

文章编号: 1000-7598(2013)01-0013-10

不同因素影响下层间错动带颗粒破碎和剪切强度特性试验研究

赵 阳^{1,2}, 周 辉¹, 冯夏庭¹, 邵建富^{1,3}, 江 权¹,
闵 弘¹, 江亚丽⁴, 黄 可⁴

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 郑州 450011;
3. 法国里尔科技大学 里尔力学试验室, 法国 里尔 59655; 4. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

摘 要: 为了获得不同初始颗粒粒径分布和含水率对层间错动带颗粒破碎和剪切强度特性的影响, 通过对比泥夹碎屑、泥夹粉砂、全泥型 3 种不同层间错动带类型与现场 3 种不同含水率 (10%、7% 和 3%) 试样在法向压力 2~10 MPa 作用下的反复直剪试验和剪切面颗粒粒径分析试验结果, 可得出以下结论: 粗颗粒越多 (d_{60} 越大), 采用相对颗粒破碎势 B_r 量化的颗粒破碎程度越大; 较干颗粒 (低含水率) 由于磨损产生了更多的细小颗粒, 而较湿颗粒 (高含水率) 由于破裂和摩擦产生了较大颗粒; 粗颗粒仅对峰值抗剪强度产生一定的影响, 且粗颗粒越多, 残余强度包线非线性越强; 黏聚力和内摩擦角随含水率线性减小, 且低含水率试样残余强度包线非线性最强; 残余内摩擦角随颗粒破碎后的黏粒含量 ($<2 \mu\text{m}$) 线性减小。提出的残余内摩擦角初步预测公式可供实际工程参考。

关键词: 层间错动带; 反复直剪; 残余抗剪强度; 高压; 颗粒破碎; 颗粒粒径分布

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Particle crushing and shear behaviour of an infilled joint soil under different conditions

ZHAO Yang^{1,2}, ZHOU Hui¹, FENG Xia-ting¹, SHAO Jian-fu^{1,3}, JIANG Quan¹,
MIN Hong¹, JIANG Ya-li⁴, HUANG Ke⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Resources and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China;
3. Laboratory of Mechanics of Lille, Lille University of Sciences and Technology, Lille 59655, France;
4. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The results of the samples with three different types of infilled joint soils (mud with fragment, mud with sand and muddy) and the ones with three different water contents (10%, 7% and 3%) around the in-situ water content by the reversal direct shear tests (normal stress is between 2 MPa and 10 MPa) and particle size distribution (PSD) tests (around the shear zones) were compared to get the effects of the different initial particle size distributions and water contents on the infilled joint soil. Some conclusions are drawn as follows. The degree of particle crushing is higher quantified by B_r index (relative particle crushing potential) for the coarser particles (d_{60} is greater). Dry particles (lower water content) tend to crush to tiny particles due to abrasion and wet particles (higher water content) generate more relative large particles due to fracture or attrition. Coarse particles have limited effect on the peak strength; besides nonlinearity of residual strength envelope is higher for coarser particles (d_{60} is greater). Cohesion and friction angle decrease linearly with water content; moreover the samples with lower contents have a higher nonlinear residual strength envelope. The residual friction angle decreases linearly with clay fraction; in addition, the equation proposed could be used to estimate the residual friction angle of the infilled joint soils preliminarily in practice.

Key words: infilled joint soil; multi-reversal direct shear; residual shear strength; high pressure; particle crushing; particle size distribution

收稿日期: 2011-09-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2010CB732006); 国家自然科学基金(No. 50979104); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX2-EW-QN115)。

第一作者简介: 赵阳, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学试验与数值模拟方面的研究工作。E-mail: china.zhaoyang@hotmail.com

通讯作者: 周辉, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

1 引言

层间错动带是岩石向土转化的中间产物, 其常在褶皱岩体的地下或边坡工程中遇到, 是工程地质性质中最差的不连续面, 对整体工程的稳定性起决定性作用^[1]。在有层间错动带出露的工程设计中, 残余强度是一个重要的强度指标。但其力学性质不仅与其物理性质(如矿物成分、颗粒分布和化学成分)相关, 也受其赋存的环境条件(如地应力、地下水的流动)的影响^[2]。

根据文献[3-5], 在层间错动带物理性质中, 对其抗剪强度起关键作用的是颗粒粒径分布(简称 PSD), 因此, 众多学者按照颗粒粒径分布对层间错动带进行分类, 并根据颗粒组分获得了有关层间错动带强度的普遍性规律^[4, 6]。但考虑到其赋存环境条件, 对于埋藏较深的层间错动带, 其所处地应力较大, 高应力试验条件下(一般指法向应力大于 1 MPa)往往会获得与低应力条件下不同的力学特性^[7], 针对不同 PSD 的层间错动带, 考虑现场高应力环境条件下的剪切试验开展甚少。此外, 受降雨和水文地质条件的影响, 地下水位的变化会造成层间错动带含水率的变化; 从工程角度看, 在大型工程施工期前, 需要采用防渗帷幕或排水等截(导)流工程措施来减少施工区的水流, 从而导致层间错动带中含水率的降低。为了评价层间错动带中含水率的差异所导致的力学性能的变化, 有必要开展在不同含水率条件下的抗剪试验。

层间错动带作为一种夹杂着错动后残留有岩石碎屑(块)软弱物质的颗粒类材料, 在剪切应力下其塑性变形主要来源于颗粒破碎^[8]。颗粒破碎不仅会改变其内在结构, 也会引起颗粒的重新排列^[9], 从而影响其抗剪强度。基于以上原因, 层间错动带在剪切过程中颗粒破碎对其产生的影响是不可忽略的。

本文是文献[10]的后续研究, 为了研究不同因素对层间错动带剪切强度的影响, 针对不同 PSD、不同含水率条件下的层间错动带重塑样开展了法向应力高达 10 MPa 的反复直剪试验, 结合文献[10]中的试验结果, 分析了 PSD 和含水率对颗粒破碎的影响, 探讨了试验条件下峰值强度和残余强度的变化规律。值得注意的是, 本次试验选择重塑层间错动带作为试样是基于以下考虑: 现场情况下层间错动带原状样的取样非常困难, 且其颗粒粒径分布不均匀, 很难获得完全相同的试样进行试验; 本次试验的结果可作为层间错动带性质的定性分析,

