

DOI: 10.12401/j.nwg.2022029

# 立节北山滑坡地震稳定性及破坏过程三维有限元分析

丛凯<sup>1</sup>, 马宗源<sup>2,\*</sup>, 李瑞冬<sup>1</sup>

(1. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050; 2. 贵州交通职业技术学院, 贵州 贵阳 551400)

**摘要:** 针对甘肃省舟曲县立节镇北山滑坡在地震情况下的稳定性及失稳后可能威胁的范围问题, 笔者使用显式有限元及动力学大变形方法分析了该滑坡在地震情况下的稳定性及失稳后的破坏过程。首先基于滑坡纵剖面建立二维平面应变模型分析滑坡稳定性及破坏过程, 之后使用航测点云数据建立三维滑坡模型进行计算分析。地震条件下三维计算确定的滑坡安全系数结果低于 1.0, 较二维计算结果低 7.7%; 三维情况计算出的滑动距离达 1.73 km, 高于二维情况 17%, 说明滑坡灾害问题使用二维小变形方法得出结果偏于危险。笔者采用显式有限元、三维及大变形计算方法分析更符合实际, 可为滑坡灾害的工程防治提供科学理论依据。

**关键词:** 地震; 滑坡; 破坏过程; 大变形; 显式有限元法

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0283-09

## Three-dimensional Analysis of Seismic Stability and Failure Process of Lijie Landslide in Gansu Province, China

CONG Kai<sup>1</sup>, MA Zongyuan<sup>2,\*</sup>, LI Ruidong<sup>1</sup>

(1. Gansu Geology Environment Monitoring Institute, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Guizhou Communications Polytechnic, Guiyang 551400, Guizhou, China)

**Abstract:** The seismic stability and failure process of Lijie landslide is analyzed using the explicit finite element method with dynamic and large deformation modes. Firstly, the Lijie landslide seismic stability is analyzed with two-dimensional plane strain assumption. Then, a three-dimensional mountain model is established via the point cloud data, and three-dimensional landslide failure process analysis is processed to determine the maximum sliding distance and failure range of the landslide. The results obtained by the explicit finite element, three-dimensional and large deformation method in this paper is more accurate than that of the two-dimensional and small deformation method. This study will propose the theoretical guidance for earthquake resistance and the prevention of earthquake-induced landslide disaster.

**Keywords:** earthquake; landslide; progressive failure process; large deformation; explicit finite element method

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-07-20; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“超高沥青混凝土心墙堆石坝设计理论与关键技术问题研究”(51979225), “黄土丘陵植被与淤地坝调控中立侵蚀的协同作用机制”(42177346)与“不同草带空间分布对坡面细沟侵蚀调控机制”(52009103)联合资助。

作者简介: 丛凯(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查及防治方面的工作。E-mail: 254690133@qq.com。

\* 通讯作者: 马宗源(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学方面的研究工作。E-mail: mzy\_gogo@sohu.com。

由地震引发的山体滑坡是地震次生灾害的主要类型之一,且对地震后期的灾后重建工作造成巨大影响。通过总结分析 2008 年汶川地震中形成的滑坡特征及分布情况,发现地震诱发滑坡的破坏力及危害性极大,有些甚至超过了地震本身所造成的损失(殷跃平等, 2008)。甘肃地区先后经历了汶川地震(2008 年)及岷县地震(2013 年)(表 1),均引发了大量滑坡及崩塌等次生地质灾害(王兰民等, 2013, 2019)。地震除了直接造成滑坡灾害之外,也严重削弱了山区坡体覆盖层的稳定性,地震之后再形成大量潜在的滑坡隐患。如,2013 年甘肃岷县地震(M=6.6 级)诱发多处大型黄土滑坡,且地震诱发的滑坡、崩塌、震陷等次生地质灾害具有成片及密集分布的特点(王兰民等, 2013)。

表 1 甘肃地区典型地震及诱发滑坡统计表  
Tab. 1 Typical earthquakes and landslides in Gansu

时间	震中	震级(M)	烈度	滑坡灾害特点
1654	甘肃天水	8	XI	密集滑坡群
1718	甘肃通渭	7½	X	密集滑坡群, 遇难人数占总数的 2/3
1927	甘肃古浪	8	XI	密集滑坡群
2013	甘肃岷县	6.6	VIII	成片及密集分布

目前,边坡及滑坡的地震稳定性问题主要采用拟静力法进行计算分析。该方法通过施加一定水平分量的体力,并使用极限平衡方法或有限元强度折减法确定边坡及滑坡的地震安全系数(Shukha et al., 2006; Travararou et al., 2009)。该方法计算思路简单易行,但却忽略了地震产生的惯性力影响以及边坡的动力反应过程,无法反映地震过程中边坡的动力响应及边坡失稳后的破坏过程。Newmark(1965)基于刚塑性滑移块假定提出了地震条件下边坡永久位移的计算公式并广泛应用于边坡及滑坡地震稳定性问题的计算分析。该方法能够合理考虑地震效应的影响,但仍然基于小变形及极限平衡假定进行计算,无法考虑土体的动力特性及分析地震过程中边坡的失稳破坏过程。笔者基于显式有限元及动力学大变形方法(Ma et al., 2020, 2021)对甘肃省舟曲县立节镇北山滑坡在地震情况下的稳定性及失稳破坏过程进行计算分析。

