

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.022

圆形洞室预应力锚索的地震动力响应

郝振群,石 崇,朱珍德

(河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 针对锚索在本身预应力及动荷载作用下轴向力可能产生损失、降低抵抗洞室变形能力的问题,采用有限差分数值分析方法,通过构造简单洞室模型,分别对简化的地震动载荷进行纵向压缩、横向剪切数值模拟。结果表明:由于洞室尺寸相对于无限空间较小,动荷载作用时洞室几何形状引起的挠动有限,因此锚索内动应力引起的变化较小;锚索安装角对该作用力的大小有很大影响;波动频率越高,该作用力越大;波动的类型影响不大。

关键词 圆形洞室 预应力锚索 地震荷载 动力响应

中图分类号 :U453.2 ;P315.9

文献标志码 :A

文章编号 :1000-1980(2010)06-0716-05

锚索加固技术是洞室开挖的有效支护手段,在岩土工程领域获得了广泛应用。锚索在参数设计方面,主要以悬吊理论、挤压拱理论、压缩梁理论为理论依据,设计通过解析方法、工程类比法等实现。在岩体锚固性能方面,大多都是采用现场拉拔试验、室内模型试验和数值仿真模拟等方法进行研究^[1-4],不过这些研究都是基于静态条件展开的。研究爆破、地震等动荷载也具有重要的现实意义和重大研究价值^[5]。杨苏杭等^[6]采用抗爆模型试验方法,研究了预应力锚索对洞室抗爆加固效应,探讨了试验中爆炸引起的锚索预应力变化特点,得出不同锚索加固洞室的预应力变化特性。Tannant 等^[7]进行了现场试验,得出爆炸载荷在端头锚杆中激起剧烈轴向振动和横向振动,从而使锚杆和围岩之间的岩体产生松动,应力波不能传播到锚杆中而不至于破坏的结论。Ortlepp 等^[8]研究了受静载和动载条件下大变形坑道的加固形式,指出屈服锚杆可以吸收大量能量而使坑道不发生破坏。王光勇等^[9]研究了在爆破载荷作用下锚杆的动力响应,得出锚杆不同位置的受力情况。闫毅志等^[10]分析了预应力作用下锚索的剪力和轴力规律,获得了影响锚固段剪应力分布的因素。大多数的岩体锚固性能研究资料偏重于讨论在爆破或冲击荷载作用下的现象和本质,但对地震动荷载下岩体锚固性能问题则研究相对较少。薛亚东等^[11]采用二维快速拉格朗日程序 FLAC 对回采巷道锚杆支护(端锚和全锚)进行地震动载模拟分析,得出锚杆轴力随动载作用时间的变化规律,认为锚杆安装角对轴力的动载响应有很大影响。戴林岐^[12]指出锚杆受地震冲击时,预应力锚杆将产生永久性的预应力损失,有可能使锚杆的预应力突然增加,预应力锚杆发生突变性变化,会严重影响锚杆的功能。本文重点研究简化地震荷载对预应力锚索的力学响应及洞室变形特性,通过水平和竖直方向 2 种地震波的对比,分析预应力锚索的受力特点。

1 计算模型

1.1 计算模型的设计

圆形洞室跨度 10 m,考虑到模型较小会对结果造成较大误差,取模型长、宽均为 120 m。为方便分析锚索安装角对轴力的影响,沿洞室周边均匀安装 12 根锚索,长度均为 20 m(图 1)。模型为无限空间体,不考虑地震波的反射及锚索受力后可能出现的扭转效应。假设洞室埋深 100 m,不考虑地应力及构造应力对洞室的影响,侧压力系数取 0.8。

