

岩土边坡地震崩滑及其初判准则*

Earthquake-induced landslide and avalanche

辛鸿博 王余庆

(冶金工业部建筑研究总院, 北京, 100088)

文 摘 根据我国过去近 800 年间地震诱发天然岩土边坡崩滑的事例, 研究了我国岩土边坡地震崩滑的特征, 以及边坡地震崩滑与地震动参数的关系。通过对 125 次历史地震造成的 285 例典型滑坡进行分析, 提出了预测天然岩土边坡地震崩滑的初判标准。

关键词 边坡, 地震, 滑动, 崩塌, 判别标准

中图法分类号 TU 435

作者简介 辛鸿博, 男, 1962 年生, 硕士, 冶金工业部建筑研究总院工程抗震研究所高级研究工程师。主要从事地震岩土工程学科的科学研究与技术咨询工作。

Xin Hongbo Wang Yuqing

(Central Research Institute of Building and Construction, MMI, Beijing, 100088)

Abstract Based upon data on the landslides and avalanches of natural slopes caused by earthquakes during the last 800 years, characteristics of landslides and avalanches and relationships between landslides and seismic parameters were investigated. By statistically analyzing 285 typical landslides and avalanches produced by a total of 125 earthquakes, criteria for earthquake-induced landslide and avalanche were proposed.

Key words slope, earthquake, landslide, avalanche, criterion

1 前 言*

岩土边坡地震滑动与崩塌是常见的地震灾害之一。在山区和丘陵地带, 地震诱发的岩土边坡崩滑往往分布广、数量多、危害大。例如 1920 年 12 月 16 日发生在我国宁夏海原的 $M 8.5$ 地震, 触发了 657 处大滑坡, 边坡崩滑区面积达 5 万 km^2 。因此, 近 30 年来岩土边坡地震崩滑问题引起了高度重视。但由于这一问题的复杂性, 人们对岩土边坡地震崩滑的认识与预报仍处于感性阶段, 目前代表性研究成果见文献[1, 2], 在预报方面, 国际土力学及基础工程学会地震岩土工程专业委员会(TC-4)根据日本、菲律宾、伊朗和亚美尼亚的地震资料, 推荐以震级-震中距关系曲线作为判别标准。

众所周知, 边坡地震崩滑受诸因素制约, 如边坡所在场地地质单元构造、场地地形与地貌、边坡结构和岩土材料特性、地震特征以及大气降雨等。我国幅员辽阔, 为一多山的国家, 山区约占全国总面积的 70%。随着国民经济的不断发展, 开发与保护山区资源(矿产、水电、农林等)正在紧张有序地进行, 山区城镇逐步兴起, 交通运输日益完善, 随之岩土边坡地震崩滑问题在我国山区开发与建设中也日趋突出。据笔者了解, 到目前为止我国对此课题的研究较少, 可应用成果不多。本文拟通过分析我国丰富的历史地震资料, 对我国岩土边坡地震崩滑问题作一初步探讨, 以期认

识与了解我国岩土边坡地震崩滑的特征, 以及边坡地震崩滑与地震动参数的关系。

2 历史地震及其触发的滑坡

我国是一个多地震的国家, 历史上曾发生过许多次强烈地震。根据《中国地震目录》及其他目录、年鉴的记载^[3, 4], 仅公元前 780 年—公元 1992 年, 在我国境内共发生 $M \geq 4.7$ 级的中、强烈地震已达 5 142 次以上, 地震触发的滑坡数以千计。

为了较全面地研究我国地震与边坡地震崩滑的关系, 研究中以《中国地震目录》、地震年鉴为线索, 跟踪查阅了发表的和内部提出的有关地震及其触发滑坡、崩塌的文献资料和研究报告, 搜集整理了发生在 1216 年至 1996 年间记载较为详细的 125 次地震, 及其相应的 285 例崩塌和滑坡, 其中民国前的地震为 37 次, 相应的崩滑为 93 例。有关这些地震及相应滑坡、崩塌的史料详见文献[5]。

研究发现, 过去我国大量岩土边坡地震崩塌与滑动主要发生在多震的西部地区, 即陕西、贵州、宁夏、四川、云南、甘肃、西藏和新疆地区, 其中发生边坡地震崩滑最多的为四川和云南两省。在这 125 次地震中, 西部地区占了 75%, 相应的崩滑边坡占 77%。故此, 在研究我国岩土边坡地震崩滑与地震动的关系时, 以西

