

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.007



基于振动特性判别钢管混凝土 两种材料间的脱粘规律

王军^a, 曹晖^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:通过钢管混凝土推出试验,分析比较推出过程中各阶段钢管混凝土非线性振动特性的差异,研究影响钢管混凝土非线性特性的因素。利用解析模式分解提取钢管混凝土振动信号的第一阶振动分量,通过 Hilbert 变换得到频率-振幅关系,分析钢管混凝土的非线性振动特性。3 根钢管混凝土构件试验结果表明,构件非线性在整个加载过程中呈现出先增大后减小的变化趋势,钢管混凝土非线性振动特性受其界面作用影响。在未发生加载脱粘的情况下,混凝土浇筑质量不良将削弱其界面的胶结作用,从而降低非线性特性。

关键词:钢管混凝土;推出试验;非线性分析;AMD 滤波

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)01-0048-07

Discriminant analysis of concrete debonding of CFST based on nonlinear vibration characteristics

Wang Jun^a, Cao Hui^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: This paper firstly conducted push-out test and dynamic signal test on CFST. The difference of nonlinear vibration characteristics of CFST in different working conditions in push-out test was analyzed. And the influence factors of nonlinear characteristics of CFST were studied. The first order of vibration signal was extracted by utilizing analytical mode, the relationship of frequency- amplitude was obtained by Hilbert transform. The test results of three CFST members show that the nonlinear vibration characteristics first increase then decrease in all loading process, and the characteristics are affected by the interaction between steel tubular and concrete. The interface of cementation is weakened by the poor quality of concrete placement, thus the nonlinear characteristics is relatively low when the concrete debonding isn't occurred.

Keywords: concrete filled steel tube; push-out test; nonlinear analysis; AMD filtering

钢管混凝土的脱粘缺陷可以分为 2 种:1) 结构受到荷载作用导致脱粘,如温度以及轴向力等因素的影响;2) 由于混凝土的浇筑不良,导致混凝土浇筑不

密实,从而形成的钢管混凝土的界面脱粘。

目前,钢管混凝土检测主要是基于声光学以及基于弹性假设的力学检测方法。超声波检测方法应

收稿日期:2017-05-10

作者简介:王军(1992-),男,主要从事结构健康监测研究,E-mail:jwpanda1992@gmail.com。

Received:2017-05-10

Author brief:Wang Jun (1992-), main research interest: structure health monitoring, E-mail: jwpanda1992@gmail.com.

用较早,但该方法仅适用于管壁与混凝土胶结良好的界面,首波沿钢管壁传播会对检测结果产生干扰。郝放等^[1]在超声波方法实际检测过程中指出:对声能的衰减和波形的变化只能做定性和经验性的判断。丁睿等^[2]提出了利用分布式光纤传感系统检测钢管混凝土脱空,表明利用光纤传感器检测钢管混凝土脱空脱粘可行,但此方法必须在施工过程中预埋传感器,无法用于已建成结构的检测。许斌等^[3]采用基于压电陶瓷的波动法和阻抗法来监测钢管混凝土界面剥离,以小波包能量谱的变化情况,来判断界面剥离状况。

CFST 核心混凝土与钢管的内壁存在相互作用,这种界面作用由化学胶结力、机械咬合力和摩阻力构成。当钢管混凝土发生自由振动时,界面作用复杂的动态变化(微粘滞、微碰撞、微滑动),导致振动呈现频率随振幅改变的非线性特征。通过识别钢管混凝土振动信号中的非线性特征,能够推测钢管与核心混凝土的界面状况。

目前,基于非线性动力检测进行损伤识别方面的研究还很少。Neild 等^[4]、Chajdi^[5]、郑星^[6]、曹晖等^[7]通过对混凝土梁的非线性动力研究,探讨了将其运用到损伤识别的可能。许鑫^[8]通过 3 根钢管混凝土悬臂柱证实基于非线性振动特性的钢管混凝土脱粘识别可行;曹平^[9]通过实验室 CFST 短柱和工地实测,研究 CFST 脱粘与非线性特性的影响关系。

