

锚杆锚固系统在瞬态激励下的动态响应特性

王 成, 宁建国, 李 朋

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 在考虑内外黏性阻力和底端岩层刚度的条件下, 建立了端锚锚杆的纵向振动理论模型, 求解得到了不同边界条件下端锚锚杆在瞬态敲击下的加速度动态响应, 并基于该理论模型对影响锚杆锚固质量的参数进行了分析. 最后将理论和数值模拟结果与实验进行对比, 三者吻合较好, 从而验证了理论模型和数值计算结果能较准确地反映锚固锚杆的振动特性和弹性波的传播规律.

关键词: 锚杆; 锚固质量; 上界面反射; 底端反射; 无损检测

中图分类号: TD353.6

文献标识码: A

Dynamic response for grouted system of rock bolts under instantaneous excitation

WANG Cheng, NING Jian-guo, LI Peng

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Considering viscous resistance and the stiffness of rock layer for bottom, the longitudinal vibration theoretical model for the grouted rock bolts was established, and the acceleration responses for free rock bolts and grouted rock bolts under different boundary conditions were obtained. Based on the theoretical model, analyzed the parameters that have the influence on the bonding quality of rock bolts. The theoretical results were compared with numerical results and experiments, which indicated a satisfactory coincidence among the three. As a result, the theoretical model and numerical results can accurately reflect the vibration characteristics of grouted rock bolts and the propagation laws of elastic wave.

Key words: rock bolts; bonding quality; upper interface reflection; end reflection; nondestructive test

近年来, 我国在煤矿采掘、公路铁路隧道和高边坡维护等工程中大力推广锚杆锚固技术, 但是由于锚杆锚固失效导致塌方等灾难频繁出现, 如何采用科学有效的方法对锚杆锚固质量进行无损检测已经成为国家基础设施建设中的一个重要研究课题^[1~3]. 前人基于弹性反射波法对锚杆锚固质量进行过大量的实验研究^[1, 2], 但理论研究相对滞后, 锚杆锚固系统在瞬态激励下的振动理论模型及弹性波传播规律的研究相对较少^[4~6]. 鉴于此, 本文基于瞬态敲击法, 借鉴桩基振动理论^[7, 8], 建立了锚杆锚固系统的理论模型, 求解得到了不同边界条件下端锚锚杆在瞬态敲击下的加速度动态响应. 在此基础上, 采用有限元程序对锚杆锚固系统在瞬态激励下的动态响应进行了数值模拟, 并结合实验结果进行验证.

1 锚固锚杆振动模型的建立、求解和分析

1.1 波动方程的建立

图1为端锚锚杆的振动力学模型, 锚杆长 L , 锚固长度为 x_0 . 杆端受瞬态敲击力 $F(L, t)$ 作用, $F(x, t)$ 和 $F(x-dx, t)$ 为微元 dx 上下面的轴向力; F_{r1} 为锚杆的微元黏性阻尼力; F_{r2} 为边界黏性阻尼

收稿日期: 2007-06-08 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572026)

作者简介: 王 成(1972—), 男, 内蒙古商都人, 副教授. Tel: 010-68912762, E-mail: wangcheng@bit.edu.cn

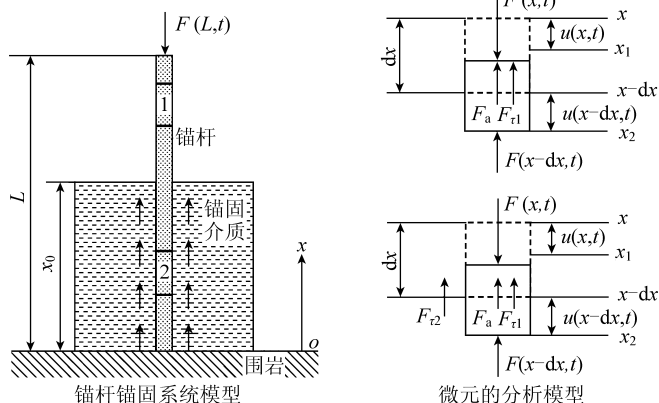


图 1 端锚锚杆的振动力学模型

Fig. 1 Vibration mechanical model of partly grouted rock bolts

边界条件和在 $x = x_0$ 的协调方程。

(1) 初始条件

$$\begin{cases} u^{(1)}(x, 0) = 0 & (0 \leq x \leq x_0), \\ u^{(2)}(x, 0) = 0 & (x_0 \leq x \leq L), \end{cases} \quad \begin{cases} u_t^{(1)}(x, 0) = 0 & (0 \leq x \leq x_0), \\ u_t^{(2)}(x, t_1) = F_{t1} \delta(L - x) / \rho A = I \delta(L - x) / \rho A & (x_0 \leq x \leq L). \end{cases}$$

