

## 预应力孔道注浆脱黏缺陷的冲击回波响应特征

方志<sup>1,2†</sup>, 蒋国俊<sup>1</sup>, 卢江波<sup>3</sup>

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;  
3.湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008)

**摘要:**为区分预应力孔道因注浆体收缩导致的界面脱黏和因注浆欠密实导致的脱空两种缺陷的冲击回波响应特征,分别通过波纹管内壁界面剂的使用、浆体中膨胀剂的存在、注浆后试件的养护方式3个控制条件制取不同界面脱黏状态试件,采用波纹管内壁预埋泡沫板的方式形成注浆脱空缺陷.对4组注浆密实试件与1组注浆脱空试件的冲击回波响应进行了连续5天测试.测试结果表明:对于注浆密实试件,注浆后前2天的频谱特征与无空洞实心试件类似,第2天后因注浆体收缩导致的界面脱黏现象开始萌生,并导致试件的厚度主频显著降低及频谱结果趋于复杂,据此可较易分辨脱黏发生与否;对于注浆体中有预置空洞但界面无脱黏试件,虽然其厚度主频一直较密实无脱黏试件的低,但随注浆龄期的发展规律与后者相似,且每一测试时刻二者的频率比基本维持在0.85不变.注浆饱满试件发生脱黏后,其厚度主频发展曲线逐渐降低并与预置空洞试件的相交,此时,相互间的厚度主频相近.因此,仅凭某一时刻厚度主频的单次冲击回波测试结果难以分辨注浆空洞和界面脱黏两种缺陷,而通过注浆后4天左右的连续测试,基于厚度主频和频谱的变化规律则可较易分辨.

**关键词:**预应力孔道;注浆缺陷;脱黏缺陷;脱空缺陷;冲击回波法;厚度主频;频谱特征  
**中图分类号:**U448.35 **文献标志码:**A

## Impact-echo Response Characteristics of Grouting Defects with Interface Debonding in Prestressed Concrete Ducts

FANG Zhi<sup>1,2†</sup>, JIANG Guojun<sup>1</sup>, LU Jiangbo<sup>3</sup>

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;

3.Hunan Provincial Communications Planning, Surveying and Designing Institute, Changsha 410008, China)

**Abstract:**In order to identify the impact echo response characteristics of two kinds of void-existed defects induced by the interface debonding between the grouting medium and duct's inner surface due to the shrinkage of grouting material and initial void in grouting medium within the duct of post-tensioned concrete members, four grouted specimens with different interface debonding state were fabricated by using interfacial bonding agent, expansive agent and curing ways after grouting, and another specimen with void defect in grouting medium was formed by presetting a foam in the duct. The spectrum response was continuously measured by impact echo system within five days after grouting. The results show that the spectrum within first 2 days after grouting of well grouted speci-

\* 收稿日期:2018-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278182), National Natural Science Foundation of China(51278182)

作者简介:方志(1963—),男,湖北黄冈人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail:fangzhi@hnu.edu.cn

mens without any preset void in the grouting medium were almost identical and similar to that of solid specimens without duct, and obvious interface debonding in specimens without expanding agent in the grouting material was observed, resulting in the lower thickness frequency and more complicated spectrum at the third and following days after grouting, which can be considered the principle to ascertain the occurrence of interface debonding for specimens with well grouted duct. In the specimen with a preset void in the grouting medium but without any interface debonding, although its thickness frequency was always lower than that of well grouted specimens without interface debonding, its spectrum form was very similar to that of the latter and its thickness frequency ratio almost kept unchanged as about 0.85. The thickness frequency development curves with the grouting age between the specimens with a preset void and interface debonding intersected, and both had the same frequency at about the third day, which indicates that the two different defects of interface debonding and existing void cannot be identified uniquely only by the thickness frequency at some moment. To distinguish these two defects mentioned previously through the response characteristics and the development curves of thickness frequency during about 4 days after grouting is necessary.

**Key words:** prestressed concrete duct; grouting defects; interface-debonded defect; void-existed defect; impact-echo method; thickness main frequency; spectrum features

后张有黏结预应力混凝土结构孔道注浆质量的检测与评定,一直是国内外土木工作界迫切需要解决但又尚未很好解决的重点问题。目前,已尝试的相关无损检测方法主要有:冲击回波法、超声波法、射线照相检测法和探地雷达法等<sup>[1]</sup>。相较于其它方法,冲击回波法具有可单面测试且快速简便的特点而被认为更具应用前景<sup>[2]</sup>。其原理可简述为:冲击结构表面产生往返于结构内部的应力回波,其携带有测点内部的阻抗信息,通过对回波信号的处理与分析,即可实现对该区域缺陷信息的判读<sup>[3-6]</sup>。

通常,采用快速傅里叶变换即可得到回波信号的频谱特征,幅值谱中对应一阶频峰的频率值即为该测点的厚度主频值,测点内部的状态信息能在信号的频谱结果及主频偏移程度中得到反映<sup>[7]</sup>。国内外诸多学者针对冲击回波法识别预应力孔道注浆缺陷的适用性开展了大量的探索:Andary采用冲击回波法对预应力混凝土板的孔道注浆质量进行了研究,发现波纹管内浆体与孔道黏结状态是导致冲击回波法难以识别注浆质量的主要原因之一<sup>[8]</sup>;Daniel等通过冲击回波法获得预应力孔道位置处的厚度主频值以评估孔道注浆质量,亦发现界面脱黏现象的存在,导致多处密实注浆位置处的主频测试值明显偏低<sup>[9]</sup>;Carino和Sansalone的研究指出,浆体与波纹管黏结失效而产生的脱黏空气层,破坏了介质的阻抗连续性,导致注浆饱满位置处回波信号的频谱结果与注浆空洞的相近<sup>[10]</sup>。《冲击回波法检测混凝土

