维普资讯 http://www.cqvip.com

第29卷 第1期
2007年3月

西北地震学报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 29 No. 1
March, 2007

预应力锚索加固石窟岩体的地震动力响应研究

秋仁东[1,2]，石玉成[1,2]，徐舜华[1,2]，胡明清[1,2]

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地，甘肃 兰州 730000；
2. 中国地震局兰州地震研究所，甘肃 兰州 730000)

摘 要：根据锚索加固石窟岩体的特点，以甘肃安西榆林石窟的三个典型的工程段为例，通过动力有限元的方法对地震荷载作用下预应力锚索加固石窟岩体的位移场、应力场的模拟计算，得出了其动态响应和变化规律。并通过对地震荷载的频谱特性分析，揭示了地震荷载的特征周期对锚索加固石窟围岩的动力响应结果的影响。

关键词：榆林石窟；石窟岩体；预应力锚索；动力有限元；地震荷载

中图分类号：P315.9；T352.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2007)01－0049－05

Study on Dynamical Response of Grotto Rock Reinforced by Prestress Anchor Cable under the Seismic Load

QIU Ren-dong[1,2], SHI Yu-cheng[1,2], XU Shun-hua[1,2], HU Ming-qing[1,2]

(1. *Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou* 730000, *China*;
2. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: Based on the characteristic of the grotto rock reinforced by prestress anchor cable, taking three typical engineering sections in Yulin grotto in Anxi county Gansu province, as examples, the simultating computation for the displacement field and stress field of the grotto rock under seismic load is done using dynamic finite element method, the change regularity and dynamical response of the grotto rock are concluded. Meanwhile through analyzing the characteristic of the frequency spectrum of real seismic load, the influence of sismic load's feature period on dynamic response result of the grotto rock is revealed.

Key words: Yulin grotto; Grotto rock; Prestress anchor cable; Dynamic finite element; Seismic load

0 前言

佛教石窟是我国重要的历史文化文化遗产。中国的佛教石窟大都(近70%)分布在地震活动频繁的高烈度地区[1]。研究地震动荷载作用下的岩体响应一直是岩石动力学研究的主要内容之一[2]。而对于地震荷载作用下被加固石窟岩体的动力特性研究目前较少。国内的一些研究者曾在这方面做过一些工作[3-6]，但到目前为止地震荷载作用下被加固石窟岩体的动力响应研究(石窟所在位置的地震动选取、石窟岩体的本构关系、加固方式的选择，石窟结构分布对动力响应结果的影响)都还未能给出令人满意的解答。

地震荷载作用下石窟岩体的动力响应是一个复杂的问题，与地震学、地震工程学、岩土动力学诸多领域的问题都有关联。本文以甘肃省安西县的榆林窟为例，研究地震荷载作用下石窟岩体的动力响应(预应力锚索加固的石窟岩体的动力响应的结果与真实地震动的频谱特性对应关系)问题，以得到一些基本规律。其结果将有助于人们对真实地震动的频

收稿日期：2006-05-12
基金项目：国家社会公益研究专项(2002DIB20062)；兰州地震研究所青年基金(2006255)；中国地震局兰州地震研究所论著编号：LC20070019
作者简介：秋仁东(1981－)，男(满族)，辽宁大连人，硕士，主要从事结构工程与地震岩土工程研究工作.

维普资讯 http://www.cqvip.com

谱特性的实质及真实地震动作用下锚索加固石窟岩体的动力响应问题的理解，为石窟岩体的工程减灾与文物保护工作提供借鉴。

1 预应力锚索加固石窟岩体的工作原理

石窟围岩动力变形稳定性主要取决于四个方面的因素：(1)地震因素：地震动强度、地震作用特点、地震动持续时间等；(2)环境工程地质条件：岩性、岩体结构及裂隙分布、岩体力学性质、地形地貌等；(3)工程因素：洞窟的方位、分布方式(单洞或群洞及其布局关系)和规模形态等；(4)加固工程构筑物对石窟崖体的加固效果。上述因素的不同组合会使石窟岩体在不同地震条件下发生破坏的程度不同。

1.1 预应力锚杆(锚索)对边坡的加固机理

预应力锚杆(锚索)对边坡和滑坡的加固主要通过预应力产生的两个分力的作用来实现：一是产生滑面法向压应力 w_2，从而增加滑面摩擦力，达到抗滑作用；二是在滑体中锚杆(锚索)产生与下滑方向相反的力(拉力) w_1，达到抗滑作用(图1)。

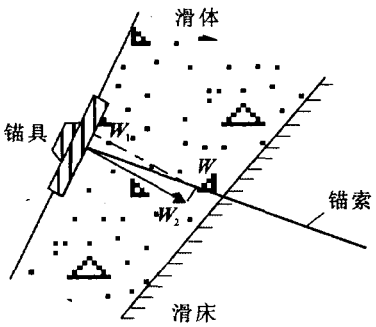


图1 锚索应力分界图

Fig. 1 Sketch of the stress boundery of anchor cable.

