

基于决策树模型的抗滑桩破坏概率

乔建平^{1,2}, 黄 栋^{1,2}, 李倩倩^{1,2,3}

(1. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文以抗滑桩桩顶位移变形和滑坡地表变形为研究目标, 采用决策树模型分别构成抗滑桩桩顶设计位移量、实测位移量、滑坡地表破坏概率的三个决策方案枝, 以及抗滑桩破坏概率分析决策终结点的决策树概率分析模型。从而建立了一种分析抗滑桩可靠性的判断方法。该方法的特点是将桩顶位移变形特点与滑坡地表宏观变形现象相结合, 对抗滑桩的可靠性作出综合判断, 其结果更具合理性。

关键词: 决策树; 抗滑桩; 可靠性

文章编号: 1003-8035(2014)04-0006-05

中图分类号: P694

文献标识码: A

0 引言

按照抗滑桩工程破坏失效的类型划分主要有 4 种: ①抗滑桩自身结构破损; ②桩间距设计不合理, 滑坡从抗滑桩桩间挤出; ③抗滑桩嵌固段未穿过滑动面或嵌固深度不够, 产生坐船滑动; ④滑坡沿抗滑桩桩顶以上临空面越顶剪出。前两种破坏现象属于抗滑桩工程的结构问题, 属于结构失效类型。后两种破坏现象属于滑坡机理的认识问题, 属于方案失效类型。目前评价滑坡工程失效的概率分析方法主要为^[1-6]: ①蒙特卡罗法; ②有限元法; ③破坏形态分析法; ④监测变形分析法。在这些方法的基础上, 作者认为无论抗滑桩失效破坏是什么原因, 首先都表现出桩顶位移变形和地表变形现象。根据这些最初的变形现象, 可以判断抗滑桩破坏的可能性。并成为判断决策的依据。本文根据决策技术理论, 建立决策树概率分析模型, 评价抗滑桩工程运行的可靠性。该方法的优点是, 在不涉及抗滑桩隐蔽工程段结构破损和设计方案错判等复杂问题的前提下, 通过桩顶位移变形监测与滑坡地表形态变化特征相结合, 形成多因素耦合综合判断抗滑桩工程可靠性的方法。通过实例检验, 证明该方法具有可靠性。

1 抗滑桩桩顶位移

抗滑桩桩顶位移是目前抗滑桩工程效益监测的主要方法。当抗滑桩桩顶位移超过设计规范标准时, 抗滑桩工程将存在失效的可能性。桩顶位移的原因可能分为: ①滑坡的剩余下滑力计算有误, 抗滑桩设计的受力结构不能抵抗下滑力, 形成抗滑桩在滑动面处中间

折断或推到; ②抗滑桩设计的嵌固深度不够, 尤其在自由支和铰支基础中采用 m、C 法计算的软地基系数达不到嵌基深度要求, 出现完全弹性变形; ③采用抗滑桩工程材料强度没有达到抗滑桩设计标准要求; ④在特殊工况条件下(如地震加暴雨), 抗滑桩失效。

根据抗滑桩参考设计规范(《建筑桩基设计规范》JGJ94—2008)^[7], 抗滑桩桩顶位移标准(表 1):

表 1 抗滑桩桩顶位移允许偏差

Table 1 Permissible variations of the pile-top displacement

变形类型	允许偏差
①垂直基础梁的中心线	100mm ± 0.01H
②沿基础梁的中心线	150mm ± 0.01H

表中: H 为抗滑桩桩长。

2 决策树模型

决策树(decision tree)是一个预测模型, 代表的是对象属性与对象值之间的一种映射关系。树中每个节点表示某个对象, 而每个分叉路径则代表某个可能的属性值, 而每个叶结点则对应从根节点到该叶节点所经历的路径所表示的对象的值。决策树仅有单一输出, 若欲有复数输出, 可以建立独立的决策树以处理不同输出。针对抗滑桩桩顶位移问题, 可以建立

收稿日期: 2014-08-08; 修订日期: 2014-10-10

基金项目: 973 项目(2010CB731504); 科技部国际合作项目(2013DFA21720); 国家科技支撑计划课题(2011BAK12B01)

作者简介: 乔建平(1953—), 男, 四川成都人, 研究员, 博导, 研究方向为滑坡规律、滑坡机理与滑坡危险性、地震滑坡。

E-mail: jqpiao@imde.ac.cn

相关的决策树结构模型(图1):

