

DOI:10.11918/202502012

装配式风电混塔干式连接竖缝抗剪性能试验

黄赐荣^{1,2}, 张栋梁^{1,2}, 刘吉春^{3,4}, 付坤^{1,2}, 王宇航^{3,4}, 王滨^{1,2}, 何澜^{1,2}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2. 浙江华东新能科技有限公司, 杭州 311121;
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 4. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 免灌浆干式连接预应力混塔竖缝界面采用环氧树脂结构胶+弯螺栓施加预紧力共同抗剪, 相比传统的灌浆湿连接+连接钢筋的形式, 可以极大地提高现场安装效率。为此, 针对干式连接竖缝界面的抗剪性能, 以足尺试件为研究对象, 开展1个直剪静力试验和两个直剪疲劳试验。研究竖缝界面在静力剪切荷载作用下的破坏模式、黏结滑移曲线及承载力计算, 进一步重点分析竖缝界面的疲劳破坏模式、剪切刚度退化及疲劳寿命计算方法。试验研究和理论分析结果表明: 干式连接竖缝的静力、疲劳试验均发生脆性破坏模式, 界面可分为界面脱黏破坏和混凝土保护层剥离破坏两类区域, 面积占比约各50%, 弯螺栓施加预紧力可以有效提高结构胶界面的黏结抗剪能力; 荷载上限是影响竖缝剪切疲劳性能的关键因素, 且疲劳寿命与荷载上限呈负相关; 竖缝界面的抗剪能力由混凝土直接抗剪和弯螺栓预紧力产生的摩擦力共同提供, 根据叠加法推导的竖缝界面受剪承载力计算公式具有较高的精度; Fib Model Code规范公式可以对竖缝的剪切疲劳寿命进行预测, 预测结果具有较高的准确性和一定的安全富余, 具有良好的工程应用价值。

关键词: 干式连接竖缝; 疲劳性能; 受剪承载力; 寿命计算

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)02-0122-10

Experimental study on shear performance of dry-type vertical seam for modular hybrid wind turbine tower

HUANG Cirong^{1,2}, ZHANG Dongliang^{1,2}, LIU Jichun^{3,4}, FU Kun^{1,2}, WANG Yuhang^{3,4}, WANG Bin^{1,2}, HE Lan^{1,2}

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China; 2. Zhejiang Huadong Xinneng Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
4. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: The interface of dry-type vertical seam without grouting for prestressed concrete hybrid tower uses epoxy resin structural adhesive and bending bolts with pre-tension applied to resist shear. Compared with the traditional grouted wet connection with connecting steel bars, this approach can greatly improve on-site installation efficiency. Aiming at the shear performance of the vertical seam interface of dry-type connection, one direct shear static test and two direct shear fatigue tests were carried out on full-scale specimens. The failure mode, bond-slip curves, and bearing capacity calculation of the vertical seam interface under static shear loading were systematically investigated. Furthermore, the fatigue failure mode, degradation of shear stiffness, and methods for fatigue life prediction of the seam interface were further analyzed. The results of experimental research and theoretical analysis show that both static and fatigue tests of the dry-type vertical seams have brittle failure modes. The interface failures can be divided into two regions: interface debonding and delamination of the concrete protective layer—each occupying roughly 50% of the damaged area. The pre-tension applied by the bending bolts can effectively improve the shear capacity of the structural adhesive interface. The upper limit of load is the key factor affecting the shear fatigue performance of vertical seams, and the fatigue life is negatively correlated with the upper limit of load. The shear capacity of the vertical seam interface is provided jointly by the friction force generated by the direct shear of concrete and the pre-tension of the bending bolts. The calculation formula of the shear capacity of the vertical seam interface deduced by the superposition method shows high accuracy. The Fib Model Code specification formula is capable of predicting the shear fatigue life of vertical seams with commendable accuracy and a built-in safety margin, rendering it highly valuable for engineering applications.

Keywords: dry-type vertical seam; fatigue performance; shear capacity; lifetime calculation

收稿日期: 2025-02-12; 录用日期: 2025-04-21; 网络首发日期: 2025-08-12

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250812.1420.006>

基金项目: 国家自然科学基金(52221002); 重庆市杰出青年科学基金(2024NSCQ-JQX0096); 中国博士后科学基金(2023M733316)

作者简介: 黄赐荣(1995—), 男, 博士; 王宇航(1985—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘吉春, liujispring520@163.com

目前,随着风电开发向着高塔架、集约化方向迈进,钢-混凝土混合塔筒(以下简称“混塔”)已成为低风速、高湍流、高切变区域的首选结构型式^[1]。混塔是下部采用分片预制装配式混凝土塔筒,上部采用钢制塔筒,两者之间通过钢-混过渡段衔接,并整体施加预应力系统的高耸支撑体系。其中,下部混塔段竖缝以往采用灌浆湿连接,把预制混凝土分片通过U型连接钢筋和灌浆料装配成整环,但存在现场湿作业量大,施工易受环境温度限制等问题。本文研究的免灌浆干式连接竖缝^[2],创造性地取消了接缝间的灌浆步骤,采用弯螺栓加结构胶的干式连接工艺进行拼装,极大地提高了现场安装效率。装配式混塔的接缝部位起着建筑节点的枢纽作用。在塔筒事故中,疲劳失效损坏占大多数^[3],根据剪应力互等定理,混塔在承受机舱及筒身传来的千万次水平循环荷载时,干式连接竖缝会承担相同循环的竖向剪力,由此带来竖缝剪切疲劳问题。

干式连接竖缝的剪切疲劳,本质属于黏结结构的单轴疲劳范畴^[4]。中科院大连化学物理研究所^[5]最先使用改进韧性的JGN-I(A)型环氧结构胶将钢与C50 砼黏结,不论剪切还是拉伸,均造成砼破坏而胶层未损伤。随后进行耐疲劳强度试验,发现其可以应用于200万次内允许设计值范围的疲劳荷载,这对丰富结构胶的应用具有重要意义。Jen等^[6]通过试验系统地研究了搭接长度、黏结层厚度等参数对结构胶-铝合金黏结试件疲劳性能的影响,使用有限元分析寻找影响疲劳性能的关键因素。结果表明,黏结界面的应力状态是影响其疲劳性能的重要因素,通过黏结界面剥离应力与剪应力两个参数可以有效评价黏结结构的疲劳寿命。韩强^[7]采用改进的双剪试验方法,对疲劳荷载下碳纤维薄板-混凝土界面黏结滑移性能进行了理论分析和试验研究,发现界面的疲劳寿命随疲劳荷载幅值的增大而降低,建立了界面黏结强度随循环次数退化的计算公式和界面黏结刚度损伤模型。丑佳璇等^[8]开展了疲劳荷载下的单剪拔出试验,研究了疲劳荷载下表层嵌贴CFRP与混凝土界面的黏结行为与退化机制,把疲劳荷载下黏结界面的受力行为概括为弹性变形、塑性损伤、界面退化和完全剥离4个阶段,并得到了适用于该体系发生剥离破坏情况下的S-N曲线模型。彭兴财等^[9]采用拉-拉单向剪切疲劳测试评价了叶片用环氧结构胶的疲劳性能,结果发生界面破坏、基材破坏和胶层破坏3种形式。姚允武等^[10]采用界面剪切疲劳试验,研究了碳纤维与混凝土黏结界面的抗疲劳性能。结果表明,在应力比为0.2的条件下,碳纤维布与混凝土界面间的极

