水文地质工程地质
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

含裂隙近水平红层软岩边坡渗透稳定性模型试验

邓　威，肖世国

Model test on stability of soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks

DENG Wei and XIAO Shiguo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210050

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 陈星, 刘悦　水文地质工程地质. 2022, 49(5): 119-128

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健　水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣　水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建　水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models

穆成林, 裴向军, 裴钻, 张引, 习朝辉　水文地质工程地质. 2019, 46(4): 150-158

基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析

An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory

鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎　水文地质工程地质. 2019, 46(6): 112-118

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210050

邓威, 肖世国. 含裂隙近水平红层软岩边坡渗透稳定性模型试验 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 57-68.

DENG Wei, XIAO Shiguo. Model test on stability of soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 57-68.

含裂隙近水平红层软岩边坡渗透稳定性模型试验

邓　威[1], 肖世国[2]

（1. 西南交通大学地质工程系, 四川 成都　610031;
2. 高速铁路线路工程教育部重点实验室（西南交通大学）, 四川 成都　610031）

摘要：针对川东地区含裂隙近水平红层软岩边坡在长时强降雨条件下易产生滑坡灾害的问题, 依托含双软弱夹层的此类典型坡体实例, 以弹性模量和抗拉强度为主控因素制备可表征软岩遇水软化开裂特性的相似材料, 构建了含裂隙近水平红层软岩边坡的室内物理试验模型, 研究了边坡在长期雨水入渗作用下的坡体变形、裂隙扩展和稳定性演变规律。结果表明: (1)坡体变形发展可分为初始变形阶段、匀速变形阶段、加速变形破坏阶段; (2)坡体裂隙扩展主要包括在坡体后部的自下而上发育的“上窄下宽”裂隙, 以及在坡体前部的自上而下发育的“上宽下窄”裂隙。裂隙扩展区域主要集中在上、下软弱夹层之间, 其中易产生超孔隙水压力; (3)试验模型的 FLAC3D 数值模拟再现了该推移式滑坡的渗流过程, 超孔隙水压力随时间呈现先增大后逐渐趋于稳定的变化特征, 在软弱夹层和竖向裂隙处, 超孔隙水压力呈累计增大的特征; (4)坡体滑面形成及失稳破坏演变过程可划分为浅表层裂隙发育贯通阶段、裂隙向软弱夹层延伸发育并逐步贯通阶段、裂隙扩展与坡体滑动失稳阶段。长期雨水入渗致岩体强度弱化, 以及裂隙逐渐向坡体深部发育并与软弱夹层贯通形成多级阶梯式滑裂面, 是造成含裂隙近水平红层软岩边坡滑动失稳的根本原因。

关键词：近水平红层; 软岩边坡; 渗透稳定性; 模型试验; 裂隙

中图分类号：P642.22　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-3665(2024)01-0057-12

Model test on stability of soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks

DENG Wei[1], XIAO Shiguo[2]

(1. *Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan*　610031, *China*;
2. *Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education*
(*Southwest Jiaotong University*), *Chengdu, Sichuan*　610031, *China*)

Abstract: Regarding to the problem that soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks in the eastern Sichuan area is prone to sliding failure under long-term heavy rainfall conditions, based on a typical slope example with double weak interlayers, similar materials that can characterize the softening and cracking characteristics of the soft rock in water are prepared with elastic modulus and tensile strength as the main control factors. A laboratory physical test model on a soft rock slope with fissured nearly horizontal redbeds was constructed, and the deformation, crack propagation and stability evolution of the slope under long-term rainwater

收稿日期：2022-10-21；**修订日期：**2023-03-02　　**投稿网址：**www.swdzgcdz.com

基金项目：四川省交通运输科技项目 (2020-A-01); 国家自然科学基金项目 (51578466)

第一作者：邓威 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事边坡工程研究工作。E-mail: 2950883042@qq.com

通讯作者：肖世国(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事边坡与支挡结构研究工作。E-mail: xiaoshiguo@swjtu.cn

infiltration was investigated. The results show that (1) the development of slope deformation can be divided into three stages - initial deformation, uniform deformation and accelerated deformation failure; (2) the crack propagation of the slope mainly includes the ‘upper-narrow and lower-wide’ cracks developed from bottom to top in the rear of the slope, and the related cracks developed from top to bottom in the front of the slope. The crack propagation area is mainly concentrated between the upper and lower weak interlayers, where excess pore water pressure is easily gathered; (3) a numerical simulation of the test model via FLAC3D presents the seepage process of the thrust landslide, and shows that the excess pore pressure increases initially and then stabilizes gradually with time. At the weak interlayers and vertical cracks, the excess pore water pressure increases cumulatively; (4) the evolution process of the sliding surface and slope instability can be divided into three stages: shallow fracture development and penetration, fracture spreading to deep weak interlayers and gradual penetrating, fracture further extension and slope failure. The weakening of rock mass caused by long-term rainwater infiltration, together with the gradual development of cracks to the deep zone of the slope and their connections with the soft interlayers to form the multi-stage stepped sliding surface are fundamental reason of slope failure for the soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks.

Keywords: nearly horizontal redbeds；soft rock slope；stability permeability；model test；cracks

在四川省分布有大量的近水平红层，尤其是位于四川盆地东北边缘的川东红层地区，地处大巴山弧形构造带与川东平行皱褶带的结合部位，受构造运动影响较大，地层以侏罗系、白垩系为主。川东红层地区暴雨频发，年降雨量在 1 000 mm 以上[1]。2011 年 9 月 17—18 日大暴雨导致滑坡频发，仅南江县新增地质灾害点达 1 000 余处，代表性的大型顺层岩质滑坡有石板沟滑坡、牛马场滑坡、窑厂坪滑坡等 10 余处。在普通工况下此类边坡非常稳定，但在频发暴雨工况下则会产生大规模滑坡，且其主滑面倾角较小。因此，近水平红层软岩边坡的滑动破坏成因机制与滑面倾角较大的坡体可能有所不同，频发暴雨的诱发机制尤为关键。

部分学者认为，近水平红层软岩滑坡的发生主要是由于雨水对于岩土体强度的软化作用致使边坡失稳。通过室内强度试验发现，红层软弱夹层一旦遇水饱和其力学特性将大幅下降[2－3]。针对川东红层泥岩室内试验研究发现，红层饱水软化后微观结构的破坏是导致滑带土的力学强度降低的内在原因[4－7]。同时，也有部分研究认为红层的强崩解性是其强度弱化的重要因素，且崩解速率、崩解程度和水-岩相互作用密切相关[8－10]。然而，很多情况下即使将滑面抗剪强度参数调至很低的水平，相关的近水平红层滑坡稳定性验算仍能满足规范要求。所以，雨水入渗引起岩体强度软化只是导致近水平红层软岩边坡滑动失稳的一个可能要素，并非在任何情况下都是决定性因素。

实际上，近水平红层软岩边坡中的裂隙发育，往往是导致频发强降雨条件下坡体滑动失稳的一个重要因素。有学者在川东红层近水平或缓倾滑坡典型案例的调查中发现，在极端降雨条件下大型缓倾角红层滑坡常发育有深大裂隙和后缘拉裂隙，成为雨水入渗的主要通道[11－12]。降雨入渗是含软弱层的顺层岩质边坡破坏的主要因素，持续降雨容易引起超孔隙水压力，边坡失稳实际是孔隙水压力和滑带土剪切强度下降共同作用的结果[13－15]。部分学者通过降雨工况下模型试验，探究边坡内部应力场的变化，揭示了坡体稳定性的主要影响因素是超孔隙水压力的累聚和消散、雨水入渗软化软弱夹层[16－18]。

