

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.11.010

混凝土工字梁三点弯曲荷载超声测试

郭增伟, 田川, 计亲, 郑罡

(重庆交通大学 省部共建山区桥梁与隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 制定并实施了钢筋混凝土工字梁三点弯曲荷载超声测试方案, 采集了 21 个荷载等级下超声波波形, 利用泰勒展开式, 去除了高阶信号的影响, 提取波形幅值变化多阶含量, 建立了幅值一阶变化系数与应力变化近似线性曲线。研究表明: 钢筋混凝土工字梁超声波幅值一阶变化系数与应力变化拟合曲线拟合优度高于 0.99。

关键词: 超声波; 应力测试; 泰勒展开; 混凝土

中图分类号: TN344.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)11-088-10

Three-point bending load ultrasonic test of concrete I-beam

GUO Zengwei, TIAN Chuan, JI Qin, ZHENG Gang

(State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: An ultrasonic waves test scheme for three-point bending load of reinforced concrete I-beam was developed and implemented. Ultrasonic waves data were collected under 21 load levels, Taylor expansion was applied to eliminate the influence of high order signal and extract the multiorder content of amplitude change of wave, and an approximate linear curve between amplitude first-order change coefficient and stress change was established. The research shows that under the condition of three-point bending stress, the first-order change coefficient of the wave amplitude of reinforced concrete I-beam can be fitted linearly with its stress change, and the goodness of fit is higher than 0.99.

Keywords: ultrasonic; stress test; Taylor expansion; concrete

工作应力是混凝土结构可靠性的重要指标之一^[1], 众多混凝土应力测试技术中, 超声波应力测试技术具有便捷、经济和环保等优势, 超声波多种参数与混凝土材料应力变化相关^[2], 故国内外对混凝土的超声波应力测试技术与日俱增^[3-5]。

超声波应力测试技术具有多个研究方向, 例如, 声弹性技术、尾波干涉技术等。林军志等^[3]选取声速与加权谱面积 2 个对应力较敏感的声学参数进行相关性分析; 陈立新等^[4]在声弹性基础上, 从混凝土骨料粒径、水灰比、砂率等参数出发, 探究声速、加权谱面积与应力敏感性影响; Larose 等^[5]基于尾波干涉法监测混凝土试块应力相关速度变化; Sähler 等^[6]基于尾波干涉法测量混凝土试块应力变化, 并对桥梁模型进行处理, 分析了速度变化与应力变化影响关系; Payan 等^[7]基于尾波干涉法监测应力变化, 提取非线性系数; 梁

收稿日期: 2018-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878106, 51478072)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51878106, 51478072).

作者简介: 郭增伟(1985—), 男, 重庆交通大学教授, 博士生导师, (E-mail) zengweigu@cqjtu.edu.cn。

田川(1994—), 男, 重庆交通大学硕士研究生, 主要从事桥梁振动方面研究。

潇^[8]利用尾波对混凝土试块的温度变化与应力变化进行监测,测试结果与国外学者研究结果基本接近,在简支梁上应用时,发现对称加载时,波速随对称荷载对称变化;庄晨旭^[9]采用尾波干涉法处理混凝土试块试验数据,提出了混凝土受压条件下尾波波速变化率与应力状态的数学判断模型,并应用到混凝土T梁四点弯曲加载条件,发现尾波波速变化率及其斜率可区分混凝土受压受拉区。分析相关文献发现,无论何种超声应力测试技术,均以建立超声波某一参数指标与应力变化关系为目的,亦可发现大多试验对象只是单轴应力试块,在此基础上进行复杂应力构件的超声波应力测试,有助于推动该技术向工程应用靠近。

超声波应力测试技术目前均处于探索阶段。其中,尾波干涉技术在单轴应力的试块级别已取得实质性进展。但在构件级别,当受力关系更加复杂时,可观察到波形前后交错移动,波速不一致(受压侧波速提高,受拉侧波速减小),此时,由于时间窗口的局限性,其选择标准难以确定,可能需对全域时间信号相关性进行分析。文中制定实施了混凝土工字梁三点弯曲荷载(弯剪组合应力场)超声应力测试方案,以建立声波幅值一阶变化系数与应力变化近似线性曲线为技术路线,运用泰勒展开推导了一套处理全域时间信号的新方法。

1 试验方案与实施

利用超声波通过混凝土材料后携带大量信息的特点,在构件一端主动发射超声信号,另一端接收超声信号,在同样的荷载模式不同荷载等级下进行超声测试。

1.1 试验装置

1) 试验系统

试验为工字梁三点弯曲荷载测试,测试装置由试验工字梁与支座系统、定制砝码加载系统、超声测试系统组成,试验装置模型如图 1 所示。图 1 中试验换能器采用一发双收方式。工字梁截面上侧接收端一位置为梁体受压侧,下侧接收端两位置为梁体受拉侧,其布置位置如图 2 所示。

