

不同边界条件下土石混合体破坏机制研究

范永波,李世海,侯岳峰,冯 春
(中国科学院力学研究所,北京 100190)

摘要: 土石混合体是非均匀、非连续的,在外力作用下,其内部应力分布是不均匀的,其真正的边界条件是等应力边界条件。现有的土力学实验机都是刚性边界加载,即按等位移边界条件加载,不适用于研究非均匀材料。基于此自行研制了等应力边界加载实验机,通过采用柔性压头和柔性底座施加等应力边界条件,研究两种边界条件下土石混合体抗剪强度参数的差异,同时采用课题组自行研发的 CDEM(Continuum-based Discrete Element Method) 计算软件,开展了相应的数值计算,结果表明,传统的等位移边界条件所得不均匀地质体参数明显大于同等条件下等应力边界条件所得参数(约 20%),是偏不安全的。

关键词: 土石混合体; 不同边界条件; 三轴实验

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)03-0048-04

土石混合体滑坡在地质灾害中占有很大比重,三峡库区 80% 以上的滑坡为该类型滑坡,如新滩滑坡、黄腊石滑坡等^[1-3]; 青藏高原川藏公路沿线八一至然乌段 400km 发育的 7 个大型滑坡中有 6 个为土石混合体滑坡,占 86%^[4-5]; 攀西地区的 816 个滑坡中,碎石土滑坡 500 个,占 61.3%^[6-7]; 土石混合体滑坡造成的损失高达 200 亿元/年^[8],严重影响了国民经济建设、人民正常生活与生命安全,对此类滑坡进行系统的基础性研究具有特殊的理论和实用价值。

土石混合体(rock and soil aggregate, RSA)^[9] 是一种复杂的非均匀非连续介质材料,具有材料非均质、块石分布非均匀、土石胶结非连续和典型的尺寸效应等结构特征,在外荷载作用下,由于土体与岩石块体刚度和强度的差异性,原则上讲,在施加荷载接触面位置应产生不同的位移或变形,即材料内每一点的应力状态是不同的。现有刚性加载实验机提供的等位移边界条件,对材料变形起到束缚或限制的作用,难于提供真正意义上的非均匀材料变形过程或特点。柔性三轴实验机正是基于均匀加载的角度,通过柔性水囊提供等应力边界条件,更好地研究非均匀、非连续介质的变形和破坏规律。

本文通过开展两种边界条件下不同围压、不同含石量土石混合体三轴实验,探讨其不同破坏模式、抗剪

强度参数差异性。

1 实验设备研制及试样制备

1.1 实验原材料基本特征

实验土样取自于某土石混合体边坡滑带附近,颜色为黄褐色,石块采用边长 5cm 的正方体花岗岩。

1.2 实验设备

实验采用的微机控制电液伺服柔性三轴实验机为中国科学院力学研究所自主设计研发。该系统能对粗粒土、细粒土按规定组成的圆试样通过压力室进行静态三轴实验,测定总抗剪强度和有效抗剪强度参数。最大轴压 10MPa,围压范围 0~5MPa。

1.3 试样制备

根据土工实验方法标准(GB/T50123-1999),对原状土进行了颗粒分析实验,筛选出 5 种粒径范围为 $d < 0.074\text{mm}$ 、 $0.074 < d < 0.25\text{mm}$ 、 $0.25 < d < 0.5\text{mm}$ 、 $0.5 < d < 1\text{mm}$ 、 $1 < d < 2\text{mm}$ 的土样,土样颗分曲线见图 1。将土样在干燥箱中烘烤,按含水率 8% 加水拌和均匀,在护筒中分层压制成型,整个过程均在乳胶囊中进行,为防止石块将胶囊挤破,目前采用石块规则排列方式,与实际情况会有些差别(图 2)。

试样直径 300mm,高 600mm,本次实验设计了 2 种边界条件下不同含石量、不同围压三轴实验共 18 组,以研究其强度及变形特性,含石量分别为 10%、20%、30%,围压分别为 0.2、0.3、0.4MPa。试样均为重塑样,在试验机上进行预压,初始参数如表 1 所示,保证试样具有相同初始状态、相同岩性(花岗岩)、相同块石尺寸,边长 50mm。

