

DOI: 10.7672/sgjs2024130153

基于 BIM 的桥梁高支模三维可视化智能设计系统*

刘建华¹, 王国军¹, 王文剑², 陈培锋³, 符铎³

(1. 广州市高速公路有限公司, 广东 广州 510290; 2. 广东星层建筑科技股份有限公司, 广东 广州 510220;
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510630)

[摘要] 为提高桥梁高支模支撑结构的设计效率和设计质量, 利用 BIM 的二次开发技术对桥梁高支模设计系统进行研究。在实现桥梁及高支模 BIM 模型的参数化快速建模基础上, 研究开发系统内嵌的高支模空间分布设计、受力分析验算、设计冲突分析、工程量校核、设计合理性校验、施工模拟以及集高支模结构三维模型、设计图纸和工程量清单自动生成, 高支模交互设计功能于一体的桥梁高支模三维可视化智能设计系统。该系统在多个桥梁实际工程项目的高支模设计中得到成功应用, 有效解决传统高支模设计方法存在的图纸表达不够清晰完整、方案修改工作量大、设计效率低下、设计合理性校验不便等问题。

[关键词] 桥梁工程; 高支模; 支撑体系; 智能设计; 建筑信息模型

[中图分类号] TU445

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)13-0153-07

BIM-based 3D Visualization Intelligent Design System for Bridge High Support Formwork

LIU Jianhua¹, WANG Guojun¹, WANG Wenjian², CHEN Peifeng³, FU Xinshe³

(1. Guangzhou Expressway Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510290, China;
2. Guangdong Xingceng Building Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510220, China;
3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510630, China)

Abstract: To improve the design efficiency and quality of bridge high formwork support structures, a secondary development technology of BIM is used to study the design system of bridge high formwork. On the basis of realizing the parametric rapid modeling of BIM model of bridge and high formwork, this paper studies and develops the spatial distribution design, force analysis and checking calculation, design conflict analysis, engineering quantity checking, design rationality checking, construction simulation of high formwork embedded in the system, as well as the three-dimensional visual intelligent design system of bridge high formwork, which integrates the three-dimensional model of high formwork structure, the automatic generation of design drawings and bills of quantities, and the interactive design function of high formwork. The system has been successfully applied in the high formwork support design of several actual bridge engineering projects, which has effectively solved the problems of unclear and incomplete drawing expression, heavy workload of scheme modification, low design efficiency and inconvenient verification of design rationality that have ever existed in the traditional high formwork support design method.

Keywords: bridge engineering; high support formwork; support system; intelligent design; building information modeling(BIM)

0 引言

随着我国基础设施建设的快速发展, 大跨度、超高层等大型复杂工程越来越多, 施工难度也越来越大。在桥梁工程建设过程中, 为了保障某些特殊路段的施工安全和便利, 高大空间模板支撑体

* 国家自然科学基金(51978283)

[作者简介] 刘建华, 高级工程师, 博士, E-mail: wanghao166@126.com

[收稿日期] 2024-01-22

系(简称高支模)也得到广泛应用。高支模作为桥梁施工过程中承重结构的重要组成部分,在施工期间需要承担多种荷载作用,而高支模设计是否合理也直接影响高支模的结构安全。据统计,近年来由高支模引发的安全事故屡见不鲜,已然成为桥梁工程建设中的一个重大危险源^[1-2]。

通过对高支模安全事故的致因分析,发现高支模设计不合理占据了很大比重^[3-4]。传统的高支模设计是在二维图纸上进行的,一般情况下,二维图纸表达不直观,不够完整、清晰,对设计隐患难以察觉;而且设计过程涉及大量的计算和方案修改,图纸众多、工作量大、效率低下,对于危险性较大的复杂高支模设计项目,存在一定的设计安全风险。

