

数字孪生边坡有限元稳定分析

明世雄*, 何翔, 赵开明, 吴亦强, 黄浪, 龚志勇

武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月16日

摘要

针对高边坡施工阶段几何边界持续变化、有限元建模前处理重复性强、多开挖阶段和多扰动工况难以快速检算的问题, 提出一种基于数字孪生几何底座的边坡自动化有限元建模与稳定性分析方法。根据数字孪生成熟度层级, 本文工作定位为边坡稳定分析数字孪生体系中的“数字模型-数字影子”阶段, 即以三维几何模型和有限元仿真流程为核心, 实现工程几何信息到计算模型的自动映射, 但尚未包含现场监测反演和实时闭环控制。该方法以等高线、钻孔分层、开挖台阶和支护设计参数为基础, 利用OpenCascade几何内核构建ZK16高边坡三维几何模型, 并通过开挖包络体与坡体实体的布尔差集运算表达施工阶段坡面演化。在给定控制剖面后, 系统可随施工步自动完成剖面几何更新与数据提取, 生成Abaqus可读取的二维剖面数据, 并进一步完成材料赋值、边界约束、等效支护、网格划分和强度折减计算。以ZK16典型剖面为对象开展数值分析, 结果表明: 第1至第4施工步安全系数均达到搜索上限 $F_s \geq 2.00$, 第5、第6施工步分别降至1.88和1.56, 说明后期开挖阶段为稳定性控制阶段; 强度软化20%和30%时安全系数分别降至1.22和1.10, 表明岩土体抗剪强度衰减对边坡稳定性影响显著。在不计Abaqus求解器计算时间的前提下, 本文流程可显著减少多施工步、多工况分析中的重复前处理交互时间。进一步基于400组有限元仿真样本开展1D-CNN代理模型初步验证, 验证集决定系数 $R^2 = 0.8071$, 说明自动化有限元样本库具有辅助快速评估的潜力。

关键词

高边坡, 数字模型, 数字影子, 剖面几何自动更新与数据提取, Abaqus, 强度折减法

Finite Element Stability Analysis of Digital Twin Slopes

Shixiong Ming*, Xiang He, Kaiming Zhao, Yiqiang Wu, Lang Huang, Zhiyong Gong

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan Hubei

Received: May 11, 2026; accepted: June 3, 2026; published: June 16, 2026

*通讯作者。

文章引用: 明世雄, 何翔, 赵开明, 吴亦强, 黄浪, 龚志勇. 数字孪生边坡有限元稳定分析[J]. 土木工程, 2026, 15(6): 34-43. DOI: 10.12677/hjce.2026.156152

Abstract

To address the problems of continuous geometric boundary changes during the staged construction of high slopes, highly repetitive preprocessing in finite element modeling, and the difficulty of rapid stability calculation under multiple excavation stages and disturbance conditions, an automatic finite element modeling and stability analysis method for slopes based on a digital twin geometric framework is proposed. According to the maturity levels of digital twins, this work is positioned at the “digital model-digital shadow” stage within the slope stability analysis digital twin system. It focuses on the three-dimensional geometric model and the finite element simulation workflow to achieve automatic mapping from engineering geometric information to computational models, but does not yet include field monitoring inversion and real-time closed-loop control. Based on contour lines, borehole stratification, excavation benches, and support design parameters, this method utilizes the OpenCascade geometric kernel to construct a three-dimensional geometric model of the ZK16 high slope. The slope surface evolution during the construction stage is represented by Boolean subtraction operations between the excavation envelope bodies and the slope entity. Once a control section is specified, the system automatically updates the section geometry and extracts data according to the construction steps, generating two-dimensional section data readable by Abaqus. It further completes material assignment, boundary constraints, equivalent support modeling, mesh generation, and strength reduction calculations. Numerical analysis is conducted on a typical section of the ZK16 high slope, and the results show that the safety factors of the 1st to 4th construction steps all reach the search upper limit of $F_s \geq 2.00$, while those of the 5th and 6th construction steps drop to 1.88 and 1.56, respectively, indicating that the later excavation stages are the stability-controlling stages. Under conditions where the strength softens by 20% and 30%, the safety factors decrease to 1.22 and 1.10, respectively, demonstrating that the degradation of rock and soil shear strength has a significant impact on slope stability. Excluding the calculation time of the Abaqus solver, the proposed workflow can significantly reduce the repetitive preprocessing interaction time in multi-stage and multi-condition analysis. Furthermore, based on 400 sets of finite element simulation samples, a preliminary validation of a 1D-CNN surrogate model is conducted. The coefficient of determination on the validation set is $R^2 = 0.8071$, indicating that the automated finite element sample database has the potential to assist in rapid assessment.

