

大坝溃决导致的生命损失估算方法研究现状

李 雷 ,周克发

(南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所 ,江苏 南京 210029)

摘要 :简要介绍国内外已溃坝的生命损失概况 ,总结了在大坝溃决中影响生命损失的 4 个重要因素 ,即风险人口、洪水严重程度、警报时间和公众对溃坝事件严重性的理解程度。较为详细地介绍了目前国外估算溃坝生命损失的常用方法 :Dekay & McClelland 法、Graham 法、RESCDAM 法(简化 Graham 法)、Assaf 法和 Utah 州立大学法 ,并初步评价了它们的发展过程 and 方向。在此基础上提出了我国生命损失估算方法的两个研究方向 ,建议我国溃坝生命损失估算方法研究应从调查已溃坝的生命损失入手 ,研究估算溃坝生命损失的经验公式 ,继而研究溃坝生命损失的可靠度分析方法。

关键词 :生命损失估算 ;溃坝 ;风险评价 ;风险人口 ;警报时间 ;洪水严重程度

中图分类号 :C924.24

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2006)02-0076-05

Methods for evaluation of life loss induced by dam failure//LI Lei ,ZHOU Ke-fa(Dam Safety and Management Department of Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China)

Abstract :An introduction was given to the general situation about life loss induced by dam failure at home and abroad. Four important influencing factors ,including population at risk ,severity of flood ,warning time ,and public 's awareness of severity of dam failure events ,were analyzed. Some methods for evaluation of life loss currently used at home and abroad were discussed in detail ,which included Dekay & McClelland method ,Graham method ,RESCDAM method (i. e. simplified Graham method) ,Assaf method ,and the method developed by researchers of Utah State University ,and the trends of their development were briefly assessed. Furthermore ,it is suggested that the research on the method in China should begin with the investigation of life loss induced by dam failure ,and be followed with a study of empirical formulas for evaluation of life loss ,and finally ,the method for reliability analysis of the evaluated result should be studied.

Key words :evaluation of life loss ;dam failure ;risk evaluation ;population at risk ;warning time ;severity of flood

21 世纪我国执政理念和治水思路正在转换 ,治水新理念的一个重要方面就是要建立风险和风险管理的观念 ,水库大坝风险评价中的一个关键方面就是大坝溃决导致下游生命损失的评价技术。

大坝溃决一般会引起重大的灾难性事故 ,并造成严重的生命损失 ,给社会与环境带来很大的灾难。目前我国在生命损失评价方面的研究才刚刚起步。本文介绍了国内外主要溃坝事件造成的生命损失情况 ,总结了影响生命损失的几个重要因素 ,评价了国外大坝溃决导致生命损失的几种估算方法 ,针对我国实际情况 ,提出了我国生命损失估算方法研究的一些设想 ,为我国大坝溃决的生命损失估算方法研究抛砖引玉。

1 国内外大坝溃决导致的生命损失

1.1 国外

1963 年 9 月 9 日 22 :40 意大利北部的 Vajont 坝

在竣工 3 年之后 ,1 块 $268 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑坡体在 20 ~ 30 s 内滑入水库。该坝是当时世界上的第二高坝 ,滑坡体造成 $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的巨大水体涌出 ,波浪上升到 250 m 之后冲向大坝下游 2 km 处的 Longarone 村 ,淹没了水库山坡上的 Erto 与 Casso 镇 ,导致大约 2 000 人死亡 ,仅 Longarone 村就有 1 269 人丧生 ,其伤亡率约为 94%。意大利北部尾矿坝 Stava 坝于 1985 年 7 月 19 日 12 :20 溃决 ,造成大坝下游 1 km 处 Stava 社区 300 个风险人口中约 90% 的伤亡。美国也发生过较多的大坝溃决事件 ,提供的大坝溃决数据较为详细。20 世纪 80 年代中期坝高超过 15 m 的大坝有 5 459 座 ,超过 7.6 m 的多达 71 000 座。1960 ~ 1998 年美国由于大坝溃决造成的伤亡人数超过 300。1985 年下半年至 1994 年下半年的 9 年间美国发生的大坝溃决超过 400 次 ,但仅仅造成 10 人死亡。这些事件中大多数是小型坝 ,许多是无人管理的。由