随着建筑信息模型(builting information modeling,BIM)的出现和不断发展,其可视化、参数化、仿真性、优化性、可出图性等优势逐渐显现,BIM 技术越来越多地应用于工程建设的各个阶段^[5-7]。如张建平^[8]将 BIM 与 4D 技术结合,研发了施工管理系列软件,实现了施工过程的可视化模拟;王婷^[9]依托实际工程研究 BIM 技术在施工中的应用,展现了 BIM 在 4D 进度模拟中的优越性;杨骐麟^[10]利用 BIM 三维可视化的特点,研究基于 BIM 平台的多专业间协同设计,表明协同设计可有效减少设计冲突,提高设计效率;刘向阳^[11]开发公路 BIM 平台,实现设计优化、场地布置、施工进度模拟、工程量统计等功能,体现了 BIM 在公路项目全生命周期管理中的应用价值;范学宁^[12]构建基于 BIM 高支模施工安全管理系统,实现对高支模施工前期的隐患排查、施工过程的实时监测;吕布^[13]基于 BIM 平台进行二次开发,实现了高支模参数化设计与虚拟仿真;车轶等^[14]开发基于 BIM 的高支模自动监测系统,将传感器监测数据与 BIM 模型挂接,实现对高支模事故的有效预警等。这些研究表明,新兴的 BIM 技术可以为解决当前高支模设计存在的问题提供了新思路和可靠的技术支撑。

为提高桥梁高支模支撑结构的设计效率和设计质量,本文对高支模的空间分布设计、受力分析验算、设计冲突分析、工程量校核、设计合理性校验、施工仿真模拟以及设计图纸和工程量清单自动生成等技术进行了系统研究,在实现桥梁及高支模 BIM 模型的参数化快速建模基础上,研究开发了桥梁高支模三维可视化智能设计系统。

1 桥梁高支模 BIM 模型快速构建

桥梁和高支模 BIM 模型是实现高支模智能设计的基础,这两者的建模效率和模型精度十分重

要,而桥梁结构作为一种构件较多的复杂结构,按传统方式建模其精度难以得到保证,且效率低下,因此需要一个精准、高效的建模平台。

目前市场上应用较广的 BIM 建模软件是 Autodesk 公司开发的 Revit,其建模功能强大,可与 Autodesk 系列软件共享模型数据,提供丰富的 API 接口,方便进行二次开发。因此,本文选择 Revit 作为桥梁和高支模 BIM 模型的建模软件。

1.1 参数化快速建模

为了精准、高效地构建桥梁和高支模 BIM 模型,采用参数化建模是最为快捷有效的方法,对桥梁和高支模结构而言,只需将构建模型所需的各种信息全部参数化,系统根据桥梁设计文件获取相关数据及用户输入的高支模设计参数,系统便可快速生成相应的 BIM 模型。

1.1.1 桥梁参数化快速建模

对桥梁 BIM 模型建模而言,构建参数化模型需要 3 类数据:①桥梁的空间位置数据,如桩号坐标、平纵线参数等;②结构几何数据,如梁截面类型、梁截面尺寸、墩台类型、墩台尺寸等;③构件材质数据。根据从桥梁设计文件中获取这 3 类数据,便可建立桥梁建模数据库,具体形式如表 1 所示。

表 1 桥梁 BIM 数据库 Table 1 Bridge BIM database			
数据库子类	数据内容	数据来源	数据类型
总体信息	桥梁类型	桥涵设计说明	属性类型
	跨径组合	桥梁布置图	数值类型
	墩台坐标	桥梁布置图 桩位坐标表	数值类型
上部结构 及桥面系	梁截面类型	上部结构横断面 设计图表	属性类型
	梁截面尺寸	上部结构横断面 设计图表	数值类型
	结构材质	上部结构横断面 设计图表	属性类型
	桥面铺装	路面结构 设计图表	属性、 数值类型
	防撞栏杆	防撞栏杆 设计图表	属性、 数值类型
	支座	支座设计图表及 设计说明	属性、 数值类型
	伸缩缝	设计说明	属性类型
下部结构	桥墩桥台类型	桥墩桥台类型 一览表	属性类型
	桥墩桥台尺寸	桥墩桥台一般 构造图表	数值类型
	基础类型	桥墩桥台一般 构造图表	属性类型
	基础尺寸	桥墩桥台一般 构造图表	数值类型
施工方案	结构施工信息	设计说明及 施工方案	属性类型