缺陷技术规程》(JGJ/T 411-2017)(以下简称规程)亦指出:当预应力孔道注浆黏结缺陷时,目前的测试水平难以判定孔道内部的注浆质量<sup>[11]</sup>。

可见,采用冲击回波法进行预应力孔道注浆缺陷检测时,由于界面脱黏与注浆空洞有着相似的频谱反应,导致两类注浆缺陷的检测结果极易误判,而实际上,注浆空洞对结构性能的不利影响要严重得多。因此,若能明确界面脱黏和注浆脱空两种缺陷下的冲击回波响应特征,对实际工程中孔道内注浆缺陷类型的准确判断以及冲击回波法的可靠应用极具意义。而目前国内外对注浆脱黏、脱空两种缺陷的回波信号响应特征,特别是随注浆龄期的变化、界面脱黏导致的冲击响应特征如何演变,未见相关文献报道。

基于此,本文采用冲击回波法测试了注浆脱黏、注浆脱空和注浆饱满等多个不同注浆状态试件的冲击回波响应随注浆龄期的变化规律,以期获得孔道脱黏和脱空两种不同注浆缺陷回波信号响应的不同特征,从而为冲击回波法的可靠应用提供依据。

## 1 试验方案

通过波纹管内壁界面剂的使用、浆体中膨胀剂的存在和注浆后试件的养护条件等方式控制界面的脱黏状态;采用波纹管内壁预埋泡沫板的方式形

成注浆脱空缺陷.通过冲击回波法对 5 个预应力孔道注浆缺陷试件的频谱响应进行注浆后的连续测试,以期获得注浆脱黏和脱空缺陷下冲击回波效应随注浆龄期变化的不同特征,并据此对冲击回波法识别孔道注浆脱黏和脱空缺陷的可行性进行评价.

1.1 试件设计

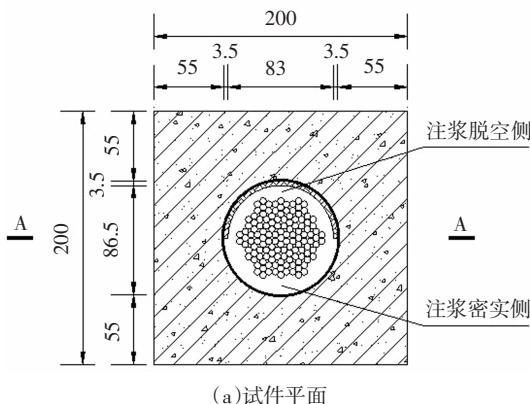
试件设计参考某 30 m 跨预应力混凝土箱梁桥的尺寸与预应力布置.该桥箱梁高为 1.6 m,顶、底板厚度均为 200 mm,预应力管道采用内径为 90 mm 的金属波纹管成孔,单孔管道内置 16 束预应力钢绞线.

依据规程关于冲击回波法测试时边界影响区域的建议<sup>[1]</sup>;测区外缘距构件侧表面的最小距离不宜小于预估最大测深.故试件设计为边长 200 mm 的立方体,预应力孔道采用内径 90 mm、长为 200 mm 的平直金属波纹管,管道内置 16 根直径为 15.2 mm 的钢绞线,管道轴线与试件的中心线重合并与钢绞线的轴线方向平行.亦即试件在箱梁顶、底板厚度方向尺寸取实际板厚 200 mm,单个孔道尺寸及其内的预应力筋布置也与实际工程一致,但在箱梁顶、底板横向和长度方向在满足测试要求的前提下也仅取为 200 mm.

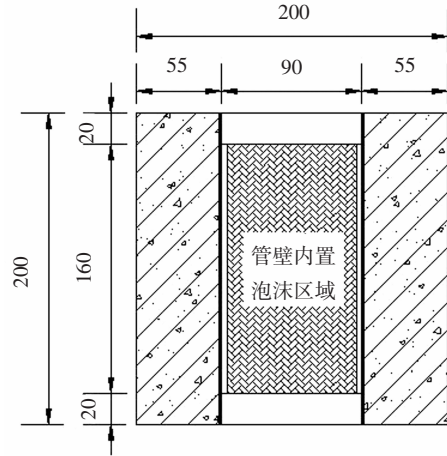
脱黏试件全孔道密实注浆;注浆脱空试件灌浆前在孔道预置长 160 mm、厚 3.5 mm 的半环形泡沫板以形成注浆空洞,缺陷位置和大小见图 1.试验共制作了 6 个 C40 混凝土立方体试件,其中 1 个无孔实心试件,1 个注浆孔洞试件,4 个界面黏结状态试件.试件混凝土的配合比见表 1,实测 28 d 立方体抗压强度为 45.1 MPa.注浆后的试件见图 2.

表 1 混凝土配合比

Tab.1 Mixture of concrete specimens				kg·m <sup>-3</sup>
水	水泥	砂	碎石	减水剂
144	448	621	1 106	2.688



(a)试件平面



(b)A-A 剖面

图 1 注浆空洞缺陷布置图(单位:mm)

Fig.1 Defect location of void-exist specimens(units: mm)

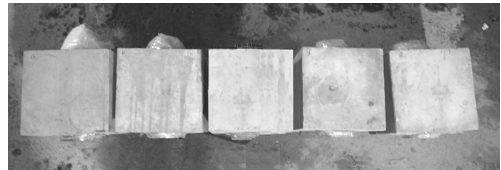


图 2 5 个孔道注浆试件

Fig.2 Five grouted specimens

脱黏试件界面不同黏结状态,系通过波纹管内壁界面剂的使用、浆体中膨胀剂的添加以及注浆后试件的养护条件等方式予以实现.合适的膨胀剂掺量能维持浆体终凝阶段的自由膨胀率,补偿浆体自收缩,实现浆体硬化后的体积稳定<sup>[2]</sup>;界面剂在灌浆前涂抹于波纹管内壁,其主要组分为环氧树脂黏结增强剂,能有效保证浆体与波纹管内壁的化学黏结,降低界面脱黏发生的可能;注浆后试件的密封养护能大幅减少浆体的失水干缩<sup>[2]</sup>.

