

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201229002

基于多传感器数据融合分析的路堑滑坡模型 试验研究*

马 坤^{1,2}, 张永谋¹, 吴红刚^{2,3,4}, 张少龙^{1,2}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国
中铁滑坡工程实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 西部环境岩土及场地修复技术工程实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以成都天府国际机场高速公路TJ04标段K17+700~K17+900段滑坡为典型代表,通过地质分析及室内模型试验相结合的方法,运用数据融合及统计学概率运算方法,对降雨作用下路堑边坡的变形破坏过程进行研究。结果表明:(1)通过地质分析认为K17+700~K17+900段滑坡形成主要原因是地表水入渗及滑坡前缘路基开挖;(2)通过模型试验研究已开挖路基在降雨条件下的变形特征,得出其变形机理为:降雨入渗→边坡局部溜坍→地表水入渗加剧→土体含水率上升→孔隙水压力增大→边坡失稳→整体牵引式滑移;(3)通过传感器数据融合及统计学概率分析得出,随着降雨历时增长,含水率的变化曲线与累计降雨量之间呈正相关,相关系数为0.600 15具有显著相关性,孔隙水压力的变化曲线与含水率之间正相关,相关系数为0.921 74具有高度相关性,说明雨水入渗是土体含水率与孔隙水压力增长的直接原因。

关键词:多源数据融合; 降雨型滑坡; 路堑边坡; 模型试验; 孔隙水压力

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0653-11

Research on Model Test of Cutting Landslide based on Multi-sensor Data Fusion Analysis

MA Kun^{1,2}, ZHANG Yongmou¹, WU Honggang^{2,3,4}, ZHANG Shaolong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China;

2. China Northwest Research Institute Co. Ltd. of CREC, Lanzhou 730000, China;

3. China Railway Landslide Engineering Laboratory, Lanzhou 730000, China;

4. Western Environmental Geotechnical and Site Rehabilitation Technology Engineering Laboratory, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking the landslide in section K17+700~K17+900 of Chengdu Tianfu International Airport Expressway TJ04 as a typical representative, combining geological analysis and indoor model test, and using data fusion and statistical probability calculation methods, the deformation and failure process of a road cut slope under the action of rainfall was studied. The results show that: (1) Through geological analysis, it is believed that the main reasons for the formation of the landslide in section K17+700~K17+900 are surface water infiltration and excavation of roadbed at the landslide outlet; (2) The deformation characteristics of the excavated roadbed under rainfall conditions are studied through model tests. It is concluded that the deformation mechanism is as follows: rainfall infiltra-

* 收稿日期:2020-12-29;修回日期:2021-04-23

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC504903)、甘肃省教育厅:优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-632)资助

作者简介:马坤(1999—),男,硕士研究生。主要从事岩土和边坡工程研究。E-mail:makun082035@163.com

tion → partial slump of the slope → intensified surface water infiltration → increase of soil moisture content → increase of pore water pressure → slope instability → overall retrogressive sliding; (3) Data fusion and statistical probability analyses show that, as the rainfall duration increases, there is a positive correlation between the change curve of water cut and the accumulated rainfall. The correlation coefficient is 0.600 15, showing a significant correlation. The change curve of pore water pressure has a positive correlation with the water cut. A correlation coefficient of 0.921 74 shows a high correlation, indicating that the rainfall infiltration is the direct cause of the increase in soil moisture content and pore water pressure.

Keywords: multi-source data fusion; rainfall caused landslide; cutting slope; model experiment; pore water pressure

引 言

诱发滑坡的影响因素有降雨、地震、人为干扰、地下水位等,其中,降雨和人为干扰是诱发滑坡失稳的主要因素。据统计,70%以上大型滑坡发生与人类活动有密切的关系^[1]。为了研究降雨对存在人为干扰的边坡滑坡的影响,国内外的众多学者通过不同的手段重演了此类降雨型滑坡^[2-5]。(1)现场试验方面:张家发等^[6]对三峡永久船闸高边坡全风化花岗岩山体开展了人工降雨实验研究,得出降雨入渗过程不能简单地用连续介质中的扩散过程来描述。(2)室内模型试验方面,大多运用相似理论将实际工程地质问题搬到室内实验室通过模型试验来演绎:朱宝龙等^[7]通过室内模拟试验,得出路堑在降雨作用下边坡三种破坏方式为:局部溜坍或滑塌、表面冲刷与整体下滑(滑坡)形式;汪丁建等^[8]对强降雨作用下堆积层滑坡稳定性作分析,得出降雨初期,滑坡稳定性下降较快,随着降雨的持续,稳定性下降速率逐渐放缓;H.X. Chen等^[9]指出了降雨入渗对滑坡的影响包括雨水作用下土体力学性质发生改变和雨水渗入坡体后土体重度增加两个方面。周春梅等^[10]指出土体含水量的变化对其强度和变形参数有较大影响,并且影响滑坡稳定性。

数据融合在边坡监测预警方面已经有了广泛应用^[11-12],江山^[13]在研究区域降雨型滑坡时提出了一种加权平均的数据融合方法,提高了滑坡位移监测的精度。解明礼等^[14]采用多源数据融合方法,利用各类数据源在滑坡体中不同的特征与适用性,研究了黄泥坝子滑坡动态演变过程中的变形破坏特征和时空演化规律。刘超云等^[15]利用 kalman 滤波方法对滑坡位移数据做了数据融合处理,得出融合

后的滤波数据能更准确地反映滑坡体的整体稳定趋势。F. Villalpando 等^[16]面向多源和多时间数据的融合框架,将多个滑坡的特征数据进行融合,以密集点云的形式生成 3D 虚拟模型,用于描述滑坡事件。

目前运用数据融合方法针对降雨作用下路堑边坡的模型试验研究较少,本文采用地质分析和室内模型试验相结合的方法,基于数据融合及统计学概率运算手段,对降雨作用下路堑边坡的变形破坏过程进行了研究。

