

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.02

强降雨条件下岩质边坡倾倒崩塌破坏机理 ——以鄂西赵家岩崩塌为例

曾 芮,姜明顺,孙琳旭,熊承仁

(中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,湖北 武汉 430074)

摘要:我国鄂西地区山多且陡、岩溶发育、雨量充沛,强降雨作用下崩塌地质灾害频发,研究该区域岩质边坡崩塌倾倒破坏机理对该区域的灾害防治具有重要意义。以该区具有典型代表意义的赵家岩崩塌为研究对象,通过实地勘测,工程地质分析,ABAQUS 数值模拟分析等手段,对其变形破坏机理进行研究,结果表明:三面临空近直角陡峭的地形地貌、上硬下软的岩性组合是影响崩塌破坏的内在因素;下伏煤层开挖使得岩体下部架空,改变了岩体内部的应力分布并加速了岩体蠕变破坏的发展;节理裂隙发育改造了岩体内部结构,降低了岩体强度,促进了降雨条件下水压力对岩体的作用;强降水作用使得岩体后缘裂隙快速充水,对岩体产生向外的推力,是岩体崩塌倾倒破坏的直接诱因。

关键词:强降雨;崩塌倾倒;破坏机理;ABAQUS

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)03-0012-06

Toppling failure mechanism of rock slope induced by heavy rainfall: a case study of the Zhaojiayan Rockfall in Western Hubei

ZENG Rui, JIANG Mingshun, SUN Linkui, XIONG Chengren

(Three Gorges Research Center for Geohazards, Ministry of Education, China University of Geosciences,
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In Western Hubei Province, there are many steep mountains, karst phenomena and abundant rainfall which leading to frequent collapse under heavy rainfall. Therefore it is important to study the toppling failure mechanism of rock collapse in this area. The typical Zhaojiayan Collapse as the research object, through field investigation, engineering geological analysis, ABAQUS numerical simulation, the deformation failure mechanism were studied. The results show that: three facing the steep terrain near right angle, upper hard and lower soft rock combination are the intrinsic factors affecting collapse failure; coal seam excavation made the rock mass overhead, changed the stress distribution and accelerated the development of rock mass creep failure; the development of joints and cracks transformed the internal structure of rock mass, reduced the strength, and promoted the effect of water pressure on rock mass under rainfall condition; heavy rainfall made cracks rapid water filling, exerted outward thrust on the rock mass, is a direct cause of toppling failure.

Keywords: heavy rainfall; toppling; failure mechanism; ABAQUS

收稿日期: 2017-09-10; 修订日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272309)

第一作者: 曾 芮(1993-),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事地质灾害的评价与治理研究。E-mail: zzzrui@163.com

通讯作者: 熊承仁(1965-),男,湖北武汉人,博士,副教授,主要从事岩土工程与工程地质研究。E-mail: xiongcr@126.com

0 引言

鄂西山区雨量充沛、岩溶发育,崩塌、滑坡等地质灾害频发。崩塌是其中分布最广的地质灾害之一,但由于地质环境复杂、影响因素众多等原因,崩塌机理的分析一直是广大学者们关注的重点与难点^[1-7]。郑允等^[8]通过建立顶坡荷载作用下岩质边坡块体倾倒破坏地质力学模型,探讨了不同岩块厚度和切坡角度下坡顶荷载对边坡稳定性的影响;刘才华等^[9]通过建立地震作用下岩质边坡倾倒破坏地质力学模型,理论分析了地震作用对边坡倾倒稳定性的影响,提出了判别边坡破坏模式的地震影响系数临界值;郑允等^[10]针对岩块长细比较大的情况,推导了地震作用下岩质边坡倾倒破坏的一般解析解;杨根兰等^[11]以小湾水电站引水沟上部高边坡为例,详细分析了其倾倒破坏模式,揭示了这类大规模的倾倒破坏表现特征及其形成条件。这些研究对各类成因的岩质边坡倾倒破坏模式进行了分析,但针对以强降雨为诱因,受节理切割的倾倒式崩塌灾害现今还未见系统性研究。鉴于此,以赵家岩崩塌为例,针对受节理切割的危岩体倾倒失稳破坏模式,结合现场勘察资料,对危岩体失稳过程进行了理论研究,并采用有限元数值模拟方法半定量分析了崩塌灾害的直接诱发因素。