限黏结疲劳强度约为静黏结强度的64%,因此,建议设计时对黏结剪切强度赋予一定的安全系数。

区别于普通的黏结界面,干式连接竖缝采用弯螺栓施加预紧力对砼-胶-砼界面进行加强,竖缝的剪切疲劳特性和破坏机制更加复杂。另一方面,现阶段风电混塔设计时对干式连接竖缝的承载力及疲劳验算仍处于借鉴相关规范的起步阶段,缺乏有效的试验数据和理论支撑。因此,有必要针对干式连接竖缝的抗剪性能展开静力和疲劳试验研究。在试验基础上,进一步通过理论分析探究竖结界面的受剪承载力、疲劳损伤规律及寿命预测模型,为完善设计理论和增加工程可靠性提供依据。

1 试验

1.1 试件设计与制作

共设计3个试件(编号JS-1~JS-3),重点研究荷载幅值、荷载水平等因素对干式连接竖缝剪切疲劳性能的影响。试件JS-1进行静力加载;试件JS-2进行等幅疲劳加载,预设发生低周疲劳破坏(寿命 $<10^5$ 次);试件JS-3进行两级变幅疲劳加载(两级用#1和#2表示),预设发生高周疲劳破坏(寿命 $>10^5$ 次)。各试件具体参数如表1所示,规定 P_{\min} 为荷载下限, P_{\max} 为荷载上限, $\Delta P(P_{\max} - P_{\min})$ 为荷载幅值, $R(P_{\min}/P_{\max})$ 为荷载比, $P_m((P_{\min} + P_{\max})/2)$ 为荷载均值, $P_{u,p}$ 为按照3.1节公式预估的竖缝界面静力受剪承载力。

表1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件 编号	$P_{\min}/$ kN	$P_{\max}/$ kN	$\Delta P/$ kN	R	$P_m/$ kN	$P_{u,p}/$ kN	加载类型
JS-1	0	—	—	—	—	1 423	静力
JS-2	240	1 000	760	0.24	620	1 423	低周疲劳($<10^5$ 次)
JS-3#1	240	800	560	0.30	520	1 423	高周疲劳($>10^5$ 次)
JS-3#2	240	1 000	760	0.24	620	1 423	

注:荷载幅值、均值与荷载比的关系为 $P_m = \Delta P(1+R)/[2(1-R)]$ 。

本文研究的对象是华东院 Hybrid Tower HD 141-2500-140 m型混塔的工程原型(图1(a))。所有竖缝试件的几何参数均相同,砼-胶-砼界面按照相似比为1:1的足尺尺寸设计为260 mm×3 000 mm(图1(b))。由于混塔底部整环直径较大(往往超过8 m),且本文研究对象聚焦于局部的竖缝拼接部位,为方便制作忽略环向弧度,每片沿环切线方向化曲为直取600 mm,结构胶厚度3 mm。每个试件的黏结界面用3 mm厚结构胶(a组分与b组分质量比为3:1)均匀涂满,另采用3个8.8级M20摩擦型高

强弯螺栓辅助抗剪,每个螺栓施加 $P_w = 95 \text{ kN}$ 的预紧力。在每个板件的一端设置牛腿,以便设置集中力加载点以及消除加载时偏心弯矩的影响。界面试

验区配筋情况与实际工程保持一致,牛腿加载区配足量钢筋以消除自身变形对试验的影响。试件尺寸及详细构造如图 1 所示。

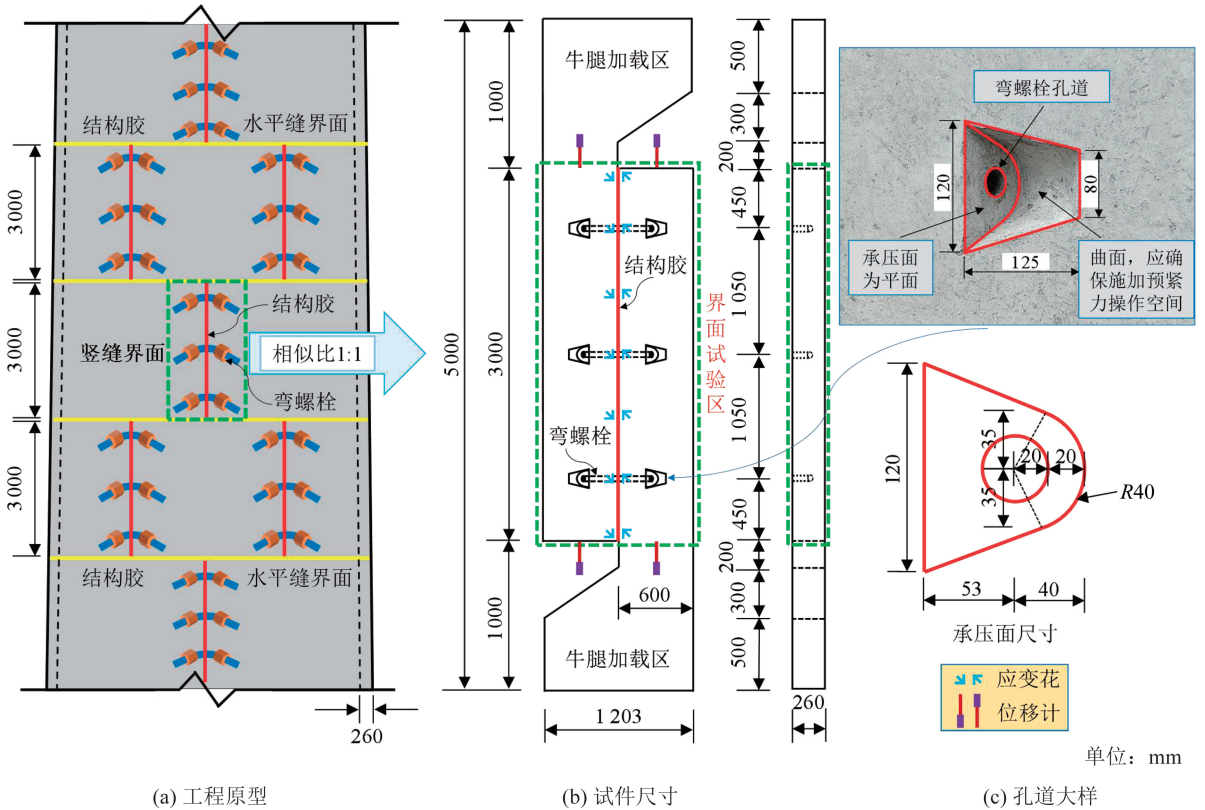


图 1 试件尺寸与详细构造

Fig. 1 Size and detailed construction of specimens

竖缝试件的制作过程如下:1)支模,并在模板内铺设钢筋网、绑扎固定,预留 PVC 管孔洞便于安装弯螺栓以及试验时固定和吊装;2)浇筑混凝土并养护 28 d,严格把控混凝土浇筑质量,避免混凝土浇筑不密实导致的“脱空”现象;3)组装试件,在竖缝界面均匀涂抹结构胶;4)等结构胶凝固后安装弯螺栓并施加预紧力。试件制作过程如图 2 所示。