1 试验工点概况

成都市双流区太平镇滑坡^[17]位于成都天府国际机场高速公路 TJ04 标段 K17+700~K17+900 段,路线沿龙泉山脉西侧斜坡以路基形式通过,龙泉山脉走向呈南北向。K17+700~K17+900 段滑坡(图 1)为中型牵引式基岩顺层滑坡,滑坡体在平面上近似三角形,后缘为圆弧圈椅状,滑坡体与周围稳定岩土体相比呈凸地形,滑动方向 54.9°。滑体前缘厚度约 8~15 m,并覆盖于侏罗系遂宁组砂泥岩地层上,中后部厚度约 4~7 m,滑坡长约 150 m,前缘最宽约 200 m,后缘最宽约 70 m,滑体主要为强~中风化的块石,石质成分以粉砂质泥岩为主,为基岩顺层滑坡块石堆积层,局部段粉砂质泥岩质块石有明显软化现象,岩芯极为破碎。下伏基岩为 J_{3s} 层粉砂质泥岩。

2 滑坡变形机制的地质分析

2.1 滑坡区地质特征

地形地貌:K17+700~K17+900 段滑坡处于龙泉山脉西侧,龙泉山脉走向呈南北向,区内山包



图1 K17+700~K17+900滑坡全貌

Fig.1 Overall view of the K17+700 ~ K17+900 landslide

呈驼状,场地内沟谷切割较深,沟水于谷底蜿蜒曲折于坡脚下流过。沟两侧斜坡,冲沟、坳沟发育,自然斜坡坡角多变化在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$,局部砂岩陡呈陡坎状,斜坡呈台阶折线型。细砂岩出露地段形成陡坎,粉砂质泥岩出露段多形成缓坡平台,谷地、坳沟内多为水田,斜坡及山顶处多被垦为旱地,斜坡上有少量灌木、柏树,场地处山峰海拔606 m,路线所跨沟床高程约494.9 m,相对高差大于100 m,属构造侵蚀浅~中切割低山地貌。

地层岩性:根据钻孔资料及地质调查可知,滑坡地段发育的地层主要为新生界第四系全新统滑坡堆积层(Q_4^{del})、坡残积层(Q_4^{dl+el})及中生界侏罗系上统遂宁组(J_{3s}),如图2所示。

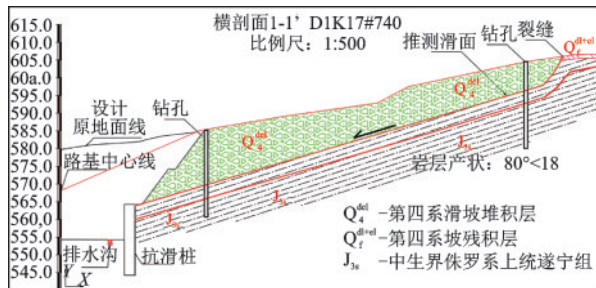


图2 K17+700~K17+900段滑坡工程地质断面

Fig. 2 Engineering geological section of the JG2-1 landslide

地质构造:滑坡地区位于新华夏系四川沉降带四川盆地西部,龙泉山断褶带的南西段,该断褶带以龙泉山背斜为骨干,包括一系列走向北 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 东的褶皱、压性、压扭性结构面,共同组成右行斜列的多字形构造,在区内平行展布。K17+700~K17+900段滑坡位于龙泉山背斜西翼,次级褶曲的东翼,龙泉山断裂上盘。主要构造如下:(1)龙泉山背斜:走向北 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 东,全长130 km,宽15~20 km,由南向北逐渐倾伏,轴部宽阔平缓,岩层倾角 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$,两翼较陡,倾角 $30^{\circ}\sim 55^{\circ}$,为典型的箱状背

斜,核部为沙溪庙组地层,两翼依次为遂宁组、蓬莱镇组地层,发育有次级褶皱。(2)老君场断裂:位于龙泉山背斜西翼,上盘为 K_{11} 、 J_{3p} 、 J_{3s} 及 J_{2s} 地层,下盘为 K_{2j} 地层,断距达1400 m,产状 $120^{\circ}\sim 140^{\circ}\angle 30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,延伸大于60 km。受龙泉山背斜和老君场断层影响,场地附近次生小断层和次级褶曲发育。地层由中生界侏罗系遂宁组(J_{3s})地层组成,岩层产状主要受次级构造影响,岩层以倾向东为主,但受断层和岩体中透镜体发育影响,部分段产状异常。岩层产状一般在 $80^{\circ}\angle 18^{\circ}\sim 20^{\circ}$,场地厚层砂岩中主要发育两组近正交的构造节理。 J_1 : $240^{\circ}\sim 270^{\circ}\angle 60^{\circ}\sim 85^{\circ}$, J_2 : $320^{\circ}\sim 350^{\circ}\angle 60^{\circ}\sim 85^{\circ}$,前者延伸大于5 m,最大可达8 m,裂隙间距1.0~1.2 m,微张,隙面平整光滑; J_2 一般延伸3~5 m,裂隙间距0.6~1.0 m,微张~开口,隙面弯曲,无充填,两组裂隙垂向止于粉砂质泥岩层面上。

气象、水文及水文地质条件:该地区属亚热带季风气候,据多年平均资料,降雨量龙泉山以西的平原区为1000~1200 mm,龙泉山及龙泉山以东的丘陵地带为800~1000 mm,降雨量集中于6~9月,约占全年降雨量的50%~60%,冬春季节12月~3月降雨最少;区内无大江大河,场地内支流、溪沟呈树枝状发育,溪沟为鹿溪河支流,岷江的次级支流,上游源头属岷江水系。地下水类型主要有松散堆积层孔隙水、基岩裂隙孔隙水。场地水文地质条件简单,第四系松散层孔隙水埋藏浅,分布零星,水量贫乏,基岩孔隙裂隙水,含水层与隔水层相间,层间水力联系差,局部地下水具承压性,富水性也不强。

2.2 滑坡成因分析

K17+700~K17+900段右侧为挖方路基,当时处于施工阶段。2018年6~8月,双流地区遭遇连续强降雨,双流区太平镇2018年8月平均降雨量225 mm,9月平均156 mm。2018年8月底开始出现局部少量土溜,由于连续强降雨,导致地表水大量入渗,使基岩中软弱面抗剪强度降低,9月初坡表已形成多条裂缝,滑坡前缘锚杆及框架锚索变形破坏,后缘及两侧裂缝有继续向外延伸的趋势。