1 工程概况

1998年8月16日16时16分,位于湖北省宜昌市五峰土家族自治县的赵家岩危岩体发生整体倾倒失稳,在几分钟时间里崩塌体转化为高速远程碎屑流,沿沟谷水平运动距离约2 km。此次崩塌灾害造成物源区下方2座电站拦水坝和部分引水明渠破坏,毁坏7栋84间民房,破坏农田庄稼约8.47 ha,山林土地约13.6 ha,影响公路约1 210 m,造成直接经济损失约 1.619×10^7 元。幸运的是,由于前期的预防监测,此次崩塌没有造成人员伤亡,是湖北省地质灾害群测群防预报成功的典型案例之一。

1.1 地形地貌

赵家岩崩塌是发生在湖北省西部山区清江流域的一处较为典型的倾倒式岩质崩塌,其地处清江与澧水分水岭地带,地貌上属于构造剥蚀溶蚀中低山地貌。原始危岩体位于湖北省五峰县长乐坪镇桥坪村赵家岩陡崖处,距离五峰旧县城约15 km,根据现场勘察资料,赵家岩崩塌的主崩方向约为NE 75°,原始危岩体崖顶高程1 690~1 720 m,崖底高程1 620~1 640 m,崩塌体呈“方块状”,原始危岩体长约139 m,平均高约

80 m,平均厚约40 m,总体积约 $4.48^5 \times 10^3 \text{ m}^3$,崩塌体原始地形见图1、图2。



图1 赵家岩崩塌碎屑流运动路径图

Fig. 1 Debris flow path map of Zhaojiayan Collapse



图2 赵家岩原始地形图

Fig. 2 Original terrain map of Zhaojiayan

1.2 地质构造

根据现场踏勘调查和查阅相关文献资料,赵家岩物源区位于狮子埡向斜核部、赵家岩原始陡崖处,滑坡区内主要地质构造有狮子埡向斜和3条小型逆断层,向斜核部及两翼地层主要为微晶灰岩,SE翼岩层产状 $350^\circ \angle 12^\circ$,NW翼岩层产状 $170^\circ \angle 11^\circ$,两翼形态对称。

1.3 地层岩性

研究区内主要出露有三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系地层,成分主要为灰岩、页岩、砂岩等沉积岩类;原始危岩体主要为二叠系吴家坪组上、中段地层,下伏基岩为二叠系吴家坪组下段地层,具体如下:

① Q_4 :第四系松散堆积物,主要为土黄色碎土、粉质黏土;

② P_2w^3 :二叠系中统吴家坪组上段灰岩,灰色、灰白色中厚层结构;

③ P_2w^2 :二叠系中统吴家坪组中段含燧石结核灰岩,深灰色、灰色中厚层结构,其中燧石结核呈黑色,粒径3~15 mm不等;

④ P_2w^1 :二叠系中统吴家坪组下段炭质页岩夹煤层,黑色、灰黑色层状结构;

⑤ P_1m : 二叠系下统茅口组灰岩, 灰色中厚层结构。

各地层平行整合接触, 产状均为 $250^\circ \angle 4^\circ$ 。

2 赵家岩崩塌影响因素

结合现场踏勘调查, 赵家岩崩塌的主要影响因素有以下五点。

2.1 三面临空近直角陡峭的地形地貌

赵家岩原始地形南高北低, 呈陡崖地形, 原始危岩体地势高陡, 临空面近乎直立, 且呈三面临空状态, 为崩塌灾害的发生提供有利的地形条件。

崩塌体物源区和堆积区相对高差达 880 m, 使得崩塌体具有很高的重力势能, 为崩塌碎屑流和块体运动提供了动力来源。

2.2 上硬下软的岩性组合

由剖面图(图 3)可见, 赵家岩上部为强度较高的灰岩、含燧石结核灰岩, 下伏为强度较低的炭质页岩, 构成上硬下软的软弱斜坡岩体结构类型。下部的炭质页岩易受到风化作用等地质营力侵蚀, 破坏其岩体结构, 使得原本就不高的强度进一步降低, 甚至发生形变, 从而导致上部岩体发生应力重分布, 影响赵家岩山体整体稳定性。此外, 炭质页岩岩层易形成滑动面, 虽然赵家岩岩层内倾, 但也一定程度上影响着山体的稳定性。

