

文章编号: 1000-7598 (2010) 04-1118-05

不同应力路径下粗粒料力学特性试验研究

杨 光, 孙 逊, 于玉贞, 张丙印

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 采用大型三轴试验机, 对粗粒料进行了常规三轴、等 p 和等应力比等不同应力路径的试验。通过对试验结果进行对比分析, 研究了粗粒料在不同应力路径下的应力-应变、变形和强度特性, 并对粗粒料的卸载体缩现象进行了分析和探讨。结果表明, 应力路径对粗粒料的应力-应变和变形特性影响较大, 而对强度特性影响较小; 卸载体缩主要是由偏应力比 η 的变化所引起的, 与应力路径关系很大。

关 键 词: 粗粒料; 应力路径; 变形和强度特性; 卸载体缩

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental study of mechanical behavior of a coarse-grained material under various stress paths

YANG Guang, SUN Xun, YU Yu-zhen, ZHANG Bing-yin

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A series of large-scale triaxial tests under different stress paths are performed, including the conventional triaxial tests, constant p tests and constant stress ratio tests. Based on the comparison of test results, the stress-strain, deformation and strength characteristics of a coarse-grained material under different stress paths are investigated. Meanwhile, the phenomena of the volume-contraction in unloading is discussed. The test results indicate that the stress path has obvious influence on the stress-strain and deformation characteristics of the coarse-grained material, but little influence on strength characteristics. The volume-contraction in unloading of the coarse-grained material is caused by the change of deviatoric stress ratio and is related to stress path of test.

Key words: coarse-grained material; stress path; deformation and strength characteristics; volume-contraction in unloading

1 引 言

粗粒土具有压实性能好、透水性强、填筑密度大、抗剪强度高、沉陷变形小、承载力高等工程特性, 因此, 在工程建设中得到了广泛应用。随着高土石坝和高层建筑的发展, 粗粒土的力学特性成为研究的热点之一。但由于试验条件的限制, 对粗粒料的应力-应变、变形和强度特性的研究远远落后于对细料土的研究, 对粗粒料的试验大多采用围压不变的常规三轴试验^[1-4], 而其他应力路径的三轴试验研究较少。研究表明^[5-8], 岩土材料的应力-应变特性存在着所谓的“交叉影响”, 即球应力 p 的变化不仅引起体积应变 ε_v 的变化, 也会引起偏应变 ε_s ($\varepsilon_s = \varepsilon_1 - \varepsilon_v/3$) 的变化; 同样, 偏应力比 η ($\eta = q/p$) 的

变化不仅影响偏应变 ε_s , 亦影响着体积应变 ε_v 。岩土材料的这一特性是建立合理数值模型的重要基础。因此, 对粗粒料进行球应力 p =常数的等 p 试验和偏应力比 η =常数的等应力比试验, 显然更有助于深入地了其力学特性。

2 试验用料和试验方案

试验在清华大学自行研制的大型高压多功能静动三轴试验机上进行。对于大型三轴试验, 试样直径为 300 mm, 根据试验规程, 试验用料的允许最大粒径为 60 mm。因而, 试验时需对设计级配进行缩尺。试验用料的级配采用了相似级配法和等量替换法相结合的方法由设计级配缩尺而成, 颗粒级配见表 1。缩尺的原则为尽量保持试验用料级配和设

收稿日期: 2008-07-08

基金项目: 国家自然科学基金委员会、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(No. 50639060); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室课题(610103002); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(2006003040)。

第一作者简介: 杨光, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事土的静动力特性和本构模型等方面的研究。E-mail: yangguang00@gmail.com.

计用料级配相似，同时也不应过多地增加细料的含量。试验用料为某高心墙堆石坝主堆石料，为弱风化花岗岩，试样直径为 30 cm，高 73 cm，制样干密度为 $\rho_d=1.98 \text{ g/cm}^3$ ，试样最大粒径为 60 mm，不均匀系数为 5.81，曲率系数为 1.57。

表1 粗粒料的级配

Table 1 Particle size distribution of the coarse-grained material

级配	颗粒直径/mm								
	600	400	200	100	60	40	20	10	5
原始级配	100	84.5	64	47	35.5	27.5	17	11	6
试验级配					100	80	48	24	11

本文采用大型三轴试验机，对粗粒料进行了常规三轴、等 p 和等应力比等不同应力路径的试验。

(1) 常规三轴试验：选取了 5 个围压，分别为 0.2、0.7、1.4、2.0、2.6 MPa。试验采用位移控制，轴向剪切速率为 1.0 mm/min。当轴向应变达到 15% 时进行一个卸载和再加载的循环，然后结束试验。

