

大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构的发展与应用

熊刚 丁雪松 谢斌

(天津市市政工程设计研究院 天津 300051)

摘要:拉索锚固区是斜拉桥控制设计的关键部位,国内外许多大跨度斜拉桥均对锚固区开展了专门的分析研究。结合工程实例,介绍了大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构的常见连接型式—锚箱式、销铰式、锚拉板式和锚管式。概述了不同连接型式的构造特点及有限元计算、静载试验和疲劳试验方法。分析了四种锚固结构的传力机理和应力集中现象,提出了合理传递索力和减小应力集中现象的构造措施,明确了设计中应注意的问题。

关键词:钢箱梁斜拉桥 索梁锚固 FEA 试验研究 传力机理 应力集中 构造措施

1 引言

随着正交异性板流线型扁平钢箱梁技术的成熟和设计理论与计算方法的提高,钢箱梁斜拉桥以其独特的竞争力和适应能力在大跨径桥梁中得到广泛应用。世界上绝大多数大跨度斜拉桥均为钢箱梁或钢混结合梁结构。其索梁锚固区是斜拉索与主梁之间传递索力的重要结构,刚度变化大、局部应力大、传力复杂,是斜拉桥控制设计的关键部位。

大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构主要有锚箱式、销铰式、锚管式和锚拉板式等四种连接型式。范立础等人研究了锚箱式结构的承压板与锚垫板的传力方式和模拟方法。日本远腾武夫等人研究了多多罗大桥的梁式锚箱和柱式锚箱。强士中、李乔和陈开利等人研究了南京长江二桥、苏通长江大桥和安庆长江大桥的钢锚箱结构。卫星等人结合深圳湾公路大桥、朱劲松等人结合杭州湾跨海大桥、苏善根等人结合桃夭门大桥研究了销铰式结构。李小珍和任伟平等人通过模型试验,研究了湛江海湾大桥的锚拉板式结构。王嘉弟和赵廷衡等人研究了汕头岩石大桥的锚管式结构。表1列出了四种连接型式在国内外的应用情况。对斜拉桥索梁锚固区开展的专门研究,十分清楚地揭示了四种锚固型式的构造特点和传力机理。本文将对此做归纳总结,为设计工作提供借鉴和参考。

表1 四种连接型式的应用情况

桥名	跨径/m	型式
南京长江二桥	628	锚箱式
南京长江三桥	648	锚箱式
苏通长江大桥	1088	锚箱式
安庆长江大桥	510	锚箱式
多多罗大桥	890	锚箱式
哈尔滨松花江大桥	326	锚箱式
诺曼底大桥	865	销铰式
舟山桃夭门大桥	580	销铰式
深圳湾公路大桥	180	销铰式
杭州湾跨海大桥	448	销铰式
青州闽江大桥	605	锚拉板式
湛江海湾大桥	480	锚拉板式
灌河大桥	340	锚拉板式
汕头岩石大桥	518	锚管式
天津海河大桥	310	锚管式

2 索梁锚固基本构造

2.1 锚箱式连接

锚箱式连接是在钢箱梁主梁腹板外悬挂钢锚箱的一种锚固方式,结构主要由锚垫板、承压板、锚固板和加劲板等板件组成。钢锚箱通过承压板及锚固板与腹板之间的焊缝同主梁腹板相连接,斜拉索锚固在锚垫板上,较厚的锚垫板和较

薄的承压板的组合,既避免了厚钢板的焊接问题,也解决了承压板抗弯不足的问题。斜拉索角度的不同,主要通过改变承压板和锚固板与腹板的交角来适应。柱式锚箱横向较短,斜拉索方向较长。而梁式锚箱横向较宽,斜拉索方向较短。钢锚箱在国内应用较多,且主要采用柱式锚箱,如图1示。

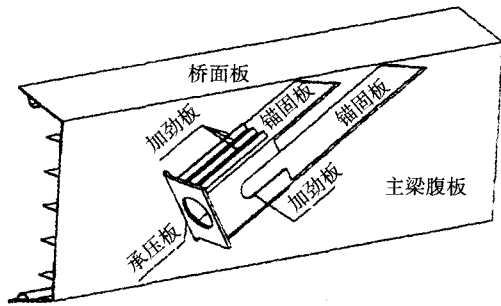


图1 南京长江二桥柱式锚箱

2.2 销铰式连接

销铰式连接也称耳板式连接,是借鉴悬索桥吊索连接方式发展起来的一种索梁锚固型式。结构由耳板、销铰连接件、夹板及高强螺栓等组成。拉索通过铰或钢管锚固在耳板上。或将主梁的腹板在锚固位置局部加厚并向上延伸,如诺曼底大桥。或通过高强螺栓在锚固位置将耳板与腹板相连,如桃天门大桥。此种锚固结构对耳板的强度要求高,多采用高强度中等厚度的钢板。