根据上述数据库的数据类型,创建各类构件的 Revit 族文件和体量文件,全部模型构件均保留空间位置信息、几何尺寸信息、材质信息等参数。然后基于 Revit 平台和 IFC 标准,使用 C#语言编程进行二次开发,得到桥梁快速建模软件,用户只需根据桥梁设计图纸中的桥梁截面、平纵曲线、节段信息和下部结构等信息,整理成特定格式并导入软件,再设置相应的参数,软件便可自动识别信息并生成桥梁 BIM 模型。

采用该软件进行桥梁快速建模整个过程只需 3 个步骤:首先是整理并导入桥梁的 CAD 设计图纸,然后设置桥梁结构的空間位置、几何尺寸等相应参数,最后该软件根据图纸和参数信息,自动生成桥梁 BIM 模型。整个过程十分方便简洁快速,极大地提高了桥梁 BIM 模型的效率(见图 1)。

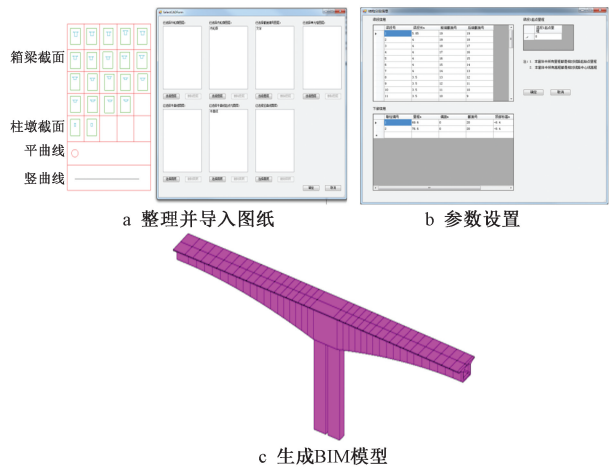


图 1 桥梁参数化快速建模

Fig. 1 Rapid parametric modeling of bridge

该软件采用多截面融合的建模方法快速搭建模型,不仅可以针对复杂箱梁、腹板、桥墩、变截面构件等桥梁各类复杂截面进行自动精确识别,以满足各类多截面桥型变化的桥梁建模需要,而且可以处理各种复杂桥梁平纵曲线,并自动统计桥梁的混凝土工程量。建模精度高,软件适用覆盖面广,桥梁建模完成后,可在此基础上直接进行后续高支模智能设计。

1.1.2 高支模参数化快速建模

高支模模架 BIM 模型构建与桥梁 BIM 项目构建方法相似,同样需要将高支模拆分成杆件、扣件、面板、型钢等各类构件,分别创建各类构件相应的 Revit 族文件,并保留其空间位置信息、几何尺寸信息、材质信息等参数,在后续设计完成后根据参数信息调用,从而实现高支模模架 BIM 模型快速建模和工程量统计。

2 高支模智能设计系统研究及实现

2.1 参数化快速建模

在上述 Revit 族文件和参数化快速建模的基础上,本文使用 C#语言在 Visual Studio 平台下通过 Revit API 进行二次开发,将力学验算、设计校核、出图等功能模块集成于 Revit 中,实现在该平台中完成高支模智能设计工作。

Revit API 是一个类库,进行二次开发时需要引用其中的 Revit API.dll 和 Revit APIUI.dll 两个程序集,其中包含有 Parameter 方法、访问 DB 级别的 Application、IExternal Application 相关接口、IExternal Command 相关接口等内容。本文主要用到两种方式进行功能扩展。

- 1) 外部命令方式:继承 IExternalCommand 接口,并重载 Execute 函数实现接口功能。
- 2) 外部应用方式:继承 IExternalApplication 接口,并重载 OnShutup 和 OnShutdown 函数实现接口功能。

在 Visual Studio 中完成相关功能的代码编译之后,通过上述两种方式与 Revit 平台连接,最后使用 Addin Manager 加载相应的插件,实现整个高支模智能设计系统的开发。

