

基于BIM的装配式叠合板有限元模型自动转换研究

郭点点

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年7月13日; 录用日期: 2026年8月5日; 发布日期: 2026年8月17日

摘要

针对装配式叠合板BIM设计模型与力学性能分析脱节的问题, 基于Revit与ABAQUS平台开发专用转换插件与脚本, 自动提取叠合板的分层几何、非均质材料属性、钢筋布置及边界条件, 生成高保真有限元模型, 实现一键式转换。验证结果表明, 该方法能有效弥合设计-分析间的语义鸿沟, 显著提升建模分析效率与模型可靠性, 为叠合板正向设计提供了从数字化建模到性能仿真的自动化技术路径, 实现了BIM与FEM在构件级别的深度互操作。

关键词

建筑信息模型(BIM), 有限元分析(FEM), 自动化模型转换, 装配式叠合板, 互操作性

Research on Automatic Conversion of Finite Element Models for Prefabricated Composite Slabs Based on BIM

Diandian Guo

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: July 13, 2026; accepted: August 5, 2026; published: August 17, 2026

Abstract

To address the disconnection between the BIM design model and mechanical performance analysis of prefabricated composite slabs, dedicated conversion plugins and scripts are developed on the Revit and ABAQUS platforms. The layered geometry, heterogeneous material properties, reinforcement layout, and boundary conditions are automatically extracted from the BIM model to generate

a high-fidelity finite element model with one-click conversion. Validation results demonstrate that this approach effectively bridges the semantic gap between design and analysis, significantly improves modeling efficiency and model reliability, provides an automated technical pathway from digital modeling to performance simulation for forward design of composite slabs, and achieves deep interoperability between BIM and FEM at the component level.

Keywords

Building Information Modeling (BIM), Finite Element Analysis (FEM), Automated Model Conversion, Prefabricated Composite Slab, Interoperability

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

装配式建筑是我国推进建筑工业化、实现建筑业转型升级的核心路径，其核心在于通过构件标准化设计、工厂化生产、装配化施工提升建筑质量与效率[1]。叠合板作为装配式建筑最主要的水平受力构件，其力学性能(如承载能力、变形特性、抗裂性能)的精准分析直接决定了工程安全与设计经济性。

建筑信息模型(BIM)技术已成为装配式建筑数字化设计的基础工具，其能够集成构件的几何形状、材料属性、钢筋布置等全要素信息，构建数字孪生产品模型[2]；而有限元分析(FEM)是复杂结构力学性能仿真的核心手段，可实现叠合板分层构造、桁架钢筋等复合特性的精细化力学评估。然而，BIM与FEM源于不同领域的技术体系：BIM以建造语义为核心，关注构件的类型、装配逻辑与全生命周期信息；FEM以分析语义为核心，关注单元离散、材料本构与边界条件。这种语义鸿沟导致两者间的模型转换常出现信息丢失、精度不足等问题，直接造成装配式叠合板设计-分析流程脱节，成为制约其正向设计的关键技术瓶颈。

当前，BIM向FEM模型的转换研究已从早期的中性文件格式交换(如IFC、SAT)，逐步向基于API的精准映射、集成化工作流演进。然而，针对装配式叠合板的专用转换方案仍存在显著短板：现有方法在几何转换中难以完整保持其预制层、现浇层与桁架钢筋的复合构造细节，在属性映射上也无法自动实现分层材料、配筋信息向分析语义的高保真传递，导致转换后的模型精度与效率无法满足正向设计中的精细化分析需求。因此，研发能精准处理叠合板特有构造的BIM-FEM自动转换技术，已成为推动其正向设计应用的关键。本文所开发的BIM-FEM自动转换工具具备明确的适用边界，工具仅适配规则矩形、无开洞、实心构造的普通装配式混凝土叠合板，可稳定实现此类标准构件分层构造、桁架钢筋、材料参数的高精度自动转换与力学模型重构。现阶段工具暂不支持各类复杂工况的叠合板模型转换，具体包括异形轮廓叠合板、板面开设设备洞口及后浇带的叠合板、带有悬挑、变厚度、斜向支撑等复杂边界约束条件的叠合板，同时无法适配空心叠合板、预应力叠合板等特殊构造类型叠合板的模型处理工作。

