

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

WEI Zhanxi, XIE Dongwu, WU Yuanzhao, MA Wenli, LI Yuan, and LI Wanhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171-179

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

某机场飞行区土工格栅加筋高边坡优化设计

Optimal design of the high geogrid-reinforced slope at the airfield of an airport

廖鸿, 徐超, 杨阳 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 113-121



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104055

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 等. 基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 126-136.

WEI Zhanxi, XIE Dongwu, WU Yuanzhao, *et al.* Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 126-136.

基于动态残余强度的不同含水率条件下 滑坡稳定性研究

魏占玺^{1,2,3,4}, 谢东武⁵, 毋远召^{1,2,3,4}, 马文礼^{1,2,3,4}, 李元^{1,2,3,4}, 李万花^{1,2,3,4}

1. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007; 2. 青海九零六工程勘察设计院, 青海 西宁 810007; 3. 青海省环境地质重点实验室, 青海 西宁 810007;
4. 青海省地质环境保护与灾害防治工程技术研究中心, 青海 西宁 810007;
5. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 长时降雨会引起斜坡发生累进性破坏, 在此过程中, 滑带土将随含水率的变化达到不同含水率状态下的残余强度。传统应变软化模型不能准确表达这一变化过程中滑带土残余强度的动态特征, 而引入动态残余强度的应变软化模型能更加真实地模拟含水率变化时滑坡稳定性的发展。基于此, 文章对四川中江县垮梁子滑坡开展了野外调查工作, 通过现场竖井获取滑带土, 采用环剪试验研究了滑带土力学参数与含水率的关系, 在此基础上建立了基于动态残余强度的应变软化模型, 模拟了垮梁子滑坡在滑带土处于不同含水率阶段的发展情况。结果表明: 含水率的增加使得滑带土抗剪性能显著衰减, 峰值及残余抗剪强度呈近乎线性降低, 残余强度参数则表现出三次函数型衰减特征。应用基于残余强度参数衰减规律建立的应变软化模型模拟了垮梁子滑坡的变形破坏过程, 结果表明在滑带土含水率低于 20% 时, 斜坡仅在前缘局部产生塑性区; 当含水率达到 22% 时, 斜坡中上部开始产生塑性区及未贯通滑动面; 当含水率达到 24% 时, 塑性区趋于贯通, 滑坡进入加速变形状态, 并于坡表产生张拉裂缝; 当含水率达到 26% 时, 滑坡处于失稳状态, 坡表张拉塑性区及破坏面的发展与滑坡现状破坏特征高度吻合。该成果可为相关滑坡的稳定性研究提供一定的理论依据。

关键词: 动态残余强度; 含水率; 应变软化; 边坡稳定性; 数值模拟

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0126-11

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

WEI Zhanxi^{1,2,3,4}, XIE Dongwu⁵, WU Yuanzhao^{1,2,3,4}, MA Wenli^{1,2,3,4}, LI Yuan^{1,2,3,4}, LI Wanhua^{1,2,3,4}

1. Qinghai Environmental Geological Exploration Bureau, Xining, Qinghai 810007, China;
2. Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute, Xining, Qinghai 810007, China;
3. Key Laboratory of Environmental Geology of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810007, China;
4. Qinghai Geological Environment Protection and Disaster Prevention Engineering Technology Research Center, Xining, Qinghai 810007, China; 5. Department of Underground Architecture and Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-08-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977227)

第一作者: 魏占玺(1977-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为地基及地质灾害防治。E-mail: sil7939108307@163.com

通讯作者: 谢东武(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为地下建筑工程。E-mail: yenuo557478941@163.com

Abstract: Long-term rainfall causes progressive damage to a slope. In this process, the slip zone soil will reach the residual strength under different water-containing states with the change of water content. The traditional strain softening model cannot accurately express the dynamic characteristics of the residual strength of the slip zone soil during this change, resulting in difficulty to get close to reality in the simulation of the landslide development process. The strain softening model that involves the dynamic residual strength can more realistically simulate the development of the stability of the landslide when the water content changes. Based on this, the field investigation was carried out on the Kualiangzi landslide in Zhongjiang County in Sichuan, and the slip zone soil was obtained through the on-site shaft. The ring shear test is used to study the relationship between the mechanical parameters of the slip zone soil and the water content, and a strain softening model based on the dynamic residual strength is established to simulate the development of the Kualiangzi landslide when the slip zone soil is at different water content stages. The evolution process of the landslide through the evolution of the plastic zone and the sliding surface is analyzed and compared with the current failure characteristics. The research results show that the increase of water content makes the shear resistance of slip zone soil attenuate significantly, the peak and residual shear strength decrease almost linearly, and the residual strength parameters show the characteristics of cubic attenuation. The strain softening model established based on the attenuation law of residual strength parameters simulates the deformation and failure process of the Kualiangzi landslide. It is found that when the water content of the slip zone soil is less than 20%, the slope only produces a plastic zone at the front edge; when the water content reaches 22%, a plastic zone and a non-penetrated sliding surface begin to appear in the middle and upper parts of the slope; when the water content of the slip zone soil reaches 24%, the plastic zone tends to penetrate, the landslide enters a state of accelerated deformation, and tensile cracks are generated on the slope surface; when the water content reaches 26%, the landslide is in a state of instability, and the development of the tensile plastic zone and failure surface of the slope is highly consistent with the current failure characteristics of the landslide. The results can provide a certain theoretical basis for the stability study of related landslides.

Keywords: dynamic residual strength; moisture content; strain softening; slope stability; numerical simulation

我国西南地区滑坡灾害频发,其中以降雨诱发型尤为显著。降雨诱发滑坡可分为短时暴雨诱发和长时降雨诱发,其中短时暴雨引起的滑坡发生时间短、成灾迅速、难以预防,而长时降雨引起的滑坡有鲜明的变形过程,对其进行深入研究可为相关滑坡的防治起到积极作用。

长时降雨诱发滑坡的过程实质上是斜坡岩土体物理力学性质劣化的过程,这一过程中滑带土强度随着含水率的变化会表现出应变软化特征^[1-3]。随着降雨入渗,滑带土的含水率随之增加,而含水率与土体强度之间存在显著的负相关特征,这个现象在滑带土体积分含水率由极低逐渐上升的过程中表现得更为显著^[4-7]。强度劣化过程在滑坡中表现出鲜明的渐进累计破坏特征,早期有部分学者^[8-9]通过假定滑动面,将应变软化模型引入极限平衡算法中,尝试分析边坡的渐进破坏,但斜坡中滑动面通常是不固定的,而由点及面的渐进破坏特征更符合滑坡的破坏过程^[10-12],因此发展

