

结构化设计在道路桥梁设计中的应用

兰 飞

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430070

[摘要]结构化设计是系统化的工程技术手段,把复杂的工程问题划分成一些功能单元并对这些功能单元进行最优化整合,在道路桥梁工程中的地位也越来越重要。文章主要从提高桥梁的设计水平、改善结构性能以及减少全生命周期投入这三方面来说明结构化设计的重要性,对有限元分析、拓扑优化以及参数化设计和模块化设计等几种结构化设计方法进行了详细的介绍,并具体讲解了结构化的设计思想是如何运用到各个层面的设计当中的。希望可以给道路桥梁工程的设计现代化提供一点借鉴。

[关键词]结构化设计;道路桥梁;有限元分析;拓扑优化;参数化设计

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19783

中图分类号: U442.5

文献标识码: A

Application of Structured Design in Road and Bridge Design

LAN Fei

Central South Survey Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: Structured design is a systematic engineering technique that divides complex engineering problems into functional units and optimizes their integration. Its position in road and bridge engineering is becoming increasingly important. The article mainly explains the importance of structured design from three aspects: improving the design level of bridges, improving structural performance, and reducing full life cycle investment. It provides a detailed introduction to several structured design methods such as finite element analysis, topology optimization, parametric design, and modular design, and specifically explains how structured design ideas are applied to various levels of design, so as to provide some reference for the modernization of road and bridge engineering design.

Keywords: structured design; road and bridge; finite element analysis; topology optimization; parametric design

引言

结构化设计是以拆解复杂的工程项目为一系列相互之间相对独立的功能单元,在此基础上再以系统化的途径来对各个单元进行合理组合的一种设计理念。对于道路桥梁工程建设来说,结构化设计就是基于桥梁整体的受力系统进行拆分,把结构划分为各自不同的带有一定功能范围以及边界限制的子结构,运用合理的计算分析方式及优化策略来使得整个桥体结构达到最优状态。现在桥梁结构的设计目标就是要将桥梁结构的设计方案形成、建模、优化、细化等一系列过程自动化,并将数字化的设计方案同后续的数字化加工以及智能化施工相结合,而结构化设计就是达到此目的的方法论基础。在桥梁跨度日益增大和结构越来越复杂的情况下,传统的依靠经验进行的设计方式已经无法达到当今社会道路桥梁工程项目对于其安全性和经济性以及可持续性的统一的要求了。采用结构化的设计思想,在系统层面对桥梁的设计进行全面的研究和改进,是我国道路桥梁工程建设技术进步的一个重要标志。

1 结构化设计在道路桥梁设计中的重要性

结构化设计可以大大提高道路桥梁的设计水平。一方面,结构化设计有利于形成良好的层次式设计架构,把庞大复杂的桥梁工程分为上部构造、下部构造以及基础工程几个部分,然后又细分到梁、柱、节点这些基本单元,让整个设计思路更清晰、职责分工更清晰,方便设计师一起协作;另一方面,在复杂的桥梁工程中,结构化设计可以有效地避免各专业的信息壁垒,让设计方案能够在各个子项目间顺畅流转,防止相互冲突与返工情况的发生。其次,结构化设计极大提高了设计速度及质量。基于 BIM 技术的桥梁方案设计能够做到基于三维环境下的正向设计,自动完成桥梁建设规模统计及高墩的定位、标示等工作,并把设计信息传送给后端的专业应用,极大地提高了工作进度,在一定程度上使桥型方案的选择更加直观,使得设计资料得到了充分利用。利用参数化的设计和模块化的思路,设计师可以迅速地制作出众多不同的对比方案并根据其功能进行选择。其次,整体式的思路也有利于达到全生命

周期最优。从系统性的角度来考虑桥梁的设计建造运行以及维护等问题,把可行性、可维护性考虑进去,可以很好地减少全生命周期的成本。设计使用年限是进行桥梁耐久性设计的基础以及全寿命设计的重要参数,全寿命设计不仅要考虑好桥涵设计前期的研究工作,还需要对后期的运营管理、维修保养及拆卸等环节进行研究。