1.2 材料力学性能

本试验采用 C70 商品细石混凝土,将试件浇筑同时制作的立方体试块,按照 GB/T 50081—2019^[11]测得其立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$,再用 GB 50010—2010^[12]中的转换公式计算得到轴心抗压强度标准值 f_{ck} 、轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 及弹性模量。弯螺栓采用 8.8 级 M20 摩擦型高强螺栓,强度采用 GB 50017—2017^[13]中对 8.8 级高强螺栓的规定值。结构胶的材料属性采用厂家提供的检测数据。各材料的力学性能指标汇总于表 2。

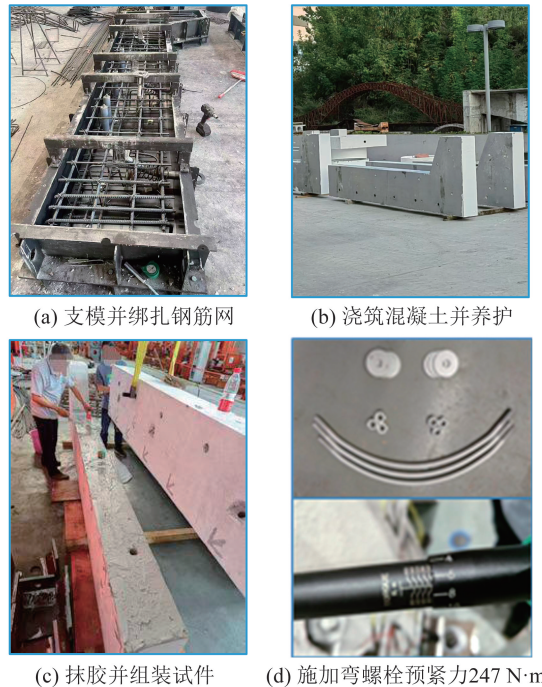


图 2 试件制作过程

Fig. 2 Fabrication of specimens

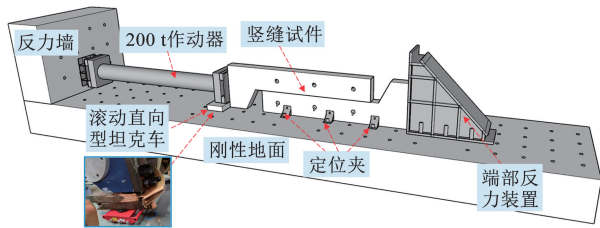
表 2 材料力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of material

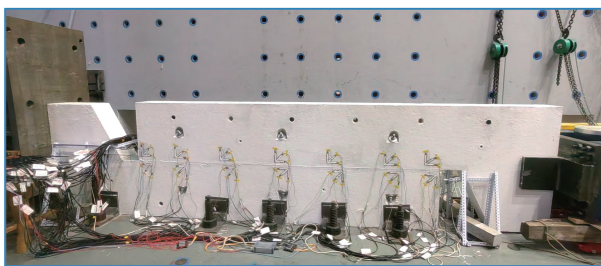
材料类型	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗剪强度/ MPa
C70 混凝土	37	59.3	—	3.30	—
8.8 级弯螺栓	206	—	640	800	370
结构胶	3.5	65	—	3.0	3.1

1.3 试验装置和加载制度

试验在重庆交通大学山区桥梁及隧道工程国家重点实验室完成, 采用 200 t MTS 作动器对倒置的试件进行水平向单点加载, 装置如图 3 所示。为消除偏心弯矩的影响, 试验前应保证作动器中心与竖缝界面在同一水平面内, 同时在试件两侧安装定位夹, 防止侧向和竖向位移。端部反力装置通过高强螺栓与刚性地面连接, 保证试件下部 L 形分片处于完全固定状态, 上部 L 形分片可在水平向自由移动。作动器加载端下面放置两个 8 t 的滚动直向型坦克车, 以克服加载时与地面的摩擦力。



(a) 示意图

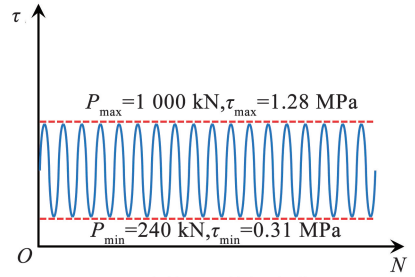


(b) 实际图

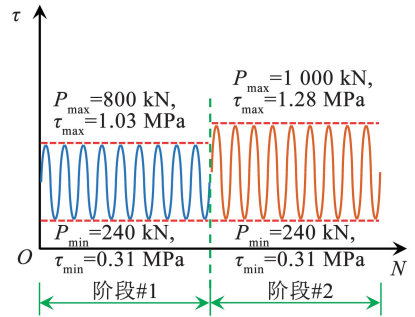
图 3 竖缝试验装置

Fig. 3 Test device of vertical joints

试件 JS-1 进行静力加载, 试件 JS-2 进行等幅疲劳加载, 试件 JS-3 进行两级变幅疲劳加载。疲劳加载频率为 3 Hz。实际加载制度如图 4 所示。当荷载循环次数分别达到 0 次及 2 万、5 万、10 万、25 万、40 万、55 万、70 万、85 万、110 万次时, 停止疲劳加载, 进行一次以 P_{max} 为上限的静力加、卸载, 并在峰值荷载处持荷, 观察并记录裂纹发展情况。



(a) 试件 JS-2 等幅疲劳



(b) 试件 JS-3 两级变幅疲劳

图 4 竖缝剪切疲劳试验加载制度

Fig. 4 Shear fatigue test loading system of vertical joints

1.4 测量方案

主要测量内容包括①界面剪力 V : 本试验荷载 P 由 MTS 作动器直接输出到动态采集设备, 同应变和位移等采集数据同步导出, $V = P$ 。②界面滑移 S : 在竖缝界面试验区端部边缘位置分别布置两个量程为 150 mm 的 LVDT 高精度位移传感器, 界面滑移取两端各自位移差值的平均值。③疲劳寿命 N : 试件的疲劳循环次数由与 MTS 作动器相连数控设备自动采集。④界面附近混凝土应变: 在靠近竖缝界面的混凝土边缘均匀布置一定数量的三轴应变花。具体测量方案如图 1 和图 5 所示, 为方便后文叙述, 规定沿界面纵切向为 x 方向, 法向为 y 方向, 并将界面试验区划分为 A ~ G 7 个区域, 试件正面是弯螺栓弯曲内侧 (塔筒内侧), 试件反面是弯螺栓弯曲外侧 (塔筒外侧)。

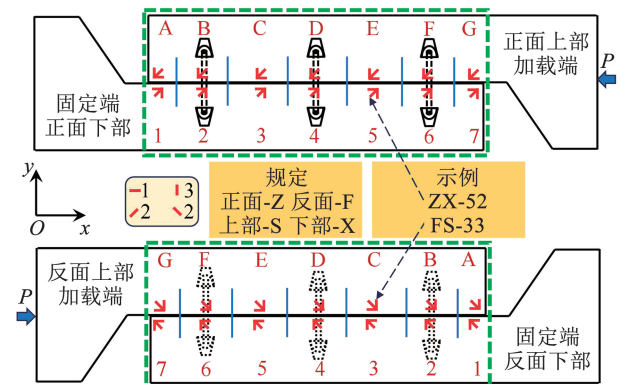


图 5 测量方案

Fig. 5 Measuring scheme

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏模式

1) 试件 JS-1。试件 JS-1 发生静力破坏, 可认为疲劳寿命为 1。加载前期试件处于弹性阶段, 无明显裂纹产生; 加载至 1 200 kN 时, 观察到多条点状分布的局部微裂纹; 加载至 1 400 kN 时, 随着一声轻微脆响, 试件从加载一端界面处突然产生一条贯穿裂缝, 此裂缝从正面和反面的端部 G 区呈现水平方向, 延伸至第 3 根弯螺栓加强部位进入 F 区后, 在下方混凝土内以斜裂缝形式继续扩展至 E 区, 如

