

DOI: 10.11779/CJGE201907023

# 大型微摩阻土工真三轴试验系统及其应用

潘家军, 程展林, 江泊洧, 左永振, 徐晗

(长江水利委员会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:**介绍了长江科学院研制的大型土工真三轴试验系统,该试验系统具有如下功能:①能够稳定的开展粗粒土的真三轴试验;②可以提供的小主应力最大值为3.0 MPa,大主应力最大值为15.0 MPa;③试验尺寸为300 mm(长)×300 mm(宽)×600 mm(高);④可按任意设定的加载过程,采用应力或应变控制方式进行三向独立加载,实现复杂应力条件下的模拟试验;⑤能获得粗粒土试样的应力变形全过程线。通过一个典型工程案例,将该试验系统应用于粗粒土复杂应力条件下的力学特性研究,获得了粗粒土在不同应力水平下的应力变形规律;得到了试样在不同加载路径下的强度参数,并对其破坏准则的适用性进行了初步探讨。大型微摩阻土工真三轴试验系统的成功研制,为深入研究粗粒土在高应力和复杂应力路径下的强度与变形特性提供了技术手段。

**关键词:**大型真三轴;粗粒土;应力变形;中主应力;强度特性

中图分类号: TU415 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)07-1367-07

作者简介:潘家军(1980—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事粗粒土力学特性与土石坝工程方面的研究工作。

E-mail: panjj@mail.crsri.cn。

## Large-scale low-friction geotechnical true tri-axial apparatus and its application

PAN Jia-jun, CHENG Zhan-lin, JIANG Ji-wei, ZUO Yong-zhen, XU Han

(Changjiang River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Firstly, an introduction is made to the large-scale geotechnical true tri-axial apparatus developed by Changjiang River Scientific Research Institute. The functions of this apparatus can be described as follows: (1) The true tri-axial tests on coarse grained soil can be carried out steadily. (2) The maximum value of  $\sigma_3$  is able to achieve 3.0 MPa, while that of  $\sigma_1$  is able to achieve 15.0 MPa. (3) The specimen size is 300 mm (length) × 300 mm (width) × 600 mm (height). (4) The loading process can be set arbitrarily, both the stress control and the strain control are available, and loading in three directions is independently, which makes it possible to simulate complex stress paths. (5) The whole process stress-strain curves of coarsely grained soil can be obtained. Through an engineering case, the researches on the mechanical characteristics of coarse grained soil under complex stress conditions are conducted using this apparatus, and the stress-strain rules are obtained at different stress levels. The strength parameters of the specimen in different loading paths are achieved, and a preliminary analysis for the applicability of strength criterion is made. The successful development of the large-scale low-friction true tri-axial apparatus provides a new technical method in studying the strength and deformation of coarse grained soil under high stress levels and complex stress paths.

**Key words:** large-scale true tri-axial apparatus; coarse-grained soil; stress-strain; intermediate principal stress; strength property

## 0 引言

目前一般采用大型常规三轴试验研究粗粒土的强度变形参数。但常规的大型土工三轴仪不能模拟实际工程中粗粒土所处的三向应力状态和经历的真实应力路径,得到的应力变形关系和强度参数未充分考虑中主应力的影响,应用过程中存在一定的局限性。

土工真三轴试验仪是研究复杂应力条件下土的力学特性的最为有效的试验手段之一,相对于常规三轴

试验,真三轴试验可以更全面、更真实地反映土单元在三向受力状态下的变形规律、各向异性特征,可用于研究土体的应力应变特性及验证和发展土体本构模型等。自1936年Kjellman提出真三轴仪的设想以来,

基金项目: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);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017023/YT)

