

文章编号: 0253-9993(2007)10-1066-04

全长锚固锚杆早期锚固质量无损检测技术

刘海峰^{1,2}, 杨维武², 李 义³

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081; 3. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 借鉴桩基检测原理, 通过理论分析和实验研究, 证明了锚杆锚固体中固结波速确实会发生变化, 其变化范围介于激发应力波在自由锚杆杆体中的传播速度和应力波在锚固介质中的传播速度之间, 其值大小与锚杆、锚固介质及围岩的黏结强度有关. 养护初期 (<14 d), 随着养护时间的增加, 固结波速逐渐减小. 当养护时间达到一定值 (约 14 d) 后, 随着养护时间的增加, 固结波速逐渐增大, 并最终趋于定值. 同时给出了固结波速和锚固质量的定性关系.

关键词: 锚杆; 锚固体; 固结波速; 无损检测

中图分类号: TD353.7 文献标识码: A

Non-destructive testing technology of all-lengthy anchorage rock bolt at early age

LIU Hai-feng^{1,2}, YANG Wei-wu¹, LI Yi³

(1. Department of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Mechanic-electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Department of Mining, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on principle of pile testing, concretion wave speed in anchorage volume was proved to change by means of theoretic analysis and laboratory study. It ranges from wave speed of elastic stress wave in anchorage bolt to that in free rock bolt. Its value depends on anchorage bolt, anchorage medium and cohesion intensity. When the curing time is less than fourteen days, with the increase of curing time, concretion wave speed decreases. However, when the curing time is more than fourteen days, with the increase of curing time, concretion wave speed enhances and tends to fixed value. At the same time, the relation between rock bolt integrity and concretion wave speed was also given.

Key words: rock bolt; anchorage volume; concretion wave speed; non-destructive testing

锚杆锚固技术在隧道支护、矿业采掘支护、高边坡和深基坑维护等工程中得到广泛应用, 同时现场施工因无完备检测质量问题的手段而造成事故与经济损失也越来越多, 锚杆锚固质量的无损检测理论和新技术的研究成为岩土工程界迫切需要解决的问题. 目前我国现场测试仍停留在利用液压千斤顶进行破坏性拉拔实验阶段, 不仅费工费时, 同时对经锚杆加固的围岩产生较强的局部扰动, 降低了锚杆对围岩的加固作用, 对软岩或较破碎岩层尤为不利. 20 世纪 80 年代以来, S. C. Tadolini 利用超声波检测锚杆的锚固质量^[1]; 王鹤龄等提出了用振幅比及能量衰减系数来衡量锚杆的锚固质量^[2]; 李义采用波的时域、频域分析来检测锚杆锚固质量, 提出了表征锚杆锚固质量的 6 个参数^[3]: 有效锚固长度、幅值比、衰减系数、动刚度、基频、频率比. 在应用波动理论无损检测锚杆锚固质量中, 关键问题是确定锚杆的底端反射. 为了准确确定锚杆的底端反射时间, 必须搞清楚应力波在锚杆锚固体中的传播规律, 同时在研究锚杆底端反射

收稿日期: 2006-10-30 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 宁夏高校基金资助项目 (06008); 宁夏大学基金资助项目 (ZR0620)

作者简介: 刘海峰 (1975-), 男, 宁夏中宁人, 博士研究生. E-mail: liuhai Feng@bit.edu.cn

显现规律^[3]的过程中发现,即使在底端反射较明显的范围内,仍有底端反射出现滞后的现象,即锚杆动态测试响应曲线上底端反射的位置与实测结果不一致,有时甚至相差很大,经过分析发现,锚固段内固结波速发生变化是导致底端反射滞后的主要原因,本文对这一问题进行研究。

1 固结波速

固结波速是指激发应力波通过锚杆锚固段(锚杆、锚固剂和围岩共同组成的体系)时的速度,它是评价锚杆锚固质量的重要参数^[4,5]。现场锚固的锚杆同时承受着锚固介质和围岩的多重影响,尤其是全长黏结型锚杆,当锚固介质或围岩的刚度和阻尼与锚杆相比时,则会对锚杆的振动特性产生较明显的影响。锚杆-锚固介质共同工作时,锚杆的振动非常复杂。为了简化计算,假设^[6-8]:①锚杆的受激振动在弹性限度内。锚杆振动时,杆体内各质点的位移、应力和应变之间的关系都服从弹性虎克定律。在低应变动力测试中,由于激振力很小,并且是可以控制的,故锚杆的振动完全满足这一假设条件。②锚杆材料均匀或分段均匀且各向同性。对于水泥锚杆,在拉伸与压缩特性方面存在明显差异,而且也不均匀,但在低应变情况下,近似满足这一假设条件,可以忽略不计这种差异。③锚杆受激振动时,其截面保持为平面。锚杆受激振动时,同一截面上所有质点位移的方向和大小都是一致的,不存在相位的差别或振动的超前或滞后现象。这对于锚杆直径 D 和杆长 L 之比 $L/D \leq 1/10$ 的情况是满足的。

