

滑坡次生灾害损失评估方法研究

谢全敏¹, 李道明¹, 翟鹏程²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 理学院, 武汉 430070)

摘 要: 针对目前滑坡灾害破坏损失评估研究还没有涉及滑坡次生灾害破坏损失评估方面的研究, 提出并建立了滑坡次生灾害破坏损失的评估模型与方法。应用故障树分析法 (FTA) 和事件树分析法 (ETA) 相结合的因果图方法对滑坡次生灾害作可靠性分析, 由此对滑坡次生灾害损失进行了预测及评估。

关 键 词: 滑坡; 次生灾害; 损失评估; 故障树分析法; 事件树分析法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on loss evaluation method of landslide secondary hazards

XIE Quan-min¹, LI Dao-ming¹, ZHAI Peng-cheng²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Landslide hazard is a serious natural hazard next only to earthquake and floodwater. It has brought about great losses to the economic and social development worldwide. Each year it causes a loss up to billions of dollars in the whole world. A striking amount of money has been spent on the prevention and redress of the hazard and much more losses have been incurred indirectly in addition. In China, mountains where landslide hazards happen frequently and densely cover 70 % of the area. China is among those countries stricken most by these hazards. These hazards give rise to loss with a total value of hundreds of millions Yuan and great damages to the country and people's lives and properties. Since till now the damage and loss evaluation of secondary hazards has not been touched upon; the authors propose an evaluation model by making use of causal diagram combining failure tree analysis (FTA) and event tree analysis (ETA) to make reliability analysis of the secondary hazards system and forecasting of the losses thus arising from.

Key words: landslide; secondary hazards; loss evaluation; failure tree analysis(FTA); event tree analysis(ETA)

1 引 言

滑坡对人类社会发展和经济建设的危害是世界性的, 它给世界各国造成的经济损失估计每年可达数十亿美元, 防灾减灾费用十分惊人。此外, 工程不能及时发挥效益或使用中断, 其间接损失更大。我国因 70 % 地域为山区, 故滑坡灾害发生密度大、频率高, 已成为世界上受滑坡危害最严重的国家之一, 每年因滑坡灾害造成的损失数以亿计, 给国家和人民生命财产带来巨大损失, 产生严重社会影响。目前滑坡灾害破坏损失评价方法主要是对滑坡灾害所造成的直接灾害进行评价预测, 而对由于滑坡灾害破坏所引起的次生灾害如水灾、火灾、有毒

物质的散逸、爆炸、以及瘟疫流行等, 则基本上没有涉及, 但滑坡次生灾害也可能对人类造成巨大的损失^[1-8, 10, 13-15], 所以对滑坡次生灾害破坏损失评价研究应是滑坡灾害风险评价研究的一个重要方面, 这对滑坡灾害的防灾减灾工作及灾后的抢险救灾工作都具有重要意义^[1, 2, 4, 7-11, 16]。

从系统工程的角度来看, 可以认为一个区域是一个大系统, 而可以引发区域滑坡次生灾害的各个因素可以组成一个小系统。系统内的各个因素是相互联系、相互制约的, 因此要对滑坡次生灾害损失作出评价, 就必须用系统工程的方法进行分析; 如果从可靠性的角度来进行评价, 就应使用系统可靠性分析技术来对产生滑坡次生灾害的原因进行分析。

本文应用系统可靠性分析技术,研究滑坡引发的次生灾害破坏损失的评价模型及其相应的评价方法^[4,5,9-16]。

2 滑坡次生灾害破坏损失评价模型与方法

为了建立滑坡次生灾害破坏损失的评价模型与方法,首先作以下假设:(1)各种滑坡次生灾害均为互相独立的基本灾害事件,记为集合 D : $D = \{D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_f\}$, 其中 D 称为“滑坡次生灾害事件集”。由滑坡灾害引发的火灾、毒气(物)散逸,放射性污染、水灾、瘟疫等次生灾害可视为基本灾害事件,由 D_i 表示; f 为基本灾害事件的种类数。(2)当发生 I_j 类滑坡灾害时体系的次生灾害损失期望值为