收稿日期: 2012-07-16; 修订日期: 2012-09-26

基金项目: 973 项目(2010CB731506); 国家自然科学基金项目(11002146)

作者简介: 范永波(1980-),男,博士,助理研究员,主要从事岩土体力学相关科研工作。

E-mail: ybfan@imech.ac.cn

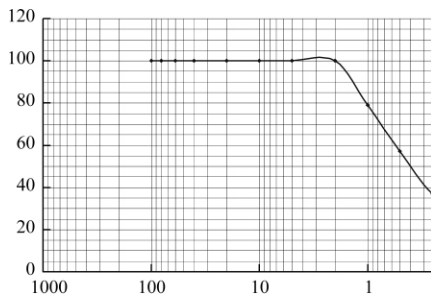


图1 土样颗粒分曲线

Fig.1 Grain size curves of soil samples

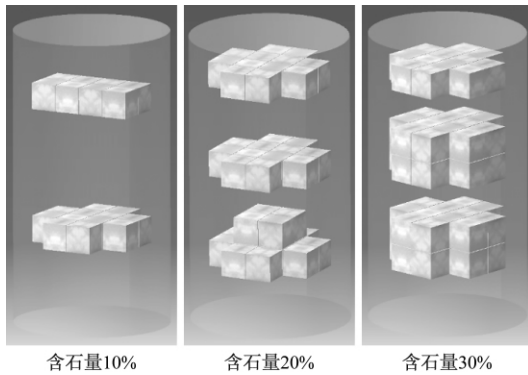


图2 不同含石量的石块排列方式

Fig.2 Stone arrangement of different content of stones

表1 九组土石混合体初始参数

Table 1 Initial conditions of the samples

样品编号	土质量 (kg)	岩块质量 (kg)	土石混合体密度 (g/cm ³)	含石量 (%)	含水量 (%)	围压 (MPa)
RSA-1	67.5	7.50	1.985	10	8	0.2
RSA-2	67.5	7.50	1.851	10	8	0.3
RSA-3	67.5	7.50	1.979	10	8	0.4
RSA-4	60.0	15.0	2.090	20	8	0.2
RSA-5	60.0	15.0	1.897	20	8	0.3
RSA-6	60.0	15.0	2.051	20	8	0.4
RSA-7	45.5	19.5	1.744	30	8	0.2
RSA-8	45.5	19.5	1.841	30	8	0.3
RSA-9	45.5	19.5	1.976	30	8	0.4

2 2种边界条件下土石混合体强度及变形特性

等应力边界条件下,土石混合体应力应变曲线呈现明显的三段式:挤密压实、弹性变形、塑性变形(图3),呈现明显的残余强度特性。石块在整个实验过程中完好无损,由于受到石块阻挡,土体呈断续剪切破坏并伴随试样底部局部张破坏,其独有的破坏模式充分反映了材料的非均匀非连续特性。

两种边界条件下,土石混合体均出现明显的鼓胀现象,同时在等应力边界条件下又表现出与刚性边界

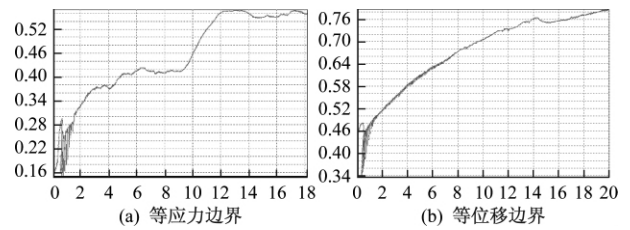


图3 土石混合体应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of RSA

条件下不一样的破坏形态,即试样上下端面,由于石块与土压缩模量的差异,表现出不同的压缩特性,石块上部土体呈现明显凸起,上下端面相似(图4);同时,随着含石量的变化,试样破坏位置有所不同。

由表2可看出,同等条件下,等应力边界条件所得土石混合体峰值强度均小于等位移边界所得强度。以含石量20%为例,根据三轴压缩实验结果绘制莫尔应力圆及强度包络线(图5),3种围压的莫尔应力圆基本上均与强度包络线相切,与土体相似,基本满足莫尔-库伦破坏准则,等应力边界条件下土石混合体粘聚力0.085MPa,内摩擦角20°;等位移条件下粘聚力0.105MPa,内摩擦角25°。

