doi:10.3969/j.issn.1674-0696.2015.02.10

高寒高海拔地区岩质边坡稳定性评价研究

李建峰[1],万 臣[1,2],赵 勇[2]

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710064;2. 武警水电三总队八支队,四川 成都 610036)

摘要:为研究高寒高海拔地区岩质边坡稳定性的评判方法,选取影响该类特殊地区岩质边坡稳定性的12项主要评判指标,作为模糊评判的评价因子,应用AHP方法和模糊数学理论确定各指标的权重和隶属度,从而构建高寒高海拔地区模糊综合评判体系模型。基于该模型对旁多水利枢纽工程右岸公路边坡稳定性作模糊综合评判,评价结果较为客观地反映了工程实际情况,对该类地区岩质边坡稳定性进行分析预测具有一定的指导意义和参考实用价值。

关 键 词:岩土工程;高寒高海拔地区;AHP;岩质边坡;稳定性;评价指标

中图分类号:U416.1^{+}4 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-0696(2015)02-045-05

Evaluation Study of Rock Slope Stability in Alpine High Altitude Region

Li Jianfeng[1], Wan Chen[1,2], Zhao Yong[2]

(1. Architecture and Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. Eighth Detachment, Armed Police Hydropower Third Corp, Chengdu 610036, Sichuan, China)

Abstract: For the study of rock slope stability evaluation method of the alpine high altitude region, 12 main evaluation indexes which influence the stability of rock slope in the special area were selected as the evaluation factors of fuzzy evaluation, to build fuzzy comprehensive evaluation model of the system in the alpine high altitude areas by applying of AHP method and fuzzy mathematics theory to determine the weight of each index and membership. Based on this model, the right bank of highway slope stability of the Pangduo Hydro Project was evaluated by fuzzy comprehensive evaluation. The evaluation results objectively reflect the engineering actual situation, which has some practical guiding significance and reference value to analysis and predict of rock slope stability in this kind of region.

Key words: geotechnical engineering; alpine high altitude region; AHP; rock slope; stability; evaluation index

0 引 言

边坡稳定性分析是岩土工程的一个重要的应用性研究课题,边坡稳定性问题涉及公路工程、矿山工程、水利水电工程等诸多工程领域,近年来受到越来越多的关注和重视[1]。随着西部大开发战略的实施,人类改造自然的能力不断地增强,我国已经在高寒高海拔地区进行了大量的公路、水电等工程建设,并且形成了大量的裸露岩质边坡[2]。西部高寒高海拔地区边坡的主要特点是边坡稳定性受冻融影响大、岩体节理发育、土壤覆盖层较薄、土质松散且遇水极易崩塌、边坡所处的气候环境多变且复杂等。另外调查发现,由于岩体风化严重,强度大幅降低,而且人类工程活动中不规则的爆破和开挖,势必会进一步引起边坡坡面上一定深度的岩石破碎,裂隙发展,从而降低了边坡的稳定性[3]。该类地区边坡工程的稳定状况,事关工程建设的成败与安全,会对整个工程建设的可行性、安全性及经济性等起重要的制约作用,并且很大程度上影响着工程建设的投资及使用效益,因此,对其进行研究具有重大的实际意义。目前,我国各种针对边坡稳定性的研究方法层出不穷,但一般是针对常规常态地区,而对这种高寒高海拔地区的边坡稳定性分析研究较少且还不够完善。

高寒高海拔地区的边坡稳定性评价是一项复杂并且综合性很强的工作。尤其对于这种特殊复杂地区,影响边坡稳定性的因素多且复杂,具有不确定性的特征,更有其特殊性。而且,作为划分高寒高海拔岩质边坡稳定性级别的各因素以及界限比较模糊,这种模糊性表现在含义上不能明确区别是与非,在论域上不能划分其界限[4],因而难于建立合理的数学模型和力学模型来进行度量。基于高寒高海拔地区边坡的上述特点,笔者选取主要的合理的边坡稳

收稿日期:2013-09-14;**修订日期**:2013-11-21

第一作者:李建峰(1956—),男,河北巨鹿人,教授,主要从事现代施工技术与管理方面的研究。E-mail:363300673@qq.com。

定性评价指标,应用 AHP-模糊综合评价法对高寒高海拔地区岩质边坡稳定性进行研究,为该类特殊地区的岩质边坡稳定性评判提供适用的方法和较为准确的依据。

1 高寒高海拔地区岩质边坡综合评价模型的构建

对于高寒高海拔地区岩质边坡稳定性的综合评价,首先应用 AHP(层次分析)方法建立结构层次模型,并且构造出判断矩阵,然后利用模糊变换原理,考虑各种因素的影响,做出边坡稳定性综合评价。

