

文章编号:1001-4888(2010)01-0061-07

块石对土石混合体力学性能的影响研究^{*}

欧阳振华¹, 李世海², 戴志胜³

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

3. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 土石混合体是一种由强度较高岩块、强度较低的土体充填成分及相应孔隙等多相体系组成的复杂地质材料。我国中西部地区诸多地质灾害的发生均与其抗剪强度密切相关。影响土石混合体力学性能的因素很多。本文采用柔性边界条件下的大型剪切实验,从含石量、块石排列、块石尺寸三个方面研究了块石对土石混合体力学性能的影响。通过正交实验确定了3种因素对土石混合体抗剪强度的影响顺序及各因素的显著性水平,研究发现在这3个影响因素中,块石尺寸对土石混合体抗剪性能的影响最大,含石量次之,块石排列的影响最小。

关键词: 土石混合体; 大剪切实验; 影响因素; 正交实验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

0 引言

土石混合体是一种非常复杂的不连续介质材料,它是由具有一定尺寸的强度较高岩块、强度相对较低的土体充填成分及相应的孔隙等组成的多相体系^[1]。土石混合体广泛分布在我国三峡库区^[2]、青藏高原和攀西地区,如川藏公路沿线八一至然乌段400km发育的7个大型滑坡中就有6个为土石混合体滑坡;攀西地区60%以上的滑坡是土石混合体滑坡。

土石混合体由岩石和土体组成,具有非连续、非均匀、流-固耦合以及未知“初始”状态的特性^[3],它的组成颗粒物理力学性质差异很大,结构上既有土颗粒之间的细观结构,又有岩石与土颗粒之间的宏观结构,现有岩土力学的本构模型很难用来描述这种特殊介质。在现有的《工程地质手册》、岩土工程勘察规范以及其他规范中,土石混合体被称之为“碎石土”,其力学参数是通过土石混合体中土体进行试验,再乘以一定的折减系数而得到的,这种试验方法决定了所得的力学参数与实际情况会有较大差异。造成这种差异的原因来自两个方面,其一是折减系数选取具有较大的随意性,其二是忽略了碎石对土石混合体力学参数的影响。碎石对土石混合体力学性能肯定是有影响的,而且土石混合体强度的大小有时是由控制性块石决定的。但是文献对这方面的研究比较少。本文旨在通过设计土石混合体大型剪切试验,探讨块石对土石混合体力学性能的影响。

1 柔性边界下的剪切试验

对于岩土力学实验来说,加载端的边界条件有两种,一种是由刚性边界提供的均匀位移边界条件,现有的岩土力学实验设备几乎都是采用这种加载条件;另一种是由柔性边界提供的均匀力边界条件,这种边界条件的实验机并不多见。开展柔性边界条件下的土石混合体力学试验研究,不仅可以发展一种

^{*} 收稿日期: 2009-07-02; 修订日期: 2009-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10702072)

通讯作者: 欧阳振华(1976-),男,博士,工程师,主要从事工程地质灾害监测与防治研究。E-mail: oyzhua@163.com

试验方法还可以作为理论上的补充。另外,由于土石混合体具有不均匀性,这类地质体滑坡等灾害发生时其周边不可能是等位移的,更接近于等应力边界。由此可见,柔性边界下的土石混合体剪切试验研究具有一定的理论价值和工程应用价值。

1.1 不同边界条件下的材料力学响应

已有的研究成果表明,两种不同边界条件下获得的实验结果是有区别的。Hill^[4]认为:当微结构代表性体积单元足够大时,材料在均匀力边界条件和均匀位移边界条件下的整体响应将趋于一致。否则均匀力边界条件将给出材料有效特性的下限解,而均匀位移边界条件将给出有效特性的上限解。Huet^[5]对含有随机颗粒增强体的复合材料在弹性范围内进行了两种边界条件的加载试验,发现,当代表性体积单元不具有统计性时,均匀力边界条件所得弹性模量确实小于均匀位移边界条件所得弹性模量,见图 1。Jiang^[6]等对含有随机颗粒增强体的复合材料进行了弹塑性加载试验,不仅发现均匀位移边界条件所得响应高于均匀力边界条件所得响应,而且发现塑性应变的分布也有所不同。位移边界条件产生更为密集、均匀分布的滑移带,而应力边界条件产生更为局部化的变形场。

