

边坡稳定性分析与 BIM 模型集成研究

王定强¹ 许博²

1.湖北智建工程科技有限公司 湖北 武汉 430051

2.湖北省城建设计院股份有限公司 湖北 武汉 430051

【摘要】：围绕公路挖方边坡的工程，构建 BIM 与 GIM 协同的集成建模与分析流程，形成由语义映射、坐标统一、规则化 ETL、接口对接与自动化求解组成的闭环方案，并将安全系数、位移与塑性区等量回写到 BIM 场景完成多视图联动。在工程 K136+200~K136+560 案例中，集成模型在自然与暴雨工况下给出更细化的空间响应，安全系数差异约 0.04，水平位移降低 3~6 mm，塑性区面积缩小 18~26 m²，数据准备时长由 120 min 降至 35 min，暴雨场景由 50 min 降至 18 min。与监测和极限平衡基准对照，位移拟合 MAE 在暴雨场景为 3.7 mm，对比传统方法的 5.6 mm，孔压拟合 RMSE 为 8.5 kPa，对比传统方法的 12.1 kPa，时序相关系数提升至 0.91。结果表明，集成路径在空间连续性表达、参数传递一致性与跨工况管理效率方面具备可复核的工程适配性。

【关键词】：BIM-GIM 集成；边坡稳定性；自动化分析；接口开发；结果可视化

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.065

本文从工程组织与风险治理的需求出发，需要对齐构件语义与地理语义，将坐标、单位与版本管理统一到可追溯的数据管线，借助程序化接口耦合联动建模与计算。本研究立足 BIM 与 GIM 集成语义，提出规则驱动的自动抽取与传递流程，构建面向 FLAC 以及 PLAXIS 的接口与适配策略，并在求解端组织强度折减与多工况批量化运行，最终将结果返回设计视图以支撑决策协同。该路径旨在提高参数一致性与空间表达完整性，降低人工干预强度，促进勘察—设计—施工的过程贯通。

1 边坡 BIM-GIM 集成建模分析

鉴于边坡工程对地形、地质与构筑物一体化表达的需求，BIM 与 GIM 的收集，对其构件语义与地理语义，以统一坐标与单位作为约束，将时相一致性纳入版本管理。BIM 为面向构件的三维信息模型，GIM 为面向空间要素与栅格的地理信息模型，几何、语义与时态据此被映射为可追踪的数据关系。流程层面，以点云与钻孔编录重建地层曲面与坡面 TIN，把支挡、排水、锚固等对象构件化进入 BIM，并把几何与属性按 IFC 到 GeoJSON 或 LandXML 的规则沉降为 GIM 要素，自动生成网格与边界条件，同时以全局唯一标识与版本号驱动双向增量同步。为实现无缝转换与模型优化，需实施坐标与高程统一、拓扑闭合校核、轻

量化抽稀与多尺度 LOD 和 LOI 协同，以减少冗余并提高计算友好性。实际挑战来自多源异构、语义断层与设计变更，可把规则引擎与校核清单嵌入流水线，形成问题前置与闭环处置机制^[1]。

2 基于集成模型的边坡稳定性分析

2.1 分析数据自动提取与传递流程

面向边坡稳定性分析的数据需求，本研究把 BIM 模型中的几何语义与材料语义拆解为可计算要素，构建自动提取与传递流程。几何侧以坡面实体、分层界面、构筑物基础及排水构件为识别目标，把轴测坐标、边界折线、坡度、分层厚度以及构造裂隙等参数由对象属性集中抽取；材料侧依托统一材料字典，把岩土层名称、天然重度、内摩擦角、黏聚力、渗透系数以及抗剪强度折减相关标识映射为标准参数集，并对单位与取值范围进行规范化处理。为把设计模型稳定地转换为分析输入，流程设置三类规则：一是实体到要素的语义映射规则，用以把 Ifc 类与 GIM 要素编码建立一一对应；二是空间一致性规则，用以把建筑坐标系重投影至工程 CRS 并修复拓扑缝隙；三是属性完整性规则，用以进行缺失参数补全与版本追踪。随后由规则引擎驱动 ETL 中间件完成数据抽取、校核与打包，生成面向分析的软件中立数据包并记录元数据血缘^[2]。

