

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.011

我国溃坝生命风险分析方法探讨

宋敬^{1 2},何鲜峰^{3 4}

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 ;
2.河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098 ;
3.黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003 ;4.水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心,河南 郑州 450003)

摘要 :为满足大坝风险评价的需要,分析并确定了溃坝生命损失风险(个体风险、社会风险)的评价内容。鉴于生命风险标准的建立需要综合考虑国家的政治、经济、文化、公众心理、技术发展水平等因素的影响,研究了综合考虑大坝和下游地区损失的大坝风险评定标准制定原则,并在分析我国不同区域人口分布、经济发展水平存在差异的基础上,提出了我国生命风险的区域划分标准。
关键词 :风险管理 ;大坝 ;个体风险 ;社会风险 ;风险标准
中图分类号 :TV698.2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2008)05-0628-06

随着经济、科技水平的发展,以及公众自我保护意识的增强,对水库大坝以工程管理为核心的管理理念正逐步被近年发展起来的大坝风险管理理念所取代^[1-2]。其中,溃坝生命损失风险是大坝风险管理的主要内容之一。根据考察对象的不同,溃坝生命损失风险分为个体风险和社会风险 2 种。本文对我国溃坝生命损失风险的度量、标准等问题进行探讨。

1 个体风险

个体风险指驻留在某个地方的个体由于意外事故引发的危险所造成的平均死亡率。每年水库出现不同严重程度洪水的概率是不同的,在不同洪水条件下的个体死亡率也明显不同,根据条件概率理论可得个体风险率为

$$I_R = \sum_{i=1}^n P_i P_{di} \tag{1}$$

式中: P_i ——第 i 种洪水发生率; P_{di} ——发生第 i 种洪水时个体在洪水中死亡率; n ——洪水分类总数。 P_i 利用文献[3]讨论的溃坝概率分析方法得到, P_{di} 的基本值 $P_{d_{0i}}$ 可按 Graham 建议的方法取值^[4]。但 $P_{d_{0i}}$ 除受 Graham 提到的预警时间、对洪水严重性的理解程度以及洪水强度等影响之外,还受洪水的发生时段(白天、黄昏、夜间)、发生季节(不同季节水温不同)、个体生存能力、应急救援能力、洪水对建筑物的损毁程度等不确定因素的影响。根据对我国近 30 年来板桥、石漫滩、沟后、大路沟、五号河、小李湾、八一等水库溃坝资料的分析,对 $P_{d_{0i}}$ 进行如下修正:

$$P_{di} = P_{d_{0i}} I_T I_S I_L I_E I_{St} \tag{2}$$

式中: I_T ——洪水发生时段指数; I_S ——洪水发生季节修正指数; I_L ——个体生存能力指数; I_E ——应急救援能力指数; I_{St} ——洪水对建筑物威胁指数。洪水发生时间不同, I_T 取值如下:

$$I_T = \begin{cases} 0.2 \sim 0.8 & (07\ 00 \sim 17\ 00) \\ 0.8 \sim 1.0 & (17\ 00 \sim 22\ 00) \\ 1.0 & (22\ 00 \sim 07\ 00) \end{cases}$$

收稿日期 :2008-05-18
基金项目 :国家自然科学基金(50579010,50539010,50539110) ;国家科技支撑计划(2006BAC14B03) ;中国水电工程顾问集团公司科技项目(CHC-KJ-2007-02) ;国家自然科学基金-雅砻江水电开发联合基金(50539030-1-3)
作者简介 :宋敬 (1963—) ,男,江西吉安人,高级工程师,主要从事大坝安全监测理论及应用研究。

一般情况下,不同季节水温不同,而人在水中的生存时间随水温高低差别很大,因此建议根据水库所在地区季节或水温的不同,选取 I_S 合适的修正值:

$$I_S = \begin{cases} 0.2 \sim 0.8 & \text{夏季}(t > 18^{\circ}\text{C}) \\ 0.8 \sim 1.0 & \text{春秋}(10^{\circ}\text{C} < t < 18^{\circ}\text{C}) \\ 1.0 & \text{冬季}(t < 10^{\circ}\text{C}) \end{cases}$$