2.2 系统设计及实现

本文基于 BIM 二次开发技术进行高支模智能设计系统开发,该系统内嵌上文所述的桥梁快速建模软件,用户只需导入桥梁相关设计图纸即可生成桥梁模型,然后输入模架设计相关参数,系统便可根据相应的桥梁模型和高支模设计参数,利用系统内嵌的空间分布设计、受力分析验算、设计冲突分析、工程量校核,以及设计图纸、工程量清单、设计计算书的自动生成等功能模块,完成桥梁高支模结构快速设计及成果输出。系统集高支模结构三维模型、设计合理性校验、施工模拟等提供的交互设计功能,给用户对设计成果进行检查校核和交互修改完善提供了直观的、方便有效的手段。模型构件可基于项目存在的施工段进行分段分构件处理,方便用户根据施工进度的要求预览模架的局部模型。设计完成后,平台可导出各构件工程量清单及项目平面图、断面图,极大提高设计效率和准确性。高支模智能设计流程如图 2 所示。

2.2.1 高支模参数化快速建模

桥梁高支模在桥底部一定的空间内生成,限制其生成的构件包括桥身、桥墩、地面,这些限制条件都以桥梁 BIM 模型为载体。在前述桥梁结构快速建模的基础上,本文采用 Revit-Lookup 等辅助工具

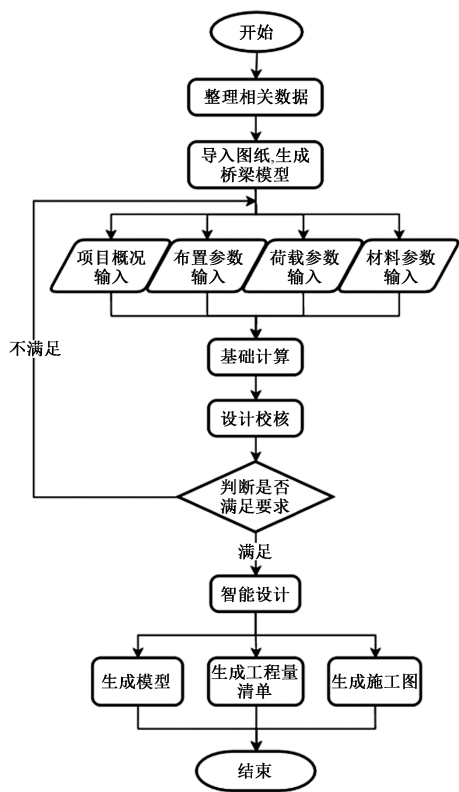


图 2 高支模智能设计流程

Fig. 2 Intelligent design flow chart of high support formwork

开发了模架空间分布设计软件,该软件通过读取桥梁各部分结构模型的实体信息,运用放射法获取空间任一点到结构模型实体外轮廓的距离,生成模架支护体系边界条件,并根据该条件生成相应线段的支护模型,实现对桥梁结构的避让,从而完成模架空间分布的设计。

获得模架设计空间之后,可根据实际项目资料和规范要求进行模架的平面设计。模架平面布置区域通常分为腹板区域和翼缘板区域,腹板区域混凝土自重重大,翼缘板区域混凝土自重小,因此腹板区域的立杆间距更小,密度更大。模架平面设计以立杆的生成点作为参考点,用户给出立杆间距、步距等设计参数后,其余杆件(如水平杆和斜杆)软件根据立杆所在位置对应生成,并可根据设计需要布置通道、楼梯等设施。

完成模架平面设计参数设置之后,按照当前的模架信息,系统会自动检索桥梁厚度,并根据不同的桥梁厚度分区生成大致的模架布置方案。同时根据施工相关规范和安装拆除规则,利用 Revit 自带的碰撞检查功能,对每一块模架实体与主梁模板实体进行碰撞检查,当检测到模架实体过长与主梁模板发生碰撞或模型重叠时,根据模型构件 ID 值反查出对应的杆件。随后计算发生碰撞的每一根杆