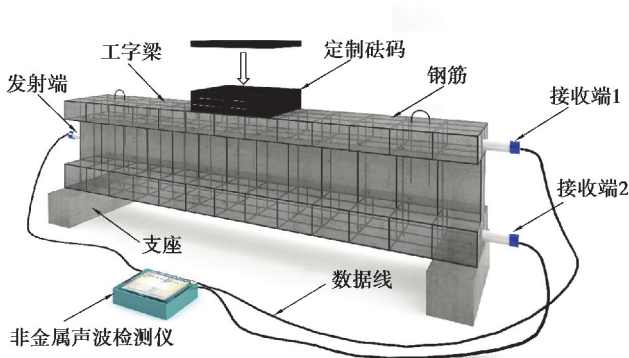


图 1 试验装置模型

Fig. 1 Test device model

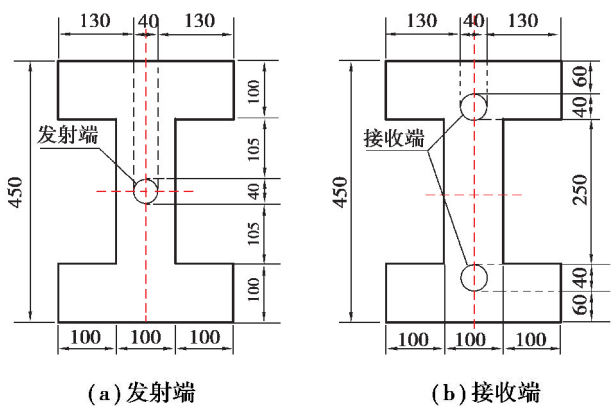


图 2 换能器布置图

Fig. 2 Transducer layout

2) 试验材料

① 试验工字梁与支座

工字梁设计尺寸为:跨径 2 m,上下翼缘板宽 30 cm,厚 10 cm,腹板高 25 cm,宽 10 cm,钢筋直径均为 $\phi 10$,具体配筋构造如图 3 所示。混凝土强度等级为 C30(42.5);细骨料细度模数为 2.7,MB 值为 1.1;粗骨料为 5~10 mm 的碎石,含泥量为 0.3%。C30 混凝土配合比为水泥:细骨料:粗骨料:水:粉煤灰:矿物 = 1.00:2.50:3.85:0.55:0.22:0.16。

支座为混凝土矩形试块,强度等级为 C30,其设计尺寸为:15 cm \times 15 cm \times 55 cm。

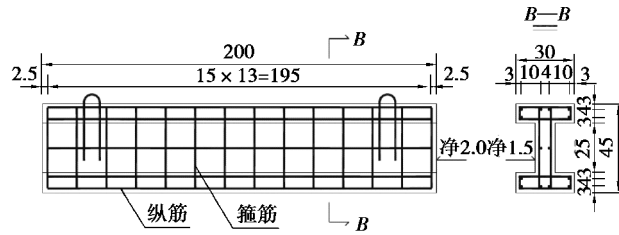


图 3 钢筋混凝土工字梁配筋图

Fig. 3 Reinforced concrete I-beam reinforcement diagram

②定制砝码

加载定制砝码为 Q235 的普通碳素结构钢, 钢板尺寸: $3\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 40\text{ cm}$, 每块质量为 $27.5 \pm 0.4\text{ kg}$, 共计 21 块。

③测试仪器

测试仪器采用 RSM-SY(T) 非金属声波检测仪^[10], 仪器主要包括非金属声波检测仪 1 台, 收发换能探头 3 个。

3) 试验细节

为减小声波在梁体传播过程中能量泄露, 影响试验测试数据, 故在梁与试块中间放置橡胶垫块。砝码加载时需进行定位, 采用测量后的薄木板, 标记出与第一块砝码的中心位置, 并与梁的中心位置对应, 后续加载位置与第一块砝码位置重合。将 21 块砝码按照加载顺序进行标注, 加卸载时严格按照顺序进行。

为在梁端固定换能器探头, 采用自制固定装置: 三角支撑架与 PVC 管组合, 如图 4 所示。三角支撑固定 PVC 管在梁端位置, 采用透明胶带缠绕。为保证收发换能器、PVC 管与梁体之间耦合连接, 采用蓝色盖子, 底部中心开孔(数据线穿过), 且在盖子与收发换能器之间放置定制弹簧(弹簧弹性模量相同), 换能器放置于 PVC 管内, 与梁端采用凡士林耦合连接。发射端与接收端换能器采用的固定装置尺寸均相同, 且每次试验蓝色盖子都推入相同尺寸。

