

U 肋带内隔板钢桥面疲劳性能研究

顾 萍, 裴辉腾, 盛 博, 胡雨蛟

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对正交异性铁路钢桥面构造细节, 开展 U 肋钢桥面疲劳性能研究, 进行了两个足尺钢桥面构件的静载和高周疲劳承载试验, 其中试件 DECK1 纵肋无内隔板, 试件 DECK2 在横梁腹板处纵肋内设置内隔板. 试验研究表明: 纵肋内隔板可有效改善纵肋腹板和横梁帽孔细节部位的受力, 提高钢桥面的疲劳强度; 与横梁帽孔交汇处的纵肋腹板为疲劳裂纹易发处, 两个构件均在此处出现水平向疲劳裂纹; 采用有限元计算模型, 分析研究了纵肋内增加内隔板对钢桥面受力的影响, 计算结果与试验结果吻合.

关键词: 正交异性钢桥面; 疲劳试验; 有限元分析; 疲劳强度

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

Fatigue Performance of Orthotropic Steel Bridge Decks with Inner Diaphragm in U-rib

GU Ping, PEI Huiteng, SHENG Bo, HU Yujiao

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

Abstract: Fatigue performance of orthotropic steel decks with U-rib was investigated based on the specific constructional detailing of the steel railway decks. Two full scale specimens, DECK1 which had the inner diaphragms in the U-ribs, and DECK2 which did not have the inner diaphragms were tested under the static loading and the high cycled loading. Test results show that inner diaphragms in the U-ribs help to redistribute stress in web of the rib and stress in diaphragm of the crossbeam, and hence to improve the fatigue strength of rib-to-diaphragm detail in the orthotropic steel railway decks. Fatigue cracks initiates very likely from the toe of the rib-to-diaphragm welds, and both specimens develop horizontal cracks in the web of rib at the position close to the rib-to-diaphragm connections. Finite element (FE) model of the decks is developed and the results agree well with the test results. Influences of the inner diaphragms in the U-ribs on the stress state and the fatigue performance of

the deck were analyzed.

Key words: orthotropic steel bridge decks; fatigue tests; finite element analysis; fatigue strength

正交异性钢桥面由于焊缝多、应力影响线短, 一辆车驶过会引起数次应力循环, 桥面在运营 5~10 年后易产生疲劳裂纹. 正交异性钢桥面裂纹主要出现于桥面板与纵肋连接处、纵肋与横梁连接处^[1-2], 疲劳裂纹的位置和强度与钢桥面构造细节、焊接工艺等因素有关. 针对这种现象, Lehigh 大学 John W. Fisher 等^[3-4]展开了正交异性钢桥面的足尺模型疲劳试验和威廉斯堡桥部分路面更换后的现场试验, 研究改善和提高钢桥面板疲劳性能和疲劳强度的构造细节. 日本在建造本四连络桥上几座大跨度悬索桥、斜拉桥设计前^[5-7], 也做了多次足尺模型疲劳试验和实桥钢桥面的现场测试. 这些研究完善了对正交异性钢桥面疲劳机理的认识, 研究成果被用于相关的疲劳设计方法中, 如美国 AASHTO LRFD^[8]、欧洲 Eurocode 3^[9]等对正交异性钢桥面均有比较明确的疲劳细节规定和疲劳计算方法. 我国正交异性钢桥面技术应用相对稍晚, 我国现行的公路、铁路设计、制作和施工规范中均没有针对正交异性钢桥面疲劳细节的规定以及疲劳强度的设计方法. 国内文献^[10-12]等对钢桥面板受力特性和疲劳强度也进行了模型疲劳试验, 但这些试验几乎都是针对公路钢桥面. 文献^[13-14]等针对铁路正交异性钢桥面板的构造细节, 通过有限元分析、模型疲劳性能试验等对钢桥面几种典型疲劳裂纹进行了疲劳寿命估算.

