

钢桥中错位厚板十字接头的力学性能与补强方法

沈 翀¹, 苏庆田¹, 陈友生²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200)

摘 要: 针对钢桥中厚板十字接头出现错位缺陷的问题, 采用有限元方法研究了错位缺陷对厚板十字接头力学性能的影响, 提出一种分离式焊接钢板补强方法并对补强钢板的尺寸进行优化设计. 研究表明, 错位缺陷对厚板十字接头的力学性能产生较大的影响, 板件竖向应力在附加弯矩作用下显著增大. 提出的焊接钢板补强方法使得补强后竖向支承板承担大部分轴力与弯矩, 强度控制设计截面位于补强钢板底部焊缝处, 可通过增加补强钢板的高度提升补强效率, 最高可达48%. 本文推荐了不同错位量下补强钢板的合理尺寸, 可为类似工程中错位厚板十字接头的补强方法提供参考.

关键词: 钢桥; 十字接头; 错位缺陷; 补强方法; 有限元方法

中图分类号: U 441 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)05-0729-09

Mechanical Properties and Reinforcement Method of Misaligned Thick Plate Cross Joints in Steel Bridge

SHEN Chong¹, SU Qing-tian¹, CHEN You-sheng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Sichuan Road & Bridge East China Construction Co., Ltd., Chengdu 610200, China. Corresponding author: SU Qing-tian, E-mail: sqt@tongji.edu.cn)

Abstract: Aiming at the problem of misalignment defects in the cross joint of thick plates in steel bridges, the finite element method was used to study the influence of misalignment defects on the mechanical properties of cross joints of thick plate, and a reinforcement method of welding separated steel plates was proposed and the size of the steel plate for reinforcement was optimized. The results show that misalignment defects have a significant effect on the mechanical properties of cross joints of thick plate, and the vertical stress increases significantly under the influence of additional bending moment. The proposed reinforcement method of welding separated steel plates makes the vertical support plate of cross joint bear most of the axial force and bending moment after reinforcement. The key section for design is located near the weld at the bottom of the steel plate for reinforcement, and the efficiency of reinforcement can be improved by increasing the height of the steel plate for reinforcement, up to 48%. Different sizes of steel plates for reinforcement are recommended for cross joints with different misalignments, which can provide a reference for the reinforcement methods of misaligned thick plate cross joints in similar projects.

Key words: steel bridge; cross joint; misalignment defect; reinforcement method; finite element method

钢结构桥梁具有轻质高强、跨越能力大、抗震性能优异以及工业化程度高等优点, 是桥梁工程中的重要发展方向^[1-2]. 近年来我国兴建了多座

大跨度钢桥, 在连接节点与关键构造处均采用焊接施工, 如杨泗港长江大桥的钢桁梁整体焊接节点由弦杆、竖腹杆、斜腹杆等各向杆件相交组成,

空间布置错综复杂^[3-4];齐鲁黄河大桥的异形拱肋、横撑节点以及拱脚、系梁节点均采用厚板对接焊接连接,局部构造力学性能复杂^[5]。

焊接是桥梁钢结构最常用的连接方式,具有不削弱构件截面、构造简单、施工便捷等优势,能充分满足现代钢桥日益增长的美学与力学要求。钢桥中厚板十字接头在工时不可避免地由于制造工艺、定位误差以及焊接变形产生焊接缺陷,焊缝处几何形状不连续、咬边、未焊透、错位等缺陷易引起局部应力集中,成为反复荷载下结构失效的疲劳源^[6-9]。

错位缺陷在钢结构十字接头组装施工过程中较为常见,《钢结构工程施工质量验收标准》^[10]中对十字接头熔透对接焊缝的最大允许偏差为 4 mm。针对该问题,文献^[11-13]研究了错位缺陷对板对接、管对接结构中焊缝受力性能的影响,分析了焊缝处板件在轴向力与平面内弯矩共同作用下的应力集中系数,并总结与改进了该系数的计算方法;文献^[14-17]揭示了板厚、错位量、堆焊坡度、焊缝余高、截面形状等参数对不同形式焊接接头的静力性能、疲劳性能的影响规律。桥梁结构的加固方法大致分为增大截面法、粘贴钢板法、体外预应力法、纤维增强复合材料法、新型混凝土材料加固法以及组合加固法等^[18-22]。增大截面法采用焊接和螺栓连接等方式将钢板、型钢等新构件与原截面进行固结,常用于提高钢结构梁、柱的承载能力与刚度,依据《钢结构加固设计标准》^[23],增大截面法可用于轴心受力、受弯、压弯、拉弯构件的加固。目前对于焊接接头的力学性能已开展多项研究,而对于错位厚板十字接头的加固方法鲜有讨论。

本文结合某钢拱桥实际工程在工时拱脚与系梁结合段处焊接十字接头发生错位缺陷的情况,提出一种非持荷状态下便捷高效的分离式焊接钢板补强方法。采用有限元方法研究错位缺陷对十字接头力学性能的影响以及加固前后十字接头力学性能的变化,并从传力机理的角度对补强钢板的尺寸进行优化设计,推荐了不同错位量下补强钢板的合理尺寸,可为类似工程中错位厚板十字接头的补强方法提供参考。

1 研究背景

1.1 工程背景

某主跨 200 米的下承式简支系杆拱桥采用钢箱系梁与钢箱拱肋固结的结构体系,拱轴线为抛

物线并向内倾斜呈提篮状。该桥拱脚-系梁结合段处采用焊接连接,六边形拱肋边板与内部隔板焊于系梁水平顶板的上表面,该板下表面相同位置处焊有竖向支承板,起到固结与传力作用,详细构造见图 1,图中拱脚处拱肋边板、隔板与系梁竖向支承板、加劲隔板的厚度均为 40 mm,系梁水平顶板未显示,厚度同为 40 mm。