在钢管混凝土拱桥结构中,桥面荷载一般通过吊杆或者立柱先传递给拱肋钢管,然后,通过钢管与混凝土的界面相互作用传递给混凝土,最终使钢管与混凝土共同受力。在实际高层建筑工程结构中,荷载作用于钢管混凝土柱的形式有两种:一种是荷载直接作用于柱顶,此种传力方式钢管与混凝土共同受力,变形协调;另外一种则是梁间荷载先传递给钢管侧壁,再通过钢管与混凝土的粘结作用传递给混凝土,实际工程中的大部分钢管壁脱粘情况与推出试验的传力方式一致。因此,采用推出试验的振动特性来分析钢管混凝土的粘结质量对于实际工程具有非常重要的参考价值。

在推出试验^[10-11]过程中,当采用压力将核心混凝土推出钢管的时候,混凝土通过界面作用将荷载传递给钢管壁。在此过程中,由开始的胶结良好,到最后的整体刚体滑移,CFST 的界面作用不断变化。这非常有助于分析界面作用与非线性振动特性的相互关系。对 3 根钢管混凝土构件进行推出试验,在不同的加载工况下,分别测试钢管的纵向应变以

及钢管与混凝土的相对滑移,并同时采用动测方法记录不同工况下构件的振动加速度信号。对加速度信号采用解析模式分解(AMD)方法和 Hilbert 变换得到频率-振幅关系。通过分析比较,探讨钢管混凝土界面作用和非线性特性之间的关系和规律,并探讨将其运用到脱粘识别的可能。

1 基于信号处理的非线性振动分析方法

1.1 信号采集及前期信号处理

利用 IEPE 型加速度传感器采集试件被人工激励后的振动加速度信号。由于实验室的各种实验操作,采集的信号往往夹杂较多的噪声。为改善分析效果,采用小波软阈值方法对信号进行前期去噪处理^[12]。对于阈值的选择,应本着尽量去掉噪声,又避免信号产生过大失真的原则。通过小波去噪,能够使加速度的信号包线更加平滑,同时,对信号的功率谱影响又很小。

1.2 解析模式分解方法分离一阶信号

采用解析模式分解方法对经过小波去噪后的振动信号进行滤波处理,得到一阶振动分量。Chen 等^[13]提出的解析模式分析(AMD)方法,可以实现对多组分信号进行分解,该方法能够对频率混叠信号、窄带信号以及间歇性波动信号进行较好的处理。

解析模式分解方法是通过构造两个具有相同指定频率的正交函数,将正交函数与原信号的乘积作希尔伯特变换,从而分解出原信号中小于正交函数指定频率的成分。解析模式分解方法理论如下^[14-15]:对于任意由 n 个信号分量 $x_i^{(d)}(t)(i = 1, 2, \dots, n)$ 组成的原信号 $x(t)$

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i^{(d)}(t) \quad (1)$$

若每一个分量的时变频率 $\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_n(t)$ 满足

$$|\omega_1(t)| < \omega_{b1}(t) < |\omega_2(t)| < \omega_{b2}(t) < |\omega_3(t)| < \dots < |\omega_{n-1}(t)| < \omega_{b(n-1)}(t) < |\omega_n(t)|.$$

其中, $\omega_{bi}(t) \in (\omega_i(t), \omega_{i+1}(t))(i = 1, 2, \dots, n-1)$ 为选取的截止频率。那么可以解析地分解出它的每一个信号分量。

$$\begin{aligned} x_1^{(d)}(t) &= s_1(t), \dots, x_i^{(d)}(t) = s_i(t) - \\ & s_{i-1}(t), \dots, x_n^{(d)}(t) = x(t) - S_{n-1}(t) \quad (2) \\ s_i(t) &= \sin[\omega_{bi}(t)]H\{x(t)\cos[\omega_{bi}(t)]\} - \\ & \cos[\omega_{bi}(t)]H\{x(t)\sin[\omega_{bi}(t)]\} \\ & (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (3) \end{aligned}$$