件与主梁模板相交后的超出长度,根据计算值批量自动调整杆件的长度,从而使模架与主梁模板之间容易发生碰撞的接触部位的设计空间分布更加合理。

完成各类参数设置之后,系统可快速生成模架的平面布置,包括主次龙骨、立杆、水平杆、斜杆、楼梯、通道等的位置、尺寸,如图 3 所示。同时,用户可根据实际项目需要,在设计界面中对模架平面布置进行相应调整,以达到平面设计优化。在该平台中,所有模型构件都具有一定的关联逻辑,整体模型是基于相应构件模型的关联逻辑所生成的,对某一构件模型进行修改,将会同步修改所有与其关联逻辑的构件模型相关信息,无需再人工逐一修改,减少了繁琐的重复工作,有效提高了设计效率。

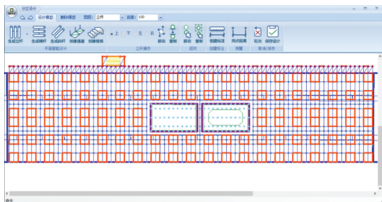


图 3 模架平面设计界面

Fig. 3 Interface of formwork frame plan design

2.2.2 模架受力分析验算

桥梁高支模在桥底部一定的空间内生成,限制其生成的构件包括桥身、桥墩、地面,这些限制条件都以桥梁 BIM 模型为载体。在前述桥梁结构快速建模的基础上,本文采用 Revit-Lookup 等辅助工具开发了模架空间分布设计软件,该软件通过读取桥梁各部分结构模型的实体信息,运用放射法获取空间任一点到结构模型实体外轮廓的距离,生成模架支护体系边界条件,并根据该条件生成相应线段的支护模型,实现对桥梁结构的避让,从而完成模架空间分布的设计。

高支模智能设计平台具有模架力学验算功能,平台将根据模架的空间分布,对模架的受力进行分析计算。行业规范、力学相关公式和结构力学求解器等被编制成相应的算法,集成到高支模智能设计平台中,用户仅需输入模架空间分布、外荷载、材料特性、形状尺寸等参数,平台便可根据相应算法自动计算模架受力情况。

模架的力学验算主要包括以下内容。

- 1) 模板竹胶板的强度验算和挠度验算,即 $\sigma_{\max} \leq [f_m], \omega_{\max} \leq [\omega]$ 。
- 2) 主龙骨的强度验算和挠度验算,即 $\sigma_{\max} \leq [\delta_{\text{主}}], \omega_{\max} \leq [\omega]$ 。

3) 次龙骨的强度验算和挠度验算,即 $\sigma_{\max} \leq [\delta_{\text{次}}], \omega_{\max} \leq [\omega]$ 。

4) 立杆的稳定性验算,不组合风荷载时轴心力 $\frac{N}{\varphi A_0} \leq [f_c]$,组合风荷载时 $\frac{N}{\varphi A_0} + \frac{M_w}{W} \leq [f_c]$ 。

5) 基础的地基承载力验算、混凝土垫层抗压抗冲切验算。

其中, $\sigma_{\max}$ 为计算最大弯拉应力, $[f_m]$ 为模板抗弯强度设计值, $\omega_{\max}$ 为计算最大挠度, $[\omega]$ 为最大容许挠度值, $[\delta_{\text{主}}]$ 为主龙骨(型钢)抗弯强度设计值, $[\delta_{\text{次}}]$ 为次龙骨(方木)抗弯强度设计值, N 为计算立杆所代表的脚手架柱段范围内轴心力的设计值, φ 为轴心受压构件的稳定系数, A_0 为立杆的毛截面积, M_w 为计算立柱段风荷载产生的弯矩, W 为截面抗弯模量, $[f_c]$ 为立杆的抗压强度设计值。

完成模架受力计算之后,平台根据内嵌的规范数值自动判断各结构受力是否在允许范围内。如果验算不通过,平台会详细列出不符合要求的部位,用户可导出计算书查看,并对不合理参数进行适当修改;如果验算通过,则导出计算书和布置方案,进行下一步模架 BIM 模型的构建。

