

文章编号:1007-6069(2023)02-0011-09

DOI:10.19994/j.cnki.WEE.2023.0025

地震动强度参数相关性对地震滑坡危险性影响分析

刘同同¹, 杨玉萍¹, 李朝阳², 程印¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:本文基于全概率地震滑坡危险性分析方法,利用蒙特卡罗模拟研究在不同临界屈服加速度 a_c 、永久位移模型、场地类别和断层距情况下,地震动强度参数相关性对地震滑坡危险性结果的影响规律。主要结果表明:在进行滑坡危险性分析时,不考虑多地震动强度参数相关性会造成预测位移值偏小,滑坡风险被低估。因此,考虑地震动强度参数相关性对滑坡危险性评价很有必要,这能使预测结果反映地震动参数样本作为输入时的实际相关性特征,为合理进行滑坡防护提供理论依据和参考。

关键词:地震滑坡危险性;地震动强度参数;相关性;蒙特卡罗模拟

中图分类号:P315

文献标识码:A

Analysis of the influence of the correlation of ground motion parameters on earthquake-induced landslide hazard

LIU Tongtong¹, YANG Yuping¹, LI Zhaoyang², CHENG Yin¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Sichuan Highway Planning Survey Design and Research Institute LTD, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the full probability seismic landslide hazard analysis method utilizing Monte-Carlo simulation, this study discusses the impacts of the correlation among ground motion intensity parameters on the earthquake-induced landslide hazard assessment under different critical yield accelerations (a_c), permanent displacement models, site types, and fault distances. The main conclusions show that; in the earthquake-induced landslide hazard analysis, ignoring the correlation of multiple ground motion intensity parameters will cause the predicted displacement value to be unconservative and the landslide hazard to be underestimated. Accordingly, it is vital to consider the correlation of ground motion intensity parameters for earthquake-induced landslide hazard assessment, which makes the prediction results reflect the actual correlation characteristics of ground motion parameter samples as input, and provides a theoretical basis and reference for reasonable landslide protection.

Key words: seismic landslide hazard; ground motion intensity measures; correlation; Monte-Carlo simulation

0 引言

几十年以来,多起滑坡事件证明地震引起的滑坡是最具影响的地震灾害之一。例如,在2008年汶川地震期间,15000起地震引发的滑坡、落石和泥石流事件使死亡人数增加了2000人^[1]。在众多的滑坡评估方法中,通常使用Newmark位移预测模型来预测可能发生的滑坡位移。Newmark位移预测模型是

收稿日期:2022-08-16; 修回日期:2023-01-04

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51708460);四川省科技厅重点研发项目(2021YFS0320);四川省交通运输科技项目(2021-WX-06)

作者简介:刘同同(1996—),男,硕士研究生,主要从事地震滑坡危险性研究.E-mail:liutongtong@my.swjtu.edu.cn

通讯作者:程印(1983—),男,博士,副教授,主要从事地震危险性分析及风险评估研究.E-mail:yin.cheng@swjtu.edu.cn

NEWMARK^[2]于1965年首次提出的基于均值地震动强度参数(IMS)的预测模型,随着GIS技术的不断创新和发展,该方法被国内外学者大量的应用于地震滑坡危险性评估研究中^[3-8]。IMS的相关性在空间分布的基础设施系统的地震灾害分析中很重要^[9]。例如,评估建筑组合的风险通常需要多个周期的谱加速度(SA)场^[10],还需要考虑IMS的相关性。研究证实:IMS的相关性对地震损失估计的影响可能是显著的,特别是对总体损失估计的不确定性程度而言^[9, 11]。对于地震滑坡而言,考虑IMS的相关性也是非常有必要的。然而,在地震滑坡危险性评估中,多采用IMS的均值预测滑坡永久位移,其不确定性中的相关性往往被忽略,将会导致出现不真实的地震动特征,最终可能造成预测结果与实际结果相差甚远。

近年来,各种预测滑坡位移经验模型已建议将IMS和Newmark累积位移模型联系起来^[12-15]。其中:峰值地面速度(PGA)、峰值地面加速度(PGA)和阿里亚斯强度(I_a)等常用IMS的均值作为模型输入,用于评估区域分布的地震边坡稳定性^[16-17]。SAYGILI等^[13]利用传统非线性拟合方法,将IMS作为输入参数预测滑坡永久位移;WANG等^[15]利用在非参数方式处理综合数据集方面通常具有优越能力的机器学习方法(XG-Boost),提出一种基于多地震动参数的机器学习框架预测滑坡永久位移。然而,现有的Newmark永久位移模型将IMS均值作为输入,并不能很好地准确预测位移以及评估地震滑坡危险性。为了更加准确的预测和评估,需要考虑IMS输入的随机性和不确定性。在这过程中,对IMS的相关性的考虑至关重要。因此,有必要研究IMS相关性特征对地震滑坡危险性分析结果的影响,以及在不同工况和因素下影响的差异和变化规律。

本文将基于Newmark永久位移算法,利用全概率地震滑坡危险性分析方法,研究在不同临界屈服加速度 a_c 、永久位移模型、场地条件和断层距情况下,是否考虑IMS对地震滑坡危险性结果的影响大小和变化规律,为合理进行滑坡防护提供理论依据和参考。

