

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202030053

西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式 ——以关岭县大寨滑坡为例

易连兴

(中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 岩溶地下水对我国西南岩溶石山地区特大型滑坡频发具有重要影响,因此,岩溶地下水的赋存规律及在其影响下的滑坡成灾模式成为一个亟待研究的科学问题。文章以贵州省关岭县岗乌镇大寨村大寨滑坡为例,基于野外调查,结合水动力场、水化学数据、暴雨数据等进行综合分析,取得以下成果和认识:(1)划分出大寨滑坡区地下分水岭,圈定了影响大寨滑坡的灰岩区和碎屑岩区,面积分别为0.93,0.30 km²;(2)滑坡当日暴雨集中在6—12时,后缘区域岩溶管道水对大寨滑坡滞后暴雨2 h启动起到主要控制作用;(3)滑坡区碎屑岩以及后缘灰岩接受了百年一遇的强降水的入渗补给后,在各自内部形成高压水动力场;在基岩裂隙水、岩溶管道水两种水动力场及岩层自身重力的共同作用下,潜在软弱结构面上的岩层失稳进而发生滑坡。由此建立了基岩裂隙水和岩溶管道水复合水动力场对滑坡的影响模式,并提出一种复合水动力场耦合方法。

关键词: 大寨滑坡;岩溶石山;岩溶管道水;复合水动力场;暴雨延迟效应

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0043-08

Impact model of landslide with complex hydrodynamic field in karst mountain areas of southwest China: a case study of the Dazhai landslide in Guanling County

YI Lianxing

(Institute of Karst of Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Groundwater in karst aquifers has an important effect on the large landslides frequently occurring in the karst mountain areas in southwest China. The storage rule of karst groundwater and its impact model on landslide disasters have become a scientific problem to be studied urgently. At 14:00 on June 28, 2010, a huge landslide disaster occurred at Dazhai near Gangwu Town in Guanling County of Guizhou Province, resulting in dozens of deaths and a large number of residential damage. This paper takes the Dazhai landslide as an example, and the field investigations, combining with hydrodynamic field analysis, hydrochemical analysis, rainstorm data analysis and comprehensive analysis are carried out. The research results show that (1) the underground watershed of the Dazhai landslide area is divided, and the area of limestone and clastic-rock affecting the Dazhai landslide is delineated as 0.93 and 0.30 km², respectively; (2) The heavy rain on the day of the landslide mainly occurred at 6:00—12:00, and it is considered that the karst conduit water in the trailing edge area plays a major role in controlling the start of the Dazhai landslide 2 hours after the heavy rain. (3) After the recharge of once-in-100-years heavy precipitation, the high-pressure hydrodynamic field

收稿日期: 2020-03-20; 修订日期: 2020-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504800)

第一作者: 易连兴(1963-),男,学士,研究员,主要从事岩溶水文地质研究。E-mail:yilx79@karst.ac.cn

was formed respectively in clastic-rocks and trailing edge limestones of the landslide area. Under the combined action of the two hydrodynamic fields (bedrock fissure water and karst conduit water) and the gravity of the rock-layer, rock formation instability on potentially weak structural surfaces was caused and the formation of this landslide was eventually occurred. This paper establishes the landslide impact model of the compound hydrodynamic field of bedrock fissure water and karst conduit water, and may provide a method of coupling the compound hydrodynamic field.

Keywords: Dazhai landslide; karst mountain area; karst conduit groundwater; compound hydrodynamic field; rain delay effect

2010 年 6 月 28 日 14 时,贵州省关岭县岗乌镇大寨村发生特大滑坡灾害^[1]。大寨滑坡发生后,有关单位和专家学者对滑坡区进行了调查^[1~3]和研究^[4~9]。殷跃平等^[4]研究了滑坡失稳后的运动特征和堆积特征,从地形、地质结构以及降雨作用等方面分析了滑坡的形成机制;刘传正^[5]通过降雨、斜坡岩体结构两个方面的影响对滑坡的启动机理进行了分析,对大寨边坡岩体的稳定性进行力学平衡计算;孔纪名等^[6]分析了滑坡区工程地质条件,认为边坡区岩性、构造、地形等构成了滑坡发生的必要条件,久旱强降雨是最重要的激发致灾因素;张信宝^[7]采用“超压密岩土边坡失稳理论”来解释大寨高速滑坡的启动机理,认为由于强降雨入渗,岩层裂隙与大气贯通,负压消失,“假”稳定状态消失,导致边坡失稳;张建江等^[8]认为特殊的地形地貌、“上硬下软”的地质结构以及“前旱后雨”极端气候是大寨滑坡的成灾原因。上述研究侧重于滑坡区工程地质及滑坡体结构特征,提出了地下水对滑坡启动或诱导作用,但仅笼统提出基岩地下水和岩溶地下水的作用。胡光中^[9]在大寨滑坡机理研究基础上,讨论了地下水的影响,并建立地下水作用下的滑坡模拟评价模型,但仅考虑了基岩裂隙水,没有考虑滑坡区后缘上覆灰岩区岩溶地下水的影响作用。