以往的相关研究工作对于认识近水平红层软岩边坡的滑动变形与失稳机制有重要参考意义。然而，在关于坡体中裂隙发展及其中雨水入渗的渗透作用对坡体滑动变形的影响机制还缺乏深入研究。鉴于此，针对含裂隙的近水平红层软岩边坡，基于相似理论，采用物理模型试验方法，制备可表征软岩遇水软化特性的相似材料，构建裂隙边坡模型，模拟长期强降雨工况，通过测试边坡表面位移、内部应力及孔隙水压力等变化特征，揭示坡体内部裂隙发展和雨水渗流的规律及其对坡体滑坡变形的影响，并对岩体裂隙渗流的不同阶段进行边坡稳定性演变分析。

1 实例工程地质条件

以安乐寺滑坡为依托实例。安乐寺滑坡地处万州长生河与西溪河交汇处，滑坡两侧边界与河流相距

约 200 ~ 400 m, 在滑坡前缘分布着鱼鳅洞、农机技校和天成移民局等小滑坡。安乐寺滑坡为不规则椭圆状, 滑体主轴方向 175°, 总长 699 m, 宽约 2 100 m, 滑体厚 10 ~ 48 m, 平均厚度 24.6 m, 总面积为 1.01×10^6 m^2, 总体积为 2.486×10^7 m^3。坡体地形平缓, 呈多级小平台, 后缘与前缘因变形和自然改造作用坡度为陡, 表面风化及卸荷裂隙发育, 裂隙倾角多集中在 70° ~ 90°, 后缘分布纵深拉裂隙下错陡坎[19]。

安乐寺滑坡剖面图如图 1 所示[20], 潜在滑体及滑床范围内从上到下主要包括 10 个岩层。滑坡出露地层为中侏罗统沙溪庙组(J_2s), 岩性为紫红色砂岩, 灰白色长石石英砂岩、紫红色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩等, 岩层产状为 150°∠4° ~ 5°, 厚度 10 ~ 15 m, 其中砂岩地层属硬岩, 岩体强度较高, 泥岩地层属软岩; 坡表覆盖第四系黄褐色黏土, 厚度 1 ~ 4 m。滑坡含双软弱夹层(Y1、Y2), 均为滑带: Y1 软弱夹层平均厚度 0.2 ~ 0.35 m, 下伏长石石英砂岩, 厚度约 15 m, 上覆泥质粉砂岩, 厚度约 12 m; 在 Y1 软弱夹层下平均深度约 12 m 处存在 Y2 软弱夹层, 其平均厚度 0.1 ~ 0.15 m, 上覆粉砂岩, 厚度约 12 m。滑带土成分均为灰白色含角砾黏土, 角砾成分为灰白色泥岩, 在黏土层底部可见滑动擦痕。

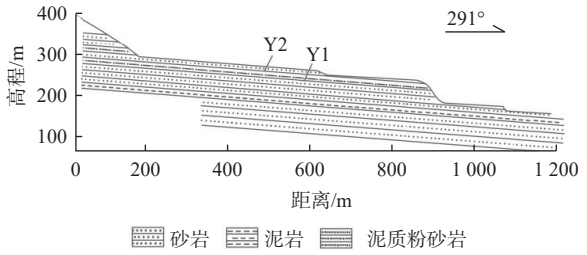


图 1　安乐寺滑坡地质剖面图(改自文献 [20])

Fig. 1　Geological profile of the Anle Temple landslide (modified after Ref. [20])

2　物理试验模型

2.1　模型设计

鉴于试验场地条件, 试验所用模型箱尺寸为: 长 200 cm、宽 75 cm、高 125 cm, 采用方钢、工字钢和钢板焊接而成, 侧壁镶嵌钢化玻璃, 后端可通过升降支座调整边坡倾角。模型箱底部设有排水系统, 可控制箱内排水, 顶部设置降雨模拟系统。

针对前述的岩层倾角 4°、坡高约 42 m 的红层软岩边坡, 模型对原型的几何相似比取为 C_l=1∶40、重度相似比取为 C_γ=1∶1.25, 边坡模型高度约 106 cm, 如图 2 所示。根据几何相似与渗流等效原理, 边坡岩层相似材料的抗拉强度(σ_t)、抗压强度(σ_c)、弹性模量(E)、黏聚力(c)和内摩擦角(φ)等物理力学参数的相似比可通过 FLT(力-长度-时间)量纲系统换算得到(表 1)。

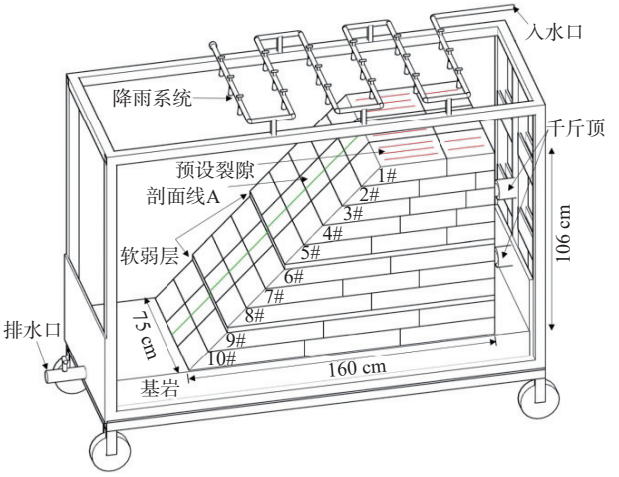


图 2　试验模型示意图

Fig. 2　Sketch map of the test model

表 1　岩层原型与模型材料的主控力学参数

Table 1　Main mechanical parameters of rock prototype and model materials

岩层		σ_t/MPa	σ_c/MPa	E/MPa	c/kPa	φ/(°)
粉砂岩	原型	1.440	44.95	4 803.24	6 630.0	59.6
	设计	0.029	0.90	96.07	132.6	59.6
	试验	0.027	0.66	82.07	128.2	58.9
泥岩	原型	0.300	3.20	588.00	280.0	34.3
	设计	0.006	0.06	11.76	5.6	34.3
	试验	0.005	0.06	10.92	5.0	33.1

根据实际工程地质条件, 岩层中普遍存在 1 ~ 2 组竖向节理面。在坡体模型 1#—3#岩层顶面, 用锋利刀片切割形成预设裂隙, 裂隙深度和数量随坡体深度减小, 以模拟坡体中的裂隙分布情况, 如图 3 所示。既可模拟实际边坡浅表层卸荷风化裂隙, 也能更好地观察降雨作用下裂隙的扩展。

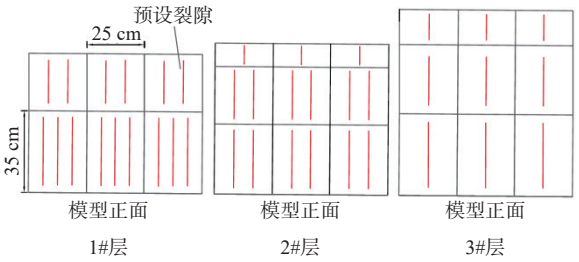


图 3　模型岩层 1#—3#中预设裂隙平面示意图

Fig. 3　Plane diagram of preset fractures in modelled rock strata 1# to 3 #

2.2 模型材料与制作

试验研究的主要目的是揭示裂隙渗流作用下岩质边坡的变形破坏特征，故在选配相似材料时，以原型与模型之间的 E 和 σ_t 的相似关系作为主控条件，σ_c 为辅助因素。试验采用细砂、粗砂、石膏、水泥、水作为浇筑模型岩块的相似材料。粗砂和细砂分别起粗、细骨料的作用，石膏、水泥与水混合后起胶结作用。