Keywords

High Slope, Digital Model, Digital Shadow, Automatic Section Geometry Updating and Data Extraction, Abaqus, Strength Reduction Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高边坡施工通常伴随多级开挖、坡面卸荷、支护施作和外部扰动共同作用，边坡稳定状态随施工阶段持续变化。传统稳定性分析多依赖人工选取典型剖面、重绘有限元模型并逐项设置材料、边界和支护参数，难以满足施工期多阶段、多工况快速计算需求。有限元强度折减法能够在不预设滑动面的情况下反映坡体应力、位移和塑性区演化，是复杂边坡稳定性分析的重要方法[1][2]；但其工程应用效率受限于模型前处理和工况批量化能力。

近年来，数字孪生、BIM、无人机测绘和 Abaqus 二次开发等技术被用于边坡建模、监测和安全评估[3]-[8]。已有研究多关注三维可视化、监测预警或单次有限元检算，而对于施工阶段几何持续变化条件下，

如何将三维地质模型稳定映射为可批量计算的二维强度折减模型，仍缺少清晰流程。

从数字孪生成熟度看，工程对象的数字化通常可分为数字模型、数字影子和完整数字孪生等层次。数字模型侧重几何、属性和边界条件的数字表达；数字影子强调实体状态或施工过程能够向模型侧自动传递；完整数字孪生则要求现场监测、模型更新、风险判别和决策反馈之间形成实时闭环。受限于本文尚未接入在线监测数据、施工状态反馈和反演校正机制，本研究不将当前系统界定为完整数字孪生预警系统，而是定位为面向施工期稳定性分析的“数字模型-数字影子”阶段：三维几何底座负责表达地形、地层、开挖和支护空间关系，自动化有限元流程负责将几何变化转化为可批量计算的分析模型，为后续接入监测数据和闭环预警提供基础。

基于上述定位，本文贡献包括：(1) 构建 ZK16 边坡三维数字孪生几何底座，并表达逐级开挖引起的坡面边界演化；(2) 提出给定控制剖面下的剖面几何自动更新与数据提取流程，并与 Abaqus 自动建模、强度折减计算相衔接；(3) 对比开源几何内核方案与单一商业软件脚本方案的适用性，说明本文框架在几何处理灵活性、可扩展性和批量分析方面的价值；(4) 开展开挖阶段、扰动工况、建模效率和有限元样本库代理模型验证。

本文方法的总体技术路线如图 1 所示。

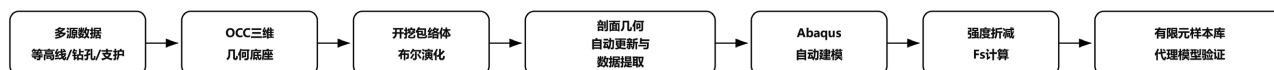


Figure 1. Technical route of the proposed automatic finite element analysis method

图 1. 自动化有限元分析方法技术路线图

2. 方法

2.1. 数字孪生几何底座与开挖演化

ZK16 边坡几何底座由地表、地层、开挖台阶和支护结构组成。首先从 CAD 等高线中提取高程点，通过规则格网化生成 DEM 点阵。对于目标格网点，若邻域内共有 n 个已知高程点，采用反距离权重法估算高程，其文本表达为：

$$Z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-p}}$$

式中， $Z(x, y)$ 为待求格网点高程， z_i 为第 i 个已知点高程， d_i 为待求点与第 i 个已知点之间的平面距离， p 为距离衰减指数。随后利用 B-Spline 曲面拟合地表和地层分界面，并通过拓扑缝合形成可参与布尔运算的三维地质实体。为减少复杂地层曲面在布尔运算中的失败概率，采用拓扑重心筛选剔除异常碎片，并通过法向一致性校验修正壳体内外方向。

施工开挖采用“开挖包络体-边坡实体”布尔差集表达。系统根据设计坡率、平台宽度和开挖标高生成各级开挖包络体，逐级从原始坡体中切除，得到不同施工步下的坡面自由边界。需要说明的是，工程边坡级数通常按由下至上命名，而本工程施工由上向下推进，因此本文采用施工步序表述：第 1 施工步对应上部六级边坡开挖，第 6 施工步对应下部一级边坡开挖后的最终状态。

2.2. 剖面几何自动更新与数据提取及 Abaqus 自动建模

本文采用“三维建模、二维计算”的策略。三维模型用于表达真实地形、地层和施工阶段几何状态，二维平面应变模型用于典型控制剖面的强度折减分析。本文所称“剖面几何自动更新与数据提取”并非指剖面位置完全由算法自主优化，而是指在给定控制剖面后，系统根据当前施工阶段三维几何状态，自动更新坡面轮廓、地层分界、支护空间关系和工况参数，并生成满足 Abaqus 建模要求的二维剖面数据。