图 6(a)和图 6(b)中所示。继续缓慢加载至 1 557 kN 时, 整个界面发生脆性破坏, 弯螺栓全部被剪断 (图 6(c))。试件破坏后测得结构胶层厚度约 3.0 mm (图 6(d)), 界面破坏情况如图 6(e)和图 6(f)所示, 大体可分为界面脱黏破坏和混凝土保护层剥离破坏两类区域。经过测算, 两类区域的面积约各占竖缝界面总面积的一半。另外可观察到有弯螺栓施加预紧力的位置, 尤其是偏正面一侧 (即弯螺栓弯曲内侧) 的区域多发生混凝土保护层剥离破坏。这说明预紧力的施加有效增加了局部结构胶界面的黏结抗剪能力。

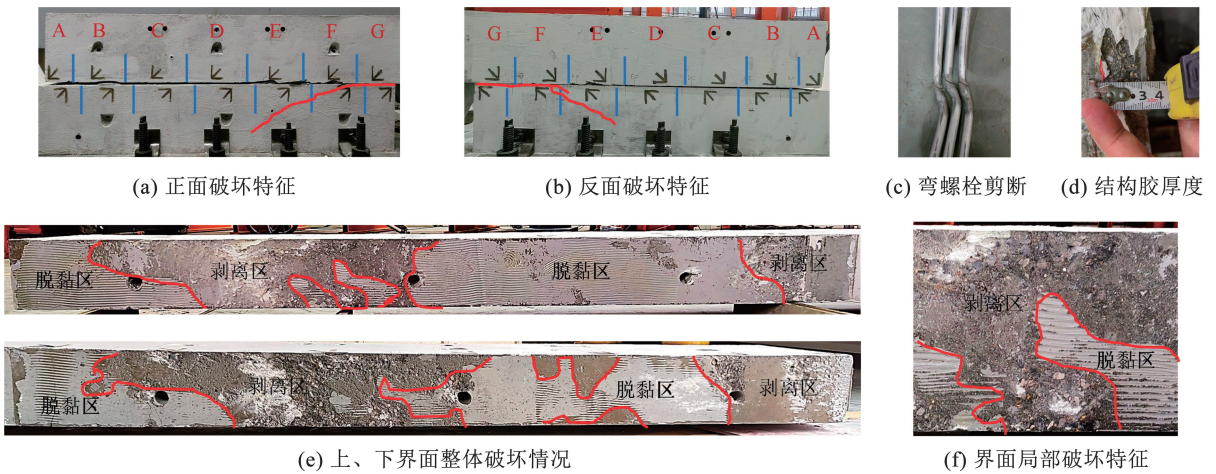


图 6 试件 JS-1 破坏现象及模式

Fig. 6 Failure phenomenon and mode of specimen JS-1

2) 试件 JS-2。试件 JS-2 发生低周疲劳破坏, 疲劳寿命 3.05 万次。由于荷载上限仅 1 000 kN, 试件全程处于弹性阶段, 表面并未萌生肉眼可见的裂纹 (宏观)。界面破坏情况如图 7(e)和图 7(f)所示, 经过测算, 脱黏破坏和混凝土剥离破坏面积约各占竖缝界面总面积的一半。试件处于弹性应变起主导

作用的加载工况, 却发生低周疲劳破坏, 可以推测, 砼-胶-砼界面的疲劳特性与一般金属等延性材料大不相同, 其对循环应力作用下产生的界面脱黏行为或混凝土保护层剥离破坏行为较为敏感, 且可能由于界面内部出现疲劳损伤而具有一定的隐蔽性, 最终呈现出具有脆性特征的低周疲劳破坏模式。

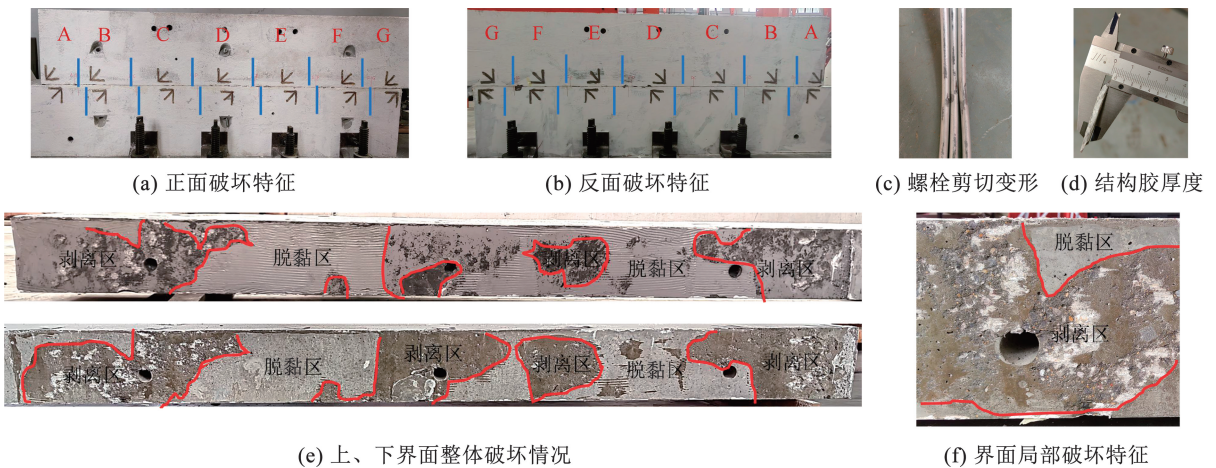
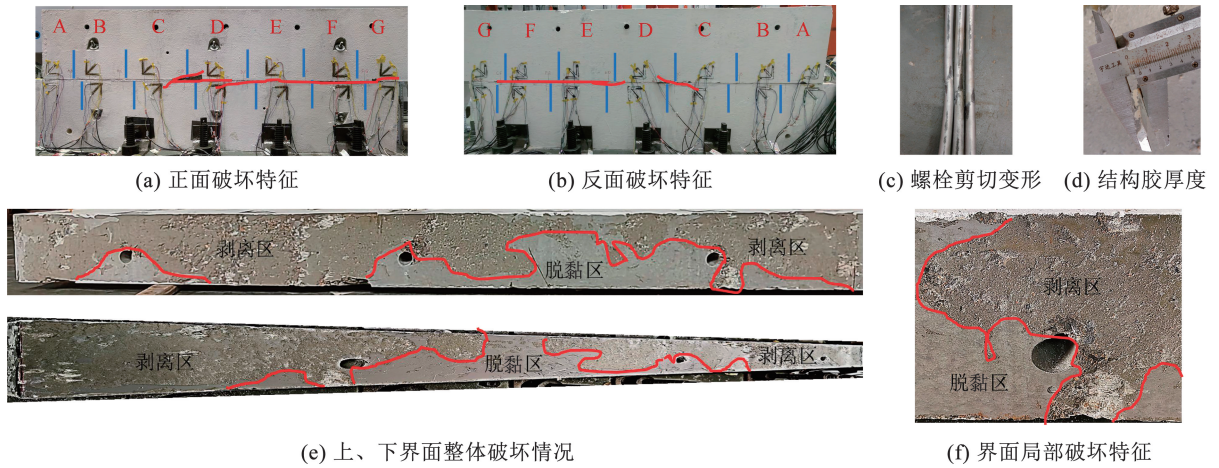