2. 技术路径演进

早期研究普遍依赖IFC、STEP等中性文件格式实现BIM与FEM间的间接数据交换。然而，该类标准主要面向建筑全生命周期的通用信息管理需求，对复杂分析语义的表达能力存在先天局限，几何与属性信息在转换过程中频现失真或缺失，且伴随显著数据冗余，难以直接支撑高精度有限元分析[3][4]。IFC格式虽被广泛采纳，但其基于EXPRESS语言的表达体系与FEM所需的本构参数、单元类型及荷载工况

等存在根本性语义鸿沟，导致转换过程中大量分析信息被降维或滤除。为提升几何传递的可靠性，学界逐步转向 SAT、DWG、IGES 等几何载体。许红胜等和王超东等验证了 SAT 格式导入 ABAQUS 的有效性，指出其 NURBS 曲面表达在壳单元建模中具有良好的几何保真度[5] [6]；Kline 等采用 DWG 格式维持几何数学完备性，确保复杂曲线与曲面在传递过程中不产生离散化误差[7]。但上述方案本质上仍停留于几何层面，材料本构、边界条件、荷载工况及层间接触关系等分析属性仍需人工重新定义，信息完整性不足，自动化程度有限，难以满足装配式构件快速迭代分析的需求。

为实现分析语义的自动化迁移，基于 API 的直接转换已取代中性文件路径，成为当前主流范式。API 路径的核心优势在于直接读写原生数据模型，绕开中间格式的解析与重构环节，从根本上消除信息损耗的风险。吴尧开发了 Revit API 转换接口，实现构件级几何信息提取与分类存储；程李娜结合 Dynamo 开发 ABAQUS 插件，通过可视化编程节点完成部分分析语义的自动化映射[8]；Zou 等基于 DfMA (面向制造与装配的设计)方法将 BIM 模型直接转为 ANSYS 命令流，实现了设计模型与分析模型的一体化表达[9]；何守涛与张子桢验证了 API 路径在临时结构分析中的适用性，证明其能有效降低重复建模工作量[10] [11]；袁仕杰进一步将其应用于型钢混凝土节点的精细化模拟，验证了 API 转换在高非线性分析场景中的可行性[12]。上述研究虽覆盖不同应用场景，但均一致表明：API 直接转换能有效规避中间文件的信息损耗，完整保留几何与属性信息，是提升转换质量的关键技术路径。然而，既有 API 研究多针对单一构件类型或特定分析需求，尚未形成面向叠合板这类复合构造的通用转换方案。

集成化协同平台的出现进一步拓展了自动化的边界与应用场景。Crespi 等建立了 Scan-to-BIM-to-FEM 全链路工作流，覆盖从物理扫描到力学仿真的完整链条，为既有结构评估提供了高效技术手段[13]；Barazzetti 等提出 Cloud-to-BIM-to-FEM 框架，支持云端协同建模与仿真分析，使多专业团队可并行参与模型修正与分析校核[14] [15]；Li 等构建 Dynamo-Revit-Abaqus 三层集成流，通过参数驱动实现全自动一键转换与分析，将设计变更到分析结果获取的周期从数天压缩至小时级别[16]；Ninic 等的 SATBIM 框架融合等几何分析与元模型评估，支持多组件协同优化，在保持分析精度的同时显著降低计算成本[17]。此外，部分研究尝试将机器学习方法与转换流程结合，通过训练语义映射模型来提升材料参数匹配的智能水平，虽仍处于探索阶段，但为未来研究提供了新方向。

目前国内外用于 Revit 至 ABAQUS 模型转换的主流技术分为三类：一是基于 IFC/SAT 中性文件通用转换方案；二是徐雪梅等开发的通用梁柱板式 Revit-ABAQUS API 转换接口[18]；三是 Zou 等基于 Dynamo 的参数化通用转换脚本[9]。三类方案均面向通用建筑构件开发，未针对装配式叠合板分层复合构造做定制化优化，在叠合板转换场景下存在明显缺陷，现将三类主流方案与本文开发的叠合板专用转换工具从适用对象、分层构造处理、桁架钢筋自动化等多个维度开展对比，如表 1 所示。