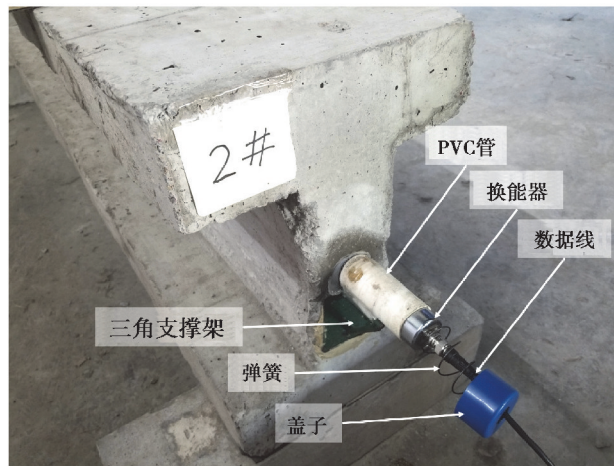


图 4 发射端装置图

Fig. 4 Transmitter device diagram

测试仪器的 3 个换能器探头功能相同, 均可作为发射或接收探头。为保证测试波形的稳定性, 发射与接收探头均进行标注, 每次测试位置固定不变。

1.2 加载与测试

仪器经过多次调试后, 参数设置如表 1 所示。

表 1 仪器参数设置

Table 1 Instrument parameter setting

| 参数 | 触发延时/ μs | 采样间隔/ μs | 脉宽/ μs | 增益/dB | 跨距/mm | 采样长度 |
|----|---------------------|---------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| 数值 | 9 999 | 8 | 5 | 200 | 2 000 | 1 024 |

1) 触发延时:通过前期对比测试决定,对仪器设置多个延时,进行单轴加载测试,观察各延时下测试波形规律,发现延时越大波形对单轴应力变化单向移动越明显,符合尾波特性的,受仪器测试范围限制,故选用最大延时 9 999 μs ;2) 采样长度:数据时间序列上信息数量,采样信息尽可能的多,测试波形信息有效性越有保障,仪器采样长度设置只有 512 和 1 024,为避免遗漏有效信息,选用最大采样长度;3) 增益:增益设置经过多个增益测试比选,设置过大会出现“削峰”(波形在峰值处始终为 2 048),致使数据不可用,设置过小波形显示能量越小,信噪比降低,在该测试条件下,增益设置 200 dB 适合;试验对象为混凝土工字梁,故跨距选取 2 000 mm;4) 采样间隔:统一设置为 8 μs ;5) 脉宽:统一设置为 5 μs 。

试验测试前均需对仪器进行 20 min 左右预热,保证仪器测试稳定性。在自重状态下(0 kN),即基准状态下,完成 11 次移点重复测试;在工字梁中心位置按照砝码标注顺序加载第 1 块砝码(0.27 kN),待加载结束后,完成 11 次移点重复测试;按照第 1 块砝码位置加载第 2 块砝码(0.54 kN),待加载结束后,完成 11 次移点重复测试;直至加载到第 21 块砝码(5.67 kN),并完成 11 次移点重复测试。此为 1 组重复试验,现场试验如图 5 所示。每组重复测试包括该组基准测试和 21 个荷载等级下测试,试验累计完成 8 组加卸载测试,如表 2 所示。

表 2 试验数据汇总表

Table 2 Test data summary

| 组数 | 荷载 | | | | | |
|-----|----|------|------|------|-----|-------|
| | 基准 | 1 砝码 | 2 砝码 | 3 砝码 | ... | 21 砝码 |
| 1 | 11 | 11 | 11 | 11 | ... | 11 |
| 2 | 11 | 11 | 11 | 11 | ... | 11 |
| ... | 11 | 11 | 11 | 11 | ... | 11 |
| 8 | 11 | 11 | 11 | 11 | ... | 11 |

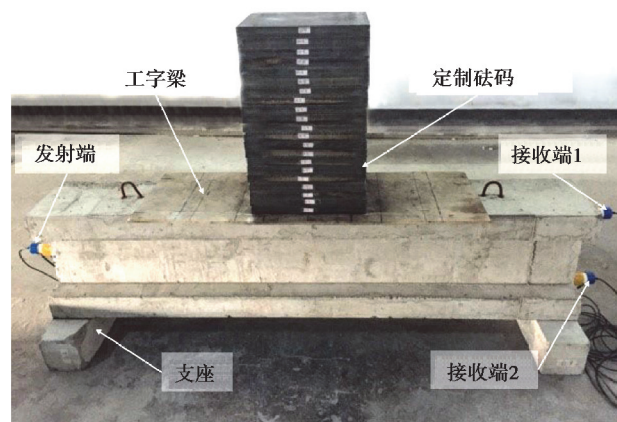


图 5 现场加载测试图

Fig. 5 Field loading test chart

2 数据处理与分析

由于受压受拉侧所采集波形数据量相同,处理方法相同,且表现结果类似,文中只以受压侧波形处理为例。根据仪器参数设定,所采集波形的波段均为 $[9\ 999\ \mu\text{s}, 18\ 183\ \mu\text{s}]$,波形分析时所选用波段为全时域波段。试验共进行 8 组加卸载测试,每组包括 1 个基准测试与 21 个荷载等级测试,每一荷载等级连续移点 11 次,共计采集 $8 \times 22 \times 11$ 条波形。