1.2 预应力锚杆(锚索)的结构

预应力锚杆(锚索)的结构分为三大部分(图2)：(1)锚固段：指提供抗拔力的部分，即锚索与稳定围岩锚固连接的部分(L_1)；(2)自由段：指锚固构件与锚固段之间的锚杆(锚索)连接部分(L_2)，即锚索能自由伸张部分。(3)锚固构件：指用于施加预应力的刚性支座构件，如锚索抗滑桩的桩体、锚锭板或锚固框格梁、锚墩等。通过预应力张拉，由锚索提供回弹拉力(预应力)，使锚固构件产生拉压作用，实现对边坡和滑坡的加固。

1.3 锚杆、预应力锚索联合支护的作用机理

预应力锚索支护技术主要是将一定长度的低松弛高强度钢绞线配以专用锚具，通过液压千斤顶在其尾部施加预应力，达到锚固支护的作用。锚索除

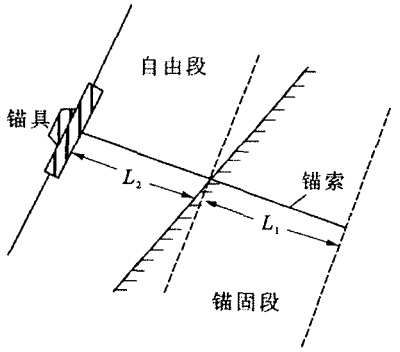


图2 锚索结构示意图

Fig. 2 Sketch of the anchor cable structure

具有普通锚杆的悬吊作用、组合梁作用、组合拱作用、楔固作用外，与普通锚杆不同的是对围岩进行深部锚固而产生强力悬吊作用，并且形成连续强支撑点，以大预紧力减缓下沉。对于围岩松动圈大、节理发育、破碎的结构，通过锚杆对松动圈内的围岩进行组合梁加固支护，再将锚索锚固到围岩深部，利用锚索的高承载力对结构进行锚固支护，使锚杆支护下形成的组合梁的作用得到加强，同时锚索将容易离层塌落的围岩稳稳地悬吊在稳固的岩体上。

2 榆林窟地区的地震地质条件及地震记录的选取

榆林窟位于河西走廊地震带西端，近代地震活动强烈。据有关资料，1932年12月25日玉门昌马堡地震的震中烈度达Ⅺ度；1952年1月23日三危山发生地震。这两次地震的震中距榆林窟不足100 km。1989年2月23日至2月26日安西和玉门昌马间发生了15次小地震活动。该地区地震烈度为Ⅶ度。

由于缺少强震观测记录，因此在地震数值计算中一般采用人造地震动，或是采用地震地质条件相类似地区的真实地震记录。本文采用2003年的民乐一山丹6.1级地震记录(图4)。图5为两次地震的傅立叶谱。

如图所示，地震动1低频成分丰富，地震动2频成分集中区大于地震动1，即前者以长特征周期为主，后者以短特征周期为主。

3 有限元分析原理和方法

根据达朗贝尔原理或虚功原理建立平衡方程。在地震荷载作用下有限元体系在 $t+\Delta t$ 时刻的运动平衡方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{u}_{t+\Delta t}+\boldsymbol{C}\dot{u}_{t+\Delta t}+\boldsymbol{K}u_{t+\Delta t}=\boldsymbol{MI}(\ddot{u}_g)_{t+\Delta t} \quad (1)$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

