DOI：10.16285/j.rsm.2017.0234

三维应力状态下粗粒料强度特性试验研究

姜景山[1, 2]，程展林[2]，左永振[2]，丁红顺[2]

（1. 南京工程学院 建筑工程学院，江苏 南京 211167；2. 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）

摘 要：粗粒料所处的应力状态具有随时间和空间而变的特点，往往处于较复杂的三维应力状态下。通过粗粒料大型真三轴各向等压固结等比例加载试验，研究了不同中主应力系数条件下粗粒料的强度特性。试验结果表明：中主应力对粗粒料的强度有重要影响，三维应力状态下，粗粒料的强度比常规三轴应力状态下有较大提高，大小主应力之差与大主应变关系曲线也更加陡峭；中主应力系数 b 从 0 增大到 0.25 时，破坏时大小主应力之差增加了 39%～50%；摩尔–库仑强度参数咬合力 c 和内摩擦角 φ 均随着中主应力系数 b 的增大而增大，其中咬合力 c 的增长较为显著，特别是 b 从 0 增大到 0.25 时；相同小主应力条件下，b = 0 时，破坏偏应力与球应力之比最小，b = 0.25 时，破坏应力比达到最大值，随着 b 的增大破坏应力比又有所减小；相同中主应力系数条件下，随着小主应力的增大，破坏应力比逐渐减小。

关 键 词：粗粒料；三维应力状态；大型真三轴试验；中主应力；强度特性；破坏应力比；应力–应变关系

中图分类号：TU 411 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 10－3581－08

Experimental investigation on strength characteristic of coarse-grained materials in three-dimensional stress state

JIANG Jing-shan[1, 2], CHENG Zhan-lin[2], ZUO Yong-zhen[2], DING Hong-shun[2]

（1. School of Architectural Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China）

Abstract: The coarse-grained materials are normally in three-dimensional (3D) stress state which changes with time and location. To investigate the strength characteristic of coarse-grained materials at different coefficients of intermediate principal stress, large-scale true triaxial tests were performed under isotropic consolidation and proportional loading conditions. The results show that the intermediate principal stress has an important effect on the strength of coarse-grained materials. The strength of coarse-grained materials in 3D stress state increases greatly compared to the strength in conventional triaxial stress state. The relationship of the major principal strain and the difference between the maximum and the minimum principal stresses in 3D stress state is steeper than that in conventional triaxial stress state. The difference between the maximum and the minimum principal stresses increases from 39% to 50% when the coefficient of intermediate principal stress increases from 0 to 0.25. Both the interlocking force c and internal friction angle φ increase with the increase of the coefficient of intermediate principal stress b. Especially, the interlocking force c increases significantly when b increases from 0 to 0.25. With the same minimum principal stress, the ratio of deviatoric stress to spheric stress at the failure state is the smallest with b=0, whereas the failure stress ratio reaches the maximum with b=0.25. However, the failure stress ratio decreases with the increase of b from 0.25 to 0.75. The stress ratio at failure state decreases with the increase of the minimum principal stress at the same coefficient of intermediate principal stress.

Keywords: coarse-grained materials; three-dimensional stress state; large-scale true triaxial test; intermediate principal stress; strength behaviour; stress ratio at failure state; stress-strain relationship

1 引 言

土体的应力状态具有随时间和空间而变的特点，常处于相对复杂的三维应力状态下，如从施工期到运营期土体的应力状态是变化的，同时，填筑于不同部位的土体应力状态也不相同。应力状态不

收稿日期：2017-05-14
基金项目：长江科学院开放研究基金资助项目(No. CKWV2017510/KY)；国家自然科学基金面上项目(No. 51679072, No. 51379021, No. 51778282)；南京工程学院校级科研基金项目资助(No. CKJB201706)。
This work was supported by the CRSRI Open Research Program (CKWV2017510/KY), the General Program of National Natural Science Foundation of China (51679072, 51379021, 51778282) and the Scientific Research Foundation of Nanjing Institute of Technology (CKJB201706).
第一作者简介：姜景山，男，1978 年生，博士，副教授，主要从事粗粒土力学性质、地基和路基处理等方面的研究工作。E-mail: j.s.jiang@163.com

同，土体的强度也随之变化。目前进行土体强度特性研究室内主要采用直剪试验和三轴试验等确定，难以反映土体在实际三维应力状态下的强度特性。

真三轴试验能模拟三维应力状态下土体的力学响应，是一种较真实反映实际土体力学特性的试验手段。自 1936 年 Kjellman[1]首次发明真三轴仪以来，国内外已经研制了多种类型的真三轴仪，真三轴试验也逐渐得到推广和应用。根据压力室 3 个主应力方向加载方式的不同真三轴仪可分为全部刚性加载、全部柔性加载和刚柔复合加载 3 种类型。应用上述真三轴仪学者们已经对黏土[2−3]、非饱和土[4−6]、黄土[7−8]、砂土[9−12]等进行了三维应力状态下力学特性试验研究，研究成果均表明，真三轴应力状态下土体的力学特性与常规三轴应力状态下有较大差异。