经过现场调查及地质分析认为滑坡形成主要原因是地表水入渗及滑坡前缘路基开挖,2018年6~8月,双流地区遭遇连续强降雨,在强降雨条件下粉砂质泥岩内软弱夹层抗剪强度急剧降低,加之

前缘临空而失稳下滑,该滑坡使滑坡前缘路基边坡锚杆及框架锚索变形破坏,坡表出现多条裂缝,据调查,该处未曾发生滑坡,每年雨季仅有局部的土体溜滑。综合分析,得出该滑坡形成的原因是开挖形成临空面,降雨入渗软化坡体导致抗滑力不足。

3 模型试验设计

3.1 试验模型

在坡体地质分析的基础上,通过模拟,探讨已开挖路基在降雨条件下岩土体的性质,观测坡体模型的变形发展规律,对于路堑边坡可能发生的滑坡灾害类型及规模有重要意义,故选取 K17+700~K17+900 段滑坡,通过模型试验(图 3)研究路堑边坡在雨水作用下,坡体内部及坡面的变形大小、分布形式及变化规律,从而揭示该边坡滑坡的发生发展过程。

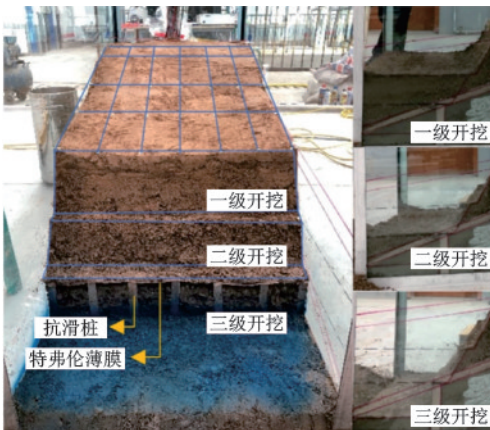


图 3 填筑完成的模型箱

Fig. 3 The completed model box

为了模拟顺倾层状基岩,填筑过程中采用分层填筑的方式,每填筑一层静置模型 12 h,且在层间铺设一层石膏粉区分层面,在基岩与滑带之间铺设了一层特弗伦薄膜,以减小两者之间的摩擦力,且在预设的位置埋设传感器;为了更好的模拟路堑边坡,还原施工过程,填筑工作完成后静置,使得坡体自身沉降,待稳定后进行破脚分级开挖,且每开挖一级,静置 0.5 h。

3.2 相似设计及相似材料配比

所依托工点的纵向长度为 150 m,模型箱尺寸为 1.5 m。此次模型试验选择几何相似比尺为:

$$C_L = \frac{L_P}{L_M} = 100$$

式中, C_L 为几何相似常数; L_P 为原型尺寸; L_M 为模型尺寸。

根据所确定的几何相似常数 $C_L=100$,由相似理论推导确定模型设计的相似参数见表 1。

表 1 模型设计相似参数

Table 1 Similar parameters of model design

物理量	相似参数	物理量	相似参数
几何尺寸	$C_L=L_M/L_P=100$	摩擦角	$C_\phi=1$
容重	$C_\gamma=1$	降雨强度	$C_u=0.1$
黏聚力	$C_c=100$	渗透系数	$C_k=10$
降雨历时相似比	$C_t=10$		

原型边坡滑体主要由强~中风化的块石,石质成分以粉砂质泥岩为主,透水性较好,其渗透系数为 $1e^{-9} \sim 1e^{-8}$ cm/s,而非完整的层状岩石,基岩岩层产状一般在 $80^\circ \angle 18^\circ \sim 20^\circ$ 。滑带部分以粉砂质泥岩为主,其渗透系数为 $1.1 \times 10^{-8} \sim 1.2 \times 10^{-8}$ cm/s,下伏泥岩的渗透系数为 $1e^{-8} \sim 1e^{-7}$ cm/s。故本次模型试验选用的滑体材料主要为砂、黏土和水,滑带材料采用砂、黏土、滑石粉和水,基岩材料分层填筑,采用水泥、黏土、砂和水配制^[18]。相似材料配比主要通过应变控制式直剪仪进行测定(图 4),选择模型土体的物理力学参数与原型相近的一组配比材料作为试验材料^[19]。最终选定水泥:砂:土:水=36:18:21:8 作为基岩相似材料配比,砂:土:滑石粉:水=37:52:25:15 配制滑带,滑体采用砂:土:水=0.5:0.5:0.1 进行模拟。表 2 为相似材料参数。

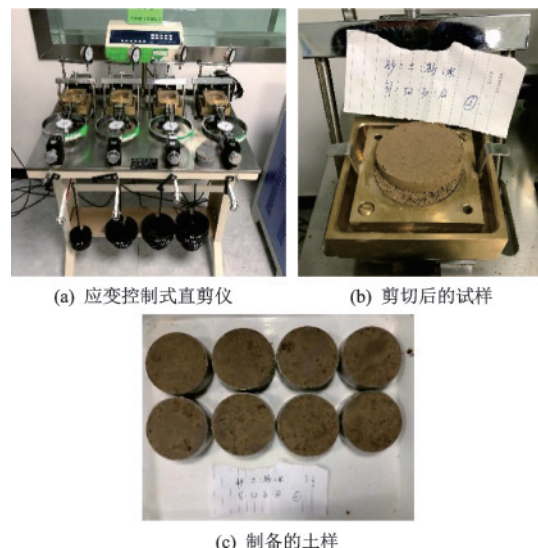


图 4 直剪试验仪器及土样

Fig. 4 Direct shear test equipment and soil samples

表2 相似材料参数

Table 2 Parameters of similar materials

材料名称		黏聚力 c/kPa	相似参数	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	相似参数	相似材料配比
滑体	原型	0.92×10^3	57.86	41.4	1.14	砂:黏土:水=0.5:0.5:0.1
	模型	15.9		36.05		
滑带	原型	1.51	0.7	16	0.53	砂:黏土:滑石粉:水=37:52:35:15
	模型	0.85		29.88		
基岩	原型	0.92×10^3	35.52	41.4	1.15	水泥:砂:黏土:水=36:18:21:8
	模型	25.9		35.99		