获得的规律可加入本构模型对其进行描述, 当需要描述其天然状态下的性质时, 仅需更改参数即可。

2 试验材料及方法

2.1 试样制备

本次试验试样取自某水电站地下厂房区水平探洞中, 其各项基本物理性质指标见表 1^[10]。X 射线衍射分析结果表明, 其主要矿物成分为伊利石(43%), 其次是赤铁矿(37%)和桐石(20%)^[10]。其颗粒形态如图 1 所示。对于粒径大于 0.5 mm 的颗粒来说, 肉眼可见其表面粗糙不平且成不规则形状。

表 1 层间错动带的基本物理性质指标

Table 1 Physical properties of the infilled joint soils

天然物理性质指标			相对密度	液限 /%	塑性指数
含水率 /%	孔隙比	饱和度 /%			
7.1	0.44	47.4	2.94	22	10.1

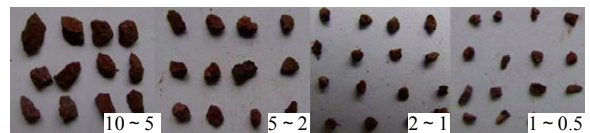


图 1 颗粒大小及形态示意图(单位: mm)

Fig.1 Schematic of size and shape of particles (unit: mm)

为了获得不同初始粒径分布的试样, 首先把取得的土样风干并干筛成粒径范围为 2.0~1.0 mm, 1.0~0.5 mm 和 <0.5 mm 三组, 然后从每组称取定量的颗粒并混合, 人工制造出两种不同的粒径分布, 最终的粒径分布使用湿筛法和比重计法测得。图 2 是本次试验采用的两种粒径分布类型(T2 和 T3), 粒径分布 T1^[10]也绘于此图作为对比。根据肖淑芳等^[6]对泥化夹层的分类, T1 属于泥夹碎屑, T2 和 T3 分别属于泥夹粉砂(或粉砂夹泥)和全泥型(参考表 2)。但根据《土的工程分类标准》^[11], T1 属于粉土质砂, T2 和 T3 均属于含粗粒的细粒土。这 3 种粒径分布具有明显的区别, T1 的最大粒径 d_{max} 是 10 mm, 限制粒径 d_{60} 为 0.46 mm, 有效粒径 d_{10} 为 0.002 6 mm; T2 的 d_{max} 为 2 mm, d_{60} 为 0.20 mm; T3 的 d_{max} 为 0.50 mm, d_{60} 为 0.072 mm; T2、T3 的 d_{10} 均小于试验测得的最小粒径。为了获得结构相同的试样^[12-13], T2、T3 试样分别加入定量的蒸馏水搅拌均匀以达到天然含水率 7%, 并装入密封塑料袋搁置在恒温 22 的房间中 24 h 以上。最后, 根据天然孔隙比 0.44, 试验时将定量的土样装入剪切盒中, 分 3 层刨毛并捣筑密实。

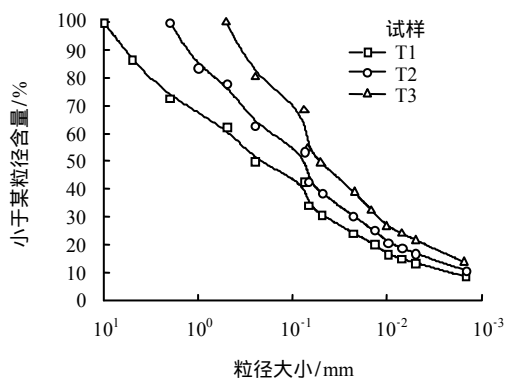


图 2 T1、T2 和 T3 的颗粒粒径分布曲线
Fig.2 Particle size distribution (PSD) curves of T1, T2 and T3

表 2 根据泥化夹层粒径分布的分类^[6]
Table 2 Classification of infilled joint soil according to particle size distribution^[6]

类型	黏粒含量/%	砾粒含量/%	砾粒组与粉粒组含量
全泥型	>20	<10	砾粒组小于粉粒组
碎屑碎屑	10 ~ 20	10 ~ 30	砾粒组大于粉粒组
碎屑碎屑	<10	>30	砾粒组大于粉粒组
泥夹粉砂或粉砂夹泥	<20	<20	砾粒组小于粉粒组

为了研究不同含水率对层间错动带抗剪强度的影响，制作了与剪切盒内边缘相同尺寸（120 mm×100 mm×80 mm）的可拆卸不锈钢盒，将压制好的试样（仅选取 T1 作为试样的颗粒粒径分布，含水率为 7%、孔隙比为 0.44）从盒中取出，对试样自然风干或使用喷雾法，并通过称重控制其含水率。共选取两组含水率进行对比，分别是 10%（喷雾法，编号为 T3W）和 3%（自然风干，编号为 T3D）。当

试样达到所设定的含水率时，再次装入密封塑料袋搁置在恒温为 22 的房间中 24 h 以上以备试验。试验前用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测定了 T1W、T1D 的试样体积，发现其几乎没有变化。可能由于其塑性指数较小，且饱和度较低（<70%）：根据 Tinjum 等^[14]和 Haines^[15]的研究，试样的塑性越小，由于吸水（失水）产生的体积变化越小，且大部分的变化主要发生在高饱和度情况下。

2.2 试验仪器

采用中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的应变式大型室内及现场两用直剪装置。该仪器的结构、水平与垂直加载系统、量测系统等情况可参考文献[16]。本次试验采用文献[10]中改造后的剪切盒，其可与原结构相匹配，并将法向应力最高提高至 16 MPa。

2.3 试验内容

针对不同粒径分布（T2、T3）和不同含水率（T1W、T1D）条件下的层间错动带重塑样，进行了法向应力为 2、4、6、8、10 MPa 共 5 级压力下的固结排水反复剪切试验。试验过程参照文献[10]。固结标准为沉降量小于 0.002 mm/min。每一个试样循环推剪 4 次，推剪速率为 0.216 mm/min，剪切盒拉回时速率为 0.6 mm/min，推剪单程位移为 15 mm，累计位移共 60 mm。试验结束后取上剪切盒试样的剪切面区域（约 2 cm 厚）进行颗粒粒径分析，并凿取下剪切盒部分试样进行含水率分析，可以看出，剪切后含水率变化不大（见表 3）。

