

大跨度桥梁设计要点以及优化措施研究

兰飞

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430070

[摘要]大跨度桥梁是当代交通运输重要工程结构的代表,在桥梁建设中的结构设计水平决定了整个项目的质量和效益。文章总结归纳了大跨度桥梁的结构形式特点以及设计过程中需要把握的重点技术问题,针对非线性计算分析、施工控制等方面的关键技术难题,提出了包括主梁截面优化、索力分布优化、主塔结构优化以及施工工艺优化在内的全方位优化方案;研究结果表明:抗风及抗震能力是影响大跨桥梁安全性的决定因素之一,在项目过程中的应力控制是保证设计意图的重要手段,而采用多目标函数法可以在安全保障、经济节约、耐久性能之间取得良好的协调,文章的研究成果可以作为相同类型桥梁结构设计及优化的借鉴。

[关键词]大跨度桥梁;设计要点;抗风稳定性;施工控制

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19641

中图分类号: U443.35

文献标识码: A

Research on Key Design Points and Optimization Measures for Large Span Bridges

LAN Fei

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430070, China

Abstract: Large span bridges are representative of important engineering structures in contemporary transportation, and the level of structural design in bridge construction determines the quality and efficiency of the entire project. The article summarizes the structural characteristics of large-span bridges and the key technical issues that need to be addressed in the design process. In response to key technical challenges such as nonlinear calculation analysis and construction control, a comprehensive optimization plan is proposed, including optimization of main beam section, cable force distribution, main tower structure, and construction technology; The research results indicate that wind resistance and seismic resistance are one of the determining factors affecting the safety of large-span bridges. Stress control during the project process is an important means to ensure the design intent. The use of multi-objective function method can achieve good coordination between safety assurance, economic savings, and durability performance. The research results of this article can serve as a reference for the design and optimization of similar bridge structures.

Keywords: large span bridges; design points; wind resistance stability; construction control

引言

伴随着交通运输网络的发展壮大以及桥梁工程建设规模的扩大,大跨径桥梁的跨越能力不断提高,悬索桥主跨突破 1000m,斜拉桥跨径也达到了千米以上水平。大跨径桥梁结构刚度增大,受风影响加剧,非线性效应明显等问题也随之而来,如何使结构达到安全可靠,经济合理并具有良好的耐久性桥梁工程技术人员所要考虑的问题。本文根据工程实际需求对大跨桥梁的设计重点与优化方案进行系统的探讨。文章首先介绍了大跨度桥梁的定义及发展状况;其次,从结构体系布置、荷载作用分析、构件构造设计、风振防振、抗推抗震等几个方面对设计的重点进行了阐述;研究了非线性分析及施工控制等关键技术难

点;给出构造及施工方面的改良建议,希望可以对类似工程设计有所借鉴作用。

1 大跨度桥梁工程概述

大跨度桥梁泛指单孔跨径大于 100m 的桥梁,主要有悬索桥、斜拉桥、拱桥以及连续刚构桥几种基本类型,而悬索桥、斜拉桥则主要是千米以上的大跨径桥梁。悬索桥包括主缆、吊杆、加劲梁以及索塔组成,主缆承受拉力并将荷载传给锚碇,跨越能力最大;斜拉桥利用斜拉索把主梁的荷载直接传给索塔,刚度较大,抗风性能好。总体来看大跨度桥梁的发展趋势向跨径更大、重量更轻、耐久性更高的方向发展。新型材料的应用如超高性能混凝土以及碳纤维复合材料的研究越来越广泛,结构健康检测技术和

