

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.12.051

栓钉剪力键裂纹的超声波探伤研究

朱毅¹, 沈至毅¹, 国凯²

(1. 上海地铁维护保障有限公司工务分公司, 上海市 200233; 2. 同济大学土木工程学院, 上海市 200092)

摘要: 钢-混凝土组合梁中栓钉剪力连接件的疲劳问题已引起人们的重视, 但目前尚缺乏有效的栓钉疲劳裂纹检测方法。为此, 通过疲劳试验在推出试件上制造带裂纹的栓钉, 并进行相应的超声波探伤检测。试验发现超声波可以检出栓钉中的疲劳裂纹, 但存在较高的漏检率。

关键词: 栓钉连接件; 推出试验; 疲劳寿命; 超声波探伤

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)12-0190-04

0 引言

钢-混凝土组合梁结构是在钢结构与钢筋混凝土结构的基础上发展起来的一种新型结构, 它充分利用了钢结构和混凝土结构各自的优点。随着桥面板混凝土易开裂的弊病被克服, 这种结构经济环保、施工便捷、抗震性能佳、工厂化水平高等优势得到了充分展示。近几十年来, 钢-混凝土组合梁在国内外高层建筑、多层工业厂房、特别是桥梁领域得到了越来越多的应用, 仅在法国就有85%的公路桥梁和45%的高铁桥梁采用了这种结构形式^[1]。

然而此类结构在实际工程中的推广应用面临着不小的挑战, 其中的主要因素之一是栓钉剪力键的疲劳问题。疲劳破坏是桥梁结构特别是桥梁钢结构的主要破坏形式之一, 具有隐蔽性与突然性, 并屡屡造成重大人身财产损失。组合结构梁的疲劳问题尚未获得足够重视的原因一是其应用历史不长, 迄今并未出现现实桥剪力键破坏的案例, 使工程界对其病害特征和失效机理的认识不够深刻; 二是栓钉剪力键被包裹在混凝土中, 相比钢结构疲劳更难以发现, 病害的隐蔽性比普通钢结构更高, 容易被忽视。

目前涉及栓钉剪力键疲劳损伤检测的研究较少, Ovuoaba等^[2]将栓钉周边混凝土凿除后采用漏磁法和渗透法进行了栓钉裂缝检测。但这种方法需要破坏桥面板, 推广价值不高。Liu等^[3]采用数值模拟方法研究了根据小波变换检测栓钉损伤的可能性, 但其研究成果是基于剪力钉群的整体破坏, 且缺乏试验验证。邝燕珊^[4]通过试验方法研究了声

发射监测栓钉破坏的可能性, 但认为在实桥应用前还需开发更好的消噪技术。李嘉等^[5]则通过在疲劳试验过程中间隔实施静载试验的结果作为判断疲劳破坏发生的依据。显然, 不论从技术角度还是从经济角度来看, 以上方法均不适用于组合结构桥梁中栓钉的疲劳损伤检验。

为有效检测栓钉疲劳, 便利实验室与现场检测相关研究, 本项目尝试采用传统的超声波探伤技术对栓钉的疲劳裂纹扩展进行检测, 验证超声波探伤方法对栓钉疲劳裂纹的敏感性。研究以上海市轨道交通4号线上的栓钉组合桥梁为研究对象, 通过结构的足尺推出试验模型进行疲劳加载以形成裂纹, 并进行相应的检测。

1 试验设置

本研究制作了3个规格相同的试件, 如图1所示。试件所采用栓钉为ML15材质的 $\phi 22$ mm栓钉, 钉长180 mm; 工字钢采用Q345C加工, 其腹板和翼缘厚度均为14 mm, 板宽均为200 mm; 混凝土为C35级, 内部钢筋为直径20 mm的HRB335。试件中除腹板宽度外, 其余参数均与实桥结构相同。

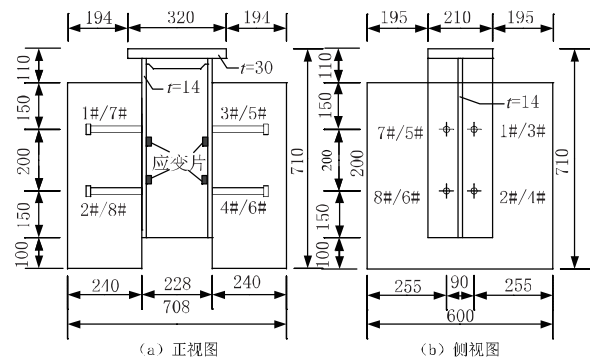


图1 试件规格(单位: mm)