$$\mu(I_j) = \sum_{i=1}^f \mu_{D_i}(I_j) \quad (1)$$

式中: $\mu(I_j)$ 为当 I_j 类滑坡灾害发生时体系中第 i 种灾害事件的损失期望值; I_j 为滑坡灾害事件。

下面讨论 $\mu_{D_i}(I_j)$ 的求法,这里提出采用故障树分析法(FTA)和事件树分析法(ETA)相结合的因果图方法:故障树分析法是已知结果,用推理的方法寻找可能引起这种结果的各种原因,是一种由果及因的逆向推理方法。事件树分析法则是一种已知一种原因,用推理方法去寻找可在能引起的各种结果,是一种由因及果的正向推理方法。事件树分析法适用于大型复杂系统,在这种系统中设置一些限制各种初因事件不良后果的安全设施。一般来说,对某一种初因事件,若存在 N 种限制设施,每种设施只能取正常或失效两种状态,则该初因事件造成的事故序列为 2^N 个。每个事故序列的发生概率就是构成事故序列各环节的环节事件的条件概率的乘积,而每个环节的条件概率又可由故障树分析法得出,这两者的结合就构成了因果图。

为了建立事件 D_i 的因果图,设其初因事件记为 B_{i0}^j , 其 n 个环节事件分别记为 $B_{i1}^j, B_{i2}^j, \dots, B_{in}^j$, m 个事故序列分别记为 $E_{i1}^j, E_{i2}^j, \dots, E_{im}^j$, 第 v 个环节事件 B_{iv}^j 的发生概率为 p_{iv}^j , 与 B_{iv}^j 对应的故障树记为 T_{iv}^j 。

为了清楚地说明滑坡次生灾害的因果图预测方法,以由 I_j 类滑坡灾害所引发的火灾 D_i 为例说明其求解步骤:

① 如果认为初因事件 B_{i0}^j 为引发火灾所应具备的条件,即系统内已经存在发火源,由此可以建

立可能导致 B_{i0}^j 发生的底事件集 b_{i0}^j 。

$$b_{i0}^j = \{b_{0u}^j | u \in s\} \quad (2)$$

式中: b_{0u}^j 为在 I_j 类滑坡灾害发生时体系的可能导致 B_{i0}^j 发生的第 u 种底事件; s 为底事件的总数。在这里 b_{0u}^j 是:机械设备发生故障而引起的设备发热或是设备部件间摩擦发出火花,电气设备发生的故障使设备发热或放出火花、化工原料发生化学反应等。

② 建立可能导致等 v 个环节事件 B_{iv}^j 发生的底事件集 b_{iv}^j

$$b_{iv}^j = \{b_{vk}^j | k \in q_v\}, \quad k=1,2,\dots,q_v \quad (3)$$

式中: b_{vk}^j 为在 I_j 类滑坡灾害发生时体系内可能导致 B_{iv}^j 发生的第 k 种底事件; q_v 为 v 环节底事件的总数,这里可以认为是限制火灾发生发展的第 v 个限制设施。例如,当第 v 个环节事件为“火灾发生,但运行人员未能灭火”,这时就可能是运行人员处理失误、灭火器发生故障等。

③ 建立事故序列集合 E_i^j

$$E_i^j = \{E_{ir}^j | r \in 2^n\} \quad (4)$$

式中: E_{ir}^j 为当初的事件 E_{i0}^j 发生并经过 r 个环节后发生的第 r 个事故; n 为环节数。实际上 E_{ir}^j 就是体系发生火灾后的第 r 种结果,它可以是体系内的部分设备损坏,停产 1 d 或厂房受到破坏,停产 1 个月等。在一般情况下由于各事件的相依性,许多事故序列不可能出现,或无意义,所以事实上事故序列数远小于 2^n 个。

④ 建立故障树集 T_i^j

$$T_i^j = \{T_{iv}^j | v \in n+1\}, \quad v=0, 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: T_{iv}^j 为 I_j 类滑坡灾害发生时第 i 类灾害事件中第 v 环节的故障树; n 的意义同上。这里 T_{iv}^j 的底事件集就是 b_{iv}^j 。当 b_{iv}^j 为真时可能导致 T_{iv}^j 为真。

⑤ 计算 b_{iv}^j 中所有最小割的集合 C_v

由上行法或下行法求出对应于 T_{iv}^j 事件的所有最小割形成集合 C_v 记为

$$C_v = \{C_t^v | t \in L_v\} \quad (6)$$

式中: $C_t^v (\subset b_{iv}^j)$ 为一最小割,并有相应的最小割集 $M_t^v (\subset q_v)$; C_t^v 中每一底事件 $b_{vk}^j (k \in M_t^v)$ 为真,则 T_{iv}^j 为真;任一 $b_{vk}^j (k \in M_t^v)$ 不为真,则 T_{iv}^j 不为真。这里 $q_0 = s$, $l_v = |L_v|$ 为最小割的个数, $l_v < n_v$, $n_v = |q_v|$, 即