试件的注浆料为商品预拌注浆干料,其主要组分为普通硅酸盐水泥、粉煤灰、矿渣、硅灰、聚羧酸减水剂等.灌浆时取 0.27 的水胶比(质量比)即可配制强度等级为 C50 的浆体.膨胀剂为硫铝酸钙型混凝土膨胀剂,掺量为注浆干料用量的 2%,获得的浆体 24 h 自由膨胀率为 2.27%.注浆料配比见表 2,实测 28 d 抗压强度为 53.4 MPa.

表 2 注浆料配合比

Tab.2 Mixture of cement paste						kg·m <sup>-3</sup>
组别	预拌注浆干料	水	膨胀剂	减水剂	3 h 自由膨胀率/%	24 h 自由膨胀率/%
含膨胀剂	1 572	366	30.5	9	1.81	2.27
无膨胀剂	1 597	372	0	9	-0.62	-0.95

波纹管内壁处理分是否涂抹界面剂 2 种,采用的界面剂为环氧砂浆黏结型增强剂;注浆后试件的养护条件分别为敞开养护和密封养护 2 种,后者采用薄膜封闭试件注浆孔实现.5 个注浆试件的参数设置见表 3.表 3 中试件编号中的 S 和 K 分别代表注浆密实和注浆脱空;随后的数字 2 和 0 分别代表浆体中膨胀剂掺量百分比;M 和 C 分别代表密封与敞开养护;J 和 N 则分别代表波纹管内壁有无涂抹界面剂.

表 3 试件参数设置

Tab.3 Parameters of specimens

试件编号	注浆状态	膨胀剂掺量/%	养护方式	界面剂使用	希望的界面状态
S2MJ	密实	2	密封	是	无脱黏
S2MN	密实	2	密封	否	局部脱黏
S0MN	密实	0	密封	否	明显脱黏
S0CN	密实	0	敞开	否	明显脱黏
K2MJ	脱空	2	密封	是	无脱黏

## 1.2 测试方案

带孔试件养护 28 d 后注浆,于注浆前对各试件进行一次测试,注浆后 5 d 内对每个试件进行连续测试.试件的测点布置见图 3,位于试件测试面的中心.测点距试件侧面距离  $x$  均接近 100 mm,孔道与注浆体界面及注浆空洞等被测区域的埋深  $h$  为 55~100 mm,则  $x/h = 1 \sim 1.8$ ,满足规程建议的不小于 1 的要求<sup>[11]</sup>.

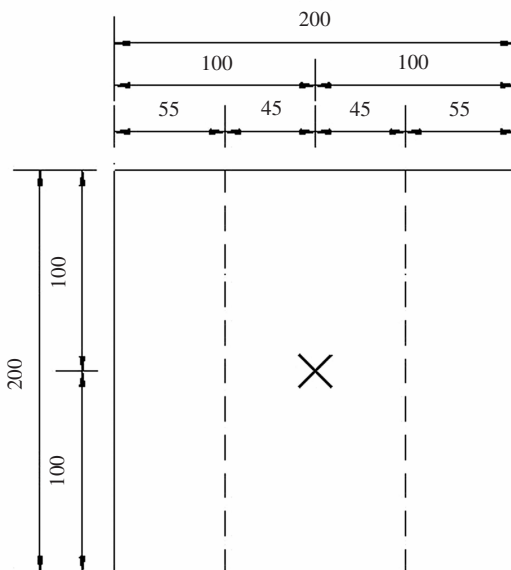


图 3 测点布置示意(单位:mm)

Fig.3 Location of measurement points(units: mm)

注:图中虚线为波纹管的侧边界,标记“x”的地方为测点

每次测试时,均对试件进行连续 10 次以上的重复性测试,并依据规程中规定的测试结果有效性筛选条件,剔除无效的测试结果;基于信号响应的分析结果,剔除离散程度较大的数据后,取测试结果的中值作为该次的测试结果<sup>[11]</sup>.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 实心试件测试结果

实心试件 28 d 龄期的测试频谱如图 4 所示,存在 4 个频率峰值,分别为 9 180 Hz、13 086 Hz、14 746 Hz 和 17 871 Hz,对应立方体试件的前 4 阶共振模态.第 2~第 4 阶频率与第 1 阶频率的比值分别为 1.43、1.61 和 1.95,与 Hsiao 的测试结果 1.42、1.61 和 1.83 接近<sup>[13]</sup>.

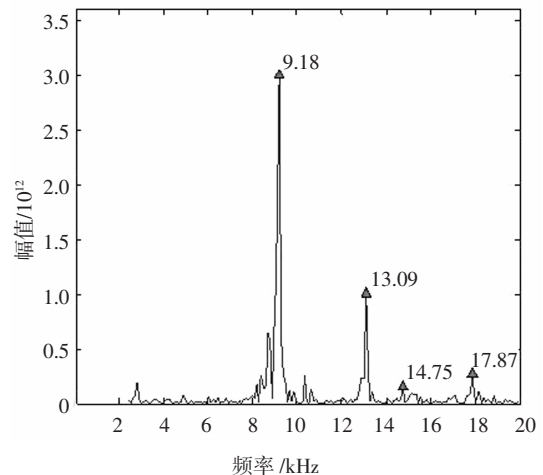


图 4 实心试件频谱

Fig.4 Spectrum of solid specimen

根据无缺陷无限大混凝土平板弹性回波的理论解,压缩波波速、板厚与厚度频率间的关系如式(1)所示<sup>[10]</sup>:

$$f_H = \frac{C_p}{2H} \quad (1)$$

式中: $f_H$ 为平板的厚度频率; $C_p$ 为混凝土板的压缩波波速; $H$ 为混凝土板的板厚.

