

切割斜坡断层的几何形态对斜坡地震响应影响研究

王志民, 罗刚, 王媛, 胡卸文, 陈仕阔

A study of the influence of the crossing-slope fault geometry on the slope seismic response

WANG Zhimin, LUO Gang, WANG Yuan, HU Xiewen, and CHEN Shikuo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209030>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究

A Study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides

张恩铭, 程谦恭, 林棋文, 谢宇, 王玉峰, 姚志勇, 孙先锋 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 125-135

不同加固技术在散粒体斜坡表层的应用对比研究

Research on the effect of different reinforcement methods on the surface of a granular slope

杨晴雯, 裴向军, 吴梦秋, 常志璐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 139-139

青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究

Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau

杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 任三绍 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 91-101

滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 148-148

滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊, 杨海龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 161-168

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

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

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209030

王志民, 罗刚, 王媛, 等. 切割斜坡断层的几何形态对斜坡地震响应影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 147-157.
WANG Zhimin, LUO Gang, WANG Yuan, *et al.* A study of the influence of the crossing-slope fault geometry on the slope seismic response[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 147-157.

切割斜坡断层的几何形态对斜坡地震响应影响研究

王志民¹, 罗刚¹, 王媛², 胡卸文¹, 陈仕阔¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756;
2. 中国中铁二局第二工程有限公司, 四川成都 610091)

摘要: 与一般重力环境的滑坡相比, 地震诱发滑坡在形成机理、运动特征等方面差异显著。天然和降雨条件下, 断层破碎带作为边坡的不连续结构面, 往往对斜坡的稳定性产生不利影响。而在地震作用下, 边坡内部的断层破碎带存在一定的滤波作用, 有可能减弱边坡的地震动响应。为了探究逆断层几何形态对边坡地震动响应的影响, 以汶川地震中牛眠沟滑坡、窝前滑坡、谢家店子滑坡及东河口滑坡为研究对象, 概化出断层切割型斜坡的地质模型, 利用 3DEC 离散元软件对不同断层破碎带宽度、倾角、位置情况下的斜坡地震动响应进行模拟。模拟结果表明: (1) 随着断层倾角增大, 斜坡总位移峰值和坡面加速度峰值表现出增大的趋势, 斜坡更易失稳; (2) 坡顶监测点的峰值加速度一般大于坡底与坡腰的值, 随着断层破碎带宽度增大, 对斜坡地震动响应的直接影响愈加明显; (3) 断层的存在会增加斜坡失稳的可能性, 断层位于坡顶时斜坡地震动响应随断层倾角和破碎带宽度变化的规律性更明显。本研究可为深入揭示地震作用下断层破碎带对斜坡稳定性的影响提供理论依据。本研究可为深入揭示地震作用下断层破碎带对斜坡稳定性的影响提供理论依据。

关键词: 地震滑坡; 断层; 几何形态; 斜坡地震响应; 离散元模拟; 斜坡稳定性

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0147-11

A study of the influence of the crossing-slope fault geometry on the slope seismic response

WANG Zhimin¹, LUO Gang¹, WANG Yuan², HU Xiewen¹, CHEN Shikuo¹

(1. Faculty of Geoscience and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. The Second Engineering Company, CREGC, Chengdu, Sichuan 610091, China)

Abstract: Compared with the landslides in the general gravity environment, the earthquake-induced landslides are significantly different in formation mechanisms and kinetic characteristics. Under the normal and rainfall conditions, the fault fracture zone, as the discontinuous structural plane of the slope, often adversely affect the stability of the slope. Under the earthquake condition, the fault fracture zone within the slope has a limited filtering effect, which could weaken the seismic response of the slope. To investigate the influence of the reverse fault's geometry on the slope's seismic response, we took the Niumiangou landslide, the Woqian landslide, the

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-12-15

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277143); 国家重点研发计划项目(2022YFC3005704); 四川省国土资源厅科技项目(KJ-2023-004; KJ-2023-025)

第一作者: 王志民(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail: 1165769800@qq.com

通讯作者: 罗刚(1984-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事地质工程和地质灾害方面的科研与教学工作。

E-mail: luogang@home.swjtu.edu.cn

Xiejadianzi landslide and the Donghekou landslide as reference objects and generalized the geological model of the fault-crossing landslide in this study. The seismic response of slopes with faults of different widths, dips and positions are simulated using the 3DEC discrete element software. The simulation results show that (1) as the fault dip angle increases, the peak value of the total displacement of the slope and the peak acceleration of the slope surface show an increasing trend, and the slope stability is worse. (2) The peak acceleration of the monitoring point at the top of the slope is generally greater than that at the bottom and waist of the slope. As the width of fault fracture zone increases, the effect on the seismic response of the slope becomes obvious. (3) The presence of faults facilitates the probability of slope instability. When the fault is located at the top of the slope, the variation of the seismic response with the dip angle and the fault width shows a more obvious regularity. This study can provide a theoretical basis for further revealing the impact of fault fracture zone on the stability of slopes under the earthquake condition.

Keywords: earthquake-induced landslide; fault; fault geometry; slope seismic response; discrete element simulation; slope stability

地震滑坡是自然界破坏力最强的一类滑坡。2008年“5·12大地震”是新中国成立以来,在我国人口密集区发生的破坏力最大,影响范围最广的地震,造成1.5万多起滑坡,其中包括数十处规模大于 $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的巨型滑坡^[1-2],滑坡灾害直接造成2万多人死亡^[3]。

在产生地表破裂的地震事件中,滑坡的分布表现出与地表破裂关系密切相关。Jibson等^[4]对发生在Denali-Totschund右旋走滑断层上的阿拉斯加Denali M_w 7.9地震进行研究,发现地震产生了长达300 km的地表破裂带和数千个地震滑坡,集中分布于地表破裂带两侧15 km的狭窄条带范围内。黄润秋等^[5]发现汶川地震引起的滑坡主要集中在断层强破碎带两侧10 km以内。陈晓利等^[6]发现汶川地震滑坡在地表破裂带两侧呈现明显的非对称性,超过80%的滑坡分布在断裂带的上盘。蒋瑶等^[7]对2010年玉树地震滑坡进行调查,发现80%的滑坡集中在活动断裂带两侧2 km宽、95 km长的范围内,表现出断层控制的典型特征。杨志华等^[8]对巴塘断裂带进行地震滑坡危险性预测评价,认为距离断层越近、坡度越大的斜坡,地震滑坡危险性越高。李光辉等^[9]对普格段则木河断裂带的地质灾害发育规律进行分析,发现绝大部分地质灾害呈带状分布在则木河断裂带的2 km范围内,具有断层距离效应。毕鸿基等^[10]开展了汶川县地质灾害易发性评价研究,发现地质灾害易发性较高的区域多分布在断裂带附近。

地震滑坡中断层的几何形态影响斜坡动力响应,且不同性质的断层引发的地震动强度及其空间变化是有区别的。Oglesby^[11]对1999年台湾集集地震进行了三维数值模拟研究,讨论了断层几何形态对该逆冲断层的地震动响应的控制作用,认为集集地震上盘地

