

## 波纹管孔道密实性的超声波对测法评估\*

黎碧波<sup>1</sup>, 徐向锋<sup>2</sup>, 曹原<sup>3</sup>, 刘冠之<sup>4</sup>(1.陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710000; 2.山东交通学院, 山东 济南 250023;  
3.山东省路桥集团, 山东 济南 250021; 4.山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 建立超声波在砼中传递的有限元计算模型, 开展不同波纹管密实度、不同砼板厚的首波声时研究; 建立全空、1/4 密实、1/2 密实、3/4 密实、完全密实 5 种不同密实度试验模型, 开展超声波对测法的测试评估, 验证有限元计算结果的有效性, 标定空洞估算模型参数。结果表明, 有限元计算结果和试验结果具有较好的一致性, 可采用数值模拟方法拟合得到首波声时的传播规律, 使用超声波对测法可有效检测孔道压浆密实度。

**关键词:** 桥梁; 波纹管; 压浆密实性; 超声波对测法

**中图分类号:** U446.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)05-0124-03

波纹管孔道的压浆密实度测试方法主要有有损检测和无损检测两种, 无损检测可避免对原结构的损伤。波纹管孔道密实性检测可分为无损探伤、无损检测、无损评价 3 个阶段, 主要方法有回弹法、冲击回波法、探地雷达法。以往研究局限于对密实性的定性评估, 难以保证评估结果的准确性。该文在已有研究的基础上, 通过数值模拟分析不同板厚的首波声时规律, 依托模型试验提出孔道压浆密实度的超声波对测法。

## 1 测试原理

超声波的传递服从机械波的一般规律, 传播速度主要与传递介质的属性有关, 其波长表达式为:

$$\lambda = cT = c/f \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $c$  为波速;  $T$  为周期;  $f$  为频率。

超声波在不同介质中的传播方式因介质的不同而改变, 固体内部以纵波、横波和其他形式的波传递, 在液体介质中仅以纵波方式传递。超声波在不同介质中的分界面会产生反射和折射现象, 在固体表面以表面波的形式传递。

## 2 超声波传递数值模拟

利用 ABAQUS 软件建立声波在砼内部传播的计算模型, 定义钢筋、砼材料参数(见表 1), 考虑钢筋、砼和垫块的本构关系。

数值模拟的力学问题为高速冲击荷载的动力学

表 1 材料的特性参数

参数名称	参数值
砼抗压强度 $f_c/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$2.4 \times 10^7$
砼抗拉强度 $f_t/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$2.4 \times 10^6$
钢筋弹性模量 $E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$1.9 \times 10^{11}$
钢筋屈服强度 $f_y/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$2.1 \times 10^8$
垫块弹性模量 $E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$2.1 \times 10^{12}$
泊松比 $\mu$	0.3

事件, 信号发射处的冲击荷载  $F$  为:

$$F(t) = F_{\max} \sin(\pi t/t_c) \quad (2)$$

式中:  $t_c$  为冲击荷载持续时间。

令  $F_{\max} = 1 \text{ N}$ , 将冲击荷载分为 100 步,  $t_c$  取  $50 \mu\text{s}$  以提高计算精度。内部弹性波波速  $v_p = \sqrt{E(1-\mu)/[\rho(1+\mu)(1-2\mu)]} = 3\,997 \text{ m/s}$ , 表面纵向弹性波波速  $v_d = \sqrt{E/\rho} = 3\,797 \text{ m/s}$ 。冲击荷载和振幅的关系见图 1。

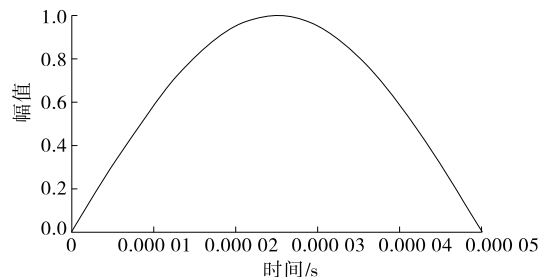


图 1 冲击荷载和振幅的关系

数值模拟结果会受单元网格大小的影响, 尺寸

\* 基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(J15LG02)

过大或过小均会导致计算结果失真,为保证计算精度,建立单元长度为 0.005 m 的有限元模型(见图 2)。模型厚度为 18 cm,砼内部预留波纹管孔道,在波纹管的正上和正下方分别设置击振点和共炮点。