每一荷载等级采集有 8×11 条波形,为保证数据信息完整性,不宜只对某一波形处理,需对每一荷载等级下所有波形预处理,即平均后归一化,得到 22 条原始波形。为达到声波相关参数指标与应力变化线性关系的目标,考虑到原始波形中各阶含量互相影响,可利用泰勒展开式推导去除高阶含量,提取原始波形中幅值一阶变化系数。去高阶化为近似处理,故建立声波幅值一阶变化系数与应力变化近似线性曲线。

2.1 数据预处理与特点分析

2.1.1 数据预处理

首先,提取测试仪器所采集的 $8 \times 22 \times 11$ 条波形,为减小仪器自身波动影响,将每一组每一荷载等级下 11 条移点重复波形进行平均处理,得到 8×22 条波形。将平均后 8 组同一荷载等级下 8 条波形再次进行平均处理,得到 22 条波形,记为矩阵 \mathbf{A} ($1\ 024 \times 22$),再进行归一化处理,得到原始波形,记为矩阵 \mathbf{D} ($1\ 024 \times 22$),归一化处理如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{p1} & \cdots & a_{pq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $p = 1\ 024, q = 22$ 。将矩阵 \mathbf{A} 按其列方向求平方和,得到行向量 \mathbf{B} (1×22):

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 + a_{21}^2 + \cdots + a_{p1}^2 \\ a_{12}^2 + a_{22}^2 + \cdots + a_{p2}^2 \\ \vdots \\ a_{1q}^2 + a_{2q}^2 + \cdots + a_{pq}^2 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

将 \mathbf{B} 向量按其列方向复制合成矩阵 \mathbf{C} (1024×22):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 + a_{21}^2 + \cdots + a_{p1}^2 & \cdots & a_{1q}^2 + a_{2q}^2 + \cdots + a_{pq}^2 \\ \vdots & & \vdots \\ a_{11}^2 + a_{21}^2 + \cdots + a_{p1}^2 & \cdots & a_{1q}^2 + a_{2q}^2 + \cdots + a_{pq}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将矩阵 \mathbf{A} 各元素与矩阵 $\sqrt{\mathbf{C}}$ 各元素对应相除,得到归一化后原始波形 \mathbf{D} :

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} / \sqrt{\mathbf{C}} \quad (4)$$

按上述方法求得 22 条平均波形。为便于观察波形特点,此处只绘制基准、7 砝码、14 砝码、21 砝码应力状态下波形,时间窗口为 $[9\ 999\ \mu\text{s}, 18\ 183\ \mu\text{s}]$,如图 6 所示。将上述 22 条平均后波形进行归一化处理,横坐标由时间变换为点数,纵坐标为归一化后幅值,如图 7 所示。

2.1.2 数据特点

图 6 中,横坐标表示波形到达时间,纵坐标表示波形幅值,下半部分为其局部放大图。由图可看出,各荷载等级平均后波形绘制于一幅图中,其波形一致性较高,信号相对稳定。

由右侧局部放大图可知:随应力增大波形向前移动,前移顺序与应力变化顺序一致。由左侧局部放大图可得:分别在基准、7 砝码、14 砝码、21 砝码荷载作用下,波形不完全随应力增大只向前移动,21 砝码应力作用下相较其它应力作用下出现波形向后移动。加入全部基准与 21 荷载等级波形,大部分波形随应力增大波形向前移动,亦可观察到部分波形前后交替移动,时间窗口在 $[13\ 000\ \mu\text{s}, 14\ 000\ \mu\text{s}]$ 前后交替移动尤为突出。

图 7 将基准与 21 荷载等级归一化后波形均绘入图中,两处局部放大对应于图 6 位置,归一化处理后波形无变化,规律与图 6 相同,文中将各荷载等级归一化后波形定义为原始波形。

