文章编号：0253-374X(2021)04-0476-11 **DOI**：10.11908/j.issn.0253-374x.20385

高强螺栓止裂法修复含裂纹钢板疲劳受力性能

姜 旭[1]，吕志林[1]，强旭红[1]，罗程巍[1]，张建东[2]
(1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 江苏省交通科学研究院股份有限公司，江苏 南京 210019)

摘要：为了分析高强螺栓止裂法的止裂效果，首先基于带裂纹钢板的有限元模型探究孔径和螺栓预紧力参数对修复后钢板的应力分布和止裂机理的影响。随后对修复后的预裂钢板进行3组对比疲劳试验，评价了不同修复方法下的结构疲劳寿命，并与各国规范相关$S-N$曲线进行比较。分析和试验结果表明：采用止裂孔法和高强螺栓止裂法均能延长损伤钢板的疲劳寿命，但高强螺栓止裂孔修复效率更优，其延长结构寿命是单纯止裂孔修复的9倍以上。以测点应力发生突变为疲劳失效判据时，单纯采用止裂孔修复不足以满足各国规范规定的疲劳强度等级，而高强螺栓止裂孔修复组明显高于AASHTO中A类细节等级，具有优异的抗疲劳性能。

关键词：钢桥；钢板；疲劳裂纹；维修加固；修复
中图分类号：U445.7 **文献标志码**：A

Fatigue Performance of Cracked Steel Plates Repaired by High Strength Bolt Stop-hole Method

JIANG Xu[1], *LÜ Zhilin*[1], *QIANG Xuhong*[1], *LUO Chengwei*[1], *ZHANG Jiandong*[2]
(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. JSTI Group, Nanjing 210019, China)

Abstract: Based on the finite element model of cracked steel plates, the influences of drilling-hole diameter and the pre-tightening force on the stress distribution and the crack arrest mechanism of the repaired steel plates are investigated to analyze the crack arrest effects of high strength bolt stop-hole method. After the pre-cracked steel plates were repaired, three groups of comparative fatigue tests were carried out to evaluate the fatigue life of the structures under various repair methods, and compared the test data with the relevant S-N curve provided by national codes. Analysis and test results indicate that two repair methods can prolong the fatigue life of the damaged steel plates, but the repairing efficiency of high strength bolt stop-hole repair method is better. Moreover, its fatigue life is over 9 times that of the steel plates by the only stop-hole repair method. According to the stress change criterion, to employ the stop-hole repair alone is not enough to satisfy the fatigue strength category specified by national standards, and the high-strength bolt stop-hole repair group is significantly higher than the category A of AASHTO, which has excellent fatigue resistance.

Key words: steel bridge; steel plate; fatigue cracks; maintenance and reinforcement; repair

钢结构桥梁具有结构轻盈、承载力高、施工便利等优势，近年来更是成为大跨度桥梁的首选形式[1]。然而，当钢桥运营一段时间后，由于结构存在焊接缺陷、焊接残余应力等不利因素，一些细节部位在循环车载下开始萌生疲劳裂纹[2-3]。随着疲劳裂纹不断扩展，钢构件将会发生疲劳破坏，最终会影响钢桥结构的安全。因此，一旦发现疲劳裂纹，应立即进行修复处理从而延长钢桥的使用寿命。

钻孔止裂法作为一种常见的疲劳裂纹修复措施，常常用于钢桥的日常维护中。其原理是在裂纹尖端钻孔来去除裂纹尖端塑性区，显著改善局部应力集中，进而延缓裂纹扩展[4]。国内外大部分研究表明选择较大直径的孔来修复裂纹尖端，可以有效降低裂纹尖端应力集中系数从而延长结构疲劳寿命[5-7]。然而，部分研究表明单纯采用普通止裂孔的止裂效果有限，仅在较少荷载循环次数下疲劳裂纹便再次萌生[8]。同时现场无法对裂纹尖端位置精准定位，止裂作用因此发生失效。为了提高止裂效果，许多学者通过对钻孔孔位、钻孔形状以及多孔布置

收稿日期：2020-09-21
基金项目：国家自然科学基金(51408424)；广东省重点领域研发计划(2019B111106002)
第一作者：姜旭(1982—)，男，副教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为钢与组合结构桥梁。
E-mail：jiangxu@tongji.edu.cn
通信作者：强旭红(1984—)，女，副教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为钢结构系统鉴定与疲劳加固理论及方法。E-mail：qiangxuhong@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

方法等相关参数进行分析,发现合理止裂孔位大致为0.5倍的孔径,采用一种腰圆孔具有较高的止裂优势,并且采用附加孔等布置形式能有效地降低孔边应力集中系数[9-11]。关于止裂孔工艺方面,Duprat学者通过对普通止裂孔进行冷扩孔在孔边边缘产生残余压应力,从而降低循环应力的平均值来达到增加止裂效果的目的。同时在冷扩孔后又置入直径稍大的栓钉来降低循环应力幅,进而再次提高疲劳剩余寿命[12]。杜洪增等[13]在航空结构应用方面研究了铆钉填充止裂孔对构件裂纹止裂的提升作用,但提升效果有限。传统的钻孔止裂法仅是去除应力高度集中的裂纹尖端,若在较大的应力幅下将在孔边产生新的应力集中点进而出现裂纹再扩展,无法解决根本问题,只能作为一种临时措施。有日本学者提出了高强螺栓止裂孔法[14],它是将螺栓施拧对止裂孔边产生挤压力,使螺栓垫板与孔边产生较大摩擦力从而减少循环荷载的应力幅,从而改善止裂效果。Fisher[15]在对大量足尺钢梁进行疲劳试验后尝试施以高强螺栓进行止裂,并建议当裂纹长度大于20mm时可采用此方法。Roeder[16]对铆接钢梁桥的纵横梁连接处疲劳裂纹进行高强螺栓修复,结果表明该方法能有效阻止裂纹进一步扩展。国内学者郭阿明[17]通过有限元方法分析了高强螺栓止裂法对中心裂纹钢板的止裂效果。因此高强螺栓止裂孔法在加固钢结构疲劳裂纹具有较强的合理性和可行性。但这些文献尚未对螺栓预紧力的效果进行分析,而且关于这种止裂技术在国内钢桥加固领域研究方面较少。针对这个情况,本文首先利用数值模拟分析相关止裂参数对含裂纹钢板应力的影响以及止裂机理,为钢板修复试验提供最优参数。然后对比单一止裂孔法,通过一系列疲劳试验结果探讨高强螺栓止裂孔的疲劳破坏模式和对裂纹疲劳寿命的增强效果。最后基于名义应力法探讨不同修复方法下的该细节部位的疲劳强度及其疲劳性能。

