

关于堆石料加卸载体积模量的探讨

Bulk Modulus of Loading and Unloading for Rockfills

栾茂田 吴兴征

(大连理工大学土木工程及海岸和近海工程国家重点实验室 大连 116024)

文摘 结合王继庄关于堆石料各向同性压缩试验的成果,分别在 $e - \lg p$ 与 $e - (p/p_a)^a$ 平面内分析了堆石的孔隙比 e 和有效围压 p 之间的关系。文中的数据整理表明各向同性加载(固结)线、弹性回弹(膨胀)线在 $e - (p/p_a)^a$ 平面内近乎呈直线。建议堆石料的各向同性加载线和回弹线在 $e - (p/p_a)^a$ 平面内绘制并建立体积模量的表达式。其中 a 是系数,对于堆石可以取0.6,其值对线性的影响是不敏感的。

关键词 压缩性, 体积模量, 各向同性

作者简介 栾茂田,男,1962年生,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土力学基本理论与数值分析、土动力学与岩土地震工程等方面的科学研究和教学工作。吴兴征,男,1972年生,在读博士生,主要从事面板堆石坝与加筋土结构等的数值分析研究。

Luan Maotian Wu Xinzheng

(Department of Civil Engineering and State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P.R.China)

Abstract The lines which relate the effective confining pressure p with the void ratio e of two kinds of rockfills which tested by J. Z. Wang during the isotropic consolidation loading and unloading are discussed. The lines are usually plotted in an $e - \lg p$ plane and is treated as a straight line in that plane for simplicity. However these lines can be plotted nearly linearly in the $e - (p/p_a)^a$ plane for rockfills, where a is a material stress Ratio and Study of Its Deformation Characte parameter. The examples given herein show that the lines of the two different rockfills examined have an value of $a = 0.6$, and the influences of the value of a on the straightness of the lines are not considerable. Finally, the expressions of bulk modulus K are formulated.

Key words: rockfills, compressibility, bulk modulus, isotropic loading

1 前言

粗粒料压缩特性的研究对于高面板坝的变形预测具有十分重要的意义。新近提出和发展的一些弹塑性模型在大型土工建筑物数值模拟中的应用,也引起学者们进一步探讨弹性体积变形和平均有效围压 p 之间的函数关系。

经典临界状态土力学中,对于正常固结粘土的临界状态线^[1],通常在 $e - \lg p$ 平面内具有良好的线性关系,并用压缩指数 C_c 表示其斜率,在工程实践中得到广泛应用。对于无粘性土,许多学者发现 $e - \lg p$ 平面内的临界状态线一般不呈直线关系^[2,3,4],而 $e - (p/p_a)^a$ 平面内的临界状态线具有较好的线性关系。对于堆石料的临界状态线,目前尚未见到类似的研究。

本文结合王继庄^[5]等人关于堆石料各向同性压缩试验的成果,提出在 $e - (p/p_a)^a$ 平面内绘制堆石固结加载线和卸载回弹线。并提出体积模量与平均正应力 p 的具体函数表达式,以利于工程应用及科学计算。

2 堆石料大型三轴压缩试验简述

堆石料的颗粒形状多为多面体,呈单粒结构,颗粒之间通常为点接触,其压缩性主要取决于颗粒的重新排列。体积模量是衡量堆石压缩变形的主要参数,受到压力、变形的量、岩性、密度、颗粒形状、尺寸效应、破碎率、最大粒径和级配等诸多因素的制约,本文主要探讨弹性体积模量与有效平均应力 p (文中均指有效应力)之间的关系。

在各向同性加载条件下,压缩体积模量随施加压力的大小而变化,由于颗粒破碎、调整,在低压力时基本上是时增时减,高压时时间歇性地增长,不具有

明显的线弹性关系。但为了考虑问题的方便以及体积变形较小时，通常近似作增量弹性处理。各向同性卸载时，粗粒料经过高应力的作用，即颗粒重新排列、挤压破碎后，已达到相对稳定状态，体积变形相对较小，接近弹性变形。

目前，测取弹性体积模量的途径主要有两种：其

3 在 $e - \lg p$ 和 $e - (p/p_a)^a$ 平面内堆石料的各向同性固结线和回弹线

按常规的方法在 $e - \lg p$ 平面内绘制各向同性固结线和回弹线，见图 1 和图 2，可以看出：两种堆石料的各向同性固结线均明显呈曲线，回弹线基本上呈直线。