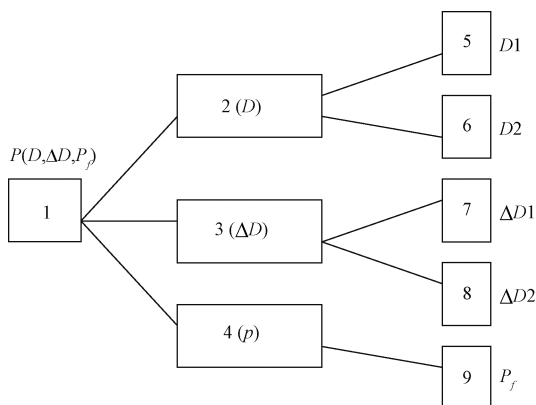


图1 决策树结构模型

Fig.1 The structural model of the decision tree

图1中决策终结点由1表示。由此产生决策方案枝,各方案枝分别生出状态结点,如:2、3、4。由状态结点引出各种状态分枝,如:5、6、7、8、9。分枝梢生出相应的信息数据源。

2.1 分枝梢

分枝梢是决策树的基础。桩顶位移事件的概率,需要通过分枝梢的基础数据源进行计算分析。分枝梢统计数据来源于,分枝点5为设计桩顶位移量(D_1),即根据不同的滑坡结构、地基系数条件,设计抗滑桩受力结构计算的桩顶最大位移量。分枝点6为桩顶允许标准位移量(D_2),如表1中:①类变形为100mm;②类变形为150mm。分枝点7为实测桩顶变形位移量(ΔD_1),此位移量具有随机性,一般是以一个水文年的工程效益监测数据为基数。分枝点8为设计抗滑桩桩顶允许最大位移变形量(ΔD_2), $\Delta D_2 = D_1 \pm 0.01H$ 。分枝点9地表破坏概率(P_f),主要根据滑坡定量稳定性计算结果(K)和滑坡地表宏观变形发育率(P_j)判定,具体方法由参考文献[8]给出。

2.2 决策方案枝

决策方案枝将上述各类数据源表示为独立事件,代表每一种决策方案的可能性(概率)。即:

$$P(D) = \frac{D_1}{D_2} \quad (1)$$

$$P(\Delta D) = \frac{\Delta D_1}{\Delta D_2} \quad (2)$$

$$P_f(KP) = K \times P_j \quad (3)$$

式中: $P(D)$ ——设计桩顶位移率,表示设计桩顶位移量与标准桩顶位移比例关系。当设计桩顶位移量大于标准桩顶位移量时,就达不到设计标准要求,抗滑

桩有损毁的可能性。超过设计标准越大,损毁的概率越大。 $P(\Delta D)$ ——桩顶位移变形率,表示实测桩顶位移与设计桩顶变形最大位移量比例关系。当实测桩顶位移量大于设计桩顶变形最大位移量时,表明抗滑桩明显变形,变形率越大,损毁的概率也越大。 $P_f(KP)$ ——地表破坏概率,根据滑坡的稳定性分析与地表宏观变形特点所确定。如果滑坡没有任何地表变形迹象,证明滑坡抗滑工程有效,则评价的目标应该重新认定。

2.3 决策终结点

在分枝梢和决策方案枝的基础上,决策终结点的概率将由:①设计桩顶位移率 $P(D)$;②桩顶变形位移率 $P(\Delta D)$;③滑坡破坏概率 $P_f(KP)$,三枝决策方案来确定。其中,分枝点2($P(D)$)和3($P(\Delta D)$)分别表达了抗滑桩自身的变化特点,存在失效破坏的可能性(概率),是分析问题的充分条件。而分枝点4($P_f(KP)$)表达了滑坡体的变形特点,是具备抗滑桩工程可靠性的必要条件。将两者综合,就成为抗滑桩工程可靠性分析的充分必要条件。

3 决策树概率

当分枝梢和决策方案枝均满足决策分析条件时,可以建立决策终结点的抗滑桩可靠性概率分析模型。由于决策树的三个决策方案枝统计模型均是相互独立事件,都有随机出现的可能性。根据决策终结点中确定的可靠性分析的充分必要条件,分析抗滑桩可靠性概率时,一般希望这些独立事件是同时发生的,如果缺少其中的任何一个,所获得的抗滑桩可靠性概率分析结果将会受到影响。根据相互独立事件的概率统计方法,抗滑桩可靠性概率可由下式给出:

$$P(D \cap \Delta D \cap P_f) = P(D) \cdot P(\Delta D) \cdot P(P_f) > 0 \quad (4)$$

