

降雨作用下土石混合体边坡力学参数 弱化规律与稳定性分析

刘明扬^{1,2}, 宋顶峰^{1,2}, 付晓东³, 田 宁^{3,4}, 张振平^{3,4}

(1. 中建国际投资(湖北)有限公司, 武汉 430071; 2. 中国建筑国际集团有限公司, 香港 999077;
3. 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; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:土石混合体边坡地质灾害是中国最为常见的地质灾害之一,而降雨是其主要诱发因素,降雨条件下边坡劣化机理研究是防灾减灾领域的重要研究方向。通过分析不同含水率条件下土石混合体力学性质试验数据,建立抗剪强度参数随含水率的演化方程;以此为基础,针对西南地区典型土石混合体边坡,考虑降雨条件下力学参数弱化的影响,采用 Geostudio 软件开展边坡稳定性分析。结果表明:演化方程能有效反映含水率增大对土石混合体抗剪强度具有显著的弱化效应;降雨强度的增大会显著降低边坡稳定性,降雨持时只是降雨过程中某一时刻值的体现,对边坡稳定性影响不大;降雨量与边坡安全系数呈明显线性负相关。研究成果可为土石混合体边坡地质灾害预测与防治提供技术支撑。

关键词:土石混合体;边坡;降雨;参数弱化;稳定性

中图分类号:U416.1⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)08-0313-06

降雨是诱发土石混合体边坡地质灾害的关键因素,其对边坡的灾变行为可以总结为对坡体的增重、弱化、冲刷潜蚀和动静水压力等方面^[1]。其具体影响效果主要体现在以下 3 个方面:①在强降雨作用下,非饱和边坡内部初始负孔隙水压力(即基质吸力)发生降低甚至达到 0^[2],从非饱和状态转化为饱和状态,结合非饱和和抗剪强度公式可以得到基质吸力的降低直接导致材料抗剪强度的降低;②降雨入渗作用导致材料内部含水量增加,造成坡体吸水重量增加,间接促进滑体向下发生滑动;③坡体材料的力学参数受到粒径分布、孔隙比、颗粒几何形态及含水量多项因素共同影响制约,其中含水量的增加有助于颗粒内部发生滑动和错动,必然导致黏聚力和内摩擦角的降低和弱化。在以往研究中对非饱和边坡稳定性的研究多停留在坡体材料由非饱和到饱和状态的变化,仅围绕孔隙水压力影响进行研究^[3-4]。地表浅层材料多为松散堆积物质,内部含有粉质黏土等亲水土体材料,在降雨作用下矿物成分发生水解游离,和细小颗粒一起被渗流带出,材料参数弱化现象极为明显。因此,同时考虑降雨

入渗与参数弱化对于土石混合体边坡稳定性分析具有重要作用。

针对上述问题,建立土石混合体强度参数随含水率劣化的经验估算公式;以西南地区典型土石混合体边坡为研究对象,将参数劣化估算公式用于降雨过程中材料参数的弱化处理,得到不同降雨条件下土石混合体边坡稳定性演化规律。

1 不同含水率条件下土石混合体抗剪强度参数弱化规律

不同含水率条件下土石混合体力学性质试验相关研究目前已有许多,部分研究结果如图 1^[5-9]所示。通过分析可以得到:①在含水率升高的条件下,土石混合体的黏聚力及内摩擦角均呈非线性下降趋势;②对于不同组构成分或块石含量的土石混合体,天然含水率状态下强度参数均不同,强度参数随含水率的衰减程度也有所不同;③黏聚力的衰减前后最大比例为 4.3:1,内摩擦角的衰减前后最大比例为 2.92:1,说明黏聚力对含水率变化更为敏感。

现阶段得到的参数折减公式包括抛物线、线性、幂函数及对数函数几类,见式(1)~式(8)^[10-14]。

收稿日期:2021-03-22

基金项目:中国建筑国际集团有限公司科技研发项目(CSCI-2020-Z-21);国家自然科学基金(51779250)。

作者简介:刘明扬(1985—),男,安徽太和人,中国建筑国际集团有限公司,工程师,研究方向为土木工程施工现场管理;通信作者张振平(1994—),女,辽宁本溪人,中国科学院武汉岩土力学研究所,博士研究生,研究方向为岩土工程边坡稳定性及防治。