1.2 本构模型及参数

洞室围岩应力应变呈线性关系,与应力路径无关。围岩是无卸载滞后现象的均质、各向同性、连续性材

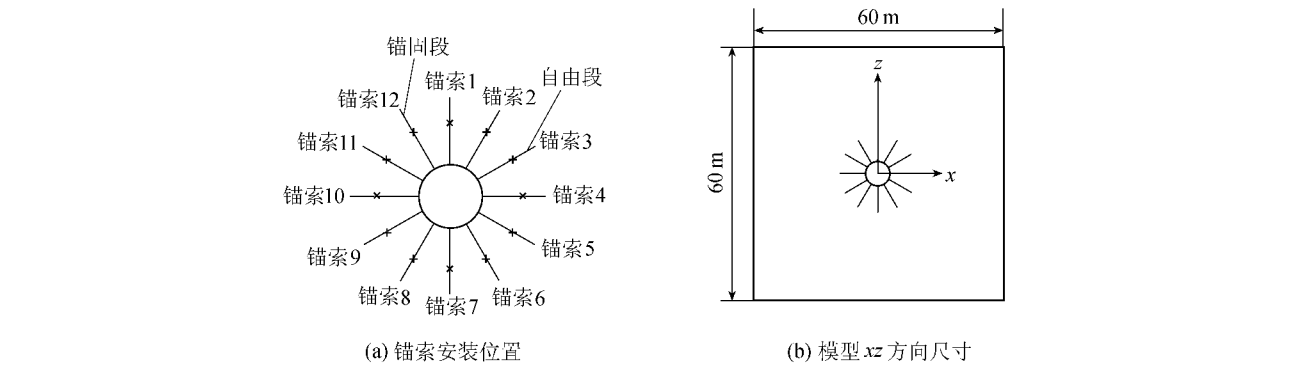


图 1 计算模型及锚索安装示意图

Fig. 1 Model and installment of anchor cables

料,故将围岩设置为各向同性弹性模型,岩石密度 $2\,600\text{ kg/m}^3$,体积模量 30 GPa ,弹性模量 15 GPa .应力应变关系依胡克定律,用应变增量的形式表达.平面应变的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_{11} &= \alpha_1\Delta e_{11} + \alpha_2\Delta e_{22} \\ \Delta\sigma_{22} &= \alpha_2\Delta e_{11} + \alpha_1\Delta e_{22} \\ \Delta\sigma_{12} &= 2G\Delta e_{12} \quad (\Delta e_{12} = \Delta e_{21}) \\ \Delta\sigma_{33} &= \alpha_2(\Delta e_{11} + \Delta e_{22}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中

$$\alpha_1 = K + \frac{4}{3}G \quad \alpha_2 = K - \frac{2}{3}G$$

式中: K ——体积模量; G ——剪切模量; $\Delta\sigma$ ——应力增量; Δe ——应变增量,可表示为

$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right] \Delta t \quad (2)$$

式中: $\dot{u}$ ——位移速率; Δt ——时步.

模型采用端头式预应力锚索.锚索与周围岩石的接触具有黏结性和自然摩擦.理想情况下,锚固段节点轴向上采用弹簧-滑块来描述(图 2).锚索锚固段长 8 m ,自由段长 11.5 m ,托盘长 0.5 m .采用 FLAC 3D 内置结构单元 cable 单元模拟锚索,加固单元由几何参数、材料参数和水泥浆特性来定义.锚索端头、自由段、锚固段赋不同的参数来模拟端头式预应力锚索.端头的锚固参数设置为极大值来模拟托盘^[13].锚索加载 $1\,000\text{ kN}$ 的预应力.根据研究目的,设置锚固段黏结刚度 $1\,000\text{ kN/mm}$,黏结强度 70 MPa ,弹性模量 202 GPa ,屈服载荷 327.6 kN ,设置未锚固段黏结强度和黏结刚度为零.

1.3 动力响应参数设置

为获得良好的模拟效果,对模型施加速度载荷.模型采用自由场边界条件,顶底部设置为黏滞边界(图 3).FLAC 施加动载方式包括速度、加速度、应力等过程方式.地震动载中速度比较容易测量,故采用速度加载方式.模型底部黏滞边界加载 z 方向速度时程模拟 p 波加载过程,模型底部黏滞边界加载 x 方向速度时程模拟 sv 波加载过程.地震是不同频率不同速度动载荷的复杂叠加,为使结果清晰,在此选用波速 1 m/s ,频率 4 Hz ,作用时间 1 s .阻尼设置为局部阻尼,赋值于锚索各节点,局部阻尼系数使用默认值.