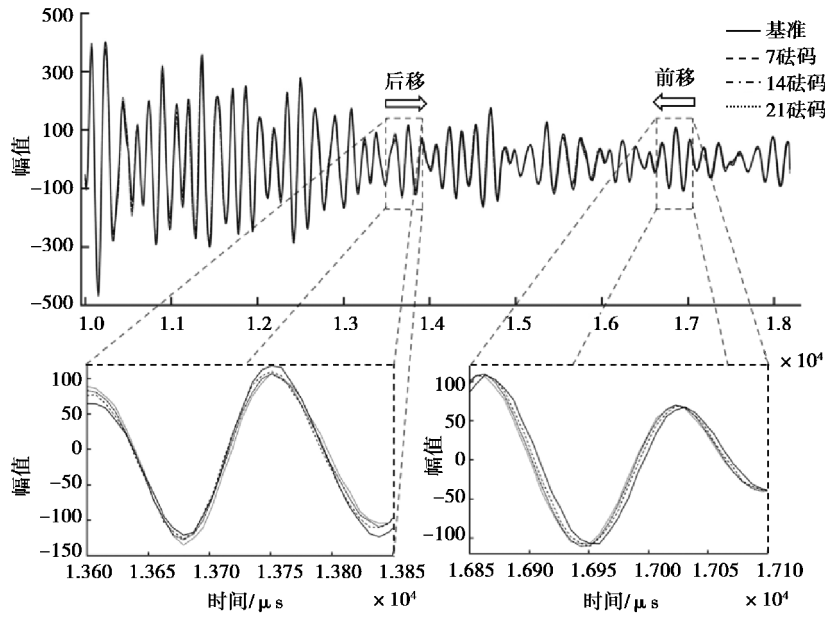


图 6 0,7,14,21 砵码应力作用下波形图

Fig. 6 Waveform diagram under 0,7,14,21 weight stress

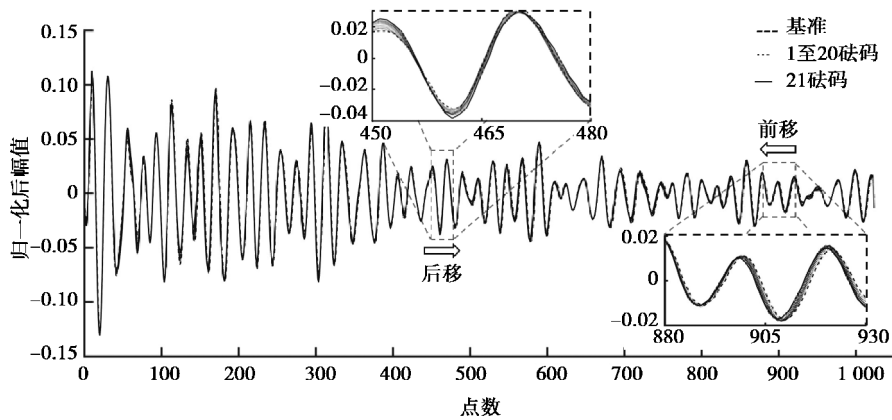


图 7 归一化处理后各应力状态波形图

Fig. 7 Stress state waveform diagram after normalization treatment

2.2 数据去高阶化

2.2.1 泰勒展开式推导

将荷载等级作为泰勒展开式自变量,基准与 21 荷载等级应力状态构成行向量 $x=[x_i], i=0,1,2,\dots, 21$ 。每荷载等级每次采集长度为 1 024 点,构成列向量 $f=[f_j], j=1,2,3,\dots,1\ 024$ 。各荷载下波形构成矩阵 $f_{ij}=[f_j(x_i)]$,如下所示:

$$x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_i \end{bmatrix}^T, f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_j \end{bmatrix}, f_{ij} = \begin{bmatrix} f_1(x_0) & f_1(x_2) & \cdots & f_1(x_i) \\ f_2(x_0) & f_2(x_2) & \cdots & f_2(x_i) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_j(x_0) & f_j(x_2) & \cdots & f_j(x_i) \end{bmatrix}$$

f_{ij} 在 $x=x_0$ 处 n 阶泰勒展开,为便于矩阵运算将 x_0 复制构造 1×22 的行向量 x_0, f_{ij} 有各阶导数矩阵 $f_{ij}^{(n)}, n=1,2,3,\dots,n$,泰勒展开式可表示为

$$f_{ij} = f_{0j} + f'_{0j}(x - x_0) + \frac{f''_{0j}}{2!}(x - x_0)^2 + \frac{f'''_{0j}}{3!}(x - x_0)^3 + \cdots + \frac{f^{(n)}_{0j}}{n!}(x - x_0)^n + R_n(x), \quad (5)$$

式(5)中 $R_n(x)$ 为余项矩阵, 则有 $R_n(x) = o(x - x_0)^n$ 。对应于各荷载等级与自重状态荷载等级差值, 记 $x - x_0 = \Delta x_i$, $x = \Delta x_i + x_0$ 。建立其与 $f_{ij}^{(n)}$ 共同影响 f_{ij} 的函数关系, 即可化为

$$[f_j(\Delta x_i + x_0)] = f_{0j} + f'_{0j} \Delta x_i + \frac{f''_{0j}}{2!} \Delta x_i^2 + \cdots + \frac{f^{(n)}_{0j}}{n!} \Delta x_i^n + o(\Delta x_i^n), \quad (6)$$

令 $F_{ij} = [F_j(\Delta x_i)] = [f_j(\Delta x_i + x_0)]$, 当 $\Delta x_i = 0$ 时, 则各阶导数 $F_{0j} = f_{0j}$, $F_{0j}^{(n)} = f_{0j}^{(n)}$, 式(6)可化为

$$F_{ij} = F_{0j} + F'_{0j} \Delta x_i + \frac{F''_{0j}}{2!} \Delta x_i^2 + \cdots + \frac{F^{(n)}_{0j}}{n!} \Delta x_i^n + o(\Delta x_i^n). \quad (7)$$

由多次试验数据分析可知, 第六阶及其以上成分含量极小, 此处只考虑前五阶, 后续数据处理结果可验证。

试验数据处理只针对荷载等级展开, 故 F_{0j} 、 F'_{0j} 、 $\frac{1}{2}F''_{0j}$ 、 $\frac{1}{5}F^{(5)}_{0j}$ 为常数向量, 可依次记为 c_0, c_1, \dots, c_5 , 故式(7)可简化为

$$F_{ij} = c_0 + c_1 \Delta x_i + c_2 \Delta x_i^2 + \cdots + c_5 \Delta x_i^5 + o(\Delta x_i^5). \quad (8)$$