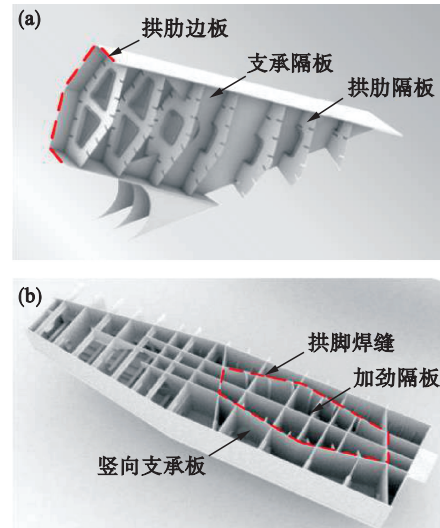


图 1 拱脚-系梁结合段构造

Fig. 1 Structure of arch-tie beam connection

(a)—拱脚; (b)—系梁。

1.2 力学模型与有限元模型

为研究该拱桥拱脚-系梁结合段处错位厚板十字接头的力学性能,选取主要受力板件如拱肋边板、拱肋隔板、系梁水平顶板、竖向支承板与加劲隔板,等效简化各板件边界约束条件,建立错位厚板十字接头简化力学模型,如图 2 所示。后文十字接头各板件名称以图 2 为准, F 为拱肋轴力,定义顶板与竖向支承板厚度方向中心线位置的差值为错位量 δ_m ,该钢拱桥经现场测量后,发现拱脚-系梁结合段处大部分厚板十字接头的焊接质量满足规范要求;少量错位十字接头的错位量达到 20 mm,顶板中心线的延长线依然位于竖向支承板内部;极少数十字接头存在明显的错位缺陷且最大错位量达到 50 mm。

根据实桥局部构造及简化力学模型,建立错位厚板十字接头三维实体有限元模型进行计算分析,如图 3 所示。整体模型中主要受力板件的尺寸为:顶板 2 300 mm×400 mm×40 mm,左、右水平板 2 300 mm×800 mm×40 mm,竖向支承板 2 300 mm×2 500 mm×40 mm,其中顶板底部与上水平板相连且无其余约束,上水平板、竖向支承板分别与厚度为 40 mm 的竖向边板与下水平板

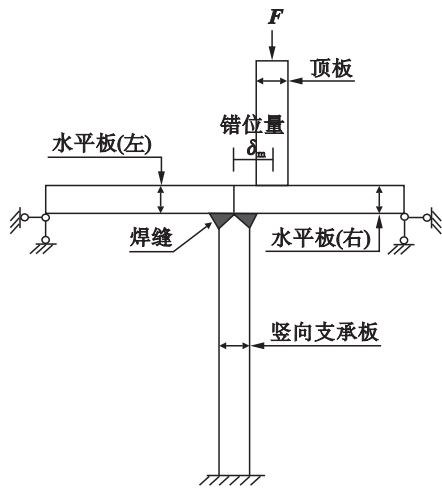


图 2 错位厚板十字接头简化力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model of misaligned thick plate cross joint

相连;整体模型约束条件与实际结构等效;局部构造方面,竖向支承板两侧与上水平板间带坡脚的全熔透角焊缝均以实体单元建模,尺寸为 12 mm×12 mm. 整体模型采用映射网格划分且焊缝处关键节点局部细化,拱肋轴力等效为均布面荷载垂直施加于顶板顶面.

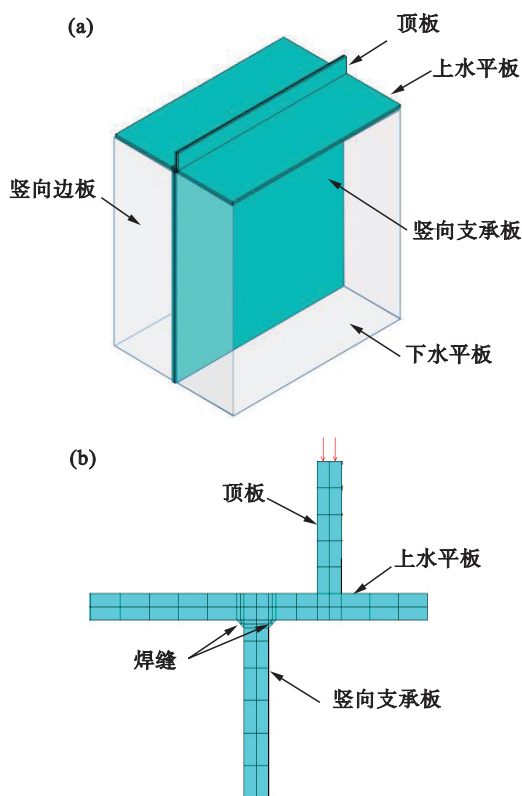


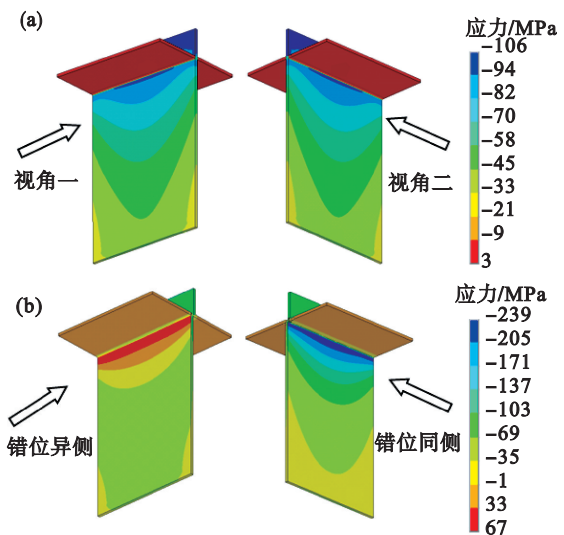
图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element models (a)—整体模型; (b)—局部模型.