根据统计,80% 以上滑坡的发生与地下水有密切关系^[10~11],因此,总结滑坡过程中的水-岩耦合影响模式是众多学者重点研究的内容之一。在这方面,非岩溶区开展了较多研究工作,如黄达等^[12]、周剑等^[13]、徐永强等^[14]开展了库区水位升降耦合滑坡体内基岩裂隙水作用下的滑坡体稳定性评价;周平根^[15]总结了土质、岩质滑坡 8 种水文地质结构类型,其中 7 种属于非岩溶区,岩溶区划分为管道含水体单一水文地质结构;李根等^[16]系统总结了水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展,并分析了因水岩耦合变形破坏机制认识不足而导致的惨痛教训案例。相对而言,针对岩溶石山区滑坡水-岩耦合作用的研究较少。基于岩溶含水

介质结构和水动力场极其复杂,岩溶地下水影响滑坡模式有待深入研究。

本文通过野外调查,结合水化学和降水数据分析、综合研究等方法,分析和提出滑体区基岩裂隙水及后缘岩溶区地下水两种流场耦合对滑坡的控制作用,对研究大寨滑坡机理及岩溶地下水对滑坡的影响模式有一定意义。

1 研究区概况

大寨滑坡区及周边区域(图 1)为溶蚀-侵蚀深切中低山河谷地貌。北盘江河床高程 590 m,滑坡区后缘为山脊,最大高程 1 695 m,切割深度大于 1 000 m;相对光照水电站正常蓄水位 730 m,高差也近千米。垂直北盘江发育东西向槽谷,槽谷内发育树枝状冲沟。冲沟地形上游为陡崖或陡坡,坡度 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$;下游为缓坡,坡度 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。本次滑坡发生于永窝一大寨槽谷之冲沟上游。

研究区处于普安山字型构造脊柱、大田—法郎向斜北翼,为单斜构造,断裂不发育,断层主要由 SW—NE 向的小型断层组成,断层倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。出露地层有三叠系中统关岭组(T_2g)、下统永宁镇组(T_{1yn})和夜郎组(T_{1y}),二叠系上统龙潭-长兴组(P_3l+c)、峨眉山玄武岩($P_3\beta$)及中统茅口组(P_2m)等;地层产状总体倾向 SE,倾角 $28^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 。

滑坡区及后缘土地利用类型为灌木、草地,滑坡区以下主要为旱地、村民房屋用地等。该区域以农业生产为主,没有采矿等工业活动。

2 复合水动力场及滑坡影响模式

2.1 含水岩组及其与滑坡的关系

(1) 含水岩组

研究区分布有碳酸盐岩含水岩组(I)和碎屑岩含水岩组(II)。碳酸盐岩含水岩组包括茅口组(P_2m),永宁镇组 1 段(T_{1yn}^1)、3 段和 4 段(T_{1yn}^{3+4}),

