

利用阻尼振动法检测套筒灌浆饱满度的可行性分析

于玲¹,李文博¹,汤浩¹,包龙生¹,冯乃辉²

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 鞍山市城市建设发展中心,辽宁 鞍山 114002)

摘要 目的 研究阻尼振动法对灌浆料初凝前后及灌浆口各类灌浆缺陷的检测能力。方法 设计并制作两组装配式混凝土桥墩套筒节点模型,并在套筒中设置了不同种类的缺陷,根据阻尼振动衰减原理对灌浆饱满度进行判断。结果 传感器暴露在空气中时,仪器检测到的振动幅值为255,当灌浆料饱满时,仪器检测到的振动幅值普遍低于100,大概保持在20~60;随着灌浆料的固化,振动幅值继续变小,大概保持在10~40。因此可知,当传感器被灌浆料包裹时,振动能量值小于100便可判定该套筒灌浆饱满。结论 通过对比传感器振幅能量值与预设的灌浆情况,证实了阻尼振动法的可行性,对于脱空类型的缺陷有着较好的检测效果。

关键词 阻尼振动法;灌浆缺陷;阻尼振动;灌浆饱满度

中图分类号 TU 997;U446.1

文献标志码 A

Feasibility Analysis of Using Damping Vibration Method to Detect the Plumpness of Sleeve Grouting

YU Ling¹, LI Wenbo¹, TANG Hao¹, BAO Longsheng¹, FENG Naihui²

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Anshan City Construction and Development Center, Anshan, China, 114002)

Abstract: This paper focuses on the detection ability of the damped vibration method on various types of grouting defects before and after the initial setting of grout and at the grouting opening. The experimental method is to design and produce two groups of assembled concrete pier sleeve node models, and set up different kinds of defects in the sleeve, according to the principle of damped vibration attenuation to judge the grout fullness. The results are as follows, when the sensor is exposed to the air, the vibration amplitude detected by the instrument is 255, when the grout is full, the vibration amplitude detected by the instrument is generally lower than 100, roughly maintained at 20~60; with the curing of grout, the vibration amplitude continues to become smaller, roughly maintained at 10~40, so it can be seen that, when the sensor is wrapped

收稿日期:2022-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(42202319);沈阳市科技计划项目(23-407-3-19)

作者简介:于玲(1970—),女,教授,主要从事桥梁结构方面研究。

by the grout, the vibration energy value of less than 100 can be determined. The sleeve is fully grouted. Conclusion By comparing the sensor amplitude energy value with the preset grouting condition, the feasibility of the damped vibration method is confirmed, and it has a better detection effect for the defects of dehollowing type.

Key words: damping vibration method; grouting defect; damping vibration attenuation principle; grouting plumpness

目前,越来越多的跨海大桥和城市高架桥的施工过程中使用全预制装配式^[1],装配式混凝土桥梁已成为建筑领域中不可或缺的一部分。灌浆套筒连接^[2]作为桥梁连接节点的一种重要技术,既能很好地保证结构的力学性能,又比焊接连接简单很多,性能也更加稳定,已逐渐取代了有很多弊端的现浇式施工技术^[3]。1972年,日本在建设预应力剪力墙时,采用的连接方式便是灌浆套筒连接,因为日本地区多发地震,工程师便对该项技术加以改进,经过地震的检验,使用了该技术的建筑结构没有发生明显破坏^[4]。2007年,我国从日本引进了灌浆套筒技术,由于进口套筒造价过高,便开发了国产的钢制套筒,但在实际使用过程中发现,套筒连接处的灌浆质量问题是决定装配式建筑整体结构稳定性的关键,因此研究一种合适的套筒灌浆质量检测方法是非常有必要的。

我国现阶段主要使用的检测手段是施工录像法,主要是以出浆口是否出浆来判断套筒的灌浆是否饱满^[5]。相关部门想要判断是否存在缺陷只能通过施工录像,而这种判定方法并不能充分证明^[6]。由于套筒灌浆的缺陷不大,套筒连接又属隐蔽工程,精准地检测出其缺陷的大小和位置并不是一件容易的事。近年来,科研工作者对套筒灌浆饱满度的无损检测方法,如超声波检测法^[7]、探地雷达检测法、冲击回波检测法以及阻尼振动法进行了很多研究。对比发现,阻尼振动法作为检测套筒的灌浆饱满度效果最为理想,因此针对阻尼振动法的检测方法和检测精度,学者们进行了众多研究。祝雯等^[8]使用了多种方法预埋传感器,套筒灌浆料流动