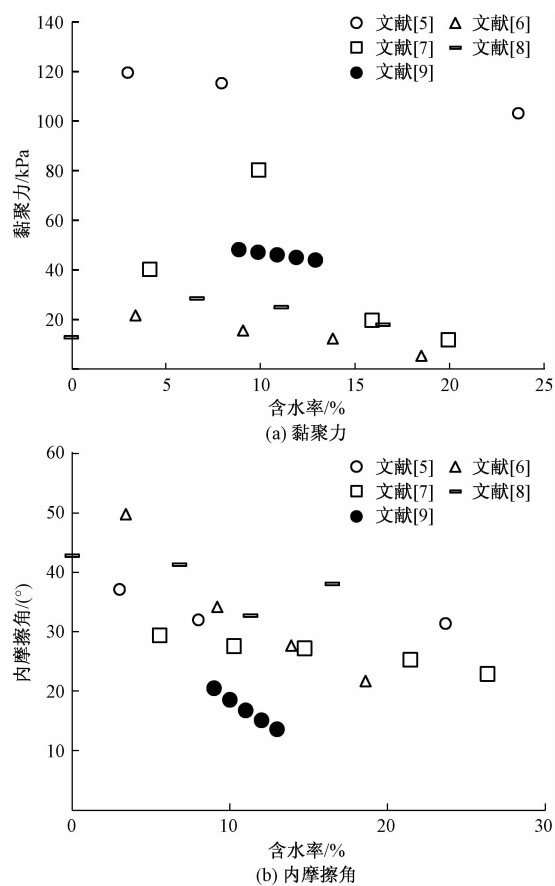


图 1 黏聚力和内摩擦角随含水率分布

考虑到土石混合体材料自身力学性质受到含石量、颗粒粒径、材料成分等多因素影响,因此基于含水率(ω)拟合得到的土石混合体强度折减公式具有较大局限。

$$c = 0.025\omega^2 - 0.79\omega + 5.585 \tag{1}$$

$$\varphi = -0.093\omega^2 - 0.735\omega + 22.93 \tag{2}$$

$$c = -0.263\omega^2 - 3.18\omega + 44.35 \tag{3}$$

$$\varphi = 0.318\omega^2 - 3.735\omega + 23.97 \tag{4}$$

$$c = -3.7835\omega^2 + 37.563\omega + 28.934 \tag{5}$$

$$\varphi = -1.7523\omega + 35.157 \tag{6}$$

$$c = 4.09\omega^{-0.85} \tag{7}$$

$$\varphi = 8.72\omega^{-0.44} \tag{8}$$

本文在进行基于含水率的混合体抗剪强度参数估算公式的推导时,选择试验数据中含水率最小(ω_0)时对应参数为参考参数,设置自变量为含水率(ω)扩大倍数 $x = \frac{\omega}{\omega_0}$,处理后可得到基于含水率的内摩擦角拟合估算公式为

$$c = c_0 x^{-0.089(x^2-5.93x+12.56)} \tag{9}$$

$$\varphi = \varphi_0 \left[\sqrt[0.15]{x-1} - 0.9 \lg x \right] \tag{10}$$

式中: c_0 为天然含水率条件下混合体的黏聚力; φ_0 为

天然含水率条件下土石混合体的内摩擦角。

为了对式(9)、式(10)的准确性进行验证,对国内外已有文献中不同含水率条件下混合体力学试验结果进行搜集^[5-12, 14-30]。将试验结果与拟合公式的计算值进行比对后如图 2 所示。结果显示,黏聚力实测值与预测值的相关性较好,决定系数达到 0.947,数据点基本上紧密分布于 $y=x$ 数据线两侧,部分数据位于 $\pm 15\%$ 误差区域外,但总体上与实测值差距较小。