将式(1)、(2)、(3)代入,可得:

$$P(D \cap \Delta D \cap P_f) = \frac{D_1}{D_2} \times \frac{\Delta D_1}{\Delta D_2} \times (K \times P_j) > 0 \quad (5)$$

式中: P ——抗滑桩破坏概率。当设计桩顶位移率 $D \leq 1$ (规范要求应该满足标准桩顶位移量),实测桩顶位移率 $\Delta D \leq 1$ 时,均在设计标准允许范围内。所以一般产生抗滑桩失效的可能性较小。当实测桩顶位移率 $\Delta D > 1$ 时,抗滑桩可靠性降低,出现变形概率随之增大。按照参考文献[8]的滑坡破坏概率分析,当自然滑坡(无工程治理)破坏概率为 $P_f > 0.5$ 时,滑坡

才具有破坏的可能性。所以当 D 、 ΔD 、 P_f 同时接近于 1 时,抗滑桩变形的概率也会随之增大。假设将 $D = \Delta D = P_f > 0.5$ 作为判别抗滑桩变形破坏的下限基数,采用式(1)(2)(3)获得等比数列:

$$P(D) = \frac{D_1}{D_2} = \frac{60}{100} = 0.6, 0.7 \cdots 1$$

$$P(\Delta D) = \frac{\Delta D_1}{\Delta D_2} = \frac{60}{100 \pm 0.01H} = 0.6, 0.7 \cdots 1$$

$$P_f(KP) = K \times P_f = 0.6, 0.7 \cdots 1$$

再将上述结果代入式(5),

$$P(D \cap \Delta D \cap P_f) = \frac{D_1}{D_2} \times \frac{\Delta D_1}{\Delta D_2} \times (K \times P_f)$$

$$= (0.6, 0.7 \cdots 1) \times (0.6, 0.7 \cdots 1) \times (0.6, 0.7 \cdots 1)$$

可以得到判别滑坡抗滑桩工程变形破坏概率的标准(表 2):

表 2 基于决策树的抗滑桩破坏概率评判标准

Table 2 Judgment criteria of failure probability of the anti-slide pile based on decision tree

决策方案枝		决策终结点概率		地表宏观变形特征	抗滑桩工程可靠性评价
D	ΔD	$P_f > 0$	$P > 0$		
0.6 ~ 0.7	0.6 ~ 0.7	0.6 ~ 0.7	0.216 ~ 0.343	地表出现不易查看的微小变形	基本可靠
0.7 ~ 0.8	0.7 ~ 0.8	0.7 ~ 0.8	0.343 ~ 0.512	地表出现可见微小变形	可靠性降低
0.8 ~ 0.9	0.8 ~ 0.9	0.8 ~ 0.9	0.512 ~ 0.729	地表出现少量变形	可靠性较差
0.9 ~ 1.0	0.9 ~ 1.0	0.9 ~ 1.0	0.729 ~ 1.0	地表出现较大范围变形	可靠性差
≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	地表已明显变形破坏	不可靠

4 实例分析

根据以上研究结论,选择了攀枝花市雅奢江二滩电站库区教师街滑坡的抗滑桩工程为例,对表 2 的抗滑桩破坏概率分析参考值域数据进行检验。

教师街滑坡后缘较宽,前缘较窄,长约 380m,宽约 120m,主滑方向约为 91° ,平均厚度约 12m,体积 $44.00 \times 10^4 \text{ m}^3$,为坡洪积层滑坡,在库区水位升降等作用下,多年来持续产生变形。1998 年 2 月,有关单位采取了抗滑桩等进行了治理。在滑坡中部共设置

抗滑桩 19 根,桩长 10 ~ 16m,嵌入滑面以下昔格达地层 5 ~ 8m,截面宽度分别为 $1.6 \times 1.8 \text{ m} \sim 2 \times 2.8 \text{ m}$,桩间距 5 ~ 7m(图 2)。自 1998 年 12 月二滩水库正常蓄水后(最高蓄水水位 1200m),旱季放水发电,库区水位下降时均出现明显滑动,抗滑桩倾斜,最大可达 $19^\circ \sim 30^\circ$,2001 年后上部边坡又继续鼓胀变形,现抗滑桩工程基本失效。教师街滑坡抗滑桩共分 4 种型,设计 4 型桩的最大桩顶位移量分别为:Ⅰ型桩 67mm(桩长 10m)、Ⅱ型桩 85mm(桩长 12m)、Ⅲ型桩 80mm(桩长 16m)、Ⅳ型桩 135(桩长 10m)mm。