1　有限元模型的建立

1.1　钢板尺寸的确定

为了保证试件尺寸与试验设备MTS 647测试框架系统的工作空间相适应,采用620mm×230mm的哑铃型板件(中间部分尺寸380mm×160mm),厚度取钢桥横梁最小厚度12mm,缺口尺寸根据《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》(GBT 6398-2017)选取[18],如图1所示。在缺口处预制裂纹长度14mm,然后分别采用钻孔止裂法和高强螺栓止裂法在预制裂纹尖端处进行止裂,修复方案如图2所示。

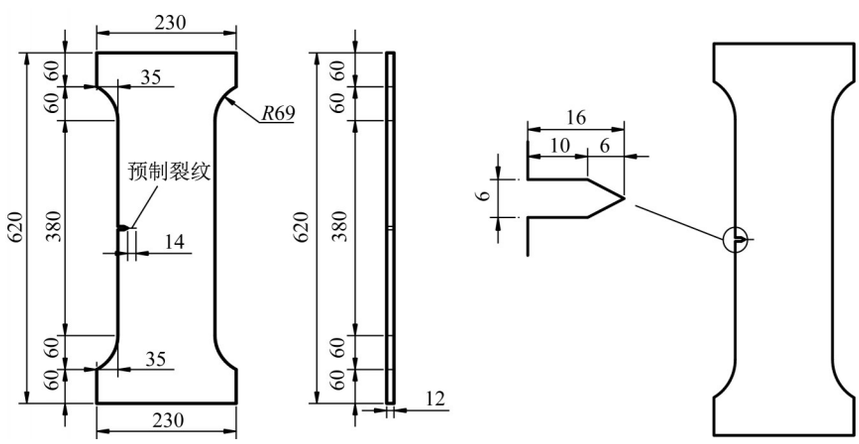


图1 标准钢板试件尺寸和缺口尺寸(单位:mm)

Fig.1　The size of standard steel plate specimen and notch size(Unit:mm)

1.2　模型建立

模型均采用ABAQUS通用有限元软件进行建立,如图3所示。模型材料参数根据实际材性试验结果进行输入,其中Q345qD材料屈服强度为418MPa,弹性模量采用2.1×10^5MPa,泊松比为0.3。对于止裂孔修复模型,分别建立止裂孔直径为8mm、10mm、14mm、18mm、22mm的5个钢板有限元模型,止裂孔位于裂纹尖端,裂纹采用“seam”模拟,除了止裂孔大小外其余参数相同。而对于高强螺栓止裂孔修复模型,在选择合适止裂孔孔径后分别建立预紧力为10kN、30kN、50kN、70kN、90kN的5个钢板有限元模型。其中高强螺栓采用实体单元C3D8R模拟,弹性模量为210GPa,泊松比为0.3。考虑螺栓起到连接和紧固作用,利用“bolt load”施加

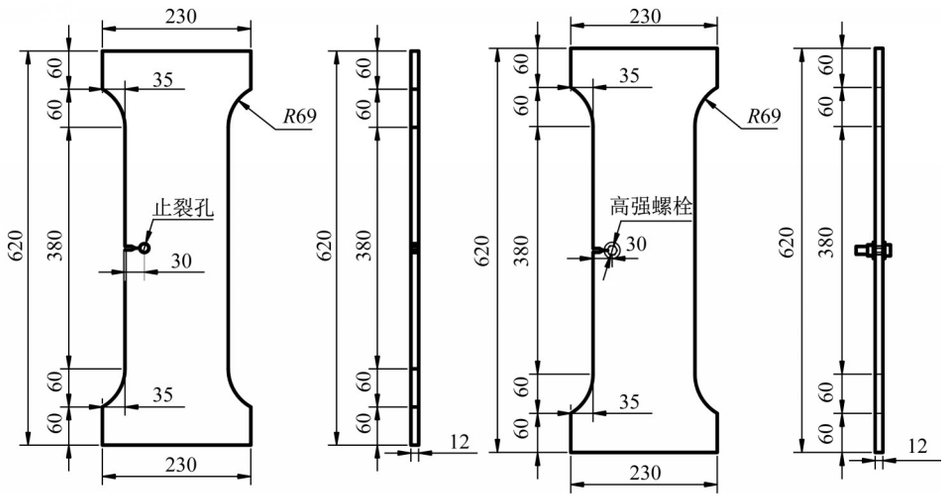
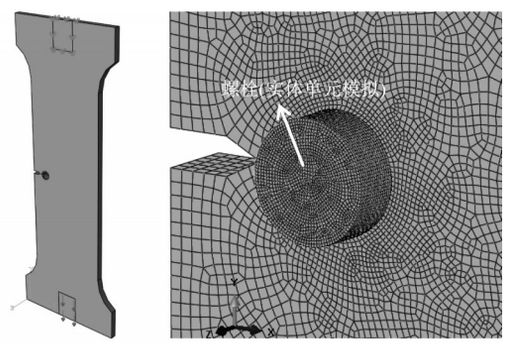


图2 止裂孔修复方案与高强螺栓止裂修复方案(单位:mm)

Fig.2 The scheme of stop-hole method and high strength bolt stop-hole method(Unit:mm)

预紧力。同时为考虑摩擦作用以模拟预紧力传递作用,螺栓垫片与钢板之间设置"general contact"面接触行为,接触属性在法向设置为硬接触,切向设置为库伦摩擦。根据试件实际制作情况,考虑接触面为"未经处理的干净轧制面",此处摩擦系数取为0.35[19]。两类模型的钢板均采用C3D8R单元,局部网格尺寸为0.5mm,拉伸荷载均为60kN,边界条件均为在实际夹持面约束x、y、z向位移。



a 止裂孔法模型 b 高强螺栓止裂孔法模型

图3 不同修复方法下的有限元模型

Fig.3 Finite element models under different repair methods

2 有限元结果分析

2.1 孔径影响分析

通过计算不同孔径下止裂孔法模型的最大应力,利用应力集中系数K_t和疲劳缺口系数K_f来表征止裂孔方法修复钢板的止裂效果[20],其中应力集中系数K_t按式(1)计算,其中钢板止裂孔孔边最大主应力σ_{max}由模型有限元计算得出,而名义应力σ_{nom}按式(2)计算。疲劳缺口系数K_f按式(3)给出,其中c为材料特征常数,本文取0.45,ρ为止裂孔半径[20]。

$$K_t=\sigma_{max}/\sigma_{nom} \tag{1}$$

$$\sigma_{nom}=\frac{P(2a+2b+D+W)}{t(W-a-b-D/2)^2} \tag{2}$$

$$K_f=1+\frac{K_t-1}{1+c/\rho} \tag{3}$$

式中:P为钢板端部拉伸荷载;W为钢板内缘宽度;a为裂纹长度;b为缺口长度;t为钢板厚度;D为止裂孔直径。将以上计算结果汇总于表1。随着止裂孔直径的增大,钢板止裂孔孔边的最大主应力减小,应力集中系数和疲劳缺口系数也相应减小,说明采用止裂孔一定程度上能够改善疲劳性能,但是加强的效果趋缓。另外,虽然钢板的最大主应力减小,但是其名义应力逐渐增大,容易对截面刚度产生削弱从而导致强度破坏,因此不能盲目增大止裂孔孔径。考虑到止裂作用和削弱作用的平衡,同时参考《钢结构高强度大六角头螺栓》(GB/T 1228—2006)中规定的最小高强螺栓尺寸[21],此处选择D=14mm的止裂孔进行后续分析。