模型 1#—10#层中风化砂岩采用细砂：粗砂：石膏：水泥：水=72：2：8：5：13，各层厚度均为 10 cm，养护 2 d；软弱夹层（强风化砂岩）采用细砂和黏土混合后铺制，厚度 3 cm。模型底部为坚硬基岩，以细砂：粗砂：石膏：水泥：水=60：6.5：10.5：6：17 的比例配置，将其铺设在密实粗砂上，养护 2 d。模型相似材料主控力学参数见表 1。试验中岩块使用不同长度预制块模拟，预制块尺寸为宽×高=25 cm×10 cm，长度 10 ~ 160 cm。在模型箱前部设置挡板，按 4°倾角自下至上逐层堆砌岩块形成坡体模型。除软弱夹层处外，岩层面均采用 2 mm 厚砂浆抹面以模拟层间充填物，软弱夹层铺设在 5#和 9#岩层上。

2.3 加载与测试方法

为充分模拟坡体滑动变形过程，基于依托实例的推移式滑坡机制，在坡体模型后侧施加推力荷载，具体以分离式手动液压千斤顶与数显压力表对坡体模型进行精确加载，千斤顶最大行程为 200 mm，如图 4 所示，千斤顶所施加的推力经加载垫板作用到模型坡体的后缘，促使坡体逐渐发生显著变形。考虑到坡体中软弱夹层的黏聚力较小，试验模型后侧所施加的最大推力荷载以坡体自重乘以深部夹层的摩擦系数估算，求得推力荷载约为 27.58 kN，除以加载面积得到相应的作用应力为 34.70 kPa。

图 4 试验加载装置

Fig. 4 Test loading device

模型测点布设如图 5 所示。在坡顶和坡面布置位移测点，坡顶中部和后部各 1 个位移计，坡面分别在 2#、5#和 8#层布置位移计，以监测边坡不同深度位移变化。采用电感顶针式位移计（图 6a）进行位移动态监测，量程为 0 ~ 200 mm、精度可达 0.01 mm。

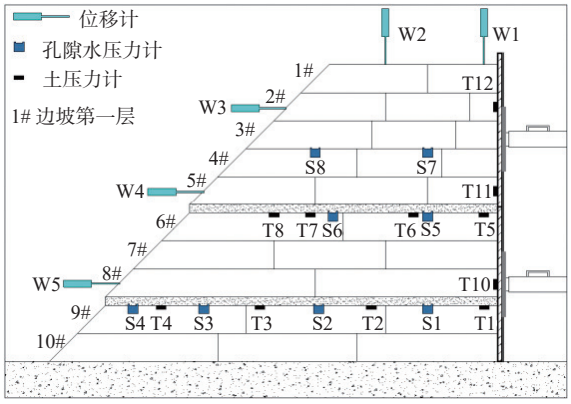


图 5 边坡模型测点布置图

Fig. 5 Measurement points layout of the slope model

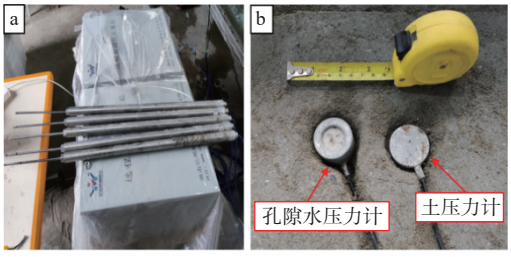


图 6 试验采用的测试元器件

Fig. 6 Sensors used in the test

沿剖面线 A（图 2）在坡体内部布设应力传感器监测坡体应力及孔隙水压力（图 6b）。采用微型土压力计测试坡体内部应力，共设 11 个测点，坡体后侧千斤顶加载面布设 3 个（编号 T10、T11、T12），上、下软弱夹层各布置 4 个（编号分别为 T1、T2、T3、T4 和 T5、T6、T7、T8）；通过孔隙水压力计测试孔隙水压力，共设 8 个测点，在下部与上部软弱夹层、4#岩层上分别安装 4 个（编号 S1、S2、S3、S4）、2 个（编号 S5、S6）、2 个（编号 S7、S8）。测试数据通过采集系统自动采集（图 7）。此外，采用高清摄像机对边坡两侧及坡面进行拍摄，捕捉边坡两侧裂隙扩展情况。

2.4 降雨模拟方法

试验模拟工况为夏季间歇性暴雨至大暴雨，降雨强度设为 100 mm/d，试验时长为 15 d。模型箱顶部设置叠加喷洒式降雨系统以实现全坡面均匀降雨，降雨装置由中软 PE 防爆管和可调流量的喷头组成。降雨系统包括供水单元、喷洒单元、控制单元和监测单元，其中，喷洒单元共 6 组，每组含 3 个喷头，每个喷头流量强度可在 0 ~ 100 mm/d 进行调节以模拟不同强度的

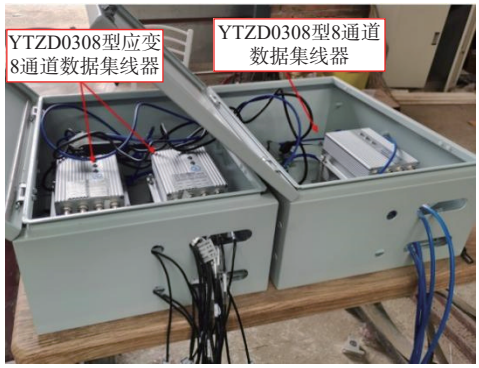


图 7　试验数据采集系统

Fig. 7　Data acquisition system in the test

降雨作用，如图 8 所示，其组合可形成 0 ~ 300 mm/d 强度的降雨。

图 8　试验降雨装置

Fig. 8　Rainfall device in the test

结合现场实际情况，采用 6 组 33 mm/d 强度单元组成 100 mm/d 强度的降雨，以间歇性降雨 15 d 来模拟夏季长期降雨对滑坡的诱发作用。为保证雨水主体不在模型边界逸散，而是主要沿着岩层接触面和裂隙进行渗流，在边坡岩块堆砌过程中，坡体两侧采用环保透明无黏性硅凝胶填充模型箱玻璃与岩层间的接触缝隙。

2.5　试验操作步骤

（1）在模型箱底部铺一层厚 5 cm 的粗砂，用于排水，防止试验降雨过程中雨水积留。采用定制模具逐层浇筑岩块，养护 2 d 后，将层面倾角调至 4°。

（2）由下至上逐层堆砌坡体岩层，根据测点布设方案在相应岩层安装孔隙水压力计和土压力计，在岩层和模型箱两侧钢化玻璃面间填充透明硅凝胶。堆砌完 9#和 6#层后，在其上部分别填筑 3 cm 厚软弱夹层。

（3）在坡体后部依次铺设防水布、2 cm 厚木板和加载钢板，用千斤顶轻轻顶住钢板使各部分接触紧密。

（4）安装降雨系统和位移计。

（5）模型砌筑完成后，如图 9 所示，静置 24 h 使边坡状态稳定，调式相关测试元器件，进入工作状态。

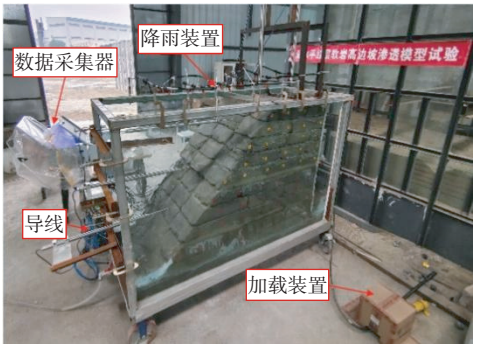


图 9　整体试验模型及加载测试系统

Fig. 9　Test model and loading test system

（6）按照试验设计的降雨工况和加载方式对模型坡体施加降雨和后侧推力荷载，并实时监测各测点物理量的变化。

3　试验结果与分析

3.1　坡体裂隙发育特征

根据以往现场调查结果，在砂泥岩互层的缓倾角红层中钻孔时，常因相对硬质砂岩中的岩芯垂直裂隙发育而出现掉钻现象[21]，本试验在坡体模型加载和降雨过程中得到了类似的坡体内部垂直裂隙发育特征（图 10）：（1）裂隙扩展区域主要集中在上、下软弱夹层之间。（2）主要有两类裂隙：一类是在坡体后部的自下而上发育的“上窄下宽”裂隙；另一类是在坡体前部的自上而下发育的“上宽下窄”裂隙。对于这种裂隙发育特征，可能原因在于随着坡体沿软弱夹层滑动位错变形，在软弱夹层与硬质岩层的界面处，二者刚度差异较大而易产生局部拉应力集中，造成岩层在该界面处易产生拉裂，然后逐渐向岩层内部扩展。同时，由于坡体后部的自重应力较大，前部的自重应力相对较小，在滑坡体整体沿下部软弱夹层滑移错动变形过程中，坡体后部的上部软弱夹层的拉应力集中效应相对下部软弱夹层较小。坡体前部的上下软弱夹

