

陕西省宝鸡市陈仓区吴家沟滑坡风险评价

韩金良¹, 燕军军², 孙炜锋¹, 王 涛¹, 姜 茂², 侯 凯², 李志科²

HAN Jin-liang¹, YAN Jun-jun², SUN Wei-feng¹,

WANG Tao¹, JIANG Mao², HOU Kai², LI Zhi-ke²

1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室/中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources/*

Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing. 100081, China;

2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

摘要:吴家沟滑坡是 2008 年汶川 Ms 8.0 级大地震触发的黄土塬边的一个中型滑坡。在野外调查、室内分析测试和滑坡稳定性计算的基础上,参照前人的研究成果,分 2 种情况对该滑坡进行了地质灾害风险评估,为防灾减灾提供决策依据。评估结果表明,在只考虑强降雨对滑坡影响的情况下,吴家沟滑坡个人风险介于 $7 \times 10^{-4} \sim 4.375 \times 10^{-5}$ 之间,位于严格详细审查区;在考虑强降雨+地震对滑坡影响的情况下,吴家沟滑坡个人风险介于 $1.32 \times 10^{-3} \sim 8.325 \times 10^{-5}$ 之间,位于不可接受区和严格详细审查区,人员社会风险位于不可接受区。

关键词:陕西吴家沟滑坡;滑坡危险性分析;风险评价

中图分类号:P694

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2009)08-1118-09

Han J L, Yan J J, Sun W F, Wang T, Jiang M, Hou K, Li Z K. Risk assessment of Wujiagou landslide in Chencang District, Baoji City, Shaanxi Province, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8):1118-1126

Abstract: Wujiagou landslide is a medium-scale loess landslide triggered by Wenchuan Ms 8.0 earthquake. Based on field investigation, in-door analysis and stability research, referring to previous achievements, landslide risk assessment for Wujiagou landslide has been accomplished under two different conditions in this paper. The result shows that individual risk of landslide is from 7×10^{-4} to 4.375×10^{-5} when considering only rainfall, which accord with the range of detailed investigation; when taking both rainfall and earthquake into consideration, the individual risk is from 1.32×10^{-3} to 8.325×10^{-5} which belong to the range of acceptable and detailed investigation, while the social risk is unacceptable.

Key words: Wujiagou landslide in Shaanxi Province; fatalness analysis of landslide; risk assessment

经过近 30 年的发展,地质灾害风险评估从定性评价、半定量评价发展到现今的定量评价,评价的范围也从区域风险评价发展到区域风险评价与场地风险评价、单体风险评价并举,地质灾害风险评估的理论、方法和技术也不断完善,构建了地质灾害风险评估的理论框架和工作流程,建立了一套方法技术

体系,并取得了明显的经济效益和显著的减灾效果^[1-27]。但是也应该看到,地质灾害风险评估的许多技术和方法还不完善,有许多关键问题还没有解决^[7,10-11,18]。其中,滑坡的发生概率、承灾体的易损性是 2 个最大的难点,制约着滑坡风险评估工作的顺利开展。受滑坡历史数据、研究程度等因素的限制,

收稿日期:2009-05-20;修订日期:2009-06-17

地调项目:国家“十一五”科技支撑项目《地质灾害风险评估技术研究》(编号:2006BAC04B05)、地质力学研究所基本科研业务费项目《宝鸡市重大滑坡监测预警研究》(编号:DZLXJK200718)和中国地调局项目《宝鸡市地质灾害详细调查》(编号:1212010640401)资助

作者简介:韩金良(1966-),男,博士,研究员,从事地质灾害、活动断裂和地壳稳定性评价方面的研究。E-mail:guodong4061988@sina.com

滑坡的发生概率、承灾体的易损性往往难以估算,而这 2 种参数是滑坡风险评估的关键,直接影响到滑坡风险评估结果的可靠性,因此是今后滑坡风险评估中应着力解决的问题。

与发达国家和地区相比,中国大陆地质灾害风险评估起步较晚,地质灾害风险评估的国家标准还没有制定,制约了地质灾害风险评估的深入开展。目前,在地质灾害防治过程中存在 2 种倾向:一方面是地质灾害风险意识较差,有的城镇坐落在活动断裂上,有的城镇被不稳定的斜坡、滑坡和泥石流所包围,一旦遇到强烈的地震和大暴雨,就会遭受灭顶之灾。例如:四川省北川县县城和青川县县城都位于活动断裂带上,2 个县城周围的斜坡也极不稳定。北川县在汶川大地震中遭受了严重的生命财产损失,地震诱发的一处大滑坡将 1600 余人掩埋,可谓雪上加霜;青川县城在这次大地震中损失也很严重,面临灾后搬迁与否的问题。另一方面是存在盲目搬迁的问题,造成不必要的经济损失,有的还导致因灾致贫,值得关注。

近年来随着中国经济的高速发展,特别是西部大开发的不断推进,人地关系越来越紧张,加上近期气候异常变化的影响,气象地质灾害频繁发生,造成巨大的生命财产损失。特别是 2008 年汶川大地震触发了数以万计的崩塌和滑坡,并导致大量的人员伤亡,再次向人们敲响了警钟。因此,迫切需要加强地质灾害风险评估工作,尤其是处于地质灾害高风险地区的城镇、乡村和重大工程场地的地质灾害风险评估应抓紧时间落实,以便为这些地方的地质灾害风险管理和控制、为中国的防灾减灾和社会的可持续发展提供技术支撑。