经D=14mm止裂孔修复后模型钢板的最大主应力分布如图4所示。由于止裂孔消除了裂纹尖端应力集中,因此降低了此处应力水平,但同时位于止裂孔最小截面处的侧边出现了新的应力集中点,该点的应力值约为无打孔模型最大主应力的66%,可能成为潜在的新裂纹萌生点。图5给出了止裂孔最小截面处孔边沿厚度方向的最大主应力分布。止裂孔边缘均处于较高的应力状态,从中间大两端小的趋势来看,说明新的疲劳裂纹极易在孔边内部产生,

表 1　不同直径下止裂孔修复模型应力集中系数和疲劳缺口系数

Tab.1　Stress concentration coefficient and fatigue notch coefficient of stop-hole model under different diameters

直径D/mm	σ_{max}/MPa	σ_{nom}/MPa	K_t	K_f
0(无打孔)	358.5	65.1	5.51	—
8	274.8	71.8	3.83	3.75
10	258.7	73.6	3.51	3.46
14	238.0	77.3	3.08	3.05
18	225.6	81.3	2.77	2.75
22	218.1	85.4	2.55	2.54

并由此进一步扩展。

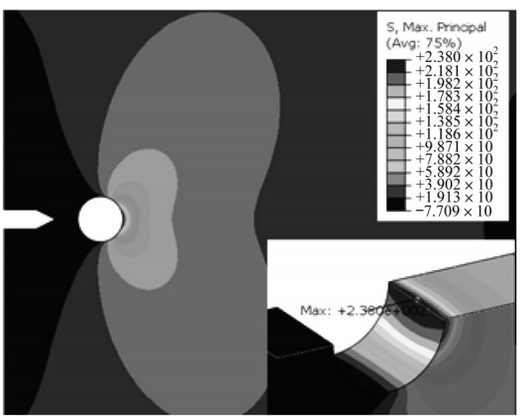


图 4　止裂孔修复模型最大主应力分布(单位:MPa)

Fig.4　Maximum principal stress distribution of stop hole repair model(Unit:MPa)

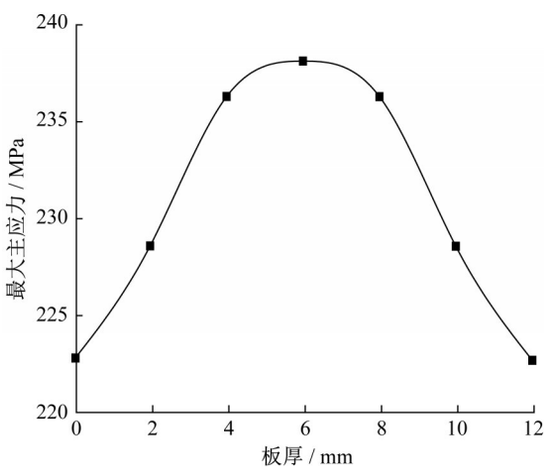


图 5　孔边沿厚度方向最大主应力变化

Fig.5　The trend of principal stress along the thickness of the hole under the preload

2.2　高强螺栓预紧力影响分析

通过有限元计算得到不同预紧力下钢板的最大主应力值,如图6所示。当预紧力小于30kN时,随

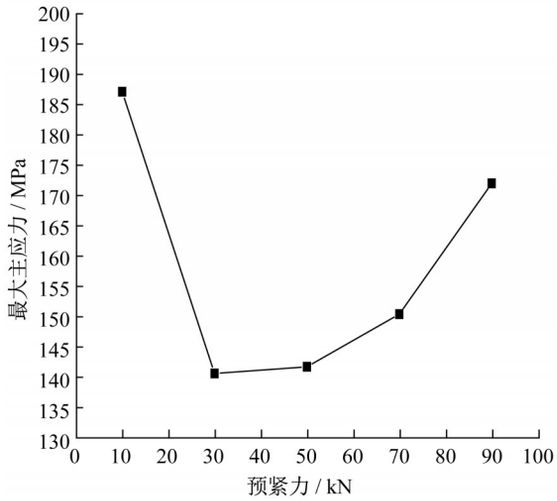


图 6　不同预紧力下的钢板最大主应力

Fig.6　The principal stress of steel plate under various preload

着预紧力的增大,钢板最大主应力减小;当预紧力大于30kN时,随着预紧力的增大,钢板最大主应力增加,增大速率先缓后急。在考虑降低钢板最大主应力的同时,也应考虑螺栓自锁、连接可靠紧密等需求,建议预紧力取30kN为宜。图7给出了预紧力30kN下高强螺栓止裂模型最大主应力分布,在增加了高强螺栓后,该孔的主应力分布发生明显变化,原先位于易萌生疲劳裂纹的止裂孔最小截面处的受拉区域变成受压为主的区域,而位于裂纹前端处变为受拉为主的区域。这是由于当试件承受拉伸作用时,裂纹前端将产生相对位移。但施拧高强螺栓后,钢板表面与螺栓垫板之间产生的摩擦力遏制了裂纹

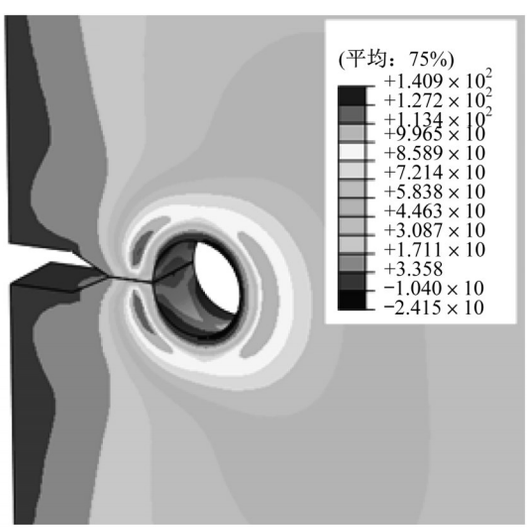


图7　预紧力30kN下模型最大主应力分布(单位:MPa)