表 3 反复直剪试验结果统计表
Table 3 Results of multi-reversal direct shear tests

法向应力 /MPa	$\phi_r / (^\circ)$					含水率/%				
	T1	T2	T3	T1W	T1D	T1	T2	T3	T1W	T1D
2	25.65	22.79	21.56	25.70	24.26	7.1*	6.9	6.8	9.8	2.8
4	22.79	21.81	19.68	23.73	22.00	7.0	6.7	6.8	9.7	3.0
6	21.23	21.15	19.47	22.48	20.47	7.1	6.9	7.0	9.7	2.9
8	20.63	20.69	19.24	22.00	18.50	6.8	7.0	7.1	9.6	2.8
10	18.63	18.68	18.07	20.56	15.96	6.9	7.1	7.0	9.8	3.0

注： ϕ_r 由 \tan^{-1} （剪切强度/法向应力）计算得到；*数字为试验后含水率。

3 试验结果与讨论

3.1 颗粒粒径分析试验

剪切面附近区域的颗粒粒径分布曲线见图 3、4。原颗粒粒径分布也绘于图 3、4 作为对比。整体而言，对于给定的颗粒组，曲线会随着法向应力的增大而向上移动，这与众多学者得到的结果相一致^[17-18]。但不同初始 PSD（见图 3）和含水率（见

图 4）对颗粒破碎影响并不相同。

3.1.1 不同初始 PSD 对颗粒破碎的影响

考虑到 PSD 的影响（见图 3），T2 中粒径大于 0.25 mm 的颗粒组明显减少，0.050 ~ 0.075 mm 的粒径含量显著增多；T3 的曲线形态与 T2 类似，其颗粒破碎主要发生在粒径大于 0.075 mm 的颗粒组，0.050 ~ 0.075 mm 的粒径含量也明显增多。本文采用相对颗粒破碎势 B_r ^[19] 度量 3 种粒径分布作用

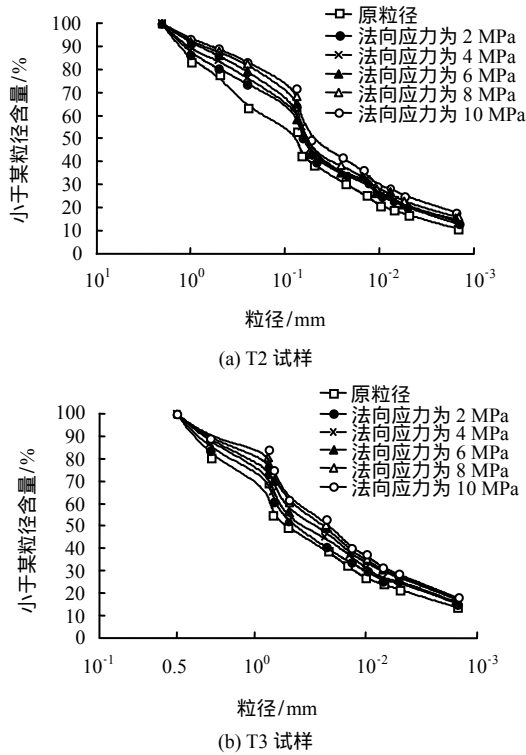


图3 不同初始粒径分布条件下剪切面颗粒粒径曲线
Fig.3 PSD curves of the shear zones for samples with different initial PSDs

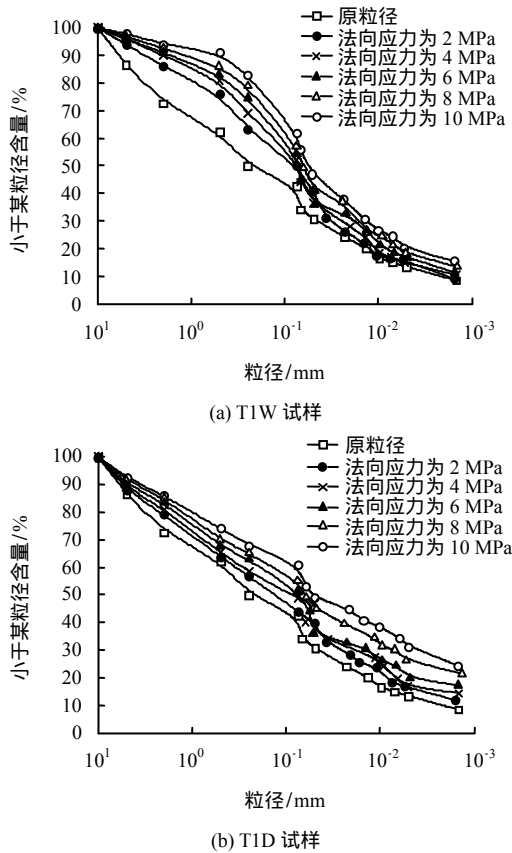


图4 不同含水率条件下剪切面颗粒粒径曲线
Fig.4 PSD curves of shear zones for the samples with different water contents

下的颗粒破碎程度(见图5),可以看出,在各级应力下,T1的颗粒破碎程度最大,而T3的颗粒破碎程度最小。这与试样中最大粒径和大于0.075 mm粒径的颗粒含量有关。Hardin^[19]认为,粒径小于0.074 mm的颗粒很难进一步破碎;随着颗粒粒径的增大,不仅颗粒本身缺陷增多,且颗粒与颗粒之间的接触力也会增大,在颗粒接触的棱角处更易产生应力集中^[20],从而导致颗粒破碎增大。

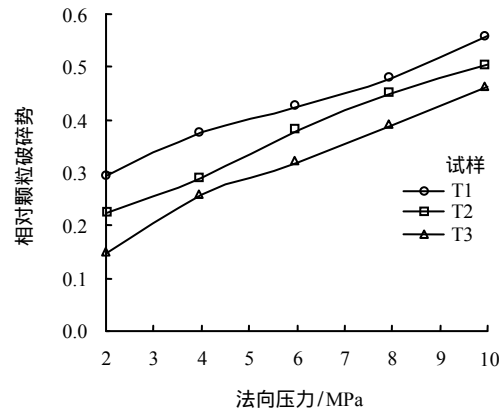


图5 T1、T2和T3试样颗粒破碎指标 B_r
Fig.5 B_r for samples of T1, T2 and T3

3.1.2 不同含水率对颗粒破碎的影响

考虑到含水率的影响(见图4),T1W、T1D在剪切后的颗粒粒径分布曲线具有明显的区别。更进一步地分析发现,相对较大的颗粒(以500 μm 为例,见图6)在试样含水率高的情况下易于破碎,而相对较小颗粒(以2 μm 为例)的含量会随着试样含水率的降低而增高。Miura等^[21]针对砂土在不同含水率的颗粒破碎情况得到了相似的结论。由此可见,不同含水率下颗粒破碎机制明显不同,即大颗粒的天然微裂隙或缺陷较多,在高含水率即比较湿润的条件下,水分易侵入到裂隙中,在水的润滑作用下,较大颗粒更容易破裂;在低含水率即比较干燥的条件下,剪切应力较大,带有棱角的颗粒在翻滚、滑移中易掉角、磨圆产生较细颗粒,部分颗粒在挤压碰撞中超过颗粒自身拉应力,产生了更多的细小颗粒。根据Guyon等^[22]对颗粒破碎机制的划分,前者的颗粒破碎机制主要是破裂和摩擦而后者主要是磨损。

