

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.029

高强螺栓连接钢板增强含裂纹横隔板的 疲劳寿命评估^{*}

曾剑波, 陈卓异, 谭胜, 赵希成

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 横隔板的弧形切口是母材易疲劳易损构造细节。为全面分析优化细部构造的有效性, 文中以实桥为研究对象, 测试实际交通荷载作用下加固后弧形切口的应力谱, 采用雨流计数法进行数据处理, 基于 Eurocode3 规范中各细节的疲劳(S-N)曲线对其疲劳寿命进行评估。结果表明, 加固后疲劳寿命明显提高, 1[#](快车道)、2[#](快车道)、3[#](重车道)弧形切口的预测疲劳寿命分别为 30.9 年、48.8 年和 32.0 年。

关键词: 桥梁; 横隔板; 弧形切口; 补强板; 疲劳寿命

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)06-0127-05

横隔板是钢箱梁桥常用的结构形式。在车轮荷载作用下, 横隔板与桥面板连成整体, 有效降低荷载横向分布系数, 提高正交异性钢桥面板的极限承载力。但横隔板需承担较大的面外弯曲应力, 位于弧形切口处的疲劳裂纹为横隔板母材的主要疲劳病害之一, 有效解决横隔板弧形切口疲劳问题迫在眉睫。横隔板弧形切口的疲劳性能受钢桥面板细部构造、焊接工艺及重载等因素影响较大, 不少学者对其优化加固开展了研究。Choi J. H. 等在弧形切口疲劳裂纹尖端处设置止裂孔进行加固, 但当裂纹周围应变过大时, 止裂孔并不能有效抑制裂纹的进一步扩展。祝志文等认为横隔板厚度大于 12 mm 时, 弧形切口处疲劳裂纹应力幅小于截止应力幅, 为无限疲劳寿命。陈卓异等认为优化弧形切口的圆弧半径、直线长度和倾角可降低其峰值应力。吴有俊等采用优化弧形切口+钢板补强的加固方案, 应力降幅明显且加固后未产生

疲劳裂纹。李传习等通过“止裂孔+弧形切口优化+双面补强钢板”的处治方案, 采取较大的弧形切口半径、4 mm 厚补强钢板和细化补强钢板参数等措施, 有效提高了横隔板弧形切口处的疲劳寿命。既有研究对横隔板弧形切口疲劳裂纹的加固不够系统全面, 补强钢板的位置和参数设计无相同标准, 未考虑螺栓孔位对弧形切口边缘距离的影响, 不能全面分析优化细部构造的影响因素。本文以实际存在疲劳病害的钢箱梁为研究对象, 进行运营荷载动应变测试, 得到局部构造细节的应力谱, 基于雨流计数法预测构造细节的疲劳寿命, 为后续优化加固策略制定提供依据。

1 工程背景

1.1 弧形切口疲劳裂纹概况

某自锚式悬索桥, 主跨采用正交异性钢桥面板结构, 桥梁立面布置见图 1。2014 年对该桥进行病

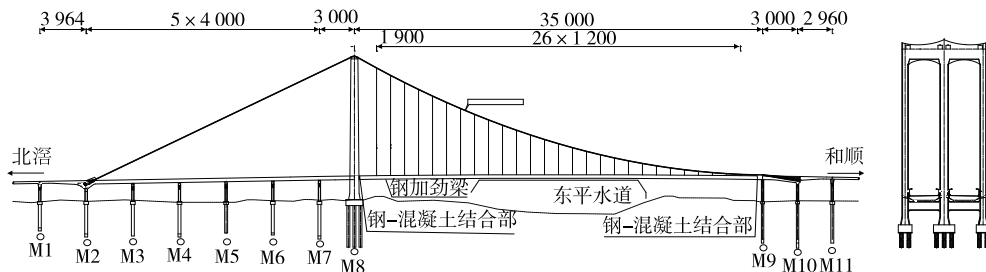


图 1 桥梁立面布置(单位: cm)

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51708047; 51778069); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50670); 重点学科创新性项目(18ZDXK11); 国家建设高水平大学公派访问学者项目(201908430033)

