

锚杆锚固体中的波系特征研究

张世平¹, 张昌锁¹, 王成², Steve Zou³

(1. 太原理工大学 矿业工程学院 太原 030024; 2. 北京理工大学 北京 100081; 3. 采矿工程系, Dalhousie 大学, 哈利法克斯, 加拿大)

摘要: 采用凝固过程中的混凝土模拟不同物理力学特性的锚固介质, 用数值模拟和试验的方法研究了锚固锚杆中的波系及锚固锚杆中界面波的形成过程。数值模拟和试验模拟都表明随着锚固介质力学性质的改变锚杆中传播的波的特性发生改变。锚杆中传播的 P 波对锚固介质的力学特性非常敏感, 随着锚固强度的增加, 界面波产生, P 波逐渐衰减消失。锚杆中传播的波由原来的 P 波占主导成为界面波占主导, 波在锚固段的传播速度也由杆速度成为界面波波速。界面波的波速与锚固介质的力学性质相关, 因此可以用界面波的波速来评价锚杆锚固质量以及计算锚杆锚固段长度。

关键词: 界面波; 锚固质量; 锚固体系

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Study on wave propagation characteristics of rock bolt grouted structure

ZHANG Shi-ping¹, ZHANG Chang-suo¹, WANG Cheng², ZOU Steve³

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 033024, China;

2. Beijing Institute of Technology China;

3. Department of Mining Engineering, Dalhousie University, Halifax, Canada;

Abstract: Numerical simulation and experimental testing are used to research the wave propagation characteristics and the forming procedure of interfacial wave in grouted rock bolt during embedded concrete curing. Both show the wave propagation characteristics will change with concrete curing. The P-wave in the grouted rock bolt is very sensitive to mechanical characteristics of embedded material, and with the increasing of concrete strength it will disappear. When the strength of concrete get harder interfacial wave will form and dominate; the velocity of interfacial wave is related to embedded material so it can be used to measure grouted quality of rock bolt as well as grouted length.

Key words: interfacial wave; grouted quality; grouted structure

1 前言

采用波测法检测锚杆锚固质量以及锚杆完整性得到了广泛的应用。一般的做法是在锚杆外露端输入一个 P 波, 该波在锚杆及锚固体中传播, 如果在锚固体中有缺陷或者假锚现象, 波将在这些部位发生反射, 同时有部分透射波继续在锚杆及锚固体中传播到达锚固锚杆的另一端发生反射。然后根据缺陷反射信号的时程及 P 波波速就可以确定该缺陷的位置, 同时根据底端反射的时程及 P 波波速来计算锚杆的锚固长度及评估锚杆的完整性。由于锚固质量越好则能量散射到锚固体中越多, 因此, 锚杆锚固质量可以根据底端反射的幅值大小确定。但是由

于在锚固锚杆中的波传播特性与自由锚杆中的波传播特性有很大的区别, 如果仍然采用自由锚杆中传播的 P 波波速来确定缺陷位置及锚杆长度就会产生非常大的误差。有关采用检测波导中的波传播特性来确定波导埋入介质的材料参数的相关技术在其他方面也有应用。由于扭转波波速随着液体的密度增加而减小, 因此, 可以采用确定浸入液体中非圆形波导中的波速来检测液体的密度^[1,2]。除了波速以外, 也可以采用波导中波的衰减来测试液体的黏性^[3]。除此以外, 采用检测波导中纵波衰减特性来确定黏性液体中的纵波波速的可能性也在文献[4]中进行了探索。最近在文献[5]中把这一技术应用于检测松散土介质的声学特征。但测试液体及松散介质

的力学参数与测试锚杆锚固质量还是有本质的区别, 由于埋入液体或者松散土介质中时波导中的波衰减要比埋入固体中时要小的多, 因而波导中的波仍然以 P 波为主。但当波导埋入固体介质中时波在其中的衰减非常大, 其波系也要发生改变。因此, 仍然采用 P 波参数估计锚固质量及锚杆的完整性就会产生非常大的误差。本文中采用凝固过程中的混凝土模拟不同物理力学特性的锚固介质, 用数值模拟和试验的方法研究锚杆中的波系。数值模拟与试验测试都表明, 当锚杆埋入处于凝固过程中的混凝土中时, 锚杆中的波系要发生变化。随着混凝土强度的增加, 锚杆与混凝土界面处产生界面波, 其衰减规律和速度与混凝土的力学参数相关, 因而有可能采用界面波来评价检测锚杆锚固质量及其完整性。有关弹性波在两个固体界面处传播问题的研究已经有数十年的历史。但所研究的问题限于两个固结非常好的半平面内传播的界面波或斯通利波。界面波和在半平面内传播的瑞利波不同, 如果半平面的热动力特性稳定则瑞利波永远存在。但界面波的存在与否依赖于两个连接半平面的弹性常数以及密度。当界面波确实存在时, 它的相速度称之为斯通利波波速。根据在两个固结各向同性半平面的斯通利波理论[6], 当两个半平面的力学特性确实允许这样的波存在时, 其波速大于两个半平面内传播的瑞利波速中的较小者。本文的目的就是利用混凝土在凝固过程中其力学参数不断变化的特性, 研究锚杆中的波传播特性随着锚固介质力学性质的改变而改变, 从而探讨锚杆锚固质量无损检测的有效手段。