度的变化同样也是影响传感器接收到信号的因素,通过控制变量来达到试验目的。崔士起等^[9]研究了套筒完全灌浆、套筒部分漏浆及套筒全部漏浆三种情况,采用阻尼振动法和超声波法进行对比试验,分析了传感器检测到的振动幅值变化,验证了阻尼振动法的可行性。赵军等^[10]利用阻尼振动法,根据传感器反馈的波形变化规律,对套筒内灌浆的饱满度进行了试验检测。

鉴于上述研究成果,笔者设计并制作了带有不同灌浆缺陷和不同缺陷程度^[11]的装配式混凝土桥墩套筒节点模型,将传感器预埋到部分套筒内进行灌浆饱满度检测^[12]试验;研究阻尼振动法对灌浆料初凝前后灌浆口周围缺陷、出浆口端部缺陷、中部缺陷等各类灌浆缺陷的检测能力;通过对比传感器振幅能量值与预设的灌浆情况,证实了阻尼振动法的可行性,对于脱空类型的缺陷有着较好的检测效果。

1 阻尼振动检测法原理

阻尼振动是一种振幅逐渐衰减的振动,主要是不断的对外部阻力进行冲击,从而使能量得到消耗,振幅逐渐降低,最终停止。阻尼振动法又称预埋传感器法,检测仪器有传感器和主机两部分,阻尼振动传感器负责采集信号,主机将信号进行分析。该方法利用传感器的振动幅值的衰减,判断传感器周围介质的状态,操作方式也十分方便,将传感器预埋进待测构件内部,把数据线连入仪器,采集波形。检测其接收信号的振动幅值的衰减变化幅度,对传感器周围介质的性状进行判断,达到检测套筒灌浆是否饱满的目的。

基于物理学进行分析,所有的单自由振动体系处于振动状态,都可以通过式(1)进行计算:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0. \quad (1)$$

其中, $\beta = \gamma/2m$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$; x 为位移, mm; t 为时间, s; β 为阻尼系数; ω 为结构的圆频率, Hz; γ 为阻力系数; m 为质量, g; ω_0 为结构固有圆频率, Hz。

固有圆频率计算式为

$$\omega_0^2 = k/m. \quad (2)$$

式中: k 为劲度系数。

当 $\beta < \omega_0$ 时, 式(1)振动微分方程的求解结果为

$$x = Ae^{-\rho t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

式中: A 为初始振动幅值, mm; φ 为初相角, rad。

分析式(3)可知, $e^{-\rho t}$ 反映了阻尼对振幅的影响。其中振动的振幅呈指数衰减, 当振动体一定, 激励后初始振动的幅度和频率一定, 振动体周围介质的弹性模量与阻尼系数 ρ 变化成正比, 与振幅的衰减速度也成正比。由于固、液、气三种介质的不同状态的弹性模量不同, 若按照阻尼系数递增来为传感器周围介质进行排序, 依次为空气、水、流动的砂浆、凝固后的砂浆, 因此传感器接收到的信号也就不同, 弹性模量又与传感器振幅成反比^[13]。随着阻尼系数的增大, 振动幅度也会逐渐地减小, 便可以直观地通过传感器振幅变化来得到检测结果。

2 试验设计及检测流程

笔者采用 GT36、GT40 两种型号的套筒, 设计两组装配式混凝土桥墩套筒节点模型, 将套筒环形放至混凝土中, 并考虑不同缺陷布置、阻尼振动传感器的预埋位置, 通过试验探究阻尼振动法对于灌浆套筒的灌浆质量以及对不同位置的不同种缺陷的检测效果。

2.1 套筒灌浆缺陷设计

2.1.1 套筒顶部灌浆缺陷

顶部脱空是一种灌浆缺陷的表现方式, 完成灌浆后, 若入浆口没有封严实、出浆口没有及时封堵、灌浆料调配的水灰比不符合规定、自动灌浆机压力不足, 都会引起套筒顶部灌浆缺陷^[14]。因此试验中设计顶部 10%、20%、40% 三种顶部灌浆缺陷。