同时,地质灾害风险评估也是改变前述 2 种倾向的有效途径之一。这是因为通过制定地质灾害风险评估的国家标准及相应的法规,加上舆论宣传等手段,可以不断地增强各级政府和广大居民的风险意识,防止盲目开发和建设,自觉地维护公众和自身的安全,以免造成不必要的生命财产损失,否则投入越多将来损失越大的悲剧将会不断重演;另一方面通过风险评估可以帮助决策者和业主作出合理的决定,即对于处于高风险地区的居民及时采取搬迁、灾害治理和监测预警等风险减缓措施,而地质灾害风险处于可接受范围以内的地方可以不必搬迁,避免不必要的浪费。

本文在野外调查、室内分析测试和滑坡稳定性计算的基础上,参照前人的研究成果,对吴家沟地震黄土滑坡进行了地质灾害风险评估。文中在滑坡发生的概率计算方面做了一些探讨,即在分析降雨、地震与滑坡的相互关系的基础上,确立滑坡发生的临界降雨强度,然后根据滑坡的主要触发事件(强降雨和地震)的频率确定滑坡发生的概率。

1 吴家沟滑坡的概况

吴家沟位于陈仓区桥镇吴家村,地貌上处于贾村黄土塬边一南北向的黄土梁的端部(处于三面临空状态),位于吴家沟大型老滑坡体的后缘。沟底到贾村塬顶的高差为 240 m,到吴家沟地震滑坡后缘的高差约为 120 m。黄土塬边斜坡呈明显的二元结构,即上部由黄土、古土壤组成,下部由三门系砂层、砾石层、含钙质结核粘土组成(图 1 至图 4)。

2008 年汶川 Ms 8.0 级地震震动大半个中国,宝鸡市陈仓区属于重灾区,地震烈度为 VI 度。据中国强震台网的观测结果,宝鸡市南北方向的水平峰值加速度为 -90.074 gal ,垂向峰值加速度为 34.316 gal 。陈仓区政府所在地南北方向的水平峰值加速度为 107.921 gal ,垂向峰值加速度为 49.143 gal ^[28]。强烈的地震加上有利的地形条件,导致了南北向的黄土梁的端部地震滑坡的形成。

该滑坡体东西宽 150~200 m,南北长约 50 m,厚 30~40 m,体积约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 5° ,平面上呈向北撒开的扇形,滑坡体由黄土和古土壤组成。其显著特征是滑坡的边界较清楚,左边界由一系列右行雁列的地裂缝构成,左行走滑特征明显,裂缝一般长 5~10 m,宽 2~4 cm;与左边界相对应,右边界由一系列左行雁列的地裂缝构成,右行走滑特征明显。此外,在滑坡体的后部出现一条规模较小的地裂缝,长约 5 m。力学分析结果表明,该滑坡整体向北运动。目前,该滑坡处于较不稳定的状态,威胁滑坡体下方 90 人的安全(图 1 至图 4)。

滑坡区的构造条件与地震活动:滑坡区处于陇县—马召北西向断裂、固关—虢镇北西向断裂、桃园—龟山寺北西向断裂和渭河北缘等近东西向断裂的交会部位。自公元前 780 年以来,对滑坡所在地区影响较大的地震包括:公元前 780 年岐山 7 级地震,1654 年天水南 8 级地震(滑坡区烈度 6~7 度),1556 年华县 8.25 级地震(滑坡区烈度 6~7 度),1920 年海原

8.5 级地震(滑坡区烈度 6~7 度)^[29-33]。据宝鸡县县志记载,公元前 780 年,“西周三川皆震”,“是岁也,三川竭,岐山崩”,震中在岐山县(E107°48′、N34°30′),震级 7 级,滑坡区烈度为 8 度。据中国地震动参数区划图,滑坡所在的地区地震烈度为Ⅶ度,相应的未来 50 年超越概率 10%的地震动峰值加速度为 0.15g^[34]。

滑坡区的气象条件:滑坡区地处中纬度地带,属于暖温带大陆性季风气候,冬冷夏热,春干燥秋潮湿,四季分明。宝鸡地区多年平均降雨量在 600 mm 以上,宝鸡市 57 年(1952—2008 年)的年平均降雨量为 644.3 mm,其中 1958 年、1964 年、1968 年、1975 年、1980 年、1981 年、1983 年和 1984 年年降雨量均超过 1000 mm,1981 年降雨量高达 1149.1 mm,为历史最高纪录。1997 年年降雨量为 577.8 mm,为历史最低纪录。日最大降雨量为 169.7 mm/d(1980 年 8 月 23 日)。降雨的特点多为连阴雨、暴雨和连阴雨加暴雨,并且降雨主要集中在每年的 6—10 月份。

2 滑坡危险性评价

滑坡体主要由黄土和古土壤组成,黄土和古土壤均属于粘质粉土的范畴,物理力学指标的平均值见表 1。需要说明的是,样品采自滑坡附近的钻孔

中,由于在钻进过程中采用了泥浆护壁工艺,样品的含水率偏高。

本文采用传递系数法分 3 个工况(天然状态、天然状态+强降雨、天然状态+强降雨+地震)分别计算



图 1 吴家沟滑坡遥感影像

Fig. 1 Remote sensing image of Wujiagou landslide



图 2 吴家沟滑坡照片

Fig. 2 Photo of Wujiagou landslide

表 1 吴家沟滑坡黄土和古土壤物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical indices of loess and paleosol in Wujiagou landslide