害检查,发现一定数量疲劳裂纹病害,主要包括横隔板弧形切口处疲劳开裂、横隔板与U肋交接处疲劳开裂、横隔板与桥面板连接处焊缝开裂等,其中横隔板弧形切口疲劳开裂病害占全桥所有病害的77%。横隔板弧形切口疲劳开裂病害多位于非吊点处10 mm厚横隔板的弧形切口位置,占该类病害的95%,且左幅弧形切口周边裂纹数量多于右幅,左幅弧形切口疲劳裂纹占67.8%。横隔板弧形切口疲劳裂纹见图2。

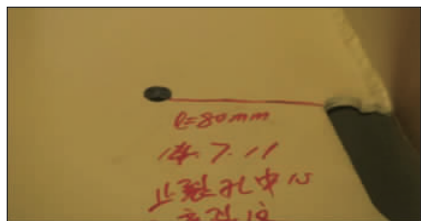


图2 弧形切口处母材裂纹

该类疲劳裂纹从弧形切口起弯点处开始萌生扩展,主要集中于重车道对应的中室及边室的弧形切口周边区域,快车道对应的弧形切口位置亦存在少量疲劳裂纹,超车道及慢车道对应位置未见疲劳裂纹,说明这类病害与车辆质量、数量和横隔板厚度紧密相关。选择左幅钢箱梁作为加固试验段。

1.2 弧形切口修复方案

(1) 结合止裂孔、弧形切口优化和钢板补强加固的优点,在距裂纹扩展端头0.5~1.0倍板厚位置钻止裂孔,抑制裂纹进一步扩展。止裂孔设置在裂纹扩展危险区或加固裂纹区域,距离弧形切口圆弧边缘至少20 mm。

(2) 在横隔板上对“优化切口形状”进行划线定位,并对横隔板优化弧形切口进行切割。对横隔板弧形切口处短小裂缝(裂缝长度 $L \leq 25$ mm)进行“弧形切口优化”加固,加固方案见图3。对横隔板弧形切口处中长裂缝(裂缝长度 $L > 25$ mm)进行“弧形切口优化+双面钢板补强”加固,在弧形切口优化的基础上,通过高强螺栓把两块补强板固定在横隔板出现裂纹的区域,加固方案见图4。

1.3 横隔板螺栓优化方案

该桥螺栓孔直径大多为21 mm,横隔板厚度为

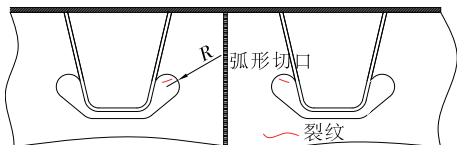


图3 裂缝长度 $L \leq 25$ mm时的加固方案

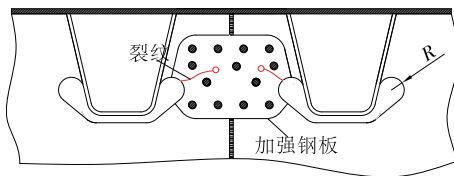


图4 裂缝长度 $L > 25$ mm时的加固方案

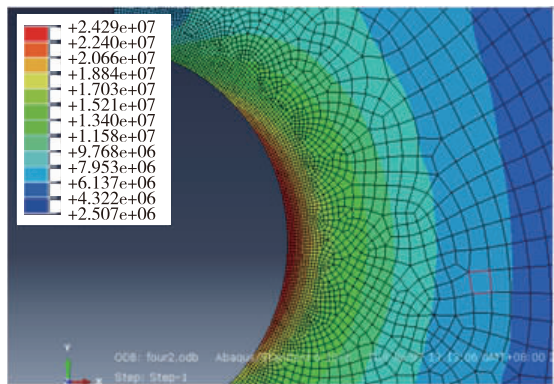
12 mm和10 mm,补强钢板厚度为10 mm。根据《钢结构设计规范》、《铁路桥梁钢结构设计规范》和《公路钢结构桥梁设计规范》对螺栓孔距的规定,按照从严的标准,钢箱梁横隔板加固螺栓孔间距要求为:外排螺栓孔中心间距为63~120 mm;沿对角线方向螺栓孔中心间距 ≥ 63 mm;中间行列上螺栓孔中心间距为63~160 mm;螺栓孔中心距构件边缘的距离为31.5~80.0 mm。