试验采用PMW-400-500型电液伺服疲劳作

收稿日期: 2020-05-18

作者简介: 朱毅(1986—), 男, 学士, 工程师, 从事桥梁维护技术管理工作。

动器按正弦荷载进行加载,应力比控制为0.1,加载频率为4 Hz。试件的疲劳加载设置见表1。

表1 试件疲劳加载设置

编号	最小吨位/t	最大吨位/t	剪应力幅/MPa	理论疲劳寿命/次
A	3.3	33.3	98.6	959 840
B	4.0	40.0	118.4	223 228
C	3.8	38.0	111.8	352 645

为检测试件的损伤状况,在翼板的栓钉背面一侧布置了应变片。应变片位于上下排栓钉之间,距最近栓钉焊趾约25 mm(见图1)。从理论上来说,栓钉一旦出现开裂,由于相应的刚度变化,将导致单钉承受的剪力重分布,应变片记录的动应变将出现明显变化,当栓钉彻底破坏时,应变记录为0。

整个加载过程分2个阶段(见图2):阶段1实施超声波探伤;阶段2实施疲劳加载,疲劳荷载 P 在 P_{max} 和 P_{min} 间循环。由于超声探伤检测员并没有常驻试验室,每次实施超声检测都需和检测员临时约定时间,因此阶段2中每次疲劳加载的次数并非恒定,仅要求每阶段的疲劳加载次数 N 不少于360 000次。

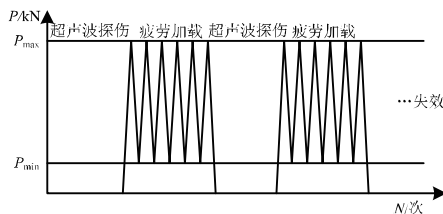


图2 疲劳加载过程

2 试验结果

3个试件均加载至疲劳破坏,其中试件A疲劳加载达到 3.28×10^6 次时发生明显的疲劳破坏,之后发现2#与8#栓钉断裂;试件B在疲劳加载达到累计加载 0.89×10^6 次时疲劳破坏,4#与6#栓钉疲劳断裂;试件C加载至 0.13×10^6 次时疲劳破坏,4#与6#栓钉相继断裂。图3为这些栓钉的断口形貌。

由图3可见:

(1)大多数疲劳裂纹均起始于栓钉表面的焊接缺陷处,裂纹面仅有1个。但图3(b)所示的试件A-8#栓钉出现了2条裂纹,第1条裂纹出现在栓钉和翼板界面附近,其裂纹延伸超过钉杆焊趾范围;第2条裂纹出现在远离焊缝的钉身上,并最终破坏。仔细观察可见,试件A-8#钉杆第2条裂缝边缘存在着钉身初始缺陷。