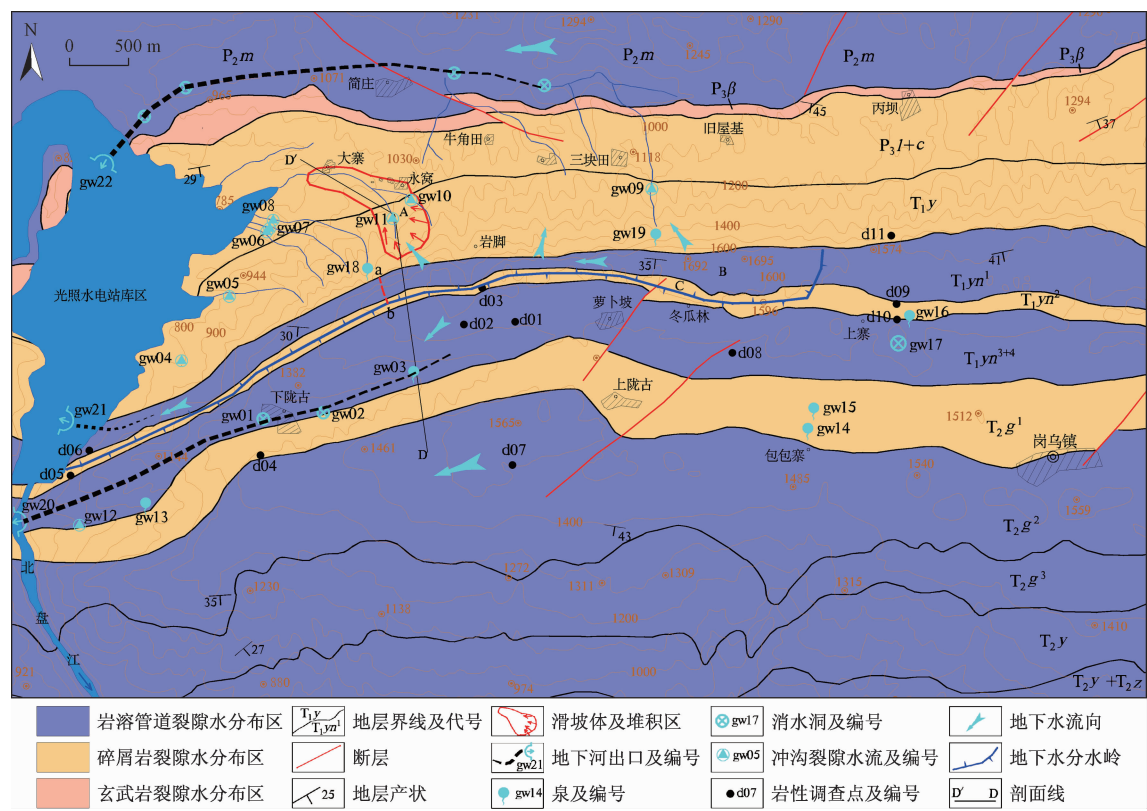


图 1 研究区水文地质简图

Fig.1 Simplified hydrogeological map of the study area

关岭组 2 段和 3 段(T_2g^{2+3})等,岩溶中等至强发育,发育地下河(表 1)、天窗和消水洞,受北盘江排泄基准面控制,岩溶地下水向北盘江或光照水电站库区径流排泄。

表 1 地下河主要特征表					
Table 1 Main features of underground rivers					
编号	发育地层	出口高程/m	流量/($L \cdot s^{-1}$)	示踪投放点	水力梯度/%
gw20	T_{1yn}^{3+4}	583.7	2.0 ~ 1 000.0	gw02;示踪 距离 2 750 m	25.0
gw21	T_{1yn}^1	582.0	0.5 ~ 20.0	钻孔;示踪 距离约 200 m	2.7
gw22	P_2m	<585.0	20.0 ~ 5 000.0		

注:本表资料来源于文献[17]。

研究区内碎屑岩含水岩组包括龙潭-长兴组(P_3l+c)、夜郎组(T_1y)、永宁镇组 2 段(T_{1yn}^2)、关岭组 1 段(T_2g^1)等。碎屑岩从地面至下具有强风化、风化、弱风化特征,浅部节理和裂隙相对发育,深部相对不发育。碎屑岩基岩裂隙水主要受地形控制,顺坡朝最近冲沟或槽谷径流排泄。研究区主要含水岩组分布见图 1,特征见表 2。

(2)分水岭

永宁镇组 2 段碎屑岩(II_2 区)含水岩组沿东西方

向呈连续条带状分布,厚 60 ~ 80 m;在西部水库旁公路边(图 2a)、东侧上寨公路边(图 2b)可见典型剖面,在滑坡后缘山体顶部 d3 处可见出露。该岩层表层风化后形成粉质黏土,如图 2(b)左侧部分,右侧为永宁镇组 1 段(T_{1yn}^1)灰岩。该地层厚度稳定、裂隙不发育,为相对隔水层,其分布区域在地形上为山脊,即地表水分水岭,同时也是地下水分水岭,地表水和地下水分别向南侧下陇古槽谷地下河(gw20)、北侧地下河(gw21)以及滑坡区径流排泄。

(3)滑坡区地下水补径排特征

受分水岭隔水作用,分水岭以南的永宁镇组 3 段、4 段(I_3 区)岩溶管道水、关岭组 1 段基岩裂隙水和关岭组 2 段、3 段岩溶地下水与滑坡区不存在水力联系。

茅口组灰岩(I_1 区)与滑坡区位于分水岭同一侧,地貌上为岩溶槽谷,发育地下河 gw22,主管道水位 570 ~ 800 m。尽管该地层岩溶强发育,且与滑坡区存在 250 m 以上的水位差,但与滑坡区之间分布有隔水作用较好的玄武岩和龙潭组长兴组中下部,两者合计厚度达数百米,因此,茅口组灰岩(I_1 区)不会对滑坡区地下水形成袭夺,即不存在地下水水力联系。当然,受地形控制,滑坡区排泄出地表的基岩裂隙水以溪流

