

钢-UHPC 组合桥面的疲劳性能研究

顾 萍,鲁 凡,张志强,马家欢

(同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘 要 目的 研究钢-UHPC 组合桥面的疲劳裂纹类型和发展规律,分析疲劳裂纹对组合桥面板结构受力特性的影响,为钢-UHPC 组合桥面的设计提供理论依据。方法 依据实桥主桥钢桥面的构造参数,设计制作了两个足尺试验构件,进行静载、疲劳试验,并与有限元计算结果进行对比分析。结果 有限元模型计算的各测点应力和位移与实测值基本吻合;纵肋与横隔板连接焊缝处容易发生疲劳裂纹,所有试件均在此处发现了裂纹;纵肋腹板裂纹较小时,对钢桥面受力性能影响较小;随着纵肋腹板裂纹、UHPC 与钢桥面板脱层扩展,试件刚度显著下降,最大挠度增量达 33%。结论 纵向配筋不同的两个构件其受力特性和疲劳性能差异不大,建议 UHPC 层中纵向钢筋可按直径 10 mm 密配筋布置。

关键词 正交异性组合桥面板;疲劳试验;裂纹;脱层;刚度

中图分类号 TU997;U443

文献标志码 A

Fatigue Performance of Steel-UHPC Composite Bridge Deck

GU Ping, LU Fan, ZHANG Zhiqiang, MA Jiahuan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, China, 200092)

Abstract: To investigate fatigue crack patterns and their influence on structural behavior of the steel-UHPC composite deck under cycling loading and enable the fatigue design specification. Two full-scale bridge deck specimens were designed and fabricated with the specific detailing and dimensions in accordance to the prototype bridge deck of a real bridge for static and fatigue tests. Compared with the test results, the FE-based computational results were found agree with the measured stress and displacement at the concerning points. The fatigue cracks observed were prone to occur at the joints between the longitudinal ribs and the transverse diaphragm for all specimens. It is concluded that when crack initiates in the rib web, very small change would occur in the rib stresses and in the deflection of bridge deck. But with further development of fatigue cracks in the rib web, and delamination between the UHPC layer and the steel deck, the flexural stiffness of the bridge deck specimen decreased significantly, and a 33% increment in the deflection was observed in the tests. The two specimens, though were not identical the same in longitudinal steel

收稿日期:2020-07-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52078362,51578407)

作者简介:顾萍(1963—),女,副教授,主要从事桥梁结构理论等方面研究。

reinforcement, they appeared similar structural and fatigue performance. The optional rebars of 10 mm in diameter are suggested for the longitudinal steel reinforcement in UHPC layer.

Key words: orthotropic composite bridge deck; fatigue tests; crack; delamination; stiffness

正交异性钢桥面因自重轻、承载力大、适用范围广等优点得到了广泛的应用,但由于重型车辆的荷载增大、交通量增加等原因,其铺装层和焊接处容易发生疲劳破坏^[1-2]。为了改进正交异性钢桥面结构受力性能,解决服役过程中出现的桥面疲劳病害问题,国内外学者做了许多研究,不断优化设计参数,改变构造细节^[3-5],但上述问题并没有得到很好的解决。随着材料的发展与进步,近年来采用 UHPC(超高性能混凝土)层与正交异性钢桥面板结合的组合桥面板结构开始兴起,将传统的厚度为 75~300 mm 的沥青铺装用厚度 50 mm 的 UHPC 层加一个薄沥青铺装层来代替,组成轻型组合桥面系^[6]。针对这种钢-UHPC 组合桥面结构的基本性能,陈斌等^[7-13]结合虎门大桥、佛陈大桥、枫溪大桥等工程实践,开展了钢-UHPC 组合钢桥面足尺模型静力试验和力学性能研究。张清华^[14]、L. Dieng^[15]、J. S. Kim^[16]对不同形式的钢-UHPC 组合钢桥面进行试验并研究了其疲劳细节。刘诚等^[17]以岳阳洞庭湖大桥为背景,对组合桥面分别进行了受正弯矩和负弯矩作用的疲劳试验。田启贤等^[18]以武汉军山长江大桥为背景,对正交异性钢-UHPC 组合桥面进行疲劳试验研究。张清华等^[19-20]通过足尺试验和有限元分析研究了正弯矩下钢-UHPC 组合桥面的疲劳破坏及结构性能。上述钢-UHPC 组合桥面的疲劳性能试验及研究的共同特点是基于工程验证,虽然历经 200 万次甚至 500 万次应力循环,组合桥面未出现明显疲劳破坏。