2 试验模拟

2.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。试验中用数据处理与控制仪控制波形发生器产生所需要的频率、长度和幅度的激发波。为了减少输入波对响应波形的影响, 采用一个传感器发射信号, 另一个传感器接收信号。接收信号经过放大器后由接收器接收进入数据处理与控制仪进行分析处理。试验模拟时采用全长锚固的锚杆, 锚固剂与围岩用混凝土模拟。锚固试件几何尺寸见表 1 所示。

表 1 试件几何尺寸

Table 1 Dimension of the samples

试件		总长度/cm	半径/mm	锚固段长度/cm
1	锚杆	50	20	50
	混凝土	50	160	50
2	锚杆	120	20	50
	混凝土	50	160	50

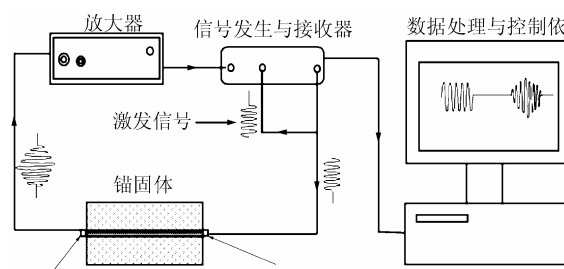


图 1 锚杆锚固质量检测实验室模拟装置

Fig.1 Experimental set-up for grouting quality test

2.2 试验结果分析

图 2~8 给出了随着混凝土龄期增加的实测波形图从图 2 可以看出, 在混凝土初凝期锚杆中有两个明显的波包。开始到达的波其波速约为 5 000 m/s, 首波过后在 0.24 ms 处波的频率减小, 但由于无法准确确定新波到达的具体位置, 其速度无法确定。但可以确定的是在 0.3 ms 处波的主振出现。

从图 3 可以看出, 锚杆中同样存在两个明显的波包。开始到达的波其波速为 5 000 m/s, 首波过后大约 0.2 ms 后新波的主振出现。对于首波来说, 从试件 1 及试件 2 的测试结果可以得到其传播速度都为 5 000 m/s, 非常接近自由杆中的波速, 由此可见, 它为锚杆中传播的 P 波。对于首波后出现的波称之为锚杆与混凝土界面处传播的界面波。在混凝土初凝期界面波和首波 P 波的振动幅度相当。但由于初凝期混凝土中波的衰减比较大, 而锚杆中的 P 波和界面波都没有明显地反射波。

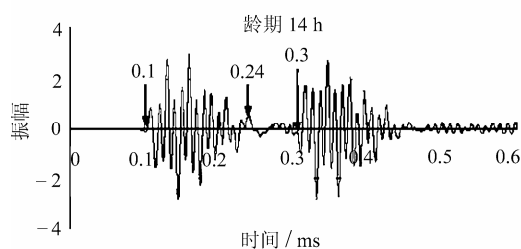


图 2 试件 1 混凝土初凝期锚杆中的波形

Fig.2 Waveform of sample 1 during beginning curing time of concrete

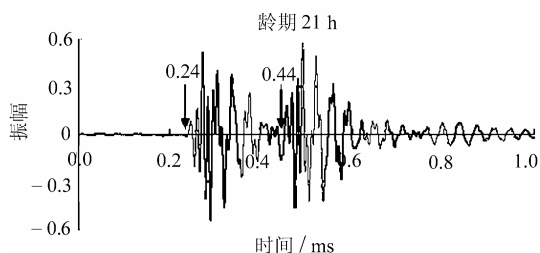


图 3 试件 2 混凝土初凝期锚杆中的波形

Fig.3 Waveform of sample 2 during beginning curing time of concrete

从图 4 可以看出, 原来可以明显分开的两个波包已经合在一起无法分开, 但首波到达的位置仍然可以确认, 而且其速度仍为 5 000 m/s。但这时 P 波的振幅已经大大减小, 小于首波过后的界面波波幅。在曲线上也看不到明显地反射信号。

