

桥梁结构设计优化与桥面施工技术探讨

赵明月

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要]桥梁工程是交通运输基础设施的重要组成部分,桥梁结构设计优化以及桥梁桥面铺装施工技术水平直接影响整体工程质量及使用寿命。文章以桥梁结构设计优化及桥面施工关键技术为两个主要的研究方向,详细介绍了桥梁结构设计的基本原则及其技术要点,通过桥梁结构体系优化设计、材料的选择与组配优化设计、荷载作用下的结构受力优化设计三个方面来了解桥梁结构设计的技术难点所在。总结了桥面施工的技术难点及工序流程,并提出了通过一体化设计与施工的概念、结构设计影响桥面施工的分析、BIM 软件共同使用、信息系统与智能化建造相结合等四种方式来进行两者之间的相互协调与优化的方法。研究证明设计优化及施工技术相结合是提高桥梁工程质量的重要手段。

[关键词]桥梁结构; 设计优化; 桥面施工; 协同优化; 施工技术

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19643

中图分类号: U445.55+1

文献标识码: A

Optimization of Bridge Structure Design and Exploration of Bridge Deck Construction Technology

ZHAO Mingyue

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: Bridge engineering is an important component of transportation infrastructure, and the optimization of bridge structure design and the level of bridge deck pavement construction technology directly affect the overall project quality and service life. The article focuses on two main research directions: bridge structure design optimization and key technologies for bridge deck construction. It provides a detailed introduction to the basic principles and technical points of bridge structure design. Through the optimization design of bridge structure system, material selection and assembly optimization design, and structural stress optimization design under load, the technical difficulties of bridge structure design are understood. Summarized the technical difficulties and process flow of bridge deck construction. And four methods were proposed to achieve mutual coordination and optimization between the two, including the concept of integrated design and construction, analysis of the impact of structural design on bridge deck construction, joint use of BIM software, and combination of information systems and intelligent construction. Research has shown that the combination of design optimization and construction technology is an important means to improve the quality of bridge engineering.

Keywords: bridge structure; design optimization; bridge deck construction; collaborative optimization; construction technology

引言

伴随着我国交通运输基础设施建设的发展壮大,桥梁工程项目越来越多,结构也越来越复杂,对设计能力和合适的结构形式的要求也越来越高。桥梁结构的设计优化是为了在有限的材料下和合适的结构形式之下保证结构的安全性和耐久性,而桥面的施工技术影响着桥梁整体性能及使用寿命。二者密不可分、相辅相成,设计的好坏直接影响到施工的质量,施工的技术精湛与否也会影响到设计者的初衷是否能够达成。研究发现,桥梁结构往往包含繁杂的施工工序,在施工过程中可能会出现结构体系的变

化。所以在设计桥梁的过程中一定要对每一步施工阶段都进行安全性校核,仅仅通过最后成桥阶段的设计是无法保障整个施工阶段桥梁的安全性的。这表明设计优化与施工工艺共同考虑的重要性。同时桥面铺装是车辆荷载接触的地方,需要平顺防滑、便于排水,另外它又是桥梁行车道板的防护层,使得桥梁主体不受雨水的侵害。

1 桥梁结构设计的基本原则

安全第一是指桥梁设计的第一项就是一定要保证它的安全性,在施工以及使用的过程中它都能够经受住各种各样的荷载以及外力的作用,并且达到相应的承载能力和

正常使用的要求。经济性原则就是在保障安全性和适应性的基础上尽量节省工程建设的成本以及总体的花费,将建安费、运维费用和使用寿命等作为综合考量的因素之一。耐久性是指桥梁结构在整个使用过程中能维持住它的使用功能的能力。在进行桥梁设计时要考虑到自然环境对材料性能造成的影响,做好相关的防护工作。可持续发展原则是在桥梁的设计时要注意到资源节约和保护生态环境,尽可能选择环保型的建筑材料并改进结构形式来减少材料的使用量。