2.1.2 套筒整体灌浆缺陷

灌浆时若套筒内的气体无法完全排出, 或灌浆前没有对套筒内部进行检查, 杂质残留在套筒内壁, 或者首次灌浆失败之后再行二次灌浆^[15], 都会出现整体灌浆缺陷^[16]。因此试验中设计三种整体灌浆缺陷, 上部、中部、下部位置设置高度 40 mm、厚度 2 mm; 高度 80 mm、厚度 2 mm; 高度 80 mm、厚度 6 mm 的白色泡沫胶模拟病害。其中高度 80 mm、厚度 6 mm 的缺陷为缠绕 3 层 2 mm 厚的白色泡沫胶。

2.1.3 套筒钢筋缺陷

钢筋对接在实际应用中很难避免钢筋偏心缺陷^[17], 我国现有的工艺, 对接钢筋几乎不可能做到完全准确, 很多工人为了避免钢筋偏心堵塞出浆口, 便会锯断钢筋, 这样做一旦出现堵塞, 就一定会造成灌浆缺陷。笔者设计了 3 个 GT40 套筒上部钢筋偏心 10 mm, 两个 GT40 套筒上部钢筋完全缺失。

2.1.4 套筒灌浆料缺陷

灌浆施工过程中, 使用普通水泥砂浆、过期灌浆料, 这种以次充好的材料灌浆, 其性能不稳定, 也会造成灌浆缺陷。因此试验中设计了未静置灌浆料直接灌浆的套筒^[18]。

2.1.5 缺陷数量

试件 1: 采用 GT40 型号的共计 24 个, 套筒编号 1~13、18~21、26~32; 采用 GT36 型号的共计 8 个, 套筒编号 14~17、22~25; 套筒 25、26 中预埋阻尼振动传感器。试件 2: 采用 GT40 型号的共计 26 个, 套筒编号 1~14、18~21、25~32; 采用 GT36 型号的共计 6

个,套筒编号 15 ~ 17、22 ~ 24;套筒 23、25、27、28、31 中预埋阻尼振动传感器。

根据上述缺陷类型,将各缺陷设计到 GT36、GT40 套筒中,并在制作完成后,放入两组装配式混凝土套筒压浆模型中。试件参数见表 1、表 2。

表 1 试件 1 套筒缺陷数量表

Table 1 Quantity table of sleeve defects of test piece 1

分类	套筒型号	缺陷类型	数量/个
无阻尼振动传感器	GT36	上部 10% 全空	3
		上部 20% 全空	2
		上部 40% 全空	3
	GT40	密实	2
		上部 10% 全空	7
		上部 20% 全空	6
预埋阻尼振动传感器	GT36	上部 40% 全空	9
		上部 10% 全空	1
	GT40	上部 10% 全空	1

表 2 试件 2 套筒缺陷数量表

Table 2 Quantity table of sleeve defects of test piece 2

分类	套筒型号	缺陷类型	数量/个
无阻尼振动传感器	GT36	上中下长 40 mm,厚 2 mm	3
		上中下长 80 mm,厚 2 mm	3
		上中下长 80 mm,厚 2 mm	6
	GT40	上中下长 40mm,厚 2 mm	4
		上中下长 80 mm,厚 6 mm	6
		密实	4
	GT36	灌浆料不静置,模拟气泡	2
		上部钢筋完全缺失	2
		钢筋偏心 10 mm	2
		上中下长 80 mm,厚 2 mm	1
预埋阻尼振动传感器	GT36	钢筋偏心 10 mm	1
		密实	1
	GT40	灌浆料不静置,模拟气泡	1
		上中下长 80 mm,厚 2 mm	1

2.2 检测流程

由于阻尼振动传感器是插入到套筒出浆口位置,因此本次试验将振动传感器绑在套筒中钢筋的上、中、下三个位置,两组试件共设计 7 个套筒预埋振动传感器。灌浆前,对

预埋在 7 个套筒内的上部、中部、下部阻尼振动传感器的振幅能量值进行测试;将套筒灌浆后,灌浆料凝固前,再次测试套筒上部、中部、下部的振幅能量值;将套筒埋入混凝土试块,养护脱模后,灌浆料完全凝固,再次测试套筒上部、中部、下部的振幅能量值。其中阻尼振动传感器的具体位置见图 1。