智慧养护系统也越来越完善,给大跨径桥梁的发展提供了持续了技术支持。

2 大跨度桥梁设计关键点分析

2.1 结构体系选择原则

结构形式的选择是大跨度桥梁设计中最先确定的关键性问题,关系到整个工程是否可行以及经济效益问题。悬索桥适合在跨径大于 800m 的大跨领域使用,悬索桥结构特点是主缆受拉较多、加劲梁受弯较多;斜拉桥适用在 200~1000m 的跨径内,斜拉桥斜拉索中的竖向分力可以给主梁提供一定的弹性支撑作用,整体刚度较好;拱桥适用跨径 300~500m,在受压的情况下材料利用率也比较好但是对拱脚基础的要求比较高;连续刚构桥适用跨径 100~300m,整体结构好,施工方法也比较成熟,是山岭峡谷地段最常采用的形式。各类桥梁适用跨径都有交叉的部分,要根据具体情况加以权衡。对于特大桥斜拉桥来说,飘浮体系及其过渡段、支承体系及其过渡段、固结体系及其过渡段、刚构体系等有各自的适用范围。研究发现,如果把竖向弹簧设置在梁塔交接位置的支承体系可以减小梁塔过渡段内主梁的负弯矩,经过计算分析得出竖向弹簧的选择范围。另外混合梁斜拉桥采用钢箱梁加混凝土梁的设计形式,主跨用钢梁降低自重,边跨用混凝土梁作为压载,可使整座桥梁受力均匀。选取桥梁结构体系的时候,要考虑桥孔大小、设防烈度及风荷载、地基承载力等因素,既要满足结构刚度又要考虑经济合理性。

2.2 荷载作用与组合分析

大跨径桥梁的荷载有恒载、活载、风荷载、地震荷载、温度荷载等。与小跨径桥梁不同的是,大跨径桥梁的非线性效应比较明显,荷载的组合应包含几何非线性和材料非线性。恒载一般占有很大比例,主缆、吊索、主梁自身重量引起的拉应力占到 70%左右;活载主要有汽车荷载和人群荷载,在计算中按照最不利分布。风荷载以及地震荷载作为影响大跨径桥梁设计的主要可变荷载,在设计时应予以重点考虑。温度也是影响大跨径桥梁的重要因素,在升温与降温,或者温差变化的情况下都会出现主梁的纵向伸长缩短和索塔的挠曲变形情况,这种情况下会产生相当大的次内力。大跨度桥梁风荷载和地震荷载作用下的响应分析需要建立精细化的有限元模型,在研究中发现:通过对桥梁结构进行非线性时程分析,以及研究不同地震波输入的影响下,能更好地了解桥梁抵抗罕见地震的能力。对于斜拉桥和悬索桥而言,由于风荷载的影响会导致主梁、索塔截面尺寸的设计受其控制,颤振临界风速及涡激振动振幅是两个非常重要的验算项目;荷载效应组合则依照规

程来选取不同的同时出现的概率,采取安全系数法来进行验算。在承载能力极限状态及正常使用极限状态下,荷载的分项系数与组合系数大小不一样,工程师应按规范规定的要求一个项目一个项目核算清楚。

2.3 主梁、主塔与索体系设计要点

表 1 大跨度桥梁主要构件设计要点

构件	主要受力特征	常用结构形式	设计关键点
主梁	弯、剪、扭	钢箱梁、钢桁梁、组合梁	抗弯刚度、抗风稳定性、疲劳细节
主塔	压、弯	门式塔、A型塔、单柱式	塔顶位移控制、稳定性、锚固区构造
索体系	拉	平行钢丝束、钢绞线	索力分布、防腐、锚固疲劳

主梁的设计应考虑其强度、刚度以及抗风稳定,钢箱梁抗扭刚度强适合于大跨径悬索桥,钢拱桥通风率小,风阻小,适用于山区或公铁两用桥;主塔是主要抗压构件,高度及形状对整个桥的刚度有影响,A字型塔横向稳定性好,门式塔方便施工。斜拉索、主缆都是高应力的构件,它们的疲劳问题直接影响着大桥的使用寿命,必须严加把控其在锚固区的构造细节。

2.4 抗风设计与气动稳定性分析

抗风设计是大跨度桥梁的关键技术难题。随着跨径的增大,结构自振频率减小,对风载的敏感程度大大增加。颤振、驰振、涡激振动为主要的风载作用下的振动模式,而其中的颤振是风险最大的失稳方式。目前大跨度桥梁非线性颤振研究取得了重要的结果。研究发现采用发展的非线性颤振分析的方法可以研究主梁截面的非线性颤振特征、量化的竖向自由度对非线性颤振影响及各种不同模式之间的耦合作用影响规律,在一定程度上揭示了几何非线性引发超谐共振的现象,这对完善大跨桥梁的韧性抗风设计标准具有重要的理论意义。而对于大跨径悬索桥而言,加劲梁宽高比、风嘴尖锐程度及检修轨道位置都会对截面的气动导数产生影响,在这需要通过对参数进行研究来得到最佳截面形状;在工程建设中经常利用风洞试验检验气动稳定性,同时设置风嘴、导流板、稳定板等气动装置优化气动流线型。