本文针对正交异性铁路钢桥面板实桥构造细节, 开展了钢桥面足尺构件的静力、疲劳试验和有限元分析, 研究了带内隔板 U 肋正交异性钢桥面受力

收稿日期: 2013-12-04

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036303)

第一作者: 顾 萍(1963—), 女, 副教授, 主要研究方向为桥梁结构理论. E-mail: gupsh@tongji.edu.cn

特性和疲劳强度,通过在纵肋内增加内隔板,改善纵肋腹板和横梁帽孔处的受力特性,提高钢桥面的疲劳强度. 研究结果与欧美规范规定的疲劳强度进行了比较,完善了钢桥面疲劳细节构造的疲劳强度验算方法.

1 试件及试验布置

设计、制作了两个足尺钢桥面试件(DECK1 和 DECK2),每个试件由四个纵肋(U形肋,R1~R4)、三根横梁(D1~D3)和钢桥面板组成(见图 1),图中

M1, M2 指跨中截面. 桥面板尺寸为 $5.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$, 厚 16 mm , 纵肋板厚 8 mm , 横梁腹板、翼板厚分别为 14 mm , 16 mm , 纵肋尺寸和间距、构造细节、制作工艺、材料均与某铁路钢桁梁桥钢桥面相同. DECK2 内隔板厚 14 mm , 与纵肋焊接, 与桥面板顶紧不焊, 尺寸见图 1e. 试件材质为 Q345qD 钢材, 其化学成分检测结果及力学特性检测结果符合《桥梁用结构钢》(GB/T 714—2008)^[15] 标准, 试件所有焊缝按照《铁路钢桥制造规范》(TB10212—2009)^[16] 进行检测, 均符合 I 级要求.

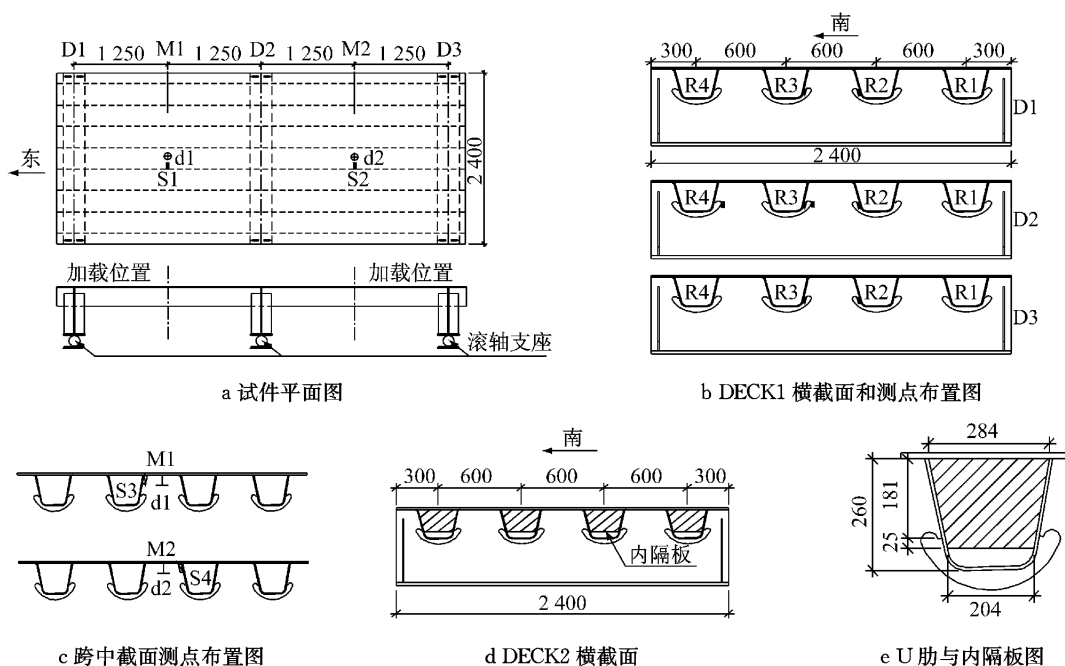


图 1 DECK1 和 DECK2 结构尺寸和测点布置 (单位: mm)

Fig. 1 Layout of instrumentation in DECK1 and DECK2 (unit: mm)

为模拟铁路钢桥面板、纵肋腹板、横梁帽孔等关注位置的应力状态,试件设计时通过多次有限元计算分析,确保关注点受力与实桥桥面相同. 试件 DECK2 在横梁腹板面的纵肋内设置内隔板, DECK1 和 DECK2 其余构造形式均相同.