迄今为止,正交异性钢-UHPC-组合桥面的疲劳评估理论、计算理论和方法还不完善。笔者根据实桥构造设计了两个足尺试件,进行疲劳性能试验,研究钢桥面开裂处细节的疲劳受力性能,得到疲劳破坏模式,分析疲劳裂纹对组

合桥面板结构受力特性的影响,为组合桥面疲劳评估提供理论依据和设计参考。

1 试 验

笔者以一座三塔钢箱梁斜拉桥实桥为工程背景,主桥全长 500 m,桥宽 39 m,跨径布置为(82+168+168+82)m,根据实桥构造设计了两个足尺试件 A、B,其参数完全相同,仅 UHPC 层内配筋不同。每个试件包括两根纵肋及两块横隔板。纵肋高 280 mm、上宽 300 mm、下宽 170 mm、厚 8 mm,纵肋间距 600 mm,横隔板厚 12 mm,顶板 16 mm。试件总长 4.8 m,跨中 2.4 m、悬臂 1.2 m,试件宽度为 1.4 m。试件结构及测点见图 1。

45 mm 厚的铺装层采用上海罗洋新材料科技有限公司生产的“泰耐克”E120 高应变强化型超高性能混凝土。UHPC 与钢板用栓钉连接,形成组合桥面板共同受力。UHPC 中配置双向钢筋网,两个试件的横向配筋均为 8@100,试件 A 纵向配筋为 10@100,试件 B 纵向配筋为 12@100,混凝土保护层厚度为 20 mm,钢筋强度均为 HRB400。采用直径 13 mm、长 35 mm 短栓钉,栓钉纵、横向间距均为 300 mm,共计 80 个。每个试件布置 3 个位移测点,分别位于加载点、跨中和支座;钢筋上布置 8 个应变测点,分别位于跨中和两个支座截面处。在试件 1~3 截面各布置 13 个应变测点。

试验加载设备为电液式脉动疲劳试验机(PMW-400),其最大加载力 500 kN,工作频率为 2~8 Hz。加载位置在悬臂端,加载点处布置有 400 mm×200 mm×20 mm 橡胶垫板,加载频率为 4 Hz。在试件横隔板下方布置滚轴支座,在远离加载处的横隔板上用千斤顶压住,加载装置见图 2。

