

李鑫, 迟明杰, 李小军. 2018. 基于简化纽马克位移模型的地震滑坡岩土体强度参数研究. 地震学报, 40(6): 820-830. doi: 10.11939/jass.20180026.

Li X, Chi M J, Li X J. 2018. Rock-soil strength parameters of earthquake-triggered landslides based on simplified Newmark displacement model. Acta Seismologica Sinica, 40(6): 820-830. doi: 10.11939/jass.20180026.

## 基于简化纽马克位移模型的地震滑坡 岩土体强度参数研究<sup>\*</sup>

李 鑫 迟明杰<sup>†</sup> 李小军

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 本文以 2008 年汶川  $M_S 8.0$  地震的烈度数据为基础, 采用简化纽马克法对四川省青川县不同岩组的岩土体强度参数组合所对应的滑坡位移进行计算得到滑坡危险性等级图, 并以计算得到的预测滑坡区与实际调查的滑坡数据的吻合度作为评价标准, 对研究区内岩土体强度参数进行分析. 分析结果表明, 研究区大部分区域岩组的岩土体强度参数的合理取值区间与《工程岩体分级标准 GB 50218—94》建议的参数取值范围基本一致, 而本文在此基础上所确定的取值结果, 在一定程度上可以提高地震滑坡危险性评估的精度.

**关键词** 地震滑坡 纽马克位移模型 岩土体强度参数 滑坡位移 青川县

doi: 10.11939/jass.20180026 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Rock-soil strength parameters of earthquake-triggered landslides based on simplified Newmark displacement model

Li Xin Chi Mingjie<sup>†</sup> Li Xiaojun

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to intensity data from the 2008 Wenchuan  $M_S 8.0$  earthquake, the simplified Newmark method was used to calculate the landslide displacement corresponding to the combination of rock-soil strength parameters of different rock groups in the Qingchuan county, Sichuan Province. Taking the goodness-of-fit between the actual and the predicted landslide data as the evaluation criteria, we analyzed the rock-soil strength parameters in the studied region. The results showed that the reasonable value ranges of rock-soil strength parameters of rock groups in most of the studied region were basically consistent with the ranges of recommended parameters of *Standard for Engineering Classification of Rock Masses GB 50218—94*. Referring to the parameters ranges determined in this paper, the evaluation accuracy of the earthquake landslide susceptibility level can be improved to some extent.

**Key words:** earthquake-triggered landslides; Newmark displacement model; rock-soil strength

<sup>\*</sup> 基金项目 中央公益科研院所基本业务专项(DQJB15C07)、国家自然科学基金重点项目(51639006)和国家重点研发计划(2017YFC1500400)共同资助.

收稿日期 2018-02-27 收到初稿, 2018-04-08 决定采用修改稿.

<sup>†</sup> 通信作者 e-mail: 03115049@bjtu.edu.cn



parameters; landslide displacement; Qingchuan county

## 引言

中国是亚洲乃至世界上滑坡灾害较为严重的国家之一,而地震是诱发滑坡灾害的主要因素。Keefer (1984) 计算得出,当  $M_S > 4.0$  时便可诱发滑坡,当  $M_S > 6.0$  时则可诱发较大面积的山体滑坡。近年来随着川滇地区的新构造运动和地震活动愈加强烈,因地震诱发的滑坡造成了人员的重大伤亡和经济财产的大量损失(陈成, 胡凯衡, 2017)。因此,快速评估地震滑坡危险性,合理地评定和预测震后滑坡的空间分布规模及其潜在分布特征,对震后救援和地震滑坡灾害预测均具有极为重要的指导意义(王涛等, 2013)。目前,国内外区域地震滑坡位移和定量危险性评估的主要研究方法为基于力学模型的简化纽马克(Newmark)位移分析法(Wilson, Keefer, 1983; 王涛等, 2015)。大量统计分析表明,区域地震滑坡产生的纽马克位移与临界加速度以及阿里亚斯(Arias)强度具有较好的函数相关性(Jibson, 1993; 王涛等, 2013)。其中临界加速度是指在地震动荷载作用下,滑块在极限平衡状态(所受下滑力等于抗滑力)时的地震加速度,其大小与地形坡度和岩土体的强度参数相关。Dreyfus 等(2013)关于美国加州北岭地震的 7 个经验位移模型的分析表明,各模型的结果均相似,因此通过完善位移预测模型来改善区域地震的滑坡位移计算结果的效果并不明显,而岩土体强度和地质单元分配参数才是决定预测精度的关键。宋志等(2016)指出,地震滑坡危险性评价的准确度取决于滑坡位移计算参数的取值精度,其中物理力学参数的取值是影响滑坡危险性评价的重要因子。王秀英等(2009)以 2008 年汶川  $M_S 8.0$  地震强震记录及滑坡灾害调查数据为基础,利用简化纽马克方法并结合已发生滑坡灾害的调查数据,推测出了观测点附近斜坡的相关参数(如:斜坡临界加速度值、斜坡组成物质的岩体力学参数等)。

纽马克位移是评估研究区潜在滑坡体的滑坡易发等级和高发位置的重要指标,而岩土体强度参数作为计算临界加速度的重要因子,将直接影响到纽马克位移量的计算结果。岩土体强度参数取值过高,会导致滑坡预测面积过小;而取值过分保守,则会导致预测滑坡面积过大(Dreyfus et al, 2013)。因此,岩土体强度参数的合理取值,对提高潜在滑坡空间分布预测的准确性具有至关重要的作用。鉴于现有地层岩性资料精度较低、实测数据较为紧缺等原因,国内外研究人员利用简化纽马克位移模型对地震滑坡快速进行评估时,对岩土体强度参数的选取方法通常先将地质岩组合并,然后基于《工程岩体分级标准 GB 50218—94》(中华人民共和国水利部, 1995)并结合个人经验进行取值,该方法主观性较强,很难真实地反映区域岩体的力学性质(宋志等, 2016)。

