

图5 3D 模糊土壤类别地图(垂直拉伸度3倍)

Fig. 5 The fuzzy 3D soil map (the vertical exaggeration is 3)

夹一层粘土层, 并有局部粉土散布其中, 本区不具砾石土层。

3 结 论

本文提出 FSGSD 来改善 FKM 应用于工程土壤分类能力, 提高分类正确率及改善原先 FKM 之隶属度之概率分布, 进而搭配地质统计方法求得模糊土壤分类空间分布讯息。依据隶属度的概率分布, 可设定适当临界值求得所需置信水平下的土壤空间分布, 由实例说明本法确实对于三维土壤之空间推估相当有效, 并能快速绘制三维土壤地图。

参考文献:

- [1] MCBRATNEY A B, DE Gruijter, BRUS J J D J. Spatial prediction and mapping of continuous soil classes [J]. *Geoderma*, 1992, **54**:39 - 64.
- [2] GRUNWALD S, MCSWEENEY K, ROONEY D J, LOWERY B. Soil layer models created with profile cone penetrometer data [J]. *Geoderma*, 2001, **103**:181 - 201.
- [3] MCBRATNEY A B, DE Gruijter J J. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades [J]. *J Soil Sci*, 1992, **43**:159 - 175.
- [4] HENDRICKS Franssen J J W M, VAN Eijnsbergen A C, STEIN A. Use of spatial prediction techniques and fuzzy classification for mapping soil pollutants [J]. *Geoderma*, 1997, **77**: 243 - 262.
- [5] DE Gruijter J J, WALVOORT D J J, VAN Gaans P F M. Continuous soil maps-a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models [J]. *Geoderma*, 1997, **77**:169 - 195.
- [6] LAGACHERIE P, CAZEMIER D R, VAN Gaans P F M, BURROUGH P A. Fuzzy k-means clustering of fields in an elementary catchment and extrapolation to a larger area [J]. *Geoderma*, 1997, **77**:197 - 216.
- [7] ODEH I O A, Mcbratney A B, CHITTLEBOROUGH D J. Soil pattern recognition with fuzzy c-means: applications to classification and soil-landform interrelationships [J]. *Soil Sci*

Soc Am J, 1992, **56**:505 - 516.

- [8] GRUNWALD S, BARAK P, MCSWEENEY K, LOWERY B. Soil landscape models at different scales portrayed in Virtual Reality Modeling Language VRML [J]. *Soil Sci*, 2000, **65**: 598 - 614.
- [9] GRUNWALD S, LOWERY B, ROONEY D J, MCSWEENEY K. Profile cone penetrometer data used to distinguish between soil materials [J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, **62**:27 - 40.
- [10] TRIANTAFILIS J, WARD W T, ODEH I O A, MCBRATNEY A B. Creation and interpolation of continuous soil layer classes in the Lower Namoi Valley [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, **65**: 403 - 413.
- [11] VAN Alphen B J, STOORVOGEL J J. A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, **64**:1706 - 1713.
- [12] ODEH I O A, MCBRATNEY A B, CHITTLEBOROUGH D J. Design of optimal sampling spacing for mapping soil using fuzzy-k-means and regionalized variable theory [J]. *Geoderma*, 1990, **47**:93 - 122.
- [13] PAPPIS C P, KARACAPILIDIS N I. A comparative assessment of measures of similarity of fuzzy values [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, **56**:171 - 174.
- [14] WANG W J. New similarity measures on fuzzy sets and on elements [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, **85**(3):305 - 309.
- [15] MINASNY B, MCBRATNEY A B. Fuzme version 3.0. Australian centre for precision agriculture (ACPA)[R]. Australia: The University of Sydney, 2002.
- [16] MINASNY B, MCBRATNEY A B, WHELAN B M. VESPER version 1.6. Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA)[R]. Australia: The University of Sydney, 2002.
- [17] BRAGATO G. Fuzzy continuous classification and spatial interpolation in conventional soil survey for soil mapping of the lower Piave plain [J]. *Geoderma*, 2004, **118**:1 - 16.
- [18] CYZE, ASSOCIATES Ltd. Geospatial Explorer version 2.9[R]. 2002.