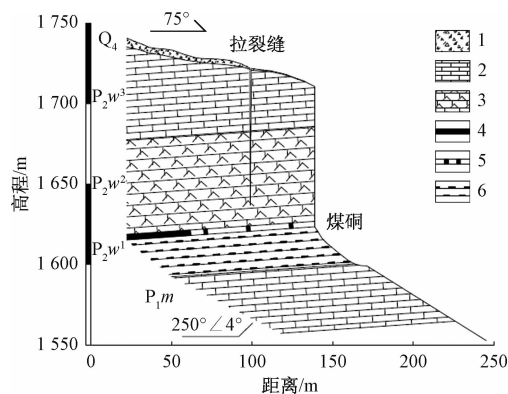


图 3 赵家岩原始剖面图

Fig. 3 Geological profile of Zhaojiayan

1—第四系松散堆积物; 2—灰岩; 3—含燧石结核灰岩;
4—煤层; 5—煤桩; 6—灰质页岩。

2.3 下伏煤层开挖

开采位置主要位于二叠系上统吴家坪组下段 (P_2w^1) 含煤层炭质页岩中, 山体底部煤层的不断的开采对赵家岩整体应力场分布产生影响: 未开采前, 岩体的节理裂隙以缓慢加速变形为主; 1995 至 1998 年初, 下部煤层陆续被采空, 在自重作用以及采空沉陷作用

下, 赵家岩顶部原有的小型裂缝扩展贯通, 形成统一连续性裂缝, 加速了斜坡的破坏。

2.4 节理裂隙发育

据现场观察, 崩塌后缘裂壁可见长期水流作用所形成的钙化、黄泥残留和层间溶蚀裂缝存在, 表明岩体内岩溶较发育。危岩体岩性为灰岩 (P_2w^3)、含燧石结核灰岩 (P_2w^2), 在长期的岩溶作用下, 使得原有溶蚀节理、张拉裂缝加宽, 并逐步贯通, 形成岩溶裂隙系统。岩溶裂隙系统的出现, 加速了降雨雨水的径流运移速度, 使得降水能通过溶蚀裂缝快速进入软弱基座, 降低其力学强度。尤其赵家岩顶部的大型拉裂缝(图 3)形成, 切割山体形成危岩体, 是崩塌灾害的主要影响因素之一。

2.5 强降雨

赵家岩地处湖北西南暴雨中心之一, 在危岩体发生崩塌前一个月, 从 1998 年 7 月 21 日至 8 月 17 日五峰县共出现 7 次暴雨、大暴雨过程, 其中 8 月 3 日降雨量达 109 mm。7 月下旬至 8 月中旬降雨天数为 25 天, 降雨量达 578.4 mm, 是历史同期平均降雨量的 2 倍。持续的降雨使危岩体后缘拉裂缝宽度由 0.1 m 增加到 0.62 m。8 月 16 日当日降雨量达到了 100.7 mm, 危岩体裂缝亦持续加宽, 直至 16 时 16 分赵家岩危岩体整体失稳, 强降雨是其破坏的直接诱发因素。

3 倾倒破坏数值模拟

为验证以上对赵家岩崩塌破坏机理的工程地质判断, 通过数值模拟的手段, 分别模拟煤层开挖、节理裂隙发育和强降雨时赵家岩的应力场及变形特征, 数值模拟软件选用 ABAQUS。

3.1 模型建立

根据赵家岩原始剖面图结合危岩体稳定性影响因素的初步理论分析建立数值模拟模型。由于赵家岩顶部的第四系堆积物层厚较薄且对危岩体稳定性的影响非常小可忽略不计, 故为简化计算, 建立模型时将其略去, 网格划分见图 4。为同时满足计算精度与速度要求, 将模型共划分为 2 430 个节点, 4 637 个网格单元, 网格类型为线性三节点平面应变单元 (CPE3) (图 4)。模型边界条件为: 模型左边界和底部边界固定, 即模型的左边界和底部边界水平位移和竖直位移均为零; 模型顶部边界和坡面为自由边界。本构模型采用 ABAQUS 软件自带的 Drucker-Prager 模型。赵家岩原始最大主应力分布见图 5。