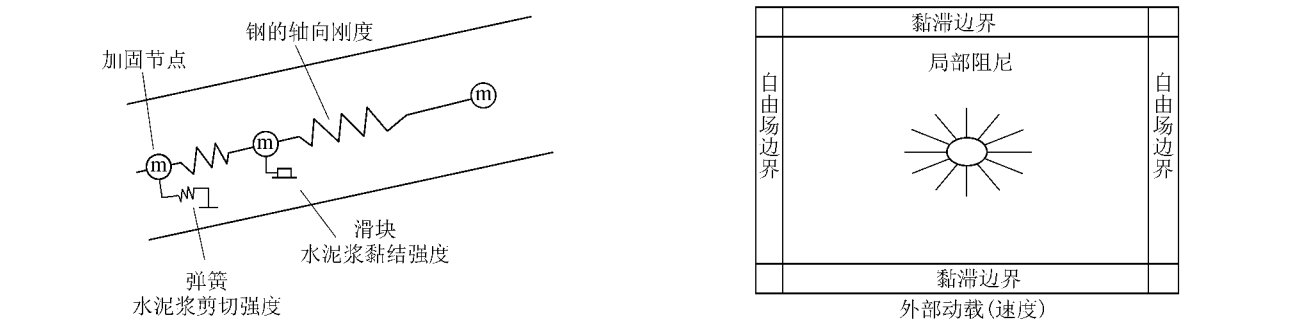


图 2 锚索锚固段黏结力学机理

Fig. 2 Anchoring mechanism of anchorage section

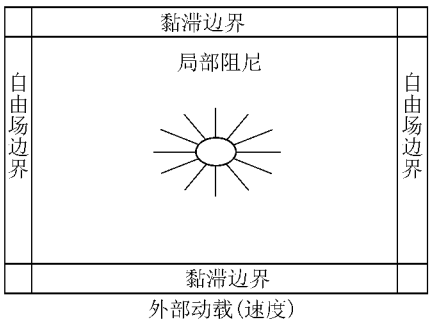


图 3 动载边界条件类型

Fig. 3 Types of boundary condition of dynamic load

2 数值计算结果

2.1 震前锚索轴力分析

安装后各锚索轴力并不完全相同,受安装位置的影响出现小幅度变化(图4).锚索不同位置轴力也不同.锚固段轴力最小,并且从锚固段头到段尾轴力递增(图5);自由段次之,托盘处轴力最大,约为预应力的2倍.锚固段围岩与锚索相互作用力主要表现为摩擦力,锚索与围岩在相互作用下达到平衡状态,使锚索紧紧锚固在周围岩体中.

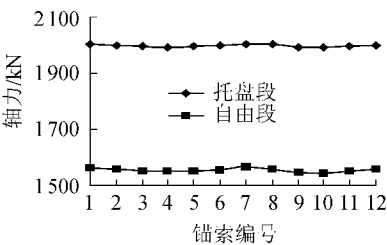


图4 震前锚索轴力

Fig. 4 Axial force before earthquake

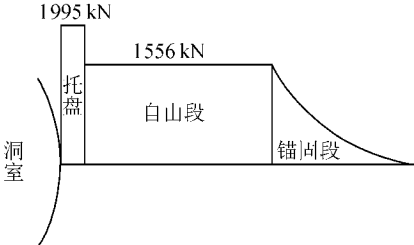


图5 锚索4轴力分布

Fig. 5 Distribution of axial force of cable No. 4

2.2 p波作用下的锚索动力响应

锚索轴力随动载时程绕原始轴力值波动.受安装位置因素影响,各锚索轴力变化幅度不同.在自由段,30°安装角的锚索轴力变化最小,水平向安装的锚索轴力变化小(图6(a)),竖直向安装的锚索轴力变化大.岩石材料内摩擦角等因素制约了小安装角锚索的轴力变化范围.锚固段是锚索拉紧岩石的重要区域,锚固段轴力受动载影响大,应力损失也比较明显(图6(b)).竖直向安装的锚索轴力变化范围最大,轴力损失也最大;水平向安装的锚索轴力变化最小,轴力损失也最小.锚索1轴力(表1)变化最显著,托盘最大轴力损失比较小,约为0.5%;自由段最大轴力损失为0.8%,锚固段中点处最大轴力损失为17.8%.