螺栓孔的放样定位:1) 加强钢板最下排6个 $\phi 21$ 螺栓孔、从上至下第二排2个 $\phi 17$ 外侧螺栓孔在工厂钻孔。2) 横隔板母材的螺栓孔与加强钢板匹配钻孔。3) 加强钢板其余孔位在横隔板原位按设计孔位放样。4) 放样后检查各孔距是否满足规范要求,若不满足,则适度调整孔位,必要时增减1个孔位,以满足要求。5) 根据最终确定的放样孔位进行横隔板原板钻孔和加强钢板匹配钻孔。

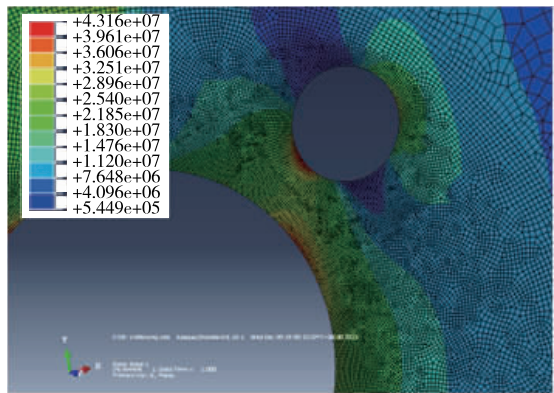
由于现场施工的原因,存在制造与加工缺陷,螺栓孔距弧形切口边缘的距离小于10 mm时,重做补强钢板,补强钢板上不设止裂孔,在距离止裂孔48 mm位置设置新的螺栓孔(见图5)。根据有限元计算结果,按照上述间距,补强钢板弧形边缘应力由原来的24.7 MPa增加至43.6 MPa,距边缘较近的螺栓孔周边应力也达到40 MPa(见图6)。



图5 补强钢板螺栓孔的调整



(a) 弧形缺口附近无螺栓孔



(b) 弧形缺口周边存在螺栓孔(螺栓孔中心距板件边缘10 mm)

图6 补强钢板应力分析结果(单位:Pa)

2 实桥裂纹修复与试验方案

2.1 测点布置

弧形切口疲劳裂纹主要位于重车道和快车道,沿横桥向选择4个加固后弧形切口进行应变测试。图7中圆圈所示为弧形切口,测点布设在横隔板弧形切口圆弧上,粘贴于弧形切口内侧(见图8),其中

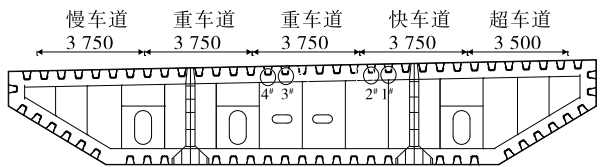


图7 动应变测点布置方案(单位:cm)

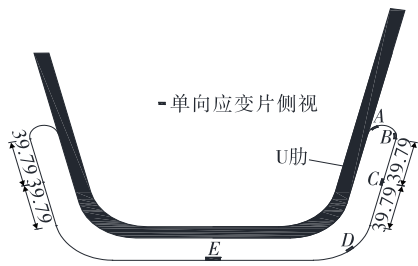


图8 应变测点布置局部放大(单位:mm)

测点B用于测量运营荷载作用下动应变,其余测点用于测量弧形切口的静应变。测点现场布置情况见图9。

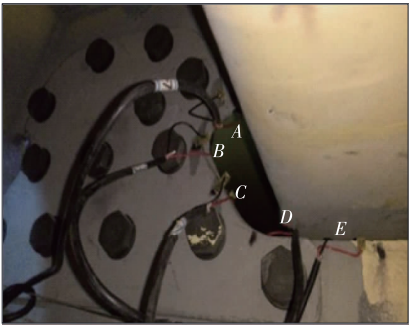


图9 应变测点现场布置

2.2 试验结果分析

采样频率为100 Hz,采集一周。考虑到现场环境的影响,先评估车辆荷载再对所采集的数据进行合理性分析。去除温度影响后,实际运营荷载作用下应力谱见图10~13,应力谱采用不小于29 MPa的应力循环。

