

孔道灌浆稳压不足非线性超声检测试验研究

唐 诚¹, 樊海林², 刘剑锋³

(1. 中国铁建港航局集团有限公司, 广东 广州 519070;

2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 预应力混凝土结构应用广泛,但施工过程常存在预应力钢筋锈蚀、孔道压浆压力不足等问题。为探索预应力混凝土结构灌浆微小缺陷检测更高效的方法,针对预应力混凝土结构,运用非线性超声检测法检测了因灌浆稳压期压力不足带来的微小缺陷,并将经典的线性超声波法作为对比试验,试验表明:线性超声参数波速与孔道中的微小缺陷的相关性不大,非线性参数针对稳压时间不足所导致的预应力混凝土孔道灌浆微小缺陷变化更敏感,非线性超声检测孔道灌浆稳压不足造成的缺陷效率更好,精确度更高。

关键词: 非线性超声法;非线性系数;稳压不足;孔道灌浆

中图分类号: TU378

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)03—0169—07

Experimental Research on Nonlinear Ultrasonic Testing of Insufficient Voltage Stabilization of Grouting in Hole

TANG Cheng¹, FAN Hailin², LIU Jianfeng³

(1. CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 519070, China;

2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Prestressed concrete structures are widely used, but there are often problems such as corrosion of prestressed steel bars and insufficient grouting pressure in the construction process. In order to try a more efficient method for the detection of small defects in grouting of prestressed concrete structures, for prestressed concrete structures, the nonlinear ultrasonic testing method was used to detect the small defects caused by insufficient pressure during the grouting period, and the classical linear ultrasonic method was used as the test method. The comparison test shows that the linear ultrasonic parameter wave velocity has little correlation with the micro-defects in the channel, the nonlinear parameter is more sensitive to the change of micro-defects in the prestressed concrete channel grouting caused by the lack of voltage stabilization time, and the nonlinear ultrasonic detection of the channel grouting stability defects caused by insufficient pressure are more efficient and more accurate.

Keywords: non-linear ultrasonic method; non-linear coefficient; insufficient voltage stabilization; hole grouting

灌浆是工程加固施工常用技术,相关研究持续不断,近来裴晓龙等^[1]通过数值模拟探讨了在裂隙岩体中的压水灌浆规律。赵卫全等^[2]研究了松散回填层以及厚淤泥层地基灌浆加固技术。针对灌浆后结构缺陷的检测方法众多,其中超声波法是无损

检测有效方法之一。超声波法包括线性超声波法和非线性超声波法。利用线性超声法对混凝土缺陷和损伤进行识别时主要是依据包括衰减系数、振幅、波速在内的线性参数的不同程度的变化规律,对应的无损检测方法应用普遍的是超声波法,检测稳定准

确,但通常情况下较大缺陷的线性参数较无缺陷时的数值变化明显^[3]。而非线性超声法在对混凝土缺陷和微损伤进行识别时则主要依据的是超声波在入射到混凝土后产生的各种非线性超声现象^[4],此现象主要包括高阶谐波、声共振频率飘移和混频调幅下的旁频等。Kim 等^[5]发现超声波频域中二阶幅值与非线性系数 β 有关。Punnose 等^[6]证明微裂纹能引发高阶谐波现象。陈军等^[7]评价受压状态下混凝土损伤与非线性系数关系,且采用非线性冲击得到的共振声谱计算非线性系数。Korneev 等^[8]系统研究了非线性超声波混频现象,总结出纵波和横波交互情况下谐振出非线性声波幅值表达式。

目前已被很多研究学者证实非线性超声法在检测材料的微小缺陷方面的灵敏程度比常规线性超声法更高,更容易识别。目前,关于非线性超声法检测孔道灌浆缺陷的相关研究较少,故本文针对孔道灌浆稳压不足造成的缺陷,进行非线性超声检测试验。

