

文章编号:1672-9331(2020)04-0023-09

钢混组合结构 PBL 剪力键滑移损伤监测试验研究

蒋田勇¹, 吴海军¹, 黄天皓²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙建筑设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为了保证钢混组合结构的正常使用和实现对 PBL 剪力键滑移损伤的有效监测, 提出了一种基于压电陶瓷的钢混组合结构 PBL 剪力键滑移损伤监测方法。设计了两组钢混组合结构 PBL 剪力键滑移损伤监测试件, 在其中一组试件的型钢与混凝土的接触界面涂了一层黄油, 另一组则未涂黄油。在试件中布置压电智能骨料驱动器和压电陶瓷传感器采集滑移损伤的响应信号。研究表明: 传感器接受到的信号幅值随滑移损伤程度加深而下降, 其小波包能量也随着相对滑移量增加而下降; 黄油使得钢混界面更加紧密, 减少了应力波在传播过程中的耗散。

关键词: 钢混组合结构; PBL 剪力键; 结构损伤监测; 压电波动法; 滑移损伤

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

Experimental study on slip damage monitoring of PBL shear key in steel-concrete composite structures

JIANG Tian-yong¹, WU Hai-jun¹, HUANG Tian-hao²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Changsha Architectural Design Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: In order to ensure the normal use of steel-concrete composite structures and effectively monitor the slip damage of PBL shear key, a method for monitoring the slip damage of PBL shear key in steel-concrete composite structures based on piezoelectric ceramics was proposed. Two groups of specimens of PBL shear key were designed to monitor slip damage in steel-concrete composite structures. One group of specimen was coated with a layer of butter at the interface between steel and concrete, while the other group was not coated with butter. The piezoelectric intelligent aggregate actuators and piezoelectric ceramic sensors were arranged in the specimens to collect response signals of slip damage. The study results show that the amplitude of the signal received by the sensors decreases with the increase of slip damage degree, and the energy of the wavelet packet decreases with the increase of relative slip amount. The butter makes the interface between concrete and steel closer and reduces the dissipation of stress wave in the propagating process.

Key words: steel-concrete composite structure; PBL shear key; structural damage monitoring; piezoelectric wave method; slip damage

收稿日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778068, 52078058); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40301); 湖南省教育厅科学研究重点项目(17A010); 长沙理工大学双一流科学研究国际合作项目(2018IC18)

通讯作者: 蒋田勇(1978-), 男, 湖南宜章人, 长沙理工大学特聘教授, 主要从事桥梁结构智能监测方面的研究。

E-mail: tianyongjiang@csust.edu.cn

钢混组合结构是一种通过剪力连接件相连的结构。剪力连接件即剪力键,它能在钢混组合结构中承受并传递两者之间的纵向剪力,同时抵抗两者之间的掀起作用。PBL 剪力连接件是剪力键的一种,通过在钢梁上焊接带有定距圆孔的钢板,并将贯穿钢筋布置在圆孔内形成。现有理论和试验的研究成果表明:PBL 剪力键通过钢结构与混凝土结构之间的相对滑移来传递荷载。汪维安等^[1]通过多排 PBL 剪力键静载试验,分析了 PBL 剪力键群试件加载全过程的滑移分布及负载特征,发现滑移与负载之间的关系服从二次曲线分布。钢混组合结构 PBL 剪力键的滑移会影响结构的承载性能,如若出现损伤,势必会影响结构的使用。因此,有必要对 PBL 剪力键的滑移损伤进行监测,以保证钢混组合结构的正常使用。

针对滑移损伤监测,许多学者做了大量的研究。赵卫平等^[2]进行了基于声发射无损监测技术的钢管混凝土试件推出试验,获得了撞击计数、能量释放和频谱特征等信号特性,并发现撞击计数率、能量释放率与荷载—滑移曲线形成了良好的对应关系。陈爽^[3]结合光纤光栅传感技术分析了 FRP 筋的相对滑移量随其埋置长度的变化规律。孙曼等^[4]利用光纤光栅传感技术完成了钢混组合桥面板界面滑移全过程的监测,利用光纤光栅传感器测出了滑移出现的临界应变值及其发展过程。

压电波动法利用压电陶瓷的特性,在驱动器上外加激励信号产生应力波,并通过计算机将传感器接收到的应力波信号进行储存和分析,然后通过对比响应信号的幅值、频谱及模态,实现对结构损伤程度和损伤位置的监测^[5-8]。彭帅^[9]提出了一种基于压电波动法的型钢—混凝土组合梁静载损伤识别方法。该方法将脉冲荷载、正弦信号、扫频信号作为激励信号分别对组合梁的混凝土翼缘板及界面的损伤进行识别,并用试验验证了所识别出的界面滑移损伤位置与损伤程度。代永^[10]提出了一种利用压电波动法对钢混组合结构界面损伤进行监测评估的方法,确定了在界面滑移的情况下进行监测的最优方式,并建立了外荷载与能耗比之间的关系式。相关文献表明,到目前为止尚没有基于压电波动法对钢混组合结构 PBL

剪力键滑移损伤进行监测的研究。因此,本研究提出了一种基于压电波动法的 PBL 剪力键滑移损伤监测方法,通过在钢混界面涂黄油以及优化布置压电智能传感器来探究型钢与混凝土板之间的黏结作用对 PBL 剪力键滑移损伤的影响,进而分析确定 PBL 剪力键的滑移破坏机理,以期验证压电波动法对 PBL 剪力键滑移损伤监测的可行性和有效性。