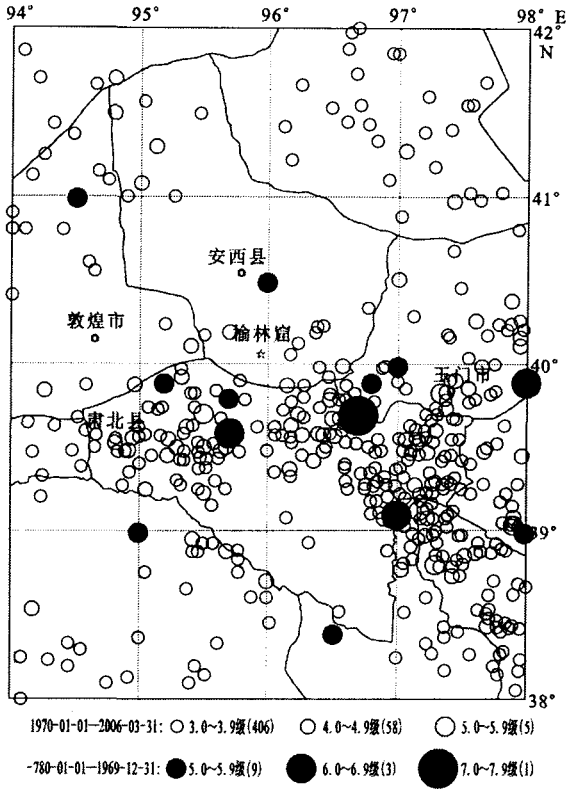


图3　榆林窟地区地震分布图

Fig. 3　Distribution of earthquake epicenters in Yulin grotto area.

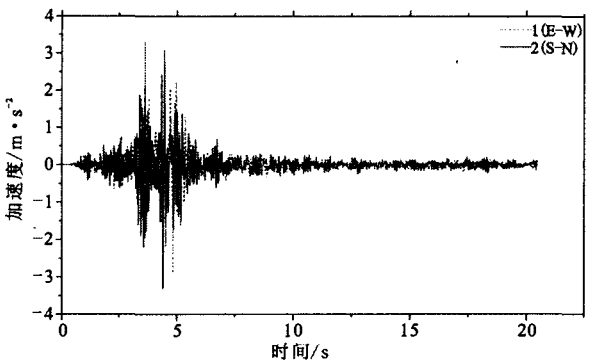


图4　2003年民乐—山丹地震的加速度记录

Fig. 4　Time history of ground motion acceleration of Minle—Shandan earthquake in 2003.

式中 $\boldsymbol{M}$ 为体系的总质量矩阵;$\boldsymbol{C}$ 为体系总阻尼矩阵;$\boldsymbol{K}$ 为体系总刚度矩阵;$\boldsymbol{I}$ 为单位激振矢量;$\ddot{u}_{t+\nu t}$ 为体系的节点加速度向量;$\dot{u}_{t+\nu t}$ 为体系的节点速度向量;$u_{t+\nu t}$ 为体系的节点位移向量;$(\ddot{u}_g)_{t+\nu t}$ 为基岩面加速度。运动平衡方程的求解采用 Newmark 隐式时间积分法。

体系采用 Rayleigh 阻尼,即 $\boldsymbol{C}=\alpha[\boldsymbol{M}]+\beta[\boldsymbol{K}]$,其中 α 阻尼也叫质量阻尼系数,β 阻尼为刚度阻尼系数,根据振型分解方法由选定的两个振型阻尼比和相应的自振频率表示

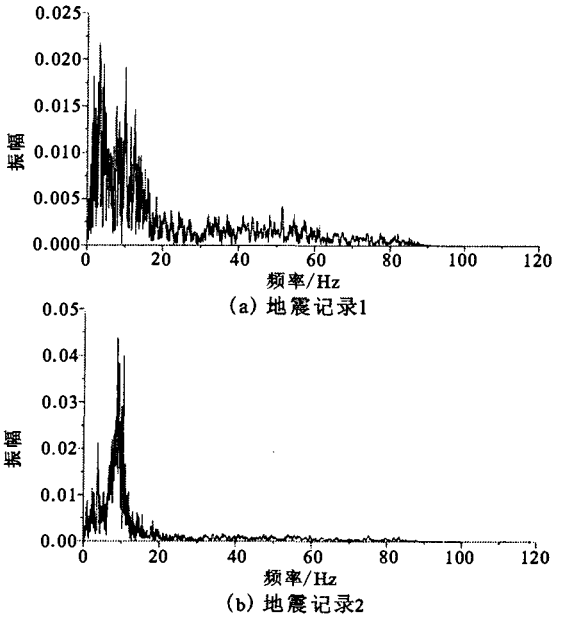


图5　民乐—山丹地震记录的傅立叶谱

Fig. 5　The Fourier spectrum of Minle—Shandan earthquakes.