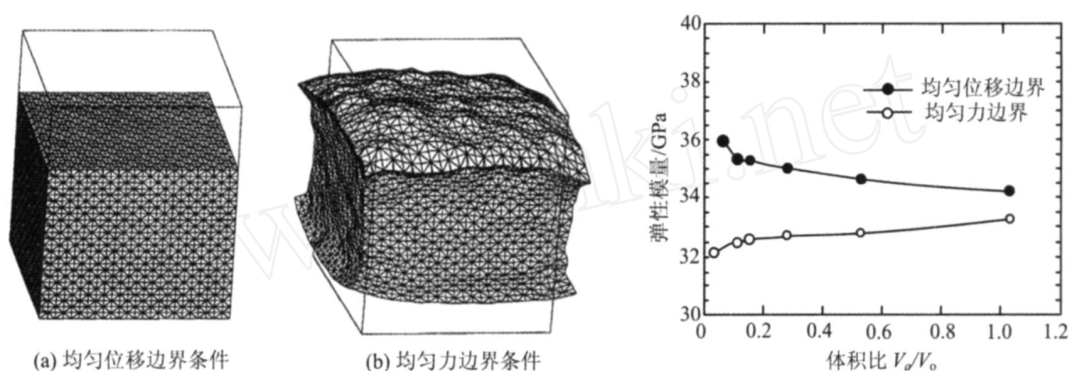


图 1 不同边界条件及其对材料弹模的影响^[5]

Fig. 1 Different boundary conditions and their impact on the material elastic modulus

1.2 柔性边界大型剪切试验装置

柔性边界大型剪切试验装置是根据中国科学院力学研究所的发明专利“岩土体抗剪强度的现场测试方法及其装置”(专利号:ZL2003101022103)的原理制成的,试验装置如图 2 所示,主要由加载装置(千斤顶)、测力装置(压力传感器)和柔性边界组成。柔性边界由装在方盒子中的柔性水囊构成,在试验过程中同一时刻侧面各点处的压力是相等的。

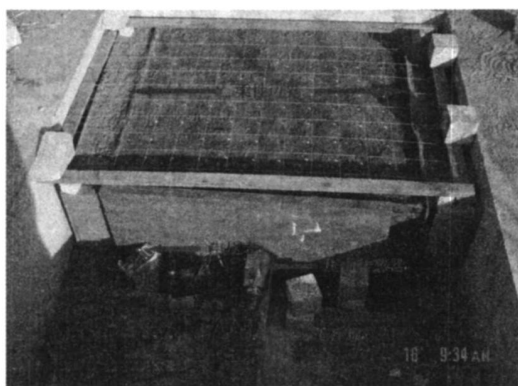


图 2 土石混合体大剪试验

Fig. 2 Large-scale shear test of soil-rock mixture

试件的尺寸为 110cm × 110cm × 40cm。试验过程中控制千斤顶加载速率在 0.2mm/s 左右,千斤顶与压力传感器相连,压力传感器与电压表相连。土石混合体承受的力是通过与压力传感器相连的电压表的读数来测定的。在试验开始前对千斤顶 - 压力传感器 - 电压表系统进行压力标定,标定结果显示,加载力和电压值之间存在如下线性关系:

$$F = au - b$$

(1)

式中, F 为加载力, kN; u 为电压, mV; a, b 为标定参数, 本次试验标定 $a = 10.06 \text{ kN/mV}$, $b = 0.11 \text{ kN}$ 。

试验过程中, 每 5mm 记录一次电压表读数, 当电压表的读数不再增大 (或突然下降) 时说明试件已经破坏, 停止加载, 记录电压表显示值的最大值, 其对应加载力作为试件的破坏载荷 F_{\max} 。

2 试验设计

2.1 影响因素的确定

影响土石混合体力学特性的因素很多。油新华^[7]通过野外原位试验发现含石率是影响土石混合体的一个重要指标;徐文杰,胡瑞林等^[8]通过大型野外水平推剪试验发现含石量和水是影响土石混合体强度的重要因素;武明^[9]指出土石混合料工程性质取决于粗、细料的含量;赫建明^[10]认为石块形状和排列对土石混合体力学特性有一定的影响;李世海等^[11,12]通过数值模拟发现土石混合体的混合比和岩石块度大小是影响其变形和破坏特性两个重要因素。综合前人的研究成果不难发现,就碎石而言,影响土石混合体力学性质的因素主要集中在含石量、石块排列、石块尺寸三个方面。本文确定选取这三个影响因素来加以研究,含石量用体积百分比来衡量;石块排列用块石受力面的外法线方向与力的加载方向所成的角度来表征;石块尺寸分别采用不同边长 (分别为 3cm、5cm 和 10cm) 的立方体石块来体现。