式(3)中: $H[\cdot]$ 为示希尔伯特变换运算。

1.3 时频分析

采用 Hilbert^[16] 变换, 将经过 AMD 方法分离得到的信号一阶振动分量进行时频分析, 最终得到频率-振幅曲线以分析 CFST 构件的非线性振动特征。为消除 Hilbert 变换时频曲线首尾容易出现的端效应, 需要先采用镜像法对位移信号进行处理, 镜像信号的中间的 1/3 段为原始信号。由于分析目的是找到曲线的变化趋势, 因此, 可以对振幅-时间曲线进行拟合, 选取同一振幅段频率的变化值作为非线性振动特性指标, 来反应构件的非线性振动特性。

2 试验及数据分析

2.1 钢管混凝土构件

试验构件尺寸参考实际工程中 1.5 m × 1.5 m 方形截面、高 4 m 的钢管混凝土柱。综合考虑实验室加载设备的加载能力和传感器的布置, 根据结构模型相似理论, 采用 1:5 的缩尺比例确定构件的尺寸。钢管截面形式为 30 cm × 30 cm 方形截面, 钢管厚 6 mm, 高度为 800 mm。材质为 Q235。混凝土浇筑前, 预先在两侧钢管壁两端及中部开槽并插入钢筋进行预埋。混凝土采用 C30 等级商品混凝土。浇筑前应对钢管内壁进行人工除锈。CFST1 采用机械振捣的方式浇筑; CFST2 采用人工振捣的方式浇筑; CFST3 设计为人为脱粘, 通过在钢管内壁涂抹黄油的方法进行人为脱粘, 每侧钢管内壁中央分别设置 15 cm × 15 cm 的方形脱粘区域。混凝土浇筑每浇筑一定量进行逐层振捣, 混凝土浇筑至钢管顶端 50 mm 处。过几天后混凝土施工表面由于收缩下凹, 采用高标号水泥砂浆抹平。

2.2 试验装置

试验采用 500T 电液伺服式长柱压力试验机加载。采用推出法, 荷载首先通过钢垫板传递给混凝土, 然后通过钢管与混凝土的界面作用传递给钢管壁, 最终传递给支座如图 1。试验采用单调分级加载, 出现明显滑移后缓慢加载, 至下端混凝土与钢板

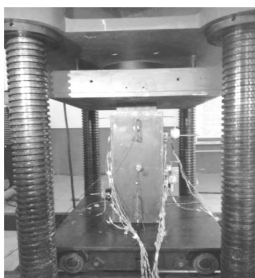


图 1 推出试验加载装置

Fig. 1 The loading device in the push-out test

接触为止, 然后开始卸载。荷载及位移采用荷载传感器和位移传感器电脑采集。

2.3 钢管纵向应变测试

在钢管外表面粘贴纵向应变片测试分级加载情况下钢管表面的应变值, 分析钢管混凝土在粘结破坏试验过程中的钢管纵向应变沿钢管长度的分布规律。钢管外表面应变片之间的竖向间距为 100 mm。

在推出试验的过程中, 混凝土通过界面粘结力将荷载传递给钢管壁, 其传递过程见图 2。

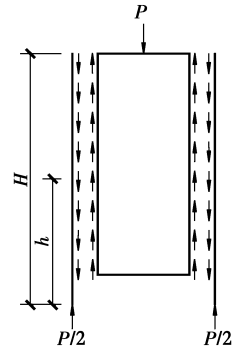


图 2 荷载传递示意图

Fig. 2 Force transferring sketch

假设钢管混凝土的粘结应力沿高度方向均匀分布^[17]。则混凝土的纵向应变可以表示为

$$\epsilon_s = \tau_p(H-h)/(tE_s t) = a - bh \quad (4)$$

式中: τ_p 为 p 荷载下的界面平均粘结应力; t 为钢管壁厚度; E_s 为钢管的弹性模量。 $a = \frac{\tau_p H}{E_s t}$, $b = \frac{\tau_p}{E_s t}$ 均为常数, 故钢管纵向应变沿高度应呈三角形分布。