2 桥梁结构设计优化关键技术分析

2.1 结构体系优化设计方法

结构体系最优化是在总体上提高桥梁整体性能的方法之一。在现今的设计中,面临着结构越来越复杂化以及构件不断增多的情况,在力求得到更好的设计方案过程中,研究人员把智能方法引入到结构体系的设计当中去,将设计的问题转化为数学表达式并且用优化的方法来找到其中的最佳解。而结构体系优化的关键是如何构造合理的数学优化模型,构造合理的数学优化模型应该有以下几个步骤:第一个步骤是要设置目标函数用来衡量设计方案的好坏程度;第二个步骤就是选择能够对结构做出较大贡献并且实际可操作的相关参数作为优化的变量;第三个步骤就是要建立包含一定数量限制在内的约束集来约束优化的结果,使其符合安全性和适用性这两个方面的要求。对于钢管混凝土系杆拱桥的改进问题,可以引入多种重要的设计变量,在此基础上选择施工期、使用期的安全评价指标作为优化限制条件,利用桥梁总造价为目标函数进行求解优化问题的计算。

2.2 材料选择与组合优化技术

材料选用以及组合优化是桥梁结构设计优化的重要内容,材料有不同的力学性质以及使用要求,在合理地进行材料的选择以及有效的对材料进行组合作用下可以使结构的性能及经济得到很大程度提高。

钢-混凝土组合结构结合了钢材受拉特点和混凝土受压特点,广泛应用于现代桥梁工程中,通过研究得出基于

可靠性的钢板组合梁桥结构优化设计方案,充分考虑到材料参数的不确定性和设计变量的多重约束条件,利用拉丁超立方试验设计来构造试验方案组合,目标是钢结构截面积最少化,从而构建一个满足规范要求 and 可靠度约束条件下的优化数学模型。

2.3 荷载分析与结构受力优化

荷载计算及结构承载能力优化是保证桥梁结构安全的重要环节,在桥梁的建设以及营运期间会受到各种各样的荷载的作用,桥梁的结构反应会随着不同的荷载工况而有很大的变化,在众多荷载作用中多车加载对于结构的应力影响最大,比单台加载时应力要高出数倍。现代的桥梁结构大多都比较复杂,施工过程中可能需要经过多个结构体系的转换,在施工期的时候结构往往处于一个未完成的状态,有临时的支撑,存在临时的荷载,这种情况下的工况与成桥的情况是有很大的区别的,在施工期产生的一些应力甚至可以超过成桥阶段产生的应力,有些情况下有可能还会超过材料强度标准值。所以只对成桥结构做设计验算,不能发现施工期间的结构安全隐患。

3 桥面施工关键技术及工艺流程

3.1 桥面施工的基本要求与技术标准

桥面铺装是车辆运行接触最直接的部分,需保证平整度、抗滑性、良好的排水性能,也是桥梁行车道板上的防护层,防止桥梁主体结构受雨水侵蚀。依据当前的技术标准,在快速路、主干路桥梁及次干道上的一些特大、大桥,桥面铺装应该使用沥青混凝土材料,铺装层厚度不宜小于80mm;水泥混凝土找平层强度等级不应低于C30,厚度宜为70-100mm并配置钢筋网;水泥混凝土铺装层面层厚度不宜小于80mm,混凝土强度等级不应低于C40,铺装层内有钢筋网。

3.2 桥面铺装结构形式及材料选用

桥面铺装结构形式的选择以及铺装材料的选择要结合桥梁本身类型、使用功能及环境条件等具体情况来决定。对于钢桥面铺装更是应该全面分析铺装材料性质、施工方法、车辆荷载以及桥梁跨度及结构形式等。

表1 常用桥梁结构材料性能对比

材料类型	密度 (kg/m ³)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (Gpa)	耐久性	经济性	适用部位
普通混凝土	2400	30~60	2~4	30~35	良	优	主梁、墩台
高性能混凝土	2450	80~120	4~6	40~45	优	良	大跨径主梁
普通钢筋	7850	335~400	335~400	200	良	优	配筋
高强钢筋	7850	500~600	500~600	200	良	良	预应力筋
结构钢	7850	235~460	235~460	206	良	中	钢箱梁