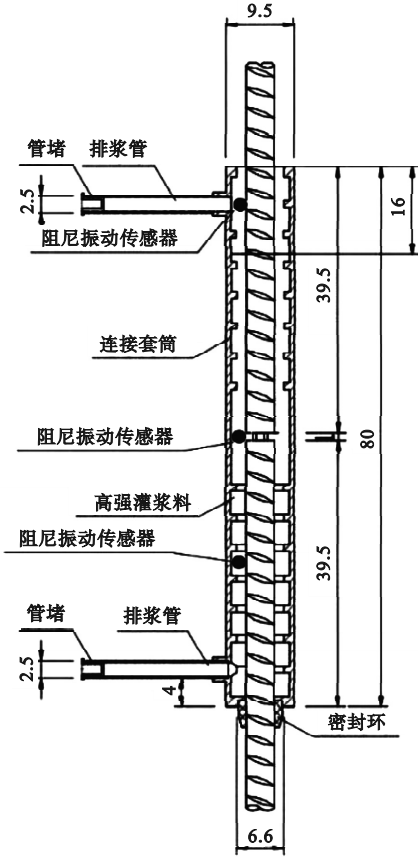


图 1 阻尼振动传感器位置

Fig. 1 Location diagram of damping vibration sensor

试验设备包括信号分析仪和传感器两部分。为了保证试验有效性,尽可能贴近实际施工操作,采用灌浆机灌浆。试验前将传感器绑在钢筋上,插入套筒内部,再接上足够长的电线,以保证套筒埋入混凝土试块后仍能进行检测。在检测开始前,需要先保证设备正常运转,然后将数据线连接到仪器上,将传感器的夹子与电线接好,这样阻尼振动传感器采集到的数据便会直接显示在仪器屏幕上(见图 2)。

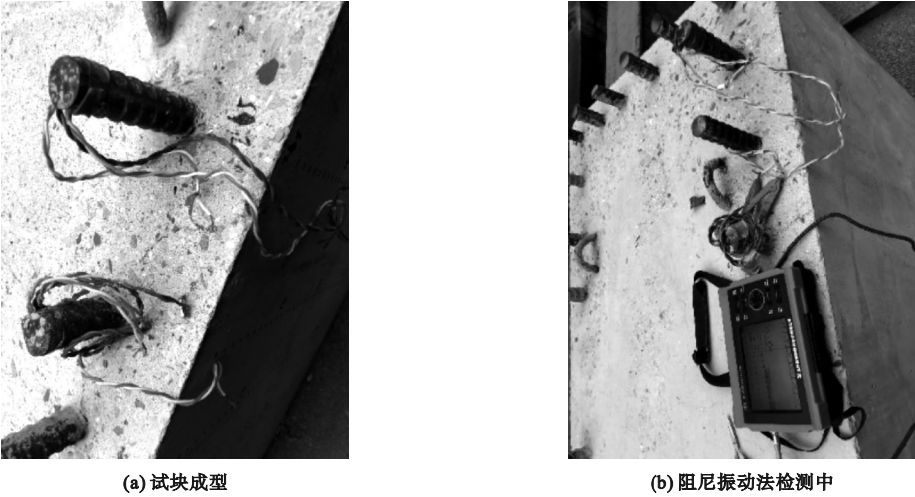


图2 阻尼振动法现场检测

Fig. 2 Schematic diagram of grouting material preparation

检测前,先将阻尼振动传感器暴露在空气中,通过数据线连接分析仪,得出此时的振动幅值并记录,再将其放入水中,得出此时振动幅值并记录,最后找到两个小的混凝土块将其包裹,来模拟固体状态,将得出的数据记录下来。通过以上操作,可对阻尼振动传感器处于不同介质时的振动幅值有初步了解。

3 检测结果及分析

3.1 灌浆前套筒内振幅能量值

在进行灌浆之前,先把埋入7个套筒中的传感器连入分析仪,开始第一次检测。

试件1的25#套筒,顶部传感器显示振动幅值为255,中部传感器显示振动幅值为223,底部传感器显示为255。说明试件1的25#套筒中的3个传感器与仪器连接良好,且均暴露在空气中。试件1的26#套筒,顶部传感器显示振动幅值为255,中部传感器显示振动幅值为255,底部传感器显示为255。说明试件1的26#套筒中的3个传感器与仪器连接良好,且均暴露在空气中。

