

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.06.013



钢砼组合结构 PBH 剪力键的疲劳性能

范亮¹, 闫龙彪¹, 吕娜²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 新乡职业技术学院 建筑工程系, 河南 新乡 453000)

摘要:为了研究钢箱-砼组合结构中 PBH 剪力键在反复荷载作用下的疲劳性能,设计制作了 PBH 剪力键试验模型,进行了 24 万次疲劳推出试验。在疲劳破坏形态和试验滑移及应变数据分析的基础上,利用数值工具开展肋板开孔孔径、穿入钢筋直径、混凝土强度 3 个参数的 PBH 剪力键疲劳寿命影响因素分析。研究表明:PBH 剪力键的疲劳破坏形态与静载破坏相似,表现表现为混凝土面多处斜向劈裂裂缝、内部榫孔混凝土压碎、穿入钢筋局部屈服;疲劳破坏演化过程分为疲劳损伤开始、发展、破坏 3 个阶段,其中疲劳发展阶段占整个疲劳阶段的 91.7%,结构刚度在疲劳损伤开始和发展阶段退化较慢,在疲劳破坏阶段退化较快;肋板开孔孔径、穿入钢筋直径、混凝土强度 3 个参数对 PBH 剪力键疲劳寿命影响均有明显影响,其中穿入钢筋直径对疲劳寿命的影响尤为突出。

关键词:组合结构;剪力键;疲劳试验;疲劳寿命

中图分类号:TU 398.9 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2016)06-0097-08

Fatigue performance analysis of steel concrete composite structure PBH shear connectors

Fan Liang¹, Yan Longbiao¹, Lyu Na²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;

2. Department of Civil Engineering, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000, Henan, P. R. China)

Abstract: PBH test model is designed and 240000 times fatigue tests were conducted to investigate the steel box-concrete composite structure of PBH shear connector under repeated load fatigue performance. The fatigue failure pattern and test data are analysed. Take advantage of the finite element software to analysis the floor opening aperture, wear into the steel bar diameter, concrete strength influence of the PBH fatigue. Results showed that the PBH's fatigue failure pattern is similar to static, which is concrete surface appear oblique splitting cracks, concrete tenor crushed, through the steel yield. Fatigue damage can be divided into beginning and development and damage three stages, the development stage accounted for 91.7% of the whole fatigue stage, structural stiffness in the beginning and development stages degradation slower, fast during the damage stage. Three parameters are of great influence on the fatigue life of PBH, among them through the bar diameter's influence particularly prominent.

Keywords: steel-concrete composite structure; PBH shear connector; fatigue test; fatigue lifetime

收稿日期:2016-03-07

基金项目:国家自然科学基金(51308571)

作者简介:范亮(1979-),女,副教授,主要从事桥梁结构研究,(E-mail) fanliang2001@gmail.com.

Received:2016-03-07

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51308571)

Author brief: Fan Liang (1979-), associate professor, main research interest: bridge structure, (E-mail) fanliang2001@gmail.com.

近年应用日益广泛的钢-混组合结构将两种材料的优势性能结合起来,突破混凝土和钢结构单独使用的局限,具有自重小、强度大、抗震性能强、截面设计灵活的优点,耐火性、耐久性、整体性相对于传统结构均有很大提高。钢-混组合结构主要应用于桥梁、高层建筑等领域^[1-4]。

作为钢-混凝土组合结构的关键部件,剪力连接件把有较大弹性模量差别的钢结构和混凝土结构连接成整体而共同工作,防止界面处过大滑移和分离^[5]。常用的剪力键形式有栓钉、PBL等,已对剪力键进行了抗剪承载力、疲劳性能等相关的广泛研究^[6-14]。笔者在优化组合拱桥设计和施工的背景下提出了钢箱-砼组合拱桥^[15-16],并针对钢箱-砼组合构件(图1)提出了一种基于PBL的新型剪力键——开孔加劲肋套箍剪力联结构造^[17](Perfobond Hoop,简称为PBH)。PBH位于钢箱的侧面钢板,由焊接在钢板上的肋板按照一定的间距挖孔,而后将穿入钢筋穿过加劲肋的圆孔,并将穿入钢筋作为浇筑混凝土后与钢箱接触的混凝土块的钢筋骨架的一部分。