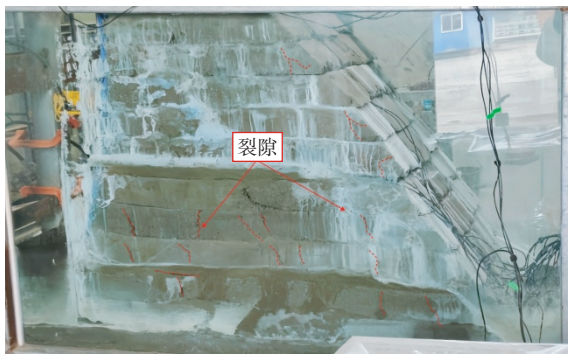


图 10　坡体模型裂隙发育特征

Fig. 10　Fracture development characteristics of the slope model

层的相对大小关系刚好相反，由此即形成了坡体后部的自下而上发育的“上窄下宽”裂隙、坡体前部的自上而下发育的“上宽下窄”裂隙。

3.2 边坡表面位移

坡体表面位移随时间变化曲线如图 11 所示，其中，正值表示坡顶监测点下沉或坡面监测点向坡体临空面方向移动。根据位移变化曲线特征可将其划分为三个阶段：初始变形阶段（0 ~ 4 d）、匀速变形阶段（4 ~ 10 d）、加速变形破坏阶段（10 ~ 15 d）。

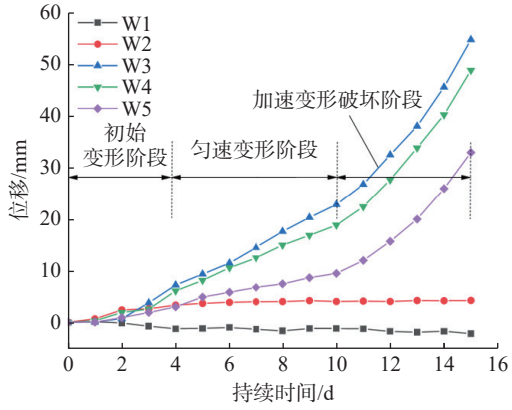


图 11 坡表位移随时间变化曲线

Fig. 11 Variation curves of displacements on the slope surface with time

在初始变形阶段，坡体后侧逐级加载，边坡内部处于微小变形调整状态，坡面水平位移量较小，坡顶前部下沉，坡顶后部隆起变形。

在匀速变形阶段，边坡内部裂隙逐渐发展，3#监测点（W3）和 5#监测点（W4）位移呈现线性增加，1#—5#层之间的岩层界面发展成为贯通滑裂面，坡面位移随时间线性增长。此阶段坡面出现径流，同时 1#—3#层预设裂缝宽度和深度逐渐增加，并伴随 1#—5#层坡体内部新裂缝的不断形成。这说明坡体裂缝及其不断扩展增加了雨水渗入的通道和水岩接触面积，在降雨密集的情况下使得坡体中水的入渗速度加快，促进了边坡岩体的强度弱化与变形发展。

在加速变形破坏阶段，边坡内部裂隙加速向深部 6#—8#层扩展，坡体变形加剧，3#监测点（W3）、5#监测点（W4）和 8#监测点（W5）位移随时间呈非线性加速增长。同时，此阶段坡面开裂，坡面已有局部小块体滑落，如图 12 所示，岩层交界面开始不断有水渗出，坡体内部渗流作用增强；此外，坡面岩块可见细密的纵向裂隙，进一步说明坡体中滑裂面已逐渐扩展至坡面，潜在滑动面已基本贯通。

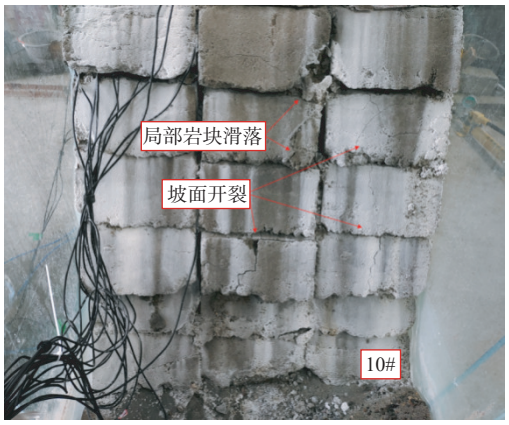


图 12 试验中坡面开裂及局部岩块滑落

Fig. 12 Slope face cracking and local rock sliding in the test

另外，由图 11 可见，短时间（0 ~ 5 d）降雨时测点 W3 位移增长相对显著，说明短时降雨影响的主要是坡体浅层 1#—5#层；长时间（5 d 以后）降雨后测点 W4 和 W5 位移增长也较为明显，说明长时降雨的影响范围会扩展到坡体深部 6#—8#层。

3.3 边坡应力与孔隙水压力

图 13 为坡体中各测点的总压应力随时间变化曲线。可见，位于下部软弱夹层后部的测点 T1 在试验过程中几乎保持不变。由图 10 可见，T1 测点周围未发育裂隙，是压应力不变的原因。对于下部软弱夹层中前部测点 T2、T3 和 T4，压应力均随时间先增大后趋于稳定，分别在 4, 7, 10 d 趋稳，稳定压力值分别约为 33, 27, 23 kPa，是由于内部裂隙是从坡体深部软弱夹层的上覆岩块中后部向坡面逐渐发展，导致近坡面处压力逐渐释放。同样。由图 10 中可以看出，7#、8#层内部裂隙的深度和数量都大于其坡面处。

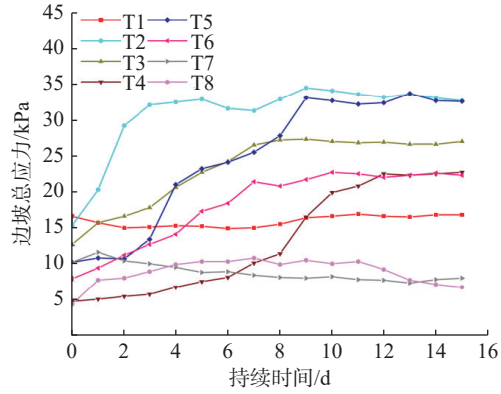
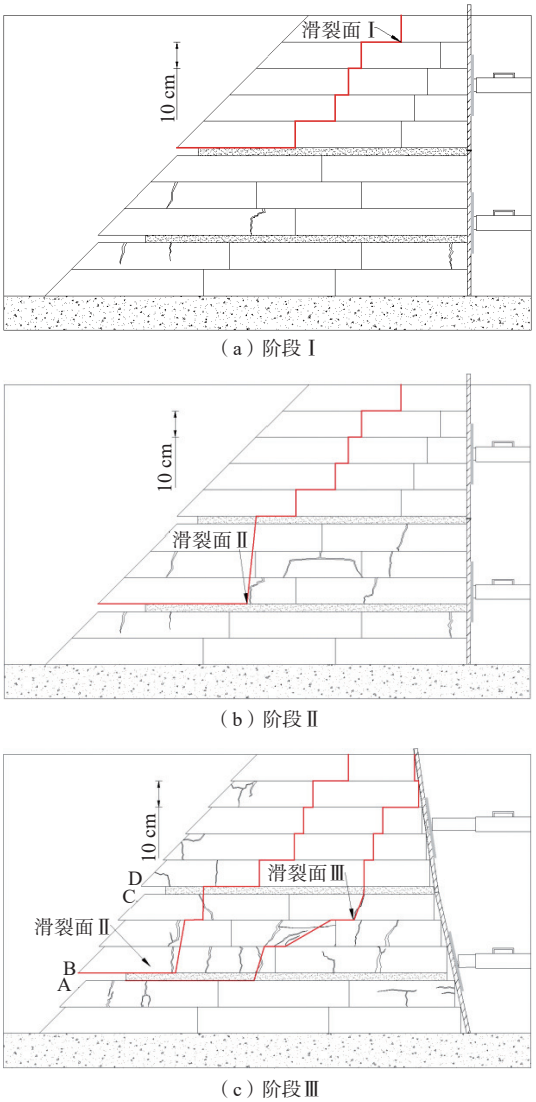