1 非线性超声测试原理

基于非线性超声的测试方法主要有三种:双频谱分析法、振动调制法和有限幅度法^[9]。

1.1 双频谱分析法

双频谱分析法基于波束混叠现象识别缺陷,当两个不同频率的波在无缺陷的介质中相遇时,不会发生相互作用,按照各自的频率进行传播,其幅度的变化符合线性叠加原理;当传播介质存在缺陷时,两列波相遇后就会发生相互作用,且振幅变化不符合线性叠加原理^[10]。同时在频域中出现不同频率波,新波的频率通常为两列入射波频率的组合^[11]。因此观察是否有新频率的出现以及新频率波的振幅分布情况来进行缺陷识别和定量分析。图 1 为双频谱分析法的测试装置图。

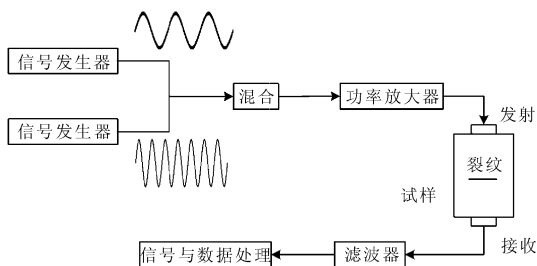


图 1 双频谱分析法试验装置图

1.2 振动调制法

振动调制法基于波束混叠现象进行缺陷识别,但在两个不同频率的超声波选取中不一样^[12]。振

动调制法通过外界给试样施加振动或冲击,产生的低频应力波代替双频谱分析法中的一个低频超声波。此方法所产生应力波频率较低,且对于发射和接收换能器的布置要求不高,可用于复杂结构和较远距离的检测。在测试中通过新频率波和对应振幅分量是否存在来进行缺陷识别和分析^[13]。图 2 为采用振动调制法对板状结构进行缺陷检测的试验装置图^[14]。

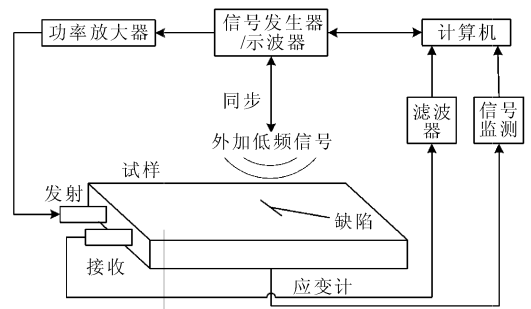


图 2 振动调制法试验装置图

1.3 有限幅度法

有限幅度法也称为高阶谐波法,该方法是通过高能量入射单一频率的大振幅超声波,使波在材料传播中与缺陷互相作用产生波形畸变,形成高次谐波^[15]。对接收到的信号进行频谱分析得出基波和高次谐波的幅值,得到非线性系数用以评价材料的微小缺陷^[16]。图 3 为有限幅度法的测试原理示意图。非线性系数表达式如下:

$$\beta = \frac{8A_1}{xA_0^2k^2} \quad (1)$$

其中: A_0 、 A_1 分别表示一次和二次谐波振幅; k 是波束。

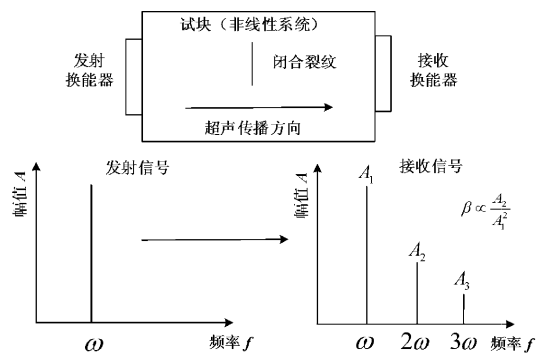


图 3 有限幅度法原理图

本文基于非线性超声中的有限幅度法,检测因孔道灌浆稳压不足造成的微缺陷,以经典线性超声波法的试验结果作为对比,以探讨非线性超声系数

对灌浆微缺陷变化的高灵敏性。

2 孔道灌浆的非线性超声试验研究

2.1 测试方案

针对稳压时间不同状况造成的孔道灌浆微缺陷的检测,非线性超声法检测系统由信号发生器 DG1022U、功率放大器 ATA-2042、超声换能器以及示波器 TBS1072B 四部分组成;作为对比试验的线性超声波法测试选取型号为 NM-4A 的非金属超声检测分析仪,主要包括主机核心部件、超声换能器、电缆。其中耦合剂采用医用凡士林,被加在超声探头与混凝土检测面之间。在进行测试之前,需要对所测试位置进行清洁和打磨,使其尽量光滑平整,使试验环境排除其他干扰。