出基于岩土体本构关系的数值分析方法来准确反映滑带土强度劣化过程中边坡的稳定性。极限平衡方法或数值分析方法中,滑带土力学参数的降低过程通常被描述为从峰值到残余强度的线性过程^[1,9-14],但滑坡从开始发展到失稳可能经历多次暂停和启动,其间滑带土多次达到不同含水率状态或密度条件下的残余强度,使得滑带土残余强度处于动态变化状态,而传统应变软化模型忽略了这一过程。同时,以往对于垮梁子滑坡的研究集中于后缘裂隙水压力^[15-16],而较少有对滑带土性质变化的深入研究。

基于以上考虑,本文以四川中江县垮梁子滑坡为研究对象,通过环剪试验分析总结了不同含水率条件下滑带土残余强度的动态变化规律。在前人研究的基础上,提出可以反映不同含水率状态下滑带土强度变化的应变软化模型,用以描述滑带土在一系列含水率条件下残余强度的动态变化过程,从而更加真实地体现滑坡体变形发展过程中的稳定性状态。

1 试验方法及过程

1.1 滑坡概况及土样性质

四川中江县垮梁子滑坡(图 1)发育于近水平岩层,分别于 1949 年和 1981 年发生大规模变形,至今仍处于缓慢变形状态。该滑坡属于典型的滑移-压致拉

裂型滑坡,滑动方向 93°。该斜坡由上覆第四系粉质黏土、黏土和下伏砂泥岩互层岩体组成,岩层倾角 3°~5°。滑动面发育在近水平岩层中,上覆厚度 5~10 m 的第四系堆积体是促使该滑坡发生的必要物质条件。长时间降雨入渗导致滑带土物理力学性质不断劣化以及地下水扬压力是造成该滑坡变形的主要因素。

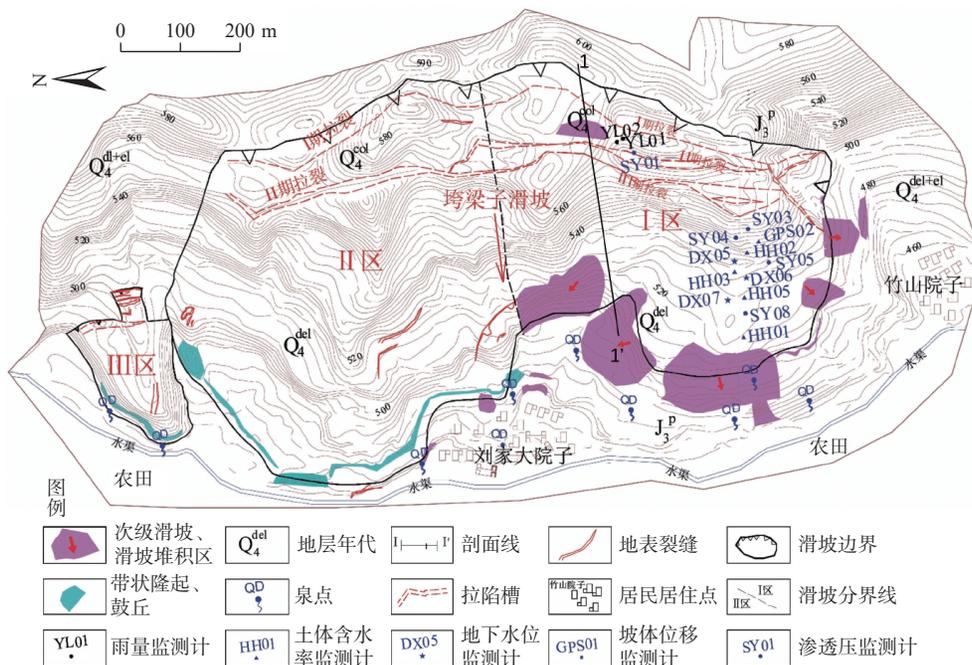


图 1 垮梁子滑坡平面图

Fig. 1 Plan of the Kualiangzi landslide

本研究通过前人挖掘的竖井采得滑带土试样,并根据《土工试验方法标准》(GBT 50 123—2019)进行土体物理力学性质测试,结果表明:滑带土天然含水率为 14%,密度为 2.30 g/cm³,干密度为 2.10 g/cm³。滑带土中小于 0.075 mm 的颗粒含量大于 50%,且黏粒($d < 0.005$ mm)含量占比在 10%~30%;土样塑限为 18.99%,液限为 35.49%,塑性指数为 16.5。通过 X 射线衍射(XRD)对滑带土进行矿物成分分析^[15],结果如图 2 所示,其中蒙脱石含量占 26%、伊利石占 28%、石英占 37%、斜长石占 5%、方解石占 4%,可以看出滑带土矿物成分以黏土矿物为主。结合上述试验最终确定该滑带土为粉质黏土。

1.2 试样制备

土体残余强度与其原始结构及应力历史关系甚微,因此可以用重塑土样进行试验研究^[17]。不同含水率滑带土试样制备过程如下:先将土样干燥压碎,剔除部分粗颗粒土,再过 2 mm 细筛;将土样按照干密度

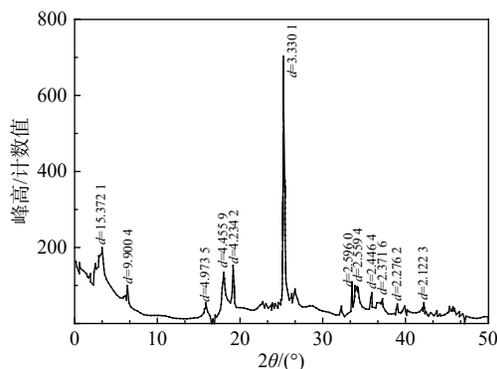


图 2 滑带土矿物 X 射线粉晶衍射矿物成分^[15]

Fig. 2 X-ray powder diffraction mineral compositions of the slip zone soil minerals^[15]

2.10 g/cm³ 加入去离子水达到预设含水率,然后将土样静置于保湿缸内使水分分布均匀;将试样分层装入剪切盒并压实,新加土层前将上一层土表面刮毛以保证各土层间紧密结合;最后挖去土样中心部分的土体,将试样装入环剪仪内。

试样含水率的设定以土体液塑限对应的含水率为上下限, 在可制样的含水率范围内分为 5 个梯度: 18%、20%、22%、24%、26%。每组试样制备完成时, 均采用烘干法实时测量试样含水率状态, 确保含水率差值控制在 $\pm 0.2\%$ 。