I_L 体现了陷入洪水中个体的自救能力.有条件的可根据聚居区居民身份登记资料,进一步细化风险人群.建议 I_L 取值如下:

$$I_L = \begin{cases} 0.7 \sim 1.0 & \text{老人} \\ 0.7 \sim 1.0 & \text{儿童} \\ 0.5 \sim 0.7 & \text{成人} \end{cases}$$

I_E 反映了各部门对灾区的救援能力.实践表明,及时地救援可大大减少受灾人群的死亡率,因此可根据灾区应急救援机制完善程度以及救援队伍救援区域的大小确定该指数:

$$I_E = \begin{cases} 0.5 \sim 0.7 & \text{救援机制完善,洪水发生后可立即出动救援,可覆盖整个区域} \\ 0.7 \sim 0.9 & \text{应急救援机制不太完善,灾后救援行动迟缓,覆盖区域有限} \\ 0.9 \sim 1.0 & \text{缺乏应急救援,行动不及时,覆盖区域有限} \end{cases}$$

I_{St} 反映了洪水对建筑物的威胁程度.通常洪水到来时,建筑物会为附近的人提供暂时避难场所,建筑物的损毁无疑会加大洪灾生命死亡率.这里采用 Peter Reiter 等的分类标准,将 I_{St} 分为 3 类^[5],每一类威胁指数的取值范围为

$$I_{St} = \begin{cases} 0.5 \sim 0.7 & \text{建筑物处于较低威胁} \\ 0.7 \sim 0.85 & \text{建筑物处于中等程度威胁} \\ 0.85 \sim 1.0 & \text{建筑物处于高度威胁} \end{cases}$$

2 社会风险

社会风险指生活在大坝下游地区的公众受溃坝洪水影响造成的生命损失数量.根据计算方式的不同,主要有累计加权法、 $F-N$ 线法和经验公式法等 3 种方法.

2.1 累计加权法

累计加权生命损失算法最初由 Piers^[6]提出,通过对计算区域内家庭的生命损失积分得到.考虑到我国居民家庭分布及人口信息获取难度较大,根据我国国情,本文建议使用风险人群积分算法,即

$$L_{ol} = \iint_{\Omega} P_{a}(x,y) I_R(x,y) dx dy \tag{3}$$

式中: L_{ol} ——生命损失数量; $P_a(x,y)$ —— (x,y) 位置风险人口数量; $I_R(x,y)$ —— (x,y) 处风险人口的死亡率; Ω ——计算区域.

因为下游不同人口聚居区离大坝失事位置的距离、预警时间长短、聚居区地势等各不相同,为方便计算并能比较准确地进行估算,可以根据人口聚居特点并结合行政区将下游地区划分为若干子区域,得到实用离散计算公式:

$$L_{ol} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ar_{i,j}} I_{R_{i,j}} \tag{4}$$

式中: $P_{ar_{i,j}}$ ——第 i 个子区域中第 j 组风险人群的数量; $I_{R_{i,j}}$ ——第 i 个子区域中第 j 组风险人群的个体生命损失率; n ——划分的风险子区域总数; m ——风险人口分组数量.

在上述风险估算过程中仍存在很多的不确定性,其中个体风险率的不确定性已有论述,这里仅探讨影响风险人群的主要不确定性因素.影响风险人群的主要不确定性因素包括旅游业、学校、交通运输业、短期用工等,并最终影响到常住人口、暂住人口和流动人口的精确确定.常住人口可通过查询当地相关部门的人口登记记录得到,常住人口的外出人口数量和变异系数可通过抽样调查得到.暂住人口的统计特征值可通过对当地寄宿学校、工厂、矿山、服务业的调查获得,流动人口的统计特征值则通过对当地旅游业和交通运输业的调查得到.

