

基于 GIS 与 BIM 集成模型的边坡工程 仿真技术研究

杨 锦¹, 张 卓¹, 张燕廷¹, 房昱纬², 汪 超³, 周永强³, 付晓东³

(1. 云南省交通发展投资有限责任公司, 云南 昆明 650103;

2. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司, 云南 昆明 650200;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 为实现边坡工程三维地质体与工程结构体模型的集成, 聚焦边坡工程中的三维地质体与工程结构体这两大关键要素, 开展了基于多源数据的三维地质体建模方法研究, 并针对边坡工程三维结构体模型, 基于 Revit 族文件进行了二次开发程序的设计。从标准架构形式、几何表达方式等多个维度, 分析了 GIS 和 BIM 技术的特点与差异。以典型滑坡工程为例, 利用该方法分别构建了三维地质体和抗滑桩结构体模型, 并将二者进行融合, 进行仿真数值模拟。研究结果表明: 通过采用 NURBS(非均匀有理 B 样条)曲面拟合方法, 突破了地质体与结构体模型的集成处理难题, 将三维地质体 GIS 模型和包含丰富属性信息的 BIM 结构体模型结合在了一起。模拟结果显示抗滑桩能有效改善边坡的位移问题, 实现了边坡工程三维集成模型的构建及数值计算分析, 验证了该建模技术方法的有效性。

关键词: 边坡工程; GIS 模型; BIM 模型; 集成模型; 数值仿真

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0125-08

Simulation Analysis Technology of Slope Engineering Based on GIS and BIM Integrated Model

YANG Jin¹, ZHANG Zhuo¹, ZHANG Yanting¹, FANG Yuwei², WANG Chao³,
ZHOU Yongqiang³, FU Xiaodong³

(1. Yunnan Transportation Development Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650103, China;

2. Yunnan Institute of Transport Planning and Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock
and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: To address this issue and achieve the integration of three-dimensional geological and engineering structure models for slope engineering, this work focuses on two critical elements in slope engineering-three-dimensional (3D) geological bodies and engineered structural bodies. A 3D geological modeling method based on multi-source data was investigated, and a secondary development program was designed for 3D structural modeling in slope engineering using Revit family files. The characteristics and differences between GIS and BIM technologies were analyzed from multiple perspectives, including standard framework and geometric representation. Taking a typical landslide project as an example, 3D geological and structural models were constructed and integrated for numerical simulation. The results showed that by employing Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) surface fitting, the integration challenges between geological and structural models were overcome, combining GIS-based 3D geological models with BIM structural mod-

收稿日期: 2025-11-07

修稿日期: 2026-01-19

基金项目: 云南省重大科技专项(202303AA080010); 国家自然科学基金资助项目(52179117)

作者简介: 杨 锦(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事公路工程等方面工作。E-mail: 2306185@qq.com

作者简介: 付晓东(1986—), 男, 博士, 研究员, 主要从事边坡工程灾害机理与数值方法等方面的工作。E-mail: xdfu@whrsm.ac.cn

els containing rich attribute information. The results demonstrate that anti-slide piles effectively mitigate slope displacement issues. This work successfully achieved the construction of an integrated 3D slope engineering model and numerical analysis, validating the effectiveness of the proposed modeling approach.

Keywords: slope engineering; GIS model; BIM model; integrated model; numerical simulation

近年来,随着我国边坡工程建设在水利、交通等领域迅猛发展,亟需数字化转型^[1-2]。建筑信息模型(BIM)和地理信息系统(GIS)的数字化建造方法日益受到业界关注,这种技术融合显著提高了工程建设领域的信息化程度。

GIS 着重应用于描述地面上物体的地理信息和管理数据库系统。GIS 技术可以根据勘探剖面、钻孔与地表等高线信息建立三维地质体模型。最早对三维地质建模技术进行研究的是陈昌彦等^[3],针对三峡永久船闸边坡工程构建了岩体三维数字模型^[4-6]。随着技术进步,我国自主研发的 Visual Geo^[7]、3DMine 等地质建模软件相继问世^[8-9]。为进一步提升 GIS 三维地质模型的多源数据融合能力,雷鹏等^[10]采用坐标转换技术,实现了异构地质数据的高精度集成处理。针对地质建模领域普遍存在的建模效率与精度平衡问题,肖艳云等^[11]采用多源数据协同约束策略,通过耦合钻孔数据自动建模与基岩产状推演技术,显著提高了断层等不连续地质界面的建模准确性。面向城市地质三维建模的特殊需求,郝明^[12]进一步发展了融合多源异构地质数据与地质认知模型的智能建模体系。田雪峰等^[13]基于地质大数据理念,构建了“剖面引导-钻孔校验”的递进式建模框架,为复杂地质体的快速精确建模提供了新的技术路径。

BIM 技术借助三维数字化建模手段,整合工程项目的各类数据信息构建虚拟建筑模型,实现对真实场景的仿真模拟。在桥梁隧道工程领域,Autodesk、Bentley 和 Dassault 三大系列软件产品占据着主导地位,为各类桥隧工程项目的数字化建模与分析提供了多样化的技术手段。陈以飞等^[14]实现了隧道模型的高精度可视化重建;覃延春^[15]验证了 Catia 在复杂隧道设计中的技术优势;程秋雨等^[16]利用 MicroStation 软件研究了盾构隧道参数化建模方法。在建模效率提升方面,宋晓峰^[17]基于 Revit-Dynamo 平台开发了快速自动建模方法;而黄璇^[18]则通过 Rhino-Grasshopper 实现了异型桥梁的参数化建模,充分展现了该技术的特点与优势。谭尧升等^[19]开发的施工管理平台实现了工程多要素的数字化集成;傅站工等^[20]与王建伟等^[21]的研究则进一步拓展了 BIM 技术在水利工程中的应用场景,为