$$C_h^v = \bigcap_{k \in M_h^v} b_{vk}^j \quad (h \in L_v) \quad (7)$$

表示 C_h^v 所有底事件为真。

⑥ 计算各 B_{iv}^j 的发生概率

实际上 p_{iv}^j 是通过 T_{iv}^j 求出的, 显然由上可知每一最小割 C 点对应于限制设施的一种失效模式, 即

$$T_{iv}^j = \bigcup_{h \in L_v} C_h^v = \bigcup_{h \in L_v} \bigcap_{k \in M_h^v} b_{vk}^j \quad (8)$$

$$p_{iv}^j = P(T_{iv}^j) = P\left\{\bigcup_{h \in L_v} C_h^v\right\} \quad (9)$$

这里 T_{iv}^j 的发生概率是由各个底事件的失效概率所决定的。

⑦ 计算各 E_{ir}^j 的发生概率

设事故序列总数为 w , 由因果图可知其环节数为 $w-1$, 且

$$\begin{aligned} E_{i1}^j &= B_{i0}^j \cap \bar{B}_{i1}^j \\ \dots &\dots \dots \end{aligned} \quad (10)$$

$$E_{iw}^j = B_{i0}^j \cap B_{i1}^j \dots B_{i(w-2)}^j \cap B_{i(w-1)}^j$$

由此可得

$$\begin{aligned} P(E_{i1}^j) &= P(B_{i0}^j)P(\bar{B}_{i1}^j) = P_{i0}^j(1 - P_{i1}^j) \\ \dots &\dots \dots \end{aligned} \quad (11)$$

$$p(E_{iw}^j) = p_{i0}^j p_{i1}^j \dots p_{i(w-2)}^j p_{i(w-1)}^j$$

⑧ 对事故序列 $E_i^j = \{E_{i1}^j, \dots, E_{iw}^j\}$ 损失估计

设当 E_{ir}^j 发生时体系损失为 μE_{ir}^j , 当应用因果图来进行分析时, 显然环节事件越多, 事故序列也越多。因此, 每一事故的损失灾害事件的各种可能出现的情况分别进行分析, 就可以较准确地估计出对应于每一事故序列的损失值 μE_{ir}^j , 从而可以得出当 D_i 类次生灾害发生时体系损失期望值:

$$\mu_{Di}(I_j) = \sum_{r=1}^w \mu(E_{ir}^j)P(E_{ir}^j) \quad (12)$$

当已求出各种次生灾害的损失期望值 $\mu_{Di}(I_j)$ 后, 即可用式 (1) 求出由 I_j 类滑坡灾害引发的体

系次生灾害的损失期望值。当 I_j 类滑坡灾害在体系使用期内发生概率为 $P(I_j)$, 则体系在使用期限内可能发生的次生灾害总损失期望值为

$$\mu = \sum_j \mu(I_j)P(I_j) = \sum_j \sum_i \mu_{Di}(I_j)P(I_j) \quad (13)$$

3 实例研究

某工厂右侧有一古滑坡, 如果该滑坡灾害发生后, 根据分析该工厂受影响的一个车间的厂房、机械设备基本完好, 不会造成较大的直接损失, 但车间内的供电及用电设备将会出现故障, 由此可能引起滑坡次生灾害——火灾, 而造成重大损失。下面就其可能造成的损失期望值进行评价预测, 见图 1。

① 先确定初因事件 B_{i0}^j 及环节事件 B_{i1}^j 、 B_{i2}^j 、 B_{i3}^j 。由前述所述可知, 可认为 B_{i0}^j 是车间内已经具备发火源, 而 B_{i1}^j 是由发火源所引发的火灾, B_{i2}^j 是首阶限制设施即操作人员没能控制火势, 灭火未能成功, B_{i3}^j 是第二阶限制设施即厂内消防系统灭火也未成功, 至此火势迅速蔓延, 已无法控制。