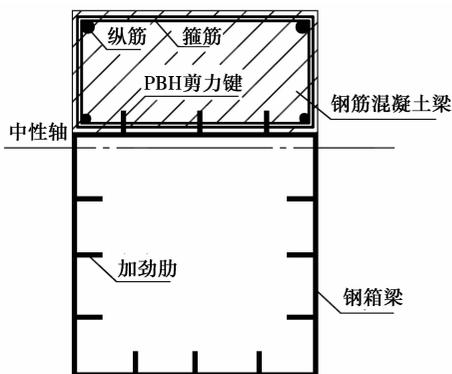


图1 钢箱-砼组合结构

Fig. 1 Steel box-concrete composite structure

PBH剪力键(图2(a))在PBL(图2(b))的基础上发展而来,与PBL受力类似,PBH的抗剪力主要由孔内钢筋混凝土榫构成。此外,PBH一个重要的特点是其穿过带孔加劲肋的钢筋是钢箱上方混凝土中钢筋骨架的一部分。由于混凝土受到箍筋套箍作用的影响,钢筋混凝土榫的抗压和抗剪性能均得到了改善,贯穿钢筋作为钢筋骨架中箍筋的一部分,变形受到了纵筋和混凝土的约束。PBH剪力连接构造由于抗剪钢筋与箍筋合为一体,且与架立钢筋及纵向受压钢筋形成钢筋骨架,该钢筋骨架内的混凝土将不同程度地参与界面抗剪。以上构造造成

PBH和PBL在受力上的不同,文献[17]中的试验表明,在相同荷载下,PBL的变形增加速度大于PBH。以限制滑移量1 mm为例,在该滑移量时,PBH试验荷载值为537 kN,而PBL试验荷载值为429 kN,PBH为PBL的1.25倍。

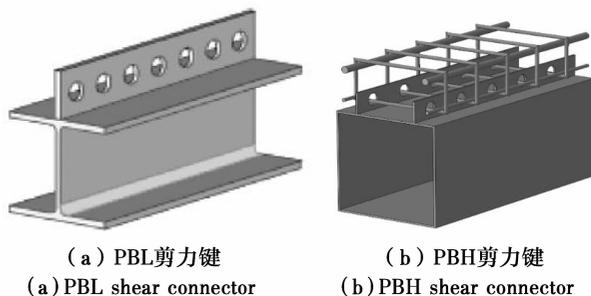


图2 剪力键构造

Fig. 2 shear connector structure

PBH剪力键构造的静力性能已得到较深入研究^[18]。考虑到钢-混组合结构在承受动荷载的情况下,剪力键是组合结构的薄弱环节,易发生疲劳破坏^[19],有必要进一步研究PBH剪力键在反复荷载作用下的疲劳力学性能。笔者结合PBH剪力键疲劳推出试验及ABAQUS和FE-SAFE有限元疲劳分析方法,对PBH破坏模式、疲劳发展全过程及疲劳寿命影响因素等进行研究。

1 试验方法及模型设计

在剪力键性能研究中,试验方法有梁式试验和推出试验2种^[20]。EC4推荐的实验方法是推出试验。在推出试验中混凝土承受直接剪力,虽然这种受力状态与组合梁中混凝土板的弯曲应力状态不一致,但在剪力连接件的力学性能研究中仍然多采用推出试验。这是由于推出试验相比于梁式试验,试件的变形、破坏更加明显,易于观测;推出试验所得出的构件的承载能力偏安全。综上,PBH剪力连接件静力抗剪承载力 P_s 以及疲劳寿命的试验均采用推出试验方法。

结合钢箱-砼组合结构及前期研究成果^[12]。如图3所示,参照欧洲规范中推出试件的尺寸,结合实验室的设备情况,设计制作了PBH疲劳试验试件。试件中带孔钢板厚8 mm,开孔孔径40 mm,穿入钢筋直径10 mm,钢材为Q235钢,混凝土标准立方体抗压强度为55.7 MPa,实测弹性模量为 3.55×10^4 MPa。推出试验模型如图4所示。

