

DOI: 10.11779/CJGE201611018

# 不同中主应力条件下粗粒土应力变形特性试验研究

潘家军<sup>1,2</sup>, 程展林<sup>1,2</sup>, 余挺<sup>3</sup>, 江泊洧<sup>1,2</sup>, 左永振<sup>1,2</sup>, 徐晗<sup>1,2</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010;  
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 采用长江科学院大型真三轴仪, 对粗粒土进行了一系列不同中主应力系数条件下的真三轴试验和平面应变试验, 研究了中主应力对粗粒土的应力变形的影响规律。试验结果表明, 中主应力比  $b$  一定时, 应力-应变关系曲线的斜率和峰值强度随着固结压力的增大而增加, 在低围压条件下, 体变关系曲线在加载过程中表现为先剪缩后剪胀的特性, 而在高围压下, 整个加载过程中表现剪缩的特性; 固结压力一定时, 随着  $b$  值的增大, 应力在峰值后的软化现象愈加明显, 体变全过程曲线表现出剪胀特征对应的固结压力越来越低, 小主应变-大主应变关系曲线的斜率绝对值增大。研究成果可为进一步研究粗粒土的本构模型奠定基础。

**关键词:** 粗粒土; 真三轴; 中主应力; 试验; 应力应变

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)11-2078-07

作者简介: 潘家军(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事粗粒土力学特性与土石坝工程方面的研究。E-mail: jjpan\_1999@163.com。

## Experimental study on stress-strain characteristics of coarse-grained soil under different intermediate principal stresses

PAN Jia-jun<sup>1,2</sup>, CHENG Zhan-lin<sup>1,2</sup>, YU Ting<sup>3</sup>, JIANG Ji-wei<sup>1,2</sup>, ZUO Yong-zhen<sup>1,2</sup>, XU Han<sup>1,2</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 3. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of CHECC, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** In order to study how the intermediate principal stress (short for IPS) influences the stress-strain characteristic of coarse-grained soil, using the large-scale true triaxial apparatus developed by Changjiang River Scientific Research Institute (CRSRI), a series of true triaxial compression tests and plane strain tests are carried out. The test results show that: (1) When the IPS ratio (also called  $b$  value) is a constant, the slope of stress-strain curves and the peak strength increase with the increasing consolidation pressure; (2) Under the relative low confining pressure conditions, with the increasing axial strain, the volumetric strain exhibits shear contracting firstly and then dilating, but when the confining pressure rises to a higher level, the volumetric strain shows shear contracting in the whole deformation process; (3) When the consolidation pressure is the same, with the increase of  $b$  value, the stress softening effect after the peak stress becomes more obvious. Under a relative lower consolidation pressure, the volumetric strain exhibits the characteristics of shear contracting firstly and then dilating. For the relation curves between the minimum and the maximum principal strains, the absolute value of slope also increases. The above results can be treated as the research foundation in establishing the constitutive model for coarse-grained soil under complex stress paths.

**Key words:** coarse-grained soil; true triaxial test; intermediate principal stress; experiment; stress-strain

## 0 引言

长期以来, 人们常采用常规的大型高压三轴仪作为研究高土石坝筑坝粗粒土力学特性的主要试验手段<sup>[1-5]</sup>。然而, 常规三轴试验系统的侧向力相等(即小主应力  $\sigma_3$ =中主应力  $\sigma_2$ ), 使土样处于轴对称应力状态, 不能反映土体在三维应力条件下的力学性能。在

土石坝工程中, 土体单元实际上处于三向复杂应力状态, 是典型的三维问题。考虑这种复杂三向应力条件

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379021, 51109013); 长江科学院创新团队项目(CKSF2015051/YT); 中央级科研院所基本科研业务费项目(CKSF2014055/YT)

收稿日期: 2015-10-13

下粗粒土的应力变形特性, 进而采用合适的粗粒土本构模型描述这种应力应变关系, 是进行土石坝有限元数值分析的前提<sup>[6-7]</sup>。真三轴试验能够独立地施加 3 个方向的主应力, 能够准确模拟土体实际受力状态, 是研究土体三维强度准则和本构模型最为有效的科学仪器之一。因此国内外不少学者使用真三轴仪对土体在三维应力状态下的特性进行研究<sup>[8-11]</sup>, AnhDan 等<sup>[8]</sup>采用真三轴仪评估了砂砾的准弹性性能, 其试样的尺寸为横截面积 25 cm×22 cm, 高 50 cm。韩国 Choi 等<sup>[9]</sup>研制了一台试样尺寸 241 mm 立方体真三轴仪, 进行了砂砾料的应力变形特性试验研究。施维成等<sup>[10-12]</sup>采用河海大学自主研制的中型真三轴仪, 试验尺寸为 35 mm×70 mm×70 mm, 对粒径为 2~5 mm 的砾石料进行了小主应力不变, 大、中主应力等比例同时加载的等  $b$  试验, 分别研究了中主应力对大、中、小主应变及强度的影响规律, 建议了一个破坏准则, 推导了该准则的内摩擦角与  $b$  的关系式, 并用几组真三轴试验结果进行验证。这些研究对认识土在复杂应力条件下的变形特性有重要意义。但对于筑坝粗粒土真三轴试验研究, 由于受试样尺寸的影响, 粗粒土(颗粒最大粒径为 60 mm)复杂加载路径的大型真三轴试验还未见公开报道。