② 分别确定与 B_{iv}^j 相对应的各底事件集 $b_{iv}^j (v=0, 1, 2, 3)$ 。由前述所知车间内出现发火源的原因是供电及用电设备发生故障, 由此可以确定与 B_{i0}^j 相对应的底事件集 $b_{i0}^j = \{b_{i01}^j, b_{i02}^j\}$, 其中 b_{i01}^j 表示供电设备发生故障、设备发热或发出电火花; b_{i02}^j 表示用电设备发生故障、设备发热或发出电火花。由于在车间内可以发生火灾的设施只有 2 种, 所以 $b_{i1}^j = \{b_{i11}^j, b_{i12}^j\}$, 其中 b_{i11}^j 为设备起火; b_{i12}^j 为厂房起火, 而在第一阶限制设施未能灭火, 即 B_{i2}^j 发生, 与其对应的底事件集 $b_{i2}^j = \{b_{i21}^j, b_{i22}^j\}$, 其中 b_{i21}^j 为运行人员灭火失误; b_{i22}^j 为灭火器故障, 而造成 B_{i3}^j 发生, 即第二阶限制设施未能灭火的底事件集 $b_{i3}^j = \{b_{i31}^j, b_{i32}^j\}$, 其中 b_{i31}^j 为灭火器控制故障; b_{i32}^j 为灭火器硬件故障。

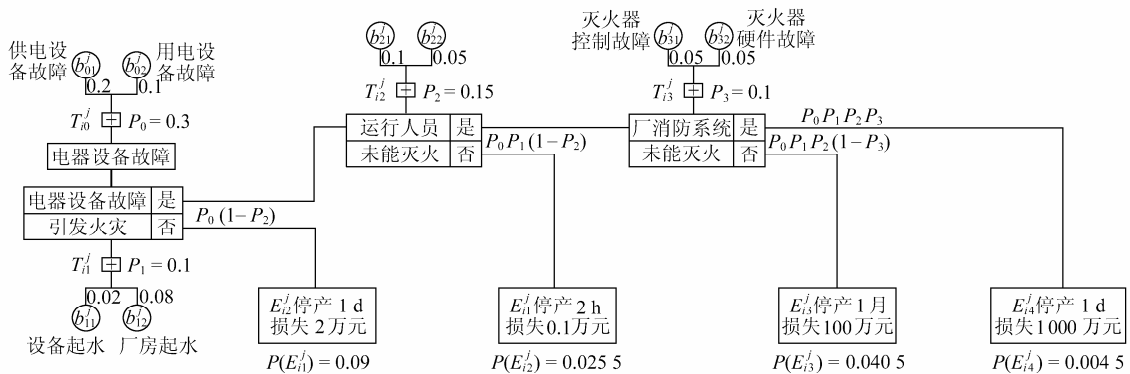


图 1 某滑坡次生灾害破坏损失期望值评价预测计算图

Fig.1 The calculation chart of damage losses of landslide secondary hazards

③ 求出各个底事件集中的各个底事件的发生概率,并在此基础上用故障树分析法求出初因事件及各环节事件的发生概率。这里各种设备发生故障、厂房在一定条件下起火、人员操作失误等底事件的发生概率一般是根据设备的设计指标、统计分析的结果及实际经验选取。由此可以计算出各个环节及初因事件的发生概率 (p_{iv}^j 简写为 P_{-}) 为 $p_0 = p(B_{i0}^j) = 0.30$; $p_1 = p(B_{i1}^j) = 0.10$; $p_2 = p(B_{i2}^j) = 0.15$; $p_3 = p(B_{i3}^j) = 0.10$ 。

④ 确定事故序列 E_{i1}^j 、 E_{i2}^j 、 E_{i3}^j 、 E_{i4}^j 及与其相对应的损失值。由于已经确定了各环节事件,这样就可以很方便地确定各事故序列及损失值。如 E_{i1}^j ,由因果图可知:此时电器发生故障,但没有起火,这时只需对电器进行修复,因此,只停产 2 h,损失 0.1 万元。 E_{i2}^j 表示发生了火灾但运行人员灭火成功,只需停产 1 d 对部分设备及厂房进行修复,损失 2 万元。 E_{i3}^j 表示发生较大的灾运行人员未能灭火,而厂内消防系统灭灾成功,但此时设备、厂房损失较大,停产一月进行修复,损失 100 万元。表示发生了大火灾,运行人员及厂内消防系统均没能控制火势,厂房、设备完全被毁,损失 1000 万元。

⑤ 求出事故序列 E_{i1}^j 、 E_{i2}^j 、 E_{i3}^j 、 E_{i4}^j 的发生概率。由于已经求出了各个环节及初因事件的发生概率,根据式(9)可求出各事故序列的发生概率为: $p(E_{i1}^j) = 0.090\ 00$; $p(E_{i2}^j) = 0.025\ 50$; $p(E_{i3}^j) = 0.004\ 05$; $p(E_{i4}^j) = 0.000\ 45$ 。