2.2 试验方案设计

常用的试验设计方法有正交设计法、均匀设计法、单纯形优化法、双水平单纯形优化法、回归正交设计法、序贯试验设计法等。各种试验设计方法都有其自身的特点。所面对的任务与要解决的问题不同,选择的试验设计方法也应有所不同。正交试验设计法在明显减少试验的次数的同时不影响试验点的均衡分散性,而且可以配合相应的极差分析方法、方差分析方法、回归分析方法等对试验结果进行分析,引出许多有价值的结论。因而日益受到科技工作者的重视,在实践中获得了广泛的应用。

本次试验的目的是研究土石混合体力学性能的影响因素,因此选择土石混合体破坏时的载荷作为试验指标,而且抗剪强度越大越好。本次试验需要研究三个影响因素,因而直接套用 $L_9(3^4)$ 来安排 3 因素 3 水平数的试验,试验因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验的因素水平表
Tab.1 Factors and levels of orthogonal tests

水平	因素		
	A 含石量 (%)	B 夹角 (°)	C 块石边长 (cm)
1	10	0	3
2	20	30	5
3	40	45	10

3 试验结果及其分析

3.1 土石混合体大剪试验

土石混合体由具有一定粒径级配的土体和立方块大理岩构成,筛分试验获得的土体颗粒粒径分配曲线如图 3 所示。为了便于试验的重复和做一般性的探讨,土体与块石分层隔开,不按随机排列。土石混合体构成的方式是,先铺垫 5cm 的土体,压实后再分层放置块石和土体,最后覆盖一层土体并压实,使整个试件的高度为 40cm。块石放置时根据块石的尺寸、含量和角度各有不同。如图 4 所示的土石混合体试件中块石的边长为 10cm,含石量 10%,块石受力面的外法线方向与力的加载方向所成的角度为 45°。每次试件构筑完成后,用环刀取样进行土体的室内试验,对试验结果进行数理统计分析,得到土体的密度为 $1.82 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$,含水量在 $16.8 \pm 1.2\%$ 之间。

正交试验开始前,先用纯土体 (不放置任何块石) 作了 3 组实验,测得其破坏载荷分别为:19.3kN、20.7kN 和 19.9kN。正交试验按表 $L_9(3^4)$ 的安排,共需作 9 组试验,每组试验作平行试验 3 次,取 3 次试验结果的平均值作为试验测量结果,绘出试验中各试件加载力 - 位移曲线如图 5 所示。

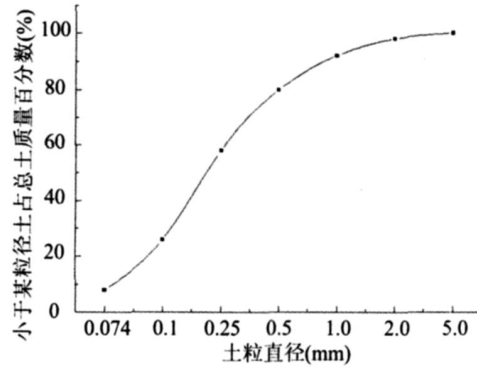


图 3 土体颗粒粒径分配曲线

Fig. 3 Particle size distribution curve of soil

比较试验 1、2 和纯土体的剪切试验的破坏载荷发现,3 者破坏载荷相差不大,这说明当块石尺寸较小,且含石量不大的情况下,土石混合体中碎石对其剪切性能影响并不大。

从图 5 中可以看出,试验 1、2 和 3 的土石混合体试样破坏时其压缩位移比试验 7、8 和 9 的试样要大,这说明块石含量增多以后块石能在一定程度上阻碍土体的变形。

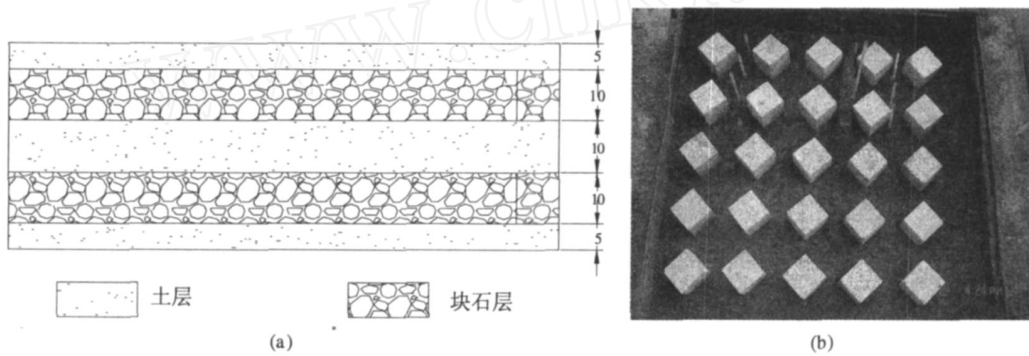


图 4 土石混合体分层示意图(单位:cm)