1 压电波动法监测原理

本试验采用压电波动法对 PBL 剪力键滑移损伤进行监测。PBL 剪力键的受力机理如图 1 所示,开孔钢板在竖向荷载的作用下向下滑移的趋势,并且开孔钢板上的荷载通过开孔内壁与混凝土樁外环的接触面传递给混凝土樁。混凝土樁因上缘受压而向下变形,并将一部分剪切荷载传递给握裹在混凝土樁中的贯穿钢筋,使得贯穿钢筋发生变形,贯穿钢筋的变形压迫其周围的混凝土,使其发生开裂^[11]。此外,由于钢的强度大于混凝土的强度,所以开孔钢板孔洞内的混凝土樁在开孔内壁和贯穿钢筋的挤压下会发生剪切破坏。

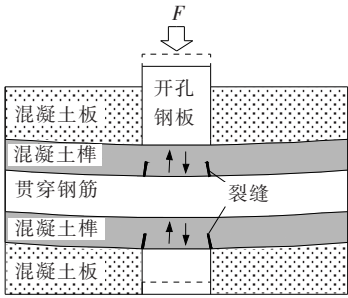


图 1 PBL 剪力键受力机理

Fig. 1 Stress mechanism of PBL shear key

根据 PBL 剪力键的受力机理,为了能够准确监测和识别 PBL 剪力键的滑移损伤,在布置压电智能材料时,要使孔洞中的混凝土樁、贯穿钢筋及其周围的混凝土处于驱动器所发出的应力波的传播路径上。由图 2 试验监测原理图可知,左侧混凝土板中压电智能骨料(SA1)发出的应力波途经孔洞中的混凝土樁被 PZT2 接收。当混凝土樁出现损伤时,应力波的传播路径受阻,导致 PZT2 接收到的响应信号减弱,从而达到监测混凝土樁损伤程度的目的;也可以途经钢混界面被 PZT1 接

收,当钢混界面发生脱离时,型钢和混凝土的实际接触面积减小,应力波的传播路径受阻,PZT1 接收到的响应信号减弱,从而达到监测钢混界面损伤程度的目的。右侧混凝土板中的压电智能骨料(SA2)发出的应力波途经贯穿钢筋及周围的混凝土被 PZT3 接收。当贯穿钢筋及周围混凝土出现损伤时,应力波的传播路径受阻,PZT3 接收到的响应信号发生变化,从而达到监测贯穿钢筋及周围混凝土损伤程度的目的。

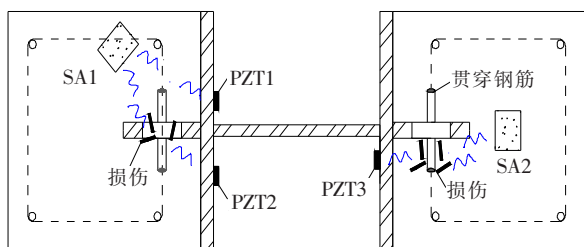


Fig. 2 Test monitoring schematic

2 试验内容

2.1 试件

钢混组合结构 PBL 剪力键滑移监测试件由 H 型钢、贯穿钢筋和混凝土板等组成。两侧混凝土板由 C30 混凝土浇筑而成, 尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, 内部构造筋采用 $\phi 6\text{ mm}$ 的 HRB400 普通钢筋。竖直 H 型钢采用 Q235, 尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 。H 型钢和混凝土板界面各焊接两个厚度为 10 mm 的 Q235 开孔钢板, 开孔直径为 30 mm 。贯穿钢筋为 $\phi 8\text{ mm}$ 的 HRB400 普通钢筋。左侧混凝土板的压电智能骨料驱动器 (SA1) 放在钢板肋的一侧, 与横向方向偏 45° , 距构造钢筋 15 mm , 和贯穿钢筋在同一水平面上。压电陶瓷传感器 (PZT1 和 PZT2) 贴在 H 型钢翼缘两侧。右侧混凝土板的压电智能骨料驱动器 (SA2) 放在距开孔钢板边缘 20 mm 处, 与贯穿钢筋保持水平。压电陶瓷传感器 (PZT3) 贴在 H 型钢距腹板 10 mm 的翼缘一侧。试验试件尺寸如图 3 所示。本试验共有两个试件: ① 试件 P1, 为了消除混凝土板和 H 型钢的自然黏结力, 在交界面上涂黄油; ② 试件 P2, 在交界面上自然黏结, 未涂黄油。

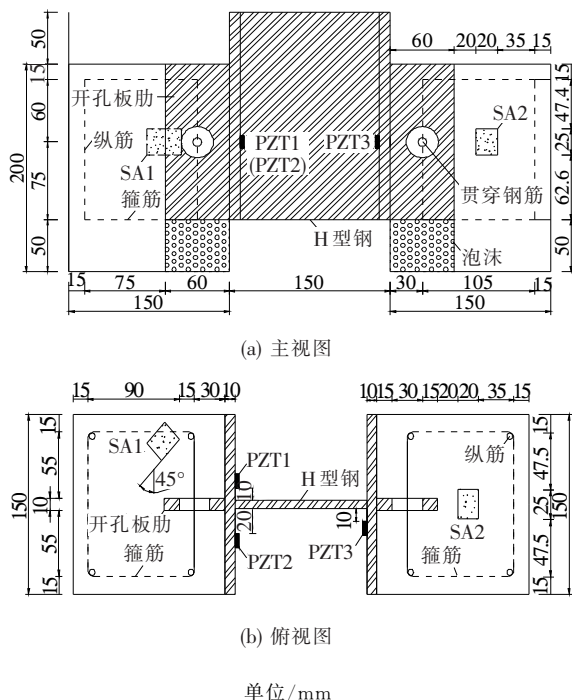


图 3 试验试件示意图

在布置智能骨料时,为使其埋置在固定位置,在绑扎钢筋笼时需要通过扎带将其固定在相应位置,以确保在浇筑混凝土的过程中智能骨料不会发生移动。在粘贴 PZT 片时,首先将专用除锈剂喷在 H 型钢腹板相应位置的表面进行除锈,并用砂纸打磨以保证 PZT 粘贴面平顺、光滑,随后涂抹上医用酒精进行清洁处理,然后用 502 胶将 PZT 片粘贴在上面,最后将 PZT 片与连接导线焊接在一起。