由导数定义可知, 每求导一次, 即可消除一项系数:

$$f'(x) = \frac{f(x_j) - f(x_i)}{x_j - x_i} = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}}. \quad (9)$$

导数定义中 x 对应 Δx_i , 由于 Δx_i 为荷载等级, 且每块砝码重量相同, 故 $\Delta x_i - \Delta x_{i-1}$ 为单块砝码重量构成的常数向量, 可以消除系数。

$$F'_{ij} = \frac{F_{ij} - F_{(i-1)j}}{\Delta x_i - \Delta x_{i-1}}, \quad (10)$$

$$F''_{ij} = \frac{F'_{ij} - F'_{(i-1)j}}{\Delta x_i - \Delta x_{i-1}}, \quad (11)$$

$$F^{(5)}_{ij} = \frac{F_{ij}^4 - F_{(i-1)j}^4}{\Delta x_i - \Delta x_{i-1}}. \quad (12)$$

可将相邻加载等级下的波形作差: ①一阶波差: 相邻荷载等级原始波形作差 $\Delta F_{(12)j} = F_{2j} - F_{1j} \approx F'_{1j}, \dots$, 可去除波形常数项。②二阶波差: 相邻荷载等级一阶波差作差 $\Delta F_{(31)j} = \Delta F_{(23)j} - \Delta F_{(12)j} \approx F''_{1j}, \dots$, 可去除波形一阶项。以此类推, ③三阶波差, ④四阶波差。⑤五阶波差: $\Delta F_{(61)j} = \Delta F_{(62)j} - \Delta F_{(51)j} \approx F^{(5)}_{1j}, \dots$, 可消除波形中四阶项, 剩下波形中五阶及其以上。将作差后一阶及其以上、二阶及其以上、...、五阶及其以上各自平均后 5 个矩阵分别记为 $D_{sij}, s=1, 2, \dots, 5$ 。

2.2.2 利用推导处理数据

由式(8)可知, c_0, c_1, \dots, c_5 六系数向量必定存在相关关系。将 c_0, c_1, \dots, c_4 中与 c_5 相关成分去除, 并分别与 c_5 作相关系数, 以 $c_{05}, c_{15}, \dots, c_{55}$ 形式表示, 记 c_{mn} 为第 m 阶系数中含有第 n 阶系数的量, $m=n=1, 2, \dots, 5$ 。以 c_{05} 为例: c_{05} 表示 c_0 中所含与 c_5 相关的系数, 则 $c_0 = c_0 \cdot (1 - c_{05}) + c_0 \cdot c_{05}$, 将 c_0 中与 c_5 相关和无关部分拆分, 其它相关系数以此类推。

记原始波形矩阵为 $F_{ij} = [F_j(\Delta x_i)]$ 。将式(8)按上述推导, 受压侧原始波形可表示为

$$F_{ij} = \sum_{n=0}^5 c_{0n} + \sum_{n=0}^5 c_{1n} \Delta x_i + \sum_{n=0}^5 c_{2n} \Delta x_i^2 + \cdots + \sum_{n=0}^5 c_{5n} \Delta x_i^5 + o(\Delta x_i^5). \quad (13)$$

1) 提取各阶波形

将上述错位相减 4 次得到的四阶及其以上波形 D_{4ij} 与错位相减 5 次得到的五阶及其以上波形 D_{5ij} 作差, 得到第四阶波形, 记第四阶波形矩阵 F'_{4ij} :

$$F'_{4ij} = D_{4ij} - D_{5ij} = c_{04} + c_{14} \Delta x_i + c_{24} \Delta x_i^2 + \cdots + c_{54} \Delta x_i^5. \quad (14)$$

以此类推, 将错位相减 3 次得到的四阶及其以上波形 D_{3ij} 与错位相减 4 次得到的五阶及其以上波形 D_{4ij} 作差, 得到第三阶波形 F'_{3ij}, \dots , 将错位相减 1 次得到的一阶及其以上波形 D_{1ij} 与错位相减 2 次得到的二阶及

其以上波形 D_{2ij} 作差,得到第一阶波形 F'_{1ij} :

$$F'_{1ij} = D_{1ij} - D_{2ij} = c_{01} + c_{11} \Delta x_i + c_{21} \Delta x_i^2 + \dots + c_{51} \Delta x_i^5. \quad (15)$$

按上述推导进行处理,得到第各阶波形,将第各阶波形记为 F'_{sij} 。为方便观察,放置于同一图形中,并将各阶波形能量求其平均值,得到各阶波形能量相对值 E_s ,如图 8 所示。