Abaqus Python 脚本读取剖面线段文件后,自动创建二维平面应变模型。坡体采用 CPE4/CPE3 单元,底边约束水平与竖向位移,左右边界约束水平位移,坡面为自由边界。计算采用 m-kg-s-Pa 一致单位体系,表中位移单位为 m。支护结构在当前脚本中以等效方式进入模型:锚杆采用 B21 梁单元,材料为钢材,弹性模量为 2.05×10^{11} Pa,圆形截面半径 0.025 m;锚杆长度包括 12 m 和 22 m 两类,倾角按 30° 并随坡面角旋转布置,通过 Embedded Region 嵌入坡体;格构梁或坡面支护以 0.2 m 厚等效混凝土条带表达,并通过 Tie 约束与坡面绑定。由于本文尚未系统开展锚杆长度、间距、预应力和局部失效敏感性分析,本文安全系数主要用于比较开挖几何变化和岩土体强度软化的影响。

典型计算剖面及边界条件如图 2 所示,剖面几何自动更新与网格生成结果如图 3 所示。

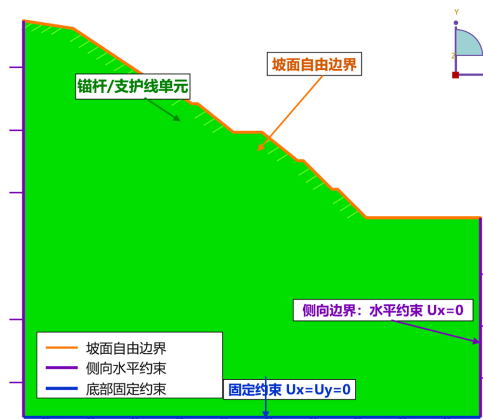
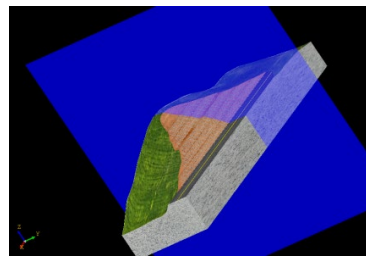
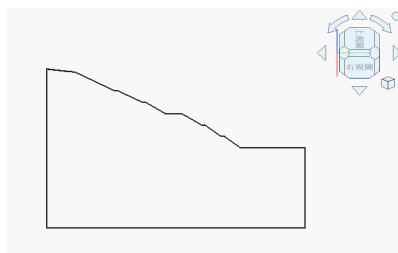


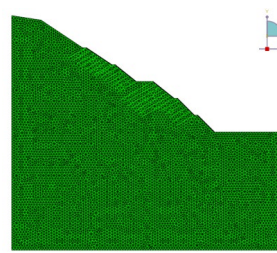
Figure 2. Typical computational section and boundary conditions of the ZK16 slope
图 2. ZK16 典型计算剖面与边界条件



(a) 三维模型剖面位置



(b) 截取二维轮廓



(c) Abaqus 网格模型

Figure 3. Automatic section geometry updating and Abaqus mesh model
图 3. 剖面几何自动更新与 Abaqus 网格模型

2.3. 开源几何内核方案与商业软件脚本方案对比

本文采用 OpenCascade 作为三维几何底座,而不是将几何构建、剖面更新和有限元建模全部绑定在

Abaqus 或其他单一商业软件脚本内部。二者的核心差异在于：商业软件脚本方案适合对已确定剖面进行重复建模和求解控制，流程相对直接；开源几何内核方案则将复杂地形、地层、开挖体和支护结构的几何表达前置到独立几何平台中，再向有限元软件输出可计算数据。

从优势看，OpenCascade 具有较强的曲面拟合、拓扑缝合、布尔运算和几何实体管理能力，便于处理 CAD 等高线、钻孔分层、开挖台阶和支护空间关系等多源工程数据；几何底座独立于求解器，也便于后续扩展到其他有限元或数值分析平台。对于多施工步、多剖面和多扰动工况，系统只需在几何底座中更新开挖状态和参数，即可批量生成对应剖面数据，避免反复在商业软件界面中重绘剖面和修补边界。

该方案也存在一定不足：其一，复杂地质曲面参与布尔运算时需要额外的拓扑修复、碎片筛选和法向检查；其二，几何底座与 Abaqus 之间需要建立稳定的数据接口；其三，对于单一剖面、单一工况的常规检算，直接采用商业软件脚本可能更加简洁。因此，本文框架的主要价值不在于替代 Abaqus 求解器本身，而在于提高施工阶段几何更新、工况批量化和样本库生成的灵活性与可扩展性。