(2) 等 p 试验：选取了 4 个球应力，分别为 0.2、0.7、1.4、2.0 MPa。试验采用应力控制，剪切速率为 2 kN/min，等 p 试验在接近破坏时由于变形较大，剪切速率改为 0.5 kN/min。剪切过程中保持 p 不变， q 不断增大；即将达到破坏强度时，按原路径卸载至 $q=0$ ；再保持 p 不变，增大 q ，加载直至试样破坏，试验中最小围压可达到 0.08 MPa。

(3) 等应力比试验：选取了 4 个应力比，分别为 $R=\sigma_1/\sigma_3=1.5、2.0、2.5、3.5$ 。试验采用应力控制，剪切速率为 2 kN/min。剪切前先对试样施加 0.15 MPa 的预固结压力，加载到围压力 $\sigma_3=1.6 \text{ MPa}$ 时进行一个卸载和再加载的循环，当试验的围压力达到 2.5 MPa 时结束试验。

通过对试验结果进行对比分析，总结了粗粒料在不同应力路径下的应力-应变、变形和强度特性。每个试验中都进行了一次卸载和再加载循环，以讨论粗粒料的卸载体缩特性。其中，等 p 试验和等应力比试验中围压变化较大，膜嵌入对试验结果影响很大，本文采用张丙印建议的经验公式^[9]进行膜嵌入的修正，如式 (1) 所示：

$$\Delta Q = \frac{100\sigma_3}{A + B\sigma_3} \quad (1)$$

式中： ΔQ 为膜嵌入体积； σ_3 为围压； A 和 B 为试验常数，可通过等向固结试验确定。

3 常规三轴试验结果及讨论

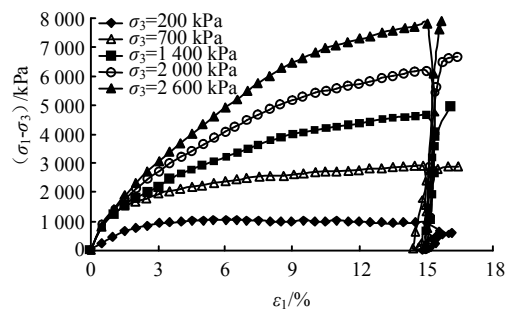
3.1 应力-应变特性分析

图 1(a) 为常规三轴试验的偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - 轴向应变 ε_1 关系曲线。由图可知：偏差应力峰值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随围压增大而增大。试样在低围压 (200 kPa) 时应力-应变曲线表现为弱软化型，轴向应变到达强度峰值后强度有所降低，但降低幅度不大，说明粗粒料的应变软化没有细粒土那么显著，其在峰值后仍可承受较大应力作用的特性。围压较高时，应力-应变曲线几乎都是应变硬化型，直到应变达到 15% 破坏时，应力都在增加。

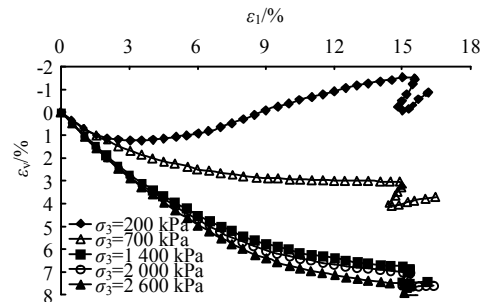
3.2 变形特性分析

图 1(b) 为常规三轴试验的体积应变 ε_v - 轴向应变 ε_1 关系曲线。曲线表明，粗粒料的体变具有以下特点：

(1) 单调加载下，应变初始段在各围压下的体变均为正，即体缩。随着轴向应变的增加，低围压 (200 kPa) 的体变由逐渐增大变为逐渐减小，即出现体积膨胀现象；高围压下，体变始终为体缩，但体变速率逐渐减小，体变最终趋向于一个定值。固结围压越大，体变值越大。



(a) 偏应力-轴向应变关系曲线



(b) 体积应变-轴向应变关系曲线

图1 常规三轴试验结果

Fig.1 Results of conventional triaxial tests

(2) 不同固结围压条件下, 不论试样是否已发生体积膨胀, 卸载时均有明显的体积收缩, 即粗粒料具有卸载体缩特性, 且围压越小, 卸载体缩现象越明显, 固结围压增大, 卸载体缩值随之减小。