表2 初始参数及实验结果对比表

Table 2 Comparison between results of two boundary conditions

含石率 (%)	10			20			30		
围压 (MPa)	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
等应力边界	0.320	0.650	0.960	0.560	0.720	0.900	0.950	1.110	1.300
等位移边界	0.670	0.850	0.980	0.700	0.780	0.941	0.750	1.300	1.600

3 基于连续介质的离散元方法(CDEM)两种边界条件加载数值实现

采用离散元方法CDEM进行计算,计算模型为Mohr-Coulomb理想弹塑性模型,土石混合体试样及加载条件同室内实验保持一致,参数取值见表3。

表3 材料参数

Table 3 Parameter of material

参数名称	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	粘聚力 (kPa)	抗拉强度 (kPa)	内摩擦角 (°)	剪胀角 (°)
土	1580	0.015	0.35	15	3	25	10
块石	3000	40	0.25	6000	3000	45	15

3.1 模型加载方式实现

刚性边界条件实现方式:模型底部完全固定,顶部水平方向固定,先在模型侧壁及顶部施加静水压力(围压),而后在顶部施加恒定法向速度,从而实现刚

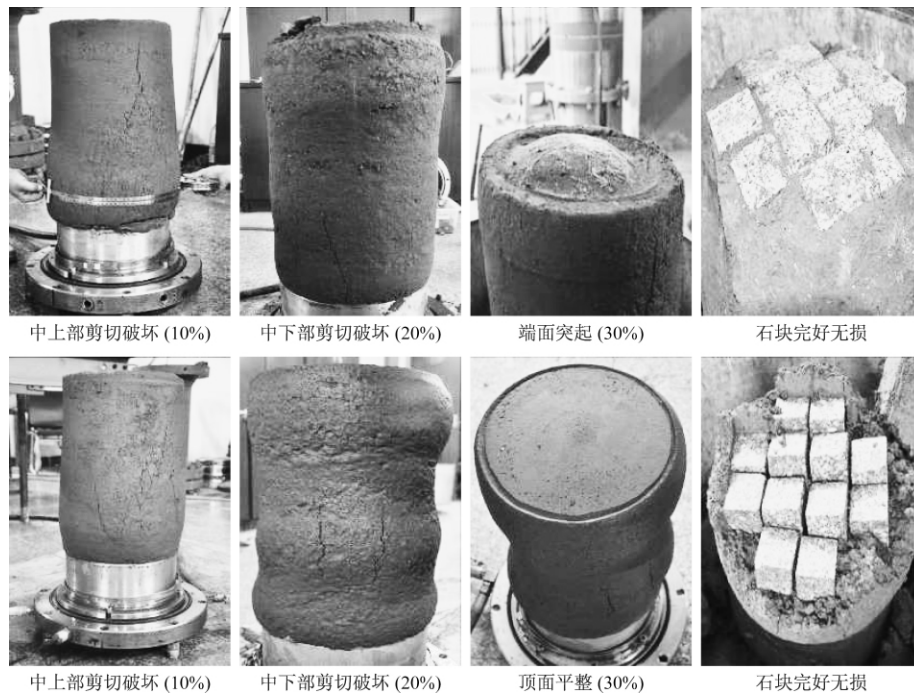


图 4 两种边界条件下土石混合体破坏及变形性状

Fig. 4 Failure and deformation behavior of RSA under two boundary condition

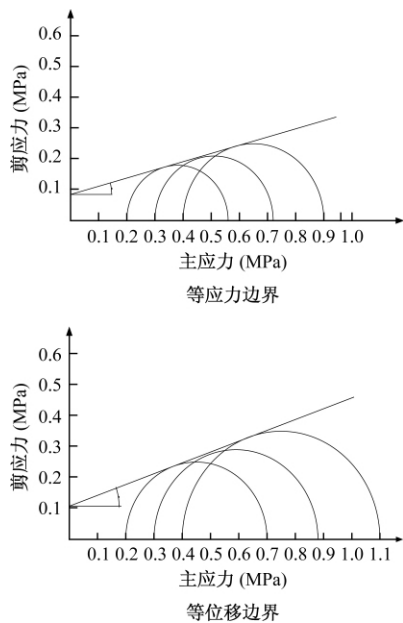


图 5 莫尔应力圆及强度包络线

Fig. 5 Mohr stress circle and the failure envelope

性加载。柔性边界条件实现方式: 模型底部最外侧全部固定, 顶部最外侧水平方向固定, 先在模型侧壁、顶部及底部施加静水压力(围压), 然后在顶部、底部施加线性增大的法向面力, 从而实现柔性加载。

