

文章编号: 1000-7598-(2006)12-2239-08

考虑时间效应的滑坡风险评估和管理

李典庆, 吴帅兵

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 提出了考虑时间效应的滑坡风险评估和管理方法。以香港地区近 20 年的 16 000 个切破的观测资料为基础, 从统计学的角度提出了边坡的时变可靠性分析方法。推导了新建边坡在未来服役时间内的年失效概率的计算公式, 并对现役边坡在未来服役时间内的年失效概率进行了预测。确定了基于年死亡人数的滑坡风险接受准则, 并分析了基于滑坡时变风险的边坡加固时间。结果表明, 考虑时间效应的滑坡风险评估和管理方法能够更加真实地反映滑坡随时间变化的特性。新建边坡的年失效概率随边坡服役时间逐渐增大, 尤其是当边坡服役超过 10 年时, 每年发生滑坡的概率急剧增大。现役边坡的年失效概率基本与继续服役时间呈线性关系。此外, 香港斜坡维修指南规定的边坡加固时间能够有效地将滑坡风险降低到 ALARP 区或可接受的风险区。

关 键 词: 滑坡; 风险评估和管理; 失效概率; 老化; 时变性

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

Landslide risk assessment and management considering time effect

LI Dian-qing, WU Shuai-bing

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A landslide risk assessment and management considering time effect is proposed. From a statistical point of view, a time-dependent reliability approach for deteriorating slopes is formulated based on about 20-year observed performance of 16 000 soil cut slopes in Hong Kong. The annual probability of failure for new slopes is deduced; and an approach is presented to predict the annual probability of failure for existing slopes within next service time. Risk acceptance criteria in terms of annual risk of fatality are selected. Based on them, a risk based maintenance planning for slopes is obtained. The results indicate that the landslide risk assessment and management considering time effect can be capable of capturing the deteriorating characteristics of slopes effectively. The annual probability of failure for new slopes increases with time. It increases significantly when the service time of slope is longer than a decade. The relationship between the annual probability of failure for existing slopes and service time is approximately linear. In addition, the maintenance planning used in Geoguide 5 can reduce the risk of slope failure to the ALARP region or the acceptable region effectively.

Key words: landslides; risk assessment and management; probability of failure; deterioration; time dependence

1 引 言

边坡失稳产生的滑坡现象已成为同地震和火山相并列的全球性三大地质灾害之一。滑坡灾害给世界各国造成的经济损失估计每年可达数十亿美元, 如美国在 20 世纪 70 年代, 滑坡损失达 10 亿美元/年。我国因 70 % 的地域为山区, 故滑坡频率更高, 每年由于各种滑坡造成的损失达 200 亿元^[1]。为此, 滑坡的风险评估和管理正日益被人们所关注。通过开展

滑坡风险评估和管理理论的研究, 研究滑坡风险评估和减灾方案的优化决策, 从而对滑坡进行有效的风险管理, 减少滑坡灾害造成的损失和节约防灾减灾的费用。对于滑坡的风险分析问题, 国内外许多学者都进行了大量的研究^[1~8], 如谢全敏等人^[1]提出了滑坡灾害风险评价的系统理论。张珍等人^[2]采用概率方法分析了重庆地区滑坡与降雨之间的关系。Fell^[3], Finlay 和 Fell^[4]从滑坡风险识别和可接受的滑坡风险水平出发, 对澳大利亚和香港的滑坡风险进

收稿日期: 2005-11-11

作者简介: 李典庆, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事大坝安全的风险和不确定性分析, 水工建筑物老化、病害检测及寿命预测, 岩土工程可靠性和风险分析方面的研究。E-mail: dianqing@whu.edu.cn