(3) 再加载过程中, 各围压下的试样几乎都出现了剪胀的趋势, 且剪胀趋势明显大于初次加载。在低围压下, 剪胀现象最为明显, 随着固结围压的增大, 再加载过程中剪胀现象逐渐减弱。

3.3 强度特性分析

图2为粗粒料的峰值内摩擦角 φ 与围压 σ_3 的关系曲线, 它表明常规三轴试验中峰值内摩擦角随着围压的增大而减小, 大致与围压的对数呈线性关系。

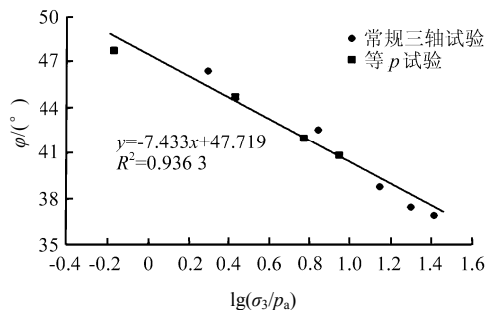


图2 峰值内摩擦角与围压关系曲线

Fig.2 Relationship between angle of internal friction and confining pressure

4 等 p 试验结果及讨论

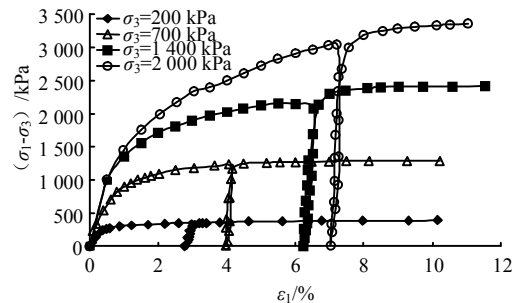
4.1 应力-应变特性分析

图3(a)为等 p 试验的偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ -轴向应变 ε_1 关系曲线。由图可知: 等 p 试验曲线与常规试验曲线形状相似。偏差应力峰值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随围压增大而增大, 应力达到峰值后, 基本不变, 轴向变形迅速发展, 直至破坏。根据常规试验数据拟合的破坏线, 等 p 试验的卸载点设置大约为破坏强度的95%。可以看到, 卸载及再加载曲线形成的滞回圈非常小, 卸载近乎于垂直下降, 轴向应变回弹量几乎可以忽略不计。

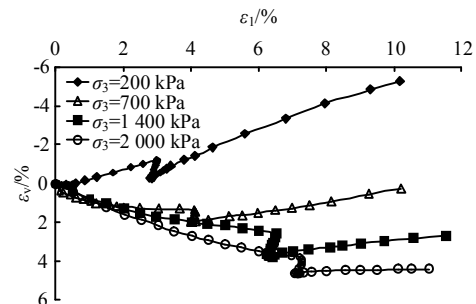
4.2 变形特性分析

图3(b)为等 p 试验的体积应变 ε_v -轴向应变 ε_1 关系曲线。从图中可以看出, 在围压较低(球应力 $p=200$ kPa)时, 偏应力施加后很快试样就出现剪胀。球应力较大时, 在初次加载中虽然没有出现剪胀, 但剪缩体变明显小于相同固结围压下的常规三轴试验。这是由于在剪应力增加的过程中, 围压却在不断减小, 使得试样受到的侧向约束也不断减小, 有利于剪胀的发生。卸载时, 试样轴向应变稍有减小,

试样体积却明显增大, 各球应力下的试样都产生了明显的卸载体缩现象。再加载时, 各试样都产生了明显的剪胀现象。卸载体缩现象和再加载的剪胀现象明显大于相同固结围压下的常规三轴试验。



(a) 偏应力-轴向应变关系曲线



(b) 体积应变-轴向应变关系曲线

图3 等 p 试验结果

Fig.3 Results of constant p tests

4.3 强度特性分析

由图2可见, 等 p 试验所得的峰值内摩擦角 φ 与围压 σ_3 的关系曲线与常规三轴试验相差不大, 可见应力路径对抗剪强度影响不大。两种应力路径下的峰值内摩擦角均随着围压的增大而减小, 与围压的对数呈线性关系。

5 等应力比试验结果及讨论

5.1 应力-应变特性分析

图4(a)和(b)为等应力比试验的应力-应变关系曲线。从图中可以发现, 不同应力比试验的应力-应变曲线之间的关系有良好的规律性, 其主要特性如下:

(1) 在本次试验的应力比范围内, 剪应力-剪应变及球应力-体积应变曲线中的应变增长率随应力的增加而减小。

(2) 应力比的变化对两种曲线均有影响。当应力比增加时, 应变增长率也随之增加, 这种趋势在剪应力-剪应变曲线上反映尤为明显。

(3) 不同应力比条件下卸载滞回圈的平均斜率

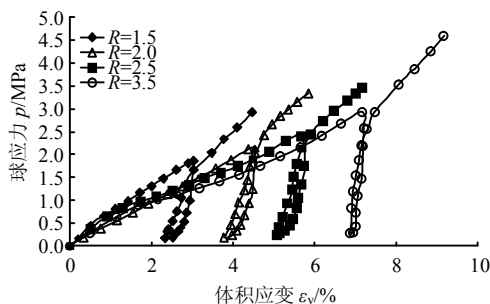
大致平行, 可视为常数。

(4) 当卸载和再压缩过程中球应力小于最大球应力(或剪应力<最大剪应力)时, 试样产生的塑性应变很小, 相对于初始压缩及球应力>最大球应力时的塑性应变可以忽略不计。

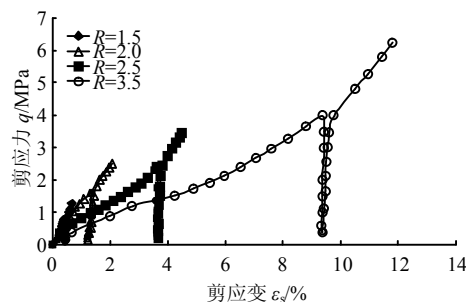
5.2 变形特性分析

图 4 (c) 和 (d) 为等应力比试验的体积应变-轴向应变关系曲线和径向应变-轴向应变关系曲线。从图中可以看出, 在本试验的应力比范围内, 虽然剪应力很大, 但试样未发生体胀, 轴应变和体应变基本上是线性关系, 其斜率随应力比而变, 应力比越大, 斜率越小。不同的应力比值下, 径向应变和轴向应变关系也不同, 随应力比值增加从径向压缩变至径向膨胀。轴应变和径向应变基本上也呈线性关系, 其斜率仅随应力比而改变, 应力比越大, 斜率越小。

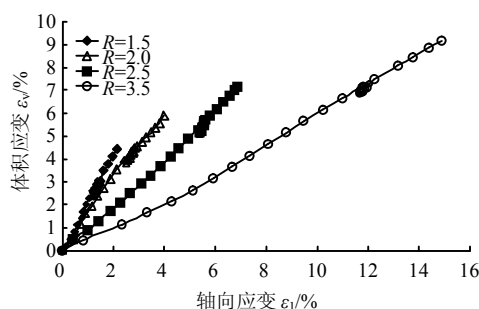
在等应力比试验中, 加载时体积压缩, 卸载时体积膨胀。即使在很高的应力比条件下 ($R=3.5$), 加载时也未发生剪胀, 卸载时只发生体积回弹膨胀。可见对于粗粒料这种具有摩擦特性的材料, 在应力比不变的情况下, 不出现加载剪胀和卸载体缩。而在等 p 试验和常规三轴压缩试验中, 粗粒料在低围压下剪胀现象明显, 高围压下体变始终表现为剪缩, 但是无论围压大小, 无论是否出现剪胀, 试样都在卸载时出现体缩。围压对于卸载体缩有一定的影响, 随着围压的增加, 卸载体缩量呈下降趋势。上述分析表明, 卸载体缩与试验的应力路径关系很大。对于等 p 试验, $dp=0$, 试样的体应变是由剪应力 dq 引起的; 对于常规三轴试验, 加载时 $dp=dq/3>0$, 卸载时 $dp=dq/3<0$, 按弹性理论应当发生体积回弹。但这两种试验在低围压下均出现加载剪胀, 在各种围压下均出现卸载体缩。在等应力比加载条件下, 偏应力 q 变化, 但是偏应力比 η ($\eta=q/p$) 不变, 加载时未发生剪胀, 卸载时只发生体积回弹膨胀。



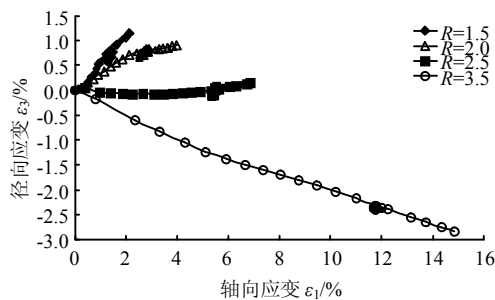
(a) 球应力-体积应变关系曲线



(b) 剪应力-剪应变关系曲线



(c) 体积应变-轴向应变关系曲线



(d) 径向应变-轴向应变关系曲线

图 4 等应力比试验结果

Fig.4 The results of constant R tests ($R=\sigma_1/\sigma_3$)