3.2 参数选取

根据室内试验, 各岩层物理力学参数见表 1。

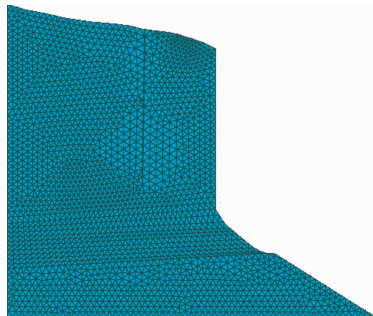


图 4 赵家岩崩塌模拟模型网格划分图

Fig. 4 Mesh diagram of Zhaojiayan simulation model

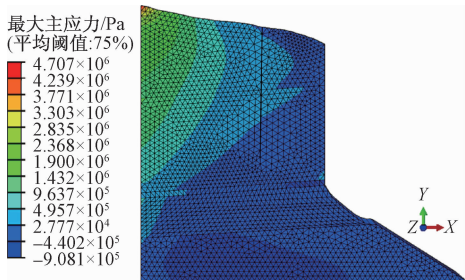


图 5 赵家岩原始最大主应力分布图

Fig. 5 Maximum principal stress distribution of original Zhaojiayan

表 1 岩体物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass						
岩性	弹性模量 E/GPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\Phi/(\text{^\circ})$	泊松比 μ	重度 $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	体积模量 GPa
灰岩 (P_2w^3)	5.3	38.76	34.99	0.271	26.20	3.44
含燧石结核灰 (P_2w^2)	5.9	31.45	36.13	0.241	25.95	2.50
炭质页岩 (P_2w^1)	4.5	21.02	17.66	0.221	24.48	1.90

3.3 煤层开挖

赵家岩下伏煤层厚度不大,煤矿规模较小,1998年后采煤活动逐渐停止。开挖深度约 80 m,开挖煤硐的高度约 1.5 m,煤硐内煤柱间距约 20 ~ 30 m。由模拟结果(图 6)可见,最大主应力峰值出现在坡顶处,其值为 $9.071 \times 10^6 \text{ Pa}$,ABAQUS 软件默认应力值为正是拉应力,即该处应力状态为受拉。煤矿末端和靠近末端的两个煤柱顶端出现应力集中现象,其中煤矿末端最大主应力为 $-2.106 \times 10^6 \text{ Pa}$,由里至外三个煤柱顶端的最大主应力分别为 $-9.178 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $-7.646 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $-4.054 \times 10^5 \text{ Pa}$,从坡底到坡顶岩体应力状态由压应力逐渐变为拉应力。煤层开挖之后,煤硐上部的自重全由 3 根煤柱和未开采部分承担,应力分布不均,故在煤矿末端和煤柱顶端出现应力集中现象。同时也是由于自重应力的作用,山体下半部包括煤层开挖处最大主应力均为负值。仅在煤矿开采的影响下,赵家岩山体未见明显变形,煤矿内的矿柱仍然完好,这与走访当地时获得的信息一致。故煤层的开挖使得岩体下部架空,岩体内部应力重分布,加速了岩体蠕变破坏的发展,对赵家岩稳定性有一定影响,但不是诱发其崩塌破坏的直接因素。

3.4 节理裂隙发育

赵家岩山体内主要发育两组近乎正交的陡倾节理,加之岩溶的作用,山体内节理裂隙十分发育。其中对赵家岩稳定性影响最大的是山体后缘的大型拉裂缝,据监测资料,1998 年 4 月至 8 月随着持续性的降雨,裂缝宽度由 0.1 m 增加至 0.62 m,故本文主要模

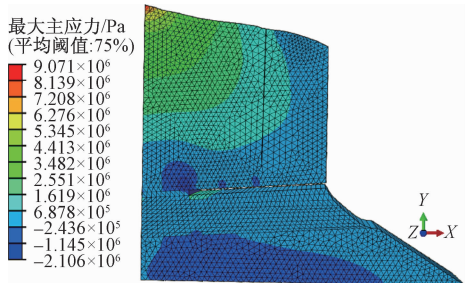


图 6 煤层开挖时最大主应力分布图

Fig. 6 Maximum principal stress distribution of coal seam excavation

拟当该裂缝形成时山体内部的应力场。

由模拟结果(图 7)可见,拉裂缝末端最大主应力达到 $2.594 \times 10^7 \text{ Pa}$,有明显应力集中现象,该处也是山体内部最大主应力最大值处,说明了该裂缝的形成大幅度改变了岩体内的应力分布。煤矿末端最大主应力为 $-1.723 \times 10^6 \text{ Pa}$,相比仅煤层开挖时压应力减小。由里至外三个煤柱顶端的最大主应力分别为 $-1.1261 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $-2.615 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $-3.169 \times 10^6 \text{ Pa}$,相比仅煤层开挖时压应力增加。裂缝切割山体形成危岩体,与仅煤层开挖时不同,危岩体的自重由裂缝未贯通部位与最靠近坡面的煤柱承担,故此时裂缝末端和该煤柱顶端最大主应力出现明显改变。