行了研究。Kong^[5]采用事件树方法确定了香港地区滑坡的概率,并对各种减少滑坡灾害的措施进行了成本效益分析。Ko等人^[6]采用定量风险评估方法研究了降雨引起的滑坡风险。Ko等人^[7]讨论了定性滑坡风险评估方法及其可靠性。Dai等人^[8]回顾了现有的滑坡风险评估和管理方法,并讨论了各种滑坡风险分析方法的适用性。上述研究对滑坡的风险评估和管理水平的提高起到了极大的推动作用。然而,由于边坡的护坡面出现裂缝或剥落、排水孔及管口的淤塞、排水渠发生淤塞及严重破裂、孔隙水压力的变化引起土体强度的降低等因素的影响^[9,10],边坡老化效应随服役时间的增加而日趋明显,相应的滑坡风险也是随时间变化的。但是上述研究都没有涉及到边坡稳定的时变可靠性问题,相应的滑坡风险评估和管理也是静态的,未能有效地反映滑坡风险随时间变化的特性。另一方面,大量的研究表明,缺乏后期的维护和加固是引起滑坡的主要因素之一^[11,12]。因此,为了降低滑坡的风险,需要对边坡进行维护和加固。目前,香港土力工程处(GEO)颁布了边坡维修指南^[13],该指南明确规定对于现役边坡要定期进行加固,加固的频率取决于基于滑坡引起的死亡人数后果的边坡分类。第1和第2类边坡每隔5年加固1次,第3类边坡每隔10年加固1次。由于当时还没有开展边坡稳定的时变可靠性研究,上述边坡加固时间的确定没有考虑边坡的时变失效概率。为此,本文提出了考虑时间效应的滑坡风险评估和管理方法。以香港地区滑坡资料为基础,采用概率统计方法确定了随时间变化的滑坡概率。然后介绍了评价滑坡后果的方法,并确定了滑坡的风险接受准则。最后,对滑坡的时变风险进行了分析,并讨论了边坡的加固时间。

2 边坡的时变可靠性

滑坡风险 $R(t)$ 通常定义为边坡发生滑坡的概率和滑坡后果的乘积^[14]:

$$R(t) = P_f(t) \times C_f(t) \quad (1)$$

式中 t 是边坡服役的时间; $P_f(t)$ 是滑坡的概率; $C_f(t)$ 是滑坡后果,如经济损失、人员伤亡、环境影响等。由上式可以看出,为了评估滑坡风险,首先需要获得滑坡的概率和滑坡后果。

香港GEO对滑坡数据进行了较长时间的记录和分析,这里以香港边坡的滑坡数据为基础来分析边坡的时变失效概率。在香港有55 000个注册边坡(包括切坡、填土边坡和挡土墙),其中一些边坡由

于建造质量差或缺乏后期维护而产生滑坡。尤其是在雨季,强降雨引起的滑坡占了滑坡总数的绝大部分。为此,香港建立了完善的边坡管理体系,称为边坡安全系统^[15],其作用主要有两个方面:降低滑坡风险和提高公众的风险意识。在边坡安全系统中,为了研究香港地区的降雨特性以及降雨和滑坡之间的关系,香港自从1984年起就建立了全香港区域内的雨量测量网络,该网络全天候24 h工作,并每隔5 min对降雨量作一次记录。因此香港地区降雨对滑坡的影响以及24 h雨量观测资料是十分丰富的(24 h雨量通常是指短时间的降雨强度,它可以作为边坡发生滑坡可能性的指标)。Brand等人^[16]的进一步研究表明,最大24 h雨量 $i_{24\max}$ 与滑坡具有直接的关系,它是度量边坡发生滑坡可能性的一个重要指标。

这里以21 000个切坡中的16 000个的观测资料为例进行分析,这些边坡在1984~2002年期间一共经历了208次暴雨。根据不同降雨强度下边坡性能的差异,降雨强度 $i_{24\max}$ 分为3类:0~200 mm/d, 200~400 mm/d 和>400 mm/d。对于每一次暴雨,不同降雨强度对应的不同种类滑坡都进行了分组,然后根据边坡的不同服役时间和不同降雨强度对边坡经历暴雨的数目进行分组。图1给出了不同降雨强度下1984~2002年间经历暴雨的边坡数目。同理,图2给出了不同降雨强度下1984~2002年间滑坡的数目。由图中可以看出,经历 $i_{24\max} = 0 \sim 200$ mm/d的边坡在3类降雨强度中占的比例最大,但是 $i_{24\max} = 0 \sim 200$ mm/d引起的滑坡数目是最少的。相反,尽管经历 $i_{24\max} > 400$ mm/d的边坡数目最少,但是相应的滑坡数目较大。

根据图1和2就可以得到不同服役时间的边坡发生滑坡的危险函数^[10]:

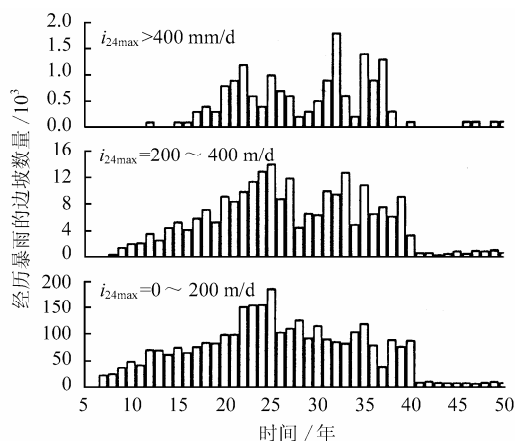


图1 1984~2002年间经历暴雨的边坡的数目^[10]

Fig.1 Number of rainstorm hits on old cut slopes in period 1984~2002^[10]

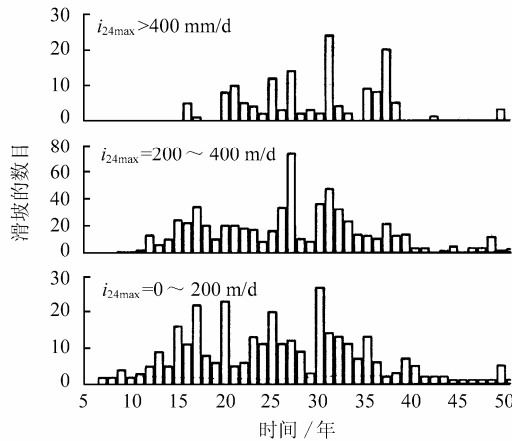


图 2 1984~2002 年间滑坡的数目^[10]
Fig.2 Number of old cut slope failures in period 1984~2002^[10]

$$\hat{h}(t) = \frac{\text{边坡服役 } t \text{ 年时发生滑坡的数目}}{t \text{ 年前没有发生滑坡的边坡的数目}} \quad (2)$$

式中 $\hat{h}(t)$ 是危险函数; t 是边坡的服役时间。考虑损伤效应的危险函数常用威布尔分布来描述, 相应的危险函数 $\hat{h}(t)$ 可以表示为

$$h(t) = \lambda \gamma (\lambda t)^{\gamma-1} \quad (3)$$

式中 γ 是控制危险函数变化率的形状参数; λ 为尺度参数。根据式(3)可得不同降雨强度下的危险函数, 如图3所示。可以看出在 $i_{24\max} = 0 \sim 200$ mm/d 和 $200 \sim 400$ mm/d 时, 形状参数发生了变化。Cheung和Tang^[10]指出这种变化是因为边坡的维护和加固减缓了滑坡的概率。同时还可以看出对于较大的降雨强度 $i_{24\max} > 400$ mm/d, 边坡的维护和加固也不能有效地减缓滑坡的概率。

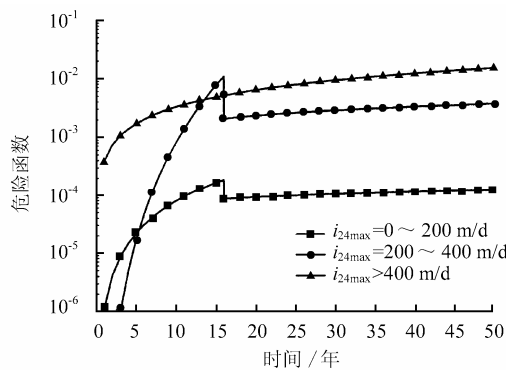


图 3 不同降雨强度的危险函数^[10]
Fig.3 Variation of hazard function under different categories of rainfall intensity^[10]

通常工程人员对边坡在某一段时间内的失效概率更感兴趣。此时, 可以将式(3)积分得到在某一段时间内的累积失效概率如下:

$$P_f(t) = 1 - \exp(-\lambda t)^\gamma \quad (4)$$

根据式(4)可得3类降雨强度下边坡的失效概率, 相应的结果在对数坐标轴表示如图4所示。可以看出累积失效概率随时间和降雨强度是逐渐增大的, 对于 $i_{24\max} = 0 \sim 200$ mm/d来说, 当边坡服役时间从25年增加到50年时, 失效概率从0.2%增加到0.5%; 另一方面, 当 $i_{24\max}$ 从 $0 \sim 200$ mm/d增加到 $200 \sim 400$ mm/d 或 > 400 mm/d 时, 服役25年边坡的失效概率分别增加到4%和10%。同时还可以看出, 由于在第16年进行了加固, 当 $i_{24\max} = 0 \sim 200$ mm/d 和 $200 \sim 400$ mm/d 时, 边坡服役16年时的累积失效概率有个突变点。当得到不同降雨强度下的边坡的累积失效概率后, 采用全概率公式就可以得到不包含降雨强度参数的边坡的累积失效概率:

$$P_{fr}(t) = \sum_{i=1}^3 P_{fi}(t) P_i(i_{24\max}) \quad (5)$$

式中 $P_i(i_{24\max})$ 是第 i 类降雨强度出现的概率; $P_{fi}(t)$ 是式(4)计算的某种降雨强度下边坡的累积失效概率。Lam和Leung^[17]统计了不同降雨强度出现的概率, $i_{24\max} = 0 \sim 200$ mm/d, $200 \sim 400$ mm/d 和 > 400 mm/d 出现的概率分别为43%, 50%和7%。根据上述数据就可以得到边坡的累积失效概率如图5所示。此时, 累积失效概率与降雨强度没有关系。可以看出, 累积失效概率是随时间逐渐增大的, 由于在第16年进行了边坡加固, 边坡的累积失效概率有个突变点。

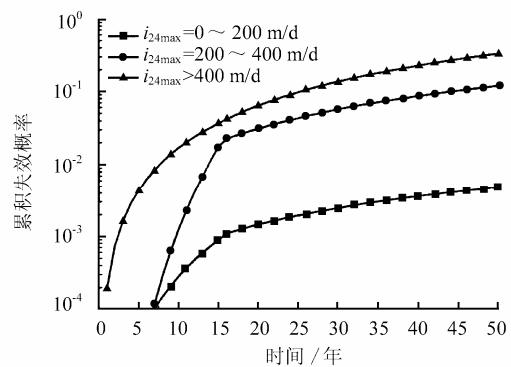


图 4 不同降雨强度下的累积失效概率
Fig.4 Cumulative probability of failure under different categories of rainfall intensity

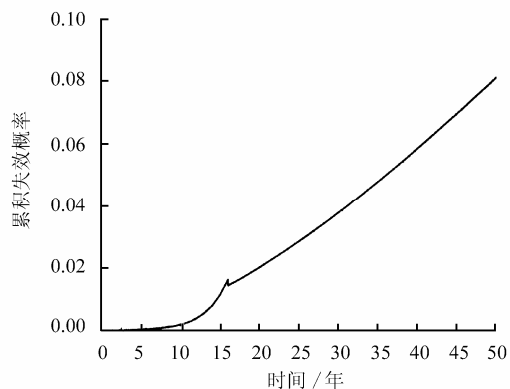


图5 边坡的累积失效概率

Fig.5 Cumulative probability of slope failure for various service periods

通常来说,在对边坡进行风险分析时,工程人员更关注边坡的年失效概率。根据式(5)可以进一步推导出边坡年失效概率的计算公式如下:

$$P_{fa}(t) = \sum_{i=1}^3 (P_{fi}(t) - P_{fi}(t-1)) P_i(i_{24\max}) \quad (6)$$

图6给出了边坡在不同服役时间的年失效概率,可以看出当边坡服役时间大于10年后,年失效概率急剧增大,当边坡服役时间从5年增加到15年时,年失效概率从0.01%增加到0.4%。这说明为了有效地防止边坡发生滑坡,边坡加固的时间应该尽可能小于10年。同时可以看出,由于在第16年对边坡进行了加固,16年后边坡的年失效概率明显下降,但是边坡加固并不能完全抵消边坡的损伤效应,也就是说加固后的边坡并不能够完全恢复到边坡初始的状态,这主要是因为边坡剪切强度的衰减等是不可逆的过程。