砂土真三轴研究方面，徐志伟[9]开展了粉砂、细砂和中砂侧向变形特性的真三轴试验（试样尺寸为 7 cm×7 cm×3.5 cm），结果表明，小主应力方向始终产生膨胀变形，由于中主应力的作用，切线泊松比可能大于 0.5 甚至 1；保持中主应力不变，只增加大主应力的情况下，中主应力方向既可产生压缩也可产生膨胀，切线泊松比有小于 0 的可能。

Lade 等[10]对美国圣塔莫妮卡海滩砂进行了相对密实度分别为 90%、74%和 50%及高径比分别为 2.47 和 1.0 的真三轴试验，结果表明，所有低试样的摩擦角均比高试样的摩擦角高 1°～2°，高试样剪切带发生时大小主应力之比与大主应变关系曲线会产生明显的峰值顶点，而低试样剪切带发生时顶点附近的应力−应变曲线则平缓很多，建议试验时应采用高试样以保证剪切带得到自由形成和发展。

扈萍等[11]为研究中主应力对粉细砂强度特性的影响，采用柔性真三轴仪对上海粉细砂进行了不同中主应力系数的各向等压固结排水剪切和不排水剪切真三轴等比例加载试验（试样尺寸为 12 cm×7 cm×7 cm），结果表明，当初始密度和小主应力相同时，砂土的强度基本随着中主应力系数的增大而增大，仅在中主应力接近大主应力时强度才略有减小。

张敏等[12]对长方体福建标准砂试样（尺寸为 7.5 cm×7.5 cm×15 cm）开展了真三轴排水剪切试验，探讨了应力路径和中主应力系数对标准砂力学特性的影响，结果表明，随着中主应力系数的增大标准砂的剪胀性增强，抗剪强度 q 和广义剪应力比 q/p 减小，而强度指标 φ 则增大；应力路径对标准砂的应力−应变关系影响较大，而对应力比−应变关系及强度指标 φ 的影响相对较小。

对于粒径更大的粗粒料，施维成等[13]对双江口心墙堆石坝坝料进行了真三轴单向加载试验，试样尺寸为 12 cm×6 cm×12 cm，最大粒径为 10 mm，大、中、小主应力方向初始应力分别为 800、500、200 kPa。结果表明，在 3 个主应力方向单向加载时，加载方向上均产生压缩变形；在大主应力或中主应力方向单向加载时，小主应力方向均产生膨胀变形，而另一主应力方向变形较小；在小主应力方向单向加载时，另外两个主应力方向基本没有变形。

潘家军等[14]应用长江水利委员会长江科学院研发的大型真三轴仪（试样尺寸为 30 cm×30 cm×60 cm）对粗粒土开展了不同中主应力系数的真三轴试验和平面应变试验，结果表明中主应力对粗粒土的力学特性有显著影响。固结应力一定时，随着中主应力系数 b 的增大，应力在峰值后的软化现象愈加明显，剪胀特性逐渐减弱、剪缩特性不断增强，小主应变−大主应变曲线斜率逐渐增大。

综上所述，三维应力条件下土体的力学特性试验主要针对黏土、黄土、砂土等，对粗粒料进行研究目前开展的还相对较少，已有的研究也存在以下不足：目前已有的真三轴仪尺寸相对较小，单边最大长度一般小于 12 cm，属于中小真三轴仪，能模拟土体的颗粒粒径也较小，由于粗粒料粒径相对较大，存在较明显的尺寸效应，已经开展的这些中小尺寸的真三轴仪难以真实反映粒径较大的粗粒料的力学特性。因此，开展三维应力状态下粗粒料的强度特性研究对土石坝应力变形分析有着重要的理论意义，也是工程中急需解决的关键问题之一。

2 试验方案

2.1 试验仪器

试验采用的真三轴仪是由长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室自主研发的大型真三轴试验系统，大型真三轴仪的长方体试样尺寸为 30 cm（边长）×30 cm（边长）×60 cm（高度），最大小主应力为 3.0 MPa，应力加载方式为刚柔复合加载，小主应力 σ_3 通过压力室内液体压力施加，中主应力 σ_2 由滚轴和滑块组成的侧向无摩阻加载板施加，大主应力 σ_1 由刚性竖向加载板施加，大型真三轴试验的原理示意图如图 1 所示。真三轴试验相对于常规三轴试验相对复杂的主要原因在于 3 个主应力方向独立加载控制的难度较大，如采用全部刚性加载的方式存在随变形的发展相邻刚性加载板的相互干扰及刚性加载板与试样密封乳胶橡皮膜摩阻力较大的问题，而全部柔性加载的方式随加载的进行存在柔

