

Ⅲ-A175 一次元圧縮試験過程における粒状土の粒子破碎特性

立命館大学大学院理工学研究科 学生員 ○喜田啓介

立命館大学大学院理工学研究科 学生員 澤井大祐

立命館大学理工学部土木工学科 正会員 福本武明

1. 緒言

常圧下で顕著な破碎性を示す特殊土に真砂土やしらすがあるが、堅硬な粒子からなるロック材や砂礫なども高圧下でかなりの破碎を起こす場合がある。粒状土を構成する土粒子が外力の作用を受けて破碎すれば、物理的にも工学的にも従前の土質でなくなってしまう。そこで本論文では、粒子破碎現象の特徴を明確に捉えるため、一次元圧縮試験過程で生じる土粒子の破碎に目を向け、土粒子の壊れ方に規則性が有るか否かという点に最大の関心を持って検討を行った。破碎後の粒径分布は、圧縮後の粒状土の強度変形特性や透水性などを決定的に支配するであろう粒子数の増加、比表面積の増加、隣接粒子との接点数の増加などと不可分の関係にある。このような観点からの研究は、粒子破碎現象に関連ある工学的諸問題の解明や、脆弱粒子から成る粒子集合体の力学を考えてゆく際に、有益な多くの情報を提供してくれるものと思われる。

2. 高圧圧縮試験の概要

表-1 に示すような材質、粒径、密度を比較できる様に調整した均一径試料を使って一次元高圧圧縮試験を実施した。絶乾状態の試料を所定の条件下でモールド（内径 60mm、深さ 40mm）に詰め、これをまず標準圧密試験機にセットし荷重増分比を 1 として¹⁾、圧縮応力 $p=9.8, 19.6, 39.2, 78.5, 156.9, 313.8, 627.6$ kPa まで載荷した後、既報²⁾で述べた油圧式高圧圧縮試験装置に移して $p=1.26, 2.51, 5.02, 10.04, 20.08, 40.17, 69.40$ MPa まで段階的に載荷した。載荷終了後、供試体の粒子破碎状況を調べるためにロータップ型振とう機を用いて粒度分析を行った。こうして得られたデータを用いて粒状土の粒子破碎特性を調べるために用いることにする。

3. 試験結果

図-1 は、高圧圧縮試験過程で測定された各試料の試験前後における粒径加積曲線（実線）の代表例を示したものである。圧縮試験後の粒径加積曲線と比較対照するために、式(1)に当てはめる。式の当てはめ方法は、既報^{3), 4)}で述べたと同様、先ず実測された試験後の粒径分布から分布の平均 μ と分散 σ^2 を求め、式(2)より m と r を算定する。得られた m 、 r を式(1)に代入し、理論曲線を描く。こうして描かれた理論曲線は、図中に点線で示されている。いずれの場合も実測線（太い折れ線）との一致性は相当に良い。このことから一次元圧縮過程における土粒子は圧縮応力に伴って、また材質の硬軟や粒径の大小などに関係なく常に規則的な壊れ方をすることが分かる。

表-1 試料の物理的性質

No.	土の種類	粒径 d (mm)	相対密度 D_r (%)	比重 G_s	最大密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最小密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)
1	しらす	0.85~0.60	95	2.501	1.106	0.835
2a	生駒真砂土	0.85~0.60	95	2.648	1.402	1.093
2b			25			
3a	六甲真砂土	2.00~1.18	95	2.614	1.471	1.198
3b			95			
3c	比叡真砂土	0.85~0.60	95	2.622	1.474	1.164
4			95			
5	愛知川砂	0.85~0.60	95	2.639	1.431	1.069
6a			95			
6b	相馬標準砂	0.85~0.60	95	2.678	1.468	1.174
6c			25			
6d			95			
6e	相馬標準砂	0.85~0.60	95	2.622	1.567	1.283
6f			25			
6g	相馬標準砂	0.85~0.60	95	2.643	1.709	1.484
6h			25			
6i	相馬標準砂	0.85~0.60	95	2.650	1.619	1.335
6j			25			
6k	相馬標準砂	0.85~0.60	95	2.622	1.421	1.100
6l			25			

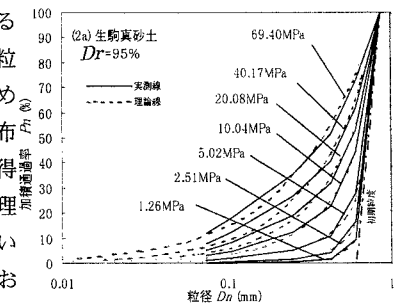


図-1 圧縮試験前後の粒径加積曲線

$$p_n = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \binom{m+i-1}{m-1} \cdot (1-r)^m \cdot r^i \cdots (1a)$$

$$n = \frac{\log\left(\frac{D_{max}}{D_n}\right)}{\log \lambda} \cdots (1b)$$

$$r = 1 - \frac{\mu}{\sigma^2}, \quad m = \frac{\mu^2}{\sigma^2 - \mu} \cdots (2)$$

Key word 一次元高圧圧縮試験 粒子破碎 粒度式

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 Tel 077-561-2731 Fax 077-561-2731