3.2 反复直剪试验

反复直剪试验结果见图7、8。从图可以看到,在各次剪切过程后,剪切强度随法向应力的增高而

增大；经历峰值强度（首次剪切强度）后，强度逐渐下降；第 4 次剪切强度已与第 3 次剪切强度相差不大，根据 Skepton^[23]对残余强度的定义，可认为第 4 次剪切强度即是其残余强度。试样在残余剪切状态下内摩擦角 φ_r 的统计结果见表 3。但在不同初始 PSD 和含水率的影响下，试样的试验曲线形态、峰值强度和残余强度各有不同，下文结合颗粒破碎特征，分别对初始 PSD 和含水率对剪切特性的影响展开描述和讨论。

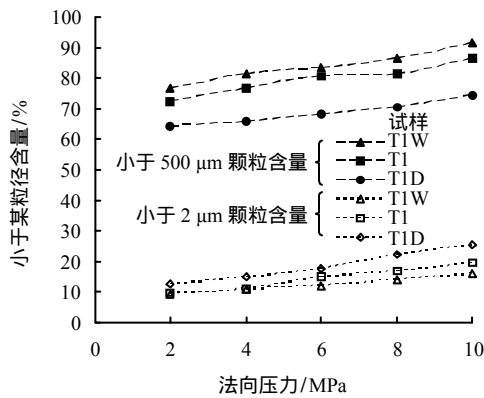


图 6 T1、T1W 和 T1D 小于 500 μm 和 2 μm 的颗粒含量
Fig.6 Fraction of particles finer than 500 μm and 2 μm for T1, T1W and T1D

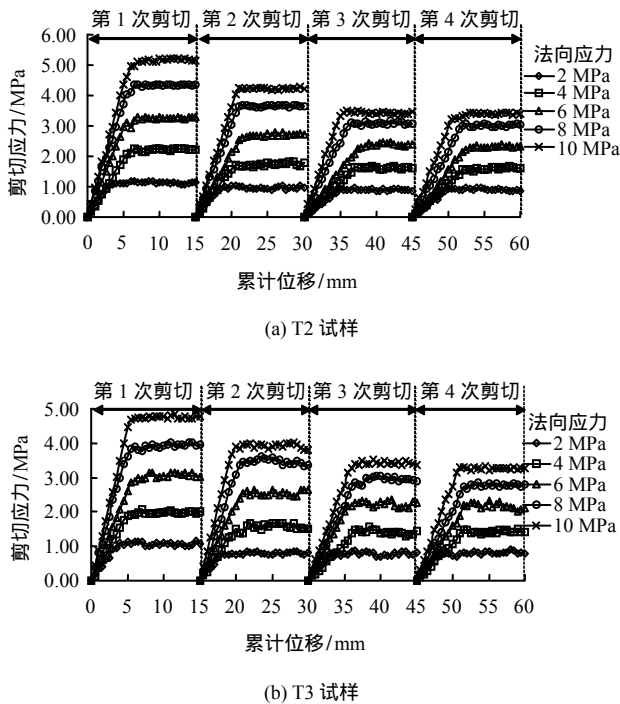
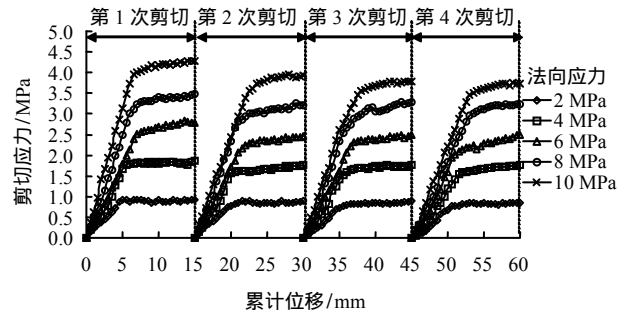
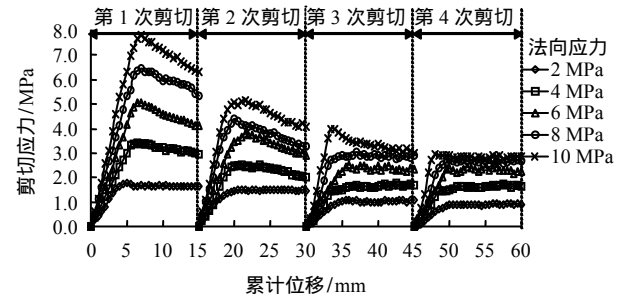


图 7 不同初始粒径分布条件下累积位移与剪切应力关系曲线

Fig.7 Accumulated displacement-shear stress curves for samples with different initial PSDs



(a) T1W 试样



(b) T1D 试样

图 8 不同含水率条件下累积位移与剪切应力关系曲线
Fig.8 Accumulated displacement-shear stress curves for samples with different water contents

3.2.1 不同初始 PSD 对剪切特性的影响

图 7(a)是 T2 试样的累积位移-剪切应力关系曲线，可以看出，在每次剪切过程中，试样并无明显的峰值。T3 试样（图 7(b)）的试验曲线形态与 T2 类似。可以看出，即使 T1、T2 和 T3 属于 3 种不同类型的泥化夹层，但在相同含水率条件（7%）下，试验曲线形式均呈现为理想塑性模型曲线。三者较粗颗粒含量（ d_{60} 分别为 0.455、0.200、0.072 mm）差别比较明显，但随着颗粒粒径的减小，细粒含量逐渐接近（见图 2），说明试样的剪切曲线形态主要取决于细粒含量和性质，但较粗颗粒含量也会影响抗剪强度。图 9 是 T1、T2 和 T3 的峰值强度（首次剪切强度）和法向应力的变化情况，其中 T1 的黏聚力 c 和内摩擦角 φ_p 最大，而 T3 的 c 和 φ_p 最小。当颗粒粒径变粗即 d_{60} 增大时， c 不仅来源于颗粒之间的黏聚效应，较粗颗粒的存在也为 c 提供了一定的咬合力^[24]。此外，在高应力下试样高度压实，较粗颗粒会与更多的颗粒接触，进一步提高了 φ_p 值。从整体而言，初始 PSD 的差别仅对峰值抗剪强度产生一定的影响： c 最大差值为 34 kPa， φ_p 最大差值为 4.35° ，且对剪切曲线形态影响不大。这与郭庆国^[25]的观点相一致：只有试样颗粒粒径大于 5 mm 且含量超过 30%时才对试验剪切特性有显著影响。