表 1 试样的基本物理力学性能

项目	比重	制样干密度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对密度 /%	孔隙比	破碎率 /%	备注
砂砾	2.77	21.58	86.0	0.23	4.7	
灰岩	2.70	20.68	85.0	0.26	9.7	

表 2 试样的颗粒级配

粒径/mm	颗粒组成/%					d_{50}	d_{60}/d_{10}	备注
	60-40	40-20	20-10	10-5	≤ 5			
砂砾	23	30	20	6	21	22.0	20.4	
灰岩	19	28	22	19	12	18.3	6.5	

一是常规三轴试验（即围压 s_3 为常数）；其二是等应力比路径（ $R = \frac{s_1}{s_3} = 1$ ，即各向同性）试验。前者将 s_3 为某一特定值的每组试验剪切起始时的 e_v 或 e 值相连，可以得到体积变形和施加围压之间的关系。然而，国内外已有许多学者结合混凝土面板坝坝体原型观测资料分析和室内应力路径试验研究，提出等应力比路径试验的重要性。但限于试验测试技术的发展，这方面测试的数据尚不多见。我国昆明水电设计院王继庄^[5]克服体积变形测取的困难，将应变控制式高压大三轴（直径 $f=300\text{mm}$ ，高度 $H=655\text{mm}$ ）改装为应力控制式，进行了粗粒料等应力比加卸载复杂应力路径试验。所选用的粗粒料取自天生桥、龙羊峡等实际面板坝工程，其物理力学性能见表 1。

粗粒料试样制备尽量参照现场级配和压实密度。限于室内仪器尺寸，采用相似级配法对原级配进行缩制，所得试验模拟料的颗粒组成如表 2。

大三轴试验采用低水头真空饱和法，为考虑试样初始阶段的不规则性，施加初始围压 $s_3 = 40 \text{ kPa}$ ，待试样固结稳定后，分别等向施加 49.05、98.10、196.20、392.40、588.60、784.80、1177.20、1569.60、1962.00 kPa。然后按递减的次序卸载。试验过程中尽量做到 s_1 、 s_3 二者同步施加。

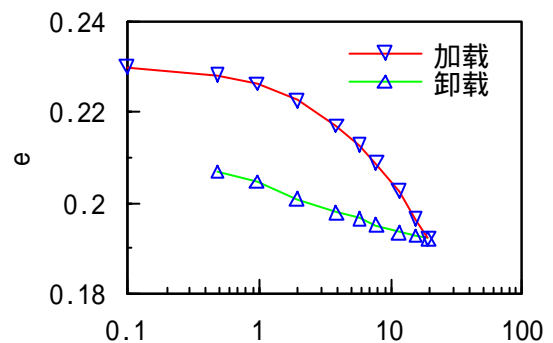


图 1 砂砾孔隙比 e 与 $\lg(p/p_a)$ 的关系
Fig.1 Relation plotted in e versus $\lg(p/p_a)$ plane for Gravel

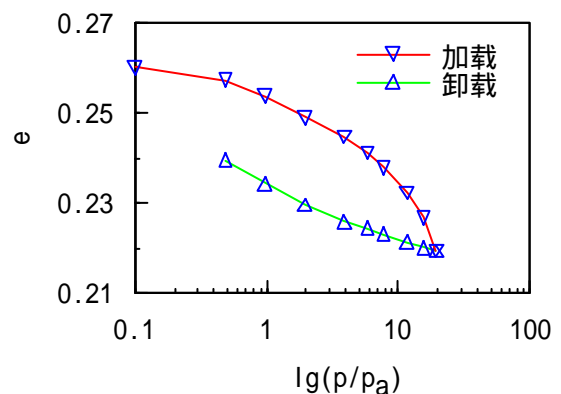


图 2 灰岩孔隙比 e 与 $\lg(p/p_a)$ 的关系
Fig.2 Relation plotted in e versus $\lg(p/p_a)$ plane for Limestone