2.4. 强度折减与判据

坡体采用摩尔 - 库仑弹塑性模型。强度折减后黏聚力和内摩擦角分别按 $c' = \frac{c}{F_s}$ ； $\phi' = \arctan\left(\frac{\tan\phi}{F_s}\right)$ 进行折减。

式中， c 、 ϕ 为初始强度参数， c' 、 ϕ' 为折减后参数， F_s 为折减系数。基准工况取 $c = 40 \text{ kPa}$ 、 $\phi = 28^\circ$ ，输入 Abaqus 时统一换算为 Pa。程序先以 0.10 为步长从 $F_s = 1.00$ 搜索至 2.00，确定稳定 - 失稳区间后，再以 0.02 为步长局部细化。安全系数取最后一个正常收敛且未触发位移和 PEEQ 异常阈值的折减系数；若至 $F_s = 2.00$ 仍未失稳，则记为 $F_s \geq 2.00$ 。

自动判据包括：以 Abaqus 作业是否正常收敛并输出 ODB 作为主要计算状态判据；几何、网格或 Abaqus 调用错误视为模型设置失败并剔除，不作为真实边坡失稳；最大总位移超过 5.0 m 或最大 PEEQ 超过 5.0 作为批量计算中的异常筛选和辅助失稳判据；PEEQ 塑性区形态用于人工复核。上述 5.0 阈值不是工程现场预警阈值，仅用于自动化批量计算中识别明显大变形或异常结果。除安全系数外，表中最大总位移和最大 PEEQ 均取对应工况 $F_s = 1.00$ 基准强度计算最终帧输出，用于比较原始强度下各工况响应；安全系数则由折减扫描另行确定。

3. ZK16 边坡数值应用

3.1. 开挖阶段稳定性分析

基于自动化建模流程，对 ZK16 典型剖面第 1 至第 6 施工步开展强度折减分析，结果见表 1。

Table 1. Calculation results for different construction steps
表 1. 不同施工步计算结果

施工步序	对应开挖部位	最大总位移/m	最大 PEEQ	安全系数 F_s	评价
第 1 施工步	六级边坡开挖	1.1311	0.0006	≥ 2.00	稳定
第 2 施工步	五级边坡开挖	1.1208	0.0052	≥ 2.00	稳定
第 3 施工步	四级边坡开挖	1.1746	0.0206	≥ 2.00	稳定
第 4 施工步	三级边坡开挖	1.1787	0.0540	≥ 2.00	稳定
第 5 施工步	二级边坡开挖	1.1922	0.0868	1.88	稳定性下降
第 6 施工步	一级边坡开挖/最终状态	1.2018	0.1484	1.56	控制阶段

结果表明,第1至第4施工步安全系数均达到搜索上限 $F_s \geq 2.00$,说明开挖前期坡体稳定储备较高。第5施工步安全系数降至1.88,第6施工步进一步降至1.56,表明随着下部开挖推进,临空高度和卸荷效应增强,后期开挖成为稳定性控制阶段。最大总位移变化相对平缓,而最大PEEQ由0.0006增至0.1484,说明塑性区扩展比位移指标更敏感,后续施工应重点关注二级、一级坡面及平台转折部位。