1 全概率地震滑坡危险性分析

本文根据刘甲美等^[7]和李雪婧等^[18]对临界加速度的选取原则,选取三种不同的临界屈服加速度 a_c ,分别为:0.02、0.1和0.3 g,反映边坡的地震滑坡易发程度从大到小;选取3种永久位移模型,分别为:2种传统Newmark位移预测模型和1种基于机器学习的Newmark位移预测模型;美国NEHRP(National Earthquake Hazards Reduction Program)规范中,根据 V_{S30} (地表下30 m内土层的平均剪切波速度)范围对场地进行了分类,该分类方法在世界范围内被广泛应用。SEYHAN等^[19]根据该场地类别分类的 V_{S30} 范围以及NGA-West2数据库中实测 V_{S30} 值,提出了各类场地类别的 V_{S30} 代表值。本文采用了该代表值研究三类场地类型的影响,分别是: $V_{S30}=913$ (m/s)(B类场地)、 $V_{S30}=489$ (m/s)(C类场地)和 $V_{S30}=266$ (m/s)(D类场地);同时选取3种断层距,分别是10、30和60 km,代表近中远三种不同场地距离。分析对比IMS相关性在上述不同因素下对地震滑坡危险性结果的影响。

全概率地震滑坡位移危险性分析旨在绘制滑坡永久位移危险曲线,而非某个指定危险地面运动水平估算单一单位位移值^[13]。与地震动强度危险性水平类似,滑坡永久位移年超越率曲线对应不同的危险性水平,将地面运动危险曲线与位移预测模型及其给定 a_c 值的变化进行卷积来计算:

$$\lambda_D(x) = \int P[D \geq x | IM = z] \cdot d(\lambda_{IM}(z)) \quad (1)$$

式中: $\lambda_D(x)$ 指该滑坡永久位移 D 超过特定位移值 x 的年平均超越率, $\int P[D \geq x | IM = z]$ 是特定地震动强度参数IM为 z 值时滑坡位移 D 大于 x 的概率。

当涉及更复杂的因素,如多种地震动衰减关系、复合地震活动模型以及多参数的不确定性时,由于无法直接进行解析表达,更复杂和全面的分析方法将会受到限制。使用蒙特卡罗模拟(Monte Carlo)实际的概率分布来拟合每个具有不确定性的变量,产生一系列的合成地震事件可以直观体现由于地震发生导致的灾害情况。

蒙特卡罗方法也称统计模拟方法,基于概率与统计理论,通过随机数或伪随机数使用电子计算机来进行随机模拟或抽样,以此来获取问题近似解^[20]。每次随机试验结果都可能有所区别,但当试验次数趋向于无穷时,估计值无限趋向于真实值。

基于公式(1),该研究采用蒙特卡罗模拟的方法计算概率滑坡危险性,其步骤如下:确定模拟次数和模拟的统计周期;通过进行蒙特卡罗模拟地震发生的泊松过程,确定地震发生的震级和断层距从而形成地震目录;通过地震动预测方程(GMPEs)计算不同地震场景的IMS预测均值;考虑IMS相关性对残差进行修正,模

拟出具有相关特征的抽样残差;计算均值和残差之和,得到具有相关性的IMs;将计算出的IMs带入滑坡永久位移预测模型,计算具有随机性的地震滑坡永久位移值D,通过下式求出滑坡永久位移D超过特定位移值x的年平均超越率:

$$\lambda_D(x) = \frac{\text{场地 } j \text{ 中 } D \geq x \text{ 事件数}}{\text{模拟事件总数} \times \text{统计周期}} \quad (2)$$

不同的超越率对应不同的危险性水平,可针对具体边坡情况得到相对应的滑坡风险位移值来进行设计指导工作。以下第2和3节将介绍生成地震目录的具体实现方法和过程。

2 地震目录生成

地震目录是地震活动性研究和地震危险性分析最为重要的资料。本文进行地震目录生成时,为简化计算,仅考虑由断层产生的地震,并通过模拟产生地震的数量、震级大小和震源位置来确定地震目录。

2.1 地震数量生成

假设地震的发生遵循泊松分布,在[0,t]这段时间内,发生k次 m_0 级以上的地震的概率为^[21]:

$$P(n=k) = \frac{(v_0 t)^k}{k!} e^{-v_0 t} \quad (k=1,2,3\cdots) \quad (3)$$

式中: v_0 为 m_0 级以上地震的年平均发生率。对上式进行求和,得到地震发生(次数大于等于1次)的概率分布函数为:

$$P(1 \leq n \leq k) = \sum_{n=1}^k \frac{(v_0 t)^k}{k!} e^{-v_0 t} \quad (4)$$

对上式进行随机抽取一个[0,1]之间的随机数,作为概率分布函数值,再根据给定年发生率和时间t,就完成一次该时段地震发生k次的模拟,重复这样的过程最终能得到指定年限内的地震数量。