图 3 是 CFST1 在推出试验过程中钢管纵向应变沿高度的分布曲线, 图中横坐标为试件高度位置, 横坐标为各相应位置处在各个试验荷载下对应的应变值, P 为施加的荷载。纵向应变沿高度呈近似三角形分布。在加载初期, 钢管的各位置的应变值都很小, 表明钢管与混凝土粘结紧密, 不存在相对滑

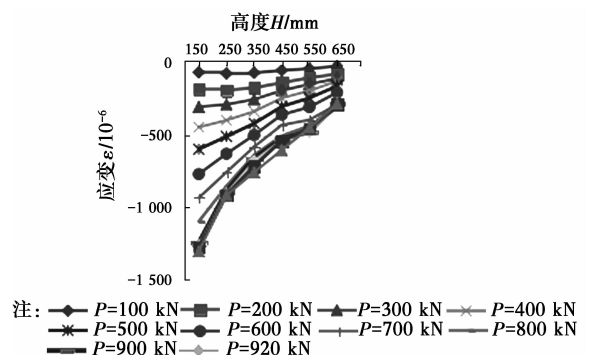


图 3 CFST1 钢管纵向应变沿长度分布

Fig. 3 Longitudinal strain of steel tubular along the length of No. 1 CFST

移;当荷载逐步增大,钢管顶部与底部的应变应变差距逐渐增大,钢管与混凝土应变的连续性遭到破坏,说明钢管与混凝土之间逐渐出现相对滑移;当荷载加载至约 700 kN,应变分布曲线与荷载为 600 kN 平行,钢管应变沿高度均匀增大,说明钢管与混凝土之间发生明显的整体刚体滑移。

2.4 钢管混凝土相对滑移量测试

钢管与混凝土的相对滑移与其界面的抗剪粘结性能有关。钢管与混凝土的界面作用由化学胶结力、机械咬合力和摩阻力^[18]构成。

试验预先在两侧钢管壁上开槽并插入钢筋进行预埋。混凝土浇筑完成后,通过测量钢筋棒与钢管壁的相对位移,从而获得钢管与混凝土在不同部位的相对滑移。3 根构件的滑移测试结果见图 4~图 6。