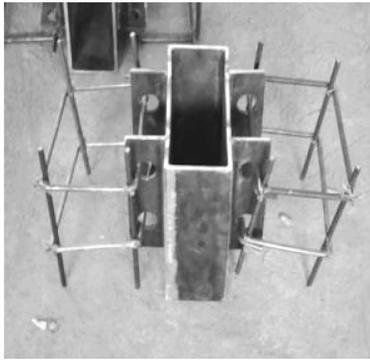


图 3 PBH 连接件试验构造图

Fig. 3 The test structure of PBH shear connector

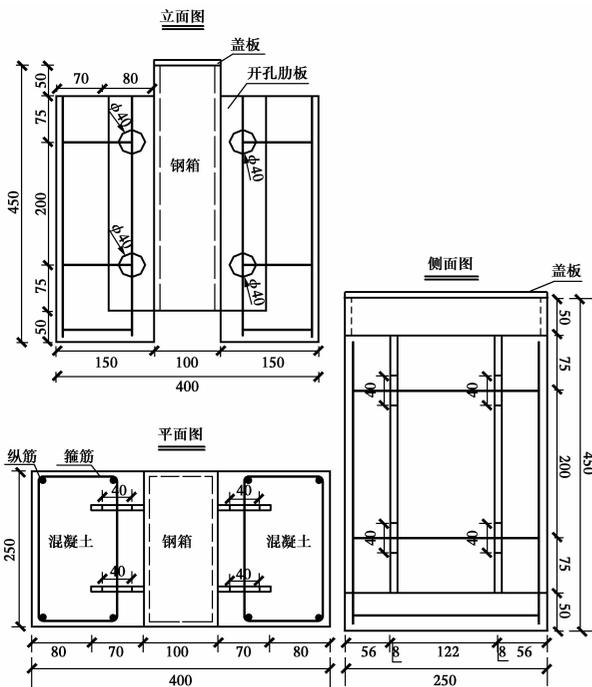


图 4 推出试验模型构造图(单位:mm)

Fig. 4 The model structure diagram of fatigue test(unit:mm)

2 疲劳推出试验

2.1 疲劳试验加载程序及测试方法

疲劳试验采用重庆交通大学 100 t 位 MTS 疲劳试验机,采用常幅正弦波载荷谱,考虑加载系统的共振影响及百分表反应时效,选择 3 Hz 加载频率。

参照规范以及前期研究结果^[18],根据静载试件的静载极限承载力 P_u ,分别取 $0.72P_u$ 和 $0.18P_u$ 作为疲劳实验时的疲劳上下限荷载。根据上述计算方法,试验中疲劳加载上下限分别取 650 kN 和 270 kN。

疲劳试验加载分为预加载和疲劳加载 2 部分。

疲劳加载分为 3 个阶段。第 1 阶段,进行分级加载静载试验,将荷载分 5 次加载至疲劳上限荷载,每次加载持荷 15 min 后卸载;第 2 阶段,疲劳加载,每进行 2 000 次的循环加载中间隔持荷 3 min 并采集数据。第 3 阶段,若试件疲劳加载次数达到 200 万次时未发生破坏,则将试件静载加载直至破坏,加载过程如图 5 所示。