1.3 试验仪器及方法

本试验所用的仪器为日本圆井株式会社公司生产的 ICL-2 型环剪仪(图 3), 试样剪切面积为 98.13 cm^2 , 高为 30 mm。



图 3 ICL-2 型环剪仪

Fig. 3 ICL-2 type ring shear

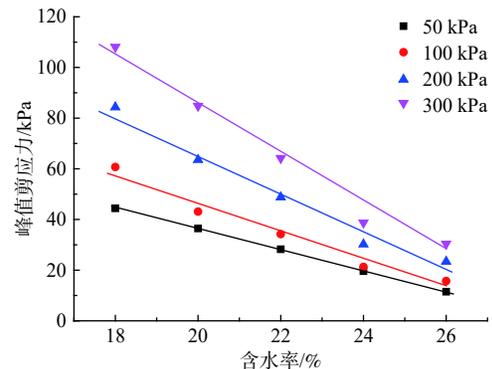
根据《土工试验方法标准》(GBT 50123—2019), 考虑现场滑体的平均厚度为 15 m, 因此试验中设置最大正压力值 300 kPa, 其余正压力值为 200, 100, 50 kPa。同时考虑该滑坡体运动过程中滑带土处于慢速-中速剪切状态, 试验过程中控制剪切速率为 0.50 mm/min 。保持正压力和剪切速率恒定进行剪切试验, 直到剪应力值达到稳定状态, 此时的剪应力值即为滑带土的残余强度, 通常黏性土在剪切位移达到 40 mm 左右即可到达残余强度。

2 不同含水率下滑带土抗剪强度试验结果

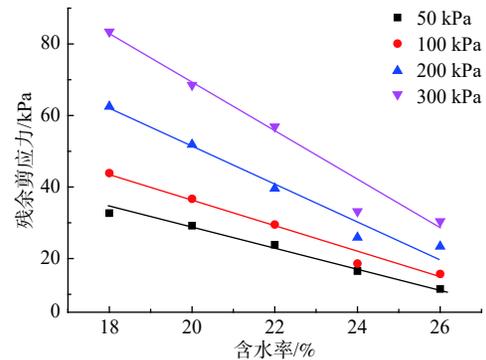
2.1 滑带土抗剪强度

滑带土在含水率为 18%、20%、22%、24% 和 26% 条件下的抗剪强度值如图 4 所示。在同一正压力条件下, 随着试样含水率的增加, 滑带土的峰值抗剪强度和残余抗剪强度均呈近乎线性衰减, 其中峰值抗剪强度较残余抗剪强度下降更为显著; 在相同含水率条件下, 法向应力的提高则显著增加土体的抗剪强度, 在含水率为 18% 时, 峰值抗剪强度增加至约 2.44 倍, 残余抗剪强度增加至约 2.55 倍; 在含水率增加至 26% 的过程中, 峰值抗剪强度和残余抗剪强

度增益依次约为 2.33/2.27/1.97/2.40 倍和 2.35/2.38/2.02/2.30 倍, 可见含水率的增加使得抗剪强度增幅整体呈下降趋势。这是由于土样中含水率的提高增加了土体中的孔隙水压力, 造成土体有效应力减小, 从而导致施加于土样的有效法向应力也相应减小。由于试验过程不能严格控制排水条件, 各组试样孔隙水会不同程度排出, 因此在含水率为 26% 时产生了异常数据。



(a) 峰值剪应力与含水率关系



(b) 残余剪应力与含水率关系

图 4 不同含水率滑带土抗剪强度

Fig. 4 Shear strength of the slip zone soil with different water content

通过拟合不同法向应力下的抗剪强度, 可以得出不同含水率条件下土样的抗剪强度参数(表 1)。可以看出, 滑带土峰值及残余黏聚力和内摩擦角均随含水率的增加而显著降低, 其中黏聚力下降更为明显; 随着含水率上升, 土样峰值抗剪强度参数便显出接近残余抗剪强度参数的趋势。在含水率从 18% 升至 26% 这一过程中, 各含水率状态下试样的残余黏聚力为同一含水率状态下峰值黏聚力的 68.50%、84.11%、80.67%、86.00%、96.25%, 残余内摩擦角为同一含水率状态下峰值内摩擦角的 80.58%、80.21%、89.56%、86.50%、80.05%, 这表明在含水率较低时, 土体黏聚力受含水率衰减效应的影响更为显著, 直到土体含水率达到

24% 以后, 土体的力学性质衰减开始转变为内摩擦角的降低。

表 1 滑带土抗剪强度参数

Table 1 Shear strength parameters of the slip zone soil

拟合公式	含水率	峰值抗剪强度参数		残余抗剪强度参数	
		c_p	φ_p	c_r	φ_r
$y=a+bx$	18%	33.67	14.06	23.06	11.33
	20%	25.04	11.12	21.06	8.92
	22%	20.33	8.24	16.40	7.38
	24%	14.59	4.52	12.46	3.91
	26%	7.99	4.31	7.69	3.45

2.2 含水率对土体残余强度参数的影响

滑带土的残余强度与土体自身性质关系极为密切, 是滑坡变形破坏行为最重要的控制因素之一。这些性质包括含水率、密度、级配和土体颗粒组成等。对于垮梁子滑坡而言, 降雨通过地表入渗, 增加了斜坡岩土体的含水率, 含水率的增加显著降低了滑带土残余强度参数, 为残余强度控制滑坡稳定性状态的能力提供了物质基础。

目前对于含水率的增加引起土体抗剪强度参数的衰减这一观点, 主要形成了以下几个认识:

(1) 水分附着在土颗粒表面充当了“润滑剂”作用, 使得土体抗剪强度参数减小;

(2) 有效应力原理表明, 土体中孔隙水压力上升会使有效应力下降, 从而降低抗剪强度参数;

(3) 非饱和土中土体基质吸力与其抗剪强度呈正相关, 而含水率则与土体基质吸力呈负相关, 当含水率上升时, 土体抗剪强度参数则会下降, 直至达到饱和土抗剪强度参数。

土体抗剪强度参数与含水率的对应关系十分复杂, 不同的土体性质往往使得土体抗剪强度表现出各不相同的变化规律。目前, 含水率与土体抗剪强度的对应关系大致有线性关系、二次函数关系、对数关系和指数函数关系等^[4,18-20]。本文根据环剪试验结果对垮梁子滑坡滑带土不同含水率状态下的残余抗剪强度参数进行了拟合分析, 结果表明, 在试验设置的含水率范围内, 含水率与滑带土残余内摩擦角和残余黏聚力均呈三次函数型衰减的趋势(图 5)。