$$\left.\begin{aligned}\alpha &= 2\left(\frac{\zeta_i}{\omega_i}-\frac{\zeta_j}{\omega_j}\right)\Big/\left(\frac{1}{\omega_i^2}-\frac{1}{\omega_j^2}\right)\\ \beta &= 2(\zeta_j\omega_j-\zeta_i\omega_i)/(\omega_j^2-\omega_i^2)\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中,ζ_i 和 ω_i 分别为第 i 振型的阻尼比和自振频率。计算中假定 $\zeta=0.05$,根据振型分析结果,采用两种"贡献"较大的与振型相应的自振频率和阻尼比来计算 α 和 β 值。

石窟崖体内裂隙为数不多,但规模较大,在加固的过程中有灌浆注入,为了能够准确反映裂隙结构面对围岩稳定性的影响,将裂隙考虑成一种具有特殊力学性质的薄层结构单元,计算分布于其上的应力大小。

在预应力锚索锚固系统中,因为钢绞线索体只能轴向抗拉,不能抗压和承受弯矩,本文将锚索材料视为非线性弹性体。图6为锚索材料力学特性曲线(其材料的应力—应变关系曲线表明当受拉时有强度,受压缩无强度)。

地层中通常存在初始应力,主要是由于土体自重和地质构造作用所产生的。不计构造应力时,初始应力就等于自重应力[7]。按照弹性理论空间体的求解结果,土体在自重作用下的初始应力为

$$\{\sigma_0^0\}=\begin{Bmatrix}\sigma_x^0\\ \sigma_y^0\\ \sigma_{xy}^0\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\dfrac{\mu}{1-\mu}\gamma y\\ \gamma y\\ 0\end{Bmatrix}\tag{3}$$

式中:y 为距地表的深度;γ 为土体容重;μ 为土体的

维普资讯 http://www.cqvip.com

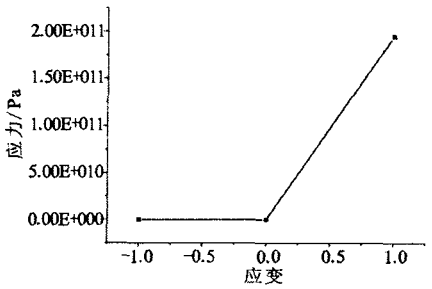


图6 锚索材料的应力—应变关系曲线图

Fig. 6 Curve of the relationship between stress and strain for the prestress anchor cable.

泊松比。

本文中采用的方法为先求出在自重荷载产生的初始地应力场，再求解在地震动荷载作用下产生的动力响应。

4 计算模型的建立及动力响应分析

4.1 计算模型的建立

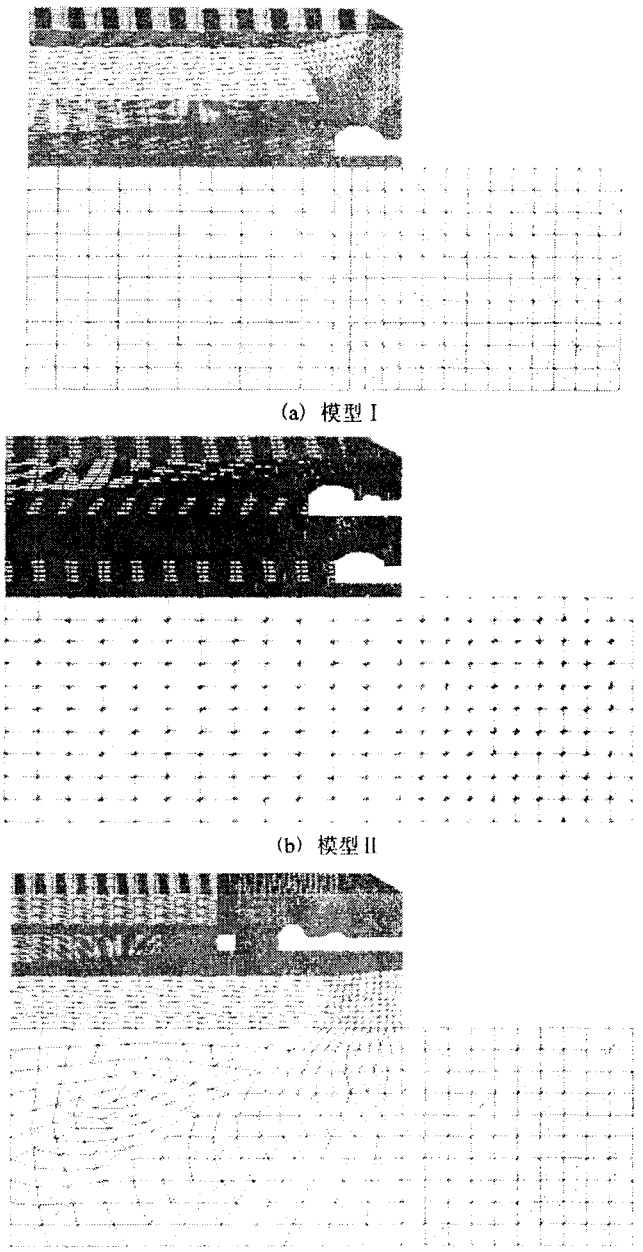
榆林石窟开凿于榆林河河谷两岸的崖壁上，分上下两层分布。实体模型宽60 m，高71 m，左边与山体相连，右边取地表至地下深度25 m处。模型Ⅰ为崖体下部分布石窟的模型；模型Ⅱ为崖体上下两层分布石窟的模型；模型Ⅲ为崖体上部分布石窟的模型。这三个模型能充分反应榆林窟石窟的分布特点，综合起来能反映整个榆林石窟震害的一般规律(图7、8)。假定模型左右两侧受水平方向位移限制，底边受垂直方向和水平方向位移限制，崖面为自由边界，载荷以地震动加速度时程方式输入，各岩层的力学参数见表1。