从图 5 可以看出, 在原来首波到达的位置已经看不到波到达的迹象, 而且界面波波包基本上以峰值对称, 同时在 0.86 ms 处有一个不太明显地反射波信号。

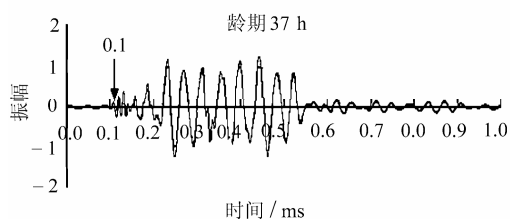


图 4 试件 1 混凝土中凝初期锚杆中的波形
Fig.4 Waveform of sample 1 during beginning of medium curing time

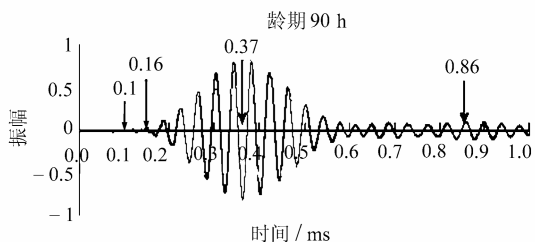


图 5 试件 1 混凝土中凝后期锚杆中的波形
Fig.5 Waveform of sample 1 during end of medium curing time

从图 6 可以看出, 在锚杆中 P 波的到达位置(0.1 ms)已经看不到首波到达的迹象, 但在 0.8 ms 处可以看到比较明显地反射信号。但由于混凝土中波的衰减较大, 反射波和到达波的幅值比很小。

从图 7 可以看到和图 6 相同的规律, 但反射波和到达波的幅值比变大。

从 28 d 龄期的完整波形图图 8 可以看到, 5 次明显地反射。而且各次反射峰值间的间隔相等为 0.4 ms。根据文献[11]所提供的瑞利波与剪切波的速度关系, 可以得到在钢以及完全凝固混凝土中的瑞利波速分别为 2 933 m/s 和 2 270 m/s, 钢及混凝土的材料参数见表 1。通过计算可以得到界面波的波速约为 2 500 m/s, 这一速度值与文献[6]的理论相吻合, 但它远远小于 P 波的速度, 如果仍采用 P 波速度定位缺陷位置就会带来很大的误差。从试验来看, 界面波的产生确实如文献[6]中所述, 它取决于锚杆

和锚固介质中间的力学参数, 并不是永远存在, 仅当锚固介质的强度达到一定程度才能在锚杆中产生界面波。

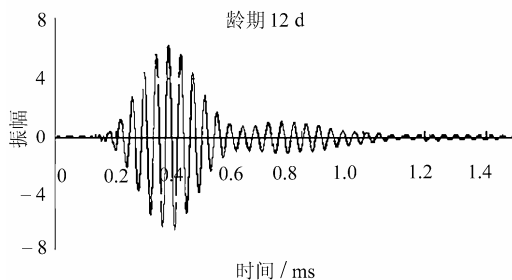


图 6 试件 1 混凝土终凝初期锚杆中的波形
Fig.6 Waveform of sample 1 during the beginning of end curing time

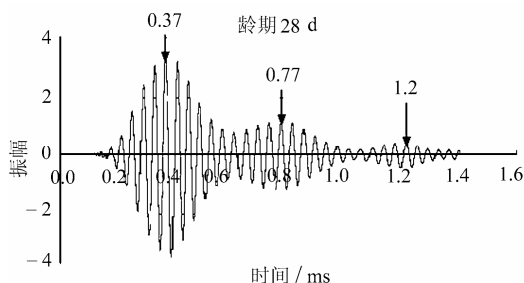


图 7 试件 1 混凝土终凝后期锚杆中的波形
Fig.7 Waveform of sample 1 during the end of end curing time

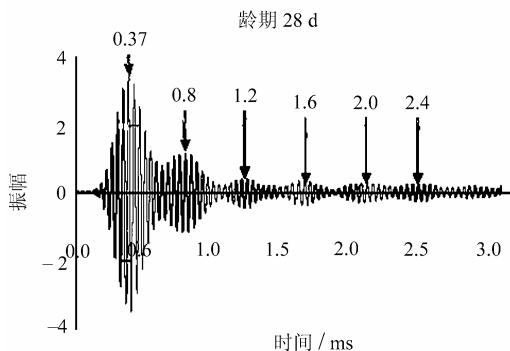


图 8 试件 1 混凝土终凝后期锚杆中的完整波形图
Fig.8 Whole waveform of sample 1 during the end of end curing time

3 数值模拟

目前, 在国内所研制使用的锚杆锚固质量无损检测仪中绝大多数是采用机械冲击激发的单脉冲波, 因此, 在本数值模拟中也采用这种方式建立数值模拟模型^[7-10]。由于单脉冲波在锚固结构中的衰减比较大, 反射波的信号比较小, 因此, 模拟结果取入射波直接到达锚杆另一端中心节点处的响应。虽然波的震动幅度与激发端不同, 但对锚固结构中