## 1 研究区域概况

立节北山滑坡位处舟曲县立节镇白龙江左岸山

体,山体受白龙江侵蚀切割作用形成“V”字型河谷。该滑坡的地层结构自上而下主要为:第四系上更新统马兰黄土,中—上更新统滑坡堆积碎石土及残坡积碎石土,志留纪千枚岩、板岩及中泥盆统灰岩。滑坡体位于坡体中上部,滑坡距离沟谷底部落差大,直接威胁沟底立节镇主城区。1979~2018 年,该滑坡多次出现复活滑动并引发泥石流灾害。1979 年,滑坡滑动导致滑坡体上部 100 多户居民房屋损毁。2020 年 8 月,北山再次发生滑坡并造成通村道路局部塌陷,滑坡体在暴雨作用下转化为泥石流,流入沟谷底部并堵塞白龙江半幅。2021 年 1 月 14 日,甘南州舟曲县立节镇北山滑坡再次出现复活迹象,坡体多处出现裂缝和错落(图 1)。

舟曲县地处青藏高原东缘、西秦岭西翼与岷山山脉交汇地区,该地属于舟曲-武都地震亚带,属于地震活跃地区,抗震设防烈度为 8 度,地震动峰值加速度为 0.2 g,特征周期为 0.45 s(中华人民共和国国家治理监督检验检疫总局, 2016)。1884 年该地发生地震引发大型滑坡及崩塌数十处,造成 430 人死亡。2008 年,汶川地震导致舟曲山区大面积岩土体松动,导致滑坡频率明显增大。因此,有必要对立节北山滑坡的地震稳定性及失稳破坏范围进行分析预测,并对滑坡灾害防治提供依据。

## 2 研究方法

Hardin-Drnevich 模型可以预测土体在循环荷载作用下动应力应变关系(滞回圈形状)及其骨干加载曲线(Hardin et al., 1972; 谢定义, 2011)。根据 Hardin 等(1972)的建议,采用公式(1)和(2)计算土体在动力循环荷载作用下动剪切模量及阻尼比与动剪应变的关系。

$$G/G_{\max} = 1/(1 + \gamma/\gamma_{\text{ref}}) \quad (1)$$

$$D/D_{\max} = (\gamma/\gamma_{\text{ref}})/(1 + \gamma/\gamma_{\text{ref}}) \quad (2)$$

式中:  $G$  和  $G_{\max}$  为土体的动剪切模量及最大剪切模量;  $D$  和  $D_{\max}$  为土体阻尼比及其最大值;  $\gamma$  为土体的动剪应变的绝对值;  $\gamma_{\text{ref}}$  为土体的剪应变参考值( $\gamma_{\text{ref}} = \tau_{\max}/G_{\max}$ ); 通常将  $\gamma$  取为广义剪应变形式。

根据黏弹性理论,采用公式(3)构建阻尼和弹簧并联型的黏弹性本构模型。

$$\begin{cases} \sigma_{ii} = K\varepsilon_v + 2G\varepsilon_{ii} + \eta_K \dot{\varepsilon}_v + 2\eta_G \dot{\varepsilon}_{ii} \\ \sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + 2\eta_G \dot{\varepsilon}_{ij} \end{cases}, (i, j = 1 \cdots 3, i \neq j) \quad (3)$$

式中:  $K$  和  $G$  分别是土体的体积模量和剪切模量,



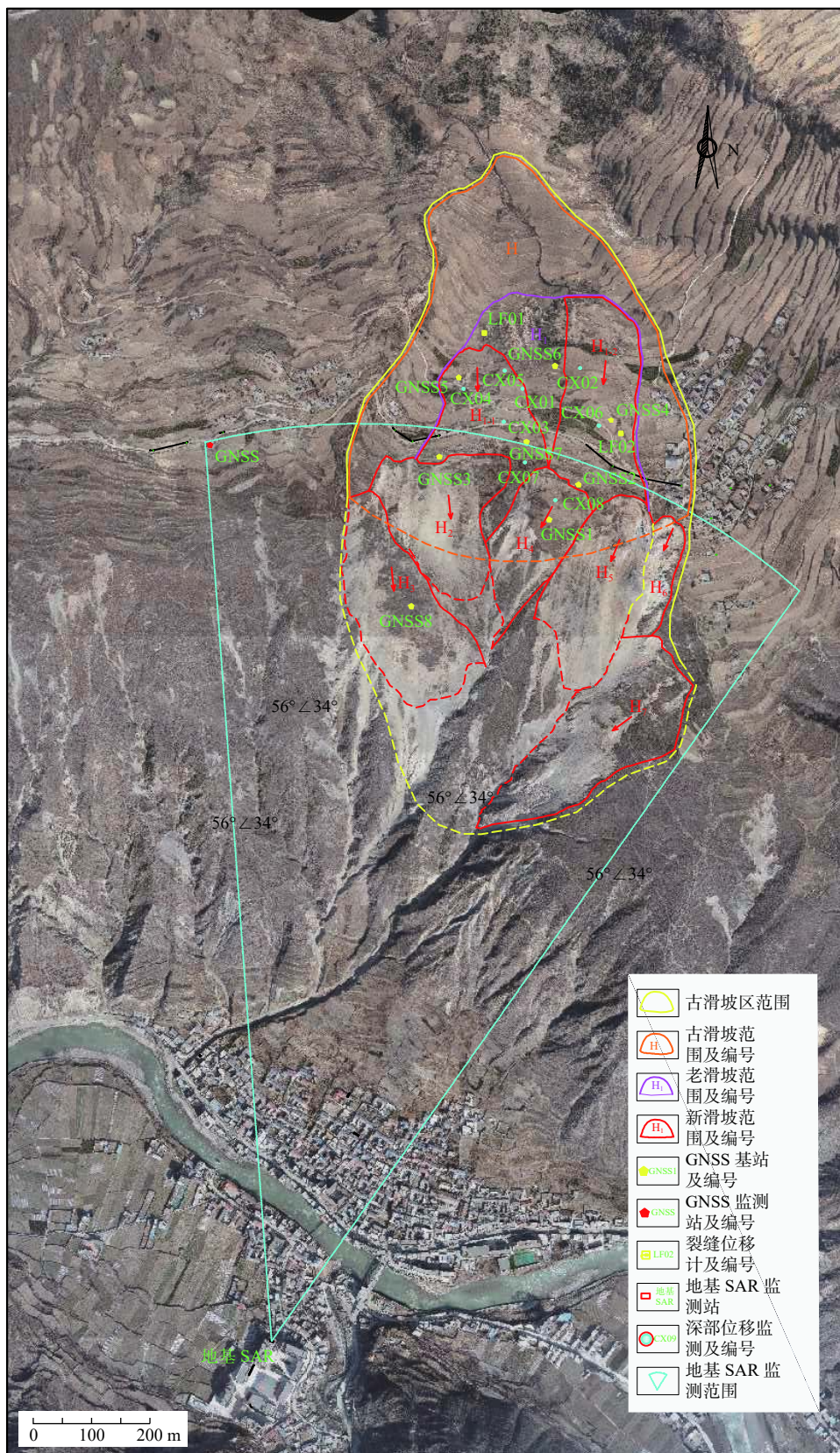
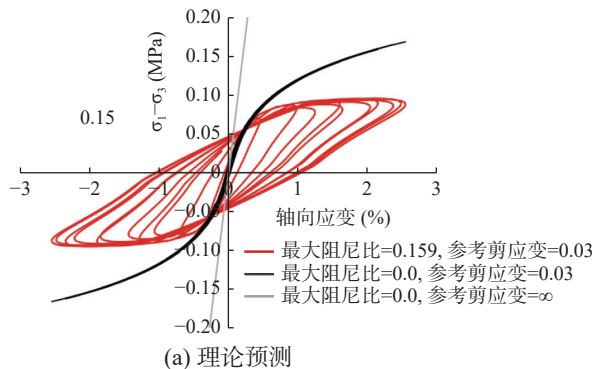