Fig.7　The principal stress of model with 30kN preload (Unit:MPa)

的张开。由此表明高强螺栓止裂孔法比单纯施加止裂孔有了较大的止裂效果。图8为在预紧力30kN下孔边沿厚度方向的应力变化,其中止裂孔最小截面处的应力显著下降,靠近钢板表面约1.0mm区域拉应力甚至转换成压应力。对比原钻孔止裂模型最大主应力,预紧力带来的应力衰减率约40.8%;而该处钢板表面最大主应力下降约110%(由拉应力→压应力),削减效果十分显著。

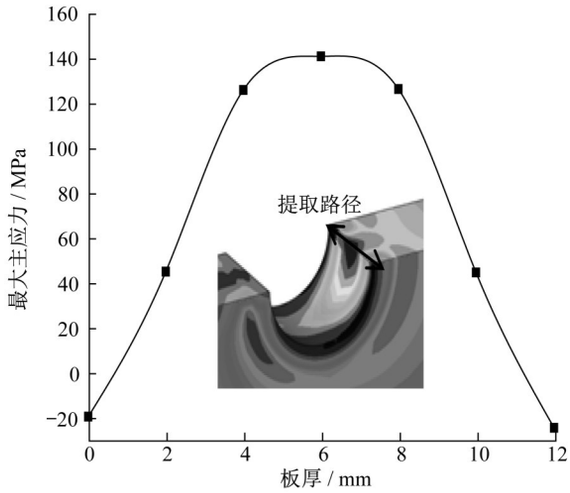


图8 预紧力下孔边沿厚度方向应力变化

Fig.8 The trend of stress along the thickness of the hole under the preload

3 疲劳试验验证

3.1 试件预处理

试验共设置3组,每组3块钢板,分别为止裂孔修复组和高强螺栓止裂孔修复组,并以无修复组进行参照,如图9所示。止裂孔修复组是以预制裂纹尖端为圆心打孔止裂,止裂孔尺寸为φ14mm,高强螺栓止裂孔修复组首先以裂纹尖端为圆心打孔止裂,止裂孔尺寸为φ14mm,再利用12.9级M12高强螺栓(螺栓直径12mm,垫片外径19mm)对钢板施加30kN预紧力,实际操作中利用扭矩扳手控制预紧力和扭矩。

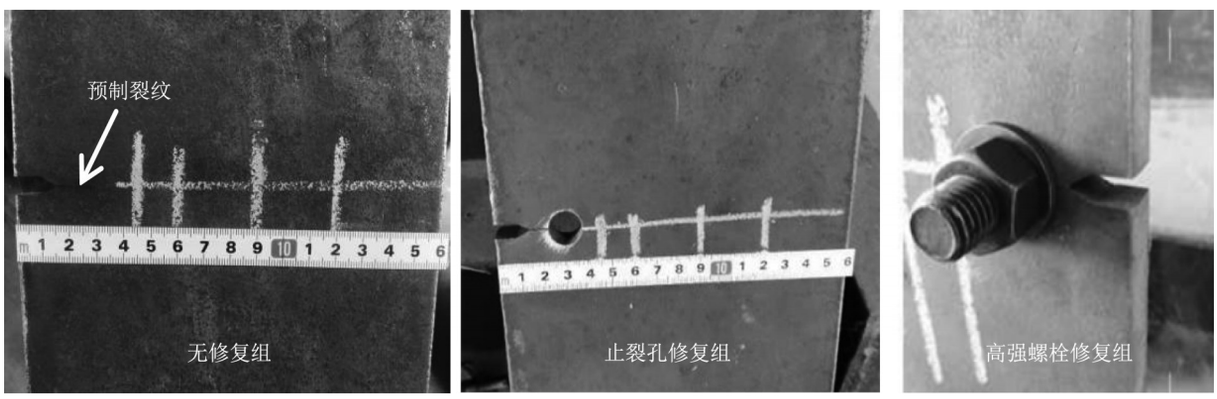


图9 不同修复方案下的试件实物

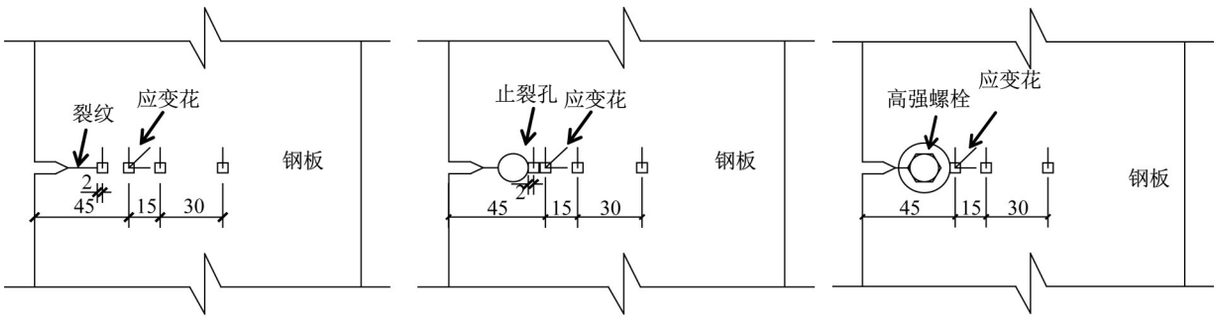
Fig.9 Actual specimens with various repair methods

3.2 测点布置

在正式疲劳阶段,无修复组、止裂孔修复组及高强螺栓止裂修复组均在相同位置布置1×2个应变花、2×2个应变片。以应变花的位置作为名义应力幅测点[22]。由于应变花距裂纹尖端或止裂孔边缘较远,对无修复组(组别1)和止裂孔修复组(组别2)增加裂纹或止裂孔处(应变片中心距边缘2mm左右)应变片,正反双侧布置如图10所示。3个组别的应变花距钢板边缘的距离均为45mm,3个组别的同位置应变片距钢板边缘的距离均为60mm、90mm,以便进行横向比较。在大于90mm之后未再设测点,是考虑到裂纹扩展至截面1/2长度之后其扩展速率受偏心拉力影响大,不再是纯粹的疲劳裂纹扩展。试验过程中连续采样,动态监测关注位置的应变。

3.3 加载装置

如图11所示,试验加载装置采用苏交科结构实验室的MTS 647加载系统,通过在上下两端进行夹持,并利用上端作动器加载实现单向拉伸(即拉-拉疲劳)的加载方式控制钢板的应力幅,以此研究不同修复方法下该结构的疲劳性能。疲劳试验机提供10Hz等幅正弦波的疲劳荷载。考虑到试件较多以及试验的效率性,在试验设计时预期每块试件的寿命在10 000~1 500 000之间,所需的应力幅较大,因此对每组内3块试件荷载幅设计为150kN、175kN、200kN,应力比0.1。



a 无修复组(组别1)　　b 止裂孔修复组(组别2)　　c 高强螺栓止裂修复组(组别3)