(1) 测线测点布置:每个管道顺着中轴线方向布置 10 个测点,测点间隔为 10 mm,为了防止边界效应以及其他因素对测试数据造成影响,在距离注浆口左右 35 mm 内不布置测点以及距离混凝土梁试件上下边缘 70 mm 外不设置测点。在进行检测时,自左往右依次逐点进行检测,如图 4 所示(注:图中局部放大处已标明,“ \boxtimes ”表示为混凝土测试点位;最上边蓝色“ \boxtimes ”为对梁纯混凝土位置标定波速测点;下边三排黑色“ \boxtimes ”为梁孔道缺陷测试点位)。测试方法采用超声波对测穿透法。

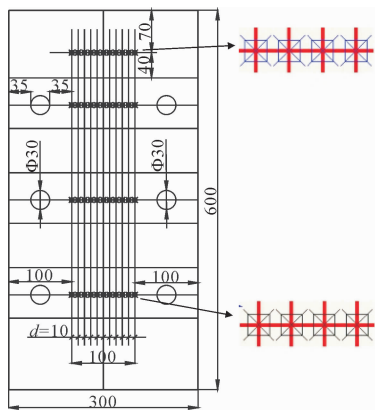


图4 线性以及非线性超声法测试点位图(单位:mm)

(2) 参数设置:非金属超声检测仪输入的测试距离为模型梁试件的厚度 200 mm。超声波的发射频率设为 50 kHz,信号采集数为 1 024。C40 混凝土试块实测标准尺寸 150 mm × 150 mm × 150 mm。

(3) 测试步骤:清洁处理模型梁测试面;确定孔道以及梁中线,按要求布置测线以及测点;连接仪器,设置参数;确定混凝土试件波速;逐线逐点规范

测试;数据保存、处理、分析,得出结论。

2.2 试件制备及工况设计

2.2.1 试件设计

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[17](JTG 3362—2018)设计梁试件,梁试件长 300 mm,宽 200 mm,高 600 mm;混凝土抗压强度等级设计为 C40,水灰比为 0.376;试验梁试件制备过程中采用外直径 85 mm,内直径 80 mm 的塑料波纹管;另外浆液的灌浆管采用常规的内壁光滑的 PVC 管,内直径为 30 mm,外直径为 33 mm,如图 5 所示。其中在每一片的模型梁试件中设有 3 个相同尺寸的预留孔道,每个孔道内设置不同的灌浆微缺陷。采用相同的混凝土配合比额外制备了 3 组 200 mm × 200 mm × 200 mm 立方体试件,用于非线性超声系统中测试参数以及获取纯混凝土相对非线性系数。鉴于本次试验处于探索性的研究,为防止多因素的影响,以及在分析原因时影响因子的模糊,因此试验时在孔道内暂时不设置预应力钢筋。

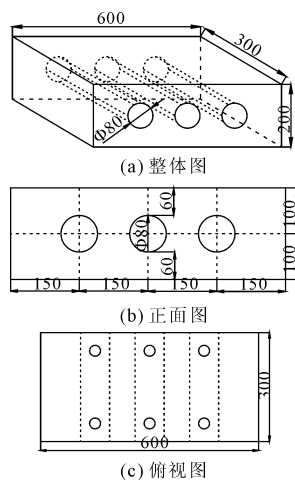


图5 试件设计尺寸图(单位:mm)

2.2.2 工况设计

本次试验采取工况对比的方式制备试验梁试件,在稳压时间不足此类型工况下制备了 6 片试验梁试件,试验梁试件除孔道内设置稳压时间不足的微缺陷不同外,其他条件均相同,以下为具体工况设计介绍以及实现方式:

(1) B 型工况:该种工况采用灌浆泵进行灌浆,不设波纹管,通过控制稳压时间制备不同的微缺陷。本次灌浆泵为华式 HS-B02 灌浆泵,以稳压时间的不同控制缺陷,在每片梁的每个波纹管管道进行编号,依次为:BBZ₁—BBZ₈、BZE₉,对应的稳压时间依次为 0~8 min,间隔 1 min。其中首字母“B”代表 B 型工

况,稳压时间为零,表示冒浆后立即停止灌浆;BZE₉管道表示饱满灌浆管道。

(2) D 型工况:该型工况下设置了 PVC 波纹管,同样采用灌浆泵灌浆,以灌浆完成后的稳压时间不同控制不同的微缺陷类型,微缺陷类型设置与 B 型工况相同,同样对每片梁的每个波纹管道进行编号,依次为:DBZ₁—DBZ₈、DZE₉,对应的稳压时间依次为 0~8 min,间隔 1 min。其中 DZE₉表示该孔道为稳压时间足额状态下的饱满灌浆,第一个字母“D”代表 D 型工况。

(3) E 型工况:此型工况数据获取设在上述两种工况中饱满灌浆状态下的梁试件的纯混凝土区,主要目的是为了对相关参数进行标定,便于进行参数对比。

3 试验数据处理与分析

3.1 梁试件纯混凝土区的非线性系数变化规律

获得预应力混凝土梁试件在纯混凝土区的非线性系数之后,分析各测点相对非线性系数的拟合参数见表 1,可知:纯混凝土区相对非线性系数均值为 0.840 11,边长为 200 mm 的立方体试件的为 0.813 12。梁试件纯混凝土区 10 个测点的相对非线性系数也相差不大,但是通过两者均值对比,梁试件纯混凝土区的非线性系数要比立方体试件的大,大了约 3.318 9%,小于 5%。因此可将纯混凝土区的相对非线性系数作为标定值用于后续微缺陷区的相对非线性系数的对比,进一步识别微缺陷。

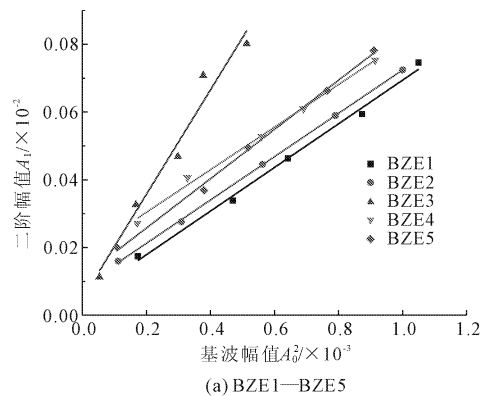
表 1 纯混凝土非线性系数变化

试件编号	斜率 (非线性系数)	斜率均值	截距	R ²
LH1	0.83214	0.84011	1.83067×10^{-5}	0.91453
LH2	0.78921		3.65328×10^{-5}	0.92367
LH3	0.81802		1.52653×10^{-5}	0.91865
CH1	0.84218		2.43718×10^{-5}	0.91765
CH2	0.83179		3.19342×10^{-5}	0.91438
CH3	0.85127		1.92301×10^{-5}	0.92577
CH4	0.83775		4.03762×10^{-5}	0.92813
CH5	0.83098		6.19423×10^{-5}	0.91397
CH6	0.84176		4.68533×10^{-5}	0.91978
CH7	0.85209		4.31291×10^{-5}	0.93124
CH8	0.83186	5.01897×10^{-5}	0.91453	
CH9	0.83229	6.89071×10^{-5}	0.93640	
CH10	0.84908	7.56139×10^{-5}	0.92156	