(2) 边界条件对于底端自由, 底端固定和底端弹性支承的端锚锚杆, 其边界条件分别为

$$\begin{cases} u_x^{(1)}(0, t) = 0, & u^{(1)}(0, t) = 0, & u_x^{(1)}(0, t) = -ku^{(1)}(0, t) / E_1 A, \\ u_x^{(2)}(L, t) = 0, & u_x^{(2)}(L, t) = 0, & u_x^{(2)}(L, t) = 0. \end{cases}$$

(3) 协调条件 $\begin{cases} u^{(1)}(x_0, t) = u^{(2)}(x_0, t), \\ E_1 u_x^{(1)}(x_0, t) = E_2 u_x^{(2)}(x_0, t) = -k_1 u^{(1)}(x_0, t) / A = -k_2 u^{(2)}(x_0, t) / A, \end{cases}$

其中, ρ , A 分别为锚杆的密度和横截面积; k_1 , k_2 分别为锚固段和外露段的单位刚度; E_1 , E_2 分别为锚固段和外露段的杨氏模量。通过分离变量法就可以得到端锚锚杆在不同边界条件下的动态响应, 不论是底端自由、底端固定还是底端弹性支承的端锚锚杆, 其加速度响应 $a(t)$ 在形式上都是一样的。

$$a(t) = \frac{d^2 u(t)}{dt^2} = \frac{2I}{M_2} e^{\beta_1(t_1-t)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[\beta_1^2 - (\omega_1)_n^2] \sin[(\omega_1)_n t] - 2(\omega_1)_n \beta_1 \cos[(\omega_1)_n t]}{[(\omega_1)_n \cos(\omega_1)_n t_1 - \beta_1 \sin(\omega_1)_n t_1] \left\{ 1 + \frac{C_2}{2\omega_n^* (L - x_0)} \sin\left[\frac{2\omega_n^*}{C_2} (L - x_0)\right] \right\}},$$

式中, ω_1 , ω_2 分别为锚固段和外露段的阻尼圆频率, $\omega_1 = \sqrt{(\omega^*)^2 - \beta_1^2}$, $\omega_2 = \sqrt{(\omega^*)^2 - \beta_2^2}$; ω^* 为不同

边界条件下端锚锚杆的固有圆频率; M_2 为锚杆外露段的质量, $M_2 = \rho_2 A (L - x_0)$ 。

1.3 振动响应分析

(1) 底端弹性支承单位刚度值的影响 图 2(a) 为锚杆长度 160 cm, 锚固长度 50 cm, 不同 k 所对应的加速度响应曲线, 从图中可以看到锚固段上界面

力; F_a 为微元惯性力。根据动静平衡达朗贝尔原理可以得到端锚锚杆的振动波动方程为

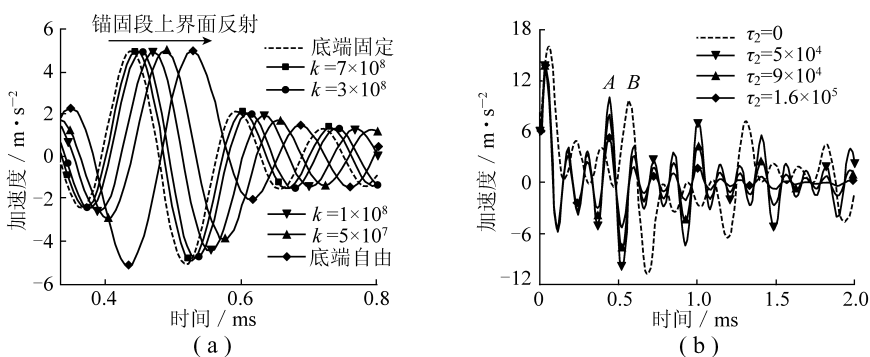
$$u_{tt}^{(1)}(x, t) + 2\beta_1 u_t^{(1)}(x, t) - C_1^2 u_{xx}^{(1)}(x, t) = 0 \quad (t > 0, 0 \leq x \leq x_0),$$

$$u_{tt}^{(2)}(x, t) + 2\beta_2 u_t^{(2)}(x, t) - C_2^2 u_{xx}^{(2)}(x, t) = 0 \quad (t > 0, x_0 \leq x \leq L),$$

式中, $u^{(1)}(x, t)$, $u^{(2)}(x, t)$ 分别为锚固段和外露段在 t 时刻的位移函数^[7]; β_1 , β_2 分别为锚固段和外露段的阻尼系数; C_1 , C_2 分别为弹性波在锚固段和外露段的波速。

1.2 模型的求解

欲求锚杆锚固系统在瞬态敲击下的动态响应, 则必须给出锚杆振动时的初始条件、

图 2 不同 k 与 τ_2 所对应的加速度响应曲线Fig. 2 Acceleration response curves corresponding for different k and τ_2 values