(2)疲劳裂纹大致平行于剪力方向,未见垂直

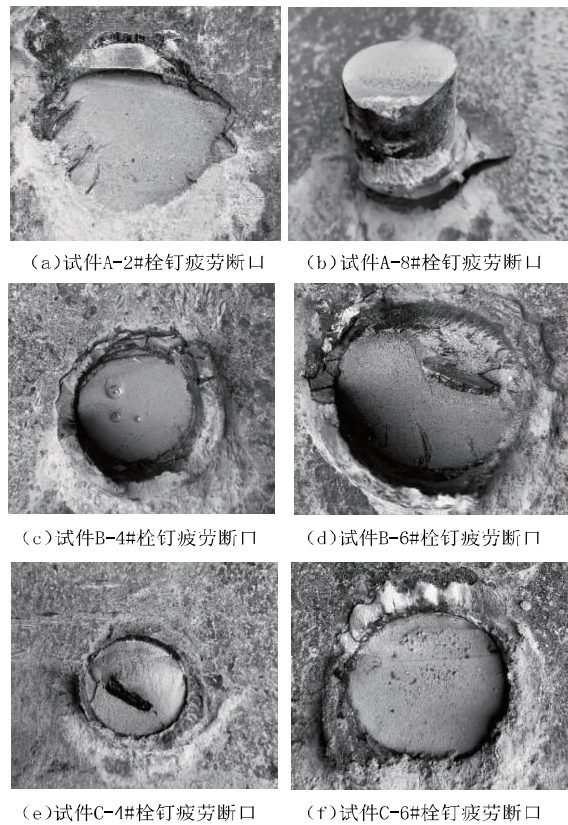


图3 栓钉疲劳断口形态

翼板的裂纹出现。

(3)裂纹面可分为2个区域。在疲劳裂纹扩展阶段裂纹表面为光滑平面,但在临近断裂时断口变得不规则并形成剪切唇。

为了评价栓钉的疲劳性能,收集了若干推出试验的疲劳数据,与本次试验数据一并绘于图4中。由图4可见,大多数试验数据的变化趋势与EuroCode提供的应力(S)-疲劳寿命(N)曲线相似。本次试验栓钉的疲劳抗力落在图4所示EuroCode提供的 $S-N$ 曲线上方,说明上海轨道交通组合梁栓钉剪力键的疲劳抗力略高于EuroCode,因此按EuroCode进行计算将得到偏于保守的结果。图中 $\Delta\tau$ 为剪应力幅。

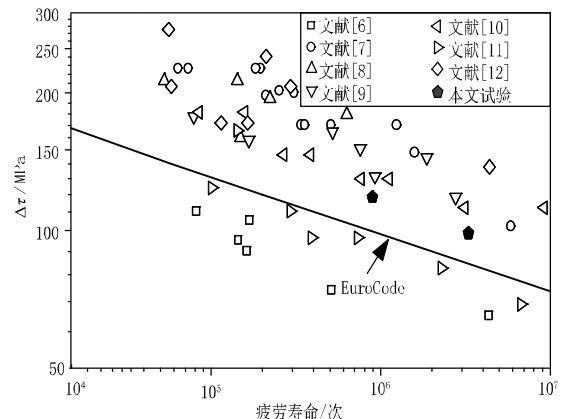


图4 EuroCode提供的 $S-N$ 曲线与疲劳试验数据^[6-12]

3 超声波探伤

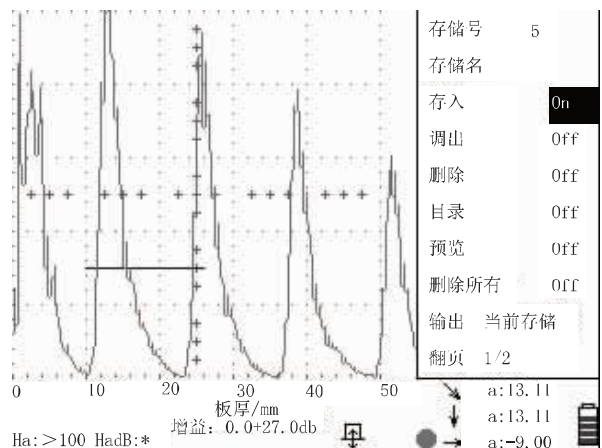
超声探伤采用汕头超声仪器研究所生产的CTS-9006数字超声探伤仪,超声探头采用晶片直径14 mm(与板厚相应)的直探头,耦合剂采用机油。

试件A在加载次数为0次、 0.86×10^6 次、 1.24×10^6 次、 2.20×10^6 次、 2.87×10^6 次时停机进行了超声波探伤。试件B在加载次数为0次、 0.70×10^6 次时停机进行了超声波探伤。试件C由于疲劳寿命短,仅在加载次数为0次时进行了超声波探伤。