行业数字化转型提供了技术支撑。

虽然 BIM 与 GIS 在各自领域的三维建模技术已趋成熟,但由于数据标准、几何表达和属性定义等层面的系统性差异,二者难以实现无缝数据对接,这种互操作性的缺失显著降低了信息协同的效率。在 BIM-GIS 融合建模与数值仿真领域,Fabozzi 等^[22]基于 Bentley 平台分别构建隧道结构模型与三维地质模型,通过 .dwg 格式实现与 Plaxis 软件的数据交互,完成网格划分与数值计算。类似地,马新根等^[23]开发了基于 KUBRIX 插件的集成方案,实现 Rhino3D 的 NURBS 曲面模型与 Flac3D 分析软件的无缝对接。上述研究表明,多软件协同正成为复杂工程仿真的重要技术路径。

国内外对 BIM 技术运用于岩土边坡的相关研究与成果相对而言较为稀少,边坡工程的相关仿真模拟研究更多只是三维地质体模型单独进行数值计算,结构体模型参与的情况较少。当前对 BIM + GIS 的研究更偏重于对工程领域的可视化处理,应用于岩土边坡领域集成数值计算的应用相对较少。因此,如何基于 BIM + GIS 强大的信息化、可视化功能对岩土边坡的仿真数值模拟亟待开展研究。当前 BIM + GIS 融合模型在边坡工程数值仿真中存在明显的技术局限性:①模型精度难以满足精细化计算要求;②地质体与结构体的融合度不足;③未能充分考虑支护结构(挡土墙、锚杆等)的力学效应。这种模型与现实的偏差导致计算结果与工程实际存在显著差异。因此,开发高精度的工程族建模方法,实现地质-结构模型的有机集成,对提升数值模拟真实性具有重要工程价值。

1 基于 BIM 技术的边坡工程结构体模型建模方法

1.1 三维结构体模型建模方法

本研究基于 BIM 技术框架,采用自下向上的建模方法,依据行业设计规范要求,开发了边坡支护结构参数化构件库。通过 Visual Studio 平台对 Revit 进行二次开发,实现了包含点、线、面、体多维度特征的参数化建模系统(图 1)。该技术路线确保了支护结构模型的规范符合性与工程适用性。

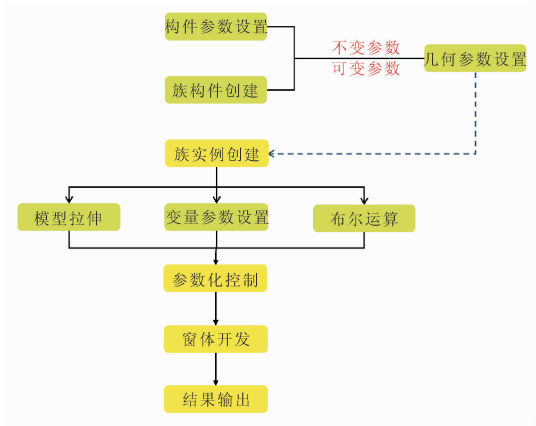


图 1 三维地质体模型建模流

1.1.1 三维结构体模型构建流程

基于参数化建模技术,通过程序化参数调控机制,实现了工程结构体属性参数与几何特征的双向协同优化,从而显著提高了三维建模的适应性与精确度。针对边坡工程中种类繁多的结构体对象,为确保参数化建模的科学性与规范性,深入剖析其几何特征并严格遵循相关施工设计规范至关重要。基于此,提出以下建议:

- (1) 数据收集与整理:在建模工作启动前,需开展全面且系统的结构体数据收集与整理工作。
- (2) 几何特征整理与族库构建:在完成数据收集后,依据施工设计规范,深入整理各类结构体的几何特征,明确其空间形态、拓扑关系等要素。构建起涵盖多种边坡结构体的边坡构件族族库,为不同边坡工程场景提供丰富的模型资源。
- (3) 参数控制窗体开发:基于已构建的结构体构件库,为进一步提高建模效率与用户交互性,开展结构体参数控制窗体开发工作。