2.2.3 模架施工仿真模拟

在模架结构受力验算通过和杆件布置点位、间距等校核无误后,平台可由各类构件的空间分布及尺寸数据,快速生成桥梁高支模 BIM 模型,如图 4 所示。利用 BIM 三维可视化的特点,用户可直观、清晰地查看模架复杂部位的各处细节,并进行碰撞检测等设计冲突分析。

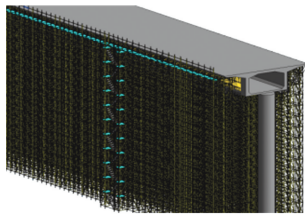


图 4 模架 BIM 模型

Fig. 4 BIM model of formwork

此外,可将生成的桥梁及高支模 BIM 模型与整理好的施工组织设计文件导入 Navisworks 进行关联,并在 Timeliner 中添加施工组织和施工技术要求等相关规则,让软件可以自动读取施工进度计划表中的任务名称、任务时间以及任务类型,根据读取的数据与 BIM 模型中项目参数值建立映射关系,并运用 BIM 技术的模拟性,通过可视化方式对施工工序、施工进度及资源配置的可行性进行施工过程的仿真模拟。

系统基于高支模 BIM 模型及施工组织计划文件,通过为每一个工程构件添加与施工流程、施工进度对应的时间属性,并根据时间轴的变化,创建施工仿真模拟动画,以三维可视化的方式动态演示桥梁整体和局部节点的施工过程以及施工场地布置情况,以多角度、全方位的视觉体验对桥梁施工全过程进行推演,对施工组织计划的安全性、可行性和合理性进行分析,为施工组织设计的分析评价及优化调整提供了有效的途径和方法。对确保施工方案和施工组织计划的可行性、合理性,对确保桥梁施工过程安全、顺利地进行具有重要作用。

2.2.4 设计结果输出与设计优化

确定设计方案之后,高支模智能设计平台可根据所生成 BIM 模型的相关参数信息,自动完成模架的平面图、立面图、断面图等施工图设计,并输出相应的 CAD 图纸;另外平台可根据 BIM 信息化的特点自动进行工程量统计,并导出工程量清单,节省人力的同时减少人工计算带来的差错,显著提高效率。

借助高支模智能设计平台的快速建模能力和分析计算能力,在模架设计过程中一旦发现问题,可在短时间内对方案进行调整,再建模,再检测,直至全部解决设计问题,是一个“设计→建模→检测→设计”的循环过程。另外,可生成多种不同布置方案所对应的模型,对不同方案的工程复杂度、施工情况、工程量等进行对比分析,确定最为合理的方案。

3 高支模智能设计系统应用

3.1 工程概况

某景观桥工程位于濮阳新区东、西龙湖的连接渠,桥梁长度 150m。上部结构采用变截面预应力混凝土现浇箱梁,最大梁高 8.4m,最小梁高 3.2m,变高段梁高采用圆曲线变化;下部结构桥墩采用矩形实体墩,桩基均采用灌注桩基础。