2 道路桥梁结构化设计的方法

道路桥梁结构化设计采用了一系列先进的工程技术方式,构建了比较系统的结构化设计方法体系。有限元法是结构化设计的基础方法,它是通过对连续的桥梁结构进行划分成有限个单元,通过求解各个单元之间节点变量间的关系式,以得到所求桥梁结构的应力、应变、变形等信息。对于大跨度复杂的桥梁来说,有限元法可以直接给出桥梁在各种承载状态下的响应结果,可作为结构优化设计的数据基础。拓扑优化是一种针对概念性的结构形状优化的方法,在给定的设计域以及边界约束下,计算机程序自动寻找出最佳的材料分配方案。基于性能的设计技术之拓扑优化,给设计者寻求轻质、优美的结构提供强有力的手段找到最优解的结构类型。参数化设计通过对几何模型和设计参数之间建立联系来达到对方案进行迅速变化以及反复优化的目的;模块化设计就是把桥梁结构分成多个标准模块,然后采用模块拼装的方式达到迅速搭建的效果,表1总结了以上三种主要结构化设计方式的区别。

拓扑优化与几何优化相结合可以在提升结构性能的同时减少重量和节约设计费用,在此方面的研究提出了一种综合考虑弯曲、翘曲及动态响应等各种重要性能指标的有效拓扑优化策略并应用于铝合金人行桥的设计;实际上这些方法经常混合应用的方式是:参数化建模得到几何形状,有限元分析检验其力学性能,拓扑优化提供构想选择依据,模块化设计促进工业化生产,形成了一个完整的设计链。

3 结构化理念在道路桥梁设计当中的应用

3.1 在宏观结构设计中的应用

结构化的概念应用于桥梁宏观结构设计,主要是对桥梁结构系统进行合理的模块划分以及传力途径的有效组

织。设计师把桥梁的整体结构分为上部结构、下部结构和基础工程三级,然后在此基础上对每一级进行功能细分以及接口界定,这样就使得整个系统的结构清晰明了、受力明确;在结构方案的选择中,采用结构化的设计手段可以很快地制定出几种不同的结构类型方案:梁桥、拱桥、斜拉桥或者悬索桥,并结合地质情况及跨度要求来初步排除一些方案;而在特殊地形情况下,结构化设计重视针对具体的结构体系进行适当的转换。针对地锚式单斜塔斜拉桥,研究结果表明桥梁下部基础宜采用斜桩,从而提高全桥结构的整体刚度,在设计时提升梁塔刚度比可以有效减少主梁竖直方向的最大位移及塔顶纵向水平位移,提高桥梁的整体刚度与稳定程度等。

3.2 在主梁设计中的应用

主梁为桥梁上部结构的主要承载部分,结构化设计在整个主梁的设计过程中,从初步的概念设计一直到具体的构造细节都包含其中。在截面类型的选择上,设计师结合桥梁的设计跨径、承载能力和现场施工情况,对箱梁、T梁、工字梁等基本截面类型进行筛选并利用参数化建模的方式对截面大小进行快捷方便的比较,而在复杂的桥梁里,参数化设计就显得至关重要了。广州海心桥的设计为了实现大量不同的横隔板、肋板的高效便捷设计,在此基础上进行了程序化设计,对拱和吊杆的建模进行参数化设定,从而可以方便地调整、反复修改拱和吊杆的设计。在成都西一线绛溪河大桥的设计过程中,课题组应用 Rhino、CATIA 软件开展基于 BIM 的正向设计。运用参数化建立、双曲面曲率优化、模拟测试以及分批出图等方式提高设计速度,改善桥体结构,节约用料成本,大大缩短了钢结构深化设计时间和制作费用。对于主桥钢梁的加劲肋设计也可采用结构化手段,迅速完成其刚度、柔度的计算,使工程师摆脱低效重复的工作模式,转而针对整体方案、结构计算、细部进行研究。