震动强度较下盘强烈的主要原因在于逆冲断层的几何形态。王文沛等^[12]对汶川地震中余震作用下汶川极震区绵竹九龙镇山前斜坡地震动力响应进行研究分析,认为断层的场地效应影响斜坡地震响应,加剧斜坡失稳。许冲^[13]指出发震断层性质控制着同震滑坡发育强度和空间分布,发震断层倾角表现出非常明显的地震滑坡控制作用。除此之外,众多地震滑坡案例表明,逆冲断层比走滑断层能够释放更多的能量,地震滑坡主要分布于断层上盘^[14-18]。

在汶川地震中,大多数滑坡都与发震断层有密切联系,在发震断裂带附近,地震动能量大,滑坡发育密集。随着距发震断层的距离增大,汶川地震中导致的崩塌滑坡密度锐减^[19]。张冬丽等^[20]调查研究了汶川地震加速度记录,认为地震动强度的变化主要由上盘效应和断层距控制,在断层下盘地震动的峰值加速度明显小于断层上盘地震动的峰值加速度,断层下盘地震动衰减明显快于断层上盘。汶川 M_w 7.9地震、台湾集集 M_w 7.6地震、庐山 M_s 7.0地震和尼泊尔 M_w 7.8地震都存在明显的上下盘效应^[19,21]。杨琴等^[22]对北川唐家湾滑坡历史和机制进行调查研究,认为地震时强烈断层逆冲错动导致坡体瞬间失稳形成滑坡。

综上所述,斜坡所在地区的大型断裂带基本上控制了该区域内地震滑坡的基本模式和规模。针对逆断层切割斜坡的地震稳定性的规律性研究并不多见,其中逆断层的倾角、出露位置和断层破碎带宽度对于边坡地震动响应的的影响尚未明晰。因此,以汶川地震中牛眠沟滑坡、窝前滑坡、谢家店子滑坡与东河口滑坡为主要研究对象,依据其坡面形态简化出断层切割型斜坡的地质模型,利用3DEC离散元软件探究断层几何形态对斜坡稳定性的影响。

1 断层切割型地震滑坡

1.1 汶川县牛眠沟滑坡

牛眠沟滑坡位于汶川县映秀镇南约 2 km 处。在强烈的地震动作用下, 斜坡失稳滑坡, 约 $7.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑体携带巨大的能量在莲花心沟和牛眠沟中运动了约 3 km, 破坏了沟内建筑物和农田, 造成了约 50 人死亡^[23]。

映秀—北川断裂从牛眠沟滑坡穿过, 断层上盘以晋宁期花岗岩($\text{Pt}_{2,3}$)为主, 是滑源区主要岩层; 下盘为上三叠统须家河组(T_{3x})灰色-块状长石石英砂岩以及薄煤层, 侵入岩为斜长花岗岩(图 1)。

1.2 青川县窝前滑坡

窝前滑坡位于四川省青川县马公乡窝前村西南, 体积约 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$, 导致 38 人死亡^[17]。窝前滑坡主要

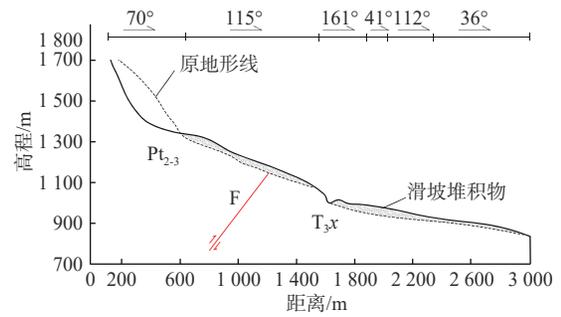


图 1 牛眠沟滑坡剖面图 (据文献 [23] 修改)

Fig. 1 Geological profile of the Niuliangou landslide (modified after Ref.[23])

由上震旦统水晶组(Z_{2s})的硅质白云质灰岩和下寒武统邱家河组(C_{1q})的含千枚岩的炭硅质板岩组成。地层接触类型为平行不整合接触。石坎断层从窝前滑坡的底部通过(图 2)。

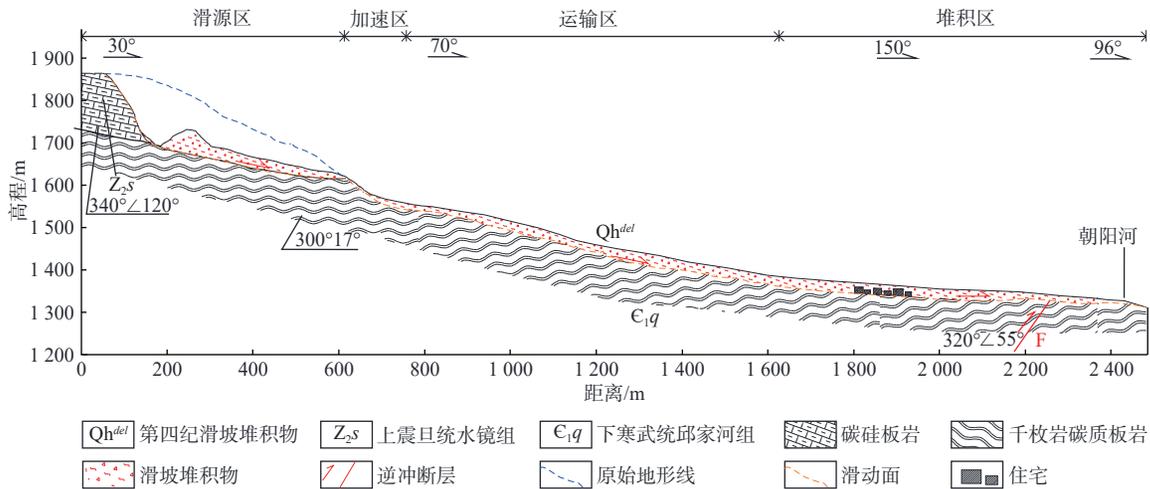


图 2 窝前滑坡剖面图 (据文献 [17] 修改)

Fig. 2 Geological profile of the Woqian landslide (modified after Ref.[17])

1.3 彭州市谢家店子滑坡

谢家店子滑坡位于彭州市龙门山镇九峰村白水河右岸, 龙门山中央主断裂带从谢家店子滑坡的腰部通过(图 3)。断层上盘为元古界黄水河群(Pthn)花岗

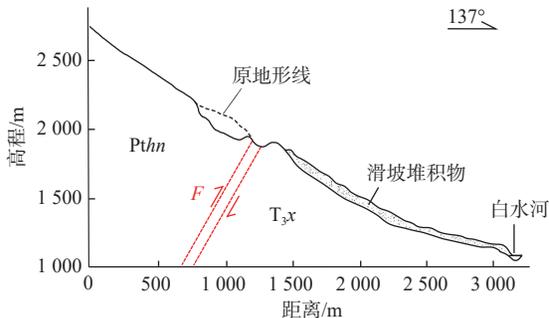


图 3 谢家店子滑坡剖面图 (据文献 [24] 修改)