表1 各岩组力学参数

工程地质岩组	弹性模量 E/MPa	泊松比 γ	密度 ρ /g·cm^{-3}	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	凝聚力 c/MPa	内摩擦角 Φ/°
Q_3	100	0.30	2.10	—	0.20	0.10	50
Q_2	460	0.32	2.20	9.50	0.66	0.30	60
Q_1	500	0.26	2.40	12.6	0.74	0.35	67
裂隙灌浆	196	0.25	2.10	—	1.60	0.25	65

4.2 位移场的综合分析

地震荷载水平左右往复激振下，洞窟围岩随之发生的位移呈现时空上的规律变化。由计算结果知道，位移场的分布因洞窟的有无和预应力锚索的施加而发生变化，表现出严格受石窟结构和预应力锚索约束的特点，并且在锚索的锚固构件端、锚固段的顶点形成位移突变，即在锚固构件端形成受压状态，在锚固段的顶端形成受拉状态，而这一点恰恰说明了主动加固结构(预应力锚索)与被动加固结构(挡墙)的区别。对于石窟边坡上的一个质点而言，在地震力作用下产生位移，其大小随输入加速度的大小的改变而变化，但时间上出现在地震动加速度到达峰值所对应的时刻之后，从这种滞后效应来分析，由于变形的积累叠加效应。地震荷载2作用窟边坡的动力响应值(位移)要小于地震荷载1作用下的值。



(a) 模型Ⅰ

(b) 模型Ⅱ

(c) 模型Ⅲ

图7 榆林窟的有限元计算模型

Fig. 7 Finite element calculation models of Yuiln grotto.

4.3 应力场的综合分析

应力场的分布和洞窟的结构分布、数量、预应力锚索的加固关系密切。在洞窟结构的角点部位，尤其是锚索的锚固构件端、锚固段的顶点，形成了压应力、拉应力和剪应力的高度集中区，是围岩容易发生破坏的地方。但是对于整个岩体而言应力状态得到

维普资讯 http://www.cqvip.com

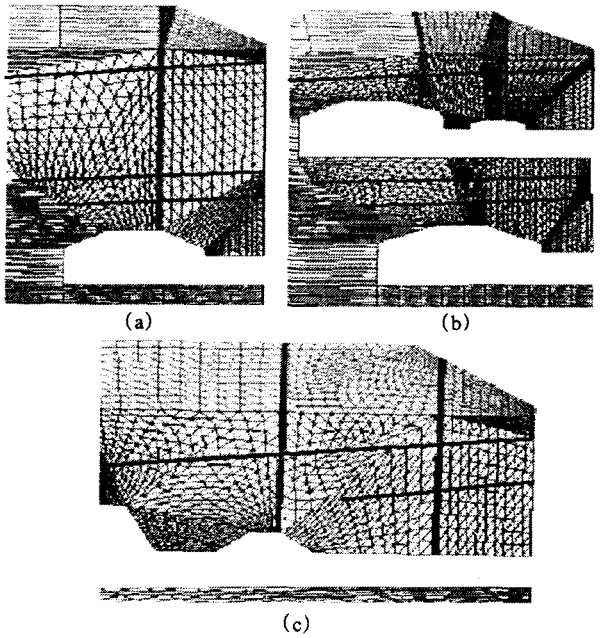


图8　模型Ⅰ—Ⅲ的裂隙位置放大图

Fig. 8　The zoom out cranny for the model Ⅰ — model Ⅲ.