由个体风险率的分析表明,将同一子区域内风险人口根据个体脆弱性进一步细分为不同的子群体有助于提高个体风险率的估算精度,但过多子风险人群的划分会增加统计数据获取的难度,因此子风险人群的总数也不宜过多,建议总数控制在6组以下。

2.2 F-N 线法

F-N 线是用双对数曲线表示每年不同死亡人数超越概率的一条曲线。每年不同死亡人数的超越概率用式(5)计算:

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^\infty f_N(x)$$

(5)

式中: $f_N(x)$ ——每年死亡人数的概率密度函数(PDF); $F_N(x)$ ——每年死亡人数小于 x 的概率分布函数。

2.3 经验公式法

国外研究人员已经根据收集到的资料建立了各种生命损失估计的经验公式,其中考虑影响因素比较完善的是 Dekay 等建立的经验公式^[7]。

由于我国地区人口密集,人口分布特征、预警机制和应急救援机制与国外差别很大,利用我国部分溃坝生命损失数据对文献[8]中经验公式的复核结果表明,用国外的经验公式预测国内溃坝生命损失误差较大。国内有学者曾对我国部分溃坝生命损失资料进行了分析^[9],建立了一种基于风险人口的指数型回归公式,但该公式使用的样本容量有限,并且没有考虑预警时间、溃坝发生时间、发生季节、应急救援能力、洪水强度等影响因素,因此,该公式的有效性有待进一步搜集数据予以验证。

总体而言,我国目前公开的溃坝资料信息还不足以建立有效的溃坝生命损失估算经验公式。从估算精度来看,国外建立的各种回归估计公式不适应中国的国情,但可以为以后建立我国的溃坝生命损失估计公式提供参考。

3 生命损失标准

3.1 影响风险标准制定的因素与 ALARP 准则

大坝失事风险限制标准的制定受政治、经济、文化、公众心理、技术发展水平等因素的影响,制定一套合理的风险控制标准,是一个需要综合考虑的复杂问题。国外早在20世纪60年代末就开始了相关研究,最初主要拘泥于技术层面开展研究,认为风险的可接受水平主要受技术手段的影响;后来逐步认识到风险标准不仅受当前技术手段的影响,还受人的参与及其他多种因素的制约,这一阶段的可接受风险水平由专家与公众共同参与确定;目前,已认识到风险可接受水平综合的社会问题,涉及政治、经济、文化、公众心理、技术发展水平、健康和环境等领域,属于决策问题。因此大坝风险标准的确定不是风险本身可不可以接受或能不能容许的问题,而是如何决策的问题。

英国健康与安全机构(HSE, Health and Safety Executive)要求以低至合理水平(ALARP, as low as reasonably practicable)作为风险管理和决策的准则,并建立了确定风险可接受水平的标准框架(图1)。图中的2条水平线,上面的是可接受风险上限,下面的为广泛可接受风险线,2条水平线将整个风险域按风险度的高低分为3个子区域。超过可接受风险上限线的区域,被认为风险水平过高,称为不可接受域;广泛可接受风险线以下的区域称为广泛可接受区,该区域内的风险被认为风险已低至可忽略水平,不需要再采取措施降低风险。在可接受风险上限线和广泛可接受风险线之间的区域称为可接受风险区(ALARP),在该区域内,可通过采取各种措施以降低风险,但只有当风险低至所获利益高于降低风险所采取措施成本时该风险才是可接受的。此外,在确定风险标准时,还应从公众的社会、文化、宗教信仰、经济水平、社会心理、道德等角度去研究,综合考虑国家的相关法律、法规和标准,并兼顾各地在技术、经济发展水平上存在的差异,做到制定标准时整体与局部的对立和统一。