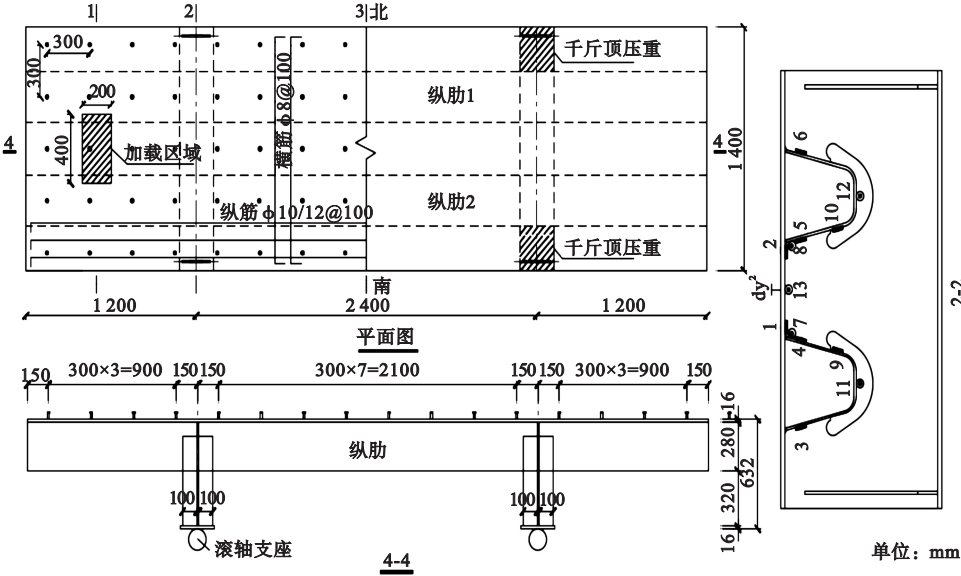


图 1 试件结构及测点示意图

Fig. 1 Specimen structure and layout of measured points

2 有限元分析

试体有限元模型如图 3 所示,钢板采用 shell63 单元模拟,混凝土采用 solid45 单元模拟,栓钉采用 combin14 弹簧单元模拟。整个模型共 350 068 个节点,329 358 个单元,最小网格尺寸为 5 mm。假定钢板与混凝土在竖向共同变形,在纵向与横向仅考虑栓钉的抗剪作用,不考虑两种材料间的粘结抗剪作用。计算模型在栓钉位置处设置纵向与横向弹簧,将钢板与混凝土竖向的自由度耦合。在靠近加载端的支座位置处施加竖向和横向位移约束,在远离加载端的支座位置处施加三个方向的位移约束以及转角约束。



图 2 试验加载装置

Fig. 2 Loading device of test

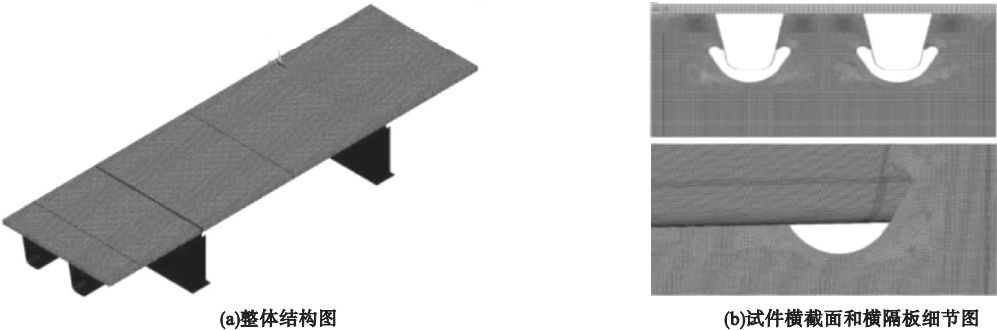


图 3 试体有限元计算模型

Fig. 3 Finite element model of specimen

试件 A-W、B-W 的有限元计算值和静力试验实测值对比结果见表 1。表中试验值均为疲劳加载前做的首次静力试验,试验荷载 120 kN。表中应力测点见图 1,测点 2-7 表示测试截面 2 中的 7 号测点,其他编号类似。

表 1 理论与试验结果对比

Table 1 Comparison of theoretical and experimental results

测试值	位移/mm		纵肋上部纵向 应力/MPa		纵肋底部纵向 应力/MPa		纵肋与横隔板连接竖 向应力/MPa		加载区顶板横向 应力/MPa	
	加载中心	跨中	2-7	2-8	2-11	2-12	2-9	2-10	1-1	1-2
试验值 1	-1.7	0.3	-4.3	5.3	-55.1	-56.2	71.2	76.6	-3.8	-5.7
试验值 2	-1.7	0.3	-4.2	5.2	-56.7	-57.2	70.8	73.8	-3.9	-5.7
计算值	-1.7	0.4	-4.1	-3.9	-57.8	-57.8	70.4	70.3	-5.5	-5.5

