

DOI: 10.11779/CJGE2019S2010

粗粒料变形特性的大型真三轴试验研究

左永振¹, 姜景山^{2,1}, 潘家军¹, 赵 娜¹, 周跃峰¹

(1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 三维应力状态下粗粒料的变形性状对土石坝的沉降尤为重要。通过大型真三轴试验系统, 对粗粒料开展了等小主应力等中主应力系数加载试验。试验结果表明: 小主应力较小时, 粗粒料的剪胀性较强, 随着小主应力的增大, 粗粒料的剪缩性逐渐增强。中主应力系数从0增大到0.5时, 粗粒料的剪胀性基本上是逐渐减小的, 而当中主应力系数增大到0.75时, 剪胀性又有所增强。大主应变均表现为压缩变形, 小主应变均产生膨胀变形, 中主应变在一般三维应力状态下表现为压缩变形, 而在常规三轴应力状态下中主应变则产生膨胀变形。

关键词: 粗粒料; 三维应力状态; 中主应力; 变形特性; 大型真三轴试验

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0037-04

作者简介: 左永振(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事粗粒土的工程特性与岩土力学可视化研究。E-mail: zuoyongzh@163.com。

Deformation characteristics of coarse granular materials in large-scale true triaxial tests

ZUO Yong-zhen¹, JIANG Jing-shan^{2,1}, PAN Jia-jun¹, ZHAO Na¹, ZHOU Yue-feng¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research

Institute, Wuhan 430010, China; 2. School of Architectural Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The deformation behaviors of coarse granular materials under three-dimensional stress state are crucial to the settlement of earth-rockfill dams. A series of tests under constant minor principle stress and constant coefficient of intermediate principle stress are conducted by the large-scale true triaxial test system. The test results show that the dilatancy of coarse granular materials is quite strong when the minor principle stress is small. The contraction of coarse granular materials is enhanced when the minor principle stress increases. The dilatancy becomes weaker when the coefficient of the intermediate principle stress increases from 0 to 0.5. But the dilatancy becomes a little bit of stronger when the coefficient of the intermediate principle stress increases to 0.75. The major principle strain behaves as contraction and the minor principle strain shows as dilatancy in all the large-scale true triaxial tests. The intermediate principle strain is compressed under the normal three-dimensional stress state. However, the dilatancy occurs in the direction of the intermediate principle stress under the conventional triaxial stress state.

Key words: coarse granular material; three-dimensional stress state; intermediate principal stress; deformation characteristic; large-scale true triaxial test

0 引言

土体的变形是土体在某种状态下受力后的一种表现, 除了受土体结构、成分等内部因素影响, 与土体的外部因素, 如应力条件、外部环境等也密切相关。大型常规三轴试验是研究粗粒料在一定应力条件下变形特性的常用手段, 并取得了丰富的研究成果。三轴试验简单、实用, 但只能模拟轴对称应力条件下土体的力学性状, 与实际大坝填料粗粒料所处的三维应力状态有较大不同, 其变形特性也有较大差异。

三维普遍应力条件下, 等小主应力 σ_3 等比例(中主应力系数 $b = \Delta\sigma_2/\Delta\sigma_1 = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$)加载应力路径试验, 小主应力方向均表现为膨胀变形, 大主应力方向都是压缩变形, 而中主应力方向可能是压缩的也可能是膨胀的^[1-3]。

目前对土体真三轴试验的变形特性研究, 主要集

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404804); 国家自然科学基金—雅砻江联合基金重点项目(U1765203); 长江科学院创新团队项目(CKSF2015051/YT)

收稿日期: 2019-04-29

中在颗粒相对较小的砂土^[2,4]和粗粒土^[3,5]，如文献[3,5]中颗粒最大粒径均为 10 mm，目前针对粗粒料的常规三轴试验中，一般试样尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times H 600 \text{ mm}$ ，允许最大颗粒粒径为 60 mm，针对最大粒径 60 mm 粗粒料的真三轴试验研究，目前还开展得相对较少。因此，有必要对三维应力条件下粗粒料的变形特性开展试验研究。