1.1.2 三维结构体模型构建方法

- (1) 边坡支护结构特征及参数
- 边坡支护结构主要包括挡土墙、锚杆(或锚索)、抗滑桩以及格构梁等,如图 2—图 5。

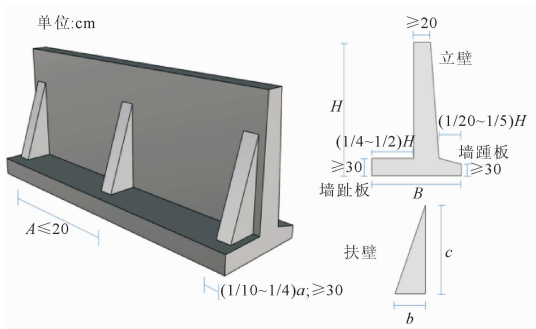


图 2 挡土墙设计示意图

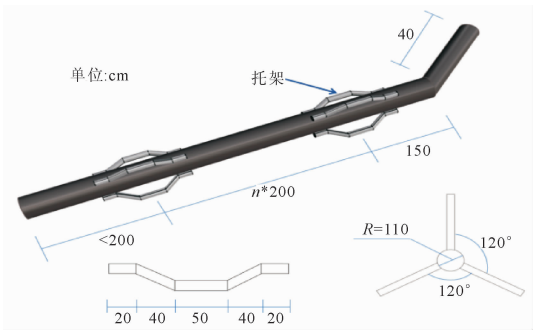


图 3 锚杆施工设计示意图

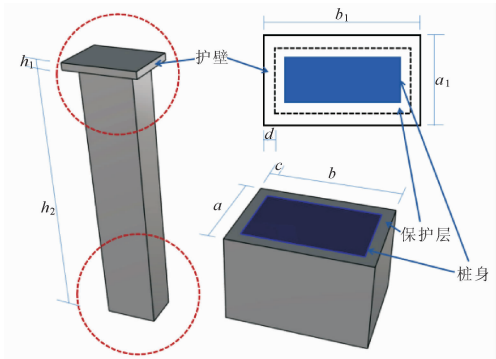


图 4 抗滑桩设计示意图

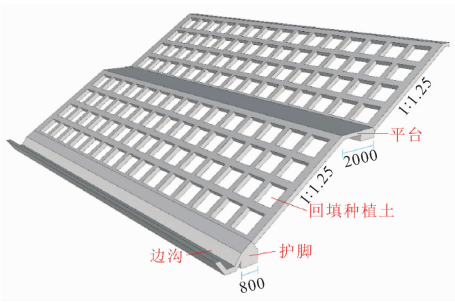


图 5 格构梁设计示意图

边坡支护体系通过结构间的协同工作机制,形成复合防护效应:①抗滑桩提供抗剪阻力;②锚杆增强岩体整体性;③挡土墙承担侧向土压力。

(2) 构件族例的构建方法

由于 Revit 软件最初主要针对建筑工程、给排水暖通等领域设计,其内置组件库缺乏专门针对边坡工程的结构构件。因此需要依据边坡工程特点及相关施工规范,自主创建适配的边坡结构构件族,并完成参数化设置与交互界面开发,以实现模型的便捷调用和参数驱动修改功能。

通过 Revit 二次开发实现边坡支护族时,需经历类型选定、参数化建模、程序编码、实例生成、参数调试及效果验证等关键环节。开发过程中需综合运用 Revit API 与 .NET 框架等技术手段,既要确保族

构件具备参数化调节能力,又要兼顾代码执行效率与可维护性。本文将通过程序开发方式,具体演示基于 Revit 的边坡支护族创建流程。

在边坡工程 Revit 二次开发中,Revit API 功能分装于 RevitAPI.dll 与 RevitAPIUI.dll。前者提供模型操作、参数管理等基础接口,后者支持用户界面交互。二者支持 C#、C++ 等语言调用。本文基于开发便捷性等考量,选 C# 为开发语言,采用外部命令模式。此模式降低开发复杂度,提升效率。接口开发流程与步骤详见图 6,流程设计贴合实际开发环境,保障可操作性。

在以上二次开发的基础上,利用 C# 语言进行边坡支护挡土墙族的开发,如图 7 所示,清晰展示了扶壁式挡土墙局部构建顺序。

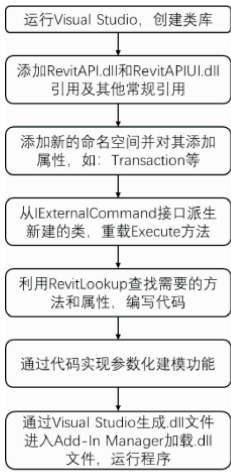


图 6 Revit 接口开发流程图

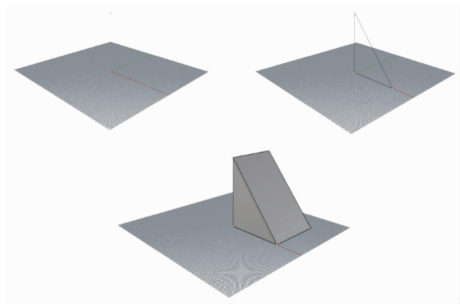


图 7 模型构建顺序示意图

(3) 构件族库

通过软件手动创建或程序生成的族实例仅仅是独立的个体。针对工程项目中多元结构体的建模需求,本文在现有成果基础上,研发了一套参数化边坡支护结构建模体系。该技术通过建立标准化的结构构件族并集成至族库系统,构建了可动态更新的边坡工程结构资源数据库。

1.2 结构体族参数化建模方法

在边坡支护族构件参数化建模前,需依地质、力学与施工要求设置几何尺寸(长、宽、高等)、材料属性(模量、强度等)、荷载等动变量,构建完整建模流程。如图 8 所示,Revit 二次开发参数化建模遵循需求分析、设计模型、编写代码、集成测试、编写文档、成果应用六步。