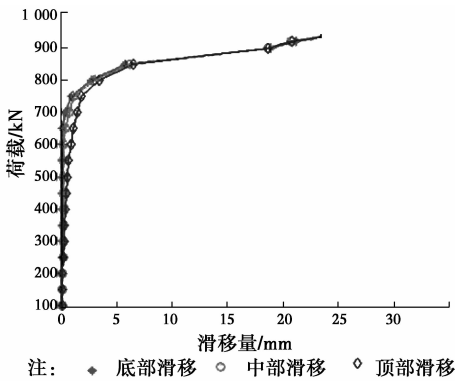


图 4 CFST1 钢管与混凝土相对滑移

Fig. 4 The relative slip of steel-concrete of No. 1 CFST

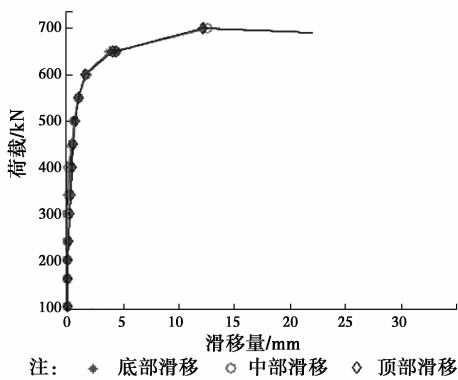


图 5 CFST2 钢管与混凝土相对滑移

Fig. 5 The relative slip of steel-concrete of No. 2 CFST

从图 4~图 6 可以看出,构件荷载-滑移曲线均可以划分为 3 个阶段:胶结良好阶段、线性滑移阶段和快速曲线滑移阶段。

分析图 4 中 CFST1 荷载-滑移曲线可知,当荷载小于 400 kN,钢管与混凝土之间胶结良好,不产生滑移,即未发生加载脱粘;当荷载超过 400 kN,

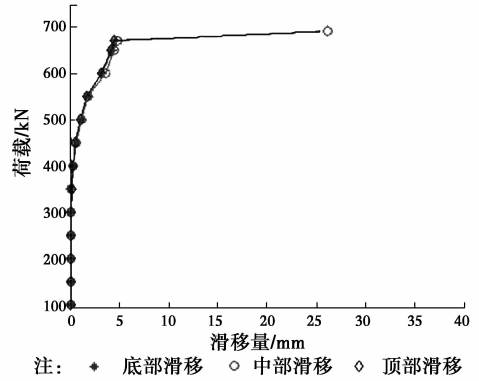


图 6 CFST3 钢管与混凝土相对滑移

Fig. 6 The relative slip of steel-concrete of No. 3 CFST

CFST1 从加载端开始向自由端逐渐产生微小的滑移,滑移量与所加荷载呈现出明显的线性关系,部分滑移的化学胶结力转化为钢管内壁与混凝土的机械咬合力和摩阻力,故认为 CFST1 发生不完全加载脱粘;当荷载达到 750 kN 时,构件开始迅速滑移直至破坏。此时,混凝土的粗糙面被磨平,界面机械咬合力和摩阻力减小,故认为 750 kN 后,CFST1 完全加载脱粘。

同样,根据图 5 和图 6 分析 CFST2 和 CFST3 可以得出:CFST2 当荷载小于 250 kN,钢管与混凝土之间胶结良好,不产生滑移,未发生加载脱粘;当荷载超过 250 kN,CFST2 开始产生微小的滑移,开始发生不完全加载脱粘;当荷载达到 600 kN 时,构件开始迅速滑移直至破坏,CFST2 完全加载脱粘。CFST3 当荷载小于 300 kN,钢管与混凝土之间胶结良好,不产生滑移,未发生加载脱粘;当荷载超过 300 kN,CFST3 开始产生微小的滑移,即开始发生不完全加载脱粘;当荷载达到 550 kN 时,构件开始迅速滑移直至破坏,CFST3 完全加载脱粘。

2.5 振动测试和非线性特性分析

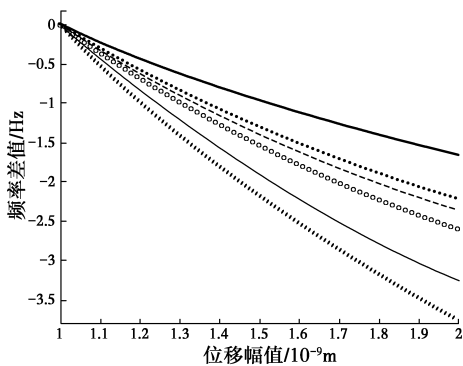
构件的非线性振动特性是指构件受外部激励发生自由振动时,界面作用复杂的动态变化导致振动呈现频率随振幅改变的特性。在实际工程当中,无论是钢管混凝土鼓屈脱粘,还是偏心受拉边缘脱粘,其本质上与推出试验导致的脱粘一样,都会导致钢管与混凝土的粘结破坏,削弱其自由振动过程中界面的相互作用,从而影响结构的非线性特性。

试验动测设备采用江苏东华测试技术股份有限公司的 DH5927N 型动态信号测试分析系统,加速度传感器采用扬州科动公司的 KD1400L 型订制传感器。该传感器为电压输出型压电式加速度传感器 (IEPE),重 200 g,可测频率范围为 0.1~2 000 Hz,

电压灵敏度为 410 mV/ms^{-2} 。

在各加载状态下分别对构件进行动测试验分析,忽略温度对频率的影响,动测尽量在外界无振动施工噪音下进行。在动测过程中激励尝试不同位置 and 不同大小。动测方法为用力锤在传感器安装的对面进行敲击,测试时间在混凝土浇筑后 1 个月左右。