两试件采用相同的加载方式,采用 500 kN 液压脉动试验机(PMS-500)加载. 液压脉动试验机的千斤顶通过分配梁对试件两跨中位置施加集中荷载,为模拟轮对对钢桥面的作用,集中荷载通过刚性钢垫块($200 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$)和 20 mm 厚橡胶垫传递到钢桥面,试件横梁两端下翼缘采用滚轴支座约束(图 1).

试件应变采集采用 DH5922 动态应变采集仪, 动应变测点(编号 s)、位移测点(编号 d)主要布置在桥面板跨中以及纵肋腹板相交处的横梁帽孔附近

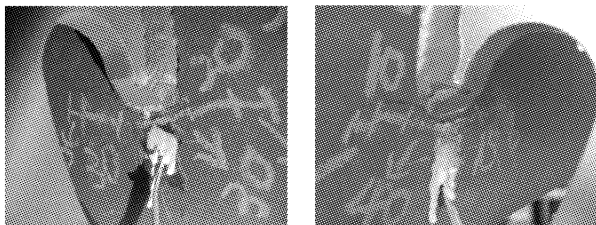
(图 1). 为避免焊缝构造影响,应变测点距焊缝的距离为 10 mm .

2 疲劳试验及试验结果

两试件疲劳试验前均先进行初始静载试验,疲劳试验荷载循环每隔 7 万次进行跨中动挠度和动应变等数据的采集和量测,并在荷载循环达到 100 万、200 万、300 万次及试验结束后进行一次静力加载试验,通过静载试验数据来判别试件受力特性变化以及疲劳裂纹对受力性能的影响. 根据施加的疲劳荷载幅,疲劳试验分为两个阶段:疲劳加载阶段 1—— $P_{\min} = 100 \text{ kN}$, $P_{\max} = 220 \text{ kN}$, 荷载幅为 120 kN , 疲劳加载至 200 万次;疲劳加载阶段 2—— $P_{\min} = 135 \text{ kN}$, $P_{\max} = 300 \text{ kN}$, 荷载幅为 165 kN , 继续加载至

450 万次时试验结束。

疲劳加载阶段 1,两个试件均未观测到疲劳裂纹;疲劳加载阶段 2,DECK1 和 DECK2 横梁附近的纵肋上分别出现了 4 条和 2 条疲劳裂纹(见表 1 和图 2)。表 1 列出了裂纹所在位置、裂纹长度以及发现裂纹所对应的加载次数。疲劳试验结束后,对两个试件均进行全面裂纹检查,除了横梁附近纵肋上的上述裂纹,在桥面板与纵肋焊接区等关注区域,均没观测到其他裂纹。另外采用超声相控阵检测仪(OLYMPUS OmniScan MX2),通过 16 晶片线阵排列探头对试件的钢桥面板进行了裂纹全面扫查,没有发现裂纹存在。