性加载应力范围和大小变化的问题。本研究采用的长江科学院大型真三轴仪，采用刚柔复合加载的方式，同时对侧向加载板设计为由滚轴和滑块组成的侧向无摩阻加载板，类似于半刚性的加载板，配合成熟的加载设备，较好地解决了 3 个主应力加载的问题，取得了较为可靠的试验成果。

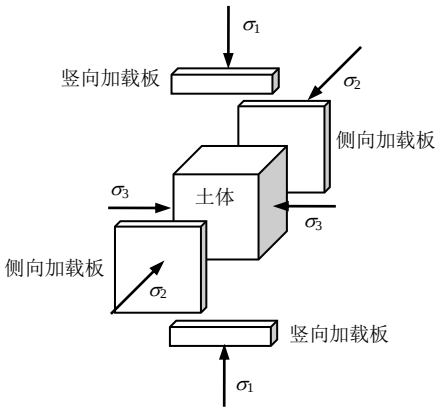


图 1　大型真三轴试验原理示意图
Fig.1　Schematic of large-scale true triaxial apparatus

2.2　试验材料

试验原材料为某面板堆石坝筑坝料，坝料是由爆破开采所得，颗粒为棱角状，母岩为纯砂岩，强度高。大型真三轴试验材料的相对密度 G_s =2.64，初始孔隙比 e_0 =0.282，相对密实度 D_r =0.90，初始干密度为 ρ_d =2.06 g/cm^3，颗粒最大粒径为 60 mm，大型真三轴试验的颗粒级配曲线如图 2 所示。

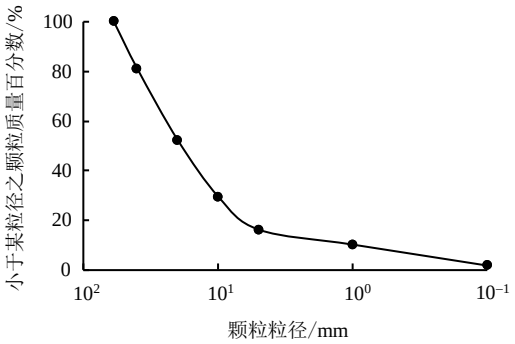


图 2　试验级配曲线
Fig.2　Particle size distribution curve

2.3　试验方案

根据试验级配和初始干密度备好 4 等份土样，每一等份土样均匀混合，然后分 4 层装料击实，试样的尺寸为 30 cm×30 cm×60 cm，利用真空泵从试样顶部抽气，使试样处于负压状态，以便拆除模版后试样能保持直立。大型真三轴压力室安装完成后对试样进行充水饱和后，利用大型真三轴仪对试样进行各向等压固结，然后保持小主应力 σ_3 不变等比例（中主应力系数 $b=\Delta\sigma_2/\Delta\sigma_1=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$）施加大主应力增量 $\Delta\sigma_1$ 和中主应力增量 $\Delta\sigma_2$，直到试样剪切破坏，等比例加载应力路径如图 3 所示。根据实际土石坝工程所处的应力状态，共开展了中主应力系数 b 分别为 0、0.25、0.5 和 0.75 的大型真三轴试验，每种中主应力系数 b 下分别开展小主应力 σ_3 为 0.2、0.4、0.6、0.8 MPa 的试验。b=0 的常规三轴应力状态试验也是在大型真三轴仪上对方柱体试样开展的，以便研究中主应力对粗粒料强度特性的影响。由于 b=0.75、σ_3=0.8 MPa 的试验在接近破坏状态时没有获得较为有效的数据，因此，本文强度特性研究中没有将此点数据列入进行分析。

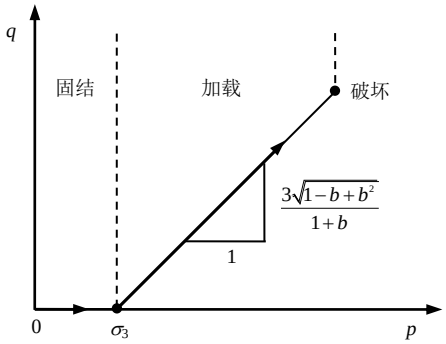


图 3　大型真三轴等比例加载应力路径
Fig.3　Proportional loading stress path of large-scale true triaxial test