对于有限尺寸的试件,计入结构有限边界效应对回波厚度频率影响后的厚度频率如式(2)所示<sup>[14-15]</sup>.

$$f_H = \frac{\beta C_p}{2H} \quad (2)$$

式中: $\beta$ 为构件的形状系数,其余参数的意义同式(1).

试验中所有试件均为边长 0.2 m 的混凝土立方



体,对应方形截面的形状系数 $\beta$ 为 0.863<sup>[10]</sup>.代入式(2)并根据厚度基频实测值 9 180 Hz,即可得出混凝土实心试件的压缩波波速为 4 255 m/s.

## 2.2 注浆前试件的测试结果

注浆前对预留有孔道的试件进行冲击回波测试,5 个试件的频谱结果几近一致,均如图 5 所示.测试结果表明:当预应力孔道未注浆时,冲击回波测试的频谱结果清晰简明,且因试件中孔洞的存在,使得厚度主频向低频明显偏移.5 个试件的主频峰值为 4 297~4 492 Hz,是实心试件的 47%~49%.

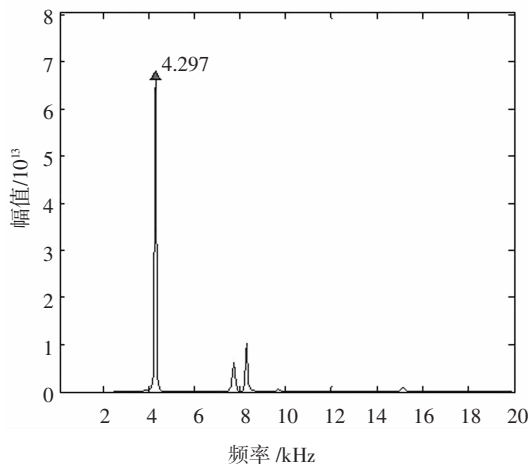


图 5 注浆前试件的频谱结果

Fig.5 Spectrum of specimen before grouting

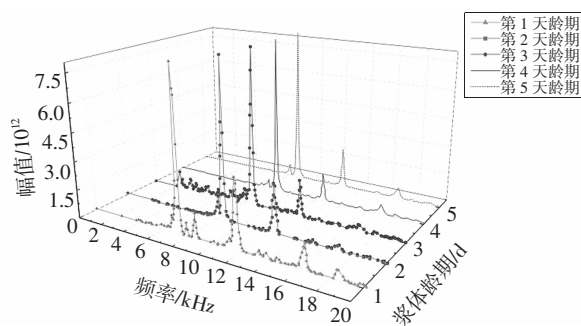
## 2.3 注浆后各试件的测试结果

### 2.3.1 试件 S2MJ 测试结果

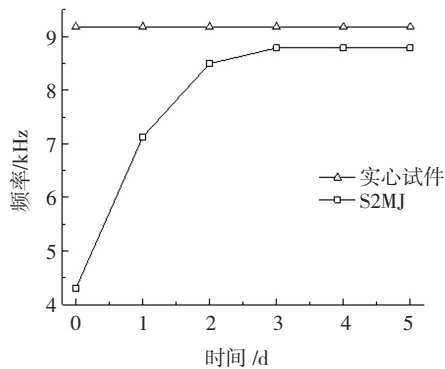
试件 S2MJ 为密实注浆试件,注浆料中添加了 2%的膨胀剂,波纹管内壁均匀涂抹界面剂,注浆后试件于密封状态下养护,意在形成无脱黏发生的界面.试验后的检测结果也表明,除孔洞两端附近的有限区域外,界面基本无脱黏发生.

对其厚度主频进行了连续 5 d 的测试,结果如图 6 所示.可见,连续 5 d 的频谱测试结果均清晰可辨,且均与图 4 所示的实心试件的频谱相近.可推断试件 S2MJ 孔道内浆体与波纹管的黏结控制达到预期设定,浆体充实饱满无界面脱黏缺陷.

随注浆龄期的发展,浆体强度不断提高,试件的厚度主频不断增大至第 3 d 趋于稳定.注浆后的前 3 d 内,主频分别提高至实心试件厚度主频的 77.66%、92.55%和 95.74%.随后基本保持在第 3 d 的 8 789 Hz 不变.但因此时浆体强度仍未达到设计强度,与实心试件相比,试件的厚度主频峰值仍向低频偏移了 4.26%.



(a)不同注浆龄期时试件 S2MJ 的频谱结果



(b)主频随龄期的发展曲线

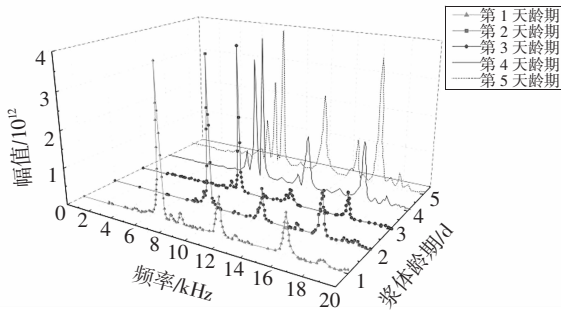
图 6 不同浆体龄期的试件 S2MJ 测试结果

Fig.6 Test results of S2MJ in different grouting age

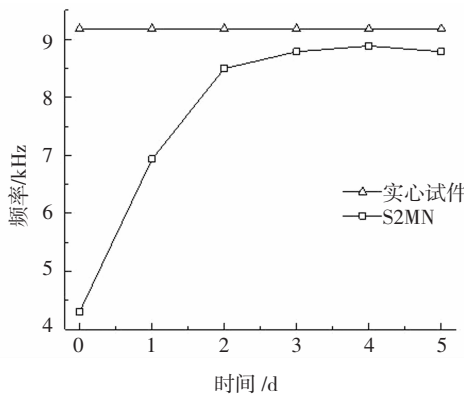
### 2.3.2 试件 S2MN 测试结果

试件 S2MN 为密实注浆试件,注浆料中添加了 2%的膨胀剂,注浆后试件于密封状态下养护,但注浆前波纹管内壁未涂界面剂,意在检验界面剂的脱黏阻止作用.试验后的检测结果表明,界面上存在局部脱黏.