反射波, 且随 k 值的减小反射波时间滞后, 但是相位变化不明显, 即底端岩层的刚度大小对上界面反射波的相位影响很小。

(2) 锚固段的边界黏性阻尼系数 τ_2 的影响 图 2 (b) 为不同 τ_2 值所对应的加速度响应曲线。从图中可以看到, 随着 τ_2 的增大, 锚固段上界面的反射波 A 点的振幅下降, 但反射波时间保持不变, 即不影响波形而只影响振幅, 表明外阻尼是应力波传播过程中能量衰减的主要原因。当 $\tau_2 = 0$, 即为自由锚杆时, 可以看到底端反射波 B 点。因此锚固段 τ_2 的大小能够反映锚杆与岩层粘结的好坏程度, 可以用它来评价锚杆锚固质量的优劣。

2 锚固锚杆在瞬态激励下动态响应的数值模拟

利用有限元程序和上述理论分别计算自由锚杆和端锚锚杆在瞬态激励下的动态响应, 锚杆锚固系统基本参数见表 1, 理论和数值结果的比较见图 3。图 3(a) 中的 A 、 B 点为锚杆底端的第 1、2 次反射波, 图 3(b) 中的 C 点为锚固段上界面的反射波, 但不能看到底端反射波。从图中可知, 理论结果与数值计算结果吻合很好, 证明本文建立的理论模型是正确的。

表 1 锚杆锚固系统的基本参数

Table 1 The parameters for the anchorage system of rock bolts

材 料	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	直径 /cm	长度 /cm
锚杆	206	0.25	7 900	2	160
环氧树脂	14	0.30	2 000	4	50
水泥	40	0.29	2 520	45	50

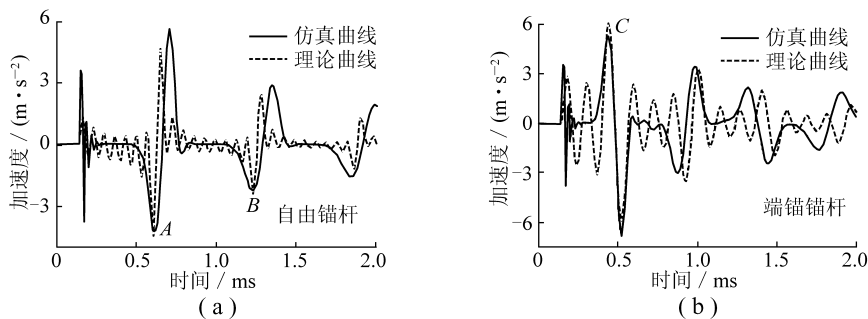


图 3 锚杆加速度响应的理论和仿真对比曲线

Fig. 3 Comparison between theoretical and numerical results for the acceleration response of rock bolts

3 锚杆锚固系统动态响应的实验研究

针对煤矿中常见的中等稳定性岩层制作了 $50 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ 混凝土试块, 锚杆长 160 cm, 直径 2 cm, 锚固长度 40 cm, 锚固剂采用环氧树脂。激发源为弹射针, 其目的是在锚杆顶端施加一瞬态激励, 由安设在锚杆顶端的传感器接受反射信号, 通过对反射波信号进行分析, 就可以得到锚杆的有效锚固长度。自由锚杆和不同锚固质量的锚杆在瞬态激励下动态响应的数值和实验结果对比见表 2 和图 4。图 4 中的 A 点和 B 点代表锚杆底端反射点, C 点代表锚固段上界面反射点。对表 2 和图 4 进行分析, 得出以下结论:

(1) 对于锚固质量劣的锚杆, 可以很清晰看到多次底端反射点, 其波形与自由锚杆的波形相似; 对于锚固质量优的锚杆, 可以很清晰地看到锚固段上界面反射点, 但不能清晰地识别底端反射点。根据锚固段上界面的反射时间和波在锚杆中的传播速度就

表 2 锚杆锚固系统的实验与数值计算结果的比较

Table 2 Comparison of numerical and experimental

results for rock bolts

锚固状态	底端反射时间/ μs		锚固段上界面反射时间/ μs	
	计算值	实验值	计算值	实验值
自由锚杆	622	620		
锚固质量劣的锚杆	623	618		
锚固质量优的锚杆			466	468

可以计算出锚杆的有效锚固长度.