试验通过力锤敲击激发钢管混凝土柱的一阶或前两阶频率成分,每个工况下的测试次数不少于 3 次,采用解析模式分解和希尔伯特变换方法对动测信号进行分析,得到不同工况下的频率-振幅曲线。对频率取常用对数,处理后的数据与位移幅值呈线性关系,故考虑采用常用对数函数对频率-振幅曲线进行拟合,并将各曲线的频率减去各自的最大值,得出构件在 $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9} \text{ m}$ 振幅段的频率-振幅归一化曲线,见图 7~图 9。选取归一化曲线振幅 $2 \times 10^{-9} \text{ m}$ 所对应的频率的绝对值作为非线性特性指标来反应各工况下的非线性特性。



注: — C1-1 C1-2 --- C1-3 ooooo C1-4 / / / / / C1-5 — C1-6

图 7 CFST1 各工况下频率振幅归一化曲线

Fig. 7 The normalized curves of frequency vs. amplitude of No. 1 CFST under different working conditions

根据构件的非线性分析结果,结合图 4~图 6 的荷载-滑移曲线,将构件不同工况下的非线性特性和加载脱粘情况汇总得表 1~表 3。

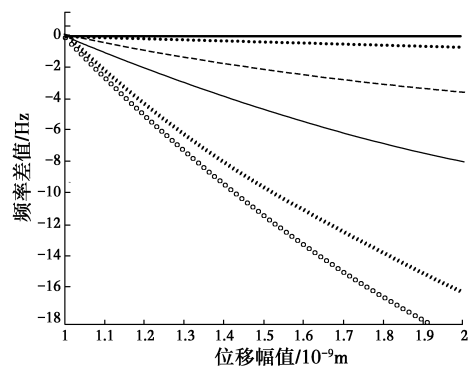
表 1 CFST1 数据分析结果

Table 1 The analysis results of No. 1 CFST

工况编号	荷载 P/kN	非线性特性指标/Hz	加载脱粘情况
C1-1	100	1.65	不脱粘
C1-2	300	2.20	不脱粘
C1-3	450	2.35	不完全脱粘
C1-4	650	2.60	不完全脱粘
C1-5	750	3.76	不完全脱粘
C1-6	920	3.27	完全脱粘

由表 1 可知,在加载初期,钢管与混凝土胶结良

好,构件的非线性特性较小;随着加载等级的不断增加,钢管与混凝土之间出现微小的相对滑移,对应荷载-滑移曲线的线性滑移阶段,钢管与混凝土之间的胶结力逐渐转化为机械咬合力和摩阻力,发生不完全加载脱粘。此时,钢管与混凝土的相互作用逐渐增强,其非线性特性逐渐增强;当荷载达到 750 kN 后,即荷载-滑移曲线的快速曲线滑移阶段,钢管与混凝土之间的相对滑移迅速增大,混凝土表面被磨平,机械咬合力和摩阻力均减小,钢管与混凝土之间完全加载脱粘,其非线性特性减小。在整个加载过程中 CFST1 的非线性特性呈现先增大后减小的变化趋势。



注: — C2-1 C2-2 --- C2-3 ooooo C2-4 / / / / / C2-5 — C2-6

图 8 CFST2 各工况下频率振幅归一化曲线

Fig. 8 The normalized curves of frequency vs. amplitude of No. 2 CFST under different working conditions

表 2 CFST2 数据分析结果

Table 2 The analysis results of No. 2 CFST

工况编号	荷载 P/kN	非线性特性指标/Hz	加载脱粘情况
C2-1	100	0.05	不脱粘
C2-2	200	0.74	不脱粘
C2-3	300	3.58	不完全脱粘
C2-4	400	19.48	不完全脱粘
C2-5	550	16.29	不完全脱粘
C2-6	700	8.02	完全脱粘

