

斜拉桥索梁锚固体体系研究现状

张 驰

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年7月22日; 录用日期: 2024年8月13日; 发布日期: 2024年8月23日

摘 要

随着斜拉桥的跨度增大, 索力也有明显增涨, 而锚固体体系是索力传递的关键部位。文章首先介绍了目前常用的索梁锚固形式及其传力路径, 总结其在设计时应注意的问题。其次, 归纳了斜拉桥索梁锚固区目前的研究现状, 包括静力分析、疲劳性能、受力行为、设计优化等方面, 为需要了解索梁锚固区的学者提供了便利。最后对文章进行总结, 提出结合人工智能对关键参数进行优化的方案。

关键词

斜拉桥, 斜拉桥, 索梁锚固区, 钢锚箱

Current Research Status of Cable Beam Anchorage System for Cable-Stayed Bridges

Chi Zhang

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Jul. 22nd, 2024; accepted: Aug. 13th, 2024; published: Aug. 23rd, 2024

Abstract

As the span of the cable-stayed bridge increases, the cable force also increases significantly, and the anchoring system is a key part of cable force transmission. This article first introduces the commonly used cable beam anchoring forms and their force transmission paths and summarizes the issues that should be noted in design. Secondly, the current research status of cable beam anchorage zones in cable-stayed bridges was summarized, including static analysis, fatigue performance, stress behavior, design optimization, etc., providing convenience for scholars who need to understand cable beam anchorage zones. Finally, summarize the article and propose a solution that combines artificial intelligence to optimize key parameters.

Keywords

Cable-Stayed Bridge, Cable Beam Anchorage Zone, Steel Anchor Box

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

斜拉桥又名斜张桥,是由承压的塔、墩台和基础,受拉的索和承弯的梁体组合起来的一种结构体系。随着社会经济的高速发展,大跨度桥梁越来越受欢迎。但是随着桥梁跨度和宽度的增大,拉索的索力也在不断增加。例如,苏通大桥[1]最大设计索力达到 8100 KN,上海长江大桥[2]最大设计索力更是高达 11,270 KN。在巨大索力作用下,如何保证索力的顺畅传递成为斜拉桥设计的关键问题之一。拉索锚固区是将主梁自重,车辆、温度等荷载以集中力的形式,安全、均匀地传递到主塔上。由于锚固区承受了较大的集中力,使得锚固区具有比较复杂的构造形式和受力状态,这成为控制设计中非常关键的部分,因此,锚固区结构是否安全可靠,将直接影响到整个斜拉桥的安全性能。

2. 斜拉桥索梁锚固结构形式

斜拉桥索梁锚固区是将索力安全、均匀地传递到塔柱的重要构造[3],此部位的受力复杂,在设计中非常值得关注。现如今国内外常采用的锚固结构形式有[4]:① 锚拉板式;② 钢锚箱式;③ 耳板式;④ 锚管式;以下是各个结构形式的结构组成和传力路径。

2.1. 锚拉板式锚固结构

锚拉板式锚固结构是将钢板作为锚拉板,锚拉板由上中下三部分组成。锚拉板上部又开槽,槽口内侧与钢管外侧焊接。斜拉索穿过锚管并用锚具锚固在锚管底部。锚拉板下部直接用焊缝与主梁顶板。由于锚拉板中间有开槽,因此在锚拉板的两侧焊接加劲板来增强其横向刚度,并提高锚固体系的整体性。