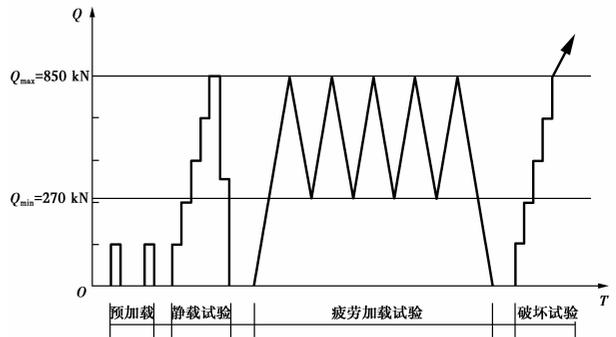


图 5 疲劳加载程序

Fig. 5 The program of fatigue loading

界面相对滑移采用百分表测试钢板与相邻对应混凝土的相对位移量表征;试件应变测试采用短标距电阻应变片,并运用以温度补偿片进行修正。测点布置图如图 6 所示。

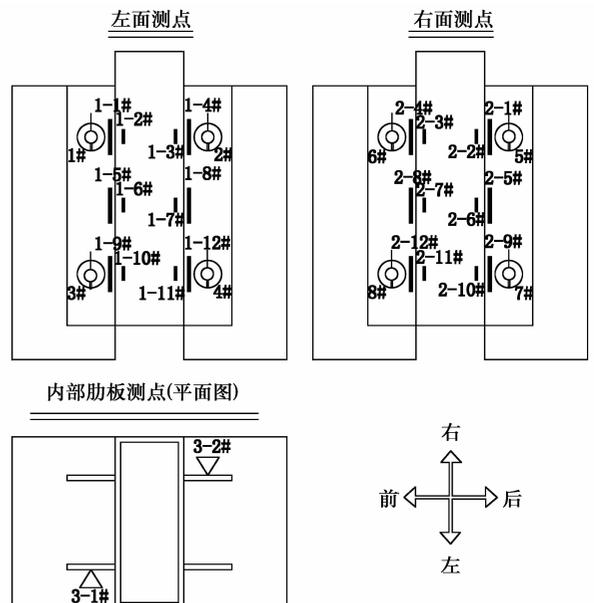


图 6 疲劳试验测点布置图

Fig. 6 The arrangement of measuring points of fatigue test

2.2 疲劳试验现象

循环加载次数达到 7 000 次时,4 条钢箱与混凝土块接触缝界面均发现可见表面缝隙,此时相对滑

移量较小;加载至 2.53 万~13.3 万次时,一侧混凝土肋板端部出现裂缝并逐渐发展至裂缝贯穿,形成包围核心混凝土的封闭裂缝,如图 7 所示;加载至 13.6 万次时,混凝土下部榫孔处出现向下约 45°斜裂缝,加载至 14.6 万次时,上部榫孔处出现类似斜裂缝,裂缝随着循环次数的增加向下发展加宽,如图 8 所示;加载至 23.2 万次时,混凝土与钢箱界面间裂缝贯通至顶部;此时,连接件已失效;加载至 24.1 万次时,混凝土与钢箱界面滑移发展迅速,最大滑移值达 3 mm,遂终止试验,认为该试件已发生疲劳破坏。对疲劳试验结束后的试件进行解剖,榫孔处穿入钢筋下方混凝土被压成碎末,穿入钢筋在榫孔处均发生局部弯曲变形,钢箱肋板连接处有微小向内凹的趋势。如图 9~10 所示。



图 7 混凝土顶面形成核心混凝土区域

Fig. 7 At the top of the concrete formation of core concrete area



图 8 榫孔处出现斜裂缝

Fig. 8 Tenon holes appear diagonal cracks



图 9 混凝土榫被压碎

2.3 疲劳试验结果

由试验现象可见,剪力键的疲劳破坏形态为:受到穿入钢筋的反复挤压,肋板孔内的混凝土榫受压破碎,穿入钢筋受到肋板宽度较小范围内集中力反复作用,导致穿入钢筋屈服。这与 PBH 剪力键静载典型破坏模式相似^[18]。

2.3.1 界面滑移量与荷载作用次数曲线 对试验

结果进行处理,得到榫孔处钢箱与混凝土块之间的滑移量与荷载作用次数曲线如图 11 所示。

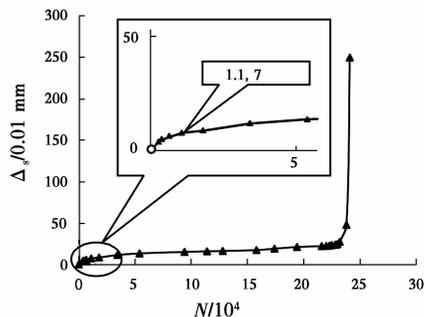


图 11 累计滑移量与荷载作用次数关系曲线

Fig. 11 The relation curve of accumulative slippage and load times

图 11 为钢箱与混凝土相对滑移量与循环次数曲线,参照 PBL 剪力键的损伤累积规律研究成果^[21],可将 PBH 剪力键疲劳损伤累积规律类似地分为 3 个阶段:疲劳损伤开始阶段、疲劳损伤发展阶段、疲劳破坏阶段。结构刚度在第 1、2 阶段退化缓慢,在第 3 阶段退化较快。疲劳损伤开始阶段的荷载循环次数占整个寿命的 4.6%左右,剪力键的界面滑移量为 0.07 mm;疲劳损伤发展阶段的荷载循环次数占整个试件疲劳寿命的 91.7%左右,剪力键的界面滑移量为 0.20 mm,该阶段的界面滑移增长速率缓慢;疲劳破坏阶段的荷载循环次数占整个试件疲劳寿命的 3.7%左右,剪力键的界面滑移量迅速增大,试件在较短的作用周期内发生疲劳破坏。

2.3.2 钢和混凝土应变幅值与荷载作用次数曲线

将不同位置的钢和混凝土应变平均幅值均值作为钢与混凝土在周期荷载上下限作用下的实测应变幅值,得到钢和混凝土在疲劳试验中应变幅值和疲劳循环作用次数的关系。

图 12 为钢与混凝土应变幅值随加载次数发展的比较。钢与混凝土的应变幅值与加载次数关系曲线也可以分为 3 个阶段,第 1 阶段为循环加载 0~1 万次,钢片和混凝土片的应变幅值均快速增加;此阶段对应于剪力键的疲劳损伤第 1 阶段,但前述疲劳损伤第 1 阶段加载次数止于 1.1 万次左右,略大于应变幅值曲线中的 1 万次,说明钢混组合结构的疲劳效应相比于钢和混凝土单种材料的疲劳效应有一定的滞后;第 2 阶段为循环加载 1~23.2 万次,钢片