2.2 震级大小的生成

模拟产生的震级大小由震级-频度关系决定。震级-频度关系是指某个地区地震时间发生的次数(频率)与地震震级之间的关系。假设N为某地区某段时间内发生地震事件震级大于等于m的次数,则N与m之间近似存在对数线性关系:

$$\lg N(m) = a - b m \quad (m_0 \leq m \leq m_u) \quad (5)$$

式中:a和b分别为反映地震活动水平和大小地震比例关系的常数。b值的选取取决于该地区介质强度与地应力大小,地应力高的地区,b值也高,反之亦然。 m_0 为震级下限,通常取4~4.75; m_u 为震级上限。在本文中选取矩震级上限为8,矩震级下限为4。根据式(5),地震事件的震级分布可以转换为指数分布:

$$N(m) = e^{\alpha - \beta m} \quad (6)$$

式中: $\alpha = \frac{a - \lg b}{\lg e}$, $\beta = \frac{b}{\lg e}$ 。以经验分布代替概率分布,则不大于m的震级累积分布函数为:

$$F(m) = \frac{1 - e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}} \quad (m_0 \leq m \leq m_u) \quad (7)$$

其概率密度函数为:

$$f(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}} \quad (m_0 \leq m \leq m_u) \quad (8)$$

2.3 震源的确定

地震的发生是一个能量释放的过程,不同面积的断层破裂释放能量大小与发生地震事件的震级大小有关。假设地震发生时,断层破裂面积为矩形,且矩形质心在断层平面位置上服从均匀分布,通过断层破裂面积与地震震级的经验关系即可确立地震的震源。断层破裂优先满足断层宽度,再计算破裂长度。其中:走滑断层破裂面积与震级关系如下:

$$\lg(A) = 0.9 M_w - 3.42 \quad (9)$$

式中: M_w 为矩震级,A为走滑断层破裂面积。

郭增建等^[22]提出了由构造分段求震级的方法,建立了震级与断层长度的关系式:

$$M_s = 3.3 + 2.1 \lg L \quad (10)$$

式中: M_s 为面波震级, L 为地表破裂长度。

面波震级和矩震级转换通过以下公式计算:

$$M_w = 0.844 M_s + 0.951 \quad (11)$$

采用式(10)~式(11), 使用 2.2 节所得到的矩震级 M_w 通过转换为面波震级 M_s , 计算断层破裂长度 L 值。若发生 $M_s = 8.0$ 级地震, 则地表破裂长度为 173 km。参考上述值, 本文假设某一的走滑断层倾角为 90°, 总长度为 170 km, 断层外有三个边坡场地, 与断层的垂直距离分别为 10、30 和 60 km, 如图 1 所示。考虑近远断层距离对滑坡地震风险的影响, 故设置三个断层距位置来进行研究。同时考虑不同场地类别对滑坡风险的影响。

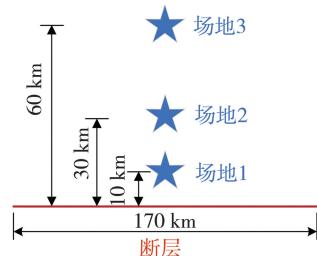


图 1 断层与边坡示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fault and slopes

3 地震目录生成结果

采用蒙特卡罗进行地震模拟, 对其进行周期为 100 a, 次数为 50 000 次的地震模拟, 一共产生 1 732 809 次 $M_w = 4.0$ 级以上地震, 其震级与断层距分布见图 2。由图 2 可得: 对于三个断层距场地, 频度最高的断层距分别位于 30~35 km、40~50 km 和 60~70 km。由于假设整条断层中发生地震时, 破裂中心点位置服从均匀分布, 断层距为 10 km 时与断层的垂直距离与断层长度相比相差很大, 同时发生地震时的大多数震级为断层破裂长度并不长的小震级, 所以对于近场而言, 实际频度最高的断层距并不是 10 km 以内。随着场地与断层垂直距离的增加, 频度最高的断层距区间也向着垂直距离靠近。