Fig. 3 Geological profile of the Xiejiaodianzi landslide (modified after Ref.[24])

闪长岩、辉长岩, 下盘为三叠系上统须家河组(T_{3x})砂岩、泥岩和碳质页岩。

在地震作用下, 约 $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑坡体顺沟谷倾泻而下, 沿途不断铲刮沟谷两岸斜坡的碎屑物质, 最终在沟口谢家店子堆积下来, 摧毁房屋并导致 63 人死亡、多人受伤。松散破碎的块石堵塞河道形成堰塞湖, 严重威胁下游人民的生命财产安全^[24]。

1.4 青川县东河口滑坡

东河口滑坡位于四川广元青川县红光乡东河口村, 区内岩性复杂, 出露地层有上震旦统元吉组(Z_{2y})碳质板岩、灰岩透镜体、硅质板岩; 下寒武统油房组(C_{1y})及邱家河组(C_{1q})砂质板岩; 穿过滑坡的断层周边出露大量断层角砾岩。该滑坡自高程约 1 000 m 剪

出并形成体积约 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的滑坡-碎屑流, 滑坡在长距离滑动过程中, 摧毁了附近几个村与东河口小学,

导致 780 余人死亡^[25]。龙门山中央主断裂带从东河口滑坡的顶部通过(图 4)。

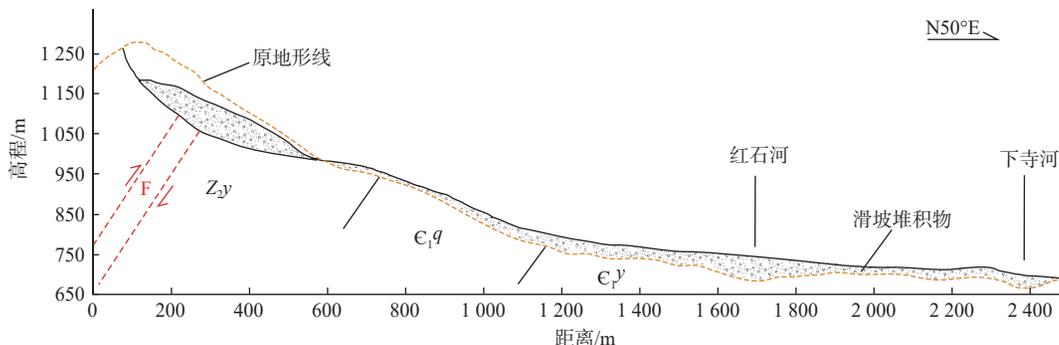


图 4 东河口滑坡剖面图 (据文献 [25] 修改)

Fig. 4 Geological profile of the Donghekou landslide (modified after Ref.[25])

贺小黑等^[26]对安化地区断层与地质灾害的关系进行研究, 认为断层位于坡体不同位置时对斜坡失稳的影响不同, 并分为断层穿过斜坡中上部和坡脚两个方面讨论。在汶川地震诱发的 4 个典型滑坡中, 映秀—北川断裂从牛眠沟滑坡的腰部、谢家店子滑坡的腰部、东河口滑坡的顶部通过, 石坎断层从窝前滑坡的底部通过。因此, 在直线斜坡的上部(坡顶)及下部(坡腰或坡脚)分别设置逆断层进行模拟研究。考虑有次级断裂穿越的大型滑坡的成因、形态等因素, 推测坡体上的断层破碎带宽度与产状同样也会对斜坡的稳定性以及滑坡的产生存在一定影响。因此分别在斜坡上设置不同断层破碎带宽度, 不同倾角和处于斜坡不同位置的逆断层, 输入相同的地震动加速度, 以探究地震作用下不同产状和宽度的逆断层处于不同位置时对斜坡地震动响应的影响。

2 数值模拟

2.1 试验方案

岩土工程分析软件 3DEC 基于离散元方法, 在模拟分析离散单元组合的变形问题上具有独特优势^[27-31]。根据前述断层切割型地震滑坡概化出地质模型, 建立长 300 m, 高 200 m, 宽 100 m 的直线型斜坡, 斜坡坡度设置为 45° , 坡脚位于 100 m 高程处, 并布置 A(坡脚)、B(坡腰)、C(坡顶)共 3 处监测点(图 5)。

为研究不同倾角和不同断层破碎带宽度的切割斜坡逆断层在位于斜坡不同位置时对斜坡地震动力响应的影响, 考虑到一般情况下断层顺层或反倾时对斜坡稳定性的不利, 将模拟断层的倾向设置为与斜坡面的倾向一致, 断层位置分别位于监测点 A 和 B 中间

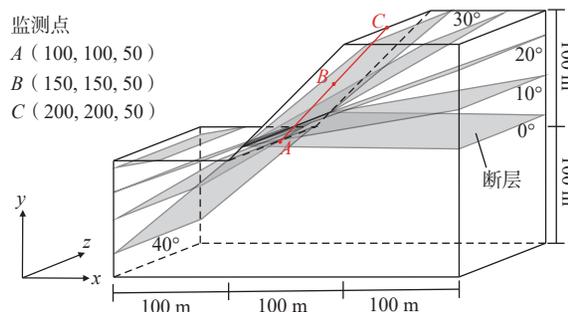


图 5 斜坡模型及监测点布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the slope model and monitoring points layout

(坡脚)与监测点 B 和 C 中间(坡顶)处。

逆冲断层形成过程中, 岩体受到的水平方向的最大主应力和竖直方向的最小主应力, 当岩体所受应力超过其抗剪强度时, 岩体发生剪切破裂, 岩体破裂面与最大主应力面的夹角 θ 按照 $45^\circ - \varphi/2$ 计算。岩体的内摩擦角 φ 为 35° , 可知岩体破裂面与最大主应力面的夹角 θ 从 27.5° 到 45° 变化。分别在坡脚和坡顶设置 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 的断层来探究不同产状和不同破碎带宽度的断层位于斜坡不同位置对斜坡稳定性的影响, 如图 5 所示, 在斜坡模型中展示了位于坡脚的 5 种不同角度的断层与坡面的相对位置关系。为便于展示, 并未绘出断层位于不同位置、不同断层厚度的所有情况。