1.3 错位十字接头的力学性能

建模计算,对比分析有无错位缺陷对十字接

头力学性能的影响,重点研究在顶板轴向均布荷载(100 MPa)作用下,无错位与最大错位量 50 mm 时十字接头的竖向应力分布与最大值变化情况,如图 4 所示.无错位十字接头的竖向支承板为轴心受压板件且两侧外表面竖向应力分布相同.由于竖向支承板与水平板间焊缝的结构形状不连续,少部分荷载在水平板内扩散后由焊缝传递至竖向支承板,致使焊缝处出现应力集中现象,局部区域应力水平增大,在竖向支承板顶部中心处竖向压应力最大值为 106 MPa.当十字接头的错位量为 50 mm 时,竖向支承板顶部呈明显的压弯受力特征且中心区域应力水平高于边缘,与错位顶板异侧的焊缝处竖向拉应力最大值为 67 MPa,与错位缺陷同侧的竖向压应力最大值为 239 MPa,对比无错位结构,错位缺陷导致的附加弯矩在竖向支承板顶部产生的弯曲正应力约为轴压正应力的 178%,与错位缺陷同侧焊缝处的竖向压应力最大值相比增大了 125%.



注:拉应力为正、压应力为负

图 4 十字接头竖向应力云图

Fig. 4 Vertical stress nephogram of cross joint (a)—无错位; (b)—错位量 50 mm.

综上所述,错位缺陷产生的附加弯矩对十字接头的力学性能产生了较大的影响,竖向支承板由轴心受压板件变为压弯受力板件且与错位缺陷同侧受压、异侧受拉,受压侧竖向应力增幅较大且结构强度不满足规范设计要求,需采取补强措施.

2 分离式焊接钢板补强方法

某钢拱桥拱脚-系梁结合段处厚板十字接头存在错位缺陷,经计算错位缺陷对十字接头的力

学性能产生较大影响且焊缝处板件强度不再满足设计要求,考虑到设计变更与重新施工带来的高额成本,最终选择对结合段进行补强加固.由此,本文提出一种非持荷状态下的分离式焊接钢板补强方法,通过在竖向支承板顶部焊接分离式矩形钢板以提高十字接头的力学性能,如图 5 所示.

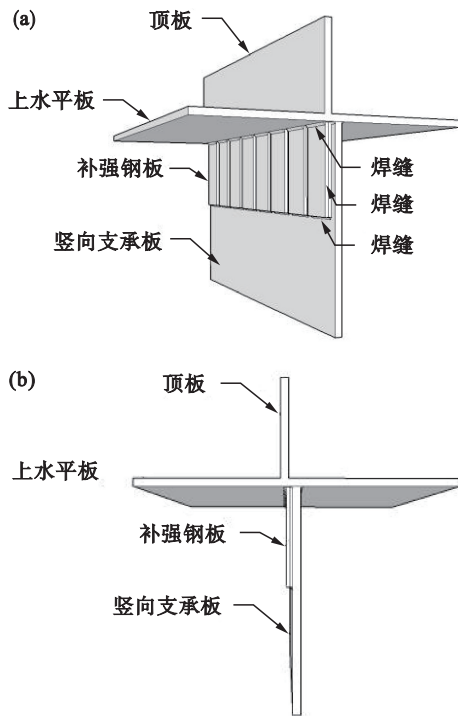


图 5 分离式焊接钢板补强方法

Fig. 5 Reinforcement method of welding separated steel plates

(a)—斜视图; (b)—正视图.

当厚板十字接头中顶板与竖向支承板发生错位时,竖向支承板顶部呈压弯受力特性且与错位顶板同侧外表面的竖向压应力增幅较大,则在该侧焊接钢板为合理高效的补强措施,具体方法如下:首先确定顶板与竖向支承板厚度方向中心线的错位关系及错位量,选择尺寸合理的矩形钢板间断式排列于顶板中心线同侧,钢板平面与竖向支承板贴合且顶边靠近上水平板与竖向支承板焊缝处;然后进行板件间焊接,补强钢板的顶边开设坡口并采用熔透焊接法与十字接头焊缝及上水平板焊接,其侧边、底边与竖向支承板外表面采用三边围角焊缝焊接;最后通过打磨平滑等焊后处理降低焊缝的残余应力,改善机械性能.

考虑到补强钢板的制作工艺、焊接技术以及主要承受竖向荷载的受力特点,矩形是合理可靠的.与大尺寸整体钢板焊接补强的方法相比,采用小尺寸矩形钢板间断布置的方式存在诸多优

点,如:体积小、自质量小的钢板在施工过程中更易运输、焊接;受力方面,补强钢板采用三边围焊的形式焊至竖向支承板,而板件内部无连接,故采用侧边焊缝更多更长的小尺寸钢板补强效率更高,且受压时补强板件的稳定性能更好.总体而言,本文提出的焊接钢板补强方法适用于各种错位钢板十字接头结构,并可在发现问题后立即进行现场取材、加工、焊接,焊接精度要求较低,工艺流程便捷迅速且经济性好.