Table 1. Comparison of technical paths for BIM-FEM model conversion of precast composite slabs
表 1. 装配式叠合板 BIM-FEM 模型转换技术路径对比表

转换技术路径	性能对比
中性文件转换(SAT/IFC/DWG)	仅支持基础几何传递，无分层、钢筋自动映射；构造信息丢失严重，模型精度差；自动化程度极低，多数分析参数需手动重建；仅适配均质现浇梁板，无法用于叠合板仿真
通用 Revit-ABAQUS API 接口	可提取构件整体几何，无叠合板分层、桁架钢筋专用模块；不能区分预制/现浇层，复合结构仿真精度不足；自动化中等，细部构造需人工补充；仅适用于梁柱、整块现浇楼板
Dynamo 通用参数化转换脚本	仅能批量导出基础几何，缺少叠合板复合构造映射逻辑；手动拆分双层板易引入坐标误差；自动化中等，大量细部需人工调整；适配常规现浇构件，叠合板处理效率极低

3. 关键解决措施与技术方案

3.1. 面向分析的建模与标准化

实现 BIM 与 FEM 模型高质量转换, 需从源头构建适配分析需求的技术体系, 核心是让 BIM 建模细节、逻辑与 FEM 精度要求、计算逻辑精准匹配。建模规范层面, 需建立全局网格对齐标准与 BIM 模型细节等级界定标准, 避免信息冗余或缺失。针对装配式叠合板, 赵静等依托实际项目提出基于 C# 与 Revit API 的二次开发方案[19], 通过 Visual Studio 2017 构建参数化建模工具, 支持输入关键参数自动建模及参数联动更新, 为 FEM 分析提供标准化、高精度模型基础。

3.2. 几何、属性映射与智能辅助

几何转换是基础, 复杂几何易导致转换失败或网格质量差。采用 Dynamo 参数化脚本可自动生成精确三维几何体, 邹新等提出的 ACIS-API 融合方法能增强几何载体兼容性与稳定性[20]; 针对叠合板, Rudenko & Petryna 探讨的基于 IFC 的 SweptSolid 表示法自动生成不同维度有限元模型的算法[21], 为叠合板截面在不同分析场景下的简化与精细化表示提供了灵活适配方案。

属性与边界条件映射是填平语义鸿沟的关键, 需精准传递叠合板分层材料参数、桁架钢筋属性等静态信息, 以及荷载、约束、施工阶段时变特性等动态信息。技术上, 通过 API 接口可自动提取映射核心信息, 结合外部数据库能实现非几何信息全维度自动化传递; 将关键参数设为可调变量, 通过优化算法与实测数据匹配, 可提升模型可靠性。

自动化工具是效率保障, Dynamo 等可视化编程工具广泛用于叠合板参数化建模与脚本开发[22], 可视化编程 + 专用插件组合模式可形成建模 - 分析自动化链路; Yavan & Maalek 在 Dynamo 平台集成有限元分析、可靠性评估与优化算法, 构建了自动化设计优化闭环[23]。

4. 研究方法和技术路线

(1) 装配式叠合板 BIM 模型的分析语义定义与标准化建模

基于 Revit 平台, 针对叠合板的预制层、现浇层、桁架钢筋等复合构造, 定义其 BIM 模型的分析语义(如分层材料属性、钢筋空间坐标、层间接触类型); 参考 DfMA 理念与多级信息模型(ml-TIM)方法, 建立面向 FEM 的装配式叠合板 BIM 建模规范, 确保模型信息的完整性与可转换性, 装配式叠合板复合构造如图 1 所示。

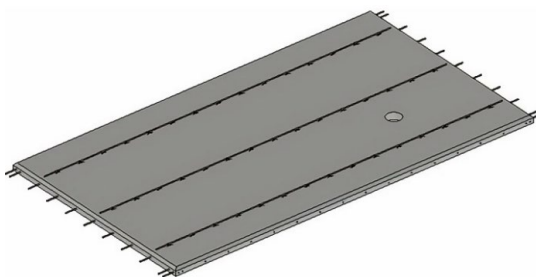


Figure 1. Schematic of precast composite slab composite structure [24]

图 1. 装配式叠合板复合构造示意图[24]