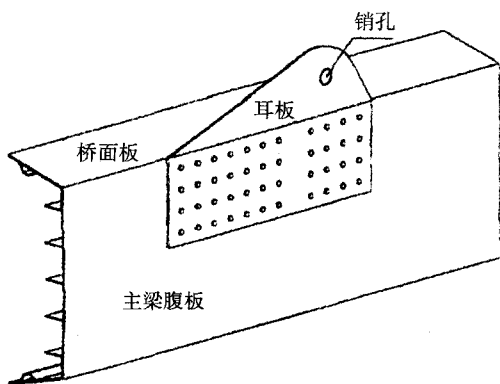


图2 销铰式锚固结构

2.3 拉板式连接

锚拉板连接是将一块厚钢板作为锚拉板,在锚拉板上部开槽,槽口内侧与锚管相焊接。斜拉索穿过锚管锚固在锚管底部的锚垫板上。结构包括锚拉板、锚垫板、锚拉管和加劲板。锚拉板底

部与主梁面板相焊接,两侧设有加劲板,以补偿开槽对锚拉板截面的削弱,并增强其横向刚度与整体性。

2.4 锚管式连接

锚管式连接是将锚管在锚固位置与腹板相焊接于一体。锚管端部设置有承压板,拉索锚固在承压板上。采用楔形承压垫板来适应斜拉索不同的横向倾角。结构对材质没有特殊的要求。

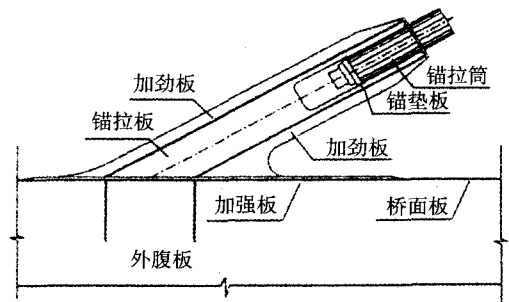


图3 湛江海湾大桥锚拉板式锚固结构

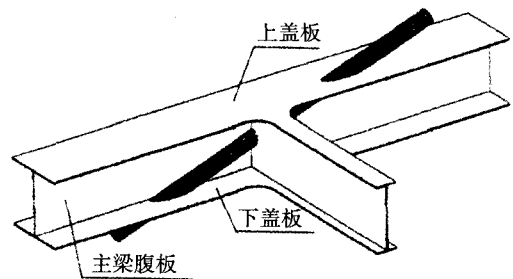


图4 岩石大桥锚管式锚固结构

3 科学研究

3.1 研究思路

索梁锚固结构的研究主要通过理论计算和模型试验重点关注索力传递机理、应力分布、应力状态和应力集中现象。试验前进行有限元分析,可掌握结构应力状态的差异。了解应力大小及分布情况,为测试元件布置提供可靠参考,增强试验的针对性。理论计算结果可指导模型试验,模型试验结果又与理论计算相互比较,相互验证。

计算和试验的模型选取主要遵照圣维南原理并适当控制模型规模,选取一定尺寸的钢箱梁节段为研究对象。为模型制作和加载方便,在不影响结构受力的前提下,往往需要对模型做局部修改。数值计算和模型试验均应以最大设计索力来加载。

锚固区刚度变化大, 钢材处于复杂的应力状态下, 其屈服并不取决于某一个方向的应力, 而是由反映各方向应力综合影响的某个“应力函数”来确定。根据材料强度理论的研究和试验验证, 形状改变能强度理论给出的屈服条件能够较好地描述钢材的弹塑性工作状况。分析钢锚箱的 Von. Mises 等效应力特征, 可对锚固区承载能力进行评价。

3.2 理论计算

(1) 钢锚箱的锚垫板与承压板之间为不焊接的紧压密贴关系, 二者通过磨光顶紧连接。锚垫板与承压板一起参与抗弯, 同时通过与承压板之间的面面接触把作用在较小面积上的分布压力分散到较大面积上。等效板厚法和非线性接触算法是模拟这种紧压密贴关系的有效方法。

等效板厚法是将锚垫板与承压板共同的抗弯刚度等效成一块板的抗弯刚度。定义一块等效板替代锚垫板和承压板, 板厚定义原则是使单块板的抗弯刚度与两块板的抗弯刚度之和相等。对分布压力的模拟是考虑一个扩散角度, 加大加载圆环面的外径, 从而增加承载面的面积。