试件2的23#套筒,顶部传感器显示振动幅值为255,中部传感器显示振动幅值为255,底部传感器显示为255。说明试件2的23#套筒中的3个传感器与仪器连接良好,且

均暴露在空气中。说明试件2的31#套筒,顶部传感器显示振动幅值为255,中部传感器显示振动幅值为255,底部传感器显示为255。说明试件2的31#套筒中的3个传感器与仪器连接良好,且均暴露在空气中。

以上未列出数据的振幅能量值均为255,可以看出套筒的振幅能量值达到255的最高能量值,可以判断阻尼振动传感器周围的介质为空气,符合预设情况。

3.2 灌浆后套筒内振幅能量值

将套筒绑扎到支架上,使用灌浆机进行灌浆,灌浆结束后,等待5 min后进行检测。

试件1的25#套筒,顶部传感器显示振动幅值为255,中部传感器显示振动幅值为22,底部传感器显示为76,说明1#~25#套筒中的3个传感器与仪器连接良好,中部、底部传感器振动幅值变小,顶部振动幅值未变,符合预设顶部10%脱空。试件1的26#套筒,顶部传感器显示振动幅值为255,中部传感器显示振动幅值为47,底部传感器显示为41。说明1#~26#套筒中的3个传感器与仪器连接良好,中部、底部传感器振动幅值变小,顶部振动幅值未变,符合预设顶部10%脱空。

试件2的23#套筒,顶部传感器显示振

动幅值为 53,中部传感器显示振动幅值为 30,底部传感器显示为 38,2#~23#套筒中的 3 个传感器与仪器连接良好,顶部、中部、底部传感器振动幅值均变小,预设缺陷为上中下缠绕长 80 mm、厚 2 mm 的白色泡沫胶,并未对传感器检测到的振动幅值产生影响。说明此时灌浆饱满,但缠绕泡沫胶缺陷未能检测出。试件 2 的 31#套筒,顶部传感器显示振动幅值为 57,中部传感器显示振动幅值为 31,底部传感器显示为 25,2#~31#套筒中的 3 个传感器与仪器连接良好,顶部、中部、底部传感器振动幅值均变小,预设缺陷为上中下缠绕长 80 mm、厚 2 mm 的白色泡沫胶,并未对传感器检测到的振动幅值产生影响。说明此时灌浆饱满,但缠绕泡沫胶缺陷未能检测出。

在灌浆饱满状态下,套筒内的振幅能量值比空套筒明显要小的多,说明阻尼振动传感器周围的介质为灌浆料,灌浆液表面到达了传感器附近,振幅能量衰减。由于有些套筒设计缺陷,顶部脱空,顶部传感器并未接触到灌浆料,周围介质仍为空气,因此振幅能量值仍保持在 255。但缠绕泡沫模拟套筒中混入杂质缺陷,阻尼振动法未能检测出。

3.3 灌浆料固化后套筒内振幅能量值

混凝土试块经过养护脱模后,再次测试套筒的振幅能量值。

试件 1 的 25#套筒,顶部传感器显示振动幅值为 255,中部传感器显示振动幅值为 4,底部传感器显示为 5,1#~25#套筒中的 3 个传感器与仪器连接良好,对比灌浆结束 5 min之后测出的振动能量值,中部、底部传感器振动幅值再次变小,顶部振动幅值未变,说明传感器周围的固液混合物转化为固态。试件 1 的 26#套筒,顶部传感器显示振动幅值为 255,中部传感器显示振动幅值为 4,底部传感器显示为 31,1#~26#套筒中的 3 个传感器与仪器连接良好,对比灌浆结束5 min之后测出的振动能量值,中部、底部传感器振