图 7 试件 JS-2 破坏现象及模式

Fig. 7 Failure phenomenon and mode of specimen JS-2

3) 试件 JS-3。试件 JS-3 发生高周疲劳破坏,疲劳寿命 110.13 万次(一级 110 万次 + 二级 0.13 万次)。当加载至 5 万次时听到轻微脆响,观测到正、反面的 E、F 区均出现 1~2 条 20 cm 左右的水平长裂纹和多个点状分布的短裂纹。5 万~55 万次加载过程属于裂纹快速扩展阶段(图 8),初始裂纹逐渐连通,且在正面上侧 D 区和 G 区的混凝土上各出现

一条 9 cm 和 13 cm 的剪切斜裂缝(角度与水平面夹角小于 45°)。而 55 万~110 万次加载过程属于裂纹缓慢扩展阶段,该阶段的裂纹几乎稳定下来,扩展速度非常缓慢。当提高荷载上限 P_{\max} 进行二级加载时,试件在已经发生部分损伤累积的基础上继续增加了 1 337 次寿命,最终伴随着一声巨响,界面全部脱开,试件发生具有脆性特征的疲劳破坏。



(e) 上、下界面整体破坏情况

(f) 界面局部破坏特征

图 8 试件 JS-3 破坏现象及模式

Fig. 8 Failure phenomenon and mode of specimen JS-3

2.2 界面黏结剪应力-滑移曲线

各试件的界面黏结剪应力 τ 和界面滑移 S 的关系曲线如图 9 所示,利用数据回归直线的斜率表征界面剪切刚度 K 。

$$\tau = P/(LB) \quad (1)$$

$$K = \tau/S \quad (2)$$

式中: L 和 B 分别代表界面的长度和宽度, L 为 3 000 mm, B 为 260 mm。

如图 9(a)所示,试件 JS-1 进行一次静力加载即发生破坏,得到竖缝界面极限受剪承载力 $P_u = 1\,557$ kN, $\tau_u = 2.00$ MPa, $K = 4.53$ MPa/mm。

如图 9(b)所示,试件 JS-2 在正式疲劳加载前进行一次以 $P_{\max} = 1\,000$ kN 为上限的静力加、卸载循环,可见加、卸载刚度差别不大,且几乎没有残余位移,界面剪切刚度 $K = 3.41$ MPa/mm,随后经过 3.05 万次的疲劳加载,试件突然发生脆性破坏,界面完全脱开。

如图 9(c)所示,试件 JS-3 分别在疲劳加载 0 次及 5 万、10 万、25 万、55 万、85 万、110 万次时停止,进行一次以疲劳上限($P_{\max, \#1} = 800$ kN, $P_{\max, \#2} = 1\,000$ kN)

为上限的静力加、卸载循环,发现虽然每一次加、卸载的刚度差别不大,但随着疲劳次数的增加,界面剪切刚度明显呈现逐渐减小的趋势,加载前期几乎没有残余位移,直到加载至 110 万次后,才出现约 0.03 mm 的残余位移。

2.3 刚度退化曲线

各试件的刚度退化曲线如图 10 所示,试件 JS-1 和 JS-2 均在极短的寿命内就发生脆性破坏,其刚度下降率也最高。试件 JS-3 在对应疲劳加载初期的 0~5 万次时, K 值由 8.33 降低为 7.14,说明此时为裂纹萌生阶段,与试验初期观察到的部分长、短裂纹出现的现象一致;对应于试验中 5 万~55 万次的裂纹快速扩展阶段, K 也由 7.14 快速降低至 2.45,下降幅度达到 66%;疲劳加载 55 万~110 万次, K 由 2.45 降低至 1.63,下降幅度为 33%,与试验中裂纹缓慢扩展阶段的现象相吻合;最后提高荷载上限 P_{\max} 进行二级加载时,界面刚度 K 在仅增加 1 337 次寿命的时间内急剧降低至零,可判断到这一阶段试件损伤较严重,剩余承载力已降低至接近 $P_{\max, \#2} = 1\,000$ kN。