形式流入茅口组灰岩区,这方面与文章所讨论的地下水与滑坡的关系无关。

表 2 研究区主要含水岩组
Table 2 Water-bearing rock formations in the study area

序号	类型	含水岩组及岩性	厚度/m	含水介质	岩溶发育特征	补给、径流、排泄特征	与滑坡区水力联系
I ₁	岩溶地下水	茅口组 (P ₂ m) 灰岩	>400	管道为主	强发育;峰丛洼地;地下河管道发育方向 SW260°	降水入渗补给,接受 II ₁ 区地表径流补给;通过地下河管道向西径流,在水库区集中排泄	无
II ₁	基岩裂隙水	龙潭-长兴组 (P ₃ l+c) 粉砂岩、粉砂质泥岩、碳质泥岩互层夹煤层; 夜郎组 (T ₁ y) 泥岩、砂岩	347 ~ 600 >300	节理裂隙		降水入渗及 I ₂ 区岩溶水侧向补给;地下水顺坡向北径流,在冲沟或槽谷内排泄	滑坡区
I ₂	岩溶地下水	永宁镇组 1 段 (T ₁ yn ¹) 灰岩	80 ~ 100	裂隙管道	中-强发育;上寨以西地形多为陡坡、陡壁;上寨以东为溶蚀缓丘,发育小型洼地	降水入渗、II ₂ 区碎屑岩侧向补给;地下水总体向水库区集中径流排泄,部分地下水向北部 II ₁ 区径流	直接关系
II ₂	基岩裂隙水	永宁镇组 2 段 (T ₁ yn ²) 泥岩、砂岩	60 ~ 80	节理裂隙		降水入渗补给;为地下水分水岭,地下水顺地形分别向北部 I ₂ 区、南部 I ₃ 区径流排泄	间接关系
I ₃	岩溶地下水	永宁镇组 3 段、4 段 (T ₁ yn ³⁺⁴) 灰岩、泥质灰岩	>800	岩溶管道	中-强发育;萝卜坡以东为溶蚀缓丘,发育大型洼地;萝卜坡以西为深切槽谷;地下河管道发育方向 SW220°	降水入渗、II ₂ 区和南部关岭组碎屑岩侧向补给;向西径流,通过地下河 gw03 在北盘江集中排泄;发育泉点 gw03 和滴水洞 gw01、gw02	无

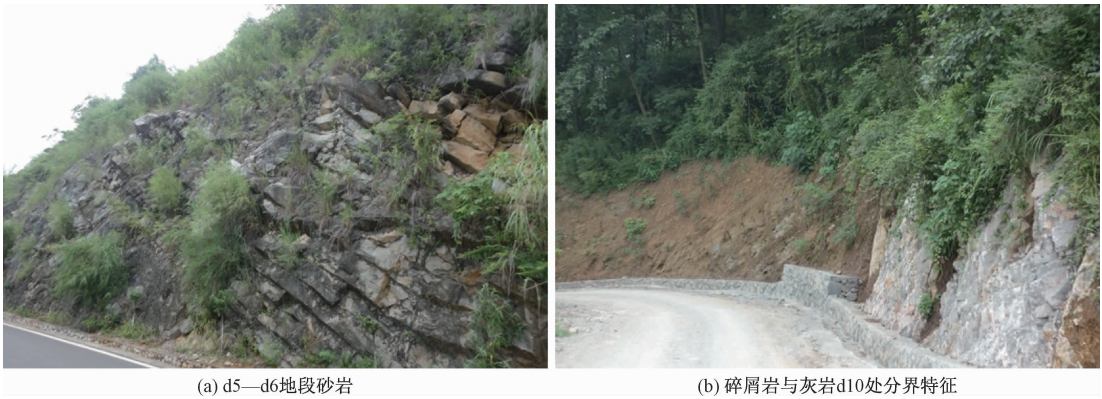


图 2 永宁镇组 2 段典型照片
Fig. 2 Typical photos of T₁yn² near the Yongning Town

滑坡区 (II₁ 区) 为基岩裂隙水分布区,大气降水垂直入渗为主要补给源。永宁镇组 1 段岩溶区 (I₂ 区) 位于分水岭北侧,紧邻且上覆于滑坡区,岩溶管道裂隙水总体由东向西朝水库区径流排泄,在径流过程中,部分岩溶地下水侧向补给滑坡区碎屑岩 (II₁ 区),因此, I₂ 区与滑坡区有密切水力联系,对滑坡将产生直接影响。对类似岩溶山区,张楠等^[18]也提出了降雨入渗且无有效的排泄通道,岩溶区的侧向补给对碎屑岩滑坡将起到重要作用。