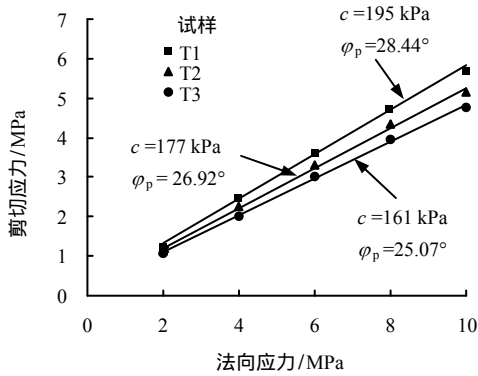


图9 不同初始 PSD 条件下法向应力和峰值剪切强度的关系
Fig.9 Relationships of normal stress and peak shear strength with different initial PSDs

从图 10 可以看出，T1、T2 和 T3 在各级法向应力下的残余剪切强度差别不大，随着法向应力的增高，三者的残余强度趋于一致，但 T3 的残余强度在各级应力下均为最小；此外，T1 的非线性程度最高（2、10 MPa 下 φ_r 相差 7.02°，见表 3）而 T3 的非线性程度最低（2、10 MPa 下 φ_r 相差 3.49°，见表 3）。Mersi 等^[26]发现，试样的残余强度与黏粒（ $<2 \mu\text{m}$ ）含量 CF 密切相关，而在本次试验中，在高剪切力作用下发生了颗粒破碎，导致试验前后的 CF 发生了变化（见图 3），从而影响了其残余强度。

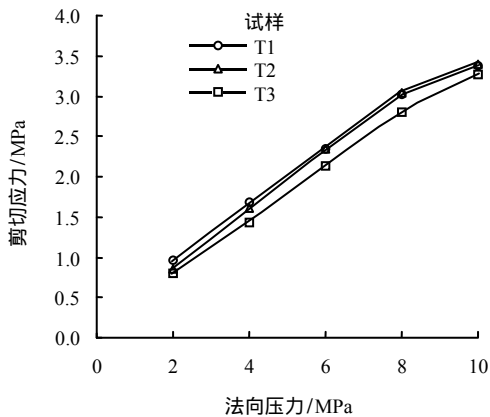


图 10 不同 PSD 条件下法向应力和残余剪切强度的关系
Fig.10 Relationships of normal stress and residual shear strength with different PSDs

图 11 是各级压力下 CF 与 φ_r 之间的关系。可以看出， φ_r 随着 CF 的升高而几乎线性减小。因此，由于 T1、T2 和 T3 初始 CF （分别为 9.13%、11.51% 和 14.69%）并不一致，在较低法向应力（如 2 MPa）作用下颗粒破碎程度较小（见图 5）， CF 依然有差别，导致 φ_r 差别相对较大。但随着法向应力的提高，颗粒破碎程度增大（见图 5），T1、T2 和 T3 的 CF

逐渐增多且逐渐接近，以 10 MPa 为例，三者的 CF 均在 19% 左右， φ_r 值均在 18° 左右（见表 3）。此外，T1 在不同法向应力下的 CF 变化最大，而 T3 最小；与原粒径含量相比，10 MPa 下 T1 增长 115.2%，T3 仅增长 31.7%，导致 T1 的 φ_r 变化最大而 T3 最小，从而造成 T1 的非线性程度最高。

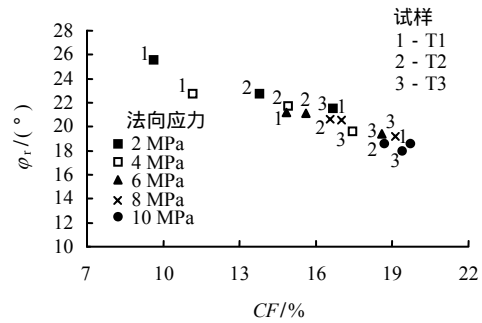


图 11 不同初始 PSD 条件下 φ_r 和 CF 之间的关系
Fig.11 Relationships of φ_r and CF for samples with different PSDs

3.2.2 不同含水率对剪切特性的影响

不同含水率条件下试样的累积位移-剪切应力关系曲线见图 8。图 8(a) 是 T1W ($w=10\%$) 在 5 级法向应力（2~10 MPa）经过 4 次推剪后得到的试验曲线。可以看出，T1W 的试验曲线呈应变硬化型曲线（除 2 MPa 法向应力下呈理想塑性模型曲线），在 4 次剪切过程后，T1W 在法向应力为 2 MPa 下降了 2.2%，与第 1 次抗剪强度几乎相同；在法向应力为 8 MPa 下抗剪强度下降已较为明显（7.2%），随着法向应力的升高，抗剪强度最高下降 12.6%（法向应力为 10 MPa）。T1D ($w=3\%$ ，见图 8(b)) 的曲线形态与 T1W 明显不同，其首次抗剪强度有较明显的峰值强度且高于 T1W。以法向应力 10 MPa 为例，T1D 的抗剪强度比 T1W 高 3.53 MPa；但随剪切次数的增多，曲线逐渐平缓，在第 4 次剪切时，曲线形态均呈理想塑性（法向应力 10 MPa 下曲线最迟呈现理想塑性状态）。此外，T1D 的抗剪强度下降较为明显：与峰值强度相比，经历 4 次剪切后，其在法向应力 2 MPa 下抗剪强度下降 49.4%，在法向应力 10 MPa 下抗剪强度最高下降 63.4%。

含水率与颗粒之间的吸力大小密切相关，含水率越大，则吸力越小。吸力主要来源于微孔的半月板结构。在第 1 次剪切过程中，低含水率试样（T1D）在较高吸力作用下产生了较大的峰值强度，但剪切面形成后，上下剪切面变为不连续面，半月板结构被破坏^[27]，由于颗粒较干燥，半月板结构很难恢复，