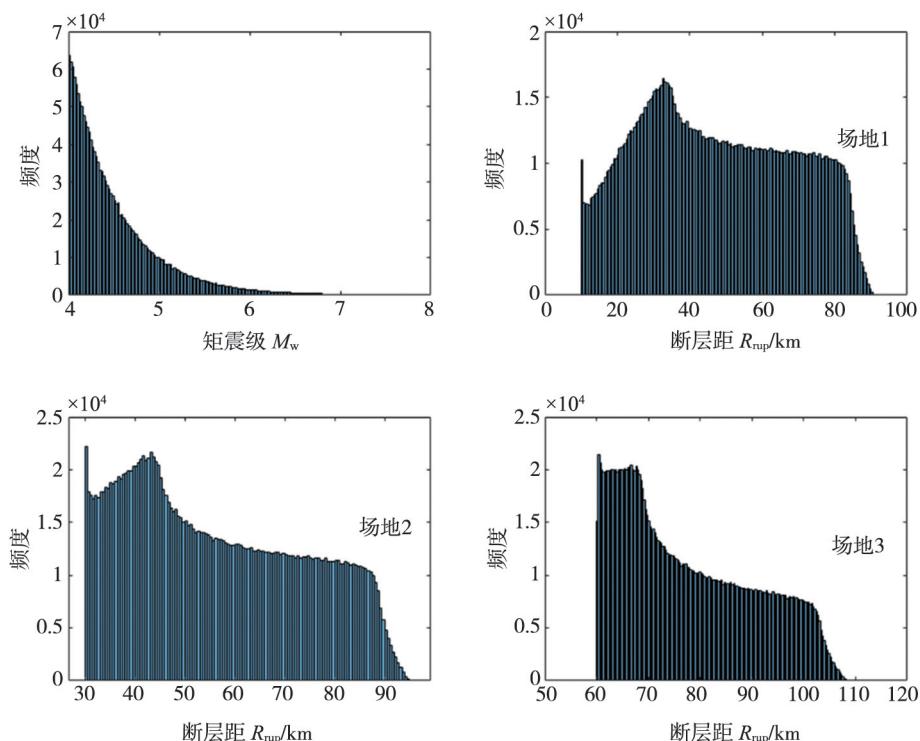
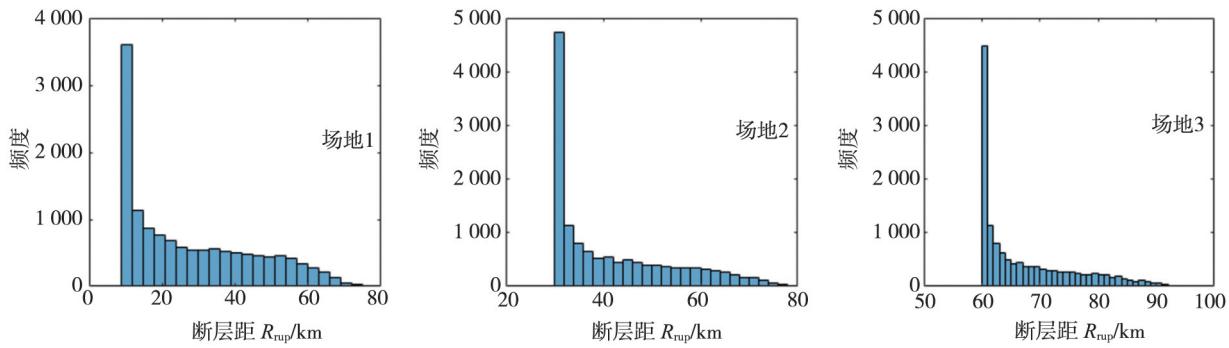


图 2 震级与震距(断层距 R_{rup})分布图

Fig. 2 Distribution of magnitude and distance

如图 3 所示, 从模拟出的地震事件中筛选出震级(M_w)大于 6.5 级的事件, 可以看出对于三个断层距而言大震级事件的断层距频次最高的分别是 10、30 和 60 km, 与场地到断层的垂直距离相符合。

图3 三个断层距 $M_w>6.5$ 的断层距分布Fig. 3 Rupture distance distribution of three epicenters with $M_w>6.5$

4 Newmark 位移预测模型

本文通过选取传统方法非线性拟合得到的 Newmark 位移预测模型和基于机器学习的 Newmark 位移预测模型,探究 IMs 相关性对基于两种不同类型预测模型的危险性结果的影响差异。

4.1 传统的 Newmark 位移预测模型

由于 SAYGILI 等^[13]模型(简称“SR08 模型”)在预测 Newmark 位移时考虑了相同的预测变量方面很受欢迎,因此我们以 SR08 模型作为传统模型的代表。SR08 (PGA, PGV, I_a)模型表达公式如下:

$$\ln(D_N) = -0.74 - 4.93 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right) - 19.91 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right)^2 + 43.75 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right)^3 - 30.12 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right)^4 - 1.3 \cdot \ln(\text{PGA}) + 1.04 \cdot \ln(\text{PGV}) + 0.68 \cdot \ln(I_a) \quad (12)$$

$$\sigma_{\ln D} = 0.2 + 0.79 \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right) \quad (13)$$

式中: D =Newmark 位移(cm); PGA、PGV、 I_a 和 a_c 的单位分别是 g、cm/s、m/s 和 g。

为了进行比较,本文采用 WANG 等^[15]根据最新的 NGA-West2 数据对 SR08 模型更新之后的模型。在之后本文中称“SR08_up 模型”,表达形式如下:

$$\ln(D_N) = -0.48 - 10.37 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right) - 3.43 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right)^2 + 24.28 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right)^3 - 22.28 \cdot \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right)^4 - 1.18 \cdot \ln(\text{PGA}) + 1.16 \cdot \ln(\text{PGV}) + 0.50 \cdot \ln(I_a) \quad (14)$$

$$\sigma_{\ln D} = 0.2 + 0.79 \left(\frac{a_c}{\text{PGA}}\right) \quad (15)$$

式中: D =Newmark 位移(cm); PGA、PGV、 I_a 和 a_c 的单位分别是 g、cm/s、m/s 和 g。

4.2 基于机器学习的 Newmark 位移预测模型

WANG 等^[15]基于深度学习和 Newmark 位移提出的预测模型(简称“XGB 模型”),该模型在位移预测方面具有良好的泛化能力,并通过优化超参数防止数据过拟合。所开发的数据驱动的 Newmark 位移预测模型能够更好地满足充分性和效率标准,与传统经验模型相比,其产生的标准偏差也小得多,并对模型在概率地边坡位移危险性分析中的应用进行了论证。XGB 模型的残差表达式如下:

$$\sigma_{\ln D} = \begin{cases} 0.798 & D_{\text{pred}} \leq 0.003 \text{ cm} \\ -0.147 \log_{10}(D_{\text{pred}}) + 0.427 & 0.003 \leq D_{\text{pred}} \leq 20 \text{ cm} \\ 0.235 & D_{\text{pred}} > 20 \text{ cm} \end{cases} \quad (16)$$