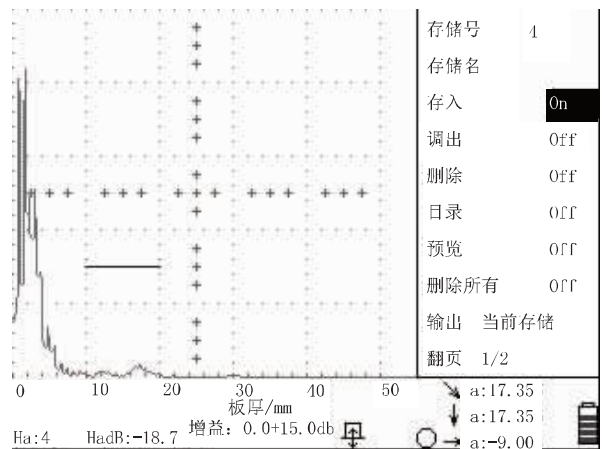
在试验前对试件的检测中发现,栓钉与翼板-混凝土界面形成的超声波信号有明显区别(见图5)。当超声波打在钢-混凝土界面上时,由于界面分界清晰,回波在图5(a)横坐标对应板厚处出现峰值信号且强度很高。而当超声波打在未损伤的栓钉上时,由于没有足够大的缺陷反射超声波,在图5(b)横坐标对应板厚处几乎看不到什么峰值变化。

在试验开始后,试件A在2 870 000次时发现A-2#栓钉的超声波信号存在异常(见图5(c)),但试件A其余栓钉以及试件B的所有栓钉在历次检测中均未发现缺陷。以上检测结果可能是由于超声波探伤存在漏检所致,也可能是由于栓钉开裂有先有后,在实施检测时相关栓钉中裂纹长度没有达到在超声探伤仪上形成峰值信号的程度。

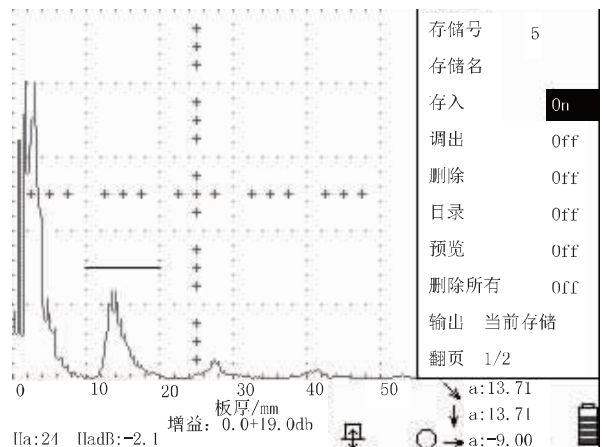
为解释以上现象,利用疲劳加载中电阻应变片记录的信息进行辅助分析。图6为部分应变测点的测量结果。其中A-8#栓钉和A-5#栓钉附近的应变片在疲劳加载过程中发生了2次应变突变(见图6(a)):第1次发生在疲劳寿命 1.25×10^6 次时,随后2个栓钉的应变逐步增高;第2次发生在疲劳寿命 2.30×10^6 次时,随后A-8#栓钉的应变值降低,而A-5#栓钉的应变值继续增加。结合超声波探伤情况来看,在试件A中仅A-2#栓钉检出开裂,至少说明该栓钉的疲劳裂纹在试件A所属的8个栓钉中是最大的,则最先开裂的栓钉也极可能就是A-2#栓钉。其裂纹萌生的时刻对应于 1.25×10^6 次疲劳循环时。由于A-2#开裂,且裂纹不断扩展,使得A-8#栓钉和A-5#栓钉对应测点的应变逐步增加。第2次应变突变时A-8#栓钉对应测点的应变降低,说明这次A-8#栓钉出现了开裂。试件A疲劳破坏时A-2#和A-8#栓钉破坏,与以上推断相符。图6(b)显示栓钉B-6#在疲劳加载至 0.50×10^6 次时对应的测点发生了1次应



(a) 钢-混凝土界面



(b) 栓钉信号(无损伤)



(c) 栓钉信号(有损伤)

图5 超声波信号截图

变突变,随后应变随着加载次数增加而下降,说明B-6#在当时已经出现了裂纹。这也与试件B破坏时的检测结果相符。

从时间上来看,在试件A加载 2.87×10^6 次后,A-2#与A-8#栓钉都已出现疲劳开裂,但超声探伤仅发现先开裂的A-2#的裂纹。同样的,在试件B加载 0.70×10^6 次后,栓钉B-6#已经开裂,但超声探伤同样没有出现明显信号。这表明虽然超声波探伤可以探测到栓钉疲劳裂纹,但存在着