此结构的传力路径是:斜拉索先将巨大的索力传递到锚垫板和锚拉管,再通过锚拉管和拉板之间的焊缝传递到拉板和拉板加劲肋,最后通过锚拉板和主梁顶板的焊缝传递到主梁整个截面[5]。因此,锚拉板与锚拉筒连接焊缝处应力集中现象严重且受力状态复杂,其主要承受纵向拉力、横向拉力以及纵向剪应力,在设计初期应重点关注。该结构对结构材质没有特殊的要求,一般桥梁用钢即可满足,这降低了材料成本,提高了经济效益。锚拉板式锚固结构构造简单,便于安装和日常检修,这对于需要快速施工或频繁维护的桥梁项目来说是一个重要的优势。锚拉板安装在现场进行,主纵梁定位后,通过三维坐标定位的方式精确安装锚拉板。这种现场组焊的方式可以根据实际情况进行灵活调整,具有较高的施工便捷性和准确性。采用这种锚固结构形式的桥梁有广东湛江海湾大桥、重庆江津观音岩长江大桥、重庆丰都长江二桥等[6]。最新建成的世界最宽全漂浮体系的沱江大桥也是这种结构形式。

2.2. 钢锚箱式锚固结构

钢锚箱通常由锚垫板、承压板、支承板、钢锚箱顶板以及底板、加劲板和加劲肋组成。钢锚箱与主梁腹板通过焊缝连接,所以索力通常以剪力的形式进行传递。钢锚箱通常包含两种连接方式:一种是将斜拉索锚固在锚固梁上,其中锚固梁通过焊接或高强螺栓固定在主梁腹板上;另一种是将主梁外伸牛腿

作为锚固梁。锚固梁通常需要对其受力强度及刚度进行补强，所以锚固梁常常被设置为箱型结构，以承受巨大的设计索力。传力途径为：由斜拉索将索力传递至钢锚箱锚垫板，再传递至钢锚箱承压板，再由承压板传递至钢锚箱支承板，最后传递至主梁腹板。钢锚箱式索梁锚固的最大应力出现在钢锚箱底板外侧和腹板接触的区域[7]。钢锚箱式锚固结构适用于斜拉索倾角变化较大的桥梁，当桥梁需要采用内置阻尼器进行斜拉索减振时，锚箱式锚固结构因其能够牢固连接阻尼器而具有优势。日本著名的多多罗大桥采用了此结构形式，将斜拉索锚固在钢锚箱中，确保了桥梁的承载能力和稳定性。

2.3. 耳板式锚固结构

耳板式锚固结构主要由斜拉索锚头、销铰连接件、锚固耳板及补强板组成。此结构由主梁腹板上伸出一块耳板构成，斜拉索通过铰或钢管锚固在耳板上，索力直接由耳板传给主梁腹板。

其索力传递明确，传力途径为：由斜拉索将索力传递至销铰连接件，再传递至锚固耳板，最后传递至腹板。但是在耳板上部存在严重的应力集中现象，因此在设计时应重点考虑。耳板式锚固结构构造简单，施工便捷多用于对工期有严格要求的斜拉桥中。在拱桥中，如果吊杆与拱肋的锚固形式需要简化施工并提高锚固效率，也可以考虑采用耳板式锚固结构。桃天门大桥的索梁锚固结构选用了耳板式锚固结构，这也是国内首次采用耳板式锚固结构的钢箱梁斜拉桥。桃天门大桥的成功实践证明了耳板式锚固结构在桥梁工程中的可行性和优越性。销轴是连接斜拉索和耳板的关键部件，其直径、长度和材料选择需要满足强度和刚度要求。同时，销轴与耳板之间的配合间隙应控制在合理范围内，以避免应力集中和擦伤疲劳。

2.4. 锚管式锚固结构

锚管式锚固结构是在箱梁的腹板上按斜拉索方向焊接锚管，斜拉索将这根钢管引入并用锚头进行锚固。锚管式锚固结构主要是由锚管、上盖板、下盖板、加劲板及加劲肋构成。

传力路径为：索力通过锚管与腹板之间的焊缝，直接传递至主梁腹板，并在腹板迅速扩散，传力顺畅简单，且没有偏心距，所以没有面外弯矩，但在梁腹板与锚管接触处存在应力集中的现象，是结构设计的关键点。锚管式锚固结构属于内置式结构，当桥梁主梁或纵梁腹板空间受限，无法安装大型锚固结构时，锚管式锚固结构因其结构紧凑而得到应用。该结构通过锚管和锚头将斜拉索拉力直接转换为剪力传递到主梁或纵梁腹板上，适用于需要高效传力的场合。黄舣长江特大桥采用了锚管式索梁锚固结构，即将锚管直接嵌入腹板焊接锚管的下端，焊接锚垫板，斜拉索穿过锚管并通过锚具锚固在锚管的下端。锚管式索梁锚固结构的核心是将锚管直接嵌入腹板并进行焊接。这一步骤需要确保焊接质量，以防止在巨大索力作用下出现焊缝开裂。