图 1 立节滑坡遥感影像及滑坡体分布图  
Fig. 1 Remote sensing image of Lijie landslide

$\eta_G=GD/\pi f$ ,  $\eta_K=KD/\pi f$ ,  $\eta_G$  和  $\eta_K$  分别为剪切和体积变形时的动力黏滞系数,  $f$  为结构的自振频率。

使用 Visual Fortran 语言编制黄土动本构关系计算程序, 并使用 VUMAT 子程序接口将模型导入 ABAQUS 有限元计算软件。采用一个四节点减缩积分单元计算单元的剪应力及剪应变关系, 并与黄土及北山滑坡体碎石土的动三轴试验测试数据进行对比。对该单元的顶部约束水平自由度, 单元底部水平方向



上加载正弦加速度时程曲线(峰值加速度为 0.04g)。黄土取自陕西彬县, 最大剪切刚度  $G_{\max}=29.2$  MPa, 最大阻尼比  $D_{\max}=0.159$ , 参考剪应变  $\gamma_{\text{ref}}=0.03$ (王振华等, 2013)。通过计算得到了黄土动应力应变关系的预测结果并与动三轴试验数据进行了对比(图 2), 根据 Hardin-Drnevich 骨干加载曲线建立的黄土动力本构模型能够很好模拟土体经受往复荷载情况下(循环加卸载过程)的滞回圈形状应力应变关系。

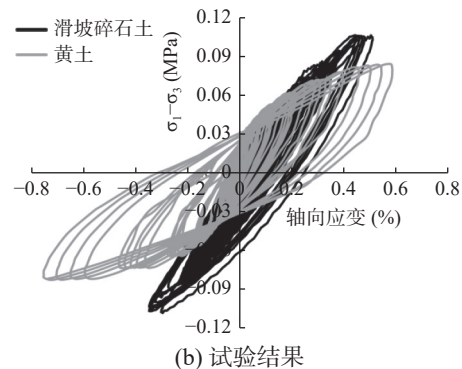


图 2 黄土动应力应变关系理论预测与试验数据的对比图

Fig. 2 Comparison of theoretical prediction and experimental data on loess

通过不断折减抗剪强度参数的数值让边坡达到临界破坏状态, 以此确定安全系数(FOS), 采用公式(4)进行强度折减(Griffiths et al., 1999)。

$$c_f = \frac{c}{\text{SRF}}, \quad \varphi_f = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{\text{SRF}}\right) \quad (4)$$

式中:  $c$  和  $\varphi$  为土的黏聚力及内摩擦角,  $c_f$  和  $\varphi_f$  为折减之后的土的黏聚力及内摩擦角。

边坡位移突然增大(折减系数与边坡最大位移关系曲线拐点)时刻的折减系数确定为边坡安全系数。以无下卧地层的边坡算例作为对比验证(Griffiths, 1999)。算例边坡坡高 10 m, 坡比为 1:2, 分别使用显式及隐式有限元方法计算边坡的安全系数, 其中显式有限元方法采用大变形, 隐式有限元方法采用小变形模式进行计算。边坡土体计算参数为: 弹性模量  $E=100.0$  MPa, 泊松比  $\nu=0.25$ , 重度  $\gamma=20$  kN/m<sup>3</sup>, 粘聚力  $c=10$  kPa, 内摩擦角  $\varphi=20^\circ$ , 不考虑剪胀角的影响, 重力加速度  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>。

使用显式有限元方法及使用隐式有限元的计算出的边坡最大位移与强度折减系数的关系对比(图 3), 计算得出的网格变形图(图 4)。对比发现, 使用显式有限元及强度折减方法同样可以确定边坡安全系数, 但由于显式有限元方法采用大变形模式, 因此边坡位移比隐式方法要大。相比隐式方法, 显式有限元方法采用显式时间积分方案求解动力学方程, 材料及几何