3 基于动态残余强度的边坡数值分析

3.1 基于动态残余强度的应变软化模型

滑带土土体结构在拉剪作用下会引起一定损伤, 表现为滑带土黏聚力、内摩擦角、剪胀角及抗拉强度

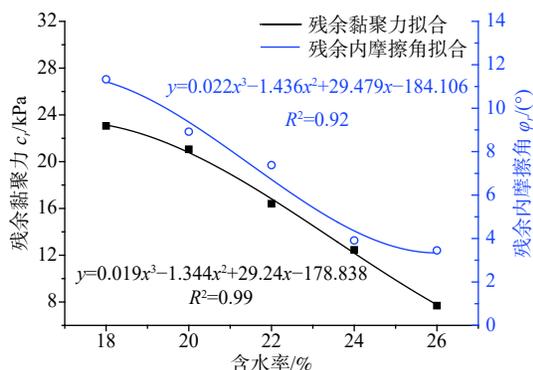


图 5 滑带土残余抗剪强度参数与含水率的关系

Fig. 5 Relationship between the residual shear strength parameters of the slip zone soil and water content

等强度参数不同程度的劣化。参考前人文献^[2,21-22], 采用剪切软化参数以及张拉屈服后的最大主塑性应变增量累计值作为损伤劣化过程的表达形式, 这些强度参数的劣化过程可以用塑性应变相关内变量的函数表示为:

$$\left. \begin{aligned} c &= c(\bar{\epsilon}^{ps}) \\ \varphi &= \varphi(\bar{\epsilon}^{ps}) \\ \psi &= \psi(\bar{\epsilon}^{ps}) \\ \sigma_t &= \sigma_t(\bar{\epsilon}^{pt}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}^{ps} &= \int \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\Delta e_1^{ps} \Delta e_1^{ps} + \Delta e_2^{ps} \Delta e_2^{ps} + \Delta e_3^{ps} \Delta e_3^{ps}} \\ \bar{\epsilon}^{pt} &= \int |\Delta e_3^{pt}| \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\bar{\epsilon}^{ps}$ 和 $\bar{\epsilon}^{pt}$ —— 等效塑性应变和张拉屈服后的最大主塑性应变增量累计值;

Δe_1^{ps} 、 Δe_2^{ps} 和 Δe_3^{ps} —— 剪切屈服后的主塑性应变增量偏量;

Δe_3^{pt} —— 张拉屈服后的最大主塑性应变增量。

对于某一条件下斜坡岩土体强度从峰值状态跌落到残余状态的劣化过程中, 强度参数的变化规律十分复杂, 为了简化计算, 前人多采用线性分段函数^[2,23]近似表达岩土材料的强度劣化过程, 如图 6 所示。图中, c_0 、 φ_0 、 ψ_0 与 σ_{t0} 分别为岩土体未发生塑性应变时的峰值黏聚力、峰值内摩擦角、峰值剪胀角和峰值抗拉强度; $\bar{\epsilon}_0^{ps}$ 和 $\bar{\epsilon}_0^{pt}$ 为岩土体在剪切和张拉作用下即将发生塑性变形的点, 即 $\bar{\epsilon}_0^{ps} - \bar{\epsilon}_0^{pt}$ 段岩土体未处于塑性变形阶段; c_r 、 φ_r 和 ψ_r 分别为岩土体剪切屈服后达到极限塑性应变 $\bar{\epsilon}_r^{ps}$ 时的残余黏聚力、残余内摩擦角和残余剪胀角; 岩土体在张拉屈服后达到极限塑性应变 $\bar{\epsilon}_r^{pt}$ 时的残余抗拉强度为 0。

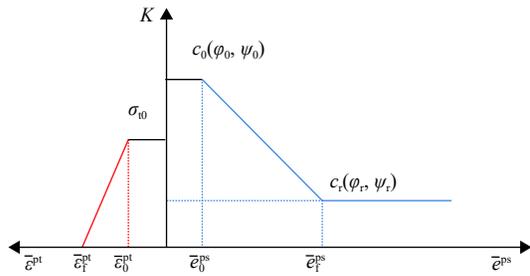


图 6 岩土材料强度劣化的线性应变软化模型

Fig. 6 Linear strain softening model for strength degradation of geomaterials

该模型用式(3)表示为:

$$K = \begin{cases} c_0(\varphi_0, \psi_0) & 0 < \bar{\varepsilon}^{ps} < \bar{\varepsilon}_0^{ps} \\ \sigma_{t0} & 0 < \bar{\varepsilon}^{ps} < \bar{\varepsilon}_0^{ps} \\ \frac{c_0 - c_r}{\bar{\varepsilon}_0^{ps} - \bar{\varepsilon}_f^{ps}} (\bar{\varepsilon}^{ps} - \bar{\varepsilon}_f^{ps}) + c_r & \bar{\varepsilon}_0^{ps} < \bar{\varepsilon}^{ps} < \bar{\varepsilon}_f^{ps} \\ c_r(\varphi_r, \psi_r) & \bar{\varepsilon}^{ps} > \bar{\varepsilon}_f^{ps} \\ \frac{\sigma_{t0}}{\bar{\varepsilon}_0^{ps} - \bar{\varepsilon}_f^{ps}} (\bar{\varepsilon}^{ps} - \bar{\varepsilon}_f^{ps}) & \bar{\varepsilon}_0^{ps} < \bar{\varepsilon}^{ps} < \bar{\varepsilon}_f^{ps} \\ 0 & \bar{\varepsilon}^{ps} > \bar{\varepsilon}_f^{ps} \end{cases} \quad (3)$$

其中, K 为黏聚力、内摩擦角、剪胀角和抗拉强度等的值。

以上应变软化模型反映了岩土体在经历一次含水状态或密度不变条件下应力状态的变化过程。部分学者^[24]提出的具有时效性的应变软化模型亦是反映了岩土体在某一不变因素下, 边坡张拉剪切渐进破坏的过程。在此基础上, 本文提出反映不同含水率条件下滑带土内部应力状态变化的模型, 以反映滑带土试样在受力过程中, 含水率不断变化的状态下其应力状态的变化过程, 从而体现岩土体残余强度的动态变化规律, 这种变化过程更符合多次滑动滑坡的形成过程。对于该模型, 岩土体每一阶段的残余强度与某一含水率具有内在的对应关系。基于此考虑, 假设滑带土在某一含水率状态下残余强度有唯一对应值, 以前文通过试验总结的残余强度参数与含水率的内在联系(图 5)为基础, 提出基于动态残余强度的应变软化模型对该滑坡变形过程进行分析, 如图 7 所示。图中: $\bar{\varepsilon}_0^{ps}$ 和 $\bar{\varepsilon}_f^{ps}$ 为岩土体在剪切和张拉作用下即将发生塑性变形的点, 即 $\bar{\varepsilon}_0^{ps} - \bar{\varepsilon}_f^{ps}$ 段岩土体未处于塑性变形阶段; c_{r1} 、 φ_{r1} 、 ψ_{r1} 与 σ_{tr} 分别为滑带土在某一含水率下初次达到屈服状态的最大残余黏聚力、残余内摩擦角、残余剪胀角和残余抗拉强度, 该状态下对应的剪切屈服塑性应变增量为 $\bar{\varepsilon}_{r1}^{ps}$, 显然 σ_{tr} 恒为 0; c_{ri} 、 φ_{ri} 和 ψ_{ri} 分别为滑带土随着含水率变化达到最小值时的残余黏聚力、残余内摩擦角和残余剪胀角, 该状态下对应的极