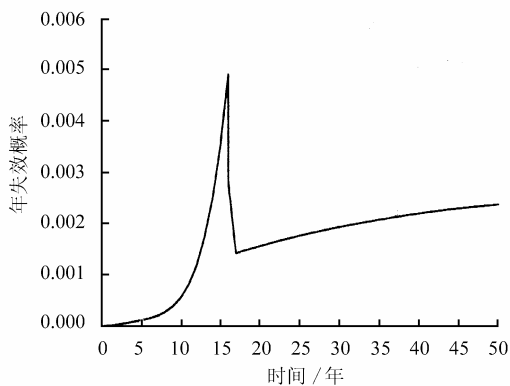


图6 边坡的年失效概率

Fig.6 Annual probability of slope failure for various service periods

上面分析了新建边坡的时变失效概率,下面进一步分析现役边坡的时变失效概率。当现役边坡的

失效概率确定后,工程人员可以制定现役边坡的维护和加固计划。对于已经服役 t_0 年的边坡,它在继续服役时间 t_1 内的累积失效概率可以表示为^[18]

$$P_f(T < t_0 + t_1 | T \geq t_0) = 1 - \exp(-\lambda^\gamma ((t_0 + t_1)^\gamma - t_0^\gamma)) \quad (7)$$

根据式(7)可以推导出现役边坡在继续服役时间 t_1 内的年失效概率如下:

$$P_{fa}(T < t_0 + t_1 | T \geq t_0) = \exp(-\lambda^\gamma ((t_0 + t_1 - 1)^\gamma - t_0^\gamma)) - \exp(-\lambda^\gamma ((t_0 + t_1)^\gamma - t_0^\gamma)) \quad (8)$$

图7给出了不同服役年限的边坡在继续服役时间内的年失效概率,可以看出年失效概率基本上随继续服役时间线性增大。在相同的继续服役时间内,已经服役时间长的边坡的年失效概率大于服役时间短的边坡的年失效概率,如已经服役20,30和40年的边坡在继续服役10年时的年失效概率分别为0.20%,0.24%和0.27%。但是随着继续服役时间的增加,不同服役年限的边坡年失效概率的差别逐渐变小,如上述3种边坡在继续服役5年和30年后的年失效概率分别是18%~26%和25%~28%。

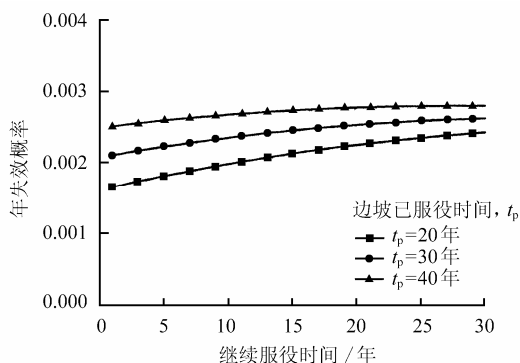


图7 不同服役时间现役边坡的年失效概率

Fig.7 Annual probability of failure for old slopes of different ages

3 滑坡后果分析和滑坡风险接受准则

前面分析了边坡发生滑坡的概率,如式(1)所示,为了评估滑坡风险必须得到滑坡的后果。Wong等人^[19]提出了评估滑坡后果的方法,由于缺乏滑坡经济后果及其它方面损失的数据,他们只考虑了人员伤亡的后果。该方法目前已经被香港地区用来制定边坡和挡土墙的维护优先度排序系统^[20]。在这个排序系统中,设施被分为5组,表1给出了滑坡引起设施内的死亡人数及其后果分类的典型例子。可以看出第1和第2组设施的潜在的死亡人数在一个数

量级上，它明显地大于第3，第4和第5组设施的潜在的死亡人数。表1还给出了基于死亡人数后果的边坡分类，可以看出第1和第2类边坡的潜在死亡人

数明显地大于第3类边坡的潜在死亡人数。由于数据有限，本文以上述死亡人数后果作为滑坡的后果，暂不考虑经济、环境等其它方面的后果。

表 1 滑坡引起设施内的死亡人数及其后果分类的典型例子^[20, 21]
Table 1 Typical examples of facilities affected by landslides in each consequence-to-life category^[20, 21]

设施分类	典型的设施	潜在的死亡人数	基于死亡人数后果的边坡分类
1	(a) 高用量建筑物 - 住宅大厦、商厦、商店、酒店、工厂、学校、电厂、救护站、医院等	3	1
	(b) 其它 - 平房、领有牌照的土地-有盖巴士站，火车站月台及其它建有上盖的公众等候地方-危险品的贮存建筑物-极高流量的道路或人行道	3	1
	(a) 低用量建筑物 - 室内停车场、军营内的建筑物、屠宰场、焚化炉、室内体育馆、污水处理厂、废物转运站、教堂、庙宇、寺院、文娛中心	2	1
2	(b) 其它 - 主要的基础设施(例如铁路、缆车、电车、天桥、隧道、隧道入口)-建筑用地(若其用途未定)-高流量的道路或人行道	1	2
	- 高使用率的休憩用地及公众等候地方(例如高使用率的游乐场或休憩处、露天停车场、园艺花园)-中流量的道路或人行道	0.25	2
3	- 低使用率的露天娱乐用地-非危险品的贮存仓库-低流量的道路或人行道	0.03	3
4	- 偏远地方(例如郊野公园、未发展的绿化地带、弃置的矿场)-极低流量的道路或人行道	0.001	3