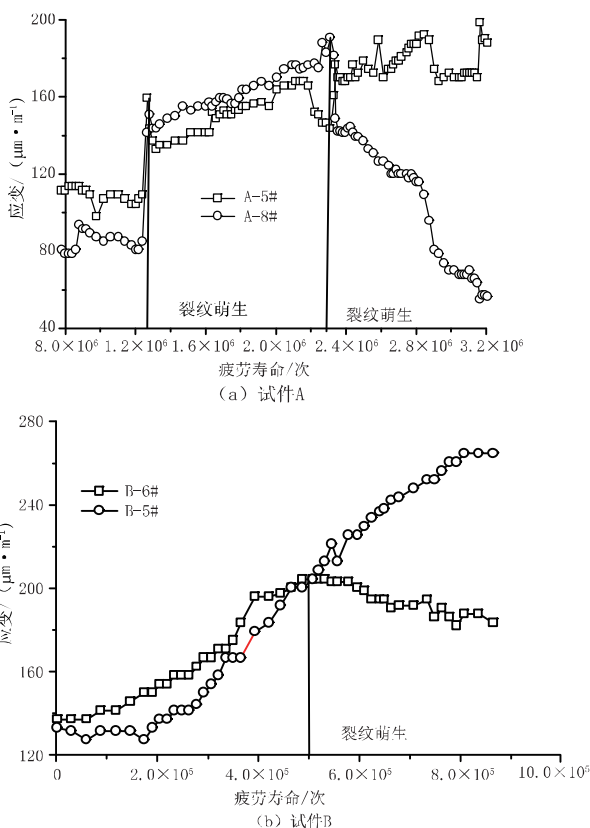


图6 测点的应变-疲劳寿命曲线

较高的漏检可能, 仅当栓钉中裂纹发展到足够大时才能有效检出疲劳裂纹。

4 结 语

(1) 本项研究中的试验数据与同类推出试件的疲劳试验结果相近, 且实测疲劳抗力均位于 EuroCode 提供的 S-N 曲线上方, 表明用 EuroCode 进行栓钉剪力键的抗疲劳检算偏保守。

(2) 通过采用直探头的超声波探伤发现了栓钉中的裂纹, 证明超声波探伤方法对栓钉疲劳开裂具有可检性。

(3) 从试验分析来看, 超声波探伤并没有发现所有的栓钉裂纹, 存在较高的漏检率。因此超声波

探伤方法的工程适用性还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 任剑. 钢-混凝土组合结构疲劳性能试验研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2006.
- [2] OVUOBA B, PRINZ G S. Investigation of residual fatigue life in shear studs of existing composite bridge girders following decades of traffic loading [J]. Engineering Structures, 2018, 161: 134-145.
- [3] LIU K, ROECK G D. Damage detection of shear connectors in composite bridges[J]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(5): 345-356.
- [4] 邝燕珊. 栓钉连接件损伤过程声发射特征研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- [5] 李嘉, 杨波, 邵旭东, 等. 钢桥面-薄层 CRRPC 组合结构栓钉连接件抗剪疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 2016(6):67-75.
- [6] LIU Yiming, ZHANG Qinghua, BAO Yi, et al. Static and fatigue push-out tests of short headed shear studs embedded in Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 29-38.
- [7] XU Chen, SUGIURA Kunitomo, SU Qingtian. Fatigue behavior of the group stud shear connectors in steel-concrete composite bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(8):1-13.
- [8] XU Chen, SU Qintian, MASUYA Hiroshi. Static and fatigue behavior of the stud shear connector in lightweight concrete[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(2): 569-581.
- [9] XU H Y, TANG X B. Research on the fatigue performance of lightweight aggregate concrete headed stud connectors[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 176(5):97-101.
- [10] SUZUKI Y, FUJIWARA Y, HIRAGI H, et al. Experimental study on shearing fatigue property of shear connectors for steel and lightweight concrete composite girder [J]. Journal of Structural Engineering, JSCE, 2005:1493-1500.
- [11] LEHMAN H G, LEW H S, TOPRAC A A. Fatigue strength of 3/4 inch studs in lightweight concrete (push-out tests)[R]. Austin, Texas, USA: Center for Highway Research and the University of Texas, 1965.
- [12] KWON G, ENGELHARDT M D, KLINGNER R E. Behavior of post-installed shear connectors under static and fatigue loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(4): 532-541.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

电话:021-55008118 传真:021-55008850 投稿及联系邮箱:cdq@smedi.com