按照参数化建模流程,系统性地编写了挡土墙族的程序化构建代码。在开发过程中,通过合理组织命名空间(Namespace)实现代码模块化管理;利用类库(Class Library)封装核心功能模块;采用接口(Interface)技术确保功能扩展性。具体实现包括:动态表单创建、事务处理机制以及参数化设置等高级功能,这些技术手段有效保障了建模过程的可靠性和灵活性。

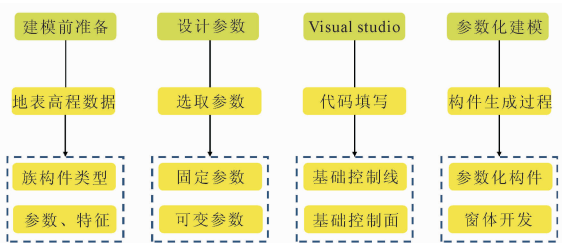


图 8 Revit 二次开发参数化建模流程

2 基于模型集成的边坡数值仿真分析技术

2.1 基于 GIS 的三维地质体模型建模方法

2.1.1 三维地质体模型建模方法

针对边坡工程多源数据建模需求,提出了一套完整的三维地质体建模技术路线,具体实施流程为:

(1)数据采集阶段:采用无人机遥感技术进行边坡地表信息采集,通过摄影测量处理生成高精度三维实景模型,并基于数字表面模型(DSM)提取地形高程特征数据。

(2)地层建模阶段:整合工程地质钻孔数据与地表等高线信息,运用空间插值算法构建分层数字高程模型(DEM),实现地层界面的三维数字化表达。

(3)模型融合阶段:开发基于 NURBS 曲面的地质建模程序,通过模型剖切、布尔运算等三维建模技术,将地表模型与地层模型进行有机融合,最终生成符合工程要求的三维地质体数值模型。

2.1.2 基于多层 DEM 的地层建模方法

采用基于多层数字高程模型(DEM)的地层建模方法,以岩性特征作为基本划分依据。针对勘探数据离散、稀疏且分布不规则的特点,借鉴二维空间

数学建模理论,创新性地提出多层DEM建模技术。该方法首先对各岩土层界面进行空间插值拟合,继而通过岩性属性对多层DEM进行交叉剖分,构建符合地质规律的三维地层骨架模型。进一步整合特殊地质构造及人工建筑等空间要素,最终形成完整的三维地下空间表征体系。

基于数字高程模型的建模原理,对各岩土层分界面的离散采样数据进行空间插值处理,构建反映各层位三维空间展布特征的分层DEM模型。通过统一空间参考系统实现多层DEM的精确配准,从而建立 (X,Y) 平面位置与多个高程值的映射关系。

在理想地质条件下,各地层界面互不相交,可通过连接相邻层面的网格节点构建六面体单元,形成具有完整拓扑结构的局域拓扑模型(LTM),实现多层DEM的有机融合。然而实际地质环境中常存在地层交错等复杂现象,因此需先进行层位关系评估与地质划分,再进行三维建模。

2.1.3 NURBS 曲面拟合程序开发

NURBS(非均匀有理B样条)是一种广泛应用于计算机辅助设计的参数化曲面表达形式,主要用于二维或三维几何形体的数学描述。该技术体系包含四个关键要素:控制顶点集合、参数化方向矢量、定义在 $[0,1]$ 区间内的双变量插值函数及其对应的权重系数。基于这些要素的三维曲面重建技术,构成了NURBS曲面重构的核心内容。以下是具体NURBS曲面拟合程序开发步骤的详细阐述:

(1) 定义变量:定义 p 为样条次数,决定了曲面的光滑度与灵活性;定义 U 为节点向量,其元素需满足非递减序列,且数量满足 $m+p+1$ (m 为控制点数量减一);定义 t 为输入的参数,取值范围在节点向量 U 的有效区间内。

(2) 计算基函数阶数:基函数的阶数为 $p+1$,即样条次数加一,这决定了基函数的连续性与复杂性。

(3) 计算节点数量:根据节点向量 U 的长度 n_{knots} ,计算基函数的节点数量,确保满足 $n_{\text{knots}} = m + p + 2$ (对于开放均匀B样条)。

(4) 搜索 t 在 U 中的位置:若 t 等于 U 的最后一个元素,直接确定其位置为 $n_{\text{knots}} - p - 1$ (避免越界)。否则,采用线性搜索算法(如二分查找)高效定位 t 在 U 中的位置 k ,满足 $U_k \leq t < U_{k+1}$ 。

(5) 初始化0次基函数:创建长度为 $n_{\text{knots}} - 1$ 的零向量 N_0 ,用于存储0次基函数的值。根据节点区间,将 $N_0[k] = 1$ 若 $U_k \leq t < U_{k+1}$,否则为0。

(6) 计算基函数:使用嵌套循环遍历所有基函

数,从1次到 p 次。对于每个基函数 i 和阶数 j ,计算其在节点间的值。

(7) 更新基函数值:在每一阶的计算中,利用线性插值公式更新基函数值,确保基函数在节点处的连续性与光滑性。

(8) 返回基函数矩阵:将计算出的各阶基函数值存储在矩阵 N 中,其维度为 $(p+1) \times n_{\text{knots}}$ 。返回 N 作为当前参数 t 处的基函数矩阵,供后续曲面拟合使用。