根据《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(TG/T D64-01-2015),计算 PBL 剪力键的抗剪承载力:

$$Q_u = 1.4f_{cd}(d_p^2 - d_t^2) + 1.2d_t^2f_{st\ o} \quad (1)$$

式中: Q_u 为单个混凝土连续销的抗剪承载力设计值, kN; f_{cd} 为混凝土轴心抗压强度设计值, MPa; d_p 为混凝土销孔直径, mm; d_t 为贯穿钢筋直径, mm; f_{st} 为贯穿钢筋的抗拉强度设计值, MPa。由公式(1)计算得到试验试件抗剪承载力的极限荷载为 120.32 kN。

2.2 加载过程

加载装置包括与 PBL 剪力键相连的钢混组合结构试件、千斤顶、力传感器、垫块和钢板等,如图 4 所示。压电陶瓷选用 PZT-5H 剪切型圆片,其直径为 7.4 mm,厚度为 1.3 mm。试验信号发

射采集板卡 NI-6363 分别与笔记本电脑、PZT 和智能骨料相连,共同组成基于压电波动法的剪力键滑移损伤监测系统。通过 NI-6363 激励混凝土板内部的智能骨料发射正弦扫频激励信号,并由 PZT 接收该信号。然后分析在各个工况下信号的差异,识别试件损伤程度,从而实现 PBL 剪力键的滑移损伤监测。在加载装置中,采用百分表测试 H 型钢与混凝土测点之间的相对滑移,百分表的量程为 30 mm。为了方便测试,提前将四个钢片固定在混凝土板上,将百分表磁座吸附在 H 型钢的腹板上,并将百分表的指针压在混凝土板的钢片上,这样可以保证百分表的针头与剪力键在同一水平面上。

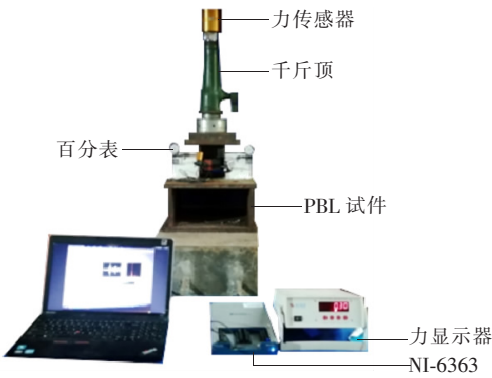


图 4 试验加载装置
Fig. 4 Test loading devices

试验加载过程分为两个阶段:第一阶段通过改变力的大小控制加载,将 0 作为初始工况,之后以 22 kN 为一级进行加载,直至加载到极限承载力;第二阶段用位移控制加载,以每增加 2 mm 相对滑移作为一个工况,直至试件破坏。在开始加载前,为了保证试件中心与千斤顶中心对齐,应对加载端顶部的钢板部位进行打磨。为了增大试件和底部之间的摩擦力需在底部铺上一层细沙,以免试验中出现侧向滑移。在千斤顶和 H 型钢之间设置钢板,以确保 H 型钢的翼缘均匀受力。开始加载后,通过 LabVIEW 控制 NI-6363 激励智能骨料驱动器发射应力波信号,在每个工况加载到既定荷载或位移时待百分表读数稳定后,再用 NI-6363 记录 PZT 接收到的响应信号。试验选用的激励信号为扫频范围 $100\sim1.5\times10^5$ Hz 的正弦扫频信号,信号周期为 1 s,电压幅值为 10 V。在

试验结束后,用“db2”小波包基函数对试验结果进行滤波和小波包能量分析。

3 结果分析与讨论

3.1 试件破坏过程分析

试件 P1 的实测极限荷载为 118 kN,与极限荷载理论计算值 120.32 kN 相差不大;试件 P2 的实测极限荷载仅为 105 kN,与极限荷载理论计算值 120.32 kN 相差较大,相对误差约为 12.7%。这主要是由于试件 P2 在加载过程中出现了偏心,导致两侧的混凝土板受力不均匀,使其实测极限荷载偏小。图 5 为试验试件的荷载与相对滑移关系曲线。从图 5 中可以看出,试件 P1 在荷载加载到 88 kN 前,滑移量较小,混凝土榫主要承担了开孔钢板与混凝土之间作用力的剪力;在持续增大荷载,直至增大到极限承载力的过程中,由于混凝土上部受剪压、下部受剪拉的共同作用,促使混凝土逐渐发生形变,且 H 型钢与混凝土界面发生脱离,孔内与孔外混凝土在竖向荷载作用下呈现剪切滑移趋势;在加载到抗剪极限承载力之后,力不再增加且适当降低,滑移迅速增大,H 型钢与混凝土之间的作用力已基本消失。由于贯穿钢筋的存在,其限制区域内的混凝土整体良好,而限制区域外的混凝土则容易沿斜裂纹发生脱离。当荷载在 88 kN 以内时,试件 P2 和试件 P1 的荷载与相对滑移关系曲线基本重合,这说明型钢与混凝土板之间的黏结作用对 PBL 剪力键的荷载与相对滑移关系曲线影响较小;当荷载大于 88 kN 时,试件 P2 在加载过程中出现了偏心,导致两侧混凝土板受力不均匀,所以试件 P2 的曲线变化趋势与试件 P1 的曲线变化趋势存在较大差异。