1.1 因素集和评价集的确定

利用 AHP-模糊综合评判法进行高寒高海拔地区边坡稳定性评价时,将影响该地区边坡稳定性的主要评价指标作为因素集。第 1 级指标因素包括:工程地质条件、气象水文地质条件和工程施工条件。该因素集可以表示为:

$$X=\{X_1,X_2,X_3\}\quad(n=1,2,3,\cdots)\tag{1}$$

X_n 表示第 n 个该特殊地区边坡稳定性的综合评价指标,故本模型的因素集为:$X=\{X_1,X_2,X_3\}=$ {工程地质条件,气象水文地质条件,工程施工条件}。

每一因素集 X 又包含若干个评价因子,即 $X_n=\{X_{n1},X_{n2},\cdots,X_{ni}\}$,因此可以得出该评价模型的 2 级评价指标:

$X_1=\{X_{11},X_{12},X_{13},X_{14},X_{15}\}=$ {地质构造,岩体的岩性,岩体的风化程度,地形地貌,地震烈度}

$X_2=\{X_{21},X_{22},X_{23},X_{24}\}=$ {降雨强度(包括冰雪),边坡排水情况,冻融循环,昼夜温差}

$X_3=\{X_{31},X_{32},X_{33}\}=$ {边坡开挖坡度,边坡开挖高度,开挖方式}

根据边坡工程的特点,建立模型的评价集合 Y,将高寒高海拔地区岩质边坡是否稳定划分为 4 个等级,即稳定、基本稳定、不稳定、极不稳定,并由此得出该模型的评价集合:

$$Y=\{Y_1,Y_2,Y_3,Y_4\}\tag{2}$$

即 $Y=\{Y_1,Y_2,Y_3,Y_4\}=$ {稳定,基本稳定,不稳定,极不稳定}。

1.2 隶属度和单因素模糊评价矩阵的确定

在高寒高海拔地区岩质边坡的稳定性评价指标中,包含的隶属度指标有两类:以定性指标为主的离散型指标和以定量为主的连续性指标。参阅相关文献资料及经过实际调查统计,并且结合高寒高海拔地区边坡工程的实际情况,得出了各评价指标在边坡稳定性评价中对应不同稳定等级的基本参考条件如表 1。

表 1 各评价指标等级划分标准

Table 1 Standard of each evaluation index hierarchy

1 级指标	2 级指标	评价指标分级标准			
		稳定	基本稳定	不稳定	极不稳定
工程地质条件 X_1	地质构造 X_{11}	有利	一般	不利	很不利
	岩体的岩性 X_{12}	岩体完整性好,强度高	岩体完整性较好,强度较高	岩体完整性不好,胶结差	岩体破碎、松散,无胶结
	岩体的风化程度 X_{13}	未风化及微风化	中风化	强风化	全风化
	地形地貌 X_{14}	坡度平缓,地势有利	坡度缓倾,地势较好	坡度较陡,地势不利	坡度陡峭,地势很不利
	地震烈度 X_{15}/度	<6	6~7	7~8	>8
气象水文地质条件 X_2	降雨强度 X_{21}(包括冰雪)/(mm·d^{-1})	0~30	30~60	60~100	>100
	边坡排水情况 X_{22}	很好	较好	较差	很差
	冻融循环 X_{23}/(次·年$^{-1}$)	0~10	10~25	25~50	>50
	昼夜温差 X_{24}/(°)	<15	15~25	25~35	>35
工程施工条件 X_3	边坡开挖坡度 X_{31}/(°)	0~20	20~45	45~60	60~90
	边坡开挖高度 X_{32}/m	<50	50~100	100~150	>150
	开挖方式 X_{33}	自然边坡	预裂、光面爆破	机械开挖	欠缺爆破

