

基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术研究

施炳军¹, 廖绍忠², 刘湘³

1. 云南奕辉建筑设计有限公司, 云南 昆明 650000

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2025100026

摘 要 : 本文聚焦基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术研究, 阐述了高陡边坡 BIM 建模方法, 介绍了数值模拟软件的选择, 分析了 BIM 模型向数值模型的转换过程, 设计了高陡边坡稳定性数值模拟方案, 并进行了模型验证与参数敏感性分析。接着探讨了基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡加固方案比选, 以具体案例设计并优化了典型加固方案。研究表明 BIM 与数值模拟的结合能为高陡边坡稳定性分析和加固设计提供科学依据, 提升工程安全性与经济性, 对相关工程实践具有重要指导意义。

关 键 词 : BIM 技术; 数值模拟; 边坡稳定性; 加固技术

Research on Stability Analysis and Reinforcement Techniques for Steep Slopes Based on BIM and Numerical Simulation

Shi Bingjun¹, Liao Shaozhong², Liu Xiang³

1. Yunnan Yihui Architectural Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

2. Kunming Prospecting Design Institute Of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

3. KUNMING ENGINEERING CORPORATION LIMITED. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : This paper focuses on the stability analysis and reinforcement techniques for steep slopes based on BIM and numerical simulation. It describes the BIM modelling methods for steep slopes, introduces the selection of numerical simulation software, analyses the conversion process from BIM models to numerical models, designs a numerical simulation scheme for steep slope stability, and conducts model validation and parameter sensitivity analysis. It then discusses the comparison of reinforcement schemes for high-steep slopes based on BIM and numerical simulation, and designs and optimises typical reinforcement schemes using specific case studies. The research indicates that the combination of BIM and numerical simulation provides a scientific basis for stability analysis and reinforcement design of high-steep slopes, enhancing engineering safety and economic efficiency, and holds significant guiding significance for related engineering practices.

Keywords : BIM technology; numerical simulation; slope stability; reinforcement technology

引言

随着信息技术的发展, BIM 技术凭借其信息集成化、可视化、参数化等特点, 在工程领域展现出巨大优势; 数值模拟方法则能通过建立力学模型, 定量分析边坡的受力变形和稳定性, 为工程决策提供有力依据。将 BIM 技术与数值模拟方法相结合, 有望实现高陡边坡稳定性分析与加固设计的精准化、高效化。本文围绕基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术展开研究。通过阐述 BIM 技术在高陡边坡工程中的应用, 探讨数值模拟分析的流程与方法, 研究加固方案的比选、设计与优化, 并结合案例验证相关方法的有效性, 旨在为高陡边坡工程的安全建设与科学管理提供理论支持和技术参考。

一、基于 BIM 模型的数值模拟分析

（一）高陡边坡 BIM 建模方法

高陡边坡 BIM 建模是一个复杂的系统工程，需要结合边坡的地质勘察数据、地形地貌信息等，按照一定的流程和方法进行构建。其基本流程主要包括数据收集与处理、模型构建、模型校验与优化等环节，在数据来源方面，高陡边坡 BIM 建模所需的数据种类繁多。地质勘察数据是核心，包括岩土体的物理力学性质、地质构造、地下水分布等，这些数据为模型中岩土体的参数设置提供了重要依据。地形地貌数据通常通过全站仪、GPS、无人机航测等手段获取，用于构建边坡的地形表面模型。此外，还可能需收集边坡周边的建筑物、道路、管线等环境信息数据，以便在模型中考虑周边环境对边坡的影响。在具体的建模过程中，首先根据地形地貌数据构建边坡的地形表面模型，然后结合地质勘察数据，对边坡进行分层处理，划分出不同的岩土体分层，并为各分层赋予相应的物理力学参数。对于边坡中的断层、裂隙等地质构造，也需要在模型中进行准确表达。在建模软件的选择上，常用的 BIM 建模软件如 Revit、Bentley 系列软件等都可以用于高陡边坡的建模。其中，Revit 具有强大的参数化设计功能，适合构建较为复杂的边坡模型；Bentley 软件在处理大型土木工程模型和地理信息数据方面具有优势，更能满足高陡边坡建模的需求。

（二）数值模拟软件选择与介绍

当前，滑坡稳定计算理论主要有极限平衡法、平面滑动法、传递系数法和有限元强度折减法。极限平衡法为滑体内潜在滑面上的抗滑力与下滑力之比来求解边坡的安全稳定系数，通常假设存在一确定的滑面，该法在工程设计当中最为常见，包括瑞典条分法、毕肖普条分法、简布法和摩根斯顿-普赖斯法^[1]。在高陡边坡稳定性分析中，选择数值模拟软件要综合边坡地质条件、分析目标和软件功能特点，常用的有有限元法、离散元法和有限差分法软件^[2]。有限元法软件如 ANSYS、ABAQUS、Plaxis，擅长处理连续介质问题。ANSYS 功能强，适用于复杂荷载下的应力应变分析；ABAQUS 本构模型丰富，能精准模拟岩土体变形破坏；Plaxis 专为岩土工程开发，操作简便且应用广泛。离散元法软件如 PFC，适合模拟节理、裂隙发育的离散岩体边坡，可再现崩塌、滑动等失稳过程。有限差分法软件如 FLAC3D，在处理大变形问题上表现好，能模拟塑性流动、剪切破坏等，还可直接计算边坡安全系数，是常用软件^[3]。实际应用中，岩土体完整、以连续介质特性为主的边坡优先选有限元法软件；岩体节理裂隙发育、离散性明显的则选离散元法或有限差分法软件，同时要考虑软件与 BIM 模型的数据交互能力，确保模型顺利转换。