典型后期开挖阶段的位移与塑性区云图见图4,安全系数变化曲线见图5。

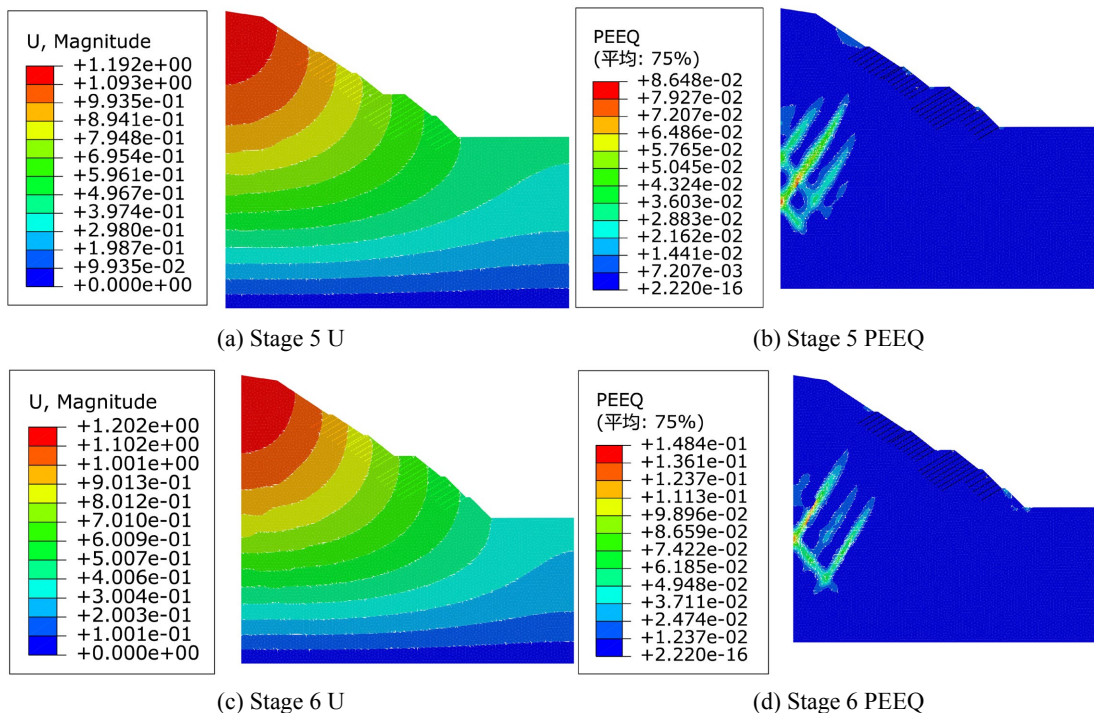


Figure 4. Displacement and PEEQ contours during excavation stages
图4. 开挖阶段位移与塑性区云图

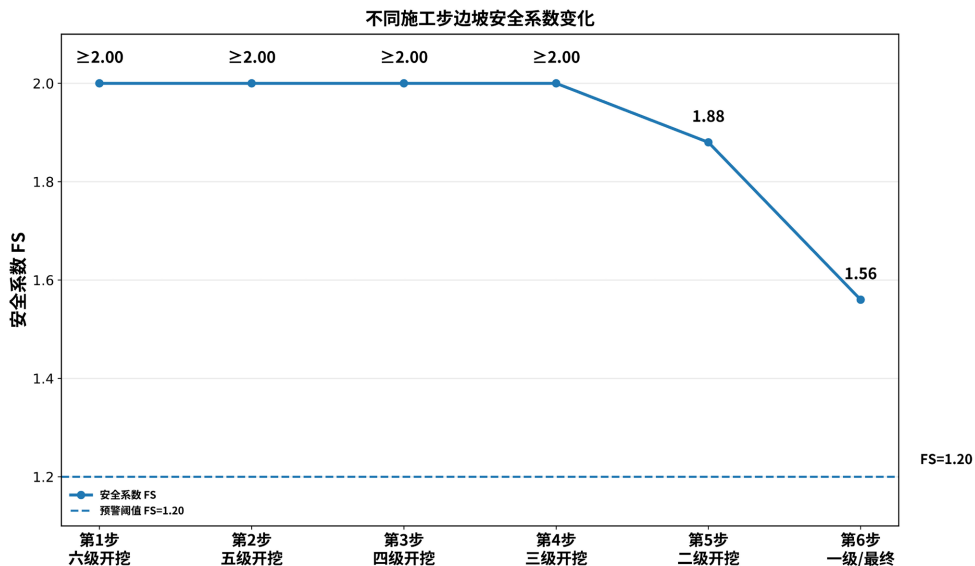


Figure 5. Variation of safety factor during excavation stages
图5. 开挖阶段安全系数变化曲线

3.2. 扰动工况分析

在第 6 施工步最终开挖状态下设置四类工况：C0 为基准工况，C1 和 C2 分别表示岩土强度软化 20% 和 30%，C3 表示 10 kPa 附加荷载。结果见表 2。

Table 2. Calculation results under different disturbance conditions

表 2. 不同扰动工况计算结果

工况	最大总位移/m	最大 PEEQ	安全系数 F_s	评价
C0 基准	1.2018	0.1484	1.56	基准稳定
C1 软化 20%	1.3560	0.2776	1.22	接近预警阈值
C2 软化 30%	1.8107	1.0624	1.10	稳定性明显降低
C3 附加荷载 10 kPa	1.2115	0.0811	1.62	未形成控制性不利工况

由表 2 可见，强度软化对边坡稳定性影响显著。C1 工况下 F_s 降至 1.22，已接近 1.20 预警阈值；C2 工况下 F_s 降至 1.10，低于预警阈值且最大 PEEQ 显著增大，说明降雨入渗或岩体软化导致的抗剪强度衰减可能成为主要风险来源。C3 工况下 F_s 为 1.62，略高于基准工况。该结果不应解释为附加荷载具有稳定作用，而应理解为在当前荷载位置、范围和强度设定下，附加荷载未落在控制性潜在滑移区内，未触发整体稳定性降低。平台荷载影响仍需结合荷载位置、作用宽度和潜在滑动面开展进一步敏感性分析。