从图10~13可以看出:在车辆荷载作用下,4#弧形切口的应力为30~40 MPa,循环次数随着应力循环的增加随机地减小。而公路钢桥疲劳应力谱的基本特征应为逐渐连续减少,4#弧形切口不符合该特征。

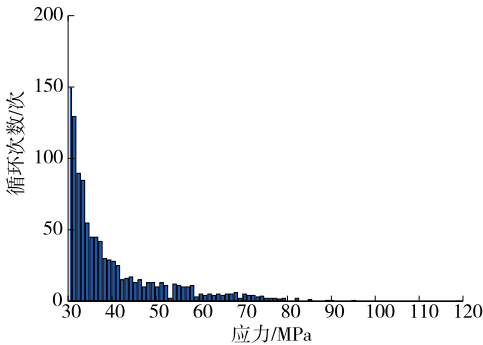


图10 1#弧形切口的应力谱(去除温度影响后)

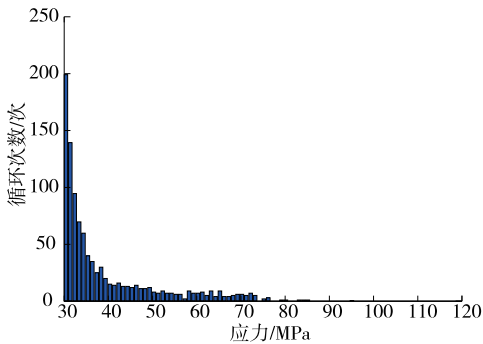


图11 2#弧形切口的应力谱(去除温度影响后)

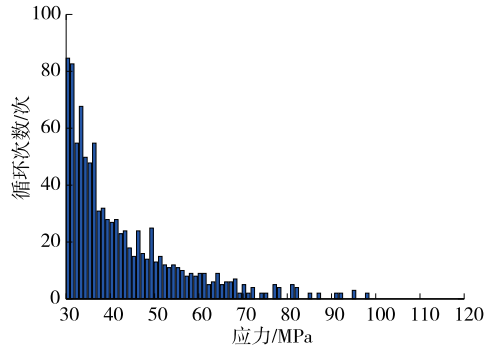


图12 3#弧形切口的应力谱(去除温度影响后)

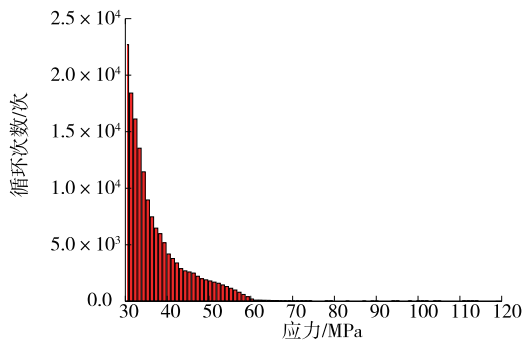


图13 4#弧形切口的应力谱(去除温度影响后)

图14、表1分别为各弧形切口的循环次数(大于29 MPa)和疲劳损伤。从图14、表1可以看出:4#弧形切口的循环次数为174 990次,该桥一天内通过的重载卡车不可能有如此之多。因此,后续分析中主要依据1#、2#和3#弧形切口的数据。

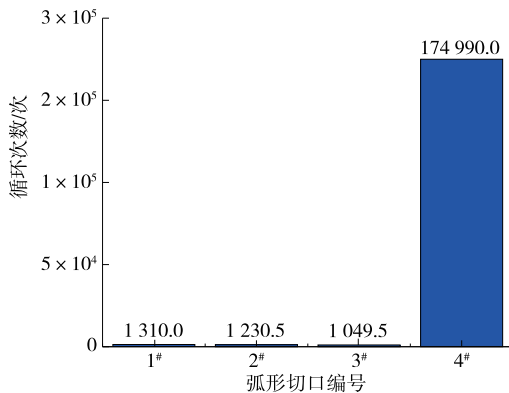


图14 各弧形切口的循环次数

表1 各弧形切口的疲劳损伤

弧形切口编号	疲劳损伤	弧形切口编号	疲劳损伤
1#	9.68×10^{-5}	3#	8.54×10^{-5}
2#	6.70×10^{-5}	4#	0.006 9