和混凝土片的应变幅值均缓慢线性增加,此阶段对应于剪力键的疲劳损伤第 2 阶段,剪力键的抗剪刚度缓慢退化,疲劳损伤第 2 阶段加载次数也截止于 23.2 万次左右,这说明此阶段两种材料已协同受力;第 3 阶段为循环加载 23.2~24.1 万次,钢片和混凝土片的应变幅值均快速增加,此阶段对应于剪力键的疲劳损伤第 3 阶段,剪力键的抗剪刚度快速退化,以至于剪力键疲劳破坏。

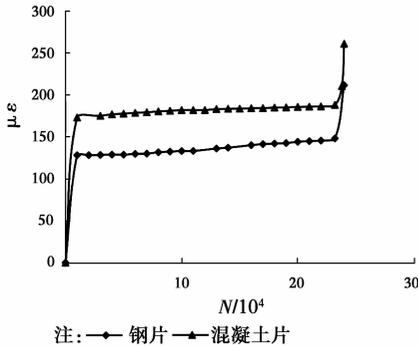


图 12 钢与混凝土应变幅值比较

Fig. 12 The comparison of steel and concrete's strain amplitude

相比来说,混凝土的应变幅值略大于钢的应变幅值,表明加载线与支撑线不完全重合造成的同一水平位置上变形不完全一致。

2.3.3 试件不同位置的界面滑移和应变幅值比较

将上、下排钢箱与混凝土块界面滑移进行对比如图 13,上、中、下排钢应变幅值对比如图 14。由图 13、14 可知,在整个疲劳加载过程中,加载端位移幅值、应变幅值均大于结构支撑端,表明在结构的疲劳加载过程中,疲劳破坏局部变形由加载端向支撑端传递,此亦说明了剪力由加载端向支撑端传递的传力机制。

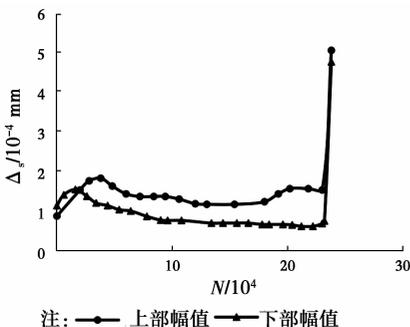


图 13 钢箱与混凝土界面处上下排榫孔处滑移幅值对比

Fig. 13 The comparison of steel box and concrete upper, lower tenon holes's slip amplitude

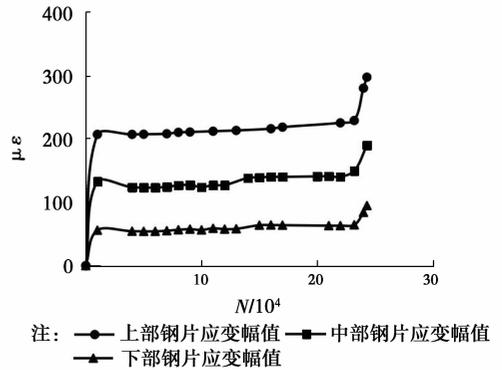


图 14 钢片上、中、下位置应变幅值对比

Fig. 14 The comparison of steel strain gauge upper, middle, lower's strain amplitude

3 PBH 键疲劳寿命多参数影响分析

3.1 疲劳寿命有限元分析方法

PBH 剪力键疲劳性能研究采用 ABAQUS + FE-SAFE 分析相结合的方法^[22]。首先利用 ABAQUS 有限元软件进行静力分析,将得出的分析结果文件导入 FE-SAFE 软件;FE-SAFE 是分析结构疲劳的专用软件,能够分析多轴疲劳;依据疲劳试验结果对软件进行验证,而后借助该软件进行 PBH 剪力键疲劳性能的研究。

ABAQUS 有限元软件模型中钢材和钢筋本构采用理想弹塑性本构,其具体参数由材性实验确定。混凝土的本构关系采用损伤塑性模型。钢箱肋板与混凝土之间界面采用虚拟软弱夹层模拟,通过夹层材料的剪切变形模拟 PBH 剪力键界面滑移。

FE-SAFE 软件中的 Seeger 算法根据材料的弹性模量、抗拉极限强度 UTS、材料类型 3 个特征自动计算材料的计算用 S-N 曲线。钢筋与钢箱肋板采用理想弹塑性本构,选择 Steel(Ductile)材料类型,抗拉极限强度设为 300 MPa;钢箱与混凝土中间夹层材料选择 Steel(Ductile)材料类型,抗拉极限强度设为 100 MPa。在疲劳计算的过程中不考虑混凝土的影响,所以其材料设定可以适当加强。

载荷谱定义参照试验取为常幅正弦波,并对应实验疲劳上下限;计算过程采用局部应力应变 Brown-Miller 方法的 Morrow 平均应力准则修正。根据中国公路桥梁设计相应规范,取设计寿命为 200 万次。