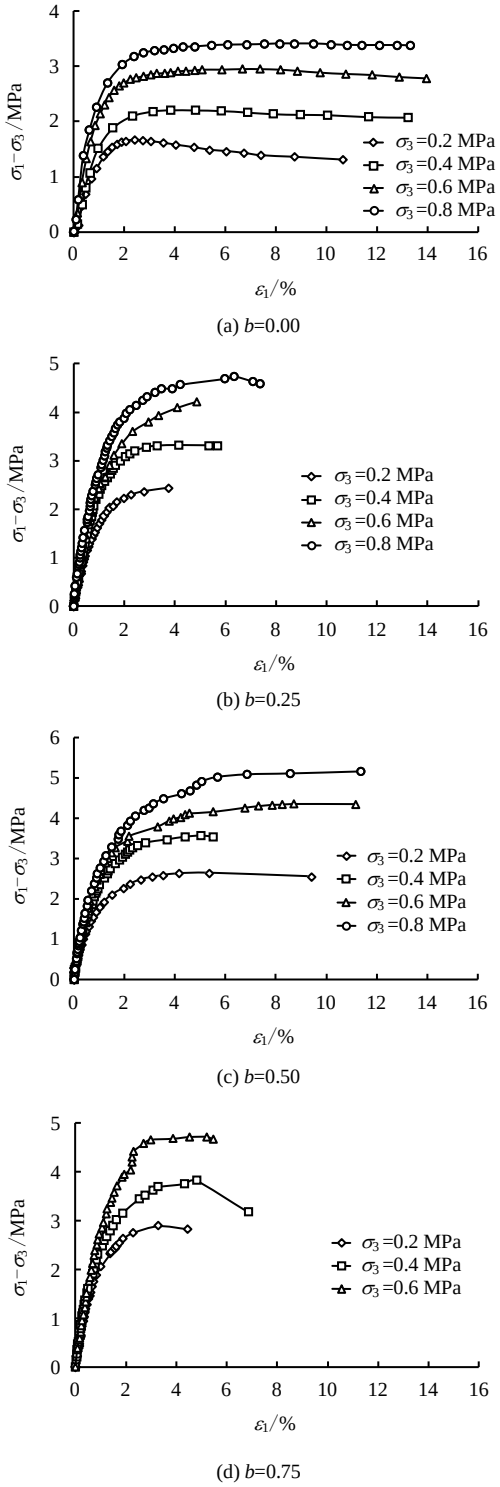
3　大型真三轴试验成果分析

3.1　应力−应变关系

图 4 为不同中主应力系数 b 的大小主应力之差 $\sigma_1-\sigma_3$ 与大主应变 ε_1 关系曲线。常规三轴应力状态下（b=0），如图 4(a)所示，小主应力 σ_3 较小时，应力−应变曲线有较明显的软化现象，随着小主应力 σ_3 的增大软化现象逐渐减弱，应力−应变曲线变得愈来愈陡。三维应力状态下，如图 4(b)～4(d)所示，应力−应变曲线的峰值或最大值均比常规三轴应力状态下（见图 4(a)）要大一些，说明中主应力 σ_2 对粗粒料的强度有较明显的影响，随着中主应力 σ_2 的增大，土体在中主应力方向所受的约束作用增强能抵抗更大的应力变形，表现出更大的强度。

由于大型真三轴试验采用等比例加载试验，中小主应力之差 $\sigma_2-\sigma_3$ 与大主应变 ε_1 关系曲线和大小主应力之差 $\sigma_1-\sigma_3$ 与大主应变 ε_1 关系曲线在形态上一致，只是数值上是相同条件下大小主应力之

差 $\sigma_1-\sigma_3$ 的 b 倍，为节省篇幅，此处省略中小主应力之差 $\sigma_2-\sigma_3$ 与大主应变 ε_1 关系曲线。



