

砂の一次元圧縮特性における応力レベルと時間依存性

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 中島 通夫

1. はじめに

豊浦砂に代表されるシリカ系の砂に比べ、比較的土粒子が破碎しやすいカーボネイト系等の砂からなる地盤は破碎性地盤と呼ばれ、粒子破碎に伴う粒子の再配列に起因した体積圧縮および沈下が問題とされている¹⁾。また、「土粒子は堅固で破碎しない」という前提に基づいて構築されている現在の支持力算定式では、陽の形で粒子破碎の影響が考慮されているとは言い難い。杭基礎先端などでは高い応力が生じ、それによって土粒子の破碎が起きることが明らかとなっている。さらに、一定の荷重の下では時間経過に伴って破碎が継続的に生じる時間依存性の挙動を示すことが指摘されている²⁾。このため、粒子破碎に起因した圧縮特性を把握することは重要となる。本研究では、単粒子破碎強度の異なる材料を用いた一次元圧縮試験およびクリープ試験を実施し、応力レベルに着目した粒子破碎の時間依存性について検討する。

2. 破碎性の指標

粒子破碎の程度を評価するために破碎性指標として表面積増加量 $\Delta S(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ を導入した^{3),4)}。表面積増加量 $\Delta S(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ は次式で求められる比表面積 $S_w(\text{cm}^2/\text{g})$ に材料の乾燥密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$ を乗じた値 $S(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ の増加量である。

$$S_w = \sum \frac{F}{100} \cdot \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(4/3)\pi(d_m/2)^3 G_s \gamma_w} \quad \cdots(1)$$

(ただし、F: 各粒径の試料の残留率(%))

表-1 試料の物性値

試料	G_s	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$D_{50}(\text{mm})$	$\sigma_{sf}(\text{MPa})$
焼き菓子	0.863	2.13	1.84	10.50	0.30
Quiou 砂	2.697	1.19	0.66	0.80	8.8

3. 一次元圧縮試験

3-1. 試料および実験装置

試料には、単粒子破碎強度 σ_{sf} の異なる球状の焼き菓子および Quiou 砂を用いた。表-1 にそれぞれの試料の物性値を示す。供試体寸法は焼き菓子については直径 100mm 高さ 100mm、Quiou 砂は、直径 80mm 高さ 30mm で、それぞれ相対密度 $D_r=40\%$ に調整した。载荷は側方変位を拘束した一次元状態のもと、一定の変位速度 0.1mm/min で行い、球状の焼き菓子は鉛直応力 $\sigma_v'=75, 120, 185, 250\text{kPa}$ まで、Quiou 砂は $\sigma_v'=580, 4900\text{kPa}$ まで载荷した後、それぞれふり分けを実施した。

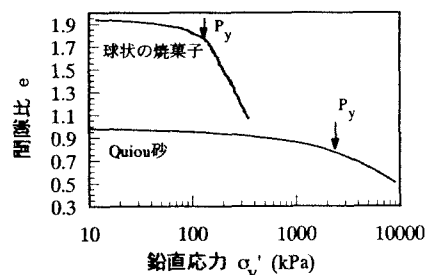
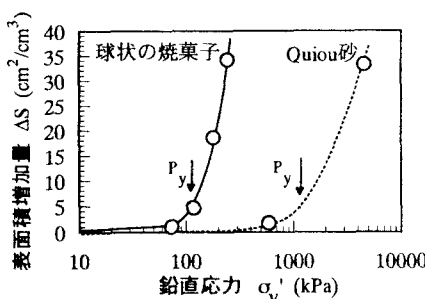
3-2. 実験結果

図-1 に示した $e \sim \log \sigma_v'$ 関係から、キャサグランデ法によって降伏応力 P_y を求めた。図-2 に $\Delta S \sim \sigma_v'$ 関係を示す。この図より降伏応力 P_y 付近から表面積増加量 ΔS が著しく増加していることが分かる。このことは、粒子破碎が P_y 以降の圧縮変形の大きな要因であることを示唆している。

4. クリープ試験

4-1. 試料および実験装置

試料には、球状の焼き菓子を用いた。図-3 に実験装置の概略図を示す。供試体寸法は直径 100mm 高さ 100mm で、相対密度 $D_r=40\%$ について実施した。また、アクリル製のセルを用いることで可視化を図り、破碎状況をデジタルカメラによって観察した。载荷は、それぞれ所定の応力に至るまでは変位制御によ

図-1 $e \sim \log \sigma_v'$ 関係図-2 $\Delta S \sim \sigma_v'$ 関係

て载荷を行い、それ以降は応力制御により一定応力を長時間(3000min)保持させた。なお、クリープ中の応力レベルとしては $\sigma_v' = 75, 120, 185, 210, 250 \text{ kPa}$ の5種類である。