收稿日期:2018-07-12

已先后研制了多种各具特点的真三轴仪。按其压力室加载特性,可分为刚性加载真三轴仪、柔性加载真三轴仪及刚柔复合加载真三轴仪。瑞典Kjellman<sup>[1]</sup>和英国Pearce<sup>[2]</sup>、Wood<sup>[3]</sup>、Matsuoka等<sup>[4-5]</sup>研制了刚性加载真三轴仪,它们适用于砂土;其他学者<sup>[6-13]</sup>研制了柔性加载真三轴仪;美国Lade<sup>[14]</sup>、日本诚研舍、日本谷藤株式会社和伦敦大学等研制了刚柔复合加载真三轴仪。中国真三轴仪的研究起步较晚,直到20世纪80年代才开始研制和引进真三轴仪,包括清华大学刚性加载真三轴仪<sup>[15]</sup>、同济大学刚柔复合型真三轴仪<sup>[16]</sup>、河海大学刚柔复合加载的真三轴仪<sup>[17]</sup>、香港理工大学刚柔复合型真三轴仪、西安理工大学刚柔复合型真三轴仪<sup>[18]</sup>等。但以往这些真三轴试验设备试样尺寸和应力水平都难以满足目前高土石坝工程研究的需要。

为了研究复杂应力状态及路径下粗粒土力学特性,长江科学院自主研制了高压、微摩阻、智能伺服控制的大型土工真三轴试验系统,该试验系统已在中国西南多个高土石坝工程堆石料力学特性测试中得到采用,取得了较好的工程应用效果。

## 1 真三轴测试系统说明

### 1.1 测试系统的构成

新研发的大尺寸微摩阻真三轴测试系统主要由5大模块组成,分别为加载传力模块、荷载模块、伺服控制及数据采集模块和量测模块。

加载传力及荷载模块由竖向反力框架、真三轴压 力室、加载板、可压缩双向减摩板、平衡盘、平衡油

缸、水平向反力框架等组成。竖向反力框架由横梁和立柱构成足够刚度的框架,试样上下分别为轴向活塞和加载板;水平反力框架由拉杆和横梁构成,试样左右分别为传力柱、轴向活塞、加载板和可压缩传力板。

伺服控制模块包括电液(气)伺服控制系统和电机伺服控制系统。其中电液(气)伺服控制系统由伺服阀、功率放大器、位移传感器、载荷传感器以及伺服控制器等组成;电机伺服系统由伺服电机、驱动器、载荷传感器、位移传感器、传动箱及滚柱丝杆等组成。

量测模块包括水下荷载传感器、交流线性差动位移传感器、压力传感器,激光液位传感器、外体变测量装置,及配套数据采集器等。

### 1.2 工作原理

真三轴仪的工作原理是对试样独立施加3个方向的荷载,并通过伺服系统,实现任意加载过程的精确控制;同时,对相应荷载、变形、孔隙水压力等进行量测;通过数据采集系统实现量测数据的自动采集、处理和实时显示。总体结构简图如图1所示。

试验时,控制软件首先给伺服系统一个控制信号,伺服控制系统控制液压源通过加载传力装置将荷载施加到试样上,施加的荷载引起试样各物理量的变化,量测系统量测到各物理量的变化信号后,将信号传递到伺服控制系统,经数字伺服控制器判断后,再控制液压源施加更准确的荷载值。数据采集系统采集到量测系统的荷载、位移、体变、孔压等物理量,经后台处理后,可在终端显示量测值、关系曲线等。