5 危险性结果对比分析

在第3节通过蒙特卡罗方法得到的地震目录,其中包括震级、断层距、断层类型和边坡条件场地等地震

信息。基于模拟的地震目录中的参数,利用 CAMPBELL 等^[23]提出的 GMPEs(CB14)计算出 PGA、PGV 和 I_a 三个 IMs 的均值及方差。再根据 IMs 的方差和 IMs 之间的相关系数,通过蒙特卡罗模拟生成具有相关性特征的 IMs 的残差,加上利用 GMPE 计算出的 IMs 的均值,得出具有空间相关性的 IMs 模拟值,将其作为三种模型(SR08、SR08_up 和 XGB)的输入。通过对比相同年平均超越率下的滑坡永久位移,分析是否考虑 IMs 的相关性造成的差异。

IMs 的相关性是指 IMs 之间的关联程度,用相关性系数表示 IMs 相关性强弱。一般采用 Pearson 线性相关系数表示 IMs 的相关性。BRADLEY^[24-25]利用 NGA-West1 数据库中的 1 842 条地震动数据,使用 GMPEs 和 Pearson 线性相关系数来确定相关性,建立了 PGA、PGV 和 I_a 等 IMs 的经验线性相关系数计算方程。本文中使用了该参考文献中相关性系数中值:IMs 的自相关系数为 1,PGA 和 PGV 的相关系数为 0.733,PGA 和 I_a 的相关系数为 0.83, I_a 和 PGV 的相关系数为 0.74。

5.1 不同临界屈服加速度 a_c

将 IMs(PGA、PGV 和 I_a)和 a_c 值分别带入 SR08、SR08_up 和 XGB 模型中,计算滑坡永久位移,根据式(1)即可得到三种断层距和三种场地类别下的地震滑坡危险性。如图 4 所示为 SR08_up 模型,C 类场地下不同 a_c 下地震滑坡危险性曲线。

图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)分别对应近中远三种距离场地。图 4(a)中: $a_c=0.02$ g 时实线和虚线相互重合, $a_c=0.1$ g 时,在重现期为 4 975 a(50 a 超越率为 1%)时,考虑 IMs 相关性的位移是 81.26 cm,不考虑时位移是 47.40 cm; $a_c=0.3$ g 时,在重现期为 4 975 a 时,考虑 IMs 相关性的位移是 9.14 cm,不考虑时位移是 3.35 cm。可见:随着 a_c 的增大,IMs 相关性对滑坡危险性影响增加。图 4 显示:随着 a_c 值的增加,危险性曲线呈现逐渐往 x 轴偏移的现象。图 4(c)中: $a_c=0.3$ g 时没有曲线,是因为模型预测对于远场且处于良好地质条件的边坡(临界加速度值为 0.3 g),滑坡位移预测值几乎都小于 1 cm,使得曲线不在所示坐标范围内。

对比图 4(a)和图 4(b) $a_c=0.02$ g 时,是否考虑 IMs 相关性对其滑坡危险性影响不大;当在近场时, $a_c=0.3$ g 时,在重现期为 100 000 a(1 000 a 超越率为 1%)时,考虑 IMs 相关性的位移是 104.50 cm,不考虑时位移是 27.30 cm;当在中场时, $a_c=0.3$ g 时,在重现期为 100 000 a 时,考虑 IMs 相关性的位移是 7.68 cm,不考虑时位移是小于 1.00 cm。所以,在 $a_c=0.3$ g 时,随着断层距的增加,考虑 IMs 相关性的影响在增大。在进行危险性评估时不考虑 IMs 相关性会低估其危险性,极有可能造成滑坡风险隐患。

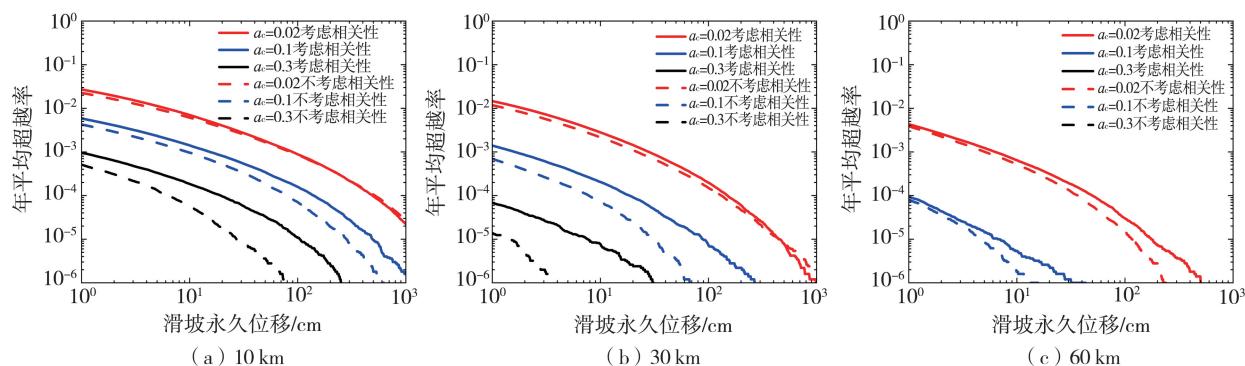


图 4 断层距为(a)10 km、(b)30 km 和(c)60 km 时不同 a_c 地震滑坡危险性曲线

Fig. 4 Seismic landslide hazard curves of different a_c when the fault distance is (a) 10 km, (b) 30 km and (c) 60 km
(solid line means considering correlation, dashed line means not considering correlation)