3.2 数值计算结果及分析

两种边界条件下土石混合体应力应变数值计算曲线

如图 6 所示。无论等应力或等位移加载, 10% 含石量时在侧壁中上部出现鼓胀破坏; 20% 含石量时在侧壁中下部出现鼓胀破坏; 30% 含石量时在模型顶、底两端出现鼓胀破坏。从图 6 中可看出, 随着含石量增大, 土石混合体的综合弹性模量逐渐增大, 失稳时的轴压逐渐增大, 理想塑性变形趋势逐渐减弱, 而应变强化特性逐渐趋于明显, 与室内试验结果完全吻合; 较等位移边界加载条件而言, 等应力边界加载时所得土石混合体的峰值强度及失稳后的强化特征均略低, 且峰值强度值与室内试验结果基本一致, 验证了等应力边界加载所得力学参数较小, 而且这种变化随着含石量的增大逐渐明显起来。从图 7 失稳后试样形态来看, 等应力边界加载条件下, 其试样顶、底面在轴向应力作用下呈现外凸现象; 等位移边界加载条件下, 其试样顶、底面最终形态均较平整。

4 结论

(1) 通过两种边界条件开展实验、数值计算结果分析, 传统的等位移边界条件所得不均匀地质体参数明显大于同等条件下等应力边界条件所得参数, 是偏不安全的。

(2) 较等位移边界加载条件而言, 等应力边界加载时所得土石混合体的峰值强度及失稳后的强化特征均要略低, 而且这种变化随着含石量的增大会逐渐明显。

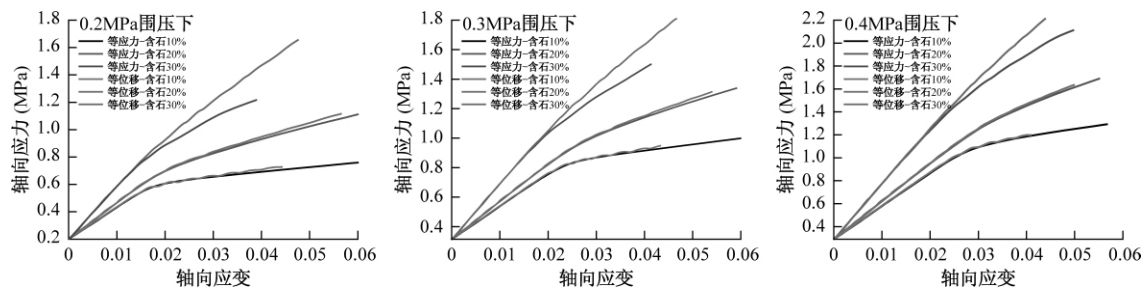


图 6 两种边界条件下土石混合体应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of RSA under two boundary conditions

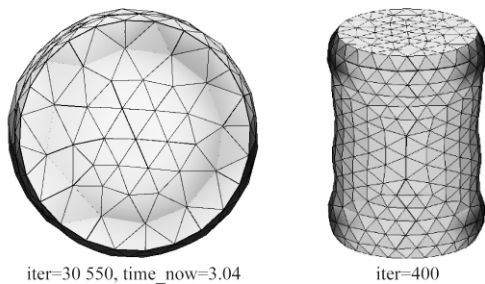


图 7 两种边界条件下土石混合体变形性状

Fig. 7 Deformation behavior of RSA under two boundary conditions

参考文献:

[1] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50 - 56. [XU W J, HU R L. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 50 - 56. (in Chinese)]

[2] 长江委综合勘测局. 长江三峡工程库区奉节县白衣庵滑坡治理规划阶段工程地质勘察报告[R]. 1999.

[3] 殷跃平, 张加桂, 陈宝荪. 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 Y P, ZHANG J G, CHEN B S. 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)]

[4] 严福章. 水库滑坡复活机理及其发展趋势预测研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004. [YAN F Z. Mechanism of resurrection of landslide and research about the trend forecast [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, GUCAS, 2004. (in Chinese)]

[5] Shang Yanjun, Yang Zhifa, Li Lihui, et al. A super-

large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster and origin [J]. Geomorphology, 2003, 54(3-4): 225 - 243.