水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究

徐文杰¹, 胡瑞林¹, 曾如意²

(1. 中科院地质与地球物理所工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 中国水电工程顾问集团公司中南勘察设计研究院, 湖南 长沙 410083)

摘要:以虎跳峡龙蟠右岸地区分布的土石混合体为依托, 对土石混合体在浸水条件下的力学响应进行了大型原位水平推剪试验, 取得一些成果。通过现场试验, 提出在采用水平推剪试验获得土石混合体的强度参数时, 为了结果的可靠性计算滑面应采用平均滑面。同时, 将试验区天然状态下和浸水条件下的土石混合体强度参数进行对比, 得出了土石混合体的各强度参数在浸水前后的变化规律。最后, 对试验区土石混合体在浸水下的强度参数提出了合理的参考值。

关键词:土石混合体; 水平推剪试验; 浸水状态; 虎跳峡

中图分类号: TV223

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)07-0814-05

作者简介:徐文杰(1978-), 男, 在读博士研究生, 主要从事土石混合体力学性能及应用性研究、边坡稳定性分析及岩土工程数值模拟工作。

Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture

XU Wen-jie¹, HU Rui-lin¹, ZENG Ru-yi²

(1. Key Laboratory of Engineering Geo-mechanics, Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Central-south Hydroelectric Investigation, Hydroelectric Engineering Counselor Company of China, Changsha 410083, China)

Abstract: Several horizontal push-shear in-situ tests on SRM in an immersion state under water were carried at Long pan slope in Tiger-Leaping Gorge, and some significant conclusions were drawn. In order to gain reliable values of the strength parameters, an average sliding surface was put forward in calculation through in-situ horizontal push-shear test. Comparing the strength parameters in immersion state under water with those in natural state, a variation for rule of the strength parameters of SRM was achieved. In the end, the referential values of the strength parameters of the water immersed SRM in test area were given.

Key words: soil-rock mixture (SRM); horizontal push-shear test; water immersion state; Tiger-Leaping Gorge

0 前言

土石混合体一般是由作为骨料的碎石或者块石和作为充填成分的粘土或砂土组成的一种特殊的工程地质体(图1)。其成因一般较为复杂, 主要有坡积成因的、崩积成因的、冲洪积成因的、冰积成因的及人工堆积的等等, 并且具有物质成分复杂、结构分布极其不规则、地域性等特性, 力学性质介于土与岩体之间。土石混合体在我国乃至世界均有广泛的分布, 尤其在我国西南的砂岩、砂页岩地区其分布更为广泛。据统计, 三峡水库蓄水后, 由崩塌堆积体和第四系松散堆积体组成且前缘高程低于175 m的崩塌体共1190处, 总面积约135.9 km², 相当于水库面积的12.5%左右, 体积约34亿m³, 约占总库容的8.7%^[1]; 在攀西地区土石混合体滑坡占该区滑坡总数的61.3%; 此外, 在美国的Appalachian省也分布有大量的崩积层滑坡, 其碎石含量为10%~30%不等(Iannacchione and Vallejo, 1995); 在肯塔基州东部煤田有77处的露天矿的废土石

边坡属于土石混合体边坡, 其粒径从砂砾到漂石均有分布^[3]。它的存在会对即将建设的或者已建设的工程具有极大的潜在性危害, 如对于坝体的稳定、蓄水后边坡的稳定性以及洞室的开挖时洞口稳定相当的不利, 经常会引起滑坡, 甚至泥石流等灾害现象。1966年10月22日发生在英国Wales Aberfan煤矿废料堆中的灾难性滑坡, 就是属于SRM滑坡的一例。

随着工程建设规模的不断扩大, 近几年来越来越受到工程界的广泛重视^[2-6], 但目前类似的研究主要集中在工程建设中使用的碎石土方面, 而对这种天然状态下形成的或者构成AML(Abandoned Mine Lands)边坡的更为复杂的土石混合体的研究国内外仅有少数的研究资料, 而且目前只限于试验室研究、数值模拟

