

堆石料的强度与变形特性及临界状态研究

丁树云^{1, 2}, 蔡正银¹, 凌华¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 通过一系列大型三轴压缩试验, 研究了不同初始应力状态与试样密度对堆石料强度和变形行为的影响以及堆石料的临界状态。试验结果表明: 堆石料在剪切过程中应变软化与否和剪胀性取决于该堆石料本身密度和所施加的围压; 且在应变足够大时, 土样出现临界状态, 临界状态与试样的初始条件无关, 剪切时, 堆石料的颗粒破碎效应明显, 其临界状态线在 $p'-q$ 平面呈现出非线性特点。

关键词: 堆石料; 变形特性; 临界状态; 剪胀性

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)02-0248-05

作者简介: 丁树云(1981-), 女, 河南开封人, 博士, 从事粗粒土试验与数值模拟方面研究。E-mail: syding2003@163.com。

Strength and deformation characteristics and critical state of rock fill

DING Shu-yun^{1, 2}, CAI Zheng-yin¹, LING Hua¹

(1. Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Through a series of large triaxial compression tests, the strength and deformation characteristics as well as the critical state of rock fill are investigated. The test results show that subjected to shear, rock fill samples under some state will exhibit shearing dilatation and strain softening behaviors, and that whether they will happen or not depends on its current state, which is characterized by both its density and effective mean normal stress applied. Under large strain levels, the critical state will appear in all the soil samples tested, and the critical state is independent of its initial state. In the $p'-q$ plane, the critical state line of rock fill shows nonlinear characteristics.

Key words: rock fill; deformation characteristic; critical state; dilatancy

0 前言

堆石料由于其良好的工程性能, 且同时符合就地取材的原则, 在高土石坝、高速铁路路基、建筑物地基、海岸港湾护岸、人工筑岛等工程中得到了广泛的应用, 研究堆石料的剪胀性与应变软化特性是建立其本构关系的重要前提, 也是进行以堆石料为主体材料的实际工程应力应变分析的重要依据。但由于堆石料粒径较大, 基于缩尺效应的考虑, 需进行大型三轴试验, 对设备要求较高, 故目前大多数研究是结合具体工程而进行的试验, 实际工程密实度多在 90% 以上, 因而有关堆石料强度和变形特性的系统研究成果较少。且实际工程在运行过程中, 密实程度在不断变化, 过去在对大多数工程问题的计算过程中, 忽略了土的密度的影响, 这种做法必然会造成很大问题, 故有必要研究密实程度对其强度和变形行为的影响。

近年来, 针对传统本构理论在对砂土的变形特性进行模拟时, 将具有不同密度的同一种砂土作为不同

材料, 分别用多组参数进行模拟的局限性, 一些学者将土的密度和应力状态同时引入剪胀方程, 提出状态相关剪胀理论, 在此基础上, 建立了无黏性土的基于状态相关剪胀理论的临界状态模型, 并在工程中得到成功应用^[1-6]。该模型最重要的特点就是在剪胀方程和塑性模量中引入状态参量 y , 使得模型仅采用一组参数就能合理地描述散粒材料的应力-应变-强度行为, 且即可模拟单调加载条件也可模拟反复加载条件。如果引进该模型的一些思想, 建立同时考虑应力水平和土体密度影响(状态相关)的堆石料本构模型并用于实际工程的计算, 将具有学术和工程上的双重价值。但该模型的建立首先需要通过试验研究堆石料应力-应变-强度的一些特点。

对于堆石料, 是否存在临界状态, 是在剪胀方程

基金项目: 国家自然科学基金委、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50639050)

收稿日期: 2008-11-12

中引入状态参量的重要前提, 目前尚未见这方面成果。基于此, 本文针对不同初始密度的堆石料进行了一系列大型固结排水三轴试验, 研究了密度和初始围压对堆石料变形特性的影响, 得到了该堆石料的临界状态线。从而为进一步合理描述堆石料的剪胀以及建立状态相关的堆石料本构模型提供依据。

1 试验概况

1.1 试验设备

试验设备为南京水利科学研究院 2003 年研制成的 1500 kN 大型动静三轴仪, 试样尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$, 见图 1。该设备主要技术参数: 最大轴向静出力 1500 kN (3 挡 300 kN, 800 kN, 1500 kN); 最大轴向动出力 500 kN; 最大围压 4.0 MPa; 最大轴向行程 210 mm; 频率 0.01~5 Hz; 波形有正弦波、三角形波、方形波; 最大反压 0.5 MPa。考虑到堆石料具有良好的渗透性能, 采用各向等压固结排水 (CID) 剪切的试验方法, 剪切速率控制在 2.0 mm/min, 试验采用的是应变控制。试样的径比 (最大允许粒径与试样直径之比 d_{\max}/D) 为 0.2。