吸力不再对剪切强度有所贡献，造成了强度的迅速下降，使曲线在每次初始剪切过程中呈应变软化型；高含水率试样（T1W）中有较充足的水分使颗粒重新黏结，但颗粒黏性并不大（ $I_p=10.1$ ），在剪切过程中可能仅有部分半月板结构恢复，使曲线呈应变硬化型。此外，由于颗粒破碎的影响，T1D 在剪切后 CF 要比 T1W 高（见图 6）， CF 增多加剧了颗粒的定向排列^[24]，造成了 T1D 的抗剪强度下降较为明显。

图 12 是 3 种含水率（3%，7%和 10%）条件下试样的峰值强度包线。从图可以看出，峰值强度受含水率变化影响很大， c 和 ϕ_p 均随含水率的增加而提高，这与凌华等^[28]通过常含水率（ w 为 17.2%~26.7%）三轴试验和申春妮等^[29]通过控制含水率（ w 为 9%~19.52%）直剪试验得到的研究成果相一致。

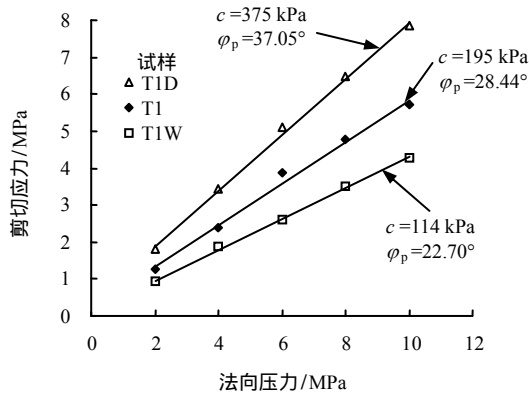


图 12 不同含水率条件下峰值剪切强度包线
Fig.12 Peak shear strength envelopes for samples with different water contents

c 和 ϕ_p 随含水率的变化趋势见图 13，可以看出， c 和 ϕ_p 随含水率的增大而线性减小。根据 Mohr-Coulomb 强度理论，可以得到用含水率表示的强度公式^[29]：

$$\tau_f = (A - w \tan B) + \sigma \tan(C - w \tan D) \quad (1)$$

式中： τ_f 为抗剪强度（MPa）； A 、 B 、 C 、 D 均为试验参数，对于本试样， $A=479.35$ kPa， $B=88.53^\circ$ ， $C=43.34^\circ$ ， $D=63.96^\circ$ 。

图 14 为不同含水率条件下残余剪切强度曲线，由图可知，残余强度随法向压力的增大而呈非线性增加，文献[30]总结了针对泥化夹层的强度试验结果，也得到了相似的趋势。考虑到含水率的影响，在法向应力 4 MPa 以下，T1W、T1 和 T1D 三者残余强度值几乎相同，在 0.9 MPa 左右；6 MPa 下 T1D

残余强度值已明显低于 T1 和 T1W；当法向应力达到 10 MPa 时，T1W 的残余强度值最大达 3.74 MPa，而 T1D 的残余强度值最小为 2.86 MPa。此外，T1D 的非线性程度最高。随着法向应力的增高，T1D 的残余内摩擦角下降最大，而 T1W 的残余内摩擦角下降最小。与 2 MPa 相比，10 MPa 下分别降低 11.3° 和 3.48°，见表 3。

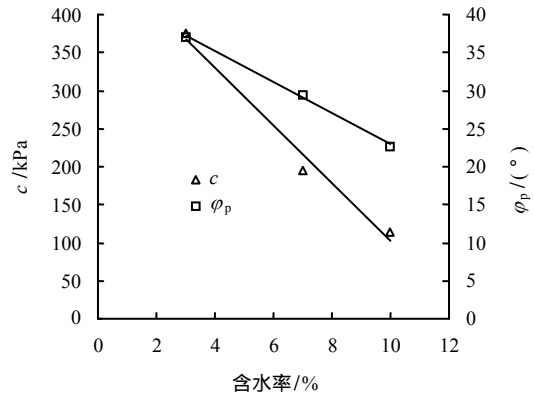


图 13 c 和 ϕ_p 与含水率之间的线性关系
Fig.13 Linear relationships between c , ϕ_p and water content

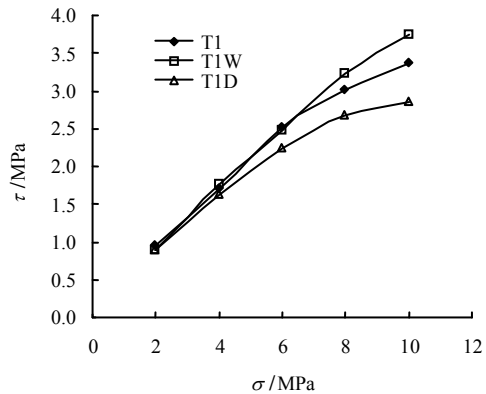


图 14 不同含水率条件下残余剪切强度包线
Fig.14 Residual shear strength envelopes for samples with different water contents

图 15 是 T1W、T1 和 T1D 在各级法向应力下 CF 与 ϕ_r 之间的关系，与图 11 的规律类似， ϕ_r 随着 CF 升高而几乎呈线性减小。三者初始 CF 一致均为 9.13%，但在颗粒破碎的影响下 CF 发生了较大的变化，且其随着法向应力的增大而差距变大（见图 7），在 10 MPa 下，三者 CF 差别最大达 9.27%，导致 ϕ_r 也差别最大（见图 14）。此外，T1D 在不同法向应力下的 CF 变化最大，而 T1W 最小。与原粒径含量相比，10 MPa 下 T1D 增长 177.9%，T1W 仅增长 76.3%，导致 T1D 的 ϕ_r 变化最大，而 T1W 最小，从而造成 T1D 的非线性程度最高。

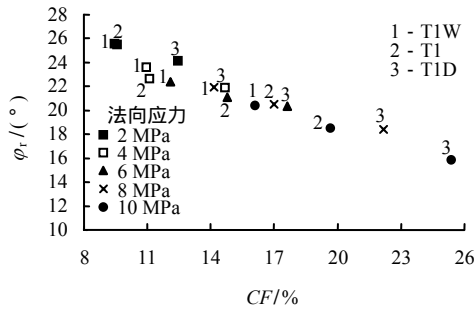


图 15 不同含水率条件下 φ_r 和 CF 之间的关系
Fig.15 Relationships of φ_r and CF for samples with different water contents