图 13 坡体中各测点总压应力随时间变化曲线

Fig. 13 Variation curves of total compressive stress of measuring points in the slope with time

下部软弱夹层前部的测点 T7 和 T5，位于潜在滑裂面 Ⅰ（见图 14a）附近，因滑裂面 Ⅰ 在 1 ~ 4 d 已基本

贯通, 所以其压应力在 1 ~ 12 d 几乎保持不变; 在 12 ~ 14 d 坡面出现“掉块”现象, 测点 T8 压应力开始逐渐减小。上部软弱夹层后部的测点 T5, 靠近坡体后缘拉裂隙, 后缘拉裂隙是边坡的主要渗水通道之一, 所以在 4 d 和 10 d 处均有阶段性的突变, 与前文所述的位移变化时间节点一致。软弱夹层中后部的测点 T7, 在 1 ~ 7 d 匀速增大, 在 7 ~ 15 d 保持稳定, 与下伏岩层 6#层相应位置裂隙发育的时间基本一致。



（a）阶段 Ⅰ　（b）阶段 Ⅱ　（c）阶段 Ⅲ

图 14　坡体模型的裂隙演变发展过程

Fig. 14　Crack evolution process of the slope model

图 15 为坡体中各测点超孔隙水压力随时间变化曲线。可见, 除临近坡面的测点 S4 的孔压保持在 1 kPa 左右外, 其余各点孔压随时间基本呈非线性增大的变化。其中, 测点 S3 和 S6 增加趋势最明显。这是因为测点 S6 和 S3 分别位于滑裂面 Ⅰ、Ⅱ(图 14b)上, 二者之间的岩层为 6#—8#层中部, 是坡体内部裂

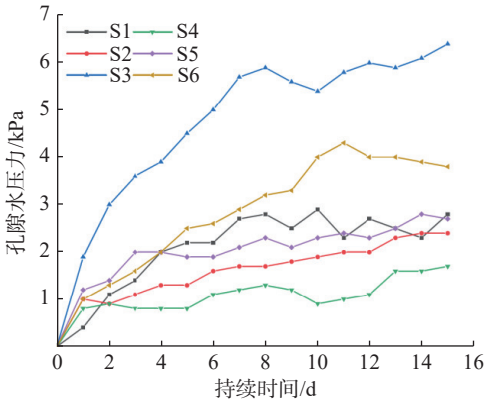


图 15　坡体中各测点超孔隙水压力随时间变化曲线

Fig. 15　Variation curves of excess pore water pressure of measuring points in the slope with time

隙最为发育的区域, 故其孔隙水压力较大。

为进一步分析坡体渗流特征, 针对试验模型, 基于 ANSYS 和 FLAC3D 数值模拟软件建立了边坡渗流数值模型(图 16)。其中, 模型坡顶为流量边界, 流量为最大降雨量 100 mm/d; 设定坡面为透水边界, 其余边界均设为隔水边界。根据本试验参数测试结果, 并参考以往经验[22], 数值模型的主要物理力学参数见表 2, 其中 k 为渗透系数。

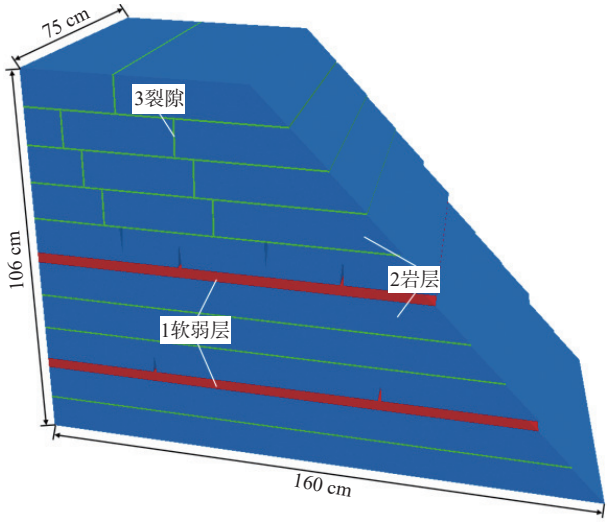


图 16　试验坡体渗流数值模型

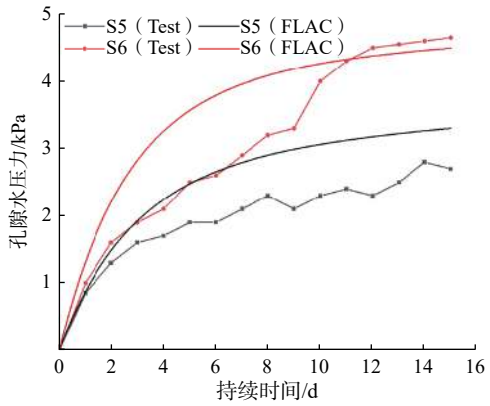
Fig. 16　Numerical model for the test slope seepage

表 2　数值模型主要物理力学参数

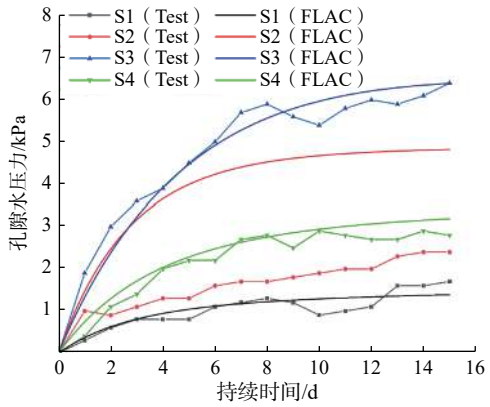
Table 2　Main physical and mechanical parameters of the numerical model

材料	c/kPa	φ/(°)	σ_t/kPa	E/MPa	k/(cm·s^{-1})
软弱层	23.5	15.2	30	0.459	6E-3
岩层	132	41	800	82.7	0
裂隙	23.5	15.2	30	0.459	1E-1

数值模拟得到的孔隙水压力结果如图 17 所示。可见，数值模拟结果与试验值的变化规律基本一致，孔压随时间均呈现先增大后逐渐趋于稳定的变化特征。数值模拟的孔隙水压力值比试验值大 2 ~ 3 kPa，趋稳时间也更早。这是因为试验模型边坡两侧与钢化玻璃之间难以实现完全密封，试验中仍有少量雨水从坡体模型侧边渗流，故试验模型侧边界并非完全隔水边界，所以试验孔隙水压力值小于数值模拟结果，相应趋稳时间也晚于数值模拟值。