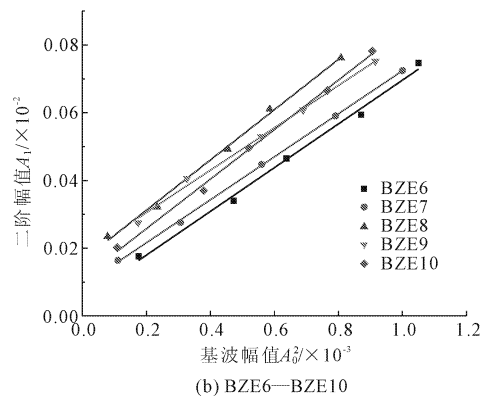
注:“LH”表示立方体混凝土试件;“CH”表示纯混凝土区。

3.2 梁试件在未设波纹管时的非线性系数变化规律

(1) 稳压时间足额条件下的相对非线性系数: B 型工况下的缺陷类型可简称压力缺陷;首先针对稳压时间足额这种工况所制作的管道进行相对非线性系数测试,稳压时间足额表示在不设波纹管的条件下严格依据规范操作的饱满灌浆。每条管道设 10 个测点,每个测点进行 5 种不同增益电压条件的相对非线性系数测试。10 个测点的相对非线性系数拟合图如图 6 所示。由图 6(a)图可知,测点 BZE₃的斜率明显大于其他测点的斜率,即 B 型工况的测点数据中在质量足额时测点 3 的数据异常,剔除第 3 组 BZE₃的数据,以此进行相对非线性系数均值求取。通过数据分析表明梁试件在稳压时间足额时,剩余 9 个有效测点的非线性系数值相差不大。在剔除异常测点 BZE3 数据后,求得该种工况的非线性系数均值为 1.868 75,而纯混凝土区的非线性系数均值为 1.840 11,可知稳压时间足额时的非线性系数比纯混凝土区的数值大。主要原因是尽管稳压时间足额,灌浆饱满,然而注浆液与原混凝土之间相对本身混凝土材料之间还是有一定的接触微缺陷,该缺陷的存在使得其相对非线性系数的增大。



(a) BZE1—BZE5



(b) BZE6—BZE10

图 6 稳压时间足额时测点相对非线性系数拟合图

(2) 稳压时间不足条件下的相对非线性系数: 本次试验设计稳压时间不足的条件下有 8 种不同的

工况,每种工况以每次增加 1 min 的次序依次递增稳压时间,即管道 BBZ₁—BBZ₉。稳压时间依次增加 1 min。在每种工况下调整不同的增益电压对该种工况的相对非线性系数进行拟合,现给出每种工况下求得的平均相对非线性系数趋势变化图,分析其之间的内部关系,见图 7。图 7 中从 BBZ₁ 到 BBZ₈ 表示稳压时间依次增加,随着稳压时间的逐渐增加,灌浆微缺陷依次减少,梁试件的相对非线性系数在整体趋势上是逐渐降低的,但是降低幅值不明显,表明相对非线性系数对于稳压时间的变化不太敏感。整体趋势的降低反映了相对非线性系数与该种缺陷大小是正相关的。出现上述情况分析原因是由于梁试件的孔道长度不是特别长,在较短的稳压时间内,浆液即达到较好的密实程度,后续增加稳压时间对其密实程度的影响不大。

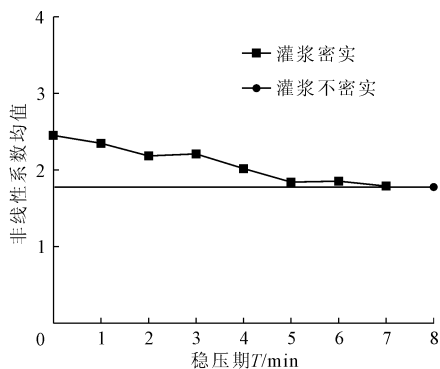


图 7 B 型工况稳压时间不足时相对非线性系数变化趋势图

3.3 梁试件在设置波纹管时的非线性系数变化规律

(1) 稳压时间充足条件下的相对非线性系数。此种状态为 D 型工况,对应的缺陷类型简称压力缺陷;主要探求在设置了波纹管的情况下,稳压时间的减少对于非线性系数的影响。进一步通过非线性系数的变化规律借以表征稳压时间减少所致的此种微缺陷。首先针对稳压时间足额这种工况所制作的管道进行相对非线性系数测试,稳压时间足额表示在不设波纹管的条件下严格依据规范操作的饱满灌浆,针对 D 型工况即指稳压时间为 8 min 的管道 DZE₉ 时的工况。在 DZE₉ 管道上设 10 个测点,每个测点进行 5 种不同增益电压条件的相对非线性系数测试。10 个测点的相对非线性系数拟合关系图如图 8 所示。