此可见 90%以上的小型坝溃决并没有造成人员的伤亡。

1.2 国内

国内从 1954~2004 年发生了 3482 起大坝溃决事件 其中有大型水库 2 座 中型水库 124 座 小(1)型水库 668 座 小(2)型水库 2668 座。2 座大型水库是河南“75.8”大洪水中溃决的板桥、石漫滩水库 由于遭遇了超标洪水而溃决。所有溃决事件中 漫坝是最主要的一种溃坝模式 所占比例为 50.2% 坝体质量问题引起的溃坝事件占 34.8% 管理和其他问题引起的溃坝事件占 15%^[1]。但我国在死亡人数统计方面资料极少 研究极为困难。表 1 为我国发生过重大溃坝事故和生命损失的水库大坝^[2]。

2 生命损失估算的几个关键参数

2.1 风险人口 P_{AR} (Population at risk)

风险人口 P_{AR} 是指下泄洪水或溃坝洪水淹没范围内的人数 是影响溃坝生命损失的一个重要因素。它取决于洪水淹没范围、溃坝发生的时间和人口在淹没区的分布状态。因此往往需要根据溃坝(或下泄)洪水计算确定淹没区 并利用人口调查统计数据、野外现场、航空照片、电话采访、地形图等来综合确定风险人口。美国垦务局曾利用遥感与地理信息系统 使用洪水淹没地图与人口统计信息来估算风险人口。但是要确切地知道风险人口并不容易 因为人口本身存在着很大的流动性 其估算方法具有诸多不确定性因素 因而风险人口估算结果也就不可避免地存在不确定性。

2.2 溃坝洪水的严重程度 S_D (Severity degree)

溃坝洪水的严重程度 S_D 与溃坝坝型、库容、下泄流量及下游地形地貌等有关 它是一个表示洪水

对居民毁损程度的参数。一般认为由洪水深度与洪水流速可以确定洪水严重程度 洪水严重程度等于水深与流速的乘积。洪水严重程度可分为以下 3 类 ①低严重程度:洪水没有冲走建筑物基础 ②中严重程度:一般房屋被洪水摧毁 但树木或被毁坏的房屋仍可以为人提供避难场所 ③高严重程度:洪水冲毁所在区域的一切东西 这种类型的洪水较为少见 美国 St. Francis 坝和意大利 Vajont 坝下游曾发生过高严重程度的洪水。

2.3 警报时间 W_T (Warning time)

警报时间 W_T 是下游群众从得到溃坝警报到撤退的时间 是另一个确定人员伤亡的重要因素。警报分类如下 ①无警报:在溃坝洪水到来之前没有发布警报 ②某种程度的警报:官方或媒体在溃坝洪水到来前 0.25~1.0 h 内发布警报 ③充分的警报:官方或媒体在溃坝洪水到达前 1.0 h 发布警报。

2.4 公众对溃坝事件严重性的理解程度

公众对发生的溃坝事件严重性的理解程度将在很大程度上影响到公众的自救措施和政府营救工作的成功率 是生命损失研究中个人作用的一个重要方面 它和政府的宣传、组织有很大的关系。公众对洪水严重程度的理解分为两种 ①模糊的:公众在警报发布时对实际存在的大坝溃决严重性没有正确的理解和反应 对洪水可能淹没范围和程度缺乏深刻理解 对应采取的逃生必要性、措施、路径缺乏了解 ②明确的:与上述情况相反。