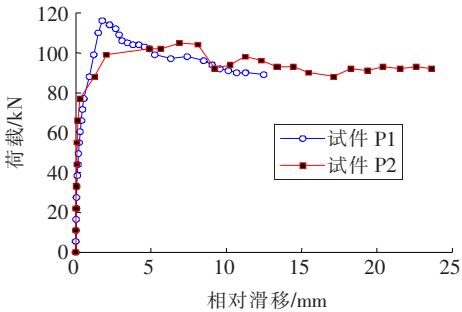


图 5 荷载与相对滑移关系曲线
Fig. 5 Relation curve of loads and relative slips

在荷载加载到 110 kN 时,试件 P1 背面开始出现若干条竖向裂纹;在相对滑移为 4 mm 时,混凝土板底面出现斜向裂纹。在荷载加载到 44 kN 时,试件 P2 的混凝土板背面开始出现裂纹,随着荷载的不断增大,裂纹向斜上方发展,裂纹变宽、加深,最终贯穿整个混凝土板背面。

在加载结束后,PBL 剪力键的混凝土榫存在明显的压缩变形和剪切破坏,贯穿钢筋明显变弯,但钢板圆孔基本没有变形。说明在整个滑移阶段,在贯穿钢筋与钢板的协同作用下试件的混凝土榫一直处于多轴受力状态,较好地发挥了销栓的作用。尽管混凝土榫处于三向受力状态,但是由于第一主应力值和第三主应力值相差较大,造成剪力键产生斜剪破坏,最终表现为上部混凝土榫被压碎。

3.2 时域信号分析

时域分析是指对时域信号中的幅值以及其他统计特征进行分析。这种分析具有直观、简单、明确等优点,是目前常用的分析方法之一^[12]。只要将试验中 PZT 所采集到的响应信号用 LabVIEW 和 MATLAB 进行分析,就可得出相应的时域信号图。由于压电陶瓷 PZT1 与 PZT2 的监测功能具有相似性,且本研究主要是监测 PBL 剪力键的滑移损伤,

故后续分析中将不列出 PZT1 的响应信号图。

图 6 和图 7 为试件 P1 的 PZT2 和 PZT3 时域信号图。图中工况 1~9 分别对应荷载 0、荷载 22 kN、荷载 44 kN、荷载 66 kN、荷载 88 kN、荷载 110 kN、荷载 118 kN、滑移 2 mm、滑移 4 mm。

图 8 和图 9 为试件 P2 的 PZT2 和 PZT3 时域信号图,图中工况 1~10 分别对应荷载 0、荷载 22 kN、荷载 44 kN、荷载 66 kN、荷载 88 kN、荷载 105 kN、滑移 2 mm、滑移 4 mm、滑移 6 mm 及滑移 8 mm。

由图 6~9 可知:试件 P1 的 PZT2 最大响应幅值范围为 $-0.005\sim0.005$ V,PZT3 最大响应幅值范围为 $-0.004\sim0.004$ V;试件 P2 的 PZT2 最大响应幅值范围为 $-0.007\sim0.007$ V,PZT3 最大响应幅值范围为 $-0.003\sim0.003$ V。同一试件的 PZT2 最大响应幅值比 PZT3 的大,这是因为前者的应力波传播距离较短,耗能较少;后者传播距离较长,耗能较多,并且应力波在传播过程中要经过 PBL 剪力键,传播界面增加,能耗也随之增大。

对于试件 P1,在荷载从 0 增加到 22 kN 的过程中,时域信号图的幅值没有发生明显下降,这是因为在其钢混界面涂了黄油,界面更加紧密,应力波耗散少;在荷载从 110 kN 加载直至产生 2 mm