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-134); 国家重点基础研究发展规划项目973(2002CB412702)

收稿日期:2005-06-03

或天然状态下的野外试验研究, 对于浸水饱和状态下的土石混合体的野外试验研究目前尚未发现相应的研究资料。由于土石混合体对水的作用非常敏感, 浸水后物理力学性质会发生明显的改变。如果不正确的判断其在水的作用下的强度特征, 对水库蓄水后或者降雨条件下边坡的稳定性分析会有很大的困难。

土石混合体在金沙江流域也有着广泛的分布, 其成因主要有坡积和冰积等^[7], 因此对该区存在的土石混合体进行研究, 为即将修建的虎跳峡水电站库区的边坡分析及深入研究土石混合体的变形破坏机理均具有重要的意义。为此, 我们对浸水条件下的土石混合体进行了野外大型原位水平推剪试验, 进行了详细的研究分析, 取得了一些有益的试验成果。

1 试验点选取

龙蟠右岸变形体位于云南丽江市虎跳峡地区龙蟠乡, 高程在 1820~2240 m 之间, 总体积约 0.24 亿立方米。据勘查资料表明, 龙蟠右岸表层土石混合体的分布厚度为 5.0~40.0 m 不等, 碎石粒径 1~5 cm 居多, 其碎石骨料主要由砂岩组成, 少量为板岩风化碎屑, 而且表面极其粗糙、菱角分明、形状不规则 (图 1); 填充料为粘土, 含量甚少。试验点我们选取在位于虎跳峡水电勘查工程龙蟠#1 平硐附近, 试验点高程 1892.0 m。为了研究类比的需要我们还在附近选取相应的试验点, 进行了天然状态下的野外试验 (图 2)。



图 1 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体

Fig. 1 Soil-rock mixture in Tiger-Leaping Gorge

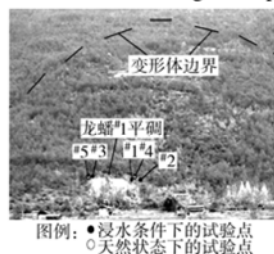


图 2 试验点分布图

Fig. 2 The distribution of test sites

2 试验方法及步骤

(1) 在选定的试验点, 挖掉表层土, 并根据要制备的试样尺寸开挖有 3 个临空面的试样。正面为施加

推力设备 (千斤顶) 的安装坑, 宽度根据设备而定; 一侧面开挖宽度为 20 cm 左右的小槽, 为观察滑面的变形破坏过程另一侧面开挖宽度为 1.5 m 左右作为观察面。开挖过程中, 同时测定土体的天然容重并进行土石颗粒含量分析, 完毕后对开挖剖面进行现场拍照, 最后将预留的 3 个临空面用粘土找平, 厚度约 1 cm 左右。试样尺寸应满足: 试样高度应大于大粒径的 5 倍, 宽高比为 1/3~1/4。待粘土凉干后, 再抹一薄层砂浆以防止粘土在浸水后破坏。根据该处的土石颗粒直径 (绝大多数小于 5 cm) 及试验结果的相似性分析, 我们采用试样尺寸均为 80 cm×80 cm×30 cm。

(2) 为克服试验时确定滑面的困难, 我们分别在两侧面用油漆笔划有间隔为 5 cm 红色网格。

(3) 在开挖小槽的一侧放置钢板使试样与周围土体分开, 并用粘土回填, 予以夯实; 另一侧面 (观察面) 放置厚度约为 1 cm 的有机玻璃板, 并用钢钎及拉杆固定, 以防止侧向位移。钢板和有机玻璃板靠近试样的一侧涂抹一层润滑油减少摩擦阻力, 放置钢板时务必使钢板直立并与试样侧面紧贴。

(4) 在试样的正面分别依次安装钢板 (钢板内侧涂抹润滑油并务必使其直立与试样侧面紧贴)、枕木及施加推力的千斤顶, 同时安装测量用的大量程百分表和油压表等测试设备。使千斤顶活塞的中心与钢板宽度的 1/2, 高度的 1/3 处保持在同一直线上, 相互贴紧密合 (见图 3)。

