元圧縮試験中の供試体内の粒子の破碎状況を推測できる可能性を見出せた。また、各点での粒子の破碎状況を見るために着色した粒子を用いて試験前後で観察を行い、着色粒子の観察結果から試験前後において粒子形状が変化しなかったものは A 点では、6 個中 6 個、B 点では 6 個中 3 個、C,D 点では 6 個中 0 個であり、角がかかるような粒子は B 点では 2 個であり C 点では 1 個、D 点では 2 個であった。また粒子が完全に破碎しているものは B 点では 1 個、C 点では 5 個、D 点では 4 個であった。このことから A～B の間で、角がかかる程度の破碎が起こり始め、B～C の間で完全に粒子が壊れる破碎が起こり始めると考えられる。

まとめ 本研究では、単粒子破碎試験と一次元圧縮試験を行い、砂粒子の単粒子破碎特性および一次元圧縮特性を把握し、またそれらの関連性について検討を行なった。その結果、単粒子破碎試験から得られる破碎強度特性と一次元圧縮試験から得られる破碎状況に関連があることがわかった。このことにより、単粒子破碎試験を行なうことにより一次元圧縮中の粒子の破碎状況を推測できる可能性を見出せた。

【参考文献】

1)児玉,中田,兵動,村田,足立,加登:砂粒子の破碎特性とせん断中の粒子破碎との関連性について,第 32 回地盤工学会研究発表概要集 pp.47-48

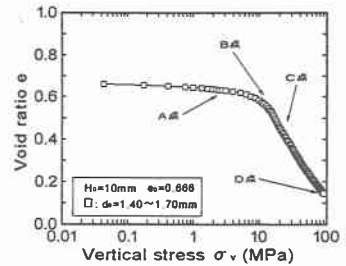


図-4 間隙比—鉛直応力関係

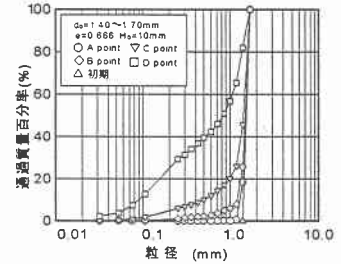


図-5 粒径加積曲線

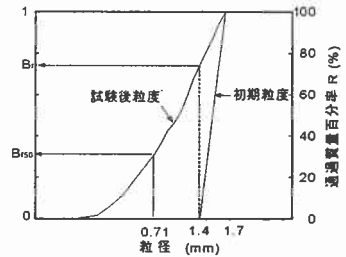


図-6 B_f, B_{f50} の算出法

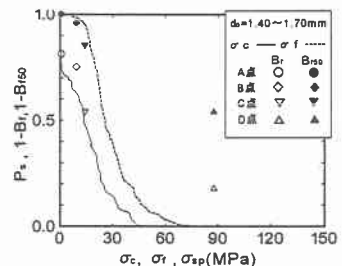


図-7 破碎しない確率—破碎強度関係