3.3 传感器的布设

试验中用到的传感器包括土压力、基质吸力、孔隙水压力、含水率,各类传感器的具体布设位置如图5所示。

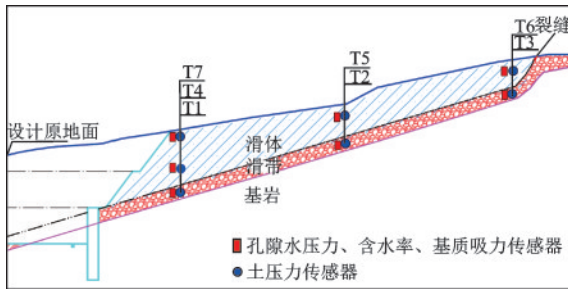


图5 传感器布设
Fig.5 Sensor layout

3.4 降雨量工况设计

2016年9月8日成都市双流区降雨量最大,24 h降水量达到了222.8 mm,日降水量均接近四川省有气象记录以来的全省日降水量极值。根据降雨时长相似准则,模型试验选择总降雨量72.5 mm作为降雨强度的相似准则的依据,试验选择在200 min的时间使得累计降雨量达到72.5 mm左右。试验过程中降雨按表3所设计的工况进行。

降雨自14:20开始至15:40结束共耗时3 h 20 min,不同阶段随着时间的推移累计降雨量的增大,实时监控土体在不同降雨量时孔隙水压力和含水率等数据。试验过程中的降雨量如图6所示。

表3 降雨工况设计
Table 3 Rainfall condition design

工况	起止时间	降雨强度/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	累计降雨/ mm
I	14:20~15:20	13.0	13
II	15:20~16:20	23.5	36.5
III	16:20~17:20	32.5	69
IV	17:20~17:40	3.50	72.5

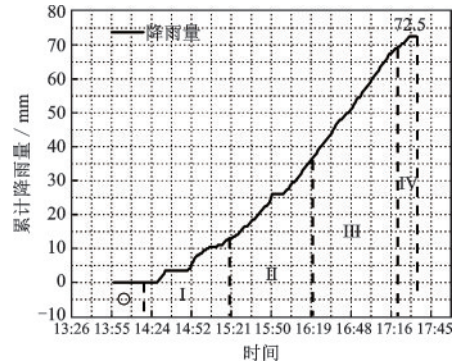


图6 累计降雨量时程曲线
Fig.6 Time history curve of accumulated rainfall

4 试验现象

降雨过程中对模型边坡用图像实时记录整个边坡的变形过程,边坡整体变形特征可以总结为:路堑边坡局部溜塌→路堑边坡张拉滑塌→边坡整体向下牵引滑移三个阶段,现将路堑边坡及边坡整体的变形破坏特征整理如表4所示,具体分四个阶段对路堑边坡及边坡整体在降雨作用下的破坏过程做了分析;在整个降雨过程中,边坡除了路堑边坡失稳滑塌之外,边坡整体在表面从裂缝出现到裂缝不断发展最终在后缘形成张拉裂缝,坡体沿着滑动面整体向下滑移。为了更加直观地反映裂缝的发展情况,在表4将裂缝用点线进行了描绘。

原型边坡于2018年8月底开始出现局部少量土溜,在实验模型中降雨前期边坡开始出现局部溜塌;原型边坡于9月初坡表已形成多条裂缝,滑坡前缘锚杆及框架锚索变形破坏,后缘及两侧裂缝有继续向外延伸的趋势,实验模型在降雨中后期时,变形持续发展,最终整体失稳下滑,于坡顶处形成张拉裂缝。对比实验现象与原型边坡,变形情况基本吻合。

表 4 试验现象

Table 4 Experimental phenomenon

阶段	降雨作用下边坡响应情况	边坡破坏过程(发展过程为从左至右)
降雨之前	降雨之前对边坡分三级开挖,右图为开挖完成后的边坡模型	
降雨前期(a)	降雨开始时间为 14:20,降雨前期为 14:20~15:01,由于分级开挖导致坡面毛糙有孔隙,加剧了雨水入渗,边坡左侧开始出现局部坍塌	
降雨中期(b)	15:01 坡面自坍塌部分延展出现张拉裂缝,初始裂缝宽度 7 mm,在 15:21 张拉裂缝贯通,最大裂缝宽度达 27 mm,15:40 时自张拉裂缝整体坍塌	
降雨后期(c)	16:03 坡体张拉裂缝之后的土体滑移将裂缝重新覆盖,饱和土体呈淤泥状顺边坡向三级开挖台阶处整体滑移堆积,17:31 堆积体顺坡向堆积对边坡形成反压,滑动趋势减缓,趋于稳定	
边坡整体	降雨前期边坡开始出现局部溜坍,在降雨中后期时,变形持续发展,最终整体失稳下滑,于坡顶处形成张拉裂缝	

5 试验结果及数据分析

5.1 数据预处理

5.1.1 相邻平均值法平滑处理

各阶段传感器数据在实际采集时采样频率不同,且采样频率最高为 200 Hz,因此数据均有冗余,考虑到冗余数据对整体曲线的影响,对数据用相邻平均值法进行平滑处理,相邻平均法即在一或一领域内对相邻点求平均,从而处理不规则和滤掉一定噪声。

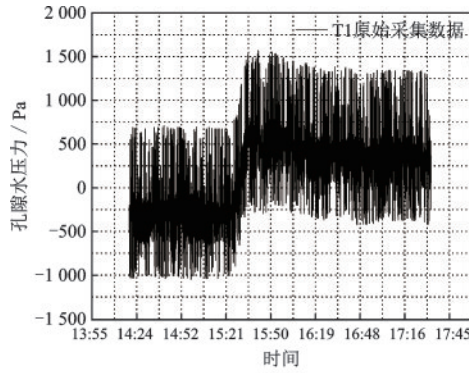
基于 Origin 中的平滑工具箱实现对实测信号的降噪,以降雨过程中的土压力、孔隙水压力和含水