图 1 大型动静三轴仪

Fig. 1 Large static-dynamic triaxial compression test apparatus

1.2 试验土样描述及试样制备

试验所取土样为四川省雅砻江两河口心墙堆石坝下游主堆石料, 岩性为粉砂质板岩与绢云母板岩互层, 偶夹砂岩, 颗粒比重为 2.76, 堆石料的最小孔隙比 $e_{\min} = 0.274$, 最大孔隙比 $e_{\max} = 0.682$ 。

场地堆石料平均级配的最大粒径为 500 mm, 超粒径含量大于 40%, 小于 5 mm 的含量为 24%。根据《土工试验规程》^[7] 规定, 本次试验采用混合法对其进行缩制。相似级配法中取粒径缩小倍数 $n=1.5$, 而后再用等量替代法进行级配缩制。试样制备采用干法制样。该堆石料的级配曲线见图 2。

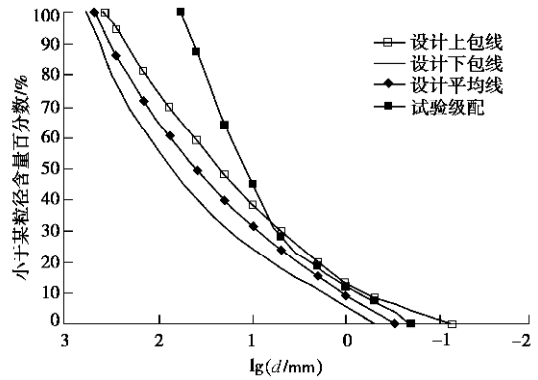


图 2 堆石料级配曲线

Fig. 2 Partical size distribution curves of rock fill

1.3 试验内容及方法

本文主要是从堆石料密度和应力状态两方面研究堆石料的变形特性, 故进行相对密度分别为 30%, 60%, 90% 和 100% 的 4 组试验, 每组在饱和状态下进行了 3 个不同围压下的常规三轴固结排水剪切试验。试验的初始状态及固结后孔隙比见表 1。根据文献[5]的试验数据, 砂土一般在轴向应变 30% 左右才能达到临界状态, 因而为求得堆石料的临界状态参数, 应使试样剪切变形足够大, 但由于设备限制, 本次试验以轴向应变 25% 为控制试验停止标准。

表 1 试样初始状态

Table 1 Initial state of soil samples

编号	$D_r/\%$	e_0	p/MPa	e_i
1			0.5	0.467
2	30	0.559	1.0	0.418
3			2.0	0.361
4			0.5	0.390
5	60	0.437	1.0	0.349
6			2.0	0.309
7			0.5	0.279
8	90	0.315	1.0	0.259
9			2.0	0.236
10			0.5	0.245
11	100	0.274	1.0	0.231
12			2.0	0.211

注: e_0 为制样时孔隙比, P 为各向等压, e_i 固结后孔隙比。

2 堆石料的变形特性

图 3 (a), (b) 为初始固结压力为 0.5 MPa 下不同相对密度试样的固结排水剪切试验结果。从图中可以看出, 对于较疏松的试样 ($e_i=0.467$), 堆石料的应力应变曲线表现为应变硬化, 偏应力随着应变的增加一直增长, 直至某一固定的值不再发生变化; 相应的, 从体积应变和轴向应变的关系曲线可以看出, 体积应变增量在整个剪切过程中均为正, 体积一直在不断的缩小, 发生剪缩。而对于较密实的试样 ($e_i=0.245$), 偏应力随着应变增长到达峰值, 然后下降, 应力增量