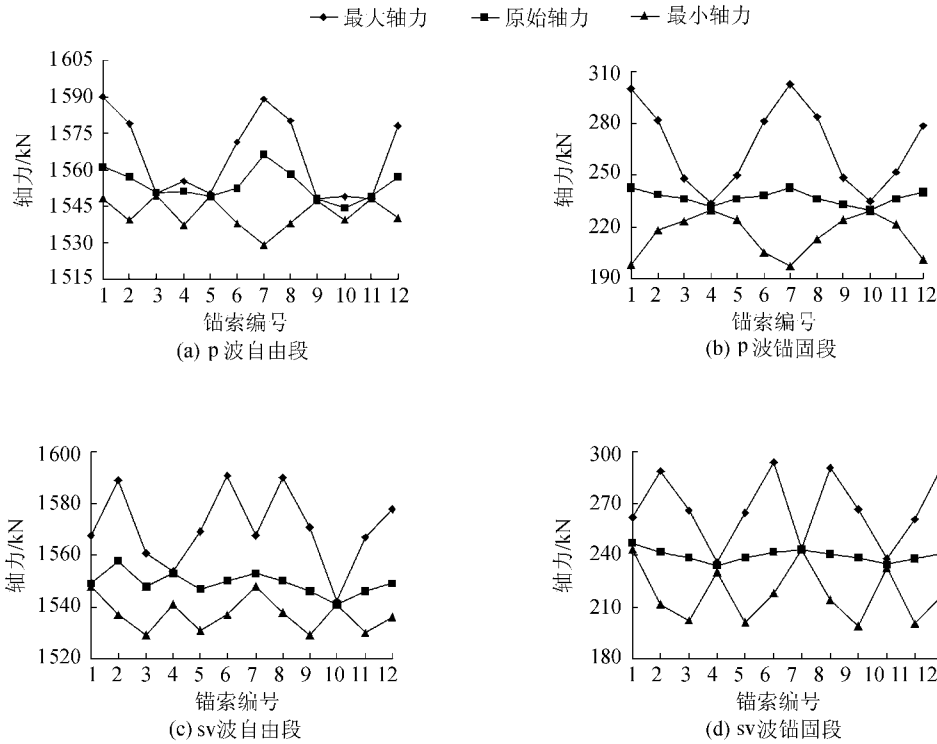


图6 两波分别作用下的锚索轴力极值

Fig. 6 Maximum and minimum axial forces under two kinds of waves

2.3 sv波作用下的锚索动力响应

锚索轴力也随sv波时程呈周期性变化.锚索的安装位置起到非常重要的作用,不同安装位置锚索轴力

的变化幅度明显不同.无论自由段还是锚固段,水平方向安装的锚索轴力变化均最小,竖直方向安装的锚索轴力较小,这是由于剪切力改变了锚索的原始受力状态;安装角为 30°与 60°的锚索轴力变化范围大,安装角为 30°的锚索轴力损失最大(图 6(c) & (d)).安装角为 30°的锚索轴力变化最显著,托盘最大轴力损失为 1.8%,自由段最大轴力损失为 1.4%,锚固段中点处最大轴力损失为 13.0%(表 1).

2.4 动载频率对锚索承受作用力的影响

选用 2 Hz、4 Hz、6 Hz 3 种波(p 波)研究频率对锚索的响应.结果表明,不同频率波动对锚索轴力的影响程度不同.频率越大,轴力变化幅度越大,自由段与锚固段最大轴力损失越大(表 2).安装角小,最大轴力损失小;安装角大,最大轴力损失大.预应力锚索的动力响应与地震波频率密切相关,高频波动可明显降低锚固能力.

表 1 锚索轴力比较

表 2 锚固段最大轴力损失极值

Table 1 Comparison of cable forces							kN	
位置	最大轴力		初始轴力		最小轴力			
	锚索 1	锚索 2	锚索 1	锚索 2	锚索 1	锚索 2		
托 盘	2011	2039	1986	1986	1976	1950		
自由段	1696	1589	1617	1558	1604	1537		
锚固段	386	289	287	242	236	211		

Table 2 Losses of maximum axial force of anchorage section			
频率/ Hz	最大轴力损失极值/kN		
	锚索 7	锚索 8	锚索 12
2	36.5	8.2	5.8
4	44.0	14.6	17.7
6	54.1	26.8	23.5

2.5 锚索对洞室抵抗动载影响的作用分析

洞室在地震波的作用下会产生一定的变形.p 波对洞室的作用方式为挤压、拉伸,sv 波对洞室的作用方式为剪切.p 波作用时,洞室会随着动载荷发生周期性挤压与拉伸,顶底板相对位移不断发生变化.同一 p 波作用下的无锚洞室与锚固洞室,洞室顶底板相对位移变化不大(图 7).因此,锚索对波传播的影响较小.

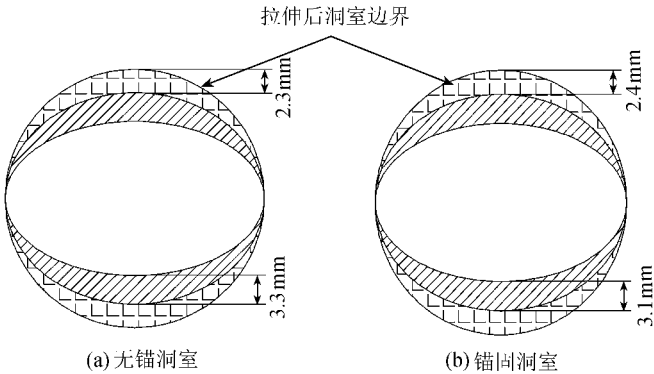


图 7 洞室顶底板最大相对位移

Fig. 7 Maximum relative deformation between roof and floor

3 结 论

- a. p 波与 sv 波对预应力锚索轴力有很大影响.动载荷作用时锚索轴力围绕原始轴力上下波动,变化幅度因锚索安装位置及锚索不同部位而不同.p 波对竖直安装的锚索影响最大,sv 波对倾斜安装的锚索影响最大.锚固段最大轴力损失幅度大于自由段.
- b. 预应力锚索的动力响应与波动频率密切相关,频率越高则锚索预应力损失越大,频率越低,则预应力锚索的波动性越低,预应力损失越小.
- c. 相对于地表,地下洞室对波动扰动小得多,无论何种波形锚索对波传播的影响均较小,因此隧洞锚索主要表现为预应力的损失,而不是对波场的扰动.