率的原始数据进行分析。方法选用相邻平均值法,窗口点数宜选取 45~55,基于以上理论对该边坡孔隙水压力数据,利用 Origin 进行平滑降噪处理,降噪后取得了较好的降噪结果,降噪结果如图 7 所示。其余数据平滑处理均采用上述方法。

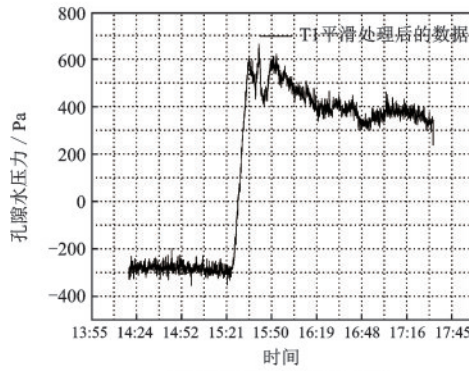
5.1.2 归一化处理

经过分析降雨量、含水率和孔隙水压力数据,发现多种数据之间存在相似性,考虑对测得的数据进行归一化处理,将数据无量纲化,横坐标均为降雨历时时间,而纵坐标均具有其各自的含义,通过多数据归一化处理可以更加直观地表示数据之间的关联性,进而得出各数据在同一时刻降雨量激励下坡体的响应情况。

归一化处理就是将原曲线纵坐标按归一化表



(a) T1测点原始曲线



(b) T1测点平滑处理后曲线

图7 T1测点孔隙水压力平滑处理实例

Fig. 7 Example of smoothing treatment on pore water pressure at T1 measuring point

达式进行转化得到新的纵坐标,由此绘制出新的降雨量、含水率、孔隙水压力曲线。

归一化处理的公式为:

$$y = \frac{X}{\bar{X}}$$

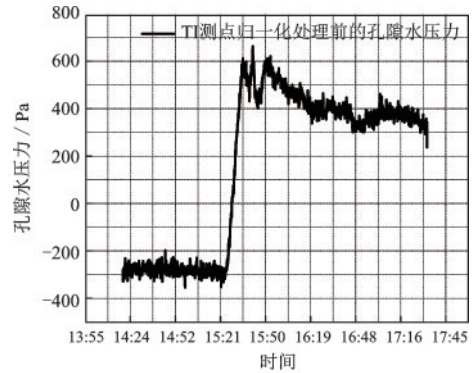
式中, y 为归一化处理之后的纵坐标值; X 为实测各传感器值; \bar{X} 为实测各传感器加权平均值。

为了使得各传感器数据无量纲化,将各数据的纵坐标值用上述公式进行转换得到新的归一化后的曲线,如图8所示。其余数据归一化处理均采用上述方法。

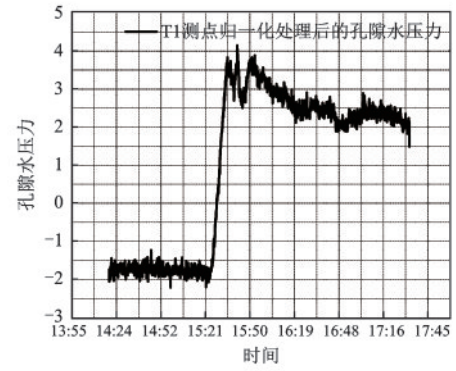
5.2 多传感器数据融合及相关性分析

JDL定义数据融合为一个数据或信息的综合过程,用于估计或预测实体状态^[20]。D.L. Hall等^[21]则认为数据融合是将多个传感器的数据或者信息进行组合,以此得到比单个独立的传感器更加精准的推理。

在进行多传感器数据融合处理时,由于多种传感器的采样频率、数据的物理意义不同,导致异构



(a) 归一化处理前的孔隙水压力曲线



(b) 归一化处理后的孔隙水压力曲线

图8 孔隙水压力归一化处理实例

Fig.8 Example of pore water pressure normalization treatment

数据的融合效果通常不是很理想,因此前人在数据融合时,大多都是对同种类型不同位置的传感器数据进行融合分析。以此避免不理想的融合决策结果,但是孔隙水压力,含水率等在分析滑坡整体的变形时又不可缺少。这里主要针对两种不同类型的传感器,结合试验现象,对预处理前后的数据做了初步融合及相关性分析。

如图9所示,T4测点含水率初始值为63.40%,自降雨开始至15:01含水率缓慢上升,随后迅速上升在15:03达到80.07%,此时坡体在T4测点附近出现了裂缝(表4(b)),自15:03开始缓慢上升至15:21后再次急速上升,在15:26达到了饱和状态,这时坡体发生了整体的坍塌(表4(b))。T1测点含水率初始值为63.30%,自降雨开始至15:03含水率缓慢上升,随后迅速上升在15:23达到饱和状态。T7测点初始含水率为77.83%,自降雨开始至15:01含水率缓慢上升,随后迅速上升在15:01达到88.77%,随后开始突变,含水率传感器暴露在空气中,随后又被滑移的土体覆盖,16:21时传感器彻底暴露在空气中,其含水率数值应为空气湿度。

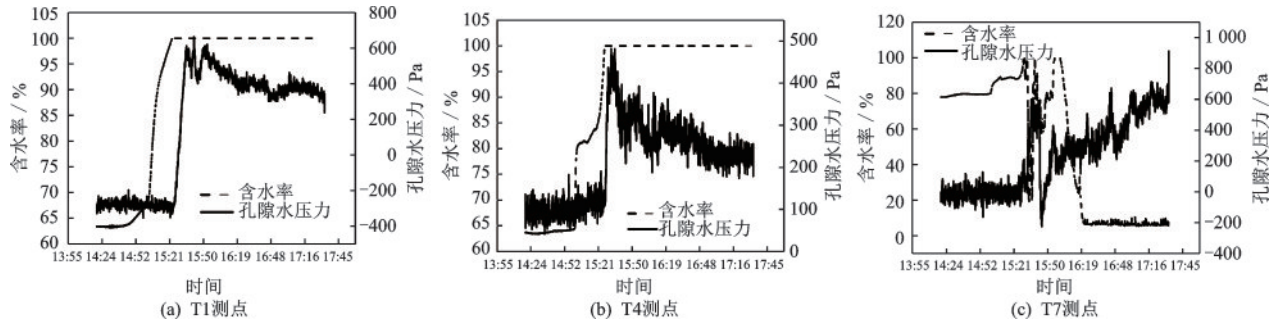


图9 含水率和孔隙水压力随降雨历时变化规律曲线

Fig. 9 Variation law curve of water content and pore water pressure with rainfall duration