就我国的实际情况而言,东西部地区在人口密度、经济发展水平、文化、社会心理等方面存在较大差异。

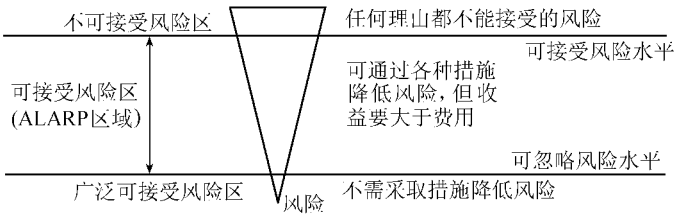


图1 ALARP 准则

Fig.1 Guidelines for ALARP

因此,在确定我国生命损失标准以及经济和环境风险时,除了应参考上述准则及国外同类风险的相应标准外,还应综合考虑我国东西部不同省市区的多方面存在的差异性,必要时可为东西部制定不同的风险标准。

3.2 个体风险标准

由于使用方法和具体应用情况存在差异,不同国家和组织制定的个体风险标准也存在明显差异。一般个体风险低于 $10^{-6}/a$ 被认为已经“低至合理水平”,而生活、工作在高于 10^{-6} 环境中的人或多或少和自己的意愿有关。因此,在制定标准时一般会考虑人们从事危险活动和居住在某地的意愿。荷兰水防御技术咨询委员会(TAW, Technical Advisory Committee on Water Defences)在此基础上制定了一种与个人意愿相结合的个体风险限制标准:

$$I_R < 10^{-4}\beta$$

(6)

式中: β 为政策因子,根据个人从事某种活动意愿程度不同, β 取值范围为 0.01 ~ 10。但使用意愿因子也有一个明显的缺点,即意愿因子的取值范围过大,取值缺乏可度量依据,主观性较强。

澳大利亚大坝委员会(ANCOLD)在 2003 年制定的《风险评价指南》^[8]中认为在役大坝对个体和团体造成的个体风险超过 $10^{-4}/a$ 是不可容忍的,新建大坝和改扩建工程的个体风险超过 $10^{-5}/a$ 是不可容忍的。英国健康委员会(HSE)对工人和公众确定的个体风险可容忍标准分别为 $10^{-3}/a$ 和 $10^{-4}/a$ 。

国内有些学者^[10]认为,公众对交通意外死亡率的可接受水平可以作为制定个体风险标准的参考依据。在分析我国公众对交通意外死亡率可接受水平的基础上,建议我国大坝的可容忍个体风险标准为 $3.0 \times 10^{-4}/a$,可接受个体风险标准为 $10^{-5}/a$ 。但是交通安全和水库大坝安全在失事损失、社会影响等方面有着较大的差别,单纯以交通意外死亡率作为水库大坝可接受风险水平的参考还有待于进一步论证。

笔者认为,我国的个体风险限制标准应充分考虑我国的国情和民情。通过对我国人口死亡率变化规律的分析发现(图 2),我国人口死亡率除了在 1959 ~ 1961 年的 3 年自然灾害时期有所反复之外,总体处于下降趋势,并从 1977 年起逐步稳定在 0.66% 左右。一般而言,一个国家的人口死亡率从一个侧面反映了该国的经济发展水平和公众的基本生存条件,这是社会个体难以改变且必须接受的事实,可以作为制定个体可容忍风险标准的参考。与我国多年平均 0.66% 的人口死亡率相比,国内学者建议的个体风险标准高出近一个数量级^[11]。另外,与澳大利亚、英国、荷兰的人均 GDP 比较表明,我国的人均 GDP 是这些国家的 1/15 ~ 1/20,经济水平还比较低。因此,国内学者建议的个体风险标准相对于我国当前经济社会发展水平而言基本合适,稍有些偏高。建议我国溃坝个体可容忍风险标准为 $5 \times 10^{-4}/a \sim 1.0 \times 10^{-3}/a$;与之相对应,可接受风险标准提高一个数量级,为 $5 \times 10^{-5}/a \sim 1.0 \times 10^{-4}/a$ 。