(2) BIM-FEM 模型自动转换的语义映射规则与插件开发

构建装配式叠合板 BIM 语义与 FEM 语义的映射关系库: 包括 BIM 几何实体向 FEM 单元(壳单元、

实体单元、钢筋单元)的映射、BIM 材料属性向 FEM 本构模型的映射、BIM 连接关系向 FEM 边界条件的映射；基于 Revit API 与 Python 语言开发专用转换插件，实现从 BIM 模型中自动提取分析语义、生成 ABAQUS 可识别的有限元模型脚本，完成一键式转换。

(3) 技术验证与工程应用

以实际装配式建筑项目中的叠合板为案例，应用所开发的转换插件与 workflow，对比手动建模与自动转换的效率、分析结果的精度，验证技术方案的可行性与实用性。

基于 Revit 平台，结合装配式叠合板预制层 + 现浇层 + 桁架钢筋的复合构造特性，制定面向 FEM 分析的 BIM 建模规范。明确叠合板 BIM 模型的细节等级要求，界定分层几何尺寸、材料属性、钢筋布置、连接边界等关键信息的建模标准；参考多级信息模型理念，建立模型信息与 FEM 分析需求的对应关系，确保 BIM 模型能够完整承载分析语义，为后续自动转换提供标准化的数据基础。选取实际工程中的叠合板构件，对比自动转换与手动建模的效率、分析结果的精度，验证技术方案的有效性。

4.1. Revit 二次开发流程

装配式叠合板 BIM-FEM 转换插件的开发基于 Revit 2018 平台，采用 C#语言实现，具体流程如下：

(1) 开发环境配置：安装 Revit 2018 及对应版本的 Revit SDK，确保 SDK 版本与 Revit2018 匹配；打开 Visual Studio 2017，将目标框架设置为 .NET Framework 4.5.2。

(2) 项目创建与引用添加：在 Visual Studio 中新建类库(.NET Framework)项目，添加 Revit 2018 对应的 RevitAPI.dll 和 RevitAPIUI.dll 引用；将引用的复制本地属性设置为 False，避免插件部署时出现文件冗余或版本冲突，引用界面如图 2 所示。



Figure 2. Interface of RevitAPI.dll & RevitAPIUI.dll referencing

图 2. 引用 RevitAPI.dll 与 RevitAPIUI.dll 界面

(3) 命名空间与接口实现：引入 Autodesk.Revit.DB、Autodesk.Revit.UI 等命名空间；创建插件主类，实现 IExternalCommand 接口，重载 Execute 方法作为插件功能的入口。

(4) 核心功能开发：模型筛选与信息提取：通过 FilteredElementCollector 类筛选出装配式叠合板的预制层、现浇层及桁架钢筋构件；利用 Solid、Edge 等类提取几何尺寸，通过 Parameter 类读取材料强度、钢筋规格等属性信息。

(5) 语义映射与数据转换：将 BIM 中的材料属性映射为 FEM 本构参数，将构件连接关系映射为边界约束条件；将提取的信息转换为 ABAQUS 脚本可识别的格式。

(6) 编译与调试：在 Visual Studio 中设置调试程序为 Revit 2018，通过断点调试验证代码逻辑；编译项目生成.dll 文件，将其复制到 Revit 2018 的插件目录(C:\ProgramData\Autodesk\Revit\Addins\2018\))进行功能测试。

(7) 插件部署：编写.addin 配置文件，指定插件名称、描述、dll 路径及 Revit 2018 版本；将.addin 文件放置在 Revit 2018 的 Addins 目录下，启动 Revit 即可自动加载插件，如图 3 所示。