孔隙水压力与边坡失稳发生变形破坏有着直接的关联,王如宾等^[2]指出孔隙水压力变化是降雨入渗透发滑坡失稳的重要因素。不同边坡土体类型、颗粒含量、渗透系数等都不尽相同,土体的孔隙水压力变化规律是判断坡体是否失稳的重要指标。

如图9所示,各测点的孔隙水压力在降雨前期14:20~15:20, T1测点在-200~-400 Pa波动, T4测点在0~200 Pa波动, T7测点在-200~200 Pa波动。降雨前期14:20~15:20,三个测点的孔隙水压力未有大的起伏变化,边坡整体还处于稳定状态。从15:20~15:50三个测点的孔隙水压力在一个小时的波动后,坡体前缘不断被浸没,土体结构松散,雨水不断入渗,坡体达到了临界状态,孔隙水压力急剧增加导致坡体内部有效应力迅速降低并导致滑坡失稳发生了变形破坏。随后在15:50之后 T1、

T4测点逐渐趋于稳定,而T7测点位于坡顶处,土体接近饱和而孔隙水压力在滑动后后方土体再次覆盖。孔隙水压力逐渐随着累计降雨量的增加还在缓慢增长,此时坡体还在缓缓滑动直至坡顶土体堆积在坡脚位置后趋于稳定。

如图10所示, T1、T4、T7测点含水率均自初始值达到临界值突增的同时,孔隙水压力也在含水率达到饱和时迅速增长,随后含水率始终为饱和状态,三个测点相关性反映在横向时,因其在同一断面自下而上分布,雨水渗透历时不同,突增之前的含水率由 T1→T4→T7 为 $0.65 < 0.76 < 0.99$, 在同一断面埋设深度越大含水率越小。孔隙水压力由 T1→T4→T7 为 $0.008 < 6.12 < 10.52$, 在同一断面也具有埋设深度越大孔隙水压力越小的同种规律性。含水率趋于稳定后,边坡前沿整体向下蠕滑,土体松动,逐渐趋于稳定。

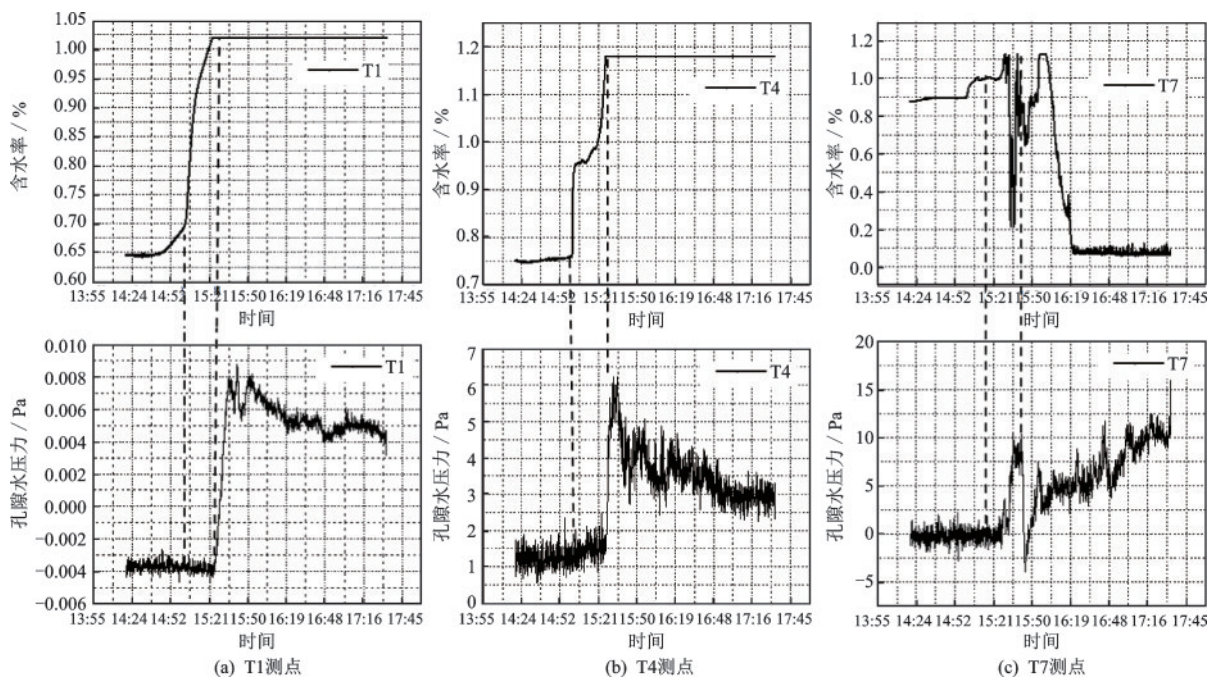


图10 含水率和孔隙水压力归一化后的变化规律曲线

Fig. 10 Normalized change curve of water content and pore water pressure

上文对T1、T4、T7测点含水率、孔隙水压力随降雨历时变化规律和相关性之间做了定性描述,为进一步量化表征含水率、孔隙水压力的特性,将各传感器的特征点多属性数据做基于统计学概率的散点矩阵运算,以更直观演示含水率、孔隙水压力和土压力之间的相关性。利用表5相关系数来描述相关程度。

表5 相关程度系数
Table 5 The correlation degree coefficient

相关系数 取值范围	$r=0$	$ r <0.3$	$ r =0.3\sim0.5$	$ r =0.5\sim0.8$	$ r >0.8$	$ r =1$
相关程度	无相关	微弱相关	低度相关	显著相关	高度相关	完全相关