注:试验值 1 为 A-W 的实测值,试验值 2 为 B-W 的实测值。

3 疲劳试验

3.1 裂纹发展

本次试验对每个试件东、西两侧的悬臂段进行疲劳加载,共进行 4 次疲劳试验,分别为 A-W、A-E、B-W、B-E。每次疲劳试验中,进行若干次静力试验:试件 A 的两个悬臂段

由表 1 可知,试件的位移、应力实测值与计算值基本吻合,试件受力对称;两个构件的静力试验实测值差值均小于 4%,故纵向配筋对钢桥面刚度与应力影响较小。

各进行 4 次静力试验,其中 A-W 中的静力试验分别在疲劳加载前、100 万次、200 万次和 400 万次,A-E 中的静力试验分别在疲劳加载前、200 万次、400 万次和 504 万次;试件 B 的两个悬臂段各进行两次静力试验,B-W 在疲劳加载前、200 万次,B-E 在疲劳加载前、283 万次。疲劳试验结果见表 2。

表 2 疲劳试验荷载幅及开裂情况汇总

Table 2 Summary of fatigue test load amplitude and cracking

循环次数/万次	A-W		A-E		B-W		B-E	
	荷载幅/ kN	裂纹	荷载幅/ kN	裂纹	荷载幅/ kN	裂纹	荷载幅/ kN	裂纹
0~100	110	—	165	—	320	裂	280	裂
100~200	115	—	165	—	320	脱	280	脱
200~300	145	—	270	裂	—	—	280	—
300~400	145	裂	270	—	—	—	—	—
400~500	—	—	310	脱	—	—	—	—

疲劳试验 A-W 共完成 400 万次荷载循环,采用的荷载幅分别为 110 kN、115 kN 和 145 kN,循环 400 万次时在纵肋与横隔板连接焊缝处(测点 2-10 附近)出现肉眼可见的裂纹,但裂纹长度较短,没有明显的扩展(见图 4)。疲劳试验 A-E 进行了 500 万次荷载循环,采用的荷载幅分别为 165 kN、270 kN 和 310 kN,当荷载循环 220 万次时在纵肋与横隔板连接焊缝处出现裂纹,并在纵

肋腹板中不断发展。在荷载循环约 476 万次后,UHPC 与顶板连接处出现脱层现象,沿连接截面产生纵向裂纹,但 UHPC 内未出现裂纹。疲劳试验 B-W 与 B-E 分别在 25 万次、39 万次时在纵肋与横隔板连接焊缝处出现裂纹,并慢慢扩展(见图 4);在 113 万次和 179 万次时发生了 UHPC 与顶板的脱层破坏,脱层不断扩大,但 UHPC 内均未出现裂缝(见图 5)。

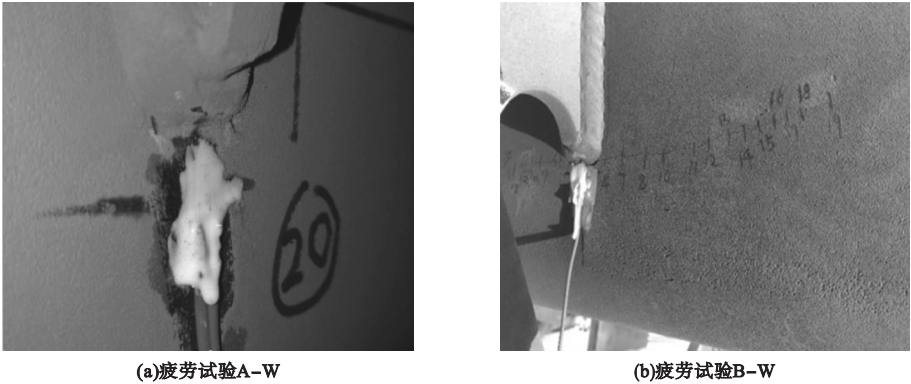


图 4 纵肋与横隔板连接焊缝疲劳裂纹

Fig. 4 Fatigue cracks of welded joint between crack longitudinal rib and transverse diaphragm