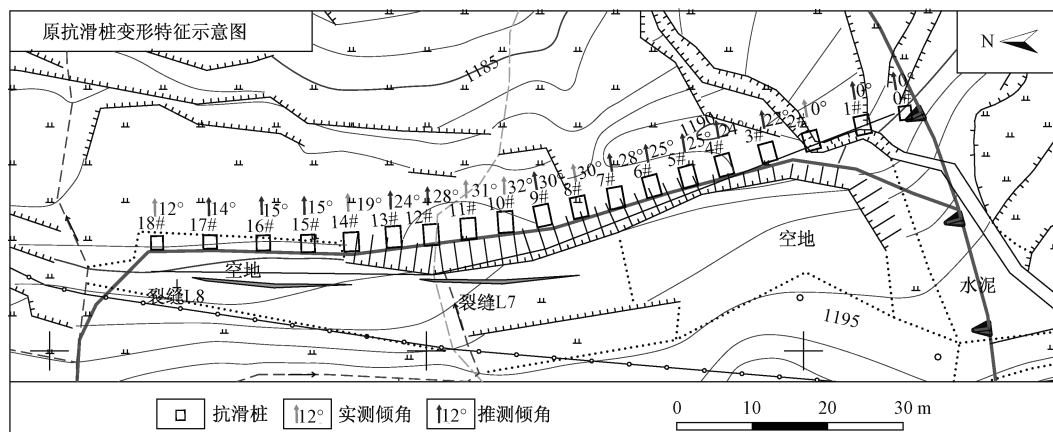


图 2 攀枝花市二滩库区教师街滑坡抗滑桩工程平面示意图(据四川地质勘察工程院)

Fig. 2 The schematic plan of the Anti-slide pile engineering of Teacher Street landslide in ertan reservoir in Panzhihua (From Geological exploration in sichuan academy of engineering)

根据式(1)~式(5)的原理和参考文献[8]的方法,可以分别获得分枝梢、决策方案枝、决策终结点概

率 P 的计算结果(表 3):

表 3 攀枝花市二滩库区教师街滑坡抗滑桩工程可靠性决策概率统计表

Table 3 Probability and statistics form about Reliability decision of each Street Landslide at ertan reservoir in Panzhihua

桩号	桩型	分枝梢				决策方案枝			决策终结点 概率 $P > 0$
		设计桩顶位 移 D_1 (mm)	标准桩顶位 移 D_2 (mm)	实测桩顶位 量 ΔD_1 (mm)	允许最大桩顶位 移 ΔD_2 (mm)	设计桩顶位 率 D_1/D_2	桩顶变形率 $\Delta D_1/\Delta D_2$	地表破坏概率 P_f	
1	I	67	100	110.0	167	0.67	0.65	0.90	0.391
2	I	67	100	120.3	167	0.67	0.71	0.90	0.420
3	I	67	100	404.0	167	0.67	2.41	0.90	1.458
4	II	85	100	445.2	220	0.85	2.02	0.90	1.545
5	II	85	100	466.3	205	0.85	2.27	0.90	1.736
6	II	85	100	466.3	205	0.85	2.27	0.90	1.736
7	II	85	100	531.7	205	0.85	2.59	0.90	1.984
8	III	80	100	577.7	240	0.80	2.40	0.90	1.733
9	III	80	100	577.7	240	0.80	2.40	0.90	1.733
10	III	80	100	624.6	240	0.80	2.60	0.90	1.872
11	III	80	100	600.6	240	0.80	2.50	0.90	1.800
12	III	80	100	531.7	240	0.80	2.21	0.90	1.595
13	III	80	100	445.2	240	0.80	1.85	0.90	1.335
14	III	80	100	344.3	240	0.80	1.43	0.90	1.032
15	IV	135	100	267.5	235	1.35	1.13	0.90	1.383
16	IV	135	100	237.5	235	1.35	1.01	0.90	1.227
17	IV	135	100	249.3	235	1.35	1.06	0.90	1.288
18	IV	135	100	212.5	235	1.35	0.90	0.90	1.098
19	IV	135	100	176.3	235	1.35	0.74	0.90	0.909

表 3 计算结果除个别抗滑桩外,85% 的抗滑桩决策终结点概率均大于 $P > 1$ 。根据表 2 评判标准,抗滑桩工程已经明显失效。计算结果与抗滑桩损毁现象符合。