a D2 和 R3 连接焊缝北侧裂纹 b D1 和 R2 连接焊缝南侧裂纹
图 2 DECK1 的裂纹

Fig.2 Crack appearance of DECK1

表 1 两试件的裂纹汇总

Tab.1 Cracks summary of two specimens

试件	加载次数/ 万次	裂纹观测情况
DECK1	239	D2 和 R3 焊缝北侧观测到长 10 mm 裂纹
	268	D1 和 R2 焊缝南侧观测到长 25 mm 裂纹
	280	D2 和 R2 焊缝南侧观测到长 20 mm 裂纹
	344	D3 和 R2 焊缝南侧观测到长 30 mm 裂纹
	344	D2 和 R3 焊缝北侧裂纹扩展至 100 mm
	412	D1 和 R2 焊缝南侧裂纹扩展至 81 mm
	412	D2 和 R2 焊缝南侧裂纹扩展至 77 mm
	412	D3 和 R2 焊缝南侧裂纹扩展至 59 mm
DECK2	273	D2 和 R2 焊缝南侧观测到长 28 mm 裂纹
	411	D2 和 R3 焊缝北侧观测到长 25 mm 裂纹
	446.4	D2 和 R2 焊缝南侧裂纹扩展至 96 mm
	446.4	D2 和 R3 焊缝北侧裂纹扩展至 39 mm

3 钢桥面疲劳强度

钢桥面的受力分析表明:在桥面轮压作用下,纵肋产生纵向弯曲变形,纵肋腹板同时还受横梁约束会产生局部弯曲应力,纵肋与横梁帽孔交汇处应力集中也会对纵肋腹板的应力分布产生很大影响,纵肋腹板容易产生纵向和竖向两种疲劳裂纹^[2,9,17](图 3)。AASHTO 和 Eurocode 3 对正交钢桥面纵肋与横梁帽孔的构造细节和疲劳强度有相应的规定,但

这些规定主要针对竖向裂纹。DECK1 和 DECK2 的试验显示:上述部位更易产生纵向裂纹,类似的纵向裂纹在德国学者 Lehrke 的疲劳试验^[17]中也被观察到。本文采用 AASHTO 和 Eurocode 3 疲劳曲线,与试验数据进行了比较,对钢桥面的疲劳性能进行分析。

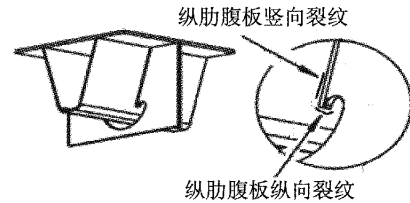


图 3 纵肋腹板裂纹形式

Fig.3 Crack patterns in web of the rib

图 4 为 AASHTO 和 Eurocode 3 针对纵肋与横梁帽孔构造细节的疲劳强度曲线,图中的 6 个数据点分别代表 DECK1 和 DECK2 在纵肋与横梁帽孔细节部位发生的 6 条纵向疲劳裂纹,试验数据对应的横坐标表示裂纹出现时的加载次数,纵坐标为裂纹位置的疲劳应力幅。第一阶段荷载幅 120 kN 的 200 万次疲劳循环(未出现裂纹)根据 Miner 线性准则,将其转换至荷载幅为 165 kN 的等效疲劳循环次数 76.9 万次。

图 4 显示,钢桥面试件纵肋上的纵向裂纹发生时的疲劳强度均大于 AASHTO-C 的 89.6 MPa 和 Eurocode 3 的 71 MPa 对应构造细节的疲劳强度,即纵肋腹板与横梁帽孔相交处的疲劳强度高于 AASHTO 规定的 C 类和 Eurocode 3 规定的 71 级疲劳强度。DECK1 出现了 4 条裂纹,DECK2 出现 2 条裂纹,在同类裂纹位置,DECK1 疲劳裂纹出现时所对应的疲劳应力幅要低一些。

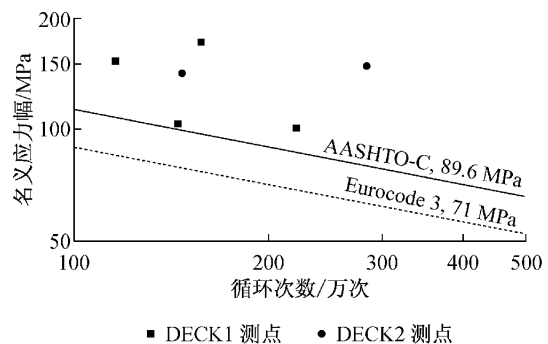


图 4 纵肋腹板的疲劳强度曲线(帽孔处)