3. 索梁锚固区研究现状

斜拉桥的斜拉索与主梁连接的锚固区受力集中、结构复杂，因此其安全可靠将直接影响到桥梁的整体安全性[8][9]。大跨度斜拉桥在设计时，往往要对索梁锚固结构进行专门的研究，学者们通过节段模型静载试验来得到索梁锚固结构在巨大索力作用下的应力分布，传力路径及扩散规律。同时进行节段模型有限元分析[10]对加载实测结果进行验证。两者的结果往往被结合起来综合评判索梁锚固结构的受力性能[11]-[13]。

3.1. 索梁锚固结构静力试验研究

目前，国内外索梁锚固结构的静载试验一般是预制所研究节段的 1:1 或 1:2 的模型，按照最大设计索力或最大设计索力的四分之一加载，在关心部位布置应变片，通过实测结果来评价索梁锚固结构的受力

特性[14]。为了得到索梁锚固结构的承载安全性能,很多研究者还进行了1.7倍最大设计索力的静力加载试验。

马雅林[15]等在成昆铁路矮塔斜拉桥索梁锚固区模型试验研究中,建立了与原桥尺寸1:2的模型进行试验。在100%设计索力作用下,锚固块倒角处拉应变最大,且应变增幅基本上线性增加,卸载后同样呈线性减小,在200%设计索力作用下仍满足,未发生破坏。但在加载过程中,锚固块前端倒角位置开始出现的细小裂纹,并随着荷载的增加不断慢慢开展,另一侧开始出现两条细小斜裂缝,卸载后裂缝随之减小。

刘庆宽等在文献[14]中对原始模型进行简化,用两个千斤顶的合力来模拟拉索的作用。利用有限元计算软件ALGOR对试验模型进行分析。准确地反映索力作用下锚箱各板件的应力大小和分布大体反映了腹板上应力分布状态。在斜拉桥耳板索梁锚固结构受力特性研究[16]中,通过解析方法对南京二桥索梁锚固处的接触应力进行了理论计算,并通过对耳板式锚固结构进行1:2缩尺试验,分析得出耳板压应力的分布规律和耳板应力随荷载增加的变化情况。

段乃民和曹映泓[17]在湛江海湾大桥索梁锚固结构的静载试验研究中,通过对湛江海湾大桥锚拉板式索梁锚固结构进行足尺模型静力试验研究,得到静力荷载作用下锚拉板式索梁锚固结构各板件应力、应变分布情况。通过模型试验验证了设计的正确性及制造工艺的可行性,结合理论分析和模型试验,对其承载能力做出了评价,并对锚拉板的设计提出了建议。

张振[18]在大跨度公铁平层斜拉桥索梁锚固区结构行为和模型试验研究中,对索梁锚固结构进行缩尺试验,分析索力荷载下锚固构造相关板件复杂应力状态。由试验结果得出,锚腹板结构内部索力自承压板斜向下方扩散传。

张清华,李乔[19]超大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构试验研究中制定四种试验方案,最后结果表明锚箱结构各主要受力构件的传力特征存在较大差别。各传力构件均存在不同程度的应力集中,其中腹板、锚箱底板和锚箱顶板的应力集中问题较为突出。

3.2. 索梁锚固结构有限元分析

随着计算机技术的飞速发展,有限元分析的计算能力和精度不断提高,使得其在实际工程中的应用越来越广泛。学者们通过不断优化模型参数、改进算法,使得有限元分析的结果更加贴近实际情况。有限元分析具有周期性短、成本低、能够模拟复杂的结构和边界条件、计算精度高、结果直观易懂等优点。