如图9所示,展示了NURBS曲面拟合结果。

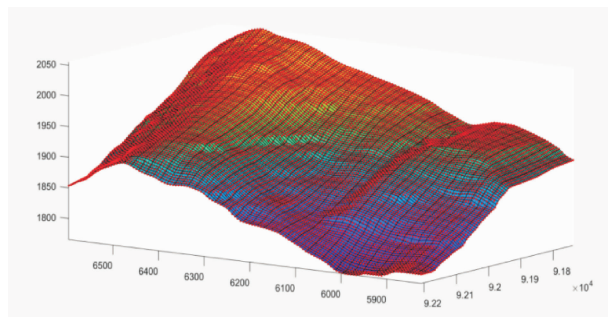


图9 NURBS 曲面展示

2.1.4 布尔运算与拓扑关系重构

在三维地质建模中,布尔运算作为核心算法之一,主要包括三类基本操作(如图10所示):①并集运算整合地质体单元,再现地层交互作用;②交集运算确定重叠区域,构建特殊地质构造;③补集运算计算集合差异,模拟风化剥蚀现象。这些运算为复杂地质现象的数字化表达提供了数学基础。

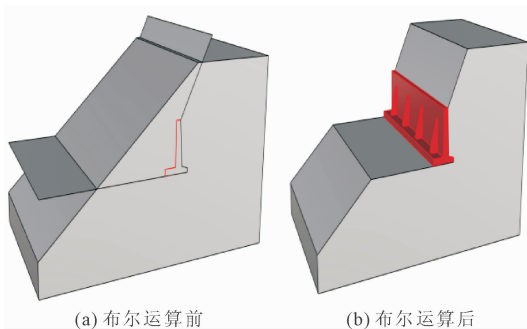


图10 布尔运算(切割与差集)示意

地质体拓扑关系涵盖邻接、包含与连接三类:邻接关系表征地质体边界点是否空间相邻,通过边界点集邻近性判定;包含关系体现一个地质体对另一地质体的完全空间嵌套,以内部点是否位于目标体内部为判据;连接关系反映地质体边界的拓扑连通性,通过边界点是否构成连续路径确定。建立与重构此类关系可精准描述地质体空间分布与形态,为

地质建模、分析及模拟提供拓扑框架。在布尔运算与拓扑操作中,需确保拓扑一致性(如避免边界自相交、非流形结构)与准确性(如精确判定空间包含),并采用半边数据结构等高效拓扑存储方案及并行计算、空间索引优化等算法策略,兼顾计算效率与结果精度。

2.2 BIM 与 GIS 模型集成技术

BIM 与 GIS 技术在三维地质建模领域各具优势:GIS 技术采用三角网表达方式构建的三维地质模型能够精确呈现边坡地形特征,但在数值模拟兼容性方面存在局限;而基于 NURBS 曲面构建的 BIM 模型则能更准确地表达工程结构特征。针对两种技术体系在数据结构和建模方法上的显著差异,本文提出以 NURBS 曲面作为统一媒介,通过数据格式转换与拓扑关系重构实现二者的有机融合。

基于 NURBS 曲面的几何特性,本文将集成模型中的空间实体划分为点、线、面、体四类基本元素,并在布尔运算过程中重建其拓扑关联。

针对地质-结构体协同建模的技术需求,提出以地层界面模型为基准框架的集成方法,在实施布尔运算与拓扑重构过程中,同步实现模型几何特征与拓扑逻辑的双重优化。

图 11 所示的集成建模成果表明,通过 GIS-BIM 融合技术构建的三维复合模型,兼具以下双重优势:高保真可视化呈现能力和高精度数值计算适用性。

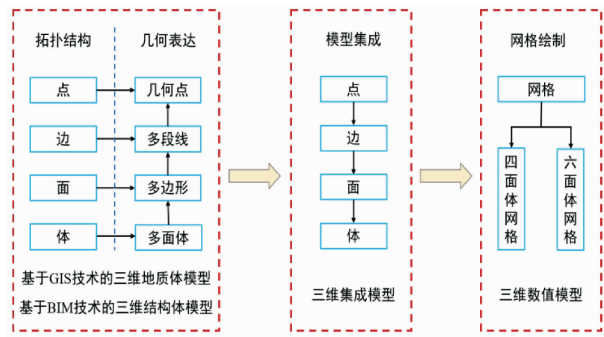


图 11 集成拓扑模型图

(1)三维结构体模型与三维结构体模型:按照“点→线→面→体”的建模路径生成多分辨率网格,实现地质-结构模型的协同可视化表达。

(2)三维集成模型:通过参数域映射与布尔运算,完成异源模型的空间融合与拓扑关系重构。

(3)三维数值模型:对三维地质体与结构体模型进行集成,并绘制网格,确保满足仿真数值模拟分析的需求。

基于 Gmsh 软件的跨平台集成方法,实现了

GIS-BIM 三维地质-结构模型的融合建模,有效整合了 GIS 在地质信息管理、空间分析及可视化方面的优势,以及 BIM 在结构体参数化建模与工程语义管理中的能力,显著提升了地质-结构多源异构数据的综合分析与可视化表达水平。