* 冶金工业部科学基金资助项目(No. 96006)

到稿日期: 1998-09-03

部地区的事例作为子样, 进行统计分析, 以其他地区 and 1996年2月3日云南丽江地震的边坡崩滑事例作为验证样本, 进行相关关系的可靠性和适用范围的验证。

3 边坡地震崩滑与地震动参数的关系

3.1 边坡崩滑与地震烈度的关系

地震烈度是指地震对某一地区地面及建筑物产生影响的强烈程度, 我国地震烈度划分标准分为12个等级。图1示出了岩土边坡地震崩滑与场地烈度的关系。

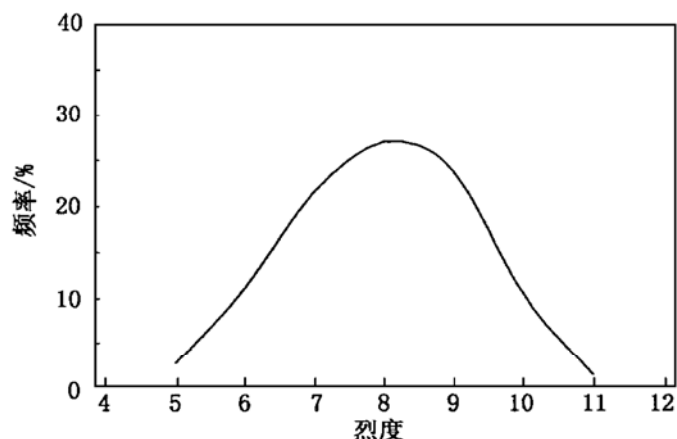


图1 地震烈度与边坡崩滑

Fig. 1 Seismic intensity and landslide

由图可见:

a) 地震诱发的边坡崩滑, 主要出现在 VII—IX度地震烈度区。

b) 边坡地震崩滑次数的概率分布近似于正态分布, 其数学期望值等于 8.0。应当指出, 这种分布并不意味着位于 8.0 度以上区的边坡不易崩滑, 它仅说明发生在 IX 度及其以上区的边坡崩滑数量相对少而已。高烈度区边坡崩滑数量相对少, 主要与以下两个因素有关: ①强烈地震发生的概率相对较小, 不少地震不存在 X 度及其以上的烈度区; ②X 度及其以上的烈度区为地震的极震区, 其面积与其他烈度区的面积相比要小得多。

c) V 度以下烈度区没有出现过边坡地震崩滑的事例, 而 V 度区内发生边坡崩滑数量极少, 所占比例不足 3%。因此, 从工程应用的角度出发, 可将 VI 度定为地震诱发边坡崩滑的下限, 也就是说将地震引发边坡崩滑的最小烈度定为 VI 度。

3.2 触发边坡崩滑的最小震级

在《中国地震目录》及其他主要地震目录中, 记载了 34 例发生在 M_s 5 级地震以下的边坡崩滑事例, 记录的最小地震为里氏 4.0 级。在这 34 例滑坡中, 有 2 例分别由 M_s 4.0 和 M_s 4.1 级地震引起的, 其余 32 例则是

由 $M_s = 4.7 \sim 4.9$ 的地震诱发的。有关这些边坡破坏情况及危害程度的典型事例分别摘录如下: ①1967 年山西昔阳 4.0 级地震造成“石崖少量崩塌”和“河床陡崖顶部土层开裂, 附近土崖崩塌”; ②1973 年宁夏固原 4.1 级地震引起老滑坡产生新滑动, 但未见有严重后果的描述; ③1964 年山西夏县东南 4.7 级地震造成“山塌, 压坏 40 余亩地”; ④1973 年河南浙川 4.7 级地震引起“山石崩落, 最大直径 3 m 以上”; ⑤1830 年四川西昌会理间 4.75 级地震引起“金家坝山崩, 安宁河水壅一日决, 下流数百里, 田畴尽淤”; ⑥1970 年贵州晴隆西北 4.8 级地震, 造成“滑坡 36 万 m^2 ”; ⑦1977 年云南泸水 4.9 级地震引起的崩塌“毁坏作物、砸断电线、阻塞公路”。