本文利用长江科学院大型真三轴仪(试样尺寸 300 mm×300 mm×600 mm), 针对某堆石坝工程筑坝粗粒土进行了一系列不同中主应力系数条件下的真三轴试验和平面应变试验, 研究了中主应力对粗粒土的应力变形特性的影响, 获得了复杂应力状态下粗粒料的应力变形的规律性认识, 为进一步研究粗粒土的本构模型奠定基础。

## 1 试验方法及加载方式

### 1.1 试验仪器

本次试验采用长江科学院大型真三轴仪, 如图 1 所示, 试样尺寸为 300 mm×300 mm×600 mm 的长方体。该仪器可对 3 个方向的主应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  分别单独控制, 且互不干扰, 可以实现三维应力空间中复杂应力路径的真三轴试验。

### 1.2 试样制备

本次试验所用粗粒土取国内某面板堆石坝的主堆石料。试验粗粒土中, 粒径 60~40 mm 的颗粒占总重量的 19.2%, 粒径 40~20 mm 的颗粒占总重量的 28.8%, 粒径 20~10 mm 的颗粒占总重量的 22.8%, 粒径 10~5 mm 的颗粒占总重量的 13.2%, 粒径小于 5 mm 的颗粒占总重量的 16%, 级配曲线如图 2 所示, 试验控制干密度为 2.06 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒相对密度为 2.64, 相对密度为 0.9。试验时采用分层击实的方法制样, 最

大程度地保证了试样的均匀性, 图 3 所示为制备完成的试样。

### 1.3 试验方案

为研究不同中主应力条件下粗粒土的应力变形特性, 进行了 5 组固结排水条件下的真三轴试验。分别选不同中主应力比系数  $b$ ( $b=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  分别为大主应力、中主应力、小主应力)进行试验, 即试验中取  $b=0$ , 0.25, 0.5, 0.75。另进行 1 组平面应变试验, 每组试验均选取 4 种不同的初始等向固结压力, 分别为 0.2, 0.4, 0.6 和 0.8 MPa。



图 1 大型粗粒土真三轴仪

Fig. 1 Large-scale true triaxial apparatus for coarse-grained soil

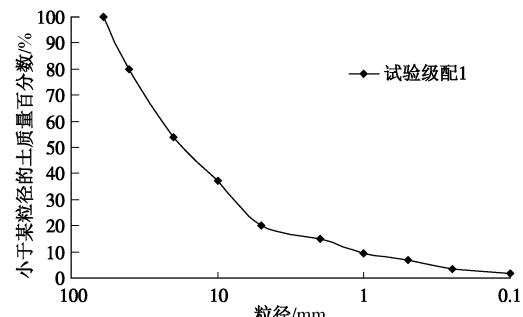


图 2 试验粗粒料级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of particles of coarse-grained soil



图 3 真三轴粗粒土试样

Fig. 3 Coarse-grained soil sample for true triaxial tests

试样装载完毕后, 充分饱和并在相应围压水平下固结不少于 24 h, 待体应变稳定后, 记录固结排水量, 并按照设计应力路径对试样进行加载。整个剪切试验过程中, 按相应的中主应力比  $b$  值恒定同步加载  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ , 并同时记录各级荷载条件下的排水量, 记录试样全过程体变数据。测试以  $\sigma_1$  超过峰值或轴向应变  $\varepsilon_1$  达到 15% 作为试验结束判别标准。

## 2 试验成果分析

### 2.1 应力应变过程曲线分析

图 4 为粗粒土常规三轴、以及  $b=0$  的真三轴 (固结围压分别为 0.2, 0.4, 0.8 MPa) 条件下的应力应变曲线图。从图可以看出,  $b=0$  的真三轴试验成果曲线与常规三轴试验成果曲线变化规律基本一致, 从而验证了真三轴的可靠性。