2.3 三维集成模型剖切与网格划分

Gmsh 在网格划分和数值模拟中的应用非常广泛,能够处理复杂的几何体和提供灵活的网格生成与优化功能。三维地质体模型分层剖切过程示意如图 12 所示。

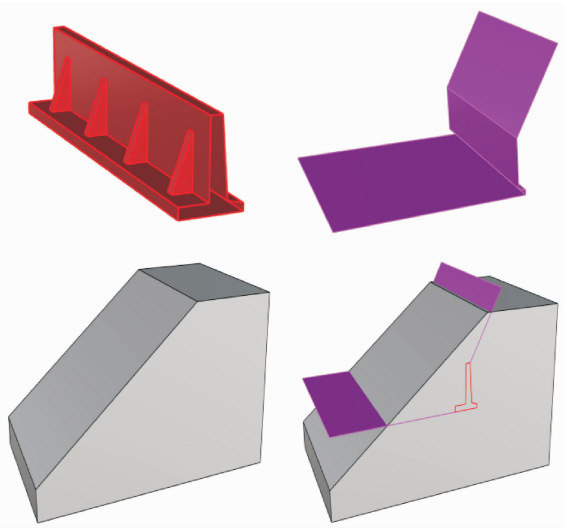


图 12 三维地质体模型分层剖切过程示意

采用 GIS-BIM 协同建模方法,分别建立边坡地质体模型与支护结构模型。通过对转换为 NURBS 曲面的地质模型进行二次处理,运用布尔运算实现开挖区域切割与支护结构差集运算,最终构建高精度的边坡工程集成模型。

通过引入改进型布尔运算引擎和几何切割算法,系统解决了地质-结构模型集成中的拓扑不一致问题,最终建立符合工程要求的三维统一模型。经过模型布尔运算处理后,绘制四面体网格并用于后续三维数值仿真模拟分析中,如图 13 所示。

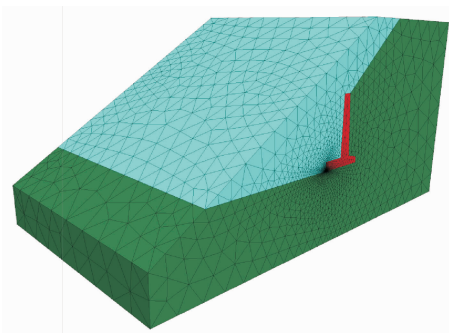


图 13 三维集成数值模型

3 典型边坡工程三维稳定性分析

3.1 工程概况

经现场勘察与分析,该土质滑坡发育于麻竹高速竹山出口以北 500 m 处的堵河右岸,属典型降雨诱发型滑坡。滑坡区在 9 月 23 日至 10 月 19 日期间累计降雨量达 330.5 mm,是主要诱发因素。从地形特征来看,滑坡体呈现明显的分区特征:后部为自然斜坡,坡度 30~40°,后缘与一条切割深度约 20 m 的冲沟相邻,形成 5~12°的缓坡平台;中部坡度约 25°;前部因人工开挖形成 35~50°的陡坡。滑坡前缘延伸至人工平整区(坡度 5°),并在房屋后方形成 3 m 高陡坎。滑坡体呈不规则形态,纵长 190 m,中后部宽约 100 m,前部宽 180 m,总面积 23 600 m²,平均厚度 16 m(变化范围 6.0~23.4 m),总体积约 37.76 万 m³,属中型中层土质滑坡。

3.2 三维地质体建模

基于无人机航测技术获取的仿地飞行数据,结合现场勘察成果,依据勘察设计资料,采用曲面重构算法生成了地层分界面(图 14 所示),最终建立了反映滑坡体空间分布特征的三维地质模型。

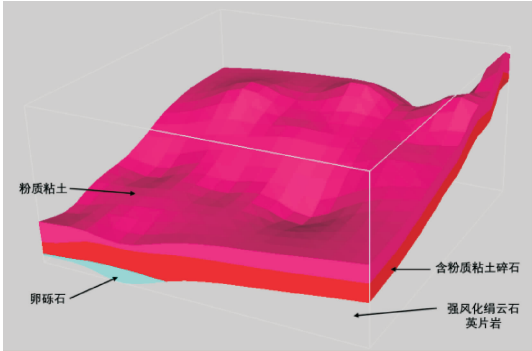


图 14 基于钻孔信息的三维地层模型

3.3 三维结构体建模

工程采用抗滑桩作为主要支挡结构,基于边坡工程勘察数据与设计参数,严格遵循行业规范要求,通过这一系列技术措施,最终构建了符合工程实际的三维支护结构模型。抗滑桩参数化建模如图 15 所示。