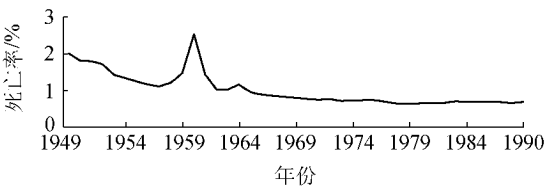


图 2 我国人口死亡率
Fig.2 Annual average mortality
for multiple years in China

3.3 社会风险标准

根据对社会生命损失度量方式的不同,社会风险标准有 $F-N$ 线准则和生命损失期望准则 2 种限制标准。

3.3.1 $F-N$ 线准则

该方法中的 N 表示死亡人数, F 为大于或等于 N 的概率。 $F-N$ 线的标准线是以双对数形式确定的由若干段斜线组成的多段线。 $F-N$ 线准则最初被用于核工业领域的风险评估,目前已被许多国家采用。 $F-N$ 线准则可用一个通用公式表示:

$$1 - F_N(x) < \frac{C}{x^n}$$

(7)

式中: n ——限制线的陡度; C ——常数,决定了限制线的位置。

准则中的陡度 $n = 1$ 称为中性风险,陡度 $n = 2$ 称为转移风险。一般情况下,较大的事故被赋予较高的权重,以保证只有在发生概率较低时才会被接受。一些国家和地区使用的 $F-N$ 线准则的系数取值见表 1。

表 1 部分 $F-N$ 限制线标准
Table 1 Some international standards
for the $F-N$ curve

国家或地区	n	C
英国	1	10^{-2}
香港	1	10^{-3}
荷兰	2	10^{-3}
丹麦	2	10^{-2}

Vrijling 等在上述标准的基础上,提出了一种确定基础设施或某

地点可接受风险标准的改进方法^[12],并规定 $n = 2$,因子 C 为基础设施在国家水平上的数值 N_A 、风险折减因子 k 和政策因子 β 的函数:

$$C = \left(\frac{100\beta}{k\sqrt{N_A}} \right)^2$$

(8)

式(8)为不同地区根据各自经济发展水平制定不同的可接受风险标准提供了参考.目前我国在役数量最多的小型水库除少部分管理、维护及加固费用比较有保证之外,大多数水库资金来源匮乏.有财政拨款的水库,由于东西部经济发展水平存在较大差异,各地在资金匹配总量上差别也很大.但这些水库一般对当地的经济贡献较大.如果全国制定统一标准,无疑将使不少西部地区的水库因缺乏资金维护和加固而停止运行或改变运行条件,这又将进一步恶化当地经济发展环境.因此,笔者认为,从国家层面上,为东西部地区制定不同的溃坝社会可接受风险标准是一个比较好的解决办法.当然,这只是一种当前阶段的变通方式,当西部地区经济水平好转以后,可以逐步将全国标准予以统一以便于管理.

根据本文的分析,结合我国和其他国家经济发展水平的对比并参考国外相关标准,建议我国 $F-N$ 线准则为:西部经济落后地区可接受风险参数为 $C = 10^{-3}$, $n = 1.5 \sim 2$,广泛可接受风险标准为 $C = 10^{-2}$, $n = 1.5 \sim 2.0$;东部经济发展较快地区可接受风险参数为 $C = 10^{-3}$, $n = 1 \sim 1.5$,广泛可接受风险标准为 $C = 10^{-2}$, $n = 1 \sim 1.5$.根据上述建议得到的 $F-N$ 线准则如图 3 所示.

3.3.2 生命损失期望准则

生命损失期望准则目前主要有美国垦务局(USBR)和加拿大的 BC Hydro 公司使用. USBR 和 BC Hydro 的生命损失期望准则分别为 $E(N) < 10^{-3}$ 人/a 和 $E(N) < 10^{-2}$ 人/a^[11].

鉴于我国当前经济水平还比较低,大坝下游地区人口居住一般比较密集,如果采用生命损失期望来度量社会风险,在参考 BC Hydro 和 USBR 标准的基础上,建议我国生命损失期望准则为 $E(N) < 10^{-2}$ 人/a.