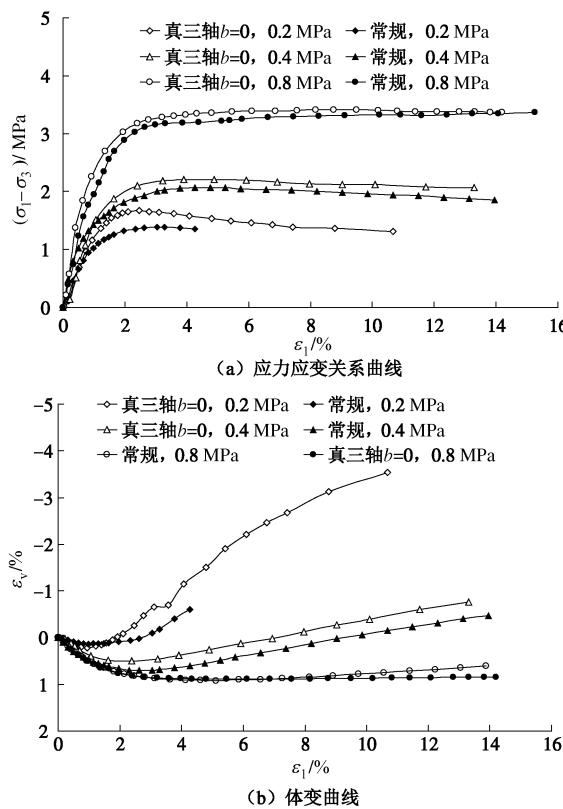


图 4  $b=0$  条件下真三轴与常规三轴试验曲线

Fig. 4 Results under true triaxial ( $b=0$ ) and triaxial tests

图 5 分别为不同中主应力比  $b$  值条件下堆石料的  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$  关系曲线。经过对比分析, 可以看出, 随着  $b$  值的增加,  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$  关系曲线形态在应变初期呈陡变趋势, 反映了中主应力  $\sigma_2$  对粗粒料起到明显的硬化作用; 同时, 从应力应变全过程曲线来看, 随着  $b$  值的增大, 应力在峰值后的软化现象愈加明显, 当  $b=0$  时 (常规三轴应力状态), 试样在高固结压力条件下尚呈现应变硬化特性、在低固结压力条件下呈现应变软化特性, 该软化过程直到轴应变 15% 左右仍

能持续; 而在  $b=0.25$  和  $b=0.5$  条件下, 有部分试样在一定围压下尚能持续应变增加且应力基本不变的现象, 但该过程持续至 10% 左右即结束, 随即出现软化现象; 当  $b=0.75$  时, 各试样均在轴应变 5% 左右时达到峰值强度, 随即应力出现下降, 出现软化现象。故可认为中主应力比  $b$  的增加使得粗粒料的应变软化现象更加明显。

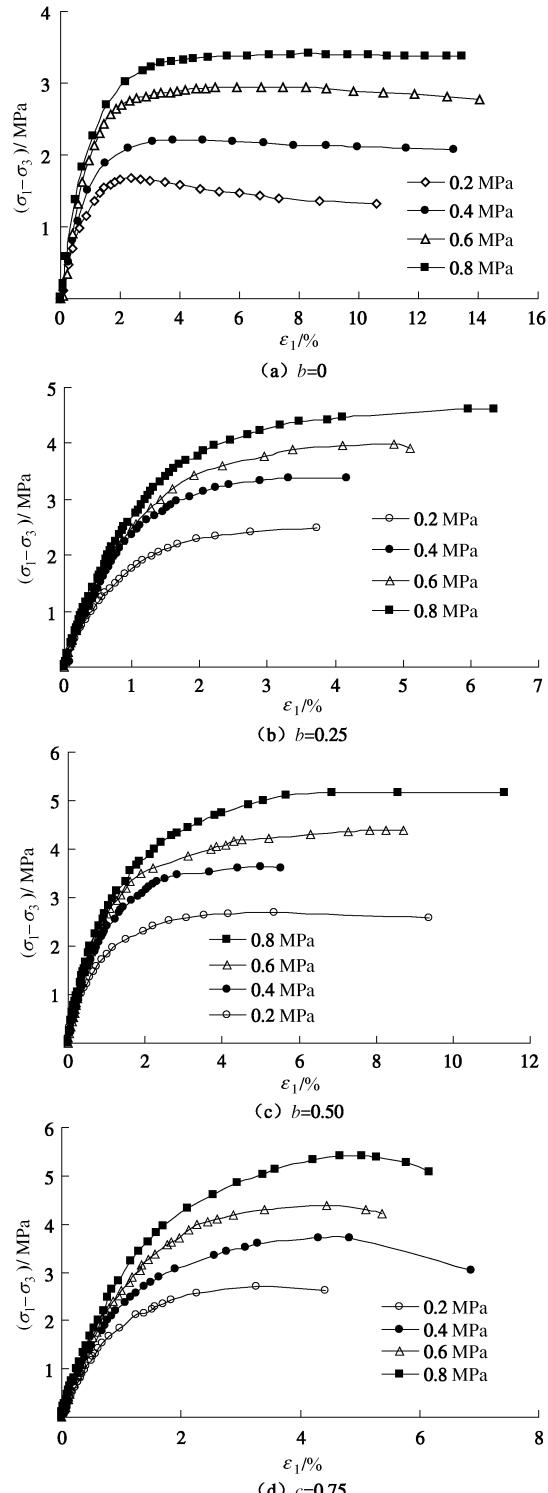


图 5 不同  $b$  值条件下  $\sigma_1 - \sigma_3$  与轴应变  $\varepsilon_1$  关系曲线

Fig. 5 Relationship between  $\sigma_1 - \sigma_3$  and  $\varepsilon_1$  under different  $b$  values