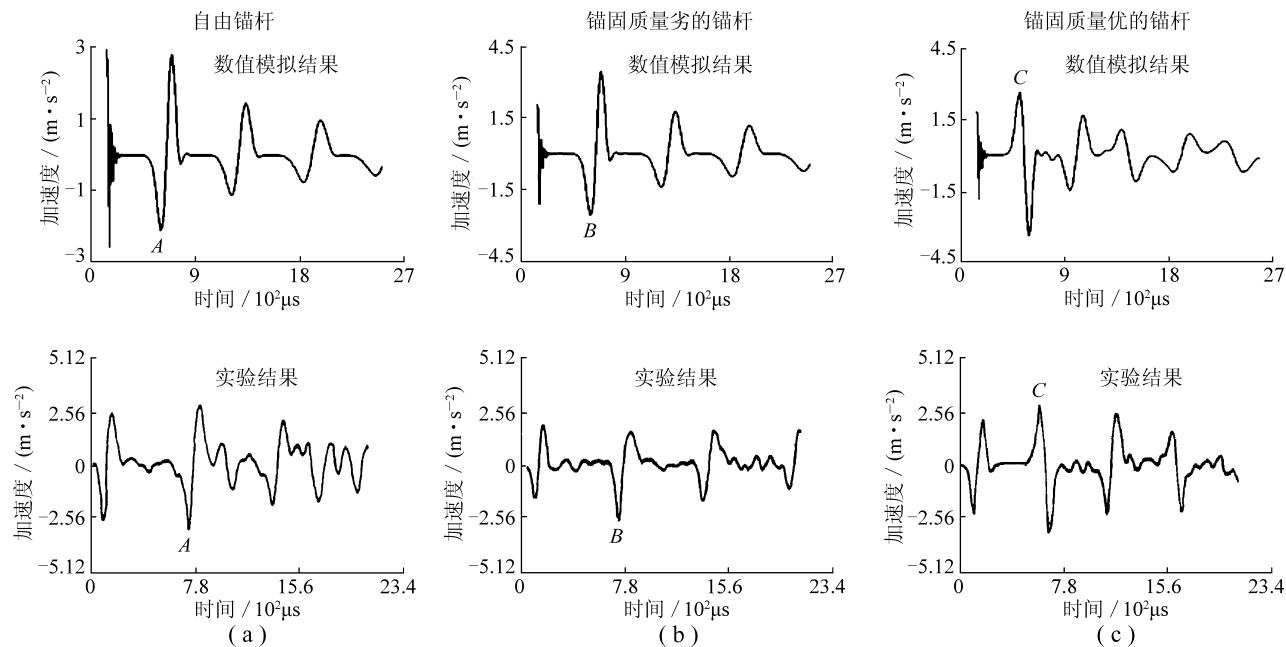


图 4 不同锚固质量的锚杆的加速度响应曲线

Fig. 4 Acceleration response curves of rock bolts with different bonding quality

(2) 低应变瞬态敲击法找不到锚杆锚固系统的底端反射点, 其主要原因: ① 低应变瞬态敲击法所激发的模态单一; ② 从锚固锚杆底端反射回来的能量很弱, 而从其它界面反射回来的能量较强, 这样反射的弹性波互相叠加造成底端反射波被湮没, 从而看不到底端反射.

(3) 从曲线的对比可知, 数值计算和实验结果吻合得很好, 因此可以利用有限元程序模拟锚杆锚固系统在瞬态激励下的动态响应, 为锚杆锚固质量的无损检测提供一定的理论依据.

4 结 语

通过理论分析、数值模拟和实验研究相结合的方法对锚杆锚固系统在瞬态激励下的动态响应进行了分析, 得到了锚固锚杆在不同边界条件下的加速度响应. 其中, 底端岩层刚度 k 的大小对上界面反射波的相位影响很小, 只产生时间滞后效应; 可以用锚杆锚固段的 τ_2 值来评价锚杆锚固质量的优劣. 这些结果为锚杆锚固质量的安全检测及支护参数的优化设计提供了重要的理论依据.

参考文献:

- [1] 李 义, 王 成. 应力反射波法检测锚杆锚固质量的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (2): 160 ~ 164.
- [2] 汪明武, 王鹤龄. 锚固质量的无损检测技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (1): 126 ~ 129.
- [3] 吴 斌, 孙雅欣, 何存富, 等. 全长粘结型锚杆高频超声导波检测应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (2): 397 ~ 404.
- [4] 王 成, 恽寿榕, 李 义. 锚杆-锚固介质-围岩系统瞬态激励的响应分析 [J]. 太原理工大学, 2000, 31 (6): 658 ~ 651.
- [5] Krzysztof Gadek. Methods of analysis of an impulse response wave of a steel anchor fixed in a rock mass [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43 (8): 1 288 ~ 1 292.
- [6] 张永兴, 陈建功. 缺陷锚杆振动问题的数学模型及其求解 [J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1 (1): 62 ~ 66.
- [7] 雷林源. 桩基动力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [8] 徐攸在. 桩的动测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.