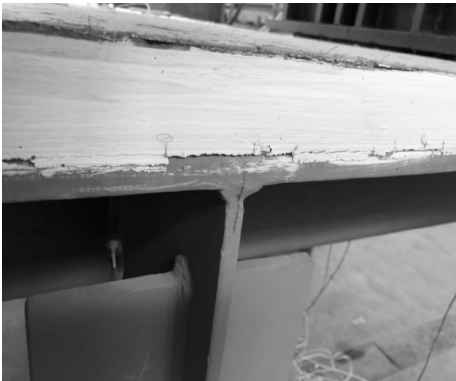


图 5 UHPC 与顶板脱层 (B-E)

Fig. 5 Delamination between UHPC and top plate (B-E)

4 次疲劳试验均在纵肋与横隔板连接焊缝处出现疲劳裂纹,除疲劳试验 A-W 的裂纹仅一条、且出现后没有扩展外,其他三次疲劳试验的纵肋腹板裂纹均有两条(测点 9、测点 10 附近),均随着循环次数的增加,裂纹在腹板上的扩展速度越来越快。图 6 为疲劳试验 A-E 的纵肋腹板上两条裂纹扩展曲线。荷载循环 220 万次时发现裂缝,初期扩展速度较慢,在荷载循环 420 万次后裂纹迅速扩展,至疲劳试验结束时其长度分别达到 163 mm、280 mm。

3.2 应力幅变化

图 7 为疲劳试验 A-W 中测点 2-9、2-10 竖向应力幅与循环次数的变化曲线。疲劳试验 A-W 前 200 万次的荷载幅为

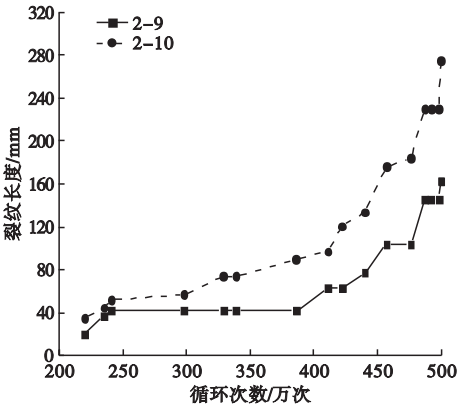


图 6 疲劳试验纵肋与横隔板连接处裂纹扩展曲线 (A-E)

Fig. 6 Crack propagation diagram at the joints of longitudinal rib and transverse diaphragm of fatigue test (A-E)

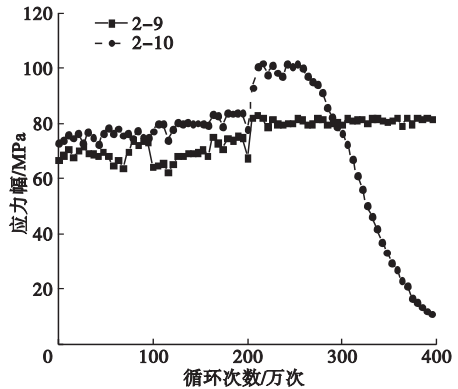


图 7 纵肋与横隔板连接竖向应力幅变化 (A-W)

Fig. 7 Vertical stresses amplitude change of connection of longitudinal rib and diaphragm (A-W)

115 kN,测点 2-9、2-10 的应力幅较平稳,循环至 200 万次时荷载幅上升为 145kN,测点 2-10应力幅也随之增大,在约 260 万次时开始下降,在 400 万次后降为最大值的 10%,同时在测点 2-10 处发现裂纹(见图 4(a))。测点 2-9 应力幅一直较平稳,至疲劳试验 A-W 结束,该位置处未发现疲劳裂纹。