3 补强后十字接头的力学性能

在图 3 有限元模型的基础上,采用实体单元新建分离式矩形钢板于错位缺陷同侧,补强钢板内表面与竖向支承板外表面间隔 1 mm,等效于实际施工时新旧焊缝界面不完全接触的情况,二者仅通过各边焊缝进行传力;补强钢板顶边与上水平板的焊缝通过实体单元模拟,焊脚尺寸为补强钢板厚度的一半且不小于 12 mm;侧边与底边的焊缝由刚臂模拟,局部有限元模型如图 6 所示.

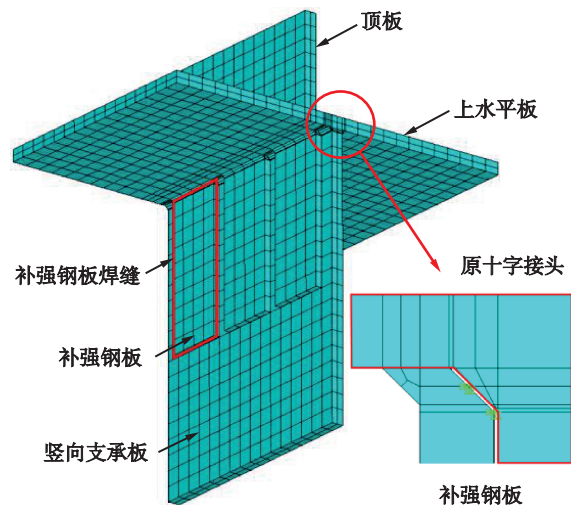


图 6 补强后十字接头有限元模型

Fig. 6 Finite element model of reinforced cross joint

以纵向间隔 50 mm、尺寸为 20 mm×200 mm×700 mm 的矩形钢板为例对错位量为 100 mm 的十字接头进行补强,除补强钢板外主要受力板件的竖向应力分布如图 7 所示,竖向支承板顶部依然为压弯受力特征且与错位缺陷同侧外表面受压,补强钢板纵向间隙顶部与底边焊缝处压应力较大,最大值为 168 MPa;竖向支承板另侧外表面受拉且顶部焊缝处最大拉应力为 129 MPa.

继续分析补强钢板与竖向支承板的内力分布规律,选取十字接头纵向中部位置,同一水平截面补强钢板的尺寸为 20 mm×200 mm,相连的竖向支

承板的尺寸为40 mm×200 mm,两板所受竖向轴力、弯矩见图8.由图可知,竖向支承板与补强钢板任一截面的轴力、弯矩以及总截面内力均与该截面位置至上水平板底面的距离近似于线性关系,除补强钢板底边焊缝处截面变化导致内力改变.

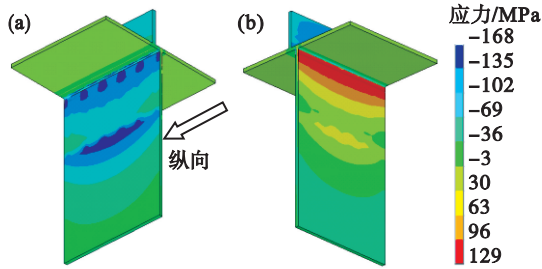


图7 补强后十字接头竖向应力云图

Fig. 7 Vertical stress nephogram of reinforced cross joint

(a)一错位同侧(不显示补强钢板);(b)一错位异侧.

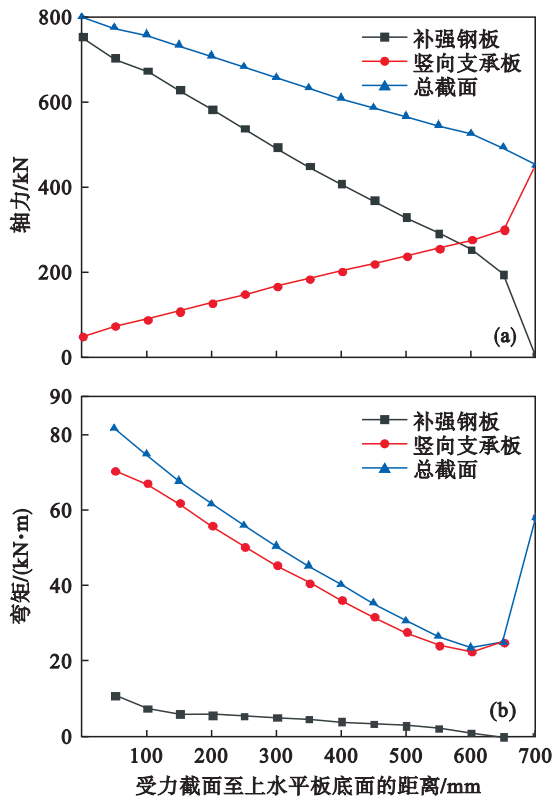


图8 补强后十字接头内力分布规律

Fig. 8 Internal force distribution of reinforced cross joint

(a)一轴力;(b)一弯矩.

由图8a可知,补强钢板与竖向支承板共同承担轴力作用,随着受力截面与上水平板底面间距增加,补强钢板所受轴力与总截面轴力产生不同程度的线性减小且补强钢板的轴力占比由94%线性减少至39%,总截面轴力在补强钢板底边焊缝处仅为顶部位置的56%,并完全由竖向支承板承担.由图8b可知,竖向支承板主要承担弯矩作

用,该弯矩随受力截面至上水平板底面的距离增加而线性减小且在总弯矩中的占比逐渐增加,由于补强钢板在底边焊缝处将轴力以偏心压力的形式传递至竖向支承板,导致该截面由竖向支承板承担的总弯矩突增.