水化学数据也反映出存在侧向补给。2019 年 7

月,在滑坡区冲沟内采集裂隙水水样,分析结果见表 3。Ca²⁺、HCO₃⁻ 平均含量为 54.62, 163.10 mg/L,与相邻打邦河流域关岭地区龙潭组、长兴组、夜郎组等相同地层结果 (表 4) 比较,分别大 45.16%、54.96%,其原因在于从处于高位的上覆永宁镇组 1 段灰岩 (I₂ 区) 析出大量离子,即上覆灰岩 I₂ 区的部分岩溶地下水向北部滑坡区 (II₁ 区) 径流补给。

滑坡区 (II₁ 区) 接受降水垂直入渗补给、侧向补给后,地下水顺地形向北径流,再转向沿永窝—大寨槽谷向水库区径流排泄,在径流过程中部分地下水就近

在沟、槽中排泄。

2.2 复合水动力场及其对滑坡的影响

(1)特枯期水动力场

2009 年 8 月 15 日以来,我国西南地区遭遇历史罕见的夏秋冬春四季连旱^[19],各地表层土体龟裂,泉点断流。研究区 2009 年 9 月至 2010 年 4 月合计降水量为 108.0 mm,仅为同期多年平均月降水量 416.8 mm 的 26%(表 5)。通过访问,在此次特枯期,南坡下陇古槽谷中 gw03 泉未断流,水位还保持在 gw03 泉口高程 1 432 m;北坡 gw18 和 gw19 两个泉断流。北坡永宁镇组 1 段(Ⅰ₂区)岩溶水动力场在相对强径流条件作用下形成低水位径流槽,并袭夺两侧基岩裂隙水向水库径流和排泄,使部分夜郎组(Ⅱ₁区)基岩裂隙水向岩溶Ⅰ₂区径流并形成临时局部地下水分水岭,永宁镇组 2 段(Ⅱ₂区)内水力坡度相对变陡

(图 2)。

(2)暴雨期水动力场及其对滑坡的影响

灾害发生前,滑坡区经历了关岭县有气象记录以来的最大一次降水过程,暴雨后的强烈补给,不同地段的地下水位急剧上升,形成与枯季不同的水动力场(图 3)。永宁镇组 2 段(Ⅱ₂区)内分水岭向北偏移;永宁镇组 1 段(Ⅰ₂区)地下水位也随着强补给而急剧上涨,伴随强烈补给和受 gw21 排水能力限制,地下水在滑坡区后缘岩溶区富集,低水位期的径流槽消失,并形成高水头,迫使部分岩溶地下水向滑坡区(Ⅱ₁区)内径流,相继夜郎组内的局部临时分水岭也消失。由于侧向补给量大,且碎屑岩(Ⅱ₁区)基岩裂隙过水能力小,部分地下水在碎屑岩和灰岩接触带溢出地表而形成泉,这也是 gw17 和 gw18 等泉点主要成因。

表 3 滑坡区水化学特征

Table 3 Hydrochemical characteristics of groundwater in the landslide area										/(mg·L ⁻¹)
编号	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂
gw07	0.54	4.63	61.14	7.85	3.06	42.53	181.90	0	3.81	10.14
gw08	0.32	2.04	56.38	3.64	2.89	16.90	172.80	1.79	2.92	7.22
gw09	0.22	3.09	46.34	4.14	2.87	18.82	134.61	3.58	2.83	8.03
平均值	0.36	3.25	54.62	5.21	2.94	26.08	163.10	1.79	3.19	8.46

表 4 打邦河流域相关地层水化学特征

Table 4 Hydrochemical features of groundwater in the relevant strata of the Dabanghe river basin										/(mg·L ⁻¹)
编号	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂
A060	0.59	3.07	31.43	2.57	1.29	25.01	69.18	0	11.79	8.44
A069	0.59	2.28	27.80	1.83	1.25	10.29	75.92	0	7.85	7.73
A101	0.49	1.98	33.24	2.20	1.33	5.31	86.05	0	18.99	8.74
D012	1.00	2.78	32.26	3.52	1.28	17.84	86.05	0	8.94	9.57
A109	0.49	4.50	24.29	5.70	1.63	52.98	31.64	0	7.74	13.31
B007	1.61	4.90	27.10	3.91	2.11	11.64	70.86	0	26.09	15.40
B020	1.00	2.65	33.55	4.70	0.97	12.53	94.48	9.96	4.09	13.97
平均值	0.82	3.17	29.95	3.49	1.41	19.37	73.45	1.42	12.21	11.02