Fig.4 Relationship between loading counts and stress range in the web (hole)

图 5 和图 6 为 Eurocode 3 针对纵肋与桥面板连接细节的疲劳强度曲线,图中 4 个数据点分别取之

DECK1 和 DECK2 跨中加载区腹板(测点 S3,S4)和桥面板(测点 S1,S2) 的实测应力幅. 由于两个试件在疲劳试验结束时, 上述部位均没有出现疲劳开裂, 图中疲劳荷载循环次数均为试验结束时对应的加载次数. 图 5,6 显示:DECK1 和 DECK2 的纵肋腹板疲劳强度远远高于 Eurocode 3 规定的 71 级疲劳曲线, 桥面板疲劳强度高于 100 级疲劳曲线.

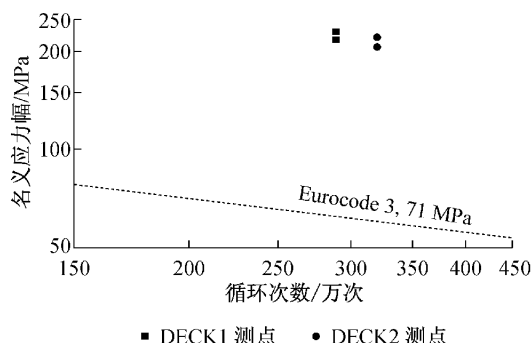


图 5 纵肋腹板的疲劳强度曲线(桥面处)

Fig.5 Relationship between loading counts and stress range in the web (deck)

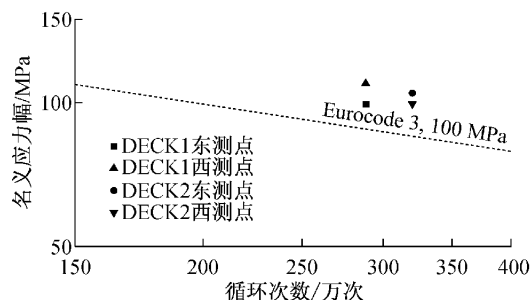


图 6 桥面板的疲劳强度曲线

Fig.6 Relationship between loading counts and stress range at the deck

4 有限元计算分析

采用有限元法,对试验桥面构件进行受力分析,

分别建立了两个试件的有限元力学模型. 与 DECK1 的计算模型相比,DECK2 在横梁腹板面的纵肋内增加了内隔板,见图 7. 有限元分析采用 ANSYS 程序,桥面板、肋与横梁均采用 Shell 63 板壳单元, DECK1 模型包含 344 544 个节点,345 103 个单元; DECK2 模型包含 355 554 个节点,356 437 个单元. 有限元计算模型的加载方式、边界条件均与试验构件一致. 桥面板两处橡胶垫块位置,施加 400 mm×200 mm 的均布荷载,两处的合力为 300 kN 荷载.

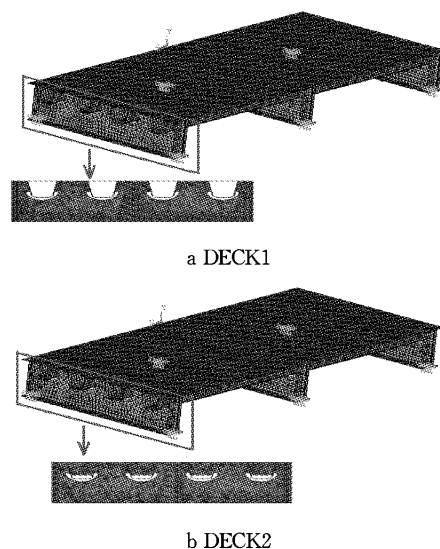


图 7 DECK1 和 DECK2 有限元模型

Fig.7 FE models of DECK1 and DECK2

图 8 为 DECK1 和 DECK2 的中横梁 R1 和 R2 两个帽孔位置应力计算结果的对比图(R3 和 R4 与之对称),图中横坐标为自帽孔左侧起点沿路径方向的距离,见图 8a. 由图 8 可知:外荷载的作用下,横梁帽孔应力呈现一侧受拉,另一侧受压的特性;内隔板使横梁帽孔周围应力得到明显改善,特别是在帽孔圆弧过渡区,横梁帽孔最大拉应力位置也从帽孔圆