表 2 常见桥面铺装结构形式对比

铺装类型	结构组合	适用桥型	铺装厚度 (cm)	优点	缺点
水泥混凝土铺装	混凝土面层+防水层	中小跨径桥梁	8~15	耐久性好、造价低	平整度差、养护期长
沥青混凝土铺装	上面层+下面层+防水层	大跨径桥梁	6~10	平整度高、行车舒适	高温易车辙
双层沥青铺装	SMA+AC+防水层	钢桥面	5~8	抗车辙、抗疲劳	施工工艺复杂
环氧沥青铺装	环氧沥青层+防水层	钢桥面	4~6	粘结性强、抗疲劳	成本高
浇筑式沥青铺装	GA 层+防水层	钢桥面	3~5	密水性好	高温稳定性差

针对传统钢桥面铺装存在的容易开裂、使用寿命短等问题,在最近几年开发出了以剪力钉超高性能混凝土加改性沥青玛蹄脂碎石混凝土的新一代持久型钢桥面结构系统。该系统是在对水泥、骨料、外加剂等主要材料合理配比的基础上提升超高性能混凝土制作质量水平同时对无缝式、燕尾榫槽式、凸凹齿式三种不同类型的钢桥面性能进行了分析,最终得出燕尾榫接头是最为理想的接缝方式。

3.3 沥青与混凝土桥面铺装施工工艺

对于装配式桥面沥青混凝土铺装,结构体系及接缝形式的选择是十分重要的。研究发现:接缝的存在使得铺装上面层最大拉应力增大、下面层最大拉应力减小;接缝界面黏结状况的变化使接缝及预制下面层边缘表面最大拉应力呈现上升趋势,铺装上面层的最大拉应力呈下降趋势,在接缝材料和预制下面层的弹性模量相近的情况下,接缝以及预制下面层边缘表面的最大拉应力最小。

4 桥梁结构与桥面施工协同优化策略

4.1 设计与施工一体化理念

设计和施工相结合是提高桥梁工程管理水平的先进思想。传统的做法是设计和施工相脱节的,设计院主要负责的是结构安全性及使用性能,而施工单位主要是针对工艺是否可行以及施工速度,二者之间缺少有效沟通的信息渠道,缺乏互动交流。这样造成的结果往往是设计图纸与实际施工有出入,在设计中忽视了施工条件和工艺要求等,而在实际过程中遇到了问题也无法迅速传达给设计优化部分,从而造成进度滞后、花费加大等问题以及可能出现的安全隐患。研究表明桥梁结构一般涉及到复杂的施工工序,在其建设过程中可能会有结构系统在几个步骤中发生变化^[1]。对于仅仅考虑成桥状态下优化难以保障施工过程中结构安全的做法,提出考虑施工及营运期间结构安全的设计方案优化思路,在设计初期就考虑到施工环节的特点,使得设计方案与施工方法相适应。实现设计和施工一体化,需构建协同机制以及信息沟通机制,使用相同的模型、数据格式等完成从设计到施工的信息流转。实行设计施工一体化总承包制度也是其重要的组织支撑,这种做法是把设

计与施工的责任单位合并在一起,解决了以往分开进行所带来的壁垒问题。

4.2 结构设计对桥面施工的影响分析

结构设计对桥面施工有较大作用:桥梁上部结构类型影响着桥面铺装工作环境,大跨度桥梁、钢桥面变形特点要求铺装层具有较好的形变响应能力;结构刚度分布影响着铺装层的受力状况;预拱度设定及桥面标高的设置都与此有关。针对钢桥面来说,正交异性钢桥面板局部变形明显,在加劲肋部位处钢板与铺装层间的界面剪应力最大,是造成铺装层推移及脱层的原因之一^[2]。所以在设计过程中应对铺装层与钢桥面板的协同受力进行精确计算,改进剪力钉设路以及铺装层的设计等。京雄大桥是京雄高速公路上的重要节点性工程,它主拱跨径很大,拱跨拱肋的异形曲面形态以及连接方式,都给传统的设计及建设带来了很大的困难,采用 BIM 技术进行集成式的设计,以单一数据源为基础构建统一体系模型,可以做到跨单位异地的便捷应用。在桥面施工上利用 BIM 模型对桥面铺装层的空间坐标点及厚度的精确建模。把设计阶段预拱度的数据与施工阶段测量得到的实际数据做对比分析,并实时调整铺设参数,很好地解决了复杂曲面环境下如何保证铺装精度的问题。