5 讨论

(1)表 3 中决策终结点概率值可见,除滑坡两侧的破坏概率 $1 \leq P$ 外,其余部位的抗滑桩破坏概率均 $P > 1$,滑坡中部抗滑桩破坏概率值最大,两侧的破坏概率值最小,说明抗滑桩破坏最严重的主要受力方向正好位于滑坡中部的主滑方向。

(2)抗滑桩失效的原因为:一是抗滑桩嵌固段是遇水易滑的昔格达地层,在库水位调节的作用下,嵌固段极易软化失稳;二是在昔格达地层中原抗滑桩嵌固段设计过短,达不到应有的嵌固效果。

(3)基于决策树模型的抗滑桩破坏概率方法,将实测抗滑桩桩顶位移变形与地表宏观变形相结合,综合分析抗滑桩工程的破坏概率,能够客观评判抗滑桩失效现象,在实例应用中已得到证实。但该方法在实际应用中,必须具备较完整的桩顶位移监测数据和滑坡变形分析经验,否则评判结果的准确性将受到

影响。

参考文献:

[1] 张文居,赵其华,刘晶晶. 抗滑桩嵌固深度的可靠性设计[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2153-2155.
ZHANG Wenju, ZHAO Qihua, LIU Jingjing. Re-liability design of anchoring depth for friction piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12):2153-2155.

[2] 李铁洪,刘永才. 抗滑桩的破坏形态与有限元设计方法[J]. 中外公路,2009,29(2):36-40.
LI Tiehong, LIU Yongcai. The damage form and finite element design method of anti-slide pile[J]. Journal of China & Foreign High-way, 2009, 29(2):36-40.

[3] 张建经,刘强. 抗滑桩水平地震作用修正系数分析—汶川地震典型抗滑桩破坏工点分析[J]. 土木工程学报,2012,45(2):89-92.
ZHANG Jianjing, LIU Qiang. Seismicanalysis of horizontal seismic coefficient of lateral loadedpile[J], China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2):89-92.

[4] 吴永,何思明,李新波. 地震波作用下抗滑桩的失效机理[J]. 四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):284-288.
WU Yong, HE Siming, LI Xinpo. Failure mechanism of

- ant-slide pile under seismic wave[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 284–288.
- [5] 郑章星, 林星. 抗滑桩失效原因分析[J]. 铁道标准设计, 2001, 21(7): 41–42.
ZHENG zhangxing, LIN xing. Reason analysis of anti-slide pile failure[J]. Railway Standard Design, 2001, 21(7): 41–42.
- [6] 任伟忠, 陈浩, 唐新建, 等. 运用钻孔倾斜仪监测滑坡抗滑桩变形受力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3667–3672.
- REN Weizhong, CHEN Hao, Tang Xinjian, et al. Study on monitoring of deformation and stress state[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3667–3672.
- [7] JGJ94—2008, 建筑桩基设计规范.
JGJ94—2008, Code for design of building foundation.
- [8] 乔建平, 杨宗佑. 基于 KP 模型的滑坡破坏概率[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 1–5.
QIAO Jianping, YANG Zongji. Failure probabilities of landslide based on KP model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 1–5.

Failure probability of anti-slide pile based on decision tree method

QIAO Jian-ping^{1,2}, HUANG Dong^{1,2}, LI Qian-qian^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: In order to research the displacement of the top of the anti-slide pile and surface deformation of the landslide, this paper introduces decision tree method to build three Decision-making plan branches including designer displacement of the anti-slide pile, the measured displacement, the failure probability of the landslide surface and the probability analysis model of decision tree including decision-making endpoints analyzed by failure probability of anti-slide pile. As a result, a judgment method to analyze the reliability of anti-slide pile is found. Its specialties are using the deformation features of the top of the anti-slide pile combined with visible deformation phenomenon to estimate the reliability of anti-slide pile synthetically. And its result is more reasonable.

Key words: decision tree method; anti-slide pile; failure probability

封面照片说明

黄河上游因人工加载和降雨引发的虎头崖滑坡

虎头崖滑坡位于青海贵德黄河左岸的虎头崖, 滑坡体平面形态呈规则的“圈椅状”, 长约 30m, 宽约 40m, 前后缘高差 20m, 坡度约 35°, 主滑方向 337°, 方量约 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属于小型座落式黄土滑坡。滑坡顶部为大禹治水雕塑广场, 底部为黄河二级阶地, 滑坡发生于 2013 年, 是由强降雨和现代人类工程活动(后缘加载)共同引发的一处席箕滩巨型滑坡的第三期解体型滑坡。

(中国地质环境监测院 殷志强 供稿)