图 8、图 9 分别为试件 A(E)在 400~520 万次荷载循环中测点 2-13 的应力幅及支座处 UHPC 中钢筋应力幅变化曲线,疲劳加载的荷载幅为 310 kN。在观察到试件 A(E)支座处 UHPC 铺装层与正交异性钢桥面板脱层现象前,钢桥面板底部应力幅就已经开始提高,呈现出一个阶梯式的变化曲线,即 UHPC 层与钢桥面板间抗剪连接的失效是阶段性的:当一部分抗剪连接疲劳破坏后,钢桥面板底部应力会突然上升。此时虽可以观察到脱层现象,但其余层间抗剪连接未破坏,UHPC 层与钢桥面板间的剪力会重新分布,使钢桥面板底部应力稳定在一个值附近,直到下一部分抗剪连接疲劳破坏。当支座处大部分抗剪连接疲劳破坏后,剩余的抗剪连接不足以承受 UHPC 层与正交异性钢桥面板的层间剪力,钢桥面板底部应力会突然提升,呈现出如图中后半段曲线的应力变化。铺装层与钢桥面板抗剪连接失效后,试件从组合

桥面板共同受力变为 UHPC 板与钢桥面板叠合受力,此时 UHPC 中钢筋应力幅减小,钢桥面板应力增大。

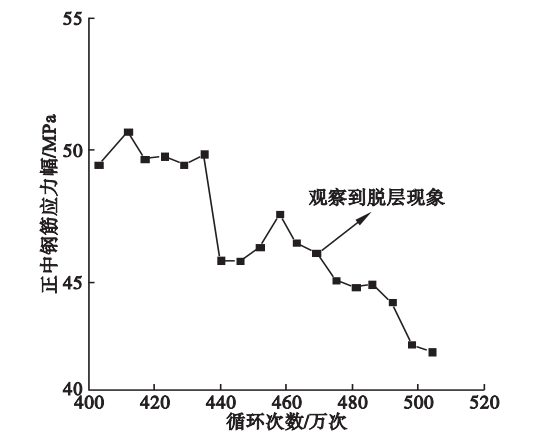


图 9 钢筋应力幅变化曲线(A-E)
Fig. 9 Stress amplitude curve of reinforcement(A-E)

图 10 为试验 A-E 中部分测点应力幅随循环次数的变化曲线。由图可知,加载截面纵肋上部竖向应力幅、支座和跨中截面纵肋底部纵向应力幅同一荷载幅下波动较小,在出现纵肋腹板疲劳裂纹(220 万次)后也没有明显的变化,应力幅波动在 5% 以内,即对钢桥面受力性能影响较小。但循环 400 万次后由于纵肋疲劳裂纹沿腹板扩展、UHPC 脱层出现,使钢桥面应力幅的波动增大。

3.3 挠度

表 3 为各构件在不同静载试验时挠度值。由表 3 可知,随着荷载循环次数的增加,除试验 A-W 外,其余试验中试件的刚度显著下降。由于试验 A-W 的疲劳荷载幅较小,纵肋腹板中裂纹长度较短,UHPC 铺装层与正交异性钢桥面板脱层现象也较轻,试件整体刚度下降差为 3%,A-W 试件刚度的变化较小,而其余构件试验结束后纵肋腹板中裂纹、UHPC 与钢桥面板脱层现象均有较大扩展,整体刚度下降在 12%~33%。由此可知,裂纹和脱层刚产生时,对试件整体的刚度影响较小,但随着裂纹的扩展,试件整体刚度的退化越来越显著。

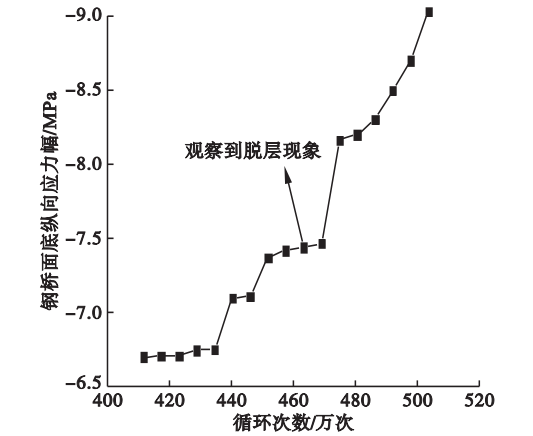


图 8 测点 2-13 应力幅变化曲线(A-E)
Fig. 8 Stress amplitude curve of measure point 2-13 (A-E)