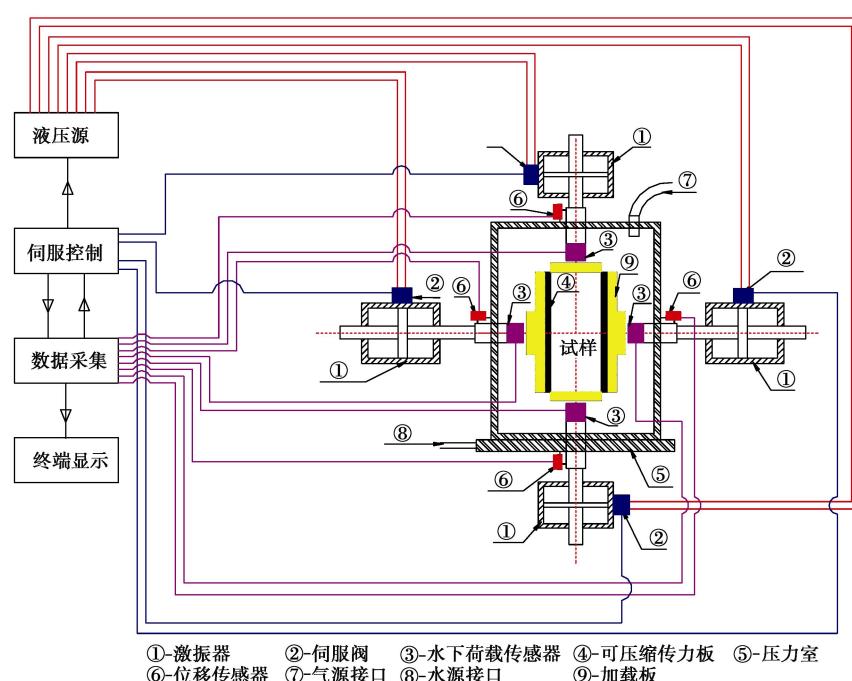


图1 大型土工真三轴试验系统工作原理图

Fig. 1 Working principles of large-scale true tri-axial apparatus

### 1.3 系统功能

大型微摩阻土工真三轴试验系统如图 2 所示, 其性能指标如下:

(1) 大尺寸。与大型土工真三轴试验系统配套的试样尺寸为 30 cm(长)×30(宽)×60 cm(高), 如图 3 所示。与目前一些真三轴仪采用立方体试样不同, 本设备采用了高宽比 1:2 制样, 控制粒径可与常规大三轴一致, 便于试验成果的比较。

(2) 高应力。大型土工真三轴试验系统中, 能够加载最小主应力最大值为 3 MPa, 中主应力最大值为 10 MPa, 大主应力最大值为 15 MPa。可满足包括高土石坝筑坝粗粒土在各种高应力水平状态下试验需求。

(3) 微摩阻加载。大型土工真三轴试验系统中加载板与试样之间通过增加特殊的可压缩双向减摩板<sup>[19]</sup>, 使得加载板与试样之间的滑动摩擦变为滚动摩擦, 保证试验成果的真实性。

(4) 复杂应力路径伺服控制。大型土工真三轴试验系统加载为自动伺服控制, 根据应力或应变控制方式对 3 个主应力方向独立设置加载路径。



图 2 大型土工真三轴试验系统

Fig. 2 Large-scale true tri-axial apparatus



图 3 真三轴试样

Fig. 3 Prepared specimen for true tri-axial tests

(5) 全过程。本系统可实现变形、孔隙水压力和体积变化的自动量测, 并可对数据进行自动采集、绘制各参量的全过程曲线。

## 2 工程应用案例

大型微摩阻土工真三轴试验系统研制成功后, 已应用于中国多个水利水电工程中的粗粒土力学特性试验研究。本节以某典型土石坝筑坝粗粒土为例, 进一步说明真三轴试验系统的性能及工程应用。

### 2.1 试样基本特性

试验所用粗粒土级配如表 1 所示。通过重型击实试验, 得到试样的最小干密度和最大干密度分别为 1.658, 2.134 g/cm<sup>3</sup>。按照相对密实度  $D_r=0.90$  控制试样密实度, 对应干密度为 2.07 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 粗粒土真三轴试验级配

Table 1 Grain-size distribution of coarse-grained soil specimen

60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm
15.9	24.7	19.9	17.5	22.0

### 2.2 应力路径方案

选取中主应力系数  $b$  ( $b=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$ ) 和不同周围压力  $\sigma_3$  作为变量, 开展粗粒土真三轴试验, 一方面研究中主应力对试样变形及强度的影响, 另一方面还可对粗粒土破坏准则的适用性进行深入研究。

应力路径具体为: ①施加周围压力  $\sigma_3$ , 使试样在静水压力固结; ②始终保持中主应力系数  $b=\Delta\sigma_2/\Delta\sigma_1$  进行荷载的持续施加, 直到试样破坏。应力加载路径如图 4 所示。

本次试验中,  $b$  分别取 0, 0.25, 0.50, 0.75; 小主应力  $\sigma_3$  则分别取 200, 400, 600, 800 kPa, 共计开展 4 组等  $\sigma_3$  等  $b$  试验。