将断层破碎带宽度分为 2 m、5 m 和 10 m 三种情况, 数值模拟方案按以上条件设置共计 30 组(表 1)。

2.2 参数设置

数值模拟试验所用地震波共计 53.74 秒, 间隔 0.02 秒, 共计 2 688 个加速度, 其中震动加速度峰值为 1.79 m/s^2 。

表 1 数值模拟试验方案

Table 1 Numerical simulation test scheme

| 工况 | 断层破碎带宽度/m | 倾角/(°) | 断层位置/m | | | | |
|----|-----------|--------|--------|-------|----------------|----------------|-----|
| | | | x | z | y ₂ | y ₁ | |
| 1 | 2 | 0 | | | 110.0 | | |
| 2 | | 10 | | | 113.0 | | |
| 3 | | 20 | 坡脚 | | | 112.9 | 110 |
| 4 | | 30 | | | | 112.7 | |
| 5 | | 40 | | | | 112.4 | |
| 6 | | 0 | | 115 | 0 | 145.0 | |
| 7 | | 10 | | | 148.0 | | |
| 8 | | 20 | 坡顶 | | | 147.9 | 145 |
| 9 | | 30 | | | | 147.7 | |
| 10 | | 40 | | | | 147.4 | |
| 11 | 0 | | | | 110.0 | | |
| 12 | 10 | | | 109.9 | | | |
| 13 | 5 | 20 | 坡脚 | 150 | 0 | 109.7 | 110 |
| 14 | | 30 | | | | 109.2 | |
| 15 | | 40 | | | | 108.5 | |
| 16 | | 0 | | | | 145.0 | |
| 17 | | 10 | | | 144.9 | | |
| 18 | | 20 | 坡顶 | 150 | 0 | 144.7 | 145 |
| 19 | | 30 | | | | 144.2 | |
| 20 | | 40 | | | | 143.5 | |
| 21 | | 0 | | | | 110.0 | |
| 22 | | 10 | | | 104.8 | | |
| 23 | 10 | 20 | 坡脚 | | | 104.4 | 110 |
| 24 | | 30 | | | | 103.5 | |
| 25 | | 40 | | | | 101.9 | |
| 26 | | 0 | | 115 | 0 | 145.0 | |
| 27 | | 10 | | | 139.8 | | |
| 28 | | 20 | 坡顶 | | | 139.4 | 145 |
| 29 | | 30 | | | | 138.5 | |
| 30 | | 40 | | | | 136.9 | |

注: 断层位置的坐标为断层面与斜坡体一侧面的交线的端点坐标, 坐标系示意图请参考图5。

地震动加速度时程曲线如图 6 所示。

为反映不同几何形态和不同位置的断层对斜坡

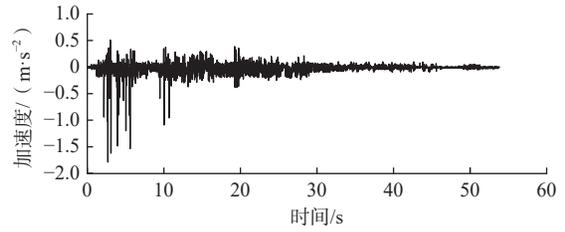


图 6 地震动加速度时程曲线

Fig. 6 Ground motion acceleration time - history curve

地震动力响应的影响, 将断层设置为碎石土, 斜坡设置为均质岩石, 忽略地下水和地应力的影响, 其物理力学参数见表 2。岩土体本构模型采用 Mohr-coulomb 强度准则和拉裂准则, 模拟地震荷载下岩体介质的剪切破坏和拉伸破坏。

表 2 断层与斜坡的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of faults and slopes

| 类型 | 体积模量 /GPa | 剪切模量 /GPa | 弹性模量 /GPa | 内摩擦角 /(°) | 黏聚力 /kPa | 密度 /(kg·m ⁻³) |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|---------------------------|
| 基岩 | 4.16 | 2.86 | 10 | 35 | 17 | 2 500 |
| 断层 | 0.008 33 | 0.384 | 0.3 | 20 | 14 | 2 200 |

在加载地震动荷载前, 先计算天然状态下模型应力-应变状态。在模型侧边施加水平压应力并设置应力梯度, 模拟产生逆断层的应力环境。沿断层倾向为最大主应力, 底部边界的压应力值为 2.468 MPa。沿深度线性变化的应力梯度为 0.022 MPa。设置最小主应力沿重力方向。加载地震荷载时, 模型底部为粘滞边界, 侧边自由边界。

2.3 斜坡动力响应模拟结果

根据表 2 设置的 30 组工况分别进行 3DEC 数值模拟, 获得坡体总位移云图、总速度云图及坡顶、坡腰、坡脚三处监测点的加速度时程曲线。图 7 为工况 4 的数值模拟结果, 斜坡总位移峰值最显著。因篇幅

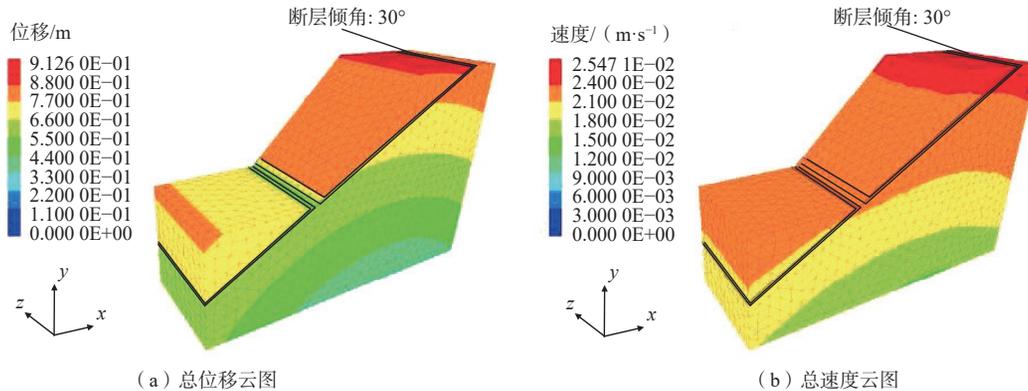


图 7 工况 4 数值模拟结果

Fig. 7 Simulation results under operation condition 4

所限, 此处仅展示出工况 4 的模拟结果图片, 其余组的结果可以在相同模拟环境下得出。

斜坡动力响应主要包括速度、加速度、位移等, 根据模拟结果所得总位移云图、总速度云图以及坡顶、

坡腰、坡脚 3 处监测点加速度时距曲线, 分别提取峰值加速度、总位移峰值研究不同几何形态的断层在处于斜坡不同位置对斜坡动力响应的影响。地震作用下斜坡动力响应模拟结果数据统计汇总于表 3。