图6,7分别为平面应变条件下 $\sigma_1-\sigma_3$ 与轴应变 $\varepsilon_1$ 关系曲线和不同固结压力下 $b$ 值变化曲线。从图中可以看出,对于平面应变应力试验,其 $b$ 值从开始的0逐步增加到峰值应力附近的0.15~0.17;平面应变试验得到的堆石料强度比三轴试验高( $b=0$ ),这在不少关于平面应变试验的文献中均可以看到同样结论<sup>[3]</sup>,应该说这个结论具有普遍性,这种差别主要是由中主应力引起的。

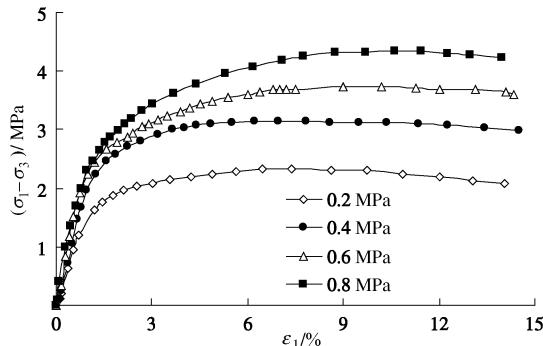


图6 平面应变 $\sigma_1-\sigma_3$ 与轴应变 $\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 6 Relationship between  $\sigma_1-\sigma_3$  and  $\varepsilon_1$  under plane strain

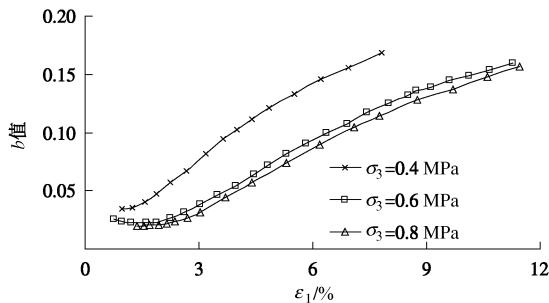


图7 平面应变试验不同围压下 $b$ 值与大主应变 $\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 7 Relationship between  $b$  value and  $\varepsilon_1$  under plane strain and different confining pressures

图8为相同固结压力、不同 $b$ 值条件下堆石料的应力应变曲线图。从图可以看出,由于有 $\sigma_2$ 的作用,试样在应变初期的线弹性特征较明显,强度与 $b=0$ 相比有明显提升,但同时可以看出,即便 $b$ 从0.25增至0.75,应变初期的 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$ 关系曲线却是接近重合的,表明中主应力 $\sigma_2$ 对粗粒料硬化特性的增强是有限的,且具有一个阀值。平面应变路径下的 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$ 关系曲线始终在 $b=0$ ,与 $b=0.25$ 之间,很好地体现出强度随 $b$ 值升高而增加的规律(如表1所示)。

表1 不同围压及 $b$ 值条件下粗粒料的内摩擦角

Table 1 Friction angles of coarse aggregates under different confining pressures and  $b$  values

围压/MPa	内摩擦角/(°)			
	$b=0$	$b=0.25$	$b=0.5$	$b=0.75$
0.2	53.66	59.48	60.51	61.60
0.4	47.15	53.95	55.02	55.97
0.6	45.23	48.42	51.76	53.05
0.8	42.76	48.03	49.78	51.47