3 国外生命损失估算的几种方法

3.1 Dekay & McClelland 法

美国垦务局 Brown 与 Graham^[3]根据历史上发生的一些溃坝生命损失(即死亡人数)数据 应用经验

表 1 我国重大溃坝事故和生命损失情况

大坝名称	地 点	溃决时间	坝 型	坝高/m	库容/10 ⁴ m ³	溃坝原因	生命损失/人
板 桥	河南泌阳	1975-08-08	黏土心墙坝	24.5	49 200	漫坝	22 564
石漫滩	河南午钢区	1975-08-08	均质土坝	25.0	9 180	漫坝	
铁佛寺	河南商城	1960-05-17	黏土心墙坝	14.5	2 000	漫坝	
滕 口	河南临汝	1961-09-28	黏土斜墙砌石坝	30.0	1 150	漫坝	119
竹 沟	河南确山	1975-08	黏土心墙坝	23.5	1 544	漫坝	248
刘家台	河北易县	1963-08-08	黏土心墙坝	35.9	4 054	漫坝	943
东川口	河北邢台	1963-08-04	堆石坝	31.0	2 700	漫坝	510
龙 屯	辽宁绥中	1959-07-22	黏土斜墙坝	9.5	3 000	漫坝	707
虎 台	辽宁抚顺	1971-07-31	黏土心墙坝	21.5	306	漫坝	512
桥墩门	浙江平阳	1960-08-10	土石混合坝	36.0	4 000	漫坝	291
洞口庙	浙江宁海	1971-06-02	均质土坝	21.5	255	滑坡垮坝	186
水口坑	浙江永康	1960-09-12	均质土坝	28.0	100	冲溃溢洪道溃坝	89
宝盖洞	湖南浏阳	1954-07-24	均质土坝	30.0	1 100	漫坝	466
横 江	广东揭西	1970-09-15	均质土坝	48.4	7 879	管涌垮坝	941
李家咀	甘肃庄浪	1973-04-29	均质土坝	25.0	114	漫坝	580
史家沟	甘肃庄浪	1973-08-25	均质土坝	28.6	86	漫坝	81
沟 后	青海共和	1993-08-27	混凝土面板砂砾石坝	71.0	330	施工差 无排水	320

统计的方法对溃坝历史记录数据进行分析 ,建立了较为简单的溃坝生命损失估算关系式 :

$$L_{OL} = \begin{cases} 0.5 P_{AR} & W_T < 0.25 \\ P_{AR}^{0.6} & 0.25 < W_T < 1.5 \\ 0.0002 P_{AR} & W_T > 1.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中 : P_{AR} 为风险人口 ,人 ; W_T 为警报时间 ,h ; L_{OL} 为生命损失 ,人。显然 ,公式(1)是比较粗糙的。同一风险人口 ,警报时间相差一点 ,依据公式(1) ,生命损失范围可能会变化很大。如风险人口为 5 000 人 ,若警报时间小于 0.25 h ,溃坝生命损失多达 2 500 人 ;若警报时间大于 1.5 h ,那么溃坝生命损失将会仅仅是 1 人。

美国垦务局 Dekay 与 McClelland^[4]在上述估算方法(Brown & Graham 法)的基础上对其进行改进 ,提出了包括洪水严重程度的溃坝生命损失经验估算公式 ,得到了一个包含风险人口、警报时间、溃坝洪水严重程度与生命损失的关系式 :

$$L(p) = a + b \ln P_{AR} + c W_T + d F + e W_T F \quad (2)$$

式中 : $L(p) = \frac{L_{OL}}{P_{AR}}$; F 为溃坝洪水严重程度 ; a, b, c, d, e 为系数。根据各溃坝参数的数值 ,可以确定式(2)中的系数 , $a = -2.586, b = -0.440, c = -0.759, d = 3.790, e = -2.223$,将式(2)简化后得

$$L_{OL} \approx 0.075 P_{AR}^{0.560} \exp(-0.759 W_T + 3.790 F - 2.223 W_T F) \quad (3)$$

DeKay 与 McClelland 还针对高、低洪水严重程度分别给出了各自的溃坝生命损失公式。

对于高严重程度的溃坝洪水 ,例如 ,被淹没居住区 20% 或 20% 以上被摧毁或被严重毁坏的地方 ,溃坝生命损失为

$$L_{OL} = \frac{P_{AR}}{1 + 13.277 P_{AR}^{0.440} \exp(2.982 W_T - 3.790)} \quad (4)$$

近似表达为

$$L_{OL} = 0.075 P_{AR}^{0.560} \exp(-2.982 W_T + 3.790) \quad (5)$$

对于低严重程度的溃坝洪水 ,例如 ,在被淹没居民区少于 20% 被摧毁或被严重毁坏的地方 ,生命损失为

$$L_{OL} = \frac{P_{AR}}{1 + 13.277 P_{AR}^{0.440} \exp(0.759 W_T)} \quad (6)$$

近似表达为

$$L_{OL} = 0.075 P_{AR}^{0.560} \exp(-0.759 W_T) \quad (7)$$

对于中等严重程度的溃坝洪水该法并没有给出一个合适的结果 ,只是认为中等严重程度 F 值的范围为 0~1 ,在估算溃坝生命损失时 ,取其范围的平

均值 0.5 进行计算 ,但是这种平均化处理会导致生命损失计算结果存在很大随意性。这是该法所无法处理的一个问题。

3.2 Graham 法

由于建立在溃坝淹没范围基础上的分析有诸多不确定性因素 ,溃坝模型需要估算形成溃决的时间、溃决形状与宽度和下游水动力参数。这些参数的变化会导致洪水深度、洪水宽度与洪水波前行时间的变化 ,将会引起风险人口、警报时间与洪水严重程度的不确定性。Graham 法^[5]认识到以上分析方法中的一些缺陷 ,给出了新的基于洪水严重程度的生命损失估算方法。