桥梁采用满堂支架一次落架施工,分两幅,两幅间设 2cm 施工缝,桥面铺装连续,铺装总厚度为 18cm 的防水混凝土及沥青混凝土,两者之间设防水层。

3.2 高支模智能设计

1) 根据建模需要整理相关的项目资料,包括桥梁设计图纸、施工进度安排、材料特性等。

2) 将桥梁图纸中的箱梁截面、桥墩截面、平曲线、竖曲线等导入平台,快速生成桥梁 BIM 模型。

3) 由桥梁模型获得模架设计空间,输入立杆、水平杆、斜杆、通道、楼梯等的布置参数,完成模架

空间分布设计。

4)输入各类构件的材料特性参数、荷载参数等进行力学验算,并生成计算书。

5)验算通过后生成高支模模型,并利用设计冲突分析和施工模拟等进行设计校核。

6)如果存在设计问题再进行优化设计,再检测,直到解决全部问题,并一键生成桥梁及高支模 BIM 模型(见图 5)。

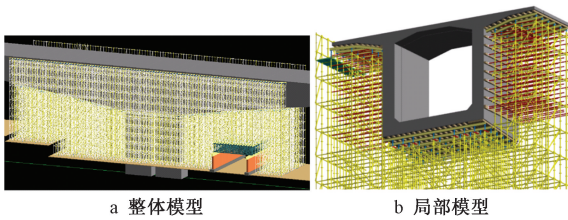


图 5 高支模 BIM 模型

Fig. 5 BIM model of high support formwork

7)完成上述所有步骤,得到最终的高支模设计方案,输出高支模设计图纸和工程量清单(见图 6, 7)。

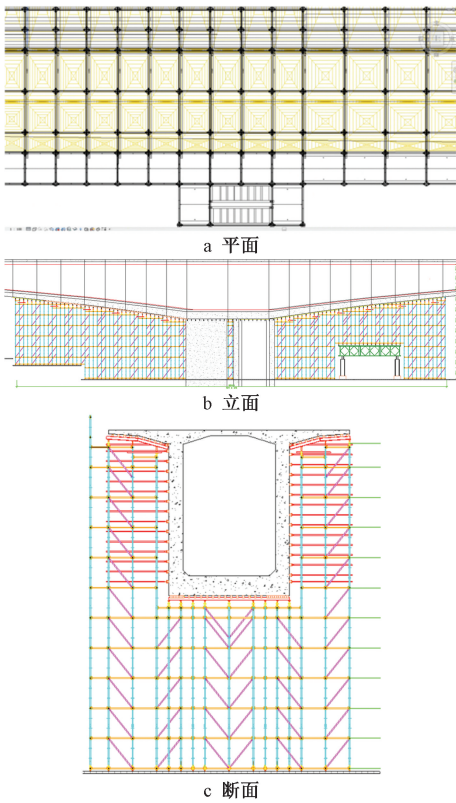


图 6 高支模设计图纸

Fig. 6 Design drawing of high support formwork

4 结语

针对传统高支模设计存在的图纸表达不够清晰完整、方案修改工作量大等问题,根据 BIM 技术可视化、优化性、信息完备性、可出图性的特点,本

序号	构件	工程量	计量单位
1	盘扣式底座	168	个
2	盘扣式立杆2000	2776	根
3	盘扣式立杆1500	80	根
4	盘扣式立杆1000	80	根
5	盘扣式横杆900	3149	根
6	盘扣式横杆600	277	根
7	盘扣式横杆1800	1507	根
8	盘扣式横杆1200	121	根
9	盘扣式横杆1500	416	根
10	盘扣式横杆2100	208	根
11	盘扣式斜杆H2000L600	85	根
12	盘扣式斜杆H2000L900	595	根
13	盘扣式斜杆H2000L1800	68	根
14	盘扣式斜杆H2000L1200	34	根
15	盘扣式斜杆H2000L1500	51	根
16	盘扣式斜杆H2000L0	34	根
17	盘扣式斜杆H2000L2100	17	根
18	挂钧跳板720X900	576	个
19	挂钧跳板720X1800	480	个
20	挂钧跳板720X1200	48	个

图 7 高支模工程量清单

Fig. 7 High support formwork bill of quantities

文对基于 BIM 技术的高支模智能设计进行了研究,主要研究内容及成果如下。

1)对桥梁和高支模参数化快速建模进行分析研究,建立相应的数据库,以 Revit 为 BIM 平台,基于 BIM 二次开发技术,开发了快速建模软件。

2)根据高支模的构件特点和布置特点,利用 Revit API 二次开发了基于 BIM 的高支模智能设计平台,包括空间分布设计、受力分析验算、设计校核、快速建模、输出设计结果、设计优化功能,解决了传统高支模设计效率低下、人工设计易出错的问题,实现了高效、准确的高支模设计。

3)本文研发的高支模施工仿真模拟系统,以三维可视化的方式动态演示桥梁整体和局部节点的施工过程,以多角度、全方位的视觉体验对桥梁施工全过程进行推演,为施工组织设计的分析评价及优化调整提供了有效的途径和方法。