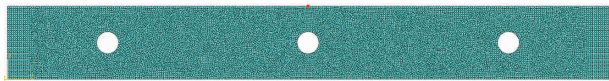


图 2 有限元计算模型

图 3 为不同时刻超声波在砼内部传播的动态波场。由图 3 可得不同时刻声波在砼内部的传递规律:12.3  $\mu\text{s}$  时刻,声波抵达波纹管孔道,开始进行反射、绕射;31.3  $\mu\text{s}$  时刻,反射波到达砼顶板;45.8  $\mu\text{s}$  时刻,绕射达到砼底板;116.0  $\mu\text{s}$  时刻,底板反射波到达顶板。

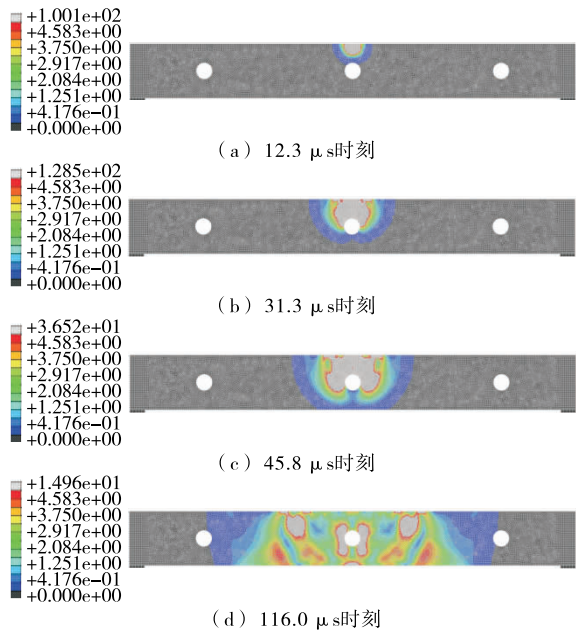


图 3 不同时刻超声波在砼内部传播的动态波场

建立不同密实程度的分析模型,孔洞情况分为全空、1/4 密实、1/2 密实、3/4 密实、完全密实 5 个等级,同时对比不同板厚(18、25、30、35、40、45、50、55 cm)情况下的声波传递,计算得到模型的时域曲线(见图 4),整理得到首波声时值(见表 2),进而得到首波声时值除以与对应厚度完全密实情况下首波声时的  $t_{\text{测}}/t_{\text{密}}-1$  规律(见表 3)。最后通过线形拟合得到首波声时传播特点:

$$t_{\text{测}}/t_{\text{密}}-1=(0.001H-0.054\ 1)q+(-0.001\ 1H+0.063\ 2) \quad (3)$$

式中: $t_{\text{测}}$  为测试首波声时; $t_{\text{密}}$  为完全密实时首波声时; $H$  为构件厚度(cm); $q$  为波纹管压浆密实度。

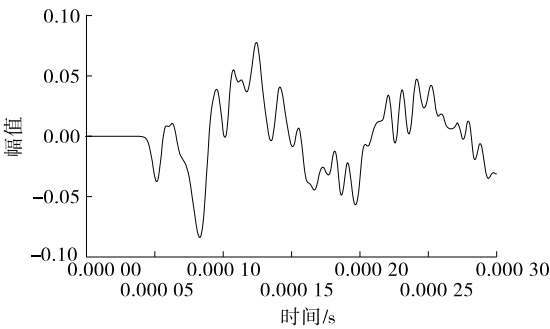


图 4 18 cm 板厚模型时域记录(全空)

表 2 有限元模型首波声时计算结果

密实度	不同板厚(cm)下首波声时值/ $\mu\text{s}$							
	18	25	30	35	40	45	50	55
0.00	52.1	69.8	82.7	93.7	109.3	120.9	134.1	144.8
0.25	52.0	69.7	82.6	93.7	109.1	120.9	134.0	144.7
0.50	51.8	69.5	81.0	93.6	108.5	120.8	134.0	144.7
0.75	51.5	68.7	80.9	93.5	108.0	120.7	133.9	144.7
1.00	50.1	67.6	80.5	91.9	107.9	120.0	133.3	143.9

表 3 各模型  $t_{\text{测}}/t_{\text{密}}-1$  参数

密实度	不同板厚(cm)下 $t_{\text{测}}/t_{\text{密}}-1$ 参数							
	18	25	30	35	40	45	50	55
0.00	0.040	0.033	0.027	0.020	0.013	0.008	0.007	0.007
0.25	0.038	0.031	0.026	0.018	0.011	0.008	0.006	0.006
0.50	0.034	0.028	0.006	0.014	0.006	0.007	0.006	0.006
0.75	0.028	0.016	0.005	0.013	0.001	0.006	0.005	0.006
1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: $t_{\text{测}}$  为各点通过 Aabqus 模拟所得数据; $t_{\text{密}}$  为对应板厚全空所测数据。