4 补强钢板尺寸参数分析

分离式焊接钢板补强法的关键在于选取尺寸合理的补强钢板,下文对高度与厚度2个参数进行计算分析,主要考察加固钢板、竖向支承板与新旧焊缝处竖向应力分布随尺寸参数变化的规律,并以补强效率为指标进行优化.

4.1 高度

计算假设十字接头顶板的错位量为20,40,60,80,100 mm,补强钢板的厚度与宽度分别为20,200 mm,钢板间纵向间隔50 mm,研究补强钢板高度在200~700 mm变化时十字接头焊缝处竖向拉、压应力最大值的变化规律,如图9所示.

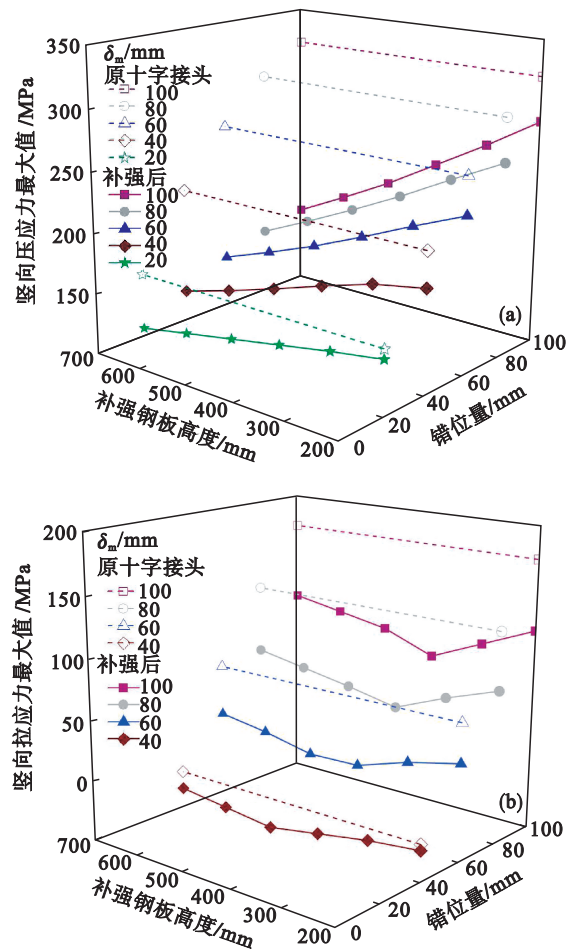


图9 补强钢板高度对十字接头力学性能的影响
Fig. 9 Influence of the height of the steel plates for reinforcement on mechanical properties of cross joint

(a)一竖向压应力;(b)一竖向拉应力.

本文定义补强效率为错位厚板十字接头补强前、后竖向应力最大值的变化量与原结构竖向应力最大值的比值,补强效率越高证明补强钢板对原结构力学性能的改善越多.由图 9a 可知,错位十字接头经不同高度补强钢板进行补强后竖向压应力最大值均有所减小,且随补强钢板高度增加而线性减小,则补强效率随补强钢板高度增加而线性提升.以错位量为 100 mm 的十字接头为例,原结构竖向支承板顶部焊缝处竖向压应力最大值为 321 MPa,经高度为 200~700 mm 的矩形钢板补强后,压应力最大值均位于补强钢板底边焊缝处并由 284 MPa 减小至 168 MPa,补强效率由 12% 提升至 48%.

相同高度补强钢板对不同错位量十字接头的补强效率不同,当错位量为 20, 40, 60, 80, 100 mm 时,原结构焊缝处竖向压应力最大值分别为 156, 214, 260, 296, 321 MPa, 经高度 700 mm 矩形钢板补强后减小至 106, 125, 143, 155, 168 MPa, 对应的补强效率分别为 32%, 42%, 45%, 48%, 48%; 而经高度 200 mm 的补强钢板时补强效率仅为 5%~12%, 降低约 33%, 故增加补强钢板高度是提升补强效率的有效方法, 并对错位量较大的十字接头有更显著的提升效果.

如图 9b 所示, 错位十字接头竖向支承板顶部焊缝处拉应力最大值几乎不随补强钢板高度变化, 该方法对十字接头拉应力的补强效率为 13%~30%, 并对错位量较大的十字接头有更高的补强效率.

通过对补强钢板高度进行大量参数分析发现, 该补强方法对错位十字接头的补强效率随着钢板高度增加而提高且最高可达 48%, 但错位量大于 40 mm 的十字接头经补强后, 其焊缝处竖向压应力最大值依然高出无错位结构 19%~58%, 应力水平难以恢复如初. 继续增加补强钢板的高度 (>700 mm) 时, 竖向支承板受压侧补强钢板底边焊缝处压应力最大值保持线性减小的变化规律, 另侧焊缝处拉应力最大值略微减小, 但受压侧补强钢板顶部纵向间隙处出现明显的应力集中现象, 局部应力较大且增长迅速, 对十字接头的力学性能产生了不利影响, 图 7 中可观察到相似的应力分布状态. 产生上述现象的原因是: 本文有限元模型中并未采用实体单元创建补强钢板侧边、底边与竖向支承板的焊缝, 而采用刚臂约束等效替代, 导致结构形状不连续与局部应力集中问题, 计算所得焊缝处局部应力水平比实际

偏大; 实际施工中对于补强钢板各边焊缝采用多层多道焊接技术, 并通过焊后处理等措施缓解应力集中问题. 总体来说, 采用合理高度的补强钢板对错位十字接头进行加固能有效改善其力学性能.