故由于节理裂隙发育,岩体出现些许变形,内部应力场发生改变,一定程度上影响了赵家岩的稳定性。但山体整体未发生破坏,赵家岩山体仍处于稳定状态,所以节理裂隙发育也不是诱发其崩塌破坏的直接因素。

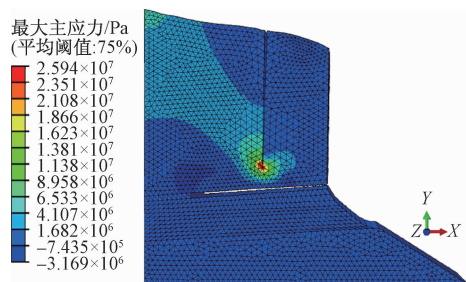


图7 后缘拉裂缝发育时最大主应力分布图

Fig. 7 Maximum principal stress distribution of tension crack generation

弱化,更加加速了整体的破坏。故强降雨是诱发赵家岩发生倾倒失稳破坏的直接因素。

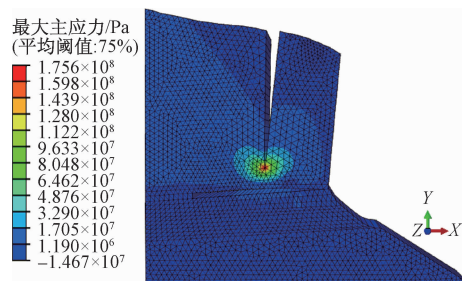


图8 强降雨时最大主应力分布图

Fig. 8 Maximum principal stress distribution of heavy rainfall

3.5 强降雨

根据唐红梅等^[12]危岩裂隙水压力计算公式为:

$$Q = \frac{1}{2} \xi \gamma_w h^2$$

式中: ξ ——裂隙水压力折减系数, 根据裂隙开度, 本文取 $\xi_{0.6} = 71.38\%$;

γ_w ——主控结构面内水体容重/(kN/m^3);

h ——主控结构面内冲水深度/m。

根据冉涛等^[1]8月16日降雨在危岩体后缘内形成的“水楔”高度达到136.33 m, 远远大于危岩体高度, 故可以认为拉裂缝被水充满。即本文中危岩体后缘裂隙水水压力 $Q = 1284.84 \text{ kN}/\text{m}$, 由于裂缝生成后的面不是自由面, 所以在ABAQUS里面无法给出面力, 因此用节点力代替, 本文选取20个节点, 即每个节点间隔3 m, 每个单元长度3 m, 对每个节点施加集中力, 集中力 $= Q/20 = 64.242 \text{ kN}/\text{m}$, 模拟结果如图8所示。

由模拟结果(图8)可见, 拉裂缝末端最大主应力达到 $1.756 \times 10^8 \text{ Pa}$, 该处也是山体内部最大主应力最大值处, 相比拉裂缝形成时其值增加了一个量级, 说明了强降雨造成的水压力较大, 大幅度改变了岩体内部应力场。煤矿末端最大主应力为 $7.599 \times 10^5 \text{ Pa}$, 相比拉裂缝形成时由压应力变为拉应力。靠坡里的两个煤柱顶端的最大主应力分别为 $7.913 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $1.124 \times 10^6 \text{ Pa}$, 与煤矿末端一样, 由压应力变为拉应力。靠近坡面的煤柱顶端最大主应力为 $-1.136 \times 10^7 \text{ Pa}$, 相比拉裂缝形成时拉应力变大, 该处也是岩体拉应力最大处。此外, 可以清晰看到后缘拉裂缝已开始变形, 煤硐中靠近坡面的煤柱已发生破坏, 危岩体发生整体失稳破坏, 这亦与走访当地时获得的信息一致。强降雨使得危岩体后缘裂缝快速充水, 水压力对危岩体产生侧向水平推力, 这是危岩体倾倒的主要动力来源, 同时降雨还使岩体强度