在确定因素集中某因素对应于评判集中某等级的隶属度即构造单因素模糊矩阵时,首先须构造出该因素的隶属函数,通过隶属函数来确定该值。考虑各方面实际情况,笔者对离散型指标的隶属度采用专家评价法来确定,而对连续型指标的隶属度采用“降半梯形”公式来确定,见式(3)~式(6)[5-6]:

$$U_1(x)=\begin{cases}1, & x\leqslant a\\ \dfrac{b-x}{b-a}, & a<x\leqslant b\\ 0, & x>b\end{cases}\tag{3}$$

$$U_2(x)=\begin{cases}0, & x<a \text{ 或 } x>c\\ -\dfrac{a-x}{b-a}, & a<x\leqslant b\\ \dfrac{c-x}{c-b}, & b<x\leqslant c\end{cases} \tag{4}$$

$$U_3(x)=\begin{cases}0, & x<b \text{ 或 } x>d\\ -\dfrac{b-x}{c-b}, & b<x\leqslant c\\ \dfrac{d-x}{d-c}, & c<x\leqslant d\end{cases} \tag{5}$$

$$U_4(x)=\begin{cases}0, & x<c\\ -\dfrac{c-x}{d-c}, & c\leqslant x<d\\ 1, & x\geqslant d\end{cases} \tag{6}$$

式中:a,d 分别对应表 1 中连续型变量分级评定中的 2 个极值;b,c 为 2 个极值间的三分点;x 为实测值。

求得各评价指标对各个评价等级的隶属度后,可得到反映因素集 X 和评价集 Y 模糊关系的单因素模糊矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m}\\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm}\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中:r_{nm}表示某个评价对象第 n 个评价指标被评为第 m 个评价等级的隶属度[7]。

1.3　各级评价指标权重的确定

为较好的准确直观反映出综合评价的效果,笔者采用层次分析法(AHP)的步骤和方法来确定各指标的权重值。各指标权重值均通过构造判断矩阵计算确定[8-9],具体见表 3 ~ 表 6。此外,为防止判断矩阵的不一致性,需要对判断矩阵进行一致性检验。假设判断矩阵为 n 阶矩阵,$\lambda\max$ 为其最大特征值,称 $CI=(\lambda\max-n)/(n-1)$ 为判断矩阵的一致性指标。一致性指标 CI 与同阶平均随机一致性指标 RI 之比为随机一致性比率 CR,其中平均随机一致性指标 RI 的取值如表 2。当 $CR<0.1$ 时,则认为判断矩阵的一致性可以接受;反之,则需要修正判断矩阵。

表 2　平均随机一致性指标

Table 2　The mean random consistency index

矩阵阶数 n	3	4	5	6
RI	0.58	0.90	1.12	1.24

表 3　准则层 1 级指标对目标层的判断矩阵及影响权重

Table 3　Criteria level indicator on the target layer of judgment matrix and weight effect

	X_1	X_2	X_3	权重 W_i
X_1	1	1.5	2	0.460
X_2	1/1.5	1	1.5	0.319
X_3	0.5	1/1.5	1	0.221

一致性检验:$CR=CI/RI=[(\lambda\max-n)/(n-1)]/RI=0.001/0.58=0.001\ 7<0.1$,即通过一致性检验。

表 4　工程地质条件 2 级评价指标影响权重

Table 4　Engineering geological conditions of the secondary influence evaluation index weights

	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	权重 W_i	组合权重
X_{11}	1	3.5	2.5	1.5	5	0.390	0.179
X_{12}	1/3.5	1	1/1.5	0.4	1.5	0.110	0.050
X_{13}	0.4	1.5	1	0.5	2	0.153	0.070
X_{14}	1/1.5	2.5	2	1	3	0.268	0.123
X_{15}	0.2	1/1.5	0.5	1/3	1	0.079	0.036

表 5　气象水文地质条件 2 级评价指标影响权重

Table 5　Meteorological hydro geological conditions secondary influence evaluation index weights

	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	权重 W_i	组合权重
X_{21}	1	1.5	1/1.5	2	0.280	0.089
X_{22}	1/1.5	1	0.5	1.5	0.198	0.063
X_{23}	1.5	2	1	2	0.370	0.118
X_{24}	0.5	1/1.5	0.5	1	0.152	0.048

表 6　工程施工条件 2 级评价指标影响权重

Table 6　Engineering construction conditions of the secondary influence evaluation index weights

	X_{31}	X_{32}	X_{33}	权重 W_i	组合权重
X_{31}	1	1.5	2.5	0.486	0.107
X_{32}	1/1.5	1	1.5	0.313	0.069
X_{33}	0.4	1/1.5	1	0.201	0.045