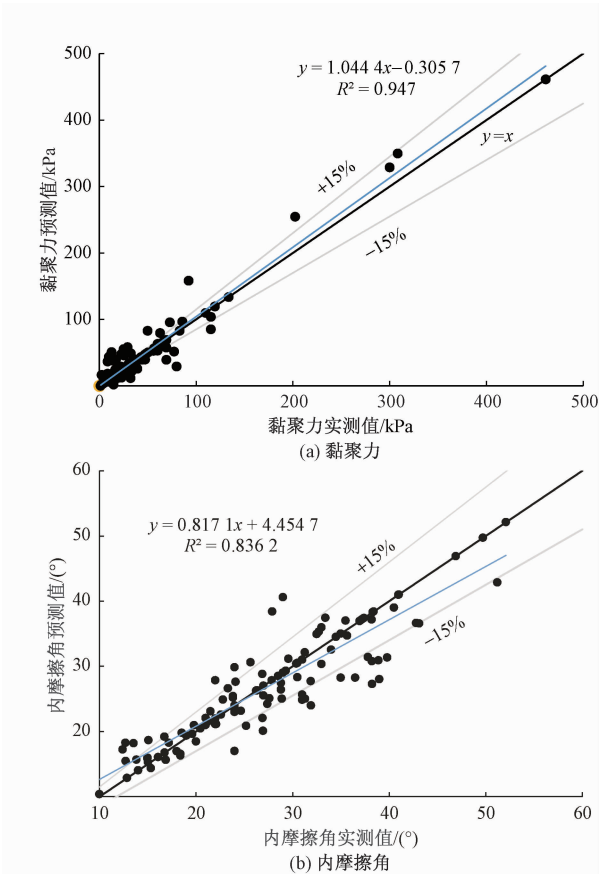


图 2 黏聚力和内摩擦角预测值与实测值对比

相比于黏聚力值,内摩擦角的预测效果相对较差,位于 $\pm 15\%$ 误差区域以外的数据点数量相对较多。这一现象说明,混合体的内摩擦角在发生遇水劣化时并不仅随含水率的变化而发生规律性变化。已有研究也表明,受到混合体组分性质及含石量的影响,混合体内摩擦角对含水率变化的敏感性有所不同。因此,在后续研究中应当适当考虑含石量等其他物性指标对内摩擦角遇水劣化效应的分析。

2 考虑抗剪强度参数弱化的边坡稳定性分析流程

在对典型堆积体边坡进行稳定性分析时,利用商业二维软件 Geostudio 开展相关数值模拟工作。

该软件为研究人员提供了较为完善的非饱和渗流计算模块 SEEP/W 及基于极限平衡理论计算边坡安全系数的 SLOPE/W 模块。

在 SEEP/W 模块中,基于软件提供的样本函数可以对非饱和材料的水力渗透性能进行定义,确定材料的水土特征曲线及渗透系数变化曲线。基于饱和—非饱和土体渗流的达西定律,求解渗透方程后即可获得关键时步各节点的孔隙水压力;随后利用非饱和强度理论对该条件下材料的非饱和强度进行计算,根据潜在滑移面位置对边坡安全系数进行求解。

虽然 Geostudio 软件中对于渗流和安全系数的计算已经较为成熟,但并未考虑到参数存在遇水劣化特性时对边坡稳定性的影响。基于此,通过商业软件 Geostudio 的 SEEP/W 和 SLOPE 两个独立模块进行渗流场和安全系数的计算。可以通过该方法实现两个模块间的引用:利用 SLOPE 模块本构材料设置中提供的空间 mohr-coulomb 参数选项,通过提供区域内不同节点坐标及对应强度参数值,使用线性差值方法对区域内力学强度性质进行描述。具体计算流程如图 3 所示。