表 3 斜坡动力响应模拟结果

Table 3 Statistics of the slope seismic response

| 工况 | 断层破碎带宽度/m | 位置 | 倾角/(°) | 监测点 | | 斜坡总位移 | | 工况 | 断层破碎带宽度/m | 位置 | 倾角/(°) | 监测点 | | 斜坡总位移 | |
|----|-----------|----|--------|-----|----------------------------|-------|----|----|-----------|----|--------|-----|----------------------------|-------|----|
| | | | | 位置 | 峰值加速度/(m·s ⁻²) | 峰值/m | 位置 | | | | | 位置 | 峰值加速度/(m·s ⁻²) | 峰值/m | 位置 |
| 1 | | | 0 | 坡顶 | 3.245 | 0.355 | 下盘 | 16 | | | 0 | 坡顶 | 3.449 | 0.274 | 下盘 |
| | | | | 坡腰 | 2.881 | | | | | | | 坡腰 | 2.991 | | |
| | | | | 坡底 | 3.947 | | | | | | | 坡底 | 2.566 | | |
| 2 | | | 10 | 坡顶 | 3.682 | 0.203 | 下盘 | 17 | | | 10 | 坡顶 | 3.170 | 0.298 | 下盘 |
| | | | | 坡腰 | 2.206 | | | | | | | 坡腰 | 3.352 | | |
| | | | | 坡底 | 4.001 | | | | | | | 坡底 | 2.357 | | |
| 3 | | 坡脚 | 20 | 坡顶 | 3.792 | 0.632 | 上盘 | 18 | 5 | 坡顶 | 20 | 坡顶 | 2.854 | 0.612 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 2.553 | | | | | | | 坡腰 | 2.998 | | |
| | | | | 坡底 | 3.338 | | | | | | | 坡底 | 2.804 | | |
| 4 | | | 30 | 坡顶 | 2.903 | 0.913 | 下盘 | 19 | | | 30 | 坡顶 | 3.334 | 0.862 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 2.611 | | | | | | | 坡腰 | 3.584 | | |
| | | | | 坡底 | 3.464 | | | | | | | 坡底 | 3.574 | | |
| 5 | | | 40 | 坡顶 | 3.497 | 0.695 | 上盘 | 20 | | | 40 | 坡顶 | 2.672 | 0.766 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 3.158 | | | | | | | 坡腰 | 4.793 | | |
| | | | | 坡底 | 4.418 | | | | | | | 坡底 | 5.262 | | |
| 6 | 2 | | 0 | 坡顶 | 2.930 | 0.316 | 下盘 | 21 | | | 0 | 坡顶 | 3.437 | 0.263 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 3.048 | | | | | | | 坡腰 | 1.213 | | |
| | | | | 坡底 | 3.230 | | | | | | | 坡底 | 2.113 | | |
| 7 | | | 10 | 坡顶 | 3.389 | 0.280 | 上盘 | 22 | | | 10 | 坡顶 | 3.876 | 0.475 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 3.372 | | | | | | | 坡腰 | 2.427 | | |
| | | | | 坡底 | 3.025 | | | | | | | 坡底 | 3.136 | | |
| 8 | | 坡顶 | 20 | 坡顶 | 3.499 | 0.670 | 上盘 | 23 | | 坡脚 | 20 | 坡顶 | 3.430 | 0.600 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 2.951 | | | | | | | 坡腰 | 2.004 | | |
| | | | | 坡底 | 4.111 | | | | | | | 坡底 | 2.694 | | |
| 9 | | | 30 | 坡顶 | 3.569 | 0.887 | 上盘 | 24 | | | 30 | 坡顶 | 3.388 | 0.882 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 3.055 | | | | | | | 坡腰 | 2.949 | | |
| | | | | 坡底 | 3.534 | | | | | | | 坡底 | 3.668 | | |
| 10 | | | 40 | 坡顶 | 2.807 | 0.713 | 上盘 | 25 | | | 40 | 坡顶 | 2.766 | 0.793 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 3.029 | | | | | | | 坡腰 | 3.579 | | |
| | | | | 坡底 | 4.152 | | | | | | | 坡底 | 4.421 | | |
| 11 | | | 0 | 坡顶 | 3.411 | 0.348 | 下盘 | 26 | 10 | | 0 | 坡顶 | 3.068 | 0.347 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 1.896 | | | | | | | 坡腰 | 3.811 | | |
| | | | | 坡底 | 2.875 | | | | | | | 坡底 | 1.994 | | |
| 12 | | | 10 | 坡顶 | 3.633 | 0.161 | 上盘 | 27 | | | 10 | 坡顶 | 3.136 | 0.272 | 下盘 |
| | | | | 坡腰 | 1.796 | | | | | | | 坡腰 | 3.749 | | |
| | | | | 坡底 | 3.013 | | | | | | | 坡底 | 2.362 | | |
| 13 | 5 | 坡脚 | 20 | 坡顶 | 3.529 | 0.608 | 上盘 | 28 | | 坡顶 | 20 | 坡顶 | 3.154 | 0.652 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 2.018 | | | | | | | 坡腰 | 5.211 | | |
| | | | | 坡底 | 3.153 | | | | | | | 坡底 | 2.728 | | |
| 14 | | | 30 | 坡顶 | 3.459 | 0.870 | 下盘 | 29 | | | 30 | 坡顶 | 3.168 | 0.870 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 2.296 | | | | | | | 坡腰 | 3.233 | | |
| | | | | 坡底 | 3.413 | | | | | | | 坡底 | 4.015 | | |
| 15 | | | 40 | 坡顶 | 3.227 | 0.771 | 上盘 | 30 | | | 40 | 坡顶 | 2.421 | 0.724 | 上盘 |
| | | | | 坡腰 | 3.247 | | | | | | | 坡腰 | 4.416 | | |
| | | | | 坡底 | 3.892 | | | | | | | 坡底 | 5.627 | | |

3 斜坡动力响应结果分析

3.1 断层倾角对斜坡动力响应的影响

3.1.1 总位移峰值

断层的倾角、位置和破碎带宽度三个因素对于地震作用下断层切割型斜坡的稳定性均有影响。只考虑断层倾角的影响, 从表 2 和表 3 中提取出各个工况的总位移峰值模拟结果, 得到总位移峰值随断层倾角变化的曲线图(图 8)。

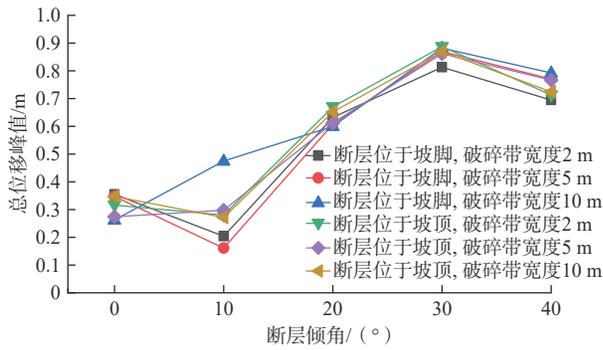


图 8 斜坡总位移峰值随断层倾角变化趋势

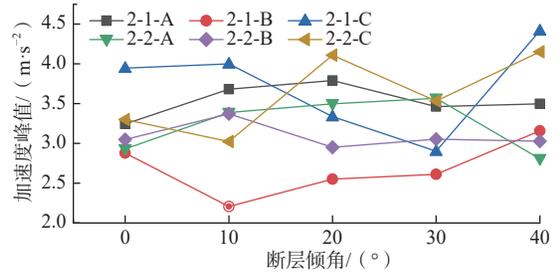
Fig. 8 Trend of the peak displacement of the slope vs the dip angle of fault

由图 8 可知, 当断层倾角为 10° 时, 在多数模拟情况下的斜坡总位移峰值达到最小; 当断层倾角增加至 30° 时, 在多数模拟情况下的斜坡总位移峰值达到最大值(0.8 ~ 0.9 m), 对斜坡稳定性最为不利。当断层位于坡脚, 断层破碎带宽度为 10 m 时, 斜坡总位移峰值随断层倾角增大而增大的趋势更为明显。