对其厚度主频进行了连续 5 d 的测试,结果如图 7 所示.注浆后的前 3 d 内,试件的厚度主频分别提高至实心试件主频的 75.53%、92.55%和 95.74%,主频和频谱与试件 S2MJ 相近.注浆后第 4 d 开始,频率发展趋于稳定,试件的厚度主频达到峰值 8 887 Hz,与实心试件的厚度主频相比,峰值向低频偏移了 3.19%,第 5 d 又回落至 8 789 Hz.但与试件 S2MJ 频谱不同的是,第 4 d 开始,S2MN 的频谱趋于复杂,出现明显的高频振动,而使用界面剂试件 S2MJ 的频谱结果则无此回波响应特征.由此可推断:虽然孔道内浆体充实饱满无缺陷,但浆体与波纹管内壁间的结合面开始出现局部缺陷而产生较明显的界面效应,并由此对弹性应力波的传播存在扰动,试件的高阶振动响应被激发,且主频峰值亦回落约 1%,孔道内壁均匀涂抹界面剂则能削弱此效应.因此,孔道内壁均匀涂抹界面剂能一定程度改善界面的脱黏情况.



(a)不同注浆龄期时试件 S2MN 的频谱结果



(b)主频随龄期的发展曲线

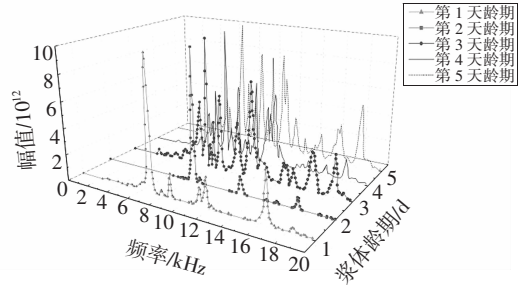
图7 不同浆体龄期的试件 S2MN 测试结果

Fig.7 Test results of S2MN in different grouting age

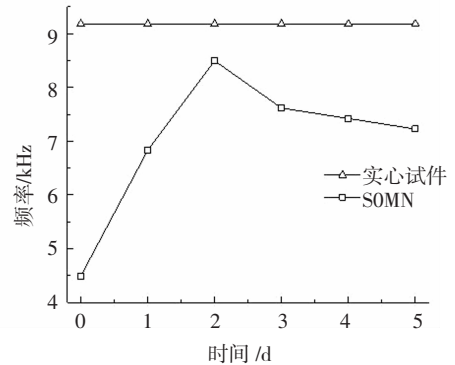
### 2.3.3 试件 SOMN 测试结果

试件 SOMN 为密实注浆试件,未使用膨胀剂和界面剂,注浆后试件于密封状态下养护,意在界面形成较明显的脱黏并验证养护条件的影响.试验后的检测结果也表明,因未使用膨胀剂,浆体收缩明显,界面上存在明显脱黏.

对其厚度主频进行了连续 5 d 的测试,结果如图 8 所示.可见,注浆后前 2 d 内,主频和频谱与试件 S2MJ 和 S2MN 的相近,试件的厚度主频分别提高至实心试件主频的 74.47%和 92.55%,并在第 2 d 时达到峰值 8 496 Hz,与实心试件的厚度主频相比,峰值向低频偏移了 7.45%.此后连续 3 d 测试结果均发现试件的厚度主频逐级下降,分别下降至第 2 d 主频峰值的 89.65%、87.36%和 85.06%,且频谱趋于复杂,更多的高频振动被激发.可以推断:注浆 2 d 后,浆体开始出现明显收缩,导致波纹管内壁与浆体间发生脱黏而出现空气层,使试件的厚度主频向低频偏移并同时激发试件的高阶振动.因此,浆体中的膨胀剂能有效补偿浆体收缩,合适的膨胀剂掺量能避免注浆脱黏缺陷的发生.



(a)不同注浆龄期时试件 SOMN 的频谱结果



(b)主频随龄期的发展曲线

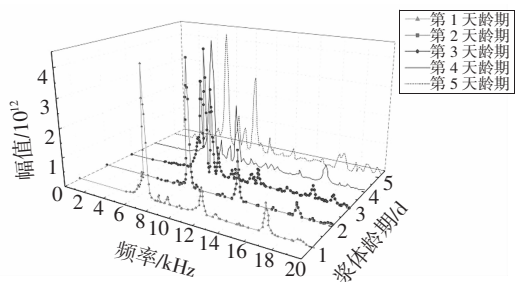
图8 不同浆体龄期的试件 SOMN 测试结果

Fig.8 Test results of SOMN in different grouting age

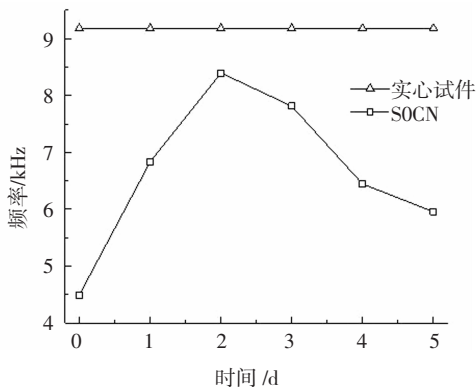
### 2.3.4 试件 SOCN 测试结果

试件 SOCN 为密实注浆试件,未使用膨胀剂和界面剂且注浆后在敞开状态下养护,意在界面形成较明显的脱黏.试验后的检测结果表明,因浆体收缩和敞开养护,导致界面上存在最为明显的脱黏.