1 试验方案

1.1 试验仪器

大型真三轴仪采用长江科学院研发的粗粒料大型真三轴试验仪，两刚一柔复合加载。与常规大型三轴仪相比，大型真三轴仪最大的不同在于中主应力 σ_2 由滑块和滚轴组成的侧向微摩阻加载板施加，试样也变成了方柱形试样（长 30 cm×宽 30 cm×高 60 cm）。

1.2 试验材料

试验材料为某面板堆石坝的主要填筑料，由爆破开采并经破碎加工获得，颗粒棱角较为明显，试样各粒组含量见表 1。

表 1 试样各粒组含量

Table 1 Contents of various grain groups of samples

60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm
18.9%	27.3%	19.8%	17.0%	17.0%

1.3 试验方案

为研究三维应力条件下粗粒料的变形特性，开展了 4 组中主应力系数 $b = \Delta\sigma_2 / \Delta\sigma_1$ (b 取 0, 0.25, 0.5, 0.75) 的等小主应力 σ_3 等比例加载试验。初始干密度 $\rho_d = 2.06 \text{ g/cm}^3$ ， σ_3 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 MPa。首先，将备好的试样进行各向等压固结（固结应力为 σ_3 ），固结完成后，测量固结变形，然后保持小主应力 σ_3 不变等比例施加大主应力增量 $\Delta\sigma_1$ 和中主应力增量 $\Delta\sigma_2$ ($= \Delta\sigma_1 \cdot b$)，直到试样剪切破坏或变形达到一定值。

2 大型真三轴试验成果分析

2.1 应力应变曲线

图 1 为应力应变关系曲线。可以看出：无论是处于轴对称应力状态下的常规三轴试验 ($b=0$) 还是三维普遍应力状态下的真三轴试验 ($b>0$)，随着 σ_3 的增大，主应力之差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 也逐渐增大，且小主应力 σ_3 越大应力曲线愈陡；随着中主应力系数 b 的增大，应力应变曲线的峰值强度也逐渐增大，说明中主应力对强度的发挥具有重要的促进作用。

2.2 应变体变曲线

图 2 为应变体变曲线 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ ，在 σ_3 较小时表现出较明显的剪胀性，随着 σ_3 的增大，剪胀性逐渐减弱，剪缩性增强。相同 σ_3 下，中主应力系数 b 从 0 增大到 0.5 时，体变曲线的剪胀性逐渐减弱，体缩变形逐渐增大，当 b 增大到 0.75 时，体变曲线变化不如小中主应力系数时明显。

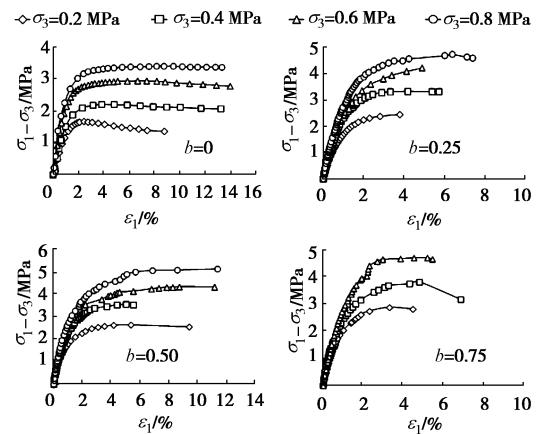


图 1 不同中主应力系数的应力 - 应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves under different coefficients of intermediate principal stress

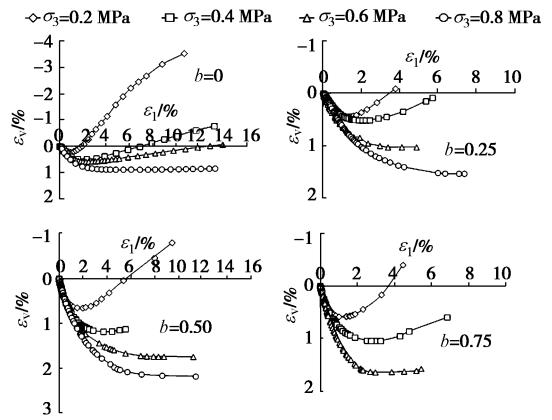


图 2 不同中主应力系数的大主应变 - 体变曲线

Fig. 2 Major principal strain-volumetric strain curves under different coefficients of intermediate principal stress