非线性接触计算通过定义接触对来模拟承压板与锚垫板的紧压密贴关系。接触对由目标单元和接触单元组成, 二者通过共享的实常数联系起来。

等效板厚法的优点是建模简单, 计算速度快。缺点是因连接刚度的增大, 使计算结果局部偏于不安全。非线性接触方法的优点是可以准确反映钢锚箱各板件的几何关系和受力模式, 缺点是计算复杂, 耗费资源多。分析结果表明, 除垫板和承压板的局部区域外, 两种方法计算结果接近。等效板厚法可用于设计时选型、初算。而非线性接触方法可用于最终计算及指导模型试验。

(2) 销铰式连接的销轴对孔壁周围产生巨大的局部压力, 应考虑接触非线性。杭州湾跨海大桥采用 ANSYS 软件分析了销铰式结构。钢箱梁各板件采用壳单元模拟, 耳板、夹板和销栓用二次四面体单元模拟。高强螺栓预紧力以等效集中力来施加。将耳板孔表面定义为接触面。销栓表面定义为目标面, 通过建立接触对模拟销栓和耳

板的接触关系, 有利于准确掌握该位置的应力集中现象。

3.3 试验研究

(1) 南京长江二桥、苏通长江大桥和安庆长江大桥的钢锚箱试验均采用 1:1 足尺试验模型。南京长江二桥的钢锚箱模型试验为了加载方便, 将锚箱模型竖起, 下端焊接在固定支座上。在模型旁边同一支座上焊接上千斤顶反力支座, 用以架设千斤顶施加对锚箱的推力来模拟斜拉索索力。模型的上方水平焊接一块盖板, 在盖板上方与模型横截面重心对应的位置设置千斤顶, 用以施加轴向压力。疲劳试验重点观测了静载试验和理论分析认为应力较大以及应力集中较明显的区域。

(2) 杭州湾跨海大桥销铰式锚固结构的静载试验研究采用 1:3 缩尺试验模型。模型耳板采用进口高强度结构钢, 其余板件为 Q345D 钢材。钢箱节段的自由端通过螺栓铰接于加载架上, 并利用千斤顶控制边纵腹板承担斜拉索垂直分力的比例。铰接螺栓和另一组千斤顶一起约束钢箱梁节段模型自由端的竖向位移, 并防止扭转发生。横隔板承担的索力竖向分力通过侧面的千斤顶来提供反力。箱梁节段焊接钢板与反力墙通过螺栓连接。

(3) 湛江海湾大桥锚拉板结构的试验研究采用 1:1 足尺试验模型, 主梁结构选用 10m 的长度。试验设计了 4.5 m 长的加载横梁, 模拟实际结构中横梁端剪力。制作 L 形加力架来模拟索塔, 该加力塔采用箱型钢结构构件。疲劳主要关注锚拉筒与锚拉板连接角焊缝下端: 锚拉板与桥面板之间的双面开坡口熔透角焊缝两端圆弧过渡部位。

(4) 汕头岩石大桥锚管结构的试验研究对试件做了局部修改, 模型为 1:2 试件。箱梁斜腹板改换成直腹板。斜底板改换成水平盖板, 得到工字型结构。在锚管轴线与工字型纵梁中性轴的交点处外伸出工字型横梁, 模拟桥梁的横隔板和桥面系的横向约束。试验分两个荷载工况进行, 工况 I 为锚管受力最不利工况, 工况 II 为腹板受力最不利工况。

4 传力机理及构造措施

4.1 锚箱式

根据多多罗大桥的研究,索力由钢锚箱以剪力和弯矩的形式传递到主梁的腹板和顶板上。柱式锚箱至主梁腹板的偏心率较小,与主梁腹板的连接较长,剪力占支配地位。而梁式锚箱偏心率较大。弯矩占主要地位。柱式锚箱的最大应力发生在腹板位于承压板外侧的区域上。主梁腹板加劲肋板为充分受力构件,对抵抗腹板由于偏心索力产生的面外变形起重要作用。

4.2 销铰式

螺栓连接式是将索力通过销子以压应力的形式传递给耳板,由高强螺栓以摩擦力的形式直接传递到主梁的腹板。腹板延伸式是将索力直接传递到腹板。由于销轴对孔壁的挤压,在孔壁形成了巨大的局部压力,是结构的薄弱点,设计中应引起高度重视。可采取以下措施改善受力状况:耳板采用高强钢材;加大耳板厚度或销轴直径,以加大承压面积;在销轴外加一层软套等。