而在 $e-(p/p_a)^a$ 平面内绘制两种堆石料的各向同性固结线和回弹线，见图 3~图 6，可以看出：各向同性固结线和回弹线都近乎呈直线关系。

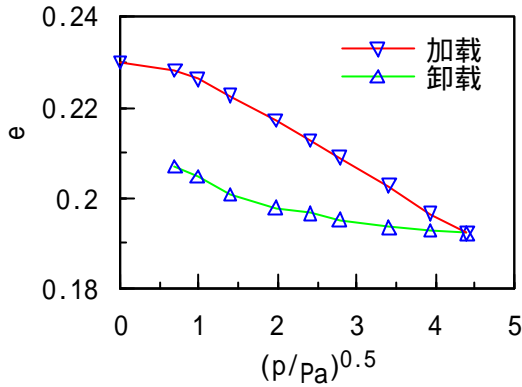


图 3 砂砾孔隙比 e 与 $(p/p_a)^{0.5}$ 的关系

Fig.3 Relation plotted in e versus $(p/p_a)^{0.5}$

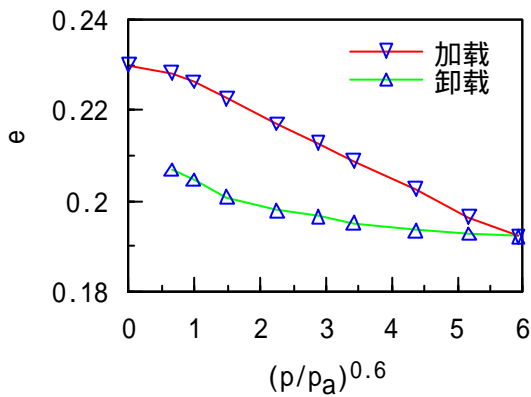


图 4 砂砾孔隙比 e 与 $(p/p_a)^{0.6}$ 的关系

Fig.4 Relation plotted in e versus $(p/p_a)^{0.6}$

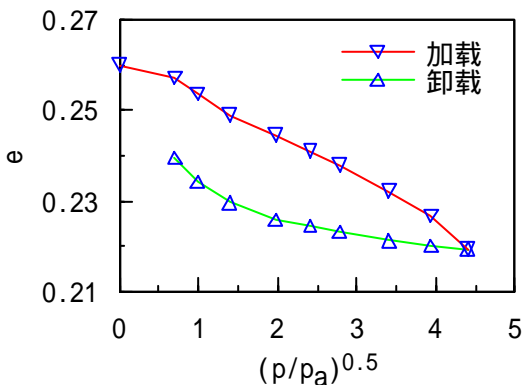


图 5 灰岩孔隙比 e 与 $(p/p_a)^{0.5}$ 的关系

Fig.5 Relation plotted in e versus $(p/p_a)^{0.5}$

在 $e-(p/p_a)^a$ 平面内，最小二乘法回归分析表

明：当 a 为 0.5 和 0.6 时，初始固结线和回弹曲线均呈线性关系，参见图 3、图 4 以及图 5、图 6。可见，堆石料的压缩和卸载弹性特性并不强烈地依赖指数 a 。

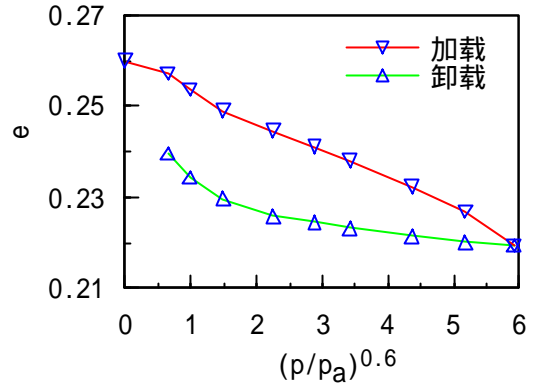


图 6 灰岩孔隙比 e 与 $(p/p_a)^{0.6}$ 的关系

Fig.6 Relation plotted in e versus $(p/p_a)^{0.6}$

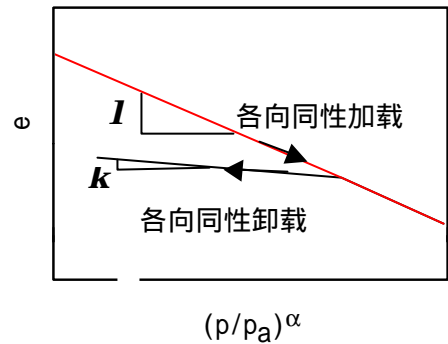


图 7 $e-(p/p_a)^{\alpha}$ 平面内的各向同性加卸载曲线示意图

Fig.7 The illustration of isotropic loading and unloading curve plotted in e versus $(p/p_a)^{\alpha}$