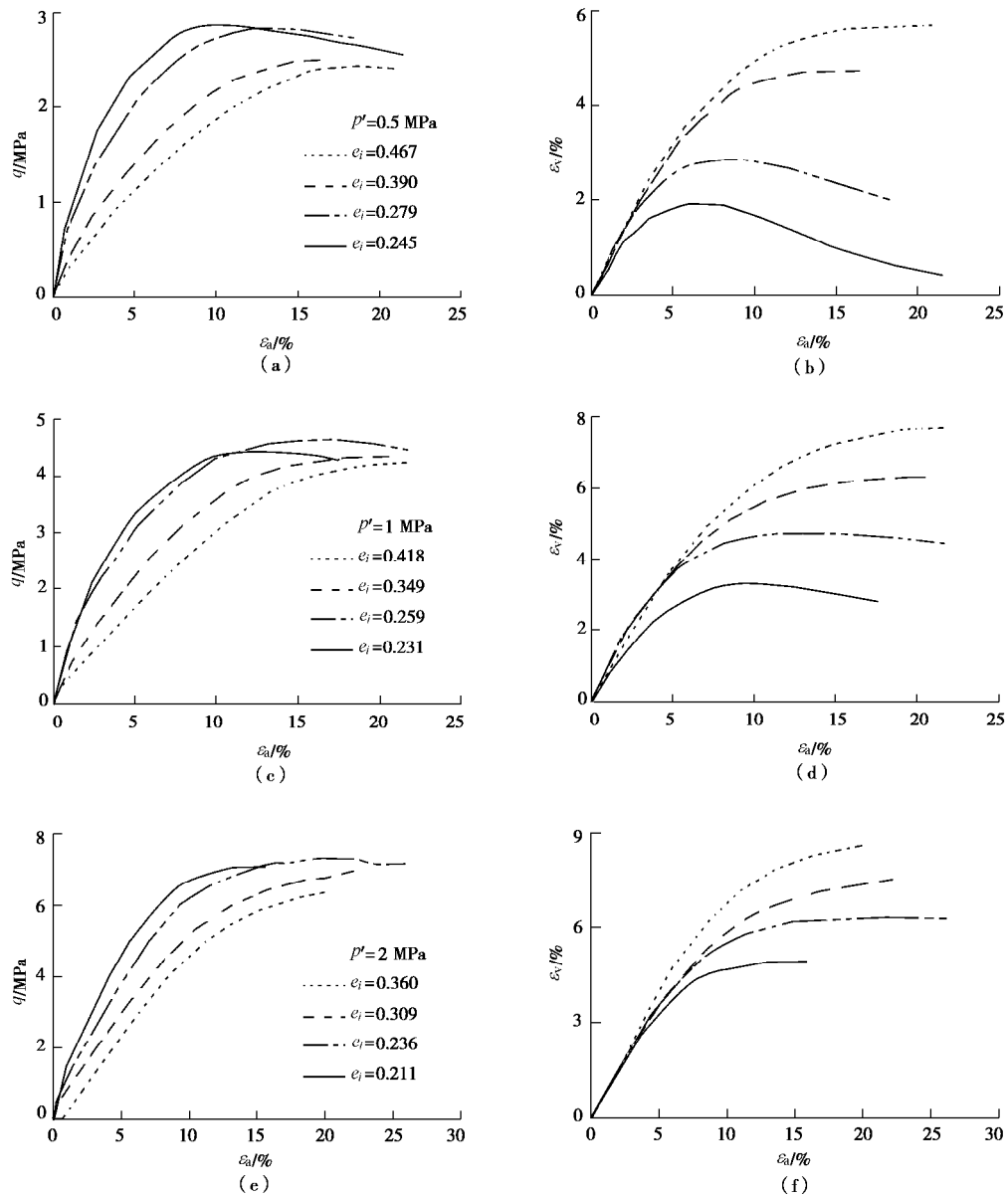


图3 三轴固结排水试验曲线

Fig. 3 Test results of drained triaxial compression tests

由正变为负,发生应变软化,但最终达到与疏松堆石料相同的某一固定数值后(残余强度)不再发生变化;相应的,从体积应变和轴向应变的关系曲线上可以看出,体变增量在应力水平较低时为正,试样发生剪缩,到达峰值后,增量变为负,发生剪胀。同时还可发现,对于某一有效固结压力 p' ,对于初始密度不同的试样,尽管其应力应变行为有很大的不同,但是最终都达到一个共同的强度值;另外,当轴向应变较大时,体积应变最终也接近一个常数,对于较密实的试样在较低固结压力下($e_i=0.245$, $p'=0.5$ MPa; $e_i=0.279$, $p'=0.5$ MPa),虽然偏应力和体变仍有变化,但从图3(b)中可以看出,它们的变化量都很小而且变化速

率也在不断减小。

图3(c)~(f)分别为初始固结压力为1 MPa和2 MPa下不同密实程度试样的固结排水剪切试验结果,发现了和0.5 MPa下同样的规律,但固结压力为2 MPa时,无论疏松试样还是密实试样,均没有剪胀发生,应变软化现象也消失了。这说明在较大固结压力下,无论对石料的密实度如何,试样均发生应变硬化和剪缩。