从理论上讲, 处于临界状态的边坡只要受到微小振动就将发生崩滑。从记载的历史事件来看, M_s 4.0 级地震应定为触发边坡崩滑的最小震级。但是从上述边坡地震破坏的范围、危害程度及工程意义上看, 最小震级定为 M_s 4.7 级似乎更为合理。因此, 本文将里氏 4.7 级定为触发边坡崩滑的最小震级。

此外, 地震目录中记载的这 34 例地震滑坡所处的场地烈度皆等于或大于 VI 度, 这从另一方面证明了本文将 VI 度定义为地震触发岩土边坡崩滑的最小烈度是合理的。

3.3 边坡崩滑震级与震中距的关系

岩土边坡在地震中是否发生崩滑, 除自身的固有特性外, 还取决于边坡所受振动强度的大小。地震震级和震中距是衡量这一强度大小的基本参数。图 2 示出了过去 800 年间诱发我国西部地区边坡崩滑的震级 (M_s) 与崩滑边坡震中距 (R) 的分布情况。

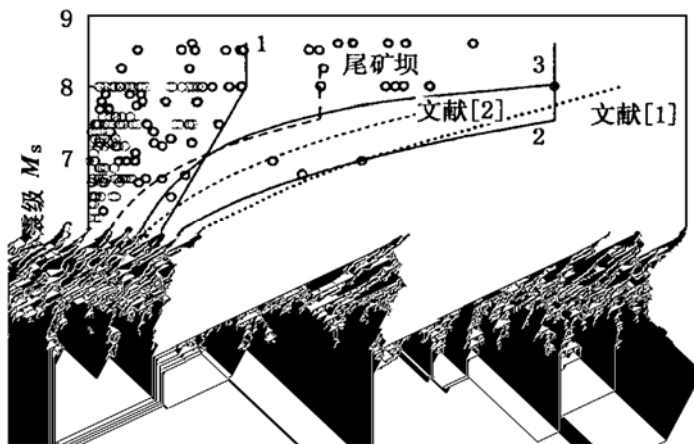


图2 边坡崩滑与地震震级、震中距的关系

Fig. 2 Susceptibility of slopes to earthquake induced landslide and avalanche

由图 2 可以看出:

a) 边坡地震崩滑主要集中在 $M_s - R$ 平面的左上方, 90% 以上的崩滑边坡发生在震中距 $R = 100$ km 的

范围以内。方程(1)给出了易出现岩土边坡地震崩滑的区域。

$$M_s = 4.280 + 0.031R \quad (15 \leq R \leq 120) \quad (1)$$

式中 M_s 为里氏震级; R 为震中距, km。

b) 边坡地震崩滑存在着一个阈值距离。对于某一震级的地震而言, 若边坡到震中的距离大于其阈值, 此地震将不会诱发该边坡崩滑, 反之则有可能诱发边坡崩滑。边坡崩滑的阈值可用边坡崩滑的最大震中距表示。经数理分析发现, 发生边坡地震崩滑的最大震中距与震级之间存在着良好的关系, 这一关系可用下列方程近似地描述:

$$M_s = 3.307 \times R_m^{0.141} \quad (2)$$

$$(15 \leq R \leq 350, \sigma = 0.018, r = 0.999)$$

式中 R_m 为最大震中距, km; σ 为标准差; r 为相关系数。

c) 在边坡可能发生崩滑的区域内有这样一个过渡带, 此带内出现边坡地震崩滑的事例很少, 并且崩滑点相对分散, 说明造成边坡地震崩滑除震级、震中距外, 还受其他因素的影响与制约。该过渡带的下限为边坡地震崩滑的阈值线, 上限近似于一条双曲线, 其统计方程为

$$M_s = \frac{R}{1.775 + 0.118R} \quad (3)$$

$$(20 \leq R \leq 350, r = 0.999)$$

为便于比较, 文献[1, 2]建议的 $M_s - R_m$ 关系曲线也分别示于图2中, 可以看出: 我国西部地区岩土边坡地震崩滑的 $M_s - R_m$ 关系曲线与 Keefer 的基本上相一致。此外, 图中还给出了尾矿坝的地震破坏关系曲线^[6], 图2表明, 在地震荷载作用下天然边坡的崩滑范围最大。