(a) b=0.00

(b) b=0.25

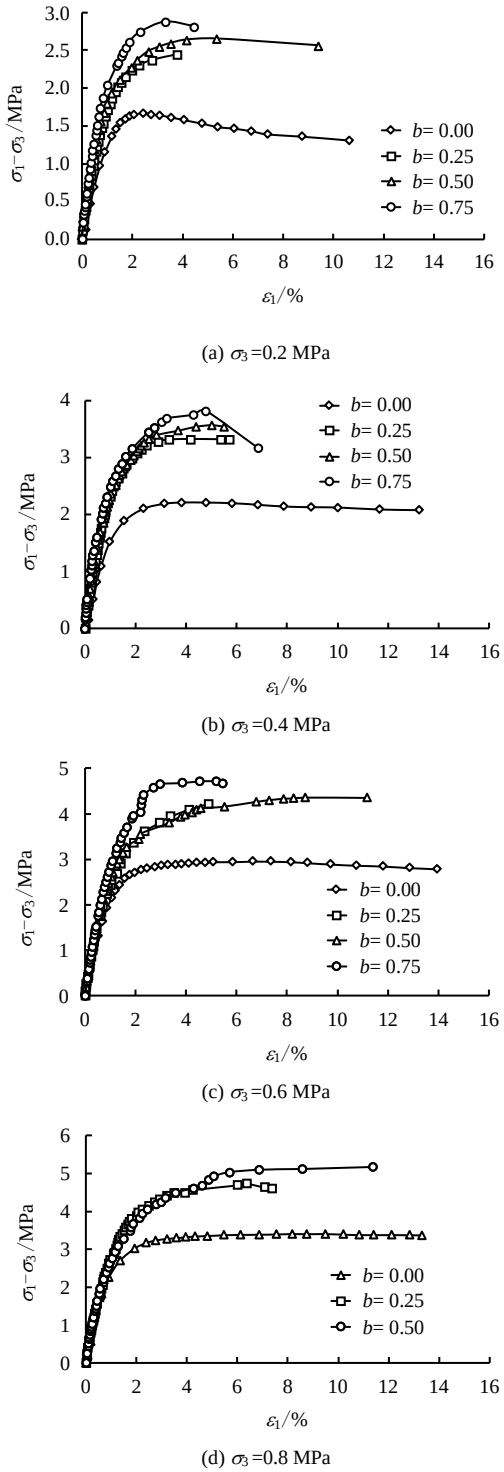
(c) b=0.50

(d) b=0.75

图 4 不同中主应力系数的应力−应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves under different coefficients of intermediate principal stress

图 5 为不同小主应力 σ_3 的大小主应力之差 $\sigma_1-\sigma_3$ 与大主应变 ε_1 的关系曲线。从图中可以看出，三维应力条件（b>0）的要明显高于和陡于常规三轴应力状态（b=0）下的应力−应变曲线。三维应力状态（b>0）下，不同中主应力系数 b 的应力−应变关系曲线在大主应变 ε_1 < 2%时均比较接近；大主应变在 2%以后，应力−应变关系曲线才有较明显的差异，大主应变 ε_1 在 4%～6%左右时，大小主应力之差 $\sigma_1-\sigma_3$ 达到最大值。



(a) σ_3 =0.2 MPa

(b) σ_3 =0.4 MPa

(c) σ_3 =0.6 MPa

(d) σ_3 =0.8 MPa

图 5 不同小主应力的应力−应变关系曲线

Fig.5 Stress-strain relationships under different minimum principal stresses

3.2　强度大小分析

以大小主应力之差的最大值$(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$作为粗粒料强度取值标准，则不同中主应力系数 b、不同小主应力σ_3的粗粒料大型真三轴试验破坏时的主应力大小如表 1 所示。

表 1　大型真三轴试验破坏时的主应力
Table 1　Failure principal stresses of large-scale true triaxial tests

序号	中主应力系数 b	大主应力 σ_1/MPa	中主应力 σ_2/MPa	小主应力 σ_3/MPa
1	0.00	1.87	0.20	0.2
2	0.00	2.61	0.40	0.4
3	0.00	3.55	0.60	0.6
4	0.00	4.21	0.80	0.8
5	0.25	2.64	0.81	0.2
6	0.25	3.72	1.23	0.4
7	0.25	4.82	1.66	0.6
8	0.25	5.54	1.98	0.8
9	0.50	2.85	1.53	0.2
10	0.50	3.97	2.19	0.4
11	0.50	4.96	2.78	0.6
12	0.50	5.96	3.38	0.8
13	0.75	3.08	2.36	0.2
14	0.75	4.22	3.26	0.4
15	0.75	5.31	4.13	0.6

图 6 为强度$(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$与中主应力系数 b 的关系。可以看出，随着中主应力系数 b 的增大，强度$(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$也是逐渐增大的，中主应力系数 b 从 0 增加到 0.25 时，强度$(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$增加的幅度较大，而中主应力系数 b 从 0.25 增大到 0.75 时基本呈线性增加，增幅相对较小一些，说明中主应力 σ_2 对粗粒料的强度有明显作用，影响最显著的范围是中主应力系数 b 在 0 到 0.25 之间。随着小主应力 σ_3 的增大，强度$(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$也逐渐增大。

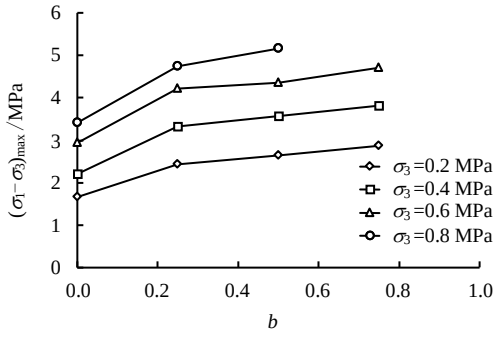


图 6　强度与中主应力系数关系曲线
Fig.6　Relationships between strength and coefficient of intermediate principle stress

图 7 为不同中主应力系数条件下破坏应力$(\sigma_1-\sigma_3)_f$相对于常规三轴应力状态下破坏应力$(\sigma_1-\sigma_3)_{f,b=0}$的增加的百分比。从图中可以看出，中主应力系数 b 从 0 增加到 0.25 时，破坏应力增加百分比较大，为 39%～50%，增加了近一半。说明三维普遍应力状态下，只要中主应力系数 b 稍大于 0，破坏应力$(\sigma_1-\sigma_3)_f$相比常规三轴应力状态就会有较大幅度的增长，常规三轴试验的结果不能反映实际三维应力状态下粗粒料强度发挥的潜能。随着 b 从 0.25 增加到 0.75，不同小主应力σ_3的破坏应力$(\sigma_1-\sigma_3)_f$基本呈线性增加，增长了 17%～26%，增幅明显减小。