5.2 不同永久位移模型

为了研究在不同永久位移预模型下考虑 IMs 相关性的差异影响,选择 SR08、SR08_up 和 XGB 三种模型。图 5 表示在 $a_c=0.1$ g 和 C 类场地情况下,基于三种预测模型是否考虑 IMs 相关性计算出的地震滑坡危险性曲线。根据图 5(a)在近场时,SR08、SR08_up 和 XGB 模型在高风险水平时考虑 IMs 相关性结果差异较大,SR08 和 SR08_up 模型预测位移值偏高;而根据图 5(b),SR08、SR08_up 和 XGB 模型在高风险水平时考虑 IMs 相关性差异变小。若重现期为 100 000 a,当在近场时,XGB 模型考虑 IMs 相关性的位移是 298.50 cm,不考虑时位移是 213.95 cm;当在中场时,考虑 IMs 相关性的位移是 78.00 cm,不考虑时位移是 34.00 cm,相差大于 2 倍。所以当断层距增大,如果不考虑 IMs 相关性进行危险性评估时低估其危险性,极

有可能造成滑坡风险隐患。同时,图5(b)和图5(c)也可以发现:当断层距增大,实线和虚线对于不同模型基本重合,是否考虑IMs相关性对不同模型之间差异较小。

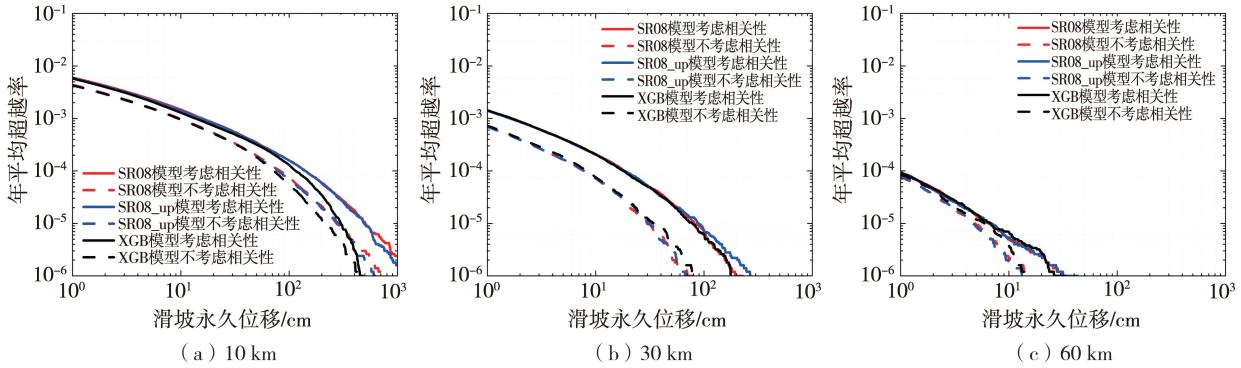


图5 断层距为(a)10 km、(b)30 km 和(c)60 km 时不同模型地震滑坡危险性曲线

Fig. 5 Seismic landslide hazard curves of different models when the fault distance is (a) 10 km, (b) 30 km and (c) 60 km
(solid line means considering correlation, dashed line means not considering correlation)

5.3 不同场地类别

为研究是否考虑IMs相关性在不同场地类别条件下的影响规律,我们选取B、C和D三类场地类别。图6(a)、图6(b)和图6(c)分别表示在 $a_c=0.1$ g和三类场地情况下,分别为近、中和远场时是否考虑IMs相关性对不同场地类别影响。对比图6(a)、图6(b)和图6(c)可以发现:若重现期为100 000 a,近场B类场地考虑IMs相关性的位移是198.20 cm,不考虑时位移是124.30 cm;当远场时,B类场地考虑IMs相关性的位移是8.35 cm,不考虑时位移是2.00 cm,相差约4倍。所以当断层距增大,IMs相关性对场地的影响增大。在同样风险水平情况下,D类场地的预测位移值最大是因为土体具有放大效应。如果不考虑IMs相关性进行危险性评估时低估其危险性极,有可能造成滑坡风险隐患。