[6] 尚彦军, 杨志法, 廖秋林, 等. 雅鲁藏布江大拐弯北段地质灾害分布规律及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(4): 30 - 40. [SHANG Y J, YANG Z F, LIAO Q L, et al. Geological hazard distribution and prevention in North of Yalu Canyon, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2001, 12(4): 30 - 40. (in Chinese)]

[7] 廖秋林, 李晓, 董艳辉, 等. 川藏公路林芝 - 八宿段地质灾害特征及形成机制初探[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 33 - 39. [LIAO Q L, LI X, DONG Y H, et al. Characteristic and formation mechanism of geological hazards along the section from Linzhi to Baxiu of the Sichuan-Tibet highway [J]. Journal of Geo-Mechanics 2004, 10(1): 33 - 39. (in Chinese)]

[8] 廖秋林. 土石混合体地质成因、结构模型及其力学特性、固流耦合特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006. [LIAO Q L. Geological origin and structure model of rock and soil aggregate and study on its mechanical and MH coupled properties [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, GUCAS 2006. (in Chinese)]

[9] Li Xiao, Liao Qiulin, He Jianming. In-situ Tests and Stochastic Structural Model of Rock and Soil Aggregate in the Three Gorges Reservoir Area [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 494.

[10] 廖秋林, 李晓, 李守定. 土石混合体重塑样制备及其压密特征与力学特性分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 385 - 391. [LIAO Q L, LI X, LI S D. Sample remodeling, compactness characteristic and mechanical behaviors of rock-soil mixtures[J]. Journal of Engineering Geology 2010, 18(3): 385 - 391. (in Chinese)]

(下转第 68 页)

Structural yielding characteristics of unsaturated loess and main influencing factors

YAN Ya-Jing , WEN Bao-Ping

(School of Water Resources and Environment , China University of Geosciences(Beijing) , Beijing 100083 , China)

Abstract: In this paper , the variation in structural yielding characteristic of the loess from Lanzhou city and the main affecting factors were analyzed via triaxial test. The results show that shear behavior of the unsaturated loess varied with degree of saturation , dry density and confining pressure. The loess with higher dry densities was of strain-softening behavior , while those with lower dry densities had strain-hardening nature. For the former , its shear behavior changed at saturation degree of 70% . The structural yielding characteristics were weakened with increase in saturation degree , with which structural yielding stress for the loess with higher and lower dry densities decreased nonlinearly and linearly. On the other hand , structural yielding characteristics of loess with different saturation degree were strengthened with the increase in confining pressure , dry density and clay content. Particularly , the structural yielding stress of the loess with higher and lower dry densities had nonlinear and linear correlations with confining pressure respectively , and increased nonlinearly with dry density.

Key words: unsaturated loess; structural yielding stress; degree of saturation; confining pressure; clay content

责任编辑: 张明霞

(上接第 51 页)

A study of the failure mechanism of rock and soil associate under different boundary conditions

FAN Yong-bo , LI Shi-hai , HOU Yue-feng , FENG Chun

(Institute of mechanics , Chinese Academy of Science , Beijing 100190 , China)

Abstract: RSA (rock and soil associate) is inhomogeneous and discontinuous , and the stress distribution inside the materials is uneven while external forces are applied on them. For these materials , the real boundary condition is the equal stress boundary condition. The existing soil mechanics testing machines are loaded by rigid boundaries , i. e. , the equal displacement boundary loading. This testing machine is not suitable for inhomogeneous material. In order to examine the mechanical behavior of RSA or fractured rock , a new type of triaxial compressive test machine with equal stress boundary loading is developed , using flexible head and base , imposing the equal stress boundary conditions. Difference in shear strength parameters of RSA under two boundary conditions are studied. And , we carried out numerical calculation with the software CDEM. The results show that the parameters obtained from the equal displacement boundary loading is 20% greater than the parameters obtained from the equal stress boundary condition and they tend to be unsafe.

Key words: rock and soil associate; different boundary condition; tri-axial experiment

责任编辑: 张明霞