图 10　测点布置

Fig.10　Layout of test points

图 11　加载装置

Fig.11　Loading set-up

4　疲劳试验结果与讨论

4.1　应力测试结果

由于试验过程中加载位置、试件制作和应变花粘贴位置的误差,钢板两侧的距边缘45mm处应变花或距边缘60mm、90mm处应变片所测得的数值会略有不同。选择测量结果较大的一侧作为试验结果分析对象,9个试件的实测应力幅变化曲线如图12所示。在疲劳试验过程中,除了部分应变花测点外,绝大部分应变花测点测得的应力幅在无裂纹产生时基本保持不变,表明试件基本处于常幅应力状态。

4.2　疲劳破坏与分析

在疲劳试验过程,结合实测主应力随循环次数变化曲线,通过观察疲劳裂纹的开裂位置及形式来分析各组试件的疲劳破坏模式。以裂纹扩展到距钢板边缘90mm为结束的标志,三组试件最终典型破坏形式如图13所示,随着循环次数的增加,疲劳裂纹均沿着垂直于拉应力的方向不断扩展。对于无修复组试件,在循环次数仅4 000～20 000次后实测应力幅便发生明显变化,同时真实裂纹在预制裂纹尖端处开始萌生扩展,循环几万次后试件即发生破坏。显然,发现疲劳裂纹后如若未对裂纹进行处理,其裂纹扩展寿命较短。止裂孔修复组的试件在经过较长的荷载循环次数后疲劳裂纹萌生于止裂孔最小截面处,与前述有限元结果一致。

对比止裂孔修复组,高强螺栓修复组的疲劳寿命明显提高。这是因为在加载初期,预紧力发挥作用从而在孔边产生摩擦力,减小了孔边循环应变幅值,进而延缓了裂纹的萌生。值得注意的是,虽然组别3最终的疲劳源均位于止裂孔最小截面处,但是通过试验观察发现试件3-1和3-2首先出现垫圈疲劳裂纹和螺母疲劳裂纹,如图14所示。由于此处位于裂纹缺口处,截面刚度在此发生突变,在局部应力集中下成为疲劳易损点。随后预紧力失效,高强螺栓止裂机制退化成单一钻孔止裂机制,孔周边发生应力重分布,继而最终破坏形态与组别2相当。而试件3-3在最大荷载幅200kN加载过程中发现螺栓垫圈周围出现暗红色粉末,与钢板间相对滑移明显,可以断定螺栓的预紧力提前损失,钢板与垫圈之间的摩擦力尚未完全发生作用,说明此时的疲劳荷载超出了预紧力下产生的摩擦力,从而使垫圈滑动,而试件3-1和3-2在较小荷载幅条件下尚未发生垫圈滑移现象。

以距试件边缘45mm处应变花所测应力幅发生明显变化或尖端应变片破坏(两者基本同步)为疲劳失效标准,得到裂纹形成寿命(视为疲劳寿命)结果汇总于表2。在相同荷载幅情况下,止裂孔修复能延长结构疲劳寿命20倍以上;对比试件2-1和试件