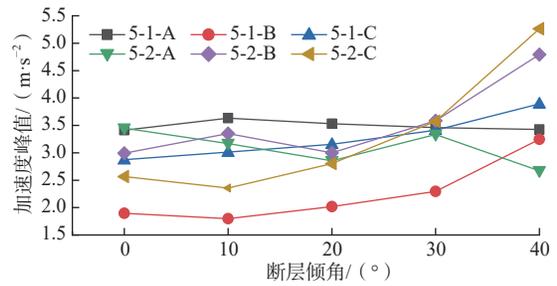
3.1.2 监测点加速度响应

只考虑断层倾角的影响, 从表 2 和表 3 中提取出各个工况的加速度模拟结果, 得到加速度峰值随断层

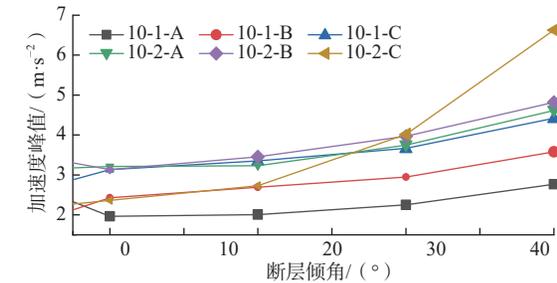
倾角变化的曲线图(图 9), 以反应不同几何形态的断层在不同宽度时和处于直线坡不同位置时对直线型斜坡加速度响应分布规律的影响。为方便制图, 对图例符号进行了简化, 具体含义如表 4。



(a) 断层破碎带宽度为 2 m



(b) 断层破碎带宽度为 5 m



(c) 断层破碎带宽度为 10 m

图 9 加速度峰值随断层倾角的变化曲线

Fig. 9 Trend of the peak acceleration vs the dip angle of fault

表 4 图例符号说明

Table 4 Explanation of the illustration symbols

| 图例符号 | 断层破碎带宽度/m | 断层位置 | 监测点位置 | 图例符号 | 断层破碎带宽度/m | 断层位置 | 监测点位置 | 图例符号 | 断层破碎带宽度/m | 断层位置 | 监测点位置 |
|-------|-----------|------|-------|-------|-----------|------|-------|--------|-----------|------|-------|
| 2-1-A | 2 | 坡脚 | 坡顶 | 5-1-A | 5 | 坡脚 | 坡顶 | 10-1-A | 10 | 坡脚 | 坡顶 |
| 2-1-B | | | 坡腰 | 5-1-B | | | 坡腰 | 10-1-B | | | 坡腰 |
| 2-1-C | | | 坡底 | 5-1-C | | | 坡底 | 10-1-C | | | 坡底 |
| 2-2-A | | 坡顶 | 坡顶 | 5-2-A | | 坡顶 | 坡顶 | 10-2-A | | 坡顶 | 坡顶 |
| 2-2-B | | | 坡腰 | 5-2-B | | | 坡腰 | 10-2-B | | | 坡腰 |
| 2-2-C | | | 坡底 | 5-2-C | | | 坡底 | 10-2-C | | | 坡底 |

不考虑断层破碎带宽度的影响, 坡顶监测点的峰值加速度一般大于坡底与坡腰的值; 从整体趋势来看, 随着断层倾角的增加加速度越来越大, 其变化程度与断层破碎带宽度的大小有关。断层破碎带宽度

大于 5 m 时, 均能明显看出加速度随断层倾角的增大而增大的趋势。

断层破碎带宽度为 2 m 时(图 9a), 放大效应不明显。不考虑断层位置, 随着断层倾角的增加斜坡的加

速度变化趋势不明显, 分别于断层倾角为 20°及 40°时达到峰值。

断层破碎带宽度为 5 m 时(图 9b), 可以观测到较为明显的放大效应。不考虑断层位置, 斜坡加速度随断层倾角的增加而小幅度增加, 当断层倾角到达 10°时, 加速度呈现小范围下降; 断层倾角增加至 30°后, 斜坡加速度随着断层倾角的增加而增加。

断层破碎带宽度为 10 m 时(图 9c), 放大效应较为明显。不考虑断层位置, 斜坡加速度随着断层倾角的增加而小幅度增加, 当断层倾角增加至 10°后, 加速度随着倾角的增加表现出稳定的增加趋势; 直至断层倾角增加至 30°后, 加速度呈现较大的增幅。

3.2 断层位置对斜坡动力响应的影响

3.2.1 总位移峰值

断层位于坡体不同位置时总位移峰值如图 10 所示。当断层位于坡脚时, 随着断层倾角的增大, 斜坡的总位移逐渐增大。断层倾角达到 10°时, 断层破碎带宽度为 2 m 与 10 m 时的总位移都有小幅度的降低, 断层破碎带宽度为 5 m 则为小幅度的上升; 断层倾角增加至 30°时, 斜坡的总位移最大, 斜坡最不稳定, 随着倾角的进一步增大, 总位移反而减小。

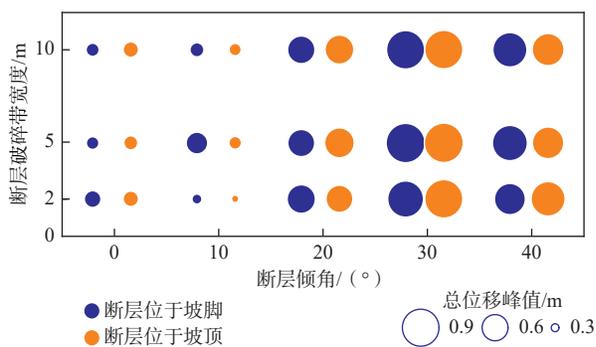


图 10 断层位于坡体不同位置总位移峰值分布气泡图

Fig. 10 Bubble diagram of the peak displacement vs the fault position on slope

当断层位于坡顶时, 随着断层角度增大, 总位移逐渐增大。断层倾角达到 10°时, 总位移小幅度减小; 断层倾角增加至 30°时, 总位移达到峰值, 此时斜坡最不稳定, 随着断层倾角继续增大, 斜坡总位移反而逐渐降低, 开始趋于稳定。

3.2.2 监测点加速度响应

断层位于坡体不同位置时斜坡顶部的监测点加速度峰值变化如图 11 所示。随着断层倾角的增大, 监测点加速度峰值变化在断层位于坡脚时和断层位于坡顶时的趋势基本一致, 都为小幅先增大后减小。

当断层位于坡脚时, 断层倾角大于 10°之后, 随着断层倾角的增大, 斜坡的加速度峰值逐渐减小。当断层位于坡顶时, 断层倾角增加至 30°时达到峰值, 此时斜坡最不稳定, 与位移云图所得结果一致。