在锚杆锚固段内取一控制体积,如图 1 所示,在低应变的情况下,假定杆体和锚固介质的界面有足够的黏结强度,在锚杆的自由端施加脉冲激励,根据 S. T. Venat 原理,在杆体内将有一稳定的弹性应力波向前传播,当应力波传播到锚杆锚固段内时,锚固介质与锚杆的界面发生畸变,且沿弯曲表面有动态剪应力产生。假定这个复杂应力场的范围是有限的,则波阵面左边一定距离处原则上是准静态区域,在该区域中质点速度是均匀的,而界面切应力等于 0。锚杆与锚固介质的连续方程为 $\rho'_1 A'_1 (v_c - v) = \rho_1 A_1 v_c$, $\rho'_2 A'_2 (v_c - v) = \rho_2 A_2 v_c$, 其中, ρ_1, ρ_2 为锚杆和锚固介质在控制体中的密度; A_1, A_2 为锚杆和锚固介质在控制体中的横截面面积; ρ'_1, ρ'_2 为准静态应变状态锚杆和锚固介质的密度; A'_1, A'_2 为准静态应变状态锚杆和锚固介质的面积; v_c 为波阵面传播速度; v 为质点运动速度。由于波阵面的前方未受扰动,伸长率 ε 就等于正应变 ε_x 。由 Love 运动学条件得

$$\varepsilon_{x1} = \varepsilon_{x2} = \varepsilon = \varepsilon_x = -v/v_c, \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}$ 为锚杆杆体和锚固介质的正应变。

控制体积左边,即在准静态应变区中,材料的单向应力应变关系可用一般形式表示为

$$\sigma_{x1} = C_1 \varepsilon_{x1}, \sigma_{x2} = C_2 \varepsilon_{x2}, \quad (2)$$

式中, σ_{x1}, σ_{x2} 为锚杆杆体和锚固介质的单向应力; C_1, C_2 为锚杆杆体和锚固介质的折算刚度系数。这 2 个系数由所考察的特定问题所施加的平衡和几何约束条件来确定,而不是锚杆杆体和锚固介质单独存在时的数值。

根据式(2),由平均折算刚度求得平均应力为

$$\sigma_{ave} = \sigma_{x1} V_1 + \sigma_{x2} V_2 = (V_1 C_1 + V_2 C_2) \varepsilon_x, \quad (3)$$

式中, V_1, V_2 为锚杆杆体和锚固介质在控制体中所占体积百分数。

在控制体积内,切应力是一种内应力,不影响总的动量平衡,所以可得动量平衡方程为

$$\sigma_{x1} A'_1 + \sigma_{x2} A'_2 = -v_c v (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2). \quad (4)$$

在低应变的情况下,取 $A'_1/A_1 = A'_2/A_2 = 1$ 。联立式(1)~(4)可得波阵面速度^[6,7]为

$$v_c^2 = (A_1 C_1 + A_2 C_2) / (A_1 \rho_1 + A_2 \rho_2). \quad (5)$$

式(5)中分母代表平均密度,分子代表平均折算刚度,是由锚杆与锚固介质的接触情况、几何尺寸

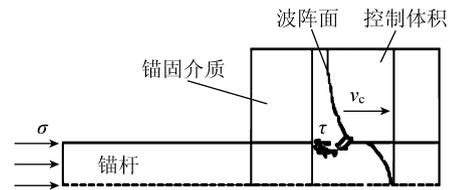


图 1 锚固控制体积

Fig. 1 Controlled volume of anchorage bolt

等条件推导出来的. 在式(5)中, 令 $\alpha = A_1/A_2$, 则当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 固结波速 v_c 趋向于应力波在锚固介质中的传播速度; 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 固结波速趋向于应力波在锚杆杆体中的传播速度. 因此, 在锚固体内, 固结波速介于应力波在锚杆杆体中的传播速度和在锚固介质中的传播速度之间, 这就从理论上证明了“在锚固体内, 固结波速确实会发生变化”.