由图 8 可知,D 型工况在稳压时间足额时图 8 (a) 图中测点 DZE₄ 和图 8 (b) 图中测点 DZE₇ 的斜率明显与其他测点数据不同,数据异常,为不可用测点数据。因此剔除对应第 4 组和第 7 组的测点数据

进行相对非线性系数均值求取。通过数据分析可知梁试件在质量足额时 8 个有效测点的相对非线性系数数值相差不大,剔除异常无效数据后,求得设置了 PVC 波纹管的预应力混凝土孔道灌浆稳压时间足额时的相对非线性系数均值为 11.182 09,纯混凝土区的相对非线性系数均值为 1.840 11,该值明显比纯混凝土区的数值大,差值为 9.341 98,大了 507.68%。出现此种状况的主要原因是尽管稳压时间足额,灌浆饱满,然而混凝土材料本身构成复杂,而且在加入了 PVC 波纹管后,波纹管表面不光滑,这就增加了浆液与波纹管间的接触性微缺陷,而且波纹管与原混凝土之间亦存在一定的接触微缺陷,此两种微缺陷的存在导致所测得相对非线性系数的大幅增加。

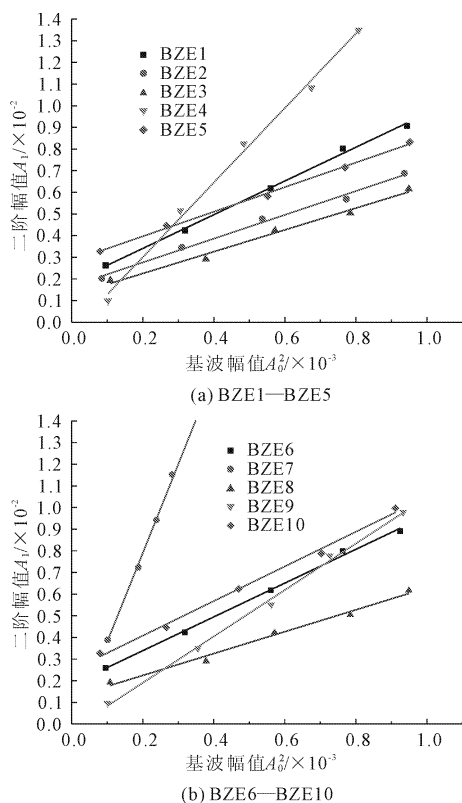


图 8 DZE 管道稳压时间足额时测点相对非线性系数拟合图

(2) 稳压时间不足条件下的相对非线性系数。本次试验设计稳压时间不足的条件下有 8 种不同的工况, DBZ₁—DBZ₈。每种工况以 1 min 依次递增稳压时间,在每种工况下调整不同的增益电压拟合对应该种工况的相对非线性系数,现列出每种工况下求得的平均相对非线性系数与该种工况的趋势变化图,如图 9 所示。

图 9 中从 DBZ₁ 到 DBZ₈ 表示稳压时间依次增加过程中,相对非线性系数变化情况。由此折线图

可以看出,随着稳压时间的逐渐增加,灌浆微缺陷依次减少,梁试件的相对非线性系数在整体趋势上是逐渐降低的。整体趋势的降低反映了相对非线性系数与该种缺陷大小是正相关的。相对比未设置波纹管时非线性系数的降低幅度较大,究其原因是由于波纹管的影响,随着稳压时间的增加,浆液与波纹管密实程度依旧会逐渐增加,因此非线性系数会继续减少。

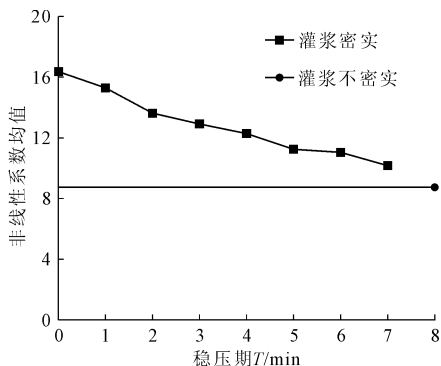


图9 D型工况稳压时间不足时相对非线性系数变化趋势图

3.4 非线性超声法与线性超声法测试结果对比

这里主要对非线性超声法与线性超声法在缺陷识别参数的灵敏度上进行分析。其中非线性超声法的参数为非线性系数,线性超声法的参数为波速。图10和图11分别列出了未设波纹管 and 设置波纹管两种方法对应参数差值对比。