陈彦江[20]在斜拉桥锚拉板式索梁锚固区尺寸参数灵敏度分析中,通过对锚拉板式锚固结构进行试验加有限元分析得到,此结构最大应力一般出现在锚管与锚拉板连接焊缝处或者圆弧倒角处,灵敏度分析得到锚拉板的厚度、锚管半径和焊缝长度对结构最大应力的敏感性较大。通过改进的EGO算法对结构进行了尺寸优化。

郭云杰[21]等在大跨径斜拉桥索梁锚固区钢锚箱受力性能及局部优化研究中,通过延伸抗剪板的长度进行局部设计优化,使主要构件的应力大幅度降低。

卫星[22]等在斜拉桥锚拉板易损细节设计优化中,针对锚拉板锚固结构在恒载作用下易发生塑性破坏,在反复荷载下容易产生疲劳破坏的劣势,通过有限元分析的方式对圆形过渡区半径、锚拉板厚度、锚垫板厚度和锚筒厚度进行设计参数优化来改善其受力性能,并通过提取热点应力计算优化后的疲劳寿命来检验优化效果。

王江浩[23]在大跨度斜拉桥索梁锚箱结构受力优化分析中,通过局部增加索梁锚箱区域主梁腹板加劲肋的数量,减小了索梁锚箱顶、底板的应力水平,改善了索梁锚箱结构的受力,增大了结构的安全储备,为同类桥梁结构受力优化设计提供了有益参考。

熊华涛[24]在大跨径斜拉桥索梁锚固区力学特征分析及优化中,对钢锚箱整体及各板件进行了详细受力分析,并基于自适应遗传算法,对钢锚箱板件厚度进行了优化。优化后各板板件沿斜拉索索力方向应力和等效峰值应力降幅较为明显,同时应力集中现象得到缓解。

4. 结论及展望

本文总结了索梁锚固区目前的研究现状,并介绍了索梁锚固区常用的锚固形式包括:锚拉板式、钢锚箱式、锚管式、耳板式四种形式及其优缺点和传力路径。学者们通过理论计算、有限元分析、模型试验等方法,对索梁锚固区的受力性能、破坏机理、优化措施等进行了深入探讨。总结各位学者的研究,发现索梁锚固区存在明显的应力集中现象,特别是在锚垫板与承压板焊接区域以及加劲板边角处。这些区域是结构应力集中的关键部位,需要特别关注并采取有效的加固措施。

采用模型试验研究索梁锚固区时,需要根据研究目的和试验条件,确定模型的比例尺,选择合理的加载方案。进行有限元分析中,若研究疲劳损伤,可以利用疲劳分析软件如 ANSYS 或 FE-SAFE 对索梁锚固区进行疲劳可靠性研究,模拟不同疲劳载荷下的应力循环过程,预测疲劳寿命和损伤位置。进行受力特性的研究时,主要采用有限元分析方法,通过构建索梁锚固区的三维有限元模型,模拟不同工况下的受力状态,分析应力分布和传递路径。针对索梁锚固区可能出现的损伤和病害问题,需要采取一系列加固与维护措施。例如,增加锚固端刚度、设置加劲斜杆、优化钢筋布置等以增强锚固区的抗裂性能;定期检查和维修锚固区域的结构件以确保其处于良好状态;在发现病害问题后及时采取措施进行修复和加固等。