3.2 可行性验证

PBH 疲劳推出试验有限元分析疲劳寿命结果

为 $10^{5.366}$, 即 232 274 次, 破坏位置在肋板位置的穿入钢筋处。计算结果与实验现象基本一致, 说明利用 fe-safe 在所选算法下的疲劳寿命计算可行。

图 15 为疲劳破坏分析结果云图。

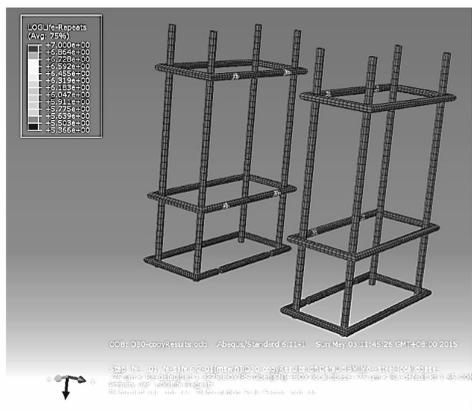


图 15 疲劳寿命结果

Fig. 15 The results of the fatigue life

3.3 PBH 键疲劳寿命影响分析

疲劳寿命分析中的荷载比 μ 为疲劳加载过程中荷载下限 P_{\min} 与荷载上限 P_{\max} 的比值, 即 $\mu = P_{\min}/P_{\max}$ 。对应推出试验所取荷载比, 在荷载比 $\mu = 0.25$ 情况下, 对比不同参数下 PBH 的疲劳曲线。参照材料疲劳强度概念, 定义疲劳强度为结构设计寿命 200 万次内不发生结构疲劳破坏时的构件内最不利点应力值上限。对 PBH 而言, 根据试验现象和有限元分析, 该最不利应力值出现在穿入钢筋中, 位置位于穿入钢筋与开孔板垂直相交点处。以下分析中, 将使用疲劳强度作为衡量试验疲劳性能的一个分析指标。

以下将分析加劲肋板开孔孔径、穿入钢筋直径、混凝土强度 3 个参数发生变化时的 PBH 疲劳 S-N 曲线。N 为结构的疲劳寿命, 是指结构发生疲劳破坏所经受的荷载循环次数, S 为疲劳荷载加载过程中结构所承受的疲劳应力。

3.3.1 加劲肋板开孔孔径 图 16 为不同加劲肋板开孔孔径下, PBH 剪力键的疲劳曲线。

通过对图 16 所示曲线的拟合, 得到结果如下: 在肋板开孔直径允许范围内, 孔径 30、40、50 mm 试件的疲劳强度分别为 189.2、202.1、215.4 MPa, 说明在其他条件相同情况下, 孔径越大, 对应的疲劳强度越大; 在相同最大疲劳破坏应力下, 孔径越大, 寿命越长。其他条件相同的情况下, 对于同一个试件, 最大疲劳破坏应力越大, 寿命越小。当破坏应力为

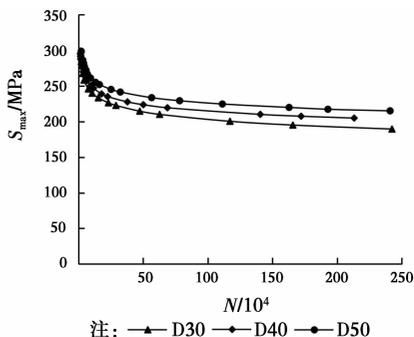


图 16 不同加劲肋板开孔孔径的 S-N 曲线

Fig. 16 The S-N curve of the different aperture of stiffener plate hole

230 MPa 时, 加劲肋开孔孔径为 30、40、50 mm 时对应的疲劳寿命分别为 21.7 万、35.7 万、75.1 万次, 孔径 40 mm 比 30 mm 的试件寿命大 39%, 孔径 50 mm 比 30 mm 的试件寿命大 71%。