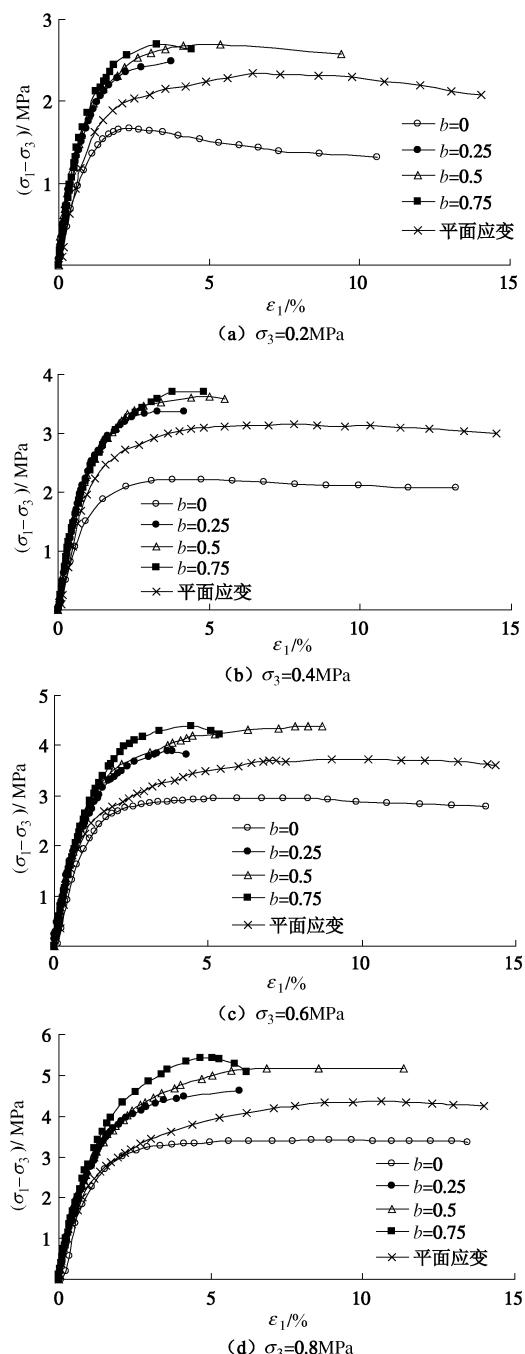


图8 不同固结压力条件下 $\sigma_1-\sigma_3$ 与 $\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 8 Relationship between  $\sigma_1-\sigma_3$  and  $\varepsilon_1$  under different consolidation pressures

## 2.2 应变过程曲线分析

图9为各种应力路径下堆石料的 $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 关系曲线。从图可以看出,不同 $b$ 值下,  $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 关系曲线变化规律相同,在试验应力范围内都出现了剪胀现象,围压越低,剪胀性越明显;低围压条件下,试样除初期的压密外,整体呈现剪胀性,在高围压条件下,试验过程中试样的剪缩性占主导,整体则表现为全程剪缩特性。从图8还可以看出,  $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 关系曲线随 $b=0$ 增加到 $b=0.75$ ,堆石料的整体剪胀特性不断被压制,剪缩特性逐步显现。随着 $b$ 的增大,试验全过程表现

为剪胀所对应的围压越来越低；对于平面应变试验，由于加载过程中  $b$  值持续的增长，使其体变曲线较  $b=0$  时明显放缓，当固结压力达到 0.6 MPa，体变曲线全过程均表现出剪缩特性。