鉴于此,本文拟基于 ArcGIS 平台,以四川省青川县为研究区,首先通过定量与定性的分析方法,对研究区地层岩土体强度参数进行归类选取;其次基于简化纽马克位移模型计算出滑坡位移危险性等级图;最后将预测滑坡区与 2008 年汶川  $M_S 8.0$  地震青川县实际滑坡调查数据对比,得出同震条件下青川县岩土体强度参数合理取值范围,以期在一定程度上提高地震滑坡危险性评估的精度。

## 1 地震滑坡位移计算分析及研究区概况

### 1.1 简化纽马克位移模型及计算步骤

Newmark (1965) 率先提出了基于极限平衡理论的滑坡体刚塑性滑块模型,该模型中滑坡

体的永久位移是由地震加速度与临界加速度之差对时间进行二次积分求得,其位移量可用于斜坡的稳定性评价.然而,由于缺乏实际的地震记录数据,计算精确积分较为困难,该方法较少在工程中应用(秦胜伍等, 2017).此后,由于区域地震滑坡危险性评估与制图的需要,由经典刚性滑块分析法衍化出一些简化位移方法,可利用临界加速度和地震动参数作为自变量的经验公式确定滑坡永久位移(Wilson, Keefer, 1983; Jibson, 1993, 2007).

应用简化纽马克位移理论评估地震滑坡危险性时,岩土体的临界加速度是最重要的计算参数,该参数的确定可直接关系到滑坡危险性评估结果的可靠性.而岩土体的临界加速度又与静态安全系数相关,但由于计算静态安全系数需要详细的岩土体强度参数(包括有效黏聚力、有效内摩擦角等)才可获得,因此计算临界加速度具有较大困难.若采用简化纽马克位移模型,通过对比分析实际地震滑坡发生区域,反向推算出观测点附近区域斜坡的临界加速度值(徐培彬, 2014),则可减少相应参数计算.

利用简化纽马克位移模型计算滑坡永久位移分为 3 个步骤:首先,获取研究区的阿里亚斯强度;其次,根据岩土体强度参数与斜坡坡度,计算研究区斜坡静态安全系数  $F_s$  和坡体临界加速度  $a_c$ ;最后,利用简化纽马克经验公式计算地震诱发滑坡累积位移  $D_N$ .

## 1.2 研究区概况

四川省广元市青川县(104°36'E—105°38'E, 32°12'N—32°56'N)地处四川北部边缘山区,是四川、陕西和甘肃等 3 省交界处,面积共 3 269 km<sup>2</sup>.青川县地势西北高东南低,以侵蚀构造产生的中低山为主,山地占有率达 88.3% 以上,地形坡度大部分介于 10°—35°之间.区域内岩层以前泥盆系和志留系出露面积最大,各系地层呈条带状分布,岩石以岩浆岩、变质岩及碎屑岩为主.青川县地质构造复杂,构造运动强烈,是地震活动和地质灾害的高发区,区内分布有两条横贯全县的大断裂,即北部的北东向乔庄大断裂和南部的北东向茶坝大断裂.2008 年汶川  $M_s$ 8.0 地震中,青川县地震诱发地质灾害 541 处,其中滑坡 35 处,崩塌 506 处,崩滑体堰塞河道 12 处(秦绪文等, 2009),为青川县有史以来最重大的地震灾害.

# 2 基于地震滑坡调查数据的岩土体强度参数确定方法

## 2.1 阿里亚斯强度计算

利用简化纽马克位移法对地震滑坡危险性进行快速评估,需要震后第一时间获取受灾区域的阿里亚斯强度参数.目前通过 ShakeMap 系统,已实现震后 1 小时快速生成地面震动图和烈度分布图(陈鲲等, 2010, 2011, 2015).利用烈度与阿里亚斯强度的转换关系,即可快速获取相关区域的阿里亚斯强度参数.根据袁一凡(2008)发布的汶川  $M_s$ 8.0 地震地表破裂带和烈度分布图显示,青川县的地震烈度分布为 IX 度.根据《中国地震动参数区划图 GB 18306—2015》(中华人民共和国国家标准化委员会, 2015)中表 G.1 所示的加速度分级及其与烈度的对应关系,地震烈度 IX 度区所对应的峰值加速度范围为 3.72—7.35 m/s<sup>2</sup>.中国分区地震动衰减关系为(汪素云等, 2000)

$$\lg Y = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \lg [R + c_5 \exp(c_6 M)], \quad (1)$$

式中,  $Y$  为加速度或速度,  $M$  为震级,  $R$  为震中距,  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  为回归常数.鉴于青川县的地理位置,取中国西部长轴系数计算.阿里亚斯强度区域的衰减经验公式为(Keefer, Wilson, 1989)

$$\lg I_a = 0.75 M_w - 2 \lg R - 2.35, \quad (2)$$

式中, 汶川地震取  $M_w=8.0$ ,  $R$  为场地震源距, 汶川地震震源深度取 15 km. 结合式(1)和式(2), 将烈度 IX 度区对应峰值加速度均值代入计算, 可间接获取研究区阿里亚斯强度值  $I_a$ .