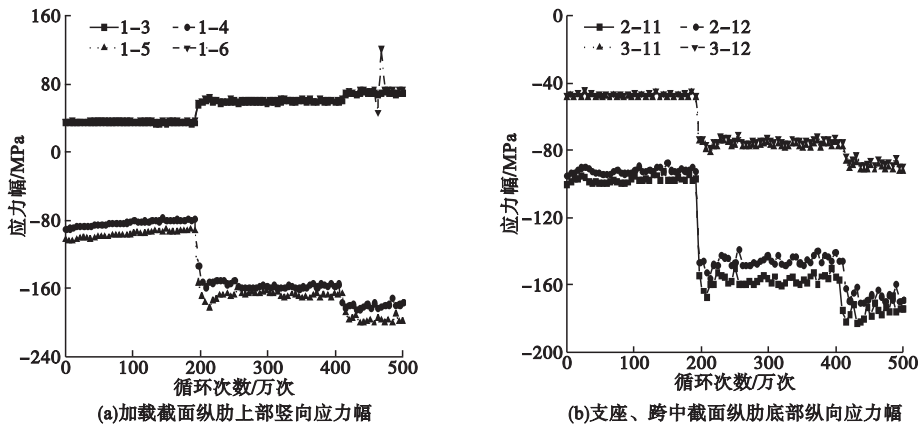


图 10 测点应力幅-循环次数曲线图(A-E)

Fig. 10 Stresses amplitude-cycles graph at measuring points(A-E)

表 3 不同静载试验时加载位置挠度

A-W		A-E		B-W		B-E	
加载次数/万次	挠度/mm	加载次数/万次	挠度/mm	加载次数/万次	挠度/mm	加载次数/万次	挠度/mm
0	1.72	0	1.8				
100	1.67	200	1.92	0	2.87	0	3.01
200	1.68	400	2.18				
400	1.71	504	2.22	200	3.24	283	4.22

注:A-W、A-E 的荷载为 120 kN;B-W、B-E 的荷载为 200 kN。

4 结 论

- (1)纵肋与横隔板连接焊缝处是容易发生开裂的疲劳细节,所有试件均在此处发现裂纹,裂纹在纵肋腹中有较大扩展,并有向顶板延伸的趋势。
- (2)纵肋腹板裂纹较小时,纵肋应力和试件挠度变化幅度均在 5% 以内,裂纹对钢桥面受力性能影响较小。
- (3)随着纵肋腹板裂纹、UHPC 与钢桥面板脱层扩展,试件刚度显著下降,最大挠度增量达 33%。

参考文献

[1] XIAO Z G, YAMADA K, INOUE J, et al. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck [J]. International journal of fatigue, 2006, 28(4): 409-416.

[2] SIM H B, UANG C M. Stress analyses and parametric study on full-scale fatigue tests of

rib-to-deck welded joints in steel orthotropic decks [J]. Journal of bridge engineering, 2012, 17(5): 765-773.

[3] 叶华文,王应良,张清华,等. 新型正交异性钢-混组合桥面板足尺模型疲劳试验 [J]. 哈尔滨工业大学报, 2017, 49(9): 25-32.

(YE Huawen, WANG Yingliang, ZHANG Qinghua, et al. Full-scale fatigue test of new steel-concrete composite orthotropic bridge deck [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2017, 49(9): 25-32.)

[4] 顾萍,裴辉腾,盛博. U 肋带内隔板钢桥面疲劳性能研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 1499-1504.

(GU Ping, PEI Huiteng, SHENG Bo. Study of fatigue performance of orthotropic steel bridge decks with inner diaphragm in U-rib [J]. Journal of Tongji university (natural science), 2014, 42(10): 1499-1504.)

[5] 王春生,付炳宁,张芹,等. 正交异性钢桥面板足尺疲劳试验 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 69-76.

(WANG Chunsheng, FU Bingning, ZHANG Qin, et al. Fatigue test on full-scale orthotropic steel bridge deck [J]. China journal of highway and transport, 2013, 26(2): 69-76.)