4 各向同性加卸载体积模量

文献[5]中仅给出了弹性体积模量的取值范围。本文以卸载回弹为例，浅释一下 $e-(p/p_a)^a$ 平面内的压缩弹性体积模量和回弹模量的求解原理和方法，并给出模量与施加压力的关系式。室内试验以及微观观察已经表明堆石的弹性模量是压力相关的，并一般与 $(p)^n$ 成比例。假定回弹曲线为线弹性，其斜率为 k ，则弹性体积模量满足：

$$K = \frac{dp}{de^e} = -\frac{dp}{de^e}(1+e_0) = A \cdot (p)^n \quad (1) \text{中: } e_v$$

为体积应变，上标 e 表示弹性； e_0 为堆石的初始孔隙比； A 和 n 为材料常数并依赖于材料类型和模量的种类。采用文献^[4]的方法对 (1) 式等号右边两项进行积

表 3 砂砾和灰岩的各向同性加卸载模量值

Table 3 Bulk Modulus of Isotropic Loading or Unloading for Gravel and Limestone

参数	各向同性加卸载模量/kPa			加载 p /kPa			卸载 p /kPa		
	a	l	k	784.8	1177.2	1569.6	784.8	1177.2	1569.6
砂砾	0.5	0.0092	0.0038	75626	92622	106951	179162	219427	253373
	0.6	0.0068	0.0027	70407	82804	92903	171013	201125	225653
灰岩	0.5	0.0091	0.0048	78223	95803	110624	142521	174552	201552
	0.6	0.0066	0.0034	72013	84694	95022	139274	163797	183772

分，当 $n \neq 1$ 时得到：

$$\Delta e^e = -\frac{1+e_0}{A(1-n)} \Delta[(p)^{1-n}] \quad (2)$$

$$\text{或 } \Delta e^e = -k \cdot \Delta[(p/p_a)^a] \quad (3)$$

式中： p_a 为大气压力，用于压力 p 的无单位化； a 为可变材料常数，且 $a=1-n$ ； k 是回弹指数， $k=(1+e_0)p_a^a/Aa$ 。由式 (3) 可见，在弹性回弹阶段，体积和压力之间的关系可以在 $e-(p/p_a)^a$ 平面上用直线表示。将 (3) 式代入 (1) 式得到卸载回弹模量的表达式为：

$$K_{\text{unload}} = \frac{(1+e_0)p_a^a}{ka} p^{1-a} \quad (4)$$

引入各向同性压缩指数 l ，同理可以得到各向同性加载体积模量为：

$$K_{\text{load}} = \frac{(1+e_0)p_a^a}{la} p^{1-a} \quad (5)$$

根据上述公式 (4)、(5) 可以得到上述两种堆石料的各向同性加载、卸载模量，参见表 3。

由表 3 中数据可以看出，当 a 取 0.5 或 0.6 时，各向同性加卸载模量变化不大，最大差值约 12%。表中的数据与文献[5]中的模量值是基本吻合的。计算卸载模量时应当注意，初始孔隙比 e_0 应取卸载终了时的孔隙比。

5 结 论

本文通过对堆石料各向同性加卸载试验成果的分析整理，得出堆石料的各向同性加载线和回弹线在 $e-(p/p_a)^a$ 平面内具有较好的线性关系。建议在 $e-(p/p_a)^a$ 平面内绘制各向同性固结线和卸载回弹线。并给出了加卸载体积模量的计算公式，对于相近特性的堆石料可参照有关试验结果，直接套用此公式进行数值计算。

参 考 文 献

- [1] Schofield A N and Worth C P. Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill Book Co. Inc. ,1968, London.
- [2] Verdugo R and Ishihara K. The Steady State of Sandy Soils. Soils and Foundations. Tokyo, Japan, 1996, 36(2): 81-91.
- [3] Wang Z L, Dafalias Y F and Shen C K. Bounding Surface Hypoplasticity Model for Sands. Journal of Engineering Mechanics Division. ASCE, 1990, 116(5): 983-1001.
- [4] Li X S. Linear Representation of Steady-State Line for Sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 1998, 124(12): 1215-1217.
- [5] Wang Jizhuang. Test of Coarse Material under Iso-stress Ratio and Study of Its Deformation Characteristics. Proceeding of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams (Sponsored by Chinese Society for Hydro-electric Engineering and International Commission on Large Dams), 1993, Beijing.