2.3 疲劳寿命预测

根据欧洲 Eurocode3 规范,名义应力谱对应的疲劳强度曲线公式为:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m \times 2 \times 10^6 \quad (m=3, N \leq 5 \times 10^6 \text{ 次}) \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m \times 5 \times 10^6 \quad (m=5, 5 \times 10^6 \text{ 次} < N \leq 10^8 \text{ 次}) \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma_R$ 为细节承受的应力范围; N_R 为对应疲劳寿命; $\Delta\sigma_C$ 为细节类型; $\Delta\sigma_D$ 为常幅疲劳极限; m 为常数, $\Delta\sigma_R < \Delta\sigma_D$ 时, m 由3变为5。

Eurocode3 规范还确定了循环次数为 10^8 次时的应力截止限 $\Delta\sigma_L$:

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D = 0.549 \Delta\sigma_D \quad (3)$$

$\Delta\sigma_R \leq \Delta\sigma_L$ 时,认为该细节的疲劳寿命是无限的。因此,也可以将 $\Delta\sigma_L$ 视为变幅疲劳作用的应力门槛,在实际计算过程中,应将小于 $\Delta\sigma_L$ 的应力循环从应力谱中剔除。

表2为Eurocode3规范中疲劳细节S-N曲线参数。选取Eurocode3规范的疲劳强度曲线进行疲劳寿命评估,根据细节的受力特征和实际构造,弧形切口细节的类型为70。

表2 Eurocode3 规范中疲劳细节S-N曲线参数MPa

$\Delta\sigma_C$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$	$\Delta\sigma_C$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
160	118	65	71	52	29
140	103	57	63	46	25
125	92	51	56	41	23
112	83	45	50	37	20
100	74	40	45	33	18
90	66	36	40	29	16
80	59	32	36	26	15

根据式(1)、式(2),可将疲劳强度曲线改写为:

$$\Delta\sigma_R^3 N_R = K_C \quad (K_C = \Delta\sigma_C^3 \times 2 \times 10^6, \Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_D) \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_R^5 N_R = K_D \quad (K_D = \Delta\sigma_D^5 \times 5 \times 10^6, \Delta\sigma_R \leq \Delta\sigma_D) \quad (5)$$

应力幅 $\Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_D$ 时,疲劳强度系数为 K_C ;应力幅 $\Delta\sigma_R < \Delta\sigma_D$ 时,疲劳强度系数为 K_D 。对于弧形切口细节70, K_C 、 K_D 分别为 7.14×10^{11} 和 1.88×10^{15} 。

根据式(4)、式(5),由应力循环产生的疲劳损伤为:

$$\frac{n}{N} = \frac{nS^3}{K_C} \quad (S \geq \Delta\sigma_D) \quad (6)$$

$$\frac{n}{N} = \frac{nS^5}{K_D} \quad (\Delta\sigma_L \leq S < \Delta\sigma_D) \quad (7)$$

式中: n 为应力 S 的作用次数; N 为与 S 对应的疲劳寿命。

根据线性损伤累积理论 (Palmgren-Miner 法则),在变幅荷载作用下,弧形切口处的细节疲劳损伤计算公式为:

$$D = \sum_{S_i \geq \Delta\sigma_D} \frac{n_i S_i^3}{K_C} + \sum_{\Delta\sigma_L \leq S_j \leq \Delta\sigma_D} \frac{n_j S_j^5}{K_D} \quad (8)$$

式中: n_i 为 $S > \Delta\sigma_D$ 的作用次数; n_j 为 $S \leq \Delta\sigma_D$ 的作用次数。

实际运营荷载作用 6 d 后,所有弧形切口的循环次数和疲劳损伤的日平均值见图 15、图 16。从图 15 可以看出:4# 测点的循环次数日平均值为 154 905 次,从该桥目前运营车辆荷载的现状来看,循环次数结果失真偏大。从图 16 可以看出:受钢箱梁顶板构造特征的影响,同一车道相互靠近的两个动应变测点的循环次数和疲劳损伤存在较大差异。