4.3 锚拉板式

湛江海湾大桥锚拉板结构的研究表明,锚拉板与锚拉筒的侧焊缝以及锚拉板与主梁顶板的连接焊缝容易出现应力集中。锚拉板与锚拉筒的连接焊缝应力集中较为严重,特别是在焊缝根部圆弧过渡区,初始屈服荷载较低。与锚拉板底部焊接的桥面加强板在板厚方向承受较大的拉应力。加大锚拉板与锚拉筒连接焊缝根部的圆弧半径,可以有效改善锚拉板的应力分布。索梁锚固位置区域的主梁顶板需加厚,且主梁腹板增设加劲板。

4.4 锚管式

汕头岩石大桥锚管结构试验研究表明。索力通过钢管与腹板之间的焊缝传递给主梁。索力的水平分力通过锚管、上下盖板和主梁腹板均匀地扩散传递。主梁腹板和锚管所承受的压应力较大。构造上应增加拉索吊点附近区域腹板和锚管的厚度。斜拉索作用端锚管应力较大,并沿锚管轴向逐渐变小。

5 结论与建议

(1) 结合工程实例,总结了钢箱梁斜拉桥索梁锚固区四种常见连接型式的应用情况、构造特点、研究方法、传力机理、应力分布和应力集

中现象。

(2) 四种连接型式在国内均有应用,且进行过专门的理论分析和试验研究。设计可以充分参考和借鉴已有研究成果,以提高设计效率。

(3) 四种结构均出现应力集中现象,但发生位置不尽相同。应充分考虑出现应力集中板件或区域的受力特性,采取必要的局部补强措施。

(4) 四种锚固型式构造特点和受力特性虽然各有千秋,但均适用于钢箱梁或钢混结合梁斜拉桥。选用时应根据工程需要和桥梁特点,综合考虑结构安全、经济可行和满足整体景观要求等具体建设条件进行比较分析和论证而定。不论选用哪种锚固型式,均应进行专门分析验算。必要时可在理论分析的基础上开展试验研究以确保结构安全。

参考文献

- [1] 李小珍,蔡靖,强士中.大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构型式的比较[J].工程力学.2004,21(6):84—90.
- [2] 颜海,范立础.大跨度斜拉桥索梁锚固中的非线性接触问题[J].中国公路学报.2004,17(2):46—49.
- [3] 陈开利译.大跨度斜拉桥拉索锚固结构的疲劳试验研究[J].世界桥梁.2004,1:29—37.
- [4] 满洪高,李乔,唐亮.钢斜拉桥锚固区合理构造型式研究[J].中国铁道科学.2005,26(4):23—27.
- [5] 卫星,强士中.斜拉桥耳板式索梁锚固结构的空分分析[J].中国铁道科学.2005,25(4):67—71.
- [6] 朱劲松,肖汝城,曹一山.杭州湾跨海大桥索梁锚固节点模型试验研究[J].土木工程学报.2007,40(1):49—53.
- [7] 苏善根,许宏亮.斜拉桥销铰连接锚固形式的初探[J].中国铁道科学.2003,24(1):94—98.
- [8] 任伟平,强士中,李小珍等.斜拉桥锚拉板式索梁锚固结构传力机理及疲劳可靠性研究[J].土木工程学报.2006,39(10):68—73.
- [9] 卫星,李小珍,李俊等.钢箱梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固结构的试验研究[J].工程力学.2007,24(4):135—141.
- [10] 王嘉弟,赵廷衡.斜拉桥钢箱梁索梁锚固区应力应变分析[J].桥梁建设.1997,4:20—25.
- [11] 狄谨,周绪红,游金兰等.钢箱梁斜拉桥索塔锚固区的受力性能[J].中国公路学报.2007,20(4):48—52.
- [12] 周绪红,吕忠达,狄谨等.钢箱梁斜拉桥索梁锚固区极限承载力分析[J].长安大学学报.2007,27(3):47—51.
- [13] 万臻,李乔.大跨度斜拉桥拉索锚固区三维有限元仿真分析[J].中国铁道科学.2006,27(2):41—45.
- [14] 高剑,裴岷山.大跨度斜拉桥锚箱空间受力分析[J].建筑科学与工程学报.2006,23(3):66—70.
- [15] 包立新,卫星,李俊等.钢箱梁斜拉桥索梁锚固区的抗疲劳性能试验研究[J].工程力学.2007,24(8):127—132.