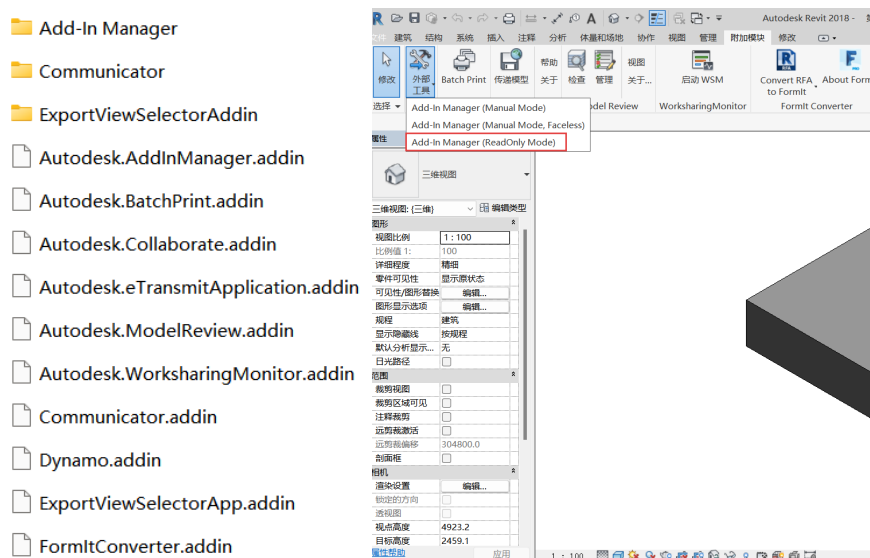


Figure 3. Revit 2018 Plug-in: Addins Directory (Left) & Loading Interface (Right)

图 3. Revit 2018 插件部署的 Addins 目录(左)与插件加载界面(右)

4.2. ABAQUS 自动化脚本开发流程

(1) 脚本框架搭建: 导入 abaqus、abaqusConstants、visualization 等核心模块, 定义脚本的全局参数, 构建模型创建 - 网格划分 - 荷载施加 - 分析计算 - 结果输出的完整流程框架。

模型重建模块: 读取 Revit 插件输出的脚本文件中的几何数据, 通过 Part、Instance 等类创建叠合板预制层、现浇层及桁架钢筋的实体模型; 根据映射关系库中的参数, 通过 Material、Section 类定义各部分的材料属性与截面类型。

(2) 网格划分模块: 采用结构化网格划分方法, 通过 MeshControl 类设置网格尺寸与划分算法, 对叠合板主体结构采用壳单元(S4R)划分, 对桁架钢筋采用梁单元(B31)划分, 确保网格质量满足分析精度要求。

(3) 分析设置模块: 通过 Step 类创建静力分析步, 定义分析收敛准则; 通过 Load、BC 类施加叠合板自重、活荷载及边界约束条件, 荷载与约束参数直接从 Revit 插件输出数据中读取, 无需手动输入。

(4) 结果输出与验证准备模块: 设置应力、应变、位移等关键分析结果的输出请求, 通过 Job 类提交分析任务。分析完成后, 自动提取核心结果数据并生成标准化的结果文件(.odb), 为后续进行转换模型精度验证与力学性能评估提供完整的数据基础。

为直观呈现装配式叠合板 BIM 建模 - 语义转换 - 有限元建模 - 力学分析的正向 workflow, 本文设计的 BIM 向 FEM 自动转换技术流程如图 4 所示。构建流畅的单向分析链路是这一流程的核心目标, 需衔接模型信息提取、语义映射、分析模型生成等关键环节: 该流程以 Revit 平台的叠合板 BIM 模型为基础起点, 通过融合 API 与 Dynamo 技术的专用转换插件, 自动提取模型分析语义并映射生成 Abaqus 有限元模型; 待完成叠合板的力学性能分析后, 即完成整个 BIM 到 FEM 的正向转换与分析链路。

现有研究也为这一集成 workflow 提供了技术参考: Beck 等提出的基于 Web 服务器和版本控制的自动化集成框架[25], 通过 Python Web 服务器实现跨平台数据处理, 依托版本控制 JSON 文件追踪模型变更, 支持自动重算与 BIM 更新, 为叠合板全流程自动化提供了支撑; 张楠等研究的 RIMS 工作流[26], 则通过 Web 端有限元计算与 WebGL 可视化技术, 实现分析结果三维呈现, 体现了双向交互的雏形, 为跨平台协同奠定了基础。