对其厚度主频进行了连续 5 d 测试,结果如图 9 所示.可见,注浆后前 2 d 内,试件的厚度主频分别提高至实心试件主频的 74.47%和 91.48%,第 2 d 达到主频峰值 8 398 Hz,与实心试件的厚度主频相比,峰值向低频偏移了 8.52%.此后连续 3 d 的测试结果发现试件的厚度主频逐渐下降,分别为第 2 d 主频峰值的 93.03%、76.74%和 70.93%,厚度主频的响应特征与试件 SOMN 相近,但第 4、5 两天试件的厚度主频衰减程度较试件 SOMN 大.从而推断:敞开养护下浆体的水分蒸发严重,收缩更加显著,加速了浆体与波纹管壁之间脱黏缺陷的发展,试件的厚度主频衰减幅度增大.



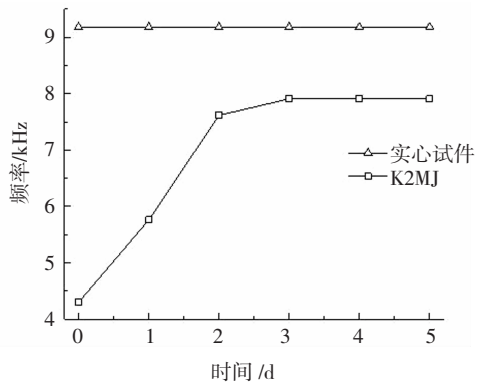
(a)不同注浆龄期时试件 SOCN 的频谱结果



(b) 主频随龄期的发展曲线

图 9 不同浆体龄期的试件 SOCN 测试结果

Fig.9 Test results of SOCN in different grouting age



(b) 主频随龄期的发展曲线

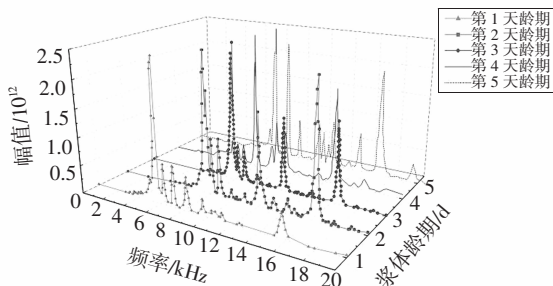
图 10 不同浆体龄期的试件 K2MJ 测试结果

Fig.10 Test results of K2MJ in different grouting age

### 2.3.5 试件 K2MJ 测试结果

试件 K2MJ 为注浆脱空试件,除设置有脱空缺陷外,其它处理均与 S2MJ 相同.注浆料中添加了 2% 的膨胀剂,波纹管内壁均匀涂抹界面剂,注浆后密封状态下养护,意在脱空区域外形成无脱黏发生的界面.试验后的检测结果表明,除设置有脱空缺陷外,界面基本无脱黏发生.

对其进行了连续 5 d 的测试,结果如图 10 所示.可见,随注浆龄期的发展,浆体强度不断提高,试件的厚度主频不断增大至第 3 d 趋于稳定.注浆后的前 3 d 内,主频分别提高至实心试件厚度主频的 62.77%、82.97% 和 86.17%,是试件 S2MJ 厚度主频的 80.82%、89.65% 和 90.00%.稳定阶段试件的厚度主频峰值基本维持在 7 910 Hz.与实心试件的频谱结果相比,由于空洞的存在,试件的主频峰值向低频偏移了 13.83%,且频谱更趋复杂,高频效应明显.注浆后连续 5 d 测试的频谱结果虽然较复杂,但与试件 S2MJ 类似,每天的频谱响应特征相近,频谱较稳定且各阶主频附近频峰清晰可辨.可以推断:孔道内浆体与波纹管界面黏结完好,未出现脱黏,仅因注浆空洞的存在导致厚度主频始终低于注浆密实试件.



(a) 不同注浆龄期时试件 K2MJ 的频谱结果

### 2.4 结果比较

图 11 列出了 5 个注浆试件的厚度主频随龄期的发展规律,结合前文中对多个试件的回波信号频谱特征的分析,可以得知:

1) 无预置空洞试件的频谱特征.对于注浆体中无预置空洞的 4 个试件 S2MJ、S2MN、S0MN 和 SOCN,不管膨胀剂和界面剂使用与否以及是否密闭养护,注浆后前 2 d 的厚度主频均随注浆龄期的增长而提高,主频量值及频谱特征均相近,频谱简洁、清晰且与实心试件类似.随后,根据试件中有无膨胀剂的存在,亦或明显的收缩脱黏发生与否,试件的频谱存在明显区别.掺有膨胀剂试件 S2MJ 和 S2MN,二者的厚度主频变化相近且基本稳定,采用界面剂试件 S2MJ 的频谱依然基本保持不变,可推断界面无脱黏发生;而没有使用界面剂 S2MN 的频谱第 4 d 开始有所改变,高频响应更加明显,可推断有轻微的脱黏出现.未掺膨胀剂试件 S0MN 和 SOCN 的厚度主频显著降低且敞开养护试件 SOCN 第 3 d 后降低幅度更大,频谱产生明显变化,变得复杂、凌乱且高频效应明显.表明注浆体的明显收缩和界面脱黏在注浆 2 d 后才开始发生,并导致厚度主频的显著降低及频谱的复杂、凌乱.因此,从厚度主频及频谱特征随注浆龄期的变化,可明显判断界面脱黏的发生与否.