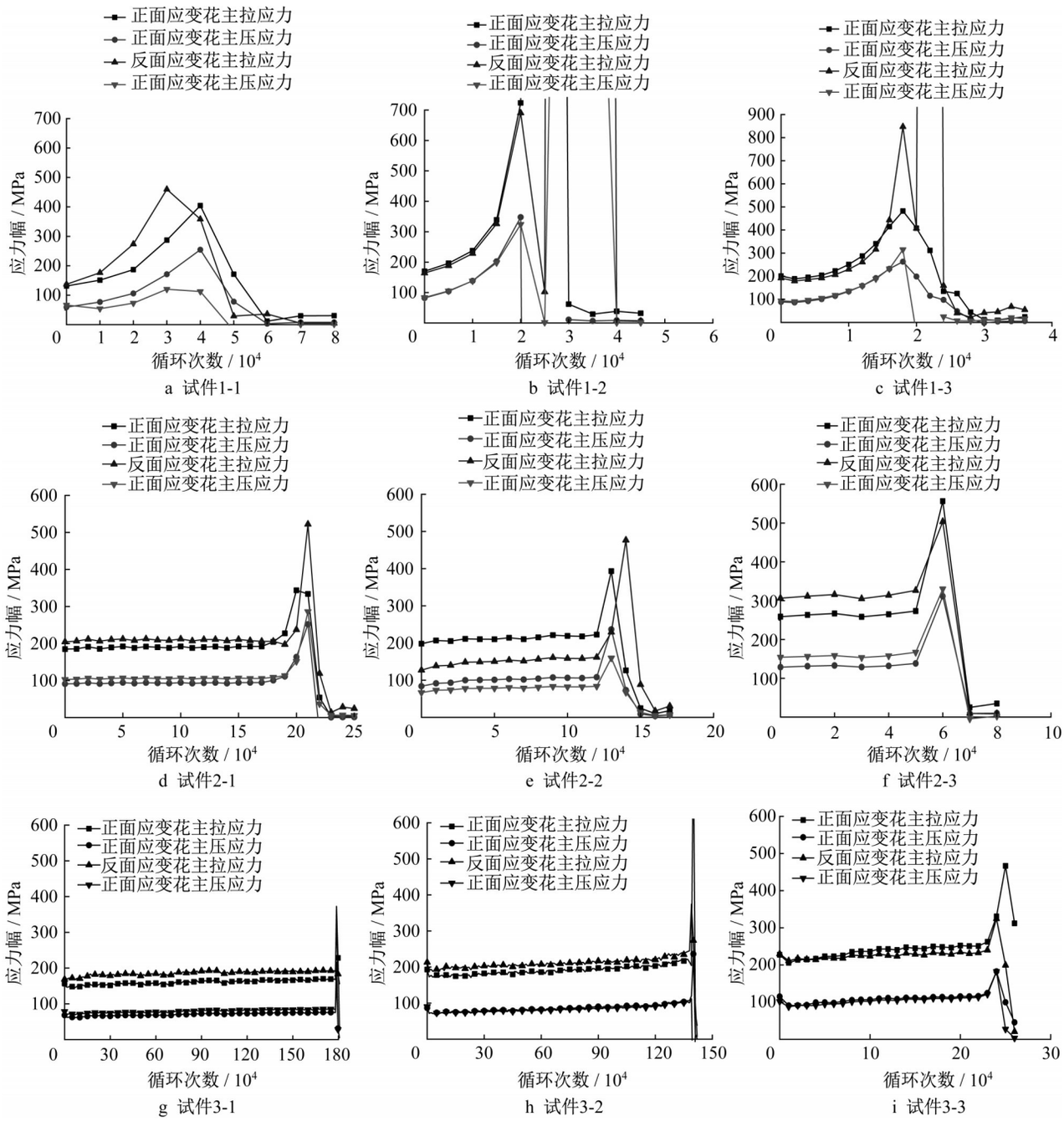


图 12 应力幅变化规律

Fig.12 The variation of stress range

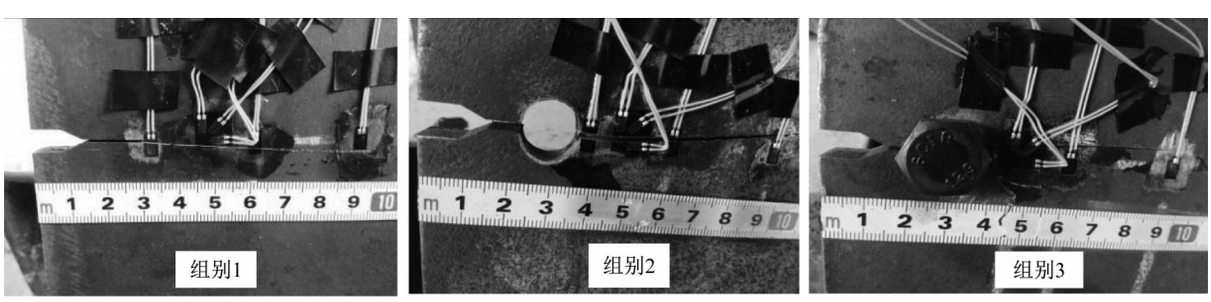


图 13 试件最终破坏形态

Fig.13 The final failure form of the specimens

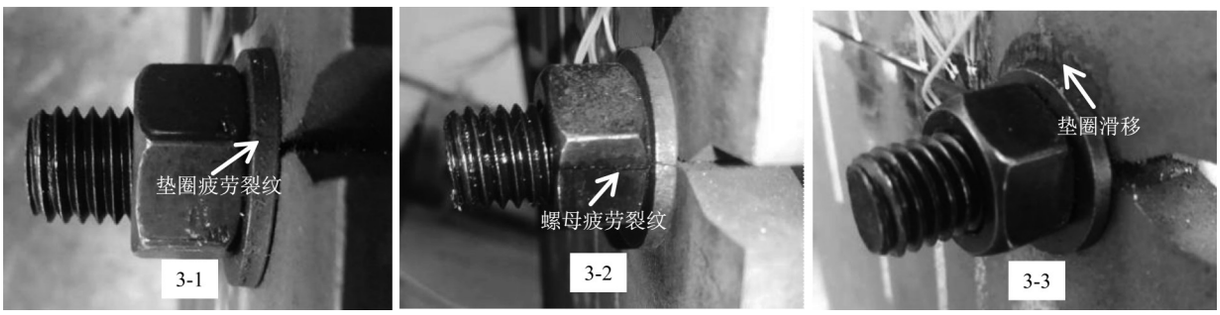


图 14　高强螺栓止裂修复试件初始破坏细节

Fig.14　The initial failure of the details for high-strength bolts repair method

3-1,在止裂孔上施加了高强螺栓后,由此产生的摩擦力可以有效降低了循环荷载的应力幅,其修复后的结构疲劳寿命是单纯止裂孔修复的9倍以上,而高强螺栓垫圈滑移的结构疲劳寿命明显下降,是仅用止裂孔修复的4.7倍,这是由于在加载一段时间后,在最大荷载幅200kN作用下垫圈与钢板发生明显滑移导致螺栓预紧力损失,丧失了部分摩擦力的提升优势。考虑到实际工程中疲劳细节较少出现如此较大的应力幅,因此采用高强螺栓止裂孔修复方法可以满足工程需求。实际工程中也可对钢板与螺栓垫圈接触面进行一定工艺处理(如喷砂除锈),保证不提前发生界面滑移失效以期增加试件的剩余疲劳寿命。

表 2　试件的疲劳寿命

Tab.2　Fatigue life of specimens

试件编号	荷载幅/kN	实测名义应力幅/MPa	裂纹形成寿命/10^4次	最终破坏/10^4次	裂纹位置
1—1	150	157	1.0	8.2	预制裂纹尖端
1—2	175	180	0.5	4.6	预制裂纹尖端
1—3	200	204	0.4	3.7	预制裂纹尖端
2—1	150	210	20.5	25.2	止裂孔最小截面处
2—2	175	230	13.5	17.1	止裂孔最小截面处
2—3	200	288	5.0	8.1	止裂孔最小截面处
3—1	150	185	178.5	180.7	止裂孔最小截面处
3—2	175	201	139.5	141.9	止裂孔最小截面处
3—3*	200	231	23.5	26.6	止裂孔最小截面处

注:*表示试件3—3发生螺栓垫圈滑移破坏

无修复组(组别1)初始裂纹长度视为30mm(含缺口长),其他组初始裂纹视为37mm,试验中以应变片失效并配合目测判断裂纹扩展程度,分别记录裂纹再次扩展至45mm、60mm和90mm这3个阶段的循环次数,如图15所示。可以看出各个组别的钢板疲劳裂纹扩展的趋势总体相同,应力幅大疲劳寿命短。在疲劳裂纹形成以后,裂纹的扩展速率加快,在10万次循环内,试件便丧失继续承载能力导致破坏。以150kN荷载幅下的试件为例分别计算各扩展阶段的平均裂纹扩展速率,如图16所示。可以看出,各组别试件中各个阶段的裂纹扩展速率均在10^{-7}~10^{-6}m·C^{-1}数量级别,属于中速率裂纹扩展区[23]。后一个阶段的裂纹扩展速率均比前一阶段高,表明后期疲劳损伤加快。每个阶段中各组别的试件裂纹扩展速率相当,表明采用止裂孔修复和高强螺栓修复虽然能延缓疲劳裂纹再次萌生,但对裂纹再次开展后的速率影响较小。因此实际修复中应避免止裂机制失效出现疲劳裂纹再开裂。

4.3　各国规范关于试验结构细节疲劳性能评估

对于切割钢板疲劳细节,我国钢桥规范和欧规BS EN1993-1-9 Fatigue[2005]根据其边缘是否修整将疲劳强度等级分为140MPa或125MPa[24-25]。英国、日本疲劳设计指针规定为其疲劳等级为C,美国规范虽然没有明确规定此疲劳细节强度等级,但可参考平面构件轧制或清洗过表面的基材疲劳强度等级规定为A[26-28]。图17将此次两组修复后的疲劳试验结果与各国规范的$S—N$细节曲线进行比较。由图可知关于该细节的各疲劳曲线差异比较小。以测