Graham 法不仅定性地对洪水严重程度加以区分 ,还考虑到了人们对溃坝洪水严重程度的不同理解 ,将这种理解分成明确理解和模糊理解 ,这就充分地考虑了溃坝生命损失的各个主要影响因素 ,有助于更为合理地估算溃坝生命损失。Graham 在 Brown & Graham 法和 Dekay & McClanand 法历次溃坝分析的基础上加以扩展 ,给出了一份较为简洁明了的溃坝生命损失死亡率 ,如表 2 所示。表 2 对于估算溃坝生命损失比较简便 ,按其将各个参数进行分类 ,可得出估算结果或估算范围。

表 2 Graham 建议的溃坝生命损失死亡率

洪水严重程度	警报时间/h	洪水严重程度理解	死亡率/%	
			建议值	建议值范围
高	无警报		0.75	0.30~1.00
高	0.25~1.0	模糊		
高	0.25~1.0	明确		
高	>1.0	模糊		
高	>1.0	明确		
中	无警报		0.25	0.03~0.35
中	0.25~1.0	模糊	0.04	0.01~0.08
中	0.25~1.0	明确	0.02	0.005~0.04
中	>1.0	模糊	0.03	0.005~0.06
中	>1.0	明确	0.01	0.002~0.02
低	无警报		0.01	0~0.02
低	0.25~1.0	模糊	0.007	0~0.015
低	0.25~1.0	明确	0.002	0~0.004
低	>1.0	模糊	0.0003	0~0.0006
低	>1.0	明确	0.0002	0~0.0004

注 :死亡率为预期风险人口中会死亡的百分数 ,设在某种状态下的风险人口死亡率为 f ,则生命损失为 $L_{OL} = f P_{AR}$

3.3 RESCDAM 法(简化 Graham 法)

芬兰 Peter Reiter 提出了一种简化的估算溃坝生命损失的方法 ,即 RESCDAM 法 ,并将之应用于芬兰 Seinajoki 地区 Kyrkosjarvi 坝的安全管理之中^[6]。RESCDAM 法不仅考虑了溃坝的警报时间、风险人口、洪水严重程度以及居民对洪水严重程度的理解程度 ,而且还分析了这些因素自身的特点以及其他一些因素(如溃坝原因和类型、溃坝发生时的天气、

溃坝发生的时间、风险人口自身的易损性、风险人口所在区域的地形地貌、救援工作、评估的可行性等)的影响,并对这些因素加以详细的划分和量化。该法的一个重要特点就是根据溃坝模式将溃坝淹没区域进行小区划,分成若干子区域分别进行估算。在Graham提出的基于溃坝洪水严重程度的生命损失伤亡率的基础上,得出了溃坝生命损失估算的修正公式:

$$L_{OL} = P_{AR} f i c \quad (8)$$

式中: f 为风险人口死亡率,见表2; i 为洪水严重程度影响因子,如生活环境影响、易损性影响等; c 为修正因子,它是在每一个次区域考虑警报效率与可能的紧急情况/营救行动的修正因子。

3.4 Assaf 法

加拿大 B. C. Hydro 公司 Assaf, Hartford 与 Cat-tanach 等在前人以经验统计与回归分析为基础的估算方法上,把可靠度概念引入了溃坝生命损失估算过程中,利用溃坝模型模拟技术和概率理论风险性分析来评价溃坝生命损失。该法模拟受到溃坝洪水威胁的居民所采取的行动,考虑了溃坝下游居民对溃坝危险的反应因素,并计算在淹没区域各个人口群体的生还概率。这就需要更为仔细地考虑每一个个体的详细情况,才可能方便地选择各个合理的估算参数。显然,该法对于估算溃坝生命损失更为合理、精确,但是所需要做的工作也将会更为复杂、繁多,估算溃坝生命损失存在着许多困难与不确定性因素。