2.3 主应变关系曲线

常规三轴应力状态下 ($b=0$)， σ_3 越小膨胀变形越大，剪胀性越强。在三维应力状态下 ($b>0$)，由于中主应力 σ_2 随大主应力 σ_1 等比例增大，此时中主应力方向的变形是压缩的。相同 σ_3 条件下，中主应变 ε_2 随着中主应力系数 b 的增大而逐渐增大。

图 3 显示不管是常规三轴 ($b=0$) 还是三维应力 ($b>0$) 状态下，小主应变 ε_3 均表现为膨胀变形。随着 b 的增大，小主应力 σ_3 方向的膨胀变形也逐渐增大。相同 b 条件下，随着 σ_3 的增大，小主应力方向的膨胀

变形基本上是逐渐变小的, 但减小幅度不大。

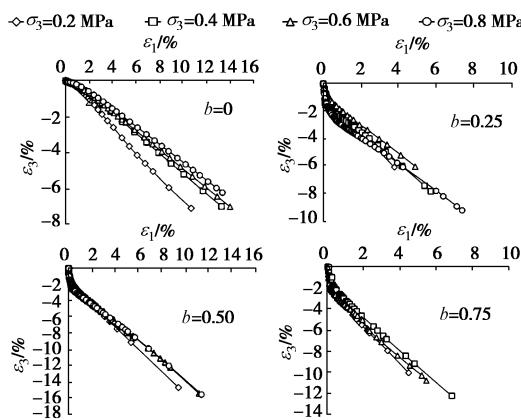


图 3 不同中主应力系数的主应变关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of principal strains under different coefficients of intermediate principal stress

3 中主应力对变形的影响

3.1 中主应力对体变的影响

图 4 为不同小主应力对应的大主应变 - 体变曲线。从图 4 中可以看出, 小主应力为 0.2 MPa 的试样均有较显著的剪胀性, 随着 σ_3 增大剪胀性也逐渐减弱, 当 σ_3 为 0.8 MPa 时, 体变均表现为较大的压缩变形。 b 为 0 时, 试样表现出较大的体胀变形或较小的压缩变形; 当 b 逐渐增大到 0.5 时剪胀性逐渐减小, 剪缩性逐渐增强; 当 b 再增大到 0.75 时总体变又略有减小, 主要原因可能是, 刚开始随着 b 的增大, 中主应力方向的约束也越来越强, 限制了试样的膨胀变形, 表现出体缩变形逐渐增大; 当 b 较大时, 中主应力比较接近大主应力, 此时 $b = \Delta\sigma_2 / \Delta\sigma_1$ 等比例加载类似于三轴伸长试验, 由于小主应力相比大主应力和中主应力过小, 不能较好抑制小主应力的膨胀, 表现出剪胀性又有所增强, 压缩变形减小。

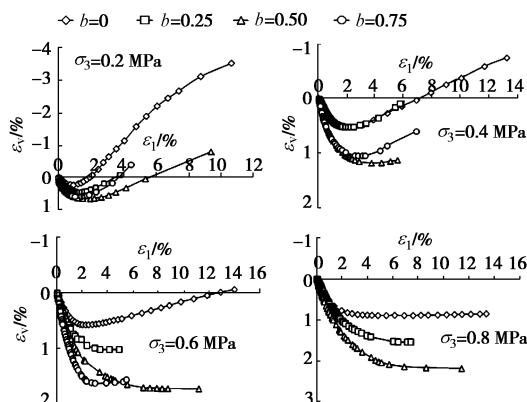


图 4 不同小主应力对应的大主应变 - 体变曲线

Fig. 4 Principal strain-volumetric strain curves under different minor principal stresses