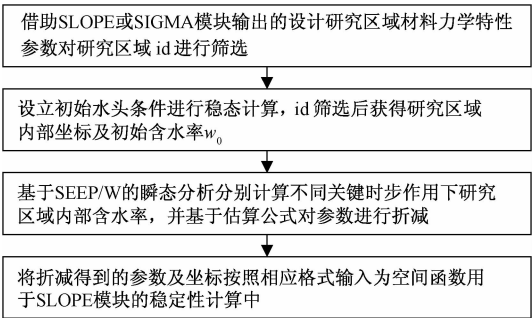


图 3 计算流程

3 典型土石混合体边坡模型与分析方案

选取西南地区某公路典型土石混合体边坡为研究对象,坡体岩土地层依次为粉质黏土、强风化砂砾岩、泥质粉砂岩及基岩,其中强风化砂砾岩内部呈碎块及碎石土状。结合地质钻孔及勘测资料搭建的分析模型高度为 103.6 m,长为 220 m,如图 4 所示。考虑降雨对边坡稳定性的影响,各岩土地层的力学参数见表 1,强风化区域材料的渗流力学参数如图 5 所示。

在考虑土石混合体力学参数弱化的基础上,边坡稳定性分析围绕降雨因素进行。降雨强度分为 10、15、20、25 mm/d 4 种,降雨持时分为 5、10、15 d 3 种,共开展 12 个降雨强度与降雨持时条件下的边坡响应计算。

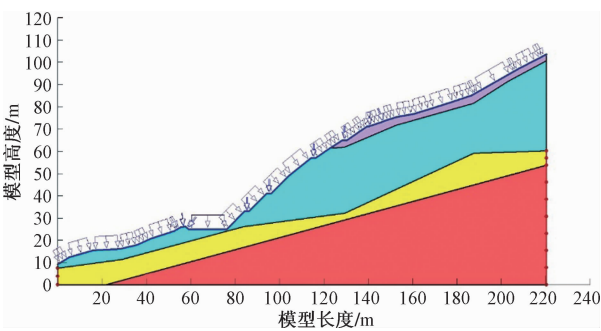


图 4 计算模型

表 1 岩土力学参数

材料名称	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)
基岩	1 500	200	35	0.25	24.5
泥质粉砂岩	256	30	32	0.32	20
强风化砂砾岩	280	27	28	0.33	21
粉质黏土	35	25	18	0.32	18

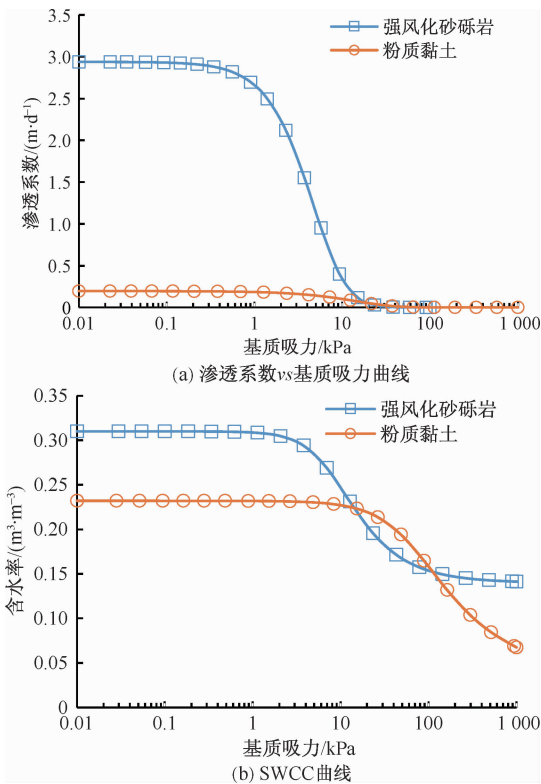


图 5 强风化砂砾岩及粉质黏土的渗流力学参数

4 土石混合体边坡稳定性分析

为了考察不同降雨条件对土石混合体边坡稳定性的影响规律,重点开展以下 5 种降雨方案的分析:10 mm/d,15 d(方案 1);15 mm/d,10 d(方案 2);20 mm/d,15 d(方案 3);25 mm/d,15 d(方案 4);25 mm/d,5 d(方案 5)。