4 结论

(1) 结合现场勘测, 分析赵家岩崩塌影响因素包括三面临空近直角陡峭的地形地貌、上硬下软的岩性组合、下伏煤层开挖、节理裂隙发育与强降雨。

(2) 运用ABAQUS有限元软件对赵家岩稳定性进行模拟: 煤层开挖改变了岩体内部应力场, 加速了岩体的蠕变变形, 促进了危岩体后缘拉裂缝的形成, 但未造成赵家岩整体发生变形; 危岩体后缘大型拉裂缝的形成进一步改变了岩体内部应力分布, 节理裂隙的发育使岩体结构破碎, 降低了岩体强度, 但模拟结果显示此时山体仍处于稳定状态; 强降雨作用下, 裂缝迅速扩张, 危岩体整体发生倾倒破坏。故煤层开挖和节理裂隙发育是影响赵家岩稳定性的重要因素, 强降雨是诱发赵家岩崩塌倾倒破坏的直接因素。

参考文献:

- [1] 冉涛, 文宝萍, 苏昌, 等. 湖北五峰赵家岩崩塌形成机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 120-124.
RAN Tao, WEN Baoping, SU Chang, et al. Analysis of the formation mechanism of the Zhaojiayan rock fall in Wufeng County, Hubei Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 120-124.
- [2] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
FEI Kang, ZHANG Weijian. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [3] 王金昌, 陈页开. ABAQUS在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
WANG Jinchang, CHEN Yekai. Application of

- ABAQUS in Civil Engineering [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [4] Ashby J, Sliding and toppling modes of failure in model and jointed rock slopes [M]. Sci. Thesis. Imperial College, London, 1971.
- [5] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proc. Rock Fracture, ISRM, Nancy, PaPer II —8, 1971.
- [6] Lee M J, Lee I M. Reliability-Based Analysis of Toppling Failure in Rock Slopes [J]. 1998, 18(3 – 5).
- [7] Tatone B S A, Grasselli G. ROCKTOPPLE: A spreadsheet-based program for probabilistic block-toppling analysis [M]. Pergamon Press, 2010.
- [8] 郑允, 陈从新, 刘婷婷, 等. 坡顶荷载作用下岩质边坡倾倒破坏分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2639 – 2647 + 2658.
- ZHENG Yun, CHEN Congxin, LIU Tingting, et al. Analysis of toppling failure of rock slope under the loads applied on the top [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2639 – 2647 + 2658.
- [9] 刘才华, 陈从新. 地震作用下岩质边坡块体倾倒破坏分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3193 – 3198.
- LIU Caihua, CHEN Congxin. Analysis of toppling failure of rock slopes due to earthquakes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3193 – 3198.
- [10] 郑允, 陈从新, 朱玺玺, 等. 地震作用下岩质边坡倾倒破坏分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1025 – 1032 + 1040.
- ZHENG Yun, CHEN Congxin, ZHU Xixi, et al. Analysis of toppling failure of rock slopes subjected to seismic loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1025 – 1032 + 1040.
- [11] 杨根兰, 黄润秋, 严明, 等. 小湾水电站饮水沟大规模倾倒破坏现象的工程地质研究 [J]. 工程地质学报, 2006(2): 165 – 171.
- YANG Genlan, HUANG Runqiu, YAN Ming, et al. Engineering geological study on a large-scale toppling deformation at Xiaowan hydropower station [J]. Journal of Engineering Geology, 2006(2): 165 – 171.
- [12] 唐红梅, 陈洪凯. 危岩裂隙水压力修正计算方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 86 – 90.
- TANG Hongmei, CHEN Hongkai. Revised method of water pressure in control fissure of perilous rockmass [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(4): 86 – 90.

封面照片说明

黄河上游尖扎县康杨镇寺门村特大型滑坡

2018年4月3日,黄河上游青海省尖扎县康杨镇寺门村发生特大型黄土-泥岩滑坡,造成马康公路、输电线路、饮水管线等严重破坏,直接经济损失约800万元。

该滑坡位于黄河南岸凹岸,受黄河侧蚀作用影响强烈。滑体后缘高程2 089 m,前缘高程2 028 m,前后缘相对高差61 m;堆积体长约300 m,宽约500 m,平均厚度约8 m,主滑方向100°;平面形态为规则的圈椅状,剖面形态呈阶梯状,上陡下缓;滑坡后壁擦痕和磨光面明显,堆积体上发育多条拉张裂缝,裂缝平均宽约5~20 cm,可见深度约0.3~1.5 m,且呈逐渐加宽、加深特征。

(中国地质环境监测院 殷志强 供稿)