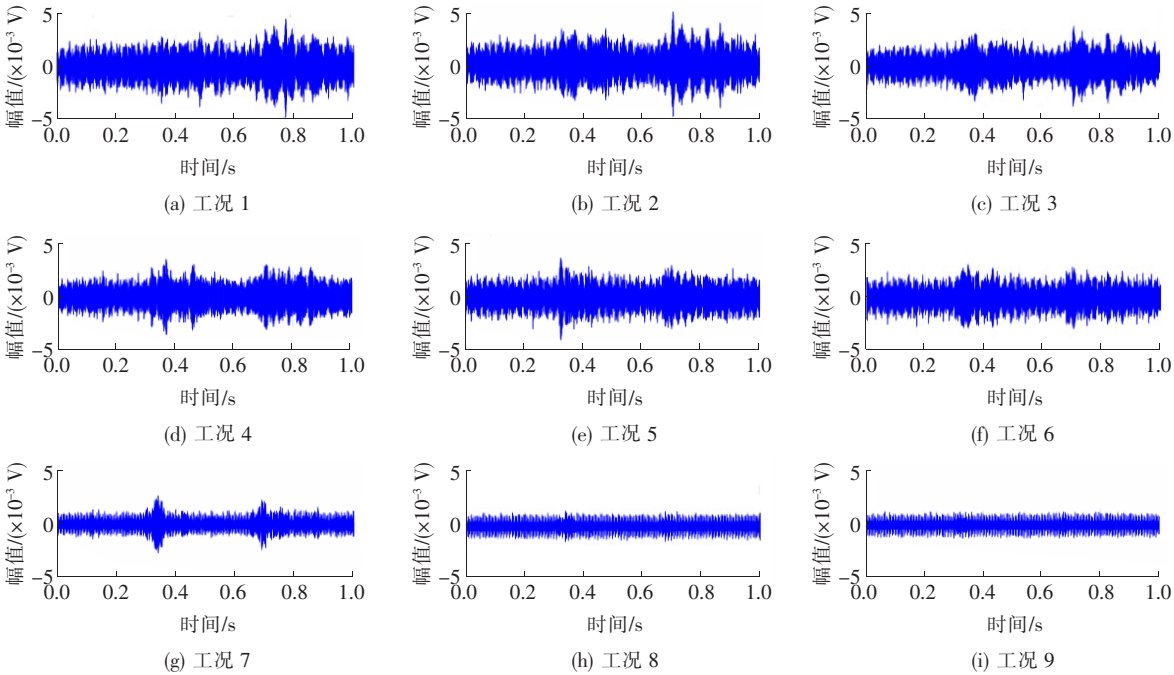


图 6 试件 P1 的 PZT2 时域信号图

Fig. 6 PZT2 time domain signals of specimen P1

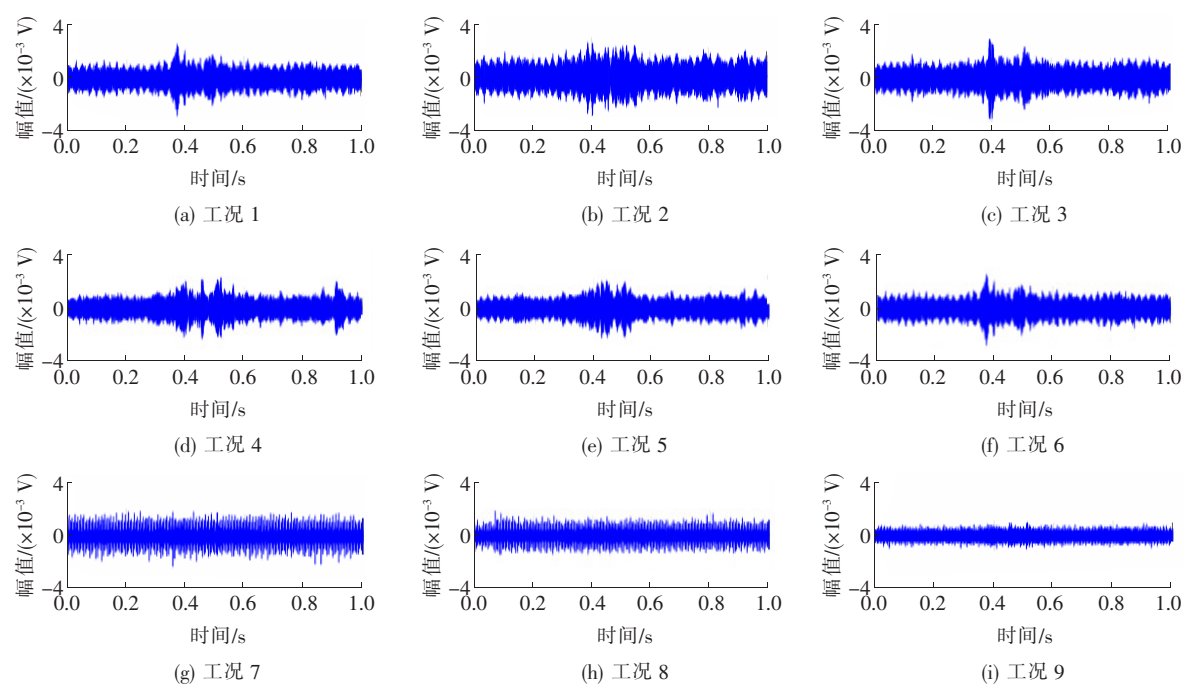


图 7 试件 P1 的 PZT3 时域信号图

Fig. 7 PZT3 time domain signals of specimen P1

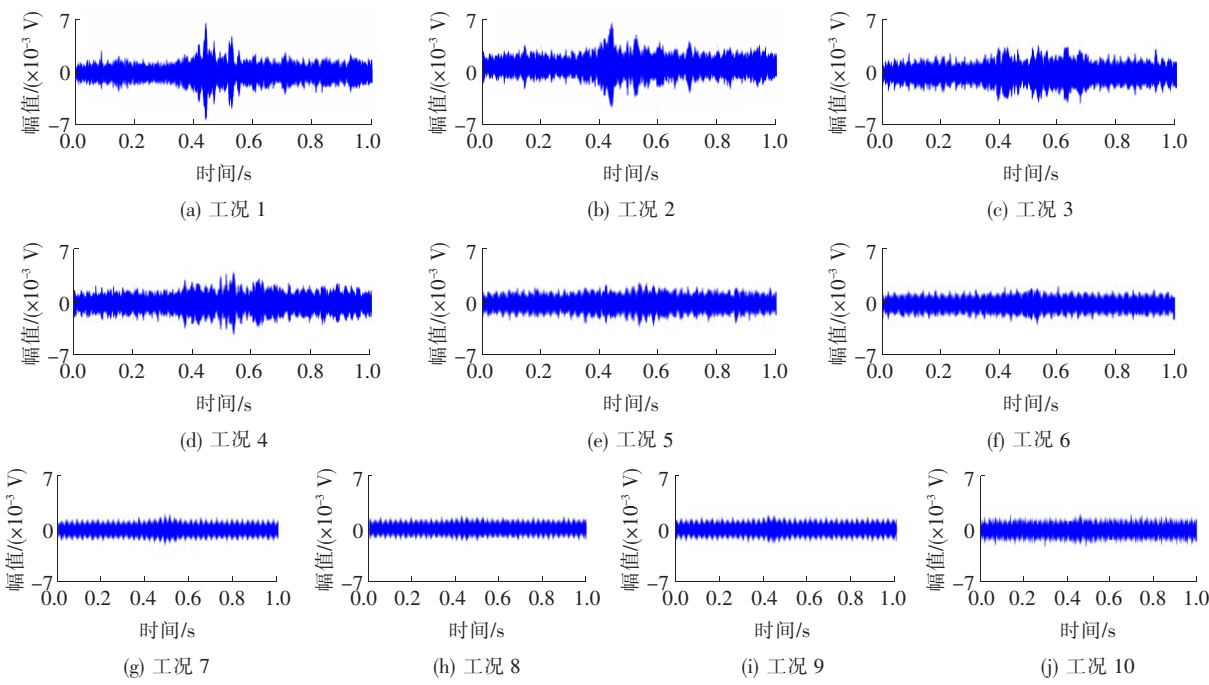


图 8 试件 P2 的 PZT2 时域信号图

Fig. 8 PZT2 time domain signals of specimen P2

滑移的过程中,时域信号图的幅值发生明显下降,这是因为试件开孔钢板处的混凝土樁出现了破坏,应力波耗散增大。

对于试件 P2,在荷载从 88 kN 加载直至产生 2 mm 滑移的过程中,PZT2 时域信号图的幅值发

生明显下降,而 PZT3 时域信号图的幅值下降不明显。这是因为试件 P2 在加载过程中出现了偏心,且为向左偏心,导致左侧混凝土板受力远大于右侧混凝土板,相应地左侧混凝土樁破坏也更严重,应力波耗散也更多。