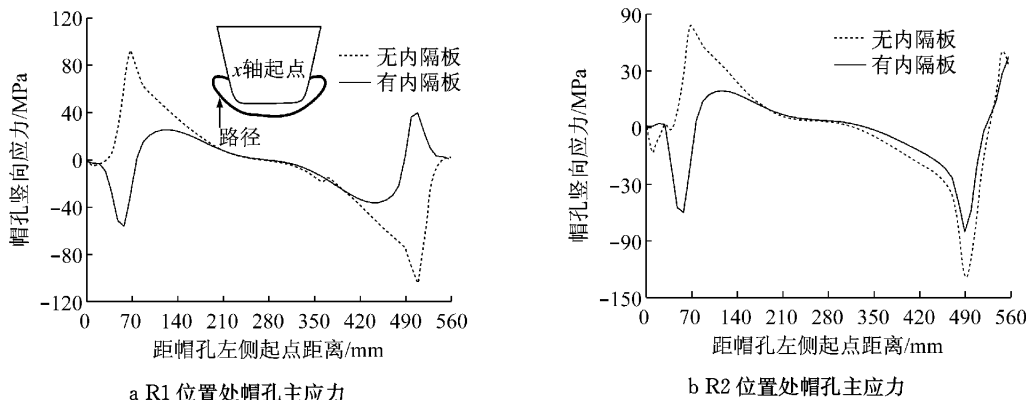


图 8 DECK1 和 DECK2 中横梁主应力对比图

Fig.8 Comparison of principal stresses in the crossbeams of DECK1 and DECK2

弧过渡区($x = 68 \text{ mm}$, $x = 507 \text{ mm}$)转到帽孔上部,最大拉应力由 90.2 MPa 减小至 53.7 MPa . 试件 DECK1 中较大拉应力的部位,在 DECK2 中(增加了内隔板)变成仅有很小的拉压过渡应力,有效改善了该区域的受力特性.

表 2 为钢桥面试件有限元计算值与实测值汇总表,计算值为试件始初状态,5 次实测值分别为疲劳试验加载前、疲劳荷载循环达到 100 万、200 万、300 万次及疲劳试验结束后的静载试验实测值. 表中显示:实测值与计算值很接近,且大部分测点的 5 次静

载试验实测值变化较小;两个试件均在疲劳循环 300 万次前在纵肋测点 9 附近出现裂纹,裂纹出现后该点应力实测值急剧下降,说明这类裂纹对钢桥面的整体受力影响不大,但改变了裂纹附近的应力分布. 试验中试件加载存在一定的偏载现象,实测试件东侧的位移、应力均稍大于西侧;两个试件实测及计算的桥面板应力基本相同,纵肋内隔板对桥面板应力影响很小;在横梁帽孔位置,DECK2 的应力计算值与实测值都明显小于 DECK1,纵肋内增加内隔板明显改善横梁帽孔的受力状态.