至此，滑坡风险就可以采用式（1）来计算了。当得到了滑坡风险后，为了评估滑坡风险水平是否可以接受，需要有个风险接受准则作为标准，如果滑坡风险超过了这个风险接受准则，就要采取措施进行控制、预防或减小滑坡风险。对于滑坡风险接受准则，Fell和Hartford^[22]在分析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（图8）^[23]，该风险接受准则是以F-N 曲线形式表示的，在图8中有3个区：分别是不可接受的风险区($>10^{-3}$)、ALARP区(10^{-3} - 10^{-5})及可接受的风险区($<10^{-5}$)。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。因为图8所示的风险接受准则已经被香港政府所采用，本文就以上述风险接受准则为标准来评价滑坡风险以及制定相应的边坡加固计划。

4 滑坡风险评估

由于每类边坡的失效后果不是一个具体值，而是一个范围（见表1），对于第1，第2和第3类边坡，它们的死亡人数范围分别是2~3，0.25~1和

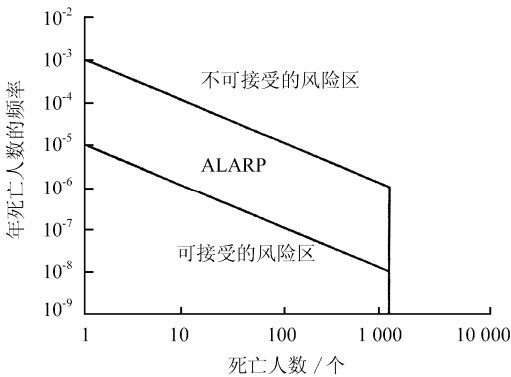


图 8 香港采用的滑坡风险接受准则^[23]
Fig.8 Risk acceptance criteria for slopes adopted in Hong Kong^[23]

0.001~0.03。因此，相应的滑坡风险也是一个范围。采用式（1）可得边坡发生滑坡的风险随边坡服役时间的变化关系，图9给出了在对数坐标轴中新建边坡在0~16年间发生滑坡的风险。可以看出第1类边坡在服役9年后的年死亡人数的风险就超过了可以接受的风险，因此，最迟应该在第9年采取加固措施把风险降低到ALARP区。同理，由于第2类边坡在服役节12年后的年死亡人数的风险超过了可接受的风险，应该至少在12年前采取相应的加固措施来把风险减小到ALARP区。对于第3类边坡，在16年后应该采取加固措施来降低滑坡风险。上述结果表明，不同种类的边坡的加固时间是不同的，这

与香港边坡维修指南^[13]中得到的结论是一致的。另一方面,如果根据香港边坡维修指南中规定的时间来加固边坡,第1和第2类边坡服役5年加固后的年死亡人数的风险位于ALARP区,第3类边坡服役10年后加固的年死亡人数的风险位于可接受的风险区,这进一步证明了香港边坡维修指南规定的边坡加固时间的合理性。