4)本文研发的集高支模空间分布设计、受力分析验算、设计冲突分析、工程量校核、设计合理性校验、施工模拟,以及设计图纸和工程量清单自动生成,高支模交互设计功能于一体的桥梁高支模三维可视化智能设计系统已在实际工程项目中得到应用,对提高高支模结构的设计效率和设计质量具有重要意义。

参考文献:

[1] 崔加文,郝建敏,宫广娟,等. 模架安全监测技术在高支模工程中的应用 [J]. 施工技术(中英文), 2022, 51 (2): 93-96.
CUI J W, HAO J M, GONG G J, et al. Application of formwork safety monitoring technology in high-formwork project [J]. Construction technology, 2022, 51 (2): 93-96.
[2] 张恒,郭艳. 钢管模板支架在长陡坡屋面施工中的应用 [J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(11): 82-85.
ZHANG H, GUO Y. Application of steel formwork support in

construction of long steep slope roof[J]. Construction technology, 2022, 51(11): 82-85.

[3] 魏欢. 基于 BIM 技术的高支模施工安全风险动态管理研究 [D]. 兰州:兰州理工大学,2020.

WEI H. Research on dynamic management of safety risk in high formwork construction based on bim technology [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.

[4] 刘浩研. 高支模坍塌事故致因分析与对策研究[D]. 北京:中国矿业大学,2019.

LIU H Y. Study on collapse accident of high supporting formwork and countermeasure[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.

[5] 朱记伟,蒋雅丽,翟翌,等. 基于知识图谱的国内外 BIM 领域研究对比[J]. 土木工程学报,2018,51(2):113-120.

ZHU J W, JIANG Y L, ZHAI Z, et al. Comparative research of BIM based on mapping knowledge domains at home and abroad [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(2): 113-120.

[6] 孙钰钦. BIM 技术在我国建筑工业化中的研究与应用[D]. 成都:西南交通大学,2016.

SUN Y Q. BIM technology study and application in building Industrialization of our country [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2016.

[7] 王斌,杨鸿. BIM 技术在公路设计中的应用现状与展望[J]. 公路,2019,64(10):229-232.

WANG B, YANG H. Application status and prospect of BIM technology in highway design [J]. Highway, 2019, 64 (10): 229-232.

[8] 张建平,李丁,林佳瑞,等. BIM 在工程施工中的应用[J]. 施工技术,2012,41(16):10-17.

ZHANG J P, LI D, LIN J R, et al. Application of BIM in engineering construction[J]. Construction technology, 2012, 41 (16): 10-17.

[9] 王婷,池文婷. BIM 技术在 4D 施工进度模拟的应用探讨[J]. 图学学报,2015,36(2):306-311.

WANG T, CHI W T. Discussion on the application of BIM technology in the field of 4D construction schedule [J]. Journal of graphics, 2015, 36(2): 306-311.

[10] 杨麒麟. 基于 BIM 的可视化协同设计应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

YANG Q L. Applied reasearch on BIM-base dcollaborative visualization design [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[11] 刘向阳,吴健,刘国图,等. 基于 BIM 的公路全寿命周期管理平台构建与应用[J]. 公路,2016,61(8):131-137.

LIU X Y, WU J, LIU G T, et al. BIM-based life-cycle management and application for highway project [J]. Highway, 2016, 61(8): 131-137.

[12] 范学宁. 基于 BIM 技术的高支模施工安全管理研究[D]. 西安:西安工业大学,2018.

FAN X N. Research on safety management of high formwork based on BIM [D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2018.

[13] 吕布. 基于 BIM 技术高支模参数化设计与虚拟仿真[D]. 荆州:长江大学,2020.

LÜ B. Parametric design and virtual simulation of high formwork based on BIM technology [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.

[14] 车轶,薛刚,鲍喜臣,等. 基于 BIM 轻量化平台的高支模自动监测系统应用研究[C]. 2020 年工业建筑学术交流会论文集,2020.

CHE Y, XUE G, BAO X C, et al. Research on the application of high formwork automatic monitoring system based on BIM lightweight platform [C]. Proceedings of the 2020Industrial Architecture Symposium,2020.