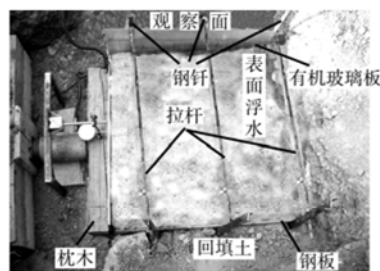


图 3 试验装配图

Fig. 3 Testing devices

(5) 设备安装完毕后, 在试样顶面连续均匀喷水 2~3 h (具体时间可根据当地土石混合体的透水性来确定), 并选取临近的土体进行试验以测定喷水速率, 使水完全渗透入试样中。本试验中选取喷水速率约为 65 L/h, 试验之前连续均有预喷水 2.5 h。

(6) 待准备完毕后, 开始摇动千斤顶分级施加水平推力, 控制加荷速率使变形速率控制在每 15~20 s 内的水平位移在 2 mm 左右。每分钟记录一次百分表及压力表的读数, 当试验进行到压力表读数达到最大值, 若再继续加压, 压力表读数不但不增加反而降低时, 此时的压力表最大读数为最大水平推力 $P_{\max}$; 松

开千斤顶油阀,使油压表读数回落到某一稳定值继续加压,使压力表读数再次达到某一试验峰值,此时压力表读数为最小的水平推力 $P_{\min}$ 。

为保证试样在整个试验过程中完全浸水,要在试样顶面进行全程喷水,并根据需要确定喷水速率,保证试样顶面在整个试验过程中保持有表面浮水。本次试验中,在试验过程中喷水速度跟试验前的预喷速度近似,在试验后期随着试样的破裂,透水性能增加,需适当加大喷水速度。

(7) 拆卸试验设备,并确定试样破裂面的位置,绘制滑动面草图。同时用取土容器在试样某部位取土测定试样在该浸水试验条件下的容重和饱和度。

(8) 为移除上部滑体以便观察土石混合体的三维破坏滑面,待试验进行完毕 1~2 d 后,再次用千斤顶对试样进行顶推(侧面无需进行限制);然后卸掉千斤顶,即可方便将上部滑体移掉。最后对三维滑面进行描述、测量并记录三维滑面信息。

3 试验结果与分析

3.1 粒度成分分析

根据各试验点的分布,由于#1和#2试验点非常临近,而#3试验点相对较远,因此我们对#1和#3试验点的浸水前的土石混合物进行了粒径分析,筛分取样质量#1试验点 24.2 kg, #2试验点 27.1 kg(图4)。从图中我们可以看出以下两点。

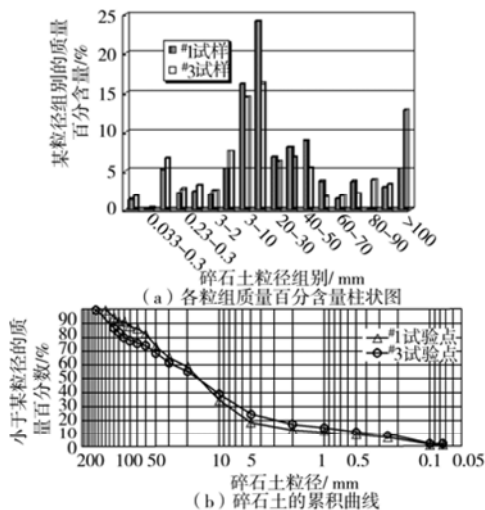


图4 #1、#2试验点的粒径筛分结果

Fig. 4 Grain-size analyses for test sites No. 1 and No. 3

(1) 该区土石混合物各粒径分布极不均匀,不均匀系数 C_u 达到 50, 曲率系数 C_c 约 5.68, 但多数粒径小于 20 mm, 占 50% 以上, 甚至达到 72% (#3 试验点), 局部看见粒径较大的砾石, 平均粒径约为 14 mm。