3.3 在混凝土施工设计中的应用

混凝土施工图纸中结构化的运用主要是针对钢筋布置和模板的选型两个方面。传统的平面钢筋图难以直接看出钢筋的空间立体关系,容易产生钢筋打架的现象,在采

表1 结构化设计主要方法对比

设计方法	基本原理	适用阶段	主要优点	典型应用场景
有限元分析	将连续体离散化为有限单元求解	详细设计	精度高、适用性强	复杂结构受力分析
拓扑优化	算法自动确定最优材料分布	概念设计	结构效率高、创新性强	桥塔、锚固区等关键部位
参数化设计	参数驱动几何模型自动更新	方案设计至施工图	修改便捷、自动化程度高	异形结构、多方案比选
模块化设计	标准化模块组合装配	方案设计与施工	工业化程度高、施工快速	装配式桥梁、常规跨径桥梁

用 BIM 技术进行参数化钢筋构建之后,设计师可以清晰地看到每个钢筋的具体位置与方向,自动计算钢筋碰撞情况,生成钢筋加工下料表以及绑扎图。针对某一主流建筑信息模型软件在建立变螺距、变直径螺旋箍筋时难度大的问题,有学者提出基于此软件二次开发的参数式建模方式,在非均匀有理 B 样条曲线重建结构下嵌入螺旋公式,使螺旋箍筋可以在单一模型内无缝焊接,把一个单个墩柱的平均建模耗时减少至原来的六成五。在混凝土浇注计划的设计上,采用结构性的方式协助设计师确定重点工序,调整分段灌浆流程及接缝处设置。对大型混凝土构件除了注意水分蒸发外还应采取防裂措施,采用有限元仿真模拟浇筑过程升温与应力变化规律,以便合理规划冷却管路的设置与养护手段。模板安装设计中,基于参数化的设计可以针对混凝土构件外形自动产生模板平面排版图,统计模板数量并进行下料处理,在异形墩柱与特殊节点部位的应用最好;

3.4 在防水设计中的应用

防水设计是影响桥梁使用寿命的重要因素之一,结构化设计思路在该方面有其独特的作用。结构化设计把桥面防水系统作为一个包含防水层、粘结层、保护层等多个层面组成的整体来进行综合考虑,在各层面所用材料的选择、厚度的设计以及施工方式上都进行了合理的设计。装配式桥梁桥面板及防水体系耐久性提高研究了桥面板湿接缝防水防渗、抗侵蚀的方法,研发防水抗疲劳层铺装材料,提出多层组合式桥面防水结构,达到提高装配式桥梁桥面板及防水系统耐久性的目的。为了解决桥梁承重构件底面渗水这个主要难题,结构化设计秉承着“统筹规划与重点加固”相结合的原则,在湿接缝顶部使用抗裂防水防震粘接性的高强抗裂贴进行抗裂防水加固,在桥面板上铺设孔隙率低、油石比大的防水抗疲劳层。对于位于海洋环境中的跨海大桥来说,由于海水腐蚀、干湿交替、温差以及波浪撞击等多种负面影响同时存在,很容易使混凝土结构丧失耐久性,发生冻融破坏、钢筋锈蚀等一系列连锁反应,因此选择性能较好的防水材料并且采取合理的防水措施就是保证其耐久性的重中之重。

3.5 在稳定性设计中的应用

大桥稳定性包含整体失稳、局部稳定以及抗倾覆等各个方面的内容,结构设计法是针对其稳定性提出的一种系统的解决方案。利用有限元技术搭建详尽的桥梁整体结构模型,可以对单个结构件的失稳模式以及失稳负载进行特征提取,从而找出结构体系中的薄弱环节,在深茂铁路虎