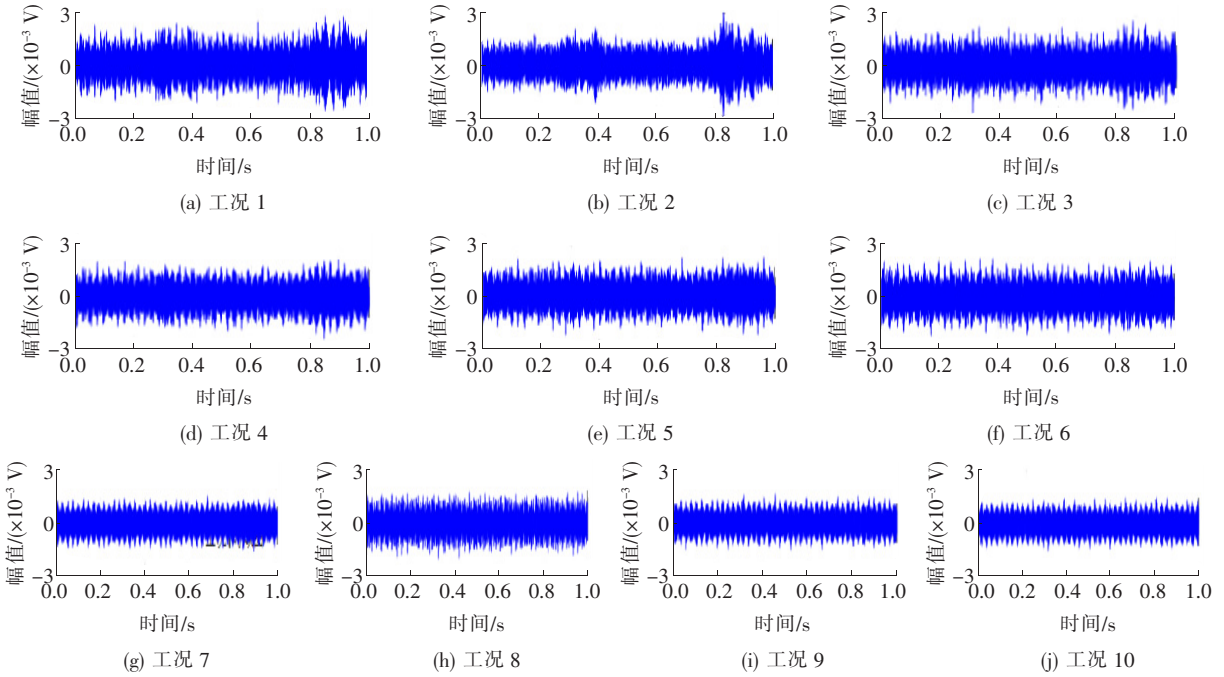


图 9 试件 P2 的 PZT3 时域信号图

Fig. 9 PZT3 time domain signals of specimen P2

3.3 小波包能量分析

应力波信号会以各种形式传播,如纵波、横波、边界反射波及混合应力波等。区别这些波需要考虑实际工程环境、结构材料及形式等因素。由于应力波的能量更容易从应力波的各种特性中被提取,且可以在不同工况之间进行比较,因此本研究对应力波的能量进行分析。

小波包能量是通过小波包分析将信号投影到一组互相正交的小波函数构成的子空间上,使信号在不同尺度上展开,所提取到的不同频带上的能量信号特征。在小波包能量分析中,假设传感器接收到的信号为 \mathbf{X} ,当对其进行 i 层小波包分析时,在最后一层会形成不同频带的 2^n 个子信号,则原始信号 \mathbf{X} 可表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \cdots + \mathbf{X}_{2^n}. \quad (2)$$