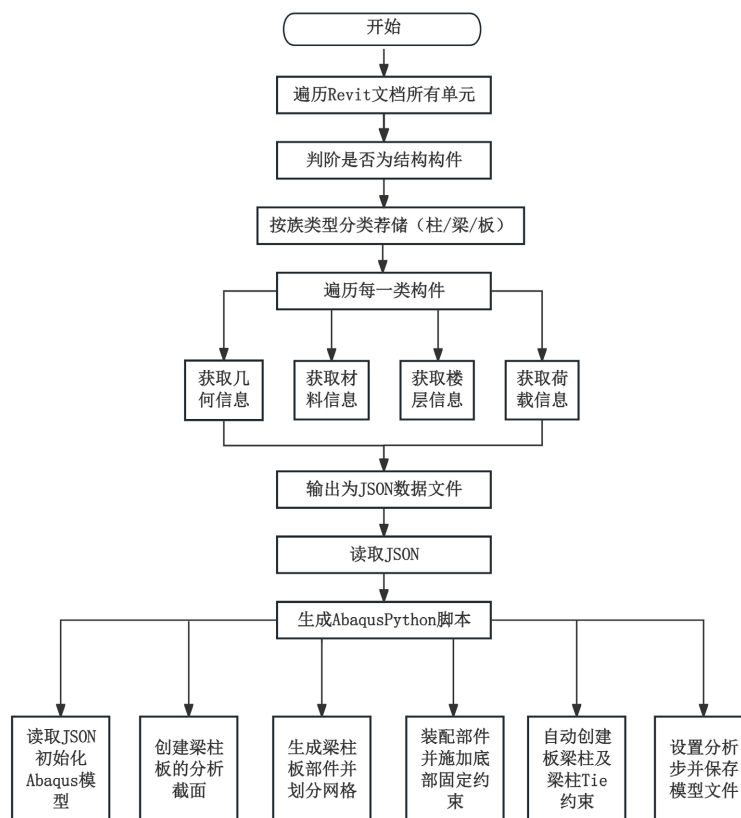


Figure 4. Prefabricated composite slab BIM-FEM automatic conversion technology process

图 4. 装配式叠合板 BIM-FEM 自动转换技术流程

5. 总结

在今后发展体系中,装配式建筑体系不可避免会成为建筑行业的主流趋势,与此同时 BIM 与有限元分析的深度融合也不断朝着智能化与自动化方向发展,不过仍存在相对应的问题亟须进一步深入研究。针对装配式叠合板 BIM-FEM 自动转换目前开展的研究,转换对象大都集中在单一叠合板构件的几何信息传递与静力分析,在复杂装配体协同转换及动力荷载作用下非线性分析方面的研究较少;其次叠合板预制层、现浇层及桁架钢筋的复合构造如何在转换过程中实现高保真语义映射,避免分析模型因信息丢失而偏离实际力学行为,也是学者今后探讨的主要方向;最后叠合板拼缝节点及板-梁连接区域应当是转换精度的薄弱环节,学者应当对节点区域的细部构造信息传递与约束边界自动生成加强研究,拼缝处应力如何通过转换规则有效传递至有限元模型,避免节点区域分析结果失真,均可以作为未来研究发展方向。

参考文献

- [1] Fedorik, F., Makkonen, T. and Heikkilä, R. (2016) Integration of BIM and FEA in Automation of Building and Bridge Engineering Design. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*, Auburn, 18-21 July 2016, 735-741. <https://doi.org/10.22260/isarc2016/0089>
- [2] Beirnaert, F. and Lippens, A. (2018) Analysis of the Interoperability from BIM to FEM. Master's Thesis, Tampere University of Applied Sciences.
- [3] 蔡春声, 庞春地, 宋晓东. 建筑信息模型与有限元模型桥梁信息传递技术分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(6): 1339-1345.