表 5 月降水量统计表

Table 5 Monthly rainfall statistics													/mm
月份	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	年合计
多年平均月降水量	288.9	170.8	100.9	86.4	35.3	18.1	24.4	22.5	37.4	91.1	157.7	309.1	1 342.6
2009 年 7 月—2010 年 6 月降水量	376.4	220.3	6.5	45.5	4.4	11.6	2.0	1.5	1.4	35.1	132.8	549.9	1 387.4

岩溶区(Ⅰ₂区)形成地下水富集并向滑坡区径流补给的同时,滑坡区地层夜郎组、龙潭-长兴组碎屑岩(Ⅱ₁区)也接收了强大的垂直入渗补给。滑坡区自身形成的裂隙水动力叠加永宁镇组 1 段岩溶区(Ⅰ₂区)的水头压力作用,当滑坡区内水头达到某种高度时,使得潜在软弱结构面以上岩层失稳而形成本次大型滑坡。

假设 P 为岩溶区水头、 p 为滑坡区(A区)内自身形成的碎屑岩裂隙水水位、 W 为滑坡岩层重力 f 为滑动面摩擦阻力,两种地下水共同作用水动力应力场 σ ($P+p$) 和岩层应力场 σW 在滑动面上与摩擦阻力 f 的平衡关系,即滑坡区水岩耦合模式关系:

$$\sigma(P + p) + \sigma W = f \tag{1}$$

由于岩溶地下水往往具有快速流动特征,在几十

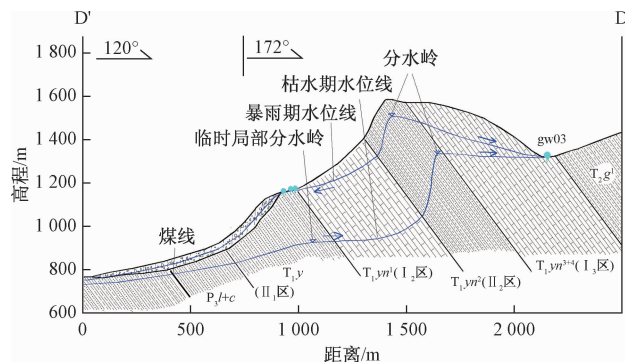


图2 滑坡区剖面水动力场

Fig.2 Hydrodynamic field of the landslide section

分钟或数小时就会影响到下游数千米距离处水位^[20-21],因此,本案例中考虑上部岩溶地下水影响,不仅需要考虑滑坡区直接后缘岩溶区域,也要考虑后缘以东岩溶区域,以及间接影响岩溶区补给条件的碎屑岩区,即图1中ab线段以东至分水岭的永宁镇组1段B区和永宁镇组2段C区,对应面积分别为0.93, 0.30 km²。

2.3 滑坡滞后暴雨分析

2010年6月26日至6月28日强降水过程合计降水296.5 mm。暴雨主要发生在28日6时—12时,合计降水191 mm,其中小时降水量最大达52 mm;12时以后为小雨,其中13时—14时2个小时降水量仅为5.9 mm(表6)。滑坡发生于14时,滞后暴雨2 h,即滑坡区内动、静水压力14时达到最大,因此滑坡暴雨滞后问题在水文地质上转化为滑坡区内最大水动力场

产生问题。

滞后暴雨问题与滑坡区本身工程地质结构、降水过程、上游补给区大小、含水介质结构等条件密切相关,一些学者统计得出西南石山区滑坡在暴雨当日或滞后1 d产生的可能性最大^[22-23]。本次滑坡区范围南北长280 m,东西宽200~250 m,后缘距离灰岩区仅25~50 m,同时又与两侧裂隙水没有联系,如果不考虑上覆岩溶水影响作用,仅考虑滑坡区碎屑岩自身基岩裂隙水,伴随13时—14时降水和补给量减少以及经过2 h的径流排泄,大部分滑坡区内的水位已经处于下降过程,14时的动、静水压力不是最大峰值。

永宁镇组1段岩溶区地下水,从东部分水岭至滑坡区后缘最大径流距离3 450 m,在暴雨2 h后于滑坡区后缘形成最高水头并传递到滑坡区内,符合实地条件和岩溶管道地下水运动规律。如本文作者实测出桂林寨底岩溶管道1 h影响距离2 230 m^[20-21]。因此可以推论,本次滑坡是基岩裂隙水叠加岩溶管道水共同作用的结果,且岩溶管道水动力是主要激发和启动因素。

当然,大寨特大型滑坡存在如相关文献提出的存在高陡斜坡、基岩节理裂隙发育等工程地质方面的滑坡失稳基本要素,但独特的地下水作用是启动或触发本次滑坡以及形成泥石流最重要的因素。从另一角度也说明,泥石流中水体不仅仅来源于滑坡区本身碎屑岩内部,更多的来源于后缘岩溶区,这是泥石流沿沟槽运动更远、破坏力更大的原因。