2.2 临界加速度计算

临界加速度  $a_c$  的计算与地形坡度和岩土体的强度参数, 其相关计算公式为(Jibson *et al*, 2000)

$$a_c=(F_s-1)g\sin\alpha,$$

(3)

式中,  $g$  为重力加速度,  $\alpha$  为坡度角,  $F_s$  为斜坡静态安全系数, 其公式为(Miles, Ho, 1999)

$$F_s=\frac{c'}{\gamma t\sin\alpha}+\frac{\tan\varphi'}{\tan\alpha}-\frac{mr_w\tan\varphi'}{\gamma\tan\alpha},$$

(4)

式中:  $c'$  为有效黏聚力, 单位为 MPa;  $\varphi'$  为有效内摩擦角, 单位为  $^\circ$ ;  $r_w$  为地下水重度, 本文取  $r_w=10\text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma$  为岩土体重度本文取  $\gamma=23\text{ kN/m}^3$ ;  $t$  为潜在滑坡体厚度, 单位 m, 本文取  $t=5\text{ m}$ ;  $m$  为饱和土体占潜在滑移体的比例, 由于青川地区降雨丰富, 本文取  $m=1$ , 视为饱和. 计算  $F_s$  需要获取研究区域岩土体及结构面的力学参数, 其中不同岩组的岩体结构面强度对纽马克模型潜在滑动面的强度影响较大. 但由于实测岩体强度参数的匮乏, 国内大部分研究在选取岩体结构面强度参数( $c'$ 和 $\varphi'$ )时, 通常基于《工程岩体分级标准 GB 50218—94》(中华人民共和国水利部, 1995)凭经验取值, 选取参数的合理性无法保证, 结果存在较大的不确定性. 因此, 研究一种能够有效地确定研究区岩土体强度参数合理取值的方法, 选择一种有效地确定研究区岩体结构面的合理强度参数的方法, 对提高潜在滑坡位移评价的精确性有重大意义.

本文根据王涛(2010)汶川地震重灾区工程地质岩组划分标准, 将青川县的地质地层划分为 3 类岩组, 即坚硬岩组、较硬岩组、较软岩组, 同时根据《工程岩体分级标准 GB 50218—94》(中华人民共和国水利部, 1995)的工程岩体分级及岩体结构面的抗剪断峰值强度(表 1), 3 类岩组分别对应表 1 序号 1, 2, 3, 其内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  的取值范围列于表 1.

表 1 岩体结构面的抗剪断峰值强度

Table 1 The shear peak strength of rock-mass discontinuities

序号	两侧岩体的坚硬程度	结构面的结合程度	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	黏聚力 $c/\text{MPa}$
1	坚硬岩	好	$>37$	$>0.22$
2	坚硬—较坚硬岩	一般	37—29	0.22—0.12
	较软岩	好		
3	坚硬—较坚硬岩	差	29—19	0.12—0.08
	较软岩—软岩	一般		
4	较坚硬—较软岩	差—很差	19—13	0.08—0.05
	软质岩泥化面	差		
5	较坚硬岩及全部软质岩	很差	$<13$	$<0.05$
	软质岩泥化层本身	很差		

根据斜坡静态安全系数计算公式(式(4)), 再考虑地下水渗入及岩石风化等因素的影响, 需要对岩体强度进行适度折减, 故强度参数采用有效内摩擦角与有效黏聚力. 为寻找合理的有效岩体强度取值范围, 根据《建筑边坡工程技术规范 GB 50330—2013》记录的岩体内摩擦角和黏聚力可由标准值按岩体裂隙发育程度与折减系数的乘积确定, 折减系数取值范围为 0.95—0.75 (中华人民共和国建设部, 2014), 最终得到的岩体结构面物理强度参数折减

组合如表 2 所示. 有效黏聚力和有效内摩擦角的计算范围按组合中的最低值和最高值确定.

表 2 岩体结构面强度参数折减组合

Table 2 Reduction combination of strength parameters of rock-mass discontinuities

折减系数	坚硬岩组		较硬岩组		较软岩组	
	$\varphi'$	$c'$	$\varphi'$	$c'$	$\varphi'$	$c'$
0.95	>35.15°	>0.209	35.15°—27.55°	0.209—0.114	27.55°—18.05°	0.114—0.076
0.90	>33.30°	>0.198	33.30°—26.10°	0.198—0.108	26.10°—17.10°	0.108—0.072
0.85	>31.45°	>0.187	31.45°—24.65°	0.187—0.102	24.65°—16.15°	0.102—0.068
0.80	>29.60°	>0.176	29.60°—23.20°	0.176—0.096	23.20°—15.20°	0.096—0.064
0.75	>27.75°	>0.165	27.75°—21.75°	0.165—0.090	21.75°—14.25°	0.090—0.060

注:  $\varphi'$ 为有效黏聚力;  $c'$ 为有效内摩擦角, 下同.

2.3 纽马克位移和参数确定

利用多变量逻辑回归方法得到经验公式计算地震滑坡累计位移(Jibson *et al.*, 2000)

$$\lg D_N=1.521\lg I_a-1.993\lg a_c-1.546,$$
 (5)

式中,  $a_c$ 为斜坡临界加速度,  $I_a$ 为汶川地震时青川县的阿里亚斯强度.

运用 ArcGIS 空间数据建模工具, 可以快速计算不同岩组的不同岩体力学参数所对应的滑坡位移. 根据滑坡位移量值, 将青川县滑坡危险等级分为极高危险、高危险、中等危险、低危险和极低危险等 5 个危险性等级. 将危险性等级、危险区域分布等条件与 2008 年汶川地震青川县实地滑坡调查点位置进行比较, 根据预测结果与实际位置分布的吻合程度, 确定岩体力学参数的合理取值范围.