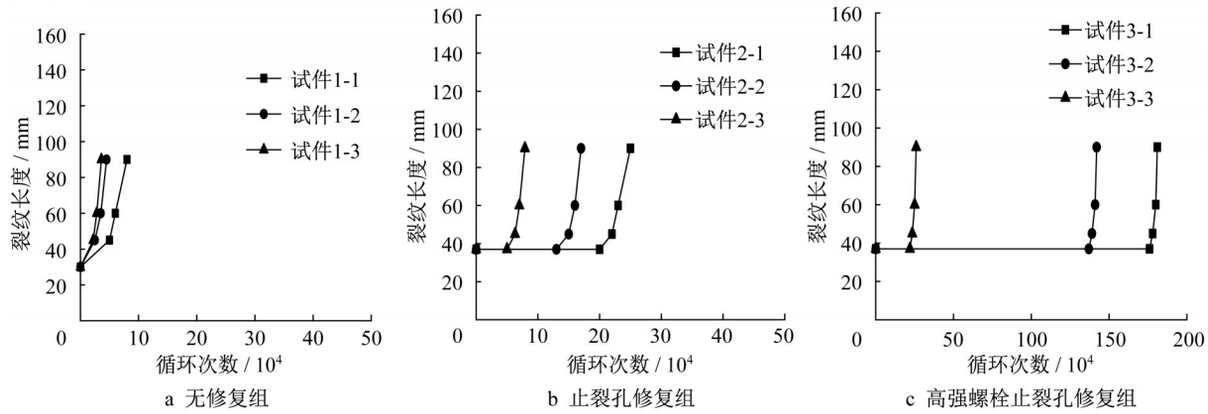


图 15 裂纹扩展曲线

Fig.15 The curves of crack propagation

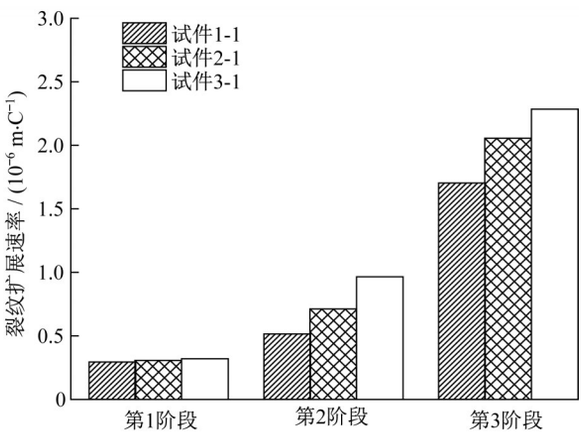


图 16 各阶段裂纹扩展速率

Fig.16 Crack growth rate at each stage

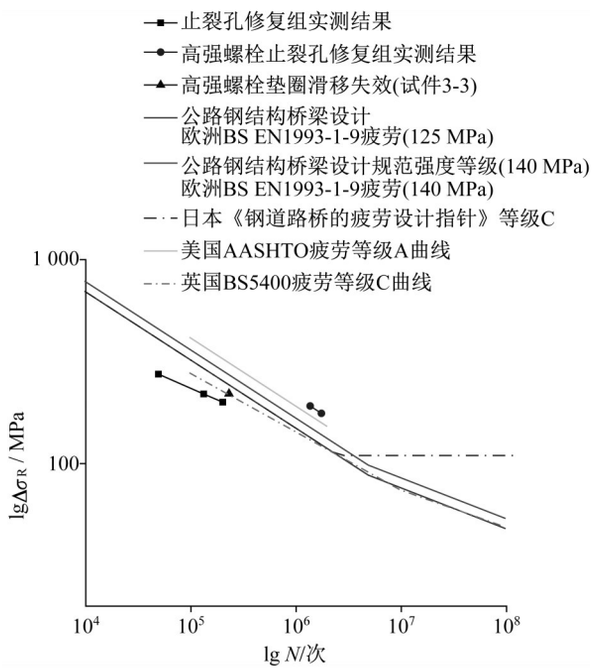


图 17 疲劳修复试验结果与 S-N 曲线

Fig.17 Fatigue repair test results and S-N curves

点应力发生为疲劳失效判据时,止裂孔修复组的疲劳强度等级低于各国规范的要求,进一步说明该方法在修复具有初始裂纹的钢板时并不能长期有效阻止疲劳裂纹再扩展,常作为临时止裂措施,与相关研究结果一致[29]。除试件3-3外,高强螺栓止裂孔修复组试验值均落在$S-N$曲线上方,表明得到的疲劳细节明显高于各国规范的级别要求,并可推测其循环200万次的疲劳强度大于160MPa,具有优异的抗疲劳性能。而在高强螺栓预紧力提前失效的情况下,其仍优于英国规范规定的疲劳强度等级C。

5 结论

通过有限元分析和钢板疲劳裂纹修复试验,对修复钢板的应力分布和不同修复方法下的结构疲劳性能进行研究得到以下结论:

(1)止裂孔孔径增大一定程度上能改善疲劳性能,但效果趋缓,考虑止裂作用和削弱作用的平衡,推荐使用直径14mm止裂孔。高强螺栓预紧力可改变止裂孔孔边的应力分布,在30kN预紧力下孔边疲劳易损点的应力可降低40.8%,由此可延缓疲劳裂纹的萌生,具有比单一止裂孔修复较高的止裂优势。

(2)有限元结果表明钻孔后钢板的疲劳易损点出现在止裂孔最小截面处,并在试验结果得到验证。对带有初始裂纹的平钢板进行止裂孔修复后,其寿命是未修复前的20倍以上,而采用高强螺栓止裂孔修复后的疲劳寿命则是仅用止裂孔修复的9倍以上。表明高强螺栓的应用对止裂优势具有较大的提升。但两种修复方法均只能延缓裂纹继续扩展,对再次开裂后的扩展速率影响不大。

(3)采用止裂孔修复虽然能一定程度上延缓疲劳裂纹的再次萌生,但不足以满足各国规范规定的200万次循环下的疲劳强度。而采用高强螺栓止裂法修复后的疲劳细节显著高于AASHTO中A类等级,可推测其200万次循环下的疲劳强度高于160MPa,故推荐高强螺栓止裂孔修复作为钢桥中平面钢板裂纹修复的有效选择之一。

作者贡献说明:

姜旭:项目的构思者及负责人,指导试验设计、数据分析、论文写作与修改。

吕志林:参与试验设计和试验结果分析,完成数据分析以及论文初稿的写作与修改。

强旭红:试验设计者和试验研究的执行人,指导试验设计和论文写作。

罗程巍是试验研究执行人,负责试验数据的采集。

张建东是试验研究顾问,对试验过程提出建议。

参考文献:

[1] 杨仕力,施洲.我国大跨径钢箱梁桥正交异性板疲劳损伤研究现状[J].桥梁建设,2017,47(4):60.
YANG Shili, SHI Zhou. Current research of fatigue damage in orthotropic deck plates of long span steel box girder bridges in China[J]. Bridge Construction, 2017,47(4):60.