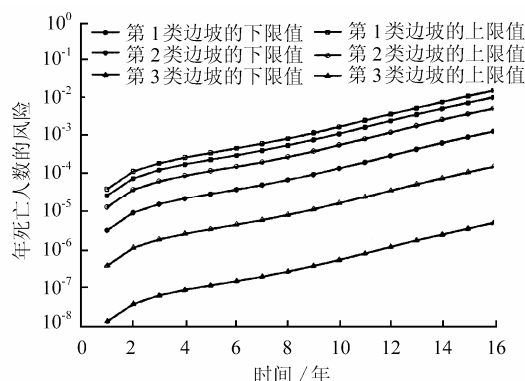


图9 不同种类边坡的年死亡人数的风险

Fig.9 Annual risk of fatality for different slope categories

由于边坡在第16年进行了加固,因此16年后边坡的危险函数不同于16年前的,相应的滑坡风险也是不同的。同理采用式(1)可得边坡在16年加固后的滑坡风险,相应的结果在对数坐标轴上表示如图10所示。可以看出当边坡服役时间从17年增加到50年时,第1类边坡的年死亡人数的风险仅从 2.8×10^{-3} 增加到 4.7×10^{-3} ,这说明由于边坡进行了加固,滑坡引起的年死亡人数的风险随着时间增加较小。同时还可以看出加固后的第1类边坡发生滑坡的年死亡人数的风险位于不可接受的风险区,因此应该采取进一步加固措施把滑坡风险降低到ALARP区;由于第2类边坡的年死亡人数的风险部分位于不可接受的风险区,因此也要采取进一步加固措施来降低滑坡风险。由于第3类边坡发生滑坡的年死亡人数风险位于不可接受的风险区之外,因此无需采取加固措施。

上面分析了新建边坡发生滑坡的风险,下面来进一步分析现役边坡发生滑坡的风险。采用式(8),图7中的数据以及表1中失效后果的分类,图11给出了对数坐标轴不同种类边坡在服役20年后的年死亡人数的风险。可以看出随着继续服役时间的增加,滑坡引起的年死亡人数风险增大不明显,当继续服役时间从1年增加到30年时,第1类边坡的年死亡人数的风险的上限值仅从 5.0×10^{-3} 增加到 7.3×10^{-3} 。此外,仅第3类边坡的年死亡人数的风险位于不可接受的风险区之外,这说明应该对服役

20年的第1和第2类边坡采取加固措施。为了研究边坡的服役时间对年死亡人数的风险的影响,图12对已经服役20和30年的第2类边坡的年死亡人数风险进行了比较。显然,已经服役30年的边坡的年死亡人数的风险高于已经服役20年的边坡的年死亡人数的风险。由于已经服役20和30年边坡的年死亡人数的风险的上限值位于不可接受的风险区,应该采取加固措施来降低风险。

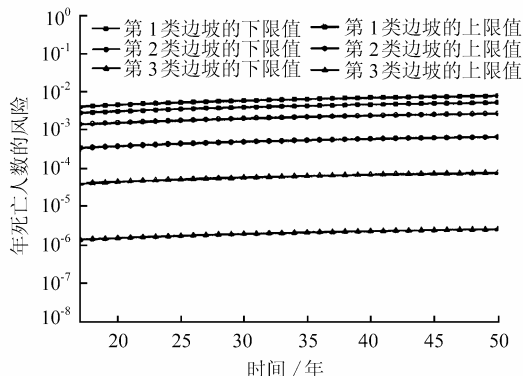


图10 加固后不同种类边坡的年死亡人数的风险

Fig.10 Annual risk of fatality for different slope categories after maintenance

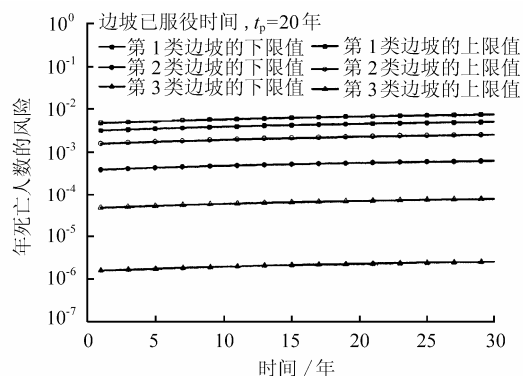


图11 已服役20年的边坡的年死亡人数的风险

Fig.11 Annual risk of fatality for 20-year-old slopes

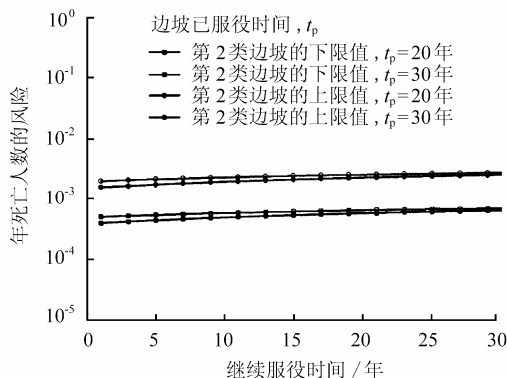


图12 已服役20和30年边坡的年死亡人数风险的比较

Fig.12 Comparison between annual risks of fatality for 20 and 30-year-old slopes

5 结 论

由于多种因素的影响, 边坡每年发生滑坡的概率不是一个常数, 在自然状态下, 边坡每年发生滑坡的概率是随边坡服役时间逐渐增大的。相应的滑坡风险也不是一个确定值, 它是随着时间动态变化的。本文提出了考虑时间效应的滑坡风险评估和管理方法, 以香港地区的滑坡资料为基础进行了分析, 由分析可以得出以下结论:

(1) 考虑时间效应的滑坡风险评估和管理方法能够更加真实地反映滑坡随时间变化的特性。在考虑时间效应的滑坡风险评估和管理基础上制定的边坡加固计划能更有效地维持边坡的安全性, 它能够将滑坡的概率和滑坡后果有机地结合起来。本文计算结果表明第1, 第2和第3类边坡的加固时间分别为9年、12年和16年。

(2) 边坡的年失效概率是随着边坡的服役时间而逐渐增大的, 尤其是当边坡服役超过10年时, 每年发生滑坡的概率急剧增大, 因此, 边坡的加固时间要尽可能小于10年。

(3) 边坡的加固能够有效地减小边坡发生滑坡的风险, 由于边坡在第16年进行了加固, 滑坡引起的年死亡人数的风险随着时间增加较小。当边坡的服役时间从17年增加到50年时, 第1类边坡的年死亡人数的风险仅从 2.8×10^{-3} 增加到 4.7×10^{-3} 。

(4) 现役边坡的年失效概率基本与继续服役时间呈线形关系, 对于相同的继续服役时间来说, 已经服役时间长的边坡的年失效概率大于服役时间短的边坡的年失效概率, 但是随着继续服役时间的增加, 不同服役年限的边坡的年失效概率间的差别逐渐变小。

(5) 香港斜坡维修指南规定的边坡加固时间能够有效地将滑坡风险降低到ALARP区或可接受的风险区, 这进一步证明了香港斜坡维修指南中现行边坡加固计划的合理性。

致谢: 本文在完成过程中得到了香港科技大学土木工程系邓汉忠(Wilson H. Tang)教授和张利民(Limin Zhang)教授的指导, 在此向他们表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 谢全敏, 边翔, 夏元友. 滑坡灾害风险评价的系统分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 71—74.
XIE Quan-min, BIAN Xiang, XIA Yuan-you. Systematic analysis of risk evaluation of landslide hazard[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 71—74.
- [2] 张珍, 李世海, 马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率

分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 25(17): 3 185—3 191.

ZHANG Zhen, LI Shi-hai, MA Li. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 25(17): 3 185—3 191.

- [3] Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(2): 261—272.
- [4] Finlay P J, Fell R. Landslides: risk perception and acceptance[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34(2): 169—188.
- [5] Kong W K. Risk assessment of slopes[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 2002, 35(3): 213—222.
- [6] Ko C K, Flentje P, Chowdhury R. Quantitative landslide hazard and risk assessment: a case study[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 2003, 36(3): 261—272.
- [7] Ko C K, Flentje P, Chowdhury R. Landslides qualitative hazard and risk assessment method and its reliability[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2004, 63(2): 149—165.
- [8] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management: a review[J]. **Engineering Geology**, 2002, 64(1): 65—87.
- [9] Lacerda W A, Santos Jr O F. Water table fluctuation — a cause of slide initiation in residual and colluvial soils in tropical regions[A]. **Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides**[C]. Cardiff: Thomas Telford, London, 2000. 877—880.
- [10] Cheung R W M, Tang W H. Realistic assessment of slope reliability for effective landslide hazard management[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(1): 85—94.
- [11] Wong H N, Ho K K S. Systematic investigation of landslides caused by a serve rainstorm in Hong Kong[J]. **HKIE Transactions**, 1997, 3(3): 17—27.
- [12] Lo D O K, Ho K K S, Wong H N. Effectiveness of slope maintenance in reducing the likelihood of landslide[A]. **Proceedings of the Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong**[C]. Hong Kong: Balkema, Rotterdam Netherland, 1998. 251—258.
- [13] GEO. Guide to slope maintenance (Geoguide 5) [M]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 1995.
- [14] Wu T H, Tang W H, Einstein H H. Landslide hazard and risk assessment[A]. **Landslides investigation and mitigation special report 247**[C]. Transportation