3 青川县岩土体强度参数取值分析

将不同岩组的岩体结构面强度参数的折减组合(表 2)作为变量输入地震滑坡快速评估模块中, 并按照位移量重新进行分类, 即可得到各参数组合所对应的滑坡危险性评估结果; 之后将青川县实际地震滑坡点数据(秦绪文等, 2009)叠加到评估结果上, 即可对本研究区岩土体的强度参数取值进行分析评判.

3.1 坚硬岩组分析

本文将计算所得的预测滑坡区与实际调查所得滑坡数据的吻合度作为确定岩土体力学参数合理与否的标准. 如图 1 所示, 在青川县坚硬岩组范围内, 大型集中滑坡群主要分布在房石镇东部、锣鼓顶及三锅乡北部地平沟一带. 当岩土体强度参数取  $\varphi'=32^\circ$ ,  $c'=0.15$  时, 地震滑坡位移几乎均集中在中危险区, 表明参数取值过大, 不能合理地体现出高危险区与实际滑坡的对应关系, 故此参数评价为不合理(图 1a); 当岩土体强度参数取  $\varphi'=24^\circ$ ,  $c'=0.14$  时, 预测高危险区域范围与实际滑坡发生区域——房石镇西部大型滑坡群、三锅乡北部滑坡群和板桥乡西南滑坡群的吻合度均较高, 故此参数确定较为合理(图 1b); 当岩土体强度参数取  $\varphi'=24^\circ$ ,  $c'=0.13$  时, 与实际滑坡位置相比, 地震滑坡高危险区预测范围偏大, 表明参数确定不合理, 取值偏小(图 1c).

通过此方法将坚硬岩组不同参数组合逐一进行计算, 最终可确定青川县坚硬岩组较为合理的岩土体强度参数的取值范围, 如表 3 所示.

可以看出, 最终确定的青川县坚硬岩组岩土体力学参数的合理范围(表 3)与所确定的计



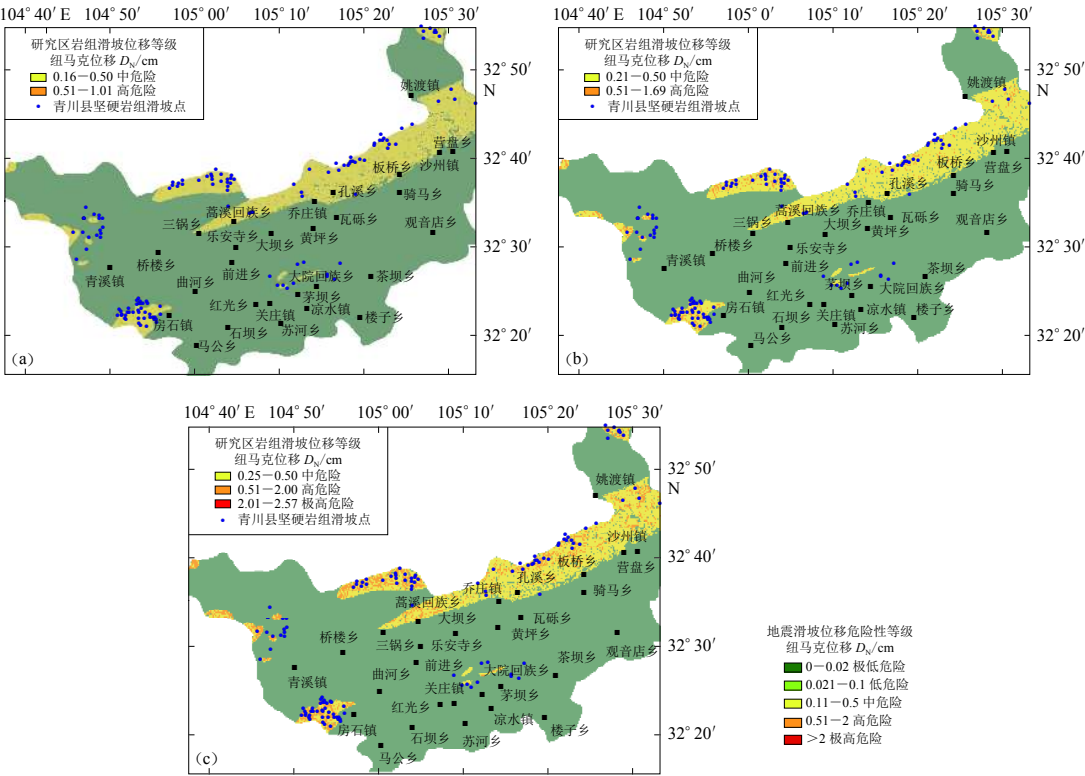


图 1 青川县坚硬岩组不同岩土体强度参数滑坡危险性与实际滑坡点分布  
Fig. 1 Distribution of landslide hazard based on different shear-strength data and  
observed landslides of hard rock groups in Qingchuan county  
(a)  $\varphi'=32^\circ$ ,  $c'=0.15$ ; (b)  $\varphi'=24^\circ$ ,  $c'=0.14$ ; (c)  $\varphi'=24^\circ$ ,  $c'=0.13$