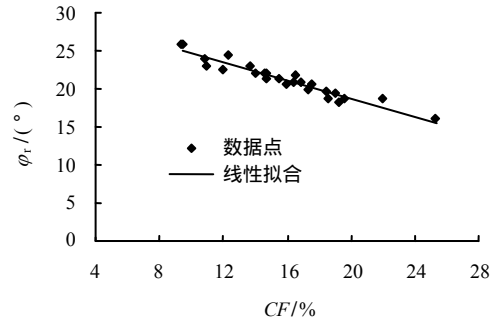


图 16 φ_r 和 CF 之间的关系
Fig.16 The relationship of φ_r and CF

3.3 残余强度的预测

3.3.1 CF 的多元线性回归分析

残余强度是层间错动带的重要特性^[31]。可以看出,残余强度与试样的 CF 关系很大,但由于颗粒破碎, CF 在不同法向应力 σ_n 、不同初始 PSD(d_{60})、不同含水率 w 条件下变化较大。针对以上 3 个因素,采用多元线性回归方法对(样本数 $n=25$)试验结果进行分析,可得

$$CF = 18.66 + 0.95\sigma_n - 7.73d_{60} - 0.89w \quad (2)$$

设显著性水平 $\alpha=0.05$, 统计量 $|t_{0.05}(\sigma_n)|=3.92$, $|t_{0.05}(d_{60})|=8.49$, $|t_{0.05}(w)|=6.09$, 均大于 $t_{0.05}(21)=2.08$, 可认为这 3 个回归系数在统计上显著。此外,式(2)的 F 值为 39.87, $F_{0.05}(3, 21)=3.07$, 显然,式(2) F 值大于 $F_{0.05}(3, 21)$ 。因此,式(2)建立的线性回归模型有效。从式(2)可以看出, CF 随着 σ_n 的增高而增大,而随着 d_{60} 和 w 的增大而减小。

3.3.2 φ_r 的初步预测

尽管本次试验的试样(T1、T2 和 T3)PSD 不同、试样(T1W、T1 和 T1D)含水率不同,但综合图 11 和图 15 上的数据(见图 16),可以发现 φ_r 与试样最终的 CF 呈线性关系,可表示为

$$\varphi_r = -0.59CF + 30.47^\circ \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得

$$\varphi_r = -0.59(18.66 + 0.95\sigma_n - 7.73d_{60} - 0.89w) + 30.47^\circ \quad (4)$$

由于本次试验是模拟现场条件而得到的结果,当实际工程中的层间错动带与本次试验试样物理性质相似,获得其现场条件下的 σ_n 、 d_{60} 和 w 后,可以采用式(4)作为试验条件范围内(2 MPa σ_n 10 MPa, 0.072 mm d_{60} 0.455 mm 和 3% w 10%) φ_r 的初步预测。

4 结 论

(1) 采用 B_r 量化 T1、T2 和 T3 的颗粒破碎程度,发现粗颗粒越多,颗粒破碎程度越大。随着颗粒粒径的增大,不仅颗粒本身缺陷增多,且颗粒之间的接触力也会增大,在颗粒接触的棱角处更易产生应力集中,从而导致颗粒破碎增大。

(2) 不同含水率下颗粒破碎机制不同。较干颗粒(T1D)由于磨损产生了更多的细小颗粒而较湿颗粒(T1W),由于破裂和摩擦产生了较大颗粒。

(3) T1、T2 和 T3 的试验曲线形态主要由细颗粒控制,均呈理想塑性模型曲线。三者相比,峰值强度差别并不大;但 T1 的残余强度包线的非线性程度最高,这主要与颗粒破碎有关。颗粒破碎造成了试样 CF 的改变, φ_r 会随着 CF 线性变化。

(4) 含水率对试验结果影响较大。含水率较高试样(T1W)试验曲线基本为应变硬化型,而含水率较低试样(T1D)呈应变软化型;且含水率越低,峰值强度越高, c 和 φ_p 随含水率线性变化。这主要受吸力(半月板结构)的影响,吸力的存在提高了低含水率试样的剪切强度,但剪切面形成之后,低含水率试样(T1D)的半月板结构破坏较严重,强度迅速下降呈软化型;而高含水率试样(T1W)有一部分颗粒重新黏结,在剪切过程中呈应变硬化。

(5) 在法向压力 4 MPa 以下, T1W、T1 和 T1D 残余强度值几乎相同;随着法向应力的增高, T1D 残余强度值最低。此外, T1D 的残余强度包线非线性程度最高。同样的,颗粒破碎是其根本原因: φ_r 随着颗粒破碎后的 CF 线性变化。在实际工程中,虽然降低层间错动带的含水率可以获得较高的峰值强度,但一旦错动后,其残余强度可能最低,工程设计中应同样给予重视。