非线性问题不需要进行迭代, 更适用于动力学及大变形问题的计算分析。

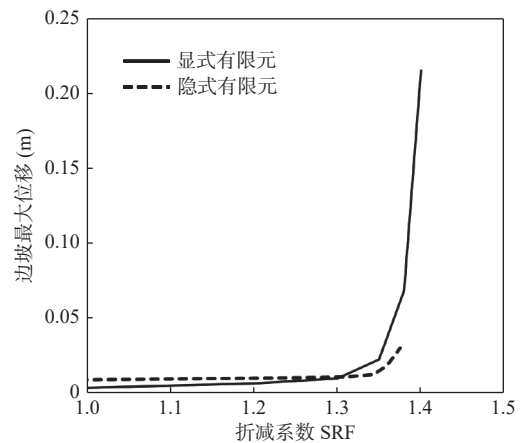


图 3 边坡最大位移与强度折减系数的关系图

Fig. 3 Relationship between maximum displacement of slope and strength reduction coefficient

## 3 结果与分析

### 3.1 计算模型及边界条件

采用 ABAQUS 有限元软件的显式动力分析模块及大变形模式对滑坡地震稳定性问题进行计算。在采用强度折减法折减滑坡土体强度参数的同时, 利用公式(5)对边坡土体的动力学参数进行折减。



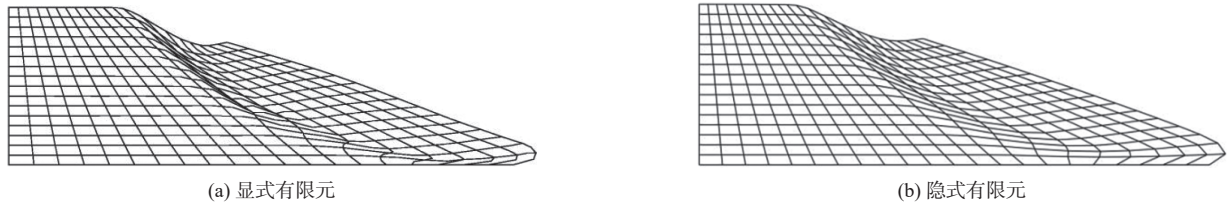


图 4 显式有限元及隐式有限元方法计算得出的边坡网格变形图

Fig. 4 Grid deformation of slope calculated by explicit and implicit finite element method

$$G_{maxf} = \frac{G_{max}}{SRF}, \gamma_{ref} = \frac{\gamma_{ref}}{SRF} \quad (5)$$

地震动输入选取天然地震加速度时程, 分别采用美国 Northridge 以及土耳其 Kocaeli 地震获取的地震动具体信息(表 2)和地震加速度时程(图 5)。其中, 将边坡模型底面设置为加速度边界, 水平分量采用 Kocaeli 地震加速度时程, 竖向分量采用 Northridge 地震加速度时程, 其竖向分量为水平向分量的 2/3(刘畅等, 2020)。5% 阻尼情况下, 对比 5 种地震加速度时程的反应谱曲线(图 6)和地震时程详细信息(表 3), 美国的 Northridge 地震波峰值反应加速度最大, 土耳其 Kocaeli 地震波特征周期  $T_g$  最大。

表 2 计算参数取值表

Tab. 2 The parameter value list

$G_{max}$ (MPa)	Poisson's ratio $\nu$	$\gamma_{ref}$	$a$	$D_{max}$	$c$ (kPa)	$\varphi$ (°)
40.0	0.25	0.10	0.5	0.200	30	20.0

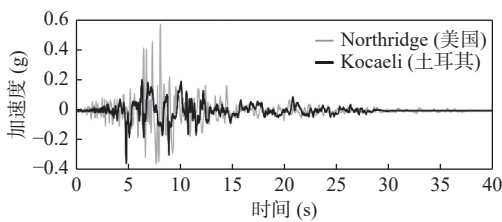


图 5 计算输入的地震加速度时程图

Fig. 5 Time histories of seismic acceleration for calculation

### 3.2 二维计算分析

根据滑坡体中心剖面(图 7)的地形及地层信息建立滑坡的二维模型, 并采用四边形 C3D8R 及三角形 C3D6 单元对模型进行网格划分(图 8), 按平面应变问题分析滑坡在地震条件下的稳定性及其破坏过程。滑坡地层结构较边坡复杂, 且滑坡的高度普遍较边坡大, 因此土体的刚度和强度需考虑初始应力的影响, 采用公式(6)计算土体的最大剪切刚度。

$$G_{max} = \kappa p_a (\sigma_m / p_a)^n \quad (6)$$

式中:  $\kappa$  为初始刚度系数;  $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ ;  $p_a$  为标准大气压;  $n$  为幂次系数。

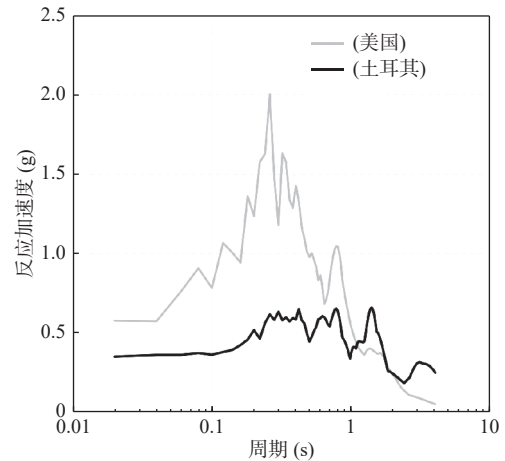


图 6 地震时程的反应谱曲线图

Fig. 6 Earthquake response acceleration spectra

表 3 输入地震波特征信息表

Tab. 3 Characteristics of the input earthquake motions

地震加速度时程	Northridge(美国)	Kocaeli(土耳其)
记录站点	CDMG(24 278)	Yarimca(KOERI330)
发生时间	1994年1月17日	1999年8月17日
地震动显著持时(秒)	9.06	15.62
峰值加速度(g)	0.568 30	0.349