3.4 边坡工程三维模型集成

采用自主开发的 NURBS 曲面拟合程序,基于边坡工程勘察数据和三维地质建模成果,实现了模型构建。NURBS 曲面拟合如图 16 所示。

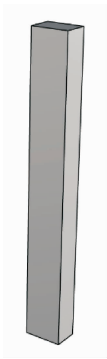


图 15 抗滑桩参数化建模

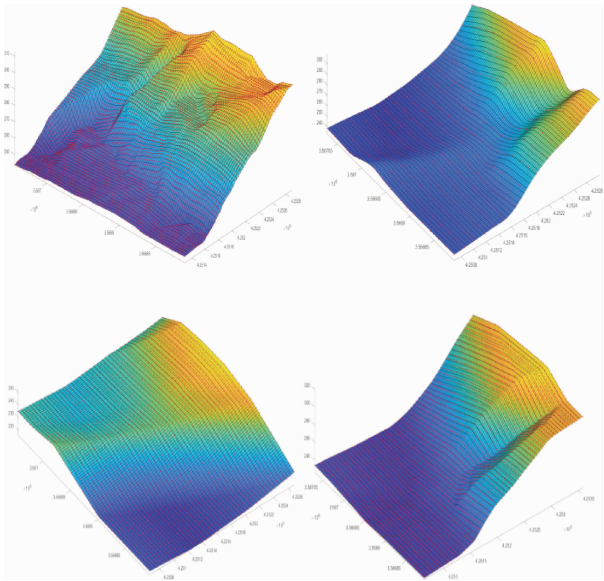


图 16 NURBS 曲面拟合

3.5 三维稳定性分析

基于 Mohr-Coulomb 弹塑性本构关系,建立了高填方边坡三维稳定性分析模型,其中模型底部采用固定约束条件,两侧施加法向位移约束,坡顶设为自由边界。数值模型构建过程中(如图 17 所示),根据边坡支护设计方案,结合室内土工试验数据和现场地质勘察成果,确定了计算分析所需的岩土体物理力学参数(详见表 1)。

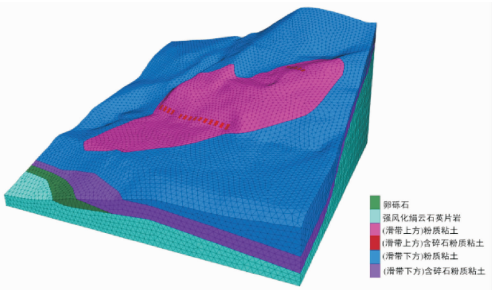


图 17 仿真数值模型

表 1 岩体物理力学计算参数

项目	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa
粉质黏土	19.53	30	20	0.35	22	7
含碎石粉质黏土	19.46	150	35	0.30	167	77
卵砾石	22.50	0	45	0.25	267	160
强风化绢云石英片岩	24.30	200	35	0.25	667	400
滑带土	19.45	8	10	0.35	22	7

图 18 展示了该滑坡区域的位移分布特征,通过位移云图可清晰识别出以下变形规律:①滑坡体呈现明显的非均匀位移特征,其中右侧区域位移量最大,监测数据显示最大位移值达 3.5 m;②滑床下部区域位移量较小,表现出较好的稳定性;③滑体上部在滑带作用下发生整体性滑移;④滑坡体左前缘已出现渐进式破坏迹象,破坏区呈向下延伸发展趋势。

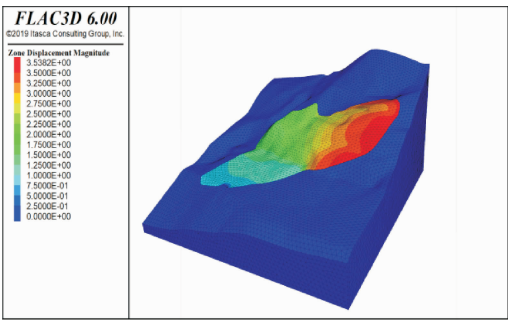


图 18 滑坡位移云图

图 19 展示了采用抗滑桩支护后的边坡位移分布特征,通过对比分析可以发现:①支护工程实施后,滑坡变形得到有效控制,最大位移量由治理前的 3.5 m 降至 0.38 m,降幅达 89%;②位移场分布呈现明显的区域差异性,仅在局部区域出现较小位移;③整体位移场趋于均衡,未出现明显的位移集中区。数据表明,该支护方案显著改善了边坡稳定性,使滑坡危险性得到有效控制。

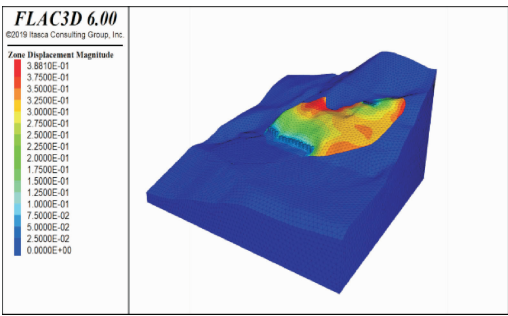


图 19 支护后滑坡位移云图

4 结 论

(1) 在技术应用层面,将 BIM 技术引入边坡工

程领域。针对锚杆、挡土墙等工程结构体的复杂几何特征,基于 Revit 平台开发了参数化建模方法,建立了完整的数字化建模流程。这一突破使得 BIM 技术能够更好地服务于边坡工程建设,为工程结构体的数字化表达提供了标准化解决方案。

(2) 在模型集成方面,提出了基于 NURBS 曲面的建模方法。通过开发曲面拟合技术,实现了地质体模型的参数化表达。采用网格映射和公共面约束等先进算法,成功完成了集成模型的四面体网格划分,为后续的数值分析奠定了坚实基础。这一技术路径有效解决了异源模型的数据融合难题。

(3) 在工程实践方面,选取典型滑坡治理工程作为案例,构建了包含完整地质与结构信息的三维数值模型。通过对比支护前后的位移场分布特征,定量评估了治理效果。模拟结果表明,支护结构的设置使滑坡体变形得到显著控制,最大位移量减少约 89%,验证了本技术方案的工程实用价值。

参考文献:

[1] 戴培柱,李明智,陈 川,等.高填路基边坡工后变形特征及预测模型研究[J].公路工程,2024,49(6):107-112.