2) 有预置空洞试件的频谱特征.对于注浆体中有预置空洞试件 K2MJ,虽然由于预置空洞的存在,其厚度主频一直较试件 S2MJ 和 S2MN 的低,频谱亦趋复杂,高频响应与脱黏试件一样趋于明显.但其随注浆龄期的发展规律与后者相似,均随注浆龄期的发展,试件的厚度主频不断增大至第 3 d 趋于稳定,且每一测试时刻与试件 S2MJ 和 S2MN 的频率



比基本保持不变,维持在 81%~90%;频谱虽然较为复杂,但在整个测试期内,与试件 S2MJ 类似,幅值谱相近、主频值稳定且各阶主频附近频峰清晰可辨.在第 3 d 左右,预置空洞试件 K2MJ 的厚度主频发展曲线与脱黏试件 SOMN 和 SOCN 的相交,频值相近,此时仅凭厚度主频无法分辨注浆空洞和界面脱黏两种缺陷.

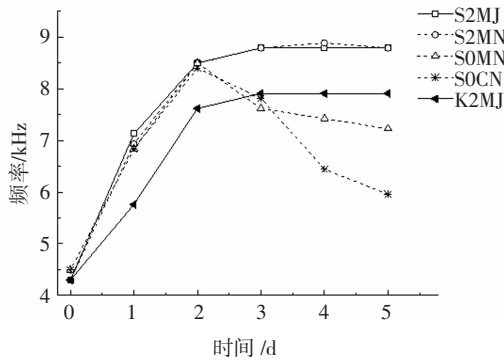


图 11 不同注浆缺陷试件厚度主频经时变化比较  
Fig.11 Frequency comparison of specimens

将注浆后 28 d 试件波纹管外围的混凝土剥离,剩下波纹管及其内注浆体,再将其两端切去一部分以观察内部注浆状态,将处理后的带波纹管注浆体放入水中浸泡 24 h 后再剥离波纹管,以观察波纹管与注浆体界面的脱黏状态.5 个试件端部剖切后状态及浸水实验后注浆体的水渍分布结果如图 12 所示.可以看到,图 12(a)中各试件波纹管内的注浆体均密实饱满,钢绞线被浆体充分包裹,无肉眼可见缺陷.根据图 12(b)所示 5 个试件的注浆体浸水实验结果,虽然各试件的注浆体表面均见水渍,但水渍的面积差别显著,试件 S2MJ、S2MN、SOMN、SOCN 和 K2MJ 界面上的水渍面积占比分别为 8.6%、29.3%、67.1%、89.4%和 18.7%.掺有膨胀剂试件 S2MJ、S2MN 和 K2MJ 除两端 10~25 mm 范围外,其余位置均未见水渍分布.而试件两端存在的水渍分布,应该是由端部附近的黏结状态在机械剖切波纹管和注浆体时遭到破坏所致.表明浆体与波纹管黏结良好,界面无脱黏缺陷存在,界面状态达到了预期要求.