采用公式(7)计算强风化的残坡积层土体强度参数  $c$ 。

$$c = c_0 (\sigma_m / p_a)^n \quad (7)$$

式中:  $c_0$  为地表土体的黏聚力, 随着深度增加土体强度逐渐增大直至达到基岩的强度。

地震荷载分别选取土耳其 Kocaeli 和美国 Northridge 地震加速度时程作为为横向及竖向输入分量, 模型两侧为无反射边界条件, 并假定基岩在地震过程中不会出现塑性变形(完全弹性体)。基岩上部风化残积层强度参数: 初始黏聚力  $c_0=40$  kPa, 内摩擦角  $\varphi=30^\circ$ , 土动力学参数: 初始刚度系数  $\kappa=800$ ,  $n=0.3$ , 最大阻尼比  $D_{max}=0.2$ , 参考剪应变  $\gamma_{ref}=0.167$ , 此外假定滑动面的摩擦系数  $\mu=0.3$ 。在强度折减计算过程中, 折减系数 SRF 取值等于 1.05 滑坡出现失稳滑动, 根据强度折减法判

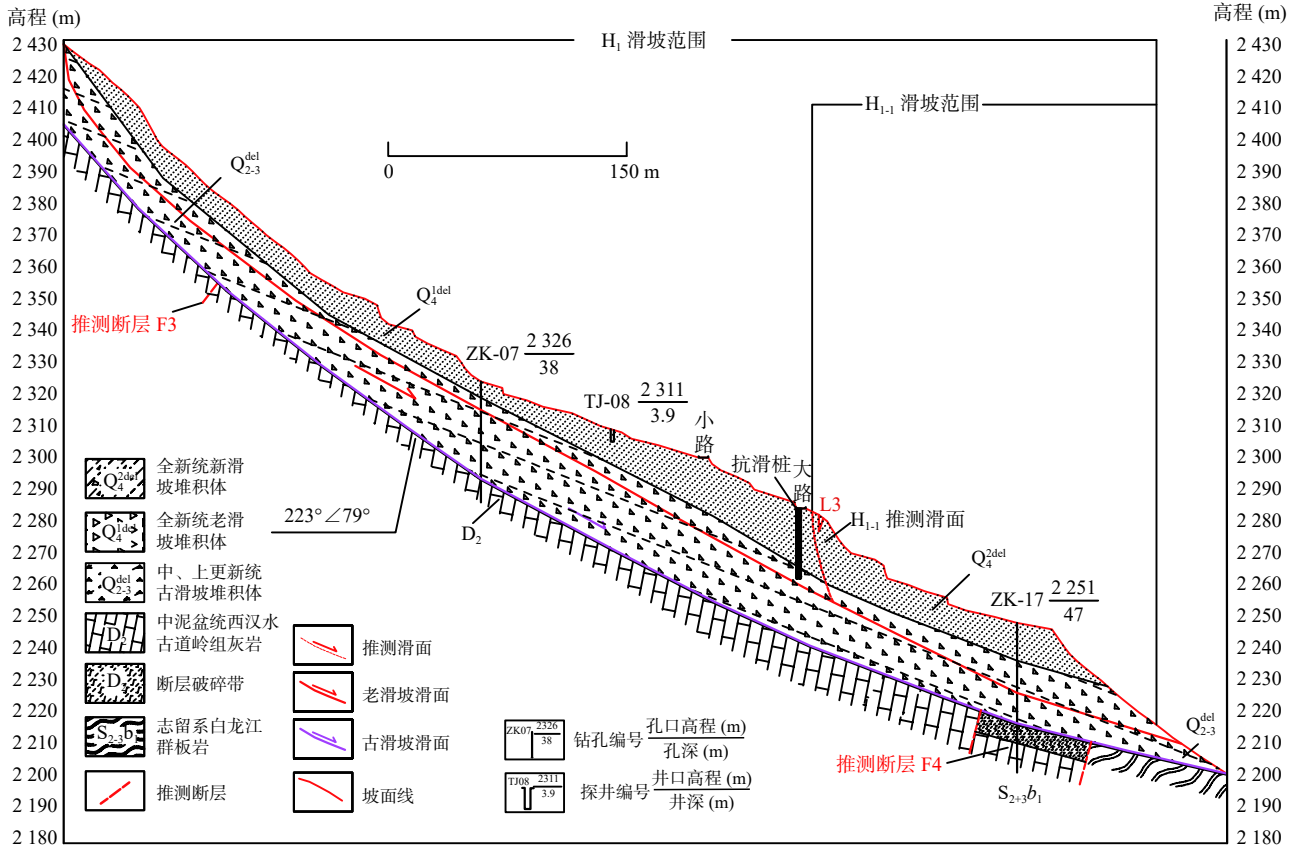


图7 滑坡体中心剖面图

Fig. 7 Cross section of landslide mass

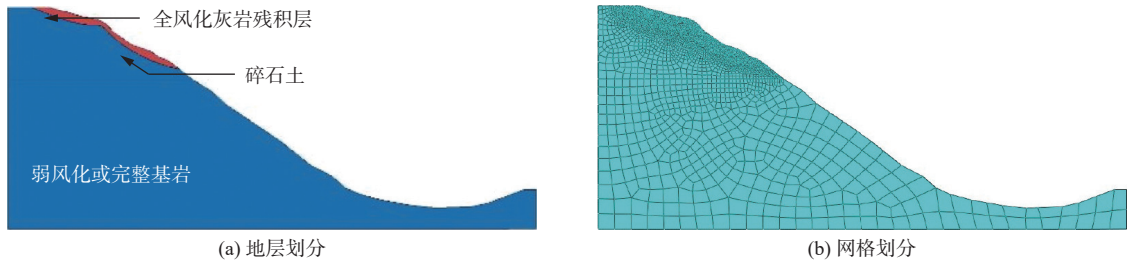


图8 滑坡计算材料分区及单元网格划分图

Fig. 8 Slide calculation material partition and unit grid division diagram