限剪切屈服塑性应变增量为 $\bar{\varepsilon}_{ri}^{ps}$ 。

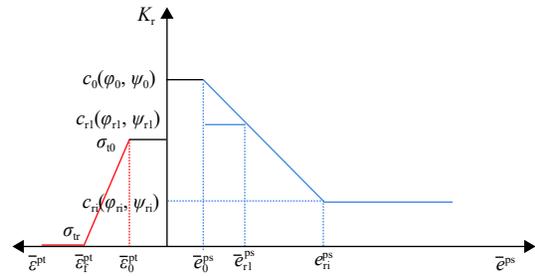


图 7 基于动态残余强度的多段线性应变软化模型

Fig. 7 Multi-segment linear strain softening model based on the dynamic residual strength

张拉和剪切两种破坏模式共同作用下, 基于应变软化模型的 Mohr-Coulomb 屈服准则表示为^[17-18,21]:

$$f_s(\sigma_1, \sigma_3, \bar{\varepsilon}^{ps}) = \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi(\bar{\varepsilon}^{ps})}{1 - \sin \varphi(\bar{\varepsilon}^{ps})} \sigma_3 + \frac{2c(\bar{\varepsilon}^{ps}) \cos \varphi(\bar{\varepsilon}^{ps})}{1 - \sin \varphi(\bar{\varepsilon}^{ps})} = 0 \quad (4)$$

$$f_t(\sigma_3, \bar{\varepsilon}^{ps}) = \sigma_3 - \sigma_t(\bar{\varepsilon}^{ps}) = 0 \quad (5)$$

式中: f_s 和 f_t ——剪切屈服函数和张拉屈服函数;

σ_1 和 σ_3 ——最小主应力和最大主应力(拉为正, 且设 $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$)。

3.2 模型的建立与参数选取

3.2.1 数值模型的建立

为了分析在含水率上升导致滑带土力学性质劣化的情况下, 滑坡发生整体滑动的变形破坏过程, 本文采用基于动态残余强度的应变软化模型对该滑坡进行数值稳定性分析, 分析软件为有限差分软件 FLAC^{3D}, 根据文献^[10,25]的计算分析, 有限差分模型用于该滑坡的分析行之有效。

根据滑坡原始地形剖面建立计算网格(图 8), 左下角为原点。由于滑面位置基本确定, 为简化计算, 将模型分为滑体、滑带和滑床三部分。岩层层面向坡外, 倾角为 5°。沿滑坡剪出口部位设置软弱夹层 λ , 其厚度为 3 m。模型的力学边界条件为: 左右两侧 (X 方向) 水平约束, 底边 (Z 方向) 完全固定, 坡面为自由面, 边坡初始应力场设为自重应力场。通过采用 C++ 语言定义的基于动态残余强度的应变软化模型

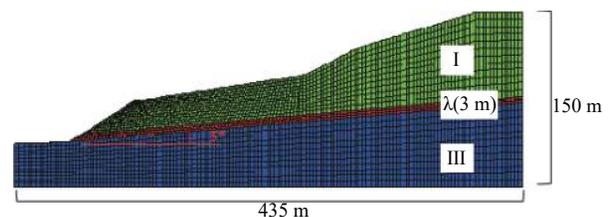


图 8 计算网格

Fig. 8 Computational grid

的 UDM 接口程序,将该本构模型嵌入 FLAC^{3D} 动态链接库文件,从而实现基于该本构模型的数值仿真计算。

3.2.2 计算参数的选取

图 8 中将滑坡模型简化为 I、 λ 和 III 三个部分,其中 I 代表滑体,为第四系残坡积物,含有大量的砂岩和泥岩块体; λ 代表滑带;III 代表滑床,主要为砂岩夹薄层泥岩。

为了模拟该滑坡滑带土强度劣化导致的大规模失稳,主要采用残余强度参数进行模拟。根据本文试验结果以及前人所作的调查和研究,本文模拟的滑坡各岩土层物理力学参数见表 2,其中:对于滑带土体来

说, c_{r1} 和 φ_{r1} 为根据试验所得残余强度参数回归分析得到的滑带土液塑限范围内最大的残余强度参数,此时对应含水率约为 17%;相对的, c_{ri} 和 φ_{ri} 为最小的残余强度参数,对应含水率约为 30%;其余含水率条件下的残余强度参数取值依据表 1; c_0 和 φ_0 为最大残余强度参数对应含水率 17% 下滑带土的峰值强度参数;剪胀角 ψ 通常取对应阶段内摩擦角值的一半,在此未列出;特别的,假设地层 III 中基岩在滑坡变形过程中始终不发生屈服,因此力学参数不发生改变;滑体中岩质成分较多,因此认为滑体中岩土体在第一次破坏达到残余强度后不再发生变化,同时滑体中岩层受地下水侵扰及风化作用强度较低。

表 2 各岩土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the rock and soil layer

地层代号	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	μ	σ_w/kPa	c_0/kPa	c_{r1}/kPa	c_{ri}/kPa	$\varphi_0/(\text{°})$	$\varphi_{r1}/(\text{°})$	$\varphi_{ri}/(\text{°})$	$\bar{\gamma}_{r1}^{ps}$	$\bar{\gamma}_n^{ps}$	$\bar{\varepsilon}_r^p$
I	22.50	45	0.3	35	65	25.2	25.20	31.5	18.50	18.50	0.008	0.02	0.002
λ	19.50	15	0.34	0	35.77	23.40	3.19	14.98	11.51	3.30	0.008	0.02	0.002
III	23.50	2.2×10^4	0.26	110	1 200	1 200	1 200	42	42	42	0.008	0.02	0.002