对不同深度点孔隙水压力进行监测,孔压变化图 6 所示。方案 1、3 和 4 分别在 15 d 降雨持时条件下,设置强度为 10、20、25 mm/d 的降雨。在相同持时条件下,孔压变化深度和变化值均随强度的增加而增加,以地表浅层 1.2 m 处为例,方案 1 中降雨最终时刻孔压为-83.65 kPa,对于其余两种方案下孔压为-34.27 kPa 和-27.46 kPa。降雨过程中湿润锋逐渐向下运移,材料内部水分进行补给,负孔隙水压力发生降低。降雨强度由 10 mm/d 升高至 25 mm/d 时,湿润锋的最远运移深度也从 3.6 m 上升至 6 m。对于相同降雨强度不同降雨持时作用下,如方案 4 和 5,可以明显看出降雨持时较短直接导致降雨量降低,因此孔压变化幅度偏小。对于同一深度降雨持时扩大 5 倍的条件下,降雨最终时刻孔压约降低 1/10~2/5。对于方案 2 和方案 3,两者降雨量均为 150 mm,虽然降雨持时不同但是不同深度孔压较为接近,尤其地表区域基本保持一致。但在 15 d 降雨持时作用下,其负孔压降低程度稍大。

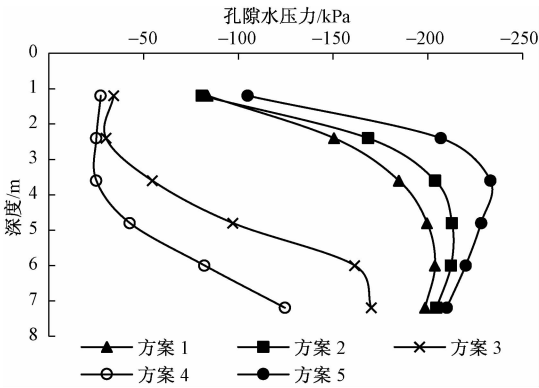


图 6 不同方案下不同深度孔压变化

不同降雨方案下边坡安全系数的变化趋势如图 7 所示。其中明显可以看到方案 1、3、4 三种降雨强度所对应的最低安全系数分别为 1.331、1.33 和 1.283,随强度的增加顺次降低。方案 5 与方案 4 中前 5 天安全系数基本相同,说明降雨持时只是主要影响渗流的入渗持时,并不影响入渗量。方案 1 和方案 2 在降雨结束时刻安全系数相差较小,说明降雨量是控制安全系数变化的重要因素,在降雨完全入渗的前提下,相同降雨量下对边坡稳定性的影响相同。

针对所有 15 个计算方案,将不同降雨持时及强度作用下坡体安全系数绘制于三维图表,如图 8 所示。可以发现,降雨强度及持时与安全系数整体呈现负相关关系,随降雨持时的增加,降雨强度的变化对

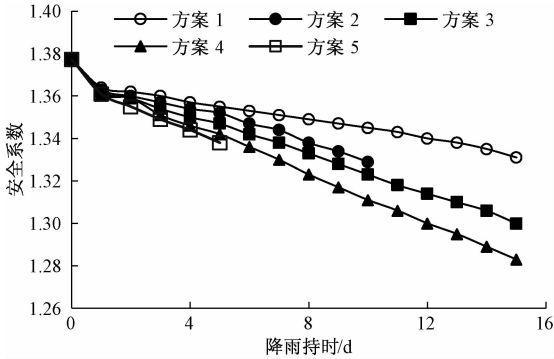


图 7 不同方案下的边坡安全系数

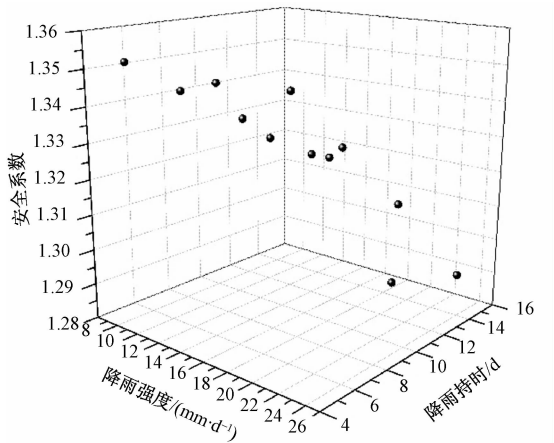


图 8 边坡安全系数与降雨强度及持时的关系

安全系数的扰动作用更大。降雨强度从 10 mm/d 扩大到 25 mm/d 的过程中,3 种降雨持时对应安全系数的降低依次为 0.014、0.021 和 0.046。