据可判定滑坡的地震安全系数为 1.05。地震过程中滑坡的广义剪应变及位移云图(图 9)显示,滑坡从形成滑动面到滑动是一个完整的破坏过程;并且该滑坡属于牵引式滑动破坏,即前缘首先滑动破坏卸荷之后带动后缘产生滑动;滑坡体并未完全滑动到坡脚沟谷底部,而是一半停留在上部上坡,只有一部分滑入谷底,且水平方向最大滑动距离为 1.46 km。滑坡体监测点的水平位移及速度分量随时间变化曲线(图 10)显示,滑坡体在滑动初期滑动速度增加较为缓慢,中期逐渐加速,到达沟谷底部后动能逐渐耗散速度降低最后产生堆积停滞。

### 3.3 三维计算分析

根据现场航测点云数据生成山体三维地形模型(图 11),选取笛卡尔坐标系的 XY 平面为水平面,重力加速度方向选取 Z 轴负方向,采用减缩积分单元(C3D8R 及 C3D4R)对模型进行网格划分。在滑坡模型底部分别输入地震动水平(X 和 Y 方向)及竖直(Z 方向)分量,其中两个水平分量输入美国 Northridge 地震加速度时程,竖直分量输入土耳其 Kocaeli 地震加速度时程。通过强度折减计算出滑坡达到失稳滑动前(临界状态)及滑坡失稳滑动后(渐进破坏)的结果(图 12、图 13)。计算结果以广义剪应变和位移云图

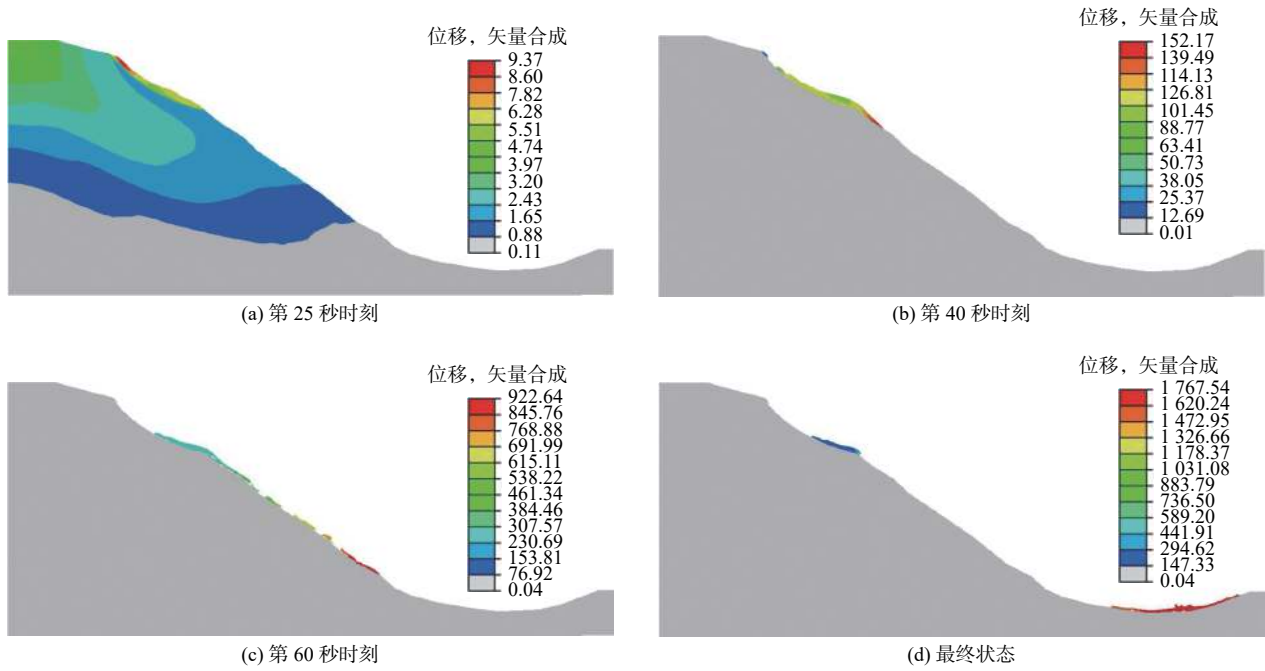


图 9 地震过程中滑坡体的位移云图 (m)

Fig. 9 Displacement contour of landslide during earthquake (m)