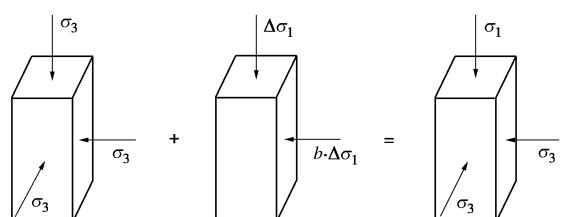


图 4 等  $\sigma_3$  等  $b$  试验应力加载路径示意图

Fig. 4 Schematic of loading path under constant ratio  $b$

### 2.3 应力变形试验成果分析

图 5 依次为不同  $b$  值、不同  $\sigma_3$  条件下粗粒土的应力应变曲线图。从图 5 可以看出:

(1) 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, 试样切线模量的提升, 直接反映出中主应力  $\sigma_2$  对粗粒土起到明显的硬化作用。

(2)  $b$  值增加, 试样  $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$  关系曲线在应变中期呈现“线性化”的趋势,  $b=0.75$  情况下最为显著。

图 6 为  $\sigma_3=0.6 \text{ MPa}$ , 不同  $b$  值条件下粗粒土的应力应变曲线图, 由图 6 可知: ①相同  $\sigma_3$  条件,  $b=0.25, 0.50, 0.75$  三种状态下  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$  曲线初始阶段的斜率非常接近, 但明显大于  $b=0$  状态, 表明中主应力对试样小变形阶段的硬化效果是显著的,  $b>0.25$  后, 应变初期的硬化增强效果基本不再持续增加; ②从  $b=0.25, 0.50, 0.75$  三种状态峰值应力对应的应变来看, 呈明显降低趋势, 表明在大应变区间, 中主应力对试样硬化的影响仍呈逐步增强趋势。

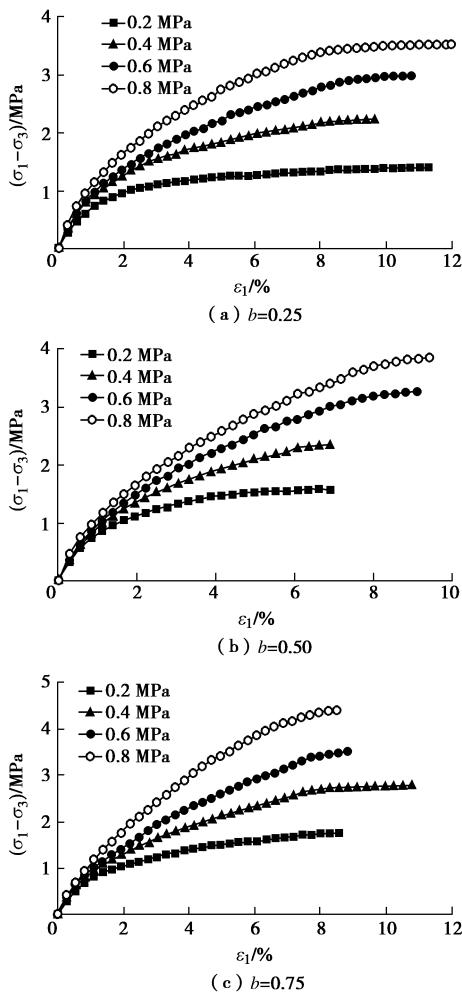


图 5 不同  $b$  值  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  -  $\varepsilon_1$  关系曲线

Fig. 5 Relationship between  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  and  $\varepsilon_1$  at different values of ratio  $b$

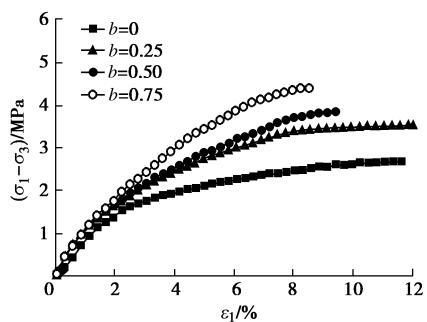


图 6  $\sigma_3=0.6 \text{ MPa}$  时  $\sigma_1 - \sigma_3$  与  $\varepsilon_1$  关系曲线

Fig. 6 Relationship between  $\sigma_1 - \sigma_3$  and  $\varepsilon_1$  at  $\sigma_3$  of  $0.6 \text{ MPa}$