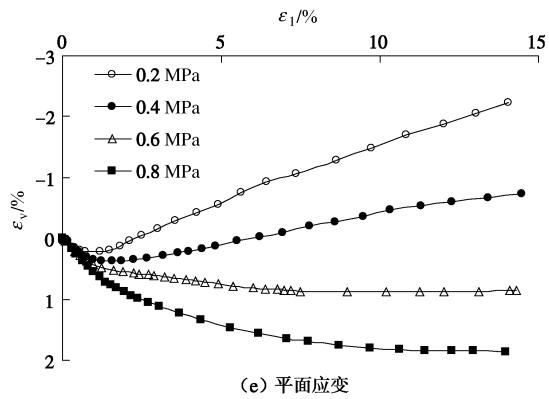
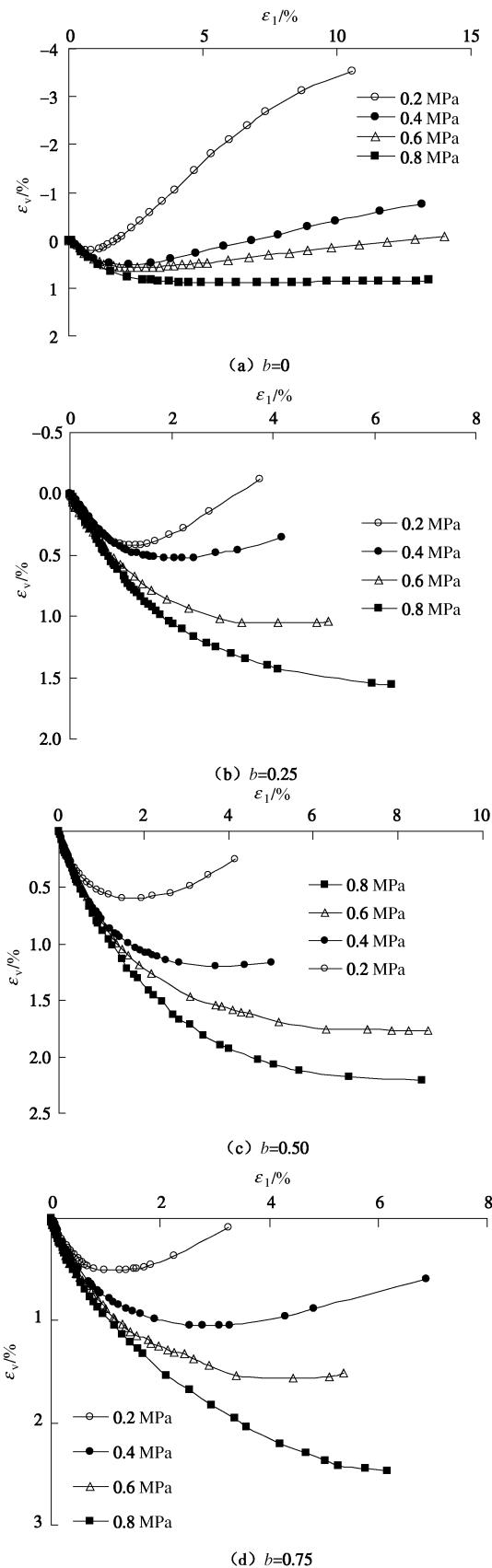
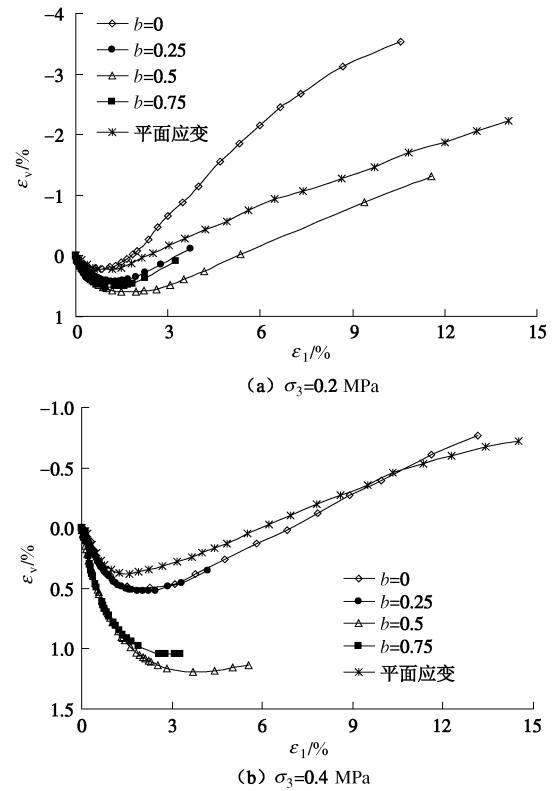


图 9 不同应力条件下粗粒料  $\varepsilon_v$  -  $\varepsilon_l$  关系曲线

Fig. 9 Relationship between  $\varepsilon_v$  and  $\varepsilon_l$  under different stress paths

从图 10 可以看出，在同一固结压力水平下，随着  $b$  值的提高，试样整体剪胀特趋势减弱、剪缩特性不断增强； $\varepsilon_v$  -  $\varepsilon_l$  关系曲线变化规律相同，在低围压条件下，不同  $b$  值下的试样整体在加载过程中表现为先剪缩后剪胀的特性，而在高围压下，试样整体在加载过程中表现剪缩的特性。随着  $b$  的增大，体变全过程曲线表现出剪胀特征对应的围压越来越低。

图 11 为不同应力条件下粗粒料  $\varepsilon_3$  -  $\varepsilon_l$  关系曲线。从图可以看出，小主应变都为负，表明在不同  $b$  值下，试样的小主应力面都是膨胀的； $\varepsilon_3$  -  $\varepsilon_l$  关系曲线的斜率绝对值随着  $b$  的增大而增大，即曲线斜率绝对值与  $b$  值呈正相关关系。在相同  $\varepsilon_l$  情况下， $b$  越大  $\varepsilon_3$  绝对值也越大。可见  $b$  值大小对小主应力方向的膨胀量影响较大， $b$  值越大在小主应力方向上越容易膨胀；在本次试验过程中  $\varepsilon_3$  -  $\varepsilon_l$  关系曲线的斜率基本上为一定值。