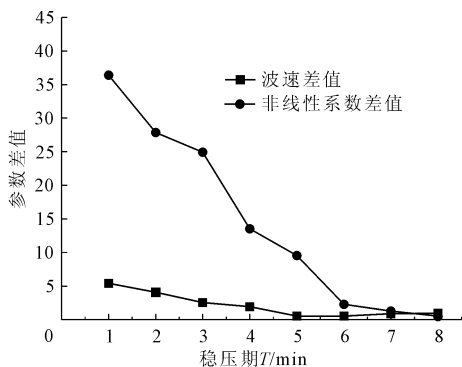


图10 未设波纹管两种方法对应参数差值对比图

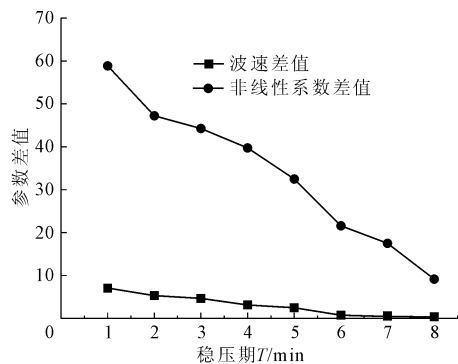


图11 设置波纹管两种方法对应参数差值对比图

通过图中两种方法在不同饱和度下相对应的差值占比可以看出,非线性超声法中非线性系数降幅明显,而线性超声法中波速虽有降幅,但极其不明显,幅度微小,表明非线性系数比波速对由于不同饱和度所致的微缺陷更加敏感,进一步说明非线性超声法比线性超声法更适合于微小缺陷的识别。

4 结论

本文针对稳压时间不足导致产生的预应力混凝土梁孔道灌浆微缺陷,运用非线性超声检测系统进行检测,探究相应的灌浆微缺陷与相对非线性系数之间的关系。另外作为验证性对比试验,采用了经典的线性超声波法对相同工况的稳压时间不足所导致的预应力混凝土孔道灌浆微缺陷进行了检测。通过分析数据得出以下结论:

(1) 非线性系数随着工况中所设计因稳压时间不断增加而产生的微小缺陷的逐渐减小而小幅减小。

(2) 与同种条件下未设置波纹管的预应力混凝土灌浆孔道所测得的相对非线性系数相比,预设PVC波纹管会使得梁试件的非线性系数明显增大。表明预设PVC波纹管后会一定程度上的增加孔道中的接触性微小缺陷。

(3) 随着稳压时间的增加,在未设波纹的灌浆孔道的相对非线性系数值在稳压时间增加5 min之后一直到8 min,其值后续几乎没有变化,接近于直线;而增设波纹管后相应的在稳压时间从5 min到8 min的相对非线性系数值尽管减幅不大,但是总体上还是有减小的。表明随着稳压时间的增加,会进一步加剧浆液与波纹管之间接触,减小两者之间的微缺陷,亦表明波纹管的存在会显著增大相对非线性系数值。

(4) 通过采用经典线性超声波法对同种因浆稳压时间足而产生的预应力混凝土孔道灌浆微缺陷进行了检测,测试结果表明微缺陷工况下的线性超声参数波速与在孔道灌浆饱满状态下数值相比变化幅度不大,说明波速与孔道中的微缺陷的相关性不大,亦无法借助该参数的变化对此种工况下的孔道灌浆微缺陷进行识别。

参考文献:

- [1] 裴晓龙,黄立维,杨培洲,等. 基于BlockDyna的裂隙岩体压水灌浆规律数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程