3.2.3 数值计算步骤

建立考虑滑带土力学性质演化的垮梁子斜坡稳定性数值计算模型,其计算步骤如下:(1)计算出基于应变软化本构模型的垮梁子斜坡初始地应力模型;(2)设置不同含水率状态下滑带土对应的残余强度参数为软化极限条件,并基于动态残余强度的应变软化模型计算至滑带初次达到屈服状态,即剪切塑性应变增量为 $\bar{\varepsilon}_n^{ps}$ 时的斜坡模型;(3)基于动态残余强度的应变软化模型计算 $\bar{\varepsilon}_n^{ps}$ 阶段的斜坡模型于 $\bar{\varepsilon}_n^{ps} - \bar{\varepsilon}_n^{ps}$ 内各阶段的计算模型;(4)基于不同含水率极限中不同阶段得到的计算模型,分析垮梁子滑坡塑性区、滑动面与安全系数等在含水率导致力学参数不断劣化过程中的动态演化过程。

4 计算结果分析

4.1 塑性区的发展

塑性区的发展是破坏面产生的必要不充分条件,但往往能揭示边坡内软弱部位的受力情况。垮梁子斜坡在滑带岩土体含水率上升的过程中,其塑性区的发展如图 9 所示。自然状态下,斜坡岩土体强度不发生劣化,此时边坡处于整体稳定状态,边坡中部塑性区几乎不发育,但边坡顶部仍然存在局部张拉塑性区,这预示着未来边坡顶部拉裂缝的产生,其次边坡底部软弱层部位有明显的剪切塑性区分布。图 9

(b)-(f)对应边坡在滑带土含水率为 18%、20%、22%、24% 和 26% 时斜坡内塑性区的分布情况。可以看出:由于软弱层力学性质差,该部分始终处于剪切塑性状态。随着含水率的提升,边坡中塑性区的分布范围不断增加,坡顶张拉塑性区开始向边坡内部发展,同时于坡表出现剪切塑性区。边坡底部开始出现明显的剪切塑性区,并不断发展直至贯通。当滑带土含水率增加至 20% 时,坡表中部开始出现剪切塑性区,随后快速扩展,并在含水率达到 24% 时扩展至整个坡表,至此坡表几乎整体处于张拉剪切塑性区。与此同时,边坡中上部出现大量剪切塑性区,并与滑带中的剪切塑性区贯通。

4.2 滑动面的演化

相比于塑性区描述的边坡内部岩土体受力状态,破坏区的分布可以更加直观地表达边坡内部岩土体的破坏发展情况,展示滑动面的渐进发展过程。图 10 (a)为自然状态下垮梁子滑坡的破坏区分布,图 10 (b)-(f)对应边坡在滑带土含水率为 18%、20%、22%、24% 和 26% 时斜坡内破坏区的分布情况。可以看出:由于地下水的软化作用使得滑带部位岩土体强度处于较低的状态,因此边坡底部沿滑带部位的软弱层中发育了间断的破坏区,同时坡脚处有不明显的破坏迹象,此时边坡仍处于稳定状态。随着滑带土中含水率增加,坡脚处的破坏面逐渐向坡表发展并有贯通的趋

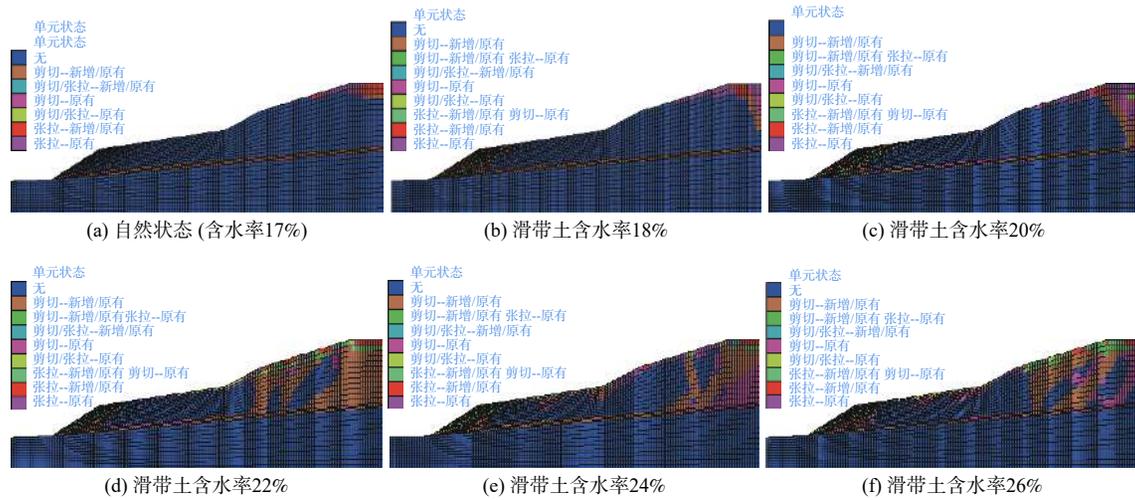


图 9 垮梁子滑坡塑性区分布

Fig. 9 Distribution of the plastic zone in the Kualiangzi landslide

势,同时边坡底部滑带中的破坏面开始相互贯通。当滑带土含水率到达 20% 时,坡脚部位破坏面贯通,岩土体开始发生局部破坏现象,同时边坡底部软弱层中的破坏面进一步贯通,但边坡仍处于整体稳定的状态。随着滑带土含水率上升至 22%,坡脚处的破坏加剧,发生局部失稳现象,同时边坡后缘开始出现拉裂缝。当含水率达到 24% 时,拉裂缝进一步发展,拉裂缝的产生为地表水进入斜坡内部提供了有利条件,随

后边坡开始加速变形,边坡后缘的拉裂缝开始与滑带中的破坏面贯通,同时边坡中部开始产生竖直和倾向坡外的拉裂缝。不同部位的拉裂缝与滑带中的破坏面相贯通,边坡开始整体失稳。同时由于拉裂缝的存在,不同部位的滑体产生了不尽相同的位移,因此在滑坡中上部形成间隔分布的拉裂区,这与垮梁子斜坡在实际滑动中产生的破坏形态(图 11)一致,也体现了数值模拟计算的可靠性。