由表 2 可知,CFST2 所表现出的非线性特性变化趋势与 CFST1 一致,呈现出先变大后减小的变化趋势。CFST2 混凝土浇筑方式采用的是人工振捣,相比于 CFST1 的机械振捣,其振捣质量较差,混凝土与钢管的粘结质量较差,钢管与混凝土的化学胶结作用较弱。因此,比较表 1 和表 2 可知,在初始加载工况下,即钢管与混凝土未发生加载脱粘时,CFST2 其钢管与粘结质量较差,导致其非线性特性

远小于 CFST1。

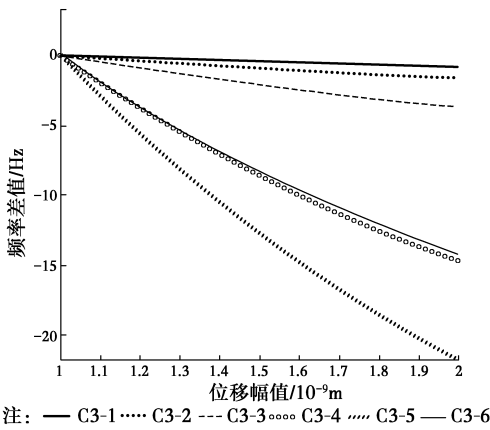


图 9 CFST3 各工况下频率振幅归一化曲线

Fig. 9 The normalized curves of frequency vs. amplitude of No. 3 CFST under different working conditions

表 3 CFST3 数据分析结果

Table 3 The analysis results of No. 3 CFST

工况编号	荷载 P/kN	非线性特 性指标/Hz	加载脱 粘情况
C3-1	100	0.82	不脱粘
C3-2	200	1.55	不脱粘
C3-3	300	3.62	不完全脱粘
C3-4	400	14.64	不完全脱粘
C3-5	500	21.76	不完全脱粘
C3-6	670	14.21	完全脱粘

由表 3 可知,CFST3 所表现出的非线性特性变化趋势与 CFST1 一致,呈现出先变大后减小的变化趋势。CFST3 通过在钢管内壁涂抹黄油的方法实现人工脱粘,其混凝土与混凝土的粘结质量相比于 CFST1 较弱,钢管与混凝土的化学胶结作用较弱。因此,比较表 1 和表 3 可知,在初始加载工况下,即钢管与混凝土未发生加载脱粘时,CFST3 钢管与粘结质量较差,导致其非线性特性小于 CFST1。

3 结论

在推出试验过程中,采用力锤激励,分别测试 CFST 在不同工况下的加速度响应信号。通过采用解析模式分解结合希尔伯特变换的信号分析方法对实验室钢管混凝土进行非线性振动特性分析,得到以下结论:

1)钢管与混凝土的界面作用是影响其非线性特性的主要因素。当钢管与混凝土胶结良好时,其非线性特性较弱;随着加载等级的不断增加,钢管与混

凝土的胶结力逐渐破坏,机械咬合力和摩阻力逐渐增强,相应地非线性特性越来越明显;当达到其粘结滑移极限承载力时,其机械咬合力和摩阻力减小,其非线性特性也随之减小。

2)在钢管混凝土未发生加载脱粘的情况下,钢管混凝土的浇筑质量不良将削弱其界面胶结作用,使得构件的非线性远小于浇筑良好的钢管混凝土构件。

3)在钢管混凝土未发生加载脱粘的情况下,采用黄油设置人为脱粘将削弱钢管与混凝土的界面胶结作用,从而降低其非线性振动特性。

4)在钢管混凝土正常使用情况下,钢管与混凝土不会因荷载作用产生脱粘,非线性特性指标可以作为是否因混凝土浇筑质量不好导致脱粘的判定依据。

参考文献:

[1] 郝放,崔红娅,崔振华. 超声波检测钢管混凝土质量的方法与应用[J]. 河南水利与南水北调, 2015, 14: 74-76.
HAO F, CUI H Y, CUI Z H. Method and application of ultrasonic testing of concrete filled steel tubular [J]. Henan Water Conservancy and South to North Water Transfer Project, 2015, 14: 74-76. (in Chinese)