同理,利用上述检验方法,分别对各比较判断矩阵进行一致性检验,结果表明均通过一致性检验。

1.4　模糊综合评判体系

假设 P 表示因素集 X 中评判指标的权重分配集。根据层次分析法所确定的各因素的权重,可设 1 级指标的权重分配集为 P,2 级指标对应的权重分配集为 P_i。首先对每一个子因素集 X_i 分别作综合评判,设 2 级指标的模糊评价矩阵为 $\boldsymbol{R}_i$,即 2 级评价指标中第 i 类子因素集的模糊综合评判为:

$$B_i=P_i\cdot\boldsymbol{R}_i=(b_{i1},b_{i2},\cdots,b_{im}) \tag{8}$$

式中:符号“·”为模糊合成运算。

2 级指标模糊综合评判的单因素评判矩阵组合后,应为 1 级指标模糊综合评价矩阵 $\boldsymbol{R}=[B_1,B_2,\cdots,B_n]^{\mathrm{T}}$,即对 1 级指标因素集的模糊综合评判为:

$$B=P\cdot\boldsymbol{R}=(b_1,b_2,\cdots,b_{\mathrm{m}}) \tag{9}$$

式中:b_i 为评价集 Y 中 Y_i 的隶属度,由最大隶属度原则,$b_i=\max\{b_1,b_2,b_3,b_4\}$,所以 b_i 对应的等级就是该边坡所处的稳定级别[10-11]。

2　工程实例

以西藏旁多水利枢纽工程右岸公路边坡为例,旁多水利枢纽工程位于青藏高原中部地震带南边,地震烈度为 8 度,边坡平均海拔达到 4 100 m,属于典型的高寒高海拔地区。边坡坡面属于山之北,地质构造复杂,大部分岩体破碎、松散且风化程度高,

边坡自然高度达到320 m,地形坡度为45~48°,属于较陡的地形。另外,该地区每年冻融循环次数多,昼夜温差大,夏季雨水多,冬季冰雪大,设计的施工开挖方案将岩体边坡的开挖坡度设定为1:0.8,基本接近或稍大于坡体的稳定角[12],开挖高度设定为120.5 m,垂直方向每隔30 m在马道处设置一条排水沟,坡体采用机械开挖,当机械开挖无法完成时,采用预裂或光面爆破。

由于该边坡规模较大,选取有代表性的一处坡体进行调查研究。对于离散型指标隶属度,采用专家评价法来确定。本研究中,组建的专家团队代表广泛,有建设、施工、监理单位的工程师,以及具有丰富工程经验的高校教授和科研人员,共计20人。如对地质构造X_{11}指标进行评价,专家组中有2人认为地质构造情况一般,有16人认为地质构造情况不利,有2人认为地质构造很不利,则可得由隶属度构成的X_{11}指标的评价集$R_{X11}=\{0,0.1,0.8,0.1\}$。同理,可以求得其他离散型指标的评价集。而对于连续型指标隶属度的确定,则需实地勘测该处坡体的降雨强度、冻融循环次数、昼夜温差等参数,参照表1的划分标准,按式(3)~式(6)计算得到各连续型指标的评价集。

待所有指标的单个评价集求得以后,进而可得工程地质条件X_1、气象水文地质条件X_2和工程施工条件X_3这3种因素所对应的模糊评价矩阵$\boldsymbol{R}_1$,$\boldsymbol{R}_2$,$\boldsymbol{R}_3$如下:

$$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix}0 & 0.1 & 0.8 & 0.1\\ 0 & 0.05 & 0.25 & 0.7\\ 0 & 0.15 & 0.65 & 0.2\\ 0 & 0.2 & 0.65 & 0.15\\ 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_2=\begin{bmatrix}0 & 0.5 & 0.5 & 0\\ 0.15 & 0.5 & 0.3 & 0.05\\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6\\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_3=\begin{bmatrix}0.2 & 0.8 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4\\ 0 & 0.1 & 0.75 & 0.15\end{bmatrix}$$

又由层次分析法计算得到的2级指标权重集P_1,P_2和P_3:

$P_1=(0.390,0.110,0.153,0.268,0.079)$

$P_2=(0.280,0.198,0.370,0.152)$

$P_3=(0.486,0.313,0.201)$

可进行2级指标模糊综合评判:

$B_1=P_1\cdot\boldsymbol{R}_1=(0,0.121,0.692,0.187)$

$B_2=P_2\cdot\boldsymbol{R}_2=(0.030,0.285,0.454,0.232)$

$B_3=P_3\cdot\boldsymbol{R}_3=(0.097,0.409,0.339,0.155)$

由B_1,B_2和B_3可组成1级指标的模糊综合评价矩阵$\boldsymbol{R}$,即:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0 & 0.121 & 0.692 & 0.187\\ 0.030 & 0.285 & 0.454 & 0.232\\ 0.097 & 0.409 & 0.339 & 0.155\end{bmatrix}$$