4 结 语

- 通过对我国溃坝生命损失风险的度量、标准等问题的研究,取得了以下成果:
- a. 研究了个体生命损失和社会生命损失的估算方法,并就其中的不确定性因素进行了分析,对传统的估算方法进行了改进.
 - b. 生命风险标准的建立受一个国家的政治、经济、文化、公众心理、技术发展水平等因素的影响,制定一套合理的风险控制标准,是一个需要综合考虑的复杂问题.基于上述考虑,分析了我国制定溃坝生命损失风险标准时应考虑的因素.
 - c. 通过对国外风险标准的调查研究,结合我国的特点,提出了适合我国不同地区的生命损失风险评价参考标准.

参考文献:

[1] 李雷. 溧阳市沙河水库东副坝溃坝生命损失估算[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(1): 46-49.
[2] 王正旭. 英国的水库安全管理[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(4): 65-68.
[3] 何鲜峰. 大坝运行风险及辅助分析系统研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
[4] GRAHAM W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure(DSO-99-06) [R]. Washington D. C. : Dam Safety Office , U S Bureau of Reclamation Safety , 1999 : 44.
[5] BOTTELBERGHS P H. Risk analysis and safety policy developments in The Netherland[J]. Journal Hazard Mater, 2000, 71(3): 59-84.
[6] PIERS M. Methods and models for the assessment of third party risk due tot aircraft accidents in the vicinity of airports and their implications for societal risk[G]//JORISSEN R E ,STALLEN P J M. Quantified Societal Risk and Policy Making Dordrecht :Kluwer

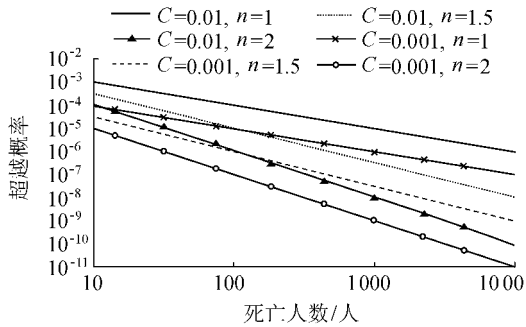


图 3 本文建议的 $F-N$ 线准则
Fig.3 Recommended standards for the $F-N$ curve

Academic Publishers ,1998.

[7] DEKAY M L , MCCLELLAND G H. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood[J]. Risk Analysis ,1993 ,13(2) :193-205.

[8] 周克发 ,李雷. 我国已溃决大坝调查及其生命损失规律初探[J]. 大坝与安全 ,2006(5) :14-18.

[9] ANCOLD. Guideline on Risk Assessment[R]. Tatura :ANCOLD ,2003.

[10] 李雷 ,王仁钟 ,盛金宝 ,等. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2006 :15-20.

[11] 匡少涛 ,李雷. 澳大利亚大坝风险评价的法规与实践[J]. 水利发展研究 ,2002(10) :55-59.

[12] JONKAMNA S N , PHAJMV G , VRIJLING J K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage[J]. Journal of Hazardous Materials ,2003 ,99(1) :1-30.

Discussion on analysis method for risk of life loss caused
by dam failure in China

SONG Jing-xiang^{1,2} , HE Xian-feng^{3,4}

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
3. Yellow River Institute of Hydraulic Research , Zhengzhou 450003 , China ;
4. Embankment Safety & Disaster Prevention Research Center of Ministry of Water Resources , Zhengzhou 450003 , China)

Abstract : To meet the needs of dam risk assessments , the assessment contents of risk of life loss caused by dam failure (including individual risk and social risk) are analyzed and determined. The standard establishment of risk of life loss needs to comprehensively consider the influences of national politics , economy , culture , public psychology and technical development level. Based on this , the standard-setting principles of dam risk assessment are studied , considering the loss in the vicinity of the dam and its downstream area. Region division standards for China ' s risk of life loss are put forward based on the great difference in population distribution and economic development level among different regions.

Key words : risk management ; dam ; individual risk ; social risk ; risk standard