参考文献：

[1] 尤春安.全长粘结式锚杆的受力分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):339-341.(YOU Chun-an. Mechanical analysis on wholly grouted anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(3):339-341.(in Chinese))

[2] 宗全兵,徐卫亚.基于局部变形理论的非均质地层中预应力锚固受力分析[J].岩土力学,2009,30(4):915-920.(ZONG Quan-bing,XU Wei-ya. Analytical approach for prestressed anchor embedded in non-homogeneous stratum based on Winkler's

- assumption[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 915-920. (in Chinese))
- [3] 张永兴, 饶泉宇, 唐树名, 等. 压花锚锚固性能的试验研究与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 607-614. (ZHANG Yong-xing, RAO Xiao-yu, TANG Shu-ming, et al. Experimental study and numerical analysis of anchorage performance of bulb anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 607-614. (in Chinese))
- [4] 曾华明, 李祺, 岳向红. 张拉荷载下砂浆锚固岩石锚杆的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3982-3986. (ZENG Hua-ming, LI Qi, YUE Xiang-hong. Analysis of mechanical behavior of fully grouted rock bolt under tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2): 3982-3986. (in Chinese))
- [5] 洪海春, 徐卫亚. 地震作用下岩体锚固性能研究综述与展望[J]. 金属矿山, 2006(3): 5-10. (HONG Hai-chun, XU Wei-ya. Review and prospect of anchorage properties of reinforced rockmass under earthquake[J]. Metal Mine, 2006(3): 5-10. (in Chinese))
- [6] 杨苏杭, 梁斌, 顾金才, 等. 锚固洞室抗爆模型试验锚索预应力变化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3749-3756. (YANG Su-hang, LIANG Bin, GU Jin-cai, et al. Research on characteristics of prestress change of anchorage cable in anti-explosion model test of anchored cavern[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2): 3749-3756. (in Chinese))
- [7] TANNANT D D, BRUMMER R K. Rock bolt behavior under dynamic loading field test and modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 537-550.
- [8] ORTLEPP W D, STACEY TR. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 15-21.
- [9] 王光勇, 徐平, 李桂林. 爆炸荷载作用下锚杆动载响应和加固机理数值分析[J]. 工程爆破, 2008, 14(4): 5-8. (WANG Guang-yong, XU Ping, LI Gui-lin. Numerical analysis on dynamic response and reinforcement mechanics of rock bolts under explosive loads[J]. Engineering Blasting, 2008, 14(4): 5-8. (in Chinese))
- [10] 闫毅志, 张燎军, 杨具瑞, 等. 预应力锚索锚固效果的三维数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(11): 62-65. (YAN Yi-zhi, ZHANG Liao-jun, YANG Ju-rui, et al. Research on 3D numerical simulation of pre-stressed cable of anchoring effect[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(11): 62-65. (in Chinese))
- [11] 薛亚东, 张世平, 康天合. 回采巷道锚杆动载响应的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1903-1906. (XUE Ya-dong, ZHANG Shi-ping, KANG Tian-he. Numerical analysis on dynamic response of rock bolts in mining roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1903-1906. (in Chinese))
- [12] 戴林岐. 影响岩体预应力锚固效果的主要因素[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 10-18.
- [13] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 157-160.

Dynamic response of prestressed anchor cables in round tunnels under earthquakes

HAO Zhen-qun, SHI Chong, ZHU Zhen-de

(Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With regard to the potential decrease of the axial force of anchor cables and the resulting reduction of deformation resisting capacity of tunnels under their inherent stress and dynamic load, the finite different method was adopted. Based on a round tunnel model, the simplified dynamic seismic load of the tunnel supported by prestressed anchor cables was simulated under pressure waves and shear waves separately. The results show that because the tunnel dimension is far smaller than the infinite space, the seismic load leads to limited torsion of the tunnel, so the stress of the cables has small variation. The angle of the cables has great influences on the stress. The higher the earthquake frequency is, the larger the force is. The propagation type has few influences.

Key words: round tunnel; prestressed anchor cable; seismic load; dynamic response