图 7 为粗粒土在不同  $\sigma_3$  条件下  $\varepsilon_v - \varepsilon_1$  关系曲线; 图 8 为  $b=0.25$  条件下试样  $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$  关系曲线。由图 8 可以看出真三轴试验中应变之间的关系特征表现为: ①  $b$  值对试样体胀的抑制作用较为明显, 在  $\sigma_3$  较低条件下,  $b=0$  在大变形区间出现了明显的体胀, 其体现出试样内部结构的调整, 而  $b=0.25, 0.50, 0.75$ , 试样全程呈现体缩特性, 中主应力对颗粒自由度的约束作用显著。②相同  $b$  值下, 由于中主应力的存在,  $\varepsilon_3$  在  $b \neq 0$  的条件下都成拉伸趋势, 但  $\varepsilon_3$  值随着  $\sigma_3$  的增大而减小,  $b$  值提升和  $\sigma_3$  增加都可抑制试样体胀, 在此情况下, 受到颗粒破碎等因素影响, 体积膨胀呈收敛趋势。

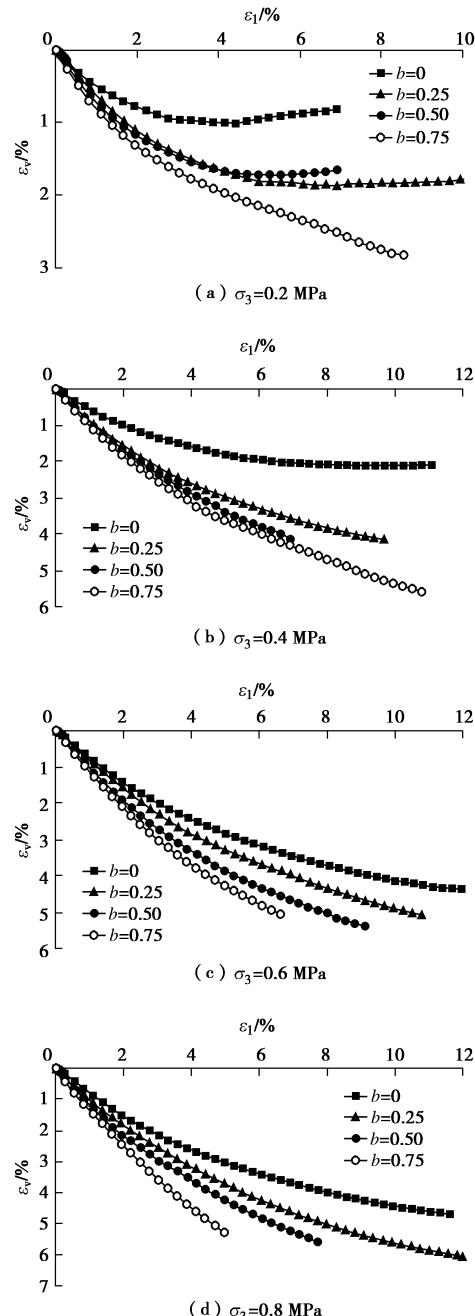
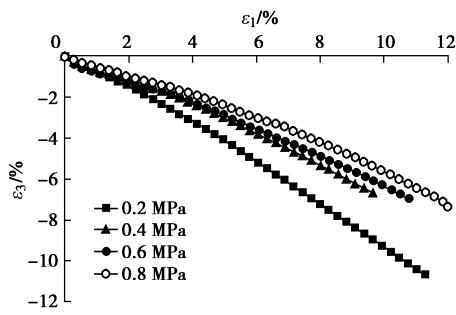


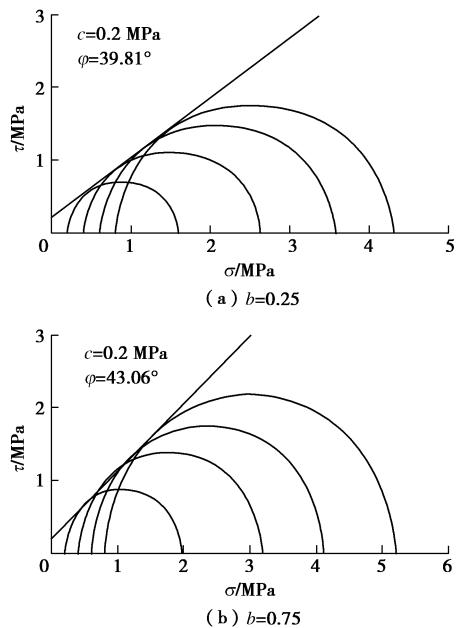
图 7 不同  $\sigma_3$  轴应变  $\varepsilon_1$  与体应变  $\varepsilon_v$  关系曲线