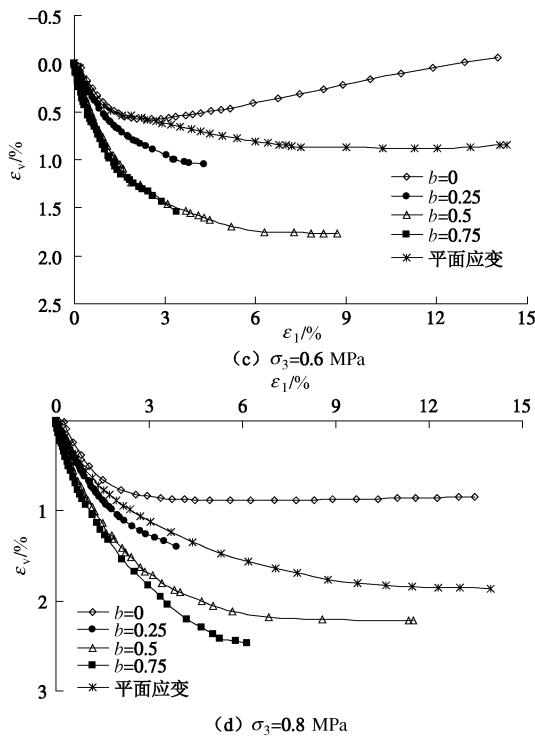


图 10 相同围压、不同  $b$  值条件下的  $\varepsilon_v$  -  $\varepsilon_1$  关系曲线  
Fig. 10 Relationship between  $\varepsilon_v$  and  $\varepsilon_1$  under different  $b$  values and same confining pressure

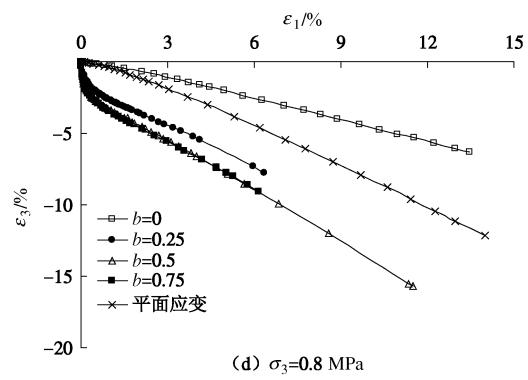
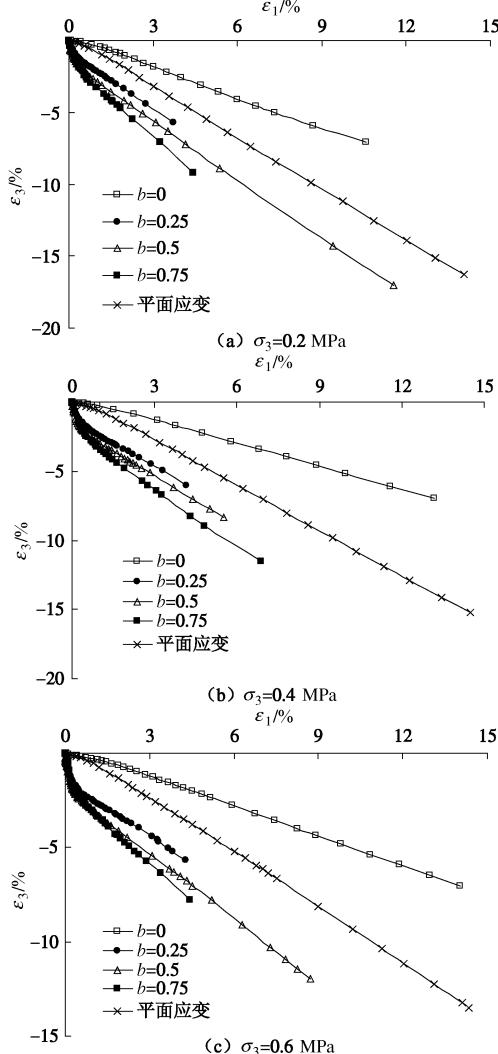


图 11 相同围压、不同  $b$  值条件下的  $\varepsilon_3$  -  $\varepsilon_1$  关系曲线

Fig. 11 Relationship between  $\varepsilon_3$  and  $\varepsilon_1$  under different  $b$  values and same confining pressure

图 12 为  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  -  $\varepsilon_1$  以及  $\varepsilon_v$  -  $\varepsilon_1$  关系曲线。从图 12 可以看出, 试样整体表现由剪缩性向剪胀性过渡也正好是应变软化段, 并且体变达到最大值, 随后出现峰值。

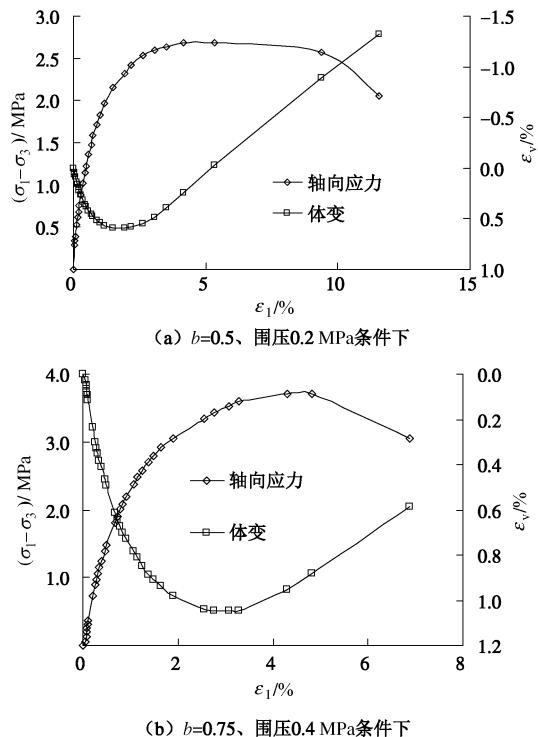


图 12  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  -  $\varepsilon_1$  以及  $\varepsilon_v$  -  $\varepsilon_1$  关系曲线对比