- [4] 吴尧. 基于 Revit 的建筑信息模型数据转换研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [5] 许红胜, 郭佩云, 颜东煌, 等. BIM 与 ABAQUS 模型一体化分析应用研究[J]. 公路与汽运, 2022(1): 128-132.
- [6] 王超东, 简永洲, 李福东, 等. 基于 SAT 文件的 BIM 模型向 FEM 模型转化思路研究[J/OL]. 工业建筑: 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.2068.TU.20250808.1738.002>, 2026-07-24.
- [7] Klinc, R., Gabršček, D., Česnik, J., Žibert, M., Hostnik, M. and Logar, J. (2021) Development of a Semiautomatic Parametric Method for Creation of an I-BIM Model of a Tunnel for Use in FEM Software. *Journal of Advanced Transportation*, **2021**, Article ID: 8843277. <https://doi.org/10.1155/2021/8843277>
- [8] 程李娜. 基于 BIM 精细化模型的有限元分析在边坡设计中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [9] Zou, Y., Hu, F., Yang, H., Cai, J., Pan, H. and Zhang, Q. (2024) Detailed Design of Special-Shaped Steel Structures Based on DfMA: The BIM-FEM Model Conversion Method. *Buildings*, **14**, Article 1320. <https://doi.org/10.3390/buildings14051320>
- [10] 何守涛. 基于 Revit 二次开发的承插盘扣式支撑架有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2024.
- [11] 张子楨. 基于 Revit 的附着式升降脚手架二次开发及有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2025.
- [12] 袁仕杰. 基于 BIM 与有限元软件的型钢混凝土结构梁柱节点施工模拟及分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [13] Crespi, P., Franchi, A., Ronca, P., Giordano, N., Scamardo, M., Gusmeroli, G., *et al.* (2015) From BIM to FEM: The Analysis of an Historical Masonry Building. *WIT Transactions on The Built Environment*, **149**, 581-592. <https://doi.org/10.2495/bim150471>
- [14] Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M. and Schiantarelli, G. (2015) Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural Simulation with Accurate Historic BIM from Laser Scans. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **57**, 71-87. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>
- [15] Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Oreni, D., Previtali, M., *et al.* (2015) BIM from Laser Clouds and Finite Element Analysis: Combining Structural Analysis and Geometric Complexity. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **5**, 345-350. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w4-345-2015>
- [16] Li, S., Yu, T., Liu, Y., Li, Y., Lei, B., Qiao, W., *et al.* (2025) Research on Parametric Modeling and Model Transformation of Proton Hospital Based on Bim. *Buildings*, **15**, Article 1658. <https://doi.org/10.3390/buildings15101658>
- [17] Ninic, J., Alsahly, A., Vonthron, A., Bui, H., Koch, C., König, M., *et al.* (2021) From Digital Models to Numerical Analysis for Mechanised Tunnelling: A Fully Automated Design-through-Analysis Workflow. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **107**, Article ID: 103622. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103622>
- [18] 徐雪梅, 何翔, 段翔, 蔡涛, 张广. Revit-Abaqus 结构模型转换接口开发[J]. 土木建筑工程信息技术, 2023, 15(1): 89-93.
- [19] 赵静, 杨科学, 李继先. 基于 C 的装配式叠合板二次开发——以某高速公路服务区项目为例[J]. 中国水运, 2025(18): 124-126.
- [20] 邹新, 林婧铭, 杨旭杰, 等. 基于 BIM 的精细化有限元模型转换方法[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(1): 137-143.
- [21] Rudenko, I. and Petryna, Y. (2025) An Approach to Automatic Building Information Modeling-Based Generation of Finite Element Models of Different Complexity and Finite Element Dimensionality. *Buildings*, **15**, Article 171. <https://doi.org/10.3390/buildings15020171>
- [22] 张信贵, 梁健航, 韦刚, 等. 基于 Dynamo 的 Revit-Midas 深基坑模型信息转换技术[J/OL]. 桂林理工大学学报: 2025. <https://link.cnki.net/urlid/45.1375.n.20251126.1707.002>, 2025-11-27.
- [23] Yavan, F. and Maalek, R. (2025) Reliability-Constrained Structural Design Optimization Using Visual Programming in Building Information Modeling (BIM) Projects. *Applied Sciences*, **15**, Article 1025. <https://doi.org/10.3390/app15031025>
- [24] 赵桐桐, 王亮, 陈鑫尧. 基于 Dynamo 的预制叠合板参数化建模方法研究与应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2024, 16(1): 78-84.
- [25] Beck, J., Jürgens, H. and Henke, S. (2024) Automating Stability Analysis Using BIM-FEA-Integration. In: Guerra, N., *et al.*, Eds., *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*, CRC Press, 338-341. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-37>
- [26] 张楠. 基于 BIM + WebGL 技术的结构有限元计算与数据交互方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2024.