[2] 丁睿,刘浩吾,罗凤林. 钢管混凝土拱桥截面脱空光纤传感研究[J]. 实验力学, 2004, 19(4): 494-496.
DING R, LIU H W, LUO F L. An investigation on optical fiber sensing of interface disengaging of steel tube confined concrete in arch bridges [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19 (4): 494-496. (in Chinese)

[3] 许斌,李冰,宋刚兵,等. 基于压电陶瓷的钢管混凝土柱剥离损伤识别研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 86-96.
XU B, LI B, SONG G B, et al. Detection of the debonding defect of concrete-filled steel tubes with piezoceramics [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 86-96. (in Chinese)

[4] NEILD S A, WILLIAMS M S, MCFADDEN P D. Nonlinear vibration characteristic of damaged concrete beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129 (2): 260-268.

[5] CHAJDI M. Geometrically nonlinear free vibration of clamped-clamped functionally graded beam with an edge crack using homogenisation method [C]// International Conference on Material Engineering & Application

- (ICMEA), August 19, 2016; 56-57.
- [6] 郑星. 基于非线性振动技术的预应力混凝土梁损伤识别[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHENG X. Damage detection of prestressed concrete beams based on nonlinear vibration [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [7] 曹晖, 郑晓宇. 基于盲源分离的钢筋混凝土梁非线性振动特性分析[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 40-45.
CAO H, ZHENG X Y. Analysis of non-linear vibration of RC beams by using blind source separation [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 40-45. (in Chinese)
- [8] 许鑫. 基于非线性振动特性的钢管混凝土脱粘识别[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
XU X. Debonding monitoring of CFST based on the nonlinear vibration characteristics [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [9] 曹平. 钢管混凝土密实性的非线性振动识别研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
CAO P. Non-linear vibration based study on compactness identification of CFST [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [10] MORISHITA Y, TOMII M. Experimental studies on bond strength between square steel tube and encased concrete core under cyclic shearing force and constant axial force [J]. Transactions of Japan Concrete Institute, 1982(4): 363-370.
- [11] SIMONA C, STEFANIA I, ZILA R. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete [J]. Materials and Structures, 2016, 49(1): 537-551.
- [12] 林助军, 严治军, 肖敏, 等. 基于经验模式分解与小波软阈值的联合去噪法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 464-467.
LIN Z J, YAN Z J, XIAO M, et al. Signal de-noising based on empirical mode decomposition and wavelet soft threshold [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(4): 464-467. (in Chinese)
- [13] CHEN G D, WANG Z C. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrowband time series with closely spaced frequency components [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 258-279.
- [14] 王佐才, 任伟新, 邢云斐. 基于解析模态分解的时变与弱非线性结构密集模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 1-7, 16.
WANG Z C, REN W X, XING Y F. Analytical modal decomposition-based time-varying and weakly nonlinear structures' modal parametric identification with closely-spaced modes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 1-7, 16. (in Chinese)
- [15] 王佐才, 任伟新. 基于解析模式分解的密集工作模态参数识别[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(6): 18-24.
WANG Z C, REN W X. Parameter identification of closely spaced structural modals based on analytical mode decomposition [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(6): 18-24. (in Chinese)
- [16] HUANG N E. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis [J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2003, 19(3): 245-268.
- [17] 柯晓军, 孙海洋, 陈宗平, 等. 钢管高强混凝土界面学性能试验研究及粘结强度计算[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(Sup): 401-404.
KE X J, SUN H Y, CHEN Z P, et al. Interface mechanical behavior test and bond strength calculation of high-strength concrete filled circular steel tube [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Sup): 401-404. (in Chinese)
- [18] 张卫东, 王振波. 方钢管再生混凝土界面粘结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(8): 66-67.
ZHANG W D, WANG Z B. Experimental research on the interface bond-slip behavior of recycled aggregate concrete-filled square steel tube [J]. Building Structure, 2015, 45(8): 66-67. (in Chinese)

(编辑 胡玲)