(2) 该区土石混合体的含石量(粒径大于等于 2

mm) 约为 80%, 其细粒(粒径小于 2 mm) 主要为 0.1~2 mm 之间的砂粒, 约占总细粒含量的 90%, 而 <0.1 mm 的粉粒和粘粒的含量很少。

3.2 试验现象观测与分析

(1) 滑面形成过程的观测

在试验过程中,从侧面透过预先放置的有机玻璃板可以清晰地看到,随着试验的进行试样的某些局部地区首先出现裂纹,然后随着裂纹的扩展逐渐贯穿形成完整的滑面,但在贯穿过程中由于土石混合体成分及其的非均匀性,有时还伴随着多条次生裂纹贯穿的现象(图5)。

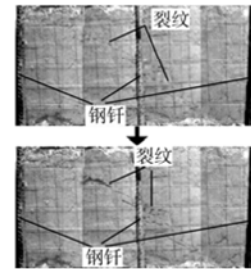


图5 #1试样在某阶段的观测结果

Fig. 5 The observed result of sample No. 1

更为有趣的是裂纹开始产生的位置与试样的碎石分布密集的地方相符合。分析其原因是由于,在碎石分布密度大的地方,碎石与碎石之间直接接触的几率将增大,导致在接触面处出现“爬高”现象引起局部的土体开裂。而在碎石密度小的地方,碎石与碎石的接触几率相对较小,其中间充填有粘土物质,在滑面位置细小粘粒的流动会防止或减缓这种“爬高”现象的发生,因此其有明显裂纹产生的时间将有较碎石密度大的位置较晚。

(2) 试验破坏后三维滑动面的分析

在试验结束后,我们对试样进行处理得到了试样破坏的三维滑动面(图6)。

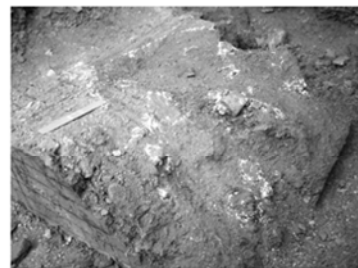


图6 某试样破坏后形成的三维滑动面

Fig. 6 The 3D sliding surface of a sample

由图5可以看出,土石混合体由于其本身的不均匀性,导致其破坏面的极其不规则性,为了能够得到较为准确的计算参数并考虑到试样的总体效应,在计算强度参数时我们采用了平均滑面作为试样总的计算

破坏面。其具体做法：首先将现场处理得到的三维滑动面，并沿正面方向每隔 10 cm 测量一滑动断面，然后将所测得的各个滑动面进行平均，得到平均意义上的滑动面——平均滑动面。

此外，我们还可以看出碎石含量及其粒径成分在某种程度上控制了滑面的形成和形态，加之该区土石混合体中所含碎石菱角较多及其大多为强度较高的砂岩组成，从而成为导致土石混合体这种特殊的土石混合体具有较高的内摩擦角。

3.3 强度参数的计算

根据现场试验资料分别绘制出各个试样的平均滑动面，图 7 显示了浸水条件下#1、#2、#3 各试样滑动体的平均滑面。

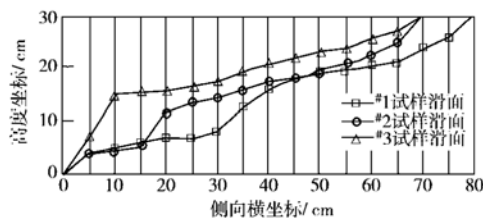


图 7 #1、#2、#3 试样破坏的平均滑面

Fig.7 Average sliding surfaces for test sites No. 1, No. 2 and No. 3

根据各滑面的转折点将滑动体划分为若干条块，计算各试样的强度参数指标 (c 、 φ 值)。在浸水条件下因考虑到水压力的作用，对文献[8]中的公式提供的水平推剪试验强度参数计算公式进行了修正，在原式的基础上添加了 $\sum_{i=1}^n W_i$ (水压力) 项，见式 (1)，各试验点的计算结果见表 1。

$$\tan \varphi = \frac{\frac{P_{\max}}{G} \sum_{i=1}^n g_i \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^n g_i \sin \alpha_i - c \sum_{i=1}^n l_i}{\frac{P_{\max}}{G} \sum_{i=1}^n g_i \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^n g_i \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