Fig. 4 Hierarchical diagram of soil-rock mixture (unit: cm)

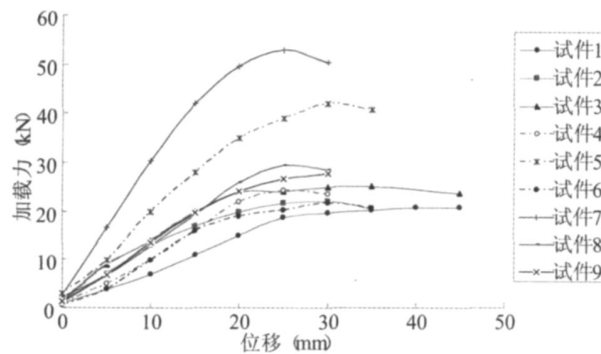


图 5 实验中试件加载力-位移曲线

Fig. 5 The specimen load force-displacement curves

3.2 极差分析

将图 5 中各试件加载力-位移曲线中的最大加载力作为该土石混合体的破坏载荷,进行正交试验的极差分析,见表 2,并绘出各因素的水平影响趋势图,见图 6。

表 2 试验数据极差分析计算表

Tab.2 The table of experimental data and range analysis

试验号	因素				破坏载荷 F_{\max} (kN)
	A	B	C		
1	1	1	1	1	20.8
2	1	2	2	2	22.1
3	1	3	3	3	25.2
4	2	1	2	3	24.4
5	2	2	3	1	42.1
6	2	3	1	2	21.7
7	3	1	3	2	52.8
8	3	2	1	3	29.5
9	3	3	2	1	27.8
	68.1	98	72	90.7	
	88.2	93.7	74.3	96.6	
	110.1	74.7	120.1	79.1	
k	3	3	3	3	$T = 266.4$
$/k$	22.70	32.67	24.00	30.23	
$/k$	29.40	31.23	24.77	32.20	
$/k$	36.70	24.90	40.03	26.37	
R	14.00	7.77	16.03	5.83	

由极差分析表可以看出,因素 C 的极差最大,因素 A 次之,因素 B 最小。这说明,影响土石混合体抗剪强度的主次顺序为 C A B,即在所研究的三个影响因素中,石块的大小是影响土石混合体抗剪强度的最主要因素,含石量是次主要影响因素,块石的排列对土石混合体强度的影响是最小的。

3.3 方差分析

正交试验的直观分析法简便、直观、计算量小,但不能估计试验误差,即不能区分试验结果的差异是由各因素的水平变化而导致,还是由试验的随机波动而导致的。要解决此问题,需要对试验结果做方差分析。方差分析除了能区分试验结果的差异是由于因素水平不同引起的,还是由于试验误差引起的外,还可以对影响土石混合体力学性能的各因素的显著性水平给予精确的数量评估。采用正交试验的方差分析法对试验数据进行分析,分析结果如表 3 所示。

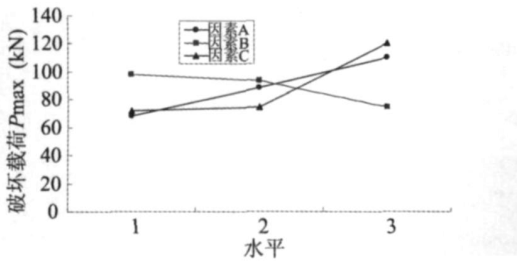


图 6 各因素与破坏荷载的关系图

Fig.6 Relationship between the failure force and different factors

表 3 方差分析结果

Tab.3 Results of variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
A	294.18	2	147.09	5.57	*
B	102.49	2	51.24	1.94	
C	490.73	2	245.36	9.29	**
e	52.85	2	26.42		

注： $F_{0.25}(2,2) = 3.00$, $F_{0.1}(2,2) = 9.00$ 。

方差分析结果表明: 试验结果的差异是由因素水平不同引起,并不是由试验误差引起的; 块石尺寸对土石混合体抗剪性能的影响高度显著,含石量对土石混合体抗剪性能的影响显著,块石排列对土石混合体抗剪性能的影响不显著。