这表明卸载体缩主要不是由平均主应力 p 的变化引起的, 而是由偏应力比 η 的变化所引起的, 与粗粒料的剪胀密切相关^[10]。

6 结 论

(1) 在等 p 和常规三轴试验中, 粗粒料的偏差应力峰值随围压的增大而增大, 应变软化并不明显; 在等 p 试验中, 在低围压下试样更容易发生剪胀, 在高围压下试样的剪缩体变明显小于相同围压下的常规三轴试验; 两种应力路径下的峰值内摩擦角与围压关系曲线相差不大, 应力路径对强度特性影响不大。

(2) 在等应力比试验中, 粗粒料的剪应力-剪应变及球应力-体变曲线中的应变增长率随应力的加

而减小;当应力比增加时,应变增长率也随之增加;体变-轴应变和轴应变-径向应变曲线基本上呈线性关系,其斜率随应力比而变,应力比越大,斜率越小。

(3) 粗粒料的卸载体缩与试验的应力路径关系很大。在等 p 和常规三轴试验中,无论围压大小,无论是否出现剪胀,试样都在卸载时出现体缩。在等应力比加载条件下,即使在很高的应力比条件下($R=3.5$),加载时也不会发生剪胀,卸载时只发生体积回弹膨胀。这表明卸载体缩主要不是由平均主应力 p 的变化引起的,而是由偏应力比 η 的变化所引起的,与粗粒料的剪胀密切相关。

参考文献

- [1] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等.堆石料变形与强度特性的大型三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(7):1104—1111.
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and strength characteristics of rockfill materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1104—1111.
- [2] 秦红玉,刘汉龙,高玉峰,等.粗粒料强度和变形特性的大型三轴试验研究[J].岩土力学,2004,25(10):1575—1580.
QIN Hong-yu, LIU Han-long, GAO Yu-Feng, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1575—1580.
- [3] 刘萌成,黄晓明,高玉峰,等.堆石料强度变形特性与非线性弹性本构模型研究[J].岩土力学,2004,25(5):798—802.
LIU Meng-cheng, HUANG Xiao-Ming, GAO Yu-Feng, et al. Research on strength-deformation characteristics and nonlinear elastic model of rockfills[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 798—802.
- [4] 田堪良,张慧莉,骆亚生.堆石料的剪切强度与应力-应变特性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):657—661.
TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, LUO Ya-sheng. Shear strength and stress-strain properties of rockfill materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(4): 657—661.
- [5] WANG Z L, DAFALIAS Y F, SHEN C K. Bounding surface hypoplasticity model for sands[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, 1986, 112(9): 966—987.
- [6] 陈生水,沈珠江,郦能惠.复杂应力路径下无粘性土的弹塑性数值模拟[J].岩土工程学报,1995,17(2):20—28.
CHEN Sheng-shui, SHEN Zhu-jiang, LI Neng-hui. A elastoplastic model for cohesionless soils under complex stress paths[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 25(10): 1575—1580.
- [7] 吴兴征,栾茂田,李相菘.复杂加载路径下堆石料动力本构模型及数值模拟[J].世界地震工程,2001,17(1):9—14.
WU Xing-zheng, LUAN Mao-tian, LI Xiang-song. Bounding-surface hypoplastic model for rockfill materials under complex loading paths and its verification[J]. **World Information on Earthquake Engineering**, 2001, 17(1): 9—14.
- [8] 谢婉丽,王家鼎,张林洪.土石粗粒料的强度和变形特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):430—437.
XIE Wan-li, WANG Jia-ding, ZHANG Lin-hong. Testing study on characteristics of strength and deformation for coarse materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 430—437.
- [9] 张丙印,吕明治,高莲士.粗粒料大型三轴试验中橡皮膜嵌入量对体变的影响及校正[J].水利水电技术,2003,34(2):30—33.
ZHANG Bin-yin, LÜ Min-zhi, GAO Lian-shi. Correction of membrane penetration in large-scale triaxial tests for granular materials[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2003, 34(2): 30—33.
- [10] 李广信,郭瑞平.土的卸载体缩与可恢复剪胀[J].岩土工程学报,2000,22(2):158—161.
LI Guang-xin, GUO Rui-pin. Volume-contraction in unloading of shear test and reversible dilatation of soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 158—161.