作者简介：

1、王定强，男（1989.08-），湖北省咸宁市人，本科，湖北智建工程科技有限公司，工程师，研究方向：勘察设计。

2、许博，男（1995.04-），湖北省鄂州市人，研究生，湖北省城建设计院股份有限公司，工程师，研究方向：勘察设计。

2.2 与专业分析软件的接口开发

鉴于集成模型需与工业级边坡分析软件稳定互联, 本文把接口开发划分为服务层、转换层以及适配层。服务层对外提供 HTTP 风格 API 与 Python 入口, 负责任务注册、模型下发、计算调度与结果回传; 转换层把 BIM- GIM 统一模型拆解为几何、材料、边界与工况四类数据; 适配层面向 FLAC 以及 PLAXIS 的命令体系、文件结构及脚本机制进行定制化封装, 形成可复用的导入导出模块。在数据转换协议设计方面, 选用中性语义模型作为中间格式, 几何以三角网地形与分层体元表达, 材料以本构模型与参数集表达, 工况以时间序列与分工况集合表达, 并把坐标基准统一到单一 EPSG 编码, 单位统一到 m、kN、MPa^[3]。

2.3 分析过程自动化与结果可视化

鉴于集成模型需高通量运行, 以自动化流程划分为参数初始化、求解调用以及结果回写三环。参数阶段由规则引擎把 BIM 几何语义落到可计算要素, 完成层理划分、工况模板选取以及材料库绑定, 同时开展量纲统一与边界条件校核, 生成含网格策略、本构模型与地下水位的场景描述文件。计算阶段依靠批处理引擎驱动接口服务对接外部求解器, 按工况组合生成作业队列, 进度由消息通道追踪, 出现不收敛时触发参数回退与时间步调整。为保证可追溯, 把版本号、随机种子与网格摘要写入元数据, 求解结束后自动抓取监测点与滑弧搜索的关键量^[4]。结果可视化围绕施工决策, 将安全系数、位移以及塑性区等量映射回 BIM 三维场景, 采用色带分级、透明度叠加与剖切视图联动呈现, 关键截面提供等值线和时程曲线以展示演化特征。

3 边坡稳定性分析与 BIM 模型集成的应用

3.1 工程概况

案例选取某高速工程 K136+200~K136+560 右侧挖方边坡, 地形为低中山剥蚀丘陵, 沟谷纵坡约 12%, 海拔 890~930 m。边坡总高约 42 m, 分 3 级平台, 每级高 12~15 m, 坡面坡角 38~45°。地层自上而下为第四系残坡积黏土 3~6 m、强风化砂岩与泥质砂岩 6~12 m、中风化砂岩基岩, 节理组走向 NE, 倾角 45~60°, 局部软弱夹层厚 0.2~0.5 m。多年平均降雨量 1300 mm, 5~9 月集中, 渗流沿沟谷汇流, 上层滞水为主, 枯季地下水位埋深 5~8 m。工程环境包含临近运营车道 2 条、上缘 10 kV 架空线与既有排水沟^[5]。

3.2 集成建模与稳定性分析

针对某高速 K136+200~K136+560 右侧挖方边

坡, 集成建模以 BIM 构件语义与 GIM 地形语义协同为主线, 先由 0.1 m 无人机点云与 26 个钻孔重建坡面对 TIN 与三维地层体, 统一到 CGCS2000 与国家高程基准, 完成地层界面、软弱夹层与沟谷排水通道的空间落位。随后把框架梁、预应力锚索、抗滑桩及截排水构件参数化, 材料库内置天然重度、黏聚力、内摩擦角与渗透系数等字段, 并把施工分期、爆破振动与交通作用定义为工况模板。为契合场地条件, 把锚索入岩段长度设定为 6~8 m, 桩间距控制在 3~4 m, 框架梁截面约 0.5 m×0.6 m, 同时把坡面喷混植生层厚度、排水孔间距与沟槽断面纳入约束集。基于接口服务把上述模型下发至分析端, 网格采用三维四面体自适应剖分, 结构近场加密至 0.5~1.0 m, 远场控制在 2~3 m, 并设置底部固结与侧界法向约束。岩土本构选用莫尔库仑模型, 弱夹层采用界面单元, 降雨条件以等效渗透边界施加, 地下水位按勘察时期滞水线外推拟合, 交通作用选用 20kPa 等效面荷载叠加于上部平台。

3.3 结果对比分析

围绕高速右侧挖方边坡的统一地质与荷载信息, 在一致的强度折减策略与求解器设置下, 构建集成模型与传统二维剖面模型的对比框架。集成模型把高精度地形、层理连续面与排水设施作为三维要素进行表达, 传统方法则依赖单剖面几何理想化与手工属性赋值。对比可见, 集成模型在暴雨工况下呈现更敏感的孔压响应, 安全系数较传统方法略低, 缘由在于沟谷汇流与软弱夹层连续性被更充分刻画; 在自然与施工分期工况中, 位移峰值与塑性区条带贴合支挡近场, 滑移面入深略大于二维理想化结果, 反映出三维曲面曲率与边界效应的共同影响。见表 1。