动幅值再次变小,顶部振动幅值未变,说明传感器周围的固液混合物转化为固态。

试件 2 的 23#套筒,顶部传感器显示振动幅值为 35,中部传感器显示振动幅值为 14,底部传感器显示为 10,2#~23#套筒中的 3 个传感器与仪器连接良好,对比灌浆结束 5 分钟之后测出的振动能量值,顶、中、底部传感器振动幅值再次变小,说明传感器周围的固液混合物转化为固态。试件 2 的 31#套筒,顶部传感器显示振动幅值为 14,中部传感器显示振动幅值为 16,底部传感器显示为 14,2#~31#套筒中的 3 个传感器与仪器连接良好,对比灌浆结束 5 min 之后测出的振动能量值,顶部、中部、底部传感器振动幅值再次变小,说明传感器周围的固液混合物转化为固态。

由振幅能量值可知,与固化前的能量值相比,固化后的能量值衰减速度更快,说明阻尼振动传感器周围介质为固体,符合灌浆料固化后的特征。

3.4 结果分析

预埋传感器套筒检测结果具体数据见表 3。

分析表 3 可以得出:

- (1)传感器暴露在空气中时,仪器检测到的振动幅值为 255;当灌浆料饱满时,仪器检测到的振动幅值普遍小于 100,大概保持在 20~60;随着灌浆料的固化,振动幅值继续变小,大概保持在 10~40。因此可知,当传感器被灌浆料包裹时,振动能量值小于 100 便可判定该套筒灌浆饱满。
- (2)试验过程中,对比传感器接触到流体状态下的灌浆料,与固化后的灌浆料,其振动幅值区别并不十分明显,传感器接触到流体状态下的灌浆料检测出的振动幅值也可能大于 100。该方法对于检测灌浆密实性,能够基本定性,但是定量判断仍有较大误差。
- (3)对于预设缺陷为上中下缠绕白色泡沫胶,模拟套筒中混入杂质的缺陷,并未对传

感器检测到的振动幅值产生影响,说明阻尼振动法并不能对此种缺陷进行检测。对于钢筋偏心、灌浆料不静置的情况,检测到的振动幅值也没有变化,说明阻尼振动法不能检测该种缺陷。

表 3 阻尼振动法检测结果

Table 3 Test results of damping vibration method

套筒编号	灌浆状态	顶部传感器 振幅能量值	中部传感 器振幅能量值	底部传感器 振幅能量值	缺陷类型
1#~25#	灌浆前	255	223	255	顶部 10% 脱空
	灌浆后	255	22	76	
	固化后	255	4	5	
1#~26#	灌浆前	255	255	255	顶部 10% 脱空
	灌浆后	255	47	41	
	固化后	255	4	31	
2#~23#	灌浆前	255	255	255	上中下缠绕长 80 mm、 厚 2 mm 泡沫胶
	灌浆后	53	30	38	
	固化后	35	14	10	
2#~25#	灌浆前	255	255	255	钢筋偏心 10 mm
	灌浆后	46	37	41	
	固化后	25	24	16	
2#~27#	灌浆前	255	255	255	密实
	灌浆后	45	39	48	
	固化后	10	5	4	
2#~28#	灌浆前	255	255	255	灌浆料不静置
	灌浆后	35	31	38	
	固化后	20	7	9	
2#~31#	灌浆前	255	255	255	上中下缠绕长 80 mm、 厚 2 mm 泡沫胶
	灌浆后	57	31	25	
	固化后	14	16	14	

4 结 论

(1)阻尼振动法测出的数据能够直观地反映出材料的弹性模量,依靠传感器接收到的信号,观测灌浆料振动幅值的变化,可知其是否被包裹,该方法能够有效的保证施工过程中出现的灌浆不饱满的问题,检测中要确保阻尼振动传感器的感应片竖直放置,避免因残留灌浆液而导致判断失误。

(2)阻尼振动法可在灌浆料初凝前进行

(4)通过对比传感器振幅能量值与预设的灌浆情况,证实了阻尼振动法的可行性,对于对于顶部脱空类型的缺陷有着较好的检测效果,其他类型的缺陷还需使用不同方法检测。

测试,发现灌浆缺陷后可以进行二次补灌,能够大幅提高灌浆质量,进而提升工程施工质量;施工完成后依然可以进行施工质量验收测试,为施工质量验收提供可靠的数据依据;检测效率高,一次检测仅需要几秒钟时间,适合大面积施工质量检测,不影响灌浆施工,适合工程现场操作。

参考文献

[1] 刘志磊.全预制装配式桥墩的设计技术[J].