含水率 /%	密度 /g·cm ⁻³	干密度 /g·cm ⁻³	孔隙比	比重	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	液性 指数	压缩模 量/MPa	粘聚力 /kPa	内摩擦 角/°
23.09	1.97	1.6	0.730	2.72	89.8	33.9	20	13.9	0.22	7.35	58.76	16.74

滑坡的稳定系数。需要说明的是:天然状态+强降雨是指在长期高强度降雨的条件下土体处于饱和状态,根据试验结果其内摩擦角为 3°,粘聚力为 4 kPa;天然状态+强降雨+地震是指在长期降雨条件下土体处于半饱和状态(其内摩擦角为 8°,粘聚力为 25 kPa),与此同时强烈的地震发生,沿主滑方向(正北)水平方向地震动峰值加速度为 0.15 g。

2.1 计算过程

土体在天然状态下密度是 1.97 g/cm³,在饱和状态下密度是 2.19 g/cm³;重度分别是 19.306×10³kN/m³和 21.462×10³kN/m³。

将滑坡剖面按几何形状分成 7 个条块,滑带的圆弧面近视为折线段,从上向下依次进行受力分析,分别求出抗滑力和下滑力,依据公式计算出传递系数,算出最后一个块体的累计剩余下滑力和累计剩余抗滑力,求出不同安全系数下的剩余力,计算滑坡的安全系数。

本文采用《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)和《滑坡防治工程勘查规范》(DZ/T 0218-2006)的稳定性计算公式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n}$$

(1)

$$R_i = (N_i - N_{wi} - R_{Di}) \tan \Phi_i + c_i L_i$$

(2)

$$N_i = Q_i \cos \theta_i$$

(3)

$$T_i = Q_i \sin \theta_i + T_{Di}$$

(4)

$$\psi_i = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \Phi_{i+1}$$

(5)

第 i 块土体推力计算的基本公式:

$$P_i = P_{i-1} \times \psi_j + F_{si} \times T_i - R_i$$

(6)