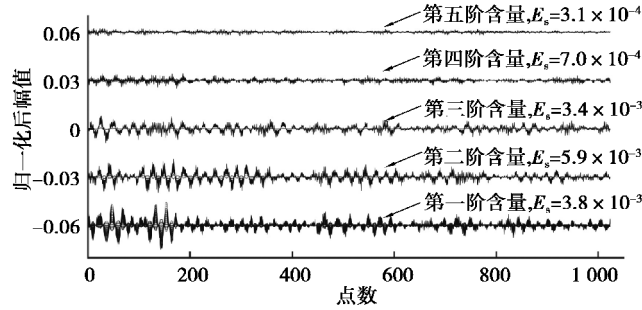


图 8 各阶含量波形图

Fig. 8 Various order of content waveform

图 8 中横坐标依旧为波形点数,纵坐标为归一化后相对幅值,为方便观察进行平移,没有物理意义。可从图中看出:第五阶能量仅 3.1×10^{-4} ,约占原始波形能量 0.03%,其以上阶次含量更小。一到五阶能量含量非常小,它们总和仅 1.4%,第零阶能量占 98.6%。

2) 提取前各阶波形

将原始波形 F_{ij} 与错位相减 5 次得到的五阶及其以上波形 D_{5ij} 作差,得到前四阶波形,记前四阶波形矩阵 F_{4ij} :

$$F_{4ij} = F_{ij} - D_{5ij} = \sum_{n=0}^4 c_{0n} + \sum_{n=0}^4 c_{1n} \Delta x_i + \sum_{n=0}^4 c_{2n} \Delta x_i^2 + \dots + \sum_{n=0}^4 c_{4n} \Delta x_i^4. \quad (16)$$

以此类推,将前四阶波形 F_{4ij} 与第四阶波形 F'_{4ij} 作差,得到前三阶波形 F_{3ij} , ..., 将前二阶波形 F_{2ij} 与第二阶波形 F'_{2ij} 作差,得到前一阶波形 F_{1ij} :

$$F_{1ij} = F_{2ij} - F'_{2ij} = \sum_{n=0}^1 c_{0n} + \sum_{n=0}^1 c_{1n} \Delta x_i. \quad (17)$$

按上述推导进行处理,得到前各阶波形,将前各阶波形记为 F_{sij} 。为方便观察,放置于同一图形中,并对前五阶波形与前一阶波形进行局部放大,如图 9 所示。

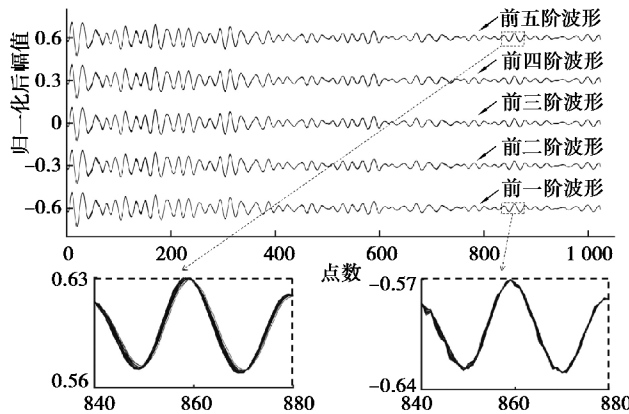


图 9 去除各阶含量后波形图

Fig. 9 Waveform after removing the content of each order

从图 9 可看出,经过去除各阶含量,前各阶波形走向轮廓无变化,一致性高。前一阶波形相较前五阶波形包络线光滑性降低,波形图为线性直线构成的折线,去高阶含量特性有所表现。

3) 提取各阶幅值变化系数

由相关系数可知, 两不相关向量内积为零: $\mathbf{a} \cdot (\mathbf{a} - k\mathbf{b}) = 0$, 由于前各阶波形与各阶波形均经过归一化处理, 即前 s 阶波形中第 s 阶波形系数向量 \mathbf{k} 为幅值 s 阶变化系数向量, 记为 α_{sij} :

$$\mathbf{F}_{sij} \cdot (\mathbf{F}_{sij} - \alpha_{sij} \mathbf{F}'_{sij}) = 0, \quad (18)$$

$$\alpha_{sij} = \frac{\mathbf{F}_{sij} \cdot \mathbf{F}'_{sij}}{\mathbf{F}'_{sij} \cdot \mathbf{F}'_{sij}}, \quad (19)$$

式中, \mathbf{F}_{sij} 分别为前各阶波形, \mathbf{F}'_{sij} 分别为各阶波形。

考虑到一阶能量相对占比高于高阶能量, 一阶曲线的拟合度高于高阶曲线, 选用一阶变化系数与应力变化线性拟合。按上述推导进行处理, 提取受压受拉侧幅值一阶变化系数向量 α_{sij} , 并分别将受压受拉侧 21 荷载等级状态下幅值一阶变化系数与各自基准状态下幅值一阶变化系数作差, 再建立受压受拉侧幅值一阶变化系数与应力变化线性拟合曲线, 如图 10 所示。