式中 φ 为内摩擦角 ($^\circ$)； c 为粘聚力 (kPa)； $P_{\max}$ 为最大水平推力 (kN)； $P_{\min}$ 为最小水平推力 (kN)； G 为滑动体的重力 (kN)； α_i 为第 i 条块滑动面与水平面的夹角 (度)； l_i 为第 i 条块滑动线的长度 (m)； g_i 为第 i 条块的重力 (kN)； W_i 为第 i 条块的滑面处的水压力 (kN/m)； $W_i = \rho_w g h_i l_i$ ； ρ_w 为水容重 (kg/m^3)； g 为重力加速度 (N/kg)； h_i 为第 i 条块的中线高度 (m)。

3.4 浸水条件下土石混合体的力学响应分析

根据浸水条件下的试验记录结果绘制各试样的剪应力和剪切位移关系曲线 (图 8)。为了进一步研究土石混合体在浸水后的变形破坏机理，我们对浸水前后 #3 试样的各细粒组别在总的细粒中所占的质量百分比 (图 9) 及孔隙比做了相应的分析。

(1) 由图 9 不难看出浸水后试样的细粒结构发生

了明显的变化： $<0.25 \text{ mm}$ 的细粒，尤其是 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 的细砂含量相对降低。其孔隙比在浸水前后也发生了变化，由浸水前的 0.35，增大为浸水后的 0.43。

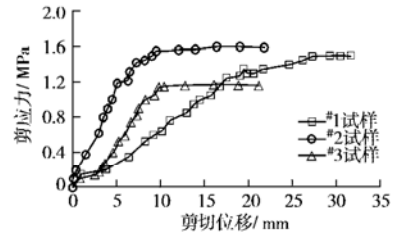


图 8 #1、#2、#3 剪应力 - 位移曲线

Fig. 8 Shear stress-displacement curves based on the records of test samples Nos. 1, 2 and 3

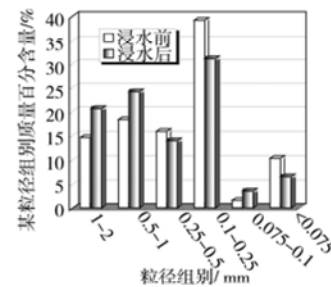


图 9 #3 试样浸水前后各细粒组别占细粒总量的质量百分含量柱状图

Fig. 9 Grain size distribution of test sample No. 3 before and after water immersion

由于在整个试验过程中注水的引起的水流，加上土石混合体的孔隙度较大而且贯通性良好，将其中的细粒成分带走，对土石混合体起到了淘空作用，从而破坏了其细粒含量结构，增大了其孔隙度。

(2) 表 1 中浸水条件下土石混合体的最大、最小水平推力较天然状态下同含石量的土有明显下降，但含石量少的 #3 试样 (较相应的天然状态下同含石量的 #5 试样) 的下降比含石量多的 #1、#2 试样 (较相应的天然状态下同含石量的 #4 试样) 下降更强烈。相应的粘聚力含石量少的 #3 试样下降较大 (0.27 kPa)，含石量较大的 #1、#2 试样下降较小，最后得到的浸水条件下的各试验点的粘聚力非常相近；而内摩擦角在浸水条件下反而出现增大的现象。

土石混合体在浸水后其中的填充成分 (土) 遇水发生软化、崩解，有些细粒甚至被水流带走，削弱了原来土在碎石颗粒间的粘结作用，混合体变的较原来松散，从而使其粘聚力明显降低，尤其是含石量较低的混合体降低更加剧烈。然而，由于填充物的软化、崩解，加之土石混合体的孔隙度较大，使原来通过由碎石与碎石间有填充的粘土起到“润滑”作用，在浸水后碎石和碎石间变为“裸露”接触，引起内摩擦角的急剧上升，这种作用在某一含石量范围的土石混合体中随着土含量的增加而增加。如含石量较少的 #3 试