式中: F_s —稳定系数; Q_i —第 i 块段滑体的重力(kN/m),暴雨时为该块段的饱水自重; R_i —作用于第 i 块

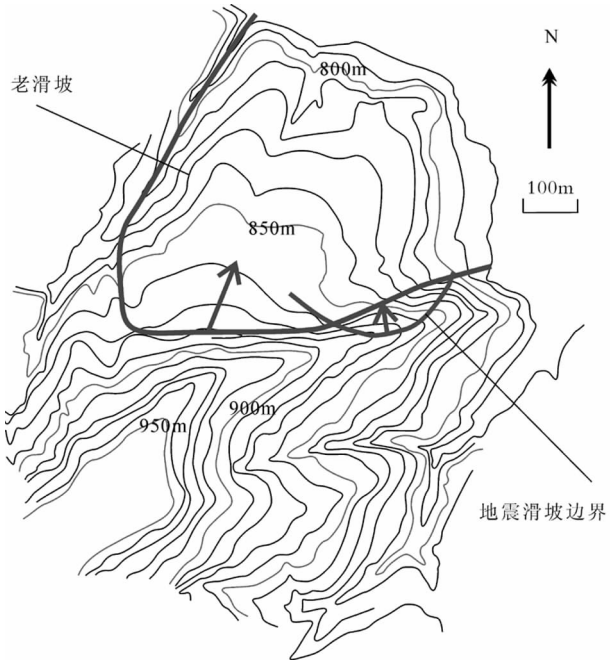


图 3 吴家沟滑坡平面图
Fig. 3 Plane map of Wujiagou landslide

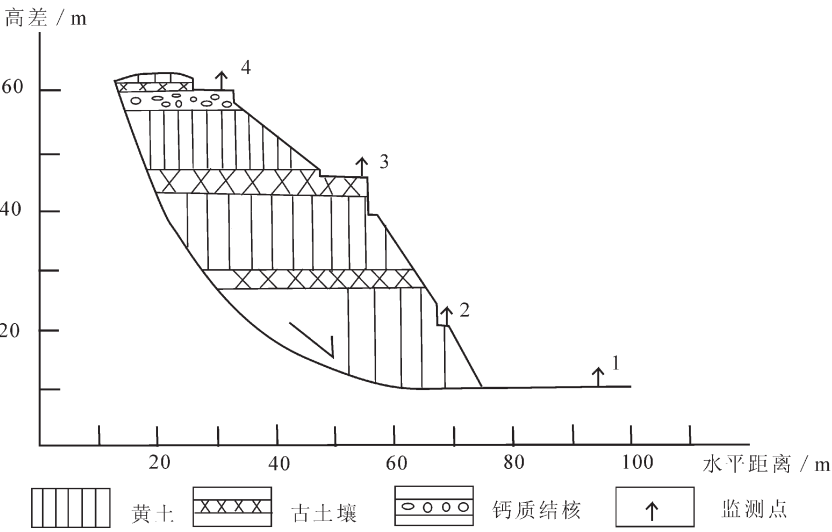


图 4 吴家沟滑坡剖面图
Fig. 4 Profile of Wujiagou landslide

段的抗滑力 (kN/m); N_i —第 i 块段滑动面的法向力 (kN/m); N_{ui} —孔隙水压力 (kN/m): $N_{ui}=\gamma_w h_{ui} L_i$; T_{Di} —渗透压力产生的平行滑面的分力 (kN/m): $T_{Di}=\gamma_w h_{ui} L_i \cos \theta_i \sin \beta_i \cos (\theta_i - \beta_i)$; R_{Di} —渗透压力产生的垂直滑面的分力 (kN/m): $R_{Di}=\gamma_w h_{ui} L_i \cos \theta_i \sin \beta_i \sin (\theta_i - \beta_i)$; ψ_i —第 i 块段土的内摩擦角($^{\circ}$); c_i —第 i 块段土的粘聚力(kPa); L_i —第 i 块段滑动面的长度(m); T_i —作用于第 i 块段滑动面上的滑动分力(kN/m); ψ_i —第 i 块段的剩余下滑力传递至 $i+1$ 块段的传递系数($j=i$); θ_i —第 i 块段滑动面与水平面的夹角($^{\circ}$); β_i —第 i 块段地下水位线与水平面的夹角($^{\circ}$); γ_w —水容重; $h_{ui} L_i$ —第 i 块段水位线以下滑体的重力(kN/m); P_i 、 P_{i+1} —分别为第 i 块、第 $i+1$ 块滑体的剩余下滑力(kN/m); F_{si} —推力计算安全稳定系数。

在计算过程中没有考虑水压力的作用,在饱 和状态下按总容重进行计算,由于水的作用,土的 摩擦角和粘聚力急剧降低,滑坡安全系数也急剧 下降。

在地震力作用时,将地震力进行切向和法向的 分解,并与重力进行合成和分解。

2.2 计算结果

天然状态下滑坡的稳定系数为 0.8744;天然状 态+强降雨条件下滑坡的稳定系数为 0.1071;天然 状态+强降雨+地震条件下滑坡的稳定系数为 0.0835。由此可见,在天然状态下,滑坡已处于临 界—较不稳定状态,而在强降雨和强降雨+地震条 件下滑坡将会整体失稳破坏。

3 滑坡整体失稳概率估算

滑坡发生的概率是风险评估所必需的一个参 数。概率的计算方法主要有 2 种:第一种通过计算斜 坡的失稳概率来获得;另一种通过对过去滑坡事件 的统计分析,特别是通过对过去滑坡频率的评价来 获得。反过来,滑坡的时间频率可以基于区域内滑坡 触发事件的重现期来确定^[2,12]。

宝鸡地区滑坡的触发因素主要包括:降雨、地 震和人类工程活动,这里主要考虑前两者的影响。 本文在分析降雨与滑坡相互关系的基础上,结合 邻区已有的研究成果和滑坡稳定性评价的结果, 判定该滑坡的临界降雨量和临界地震震级,然后 根据强降雨和强震的复发周期确定滑坡失稳的年 概率。

3.1 降雨资料与滑坡的活动历史分析

(1)降雨资料统计分析

宝鸡市降雨资料统计分析结果表明,1952— 2008 年之间有 19 个月的月降雨量超过 200 mm,其 中 1981 年 8 月降雨量高达 410.6 mm。1951 年 9 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日,暴雨(≥ 50 mm/d)日数为 52 天,即暴雨的年概率为 0.907,有 12 天降雨量超过 70 mm,年概率为 0.209;日最大降雨量为 169.7 mm/d (1980 年 8 月 23 日)。

宝鸡县(陈仓区)28 年(1980—2007 年)的降雨 资料统计结果表明,有 5 次每小时降雨量超过 30 mm (1992 年 8 月 12 日 3~4 时降雨量最大,为 54.6mm/h),年概率为 0.176。据宝鸡县县志记载,1985 年 5 月 3 日 14 时 30 分至 17 时 30 分,天王镇降雨量达到 130 mm。1987 年 8 月 9 日,上王乡一带 33 分钟降雨 量达 45 mm。1989 年 7 月 15 日零时 40 分至 16 日 12 时,县功一带降雨量达 288~300 mm,导致大量崩 塌、滑坡的发生。

宝鸡市 1952 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日 的降雨资料统计结果表明,有 31 次过程降雨量超过 100 mm,年概率为 0.544;有 19 次过程降雨量超过 150 mm,年概率为 0.333;有 4 次过程降雨量超过 200 mm(1975 年 8 月 31 日—10 月 3 日,1981 年 8 月 14 日—24 日,2003 年 8 月 20 日—9 月 6 日,2005 年 9 月 20 日—10 月 6 日),年概率为 0.07。

宝鸡县县城 1981 年 8 月 14—24 日,过程降雨 量为 316 mm(宝鸡市市区为 360.5 mm),1981 年 8 月 21 日降雨量为 96.8 mm(宝鸡市市区为 116.3 mm),1 小时最大降雨量为 42.5 mm。年概率(过程降雨量 ≥ 200 mm,日降雨量 ≥ 70 mm,1 小时降雨量 ≥ 30 mm) 为 0.0175。

(2)宝鸡地区崩塌、滑坡、泥石流活动历史

历史上 1975 年、1981 年、1982 年、1984 年、1989 年、1998 年、2003 年和 2005 年的强降雨曾经导致大 量滑坡的发生。

据宝鸡县县志记载,1975 年 9—11 月连阴雨不 断,48 天内降雨量达 425.3 mm。此次降雨导致陇县 和宝鸡县西部山区多处崩塌和滑坡的发生。1981 年 8 月宝鸡地区普降大暴雨,大暴雨触发了大范围的 崩、滑、流,导致陇海铁路、宝成铁路交通中断。例如, 此次强降雨导致岐山县蔡家坡老滑坡重新复活,整 体下错 3 m。