试验结果揭示堆石料呈现出与砂土一致的变形特性,堆石料的变形特性和强度同样取决于其自身的孔隙比 e 和有效平均正应力 p' 。密实的堆石料在高围压下剪切可能出现疏松堆石料的特性(应变硬化和剪

缩), 工程上根据堆石料的相对密度划分的松紧状态已不能正确反映其真实的密实程度, 还必须结合堆石料所处的应力状态加以考虑。即堆石料的变形和强度具有密度和应力状态依存性。不管堆石料的密度如何, 在同一固结压力下, 试样受剪, 尽管应力 - 应变曲线的形状和变化趋势不同, 但最后都达到一个共同的强度; 另外, 随着轴向应变 e_a 的增加, 体积应变增量 de_v 逐渐减小, 体积应变 e_v 最终也趋于一个常数。

3 堆石料的临界状态

从上节分析可知, 无论堆石料的初始状态如何, 排水三轴试验中, 在某一固结压力下, 堆石料会达到这样一个状态, 试样保持平均有效正应力 p' , 偏应力 q 和体变 e_v 不变的情况下, 偏应变 e_q 继续变化, 即临界状态。

由于设备限制, 本文只能做到轴向应变 $e_a = 25\%$ 左右, 就得停止试验, 因而图 3 中某些试样未达到临界状态 ($e_i=0.245, p'=0.5$ MPa; $e_i=0.279, p'=0.5$ MPa; $e_i=0.361, p'=2$ MPa; $e_i=0.309, p'=2$ MPa)。但从图 3 我们也可以看出, 这些试样在轴向应变比较大的时候, 其体积应变 e_v 的变化量很小且增长速率也在不断减小, 可以近似地认为达到了临界状态。采用到达临界状态的几组试验数据 ($e_i=0.467, p'=0.5$ MPa; $e_i=0.390, p'=0.5$ MPa; $e_i=0.418, p'=1$ MPa; $e_i=0.349, p'=1$ MPa; $e_i=0.236, p'=2$ MPa; $e_i=0.211, p'=2$ MPa) 来推求该堆石料的临界状态参数。

Li 等^[8]研究发现, 对于砂土, 其临界状态线在 $e - \ln p'$ 平面内不是直线, 而在 $e - (p'/p_a)^x$ 平面内, 却可用一条直线近似表示, 其表达式为

$$e_c = e_r - I_c \left(\frac{p'}{p_a} \right)^x, \quad (1)$$

式中, p_a 为标准大气压, e_r 为当 $p'=0$ 时对应的孔隙比, I_c 为临界状态线的斜率, x 为材料率定参数, 对于颗粒材料一般位于 0.6~0.8, 其取值对临界状态线形状影响不是很大, 这里取中间值 0.7。

沿着这个思路, 将本次试验结果绘于 $e - (p'/p_a)^x$ 平面内, 如图 4 所示。可见, 对于堆石料, 式 (1) 同样适用。对于本文所用之堆石料 $e_r = 0.512$, $I_c = 0.0251$ 。

英国剑桥大学的 Roscoe 等^[9]根据三轴试验结果整理出有效应力状态 (p', q) 关系曲线, 认为在破坏时, 不管是排水剪切试验还是固结不排水剪切试验, 破坏应力多落在同一条直线 $q = Mp'$ 上。图 5 中虚线所示为三轴压缩试验测得的 $p' - q$ 关系曲线, q 为试样达

到临界状态时的剪应力, 三轴情况下 $q = s_1 - s_3$ 。从图中可以看出, 临界状态时 $p' - q$ 关系曲线近似为一条通过原点的直线, 对于本文所用的堆石料, 该直线斜率为 1.749。