2 实验研究

2.1 试件的制作

实验采用标号为 C30 水泥, 用水泥: 细砂 = 1: 1.5 的水泥砂浆作为锚固剂, 水灰比为 1: 0.5; 锚杆杆体为普通建筑圆钢或螺纹钢, 在外径 $\phi 75$ mm 的 PVC 管中浇筑全长锚固锚杆试件, 试件结构如图 2 所示, 各试件的参数见表 1, 为了安装传感器的方便, 在锚杆端头预留长度为 L_1 自由段, 且 $L_1 < L/10$.

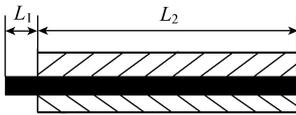


图 2 试件结构

Fig. 2 Sample structure

L_1 ——锚杆自由段长度; L_2 ——锚杆锚固段长度

表 1 各试件参数

Table 1 Samples parameters

试件编号	直径/mm	L_1 /cm	L_2 /cm	材质
No. 1	16	12	198	普通钢
No. 2	17	4	176	螺纹钢
No. 3	16	8	392	普通钢

2.2 全长锚固锚杆实验

运用四川实时信号研究所研制的 CS2092H 动态数据采集仪、中国工程物理研究所研制的加速度传感器和自制的弹射针式激发器, 采用如图 3 所示的测试系统, 在待测的锚杆外露端安设传感器, 通过弹射针式激发器, 对锚杆施加冲击载荷, 测得各个试件在不同养护时间的加速度响应曲线(图 4), 通过对实测信号进行时域分析, 确定全长锚固锚杆的底端反射时间 T_2 , 并由 $v_c = 2L_2 / (T_2 - 2L_1/v_1)$ 计算固结波速, 其中, v_1 为弹性应力波在锚杆杆体中的传播速度, $v_1 = 5\ 070$ m/s.

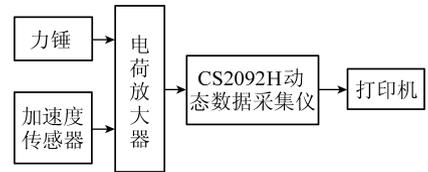


图 3 测试系统

Fig. 3 Testing system

2.3 实验结果分析

实验结果如图 5 所示. ① 由图 4, 5 分析可知, 试件浇筑初期, 加速度响应与自由杆基本相同, 波形整齐, 有规律, 锚固介质对杆体没有握裹力, 黏结强度较低, 固结波速为激发应力波在自由锚杆杆体中的传播速度, 随着养护时间的增加, 黏结强度逐渐提高, 加速度响应曲线中底端反射时间逐渐增加, 固结波速逐渐减少, 与理论分析一致. ② 当养护时间达到一定值(约 7 d)之后, 底端反射时间变化逐渐趋于平稳, 固结波速逐渐趋于应力波在锚固介质中的传播速度, 约为 3 010 m/s, 与用超声波测得的相同. ③ 当养护时间达到约 14 d 后, 底端反射时间开始减少, 固结波速逐渐增大, 但没有超过激发应力波在自由锚杆杆体中的传播速度, 约 23 d 后, 固结波速逐渐趋于定值, 不再发生变化, 与理论分析相一致.

3 结 论

锚杆锚固体中固结波速确实会发生变化, 其波动范围介于激发应力波在自由锚杆杆体中的传播速度与在锚固介质中的传播速度之间, 其值与锚杆、锚固介质及围岩的黏结强度有关. ① 养护初期(< 14 d), 随着养护时间的增加, 固结波速逐渐减小. 固结波速越小, 越接近激发应力波在锚固介质中的传播速度, 锚杆杆体与锚固介质间黏结强度越大, 锚杆的锚固质量越好. 反之, 固结波速越大, 越接近激发应力波在锚杆杆体中的传播速度, 锚杆杆体与锚固介质间黏结强度越小, 锚杆的锚固质量越差. ② 当养护时间达到一定值(约 14 d)后, 随着养护时间增加, 固结波速逐渐增大, 但数值变化不大, 并最终趋于定值. 固结