Fig. 7 Relationship between  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_v$  at different values of  $\sigma_3$

图 8  $b=0.25$  时大、小主应变  $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$  关系曲线Fig. 8 Relationship between  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_3$  at  $b$  of 0.25

## 2.4 强度参数及破坏准则适用性分析

根据试验成果, 绘制的粗粒土莫尔应力圆及线性强度包络线如图 9 所示, 表 2 统计了不同  $b$  值下粗粒土的线性强度指标。可以看出: 采用线性强度包络线能够较好地拟合相应  $b$  值下莫尔应力圆。

图 9 不同  $b$  值莫尔应力圆及线性强度包络线图Fig. 9 Mohr's circles and linear fitting curves at different values of ratio  $b$ 表 2 不同  $b$  值试样线性强度统计表Table 2 Statistic for linear strength parameters at different values of ratio  $b$ 

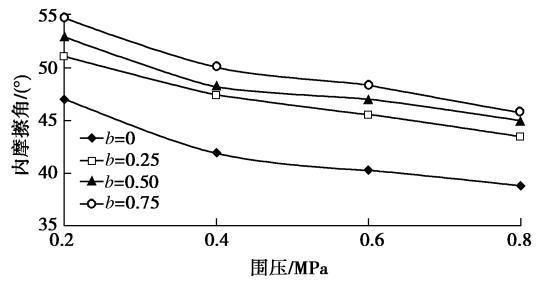
$b$ 值	$\varphi/^\circ$	$c/\text{MPa}$
0	34.89	0.1
0.25	39.81	0.2
0.50	41.23	0.2
0.75	43.06	0.2

基于粗粒土无黏性的特点,  $c=0$ , 统计得到各  $b$  值和  $\sigma_3$  条件下试样的非线性强度指标  $\varphi_0$  如表 3 所示, 相应的强度变化曲线如图 10 所示, 可以看出: 相同  $b$  值下, 内摩擦角随  $\sigma_3$  的增加呈劣化趋势, 但从不同  $b$

值下的内摩擦角演化角度看,  $b=0.25$  与  $b=0$  之间的间隔显著大于  $b=0.25, 0.50, 0.75$  之间的内摩擦角差异, 一方面表明  $b$  值对粗粒土强度的增强作用是显著的; 另一方面,  $b>0.25$  之后对于强度增强效果显著减弱。

表 3 不同  $\sigma_3$  及  $b$  值试样的内摩擦角  $\varphi_0$ Table 3 Internal friction angles at different confining pressures and values of ratio  $b$ 

$\sigma_3/\text{MPa}$	b 值			
	0	0.25	0.50	0.75
0.2	46.93	51.07	52.94	54.65
0.4	41.82	47.39	48.18	49.94
0.6	40.16	45.47	46.97	48.22
0.8	38.72	43.38	44.90	45.67

图 10 不同  $\sigma_3$  及  $b$  值试样内摩擦角  $\varphi_0$  变化曲线Fig. 10 Evolution curves of internal friction angles at different confining pressures and values of ratio  $b$ 