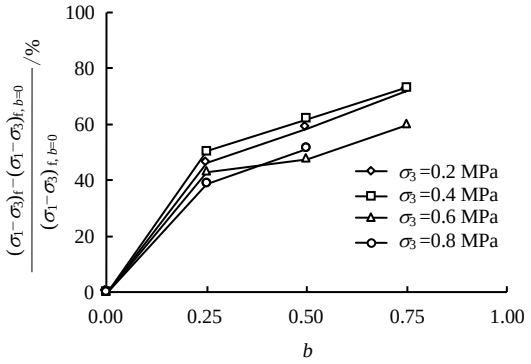


图 7　破坏应力增加百分比与中主应力系数的关系
Fig.7　Relationships between the increased percentage of failure stress and coefficient of intermediate principle stress

3.3　强度参数研究

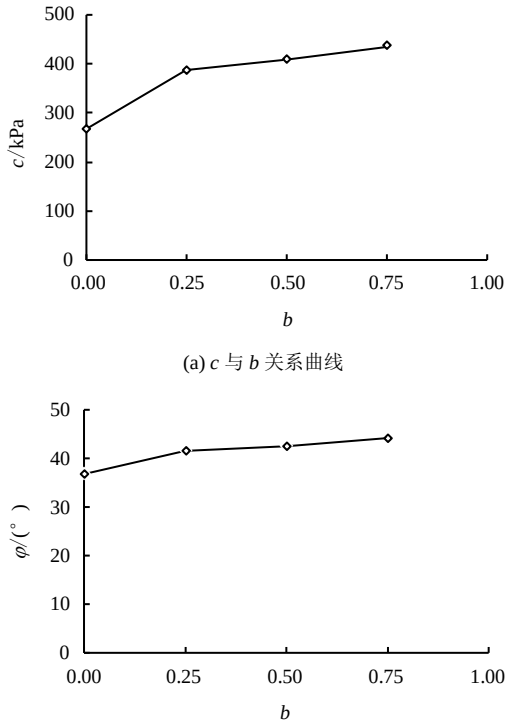
为简化分析和便于对比研究，按常规三轴试验整理摩尔−库仑强度破坏包线的方法整理三维应力状态下的强度参数，强度参数与中主应力系数的关系如图 8 所示。从图中可以看出，当 b 从 0 增大到 0.25 时，强度参数 c 和 φ 均有较大幅度的增大；当 b 从 0.25 增大到 0.75 时，c 和 φ 基本呈线性增加，但增幅明显减小。从图中还可以看出，c 的增幅要比内摩擦角 φ 的增幅大很多，说明随着中主应力 σ_2 的增大，中主应力方向侧向约束的增强会显著提高粗粒料颗粒间的嵌固啮合作用，表现出咬合力 c 较为明显的增大。需要说明的是由于粗粒料为无黏性土，按摩尔−库仑理论整理得到的 c 为咬合力，主要体现在颗粒间的嵌固啮合作用上，与黏聚力无关[15]。

对于粗粒料，颗粒间的黏结作用较弱可以忽略不计，因此，在研究粗粒料强度参数时，常假定 c=0，则内摩擦角计算式为

$$\varphi_{c=0}=\arcsin\left[(\sigma_1-\sigma_3)_f/(\sigma_1+\sigma_3)_f\right] \quad (1)$$

式中：$(\sigma_1-\sigma_3)_f$和$(\sigma_1+\sigma_3)_f$分别为破坏状态时大小

主应力之差和大小主应力之和。



(a) c 与 b 关系曲线

(b) φ 与 b 关系曲线

图 8 强度参数与中主应力系数的关系

Fig.8 Relationships between strength parameters and coefficient of intermediate principal stress

图 9 为内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 与中主应力系数 b 的关系曲线。从图中可以看出，内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 随着中主应力系数的增大而增大，特别是 b 在 0～0.25 之间增幅较为明显。同时，还可看出，随着小主应力 σ_3 的增大，内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 是逐渐减小的。

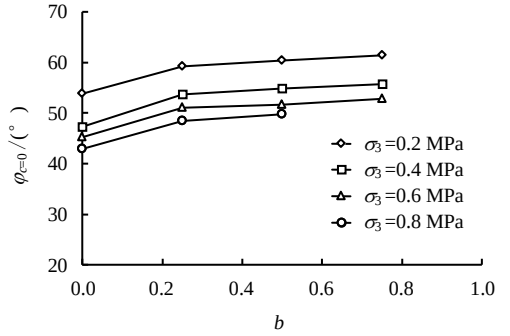


图 9 内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 与中主应力系数的关系

Fig.9 Relationships between internal friction angle $\varphi_{c=0}$ and coefficient of intermediate principal stress