据岐山县县志记载,1984 年 7 月下旬出现连阴雨和局部大暴雨,降雨量达 266.4 mm,形成滑坡 83 处。

1989 年 7 月 15 日至 19 日,特大暴雨袭击宝鸡地区,导致千阳县 7 人死亡,宝平公路发生泥石流 16 处、滑坡 5 处、塌方 57 处。2005 年 9 月 18 日至 10 月 6 日,宝鸡地区特别是陇山地区普降大雨,过程降雨量超过 200 mm,导致 60 多处崩塌、滑坡和泥石流的发生。例如:宝鸡县凤阁岭镇磨沟泥石流不仅冲毁了多处民房,而且将陇海线铁路桥桥墩冲坏,铁路交通被迫中断。

(3) 临界降雨量

根据宝鸡地区的降雨资料和滑坡历史资料,结合邻区的研究成果,初步确立宝鸡地区黄土滑坡的临界降雨量阈值:①1 小时降雨量大于等于 30 mm,②1 日降雨量大于等于 70 mm,③过程降雨量大于等于 200 mm。

降雨量满足上述一个条件就可导致局部滑坡灾害的发生,同时满足上述条件中的 2 条便可导致较大范围的滑坡灾害的发生,如果同时满足上述 3 个条件便可导致大范围滑坡灾害的发生。历史上 1975 年、1981 年、1982 年、1984 年、1989 年、1998 年、2003 年和 2005 年的强降雨曾经导致大量滑坡的发生。

3.2 导致滑坡整体失稳的强降雨发生的概率估算

根据滑坡的基本特征和稳定性计算结果,判定滑坡将在同时满足过程降雨量大于等于 200 mm,日降雨量大于等于 70 mm 和 1 小时降雨量大于等于 30 mm 的条件下整体失稳,宝鸡市自有降雨记录以来的 57 年降雨中,仅出现 1 次上述降雨事件,发生的年概率为 0.0175。

3.3 强降雨+地震事件的概率估算

这里所说的强降雨是指导致滑坡体处于特定饱和状态的强降雨,以过程降雨量超过 150 mm 为基准。宝鸡市降雨资料的统计结果表明,1952 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日,有 19 次过程降雨量超过 150 mm,年概率为 0.3333。

前已述及,自公元前 780 年以来历史上共有 4 次强震对滑坡区影响较大,但是受地震资料的限制很难估算强震的年发生概率。本文的地震概率以中国地震动参数区划图为依据,即未来 50 年以内地震动峰值加速度达到 0.15 g 的年概率为 0.1。因此,强降雨+地震事件的年概率为 $0.3333 \times 0.1 = 0.0333$ 。

3.4 滑坡的活动强度评价

滑坡的强度一般是指位移量、速度、动能等,本文只讨论位移问题。近年来一些学者对黄土滑坡的基本特征、黄土斜坡对地震的响应和黄土滑坡的空间预测进行了研究,取得了一些新成果:黄土层内滑坡具有滑速快、滑距远的特点。黄土滑坡发生时水平滑移距离的大小与滑坡的滑出条件、黄土的基本特性、滑坡的触发因素密切相关^[35-42]。1932 年 12 月 25 日沿昌马断裂发生 7.5 级地震,此次地震触发了大量的滑坡。王兰民^[39]通过统计分析建立了滑坡的垂直滑距和水平滑距的经验公式: $L=8.5438+1.8437H$,其中 L 为水平滑距, H 为垂直滑距。李保雄^[40]在对 50 多个典型黄土滑坡灾害实例反演研究的基础上,也提出一个经验公式: $L(x)=n \times \Delta H / 0.5 \tan \Phi$,其中 ΔH 为高差, Φ 为黄土的综合内摩擦角, n 为滑坡体滑出条件系数,介于 0.1~1 之间。 $n=0.3$ —滑坡堆积区地势狭窄,前方分布有永久性建筑物及大型阻滑体; $n=0.4$ —剪出口位于坡脚附近,滑坡堆积区地势狭窄,前方有大型阻滑体; $n=0.5$ —剪出口位于坡脚,滑坡堆积区地势开阔,分布有临时建筑物; $n=0.8$ —滑坡临空面开阔,滑坡前方地势平坦,无大型阻碍体。王念秦等^[42]通过对甘肃黑方台黄土滑坡的统计,也得出了一个经验公式: $L=-124.96-1.86h+3.13H+3.24\theta+2.87I$,其中 H 为斜坡高度(m), h 为黄土厚度(m), θ 为斜坡坡度(°), I 为滑动前滑体长度(m), L 为堆积区滑体长度(m)。依据上述经验公式计算的滑坡位移量见表 2。

由此可见,滑坡的位移量在 100~170 m 之间,位移量大于 100 m 的可能性极大。

4 人员易损性分析

吴家沟村的民房均为砖混结构的平房,共有 27 处民房,尚有陪房 30 多间,陪房以砖混结构为主,还包括少量的土木结构的陪房。受滑坡影响的民房有 20 处(包含陪房),潜在财产损失 200 万元,受威胁人口 90 人。

人员易损性划分主要根据滑坡体的运动特征、可能的最大滑移速率和距离、居民区所处的位置、房屋的结构、人员的年龄结构等综合考虑。易损性的评价结果为:居住在靠近滑坡前缘的 10 户居民的易损性为 0.1,中间部位的 6 户居民的易损性为 0.05,另外 4 户居民的易损性为 0.025。