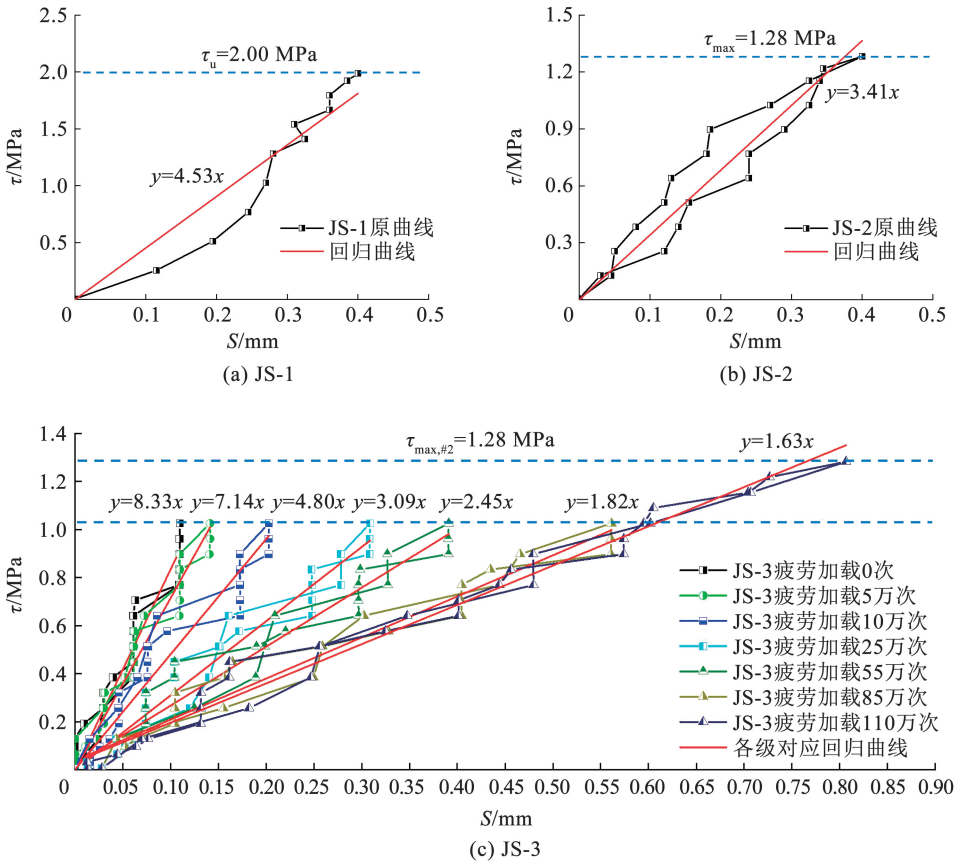


图 9 黏结剪应力-滑移曲线

Fig. 9 Bond shear stress-slip curves

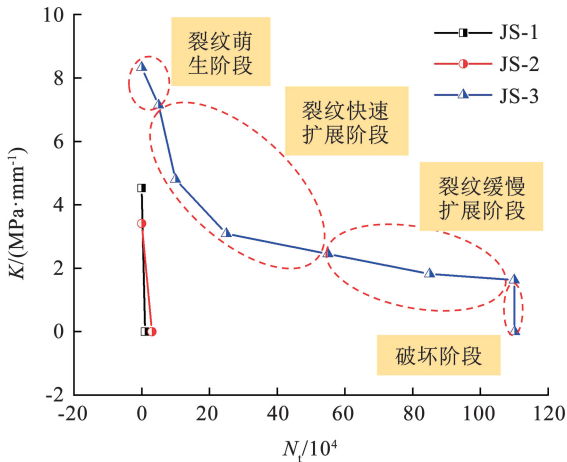


图 10 刚度退化曲线

Fig. 10 Rigidity degeneration curves

2.4 界面附近混凝土荷载-应变曲线

以静力试件 JS-1 为例,分别阐述竖缝试件正面即弯螺栓弯曲内侧(塔筒内侧)和试件反面即弯螺栓弯曲外侧(塔筒外侧)界面附近混凝土的荷载-应变曲线。

如图 11 和图 12 所示,所有荷载-应变曲线均表现出明显的弹性阶段和“局部”弹塑性阶段,1 200 kN 是其分界点。在 1 200 kN 之前,竖缝界面处于弹性

阶段,界面纵切向 x 方向、 45° 方向和界面法向 y 方向的混凝土应变均随着荷载的增大呈线性增长。加载至 1 200 kN 之后,部分点位的局部混凝土应变开始出现快速增大或急剧减小的特征,原因是该部位的界面产生微裂纹,导致局部的应力重分布。随着荷载进一步小幅增加,微裂纹开始扩展、连通为贯穿裂纹,最终在 1 557 kN 达到峰值,发生脆性破坏。

结合图 5 的测点布置及规定,不难发现界面附近混凝土应变整体呈现“两端大、中间小”的分布规律。如图 11 所示,试件正面的 7 号、6 号及 1 号应变花(分别对应 G 区、F 区及 A 区)位置的应变值明显高于其他部位,尤其是过了分界点 1 200 kN 之后,这些区域的应变陡增或陡降都标志着此处出现微裂纹。而 G 区、F 区及 A 区对应界面两端部,说明竖缝在承受剪切荷载时,裂缝易从端部边界条件薄弱处率先开展,而中部的结构胶及弯螺栓预紧力都有利于限制裂缝产生及扩展。同理,试件反面的应变发展趋势与正面相似,从图 12 亦可明显判断出端部应变大于中部应变的规律。需注意,由于仅端部应变进入“局部”弹塑性且荷载达峰后一瞬间就发生界面全部脱开,无法及时觉察和采取补救措施,宜将竖缝破坏模式归为脆性破坏。

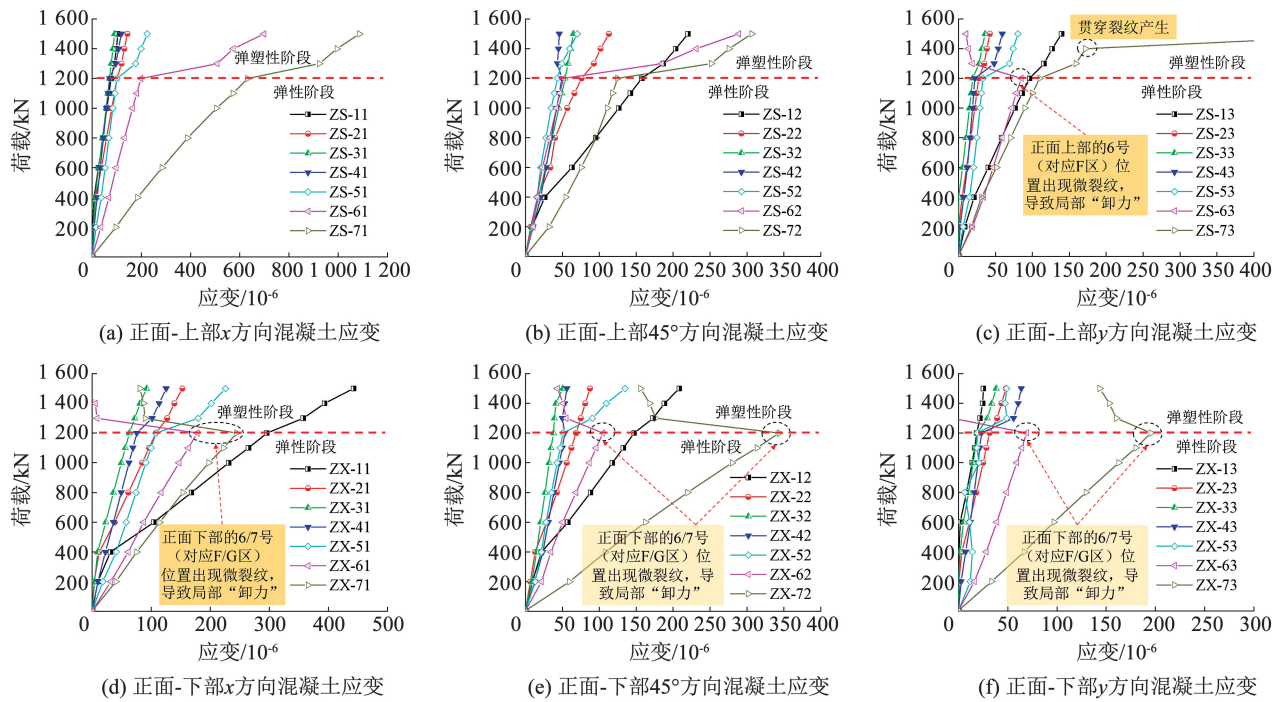


图 11 静力加载时正面界面附近混凝土荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of concrete near front interface under static loading