表 3 青川县坚硬岩组岩土体强度参数的分析结果

Table 3 Analysis results of shear-strength parameters of hard rock groups in Qingchuan county						
$\varphi'$	参数分析结果					
	$c'=0.19$	$c'=0.17$	$c'=0.15$	$c'=0.14$	$c'=0.13$	$c'=0.12$
36°	不合理	不合理	不合理	预测区偏小	合理	偏大
32°	不合理	不合理	不合理	预测区偏小	合理	不合理
28°	不合理	不合理	预测区偏小	合理	预测区偏大	不合理
26°	不合理	不合理	预测区偏小	合理	预测区偏大	不合理
24°	不合理	不合理	预测区偏小	合理	不合理	不合理

算范围(表 2)存在差别,其原因可能与研究区地质岩组分类方法有关.由于快速评估的需要,工程地质分类主要基于地质资料结合岩石坚硬程度、完整程度进行定性划分,无法对实际的风化程度、节理、断裂等进行考察,必会产生一定程度的误差,因此由表 2 的坚硬岩组岩土体的强度参数范围并不能得到较理想的结果,需要对计算范围进行适度扩大.

3.2 较硬岩组分析

青川县较硬岩组范围内的大型滑坡群主要分布在青溪镇北部东河沿岸、瑶溪镇北部及曲河乡、石坝乡一带(图 2).当岩土体强度参数取  $\varphi'=35^\circ$ ,  $c'=0.1$  时,由于强度参数取值偏大,滑坡位移预测结果中极高危险等级滑坡的预测区域范围不明显,高危险等级滑坡预测区

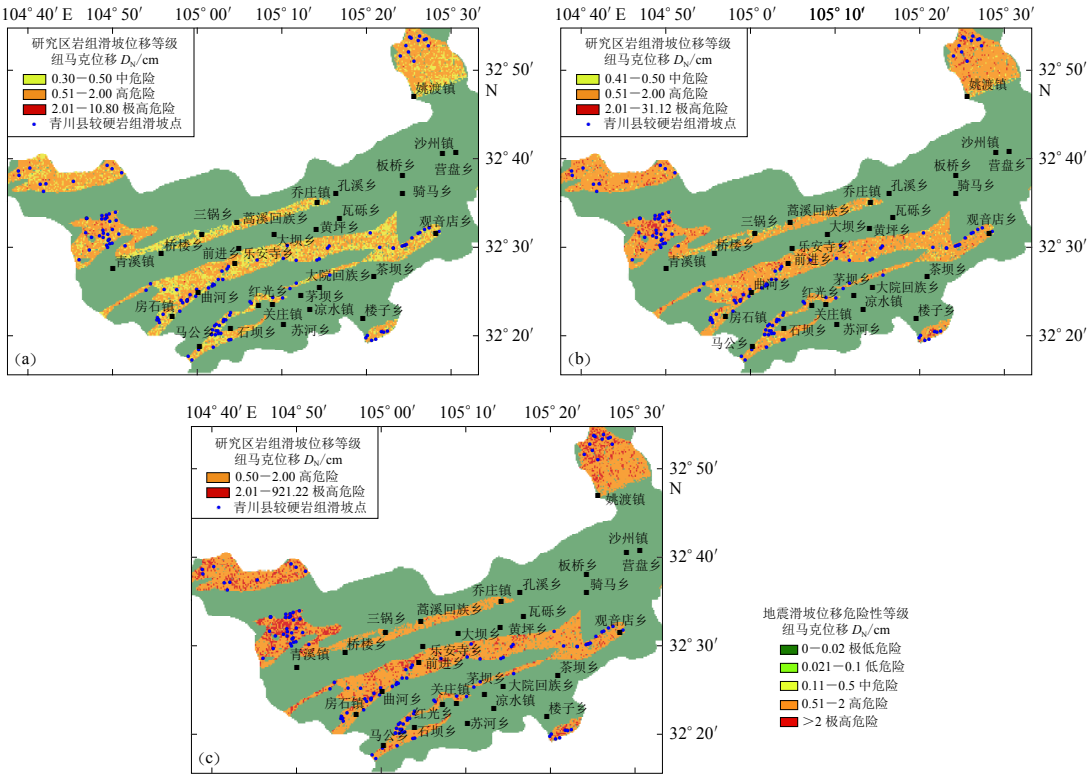


图 2 青川县较硬岩组不同岩土体强度参数的滑坡危险性及实际滑坡点分布  
Fig. 2 Distribution of landslide hazards based on different shear-strength data and  
observed landslides of less hard rock groups in Qingchuan county  
(a)  $\phi' = 35^\circ, c' = 0.1$ ; (b)  $\phi' = 23^\circ, c' = 0.1$ ; (c)  $\phi' = 23^\circ, c' = 0.09$

域范围过大,与实际滑坡区域的对应性差,因此,此参数组合定义为不合理(图 2a);当岩土体强度参数取  $\phi' = 23^\circ, c' = 0.1$  时,极高危险等级滑坡预测区域与实际滑坡发生位置——青溪镇北部滑坡群、马公乡东北部滑坡群均吻合较好,因此可将其确定为较硬岩组的合理岩土体强度参数(图 2b);当岩土体强度参数取  $\phi' = 23^\circ, c' = 0.09$  时,预测滑坡位移与实际滑坡位置相比,地震滑坡高危险区预测范围偏大,故此参数组合不合理,取值偏小(图 2c)。