表 2 吴家沟滑坡位移量计算结果
Table 2 Displacement of Wujiagou landslide

计 算 公 式	滑坡位移/m	备 注
$L=8.5438+1.8437H$	111.8	地震黄土滑坡
$L(x)=n\times\Delta H/0.5\lg\Phi$	103.7	$n=0.3$
$L(x)=n\times\Delta H/0.5\lg\Phi$	172.9	$n=0.5$
$L=-124.96-1.86h+3.13H+3.24\theta+2.87I$	137.7	

5 风险估算

本文分 2 种工况分别计算吴家沟村居民的风险。

5.1 只考虑强降雨的风险估算

个人风险按下式计算：

$$R_{(LOI)}=P_{(I)}\times P_{(TI)}\times P_{(ST)}\times V_{(DT)} \tag{7}$$

式中： $R_{(LOI)}$ —人员年死亡人数； $P_{(I)}$ —滑坡的整体失稳概率； $P_{(TI)}$ —滑坡到达承灾体的概率，滑坡到达靠近滑坡前缘的 10 户民房的概率为 1，到达中间部位的 6 户民房的概率为 0.5，到达另外 4 户民房的概率为 0.25； $P_{(ST)}$ —承灾体的时空概率，假设居民每天有 10 个小时呆在房子中，则概率为 0.4； $V_{(DT)}$ —一人对滑坡的易损性。

则居住在滑坡前缘的 10 户居民个人风险： $R_{(LOI)}=P_{(I)}\times P_{(TI)}\times P_{(ST)}\times V_{(DT)}=0.0175\times1\times0.4\times0.1=7\times10^{-4}/\text{年}$ ；居住在中间部位的居民的个人风险： $R_{(LOI)}=P_{(I)}\times P_{(TI)}\times P_{(ST)}\times V_{(DT)}=0.0175\times0.5\times0.4\times0.05=1.75\times10^{-4}/\text{年}$ ；其余 4 户居民的个人风险： $R_{(LOI)}=P_{(I)}\times P_{(TI)}\times P_{(ST)}\times V_{(DT)}=0.0175\times0.25\times0.4\times0.025=4.375\times10^{-5}/\text{年}$ 。

5.2 强降雨+地震情况下的风险估算

(1)个人风险估算

同理可得吴家沟居住在滑坡前缘的 10 户居民的个人风险为 $1.32\times10^{-3}/\text{年}$ ，居住在中间部位的 6 户居民的个人风险为 $3.333\times10^{-4}/\text{年}$ ，其余 4 户居民的个人风险为 $8.325\times10^{-5}/\text{年}$ (图 5)。

(2)社会风险估算

在个人风险计算的基础上，分别计算 10 人和 90 人的累积年死亡概率，最后得到受险人数和累计年死亡概率的数据对，并绘制 $F-N$ 曲线。计算结果为 10 人的累积年死亡概率为 $4.17\times10^{-4}/\text{年}$ ，90 人的累积年死亡概率为 $4.63\times10^{-5}/\text{年}$ (图 6)。