（三）BIM 模型向数值模型的转换

BIM 模型与数值模型在构建目的、信息表达方式等方面存在差异，因此将 BIM 模型转换为数值模型是实现基于 BIM 的数值模拟分析的关键环节，该过程主要包括信息提取与筛选、模型简化与处理、数据格式转换和数值模型参数赋值等步骤。BIM 模型向数值模型的转换也存在一些难点，如信息丢失、几何失真、参数不匹配等^[4]。为了克服这些问题，需要在转换过程中进行严格的

质量控制，对转换后的数值模型进行几何检查和参数验证，必要时结合现场勘察数据和试验结果进行修正。

（四）高陡边坡稳定性数值模拟方案设计

高陡边坡稳定性数值模拟方案的设计是确保模拟结果科学性和可靠性的前提，需要结合边坡的工程地质条件、分析目标和数值模拟方法的特点进行综合制定，主要包括模拟目标与范围确定、本构模型与强度准则选择、边界条件与初始条件设定、计算参数选取和模拟步骤与工况设计等内容^[5]。模拟目标依实际需求明确，如计算安全系数等；范围涵盖边坡及影响区域，需平衡计算量与周边环境影响。本构模型常用线性弹性、非线性弹性、弹塑性等模型；强度准则多采用摩尔-库仑准则，特殊岩土体则选用其他准则。边界条件中，位移边界设坡底和两侧为固定约束、坡顶和坡面为自由边界，应力边界考虑自重应力及孔隙水压力；初始条件主要为初始地应力，复杂区域结合现场测试修正。计算参数基于现场勘察和试验数据，缺数据时参考经验值并验证调整^[6]。模拟步骤含模型建立、网格划分等；工况设计需考虑不同影响因素，通过模拟分析评估其对边坡稳定性的影响，为设计和加固提供依据。

（五）模型验证与参数敏感性分析

模型验证和参数敏感性分析对保证高陡边坡稳定性数值模拟结果的准确性与可靠性至关重要。模型验证用于检验数值模型是否准确反映边坡实际情况，常用现场监测数据对比法和经典案例对比法^[7,8]。前者将模拟的位移、应力等与现场监测数据对比，吻合好则模型可信，否则需调整；后者与经典案例结果对比，验证模型合理性。参数敏感性分析研究参数变化对模拟结果的影响，可识别关键参数，指导工程设计。常用单因素和多因素分析法，单因素法通过改变单个参数计算敏感性系数判断影响程度，多因素法则评估多个参数共同作用的敏感性。高陡边坡分析中，常对黏聚力、内摩擦角等参数分析，其中黏聚力、内摩擦角及地下水水位对边坡稳定性影响显著。通过模型验证确保模型可靠，参数敏感性分析明确关键参数，为边坡加固设计和工程决策提供科学依据。

二、高陡边坡加固技术研究

（一）基于 BIM 与数值模拟的加固方案比选

在高陡边坡加固工程中，方案比选是确保加固效果、节约成本的关键环节，而 BIM 技术与数值模拟方法的结合，为科学、高效地进行方案比选提供了有力支持^[9]。以某山区高速公路高陡边坡为例，该边坡最大坡高 80m，平均坡度 65°，由中风化砂岩和泥岩互层组成，节理裂隙发育，存在潜在失稳风险。针对此边坡，拟定了“抗滑桩+锚索”和“土钉墙+喷射混凝土”两种加固方案，基于 BIM 的方案可视化与信息集成成为比选奠定了基础。利用 BIM 技术构建两种方案的三维模型，直观展示加固结构的布置^[9]。“抗滑桩+锚索”方案中，抗滑桩长 20m，截面 2m×3m，间距 5m，锚索长 30m，张拉吨位 500kN；“土钉墙+喷射混凝土”方案中，土钉长 8m，间距 1.5m×1.5m，喷射混

凝土厚 10cm。同时 BIM 模型集成了各方案的工程量,“抗滑桩 + 锚索”方案混凝土用量约 800m³,钢材用量约 120t;“土钉墙 + 喷射混凝土”方案混凝土用量约 300m³,钢材用量约 50t。数值模拟为方案的力学性能评估提供了量化依据,将 BIM 模型转换为 FLAC3D 数值模型后计算,“抗滑桩 + 锚索”方案加固后边坡安全系数为 1.35,最大位移 3cm;“土钉墙 + 喷射混凝土”方案安全系数为 1.20,最大位移 8cm。多维度指标体系的建立与综合比选是方案决策的核心,安全性上,“抗滑桩 + 锚索”方案更优;经济性上,“土钉墙 + 喷射混凝土”方案造价约 200 万元,“抗滑桩 + 锚索”方案约 500 万元;施工可行性方面,“土钉墙 + 喷射混凝土”施工更简便,工期短约 15 天。综合权衡,考虑边坡的高风险性,最终选择“抗滑桩 + 锚索”方案。此外,利用 BIM 技术的协同性,工程各参与方在同一模型平台上对方案进行讨论评审,及时提出修改意见,提高了方案比选的效率 and 科学性。