- 工程技术研究,2018(2):101-102.
(LIU Zhilei. Design technology for fully prefabricated piers [J]. Engineering and technological research,2018(2):101-102.)
- [2] LING H J, RAHMAN A B A, IBRAHIM S I. Feasibility study of grouted splice connector under tensile load [J]. Construction and building materials, 2014, 50(15):530-539.
- [3] 包龙生,张远宝,桑中伟,等.波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 中国公路学报,2018,31(12):242-249.
(BAO Longsheng, ZHANG Yuanbao, SANG Zhongwei, et al. Quasi static test and numerical simulation analysis for seismic performance of fabricated assemble bridge piers base on bellows connection [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(12):242-249.)
- [4] GARBACZ A, PIOTROWSKI T, COURARD L, et al. On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis [J]. Construction and building materials, 2017, 134(3):311-323.
- [5] 李辉. 装配式结构灌浆连接无损检测研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2018.
(LI Hui. Research on nondestructive testing of assembly structure grouting connection [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.)
- [6] 韩少杰. 灌浆套筒连接性能和灌浆质量检测试验研究[D]. 张家口:河北建筑工程学院,2020.
(HAN Shaojie. Experimental study on joint behavior and grout quality testing of grout sleeve [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2020.)
- [7] 刘辉. 装配式结构节点套筒灌浆连接缺陷的超声导波检测[D]. 大连:大连理工大学,2019.
(LIU Hui. Detection of sleeve grouting connection defects in fabricated structural joints based on ultrasonic guide waves [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.)
- [8] 祝雯,高梓贤,黄石明. 基于预埋阻尼振动传感器法的钢筋套筒灌浆饱满度检测技术研究[J]. 质量检测,2018(11):7-10.
(ZHU Wen, GAO Zixian, HUANG Shiming. Research on testing technology of grouting plumpness of sleeve based on vibration amplitude of sensors method [J]. Construction quality, 2018(11):7-10.)
- [9] 崔士起,刘文政. 装配式混凝土结构套筒灌浆饱满度检测试验研究[J]. 建筑结构,2018(2):40-47.
(CUI Shiqi, LIU Wenzheng. Experimental study on grouting fullness detection test of sleeves of prefabricated concrete structures [J]. Building structure, 2018(2):40-47.)
- [10] 赵军,杜彦兵. 阻尼振动法对灌浆套筒饱满度检测的试验研究[J]. 混凝土,2019(11):163-167.
(ZHAO Jun, DU Yanbing. Experimental study on detecting fullness of grouting sleeve by damping vibration method [J]. Concrete, 2019(11):163-167.)
- [11] 耿豪劫. 套筒灌浆连接节点缺陷的无损检测及其力学性能的研究[D]. 镇江:江苏大学,2021.
(GENG Haojie. Study on nondestructive testing and mechanical properties of sleeve grouting joint defects [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.)
- [12] LONGLONG W, YANCHEN S, QIANG H, et al. Experimental investigation on the dynamic behavior of grouted splice sleeve connector under fast tensile loading [J]. Journal of building engineering, 2023, 66(1):105927.
- [13] 徐柯. 装配式混凝土结构套筒灌浆饱满度检测试验研究[J]. 安徽建筑,2018(6):96-97.
(XU Ke. Experimental study on grouting fullness detection of prefabricated concrete structure sleeve [J]. Anhui architecture, 2018(6):96-97.)
- [14] 孟文清,赵凯,刘爽,等. 缺陷对灌浆套筒接头连接性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2021(7):71-75.
(MENG Wengqing, ZHAO Kai, LIU Shuang, et al. Experimental research on influence of defects on the connection performance of grouting sleeve joints [J]. China concrete and cement products, 2021(7):71-75.)
- [15] ZHENG G, KUANG Z, XIAO J, et al. Mechanical performance for defective and repaired grouted sleeve connections under uniaxial and cyclic loadings [J]. Construction and building materials, 2020, 233(10):117233.
- [16] 吕小彬,吴佳晔. 冲击弹性波理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
(Lü Xiaobin, WU Jiaye. Theory and application of shock elastic waves [M]. Beijing: China Water Power Press, 2016.)
- [17] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. Engineering structures, 2015, 83(15):154-162.
- [18] ALIAWS A, ZUBIR A M, SHAHID A K, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure [J]. Procedia engineering, 2013, 53:116-123.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)