图 10 为内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$的关系曲线，p_a 为大气压力。从图中可以看出，中主应力系数 b 相等时，内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$之间呈较好的线性关系，可表示为

$$\varphi_{c=0} = \varphi_0 - \varphi_k \lg(\sigma_3 / p_a) \tag{2}$$

式中：φ_0、φ_k 均为由试验确定的参数。

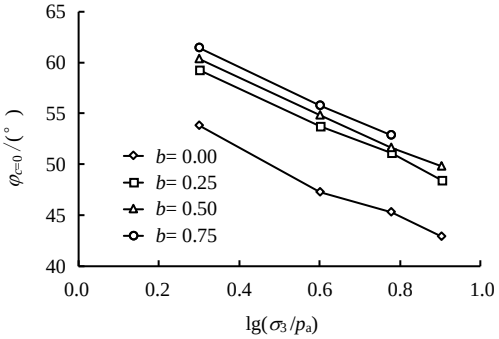


图 10 内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$的关系

Fig.10 Relationships between internal friction angle $\varphi_{c=0}$ and $\lg(\sigma_3/p_a)$

表 2 为由大型真三轴试验确定的内摩擦角参数 φ_0、φ_k。可以看出，随着中主应力系数 b 从 0 增大到 0.75，参数 φ_0 逐渐从 58.8°增大到 66.8°，增幅较小较为均匀；随着中主应力系数 b 的增大，参数 φ_k 保持在 17.7°～18.0°之间变化，基本为一常数，平均值为 17.8°。

表 2 内摩擦角试验参数

Table 2 Testing parameters of internal friction angle

序号	中主应力系数 b	φ_0/(°)	φ_k/(°)	备注
1	0.00	58.8	17.8	常规三轴
2	0.25	64.6	17.7	
3	0.50	65.6	17.7	
4	0.75	66.8	18.0	

3.4 破坏应力比

图 11 为破坏应力比 M_f（$M_f=q_f/p_f$）与中主应力系数 b 的关系，q_f 和 p_f 分别为破坏时的偏应力和球应力。可以看出，常规三轴应力状态时（b=0），不同小主应力 σ_3 条件下的破坏应力比 M_f 相对较小，随着中主应力系数 b 增大到 0.25，破坏应力比 M_f 增大到最大值，然后随着中主应力系数 b 从 0.25 增大到 0.75，破坏应力比 M_f 有所减小但数值上仍比常规三轴应力状态稍大。

图 12 为破坏应力比 M_f 与小主应力 σ_3 的关系。可以看出，随着小主应力 σ_3 的增大，不同中主应力系数 b 的破坏应力比 M_f 都逐渐减小。同时，常规三轴应力条件（b=0）下的破坏应力比 M_f 数值上最小，而对于其他中主应力系数 b>0 的破坏应力比 M_f 则

随着中主应力系数 b 的增大逐渐减小。

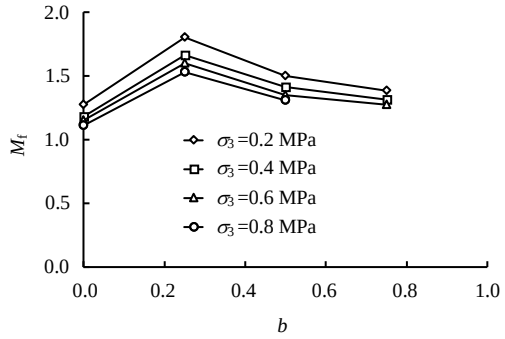


图 11　破坏应力比与中主应力系数的关系

Fig.11　Relationships between failure stress ratio and coefficient of intermediate principal stress

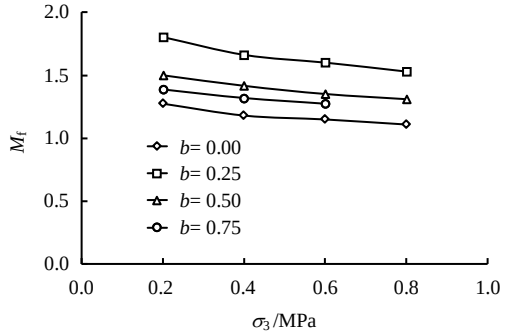


图 12　破坏应力比与小主应力的关系

Fig.12　Relationships between failure stress ratio and minimum principal stress

4　结　论

通过粗粒料大型真三轴各向等压固结等中主应力系数加载试验，对三维应力状态下粗粒料的强度特性进行了研究，结果表明：

（1）三维应力条件下（b>0）粗粒料的强度比轴对称条件下（b=0）有明显增大，特别是当 b 从 0 增加到 0.25 时，强度增长了近一半；随着中主应力系数 b 的增大，大小主应力之差 $\sigma_1-\sigma_3$ 与大主应变 ε_1 关系曲线也变得更为陡峭；相同中主应力系数 b 条件下，小主应力 σ_3 越大粗粒料的强度也越大。