3.4 边坡崩滑区面积与震级的关系

边坡崩滑区面积是在指某次地震作用下, 出现边坡崩滑的最小烈度区所包括的区域大小。由以上分析可知, VI度为地震诱发边坡崩滑的下界, 所以边坡崩滑区面积即为该次地震作用下 VI度烈度影响区所包括的面积。通过对边坡崩滑的 VI度区面积进行计算分析, 得到以下结果:

a) 边坡崩滑区的面积随着震级的增大而增大。这部分是由于地震震级越高释放的能量越大, 其影响范围也就越大。

b) 边坡崩滑面积和震级不是一一对应的关系。这主要是由于地震的发震机理、场地周围的区域构造、边坡性态等不同之故。

c) 边坡崩滑区的最大面积(S)与震级(M_s)之间存在着一定的关系, 它可以近似地表示为

$$S = 24.061 \times (M_s/4)^{13.252} \quad (4)$$

式中 S 为崩滑区面积, km^2 。

4 $M_s - R_m$ 关系的可靠性和适用性验证

1996年2月3日云南丽江发生了里氏7.0级地震, 造成140例边坡发生滑动与崩塌, 其中崩滑最远的边坡是鹤庆朵美下河川达甸滑坡(图3)。此边坡到震中的距离为 $R = 94 \text{ km}$ 。由式(2)可知, 触发震中距为94 km的边坡崩滑, 所需要的最小地震为 $M 6.3$ 。此值小于丽江地震的震级($M 7.0$), 故此边坡在遭遇 $M 7.0$ 级地震时, 有可能发生地震崩滑。这一事例初步证明了本文给出的 $M_s - R_m$ 方程作为预测边坡地震崩滑的初判标准是可行的。

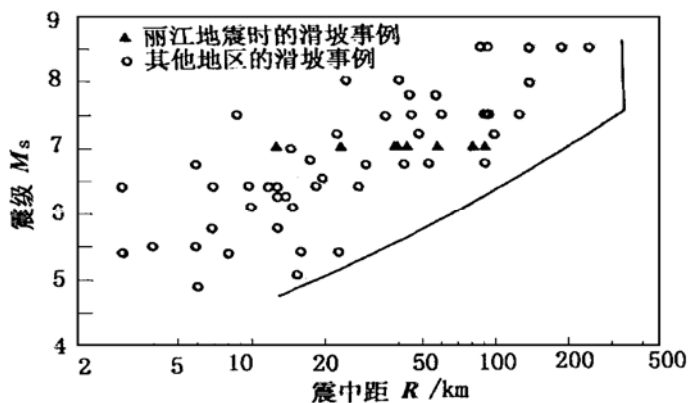


图3 $M_s - R_m$ 关系的可靠性和适用性验证

Fig. 3 Inspection to the relationship between M_s and R_m

方程(2)是根据我国西部地区边坡地震崩滑的宏观调查资料建立的, 它的可靠性已得到初步验证, 那它的适用性怎样呢? 为此采用过去800年间发生在我国其他地区的60个地震边坡崩滑实例资料对其适用性进行了验证(见图3)。由图3可见, 60个滑坡点全部位于边坡可能发生崩滑的区域内, 这说明该方程具有较好的代表性, 它可作为我国各地区判别岩土边坡是否可能发生地震崩滑的初判标准。

5 初判准则和应用实例

评判岩土边坡是否发生地震崩滑, 是一项复杂而繁重的研究工作, 它需要地震工程师和岩土工程师的共同努力。目前, 我国通常采用动力稳定计算分析方法, 来判别(某一)边坡在地震荷载作用下是否发生破坏。进行此项工作常需要大量的人力与物力。显然, 这一方法用于国土利用总体区划, 特别是在边坡地震崩滑预报和山区地震小区划中的边坡稳定性评估是不经济的, 亦是欠合理的。

若有一简便方法能在土地利用的区划中, 剔除那些在地震荷载作用下不可能发生崩滑的边坡, 这对指

导区划工作的合理开展,加速山区国土资源的开发与利用,势必达到‘事半功倍’的目的。基于此考虑,本文提出以下拙想,供讨论、参考。

5.1 判别标准

根据以上研究,判别岩土边坡在地震荷载作用下是否可能发生崩滑,可按以下步骤进行:

a) 首先按场地设防烈度和震级进行判别。若边坡场地烈度小于 VI 度或遭遇地震震级小于 $M 4.7$, 则判该边坡不会发生地震崩滑,反之则有可能发生崩滑。如果烈度与震级的判别出现矛盾,以可能出现崩滑的为准。

b) 然后按震级、震中距进行判别。若边坡位于方程(2)所描述的边界线之下方即非崩滑区,地震则不会诱发边坡崩滑,反之则有可能发生崩滑,边坡的地震稳定性需要进行更深入的研究。