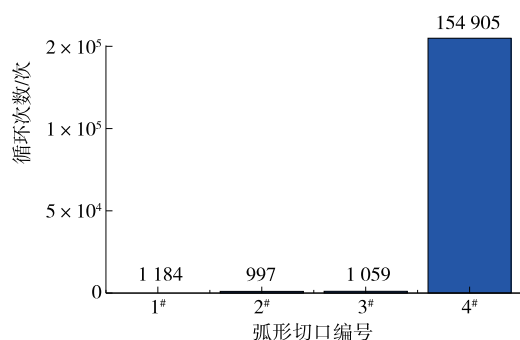


图 15 6 d 循环次数日平均值

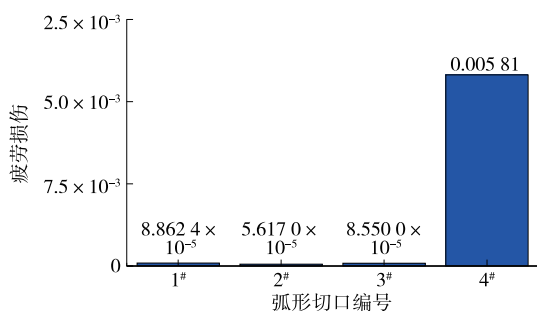


图 16 6 d 疲劳损伤日平均值

据此,可根据下式计算各弧形切口的疲劳寿命:

$$N = \frac{1}{D \times 365} \quad (9)$$

式中: N 为弧形切口的疲劳寿命,以年表示。

表 3 为疲劳寿命预测结果。从表 3 可以看出:所有车道的寿命都由原本开裂状态提升到 30 年以上的运营状态,但都小于桥梁的设计年限,需要在后

期维护管养中予以重视。

表 3 所有弧形切口的疲劳寿命

弧形切口编号	疲劳寿命/年	弧形切口编号	疲劳寿命/年
1#	30.9	3#	32.0
2#	48.8	4#	—

3 结论

(1) 对于弧形切口疲劳裂纹,在止裂孔的基础上,短小疲劳裂纹可采用“弧形切口优化”的加固方案,中长疲劳裂纹可采用“弧形切口优化+双面补强钢板”的加固方案。

(2) 补强钢板采用工厂部分预制钻孔、现场部分钻孔的方法,补强钢板的外形需圆滑过渡,避免倒角处产生应力集中效应。根据有限元分析结果,孔距太近或边距偏小,会在两孔之间的邻近区域形成新的薄弱位置,容易导致螺栓孔与弧形切口边缘之间位置应力集中,加大补强钢板产生裂纹的可能。

(3) 施工过程中的应力监控结果表明,1#(快车道)、2#(快车道)和 3#(重车道)弧形切口的预测疲劳寿命分别为 30.9 年、48.8 年和 32 年,运营状态的疲劳寿命得到有效提升。

参考文献:

- [1] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J].中国公路学报,2017,30(3):14—30+39.
- [2] 陈卓异,李传习,柯璐,等.某悬索桥钢箱梁疲劳病害及处治方法研究[J].土木工程学报,2017,50(3):91—100.
- [3] TSAKOPOULOS P A, FISHER J W. Full-scale fatigue tests of steel orthotropic deck panel for the Bronx-Whitestone Bridge rehabilitation[J]. Bridge Structures, 2005, 1(1): 55—66.
- [4] 李传习,陈卓异,周爱国,等.钢箱梁横隔板疲劳裂纹特征与实桥试验的轮载应力[J].土木工程学报,2017,50(8):59—67.
- [5] 朋茜,周绪红,狄瑾,等.钢桥面板纵肋与横隔板连接位置疲劳损伤特征[J].中国公路学报,2018,31(11):78—90.
- [6] 祝志文,黄炎,向泽,等.货运繁重公路正交异性板钢桥弧形切口的疲劳性能[J].中国公路学报,2017,30(3):104—112.
- [7] CHOI J H, KIM D H. Stress characteristics and fatigue crack behaviour of the longitudinal rib-to-cross beam

(下转第 151 页)