4.2 厚度

计算假设十字接头的错位量为 20~100 mm, 补强钢板的宽度、高度分别为 200, 600 mm, 厚度为 12~40 mm, 纵向间隔为 50 mm, 补强钢板厚度对十字接头力学性能的影响如图 10 所示, 以错位量为 100 mm 的十字接头为例.

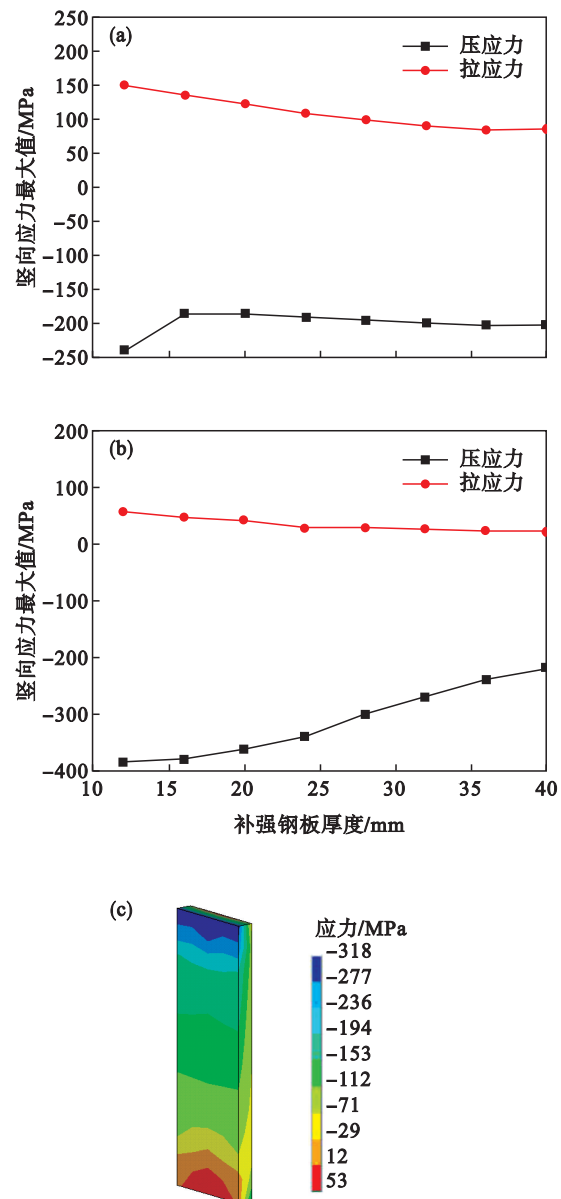


图 10 补强钢板厚度对十字接头力学性能的影响

Fig. 10 Influence of the thickness of the steel plates for reinforcement on mechanical properties of cross joint

- (a) 竖向支承板顶部焊缝处; (b) 补强钢板;
(c) 补强钢板(厚度 28 mm)竖向应力云图.

由图 10a 可知,竖向支承板顶部焊缝处的拉应力最大值随补强钢板厚度增加而逐渐减小并趋于平缓,当板厚由 12 mm 增至 40 mm 时,竖向拉应力最大值由 150 MPa 减少至 85 MPa;而竖向压应力最大值基本不随补强钢板厚度增加而变化,仅当板厚过小(12 mm)时呈明显增长趋势.整体来说,改变补强钢板的厚度对提高补强效率的影响较小.

由图 10b 与图 10c 可知,补强钢板(28 mm)的竖向应力云图表明该板呈小偏心受压状态,外表面顶部受压且压应力最大值随板厚增加而线性减小,当补强钢板厚度由 12 mm 增至 40 mm 时,压应力最大值由 384 MPa 减小至 217 MPa;补强钢板底部竖向拉应力较小且几乎不随板厚变化,原因是该截面补强钢板所受轴力由焊缝传递至竖向支承板并由后者承担.

4.3 内力分配与传力机理

通过前文对补强钢板高度与厚度参数的计算分析可知,十字接头的补强效率主要表征补强钢板的顶边、底边与竖向支承板间焊缝处应力水平的改善情况,其受补强钢板高度的影响较大,也与厚度具有一定关系,并且增厚补强钢板可有

效改善钢板自身的受力情况.为合理设计补强钢板的高度与厚度尺寸,下文对补强后十字接头竖向支承板与补强钢板的内力分配与传力机理进行了研究,确定了关键受力截面及内力组成.

设截面①为补强钢板顶边水平截面,截面②为补强钢板底部距离底边 50 mm 处水平截面,截面③为补强钢板底边水平截面.由于改变补强钢板的厚度对竖向支承板的力学性能改善较小,故经相同厚度、不同高度的矩形钢板补强后,各关键截面的轴力与弯矩分配情况分别列于表 1 与表 2.以错位量为 100 mm 的十字接头为例,表 1 为补强后十字接头关键截面竖向轴力分配,表中 h_r 为补强钢板的高度, F_r, F_s 分别表示补强钢板、竖向支承板在该水平截面所受竖向轴力.由表可知,截面①处补强钢板所受轴力 F_r 随高度 h_r 的增加而增加,相反截面③处仅由竖向支承板承担的轴力 F_s 随 h_r 的增加而线性减小,即适当增加 h_r 可改善竖向支承板的力学性能,但不利于补强钢板.此外,各算例中 F_r, F_s 及总轴力与受力截面至上水平板底面的距离均近似于线性关系,如图 8a 所示,所以补强钢板顶边焊缝处为 F_r 的控制设计截面,底边焊缝处为 F_s 的控制设计截面.