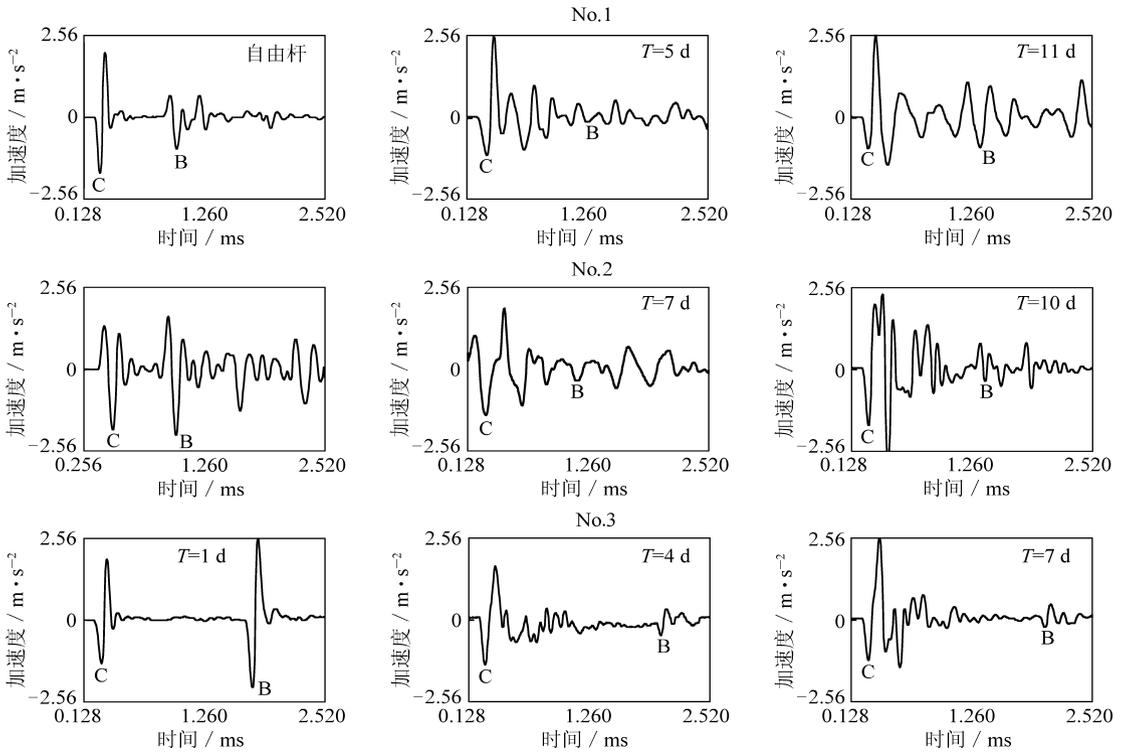


图 4 各试件在不同养护时间的测试曲线

Fig. 4 Testing curves of samples at different curing time

C——首波；B——底端反射；T——养护时间

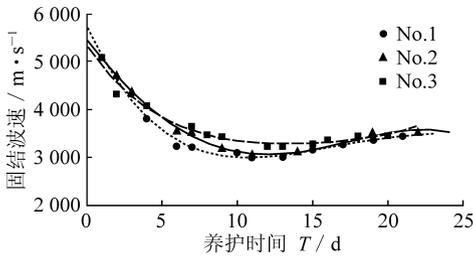


图 5 固结波速与养护时间的关系

Fig. 5 Relation curves between concretion wave speed and curing time

波速越大，锚杆杆体与锚固介质间黏结强度越大，锚杆的锚固质量越好。反之，固结波速越小，越接近激发应力波在锚固介质中的传播速度，锚杆杆体与锚固介质间黏结强度越小，锚杆的锚固质量越差。因此，在工程实践中，可以用固结波速作为衡量锚杆锚固质量的一个重要参数。由于现场锚固的锚杆同时承受着锚固介质和围岩的多重影响，锚杆的受力和振动非常复杂。本文虽然对固结波速与锚杆锚固质量的关系进行了理论分析和试验证明，但没有给出两者之间的定量关系。实现实时、无损检测锚杆的锚固质量，还需要做大量的工作。

参考文献：

[1] Tadolini S C. Evaluation of ultrasonic measurement system for bolt load determinations [R]. The US Bureau of Mines, Denver, CO, 1990.

[2] 王鹤龄. 无损检测锚杆锚固质量的现场实验研究 [J]. 水文地质与工程地质, 1998 (1): 56 ~ 58.

[3] 李 义, 王 成. 应力波反射法检测锚杆锚固质量实验研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (20): 160 ~ 164.

[4] 徐 明, 张永兴. 锚杆低应变动测的数值研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (9): 1 538 ~ 1 541.

[5] 李 义, 刘海峰, 王富春. 锚杆锚固状态参数无损检测及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (10): 1 741 ~ 1 744.

[6] 徐攸在. 桩的动测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 1 ~ 80.

[7] 周培基, Hopkin A K. 材料对强冲击荷载的动态响应 [M]. 张宝铎, 译. 北京: 科学出版社, 74 ~ 80.

[8] 刘海峰, 李 义. 锚杆锚固质量及工作状态动测技术研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2000.