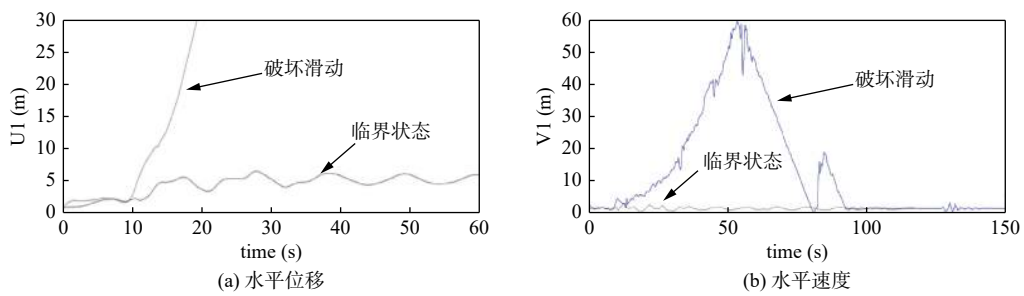


图 10 滑坡体监测点水平分量随时间变化曲线图

Fig. 10 Displacement variation of monitoring point during earthquake

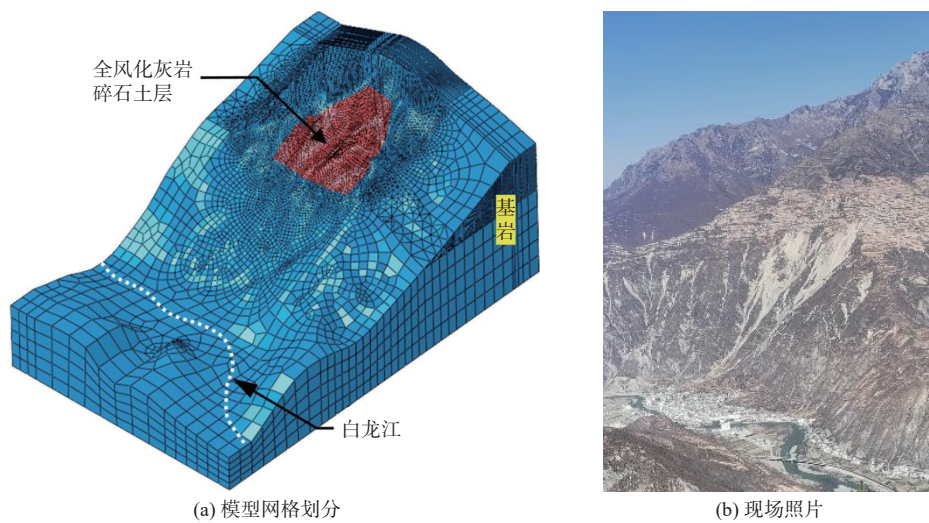


图 11 滑坡计算材料分区及单元网格划分图

Fig. 11 Calculation materials and elements of landslide

的形式展示,其中广义剪应变云图更够更好显示滑坡的滑动面,位移云图则能确定滑坡体的滑动距离。通过强度折减法确定立节北山滑坡在地震条件下的安全系数为  $F_s=0.96$ 。滑坡在地震中后期开始启动,滑坡体在下滑过程中出现解体,有少部分停留在坡体中上

部,大部分滑入沟谷底部并越过白龙江抵达对岸,所以地震情况下北山滑坡极易失稳且大部分滑坡体会滑入沟谷底部堵塞白龙江,并掩埋立节镇大部分城区(图13)。滑坡水平方向最大滑动距离为1.73 km。地震情况下滑坡计算结果显示(表4),三维模型计算