3.3.2 穿入钢筋直径 图 17 为不同的穿入钢筋直径下, PBH 剪力键的疲劳曲线。

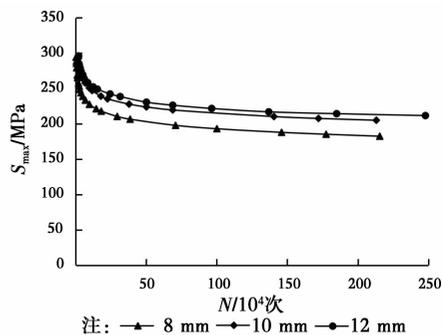


图 17 不同穿入钢筋直径的 S-N 曲线

Fig. 17 The S-N curve of the different diameter of through the steel bar

通过对曲线的拟合分析, 得到如下结果: 穿孔钢筋直径分别为 8、10、12 mm 试件的疲劳强度分别为 183.0、202.1、211.7 MPa, 说明在其他条件相同情况下, 穿入钢筋直径越大, 对应的疲劳强度越大; 在相同最大疲劳破坏应力下, 穿入钢筋直径越大, 寿命越长。其他条件相同的情况下, 对于同一个试件, 最大疲劳破坏应力越大, 寿命越小。当破坏应力是 230 MPa 时, 穿入钢筋直径为 8、10、12 mm 的试件对应的疲劳寿命为 8.7 万、35.7 万、56.9 万次, 直径 10 mm 比 8 mm 的试件寿命大 75%, 直径 12 mm 比 8 mm 的试件寿命大 85%。

3.3.3 混凝土强度 图 18 为不同的混凝土强度下, PBH 剪力键的疲劳曲线。

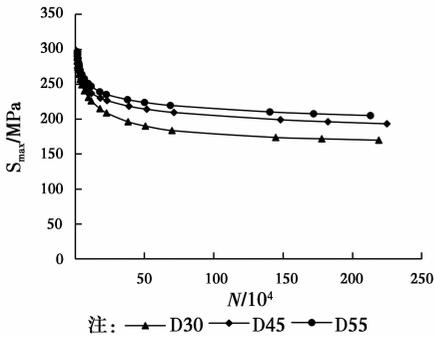


图 18 不同混凝土强度的 S-N 曲线

Fig. 18 The S-N curve of the different strength of concrete

通过对曲线的拟合分析,得到如下结果:C30、C45、C55 混凝土试件的疲劳强度分别为 167.3、190.8、202.1 MPa,说明在其他条件相同情况下,混凝土强度越高,对应的疲劳强度越大;在相同最大疲劳破坏应力下,混凝土强度越高,寿命越长。其他条件相同的情况下,对于同一个试件,最大疲劳破坏应力越大,寿命越小。当破坏应力是 230 MPa 时,混凝土强度为 C30、C45、C55 的试件对应的疲劳寿命为 10.0 万、21.6 万、35.7 万次,混凝土强度为 C45 比 C30 的试件寿命大 54%,混凝土强度为 C55 比 C30 的试件寿命大 72%。

3.3.4 疲劳寿命影响参数比较 总结图 14、15、16 以及在破坏应力为 230 MPa 时参数变化导致试件疲劳寿命的变化可知,肋板开孔直径、穿入钢筋直径及混凝土强度对 PBH 疲劳寿命的影响均较大,其中穿入钢筋直径变化影响最为显出,而后是混凝土强度和肋板开孔孔径。

4 结论

1)PBH 剪力键疲劳损伤累积规律可分为 3 个阶段:疲劳损伤开始阶段、疲劳损伤发展阶段、疲劳破坏阶段。其刚度退化在上述 3 个阶段中,第 1、2 阶段退化缓慢,第 3 阶段退化明显较快。

2)PBH 剪力键的疲劳破坏模式与静载破坏相似:受到穿入钢筋的反复挤压,肋板孔内的混凝土榫受压破碎,穿入钢筋受到肋板宽度较小范围内集中力反复作用,导致穿入钢筋局部屈服。

3)PBH 剪力键在疲劳加载过程中,位移幅值和应变幅值沿试件高度分布均表现为从加载端至支撑端逐渐减小,表明在结构的疲劳加载过程中,疲劳破坏局部变形由加载端向支撑端传递,这也说明剪力

由加载端向支撑端传递的传力机制。

4)PBH 疲劳寿命有限元分析表明,PBH 疲劳寿命随肋板开孔直径、穿入钢筋直径及混凝土强度的增加而增加,其中穿入钢筋直径对 PBH 剪力键的疲劳寿命影响最为显著,其次是混凝土强度和肋板开孔孔径。

参考文献:

- [1] BRACONI A, CAPRILI S, DEGEE H, et al. Efficiency of Eurocode 8 design rules for steel and steel-concrete composite structures [J]. *European Journal of Biochemistry*, 2015, 112(1):108-129.
- [2] NIE J, CAI C S. Steel-concrete composite beams considering shear slip effects [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 129(4): 495-506.
- [3] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. *土木工程学报*, 2012(6):110-122.
NIE J G, TAO M X, WU L L, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012 (6): 110-122. (in Chinese)
- [4] 张志明,马克俭,钟永力,等. 新型大跨度钢-混凝土组合空腹夹层板楼盖的构造与工程应用[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(5):113-117.
ZHANG Z M, MA K J, ZHONG Y L, et al. Construction and engineering application of new large-span composite open-web sandwich plate of steel and concrete [J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2013, 30(5):113-117. (in Chinese)
- [5] 卫星,强士中. 大跨钢-混凝土结合梁斜拉桥传力机理 [J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(3):402-408.
WEI X, QIANG S Z. Mechanic behavior of steel-concrete composite girder of long-span cable-stayed bridge [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(3):402-408. (in Chinese)
- [6] 卫星,肖林,邵柯夫,等. 钢-混组合结构 PBL 剪力键疲劳寿命试验 [J]. *中国公路学报*, 2013, 26(6): 96-102.
WEI X, XIAO L, SHAO K F, et al. Fatigue performance of perfobond shear connector in steel-concrete composite structure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(6): 96-102. (in Chinese)
- [7] 肖林,卫星,强士中. 两类 PBL 剪力键推出试验的对比研究 [J]. *土木工程学报*, 2013(11):70-80.
XIAO L, WEI X, QIANG S Z. Comparative study on

- two kinds of push-out tests of PBL shear connectors [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013(11):70-80. (in Chinese)
- [8] 汪维安,李乔,赵灿晖,等. 混合结构 PBL 剪力键群承载力试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(6): 109-117.
- WANG W A, LI Q, ZHAO C H, et al. Experimental study on bearing capacity of PBL shear connector group in hybrid structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(6):109-117. (in Chinese)
- [9] VALENTE I, CRUZ P J S. Experimental analysis of perfobond shear connection between steel and lightweight concrete [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(3/4/5):465-479.
- [10] VIANNA J D C, COSTA-NEVES L F, VELLASCO P C G D, et al. Experimental assessment of perfobond and T-perfobond shear connectors' structural response [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(2):408-421.
- [11] AHN J H, LEE C G, WON J H, et al. Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(10):1295-1307.
- [12] 李运生, 侯忠明, 赵志杨, 等. 焊钉连接件时变抗剪性能的试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(6):131-136.
- LI Y S, HOU Z M, ZHAO Z Y, et al. Experimental analysis of time-dependent shear behavior on stud connectors [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(6): 131-136. (in Chinese)
- [13] TAKEDA K. An experimental study on ultimate strength of aluminum alloy single shear bolted connections with curling influence [J]. *Annual Report of Studies in Humanities & Social Sciences*, 2015, 31(4):71-78.
- [14] 曹学亮, 李法雄, 雷俊卿, 等. 基于 ABAQUS 的开孔板连接件抗剪承载力分析[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(11): 89-95.
- CAO X L, LI F X, LEI J Q, et al. Analysis of shear-capacity of perfobond shear connectors based on ABAQUS software [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(11): 89-95. (in Chinese)
- [15] ZHOU Z, FAN L, WANG S, et al. Chongqing Wansheng Zaodu Bridge: Steel box-concrete composite arch bridge [J]. *Structural Engineering International (SEI)*, 2013, 23:71-74.
- [16] 范亮, 周志祥. 拱桥钢箱-混凝土组合受弯构件试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(6):15-21.
- FAN L, ZHOU Z X. Experimental analysis for steel box-concrete composite beam of arch bridge [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, 31(6):15-21. (in Chinese)
- [17] FAN L, ZHOU Z. New shear connectors based on PBL shear connector for composite arch members [J]. *Structural Engineering International (SEI)*, 2014, 24(2):281-284.
- [18] 范亮. 钢箱混凝土组合拱截面受力行为与设计原理研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
- FAN L. Study on the mechanical behaviors and design principles of steel box-concrete composite arch sections [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [19] 李建军, 聂建国. 钢-混凝土组合梁的疲劳问题[J]. *工业建筑*, 2002, 32(3):57-60.
- LI J J, NIE J G. Fatigue of steel-concrete composite beams [J]. *Industrial Construction*, 2002, 32(3): 57-60. (in Chinese)
- [20] Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1. 9: Fatigue; DD ENV 1993-1-1: 1992 [S]. 1992.
- [21] 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, 2012.
- XIAO L. Study of static and fatigue behavior of PBL shear connectors in steel-concrete composite structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [22] 刘明星, 刘志峰, 宋守许. 基于 ABAQUS/fe-safe 的服役后轴类零件疲劳分析方法[J]. *机械设计与制造*, 2012(9):72-74.
- LIU M X, LIU Z F, SONG S X. Fatigue analysis method of used shaft parts based on ABAQUS/fe-Safe [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(9):72-74. (in Chinese)