将该方法结合岩土体强度参数分析结果,最终确定出了青川县较硬岩组较为合理的岩土体强度参数取值范围,如表 4 所示。可以看出,青川县的较硬岩组的合理岩土体强度参数

表 4 青川县较硬岩组岩土体强度参数的分析结果

参数分析结果						
$\phi'$	$c' = 0.2$	$c' = 0.14$	$c' = 0.11$	$c' = 0.1$	$c' = 0.09$	$c' = 0.08$
$35^\circ$	不合理	不合理	不合理	不合理	合理	偏大
$32^\circ$	不合理	不合理	不合理	预测区偏小	合理	不合理
$29^\circ$	不合理	不合理	不合理	预测区偏小	预测区偏大	不合理
$26^\circ$	不合理	不合理	不合理	合理	预测区偏大	不合理
$23^\circ$	不合理	不合理	不合理	合理	不合理	不合理
$20^\circ$	不合理	不合理	不合理	合理	不合理	不合理

恰好包含在表 2 折减组合确定的参数计算范围内, 因此表 4 是在《工程岩体分级标准 GB 50218—94》(中华人民共和国水利部, 1995)规定的岩体结构面抗剪强度参数折减基础上更为合理的细化, 避免了盲目取值带来的计算误差。

3.3 较软岩组分析

图 3 给出了根据本方法分析青川县较软岩组不同岩体力学参数所对应的滑坡危险性等级与实际滑坡点分布图的对应情况, 可见: 当岩土体强度参数取  $\varphi'=26^\circ$ ,  $c'=0.09$  时, 极高危险等级的滑坡预测区域与实际滑坡发生区域清溪镇北部滑坡群、三锅乡西北部滑坡群、曲河乡东部滑坡群、马公乡东南部滑坡带以及楼子乡北部滑坡带均具有较高的吻合度(图 3b)。根据上述方法可得岩土体强度参数的分析结果, 进而最终确定青川县较软岩组较为合理的岩土体强度参数的取值范围, 如表 5 所示。

由表 5 可见, 青川县较软岩组岩体合理力学参数包含于表 2 折减组合确定的参数计算范围内, 因此, 本文提出的岩体力学参数选定及评价方法对青川县较硬岩组和较软岩组均适用。

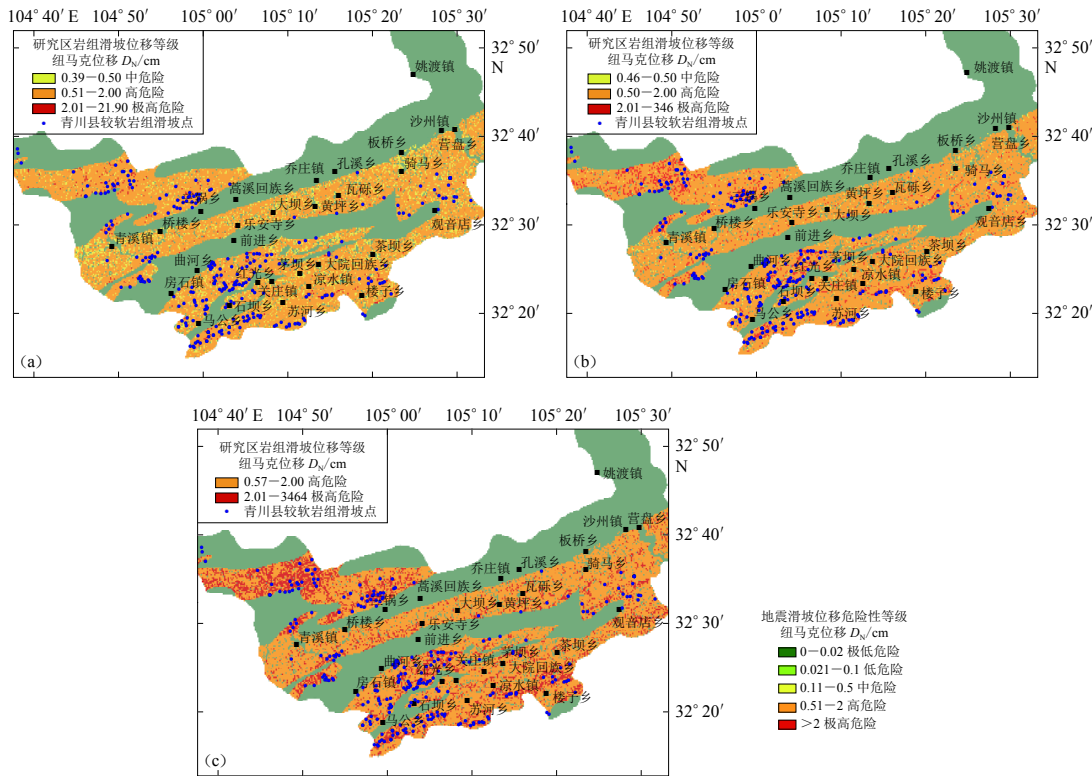


图 3 青川县较软岩组不同岩土体强度参数滑坡危险性等级及实际滑坡点分布

Fig. 3 Distribution of landslide hazards based on different shear-strength data and observed landslides of less softrock groups in Qingchuan county  
(a)  $\varphi'=18^\circ$ ,  $c'=0.11$ ; (b)  $\varphi'=26^\circ$ ,  $c'=0.09$ ; (c)  $\varphi'=26^\circ$ ,  $c'=0.08$

3.4 综合分析

根据以上青川县坚硬岩组、较硬岩组及较软岩组岩土体强度参数的分析结果可以看出, 与实际滑坡调查结果相对应的合理岩土体强度参数组合是一个范围, 其原因为岩土体强度是由摩擦性和黏聚力两大因素决定, 从理论上讲不同的材料可以有相同的强度, 不同材料只