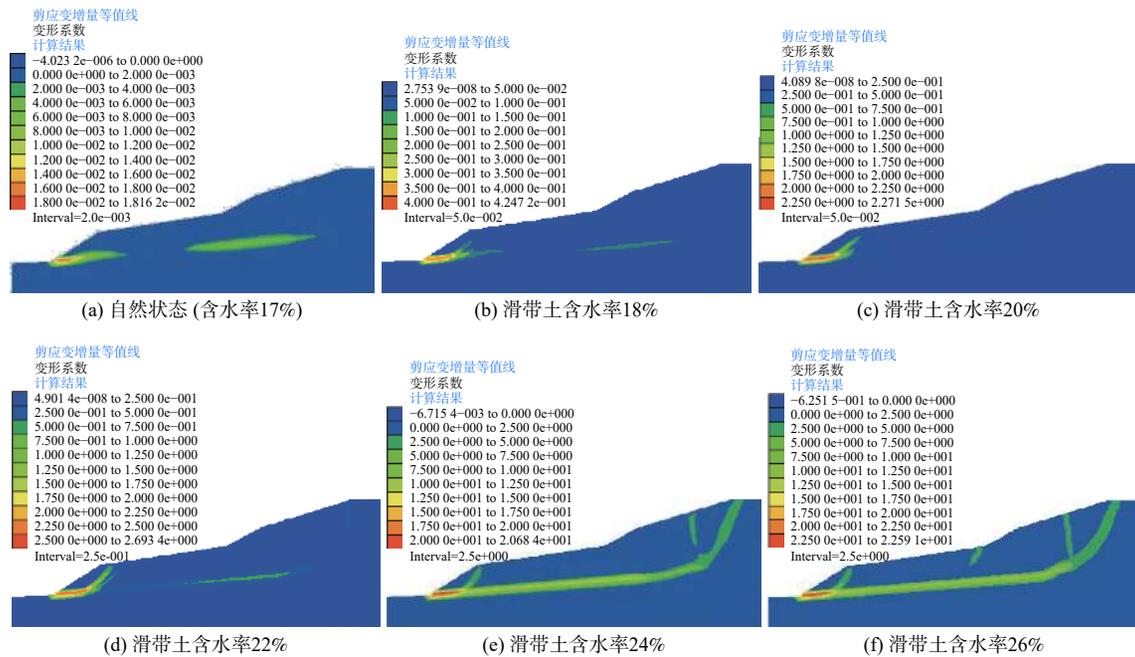


图 10 垮梁子滑坡破坏区发展过程

Fig. 10 Development process of the failure zone of the Kualiangzi landslide

无论是塑性区的演化还是滑动面的发展,都表明滑坡前缘将产生局部变形破坏。根据现场调查情况,

滑体浅表层及前缘以第四系残坡积土为主,下部则以风化砂岩及泥岩为主,且岩层倾角为 3°~5°。因此,



(a) 坡脚局部滑塌



(b) “拉陷槽”和“凹陷区”现状

图 11 垮梁子滑坡破坏形态

Fig. 11 The failure mode of the Kualiangzi landslide

尽管斜坡前缘发生局部破坏,但由此带来的抗滑力的减弱并不会对斜坡整体稳定性造成明显影响,滑带岩土体物理力学性质的发展仍是该滑坡整体稳定性的主控因素。而滑带岩土体物理力学性质的劣化是地下水长期作用的结果,这与该滑坡两次滑动时隔 32 年相互印证。

4.3 含水率与边坡稳定性的相关性

随着滑带土中含水率的增加,滑带土的强度也在不断发生劣化,在此过程中边坡的稳定性随之具有动态变化的特征。研究边坡稳定性与滑带土含水率的动态对应关系有助于更直观地理解降雨致滑带土强度劣化诱发滑坡的过程机理,以及含水率影响下边坡的稳定性发展趋势。

以上基于具有动态残余强度特征的应变软化模型,对滑带土处于不同含水率时边坡中塑性区及破坏区的分布进行了计算分析,在此基础上通过折减计算参数将边坡计算至临界破坏状态,可以得到不同含水率条件下边坡的安全系数。同时采用极限平衡法(Morgenstern-Price 法)作为对比,取不同含水率条件下对应的滑带土残余强度参数进行静力学计算,结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出:滑带土中含水率较低时,斜坡稳定性对滑带土中含水率的变化有较高的敏感性,当

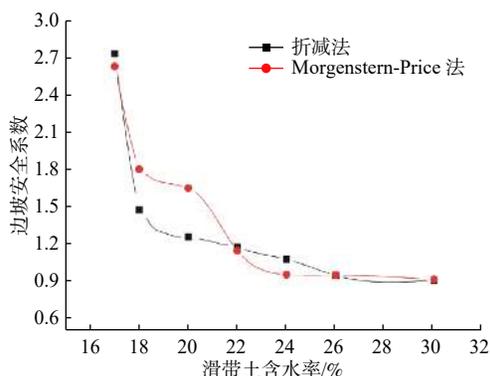


图 12 垮梁子斜坡安全系数动态变化特征

Fig. 12 Dynamic change characteristics of safety coefficient of the Kualiangzi slope

含水率升至 18% 时,边坡的安全系数显著降低,但仍处于稳定状态。采用折减法计算安全系数时,垮梁子滑坡的安全系数同样在滑带土含水率升至 18% 之前迅速下降;含水率从 18% 升至 22% 的过程中,斜坡安全系数缓慢降低,最低值为 1.180,此时斜坡处于基本稳定的状态;含水率从 22% 升至 26% 的过程中,安全系数下降程度略有增加,斜坡也随即进入不稳定状态;当滑带土含水率达到 26% 以后,斜坡安全系数下降趋于平缓。采用 Morgenstern-Price 法计算安全系数时,垮梁子斜坡在滑带土含水率为 18% ~ 20% 以及大于 24% 时,安全系数下降趋于平缓,其他含水率区间则表现出较强的敏感性。结合图 10 中不同含水率阶段垮梁子斜坡的破坏区渐进发展过程可知,在滑带土含水率低于 22% 时,斜坡中破坏区缓慢发展,但并未完全贯通,同时边坡后缘开始发育纵向拉裂缝,斜坡处于缓慢蠕变的过程中。随着含水率增加至 24%,斜坡后缘拉裂缝不断加深,开始与滑带中的剪切破坏面贯通,同时边坡中部不同部位开始产生拉裂,斜坡进入加速破坏阶段。当含水率增加至 26% 时,斜坡中张拉剪切破坏面已完全贯通,而且边坡中部的拉裂缝开始不断延伸和扩展,并逐渐与深层剪切面贯通,斜坡进入累进性破坏阶段,此时边坡的安全系数几乎降至最低。

5 结论

(1) 滑带土的抗剪强度与含水率对数值呈负相关,其中滑带土的残余强度参数随含水率的增加呈三次函数型衰减。

(2) 以含水率 24% 为分界,低于该含水率时滑带土黏聚力所受影响更为显著,高于该含水率时则滑带土内摩擦角所受影响更为显著。

(3) 基于滑带土残余强度的动态规律建立的应变软化模型可以准确描述滑带土强度因含水率状态不断变化而持续劣化的过程。

(4) 垮梁子滑坡的渐进破坏过程模拟表明,在滑带土含水率达到 24% 时,塑性区呈现贯通的趋势,滑动面也进一步发展,滑坡进入加速变形阶段。

(5) 安全系数的动态演化特征表明,在滑带土含水率较低时,滑坡稳定性受含水率影响最为显著。滑带土含水率升至 22% 时,滑坡即将进入不稳定状态。当滑带土含水率达到 26% 时,滑坡已处于失稳状态,此后滑坡的稳定性不再发生变化。