（2）不同中主应力系数 b 的摩尔–库仑强度参数咬合力 c 和内摩擦角 φ 均随着中主应力系数 b 的增大而增大，其中咬合力 c 增幅远大于内摩擦角 φ 的增幅，特别当 b 从 0 增大到 0.25 时增幅较为明显。

（3）忽略粗粒料的黏聚力，假定 c=0 时，内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 随着中主应力系数 b 的增大而增大，特别是 b 在 0～0.25 之间增幅较为明显。中主应力系数 b 相同时，随着小主应力 σ_3 的增大，内摩擦角 $\varphi_{c=0}$ 是逐渐减小的，并与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 呈较好的线性关系。

（4）小主应力 σ_3 相同时，常规三轴应力状态（b=0）的破坏应力比 M_f（偏应力 q_f 与球应力 p_f 之比）最小，b 从 0 增大到 0.25 时，破坏应力比 M_f 达到峰值，b 从 0.25 增大到 0.75 时，破坏应力比 M_f 逐渐减小，但仍比常规三轴应力状态下要大。中主应力系数 b 相同时，破坏应力比 M_f 随着小主应力 σ_3 的增大而逐渐减小。

参 考 文 献

[1] KJELLMAN W. Report on an apparatus for consumate investigation of the mechanical properties of soils[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1936.

[2] MANDEVILLE D. True triaxial testing system for clay with proportional-integral-differential (PID) control[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2004, 27(2): 134－144.

[3] 代金秋, 苏仲杰, 赵明超, 等. 粉质黏土的真三轴试验及强度特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2534－2540, 2546.
DAI Jin-qiu, SU Zhong-jie, ZHAO Ming-chao, et al. True triaxial tests and strength characteristics of silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2534－2540, 2546.

[4] MATSUOKA H, SUN D A, KOGANE A, et al. Stress-strain behaviour of unsaturated soil in true triaxial tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(3): 608－619.

[5] 石建刚, 邵生俊, 陶虎, 等. 非饱和土的真三轴试验及强度变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 85－90.
SHI Jian-gang, SHAO Sheng-jun, TAO Hu, et al. True triaxial tests and strength deformation behaviors of unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Supp.1): 85－90.

[6] HOYOS L R, PEREZ-RUIZ H D, PUPPALA A J. Modeling unsaturated soil response under suction-controlled true triaxial stress paths[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2012, 12(3): 292－308.

[7] 方瑾瑾, 冯以鑫, 朱昌星. 真三轴条件下 Q_3 原状黄土的力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1699－1708.
FANG Jin-jin, FENG Yi-xin, ZHU Chang-xing. Mechanical characteristics of Q_3 intact loess in true triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5):

1699－1708.

[8] 邵生俊, 许萍, 王强, 等. 黄土各向异性强度特性的真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1614－1623.
SHAO Sheng-jun, XU Ping, WANG Qiang, et al. True triaxial tests on anisotropic strength characteristics of loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(9): 1614－1623.

[9] 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.

[10] LADE P V, WANG Q. Effect of boundary conditions on shear banding in true triaxial tests on sand[J]. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, 2011, 42(4): 19－25.

[11] 扈萍, 黄茂松, 马少坤, 等. 粉细砂的真三轴试验与强度特性[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 465－470.
HU Ping, HUANG Mao-song, MA Shao-kun, et al. True triaxial tests and strength characteristics of silty sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 465－470.

[12] 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 principal stresses and different stress paths[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2015, 46(9): 1071－1079.

[13] 施维成, 朱俊高, 何顺宾, 等. 粗粒料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 triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(5): 810－814.

[14] 潘家军, 程展林, 余挺, 等. 不同中主应力条件下粗粒土应力应变特性试验研究[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.

[15] 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.

欧美岩土工程勘察标准解读

著者：刘卫民，丁小军，谷志文，等，小 16 开，平膜，196 页，定价：49 元，出版单位：中国建筑工业出版社，版次：第 1 版，出版时间：2018-07，标准书号：ISBN 978-7-112-22357-2，征订号：32229。

内容简介：本书对海外岩土工程勘察全过程体系和相关规定进行了详细介绍，明确了各种勘察方法和测试手段的应用范围、技术要求及岩土参数的分析处理流程等，同时结合海外的工程实践，对实际勘察过程中易产生分歧的焦点问题进行了详细解读。

全书共分为 11 章，第 1 章 欧美岩土工程勘察标准体系；第 2 章 术语和符号；第 3 章 欧美岩土工程勘察程序计划；第 4 章 岩土取样；第 5 章 土的鉴定和试验；第 6 章 岩石鉴定及试验；第 7 章 原位测试；第 8 章 岩土参数的分析和确定；第 9 章 地下水勘察；第 10 章 岩体强度及分级系统；第 11 章 勘察报告的编制；参考文献。

读者对象：本书适用于从事岩土勘察设计的专业技术人员和管理人员参考阅读。

（摘自 中国建筑书店）