由图11~13矩阵散点图相关分析可知,降雨条件下路堑边坡含水率和孔隙水压力响应变量之间均呈正相关。孔隙水压力T1测点于T4测点变量之间孔隙水压力相关系数为0.738 48,含水率相关系数为0.788 21,降雨条件下路堑边坡坡脚和坡中含水率和孔隙水压力相应之间具有显著相关性。散点图中显示95%二元正态密度椭圆较窄,沿着对角方向延伸,这表明路堑边坡坡脚和坡中的孔隙水压力与含水率之间存在高度的线性相关关系。

孔隙水压力T1测点于T7测点变量之间孔隙水压力相关系数为0.131 86,含水率相关系数为0.776 08,降雨条件下路堑边坡坡顶与坡脚含水率

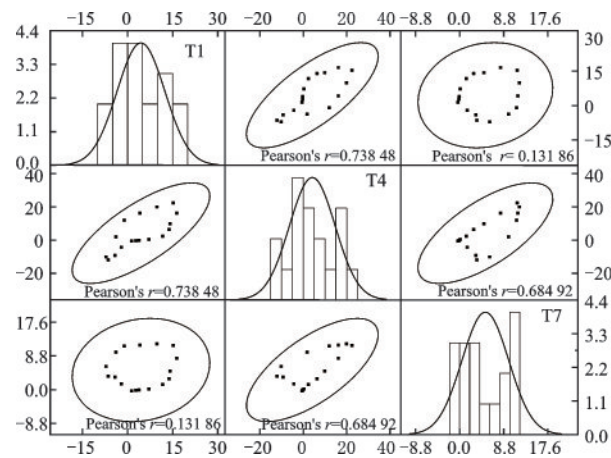


图11 孔隙水压力的特征值矩阵散点图
Fig. 11 Scatter plot of eigenvalue matrix of pore water pressure

注:图中的椭圆填充区域表示传感器特征值散点分布,椭圆表示每个散点图显示95%二元正态密度椭圆,椭圆的宽窄反映变量的相关度。若椭圆较圆,不沿对角延伸,则变量之间不相关。若椭圆较窄,沿着对角方向延伸,则变量之间相关^[23]。下同

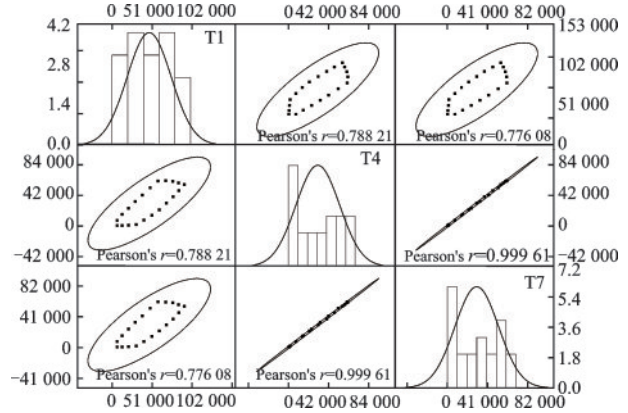


图12 含水率的特征值矩阵散点图
Fig.12 Scatter plot of eigenvalue matrix of water content

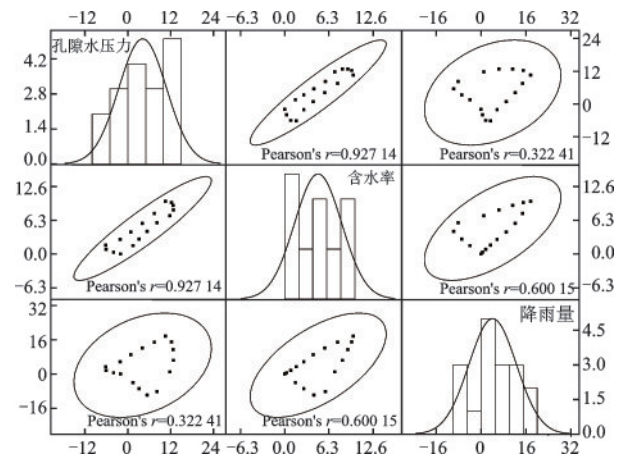


图13 多传感器特征值矩阵散点图
Fig. 13 Scatter plot of multi-sensor eigenvalue matrix

和孔隙水压力相应之间只有微弱的相关性。散点图中显示95%二元正态密度椭圆较圆,没有沿着对角方向延伸,这表明路堑边坡坡脚和坡顶的孔隙水压力之间线性相关关系较弱。

孔隙水压力T4测点于T7测点变量之间孔隙水压力相关系数为0.684 92,含水率相关系数为0.999 61,降雨条件下路堑边坡坡中与坡顶孔隙水压力之间具有显著相关性,含水率之间具有高度相关性。散点图中显示95%二元正态密度椭圆较窄,沿着对角方向延伸,这表明路堑边坡坡脚和坡顶的孔隙水压力之间存在着高度的线性相关关系。

孔隙水压力与含水率之间的相关系数为0.921 74,含水率与降雨量之间的相关系数为0.600 15,降雨条件下路堑边坡孔隙水压力与含水率之间高度相关性,含水率与降雨量之间具有显著相关性。散点图中显示95%二元正态密度椭圆较窄,沿着对角方向延伸,这表明路堑边坡的孔隙水压力之间存在着线性相关关系。

6 结 论

以成都天府国际机场高速公路 TJ04 标段 K17+700~K17+900 滑坡为依托工点,通过地质调查及分析和物理模型试验,测试得到边坡变形图像、含水率、孔隙水压力等多属性传感器数据信息,根据对试验模型的变形特征,多传感器数据的融合分析,结合统计学概率散点矩阵运算,得出结论如下:

(1)通过地质分析认为 K17+700~K17+900 段滑坡形成主要原因是地表水入渗及滑坡前缘路基开挖。

(2)通过模型试验研究已开挖路基在降雨条件下的变形特征,得出其变形机理为:降雨入渗→边坡局部溜坍→地表水入渗加剧→土体含水率上升→孔隙水压力增大→边坡失稳→整体牵引式滑移。