降雨量与安全系数的定量变化关系如图 9 所示,结果显示降雨量与安全系数呈明显的线性关系,拟合曲线为 $y = -0.000\ 2x + 1.361\ 2$ 。结合规范^[31],降雨条件下边坡安全系数下降至 1.2 发生破坏,依据本研究获得的拟合公式可知在降雨量达到 800 mm 时该边坡可能发生局部破坏。

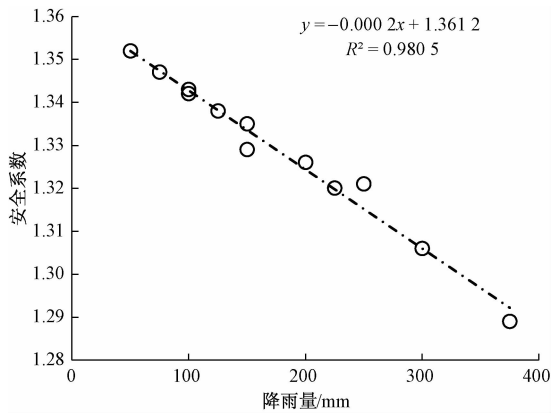


图 9 不同降雨量下安全系数分布

5 结论

1)结合国内外土石混合体试验数据,建立了土石混合体强度参数随含水率的非线性演化关系,该表达式可以较好地反映实际工程中降雨作用下土石混合体边坡强度力学参数的弱化效应。

2)降雨持时相同时,降雨强度的增加直接引起入渗降雨量增加,导致边坡安全系数持续降低,坡体内部孔压变化深度也随之增大;在降雨完全入渗的条件下,降雨持时的改变只是原降雨过程中某一时刻的值的体现,对边坡稳定性影响不大;降雨量相同时边坡响应情况基本一致,边坡安全系数与降雨量密切相关,且呈明显的负相关线性关系。