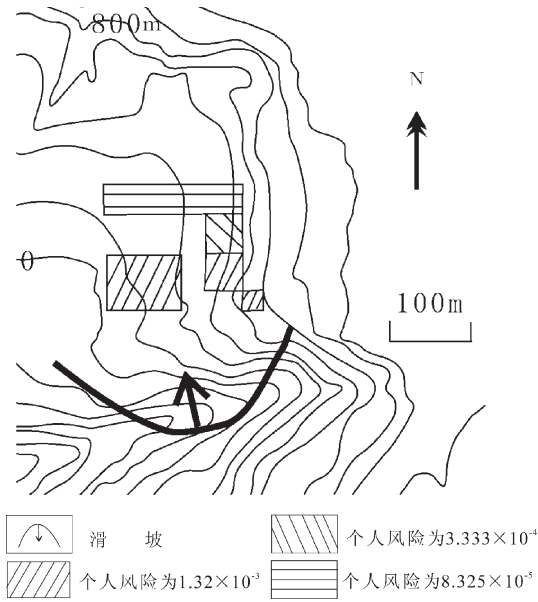


图 5 吴家沟滑坡个人风险区划
Fig. 5 Individual risk zoning of Wujiagou landslide

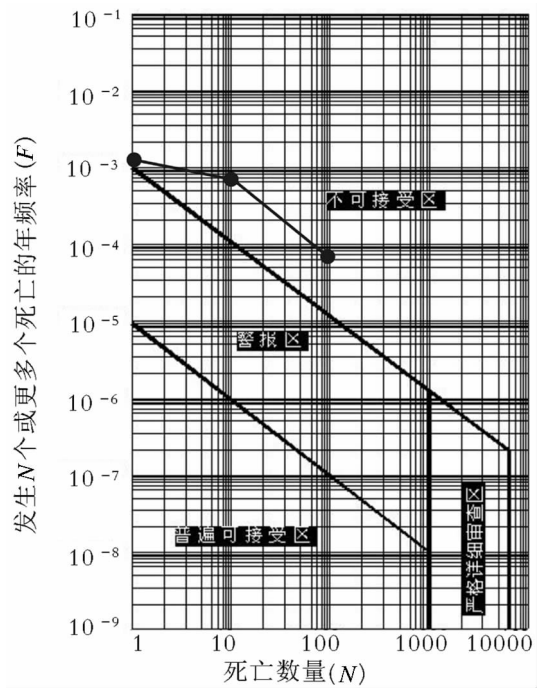


图 6 吴家沟滑坡社会风险 $F-N$ 曲线
Fig. 6 $F-N$ curve of social risk of Wujiagou landslide

6 风险评价

当得到了滑坡的风险后，为了评估滑坡风险水平是否可以接受，需要有风险接受准则作为标准，如

果滑坡风险超过了这个准则,就要采取措施控制、预防或减小滑坡风险。Fell 等^[2]在各种行业分析的基础上提出了滑坡风险的死亡人数风险接受准则,对于已建边坡,处于高危地区的人群可接受的风险是 10^{-4} ,一般人群可接受的风险是 10^{-6} 。香港政府建议把有害化学物质储存的风险接受准则作为香港地区滑坡的风险接受准则,分为不可接受的风险区 ($>10^{-3}$)、ALARP 区 ($10^{-3} \sim 10^{-5}$) 及可接受的风险区 ($<10^{-5}$), $F-N$ 曲线反映了地质灾害的发生可能导致的大于或等于 N 个人死亡的年累计概率(图 6)。如果滑坡风险部分或全部位于不可接受的风险区,那么就要采取相应的措施来降低滑坡风险,使之位于 ALARP 区或可接受的风险区^[43]。目前,中国大陆的地质灾害风险评价标准还未制定,本文采用香港地区的滑坡风险评价标准。

吴家沟滑坡风险估算结果与滑坡风险评价标准对比的结果:在只考虑强降雨对滑坡影响的情况下,吴家沟滑坡个人风险介于 $7 \times 10^{-4}/\text{年} \sim 4.375 \times 10^{-5}/\text{年}$ 之间,位于严格详细审查区;在考虑强降雨+地震对滑坡影响的情况下,吴家沟滑坡个人风险介于 $1.32 \times 10^{-3}/\text{年} \sim 8.325 \times 10^{-5}/\text{年}$ 之间,位于不可接受区和严格详细审查区,人员社会风险位于不可接受区(图 6)。

7 吴家沟滑坡风险管理

在强降雨+地震对滑坡影响的情况下,吴家沟滑坡个人风险介于 $1.32 \times 10^{-3}/\text{年} \sim 8.325 \times 10^{-5}/\text{年}$ 之间,位于不可接受区和严格详细审查区,人员社会风险位于不可接受区。为此,采取以下防治措施:将滑坡裂缝掩埋,防止雨水大量入渗。与此同时,指定群防群测人员,在雨季不定期地对滑坡进行观测。另外,为了对该滑坡的风险进行有效的管理,降低滑坡风险,大地震发生以后,笔者在吴家沟滑坡上建立了监测系统(图 4),整个监测系统由 1 个测站、1 个后视点、4 个监测桩和全站仪、棱镜组成。利用全站仪分别于 2008 年 6 月和 12 月进行了 2 次测量,监测结果表明,除了 2 号监测桩(18.2 mm/6 个月)以外,其余 3 个点的水平位移较小,均在仪器的系统误差之内;由此可见,目前该滑坡处于蠕滑阶段,这与野外调查和稳定性计算的结果相吻合。但是,仍需要对该滑坡进行连续监测,一旦出现险情,应及时组织当地居民撤离,避免人员伤亡。

8 结 论

在只考虑强降雨对滑坡影响的情况下,吴家沟滑坡个人风险介于 $7 \times 10^{-4}/\text{年} \sim 4.375 \times 10^{-5}/\text{年}$ 之间,位于严格详细审查区;在强降雨+地震对滑坡影响的情况下,吴家沟滑坡个人风险介于 $1.32 \times 10^{-3}/\text{年} \sim 8.325 \times 10^{-5}/\text{年}$ 之间,位于不可接受区和严格详细审查区,人员社会风险位于不可接受区。

致谢:在野外调查期间得到宝鸡市和陈仓区国土局工作人员的大力支持,吴树仁研究员审阅了全文,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 吴树仁. 突发地质灾害研究某些新进展[J]. 地质力学学报, 2006, 12 (2): 265-273.
- [2] Fell R, Ho K K S, Lacasse S, et al. A framework for landslide risk assessment and management[C]//The International Conference on Landslide Risk Management. Vancouver, Canada: A. A. Balkema Publishers, 2005: 3-26.
- [3] AGS. Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management. Australian geomechanics society landslide taskforce landslide zoning working group[J]. Australian Geomechanics, 2007, 42 (1): 13-36.
- [4] AGS. Commentary on guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management. Australian geomechanics society landslide taskforce landslide zoning working group[J]. Australian Geomechanics, 2007, 42 (1): 37-62.
- [5] AGS. Commentary on guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management. Australian geomechanics society landslide taskforce landslide zoning working group[J]. Australian Geomechanics, 2007, 42 (1): 63-114.
- [6] AGS. Commentary on guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management. Australian geomechanics society landslide taskforce landslide zoning working group[J]. Australian Geomechanics, 2007, 42 (1): 115-158.
- [7] 吴树仁, 石菊松, 王涛. 突发地质灾害预测评价[J]. 地质通报, 2008, 27 (11): 1753-1763.
- [8] Robin Fell, Jordi Corominas, Christophe Bonnard, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning[J]. Engineering Geology, 2008, 102 : 85-98.
- [9] Robin Fell, Jordi Corominas, Christophe Bonnard, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning[J]. Engineering Geology, 2008, 102 : 99-111.
- [10] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview[J]. Engineering Geology, 2002, 64 (1) : 65-87.
- [11] Van Westen C J, Van Asch T W J, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—Why is it still so difficult? [J]. Bull. Eng. Geol. Env.,