Fig. 12 Comparison of  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  -  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_v$  -  $\varepsilon_1$  curves

## 4 结 论

通过对粗粒土的大型真三轴试验成果分析, 可得出排水条件下不同中主应力比和平面应变路径下粗粒土的应力 - 应变关系特征如下:

(1) 中主应力比  $b$  一定时, 应力 - 应变关系曲线的斜率和峰值强度随着固结压力的增大而增加; 固结压力一定时, 随着  $b$  值的增大, 应变软化现象愈加明显。

(2) 中主应力比  $b$  一定时, 在低围压条件下, 体变关系曲线在加载过程中表现为先剪缩后剪胀的特性, 而在高围压下, 整个加载过程中表现剪缩的特性; 固结压力一定时, 随着  $b$  的增大, 体变全过程曲线表现出剪胀特征对应的固结压力越来越低。

(3) 试验过程中小主应力面都是膨胀的,  $b$  值大小对小主应力方向的膨胀量影响较大,  $b$  值越大在小主应力方向上越容易膨胀。固结压力一定时, 小主应变-大主应变关系曲线的斜率绝对值随着  $b$  的增大而增大, 曲线斜率绝对值与  $b$  值呈正相关关系。

## 参考文献:

- [1] 程展林, 丁红顺, 吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1151 - 1158. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, WU Liang-ping. Experimental study on mechanical behaviour of granular material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1151 - 1158. (in Chinese))
- [2] 程展林, 姜景山, 丁红顺, 等. 粗粒土非线性剪胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 331 - 337. (CHENG Zhan-lin, JIANG Jing-shan, DING Hong-shun, et al. Nonlinear Dilatant Model for Coarse-Grained Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 331 - 337. (in Chinese))
- [3] 程展林, 陈 鸥, 左永振, 等. 再论粗粒土剪胀性模型[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(6): 39 - 45. (CHENG Zhan-lin, CHEN Ou, ZUO Yong-zhen, et al. Further discussion on dilatancy model for coarse-grained soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(6): 39 - 45. (in Chinese))
- [4] 陈晓斌. 红砂岩粗粒土剪胀效应大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3145 - 3149. (CHEN Xiao-bin. Study of dilatancy effect of redstone coarse grained soil by large scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3145 - 3149. (in Chinese))
- [5] 姜景山, 刘汉龙, 程展林, 等. 密度和围压对粗粒土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8): 46 - 50. (JIANG Jing-shan, LIU Han-long, CHENG Zhan-lin, et al. Influences of density and confining pressure on mechanical properties for coarse-grained soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(8): 46 - 50. (in Chinese))
- [6] 殷宗泽. 土的侧膨胀性及其对土石坝应力变形的影响[J]. 水力学报, 2000, 31(7): 49 - 54. (YIN Zong-ze. The effect of soil lateral dilation behavior on stress and strain of earth and rockfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(7): 49 - 54. (in Chinese))
- [7] 殷宗泽, 张坤勇, 朱俊高. 面板堆石坝应力变形计算中考虑土的各向异性[J]. 水力学报, 2004, 35(11): 22 - 26. (YIN Zong-ze, ZHANG Kun-yong, ZHU Jun-gao. Computation for stress and deformation of concrete slab in rockfill dam in consideration of soil anisotropy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 22 - 26. (in Chinese))
- [8] ANHDAN, L, KOSEKI J, SATO T. Evaluation of quasi-elastic properties of gravel using a large-scale true triaxial apparatus[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(5): 374 - 384.
- [9] SUITS LD, SHEAHAN T C, CHOI C, et al. Development of a true triaxial apparatus for sands and gravels[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, 31(1): 32 - 44.
- [10] 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))
- [11] 施维成, 朱俊高, 刘汉龙. 中主应力对砾石料变形和强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1449 - 1453. (SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, LIU Han-long. Influence of intermediate principal stress on deformation and strength of gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1449 - 1453. (in Chinese))
- [12] SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, CHIU Chung-fai, et al. Strength and deformation behaviour of coarse-grained soil by true triaxial tests[J]. Journal of Central South University, 2010, 17: 1095 - 1102.