（a）上部软弱夹层

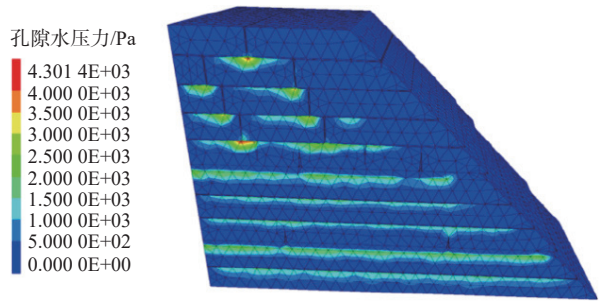


（b）下部软弱夹层

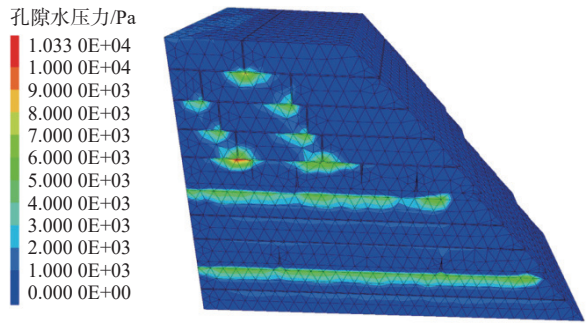
图 17　数值模拟与模型试验的超孔隙水压力对比

Fig. 17　Comparison of excess pore water pressure in the slope between the numerical simulation and model test

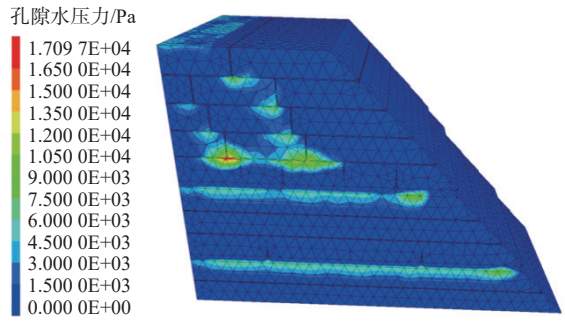
图 18 展示了降雨时长 4 d、10 d 和 14 d 的坡体中超孔隙水压力分布及其变化。可见，当降雨时长为 4 d 时，超孔隙水压力主要沿着岩层面增大，雨水的主要渗流路径是以坡体后缘张拉裂隙和内部裂隙网络为通道，向坡体下部渗流；当降雨时长达到 8 d 时，雨水在软弱夹层处积聚，尤其是竖向裂隙和软弱夹层交界处是整个坡体的超孔隙水压力集中部位；降雨时长 14 d 时，岩层面渗流通道已基本贯通，雨水无法在岩层面间集聚，其超孔隙水压力接近于 0；但在软弱夹层和竖向裂隙处，因入渗水的局部集聚，超孔隙水压力进一步增大。



（a）降雨4 d



（b）降雨10 d



（c）降雨14 d

图 18　不同降雨时长下坡体超孔隙水压力分布云图

Fig. 18　Contour of excess pore water pressure in the slope under different rainfall duration

由此可见，软弱夹层作为优势渗流通道，阻碍了雨水进一步向坡体内部的渗流。雨水先沿上部岩体的节理裂隙向坡体下部渗流，当雨水达到 4#层时，由于岩体的低渗透性，雨水在裂隙处产生积聚，形成超孔隙水压力。因此，降雨过程中坡体内部裂隙容易向下扩展。随着降雨时间增加，6#—8#层间裂隙发育并逐渐贯通，雨水进入岩体后直接沿裂隙通道向坡体深部渗流，并沿着下部软弱夹层的层面流动。

4　讨论

4.1　边坡裂隙扩展机制

根据试验结果，在试验降雨的中前期（0 ~ 10 d），

边坡相对较大滑动变形范围位于 1#—5#层，而 6#—10#层位移较小；随着降雨时间增长，坡体中滑裂面扩展，较大的滑动变形范围扩展到 6#—8#层，且各层之间的相对位移均较大，岩层交界面处产生摩阻力，使下部岩层因拉应力集中产生拉裂缝。对于坡体中岩块而言，沿层面滑移时受到 6 个力的作用：岩块上覆岩层的压力、后缘垂向裂缝中静水压力、岩块自重、与上下岩层面因相对运动产生的摩阻力 τ_1 和 τ_2、层面上的超孔隙水压力。摩阻力 τ_1 和 τ_2 是岩层表面开裂的主要诱因，雨水入渗进入其下伏的近水平岩层面时产生的超孔隙水压力是岩层表面开裂后裂隙进一步扩展的主要原因。

根据最大拉应力准则，当岩层中的某点 $\sigma>\sigma_t$ 时，岩石发生开裂。拉应力可近似取为 τ_1、τ_2 两者产生的摩阻应力（摩阻力除以岩层横截面积，本试验模型为 0.075 m^2）中的较大值。摩阻力可由库仑摩擦定理确定。

在试验降雨后期（10 ~ 14 d），雨水已渗透至 6#—8#层岩体内部，6#—8#层之间的岩层产生相对滑动且位移较大，岩层界面的滑动摩擦系数取为 0.3，正压力取界面上覆岩体自重，则有：

（1）对于 7#层，τ_1=3.16 kN，τ_2=3.66 kN，σ=48.8 kPa>σ_t=37 kPa，满足起裂条件。

（2）对于 8#层，τ_1=3.66 kN，τ_2=4.16 kN，σ=55.5 kPa>σ_t=37 kPa，满足起裂条件。

因此，6#—8#层之间的岩层张拉裂隙普遍发育，与图 10 所示的裂隙分布特征相一致。

综上所述，边坡内部岩体裂隙的产生主要有两个过程：一是“起裂萌生”过程，在长期降雨作用下，降雨致使岩体强度弱化，岩层间相对运动产生的界面摩阻力、雨水入渗过程中的超孔隙水压力，均会导致岩层表面产生微小的蠕滑拉裂效应，裂隙产生；二是“裂隙扩展”过程，随着坡体向前滑移变形，裂隙内部的水不断向下渗流，在后侧坡体推力作用下，极易产生很大的超孔隙水压力，使裂隙进一步扩展。

4.2　边坡稳定性演变分析

雨水入渗边坡后，对软弱夹层的软化作用远大于对硬岩层面的软化作用。软弱夹层遇水后抗剪强度急剧下降，且雨水入渗坡体后在软弱夹层间易产生超孔隙水压力，均造成坡体易沿软弱夹层发生滑动。根据试验结果，可将边坡在逐级加载和降雨作用下的滑面形成及失稳破坏过程划分为 3 个阶段。

阶段Ⅰ：浅表层（坡面及坡顶）裂隙发育贯通阶段（图 14a）

主要发生在试验的 0 ~ 4 d 期间。首先，在逐级加载和降雨作用下，1#—3#层预设裂隙将最先被拉裂并完全贯通。随后，由于坡体不同部位对于其后侧推力的响应程度存在差异，边坡上部岩层的响应更加明显，因此竖向拉裂缝主要出现在此区域，并使得 1#—5#层岩块间竖向接触面分离扩展，岩层间裂隙逐渐扩展贯通，形成阶梯形潜在滑裂面。在此阶段，雨水主要由坡面及坡顶沿着岩块间接触面渗流进入坡体，孔隙水压力急剧增大，但由于裂隙主要在浅表层发育，故未产生超孔隙水压力。

阶段Ⅱ：裂隙向软弱夹层延伸发育并逐步贯通阶段（图 14b）

主要发生在 4 ~ 10 d 期间。随着边坡 1#—5#层岩体的次级节理张拉贯通至软弱夹层面，此时坡体内部裂隙向深部发育，裂隙在长时间降雨下持续充水，逐渐累积形成超孔隙水压力，且随着裂隙的逐渐发育，超孔隙水压力增大速率逐渐减小，超孔隙水压力已达 2.1 ~ 5.5 kPa。坡体位移开始匀速增加，说明在阶段Ⅰ的前期累计降雨作用下，边坡内部岩体开始逐渐软化，裂隙较为发育。在 1#—5#岩层的层面处开始出现少量泥化现象，2#—4#层坡面开始产生拉裂隙。