边坡地震崩滑的判别流程图如图 4。

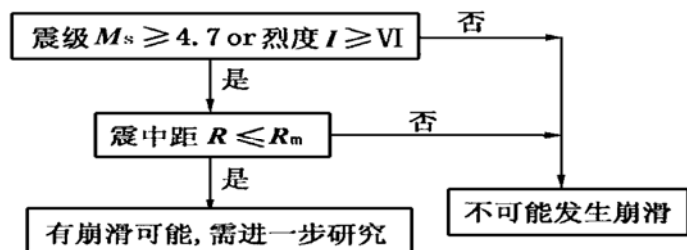


图 4 边坡地震崩滑判别流程图

Fig. 4 Flowchart for landslide and avalanche

5.2 应用实例

在进行郑州铝厂的抗震设防区划时,要求对位于黄河岸边的孤柏咀高边坡的地震稳定性进行预测。该边坡的设防烈度为 VIII 度,可能遭遇的最大震级为 $M 6.5$,边坡到震中距离为 72 km。根据判别流程图,第一步:烈度大于 VI 度,震级大于 $M 4.7$ 级,边坡有可能发生地震崩滑,进入下一步;第二步: $M 6.5$ 级地震可诱发边坡崩滑的最远距离为 $R_m = 122$ km,大于边坡到震中的距离 $R = 72$ km,边坡则有可能发生地震崩滑,应进行更深入的研究。文献[7]对孤柏咀边坡地震稳定性问题的系统研究进行了较为详尽的描述,其研究结果表明,该边坡在 $M 6.5$ 级地震荷载作用下将发生滑动,需要进行加固处理。

6 结 论

通过对我国过去近 800 年间发生的 125 次地震及

其触发的 285 例典型边坡崩滑实例进行分析研究,对我国岩土边坡地震崩滑的特征有了初步认识。基于我国边坡地震崩滑的特点,提出了以场地烈度、震级、震中距为标准的三参数边坡地震崩滑初判准则。这一判别标准主要适用于岩土边坡地震崩滑预报和在地震小区中对天然岩土边坡地震崩滑可能性的评价,它对岩土边坡众多的山区地震区划尤为重要。应当指出,随着研究的深入和资料的补充,文中给出的量化标准及判别方法将得到进一步验证、完善,判别亦将更趋于合理。

本次研究得到的主要结论如下:

(1) 众多的天然岩土边坡地震崩滑主要出现在 VII—IX 度烈度区, VI 度以下发生边坡地震崩滑的事例极少。从工程角度出发, VI 度可作为地震诱发岩土边坡崩滑的最小场地烈度。

(2) 记载触发边坡地震崩滑的最小震级为 $M 4.0$ 级。工程意义上的最小震级可定为 $M 4.7$ 级。

(3) 岩土边坡地震崩滑主要出现在距震中 100 km 的范围内,与土石坝、尾矿坝相比,天然边坡更易发生地震破坏。

(4) 边坡地震崩滑区的面积随着地震震级的增大而增大,但不是震级的单调函数。

参 考 文 献

- 1 Keefer D K. Landslides caused by earthquake. Bulletin of Geological Society of America, 1989, 95: 406~ 421
- 2 Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC- 4, ISSMFE. Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1993
- 3 顾功叙,林庭煌,时振梁等. 中国地震目录(公元前 1831 年~ 1979 年). 北京:地震出版社, 1983
- 4 国家地震局编. 中国地震年鉴(1949~ 1992). 北京:地震出版社, 1994
- 5 王余庆,辛鸿博等. 预测岩土边坡地震崩滑的初判准则研究:[研究报告]. 冶金工业部建筑研究总院, 1997
- 6 Xin Hongbo, Finn W D Liam, Wang Yuqing. Lessons from seismic responses of Chinese tailings dams: [Report]. Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada, 1992
- 7 中国振动工程学会土动力学专业委员会著. 土动力学工程应用实例与分析. 北京:中国建筑工业出版社. 1998. 44~ 51