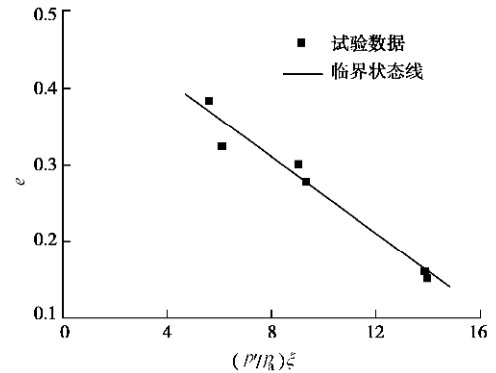


图 4 临界状态线

Fig. 4 Critical state line in $e - (p'/p_a)^x$ plane

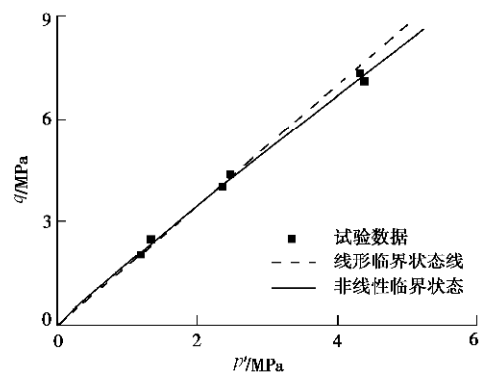


图 5 临界状态应力比

Fig. 5 Stress ratio in critical state

但还可以发现, 在固结压力较小时, 试验点均位于临界状态线上方, 固结压力较大时, 试验点均位于临界状态线的下方, 这主要是由于围压增加导致颗粒破碎效应逐步增大。表 2 为 $D_r=100\%$ 一组试样在不同固结压力下剪切后颗粒破碎率统计结果, 可看出, 在高围压下, 颗粒破碎明显, 堆石料临界应力比具有非线性特点。为此, 刘萌成等^[10]建议以 $q = Ap^b$ 来表示堆石料强度包线的非线性, 图 5 中实线为本次试验堆石料的非线性包线。可以看出, 非线性强度包线拟合情况要优于 Roscoe 建议临界状态线拟合结果。

表 2 堆石料三轴压缩试验颗粒破碎

Table 2 Partical breakage of rock-fill under triaxial compression

	test			
围压/MPa	0.2	0.5	1.0	2.0
破碎率 B_m	18.44	23.9	25.18	32.86

B_m 按照 Marsal^[11]建议来取值:

$$B_m = \sum \Delta W_k, \quad (2)$$

$$W_k = |W_{ki} - W_{kf}|, \quad (3)$$

式中, W_{ki} 为试验前级配曲线上某粒径组含量, W_{kf} 为试验后级配曲线上某粒径组含量。

4 结 论

根据目前的国内外相关文献, 未曾见堆石料变形特性系统试验和临界状态的相关报道, 而堆石料又是目前工程中常见的一种重要材料。基于此, 本文进行了一系列较大轴向变形下的大型三轴排水剪切试验, 得到如下结论:

(1) 剪切时, 堆石料的强度和变形均具有强度和应力状态依存性。当应变足够大时, 随着轴向应变 e_a 的增加, 其偏应力 q 和体积应变 e_v 趋于一常数。

(2) 堆石料的临界状态线, 在 $e - (p'/p_a)^x$ 平面内, 也可用直线近似表示, 在 $p' - q$ 平面内, 由于高围压下堆石料颗粒破碎效应, 其强度具有非线性的特点, 用非线性表达式来表示二者关系优于剑桥临界状态线的线性表达。

参考文献:

- [1] BEEN K, JEFFERIES M G A state parameter for sands[J]. *Geotechnique*, 1985, **35**(2): 99 - 112.
- [2] LI X S, DAFALIAS Y F, WANG Z L. State-dependent dilatancy in critical state constitutive modeling of sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(4): 599 - 611.
- [3] CAI Zheng-yin. The deformation behavior of sand[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2004.
- [4] 明海燕, 李相菘. Lower San Fernando 土坝破坏及加固的完全耦合分析[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(3): 294 - 300. (MING Hai-yan, LI Xiang-song. Fully coupled analysis of failure and remediation of lower San Fernando Dam[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(3): 294 - 300. (in Chinese))
- [5] 曹培, 蔡正银. 砂土应力路径试验的数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(1): 133 - 137. (CAO Pei, CAI Zheng-yin. Numerical simulation of stress path tests on sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(1): 133 - 137. (in Chinese))
- [6] 明海燕, 李相菘, 张瑞华. 地下水位上升引起斜坡变形的完全耦合分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(4): 510 - 516. (MING Hai-yan, LI Xiang-song, ZHANG Rui-hua. Fully coupled deformation analysis of slopes due to rise of ground water level[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(4): 510 - 516. (in Chinese))
- [7] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [8] LI X S, WANG Y. Linear representation of steady-state line for sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1998, **124**(12): 1215 - 1217.
- [9] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Theory and calculation of soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [10] 刘萌成, 高玉峰, 黄晓明. 考虑强度非线性的堆石料弹塑性本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(3): 294 - 298. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, HUANG Xiao-ming. Study on elasto-plastic constitutive model of rockfills with nonlinear strength characteristics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(3): 294 - 298. (in Chinese))
- [11] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill[A]// *Embankment Dam Engineering; Casagrand Volume*. New York, 1973: 109 - 200.