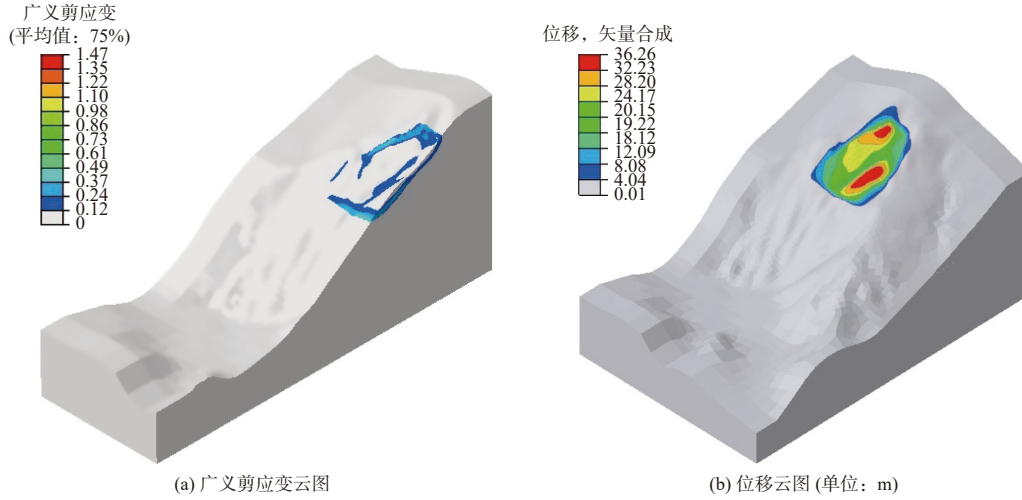


图 12 滑坡达到滑动临界状态时的计算结果图

Fig. 12 Calculation results of landslide during earthquake in critical state

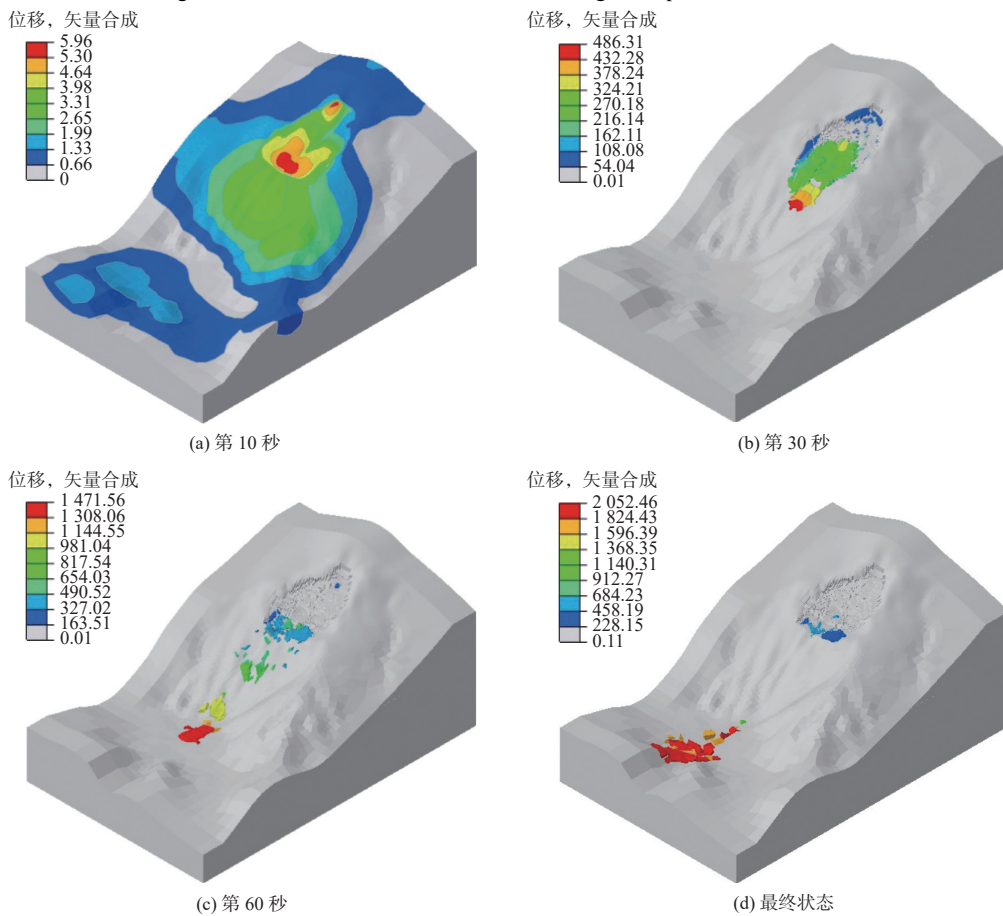


图 13 地震过程中滑坡位移云图(m)

Fig. 13 Displacement counter of landslide during earthquake (m)



结果确定的安全系数数值更低,且滑坡的滑动距离更远。

表4 滑坡滑动距离计算结果列表  
Tab. 4 Calculation result of slide distance

模型	滑坡状态	安全系数	变形/滑动距离(m)
二维	临界滑动状态	---	5.36
	失稳滑动	1.05	1 767.54
三维	临界滑动状态	---	38.26
	失稳滑动	0.96	2 052.46

## 4 结论

(1)地震情况下立节北山滑坡的失稳破坏是一个从坡体变形到出现局部滑动直至整体滑动的发展过程,并非是达到极限状态后突然发生的。

(2)取滑坡中心剖面按二维平面应变假定的滑坡地震条件下的安全系数大于1.0,说明地震情况下滑坡是安全的;但是按照三维情况计算确定的滑坡地震条件下的安全系数为0.96,即地震情况下滑坡失稳。此外,三维情况计算出的滑动距离为1.73 km,超出二维情况计算结果17%。因此二维分析结果偏于危险,须使用三维、动力学及大变形计算方法预测滑坡破坏范围。

(3)笔者采用显式有限元、三维及大变形计算方法对地震条件下甘肃立节北山大型滑坡体的稳定性及破坏过程问题进行了计算分析。相比传统隐式有限元方法,本次所用方法可模拟滑坡的渐进破坏过程及确定滑坡失稳后滑体的滑动距离及破坏范围。本研究分析方法地震条件下边坡及滑坡问题优势显著,可为地震诱发滑坡灾害的工程防治提供理论指导。

## 参考文献(References):

刘畅,张平松,杨为民,等. 税湾地震黄土滑坡的岩土动力特性及其稳定性评价[J]. *西北地质*, 2020, 53(04): 176-185.  
LIU Chang, ZHANG Pingsong, YANG Weimin, et al. Geotechnical dynamic characteristics and stability evaluation of Shuiwan earthquake loess landslide[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(04): 176-185.

谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.  
XIE Dingyi. Soil dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.  
王兰民, 蒲小武, 陈金昌. 黄土高原地震诱发滑坡分布特征与灾害风险[J]. *城市与减灾*, 2019, 3: 33-40.  
WANG Lanmin, PU Xiaowu, CHEN Jinchang. Distribution feature and disaster risk of earthquake-induced landslides in Loess Plateau[J]. *Cities and Disaster Reduction*, 2019, 3: 33-40.  
王兰民, 吴志坚. 岷县漳县6.6级地震震害特征及其启示[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 401-412.  
WANG Lanmin, WU Zhijian. Earthquake damage characteristics of the Minxian-Zhangxian Ms6.6 earthquake and its lessons[J]. *Chinese Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 401-412.  
王振华, 马宗源, 党发宁. 等效线性和非线性方法土层地震反应分析对比[J]. *西安理工大学学报*, 2013, 29(04): 421-427.  
殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. *工程地质学报*, 2008, 1(04): 433-444.  
YIN Yueping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 1(04): 433-444.  
中华人民共和国国家治理监督检查总局, 中国国家标准化管理委员会. 《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.  
Hardin B O, Drnevich V P. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, 1972, 98(7): 667-692.  
MA Zongyuan, LIAO Hongjian, DANG Faning, et al. Seismic slope stability and failure process analysis using explicit finite element method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80: 1287-1301.  
MA Zongyuan, DANG Faning, LIAO Hongjian, et al. Seismic stability and failure process analysis of earth-filled dam[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(827): 1-12.  
Newmark N M. Effect of earthquake on dam and embankment[J]. *Geotechnique*, 1965, 15(2): 139-160.  
Shukha R, Operstein V, Frydman S. Stability charts for pseudo-static slope stability analysis[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(9): 813-823.  
Travasrou T, Bray J D. Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(9): 1336-1340.