4.3 基于 BIM 技术的协同优化应用

BIM 技术为设计与施工的有效协同提供了一个良好的平台,基于一个共同的数据模型使所有参与者在同一来源上进行工作,可以做到设计信息与施工信息的完美传递,BIM 技术最大意义就是打通了信息壁垒,形成了覆盖整个项目生命周期的设计到施工再到运营的数据链条^[3]。在设计中 BIM 模型可以用于做结构性能分析,用作碰撞检测以及方案选择,在施工过程中 BIM 模型中可以嵌入进度、资源、质量三类信息,并通过四维施工模拟和动态跟踪的方式来进行管理。在雄安京雄大桥工程上,在 BIM 模型的深度全融合的应用下,很好地解决了空间扭转面的设计以及优化问题,节约近 4 个月模型深化时间,保障了桥梁施工进度及质量。该桥使用了参数化的建模方式将复

杂的空间曲线表面转换成了可控制的数学公式,使得设计可以快速地更新及改进,而且使用了 BIM 模型的数字化移交手段,降低了传统图纸的出图数量,提高了设计信息传送的速度及精确度。

4.4 信息化与智能建造技术的融合路径

智慧建设技术正在重塑桥梁工程施工方式,数字孪生技术让实体建筑与虚拟仿真同步,以感知设备数据+BIM 模型的形式实时监控、预警施工现场的情况并为施工决策提供依据;针对桥梁面层施工,智能化压路机可以做到根据材料情况实时调节碾压力度从而避免出现过度或者不足的现象发生;图像识别技术和机械臂技术相结合使得结构位置达到了厘米级别的准确度,大大减少了人力测量时产生的误差量;将来利用机器学习来计算出最适合的施工参数可以自动得出最好的施工计划,无人驾驶的施工机械设备群组合作将会使施工的速度更快更安全。

5 结语

桥梁结构设计优化以及桥面施工技术是影响整个桥梁工程质量的两个方面,本文得到的主要结论如下:一是桥梁结构的设计优化要对结构体系、材料组合、荷载受力这三个方面进行综合考虑。在结构体系的设计当中需要建立起合理的数学优化模型;对材料的选择要兼顾经济

性和功能性;对于荷载的分析则必须要考虑到施工和运营过程中所面临的不同的受力情况。二是桥面施工技术有材料挑选、结构形式、施工工艺等多个层面。桥面铺装的形式应当同沥青路面相匹配,对于钢桥面的铺装既要注重材料的功能又要考虑施工工艺,而新式的长寿命钢桥面结构体系也为解决传统铺装开裂的问题提供了一个好的途径。第三,设计与施工一体化协同是高质量建桥的有效方式。BIM 技术给协同优化提供信息化载体,智慧建造引领桥梁施工方式变革,未来研究可以尝试研究 AI 用于桥梁结构最优化、新材料应用于桥梁铺装的应用可行性、数字孪生与桥梁全寿命周期管理融合应用等。

[参考文献]

- [1]徐政杰,牟健.桥梁结构设计优化与桥面施工技术探讨[J].科技视界,2024,14(36):59-63.
- [2]张磊.新型长寿命钢桥面结构体系施工关键技术[J].施工技术(中英文),2025,54(21):55-63.
- [3]刘刚,钱振东,陈磊磊,等.装配式桥面沥青混凝土铺装结构体系及其接缝构造优化[J].中国公路学报,2025,38(9):124-133.

作者简介:赵明月(1991—),男,汉族,吉林梨树人,白城师范学院本科毕业,从事桥梁设计工作。