表 5 青川县较软岩组岩土体强度参数的分析结果

参数分析结果						
$\varphi'$	$c'=0.12$	$c'=0.11$	$c'=0.1$	$c'=0.09$	$c'=0.08$	$c'=0.06$
28°	不合理	不合理	预测区偏小	合理	不合理	不合理
26°	不合理	不合理	预测区偏小	合理	不合理	不合理
22°	不合理	不合理	合理	合理	不合理	不合理
21°	不合理	不合理	合理	预测区偏大	不合理	不合理
18°	不合理	预测区偏小	合理	不合理	不合理	不合理
14°	不合理	预测区偏小	预测区偏大	不合理	不合理	不合理

是摩擦性和黏聚力的不同组合。在具体应用当中可以根据潜在滑坡区岩土体的摩擦性(与有效内摩擦角 $\varphi'$ 对应)和黏聚力(与黏性系数 $c'$ 相对应)从本区域适合的参数范围(见表3—5)内确定合理值,例如摩擦性小、黏性大的(黏性)岩土体可选择 $\varphi'$ 值小而 $c'$ 值大的组合,而摩擦性大、黏性小的(砂性)岩土体可选择 $\varphi'$ 值大而 $c'$ 值小的组合。

王涛等(2013)关于汶川地震重灾区工程地质岩组结构面强度的经验取值为:坚硬岩组取 $\varphi'=28^\circ$ ,  $c'=0.15$ ;较硬岩组取 $\varphi'=26^\circ$ ,  $c'=0.14$ ;较软岩组取 $\varphi'=18^\circ$ ,  $c'=0.08$ ,将本文方法得到的青川县坚硬岩组、较硬岩组、较软岩组这3种岩组的岩土体强度参数分析结果(表3—5)与其对比可知,王涛等(2013)采用的岩土体强度参数取值与本文得到的3种不同岩组较为合理的岩土体强度参数取值范围存在差异,具体表现为:针对青川县研究区,其对坚硬岩组和较硬岩组的岩体强度参数取值偏大,滑坡预测位移偏保守,而对较软岩组的岩土体强度参数取值偏小,预测滑坡位移极高危险区域的范围偏大,极高危险区与实际滑坡分布位置对应关系的可识别度相对较低。

5 讨论与结论

岩土体强度参数作为重要的计算参数,对研究区地震滑坡易发等级和高发位置的评估精度具有显著影响。本文基于简化纽马克位移模型,利用ArcGIS软件计算分析青川地区不同地质岩组不同岩土强度参数组合下的地震滑坡位移,并将位移预测结果与2008年汶川 $M_s8.0$ 地震实际滑坡调查资料进行对比,根据预测结果与实际滑坡数量及位置的吻合程度,评价计算结果可靠性并确定区域岩土体强度参数合理取值区间。分析结果表明,合理岩土体强度参数组合计算得到的滑坡极高危险区与实际滑坡点的分布具有一致性,因此采用基于实际滑坡调查数据确定区域岩土体强度参数方法,对区域岩组强度参数取值具有适用性和可行性。上述方法确定的地震滑坡参数可作为本区域地震滑坡分析的重要参考,可以弥补《工程岩体分级标准GB 50218—94》(中华人民共和国水利部,1995)建议参数局部区域使用的不足。

本文所得青川县3类岩组岩土体强度参数的合理取值范围与王涛等(2013)岩土体强度参数取值有一定差别,这是否可以解释王涛等(2013)提出的评估结果存在局部地段欠佳问题,尚需进一步验证分析。另外,研究区地震烈度分布较为单一,实际滑坡分布与预测滑坡区域的定性对比仍存在主观因素的干扰,因此如何对多烈度分布区域进行滑坡预测精度的定量分析,也需要进一步探讨和完善。此外,利用静态安全系数公式计算时,岩土体重度和潜在滑坡体的厚度这两个参数的取值均会对计算结果产生一定影响,如何确定上述参数的