跳门水道特大桥(主跨 300m)稳定性分析中,运用有限元软件 Ansys 构建以梁单元为主的三维空间框架有限元模型,开展铁路钢桁架-混凝土板组合梁斜拉桥弹性稳定性计算,在非线形情况下考虑几何初始畸变及材料的弹塑性进行非线性弹性稳定性分析。抗倾覆稳定性是一个近几年来备受关注的话题,尤其是针对独柱墩连续梁桥以及弯梁桥,在结构化设计时需注重以整桥受力体系为基础设计出合理的支座布置方案并采用设置抗拉支座或者增加钢盖梁等方式进行加固。空间异形钢拱-梁组合体系桥基于有限元分析的迈达斯软件土木创建了三维空间模型,经过数值仿真计算动力学和静力学试验,研究拱肋与主梁部分重要截面上内力、变形以及应变的变化趋势规律,结合主要承重部件特征截面的影响线图给出静力荷载作用下的布置位置及加载方式。对于大风、地震等特殊荷载,对桥梁进行抗风稳定性以及抗震稳定性也要求采用结构化的办法来进行验算和校核,在各种工作状态中都满足足够的安全储备。

3.6 在后续维护设计中的应用

把维护的需求考虑进设计当中是结构化设计的一个重要思想,也体现了全生命周期的理念。结构化设计就是从方案开始就要考虑到桥梁建成后进行检查、维修及更换的需要,在构造设计上要有后期养护的条件,实际操作中,我国公路桥涵的设计存在着忽视桥梁结构将来养护需求的问题,如有些桥梁结构部分不容易进入或者不易观察。结构化设计通过将桥梁划分为可以方便检修替换的部分,设计师就可以发现一些使用寿命相对较短的部分并设置相应的替换构造。而《公路桥涵设计通用规范》规定:公路桥涵需要考虑到日常养护,根据可进入、可查看、可维修可替换的原则来进行设计。杭甬复线宁波三期项目的项目组秉承着“百年免维护”的理念来进行桥梁支座的研发,在材料、结构和工艺三方面进行创新,使用 UHPC 滑板型材料让磨损寿命延长了 12 倍,“滑转式抗水平力框架”解决了长久以来困扰行业的应力集中问题,用整体包覆不锈钢的方式形成一个坚强的“防锈盔甲”,传统的支座在整个服役期内需要更换两次甚至三次,8 个支座的更换费用达到了 1200 万元左右,而新型的支座仅仅增加 160 万元就可以省下接近千万元的养护费用。重庆市的首座装配式桥梁伸缩装置基于标准化、可装配的特点以及便捷高效的换装方式,使整个伸缩装置更换与维护的时间从最初的 15 天缩短到了短短的 4h 之内,单次更换施工费用减少 80%。

4 结语

结构化设计为道路桥梁工程提供了一种系统的、分层次的设计指导思想。有限元分析、拓扑优化、参数化设计、模块化设计贯穿了整个设计过程,从初步的概念设计方案到最后的施工图纸,结构化设计的方式都可以应用。在总体结构设计上,结构化的手段有助于搭建一个明确的层级划分的设计体系;主梁的设计中应用参数化建模以及 BIM 的设计方式大大提高了工程师的工作效率;对于混凝土施工设计来讲,通过计算机进行钢筋排布、模具的设计实现了智能化管理;防水设计方面采用多层次的防水系统保证了结构长久的抗渗能力;而稳定性的设计则通过精细化的有限元计算来对结构的安全给予充足的论证依据等等。在后期维护设计当中,可维修单元与全寿命周期理念减少了运维费用;伴随着 BIM 技术的发展和人工智能算法的融合、工业化施工的继续推进,标准化设计将会在道路桥梁

工程建设领域起到更加重要的导向作用,促进桥梁设计朝着更加高效便捷、更加智能化以及更加绿色可持续的方向发展。

[参考文献]

- [1]曾健峰,谷东锴.结构化设计在道路桥梁设计中的应用[J].建筑经济,2024,45(2):403-405.
- [2]王勇,董宗岭.道路桥梁设计中结构化设计的应用研究[J].科技资讯,2022,20(3):65-67.
- [3]邢志达.试析道路桥梁设计中的结构化设计要点[J].中华建设,2022(8):110-111.
- [4]刘世杰.结构化设计在道路桥梁设计中的应用[J].运输经理世界,2024(8):95-97.

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,硕士研究生,公路桥梁设计方向。