目前土体常见的破坏准则主要有莫尔-库仑 (M-C) 破坏准则、拉德-邓肯 (L-D) 破坏准则和松岗元-中井 (SMP) 破坏准则, 关系表达式分别为

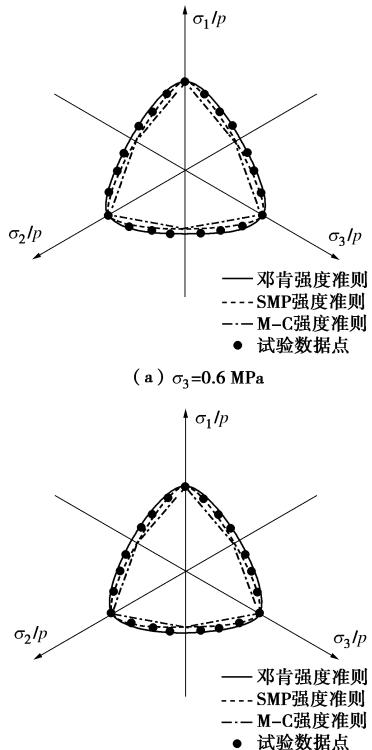
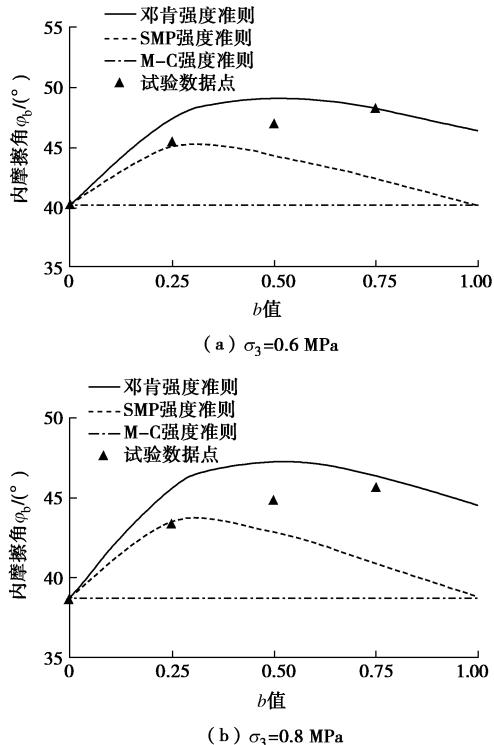
莫尔-库仑 (M-C) 准则,  $\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2 \cot(45^\circ + \varphi/2)$ ; 拉德-邓肯 (LADE-DUNCAN) 准则,  $\frac{I_1^3}{I_3} = k_f$ ; 松岗元-中井 (SMP) 准则:  $\frac{I_1 I_2}{I_3} = k_f$ 。

其中  $I_1, I_2, I_3$  分别为第一、第二、第三应力不变量;  $k_f$  为与试验应力值有关的比例系数。

图 11 为  $\sigma_3=0.6, 0.8 \text{ MPa}$  条件下试验获得的强度指标数据点与以上 3 个破坏准则在  $\pi$  平面上的轨迹。可以看出: 莫尔-库仑 (M-C) 破坏准则包围的面积最小; 其次为松岗元-中井 (SMP) 破坏准则, 其在  $b=0$  和  $b=1$  外接于 M-C 准则的六边形轨迹; 拉德-邓肯 (L-D) 破坏准则包围面积最大, 除  $b=0$  外, L-D 准则对强度的预测均高于另外两个破坏准则。

从与数据点的吻合度来看, 本次试验实测数据与 L-D 破坏准则拟合更好, M-C 破坏准则忽略了中主应力而显著低估粗粒土的强度。

图 12 绘制了不同破坏准则下的  $\varphi_b - b$  曲线与试验结果的关系, 可以看出: 试验得到的内摩擦角参数基本位于 L-D 破坏准则与 SMP 破坏准则, L-D 破坏准则对于强度全过程的预测效果更好; SMP 准则对于  $b$  值较大区间粗粒土强度趋势的预测存在较大偏差。

图 11 试验点与经典破坏准则在  $\pi$  平面分布关系Fig. 11 Comparison between test data and classical failure criteria on  $\pi$  plane图 12 内摩擦角与  $b$  值的关系同经典破坏准则对比Fig. 12 Comparison between test data of  $\phi$  and ratio  $b$  and classical failure criterion

### 3 结语

本文首先从设备的系统构成、工作原理以及设备

性能等方面介绍了长江科学院自主研发的大型微摩阻土工真三轴试验系统，该设备为目前国内外试样尺寸最大的土工真三轴仪，同时通过对加载板和控制系统的技术创新，显著降低了设备的机械摩阻力，并提高了设备的自动化程度，可有效满足目前高土石坝工程和复杂应力条件下粗粒土力学特性的试验需求。