3 试验检测

建立不同波纹管密实程度试验模型,验证超声波对测法的有效性。砼构件厚度为 40 cm,横向均匀布置 3 根波纹管(见图 5、图 6),每根依次由全空、1/4 密实、1/2 密实、3/4 密实、完全密实 5 种密实程度构成(见图 7)。不同密实程度试验波纹管在灌浆后水平放置(见图 8),保证分区界面水平。

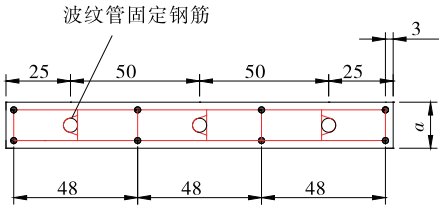


图 5 模型构件横截面(单位:cm)

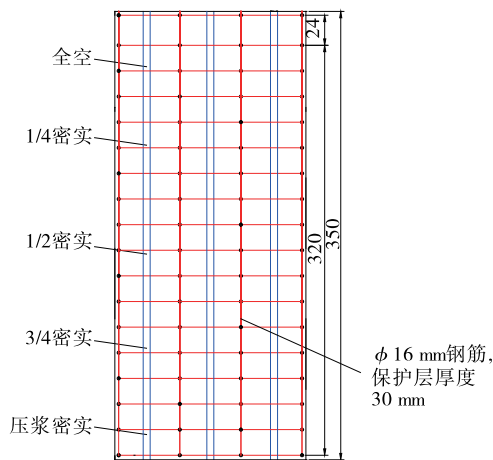


图6 模型构件俯视图(单位:cm)



图7 不同密实程度的波纹管



图8 试验波纹管的养护

在每个压浆等级的波纹管布设 11 个测点检测声时值,并通过修正消除电子信号延迟的影响,结果见表 4。

结合前文有限元计算方法进行对比分析,结果见图 9。可见,有限元计算结果和试验结果具有较好的一致性,误差在 10% 以内。

根据测试结果标定空洞估算模型参数,得到理论结果和测试结果的关系(见图 10)。可见,两者吻合较好,表明使用超声波对测法可有效检测波纹管孔道压浆密实度。

#### 4 结语

孔道压浆密实度的定量评估是波纹管应用中的研究重点和难点。该文开展波纹管孔道压浆密实度

表4 各测点的声时值

测点编号	不同密实程度试验波纹管的声时值/ $\mu\text{s}$				
	密实	3/4 密实	1/2 密实	1/4 密实	全空
1	97.6	97.2	99.6	102.0	99.6
2	98.4	98.0	99.6	104.0	98.4
3	97.6	98.8	100.4	102.4	100.8
4	96.8	98.0	99.6	101.6	102.4
5	97.6	98.8	99.6	102.8	104.8
6	97.2	98.4	100.4	103.2	104.0
7	97.6	98.8	100.8	101.2	105.2
8	97.2	98.4	101.2	100.8	104.4
9	98.0	98.0	100.0	100.8	105.2
10	97.6	99.6	99.2	100.0	102.8
11	97.6	100.0	100.0	100.4	102.8
平均值	97.56	98.55	100.04	101.74	102.76
修正值	91.56	92.44	94.12	6.88	98.72

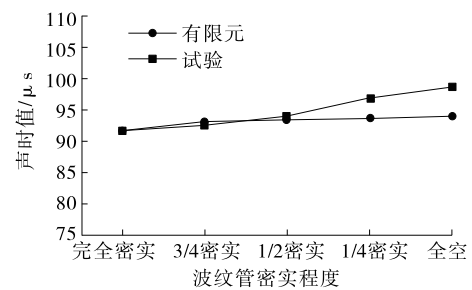


图9 有限元计算结果与试验结果对比

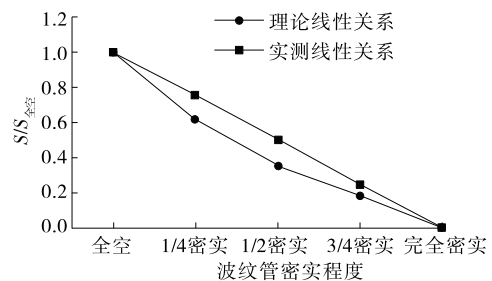


图10 理论与实测数据对比

的数值模拟和模型试验,进行超声波对测法用于波纹管孔道压浆密实度测试验证。通过数值模拟拟合得到了首波声时的传播规律,通过试验研究验证了有限元计算结果的有效性,标定了空洞估算模型参数,理论结果和测试结果吻合较好,表明使用超声波对测法可有效检测波纹管孔道压浆密实度。

#### 参考文献:

- [1] 张鹏飞.实桥孔道压浆调查和力筋性能分析及其对桥梁结构的影响[D].南京:东南大学,2007.