2.5 抗震设计与结构动力响应分析

大跨桥梁抗震设计应以概念设计、计算分析、构造措施三者相统一为原则,与普通桥梁相比,大跨桥梁空间振动力学影响突出,需要考虑多点激励、行波效应以及土一结构效应。合理选择大跨公铁两用斜拉桥抗震结构形式对于保证结构具有良好的抗震性能至关重要,选择合理的抗震结构体系主要取决于主塔自身以及主塔与梁之间的连

接方式,各种不同的纵向约束方式都对应着不同的抗震效果,采用耗能阻尼约束可以有效的降低地震响应大小,耗能阻尼系数则要靠非线性时程法进行修正来取得。减隔震技术也是提高结构抗震能力的一种途径,常用装置有粘滞阻尼器、锁死装置、橡胶隔震垫等。这些装置在地震发生时耗散能量,减小结构内力响应。

3 大跨度桥梁设计中的关键技术问题

3.1 非线性结构分析问题

大跨度桥梁的非线性效应主要包括几何非线性和材料非线性两种类型。几何非线性是由缆索结构的垂度效应以及大变形产生的刚度改变造成的影响,主缆以及斜拉索在荷载的作用下会出现较大的应力刚化情况;材料非线性的产生主要是由于混凝土的徐变收缩效应,钢筋的屈服硬化效应等原因导致。非线性结构分析需要运用增量迭代法来进行求解,而有限元方法就是将杆系结构的矩阵位移法应用到连续介质上,在此之后将连续介质划分成若干单元构成的整体,再通过结构离散化、单元分析与整体分析来解决不同组合荷载对结构结点位移及内力的影响问题。对于悬索桥主缆线型的确定属于典型的大型位移非线性问题,一般先用抛物线假定,然后利用有限元逐次逼近进行调整;对于斜拉桥中主缆内力的选取也需要考虑几何非线性的影响,适合的成桥内力能使主梁弯矩比较均匀、索塔呈现受压状态等。

3.2 施工阶段受力与成桥状态控制问题

大跨桥梁工程施工的过程就是一个复杂的时间变动结构系统演变的过程,其中悬索桥的施工工序主要有:锚碇及索塔施工、猫道架设、主缆架设、索夹及吊索安装、加劲梁吊装、桥面板施工等^[1]。每一步工序其结构受力的状态都是不一样的,需要对其施工全过程进行模拟,钢桁架悬索桥成桥状态及施工阶段的研究显示恒载对于主缆、吊杆的受力起决定性的作用,主缆成桥线形、各个单元的无应力索长、吊杆无应力长度是最主要的施工控制参数,主梁吊装过程的不同吊装顺序也会造成主缆线形变化以及受力的不同,应根据计算结果来确定边吊装边部分刚接的方式。成桥状态监控的目的是保证成桥后的线型及内力满足设计标准的要求,关键监控指标为主缆线形、索塔偏位、主梁高度以及索力等。施工过程中进行的实时监测及理论计算相结合的方式形成了闭环回路,从而提高成桥质量。

4 大跨度桥梁关键构造与施工优化措施

4.1 主梁截面与索力布置优化

主梁截面优化以减轻自重、增强抗风能力、减少工程费用为出发点。对钢结构箱形梁进行优化设计的目标是:

减轻壁板厚度、调整加劲肋的位置、选取流线形断面;对于钢桁架梁而言,其主要从减少节点数目、合理配置杆件截面着手考虑^[2]。扁平流线型钢箱梁具有良好的空气动力学特性,在大跨径悬索桥以及斜拉桥的设计中得到了广泛的应用。合理的斜拉桥成桥索力配置应当满足以下条件:主梁弯矩最小、索塔弯矩相等、索力平均分布。常用的斜拉桥索力优化手段有:刚性支承连续梁法、最小弯曲能法和影响矩阵法。斜拉索的空间布置有单索面体系以及双索面体系两种,在桥面宽度较小的情形下采用单索面体系,而双索面体系具有较大的抗扭刚度,适合用于建造大型的斜拉桥,斜拉索的锚固形式是最容易产生疲劳损坏的部分,因此要保证锚固区域内应力分布均匀,无突变,以免应力过于集中。