阶段Ⅲ：裂隙扩展与坡体滑动失稳阶段（图 14c）

发生 10 ~ 14 d 期间。边坡中前部岩体沿滑裂面Ⅱ滑动，边坡中后部的节理裂隙受到张拉作用逐渐展开，并逐渐贯通形成滑裂面Ⅲ。在此阶段，随着裂隙发育贯通，坡体开始失稳滑动，坡体内部的裂隙发育完全，超孔隙水压力趋于稳定。由此阶段的坡体渗流路径（图 19）可知，随着滑裂面Ⅱ的产生，雨水充分沿着边坡裂隙向边坡深部入渗，增大了水岩作用的面积，使得边坡岩体强度进一步弱化，进而又加速了裂缝的扩展。滑裂面Ⅱ上覆滑体加速滑移，位移开始呈现非线性增大，6#—8#层靠近坡体中后部岩体拉裂并发育新的裂隙，新裂隙的产生则进一步加剧了水岩作用的程度。如此循环，边坡内部裂缝逐渐扩展、丛集、贯通，并形成滑裂面Ⅲ（图 20），边坡整体稳定性逐渐降低，最终发生失稳破坏。

基于上述的 3 个阶段的坡体失稳破坏机制，可建立在渗流作用下边坡潜在滑体受力模式（图 21）。其中，L 为滑裂面总长，l 为滑面上雨水未完全入渗软化段，H 为后缘水位高度；W 为滑体自重，R 为抗滑力，F 为下滑力。滑体后缘受三角形分布静水压力（γH）和矩形分布加载推力（P_j），后缘静水压力合力为 V，雨

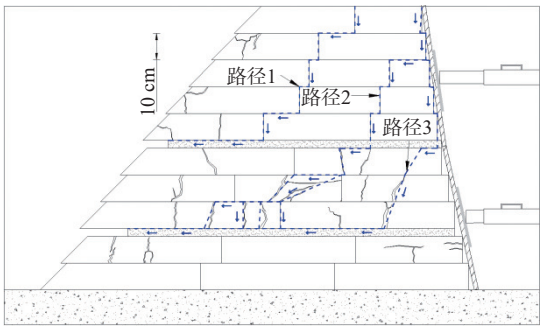


图 19 边坡内部渗流路径分布

Fig. 19 Seepage paths inside the slope

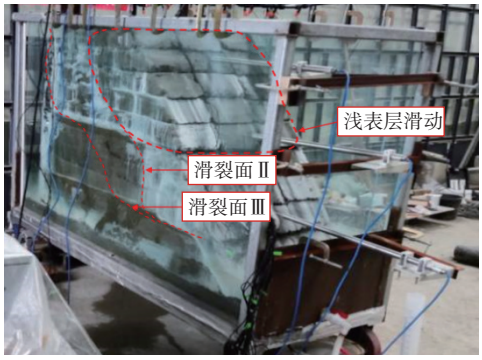


图 20 阶段 Ⅲ 时坡体中潜在滑裂面

Fig. 20 Potential slip surface in the slope at stage Ⅲ

水未完全入渗软化段静水压力呈三角形分布，雨水完全入渗软化段静水压力呈矩形分布，U 为滑面上的孔隙水压力合力。

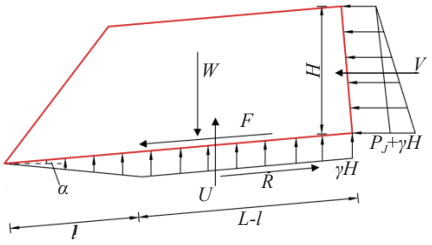


图 21 边坡潜在滑体受力分析模型

Fig. 21 Analysis model of potential sliding body of the slope

作用于滑面上的超孔隙水压力合力 (U) 为：

$$U=\frac{1}{2}\gamma H(2L-l)\cdot\cos\alpha \tag{1}$$

滑体后缘的静水压力合力 (V) 为：

$$V=\frac{1}{2}\gamma H^2 \tag{2}$$

故根据极限平衡条件可得，滑体下滑力 (F) 为：

$$F=(P_JH+V)\cdot\cos\alpha+(W-U)\cdot\sin\alpha \tag{3}$$

作用于滑面的抗滑力 (R) 为：

$$R=(W\cdot\cos\alpha-(P_JH+V)\cdot\sin\alpha)\cdot\tan\varphi+cL \tag{4}$$

从而，坡体的整体稳定性系数 (K) 为：

$$K=\frac{R}{F}=\frac{(W\cdot\cos\alpha-(P_JH+V)\cdot\sin\alpha)\cdot\tan\varphi+cL}{(P_JH+V)\cdot\cos\alpha+(W-U)\cdot\sin\alpha} \tag{5}$$

坡体模型在各阶段的参数取值见表 3。其中，阶段 Ⅰ、Ⅲ 的岩体抗剪强度参数分别取天然强度、饱和强度，阶段 Ⅱ 取接近二者平均值。坡体后侧推力变化曲线如图 22 所示，P_J 取各阶段测量值的平均值；l 近似取 0，以偏安全估算。根据式(5)计算可得，阶段 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 边坡稳定性系数及相应的潜在最不利滑面，结果见表 4。可见，随着降雨时长的增加，坡体稳定性逐渐降低，稳定系数由阶段 Ⅰ 的 2.20 经阶段 Ⅱ 的 1.38 逐渐降低至阶段 Ⅲ 的 0.89，坡体最终失稳。

表 3 坡体模型稳定性分析的滑面参数取值

Table 3 Parameters of the sliding surface in the slope model for stability analysis

阶段	φ/(°)	c/kPa	P_J/kPa	V/kPa	L/m	S/m²
Ⅰ	16.4	31	17.53	3	0.85	0.2
Ⅱ	15.8	28	31.58	5	1.3	0.31
Ⅲ	15.2	25	33.88	6	1.4	0.6

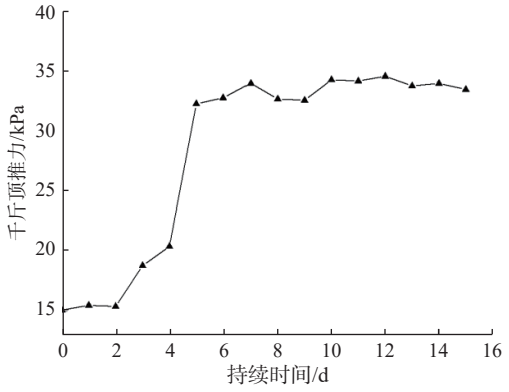


图 22 坡体后侧加载推力变化曲线

Fig. 22 Variation curve of loading thrust with time on the back of slope

表 4 坡体稳定性分析结果

Table 4 Analysis results of the slope stability

阶段	滑面	R/(kN·m⁻¹)	F/(kN·m⁻¹)	K
Ⅰ	Ⅰ	27.30	12.42	2.20
Ⅱ	Ⅱ	37.67	27.36	1.38
Ⅲ	Ⅲ	37.68	42.26	0.89

5 结论

(1)对于含有裂隙的近水平红层软岩边坡(含双软弱夹层)，在长期降雨入渗作用下，坡体变形发展可

分为初始变形阶段、匀速变形阶段、加速变形破坏阶段。在暴雨工况下，短时降雨（模型历时 5 d）影响的主要是坡体浅层，长时降雨的影响范围可能会扩展到坡体深部。

（2）试验模型坡体的裂隙扩展主要包括两类：一类是在坡体后部的自下而上发育的“上窄下宽”裂隙；另一类是在坡体前部的自上而下发育的“上宽下窄”裂隙。裂隙扩展区域主要集中在上、下软弱夹层之间，其中易产生超孔隙水压力。