该法利用风险人口分布、人口统计数据、溃坝模拟结果,得出了不同时间里溃坝生命损失估算公式。假设溃坝下游某一个具体位置的生命损失是淹没区域内所处单元(包括居民住所、工厂、医院、学校、商店与办公设施等建筑物)风险人口的生命损失之和。生命损失表示如下:

$$L_{OL\text{单元}} = P_{AR\text{单元}} (1 - P_{\text{生还}}) \quad (9)$$

$$P_{AR\text{单元}} = T_{NR\text{单元}} O_{AF\text{单元}/TDWY} \quad (10)$$

$$P_{\text{生还}} = (1 - P_T) P_{S/E} + P_T P_{S/C} \quad (11)$$

$$P_T = \begin{cases} 0 & W_D < L_{TD} \\ 1 & W_D > H_{SD} \\ \frac{W_D - L_{TD}}{H_{SD} - L_{TD}} & L_{TD} < W_D < H_{SD} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $L_{OL\text{单元}}$ 为某个给定单元的生命损失,人; $P_{AR\text{单元}}$ 为洪水泛滥时居住在该单元的人数; $P_{\text{生还}}$ 为洪水中逃生生还的概率,取决于警报时间、疏散撤离能力、营救能力、水流速度、水深与洪水上涨速度; $T_{NR\text{单元}}$ 为单元的居民总数; $O_{AF\text{单元}/TDWY}$ 为溃坝时的

单元居住率; P_T 为被洪水波浪冲倒的概率; W_D 为水深; L_{TD} 为最低冲倒深度; H_{SD} 为最高安全深度; $P_{S/E}$ 为个人退到安全地面所给定的生还概率; $P_{S/C}$ 为个人被洪水波浪围困所给定的生还概率。

从该法的分析过程可知,最为重要的是确定 $P_{\text{生还}}$,一旦确定了 $P_{\text{生还}}$ 就可以采用式(9)来估算溃坝生命损失。由于影响 $P_{\text{生还}}$ 的因素较多,要准确地衡量这些因素往往比较困难,因此该方法使用起来存在诸多问题,目前仍然处于发展之中,但仍不失为一种适合估算溃坝生命损失的先进方法。

3.5 Utah 州立大学法

Utah 州立大学 McClelland 与 Bowles 也提出了一种目前正处于发展阶段的溃坝生命损失估算方法^[7]。这种方法将溃坝淹没区域进行分区分带,在各个区带之中对溃坝生命损失的一些影响因素进行详细地考虑,根据区带的影响因素来考虑如何计算生命损失。显然,它所需要做的工作十分庞杂,对于调查统计及分区十分讲究。McClelland 与 Bowles 在这种方法中并没有给出明确估算溃坝生命损失的公式,只是给出了具体估算生命损失的一些关键因素。

3.6 对上述几种估算方法的评价

美国垦务局提出的 Dekay & McClelland 法、Graham 法、RESCDAM 法(简化 Graham 法)是基于对溃坝历史记录数据进行经验统计与回归分析得出的,这些溃坝生命损失估算方法很大程度上依赖于历史记录数据资料是否详细、充足。对各个参数的量化处理是否得当,也是影响溃坝生命损失估算结果的重要因素之一。目前这3种方法有的已经过时,有的因为其简单方便又切实可行,如Graham法在有些国家得到了应用。

一些发达国家对这3种方法已经不再使用或基本只作初步估算使用,Assaf法和Utah州立大学法指出了这3种方法的缺陷,一些学者正致力于以概率分析为基础的深入研究,并把可靠度概念引入到溃坝生命损失估算之中,但是这方面的研究成果目前并不多,在实际应用中也存在许多困难。这主要受制于所选溃坝模型是否合适、确定洪水淹没范围的工具(如地形图、地理信息系统等)、救援能力、风险人口自身条件(身体素质、防灾意识、职业性质等)以及经济与交通状况等。尽管如此,以可靠度理论为基础的溃坝生命损失的研究是生命损失研究的一个主要方向。

4 我国生命损失估算方法研究展望

21世纪“以人为本”的执政理念和“承受适度风险”的工程风险管理理念不断深入,生命损失已经成

为公共安全中一个热点和难点问题,是社会和公众关注的焦点。我国比国外任何一个国家都有条件研究溃坝生命损失,因为我国曾经发生了3480多起溃坝事件,但有较为详细记录的并不多,这使我们不得不面对资料极其匮乏和研究急需进行之间的矛盾。