3.2 中主应力对主应变的影响

图 5 和图 6 为不同小主应力对应的主应变关系曲线 $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ 曲线和 $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ 曲线。可以看出, $b=0$ 时, 中主应变 ε_2 为负, 表现为膨胀变形, 而 b 为 0.25、0.5 和 0.75 时, 中主应变 ε_2 均为正值, 表现为压缩变形。因此, 随着 b 从零逐渐增大, 中主应变 ε_2 逐渐从常规三轴应力条件下的膨胀变形转变为压缩变形, b 仅在 0~0.25 之间取很小的值时中主应变 ε_2 才为负值和表现为膨胀变形, 说明中主应力 σ_2 对中主应变 ε_2 具有很大的约束和限制作用, 只要略大于 σ_3 即可完全抑制中主应力 σ_2 方向的膨胀变形 ε_2 并能够产生压缩变形, 正是由于中主应力的这种作用, 造成在三维普遍状态下粗粒土的强度要高于常规三轴应力状态下的强度。而在小主应力方向全部为膨胀变形, b 越大, 小主应变 ε_3 方向的膨胀变形也越大, 原因是 b 越大, 大主应力 σ_1 和中主应力 σ_2 方向对粗粒土的挤压作用越强, 此时在小主应力方向不能有效约束此方向上侧向变形导致产生较大的膨胀变形。

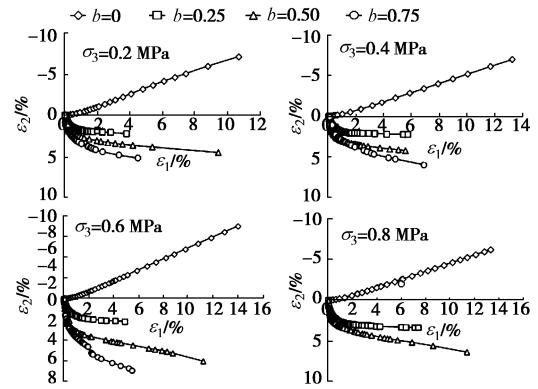


图 5 不同小主应力对应的大主应变 - 中主应变曲线

Fig. 5 Principal strain-volumetric strain curves under different minor principal stresses

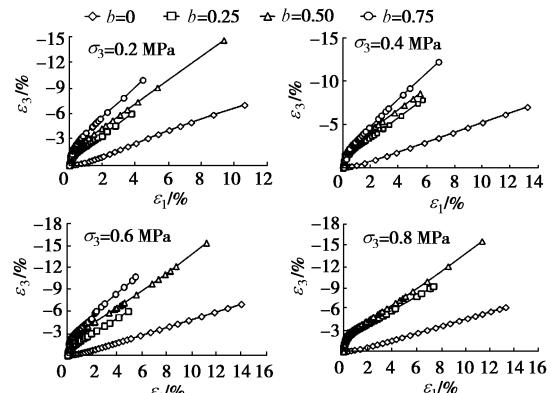


图 6 不同小主应力对应的大主应变 - 小主应变曲线

Fig. 6 Principal strain-volumetric strain curves under different minor principal stresses

3.3 中主应力对变形影响的机理分析

综上所述, 常规三轴压缩试验($b=0$), 在大主应力 σ_1 (轴向应力)作用下, 试样在中主应力 σ_2 和小主应力 σ_3 方向都可以相对自由地变形。而在等 σ_3 等 b 真三轴试验中($b>0$), 试样在小主应力 σ_3 方向可以产生相对自由的膨胀变形, 另一方向(中主应力 σ_2 方向)的变形由于 $\Delta\sigma_2$ 的影响而受到更强的约束作用。因此, 常规三轴压缩试验($b=0$)的轴向应变 ε_{ltc} 要大于等 σ_3 等 b 真三轴试验($b>0$)的大主应变 ε_{lta} 。以土石坝常用的增量弹性模型进行说明:

对常规三轴压缩试验($b=0$), 有

$$\varepsilon_{ltc} = \frac{\Delta\sigma_1}{E} - \frac{2\Delta\sigma_3}{E}v \quad ; \quad (1)$$

对等 σ_3 等 b 真三轴试验($b>0$), 有

$$\varepsilon_{lta} = \frac{\Delta\sigma_1}{E} - \frac{\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{E}v \quad . \quad (2)$$

上式中下标 tc 和 tt 分别表示常规三轴压缩试验($b=0$)和等 σ_3 等 b 真三轴试验($b>0$), 两种试验条件下, 均保持小主应力(围压) σ_3 不变, 即 $\Delta\sigma_3=0$, 等 σ_3 等 b 真三轴试验($b>0$)的 $\Delta\sigma_2>0$, 而常规三轴压缩试验($b=0$)的 $\Delta\sigma_2=\Delta\sigma_3=0$, 因此, 相同 $\Delta\sigma_1$ 作用下, 等 σ_3 等 b 真三轴试验($b>0$)的 ε_{lta} 小于常规三轴压缩试验($b=0$)的 ε_{ltc} , 即 $\varepsilon_{lta} < \varepsilon_{ltc}$, 等 σ_3 等 b 真三轴试验($b>0$)的大主应变较小, 应力应变曲线较陡, 因而表现出更高的强度。

4 结 论

粗粒料的变形特性对土石坝坝体的变形有着至关重要的影响, 土石坝由于在建造和运行阶段受力情况复杂坝体填料常处于较为复杂的三维应力状态下。通过粗粒料大型真三轴等中主应力系数加载试验, 得到如下结论:

(1) 小主应力较小时, 体积变形表现为先减缩后产生明显的剪胀变形, 随着小主应力的增大试样的剪胀变形逐渐降低而剪缩性逐渐增强, 小主应力较大时体变均为压缩变形且随着大主应变的增大体积压缩变形也逐渐增大。

(2) 中主应力系数从 0 增大到 0.5 时, 试样的剪胀性逐渐减弱, 剪缩性逐渐增强, 而当中主应力系数增大到 0.75 时, 试样的剪胀性又略有增大。

(3) 无论中主应力系数大小如何, 大主应变均是

压缩变形, 小主应变均是膨胀变形。中主应力系数为零时, 大三轴试样处于常规三轴应力状态, 中主应变为膨胀变形。中主应力系数在 0~1 之间时, 中主应变为压缩变形, 且随着大主应变压缩变形的增大, 中主应变的压缩变形也逐渐增大。

参 考 文 献:

- [1] 潘家军, 程展林, 余挺, 等. 不同中主应力条件下粗粒土应力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2078~2084. (PAN Jia-jun, CHENG Zhan-lin, YU Ting, et al. Experimental study on stress-strain characteristics of coarse-grained soil under different intermediate principal stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 2078~2084. (in Chinese))
- [2] 徐志伟. 砂土侧向变形特性的真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 371~374. (XU Zhi-wei. On the deformation characteristic of sand by true triaxial test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 371~374. (in Chinese))
- [3] 施维成, 朱俊高, 何顺宾, 等. 粗粒土应力诱导各向异性真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 810~814. (SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, HE Shun-bin, et al. Stress-induced anisotropy of coarse-grained soil by true triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 810~814. (in Chinese))
- [4] 张敏, 许成顺, 杜修力, 等. 中主应力系数及应力路径对砂土剪切特性影响的真三轴试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1072~1079. (ZHANG Min, XU Cheng-shun, DU Xiu-li, et al. True triaxial experimental research on shear behaviors of sand under different intermediate stresses and different stress paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1072~1079. (in Chinese))
- [5] 施维成, 朱俊高, 代国忠, 等. 球应力和偏应力对粗粒土变形影响的真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 776~783. (SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, DAI Guo-zhong, et al. True triaxial test on influence of spherical and deviatoric stresses on deformation of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 776~783. (in Chinese))

(责编: 明经平)