表 1 补强后十字接头关键截面轴力
Table 1 Axial force of critical sections of reinforced cross joint

h_r/mm	截面①		截面②		截面③
	F_r/kN	F_s/kN	F_r/kN	F_s/kN	F_s/kN
200	551	187	364	280	576
300	614	137	328	276	540
400	666	101	292	277	510
500	705	75	257	282	486
600	733	58	224	290	466
700	753	47	194	298	450

表 2 补强后十字接头关键截面弯矩
Table 2 Bending moment of critical sections of reinforced cross joint

h_r/mm	截面①		截面②		截面③
	$M_r/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_s/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_r/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_s/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_s/(\text{kN}\cdot\text{m})$
200	8.5	42.2	2.6	47.4	118.6
300	9.0	51.1	2.5	44.5	106.0
400	9.5	58.6	2.1	40.0	93.6
500	10.0	64.0	1.4	35.0	80.9
600	10.4	67.8	0.7	30.0	69.0
700	11.0	70.4	0.1	25.0	58.0

表 2 为补强后十字接头各关键截面弯矩分配,表中 M_r, M_s 分别表示补强钢板、竖向支承板水平截面所受弯矩.由表可知,补强钢板与竖向

支承板组成的总截面中 83% 以上的弯矩由后者承担,截面①处 M_s 与 h_r 呈线性正比关系,而截面③处二者近似于线性反比关系,当 $h_r < 700 \text{ mm}$ 时,

截面③处 M_s 较大且为弯矩控制设计截面. 结合前文计算结果, 截面③处总轴力与 h_r 同样满足线性反比关系, 故补强钢板底边焊缝处竖向支承板的竖向应力与补强钢板高度近似符合线性反比关系, 与图 9 所示规律一致.

4.4 补强方法的建议与应用

以十字接头顶板顶面施加 100 MPa 均布荷载为例, 从结构的力学性能与材料经济性角度, 建议补强钢板的合理尺寸如表 3 所示, 实际工程可依据需求进行调整. 表中 d 为竖向支承板件的厚度, d_r 为补强钢板的厚度, σ_p, σ_r 分别表示错位十字接头补强前、后的竖向压应力最大值, σ_s 为补强钢板竖向压应力最大值, η 为补强效率.

表 3 补强钢板合理尺寸及补强效率
Table 3 Reasonable size and reinforcement efficiency of steel plates for reinforcement

δ_m/mm	h_r/mm	d_r/mm	σ_p/MPa	σ_r/MPa	σ_s/MPa	$\eta/\%$
0	—	—	106	—	—	—
10	400	20	128	112	75	13
20	500	20	156	120	100	23
30	600	28	187	132	105	29
40	700	28	214	131	130	39
50	800	36	239	134	130	44
60	800	40	260	144	150	45
80	900	44	296	148	177	50
100(2.5d)	1000	48	321	150	218	53

采用分离式焊接钢板补强法对该钢拱桥拱脚-系梁结合段的错位厚板十字接头进行补强与初步验算. 以现场测量所得最大错位量 50 mm 为例, 该桥在设计阶段拱脚板件的轴向压应力为 151 MPa, 施工阶段由于错位缺陷导致竖向支承板顶部所受最大拉、压应力分别为 101 MPa 与 359 MPa, 钢结构强度不再满足规范要求; 依据表 3 选择尺寸为 36 mm×200 mm×800 mm 的矩形钢板进行补强后, 竖向支承板的拉、压应力最大值分别为 18 MPa 与 202 MPa, 补强钢板的竖向压应力最大值为 196 MPa, 能够满足规范设计要求. 通过设计计算与实际施工论证了该分离式焊接钢板补强方法是合理有效的, 可为类似工程中错位厚板十字接头的补强方法提供参考.

5 结 论

1) 板件错位缺陷对厚板十字接头的力学性能产生较大的影响, 在附加弯矩作用下, 竖向支承板由轴心受压板件变为压弯受力板件且与错

位缺陷同侧受压、异侧受拉, 受压侧竖向压应力显著增大.

2) 错位厚板十字接头经补强后, 补强钢板主要受轴力作用, 可通过增加板厚提高其承载能力; 竖向支承板承担大部分轴力与弯矩, 强度控制设计截面位于补强钢板底边焊缝处, 此处竖向支承板所受轴力、弯矩均与补强钢板的高度近似负线性相关, 故增加补强钢板高度可有效提升十字接头的补强效率, 最高可达 48%.

3) 本文提出一种未持荷状态下, 便捷高效的分离式焊接钢板补强方法, 并通过大量有限元计算, 从结构的力学性能与材料经济性角度, 对补强钢板的合理尺寸提出建议, 可为类似工程中错位厚板十字接头的补强方法提供参考.