传播的波系特征是没有影响的。在锚固介质混凝土凝固过程中, 混凝土的弹性模量和泊松比随着其强度的增加而增加, 但由于泊松比的变化范围并不大, 因此, 该次数值模拟中并未改变凝固过程中混凝土的泊松比, 仅改变混凝土的弹性模量。锚杆与混凝土的材料参数见表 2。模拟中采用商用有限元软件 LS-dyna 进行了波动的数值模拟。模拟计算中根据混凝土弹性模量的不同分成 3 个阶段, 第 1 个阶段 $E = 2.5 \sim 10$ GPa, 第二个阶段 $E = 12.5 \sim 17.5$ GPa, 第 3 个阶段 $E = 12.5 \sim 17.5$ GPa。

表 2 数值模拟中的材料参数
Table 2 Material parameters in the model

材料	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比
锚杆	7.8	210	0.3
混凝土	2.4	2.5-37.9	0.2

数值模拟结果显示, 当混凝土的弹性模量增加到一定程度时, 在锚杆中产生界面波。在第 1 阶段(图 9), 锚杆中仅有 P 波的传播, P 波对锚固介质强度的变化非常敏感。随着混凝土强度的增加, P 波很快衰减; 进入第 2 阶段以后界面波形成(图 10), 界面波的幅度和 P 波幅度基本相当, 这时界面波叠加在 P 波上, 但界面波的波长较大, 波速远小于 P 波波速; 在第 3 阶段(图 11), P 波由于波的衰减基本消失, 在锚杆中传播的波以界面波为主, 界面波对锚固介质强度的变化并不十分敏感, 锚固介质混凝土强度的增加并不会增加界面波的衰减, 而且界面波的传播速度会随着混凝土弹性模量的增加而增加。

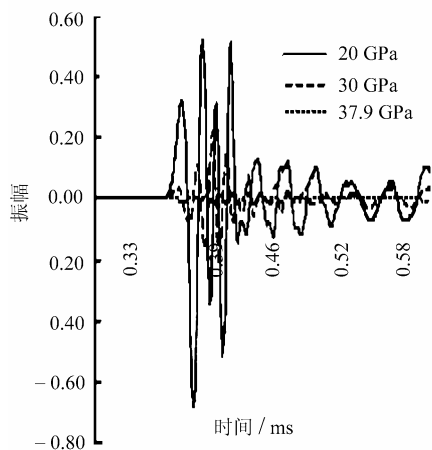


图 9 锚固介质第 1 凝固阶段锚杆中的模拟波形
Fig.9 Simulation waveform during the first stage of curing time

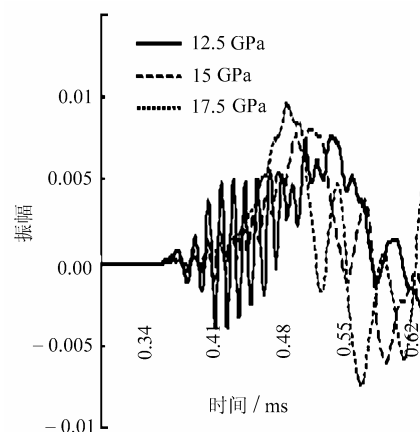


图 10 锚固介质第 2 凝固阶段锚杆中的模拟波形
Fig.10 Simulation waveform during the second stage of curing time

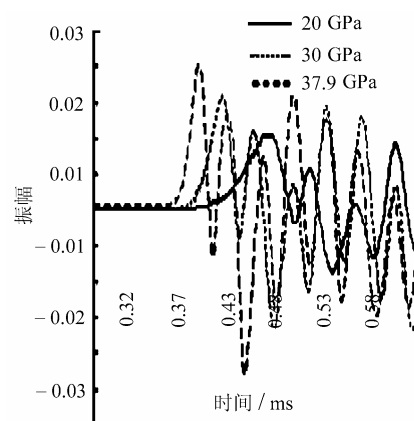


图 11 锚固介质第 3 凝固阶段锚杆中的模拟波形
Fig.11 Simulation waveform during the third stage of curing time

4 结 论

尽管试验中采用的激发波和数值模拟中的激发波频率、周期数都不同, 但从结果的分析来看, 定性上来说是完全一致的。无论是单脉冲低频(5 kHz)还是多个周期数的较高频率(25 kHz)的激发波, 在锚固锚杆结构中传播的波系中存在 P 波模式和界面波模式。在混凝土凝固初期, P 波占主导, 随着锚固介质强度、弹性模量的增加 P 波衰减消失, 界面波产生。在混凝土凝固后期, 界面波占主导。因此, 在锚杆锚固质量测试中, 测试所得到的是锚杆中传播的界面波而不是 P 波。在定位缺陷位置及表征锚固质量时也应采用界面波参数。

参 考 文 献

- [1] J. O. Kim and H. H. Bau, On line, real-time densimeter – Theory and optimisation[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1989,85: 432–439.