⑥ 求出 I_j 类滑坡灾害发生时该车间的次生大灾损失期望值 $\mu_{di}(j)$ 。由前已知: $\mu(E_{i1}^j) = 0.1$ 万元; $\mu(E_{i2}^j) = 2$ 万元; $\mu(E_{i3}^j) = 100$ 万元; $\mu(E_{i4}^j) = 1\ 000$ 万元。由于 $\mu_{Di}^j = \sum_{r=1}^4 \mu(E_{ir}^j)P(E_{ir}^j)$, 则 $\mu_{Di}(j) = 9.86$ 万元。这里应用本文所提出的方法仅对滑坡引起的滑坡次生灾害——火灾进行了评估分析,对于其它滑坡次生灾害,如水灾、有毒物质的散逸、爆炸、以及瘟疫流行等的破坏损失评估同样可按上述方法进行分析。限于篇幅,这里不再研究分析。

4 结 语

滑坡次生灾害(如水灾、火灾、有毒物质的散逸、爆炸、以及瘟疫流行等)破坏损失评价应是滑坡灾害风险评价的一个重要方面,这对滑坡灾害的防灾减灾工作及灾后的抢险救灾工作都具有重要意义。本文提出了滑坡次生灾害破坏损失评价研究,应用故障树分析法(FTA)和事件树分析法(ETA)相结合的因果图方法对滑坡次生灾害作可靠性分

析,由此对滑坡次生灾害损失进行评价预测。本文研究的重点是建立概念、模型与方法,对某些具体问题及实际计算公式,还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 茹继平. 土木基础设施减灾基础研究进展与趋势[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 1—5.
RU Ji-ping. Development of fundamental researches on disaster mitigation of civil infrastructure systems[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(6): 1—5.
- [2] 郑远长. 防灾减灾的基础研究及应用研究进展概况[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 1—5.
ZHENG Yuan-chang. Perspective of the basic and applied study in disaster prevention and reduction system[J]. **Journal of Natural Disasters**, 1996, 5(4): 1—5.
- [3] 谢全敏, 夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 775—777.
XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Comprehensive assessment method of stability of critical rock-block mass and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 775—777.
- [4] 谢全敏, 刘鹏, 夏元友. 滑坡灾害风险评价研究[J]. 金属矿山, 2004, (3): 58—61.
XIE Quan-min, LIU Peng, XIA Yuan-you. Study on risk evaluation of landslide hazard[J]. **Metal Mine**, 2004, (3): 58—61.
- [5] 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, 2003, 26(1): 71—74.
XIE Quan-min, BAN Xiang, XIA Yuan-you. Systematic analysis of risk evaluation of landslide hazard[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 71—74.
- [6] 张业成, 张梁. 论地质灾害风险评价[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(3): 1—6.
ZHANG Ye-cheng, ZHANG Liang. On risk evaluation of geological hazards[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1996, 7(3): 1—6.
- [7] 谢全敏, 夏元友. 基于遗传算法的边坡稳定性评价的动态聚类方法[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 170—172.
XIE Quan-min, XIA Yuan-you. A dynamic clustering method for evaluation of slope stability based on genetic algorithms[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 170—172.

- [8] 谢全敏. 滑坡灾害风险评价及其治理决策方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 24(12): 4260—4260.
- XIE Quan-min. Study on the risk evaluation and treatment decision-making methods of landslide hazard[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 24(12): 4 260—4 260.
- [9] Dai F C, Lee C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides[J]. **Engineering Geology**, 2001, 59(3-4): 253—266.
- [10] Edward Derbyshire. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China[J]. **Earth-science Reviews**, 2001, 54(1-3): 231—260.
- [11] Mandy Lineback Gritzner, Andrew Marcus W, Richard Aspinall, et al. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho[J]. **Geomorphology**, 2001, 37(1-2): 149—165.
- [12] Fausto Guzzetti. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy[J]. **Engineering Geology**, 2000, 58(2): 89—107.
- [13] Uromeihy A, MahdaviFar M R. Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2000, 58(3): 207—213.
- [14] Piyoosh Rautela1, Ramesh Chandra Lakhera. Landslide risk analysis between Giri and Tons Rivers in Himachal Himalaya (India)[J]. **ITC Journal/the International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences**, 2000, 2(3-4): 153—160.
- [15] Xie Q M, Xia Y Y. Systems theory for risk evaluation of landslide hazard[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(3): 445—45.
- [16] XIE Quan-min, XIA Yuan-you. A multi-objective decision-making method for the treatment scheme of landslide hazard[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2004, 11(2): 101—105.