表 2 计算值与实测值汇总表

Tab.2 Summary of the calculated and the measured values

试件	数值	位移/mm		桥面板横向应力/MPa		横梁帽孔主应力/MPa		纵肋腹板应力/MPa		
		d1	d2	S1	S2	S7	S8	S5	S9	S11
DECK1	计算值	-1.95	-1.95	-75.1	-75.1	-61.1	-84.0	76.3	94.6	76.3
	实测值 1	-2.13	-1.94	-76.5	-65.3	-68.6	-93.2	78.6	102.5	81.9
	实测值 2	-2.11	-1.97	-76.5	-68.1	-71.1	-94.1	76.0	101.5	77.4
	实测值 3	-2.15	-1.87	-73.3	-76.1	-69.1	-95.1	75.1	103.1	80.1
	实测值 4	-2.18	-1.91	-77.7	-74.8	-67.4	-96.9	76.1	-10.3	79.8
	实测值 5	-2.19	-1.95	-79.9	-79.7	-72.2	-94.6	82.5	-10.8	86.2
DECK2	计算值	-1.80	-1.80	-77.6	-77.6	-9.3	-71.2	107.5	121.6	107.5
	实测值 1	-2.06	-1.89	-71.3	-63.2	-12.8	-77.0	97.8	117.2	93.0
	实测值 2	-2.07	-1.89	-73.7	-59.1	-10.3	-75.2	96.4	110.5	96.7
	实测值 3	-2.08	-1.91	-74.2	-60.1	-12.7	-76.7	98.2	112.3	97.6
	实测值 4	-2.15	-1.98	-72.2	-60.2	-10.3	-79.7	99.2	17.8	99.8
	实测值 5	-2.13	-2.02	-81.9	-60.1	-11.7	-78.6	105.8	17.4	101.1

图 9 为纵肋 R2 上纵肋腹板应力随腹板位置变化的曲线,图中横坐标为纵肋腹板的位置,其原点取在纵肋与横梁帽孔相交处. 由图 9 和表 2 列出的数据可知:在纵肋与横梁帽孔交汇处(横坐标原点),DECK2 的应力明显小于 DECK1,而该位置是疲劳裂纹的易发地;在内隔板与纵肋焊缝底部位置,DECK2 的应力明显大于 DECK1,但该位置对应构造细节的疲劳强度也较大. 可以看出:纵肋内增加内

隔板可以改善纵肋腹板与横梁帽孔交汇部位的应力状态,其应力影响范围大致距焊缝 10 mm 内. 而试验时应变测点均布置于距焊缝 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 左右距离,在该区域 DECK1(无内隔板)和 DECK2(有内隔板)的应力相近,因此实测应力未能反映内隔板对此区域应力分布的影响. 因此,通过增加纵肋内隔板来改善帽孔处的纵肋腹板应力,可提高该细节的疲劳强度.

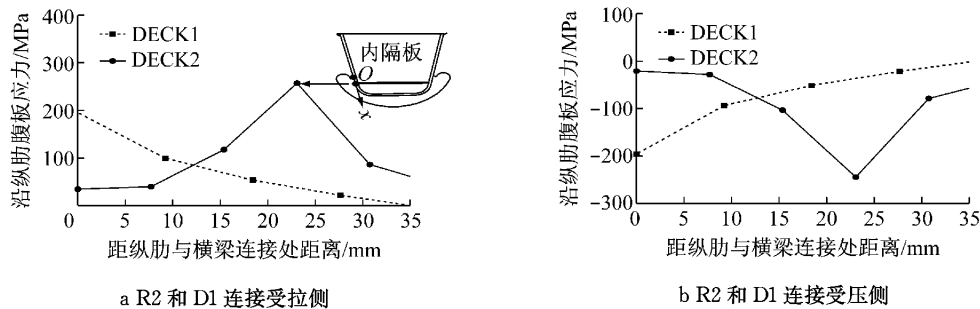


图 9 内隔板与纵肋腹板应力的影响关系

Fig.9 Influence of the inner diaphragms on the stress in the web

5 结论

通过足尺构件的静力、疲劳试验和有限元分析,研究了 U 肋正交异性铁路钢桥面的受力特性和疲劳强度,对纵肋内隔板改善钢桥面相关细节部位的受力和疲劳特性的影响进行了讨论,研究结论如下:

(1) 钢桥面横梁腹板处的纵肋设置内隔板能有效改善纵肋腹板和横梁帽孔处的受力,提高钢桥面此类构造细节的疲劳强度。

(2) 钢桥面中与横梁帽孔交汇处的纵肋腹板为疲劳裂纹易发处,本次试验的两个钢桥面构件均在此处纵肋腹板出现水平向疲劳裂纹,该类裂纹的疲劳强度均高于 AASHTO 或 Eurocode 3 规定的 C 级或 71 级。