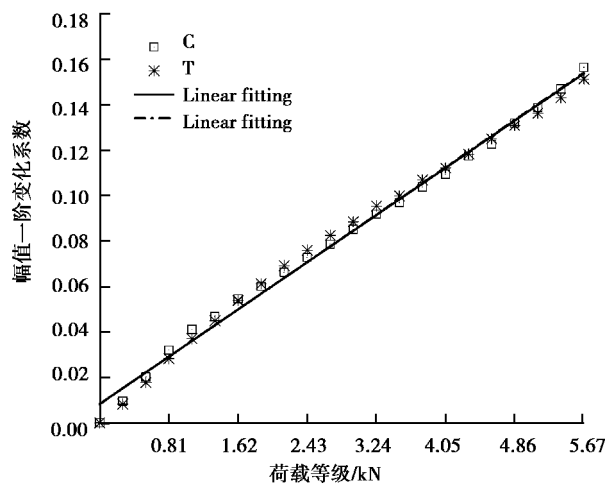


图 10 幅值一阶变化系数与应力变化线性拟合图

Fig. 10 Linear fitting of first-order amplitude variation coefficient and stress variation

受压受拉侧幅值一阶变化系数与应力变化线性拟合直线方程及拟合优度 R^2 :

受压侧: $y = 0.02567x - 0.00830, R^2 = 0.99422$;

受拉侧: $y = 0.02576x - 0.00821, R^2 = 0.99181$ 。

3 结 论

通过对工字梁进行三点弯曲荷载超声波测试的数据进行处理分析, 建立了声波幅值的一阶变化系数与加载应力之间的近似线性关系, 主要结论如下:

1) 从能量角度, 利用泰勒展开式提取了原始波形中一阶到五阶含量。其中, 第五阶能量仅占原始波形能量 0.03%, 以上阶次能量更低。一到五阶能量总和仅占 1.4%, 零阶能量达到 98.6%。零阶含量占主导影响, 去高阶化不影响原始波形信息, 验证了文中去高阶化的可行性。

2) 利用泰勒展开推导提取受压受拉侧原始波形中幅值一阶变化系数, 并将各荷载等级下幅值一阶变化系数与基准状态下幅值一阶变化系数做差量处理, 再将处理后各荷载等级应力状态下幅值一阶变化系数线性拟合, 受压受拉侧拟合直线拟合优度均为 0.99 以上, 受压受拉侧拟合直线接近重合, 结果一致性高。

3) 根据受压或受拉侧某一幅值一阶变化系数与应力变化拟合直线, 进行应力精准识别, 为后期主要研究方向, 不论在试验方案还是数据处理方面, 均需对其进行优化。

参考文献:

- [1] 付波, 向洪, 袁铜森. 钢筋混凝土桥梁工作应力测试研究[J]. 湖南交通科技, 2007, 33(2): 68-71.
FU Bo, XIANG Hong, YUAN Tongsen. The testing and research on the working stress of reinforced concrete bridge[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2007, 33(2): 68-71. (in Chinese)
- [2] 庄晨旭, 张劲泉, 蒋含莞. 混凝土应力检测技术研究综述[J]. 公路交通科技, 2016, 33(3): 43-51.
ZHUANG Chenxu, ZHANG Jinquan, JIANG Hanwan. Review of concrete stress testing technologies[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(3): 43-51. (in Chinese)
- [3] 林军志, 赵明阶, 杨洪武. 改性混凝土声学参数与应力相关性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 69-74.
LIN Junzhi, ZHAO Mingjie, YANG Hongwu. Experimental research on correlation of acoustic parameters and stress of modified concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 69-74. (in Chinese)
- [4] 陈立新, 许锡宾, 赵明阶, 等. 混凝土声: 应力相关性影响因素分析[J]. 中国港湾建设, 2005, 25(4): 6-8,12.
CHEN Lixin, XU Xibin, ZHAO Mingjie, et al. Analysis of factors influencing correlativity of ultrasound and stress in concrete[J]. China Harbour Engineering, 2005, 25(4): 6-8,12. (in Chinese)
- [5] Eric L, Stephen H. Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2×10^{-5} relative resolution using diffuse ultrasound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(4): 2641.
- [6] Stähler S C, Sens-Schönfelder C, Niederleithinger E. Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(4): 1945-1952.
- [7] Payan C, Garnier V, Moysan J. Potential of nonlinear ultrasonic indicators for nondestructive testing of concrete[J]. Advances in Civil Engineering, 2010: 1-8.
- [8] 梁潇. 钢筋混凝土 T 梁尾波特性的初步试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
LIANG Xiao. Preliminary experimental study of coda wave in reinforced concrete T-beam[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [9] 庄晨旭. 基于尾波干涉法的混凝土应力测量方法研究[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2016.
ZHUANG Chenxu. Research on concrete stress measurement with coda wave interferometry[D]. Beijing: Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2016. (in Chinese)
- [10] RSM-SY5(T)非金属声波检测仪使用说明[OL]. <http://jz.docin.com/p-702008087.html>RSM-SY5(T)2018/10/10.
Non-metallic acoustic detector operating instructions[OL]. <http://jz.docin.com/p-702008087.html>RSM-SY5(T)2018/10/10. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)