4 结论

(1) 当土石混合体中的碎石达到一定尺寸和含量时,碎石就成为影响土石混合体力学性能的重要因素,土石混合体剪切强度随着碎石尺寸的增大和含量的增多而增大。尺寸较小的碎在石含量较少的情况下,对土石混合体中碎石对其剪切性能影响并不大。

(2) 就碎石而言,含石量、石块排列、石块尺寸均为影响土石混合体力学性能的因素,其中块石尺寸对土石混合体抗剪性能的影响高度显著,含石量次之,块石排列的影响不显著。

参考文献:

- [1] 徐文杰,胡瑞林. 循环荷载下土石混合体力学特性野外试验研究[J]. 工程地质学报,2008,23(3):63-69 (XU Wenjie, HU Ruilin. Field horizontal push shear test for mechanical property of soil-rock mixtures under cyclic loading [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 23(3): 63-69 (in Chinese))
- [2] 殷跃平,张加桂,陈宝荪等. 三峡库区巫山移民新城址松散堆积体成因机制研究[J]. 工程地质学报,2000,8(3):265-271 (Yin Yueping, Zhang Jiagui, Chen Baosun, et al. Formation mechanism of large-scale loose sediment at the relocation sites of Wushan County on the three Gorges [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3): 265-271(in Chinese))
- [3] 李世海,李晓,刘晓宇. 工程地质力学及其应用中的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(6):1125-1140 (LI Shihai, LI Xiao, LIU Xiaoyu. Some issues in engineering geomechanics and its applications, Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1125-1140 (in Chinese))
- [4] Hill, R. Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles [J]. J. Mech. Phys. Solids, 1963, 11: 357-372.
- [5] Huet, C. Coupled size and boundary-condition effects in viscoelastic heterogeneous and composite bodies [J]. Mech. Mater, 1999, 31: 787-829.
- [6] Jiang M, Ostoja-Starzewski M, Jasiuk I. Scale-dependent Bounds on Effective Elastoplastic Response of Random Composites [J]. J. Mech. Phys. Solids, 2001, 49: 655-673.
- [7] 油新华,汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1537-1540 (You Xinhua, Tang Jinsong. Research on horizontal push-shear in-situ test of soil and rock-mixture [J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2002, 21(10):1537-1540(in Chinese))
- [8] 徐文杰,胡瑞林,谭儒蛟等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(6):1270-1277 (Xu Wenjie, Hu Ruilin, Tan Rujiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate in the right bank of Longpan in Tiger-Leaping Gorge area [J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2006, 25(6):1270-1277(in Chinese))
- [9] 武明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究[J]. 公路,1997,(1):40-49 (WuMing. Experimental study of mechanical features on the heterogeneous filling of rock and soil aggregate [J]. Highway, 1997, (1): 40-49(in Chinese))
- [10] 赫建明. 三峡库区土石混合体的变形与破坏机理研究[D]. 北京:中国矿业大学博士学位论文(北京校区),2004 (He Jianmin. Study of deformation and failure mechanisms of rock-soil aggregate in three gorges reservoir area [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2004 (in Chinese))
- [11] Shihai Li, Manhong Zhao, Yuannian Wang. A new numerical method for DEM block and particle model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3):436.
- [12] 李世海,汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. 岩土工程学报,2004,26(2):172-177 (LI Shihai, WANG Yuannian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D-DEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2):172-177 (in Chinese))

On the Influence Factors of Mechanical Properties for Soil- Rock Mixture

OU YANG Zhen-hua¹, LI Shi-hai², DAI Zhi-sheng³

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract : Soil-rock mixture, which is made from such as high strength rock-block, low strength soil filling ingredient and corresponding pores, is a kind of complex multi-phase geological materials. Many geological disasters occurred in Chinese central and western regions are close related with its shear strength. The mechanical properties of soil-rock mixture are affected by many factors. In this paper, using large-size shear test under flexibility boundary condition, the influence of rock on shearing strength of soil-rock mixture was studied from three aspects: such as rock content, rock arrangement and size of block-stone. Through orthogonal test, the essentiality and its significance of above-mentioned three factors were studied. Results show that among three factors the size of block-stone has most important influence on the shear properties of soil-rock mixture, the stone content takes the second position, and the arrangement of block-rocks takes the third one.

Key words : soil-rock-mixture; large-size shear test; influence factor; orthogonal test