[2] 雷 航,刘天翔,程 强,等.山区公路深厚堆积体滑坡变形机理及支护措施[J].公路工程,2025,50(4):132-139.

[3] 陈昌彦,张菊明,杜永廉,等.边坡工程地质信息的三维可视化及其在三峡船闸边坡工程中的应用[J].岩土工程学报,1998,20(4):4-9.

[4] 张菊明,王思敬,杜永廉,等.边坡地质信息三维数学模型及其图形显示[C]//中国岩石力学与工程学会.面向 21 世纪的岩石力学与工程:中国岩石力学与工程学会第四次学术大会论文集:中国岩石力学与工程学会,1996:10.

[5] 朱良峰,潘 信,吴信才.三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J].岩土力学,2006,27(5):828-832.

[6] 陈国良,刘修国,盛 谦,等.一种基于交叉剖面的地质模型构建方法[J].岩土力学,2011,32(8):2409-2415.

(下转第 172 页)

[6] 刘曙光,方琦,钟桂辉,等. 新型装配式悬臂混凝土挡土墙承载性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020,48(7):937-944,952.

[7] 章宏生,沈振中,徐力群,等. 新型装配扶壁式挡土墙结构特性有限元分析[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(3):145-150,189.

[8] 桂云,余勇胜,吴应雄,等. 可恢复功能预制装配式损伤可控钢质节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2021,54(8):87-100.

[9] 雷崇,孙波,徐军林,等. 装配整体式地下车站中板大开孔力学性能研究[J]. 铁道工程学报,2022,39(10):87-93.

[10] 刘继良,王宝民,初明进,等. 不同轴压比下榫卯接缝装配整体式剪力墙受弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2021,38(11):79-87.

[11] 祎霖,李易,赵子栋,等. 装配整体式混凝土框架结构抗连续倒塌试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(6):117-127.

[12] Kim S, Lee D E, Kim Y, et al. Development and application of precast concrete double wall system to improve productivity of retaining wall construction[J]. Sustainability, 2020,12(8):34-54.

[13] Farhat M, Issa M, Prado B F J. Pull-out behavior of headed anchors used in a totally prefabricated counterfort retaining wall system[J]. PCI J, 2019,64(1):81-98.

[14] Min K N, Lee J W, Lee J G, et al. Field application of a precast concrete-panel retaining wall adhered to in-situ ground[J]. The Journal of Engineering Geology, 2016,26(1):51-61.

[15] 章锦洋,吴京,谢鲁齐,等. 可更换耗能连接组件的装配式混凝土柱脚抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(11):51-62.



(上接第 132 页)

[7] 李明超. 大型水利水电工程地质信息三维建模与分析研究[D]. 天津:天津大学,2006.

[8] 田小甫,张硕,贾雷,等. 三维地质建模技术在北京地铁建设工程中的应用研究——以车公庄西站为例[J]. 科学技术与工程,2012,12(25):6362-6368.

[9] 田玉培,王俊,刘文文. 城市地下空间三维地质建模的研究及实现[J]. 现代矿业,2021,37(8):49-52,55.

[10] 雷鹏,黄天尘,党晓伟,等. 智能化煤矿 GIS 地测协同多源信息数据集成处理模型[J]. 能源与环保,2023,45(11):166-172.

[11] 肖艳云,刘敬,李文敬,等. 基于多源数据的三维地质建模——以东莞市滨海湾新区为例[J]. 华南地质, 2023,39(3):548-557.

[12] 郝明. 多元复杂地质结构城市地质三维建模技术研究及示范应用[D]. 武汉:中国地质大学,2023.

[13] 田雪峰,王金林,张征峰,等. 基于多源数据的三维地质建模与应用[J]. 新疆地质,2022,40(3):456-459.

[14] 陈一飞,曹顺,李芳,等. 基于 3dmax 的虚拟隧道建模[J]. 电脑知识与技术,2018,14(20):262-264.

[15] 覃延春. 基于 Catia 和 Micro Station 的隧道 BIM 设计比较[J]. 西部交通科技,2019(1):132-135.

[16] 程雨秋,王国光,杨礼国,等. 盾构隧道三维参数化建模技术研究[J]. 工程技术研究,2020,5(20):10-12.

[17] 宋晓峰. 一种基于 Revit + Dynamo 的装配式预制 T 形梁桥参数化建模方法研究[J]. 公路,2023,68(12):126-129.

[18] 黄璇. 基于 Rhino + Grasshopper 的参数化建模在异型桥梁设计中的应用[J]. 中国住宅设施,2023(8):22-24.

[19] 谭尧升,陈文夫,郭增光,等. 水电工程边坡施工全过程信息模型研究与应用[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(7):566-574.

[20] 傅战工,郭衡,张锐,等. BIM 技术在常泰长江大桥主航道桥设计阶段的应用[J]. 桥梁建设,2020,50(5):90-95.

[21] 王建伟,高超,董是,等. 道路基础设施数字化研究进展与展望[J]. 中国公路学报,2020,33(11):101-124.

[22] Fabozzi S, Biancardo S A, Veropalumbo R, et al. I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103723.

[23] 马新根,孙健东,赵洪泽,等. 基于 Rhino3D NURBS 的 FLAC3D 快速建模方法在露天边坡问题中的应用[J]. 煤矿安全,2015,46(8):138-141.