4. 圧縮応力に伴う粒径分布の変化

図-2は、圧縮応力 p の増加に伴って粒径分布の平均 μ がどのように変化するかを一括図示したものである。図から明らかなように、 μ はある一定の究極値 μ_{∞} をもつような形で増大する。その増大の様子は、この場合も既報^{5), 6)}で述べた式(4)の双曲線式で相当精度良く表すことができる。式中 μ_{∞} と p_B とは、材質や試験条件によって決まる係数である。これらの値を一括して表-2に示す。上述の事柄は、かつて Bishop⁷⁾が高压力下の土の挙動と関連して暗示した究極状態における粒径分布の存在を今回、平均 μ_{∞} をもつ分布という形で具体的に示したことになる。と同時に、 μ_{∞} 値へ至るプロセスが式(4)でコントロールされるということを明確にしたことになる。

$$\frac{\mu}{\mu_{\infty}} = \frac{(p/p_B)^{\xi}}{1 + (p/p_B)^{\xi}} \dots (4) \quad \sigma^2 = \alpha \cdot \mu^{\beta} \quad (5)$$

一方、粒径分布の分散 σ^2 についても、図-3に示すことから類推されるように圧縮応力 p の増加とともに増大する。この σ^2 と μ との間には、既報⁸⁾で示した式(5)が成り立つ。式中の α と β は、材質などの試験条件によって決まる係数であって、表-3に示すような値となる。尚、図-3中の()中の数字は、表-1中の symbol No. と対応している。

表-2 式(4)中の係数

No.	μ_{∞}	ξ	p_B
1	4.264058	0.875	12.37414
2a	2.389159	1.205	13.32118
2b	2.415837	1.1	8.887061
3a	2.679497	1.262	16.14356
3b	2.978925	1.5625	22.01632
3c	2.735739	0.775	151.4936
4	3.119952	1.105	22.30297
5	2.378763	2.05	38.25635
6a	1.695165	3.205	25.34704
6b	2.075078	2.95	27.90691
6c	2.082295	2.55	2.082295
6d	1.41809	1.85	30.83306

表-3 式(5)中の係数

No.	α	β
1	3.4789	0.9551
2a	2.9714	1.1816
2b	3.3045	1.1308
3a	2.2885	1.0035
3b	3.0442	1.0148
3c	1.7187	1.3251
4	3.4428	1.0909
5	3.3686	1.3066
6a	2.4398	1.1672
6b	3.2948	1.2711
6c	3.5407	1.2717
6d	3.0371	1.2518

5. 結言

本論文では、各種粒状土の均一径試料に対し実施した一次元高压圧縮試験のデータに基づき、特に試験中に生じる粒子破碎現象に着目し、その規則性の有無に関心を持って基本的な考察を行った。その結果、圧縮応力の大きさと試験後の粒径分布の平均との間には、式(4)で示されるような双曲線関係が存在すること、分布の平均と分散との間には、式(5)のような関係が成り立つことが判明した。また圧縮過程における粒子破碎の仕方をコントロールする式(4)と式(5)中の諸係数は、いずれも材質の硬軟や粒径の大小あるいは相対密度により値を異にする。

今後は、上記の知見を基礎に、脆弱な粒状土の圧縮特性に及ぼす粒子破碎の影響量を定量的に把握するとともに、強度や透水性などの力学特性全般への展開もはかってゆきたい。

【参考文献】

- 1) 土質工学会編：土質試験方法と解説，1990 2) 福本武明・野口進：砂の高圧圧縮特性，平成7年度土木学会関西支部年次学術講演概要 pp.457-458, 1993 3) Fukumoto, T.: "A grading equation for decomposed granite soil," Soils and Foundations, Vol.30, No.1, pp.27-34, 1990 4) 福本武明：土の粒径分布に関する検討，土木学会論文集，No.475, III-24, pp.11-18, 1993 5) 福本武明：粒子破碎機構に関する一考察，第24回土質工学研究発表会，pp.219-260, 1989 6) 福本武明：土の粒度式の特長，土木学会論文集，No.469, III-23, pp.103-110, 1993 7) Bishop, A.W.: "The strength of soils as engineering materials," Geotechnique, Vol.16, No.2, pp.91-128, 1966 8) Fukumoto, T.: Particle Breakage Characteristics of Granular Soils, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.75-89, 1992

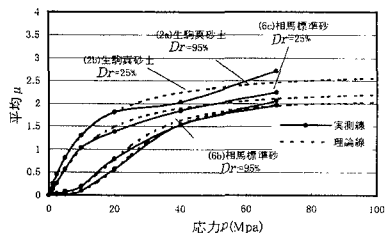
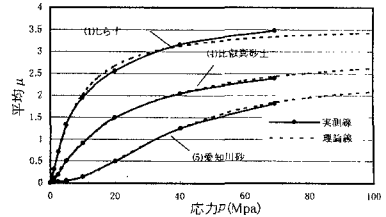
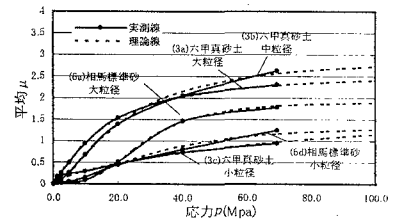


図-2 分布の平均-圧縮応力の関係

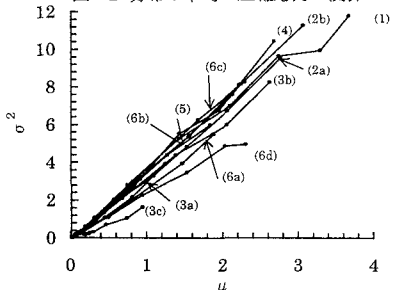


図-3 $\mu - \sigma^2$ の関係