[2] GUO T, LI A, WANG H. Influence of ambient temperature on the fatigue damage of welded bridge decks[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6):1092.

[3] 王春生,翟慕赛,HOUANKPO T.正交异性钢桥面板典型细节疲劳强度研究[J].工程力学,2020,37(8):102.
WANG Chunsheng, ZHAI Musai, HOUANKPO T. Fatigue strength of typical details in orthotropic steel bridge deck[J]. Engineering Mechanics, 2020,37(8):102.

[4] FU Z Q, JI B H, XIE S H, *et al*. Crack stop holes in steel bridge decks: drilling method and effects[J]. Journal of Central South University,2017,24(10): 2372.

[5] WU H, IMAD A, BENSEDDIQ N, *et al*. On the prediction of the residual fatigue life of cracked structures repaired by the stop-hole method[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(4):670.

[6] AYATOLLAHI M R, RAZAVI S M J, CHAMANI H R. Fatigue life extension by crack repair using stop-hole technique under pure Mode-I and pure Mode-II loading conditions[J]. Procedia Engineering, 2014,74:18.

[7] 谢曙辉,吉伯海,傅中秋,等.钢桥面板疲劳裂纹钻孔止裂分析及实验验证[J].河南大学学报(自然科学版),2016,46(6):732.
XIE Shuhui, JI Bohai, FU Zhongqiu, *et al*. Numerical analysis and experimental verification of stop-hole method for fatigue crack in steel bridge deck[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2016, 46(6):732.

[8] CHOI J H, KIM D H. Stress characteristics and fatigue crack behaviour of the longitudinal rib-to-cross beam joints in an orthotropic steel deck[J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 11(2):189.

[9] 谢曙辉,吉伯海,姚悦,等.钢桥面板顶板角焊缝疲劳裂纹钻孔孔位分析[J].广西大学学报(自然科学版),2017,42(1):290.
XIE Shuhui, JI Bohai, YAO Yue, *et al*. Analysis on location of retrofit hole for fatigue crack near fillet weld on steel bridge deck[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017,42(1):290.

[10] ANGGIT Murdani, CHOBIN Makabe, AKIHIDE Saimoto, *et al*. Stress concentration at stop-drilled holes and additional holes[J]. Engineering Failure Analysis,2008,15(7):810.

[11] 袁周致远,吉伯海,傅中秋.钢结构疲劳裂纹合理止裂孔形状研究[J].南京理工大学学报,2017,41(5):556.
YUAN-ZHOU Zhiyuan , JI Bohai, FU Zhongqiu. Study on reasonable stop-hole shape for fatigue crack in steel structure[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017,41(5):556.

[12] DUPRAT D, CAMPASSENS D, BALZANO M, *et al*. Fatigue life prediction of interference fit fastener and cold worked holes[J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(8):515.

[13] 杜洪增,田秀云,刘海涛.关于铆钉对止裂孔填充作用的研究[J].中国民航学院学报,2005,23(2):1.
DU Hongzeng, TIAN Xiuyun, LIU Haitao. Study on effectiveness of riveted stop-crack holes[J]. Journal of Civil Aviation University of China,2005,23(2):1.

[14] UCHIDA D. Fatigue strength evaluation of out-of-plane gusset welded joints repaired by bolting-stop-hole method[J]. Mitsui Zosen Technical Review, 2007,190:45.

[15] FISHER J W, BARTHELEMY B M, MERTZ D R, *et al*. Fatigue behavior of full-scale welded bridge attachments[R]. [S.l]:NCHRP Report,1980.

[16] ROEDER C W, MACRAE G, LELAND A, *et al*. Extending the fatigue life of riveted coped stringer connections[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(1):69.

[17] 郭阿明.钢结构钻孔止裂及相关技术研究[D].天津:天津大学,2007.
GUO Aming. Study on stop hole and related techniques in steel structures[D]. Tianjing:Tianjin University,2007.

[18] 中国钢铁工业协会.金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法:GB/T 6398-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
China Iron and Steel Industry Association. Metallic materials-fatigue testing-fatigue crack growth method: GB/T 6398-2017[S]. Beijing:Standards Press of China, 2017.

[19] 贺欣怡,吴冲,曾明辉,等.组合桥面板U肋螺栓接头疲劳受力性能[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(7):990.
HE Xinyi, WU Chong, ZENG Minghui, *et al*. Fatigue performance of bolted joint for u-ribs in composite bridge deck

[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48 (7):990.

[20] 吉伯海,袁周致远,刘天笳,等.钢箱梁疲劳裂纹钻孔止裂修复的影响因素[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2016,37(1):97.
JI Bohai, YUAN-ZHOU Zhiyuan, LIU Tianjia, *et al*. Influencing factors of stop-hole method for fatigue crack of steel box girder[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2016,37 (1):97.

[21] 中国机械工业联合会.钢结构用高强度大六角头螺栓:GB/T 1228-2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
China Machinery Industry Federation. High strength bolts with large hexagon head for steel structures: GB/T 1228-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

[22] 姚悦,傅中秋,王益逊,等.弯曲荷载作用下平板贯穿裂纹钻孔止裂试验研究[J].建筑钢结构进展,2019,21(4):54.
YAO Yue, FU Zhongqiu, WANG Yixun, *et al*. Experimental study of stop-hole drilling on through-wall crack of plate under bending load[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(4):54.

[23] 陈传尧.疲劳与断裂[M].武汉:华中科技大学出版社,2006.
CHEN Chunyao. Fatigue and fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.

[24] European Commitee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures Part 1 - 9: fatigue [S]. Brussel: European Commitee for Standardization, 2005.

[25] 中华人民共和国交通运输部.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64-2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
Ministry of Transportation of People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64-2015 [S].Beijing: China Communications Press, 2015.

[26] AASHTO LRFD . Bridge design specifications [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.

[27] British Standards Institution. Steel, concrete and composite bridges-part 10: Code of practice for fatigue BS 5400 [S]. London: British Standards Institution, 1980.

[28] 日本道路协会.钢道路桥疲劳设计指针[S]. 东京:丸善出版株式会社,2002.
Japan Road Association. Fatigue design guidelines for steel highway bridges [S]. Tokyo: Maruzen Intec, 2002.

[29] 唐亮,黄李骥,刘高,等.正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J].土木工程学报,2014,47(3):112.
TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao, *et al*. Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3):112.