同理由层次分析法确定的1级指标权重集P,$P=(0.460,0.319,0.221)$。

故由P与$\boldsymbol{R}$进行1级指标模糊综合评判,得出影响该处边坡稳定性因素的隶属度矩阵$\boldsymbol{B}$为:

$\boldsymbol{B}=P\cdot\boldsymbol{R}=(0.031,0.237,0.538,0.194)$

计算结果表明:该处边坡处于稳定状态的概率为3.1%,处于基本稳定状态的概率为23.7%,处于不稳定状态的概率为53.8%,处于极不稳定状态的概率为19.4%。由最大隶属度原则可知:该处边坡处于不稳定状态,即在一系列触发因素的作用下,随时可能发生碎石滚落或滑坡灾害,应引起建设、监理、施工单位及当地政府和群众的高度重视。因此,基于安全考虑,该边坡应该及时采取坡面防护措施进行加固处理,以防安全事故的发生。

3 结 论

1)针对高寒高海拔地区,由于其地域环境的特殊性,影响该地区边坡稳定性的因素本身就具有很大的模糊性。通过对各个影响因素的综合分析,笔者选取主要影响因素,利用AHP-模糊数学理论建立了高寒高海拔地区边坡稳定性的模糊综合评判模型,并基于这个模型,对旁多水利枢纽工程右岸公路边坡稳定性做出模糊综合评价,其评价结果与工程实际有较高的吻合度,为后续进行实际边坡工程的稳定性分析评价及监测提供一定的支持和依据。

2)为使该地区边坡稳定性评价模型简单实用,该评价模型中因素集的建立考虑的是一些主要因素,不可避免的略去了一些不太重要的因素。另外,对因素集和权重集的建立,难免会有一定的主观性,所以使得边坡评价结果与边坡实际会存在一定的误差。因此,为了使该评价模型更趋完善合理,其因素集和权重集的科学性和合理性有待进一步深入研究和探讨。

3)由于AHP-模糊数学理论中离散型指标隶属度采用专家评价法来确定,且调查资料和数据有限,所以它的准确性还有待工程实践的进一步检验。

参考文献(References):

[1] 王玉平,曾志强,潘树林. 边坡稳定性分析方法综述[J]. 西华大学学报:自然科学版,2012,31(2):101-105.
Wang Yuping, Zeng Zhiqiang, Pan Shulin. Summarization of Slope Stability Analysis Method[J]. Journal of Xihua University: Nature Science, 2012, 31(2): 101-105.

[2] 李天斌,徐华,周雄华,等. 高寒高海拔地区岩质陡边坡JYC生态基材护坡技术[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(11):8-10.

Li Tianbin, Xu Hua, Zhou Xionghua, et al. Protection techniques of steep rock slop with JYC ecological base material in high-cold and high-altitude area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (11): 8-10.

[3] 武鹤,葛琪,陈瑶,等. 基于模糊理论的寒区岩质路堑边坡稳定性分级标准研究[J]. 黑龙江工程学院学报,2012,26(1):7-10.
Wu He, Ge Qi, Chen Yao, et al. Study of stability gradation of rock cutting slopes based on fuzzy evaluation methods in frozen regions [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2012, 26 (1): 7-10.

[4] 欧国林,张娜. 模糊数学方法在路基边坡稳定性评价中的应用[J]. 四川建筑,2009,29(1):67-68.
Ou Guolin, Zhang Na. Fuzzy mathematics methods in the application of subgrade slope stability evaluation [J]. Sichuan Architecture, 2009, 29 (1): 67-68.

[5] 孟衡. 模糊数学在岩质边坡稳定性中的应用[J]. 岩土工程技术,2008,22(4):178-181.
Meng Heng. Application of fuzzy mathematics on rock-slop stability analysis[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2008, 22 (4): 178-181.

[6] 刘合寨,孙世国,阚生雷,等. 模糊综合评判在高陡边坡稳定性评价中的应用[J]. 北方工业大学学报,2012,22(3):82-85.
Liu Hezhai, Sun Shiguo, Kan Shenglei, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation to high steep slope stability[J]. Journal of North China University of Technology, 2012, 22 (3): 82-85.

[7] 毛巨省. 模糊综合评判在边坡稳定性评价中的应用[J]. 西安科技大学学报,2010,30(5):609-612.
Mao Jusheng. Application of fuzzy comprehensive evaluation in slop stability evaluation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30 (5): 609-612.