(3) 与桥面板连接细节部位的纵肋腹板和桥面板在试验结束(荷载循环 450 万次)时未出现疲劳裂纹,其疲劳强度分别高于 Eurocode 3 规定的 71 级和 100 级。

参考文献:

- [1] De Jong F B P. Overview fatigue phenomenon in orthotropic bridge decks in the Netherlands [C]//Orthotropic Bridge Conference. Sacramento: ASCE, 2004:489-512
- [2] Xiao Z G, Yamada K, Ya S, *et al.* Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(8): 1387.
- [3] Tsakopoulos A, Fisher J W. Full-scale fatigue tests of steel orthotropic decks for the Williamsburg Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE. 2003, 8(5):323.
- [4] Tsakopoulos A, Fisher J W. Fatigue performance and design refinements of steel orthotropic deck panels based on full-scale laboratory [J]. Steel Structures, 2005 (5):211.
- [5] Xiao Z G, Yamada K, Inoue J, *et al.* Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28:409.
- [6] Xiao Z G, Yamada K, Inoue J, *et al.* Measurement of truck axle weights by instrumenting longitudinal ribs of orthotropic bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2006, 11 (5):526.
- [7] Fumotok K, Yamada I, Moriyama A, *et al.* Fatigue design, evaluation and inspection for orthotropic steel decks on long-span bridges [C/OL] // 23th US-Japan Bridge Engineering Workshop[2012-04-02]. <http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/pdf/23-2-zfumoto.pdf>.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD bridge design specifications[S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005.
- [9] European Committee for Standardization. Design of steel structure part 2: steel bridges [S]. Brussel: European Committee for Standardization, 2006.
- [10] 童乐为,沈祖炎. 开口纵肋的正交异性钢桥面板疲劳试验研究[J]. 中国公路学报, 1997, 10(3):59.
TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue test of orthotropic steel bridge decks with open-shaped longitudinal ribs [J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(3):59.
- [11] 田洋,李运生,张德莹,等. 正交异性板 U 肋与桥面板焊缝连接的静力及疲劳试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8 (2):34.
TIAN Yang, LI Yunsheng, ZHANG Deying, *et al.* Static and fatigue test research on welded rib-to-deck connections in orthotropic steel bridge decks [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(2):34.
- [12] 赵欣欣,张玉玲,刘晓光,等. 钢桥面板纵肋与面板连接构造的疲劳试验与全寿命疲劳设计方法研究 [C]// 中国钢协桥梁钢结构分会 2012 年第八次学术年会. 合肥:中国钢协桥梁钢结构分会, 2012:199-205.
ZHAO Xinxin, ZHANG Yuling, LIU Xiaoguang, *et al.* Study on fatigue tests and whole fatigue life design of rib-to-deck connections in orthotropic decks [C]// The 8th Congress of Steel Bridge Structures of China Steel Construction Society 2012. Hefei: China Steel Construction Society, 2012:199-205.
- [13] 顾萍,周聪. 铁路正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹寿命估算[J]. 铁道学报, 2012, 34(1):97.
GU Ping, ZHOU Cong. Estimation of fatigue life of typical fatigue cracks of orthotropic steel decks of railway bridges [J]. Journal of The China Railway Society, 2012, 34(1):97.
- [14] 顾萍,颜兆福,盛博,等. 正交异性钢桥面板栓焊接头疲劳性能[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(6): 821.
GU Ping, YAN Zhaofu, SHENG Bo, *et al.* Fatigue behaviour of bolt-welded joints for U-ribs in orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41 (6):821.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 714—2008 桥梁用结构钢[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 714-2008 Structural steel for bridge [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2009.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路钢桥制造规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2009.
Ministry of Railways of The People's Republic of China. Fabrication code for railway steel bridges[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [17] Lehrke H. Fatigue tests of stiffener to cross beam connections [C]// IABSE Workshop. Lausanne:[s. n.], 1990: 249-257.