- 2005,64:5-23.
- [12]Jordi Corominas, José Moya. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes[J]. Engineering Geology, 2008,102: 193-213.
- [13]Wong H N. Landslide risk assessment for individual facilities[C]//The International Conference on Landslide Risk Management . Vancouver , Canada :A. A. Balkema Publishers ,2005:237-296.
- [14]Kaynia A M, Papathoma-Köhle M , Neuhäuser B, et al. Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: Application to the village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany[J]. Engineering Geology, 2008, 101: 33-48.
- [15]张梁, 张业成, 罗元华, 等. 地质灾害灾情评价理论与实践[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- [16]张春山, 吴满路, 张业成. 地质灾害风险评价方法及展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003,12(1):96-102.
- [17]成永刚. 近二十年来国内滑坡研究的现状及动态[J]. 地质灾害与环境保护, 2003,14(4):1.
- [18]石菊松, 石玲, 吴树仁. 滑坡风险评估的难点和进展[J]. 地质论评, 2007,53(6):797-806.
- [19]Fell R , Ho K K S, Lacasse S, et al. Estimating landslides motion mechanism, travel distance and velocity[C]//Hung R, Fell R, Counture R, et al. Landslide Risk Management. Vancouver, Canada: A. A. Balkema Publishers ,2005:99-128.
- [20]Leroi E, Bonnard Ch, Fell R, et al. Risk assessment and management [C]//Hung R, Fell R, Counture R, et al. Landslide Risk Management. Vancouver , Canada :A. A. Balkema Publishers ,2005:159-198.
- [21]Leroi E, Bonnard Ch, Corominas J, et al. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development[C]//Hung R, Fell R, Counture R, et al. Landslide Risk Management. Vancouver , Canada: A. A. Balkema Publishers, 2005:199-236.
- [22]Wilson R A, Moon A T, Hendrickx M, et al. Application of quantitative risk assessment to the Lawrence Hargrave Drive Project, New South Wales, Australia[C]//Hung R, Fell R, Counture R, et al. Landslide Risk Management. Vancouver , Canada :A. A. Balkema Publishers ,2005:589-588.
- [23]Thomas Nix, Oswald Marinoni. Quantitative landslide risk analysis and risk evaluation for publicly accessible geosites[M]. IAEG, 2006.
- [24]沈娜. 唐川金沙江水电站工程区典型单体滑坡风险评价探讨[J]. 云南地理环境研究, 2008,20(1):45-51.
- [25]唐亚明, 张茂省, 薛强. 陕西延安虎头岭滑坡社会风险评价[J]. 地质通报, 2008,27(11):1780-1786.
- [26]Francesca Ardizzone, Mauro Cardinali, Fausto Guzzetti, et al. Landslide hazard assessment, vulnerability, estimation, and risk evaluation at the basin scale [C]// The First World Landslide Forum, Parallel Session Volume. 2008:71-74.
- [27]Marco Uzielli , Farrokh Nadim , Suzanne Lacasse, et al. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides[J]. Engineering Geology ,2008,102 :251-256.
- [28]中国地震局震害防治司. 汶川 8 级地震未校正加速度记录[J]. 中国强震记录汇报, 2008,12(1):1-90.
- [29]中国地震局《中国岩石圈动力学图集》编委会. 中国岩石圈动力学图集[M]. 北京:中国地图出版社, 1989.
- [30]陈永明, 石玉成, 王旭东. 天水麦积山石窟地震构造环境评价[J]. 敦煌研究, 2005,5:78-82.
- [31]潘建雄, 吴业彪, 张玉油, 等. 关于 1556 年华县大地震及岳阳地震的讨论[J]. 地震地质, 1993,15(3):261-263.
- [32]冉洪流. 海原断裂带 $M \geq 6.7$ 地震概率及其震级分布[J]. 地震学报, 2004,26(6):609-615.
- [33]袁丽侠. 海原大地震极震区内烈度衰减异常探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2004,24(2):441-445.
- [34]中华人民共和国国家标准(GB18306-2001): 中国地震动参数区划图及说明书[S]. 北京:中国计划出版社, 2001.
- [35]石玉成, 王兰民, 张颖. 黄土地覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响[J]. 西北地震学报, 1999,12(2):203-208.
- [36]吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006,13(2):36-40.
- [37]徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,26(7):1297-1312.
- [38]姚清林. 中国西北黄土地区地震崩滑的分布与宏观影响因素[J]. 气象与减灾研究, 2007,30(1):41-47.
- [39]王兰民. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社, 2003:1-331.
- [40]李保雄, 王得楷. 黄土滑坡空间预报的一种新理论[J]. 甘肃科学学报, 1998,10(4):57-58.
- [41]董书宁, 李保雄. 黄土滑坡的空间预报[J]. 煤田地质与勘探, 2000,28(6):46-47.
- [42]王念秦, 张倬元, 王家鼎. 一种典型黄土滑坡的滑距预测方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2003,33(1):111-114.
- [43]李典庆, 吴帅兵. 考虑时间效应的滑坡风险评估和管理[J]. 岩土力学, 2006,27(12):2239-2249.