参考文献 (References) :

- [1] 马云长,苏培东,郑智洋,等.基于滑带土应变软化的滑坡渐进破坏研究[C]//2019年全国工程地质学术年会论文集.北京,2019:181-187.[MA Yunchang, SU Peidong, ZHENG Zhiyang, et al. Progressive failure research of landslide based on strain softening of sliding zone soil[C]//Proceedings of the 2019 Engineering Geology Session. Beijing,2019:181-197.(in Chinese with English Abstract)].
- [2] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D: Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions user manual (Version3.0)[M]. Minneapolis: Consulting Group Inc, 2005.
- [3] 宋雪琳,谢勋,齐剑峰,等.云南哀牢山某滑坡滑体与滑带土工程性质试验研究[J].水文地质工程地质,2010,37(4):77-80. [SONG Xuelin, XIE Xun, QI Jianfeng, et al. A study on the engineering properties of sliding-body and sliding-zone soil at Ailaoshan in Yunnan Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(4): 77 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张怡颖,郭长宝,杨志华,等.四川茂县周场坪深层滑坡滑带土环剪试验强度研究[J].工程地质学报,2021,29(3):764-776. [ZHANG Yiyang, GUO Changbao, YANG Zhihua, et al. Study on shear strength of deep-seated sliding zone soil of zhouchangping landslide in Maoxian, Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 764 - 776. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 黄斌,傅旭东,谭凡,等.含水率对滑带土强度及变形影响试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2613-2618. [HUANG Bin, FU Xudong, TAN Fan, et al. Experimental study of relationship between water content and strength or deformation of slip soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2613 - 2618. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李文,龙建辉,李同录,等.陕西泾阳南塬黄土滑坡滑带土残余剪切强度特性[J].地球科学与环境学报,2012,34(4):95-101. [LI Wen, LONG Jianhui, LI Tonglu, et al. Residual shear strength characteristics of landslide soil in loess landslide of Jingyang southern highland, Shaanxi[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(4): 95 - 101. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 饶鸿,王金淑,赵志明,等.基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析[J].水文地质工程地质,2021,48(1):154-162. [RAO Hong, WANG Jinshu, ZHAO Zhiming, et al. An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 154 - 162. (in Chinese with English abstract)]
- [8] SRBULOV M. A simple method for the analysis of stability of slopes in brittle soil[J]. *Soils and Foundations*, 1995, 35(4): 123 - 127.
- [9] 刘忠玉,陈少伟.应变软化土质边坡渐进破坏的演化模型[J].郑州大学学报(工学版),2002,23(2):37-40. [LIU Zhongyu, CHEN Shaowei. Evolution model of progressive failure of strain-softening soil slopes[J]. *Journal of Zhengzhou University of Technology*, 2002, 23(2): 37 - 40. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈国庆,黄润秋,周辉,等.边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J].岩土力学,2013,34(4):1140-1146. [CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, ZHOU Hui, et al. Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 1140 - 1146. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 薛海斌,党发宁,尹小涛,等.应变软化边坡稳定性分析方法研究[J].岩土工程学报,2016,38(3):570-576. [XUE Haibin, DANG Fanning, YIN Xiaotao, et al. Stability analysis methods for strain-softening slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(3): 570 - 576. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 卢应发,张凌晨,张玉芳,等.边坡渐进破坏多参量评价指标[J].工程力学,2021,38(3):132-147. [LU Yingfa, ZHANG Lingchen, ZHANG Yufang, et al. Multi parameter evaluation index of progressive failure of landslide[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 132 -

147. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 何怡, 郭力, 马冲. 考虑软弱夹层中岩土体应变软化特性的矿山边坡变形体渐进破坏分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 162 – 167. [HE Yi, GUO Li, MA Chong. Progressive failure of deformed rock body on the mine slope considering strain softening characteristics of rock and soil in weak interlayer[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(2): 162 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 罗忠行, 雷宏权. 基于FLAC^{3D}的米贝复式滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 52 – 62. [LUO Zhongxing, LEI Hongquan. Study on Mibei landslide analysis based on FLAC^{3D}[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 52 – 62. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈思娇. 四川中江垮梁子滑坡滑带土强度特性及滑坡变形机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [CHEN Sijiao. Study on shear strength properties of slip soils and deformation mechanism of Kualiangzi landslide in Zhongjiang of Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吉随旺, 张倬元, 王凌云, 等. 近水平软硬互层斜坡变形破坏机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 49 – 52. [JI Suiwang, ZHANG Zhuoyuan, WANG Lingyun, et al. The mechanism of deformation and failure for the slope composed of nearly horizontal competent and incompetent intercalated rock mass strata[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(3): 49 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 许成顺, 尹占巧, 杜修力, 等. 黏性土的抗剪强度特性试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1433 – 1438. [XU Chengshun, YIN Zhanqiao, DU Xiuli, et al. Experimental study of shear strength of clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12): 1433 – 1438. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王永璐, 刘顺青, 姜朋明. 含水率及吸力对非饱和下蜀土强度特性影响试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 48 – 52. [WANG Yonglu, LIU Shunqing, JIANG Pengming. Experimental study on the influence of moisture content and suction on the strength characteristics of Xiashu soil[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(4): 48 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 朱兆波, 王新刚, 朱荣森, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡滑带土剪切特性环剪试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(5): 144 – 150. [ZHU Zhaobo, WANG Xingang, ZHU Rongsen, et al. Ring shear test on the shear characteristics of sliding zone soil of loess in Heifangtai, Gansu[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(5): 144 – 150. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 赵蕊, 左双英, 王嵩, 等. 不同含水量贵阳重塑红黏土三轴抗剪强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 90 – 95. [ZHAO Rui, ZUO Shuangying, WANG Song, et al. Experiment and mechanism analysis of water contents on triaxial shear strength of the remodeled red clay of Guiyang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 90 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 夏志皋. 塑性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1991. [XIA Zhigao. Plastic mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991. (in Chinese)]
- [22] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. [ZHENG Yingren, KONG Liang. Geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)]
- [23] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(1): 35 – 48.
- [24] 王伟, 陈国庆, 郑水全, 等. 考虑张拉-剪切渐进破坏的边坡矢量和法研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 468 – 476. [WANG Wei, CHEN Guoqing, ZHENG Shuiquan, et al. Study on the vector sum method of slope considering tensile-shear progressive failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup 1): 468 – 476. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王伟. 考虑张拉-剪切渐进破坏的“三段式”边坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [WANG Wei. Study on the stability of “three sections” slope considering tension and shear progressive failure[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华