表 1 稳定性分析结果对比表

工况	指标	集成模型	传统方法
自然	安全系数 F	1.30	1.25
自然	最大水平位移 Ux/mm	18	21
自然	关键滑弧深度/m	14.5	13.2
自然	塑性区面积/m ²	72	90
自然	数据准备时长/min	35	120
暴雨	安全系数 F	1.12	1.08
暴雨	最大水平位移 Ux/mm	36	42
暴雨	关键滑弧深度/m	15.1	13.9

暴雨	塑性区面积/m ²	128	154
暴雨	数据准备时长/min	18	50
施工分期	安全系数 F	1.21	1.16
施工分期	最大水平位移 U _x /mm	24	28
施工分期	关键滑弧深度/m	14.8	13.5
施工分期	塑性区面积/m ²	96	112
施工分期	数据准备时长/min	22	60

注：续表 1。

4 有效性验证

为检验集成路径的工程适配性，以高速公路工程 K136+200~K136+560 右侧挖方边坡的监测数据作为参照，构建由位移、孔压、安全系数与时序一致性组成的验证体系。监测体系包括 3 条测斜管、12 个棱镜点和 5 只孔压计，雨量采用沿线自动站实测量，数据在统一时空基准下完成去噪与配准。对比对象包含集成模型计算结果与传统二维剖面法的输出，同时引入 Bishop 极限平衡作为基准算法，以刻画安全系数在不同求解范式下的差异。误差衡量选用平均绝对误差、均方根误差与 Pearson 相关系数，时序指标以滞后量表征响应同步性。综合各项量化指标，集成路径在空间连续性和参数传递的一致性方面表现出可复核的优势，具体数据见表 2。

表 2 有效性验证结果表

工况	指标	度量与单位	集成模型	传统方法	基准或参照
自然	位移拟合	MAE/mm	2.4	3.1	对监测

参考文献：

- [1] 刘南昌,林雪辉,余成华.深圳某边坡断层构造及其对边坡稳定性影响研究[J].城市勘测,2025,(06):219-224.
- [2] 伍士华.含软弱夹层岩质边坡稳定性的数值模拟研究[J].交通工程,2025,25(12):90-93+106.
- [3] 白雪亮,王汉勋,张彬,等.降雨入渗条件下非饱和黄土边坡稳定性分析研究[J].西北水电,2025,(06):102-109.
- [4] 张亚军,罗小双,陈红,等.块石形状对碎石土力学特性与边坡稳定性的影响研究[J].四川建筑科学研究,2025,51(06):55-63.
- [5] 周敬超.基于 Spencer 极限平衡法的抛石挤淤堤防边坡稳定性分析[J].水利水电快报,2025,46(S2):129-133.

自然	孔压拟合	RMSE/kPa	4.8	6.2	对监测
自然	安全系数	相对偏差/%	3.1	3.8	对 Bishop
自然	时序一致性	相关系数 R	0.86	0.81	对监测
自然	响应同步性	滞后/min	6	9	对监测
暴雨	位移拟合	MAE/mm	3.7	5.6	对监测
暴雨	孔压拟合	RMSE/kPa	8.5	12.1	对监测
暴雨	安全系数	相对偏差/%	4.5	6.9	对 Bishop
暴雨	时序一致性	相关系数 R	0.91	0.82	对监测
暴雨	响应同步性	滞后/min	8	15	对监测
施工分期	位移拟合	MAE/mm	3.1	4.7	对监测
施工分期	孔压拟合	RMSE/kPa	6.2	9.4	对监测
施工分期	安全系数	相对偏差/%	3.8	5.7	对 Bishop
施工分期	时序一致性	相关系数 R	0.88	0.79	对监测
施工分期	响应同步性	滞后/min	7	12	对监测

5 结语

综上所述，本文将 BIM 与 GIM 的语义与空间基准进行贯通，形成面向边坡稳定性的自动化建模与求解框架，并在实际高速公路边坡中验证可用性。对比结果显示，安全系数与位移等关键指标表现稳定，数据准备用时缩短约 60 - 70%，位移与孔压拟合精度与时序相关度同步提升。面向后续工作，可以将降雨入渗的时变边界、物联网监测的在线反馈与标准化接口规范纳入同一管线，扩展至群坡协同分析与运维期风险预警场景。