- 学报,2021,19(5):87-91.
- [2] 赵卫全,周建华,熊基丞,等.松散回填层及深厚淤泥地基联合灌浆加固技术研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(1):10-15,21.
- [3] 密士文,朱自强,彭凌星,等.T梁预应力波纹管压浆密实度超声检测试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2378-2384.
- [4] 滕旭东.固体中微结构缺陷的非线性声学建模及检测研究[D].南京:南京大学,2018.
- [5] Kim J, Song D G, Jhang K Y. A method to estimate the absolute ultrasonic nonlinearity parameter from relative measurements[J]. Ultrasonics, 2017,77:197.
- [6] Punnose S, Mukhopadhyay A, Sarkar R, et al. Characterisation of microstructural damage evolution during tensile deformation of a near- α titanium alloy: Effects of microtexture [J]. Materials Science & Engineering: A, 2014,607(12):476-481.
- [7] 陈 军,尹婷苑,徐 征,等.非线性冲击共振声谱法检测混凝土损伤[J].工业建筑,2016,46(1):95-99.
- [8] Korneev V A, Demcenko A. Possible second - order nonlinear interactions of plane waves in an elastic solid[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(2):591-598.
- [9] 刘剑锋,汪 魁,彭爱红,等.含裂纹砂浆试件的非共线混频超声试验研究[J].建筑材料学报,2022,25(3):221-227.
- [10] 田玉滨,莫青城,杜文森,等.基于非线性超声技术损伤钢筋混凝土无损检测的适用性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(2):192-199.
- [11] 陈 军,王庆冬.嵌入式超声传感器的混凝土损伤非线性检测研究[J].应用声学,2018,37(4):481-487.
- [12] 陈 军,黄 灿,王 豪.超声有限幅度法检测混凝土孔洞缺陷[J].无损检测,2016,38(1):26-29,68.
- [13] 吕文瀚,吴先梅,陈家熠.金属材料疲劳损伤检测的非线性声学方法[J].应用声学,2018,37(6):874-881.
- [14] 朱利勇,尹嘉雯,韩 梦,等.基于非线性声学共振法的CFRP板冲击疲劳损伤检测研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2020,34(5):116-121.
- [15] 刘剑锋.基于混频测试的混凝土非线性声学特性的试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [16] Liu J, Wang K, Zhao M, et al. Research on non - colinear mixing test method of concrete nonlinear ultrasound [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2022,37(2):115-133.
- [17] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.

(上接第133页)

- [6] 徐永福.基于颗粒破碎的粗粒土剪切强度的模拟分析[J].工程地质学报,2018,26(6):1409-1414.
- [7] 王雅婷,崔 精.基于PFC^{2D}的断续岩桥直剪强度特征及能量演化机制研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(5):234-238.
- [8] 潘远阳,魏玉峰,李远征,等.直剪试验下砂土剪切带形成的细观变形机制[J].水利水运工程学报,2020(3):82-91.
- [9] 李 爽,刘 洋,吴可嘉.砂土直剪试验离散元数值模拟与细观变形机理研究[J].长江科学院院报,2017,34(4):104-110.
- [10] 史乃伟,李 飒,刘小龙,等.粗砂直剪试验与离散元细观机理分析[J].科学技术与工程,2019,19(5):261-266.
- [11] 胡成宝,凌道盛,巩师林,等.基于砂土状态和细观特征的剪切带倾角公式[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(11):2068-2076.
- [12] 张 强,汪小刚,赵宇飞,等.土石混合体三维细观结构随机重构及其力学特性颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报,2019,41(1):60-69.
- [13] 关振长,何亚军,高 翔,等.花岗岩残积土中砾石颗粒的二维形状特征及其簇重构[J].水利与建筑工程学报,2021,19(4):1-7.
- [14] 雷晓丹,杨忠平,张晓景,等.土石混合料剪切特性及块石破碎特征[J].岩土力学,2018,39(3):899-908.
- [15] 陈鹏宇,孔 莹,余宏明.岩石单轴压缩PFC^{2D}模型细观参数标定研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1240-1249.
- [16] 杨 鑫,崔宏环,张立群,等.砂土-结构接触面剪切特性大型直剪试验研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(5):1207-1215.