基准工况与软化 30% 工况的位移、塑性区对比如图 6 所示，不同扰动工况安全系数对比如图 7 所示。

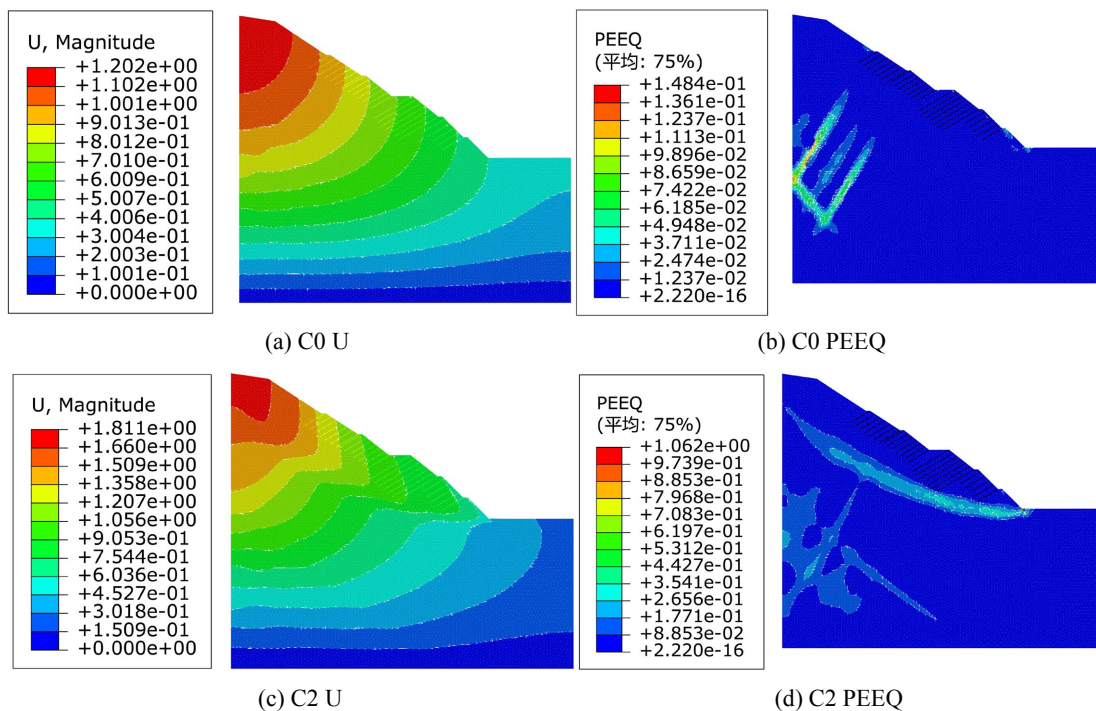


Figure 6. Displacement and PEEQ contours under different disturbance conditions

图 6. 不同扰动工况下位移与塑性区云图

3.3. 建模效率对比

为量化本文方法的效率优势，以 ZK16 典型剖面第 1 至第 6 施工步和第 6 施工步 4 类扰动工况为对象，对传统人工建模与本文自动化流程的前处理人机交互时间进行对比。由于 Abaqus 求解器计算时间主

要由模型规模、收敛状态和硬件条件决定，两种建模方式在同一有限元模型下差异不大，因此表 3 仅统计剖面更新、材料与边界设置、支护建模、网格划分、作业提交和结果整理等人工前处理时间。表 3 中的时间为作者根据本案例建模过程和重复前处理操作环节进行的保守估算，主要用于反映两类方法在人机交互工作量上的差异，而非严格的通用工时标准。