(下转第 129 页)

曲线分析得出。

### 3 低应变法的局限性

#### 3.1 缺陷的定量

通过低应变时域曲线的幅值大小判定缺陷程度建立在试验桩的密度和波速为定值的前提下,考虑的是截面的变化导致波阻抗变化。在实际检测中,受桩自身缺陷及地质条件的影响,对于缺陷的定量分析往往较难实现。

#### 3.2 缺陷类型的区分

低应变法时域曲线分析中依据反射波和入射波的相位关系判定缺陷类型,而断桩、夹泥、缩径和空洞等情况的时域曲线基本一致,很难根据曲线判断这几类缺陷。

#### 3.3 利用波速推算桩身强度

低应变法求出的波速是整桩的平均波速,平均波速与实际波速的吻合性主要取决于设计桩长和桩底反射时间,不能单纯依据波速与砼强度的正比关系确定桩身强度,还应结合工程范围内相当一部分测试桩的平均波速来辅助估算砼的强度。

#### 3.4 桩底沉渣厚度的判断

桩底与嵌岩的交界面会产生较强的与入射波相位相反的反射波,该反射波将干扰桩底反射波及是否沉渣的判断。因此,低应变法无法定量判断桩底沉渣厚度。

#### 3.5 单桩承载力的判断

低应变法只能定性判断基桩的完整性,无法确定单桩的承载力大小。单桩承载力大小与桩自身强度、桩周土性质、持力层等因素有关。

### 4 结语

低应变法检测基桩完整性的主要特点在于检测效率高、操作简单,可满足快速普查的需要,虽然在适用范围上存在一定局限性,但仍然是目前基桩完整性检测的最常用方法之一。

对于基桩质量的准确评定需结合多种试验方法,对于波形较复杂的情况,应结合钻孔取芯结果综合判定,以免造成桩质量错误评定。另外,低应变法波形数据需工程技术人员结合设计和地质资料综合判断,对工程经验有较高要求。

#### 参考文献:

- [1] JTG/T F81-01-2004,公路工程基桩动测技术规程[S].
- [2] JGJ 106-2014,建筑基桩检测技术规范[S].
- [3] 柯宅邦,刘东甲.低应变反射波法测桩的轴对称问题数值计算[J].岩土工程学报,2006,28(12).
- [4] 马建,孟新秋,刘丽.大直径长桩低应变检测若干问题探讨[J].土工基础,2017,31(5).
- [5] 刘润,嵯瑞花,闫澍旺,等.动力打桩一维波动方程的改进及其工程应用[J].岩土力学,2004,25(增刊).
- [6] 张丽琴,王家映,严德天.一维波动方程波阻抗反演的同伦方法[J].地球物理学报,2004,47(6).
- [7] 范留明.非均匀层状介质一维波动方程精确解的有限差分算法[J].岩土力学,2013,34(9).
- [8] 王颖,史旭光.欧拉-拉格朗日方程在一维波动方程中的应用[J].物理与工程,2017,27(6).

收稿日期:2018-04-12

\*\*\*\*\*  
(上接第126页)

- [2] 徐向锋.孔道压浆性能试验及施工质量的研究[D].南京:东南大学,2005.
- [3] 冯小伟.孔道压浆材料试验及技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [4] 姜灏,刘海卿.回弹法对在役钢筋混凝土结构的健康检测[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(增刊).
- [5] 王磊,张建仁,张克波.回弹法和钻芯法检测劣化桥梁混凝土强度相关性研究[J].中外公路,2010,30(2).
- [6] Odile Abraham, Phillippe Cote. Impact-echo thickness frequency profiles for detection of voids in tendon ducts [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(3).
- [7] C Colla. Improving the accuracy of impact-echo in testing post-tensioning ducts [J]. Review of Quantitative

Nondestructive Evaluation, 2003(22).

- [8] R Muldoon, A Chalker, M C Forde, et al. Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact echo SIBIE and tomography [J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(3).
- [9] 齐广志. PC箱梁桥竖向预应力张拉力与压浆密实性无损检测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [10] 季文洪, 杨超. 国外预应力孔道压浆质量检测实践: 多阵列探地雷达法 [J]. 世界桥梁, 2008(2).
- [11] 徐义标, 张峰, 曹原, 等. 波纹管孔道压浆密实度定量检测的试验研究 [J]. 中外公路, 2015, 35(3).

收稿日期:2018-02-10