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97. (Editorial department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 1-97.)
- [2] 郑凯锋, 冯霄暘, 衡俊霖, 等. 钢桥 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(sup1): 53-69. (Zheng Kai-feng, Feng Xiao-yang, Heng Jun-lin, et al. State-of-the-art review of steel bridges in 2020 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(sup1): 53-69.)
- [3] 邓晓光, 刘沐宇, 史晶, 等. 大跨径双层悬索桥钢桁梁整体焊接节点疲劳分析与试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 96-103. (Deng Xiao-guang, Liu Mu-yu, Shi Jing, et al. Fatigue analysis and test on integral welded joint at steel truss girder of long-span double deck suspension bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3): 96-103.)
- [4] He Z S, Liu J. Crack research for welded joint of steel truss bridge [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 194/195/196: 104-108.
- [5] 苏庆田, 卢志威, 邵长宇, 等. 大跨度网状吊杆拱桥拱-梁节点局部应力分析[J]. 桥梁建设, 2022, 52(1): 41-48. (Su Qing-tian, Lu Zhi-wei, Shao Chang-yu, et al. Analysis of local stresses in arch-tie connection of long-span network arch bridge [J]. *Bridge Construction*, 2022, 52(1): 41-48.)
- [6] 杨景明. 基于损伤力学的铁路钢桁梁桥整体焊接节点疲劳寿命评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2021. (Yang Jing-ming. Fatigue life assessment of integral welded joints of railway steel truss bridge based on damage mechanics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.)
- [7] Yuan D Y, Cui C, Zhang Q H, et al. Fatigue damage evaluation of welded joints in steel bridge based on meso-damage mechanics [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 161: 106898.
- [8] 兰亮云, 邵国庆, 张一婷, 等. 焊接顺序对 Q690 钢 T 型接头残余应力和变形的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(12): 1741-1746. (Lan Liang-yun, Shao Guo-qing, Zhang Yi-ting, et al. Influence of welding sequence on residual stress and

- deformation of T-Joint of Q690 steel [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41 (12): 1741-1746.)
- [9] 吕志林,姜旭,杨燕,等.碳纤维加固钢桥面板U肋对接焊缝疲劳试验[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(8):1220-1230.
(Lyu Zhi-lin, Jiang Xu, Yang Yan, et al. Fatigue test of CFRP-strengthened U-rib butt weld in steel bridge decks[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, 51 (8):1220-1230.)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for acceptance of construction quality of steel structures: GB 50205—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020.)
- [11] 安振武.对接焊缝错位应力集中系数研究[D].大连:大连理工大学,2010.
(An Zhen-wu. Research on stress concentration factor due to misalignment at butt welds [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.)
- [12] 齐赵敏.海工钢管构件对接焊缝应力集中系数分析[D].重庆:重庆交通大学,2013.
(Qi Zhao-min. Study on stress concentration factors at splice welds of marine steel tubular piles [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.)
- [13] 苏庆田,沈翀.错位缺陷对钢桥中厚板斜十字接头静力性能影响研究[J].桥梁建设,2023,53(5):17-23.
(Su Qing-tian, Shen Chong. Research on the influence of staggering defects on static performance of thick plate skew cross joints of in steel bridge [J]. *Bridge Construction*, 2023, 53(5):17-23.)
- [14] 赵秋,黄冠铭,王苹,等.基于结构应力法的焊缝错边疲劳性能分析[J].铁道建筑,2021,61(5):22-27.
(Zhao Qiu, Huang Guan-ming, Wang Ping, et al. Analysis on the fatigue performance of welding seam misalignment based on structural stress method [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(5):22-27.)
- [15] 赵伟,郑剑涵.错边缺陷对钢桥焊接接头应力集中和疲劳性能影响的研究[J].钢结构(中英文),2015,30(2):57-60.
(Zhao Wei, Zheng Jian-han. Study of effects of unfit defect on stress concentration and fatigue performance in welded joints of steel bridge [J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2015, 30(2):57-60.)
- [16] 廖平,张秀成,朱海峰,等.钢桥十字形焊接细节应力强度因子的参数敏感性研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):929-935.
(Liao Ping, Zhang Xiu-cheng, Zhu Hai-feng, et al. Parameter sensitivity study on stress intensity factors of cruciform weld details in steel bridges [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(6):929-935.)
- [17] Werner B, Heyer H, Sander M. Experimental and numerical investigation of fracture in fillet welds by cross joint specimens [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 2: 2054-2067.
- [18] 朱虹,刘子卿,董志强,等.基于铁基形状记忆合金的新型预应力技术及其工程应用[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(2):402-416.
(Zhu Hong, Liu Zi-qing, Dong Zhi-qiang, et al. New prestressing technology based on iron-based shape memory alloys and its application in engineering [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52 (2):402-416.)
- [19] 朱广山,朱浮声,盛国华.预应力CFRP与钢板复合加固T梁抗弯性能试验[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(4):594-598.
(Zhu Guang-shan, Zhu Fu-sheng, Sheng Guo-hua. Experimental research on flexural behavior of T-beams strengthened with combination of prestressed CFRP and steel plate [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(4):594-598.)
- [20] 陈卓昇,曾剑波,彭岚,等.考虑缺陷位置和CFRP粘贴方式的钢板疲劳性能[J].中国公路学报,2022,35(2):212-222.
(Chen Zhuo-yi, Zeng Jian-bo, Peng Lan, et al. Study on fatigue performance of steel plate considering defect location and CFRP bonding method [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(2):212-222.)
- [21] 陈涛,夏紫璨,李凌圳,等.单面碳纤维增强复合材料补强含斜裂纹钢板疲劳寿命研究[J].钢结构(中英文),2018,33(12):52-55.
(Chen Tao, Xia Zi-can, Li Ling-zhen, et al. Research on the fatigue life of steel plates with inclined cracks repaired with single-sided CFRP [J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2018, 33(12):52-55.)
- [22] 宋力,李林果,樊成.二次受力下粘贴钢板加固RC梁抗弯性能分析[J].沈阳工业大学学报,2021,43(4):470-475.
(Song Li, Li Lin-guo, Fan Cheng. Analysis on bending resistance of RC beams reinforced with steel bonding plates under secondary stress [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2021, 43(4):470-475.)
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.钢结构加固设计标准:GB 51367—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of strengthening steel structure: GB 51367—2019 [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2020.)