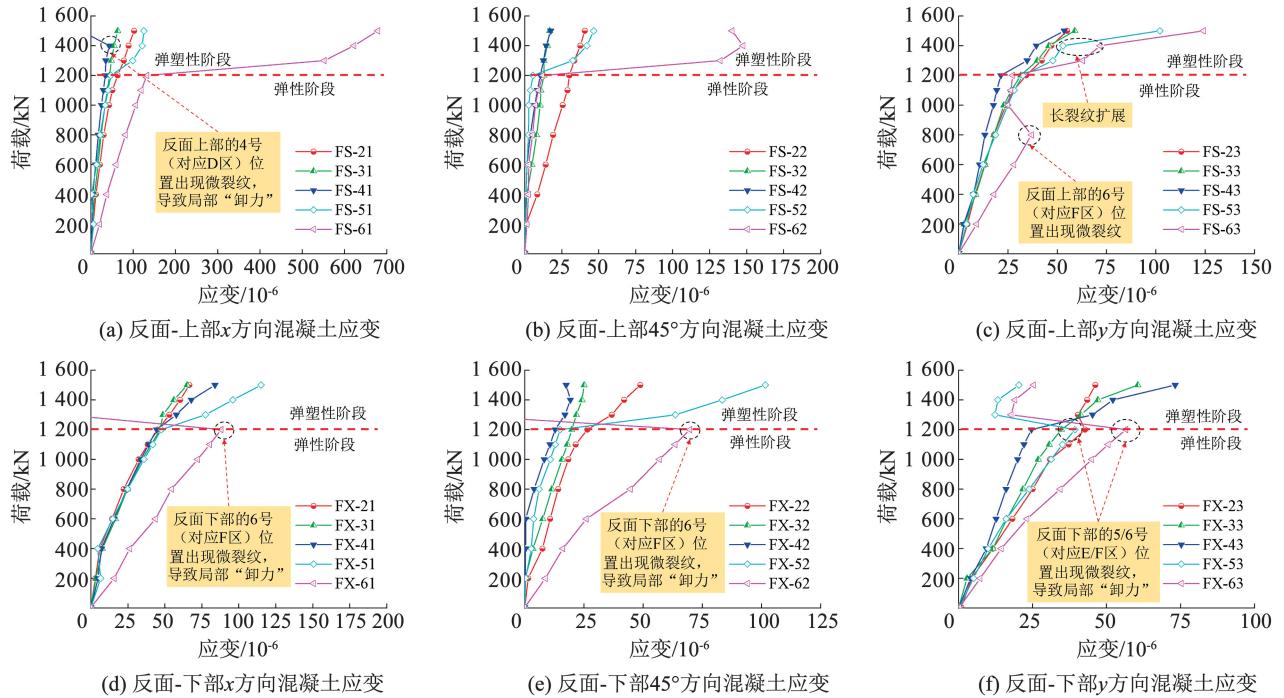


图 12 静力加载时反面界面附近混凝土荷载-应变曲线

Fig. 12 Load-strain curves of concrete near opposite interface under static loading

3 受剪承载力及疲劳寿命分析

3.1 基于叠加法的界面受剪承载力计算

欧规 2^[14]介绍了不同时段浇注混凝土之间界面的剪切力计算方法,现采用类似的逻辑,将界面受

剪承载力分为混凝土抗剪和弯螺栓预紧力提供的摩擦力两部分。根据叠加法,可得干式连接竖缝的受剪承载力计算公式为

$$V_u = c_{fk} A_v + \mu n P_w \quad (3)$$

式中: c_{fk} 为混凝土抗拉强度标准值,对于 C70 混凝土

土,试验前预估承载力时按文献[12]取 2.99 MPa,试验后计算承载力时按表 2 取实测值 3.30 MPa; A_v 为竖缝界面面积, $A_v = LB$; n 为弯螺栓数量; P_w 为弯螺栓预紧力大小; c 和 μ 为与界面粗糙程度相关的系数,欧规 2^[14] 给出了很光滑、光滑、粗糙、锯齿状表面 4 类不同界面粗糙情况下的取值,由于本文所研究的竖缝界面填充结构胶,且根据试验中结构胶-混凝土黏结界面一般为混凝土保护层剥离破坏,理论上界面的粗糙程度应远远大于上述 4 种情况,保守起见,按照欧规 2^[14] 中锯齿状表面取值, $c = 0.5$ 和 $\mu = 0.9$ 。

3.2 基于 Fib Model Code 的疲劳寿命计算

Fib Model Code 规范^[15] 给出了在恒定的应力幅下导致素混凝土疲劳破坏的循环次数的计算公式。规范公式将混凝土的疲劳寿命计算分为纯压缩、压缩-拉伸和纯拉伸 3 种情况。保守起见,在竖缝的抗剪疲劳验算中,暂不考虑弯螺栓预紧力对界面疲劳性能的提升作用。假定混凝土处于纯剪应力状态,主压应力方向和主拉应力方向均为斜 45° 方向,且全程保持不变。界面混凝土在主拉、压应力方向分别承受与界面剪力数值相等的循环拉、压应力,即界面混凝土处于纯剪状态的主应力计算公式为

$$\sigma_1 = \tau, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\tau \quad (4)$$

由于混凝土的受压性能远远优于抗拉性能,对于竖缝界面的剪切疲劳问题,主压应力方向不存在疲劳失效问题(且已经过计算验证),主控因素是主拉应力方向的疲劳验算。纯拉伸时,混凝土的疲劳寿命计算公式如下:

$$\lg N = 12(1 - S_{td, \max}) \quad (5)$$

$$S_{td, \max} = \gamma_{Ed} \sigma_{ct, \max} / f_{ctd, \text{fat}} \quad (6)$$

$$\sigma_{ct, \max} = \tau_{\max} = P_{\max} / (LB) \quad (7)$$

$$f_{ctd, \text{fat}} = f_{ctk, 0.05} / \gamma_{c, \text{fat}} \quad (8)$$

式中: N 为疲劳寿命; $S_{td, \max}$ 为最大拉应力水平; $\sigma_{ct, \max}$ 为最大拉应力,此处与界面最大剪应力相等; $f_{ctd, \text{fat}}$ 为混凝土疲劳设计抗拉强度; $f_{ctk, 0.05}$ 为具有 95% 置信度的混凝土抗拉强度特征值;荷载系数 γ_{Ed} 取 1.0,混凝土疲劳强度折减系数 $\gamma_{c, \text{fat}}$ 取 1.5。

式(5)和(6)表明,疲劳寿命与最大拉应力(即荷载上限)呈负相关。

3.3 试验与计算结果的对比与分析

代入相应数据,采用式(3)计算可得 3 个竖缝试件的界面静力受剪承载力,采用式(5)~(8)计算可得试件 JS-2 和 JS-3 的疲劳寿命,计算结果与试验值汇总于表 3 和图 13。

表 3 试验与计算结果汇总

Tab. 3 Summary of test and calculation results

试件 编号	$P_{\min} /$ kN	$P_{\max} /$ kN	$V_{u,t} /$ kN	$V_{u,c} /$ kN	$V_{u,c} /$ $V_{u,t}$	$N_t /$ 次	$N_c /$ 次	$N_c /$ N_t
JS-1	0	—	1 557	1 544	0.99	1.00	—	—
JS-2	240	1 000	—	1 544	—	30 511	25 273	0.83
JS-3#1	240	800	—	1 544	—	1 100 000	835 848	0.76
JS-3#2	240	1 000	—	1 544	—	1 337	25 273	0.05

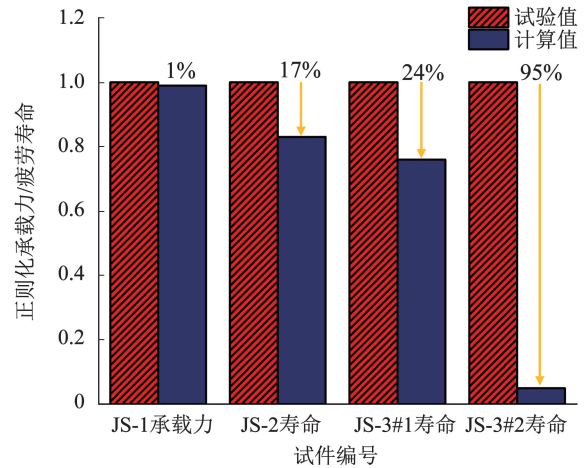


图 13 试验与计算结果对比

Fig. 13 Comparison of test and calculation results

对比试验结果与计算结果可知,试件 JS-1 的受剪承载力计算值 $V_{u,c} = 1 544$ kN,与试验值 $V_{u,t} = 1 557$ kN 相比,具有良好的吻合度,计算值仅比试验值低约 1%。试件 JS-2 在 240 ~ 1 000 kN 的荷载循环下,疲劳寿命试验值 N_t 为 30 511 次,计算值 N_c 为 25 273 次, N_c 比 N_t 仅减少约 17%,误差在可接受的范围内(一般认为疲劳寿命误差在 2 倍范围带内),说明公式计算值与试验值吻合较好。