桥梁工程技术的持续进步和斜拉桥结构的广泛应用,索梁锚固区作为桥梁结构中的关键组成部分,其研究也面临着新的挑战 and 机遇。随着计算机技术和人工智能技术的飞速发展,桥梁工程也应融合智能技术做到与时俱进。在索梁锚固区设计优化阶段中,利用神经网络模型对关键设计参数进行设计优化具有可行性。主要步骤是先建立样本库,对代理模型进行训练,最后预测最优方案。应用遗传算法、粒子群优化等智能优化算法,可以在设计空间内自动搜索最优解或近似最优解,从而实现对索梁锚固区设计的优化,这些算法能够处理复杂的非线性问题,能够全面考虑多个设计目标和约束条件,得到更加合理和经济的设计方案。索梁锚固区设计优化结合人工智能是一个具有广阔前景的研究领域,通过充分利用人工智能技术的优势,可以为桥梁工程的安全性和可靠性提供有力保障。

参考文献

- [1] 郑万山,唐光武,郑罡,张又进. 苏通大桥斜拉索拉弯疲劳试验研究[J]. 公路交通技术, 2010, 26(4): 73-76.
- [2] 苏庆田,吴冲,何武超. 上海长江大桥索梁锚固区疲劳试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 179-184.
- [3] 周绪红,吕忠达,狄谨. 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(自然科学版), 2007, 27(3): 47-51.
- [4] 李小珍,蔡婧,强士中. 大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构型式的比较研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 73-79.
- [5] 袁毅,王碧波,易伦雄. 丰都长江二桥斜拉桥索梁锚固结构设计[J]. 钢结构, 2017, 32(2): 79-83.
- [6] 陈涛. 大跨度铁路斜拉桥锚拉板受力特性及疲劳试验模型方案研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [7] 赵雨佳. 临港公铁两用斜拉桥索梁锚固区静力试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [8] 潘萍,伍贤智,袁建新. 锚拉板式索梁锚固结构构造参数分析[J]. 交通科技, 2012(3): 19-22.
- [9] 王勇,金卫兵,徐立功. 灌河斜拉桥锚拉板结构分析[J]. 现代交通技术, 2004(1): 33-35.
- [10] 王新敏. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [11] 魏顺波,潘凡. 武汉九龙大桥桥塔拉索锚箱局部应力分析[J]. 城市道桥与防洪, 2021(11): 75-78.

-
- [12] 王少怀. 斜拉桥耳板式索梁锚固区受力分析及安全性评价[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [13] 王少怀, 向中富, 谢秉敏, 赵军. 斜拉桥耳板式索梁锚固区应力分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 751-754.
- [14] 刘庆宽, 王新敏, 强士中. 南京长江二桥南汊桥索梁锚固足尺模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 50-54.
- [15] 马雅林, 任万敏, 朱敏, 孙帆, 李长年. 成昆铁路矮塔斜拉桥索梁锚固区模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 83-86.
- [16] 刘庆宽, 强士中, 张强. 拉桥耳板式索梁锚固结构受力特性研究[J]. 中国公路学报, 2022, 15(1): 72-74.
- [17] 段乃民, 曹映泓. 湛江海湾大桥索梁锚固结构的静载试验研究[J]. 中外公路, 2006, 26(5): 85-89.
- [18] 张振. 大跨度公铁平层斜拉桥索梁锚固区结构行为和模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [19] 张清华, 李乔. 超大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 71-80.
- [20] 陈彦江, 黎兵兵, 许维炳, 辛光涛, 崔涛. 斜拉桥锚拉板式索梁锚固区尺寸参数灵敏度分析[J]. 结构工程师, 2020, 36(1): 40-46.
- [21] 郭云杰, 刘俊乐, 陈云锋, 李亮亮, 张显跃. 大跨径斜拉桥索梁锚固区钢锚箱受力性能及局部优化研究[J]. 建筑技术, 2024, 55(1): 47-49.
- [22] 卫星, 吕明达, 戴晓春, 赵骏铭, 张靖. 斜拉桥锚拉板易损细节设计优化[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 84-90.
- [23] 王江浩, 徐德志, 张杰, 谭巨良, 邵加楠. 大跨度斜拉桥索梁锚箱结构受力优化分析[J]. 市政技术, 2023, 41(4): 27-31.
- [24] 熊华涛. 大跨径斜拉桥索梁锚固区力学特征分析及优化[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 145-148.