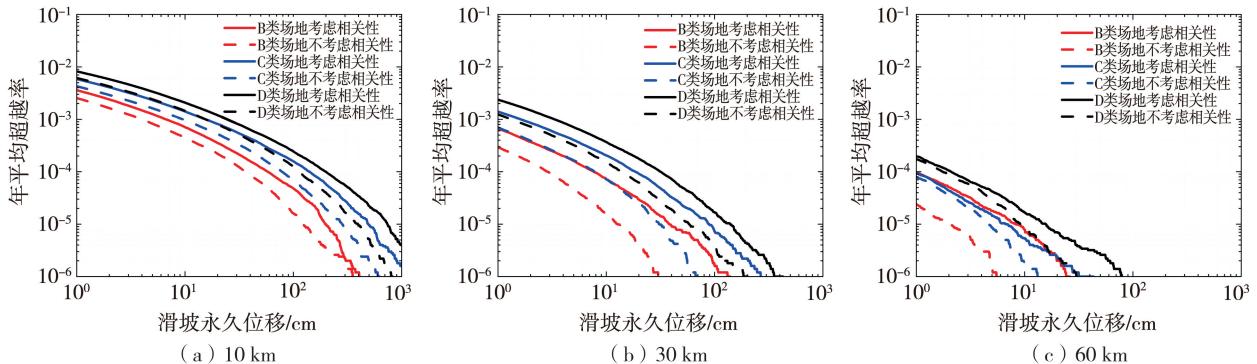


图6 断层距为(a)10 km、(b)30 km 和(c)60 km 时不同场地类别地震滑坡危险性曲线

Fig. 6 Seismic landslide hazard curves of different site types when the fault distance is (a) 10 km, (b) 30 km and (c) 60 km
(solid line means considering correlation, dashed line means not considering correlation)

5.4 不同断层距

为研究是否考虑IMs相关性在不同断层距条件下地震滑坡危险性的影响规律,选取10、30和60 km三种断层距,代表近、中和远三种场地距离。取在 $a_c=0.1$ g和SR08_up模型下不同断层距地震滑坡概率危险性曲线,如图7所示。图7(a)、图7(b)和图7(c)分别是对应B、C和D三类场地类别。在C类场地下,若重现期为100 000 a,近场时,考虑IMs相关性的位移是490.55 cm,不考虑时位移是282.13 cm;当为远场时,考虑IMs相关性的位移是6.65 cm,不考虑时位移是4.67 cm。可见:断层距越大,IMs相关性的影响越小。对同一种场地类别,随着断层距的增加,滑坡永久位移在降低。对比图7(a)、图7(b)和图7(c)可以发现C类和D类场地下考虑IMs相关性对不同断层距的影响相似。在不同场地类别条件下,如果在进行危险性评估时不考虑IMs相关性对断层距的影响会低估其预测位移值和地震滑坡危险性。

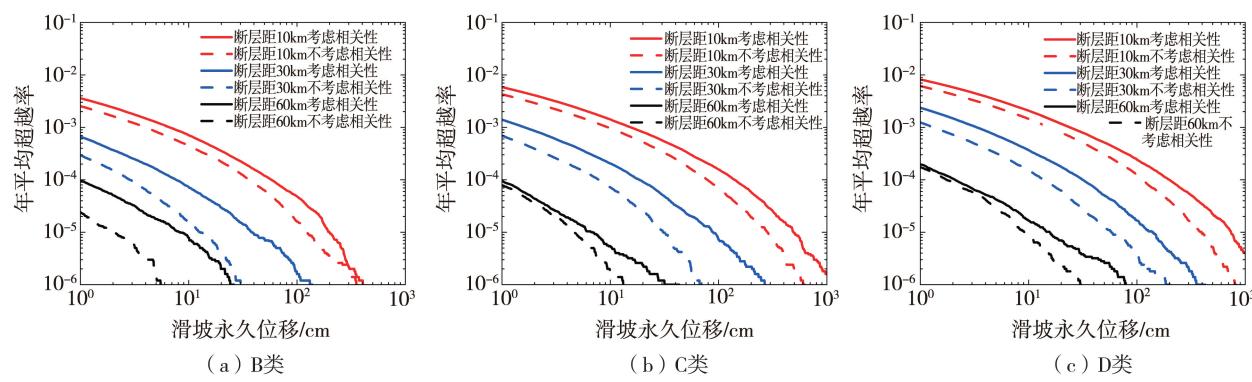


图7 场地类别为(a)B类、(b)C类和(c)D类时不同断层距地震滑坡危险性曲线

Fig. 7 The seismic landslide hazard curves of different fault distances when the site type is
(a) type B, (b) type C and (c) type D

6 结论

本文基于地震滑坡危险性的全概率分析方法,结合蒙特卡罗模拟,研究在不同临界屈服加速度 a_c 、永久位移预测模型、场地类别和断层距情况下,是否考虑IMs相关性对地震滑坡危险性评估的影响规律,为更加准确预测滑坡位移来降低滑坡风险以及为滑坡防护措施提供理论依据和参考。总的来说,对不同 a_c 、永久位移模型、场地类别和断层距,在进行滑坡危险性分析时,不考虑IMs相关性会造成预测位移值偏小,地震滑坡危险性预估偏低。具体主要结论如下:

1) 不同临界屈服加速度 a_c :当 a_c 较小,如 $a_c=0.02\text{ g}$,且为近中场时,可以忽略IMs相关性对地震滑坡危险性的影响;当 a_c 较大时,如 $a_c=0.3\text{ g}$,随着断层距的增加,相关性对危险性的影响在增大;当 a_c 与断层距同时增大时,IMs相关性对滑坡危险性的影响也在增加。

2) 不同永久位移预测模型:若考虑IMs的相关性,SR08和SR08_up位移预测模型在近场的高风险水平的永久位移值将会偏高;在中场时,高风险水平的永久位移值与观测位移值的绝对误差将会减小;随着断层距的增加,对于不同模型考虑相关性造成的绝对误差数值基本一致。