参考文献

- [1] 姚海林,郑少河,李文斌,等.降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1034—1039.
- [2] 陈善雄,陈守义.考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J].岩土力学,2001,22(4):447—450.
- [3] 王建洪,田明,邹云丽,等.云南地区降雨诱发堆积体边坡失稳的力学机理研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(4):204—208,227.
- [4] 王力,李高,陈勇,等.赣南地区人工切坡降雨致灾机制现场模型试验[J].岩土力学,2021,42(3):846—854.
- [5] WEI H Z, XU W J, WEI C F, et al. Influence of water content and shear rate on the mechanical behavior of soil-rock mixtures[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(8):1127—1136.
- [6] 刘新荣,涂义亮,王鹏,等.基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究[J].岩土工程学报,2017,39(8):1425—1434.
- [7] 冯文凯,周强,白慧林,等.降雨作用对欢喜坡冰水堆积体斜坡稳定性的影响研究[J].工程地质学报,2018,26(3):655—662.
- [8] AL-SHAYEA N. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils[J]. Engineering Geology, 2001, 62(4):319—342.
- [9] WEI J, SHI B, LI J, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2018, 166:124—133.
- [10] 沙特.泥石流堆积物的强度特性及 PFC 模拟研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [11] 温辉波.库岸松散堆积体抗剪强度试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [12] 邓华锋.库水变幅带水—岩作用机理和作用效应研究[D].武汉:武汉大学,2010.
- [13] 刘新荣,傅晏,王永新,等.(库)水—岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J].岩土工程学报,2008(9):1298—1302.
- [14] 吴瑞安,张永双,王献礼,等.汶川地震区崩滑堆积体强度现场直剪试验研究[J].地质力学学报,2017,23(1):105—114.
- [15] 邓会芳.土石混合体的剪切强度试验研究[D].南昌:东华理工大学,2016.
- [16] 杨继红,董金玉,刘汉东,等.大型堆积体原位直剪试验研究及三维稳定性分析[J].煤炭学报,2010,35(3):392—396.
- [17] 方华.文家沟泥石流源地土体直剪强度特征试验研究[C]//2011年全国工程地质学术年会论文集,工程地质学报编辑部,2011:6.
- [18] 齐丹.土石混合介质堆积体力学特性的试验研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
- [19] 吴锐.大前石岭隧道边坡碎石土强度试验研究[D].北京:中国地质大学,2015.
- [20] 黄家华.四川理县桃坪冰水堆积体强度特性研究[D].成都:成都理工大学,2016.
- [21] 吴海真,欧阳增发.降雨作用下库岸土石混合堆积体稳定性研究[C]//中国水利学会第四届青年科技论坛论文集.北京:中国水利水电出版社,2008:464—470.
- [22] 王家成.巴东高切坡碎石土抗剪强度参数试验研究及工程应用[D].宜昌:三峡大学,2011.
- [23] 彭东黎,李志勇.堆积体边坡碎石土抗剪强度试验研究[J].公路工程,2014,39(2):254—257.
- [24] 张吉庆,杨建国,温海峰.石忠高速公路松散堆积体力学特性大型室内直剪试验研究[J].公路交通技术,2009(S1):5—8.
- [25] WEI Y J, WU X L, XIA J W, et al. The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187:50—59.
- [26] XU Y, WU S, WILLIAMS D J, et al. Determination of peak and ultimate shear strength parameters of compacted clay[J]. Engineering Geology, 2018, 243:160—167.
- [27] LI Y. A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in China [J]. Engineering Geology, 2018, 236:4—10.
- [28] AL AQTASH U, BANDINI P. Prediction of unsaturated shear strength of an adobe soil from the soil - water characteristic curve[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98:892—899.
- [29] MALIZIA J P, SHAKOOR A. Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils [J]. Engineering Geology, 2018, 244:125—131.
- [30] HE Z J, MO H Q, SIGA A, et al. Research on the parameters of nonlinear hyperbolic model for clay-geogrid interfaces based on large scale direct shear tests[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 18:39—45.
- [31] 中华人民共和国交通部.公路路基设计规范:JTG D30—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

Analysis of Weakening Law of Mechanical Parameters of Soil-rock Mixture and Slope Stability under Rainfall Conditions

LIU Ming-yang^{1,2}, SONG Ding-feng^{1,2}, FU Xiao-dong³, TIAN Ning^{3,4}, ZHANG Zhen-ping^{3,4}

(1. China State Construction International Investments (Hubei) Limited, Wuhan 430071, China;

2. China State Construction International Holdings Limited, Hong Kong 999077, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The geological hazard of soil-rock mixture slope is one of the most common geological hazards in China and rainfall is the main inducing factor. The study of slope degradation mechanism under rainfall conditions is an important research direction in the field of disaster prevention and mitigation. By analyzing the experimental data of the mechanical properties of soil-rock mixtures under different water content conditions, the evolution equation of shear strength parameters with moisture content is established. A study is implemented that considering the influence of the weakening of mechanical parameters under rainfall conditions for the typical soil-rock mixture slope in Southwest China. The analysis of slope stability is carried out using Geostudio software. The results show that the evolution equation can effectively reflect the weakening effect of the shear strength of the soil-rock mixture caused by the increase of the water content, the increase of the rainfall intensity will significantly reduce the slope stability while the rainfall duration is only a reflection of the value at a certain time in the rainfall process which has a little effect on slope stability. The rainfall and slope safety factor are obviously linear and negatively correlated. The research results can provide a technical support for the prediction and prevention of geological disasters on soil-rock mixed slopes.

Key words: soil-rock mixture; slope; rainfall; parameter weakening; stability