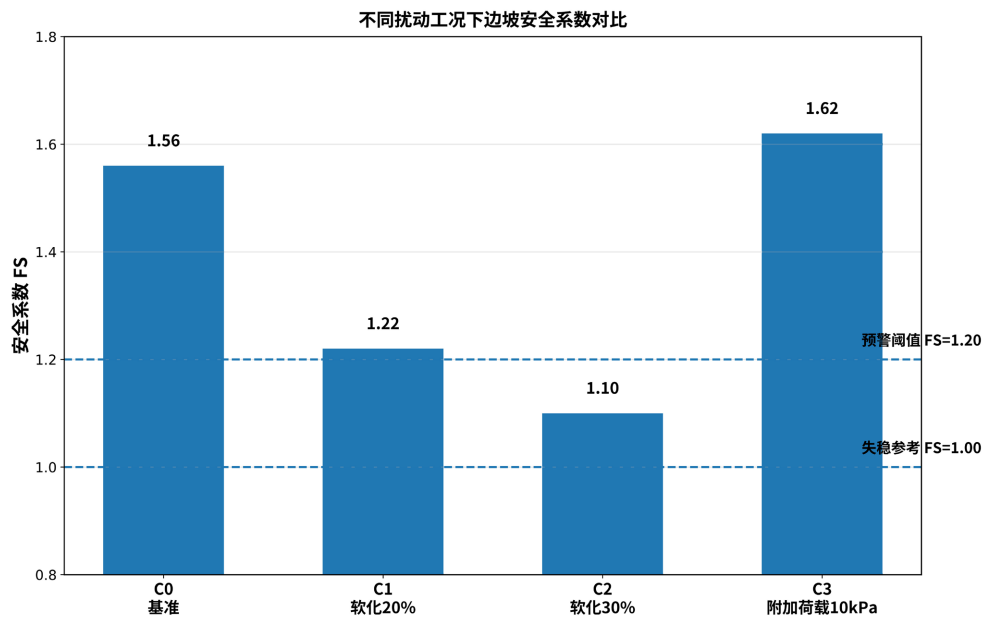


Figure 7. Comparison of safety factors under different disturbance conditions
图 7. 不同扰动工况安全系数对比

Table 3. Comparison of modeling efficiency

表 3. 建模效率对比

对比环节	传统人工方法	本文自动化流程	说明
几何/剖面更新	约 20~30 min/模型	自动生成, <1 min/模型	不含三维几何底座初次建立时间
材料、边界和支护设置	约 10~15 min/模型	脚本自动赋值, <1 min/模型	减少重复输入和人为漏项
网格划分、 作业提交与结果提取	约 10~20 min/模型	批处理执行, <1 min/模型	Abaqus 实际求解时间不计入
完成 6 个施工步 + 4 类扰动工况	约 6~10 h	初次配置约 1~2 h; 后续交互约 10~20 min	按同一典型剖面的前处理工作量 保守估算

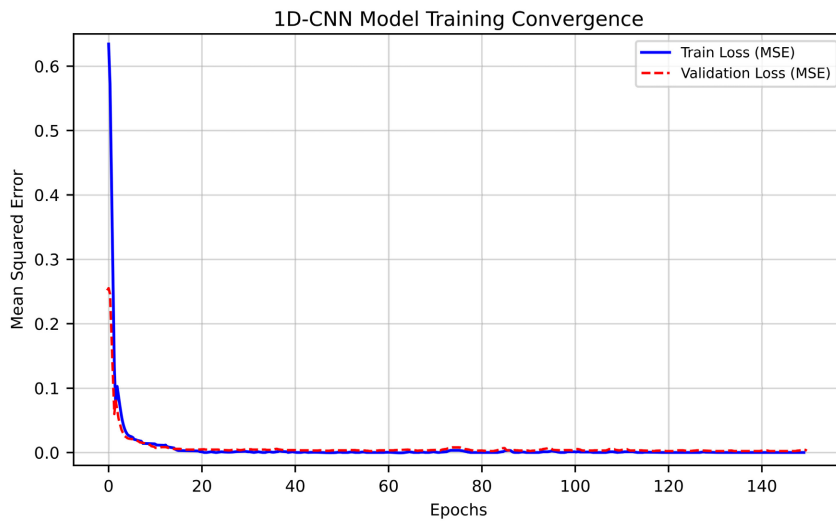
由表 3 可见，本文方法的优势并不在于直接缩短单个有限元模型的物理求解时间，而在于将重复性的剖面重绘、参数赋值、边界设置和结果整理转化为参数化、脚本化和批处理过程。当施工步、控制剖面数量或扰动变量进一步增加时，该优势会更加明显，也为后续 400 组有限元仿真样本库的构建提供了可操作的数据生产基础。

3.4. 有限元样本库与代理模型验证

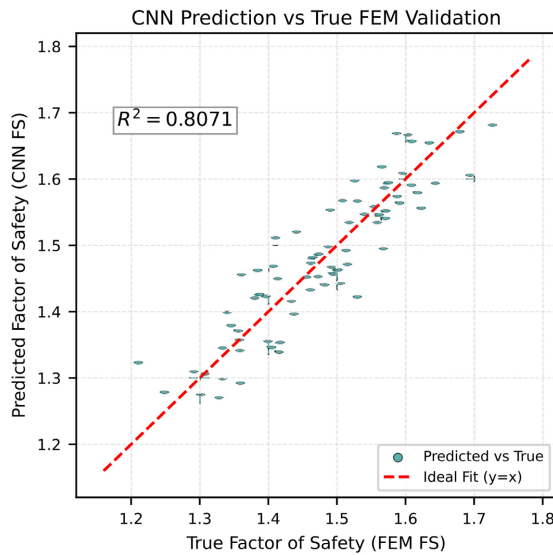
近年来，人工智能和机器学习方法已逐渐用于边坡稳定性评价、安全系数预测和数值样本库构建等研究[9][10]。在完成单个剖面多工况自动化计算后，该流程还可进一步用于批量生成有限元样本库。样本库扩展字段可包括开挖阶段、岩土参数、外部扰动、支护状态、典型位移响应和安全系数标签。需要说明的