在原始信号被分解为 n 层后,第 n 层第 j 个信号可表示为:

$$\mathbf{X}_j = [\mathbf{X}_{j1}, \mathbf{X}_{j2}, \cdots, \mathbf{X}_{jm}]. \quad (3)$$

式中: m 为信号采样点的数量; j 为初始信号被分解后第 n 层采样点的数量,且 $1 \leq j \leq 2^n$ 。则该采样点的信号能量可定义为:

$$E_{nj} = \|\mathbf{X}_j\|^2 = \mathbf{X}_{j1}^2 + \mathbf{X}_{j2}^2 + \cdots + \mathbf{X}_{jm}^2. \quad (4)$$

因此,信号 \mathbf{X} 的小波包总能量为:

$$E = E_{n1} + E_{n2} + \cdots + E_{n2^n} = \sum_{k=1}^{2^n} E_{nk}. \quad (5)$$

根据小波包分析理论,对 PZT 接收到的响应信号进行小波包能量分析^[13]。当结构处于健康状态时,信号在传递过程中损失较少,响应信号的小波包能量值较高;当结构开始出现损伤且损伤逐渐扩大时,信号的损失也逐渐增加,相应的响应信号的能量值也逐渐降低。

图 10 显示了试件 P1 的小波包能量。从图 10 可以看出,从荷载 0 到荷载 110 kN,试件 P1 的小波包能量逐渐下降,这是因为 PBL 剪力键开始易受到损伤,随着荷载的不断增加,这种损伤及应力波的耗散也都在逐渐增加。由于两侧混凝土板内应力波的耗散量不一致,在每级加载过程中 PZT2 的小波包能量损失率都大于 PZT3 的小波包能量损失率,这说明 PZT2 所监测的孔洞内的混凝土樁承担了主要剪力。在荷载 66 kN 和 118 kN 时,小波包能量急剧下降,前者是因为试件在荷载 66 kN 时开始产生较为明显的滑移(通过分析荷载与相对滑移关系曲线可知),导致钢混界面出现空隙,应力波的耗散进一步增加;后者是因为试件 P1 在荷载 118 kN 时达到抗剪极限荷载,混凝土樁被

压溃破坏,此时 H 型钢与混凝土板发生脱离。在滑移 2 mm 到滑移 4 mm 时,小波包能量损失率接近 100%,这是因为 PBL 剪力键已完全失效,H 型钢与混凝土之间的作用力已基本消失。

图 11 显示了试件 P2 的小波包能量。从图 11 可以看出,从荷载 0 到荷载 44 kN,试件 P2 的 PZT2 和 PZT3 小波包能量损失率分别为 46.5%

和 35.8%,大于试件 P1 的 41.8%和 26.9%,这是因为试件 P1 的钢混界面被涂了黄油,界面更加紧密,与 P2 的自然黏结状态相比,应力波耗散较少。由于试件 P2 在加载过程中出现了向左偏心,所以 PZT2 的小波包能量在荷载 88 kN 时发生了急剧下降,小波包能量损失了 79.8%,而 PZT3 的小波包能量只损失了 6%。