合理取值, 也需要进行更深入的研究。

## 参 考 文 献

- 陈成, 胡凯衡. 2017. 汶川、芦山和鲁甸地震滑坡分布规律对比研究[J]. 工程地质学报, **25**(3): 806–814.
- Chen C, Hu K H. 2017. Comparison of distribution of landslides triggered by Wenchuan, Lushan and Ludian earthquakes[J]. *Journal of Engineering Geology*, **25**(3): 806–814 (in Chinese).
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 2010. 考虑场地效应的 ShakeMap 系统研究[J]. 中国地震, **26**(1): 92–102.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T. 2010. Research on ShakeMap system in terms of the site effect[J]. *Earthquake Research in China*, **26**(1): 92–102 (in Chinese).
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 2011. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震震动图[J]. 中国地震, **27**(1): 99–102.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T. 2011. ShakeMap of the April 14, 2010 Yushu earthquake, Qinghai Province[J]. *Earthquake Research in China*, **27**(1): 99–102 (in Chinese).
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 亢川川. 2015. 2014 年 2 月 12 日新疆于田 7.3 级地震震动图[J]. 地震地质, **37**(2): 524–528.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T, Kang C C. 2015. ShakeMap of the Yutian, Xinjiang  $M_{7.3}$  earthquake on 12 Feb 2014[J]. *Seismology and Geology*, **37**(2): 524–528 (in Chinese).
- 秦胜伍, 马中骏, 刘绪, 李广杰, 彭帅英, 陈骏骏, 翟健健. 2017. 基于简化 Newmark 模型的长白山天池火山诱发崩塌滑坡危险性评价[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, **47**(3): 826–838.
- Qin S W, Ma Z J, Liu X, Li G J, Peng S Y, Chen J J, Zhai J J. 2017. Hazard assessment of collapse and landslide induced by Tianchi Volcano in Changbai Mountain area based on simplified Newmark displacement model[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, **47**(3): 826–838 (in Chinese).
- 秦绪文, 杨金中, 张志, 黄洁, 余德清, 陈有明, 张过, 谷延群. 2009. 汶川地震灾区航天遥感应急调查[M]. 北京: 科学出版社: 243–247.
- Qin X W, Yang J Z, Zhang Z, Huang J, Yu D Q, Chen Y P, Zhang G, Gu Y Q. 2009. *Remote Sensing Emergency Survey in Wenchuan Earthquake Area*[M]. Beijing: Science Press: 243–247 (in Chinese).
- 宋志, 倪化勇, 周洪福, 冯伟. 2016. 基于多层次物理力学参数的小区域地震滑坡危险性评估: 以长江上游石棉县城及周边为例[J]. 地质力学学报, **22**(3): 760–770.
- Song Z, Ni H Y, Zhou H F, Feng W. 2016. Risk assessment of seismic landslide within small region based on multi-level physical and mechanical parameters: A case study of Shimian and adjacent areas in the upper reaches of Yangtze river[J]. *Journal of Geomechanics*, **22**(3): 760–770 (in Chinese).
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 阎秀杰. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, **16**(2): 99–106.
- Wang S Y, Yu Y X, Gao A J, Yan X J. 2000. Development of attenuation relations for ground motion in China[J]. *Earthquake Research in China*, **16**(2): 99–106 (in Chinese).
- 王涛. 2010. 汶川地震重灾区地质灾害危险性评估研究[D]. 北京: 中国地质科学院: 36–37.
- Wang T. 2010. *Study on Seismic Landslide Hazard Assessment in Wenchuan Earthquake Severely Afflicted Area*[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences: 36–37 (in Chinese).
- 王涛, 吴树仁, 石菊松, 辛鹏. 2013. 基于简化 Newmark 位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估: 以汶川  $M_{5.8}$  级地震为例[J]. 工程地质学报, **21**(1): 16–24.
- Wang T, Wu S R, Shi J S, Xin P. 2013. Case study on rapid assessment of regional seismic landslide hazard based on simplified Newmark displacement model: Wenchuan  $M_{5.8}$  earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, **21**(1): 16–24 (in Chinese).
- 王涛, 吴树仁, 石菊松, 辛鹏. 2015. 地震滑坡危险性概念和基于力学模型的评估方法探讨[J]. 工程地质学报, **23**(1): 93–104.
- Wang T, Wu S R, Shi J S, Xin P. 2015. Concepts and mechanical assessment method for seismic landslide hazard: A review[J]. *Journal of Engineering Geology*, **23**(1): 93–104 (in Chinese).
- 王秀英, 聂高众, 王登伟. 2009. 利用强震记录分析汶川地震诱发滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(11): 2369–2376.
- Wang X Y, Nie G Z, Wang D W. 2009. Analysis of landslide induced by Wenchuan earthquake by strong motion records[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **28**(11): 2369–2376 (in Chinese).
- 徐培彬. 2014. 基于强震动参数地震滑坡评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 35–37.
- Xu P B. 2014. *Based on Strong Motion Earthquake Landslide Assessment Methods*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 35–37 (in Chinese).
- 袁一凡. 2008. 四川汶川 8.0 级地震灾害损失评估[J]. 地震工程与工程振动, **28**(5): 10–19.
- Yuan Y F. 2008. The earthquake disaster loss evaluation[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **28**(5): 10–19 (in Chinese).
- 中华人民共和国水利部. 1995. 工程岩体分级标准 GB 50218—94[S]. 北京: 中国计划出版社: 1–20.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 1995. *Standard for Engineering Classification of Rock Masses GB 50218—94*[S]. Beijing: China Planning Press: 1–84 (in Chinese).
- 中华人民共和国建设部. 2014. 建筑边坡工程技术规范 GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 1–199.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. 2014. *Technical Code for Building Slope Engineering GB 50330—2013*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 1–199 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家标准化管理委员会. 2015. 中国地震动参数区划图 GB 18306-2015[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–242.
- Standardization Administration of the Peoples Republic of China. 2015. *Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China GB 18306—2015*[S]. Beijing: Standards Press of China: 1–242 (in Chinese).
- Dreyfus D, Rathje E M, Jibson R W. 2013. The influence of different simplified sliding-block models and input parameters on regional predictions of seismic landslides triggered by the Northridge earthquake[J]. *Eng Geol*, **163**: 41–54.
- Jibson R W. 1993. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis[J]. *Trans Res Record*, **1411**: 9–17.
- Jibson R W. 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement[J]. *Eng Geol*, **91**(2/3): 209–218.
- Jibson R W, Harp E L, Michael J A. 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. *Eng Geol*, **58**(3/4): 271–289.
- Keefer D K. 1984. Landslides caused by earthquakes[J]. *Geol Soc Am Bull*, **95**(4): 406–421.
- Keefer D K, Wilson R C. 1989. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments[J]. *Landslides in A Semi-Arid Environment*, **2**: 118–149.
- Miles S B, Ho C L. 1999. Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **18**(4): 305–323.
- Newmark N M. 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. *Géotechnique*, **15**(2): 139–160.
- Wilson R C, Keefer D K. 1983. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote lake, California, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(3): 863–877.