是，本文用于代理模型验证的 400 组样本主要采用其中的岩土参数扰动字段，尚未完整覆盖支护状态、全部开挖阶段和多类型外部扰动变量。400 组参数化有限元样本主要围绕弹性模量、黏聚力折减因子和内摩擦角折减因子随机抽样，其中 $E = 8.0 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^8$ Pa，黏聚力因子为 0.7~1.3，内摩擦角因子为 0.8~1.2。

以 1D-CNN 作为示例性代理模型，样本按 8:2 划分训练集和验证集，标准化参数仅由训练集拟合。网络由一维卷积层、ReLU 激活、最大池化和全连接层构成，训练 150 轮，优化器为 Adam，损失函数为 MSE。训练结果显示，训练集和验证集损失在约 20 个 epoch 后趋于稳定；验证集预测值与有限元计算值整体接近，决定系数 $R^2 = 0.8071$ 。该结果说明自动化有限元样本库具备服务快速估算的潜力，但当前模型尚未进行 MAE、RMSE、多模型对比和低安全系数区间误差检验，不能替代有限元复核和现场监测预警。1D-CNN 代理模型训练与验证结果如图 8 所示。



(a) 训练损失曲线



(b) 预测结果对比

Figure 8. Validation results of the 1D-CNN surrogate model
图 8. 1D-CNN 代理模型验证结果

4. 结论

(1) 建立了面向有限元分析的 ZK16 边坡数字孪生几何底座, 并将本文系统明确定位为“数字模型 - 数字影子”阶段。通过 DEM 格网化、B-Spline 曲面拟合、拓扑重心筛选和法向一致性校验, 实现了地表、地层、开挖边界和支护空间关系的一体化表达, 为后续接入监测数据和形成完整数字孪生闭环提供了基础。

(2) 提出了给定控制剖面下的剖面几何自动更新与数据提取及 Abaqus 自动建模流程。该流程可根据不同施工步几何状态自动更新二维计算轮廓, 并完成材料赋值、边界约束、等效支护、网格划分和强度折减计算。与单一商业软件脚本方案相比, 开源几何内核方案在复杂几何处理、多平台扩展和批量样本生成方面具有更好的灵活性。

(3) ZK16 典型剖面计算表明, 第 1 至第 4 施工步安全系数均达到搜索上限 $F_s \geq 2.00$, 第 5、第 6 施工步分别降至 1.88 和 1.56, 说明后期开挖阶段为稳定性控制阶段。强度软化 20% 和 30% 时安全系数分别降至 1.22 和 1.10, 岩土体强度衰减对边坡稳定性影响显著。

(4) 基于 400 组有限元仿真样本的 1D-CNN 示例验证取得验证集 $R^2 = 0.8071$, 说明自动化有限元样本库可为安全系数快速估算提供数据基础。但该结果仍受样本范围、评价指标和模型对比不足限制, 不能替代有限元复核和现场监测预警。

参考文献

- [1] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-61.
- [2] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [3] 荣光旭, 彭艳, 田凯. 基于 Python 的 ABAQUS 有限元强度折减法程序在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 332-339.
- [4] 李宁, 许建聪. 基于 ABAQUS 的三维边坡降雨入渗模块的开发及其应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 667-674.
- [5] 杨雪, 苏谦, 牛云彬, 等. 基于 BIM + 数字孪生的高边坡施工检算动态反馈方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8812-8819.
- [6] 阿迪力·如苏力, 李晓军, 芮易, 等. 基于数字孪生的边坡工程及时施工安全控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(9): 1361-1371.
- [7] 陈超, 阿迪力·如苏力, 李晓军, 等. 基于无人机和数字孪生的边坡施工安全动态评估与反馈方法[J]. 测绘通报, 2025(5): 131-137.
- [8] 杨进昆. 数字孪生驱动的公路边坡状态预测研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [9] 邓炜. 边坡稳定性的人工智能模型及大数据样本的构造方法[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2023.
- [10] 武梦婷, 陈秋松, 齐冲冲. 基于机器学习的边坡安全稳定性评价及防护措施[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 180-188.