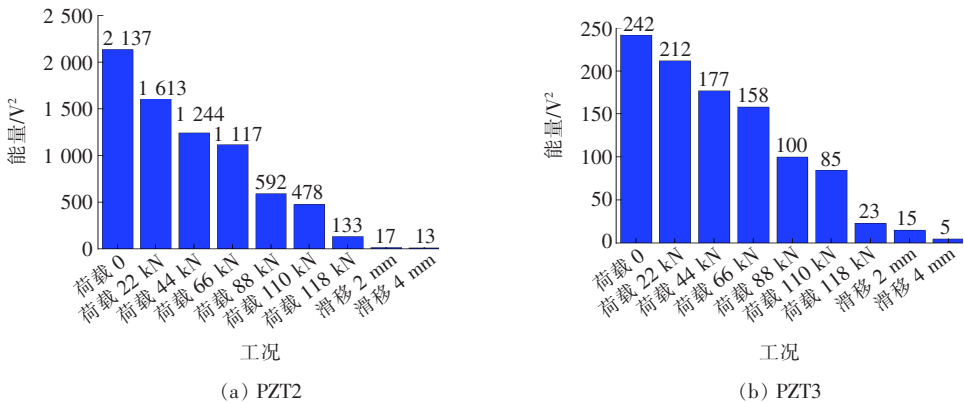


图 10 试件 P1 的小波包能量

Fig. 10 Wavelet packet energy of specimen P1

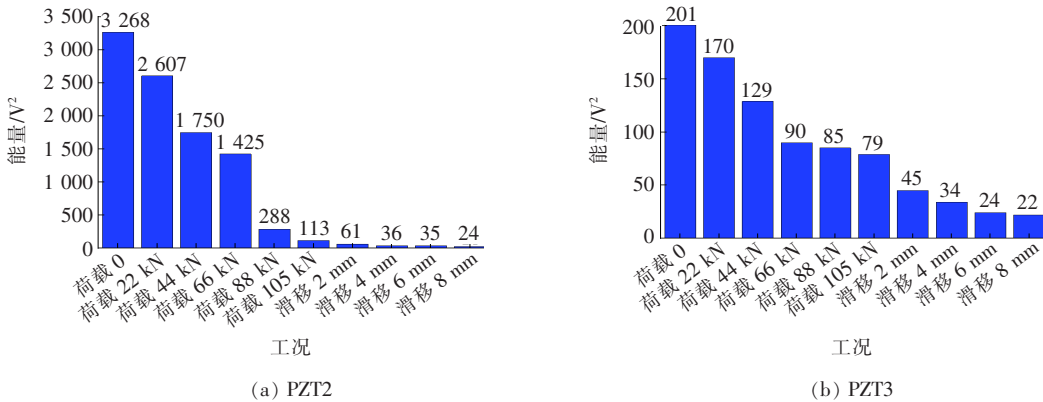


图 11 试件 P2 的小波包能量

Fig. 11 Wavelet packet energy of specimen P2

4 结论

1) 当荷载从 0 加载到 44 kN 时,试件 P1 的 PZT 小波包能量损失率为 41.8%和 26.9%,试件 P2 的 PZT 小波包能量损失率为 46.5%和 35.8%,说明黄油可以增加钢混界面结合的紧密性,减少应力波在传播过程中的耗散。

2) 当增大荷载到抗剪极限荷载,且 PBL 剪力键的混凝土榫发生剪切破坏时,压电陶瓷传感器

接收到的响应信号急剧下降;当 PBL 剪力键完全失效时,压电陶瓷传感器接收到的响应信号变得很小甚至接近于零。因此,根据压电陶瓷传感器接收到的响应信号能够非常准确地判断钢混组合结构 PBL 剪力键的滑移损伤程度。

3) 在试验过程中,试件 P2 在荷载加载到 88 kN 时,PZT2 的小波包能量损失率达到了 79.8%,远远大于 PZT3 的小波包能量损失率 6%,说明在该状态下试件 P2 产生了较大的向左偏心,这进一步验证了基于压电陶瓷的钢混组合

结构 PBL 剪力键滑移损伤监测方法的可行性和有效性。

〔参考文献〕

- [1] 汪维安,李乔,赵灿晖.混合结构 PBL 剪力键群承载力试验研究[J].土木工程学报,2014,16(6):109-117.
WANG Wei-an, LI Qiao, ZHAO Can-hui. Experimental study on bearing capacity of PBL shear bond groups in mixed structures[J]. Journal of Civil Engineering, 2014, 16(6): 109-117.
- [2] 赵卫平,雷永旺,尹鹏.钢管混凝土界面黏结破坏的声发射特征及时空演化机制[J].建筑结构学报,2020,5(2):10-20.
ZHAO Wei-ping, LEI Yong-wang, YIN Peng. Acoustic emission characteristics and temporal and spatial evolution mechanism of bond failure of concrete filled steel tubular interfaces[J]. Journal of Architectural Structure, 2020, 5(2): 10-20.
- [3] 陈爽.湿热海洋环境下 FRP 筋一珊瑚混凝土黏结滑移性能研究[D].南宁:广西大学,2019.
CHEN Shuang. Study on bond-slip behavior of FRP tendons-coral concrete in wet and hot marine environment[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [4] 孙曼,植涌,刘浩吾.组合结构界面滑移变形全过程的光纤光栅传感检测[J].四川大学学报:工程科学版,2005,6(9):43-45.
SUN Man, ZHI Yong, LIU Hao-wu. Fiber bragg grating sensing detection for the whole process of structural interface slip deformation[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 6(9): 43-45.
- [5] 肖家浩,饶玉龙,李勇.基于压电波动法的混凝土损伤检测[J].四川建材,2019,45(9):32-33.
XIAO Jia-hao, RAO Yu-long, LI Yong. Concrete damage detection based on piezoelectric wave method [J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(9): 32-33.
- [6] Jiang T Y, Wu Q L, Wang L. Monitoring of bolt looseness-induced damage in steel truss arch structure using piezoceramic transducers[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6 677-6 685.
- [7] 胡鸿,罗凯,王甜,等.压电陶瓷材料发展概况[J].信息记录材料,2016,17(4):1-2.
HU Hong, LUO Kai, WANG Tian, et al. Development of piezoelectric ceramics[J]. Information Recording Materials, 2016, 17(4): 1-2.
- [8] 张福学.现代压电学[M].北京:科学出版社,2002.
ZHANG Fu-xue. Modern piezoelectricity [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [9] 彭帅.基于压电陶瓷的型钢一混凝土梁损伤监测[D].长沙:湖南大学,2013.
PENG Shuai. Shaped steel based on piezoelectric ceramics damage monitoring of concrete beams[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [10] 代永.利用压电声波的组合结构界面损伤监测研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2016.
DAI Yong. Study on interface damage monitoring of composite structures using piezoelectric acoustic waves[D]. Shenyang: Shenyang Architecture University, 2016.
- [11] 肖林.钢混组合结构中 PBL 剪力键的静力及疲劳性能研究[D].成都:西南交通大学,2011.
XIAO Lin. Experimental study on bearing capacity of PBL shear key in steel-concrete composite structure[D]. Chengdu: Southwest Traffic University, 2011.
- [12] 张兢,徐霞,张志文.基于压电陶瓷的结构损伤检测技术[J].压电与声光,2006,28(3):350-352.
ZHANG Jing, XU Xia, ZHANG Zhi-wen. Structural damage detection technology based on piezoelectric ceramics[J]. Piezoelectric and Acoustooptic, 2006, 28(3): 350-352.
- [13] 朱劲松,孙雅丹.基于小波包能量的桥梁损伤识别指标[J].振动、测试与诊断,2015,35(4):715-721.
ZHU Jin-song, SUN Ya-dan. Bridge damage identification index based on wavelet packet energy[J]. Vibration, Test and Diagnosis, 2015, 35(4): 715-721.