通过对某土石坝筑坝粗粒土等  $b$  试验，分析了  $\sigma_2$  对粗粒土应力 - 变形特性的影响规律，揭示了  $\sigma_2$  对于粗粒土强度的影响程度及演化规律，并进一步对比分析了试验成果与几种经典破坏准则适用性，表明真三轴试验系统在研究粗粒土工程特性方面的综合工作性能优势，该测试系统可为粗粒土真三轴力学特性测试提供重要的技术保障。

另外，为促进真三轴试验系统在工程中的应用范围和应用深度，将结合使用情况，从应力路径的进一步拓展、测试变量的进一步综合优化等方面不断完善和改进试验系统的工作性能。

### 参考文献：

- [1] KIELLMAN W. Report on an apparatus for consummate investigation of the mechanical properties of soils[C]// Proceedings of the 1st ICSMFE. New York, 1963: 667 - 669.
- [2] PEARCE J A. A new triaxial apparatus, stress-strain behavior of soils[M]. London: Yeovil Co, Ltd, 1971: 330 - 339.
- [3] WOOD D M. Some aspects of the mechanical behaviour of Kaolin under truly triaxial conditions of stress and strain[D]. London: University of Cambridge, 1974.
- [4] MATSUOKA H, SUN D A. Extension of spatially mobilized plane(SMP) to frictional and cohesive materials and its application to cemented sands[J]. Soils and Foundations, 1995, 35(4): 63 - 72.
- [5] 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: 608 - 619.
- [6] BELL J M. Stress-strain characteristics of cohesionless granular materials subjected to statically applied homogeneous loads in an open system[D]. California: California Institute of Technology, 1965.
- [7] KO H Y, SCOTT R F. A new soil testing apparatus[J]. Géotechnique, 1967, 17(1): 40 - 57.
- [8] STURE S, DESAI C S. Fluid cushion truly triaxial or multi-axial testing device[J]. Geotechnical Testing Journal, 1979, 2(1): 20 - 33.
- [9] SIVAKUGAN N, CHAMEAU J L, HOLTZ R D, et al. Serve-controlled cuboidal shear device[J]. Geotechnical

- Testing Journal, 1988, **11**(2): 119 - 124.
- [10] REDDY K R, SAXENA S K, BUDIMAN J S. Development of a true triaxial testing apparatus[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, **15**(2): 89 - 105.
- [11] MANDEVILLE D, PENUMADU D. True triaxial testing system for clay with proportional-integral -differential(PID) control[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, **27**(2): 1 - 11.
- [12] CHOI C, ARDUINO P, HARNEY M D. Development of a true tri-axial apparatus for sands and gravels[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, **31**(1): 1 - 13.
- [13] PRASHANT A, PENUMADU D. Effect of intermediate principal stress on overconsolidated Kaolin clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **130**(3): 284 - 292.
- [14] LADE P V, DUNCAN J M. Cubical triaxial tests on cohesionless soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, **99**(10): 793 - 812.
- [15] 李广信. 土的三轴本构关系的探讨与模型验证[D]. 北京: 清华大学, 1985. (LI Guang-xin. A study of three-dimensional constitutive relationship of soils and an examination of various model[D]. Beijing: Tsinghua University, 1985. (in Chinese))
- [16] 孙 红, 赵锡宏, 袁聚云, 等. 软土的真三轴试验研究[J]. 水利学报, 2002(12): 72 - 78. (SUN Hong, ZHAO Xi-hong, YUAN Ju-yun, et al. A study on soft soil by true tri-axial test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(12): 72 - 78. (in Chinese))
- [17] 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究[J]. 河海大学学报, 1995, **23**(6): 28 - 33. (ZHU Jun-gao, LU Hai-hua, YIN Zong-ze. Lateral deformation of soil in true tri-axial test[J]. Journal of Hohai University, 1995, **23**(6): 28 - 33. (in Chinese))
- [18] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发 [J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1172 - 1179. (SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1172 - 1179. (in Chinese))
- [19] 程展林, 王艳丽, 饶锡保, 等. 土工真三轴试验双向微摩擦荷载传力板: 201510500516.7[P]. 2015-08-14. (CHENG Zhan-lin, WANG Yan-li, RAO Xi-bao, et al. Bi-directional micro-friction load transfer plate for geotechnical true tri-axial test: 201510500516.7[P]. 2015-08-14. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 广州国光仪器有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 南端集团水利水电技术分公司