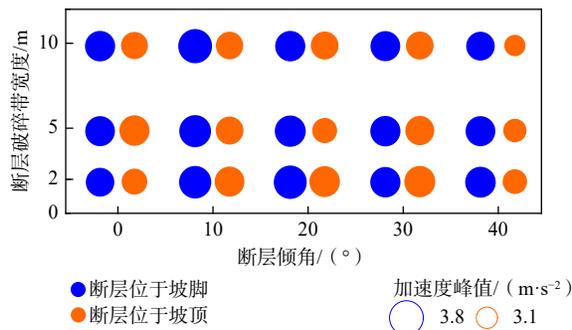


图 11 断层位于坡体不同位置加速度峰值分布气泡图

Fig. 11 Bubble diagram of the peak acceleration vs the fault position on slope

3.3 断层破碎带宽度对斜坡动力响应的影响

3.3.1 总位移峰值

断层不同宽度情况下斜坡总位移峰值如图 12 所示。当断层倾角小于 20°时, 无论断层位于斜坡的何处, 断层破碎带宽度对斜坡位移的影响并不明显, 规律性不强。当断层倾角达到 30°时, 斜坡位移的变化出现规律性, 随着断层破碎带宽度的增大, 斜坡位移也小幅度增大。

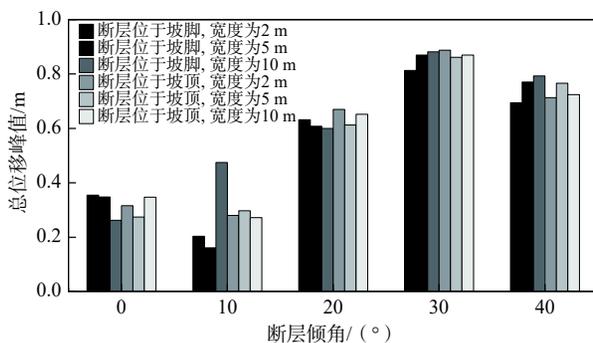


图 12 不同断层破碎带宽度下斜坡总位移峰值

Fig. 12 Peak displacement of the slope under different fault widths

3.3.2 监测点加速度响应

断层不同宽度情况下监测点加速度峰值如图 13 所示。与斜坡总位移峰值随断层破碎带宽度的变化规律类似, 当断层破碎带宽度为 2 m 时, 无论断层位于斜坡的何处, 随着断层倾角的增大, 斜坡加速度的变化都并不明显。

而当断层破碎带宽度达到 5 m 时, 斜坡加速度呈现明显的规律性, 随着断层倾角的增大, 监测点加速

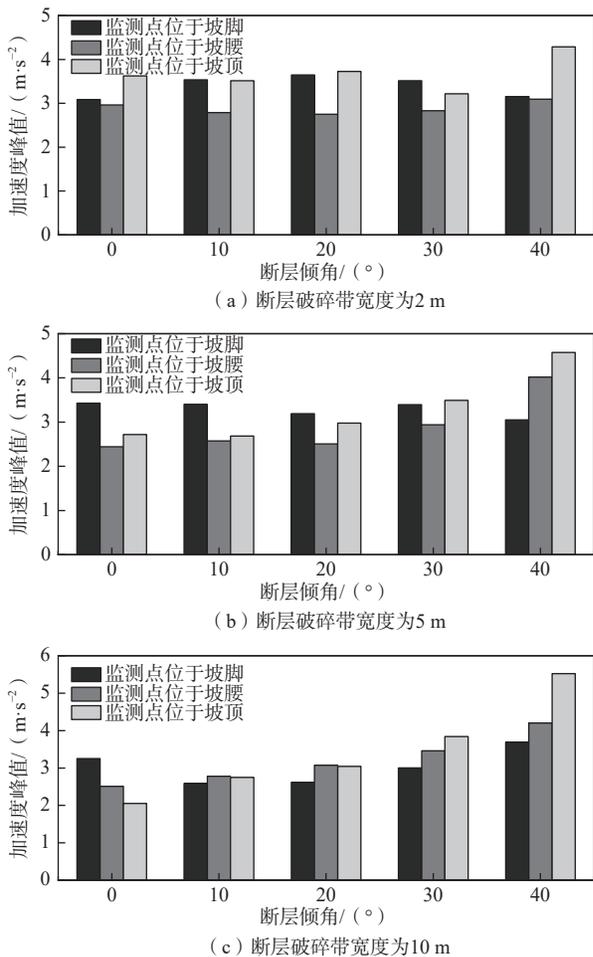


图 13 加速度峰值随断层倾角的变化

Fig. 13 Trend of the peak acceleration vs the dip angle of fault

度峰值小幅增大。当断层破碎带宽度达到 10 m 时, 监测点加速度峰值随着断层倾角的增大。

4 结论

(1) 随着切割斜坡的逆断层倾角增大, 斜坡总位移峰值和各监测点加速度峰值表现出增大的趋势, 斜坡更容易失稳。

(2) 不考虑断层破碎带宽度的影响, 坡顶监测点的峰值加速度一般大于坡底与坡腰的值。随着切割斜坡逆断层破碎带宽度增大, 对斜坡地震动响应的影响更为明显, 各监测点加速度峰值随断层倾角变化的趋势更显著。

(3) 断层的存在会增加斜坡失稳的可能性, 断层位于坡顶时, 斜坡地震动响应随断层倾角和宽度的变化呈现较断层位于坡底时更明显的规律性。

本文分析了逆断层切割且处于受压状态斜坡的地震动响应, 但未涉及正断层切割且处于受拉状态斜坡的情况, 因此得到的规律无法适用于正断层。此

外, 本文只研究了逆断层几何形态对直线型斜坡地震动响应的影响, 未涉及凸型和凹形坡。地形剧烈变化的复杂情况将在今后的工作中进行补充。最后, 断层的本构模型和力学参数对斜坡的地震动响应有显著影响, 希望更多学者在数值模拟和物理模型试验中加以关注。

参考文献 (References) :

- [1] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(6): 1239 - 1249. [HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1239 - 1249. (in Chinese with English abstract)]
- [2] QI Shengwen, XU Qiang, LAN Hengxing, et al. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5. 12 Wenchuan Earthquake, China [J]. *Engineering Geology*, 2010, 116(1/2): 95 - 108.
- [3] 方华, 崔鹏. 汶川地震大型高速远程滑坡力学机理及控制因子分析 [J]. *灾害学*, 2010, 25(增刊 1): 120 - 126. [FANG Hua, CUI Peng. Study on mechanical mechanism and controlling factors of high-speed distant landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(Sup 1): 120 - 126. (in Chinese with English abstract)]
- [4] JIBSON R W, HARP E L, SCHULZ W, et al. Large rock avalanches triggered by the M 7.9 Denali Fault, Alaska, earthquake of 3 November 2002 [J]. *Engineering Geology*, 2006, 83(1/2/3): 144 - 160.
- [5] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析 [J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 19 - 28. [HUANG Runqiu, LI Weile. Fault effect analysis of geohazard triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 19 - 28. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈晓利, 邓俭良, 冉洪流. 汶川地震滑坡崩塌的空间分布特征 [J]. *地震地质*, 2011, 33(1): 191 - 202. [CHEN Xiaoli, DENG Jianliang, RAN Hongliu. Analysis of landslides triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2011, 33(1): 191 - 202. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 蒋瑶, 吴中海, 刘艳辉, 等. 青海玉树活动断裂带的多期古地震滑坡及其年龄 [J]. *地质通报*, 2014, 33(4): 503 - 516. [JIANG Yao, WU Zhonghai, LIU Yanhui, et al. The characteristics of palaeo-earthquake landslides