(二) 典型加固方案设计与优化

典型加固方案的设计与优化需要结合边坡的工程地质条件、稳定性分析结果以及加固技术的特点,同时充分利用 BIM 技术与数值模拟方法,以实现方案的安全可靠、经济合理^[10]。仍以该山区高速公路高陡边坡为例,设计“抗滑桩 + 锚索”典型加固方案并优化。典型加固方案的设计流程如下:根据数值模拟结果,确定潜在滑动面位于边坡中上部,需重点加固。初步选择抗滑桩与锚索组合方案,利用 BIM 技术详细设计,抗滑桩长 20m,截面 2m×3m,间距 5m,嵌入稳定岩层 8m;锚索长 30m,锚固段 15m,张拉吨位 500kN,与水平面夹角 25°,构建 BIM 模型。通过数值模拟验算,加固后安全系数 1.35,满足要求。方案

优化从三方面开展:一是基于数值模拟优化加固参数,改变抗滑桩间距,模拟间距 4m、5m、6m 时的情况,间距 5m 时安全系数 1.35,桩体应力 2.5MPa,间距 4m 时安全系数 1.38,桩体应力 2.3MPa,但造价增加 10%,故最优间距为 5m。调整锚索张拉吨位至 400kN,安全系数降至 1.28,不满足要求,确定 500kN 为合理值。二是利用 BIM 技术设计优化,通过碰撞检测发现部分锚索与地下管线冲突,调整锚索角度至 20° 避免冲突;精确计算工程量,将抗滑桩截面调整为 1.8m×2.8m,混凝土用量减少 8%,成本降低,且安全系数仍为 1.32。三是施工过程优化,结合 BIM 4D 模拟,先施工抗滑桩,再张拉锚索,最后喷射混凝土,此顺序使边坡变形量减少 2cm,工期缩短 5 天。通过优化,方案在保证安全的前提下,降低了成本,提高了施工效率。

三、结束语

本文系统开展了基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡稳定性分析及加固技术研究,取得了一系列具有实践意义的成果。在加固技术研究中,结合具体案例,验证了基于 BIM 与数值模拟进行加固方案比选、设计与优化的科学性和有效性。实践表明,两者的有机结合能够显著提升高陡边坡稳定性分析的精准度,优化加固方案的经济性与安全性,为工程决策提供了有力支撑。然而研究仍存在一定局限性,复杂地质条件下参数敏感性分析的深度有待加强。未来可进一步探索更高效的数据交互技术,不断完善基于 BIM 与数值模拟的高陡边坡工程技术体系,为类似工程提供更全面、更可靠的理论与实践指导。

参考文献

[1] 白永宏. 高陡边坡的稳定性分析及抗滑桩加固数值模拟 [J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(12): 49–55.
[2] 蓝宇. 基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(03): 77–82. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2023.03.029.
[3] 董立巍, 朱仰勇. 圣雄黑山煤矿高陡边坡稳定性数值模拟分析 [J]. 现代矿业, 2019, 35(02): 209–211.
[4] 戚铨钟, 时伟, 刘通, 等. 锚杆——土工网垫喷播防护技术下植被根系长度与岩质高陡边坡稳定性影响关系数值模拟分析 [C]//《建筑科技与管理》组委会. 2013 年 10 月建筑科技与管理学术交流会论文集. 青岛理工大学土木工程学院, 2013: 18+27.
[5] 朱华碧, 陶干强, 段利波. 采矿爆破荷载作用下高陡边坡稳定性数值模拟分析 [J]. 现代矿业, 2010, 26(03): 70–73.
[6] 朱相龙, 李鑫, 杨烨. 复杂艰险山区高陡边坡稳定性分析及加固措施研究 [C]// 中国建筑学会工程勘察分会, 中国水利学会勘测专业委员会, 中国铁道学会工务委员会, 西藏自治区水力发电工程学会, 中国灾害防御协会交通分会. 第十六届边坡工程技术大会论文集. 中国铁路设计集团有限公司, 2024: 127–130. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.064025.
[7] 吴迪. 基于参数敏感性分析的重大铁路沿线典型高陡边坡稳定性研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2024. DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2024.001170.
[8] 汪超, 付晓东, 万道春, 等. 高陡边坡多源数据融合模型构建方法及稳定性分析 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(03): 57–64. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2024.03.007.
[9] 蓝宇. 基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(03): 77–82. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2023.03.029.
[10] 刘均利, 廖恒彬, 张炳辉. 基于 BIM 技术的岩溶发育区岩质高陡边坡稳定性分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(05): 274–283. DOI: 10.19815/j.jace.2021.06063.