4-2. 実験結果

写真-1 はクリープ試験前後でデジタルカメラにより撮影したものである。この写真中の①～③はそれぞれ図-4 中の①～③に対応している。①→②において荷重の増加とともに粒子破碎が生じ、さらに再配列することで、結果として体積圧縮が起きていることが観察された。また、一定の応力を保持している②→③においては、時間経過に伴い体積圧縮が進行していることが分かる。写真-1 中の②→③から、クリープ試験中の粒子破碎は、新たな粒子が破碎するよりも、粒子破碎の起きた粒子とその周囲の粒子の接触部付近においての細粒化が進行する方が顕著であると考えられる。図-5 は、各応力レベルにおけるクリープ試験中に進行した圧縮ひずみ増加量 $\Delta \epsilon$ の関係である。降伏応力 $P_y = 120 \text{ kPa}$ より小さな応力レベルにおいて、 $\Delta \epsilon$ は小さい値を示したのに対し、降伏応力を超えた最初の応力レベルである $\sigma_v' = 185 \text{ kPa}$ においては $\Delta \epsilon$ は大きな値を示した。また、さらに大きな応力レベルでは $\Delta \epsilon$ は小さな値を示すといった興味深い結果を得た。これは、所定の応力レベルまで载荷した段階ですでに大きな体積圧縮が生じているため、その後一定応力を長時間载荷しても体積圧縮はあまり進行しないのではないかと考えられる。このことから、降伏応力 P_y 付近において、 $\Delta \epsilon$ が最大となる応力域が存在することが推察される。図-6 は、それぞれの応力レベルにおける、クリープ試験前後の表面積量 S の増加量 ΔS_c の関係である。 $\Delta \epsilon \sim \sigma_v'$ 関係と同様に、降伏応力 P_y 付近において、 ΔS_c が最大となる応力域が存在することが推察され、また $\Delta \epsilon$ と ΔS_c は同じ応力域で最大となると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られたまとめとして以下に示す。

- (1) 降伏応力 P_y 付近から粒子破碎は顕著に生じており、粒子破碎が P_y 以降の圧縮変形の大きな要因であることを示唆している。
- (2) クリープ試験中の粒子破碎は、新たな粒子が破碎するよりも、粒子破碎の起きた粒子とその周囲の粒子の接触部付近においての細粒化が進行する方が顕著であると考えられる。
- (3) 降伏応力 P_y 付近において、 $\Delta \epsilon$ と ΔS_c が最大となる応力域が存在する。

【参考文献】

- 1) 北村良介: 破砕性土の力学特性と破砕性地盤の工学的諸問題, 土と基礎, Vol.48, No.10, pp.3-6, 2000.
- 2) 北村良介ら編: 破砕性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会報告書およびシンポジウム発表論文集, pp.11-13, 1999.
- 3) 三浦哲彦・山内豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文集, No.260, pp.109-118, 1977.
- 4) 安福規之: 広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究, 九州大学博士論文, pp.31-64, 1991.

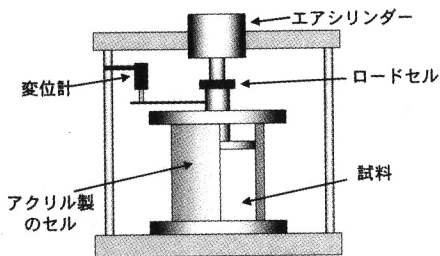


図-3 実験装置概要図

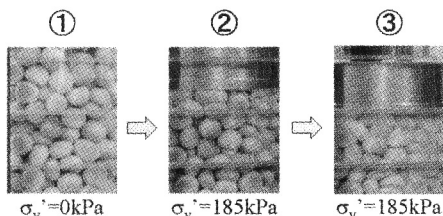


写真-1 クリープ試験中の粒子破碎の様子

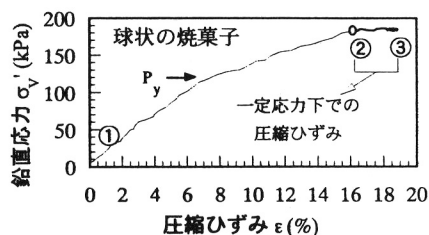


図-4 クリープ試験における $\sigma_v' \sim \epsilon$ 関係

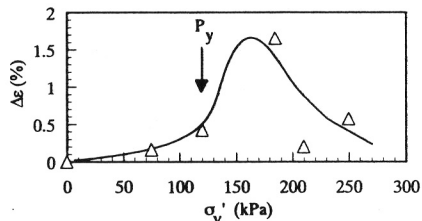


図-5 $\Delta \epsilon \sim \sigma_v'$ 関係

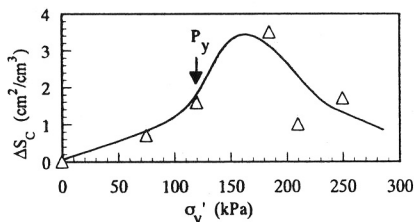


図-6 $\Delta S_c \sim \sigma_v'$ 関係