（3）边坡内部岩体裂隙的产生主要有两个过程：一是“起裂萌生”过程，因长期降雨入渗致使岩体强度弱化，岩层间相对运动产生的界面摩阻力、雨水入渗过程中的超孔隙水压力，均会导致岩层表面产生微小的蠕滑拉裂效应，导致裂隙产生；二是“裂隙扩展”过程，随着坡体向前滑移变形，裂隙内部的水向下不断渗流，在后侧坡体推力作用下，极易产生很大的超孔隙水压力，使裂隙进一步扩展。

（4）FLAC3D 数值模拟再现了推移式滑坡的渗流过程，孔隙水压力随时间呈现先增大后逐渐趋于稳定的变化特征；在软弱夹层和竖向裂隙处，因入渗水的局部集聚，超孔隙水压力呈累计增大的特征。

（5）试验模型坡体在长期降雨作用下，其滑面形成及失稳破坏演变过程可划分为 3 个阶段：浅表层裂隙发育贯通阶段、裂隙向软弱夹层延伸发育并逐步贯通阶段、裂隙扩展与坡体滑动失稳阶段。本模型坡体各阶段相应的稳定系数分别为 2.20, 1.38, 0.89。长期雨水入渗致岩体强度弱化，裂隙逐渐向坡体深部发育并与软弱夹层贯通形成多级阶梯式滑裂面，是造成含裂隙近水平红层软岩边坡失稳的根本原因。

参考文献（References）：

［1］ 张涛，谢忠胜，石胜伟，等. 南江县石板沟滑坡特征、成因及演化过程研究［J］. 长江科学院院报，2013，30(7)：33－37.［ZHANG Tao, XIE Zhongsheng, SHI Shengwei, et al. Characteristics, geological causes and evolution of shibangou landslide in Nanjiang County[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(7): 33－37.（in Chinese with English abstract）］

［2］ 谢小帅，陈华松，肖欣宏，等. 水岩耦合下的红层软岩微观结构特征与软化机制研究［J］. 工程地质学报，2019，27(5)：966－972.［XIE Xiaoshuai, CHEN Huasong, XIAO Xinhong, et al. Micro-structural characteristics and softening mechanism of red-bed soft rock under water-rock interaction condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 966－972.（in Chinese with English abstract）］

［3］ 李安润，邓辉，王红娟，等. 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型［J］. 水文地质工程地质，2021，48(2)：106－113.［LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 106－113.（in Chinese with English abstract）］

［4］ 王迎春，陈剑. 红层软岩微观结构与抗剪强度关系实验分析［J］. 现代地质，2013，27(3)：738－742.［WANG Yingchun, CHEN Jian. Preliminary research on the relationship between microscopic structure and shear strength of red-bed soft rocks[J]. Geoscience, 2013, 27(3): 738－742.（in Chinese with English abstract）］

［5］ ZHANG Shuai, XU Qiang, HU Zeming. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China[J]. Engineering Geology, 2016, 204: 1－13.

［6］ 邓华锋，周美玲，李建林，等. 水-岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究［J］. 岩石力学与工程学报，2016，35(增刊 2)：3481－3491.［DENG Huafeng, ZHOU Meiling, LI Jianlin, et al. Mechanical properties deteriorating change rule research of red-layer soft rock under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 2): 3481－3491.（in Chinese with English abstract）］

［7］ 邓华锋，支永艳，段玲玲，等. 水-岩作用下砂岩力学特性及微细观结构损伤演化［J］. 岩土力学，2019，40(9)：3447－3456.［DENG Huafeng, ZHI Yongyan, DUAN Lingling, et al. Mechanical properties of sandstone and damage evolution of microstructure under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3447－3456.（in Chinese with English abstract）］

［8］ 郭永春，谢强，文江泉. 水热交替对红层泥岩崩解的影响［J］. 水文地质工程地质，2012，39(5)：69－73.［GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Effect of the alternation of heat and water on the slaking phenomenon of redbeds[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 69－73.（in Chinese with English abstract）］

［9］ ZHANG Dan, CHEN Anqiang, LIU Gangcai. Laboratory investigation of disintegration characteristics of purple mudstone under different hydrothermal conditions[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1): 127－136.

［10］ 郭永春，赵峰先，闫圣龙，等. 红层泥岩三轴膨胀力的

试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 87 − 93. [GUO Yongchun, ZHAO Fengxian, YAN Shenglong, et al. An experimental study of the triaxial expansion force of red-bed mudstone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 87 − 93. (in Chinese with English abstract)]

[11] 张涛, 谢忠胜, 石胜伟, 等. 川东红层缓倾岩质滑坡的演化过程及其识别标志探讨 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 496 − 503. [ZHANG Tao, XIE Zhongsheng, SHI Shengwei, et al. Discussion on evolution process of flat rock landslide and its identification in red strata at eastern Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 496 − 503. (in Chinese with English abstract)]

[12] 许强, 唐然. 红层及其地质灾害研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 28 − 50. [XU Qiang, TANG Ran. Study on red beds and their geological disasters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 28 − 50. (in Chinese with English abstract)]

[13] MIKOŠ M, ČETINA M, BRILLY M. Hydrologic conditions responsible for triggering the Stože landslide, Slovenia[J]. Engineering Geology, 2004, 73(3/4): 193 − 213.

[14] 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3783 − 3790. [ZHANG Ming, HU Ruilin, YIN Yueping, et al. Study of mechanism of landslide induced by rainfall in gently inclined red stratum in East Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3783 − 3790. (in Chinese with English abstract)]

[15] ZHANG Zhenping, FU Xiaodong, SHENG Qian, et al. Effect of rainfall pattern and crack on the stability of a red bed slope: A case study in Yunnan Province[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1 − 21.

[16] 李龙起, 罗书学, 王运超, 等. 不同降雨条件下顺层边坡力学响应模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 755 − 762. [LI Longqi, LUO Shuxue, WANG Yunchao, et al. Model tests for mechanical response of bedding rock slope under different rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 755 − 762. (in Chinese with English abstract)]

[17] 杨旭, 周翠英, 刘镇, 等. 华南典型巨厚层红层软岩边坡降雨失稳的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 549 − 557. [YANG Xu, ZHOU Cuiying, LIU Zhen, et al. Model tests for failure mechanism of typical soft rock slopes of red beds under rainfall in South China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 549 − 557. (in Chinese with English abstract)]

[18] 王海, 张梓钦, 杨国香, 等. 五盂高速公路顺层岩质边坡变形破坏模型试验 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3754 − 3762. [WANG Hai, ZHANG Ziqin, YANG Guoxiang, et al. Model tests of deformation and failure of bedding rock slope in Wuyu expressway[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3754 − 3762. (in Chinese with English abstract)]

[19] 简文星, 殷坤龙, 罗冲, 等. 三峡库区万州安乐寺滑坡滑带特征 [J]. 地球科学, 2008, 33(5): 672 − 678. [JIAN Wenxing, YIN Kunlong, LUO Chong, et al. Slip zone characteristics of anlesi landslide in Wanzhou of Three Gorges Reservoir area[J]. Earth Science, 2008, 33(5): 672 − 678. (in Chinese with English abstract)]

[20] 崔政权. 三峡工程库岸稳态评价预测概念 [R]. 武汉: 长江水利委员会勘测局, 1993. [Cui Zheng Quan. The concept of steady-state evaluation and prediction for Three Gorges Reservoir Bank[R]. Wuhan: Survey Bureau of Changjiang Water Resources Commission, 1993. (in Chinese)]

[21] 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)]

[22] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册 [M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 175. [Editorial Board of Geological Engineering Handbook. Geological engineering handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 175. (in Chinese)]

编辑: 王支农