了改变:地震荷载1作用下的动力相应的值(应力)都大于地震荷载2作用下的动力响应值(应力)。

通过在地震荷载1、2下的分别计算,选取石窟最大地震反应的拉应力值(表2)。模型Ⅰ剖面上最大拉应力值为0.95 MPa,出现在两排锚索中间的部位,小于围岩的抗拉强度,因而是不稳定的;在锚索的锚固端的端部也形成拉应力集中区,危险性较大。最大剪应力出现锚索的锚固端端部,裂隙处拉应力和剪应力值出现应力集中,是比较不稳定的部位。

表2　荷载1、2下石窟岩体大主拉应力分布的情况

(单位:MPa)

	荷载1			荷载2		
部位	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ
锚索锚固端的端部	0.95	0.86	0.98	0.85	0.76	0.83
裂隙处	0.28	0.29	0.26	0.25	0.23	0.24
下层窟体前上部角点	0.58	0.63	0.56	0.51	0.53	0.46

模型Ⅱ最大拉应力值为0.86 MPa,位于最上层洞窟上的裂隙部位,大于围岩的抗拉强度0.66 MPa,明显会发生破裂甚至向外倾倒。其次,锚索锚固端的端部也有明显的应力集中现象,拉应力值都大于岩体抗拉强度,在地震作用下无疑也是不稳定的。

模型Ⅲ最大拉应力值为0.98 MPa,出现出现在锚索锚固端的部位,高于围岩抗拉强度,因而会发生拉裂。上层洞窟的左下角也是应力相对集中的地方,但应力是压应力,因为岩体是抗压材料,因而是稳定的。

通过模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ最危险结构的对比可以知道,在地震荷载作用下模型Ⅲ的最大拉应力为最大,是最不安全的。

5　结论

(1) 计算中输入的两个地震记录的时间长度都是20 s,地震记录2的峰值稍大于地震记录1的加速度的峰值,但是在地震荷载2作用下石窟边坡的动力响应值(位移,应力)要小于地震荷载1作用下的值。作者认为这是地震记录的频谱特性造成的。根据石玉成、付长华分析的人造地震动作用下石窟边坡动力响应规律[5],有理由地推测是由于地震动特特征周期与石窟围岩自振周期逐渐接近而产生共振作用的结果。

(2) 在水平地震荷载1、2的往复激振作用下,洞窟围岩随之发生的位移呈现时空上的规律变化。位移场、应力场的分布表现出严格受边坡地形、洞窟的有无以及锚索加固约束控制的特点。而地震荷载1作用下的动力相应的值(位移、应力)都大于地震荷载2作用下的动力响应值(位移、应力)。

(3) 在地震荷载作用下,锚索加固的石窟岩体也形成了复杂的应力集中问题。洞窟顶部及边角处锚索的两个端部成为拉应力和剪应力的主要集中点。计算结果还表明,在水平地震动载荷下锚索加固石窟岩体的部分部位是不稳定的。在锚索与应力、初始地应力、地震力的共同作用下,在加固的裂隙的部位、锚索的端部、顶部或边角处因应力过于集中而可能出现开裂或掉块。锚索的锚固的端部是应力集中的一个主要地方。

[参考文献]

[1] 付长华.地震荷载下石窟围岩动态损伤特性研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2004.

[2] 李海波,蒋会军,赵 坚,等.动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):1887-1891.

[3] 石玉成,蔡红卫.石窟围岩及其附属构筑物地震稳定性评价方法研究[J].西北地震学报,2000,22(1):83-89.

[4] 石玉成.石窟防震减灾与文物保护[J].灾害学,1998,13(4):90-94.

[5] 付长华,石玉成.地震荷载下莫高窟围岩动态损伤特性研究[J].西北地震学报,2004,26(3):266-272.

[6] 韦凯,高峰,石玉成,等.石窟地震反应分析[J].兰州交通大学学报,2005,24(6):46-49

[7] 张璞.列车振动荷载作用下上下近距离地铁区间交叠隧道的动力响应分析[D].上海:同济大学,2001.