[6] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system

- composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer [J]. Journal of bridge engineering, 2013, 18(5): 417-428.
- [7] 陈斌, 邵旭东, 曹君辉. 正交异性钢桥面疲劳开裂研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 170-174.
(CHEN Bin, SHAO Xudong, CAO Junhui. Study of fatigue cracking for orthotropic steel bridge deck [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(12): 170-174.)
- [8] 张龙威, 赵华, 谭承君, 等. UHPC-钢轻型组合桥面弧形切口受力分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 75-81.
(ZHANG Longwei, ZHAO Hua, TAN Chengjun, et al. Stress analysis on cutout at welded rid-to-diaphragm connections in a light-weight steel-UHPC composite deck [J]. China journal of highway and transport, 2016, 29(9): 75-81.)
- [9] CAO J H, SHAO X D, DENG L, et al. Static and fatigue behavior of short-headed studs embedded in a thin ultrahigh-performance concrete layer [J]. Journal of bridge engineering, 2017, 22(5): 40-45.
- [10] 丁楠, 邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 74-81.
(DING Nan, SHAO Xudong. Study on fatigue performance of light-weighted composite bridge deck [J]. China civil engineering journal, 2015, 48(1): 74-81.)
- [11] 裴必达, 李立峰, 邵旭东, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面板实桥试验研究[J]. 湖南大学学报, 2019, 46(01): 76-84.
(PEI Bida, LI Lifeng, SHAO Xudong, et al. Research on field measurement of steel-UHPC lightweight composite deck [J]. Journal of Hu'nan university, 2019, 46(1): 76-84.)
- [12] LUO J, SHAO X D, CAO J H, et al. Transverse bending behavior of the steel-UHPC lightweight composite deck: orthogonal test and analysis [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 162(11): 1-19.
- [13] 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, 49(6): 67-75.
(LI Jia, YANG Bo, SHAO Xudong, et al. Research on shear fatigue of studs for composite deck system of steel slab and thin CRRPC layer [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(6): 67-75.)
- [14] 张清华, 张鹏, 刘益铭, 等. 新型大纵肋正交异性组合桥面板力学性能研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 30-35.
(ZHANG Qinghua, ZHANG Peng, LIU Yiming, et al. Study of mechanical behavior of new type of orthotropic composite bridge deck with large longitudinal U ribs [J]. Bridge construction, 2017, 47(3): 30-35.)
- [15] DIENG L, MARCHAND P, GOMES F, et al. Use of uhpfrc overlay to reduce stresses in orthotropic steel decks [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 89(10): 30-41.
- [16] KIM J S, KWARK J, JOH C, et al. Headed stud shear connector for thin ultrahigh-performance concrete bridge deck [J]. Journal of constructional steel research, 2015, 108(2): 23-30.
- [17] 刘诚, 樊健生, 聂建国, 等. 钢-超高性能混凝土组合桥面系中栓钉连接件的疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 139-146.
(LIU Cheng, FAN Jiansheng, NIE Jianguo, et al. Fatigue performance research of headed studs in steel and ultra-high performance concrete composite deck [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(3): 139-146.)
- [18] 田启贤, 高立强, 周尚猛, 等. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(增刊1): 13-19.
(TIAN Qixian, GAO liqiang, ZHOU Shang meng, et al. Study of mechanical behavior of composite bridge deck with ultra high performance concrete and orthotropic steel plate [J]. Bridge construction, 2019, 49(S1): 13-19.)
- [19] ZHANG Q H, LIU Y M, BAO Y, et al. Fatigue performance of orthotropic steel-concrete composite deck with large-size longitudinal U-shaped ribs [J]. Engineering structures, 2017, 150(11): 864-874.
- [20] LIU Y, ZHANG Q, MENG W, et al. Transverse fatigue behaviour of steel-UHPC composite deck with large-size U-ribs [J]. Engineering structures, 2019, 180(4): 388-399.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)