(6) φ_r 仅与试验后的 CF 线性相关,当实际工程中的层间错动带与本次试验试样物理性质相似

时，可使用式(4)对层间错动带 φ_r 做初步预测。

参 考 文 献

- [1] 张咸恭, 聂德新, 韩文峰. 围压效应与软弱夹层泥化的可能性分析[J]. 地质评论, 1990, 30(2): 160 - 167.
ZHANG Xian-gong, NIE De-xin, HAN Wen-feng. The effect of confining pressure and the possibility of argillization of weak intercalations[J]. **Discussion of Geology**, 1990, 30(2): 160 - 167.
- [2] 符文熹, 聂德新, 尚岳全, 等. 地应力作用下软弱层带的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 584 - 587.
FU Wen-xi, NIE De-xin, SHANG Yue-quan, et al. Study on engineering properties of weak layers under ground stresses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 584 - 587.
- [3] 王行本. 关于软弱夹层的抗剪强度问题[J]. 水力发电, 1985, (4): 51 - 56.
WANG Xing-ben. The shear strength of the infilled joint soils[J]. **Water Power**, 1985, (4): 51 - 56.
- [4] 胡卸文. 无泥型软弱层带强度参数的取值研究[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 52 - 56.
HU Xie-wen. Shear strength parameter of non-clay weak interbed[J]. **Journal of Mountain Science**, 2000, 18(1): 52 - 56.
- [5] 唐良琴, 聂德新, 任光明. 软弱结构面粒度成分与抗剪强度参数的关系探讨[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 143 - 147.
TANG Liang-qin, NIE De-xin, REN Guang-ming. Discussion on the relation between granulometric composition and shear strength parameter of weak structural plane[J]. **Acta of Engineering Geology**, 2003, 11(2): 143 - 147.
- [6] 肖树芳, 阿基诺夫 K. 泥化夹层的组构及强度蠕变特性[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- [7] 马金荣. 深层土的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学建筑工程学院, 1999.
- [8] ABOUZAR SADREKARIMI, SCOTT M OLSON. Particle damage observed in ring shear tests on sands [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(5): 497 - 515.
- [9] BOLTON M D, NAKATA Y, CHENG Y P. Micro-and macro-mechanical behavior of DEM crushable materials[J]. **Géotechnique**, 2008, 58(6): 471 - 480.
- [10] 赵阳, 周辉, 冯夏庭, 等. 高压力下层间错动带残余强度特性和颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3329 - 3305.
ZHAO Yang, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Residual shear behaviour and particle crushing of an infilled joint soil under high stress[J]. **Rock and soil mechanics**, 2012, 33(11): 3329 - 3305.
- [11] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145 - 2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [12] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [13] PIERRE DELAGE, MARTINE AUDIGUIER, CUI YUJUN, et al. Microstructure of a compacted silt[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(1): 150 - 158.
- [14] TINJUM J M, BENSON C H, BLOTZ L R. Soil water characteristic curve of compacted clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(11): 1060 - 1069.
- [15] HAINES W B. The volume changes associated with variations of water content in soil[J]. **Journal of Agriculture Science**, 1923, 03(13): 296 - 310.
- [16] 闵弘, 刘小丽, 魏进兵, 等. 现场室内两用大型直剪仪研制(1): 结构设计[J]. 岩土力学, 2006, 26(1): 168 - 172.
MIN Hong, LIU Xiao-li, WEI Jin-bing, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test (I): configuration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 26(1): 168 - 172.
- [17] FUKUMOTO T. Particle breakage characteristics of granular material[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(1): 26 - 40.
- [18] LADE P V, YAMAMURO J A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(4): 309 - 316.
- [19] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(10): 177 - 1192.
- [20] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3649 - 3654.
WANG Guang-jin, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3649 - 3654.

- [21] MIURA N, YAMANOUCHI T. Effect of pore water on the behavior of a sand under high pressures[J]. **Technology Reports of the Yamaguchi University**, 1974, 1(3): 409 - 417.
- [22] GUYON E, TROADEC J P DU. Sac de billes au tas de sable[M]. Paris: Odile Jacob Sciences, 1994.
- [23] SKEMPTON A W. Long-term stability of clay slopes[J]. **Géotechnique**, 1964, 14(2): 75 - 102.
- [24] 陈希哲. 粗粒土的强度与咬合力的试验研究[J]. **工程力学**, 1994, 11(4): 56 - 63.
CHEN Xi-zhe. Research on the strength of the coarse grained soil and the interlocking force[J]. **Engineering Mechanics**, 1994, 11(4): 56 - 63.
- [25] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [26] MESRI G, CEPEDA-DIAZ A F. Residual shear strength of clays and shales[J]. **Géotechnique**, 1986, 36(2): 269 - 274.
- [27] VAUNAT J, AMADOR C, ROMERO E, et al. Residual strength of low plasticity clay at high suctions[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils. Reston: [s. n.], 2006.
- [28] 凌华, 殷宗泽, 蔡正银. 非饱和土的应力-含水率-应变关系试验研究[J]. **岩土力学**, 2008, 29(3): 651 - 655.
LIN Hua, YIN Zong-ze, CAI Zheng-yin. Experimental study of stress-water content-strain relationship of unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 651 - 655.
- [29] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(5): 1347 - 1351.
SHEN Chun-ni, FANG Xiang-wei, WANG He-wen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1347 - 1351.
- [30] 龚壁卫, 郭熙灵. 泥化夹层残余强度的非线性问题探讨[J]. **大坝观测与土工测试**, 1997, 21(5): 38 - 40.
GONG Bi-wei, GUO Xi-ling. Study on the nonlinearity of shear strength of mudded intercalation[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 1997, 21(5): 38 - 40.
- [31] 王顺, 项伟, 崔德山, 等. 不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(10): 2967 - 2972.
WANG Shun, XIANG Wei, CUI De-shan, et al. Study of residual strength of slide zone soil under different ring-shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(10): 2967 - 2972.
-
- 上接第 12 页**
- [13] 姚仰平, 谢定义. 振动拉压扭剪三轴仪及其试验研究[J]. **西安建筑科技大学学报**, 1996, 28(2): 129 - 133.
YAO Yang-ping, XIE Ding-yi. Extension-compression and torsion vibrating triaxial apparatus and experimental investigation[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture & Technology**, 1996, 28(2): 129 - 133.
- [14] 于艺林, 张建民, 童朝霞, 等. 定轴排水剪切试验中各向异性砂土的力学响应[J]. **岩土力学**, 2011, 32(6): 1637 - 1642.
YU Yi-lin, ZHANG Jian-min, TONG Zhao-xia, et al. Behavior of anisotropic mica sand under fixed principal stress axes drained shear test [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 32(6): 1637 - 1642.
- [15] YU H S, YUAN X. The importance of accounting for non-coaxial behavior in modeling soil-structure interaction[C]//Prediction, Analysis and Design in Geomechanical Applications. [S. l.]: [s. n.], 2005: 709 - 718.
- [16] NAKASHIMA H, SHIOJI Y, TATAYAMA K, et al. Specific cutting resistance of lunar regolith simulant under low gravity conditions[J]. **Journal of Space Engineering**, 2008, 1(1): 58 - 68.
- [17] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(2): 209 - 214.
JIANG Ming-jing, LI Li-qing. TJ-1 lunar soil simulant[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(2): 209 - 214.
- [18] JIANG M J, LI L Q, SUN Y G. Properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2012, 25(3): 463 - 469.
- [19] 柳艳华. 天然软黏土屈服特性及主应力轴旋转效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
- [20] 郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [21] JIANG M J, SHEN Z F, LI L Q, et al. A novel specimen method for TJ-1 lunar soil simulant in hollow cylinder apparatus[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2012, 4(4): to be published.
- [22] 史宏彦, 谢定义, 汪闻韶. 平面应变条件下主应力轴旋转产生的应变[J]. **岩土工程学报**, 2001, 23(2): 162 - 166.
SHI Hong-yan, XIE Ding-yi, WANG Wen-shao. Strain due to rotation of principal stress axes under plane strain condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(2): 162 - 166.