(3)通过传感器数据融合及统计学概率分析得出,随着降雨历时增长,含水率的变化曲线与累计降雨量之间呈正相关,相关系数为 0.600 15 具有显著相关性,孔隙水压力的变化曲线与含水率之间正相关,相关系数为 0.921 74 具有高度相关性,说明雨水入渗是土体含水率与孔隙水压力增长的直接原因。

(4)此次模型试验中存在两个问题:①只针对已开挖路基在降雨条件下的变形特征进行了研究,没有考虑坡脚开挖对边坡初始强度的破坏;②模拟层状岩石层面时通过分层填筑和层间铺设石膏粉来实现,后续试验可以考虑换种更好的方式来模拟此类层状边坡,使得模型土体的物理力学参数与原型更加相近。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 62(3): 433-454.
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 62(3): 433-454. (in Chinese)
- [2] 李焯芬, 陈虹. 雨水渗透与香港滑坡灾害[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(4): 34-38.
Li Z F, Chen H. Rainwater infiltration and landslide disaster in Hong Kong [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(4): 34-38. (in Chinese)
- [3] 常晓军, 王德伟, 唐业旗. 中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(1): 98-102.
Chang X J, Wang D W, Tang Y Q. Research status and development trend of landslide rainfall test in China [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(1): 98-102. (in Chinese)
- [4] 杜光波, 倪万魁. 降雨诱发型残坡积土滑坡形成机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4): 565-571.
Du G B, Ni W K. Analysis of the formation mechanism of rainfall-induced residual soil landslides [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(4): 565-571. (in Chinese)
- [5] 李玉瑞, 吴红刚, 赵金, 等. 模拟降雨作用桩锚-加筋土组合结构加固边坡研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 516-523.
Li Y R, Wu H G, Zhao J, et al. Study on simulated rainfall effect on pile-anchor-reinforced soil combined structure reinforcement [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 516-523. (in Chinese)
- [6] 张家发, 张伟, 朱国胜, 等. 三峡工程永久船闸高边坡降雨入渗实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 137-141.
Zhang J F, Zhang W, Zhu G S, et al. Experimental study on rainfall infiltration of the permanent shiplock slope of the Three Gorges Project [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 137-141. (in Chinese)
- [7] 朱宝龙, 胡厚田, 陈强, 等. 降雨条件下固体废弃物边坡变形及破坏模式试验研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 312-317.
Zhu B L, Hu H T, Chen Q, et al. Experimental study on deformation and failure mode of municipal solid waste slope under rainfall conditions [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 312-317. (in Chinese)
- [8] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 439-445.
Wang D J, Tang H M, Li C D, et al. Stability analysis of colluvial landslide due to heavy rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 439-445. (in Chinese)
- [9] Chen H X, Zhang L M. A physically-based distributed cell model for predicting regional rainfall-induced shallow slope failures [J]. Engineering Geology, 2014, 176: 79-92.
- [10] 周春梅, 赵子鹏, 鲁阳. 含水量对滑带土强度变形参数

- 及滑坡稳定性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 213-219.
- Zhou C M, Zhao Z P, Lu Y. The influence of water content on strength and deformation parameters of sliding zone soil and slope stability[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 213-219. (in Chinese)
- [11] 霍冬冬, 亓星. 多源数据融合在岩质滑坡监测预警中的应用[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2019, 32(5): 63-68.
- Huo D D, Qi X. Application of multi-source data fusion in the monitoring and early warning of rock landslides[J]. Journal of Sichuan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2019, 32(5): 63-68. (in Chinese)
- [12] 王智伟, 王利, 黄观文, 等. 基于BP神经网络的滑坡监测多源异构数据融合算法研究[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 575-582.
- Wang Z W, Wang L, Huang G W, et al. Research on multi-source heterogeneous data fusion algorithm based on BP neural network for landslide monitoring[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 575-582. (in Chinese)
- [13] 江山. 区域降雨型滑坡无线自主监测系统研制[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- Jiang S. The design of a wireless independent monitoring system for regional rainfall type landslides[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] 解明礼, 赵建军, 巨能攀, 等. 多源数据滑坡时空演化规律研究——以黄泥坝子滑坡为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 923-932.
- Xie M L, Zhao J J, Ju N P, et al. Study on the spatio-temporal evolution of landslides with multi-source data-taking Huangnibazi Landslide as an example[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(6): 923-932. (in Chinese)
- [15] 刘超云, 尹小波, 张彬. 基于Kalman滤波数据融合技术的滑坡变形分析与预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 30-35, 42.
- Liu C Y, Yin X B, Zhang B. Analysis and prediction of landslide deformation based on data fusion technology of Kalman-filter[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 30-35, 42. (in Chinese)
- [16] Villalpando F, Tuxpan J, Ramos-Leal J A, et al. New framework based on fusion information from multiple landslide data sources and 3D visualization[J]. Journal of Earth Science, 2020, 31(1): 159-168.
- [17] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 成都天府国际机场高速公路K17+700~K17+900滑坡工程地质勘察报告[R]. 成都: 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 2018.
- Sichuan Provincial Department of Transportation Highway Planning, Survey and Design Institute. Chengdu Tianfu international airport expressway K17+700~K17+900 landslide engineering geological survey report[R]. Chengdu: Sichuan Provincial Department of Transportation Highway Planning, 2018. (in Chinese)
- [18] 袁智洪. 顺层古滑坡降雨及切坡诱发复活机制模型试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- Yuan Z H. Model tests for resurrection mechanism of ancient landslide induced by rainfall and slope cutting [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [19] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842-1847.
- Wang H P, Li S C, Zhang Q Y, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847. (in Chinese)
- [20] Lambert D A. A blueprint for higher-level fusion systems[J]. Information Fusion, 2009, 10(1): 6-24.
- [21] Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(1): 6-23.
- [22] 王如宾, 夏瑞, 徐卫亚, 等. 滑坡堆积体降雨入渗过程物理模拟试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 47-54.
- Wang R B, Xia R, Xu W Y, et al. Study on physical simulation of rainfall infiltration process of landslide accumulation body[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(4): 47-54. (in Chinese)
- [23] Baker J W, Cornell C A. Correlation of response spectral values for multi component ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(1): 215-227.

(本文责编: 池营营)