4.2 主塔结构形式与减振抗风构造优化

主塔形式的选择影响到桥梁结构刚度以及美学效果,混凝土索塔造价低廉,刚度较大,适用于中小型桥梁,而钢索塔由于自重大,施工较慢,适用于运输条件较差的地方,其主塔截面一般选择为箱型,设置横隔板保障局部稳定性的需要。塔柱与横梁之间的连接部分应力比较复杂,需要进行精细的有限元分析^[3]。对于大跨径斜拉桥,在施工过程中,最大双悬臂状态的结构刚度最小,最容易受到风荷载导致的风致振动的影响,通过对比不同的风缆布局方式及不同临时墩布局对大桥抗风能力的影响,可以得出最理想的临时抗风措施方案。减振措施有调质阻尼器、粘滞阻尼器、电涡流阻尼器等用来减少风振及车振,气动措施要注重抗风性能与工程投资成本相结合,防止过分设计。

4.3 施工方法选择与线形控制优化

施工工艺的选择应结合桥宽、地貌、时间、造价等。悬拼法适用于大跨径斜拉桥和悬索桥加劲梁的施工,节段较轻、进度较快;缆索吊装法适用于山岭沟壑地区桥梁,不受地面运输条件影响;转体法适用于跨越现况线路的情况,可以减小对下部交通的影响。线形控制是施工控制的主要环节,在对悬索桥施工时,其主缆安装阶段的线形控制直接影响到成桥状况,必须准确算出无应力索长并且在安装的过程中进行校正,而在进行对斜拉桥施工时,索力张拉顺序及分次张拉方案都需要通过计算来确定以便使后期调整索的工作量最小化。在施工期间的线性控制方面,应该同时使用有限元模拟、现场观测及参数辨识方法来创建信息反馈体系,从而达到整个施工过程的透明化、追责化以及预警化。监测项目为:主梁高程、索塔偏差、索力大小、应力水平、温度等,在监测结果同理论分析进行比较之后,对计算模型进行参数辨识,进而引导下步工序。

5 结语

大跨径桥梁设计是一个庞大而复杂的系统工程,包含结构力学、空气动力学、地震工程以及混凝土材料等多个学科的研究。本论文从设计要点及对策进行探讨,其主要结果如下所述:抗风和抗震设计是保证大跨径桥梁安全性的重要基础,非线性计算为正确评价结构响应提供依据,施工监控是对设计目标实施的过程保障。为了改善设计方案,主梁断面最优化、索力均衡分配、塔型最佳选择、施工步骤精准化是增加总体效益的方式。多目标优化方法可以做到在安全、经济、耐久三个方面的相互兼顾。未来,随着碳纤维复合材料以及新型材料的研发应用,桥梁跨径可以有更大地突破;结构健康检测以及基于数字孪生的管理可对桥梁进行全寿命周期的运维监控;建立韧性抗风设

计标准,可在极端气候情况下保证桥梁的安全性,大跨径桥梁技术会向更加高、薄、智慧的方向迈进。

[参考文献]

- [1]李凯,蔡春声,韩艳,等.大跨度桥梁非线性颤振理论与试验研究[J].工程力学,2024,41(2):1-24.
- [2]刘旭政,曾健峰,王丰平.大跨径斜拉桥施工阶段临时抗风措施对比分析[J].铁道工程学报,2024,41(1):39-44.
- [3]张滨洋,李艺林.不同地震激励下大跨度跨海斜拉桥地震响应与减震效应研究[J].工程抗震与加固改造,2024,46(5):131-140.

作者简介:兰飞(1993—),男,汉族,湖北洪湖人,工程师,毕业于重庆交通大学建筑与土木工程专业,硕士,研究方向为公路桥梁设计。