- along Yushu faulted zone and their ages[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(4): 503 – 516. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 91 – 101. [YANG Zhihua, GUO Changbao, WU Ruian, et al. Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 91 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李光辉, 铁永波, 白永建, 等. 则木河断裂带(普格段)地质灾害发育规律及易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 123 – 133. [LI Guanghui, TIE Yongbo, BAI Yongjian, et al. Distribution and susceptibility assessment of geological hazards in Zemuhe fault zone(Puge section)[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 123 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 毕鸿基, 聂磊, 曾超, 等. 基于三种多变量不安定指数分析模型的汶川县地质灾害易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 123 – 131. [BI Hongji, NIE Lei, ZENG Chao, et al. Geological hazard susceptibility evaluation in Wenchuan area based on three models of multivariate instability index analysis[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 123 – 131. (in Chinese with English abstract)]
- [11] OGLESBY D D. Fault geometry and the dynamics of the 1999 Chi-Chi (taiwan) earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 91(5): 1099 – 1111.
- [12] 王文沛, 李滨, 李洪涛. 断层穿越斜坡场地效应分析: 以绵竹九龙镇山前斜坡为例 [J]. *工程地质学报*, 2015, 23(5): 850 – 855. [WANG Wenpei, LI Bin, LI Hongtao. Site effects of slope passed by fault on PGA, a case study at Mianzhu Jiulong town[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(5): 850 – 855. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 许冲. 环境地球科学之滑坡地震地质学 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 207 – 222. [XU Chong. Landslide seismology geology: A sub-discipline of environmental earth sciences[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 207 – 222. (in Chinese with English abstract)]
- [14] JIBSON R W, HARP E L. Landslides triggered by the Northridge earthquake[J]. *Earthquake & Volcanoes*, 1994, 51-41.
- [15] WANG Wenneng, WU H L, NAKAMURA H, et al. Mass movements caused by recent tectonic activity: the 1999 Chi-Chi earthquake in central Taiwan [J]. *Island Arc*, 2003, 12(4): 325 – 334.
- [16] WANG H B, SASSA K, XU W Y. Analysis of a spatial distribution of landslides triggered by the 2004 Chuetsu earthquakes of Niigata Prefecture, Japan[J]. *Natural Hazards*, 2007, 41(1): 43 – 60.
- [17] 汤明高, 许强, 张伟, 等. 汶川地震触发窝前滑坡特征及失稳机制探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊 2): 3491 – 3502. [TANG Minggao, XU Qiang, ZHANG Wei, et al. Discuss on failure mechanism and geologic characteristic of Woqian landslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Sup 2): 3491 – 3502. (in Chinese with English abstract)]
- [18] YIN Yueping, LI Bin, WANG Wenpei. Dynamic analysis of the stabilized Wangjiayan landslide in the Wenchuan Ms 8.0 earthquake and aftershocks[J]. *Landslides*, 2015, 12(3): 537 – 547.
- [19] 郭沉稳, 姚令侃, 段书苏, 等. 汶川、芦山、尼泊尔地震触发崩塌滑坡分布规律 [J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(1): 71 – 77. [GUO Chenwen, YAO Lingkan, DUAN Shusu, et al. Distribution regularities of landslides induced by Wenchuan earthquake, Lushan earthquake and Nepal earthquake[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(1): 71 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张冬丽, 周正华, 陶夏新. 震源破裂方式和断层性质对近场强地震动特征的影响 [J]. *西北地震学报*, 2009, 31(4): 311 – 318. [ZHANG Dongli, ZHOU Zhenghua, TAO Xiaxin. Influence of seismic source mechanism and fault property on near-field strong ground motion[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2009, 31(4): 311 – 318. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(6): 818 – 826. [XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 818 – 826. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 杨琴, 范宣梅, 许强, 等. 北川唐家湾滑坡变形历史与形成机制研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 136 – 141. [YANG Qin, FAN Xuanmei, XU Qiang, et al. A study of the deformation history and mechanism of the Tangjiawan landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 136 – 141. (in

- Chinese with English abstract)]
- [23] 毕钰璋,付跃升,何思明,等.牛眠沟地震滑坡碎屑化全过程离散元模拟 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(3): 17 - 25. [BI Yuzhang, FU Yuesheng, HE Siming, et al. Simulation of the whole process of Niumiangou creek rock avalanche triggered by the earthquake using a distinct element method[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(3): 17 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 苏生瑞,张永双,李松,等.汶川地震引发高速远程滑坡运动机理数值模拟研究——以谢家店子滑坡为例 [J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(3): 277 - 287. [SU Shengrui, ZHANG Yongshuang, LI Song, et al. Numerical analysis on motion mechanism of highspeed and long runout landslide by Wenchuan earthquake: Taking xiejiadianzi landslide as an example[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(3): 277 - 287. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 孙萍,张永双,殷跃平,等.东河口滑坡-碎屑流高速远程运移机制探讨 [J]. *工程地质学报*, 2009, 17(6): 737 - 744. [SUN Ping, ZHANG Yongshuang, YIN Yueping, et al. Discussion on long Run-out sliding mechanism of donghekou landslide-debris flow[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(6): 737 - 744. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 贺小黑,谭建民,裴来政.断层对地质灾害的影响——以安化地区为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(3): 150 - 155. [HE Xiaohai, TAN Jianmin, PEI Laizheng. Influence of faults on geohazards: Take Anhua County as an example[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(3): 150 - 155. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 汤明高,许强,黄润秋,等.小湾水电工程6#山梁节理岩体高边坡3DEC分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(3): 57 - 60. [TANG Minggao, XU Qiang, HUANG Runqiu, et al. 3DEC analysis on 6# high rock slope with joints in Xiaowan Hydropower Project[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(3): 57 - 60. (in Chinese with English abstract)]
- [28] Itasca Consulting Group Inc. 3DEC—Three-Dimensional Distinct Element Code (Version 5.2) [R]. 2016.
- [29] BOWA V M, XIA Yuanyou, YAN Minjia, et al. Toppling of the jointed rock slope with counter-tilted weak planes influenced by the response to local earthquakes[J]. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2018, 9(4): 302.
- [30] MREYEN A S, DONATI D, ELMO D, et al. Dynamic numerical modelling of co-seismic landslides using the 3D distinct element method: insights from the Balta rockslide (Romania) [J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106774.
- [31] 魏进兵,何治良,杨仲康.考虑地震危险性的倾倒变形边坡风险定量分析 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41(2): 71 - 78. [WEI Jinbing, HE Zhiliang, YANG Zhongkang. Quantitative risk analysis of toppling slope considering seismic risk[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 71 - 78.(in Chinese with English abstract)]

编辑:王支农