文献[8]对溃坝生命损失进行评估,认为溃坝洪水灾害造成的生命损失 L_{OL} 是洪水的物理特征和洪泛区社会特征的函数,并给出了其一般表达形式,即 $L_{OL}=f(F,W,L,N)$,式中 F 为洪水特征,很大程度上取决于大坝的失事模式(坝型、坝体建筑材料、溃坝缺口的位置及大小等)和洪泛区的地理状况,可通过数值计算确定淹没区的最大洪水深度及增长速率、流速、洪水波到达时间等,当水深和流速超过某一模糊域值,人的生命将会受到较大威胁; W 为洪水的预警预报系统和从洪泛区撤离的条件,提前预警的时间对生命损失的影响极大; L 为洪泛区的土地利用情况和区内建筑的抗洪性能等; N 为溃坝淹没区的人口总数,不同时段(如每天、每周、每季)人口的近似分布及位置(离坝的距离、高程等)。但总的来说,目前国内对溃坝生命损失的研究仍处于初级阶段,尚未有学者对此做出系统的研究。

由于国内研究甚少,借鉴国外的发展经验,我国生命损失估算方法应注重以下两个方向的研究。

①估算生命损失的经验公式研究。通过现场调查已溃坝的历史资料,发掘出溃坝事件中生命损失的实际情况,包括时间、数量、人数分布、居住条件等。国外的资料只能作为参考,从国外资料中总结得到的经验公式是否适合我国还有待验证。由于我国人口数量、密度和国外有着巨大的差别,应该建立适合我国实际情况的经验公式。我国已溃坝事件的数据能否得到充分发掘是该项研究成败的关键。该方向的研究应该努力争取政府主管部门的支持和有关部门的协助。②溃坝生命损失的可靠度分析研究。溃坝生命损失的可靠度分析研究是建立在溃坝后生命存活概率的基础之上。可以分析溃坝事件中生命存活的模式和路径,通过事件树的方法,获得在每条路径上生命存活的可能性,最后综合为生命存活概率。该方向的研究需要在很多细节问题上做深入的研究,短期较难见成效。上述两个方向都有相当的难度,建议先开展估算生命损失经验公式的研究。

5 结 语

a. 溃坝生命损失估算方法的研究是当前社会

发展的需要,是社会和公众关注的热点、焦点问题。在“以人为本”的理念下,为了保障公共安全,必须要研究各种突发事件中人员死亡的规律性,研究如何减少和避免生命损失的措施。

b. 我国曾经发生过3480多起大坝溃决事件,造成了惨重的损失。在当今经济社会发展条件下,溃坝事件的后果将会比以往严重得多,社会将难以承受。

c. 国外在20世纪末已经较为系统地展开了对溃坝生命损失的研究,取得了很多研究成果,目前正在不断完善和改进中。在已有溃坝生命损失资料的研究基础上,重点研究总结了估算生命损失的经验公式,并开展了以可靠度理论为基础的溃坝生命损失研究。

d. 我国已开始重视溃坝生命损失的研究,但由于资料极度缺乏和研究难度大,至今未见到溃坝生命损失方面的系统研究成果。

e. 建议我国应尽快从两个方面开展溃坝生命损失研究,一是估算溃坝生命损失的经验公式研究,二是溃坝生命损失的可靠度分析研究。建议近期先从调查已溃坝的生命损失入手。

参考文献:

- [1] 李雷,彭雪辉,王昭升.水库大坝溃决模式和溃坝概率分析研究[R].南京水利科学研究院,水利部综合事业局,2005:148-154.
- [2] 汝乃华,牛远光.大坝事故与安全:土石坝[M].北京:中国水利水电出版社,2001:148-154.
- [3] BROWN C A, GRAHAM W J. Assessing the threat to life from dam failure[J]. Water Resources Bulletin, 1988, 24(6):1303-1309.
- [4] 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.
- [5] GRAHAM W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[J]. Sedimentation & River Hydraulics, 1999, 4(5):1-43.
- [6] REITER P. Loss of life caused by dam failure: the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki[R]. Helsinki: PR Water Consulting Ltd, 2001.
- [7] McCLELLAND D M, BOWLES D S. Towards improved life loss estimation methods: lessons from case histories[R]. Seinajoki: Rescdam seminar, 2000.
- [8] 姜树海,范子武.大坝的允许风险及其运用研究[J].水利水运工程学报,2003(3):7-12.

(收稿日期 2005-07-28 编辑 骆超)