快速、高效地完成各文件的审批及签署。

(5) 计量支付中的应用。计量支付的工作过程复杂、系统性强,涉及资金和物资在建设单位和业主之间的流动,需签名审批的文件很多,若采用传统签名方式,费时费力。在计量支付中采用触屏签名技术可大大减轻工作人员负担,提高工作效率。一套计量支付文件首先由施工单位填写清单中间计量表,经施工单位负责人审核签名后流转至监理单位进行复核签名,然后转交至建设单位进行审批,期间有大量填有数据的报表需要逐级审核。利用触屏签名技术可对一整套报表同时进行签名,不必按照以往逐份签署的方式。若需要对数据进行修改,只需将相应报表退回至上一步操作人,且操作痕迹自动记录,方便后期数据溯源,责任清晰,节省签名返工时间(见图3)。

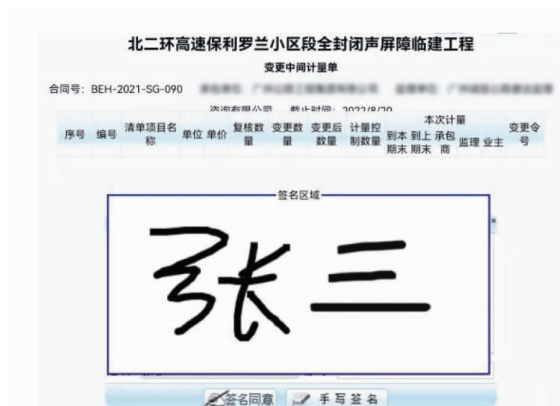


图3 变更中间计量单触屏签名

3 结语

将触屏签名技术应用于高速公路建设中,可保

障签名的及时性,通过待签提醒,签名人可及时获取需要签名审批的信息,进而完成文件的实时签名;能对签名情况进行实时汇总,包括已签和待签信息;提升签名的真实性与安全性,在签名前一般需要利用手机进行验证,确保是签名者本人,签名过程中记录签名背景信息,签名后对签名痕迹进行管理,从而识别出签名者,且触屏签名接近手写签名,不易被模仿,利用触屏签名技术保障签名信息的完整性和抗抵赖性;提高工程项目管理的高效性,签名人员通过智能手机即可对待批文件进行签署,管理人员通过工作平台即可掌握文件签署状态。总之,采用触屏签名技术能给高速公路建设管理带来极大便利,有利于节约管理成本,提高工作效率。

参考文献:

- [1] 周雪.论电子签名的功能与效力[J].甘肃高师学报, 2021,26(4):135—138.
- [2] 王政华,谢朋.电子签名在传统行业的应用与发展[J].产业与科技论坛,2021,20(17):34—35.
- [3] 郝艳丽,陈艺娟.浅析 POS 机数字手写签名笔迹与其他类型手写签名笔迹的异同[J].法制博览,2017(22):267—269.
- [4] 程朝辉.数字签名技术概览[J].信息安全与通信保密, 2020,18(7):48—62.
- [5] 许泽宁,肖利君,刘志文.基于移动手机的在线签名技术的应用开发[J].信息化研究,2020,46(4):62—66.
- [6] 黄李彦,詹康辉,周广存.触屏电子签名与纸笔签名的笔迹特征比较研究[J].刑事技术,2020,45(6):582—586.

收稿日期:2022—07—22

(上接第 131 页)

- joints in an orthotropic steel deck[J]. Advances in Structural Engineering,2009,11(2):189—198.
- [8] 祝志文,向泽,李健朋.正交异性钢桥面板横隔板弧形切口疲劳性能[J].交通运输工程学报,2018,18(2):11—22.
 - [9] 陈卓异,李传习,柯璐,等.钢桥面板弧形切口疲劳裂纹切割修复与优化[J].中国公路学报,2021,34(7):301—312.
 - [10] 吴有俊,黄志斌,邱云.正交异性钢箱梁悬索桥弧形切口优化有限元分析[J].公路与汽运,2017(3):142—147.
 - [11] 李传习,李游,陈卓异,等.钢箱梁横隔板疲劳开裂原

因及补强细节研究[J].中国公路学报,2017,30(3):121—131.

- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计规范:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [13] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司.铁路桥梁钢结构设计规范:TB 10091—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [14] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2021—09—11