表6 10月28日0—15时小时降水量

Table 6 Hourly rainfall in the time of 0 a. m. to 3 p. m. of October 28th

时刻	0时	1时	2时	3时	4时	5时	6时	7时	8时	9时	10时	11时	12时	13时	14时	15时
降水量	0.4	4.2	22.4	11.4	5.4	6.3	29.1	27.5	52.0	17.0	26.3	23.1	15.9	4.7	1.2	0.4

2.4 水动力场耦合

解决上述带有滞后特征的复合水动力场问题有多种方法,采用分块独立计算后再进行耦合是其中的有效方法之一。表示B区岩溶地下水(式2)和A区基岩裂隙水(式3)一维(也可采用二维)水流模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) - R(t) = S \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) - r(t) = \mu \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

式中: T_x —— x 方向导水系数/($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$);

P ——水头/m;

R ——源汇项/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$);

S ——储水系数;

p ——水位/m;

K_y —— y 方向渗透系数/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$);

r ——原汇项($1 \cdot \text{h}^{-1}$);

μ ——单位储水系数($1 \cdot \text{m}^{-1}$);

t ——时间/h。

根据经验,通过调整导水系数 T_x 很难反映暴雨延迟效应,可通过边界条件达到滞后耦合:

$$p(y, t) = P(x, t + \Delta t), \quad x \text{ 或 } y \in \Gamma, \quad t, \Delta t \geq 0 \quad (4)$$

式中: x, y ——岩溶区与碎屑岩接触边界 Γ 上的点;

Δt ——滞后时间/h,其值为2。

本文重点关注水动力滑坡影响模式或概念模型,

关于水流模型解算的初始条件和其他边界条件以及碎屑岩C区对岩溶B区补给条件处理等不进行深入讨论。

3 结论

(1)大寨滑坡区后缘山体顶部存在地下水分水岭,分水岭两侧地下水补径排条件主要受岩性和含水介质控制。接受补给后,岩溶区地下水以管道集中径流方式由东向西朝北盘江排泄,碎屑岩区基岩裂隙水以分散方式向最近的冲沟或槽谷径流排泄。

(2)滑坡区位于分水岭北侧,滑坡区后缘永宁镇组1段0.93 km²的岩溶区地下水与滑坡区碎屑岩裂隙水存在水力联系,其他区域,特别是下陇古岩溶地下河gw20与滑坡区没有水力联系。

(3)大寨滑坡及泥石流的发生,是暴雨后滑坡区碎屑岩体内裂隙渗流叠加覆永宁镇组1段岩溶管道快速流共同作用的结果,即复合地下水动力场滑坡影响模式;滞后暴雨2 h启动,是后缘岩溶区管道水对暴雨延迟效应的反应。

参考文献(References):

- [1] 贵州省国土资源厅. 贵州省关岭县岗乌镇“6·28”特大地质灾害及周边地区地质灾害应急排查报告[R]. 2010. [Department of Land and Resources of Guizhou Province. Emergency investigation report of “6.28” geological disaster in Gangwu Town, Guanling County, Guizhou Province[R]. 2010. (in Chinese)]
- [2] 贵州省地质环境监测院. 永窝、大寨特大型滑坡-碎屑流地质灾害勘察报告[R]. 2011. [Geological Environment Monitoring Institute of Guizhou Province. Geological hazard investigation report of Yongwo and Dazhai landslide-debris flow[R]. 2010. (in Chinese)]
- [3] 童立强, 张晓坤, 李曼, 等. “6.28”关岭滑坡特大地质灾害应急遥感调查研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(3): 65-68. [TONG L Q, ZHANG X K, LI M, et al. Emergency remote sensing research on super large geological disasters caused by “6.28” Guanling landslide[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 22(3): 65-68. (in Chinese)]
- [4] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445-454. [YIN Y P, ZHU J L, YANG S Y. Investigation of a high speed and long run-out rock-slide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 445-454. (in Chinese)]
- [5] 刘传正. 贵州关岭大寨崩滑碎屑流灾害初步研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 623-630. [LIU C Z. Preliminary findings on Dazhai landslide-debris flow disaster in Guizhou Province of June 28, 2010[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 623-630. (in Chinese)]
- [6] 孔纪名, 田述军, 阿发友, 等. 贵州关岭“6.28”特大滑坡特征和成因[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 725-731. [KONG J M, TIAN S J, A F Y, et al. Guizhou Guanling landslide formation mechanism and its characteristics[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(6): 725-731. (in Chinese)]
- [7] 张信宝. 关于《贵州关岭“6.28”特大滑坡特征和成因》一文的商榷[J]. 山地学报, 2011, 29(2): 254-256. [ZHANG X B. Discussion with the article of “Guizhou Guanling landslide formation mechanism and its characteristics”[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(2): 254-256. (in Chinese)]
- [8] 张建江, 杨胜元, 王瑞. 贵州关岭“6·28”特大地质灾害的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 137-139. [ZHANG J J, YANG S Y, WANG R. Enlightenment of “6·28” geological disaster in Guanling of Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3): 137-139. (in Chinese)]
- [9] 胡光中. 贵州省关岭县大寨村高速滑坡启动机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. [HU G Z. Study on starting mechanism of Dazhai village high-speed landslide in Guanling County of Guizhou Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)]
- [10] 陈近中, 赵其华. 水-岩相互作用对滑坡的影响[J]. 路基工程, 2007(2): 9-11. [CHEN J Z, ZHAO Q H. Influence of water-rock interaction on landslide[J]. Subgrade Engineering, 2007(2): 9-11. (in Chinese)]
- [11] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 303-310. [WU Y Q. Groundwater flow and geological hazards[J]. Underground Space, 1999, 19(4): 303-310. (in Chinese)]
- [12] 黄达, 匡希彬, 罗世林. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 127-135. [HUANG D, KUANG X B, LUO S L. A study of the deformation characteristics and

- reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5):127-135. (in Chinese)]
- [13] 周剑,邓茂林,李卓骏,等. 三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律[J]. *水文地质工程地质*, 2019,46(5):136-143. [ZHOU J, DENG M L, LI Z J, et al. Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019,46(5):136-143. (in Chinese)]
- [14] 徐永强,祁小博,张楠. 基于降雨与库水位耦合的三舟溪滑坡渗流模拟及稳定性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2016,43(5):111-118. [XU Y Q, QI X B, ZHANG N. Numerical simulation and stability analysis for the seepage flow in the Sanzhouxi landslide under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5):111-118. (in Chinese)]
- [15] 周平根. 滑坡的水文地质结构类型[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998, 9(增刊1):211-218. [ZHOU P G. On types of hydrogeological structure of landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(Sup1):211-218. (in Chinese)]
- [16] 李根,唐春安,李连崇. 水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J]. *力学进展*, 2012,42(5):593-619. [LI G, TANG C A, LI L C. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling[J]. *Advances in Mechanics*, 2012,42(5):593-619. (in Chinese)]
- [17] 余波. 光照水电站坝址区岩溶水文地质特征及工程影响[J]. *贵州水力发电*, 2005,19(1):14-19. [YU B. Karst hydro-geologic characteristics in dam area of Guangzhao hydropower station & their influence on engineering [J]. *Guizhou Water Power*, 2005, 19(1):14-19. (in Chinese)]
- [18] 张楠,徐永强,闫慧. 岩溶山区浅层基岩滑坡失稳机理研究——以大方县金星组滑坡为例[J]. *水文地质工程地质*, 2017,44(6):142-146. [ZHANG N, XU Y Q, YAN H. A study of the instability mechanism and investigation methods of shallow bedrock landslides in karst mountain areas; taking the Jinxing landslide in Dafang County as an example[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017,44(6):142-146. (in Chinese)]
- [19] 李忆平,王劲松,李耀辉. 2009/2010 年中国西南区域性大旱的特征分析[J]. *干旱气象*, 2015,33(4):537-545. [LI Y P, WANG J S, LI Y H. Characteristics of a regional meteorological drought event in southwestern China during 2009-2010[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015,33(4):537-545. (in Chinese)]
- [20] 易连兴,夏日元,王喆,等. 岩溶地下河探测与评价[M]. 北京:科学出版社, 2018:211-216. [YI L X, XIA R Y, WANG Z, et al. Detection and evaluation of karst underground river [M]. Beijing: Science Press, 2018:211-216. (in Chinese)]
- [21] YI L X, XIA R Y, TANG J S, et al. Karst conduit hydro-gradient nonlinear variation feature study: case study of Zhaidi karst underground river [J]. *Environment Earth Science*, 2015(74):1071-1078.
- [22] 唐红梅,魏来,唐云辉,等. 重庆地区降雨型滑坡相关性分析及预报模型[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013,24(4):16-22. [TANG H M, WEI L, TANG Y H, et al. Correlation analysis and prediction model for rainfall-induced landslide in Chongqing area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013,24(4):16-22. (in Chinese)]
- [23] 高华喜,殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. *岩土力学*, 2007,28(5):1055-1060. [GAO H X, YIN K L. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007,28(5):1055-1060. (in Chinese)]

编辑:汪美华