3) 不同场地类别与断层距:在近中场时,B类场地的危险性水平比C和D类场的地低,但随着断层距的增加,IMs相关性对不同场地类别带来的影响增大。在各类场地上,断层距越大,IMs相关性的影响越大。在各类场地相同风险水平下,由于D类场地具有放大效应,该类场地上的边坡滑坡位移值最大。

参考文献:

- [1] YIN Y P, WANG F W, SUN P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Landslides, 2009, 6(2): 139–152.
- [2] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Géotechnique, 1965, 15(2): 139–160.
- [3] 雷真, 李林锐, 隆交凤, 等. 基于降雨入渗的Newmark模型改进及地震滑坡危险性预测研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(3): 527–534.
LEI Zhen, LI Linrui, LONG Jiaofeng, et al. Improvement of Newmark model and prediction of earthquake landslide risk based on rainfall infiltration [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 527–534. (in Chinese)
- [4] JIBSON R W. Regression models for estimating coseismic landslide displacement[J]. Engineering Geology, 2007, 91(2/3/4): 209–218.
- [5] 陈启国, 葛华, 周洪福. 利用Newmark方法进行地震滑坡制图——以映秀研究区为例[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(11): 44–48, 56.
CHEN Qiguo, GE Hua, ZHOU Hongfu. Mapping of seismic triggered landslide through newmark method—An example from study area Yingxiu [J]. Coal Geology of China, 2011, 23(11): 44–48, 56. (in Chinese)
- [6] 葛华, 陈启国, 王德伟. 地震滑坡危险性评价及编图——以映秀震中区为例[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 644–652.
GE Hua, CHEN Qiguo, WANG Dewei. The assessment and mapping of seismic landslide hazards: A case study of Yingxiu area, Sichuan Province [J]. Geology in China, 2013, 40(2): 644–652. (in Chinese)
- [7] 刘甲美, 王涛, 石菊松, 等. 四川九寨沟Ms7.0级地震滑坡应急快速评估[J]. 地质力学学报, 2017, 23(5): 639–645.
LIU Jiamei, WANG Tao, SHI Jusong, et al. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Jiuzhaigou Ms7.0 earthquake, Sichuan, China[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 639–645. (in Chinese)
- [8] 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等. 基于汶川地震强震动记录的边坡永久位移预测模型[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1131–1136.
XU Guangxing, YAO Lingkan, LI Chaohong, et al. Predictive models for permanent displacement of slopes based on recorded strong-motion data

- of Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1131–1136. (in Chinese)
- [9] LEE R, KIREMIDJIAN A S. Uncertainty and correlation for loss assessment of spatially distributed systems[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(4): 753–770.
- [10] CODA K, HONG H P. Spatial correlation of peak ground motions and response spectra[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(1): 354–365.
- [11] SOKOLOV V, WENZEL F. Influence of ground-motion correlation on probabilistic assessments of seismic hazard and loss: sensitivity analysis [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(5): 1339–1360.
- [12] DU W Q, WANG G. A one-step Newmark displacement model for probabilistic seismic slope displacement hazard analysis[J]. Engineering Geology, 2016, 205: 12–23.
- [13] SAYGILI G, RATHJE E M. Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(6): 790–803.
- [14] SONG J, RODRIGUEZ-MAREK A. Sliding displacement of flexible earth slopes subject to near-fault ground motions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(3): 0001233.
- [15] WANG M X, HUANG D R, WANG G, et al. SS-XGBoost: a machine learning framework for predicting newmark sliding displacements of slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(9): 04020074.
- [16] Arias A. Measure of Earthquake Intensity. 1970, Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge. Univ. of Chile, Santiago de Chile.
- [17] DU W Q, WANG G. Fully probabilistic seismic displacement analysis of spatially distributed slopes using spatially correlated vector intensity measures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(5): 661–679.
- [18] 李雪婧,高孟潭,徐伟进.基于Newmark模型的概率地震滑坡危险性分析方法研究——以甘肃天水地区为例[J].地震学报,2019,41(6): 795–808.
LI Xuejing, GAO Mengtan, XU Weijin. Probabilistic seismic slope displacement hazard analysis based on Newmark displacement model: Take the area of Tianshui, Gansu Province, China as an example[J]. Acta Seismologica Sinica, 2019, 41(6): 795–808. (in Chinese)
- [19] SEYHAN E, STEWART J P. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1241–1256.
- [20] Page, E., Monte Carlo Methods. 1964, Wiley Online Library.
- [21] 潘华,高孟潭,谢富仁.新版地震区划图地震活动性模型与参数确定[J].震灾防御技术,2013,8(1): 11–23.
PAN Hua, GAO Mengtan, XIE Furen. The earthquake activity model and seismicity parameters in the new seismic hazard map of China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1): 11–23. (in Chinese)
- [22] 郭增建,秦保燕.用发震构造显示的构造规模来估计地震的最大强度[R].酒钢地震考察报告,1965.
GUO Zengjian, QIN Baoyan. Estimation of the maximum intensity of earthquakes by the scale of seismogenic structures [R]. Jsteel Seismic Survey Report, 1965. (in Chinese)
- [23] CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1087–1115.
- [24] BRADLEY B A. Correlation of Arias intensity with amplitude, duration and cumulative intensity measures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 78: 89–98.
- [25] BRADLEY B A. Empirical correlations between peak ground velocity and spectrum-based intensity measures[J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(1): 17–35.