[8] 边馥萍,侯文华,梁冯珍. 数学模型方法与算法[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
Bian Fuping, Hou Wenhua, Liang Fengzhen. Mathematical Model and Algorithm [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.

[9] 吕伟,胡荣华. 边坡稳定性的 Fuzzy AHP 和 AHP 对比研究[J]. 西安科技大学学报,2013,33(3):307-311.
Lv Wei, Hu Ronghua. Comparison research of fuzzy AHP and AHP for slop stability [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(3): 307-311.

[10] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京:科学出版社,2005.
Li Hongji. Fuzzy Mathematics Foundation and Practical Algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[11] 李天斌,王兰生. 岩质工程高边坡稳定性及其控制[M]. 北京:科学出版社,2008.
Li Tianbin, Wang Lansheng. Rocky High Slope Engineering Stability and Control [M]. Beijing: Science Press, 2008.

[12] 魏红平. 旁多水利枢纽工程公路边坡滑塌问题分析与对策[J]. 四川水力发电,2011(增刊1):48-55.
Wei Hongping. Analysis and solutions for highway slope sliding at Pangduo hydropower station [J]. Sichuan Water Power, 2011 (Sup1): 48-49.

(上接第 27 页)

计张拉荷载作用下锚区岩体和锚塞体的静力响应。验算其常规设计荷载作用下的承载能力满足设计要求。

2)地震时,从锚塞体及洞口边坡对主缆动张拉力荷载的响应方面考虑。以锚塞体底面 4 个角点及锚塞体前后锚面 2 个顶点为监测点,通过计算出来的应力及应力幅值分析,得到锚塞体前锚面质点的响应比锚塞体后锚面质点响应更强烈;在约 0 ~ 4.4 s 及 6.35 ~ 10.65 s 时间段内锚塞体监测点振动强烈,锚塞体和围岩的紧密接触导致接触围岩质点塑性应变积累加剧等。

3)通过锚塞体对主缆动张拉力的响应分析结果,分析锚区岩体及隧道式锚碇的动力稳定性,对隧道式锚碇的加固及抗减震措施的提出提供了参考。

参考文献(References):

[1] 熊良宵,李天斌,刘勇,等. 隧道地震响应数值模拟研究[J]. 地质力学学报,2007,13(3):255-260.
Xiong Liangxiao, Li Tianbin, Liu Yong, et al. Numerical simulation of seismic response at the entrance of the unsymmetrical loading tunnel [J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13(3): 255-260.

[2] 董志宏,张奇华,丁秀丽,等. 矮寨悬索桥隧道锚碇稳定性数值分析[J]. 长江科学院院报,2005,22(6):54-58.
Dong Zhihong, Zhang Qihua, Ding Xiuli, et al. Numerical analysis of rock mass stability in tunnel anchoring of aizhai Bridge [J]. Journal Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(6): 54-58.

[3] 汪海滨,高波,孙振. 悬索桥隧道式锚碇系统力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2728-2735.
Wang Haibin, Gao Bo, Sun Zhen. Study on mechanical behavior of tunnel anchorage system for suspension bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2728-2735.

[4] 江南,冯军. 悬索桥隧道式锚碇横断面形状对其承载性能影响(英文)[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(4):755-759.
Jiang Nan, Feng Jun. Effect of cross section type of tunnel anchorage on its mechanical behavior for suspension bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(4): 755-759.

[5] 彭建国,张奇华,胡惠华,等. 矮寨悬索桥茶洞岸构筑物围岩及山体稳定性研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(6):1298-1302.
Peng Jianguo, Zhang Qihua, Hu Huihua, et al. Surrounding rock structures and mountain stability of chadong bank of the Aizhai suspension bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(6): 1298-1302.

[6] 朱杰兵,邬爱清,黄正加,等. 四渡河特大悬索桥隧道锚模型拉拔试验研究[J]. 长江科学院院报,2006,23(4):51-55.
Zhu Jiebing, Wu Aiqing, Huang Zhengjia, et al. Pulling test of anchorage model of Siduhe suspension bridge [J]. Journal Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(4): 51-55.

[7] 曾平,陈汉珍. 支井河特大桥隧道锚碇岩石力学性质试验[J]. 土工基础,2004,l8(5):16-18.
Zeng Ping, Chen Hanzhen. Testing on mechanical property of rock mass in anchored area of Zhijing River Bridge[J]. Soil Engineering and Foundation, 2004, 18(5): 16-18.

[8] Zhou Mengbo. Manual of Suspension Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 105-219.