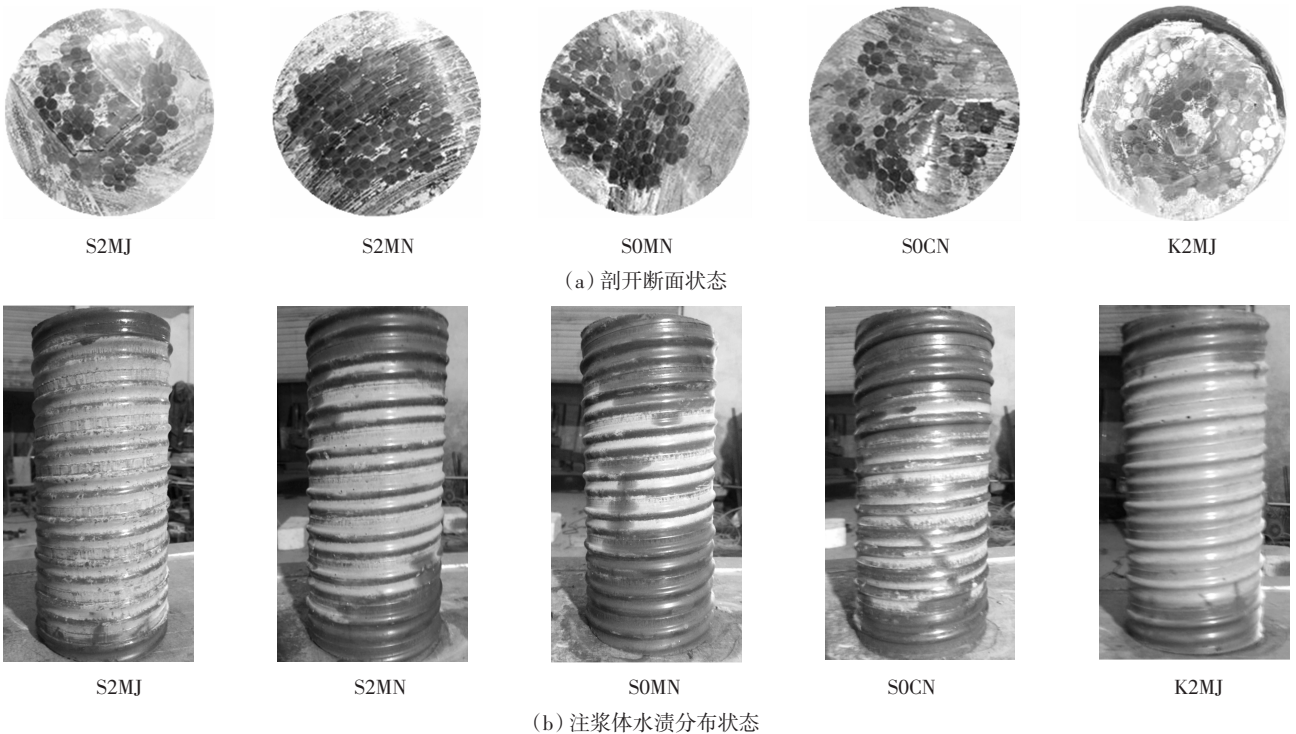


图 12 注浆状态  
Fig.12 Grouting state

### 3 结论

基于 5 个不同预应力孔道注浆状态试件在不同注浆龄期冲击回波响应特征测试结果的比较分

析,可得出如下结论:

1)对于注浆体中无预置空洞的试件,注浆后前 2 天的频谱与无空洞的实心试件类似.浆体收缩导致的界面脱黏在注浆后 2 天后才开始发生,并导致



厚度主频的显著降低及频谱趋于复杂、凌乱,据此可较易分辨脱黏发生与否.浆体中膨胀剂的使用可有效防止界面脱黏的发生,界面黏结剂对脱黏的防止亦有所作用.

2)对于注浆体中有预置空洞但界面无脱黏的试件,虽然其厚度主频一直较密实无脱黏试件的低,但其随注浆龄期的发展规律与后者相似,且每一测试时刻二者的频率比基本维持在 85%左右;频谱虽然较复杂,但整过测试期内的频谱响应特征相近.脱黏发生后,脱黏试件的厚度主频发展曲线逐渐降低并与预置空洞试件的相交,此时,相互间的厚度主频相近.因此,仅凭某一时刻厚度主频的单次测试结果难以分辨注浆空洞和界面脱黏两种缺陷,而通过注浆后 4 天左右的连续测试,基于厚度主频和频谱的变化规律则可较易分辨两种缺陷.

## 参考文献

- [1] BREYSSE D. Non-destructive assessment of concrete structures: reliability and limits of single and combined techniques: state-of-the-art report of the rilem technical committee 207-INR[M]. New York: Springer Netherlands, 2012: 17—117.
- [2] 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: 山东大学土建与水利学院, 2015: 6—14, 26—58.  
 QI G Z. The research on the ndt testing technology of the vertical prestress tension and the grouting compactness of the PC box girder bridge[D]. Jinan: School of Civil Engineering, Shandong University, 2015: 6—14, 26—58. (In Chinese)
- [3] 龚建清, 邓国旗, 单波. 活性粉末混凝土高温后超声研究及微观分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 68—76.  
 GONG J Q, DENG G Q, SHAN B. Ultrasonic test and microscopic concrete exposed to analysis of reactive powder high temperature[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(1): 68—76. (In Chinese)
- [4] 王智丰, 周先雁, 晏班夫, 等. 冲击回波法检测预应力束孔管道压浆质量[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 166—169.  
 WANG Z F, ZHOU X Y, YAN B F, *et al.* Grout quality testing in prestressed ducts with impact-echo method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 166—169. (In Chinese)
- [5] JAEGER B J, SANSALONE M J, POSTON R W. Detecting voids in grouted tendon ducts of post-tensioned concrete structures using the impact-echo method [J]. *Aci Structural Journal*, 1996, 93(4): 462—473.
- [6] JAEGER B J, SANSALONE M J, POSTON R W. Using impact-echo to assess tendon ducts[J]. *Concrete International*, 1997, 19(2): 42—46.
- [7] ZOU C, CHEN Z, PING D, *et al.* Experimental and numerical studies on nondestructive evaluation of grout quality in tendon ducts using impact-echo method [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 21(2): 1—9.
- [8] ANDARY E G. Evaluating nondestructive testing techniques to detect voids in bonded post-tensioned ducts [R]. Gainesville: University of Florida, 2003: 1—113.
- [9] ALGERNON D, HILTUNEN D R, FERRARO C C. Tendon duct assessment using impact-echo and ultrasonic pulse-echo in combination with an automated scanning system [C]// *Proceedings of the Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*. Phoenix Arizona: ASCE, 2016: 67—76.
- [10] CARINO N J, SANSALONE M. Detection of voids in grouted ducts using the impact-echo method[J]. *Aci Materials Journal*, 1992, 89(3): 296—303.
- [11] JGJ/T 411—2017 冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 33—36.  
 JGJ/T 411—2017 Technical specification for testing of concrete defects by impact echo method [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 33—36. (In Chinese)
- [12] 黄政宇, 钱峰. DSP 早强高强灌浆料综合性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(8): 18—22.  
 HUANG Z Y, QIAN F. Research on the comprehensive properties of early-strength and high-strength grouting materials based on DSP principle[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2009, 36(8): 18—22. (In Chinese)
- [13] HSHIAO C, CHENG C C, LIOU T, *et al.* Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method[J]. *Ndt & E International*, 2008, 41(2): 98—107.
- [14] 卢江波, 方志. 基于冲击回波厚度频率的预应力孔道注浆状态分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 239—244.  
 LU J B, FANG Z. Analysis of tendon grouting state based on impact-echo thickness frequency[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(3): 239—244. (In Chinese)
- [15] 周先雁, 王智丰, 晏班夫. 预应力管道压浆质量无损检测方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 64—71.  
 ZHOU X Y, WANG Z F, YAN B F. Nondestructive testing method of grouting quality for prestressed pipe [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(6): 64—71. (In Chinese)
- [16] SANSALONE M. Impact-echo: the complete story[J]. *Aci Structural Journal*, 1997, 94(6): 777—786.