试件 JS-3 在 240 ~ 800 kN 的荷载循环下,疲劳寿命试验值 N_t 为 1 100 000 次,计算值 N_c 为 835 848 次, N_c 比 N_t 减少约 24%,但值得注意的是,试验中 JS-3 在加载到 110 万次时并未完全破坏,即在 240 ~ 800 kN 的荷载循环下其真实寿命应大于 110 万次,这说明规范计算的疲劳寿命比较保守,且保守富余度超过 24%,具有工程应用价值。当试件 JS-3 提高荷载上限 P_{\max} 至 1 000 kN 进行二级加载时,试验寿命仅增加 1 337 次就破坏,这说明荷载上限对竖缝的剪切疲劳寿命影响很大,与规范公式的失效机制一致。

3.4 现有计算方法的评价

塔筒结构一般为高耸圆筒型结构,筒身承受叶片和机舱传来的压-弯-剪-扭复合荷载,但从应力的角度分析,竖缝界面承受的应力只有两种,一是弯螺栓预紧力带来的法向压应力,二是根据剪应力互等定理由水平剪力转换得到的竖向(切向)剪应力,其他类型的内力(如弯矩、扭矩等)对竖缝的抗剪特性不产生耦合作用。因此,根据 1:1 工况设计的竖

缝直剪试件,且施加了与工程一致的弯螺栓预紧力,基本可以保证其受力模式与工程原型保持一致。但本试验的局限性在于实际塔筒中竖缝错动趋势受上下相邻塔段的约束,而直剪试验中由于需要施加剪力,端部边界条件只能自由,较难与工程实际完全一致。试件受力模式可能与实际塔筒有细微差别,但由于试验边界条件约束较弱,结果应该是偏安全的。下一步改进方向可以是对既包含竖缝又包含水平缝及预应力筋等关键受力部位的整体结构进行研究,并且探讨压-弯-剪-扭复合作用下的加载方式和力学响应。

虽然上述基于叠加法的界面受剪承载力计算和基于 Fib Model Code 的疲劳寿命计算可保守地应用于工程实际,但存在不可忽视的物理意义上的缺陷。如式(3)只考虑了混凝土强度本身和弯螺栓预紧力带来的摩擦力的简单叠加,却忽视了试验中实际发生的砼-胶界面脱黏破坏(脱黏强度 < 材料强度),以及弯螺栓预紧力对混凝土抗剪强度的提升效应,该公式计算值与试验值吻合良好的原因很可能来自上述两种缺陷的相互抵消,鉴于科学理论的严谨性,应对符合其真实破坏模式的抗剪机制作进一步研究。

另外,基于混凝土材料的 S-N 疲劳寿命预测模型适合均匀材料或有明确危险点的局部应力状态,而竖缝砼-胶-砼界面一方面受限于抹胶面积大导致的质量不均匀性,另一方面弯螺栓施加预紧力的有效约束范围内实际处于压-剪耦合应力状态,两者都会对现有规范验算公式的力学机制及准确性造成重大影响。后续有必要针对上述缺陷开展进一步试验研究和理论攻关。

4 结 论

1) 干式连接竖缝的静力、疲劳试验均发生脆性破坏模式,界面可分为界面脱黏破坏和混凝土保护层剥离破坏两类区域(占比约各 50%),弯螺栓施加预紧力可以有效提高结构胶界面的黏结抗剪能力。

2) 竖缝界面附近混凝土应变整体呈现“两端大、中间小”的分布规律。竖缝在承受剪切荷载时,裂缝易从端部的边界条件薄弱处率先开展,而中部的结构胶及弯螺栓预紧力都有利于限制裂缝产生及扩展。

3) 试验结果和规范公式^[15]都表明,荷载上限是影响竖缝剪切疲劳性能的关键因素,且疲劳寿命与荷载上限呈负相关。

4) 竖缝界面的抗剪能力由混凝土直接抗剪和弯螺栓预紧力产生的摩擦力共同提供。根据叠加法推导了干式连接竖缝界面受剪承载力计算公式,该公式具有较高的精度。

5) Fib Model Code 规范公式可以对竖缝的剪切疲劳寿命进行预测,预测结果具有较好的准确性和一定的安全富余,具有良好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 黄继明,董焕峰,张后禅,等.大型风电项目钢混塔筒综合建造技术[J].安装,2022,(增刊1):257
HUANG Jiming, DONG Huanfeng, ZHANG Houchan, et al. Comprehensive construction technology for steel-concrete towers in large-scale wind power projects[J]. Installation, 2022, (Sup. 1): 257
- [2] 张栋梁,黄春林,孙杏建,等.一种免灌浆干式预应力螺栓拼接分片预制装配式混塔:CN202010847254.2[P].2020-12-18
ZHANG Dongliang, HUANG Chunlin, SUN Xingjian, et al. A dry-type pre-stressed bolt jointing segmented prefabricated assembled concrete tower without grouting: CN202010847254.2[P]. 2020-12-18
- [3] 樊昂,李录平,张世海,等.大型风电机组塔筒动力学特性与寿命损耗研究进展[J].发电技术,2022,43(3):421
FAN Ang, LI Luping, ZHANG Shihai, et al. A review on dynamic characteristics and life loss of large wind turbine towers[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 421. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.21022
- [4] 姚卫星.结构疲劳寿命分析[M].北京:科学出版社,2019
YAO Weixing. Structural fatigue life analysis[M]. Beijing: Science Press, 2019
- [5] 贺曼罗,林治江.环氧建筑结构胶耐疲劳性能试验研究[J].热固性树脂,1996,11(1):4
HE Manluo, LIN Zhijiang. Study on fatigue resistance of epoxy structural adhesive for construction[J]. Thermosetting Resin, 1996, 11(1): 4
- [6] JEN Y M, KO C W. Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(2): 330. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.07.001
- [7] 韩强. CFRP-混凝土界面粘结滑移机理研究[D].广州:华南理工大学,2010
HAN Qiang. Study on the bond-slip mechanism of CFRP-concrete interface[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010
- [8] 丑佳璇,张智涛,张建仁,等. NSM CFRP-混凝土界面疲劳黏结性能研究[J].中国公路学报,2022,35(2):234
CHOU Jiaxuan, ZHANG Zhitao, ZHANG Jianren, et al. Study on fatigue bond behavior of NSM CFRP-concrete interface[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 234. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.02.021
- [9] 彭兴财,张力平,解祥夫,等.风电叶片用环氧结构胶疲劳性能研究[J].玻璃钢/复合材料,2014(4):62
PENG Xingcai, ZHANG Liping, XIE Xiangfu, et al. Investigation of the fatigue property of the epoxy structural adhesive used for wind power blade[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(4): 62. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2014.04.014
- [10] 姚允武,李春良,程永春.碳纤维布加固混凝土结构疲劳特性试验研究[J].工程力学,2008,25(8):200
YAO Yunwu, LI Chunliang, CHENG Yongchun. Experimental research on fatigue properties of concrete structure strengthened with CFRP sheets[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(8): 200
- [11] 中国建筑科学研究院有限公司.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010
- [13] 北京构力科技有限公司.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017
- [14] Eurocode 2. Design of concrete structures-part1-1: general rules and rules for buildings. BS EN 1992-1-1: 2004[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- [15] International Federation for Structural Concrete. Fib model code for concrete structures 2010[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013: 1