

# 英文论文翻译

## 基于 BIM 技术的建筑安全规划中的危害辨识及 防范

作者: Sijie Zhang

作者: Kristiina Sulankivi

作者: Markku Kiviniemi

作者: Ilkka Romo

作者: Charles M. Eastman

作者: Jochen Teizer

## 摘 要

建筑信息模型在建筑设计和建筑规划中的应用正在迅速发展。基于 BIM 的建模和 4D 仿真 (3D 和调度) 为安全和物流应用带来了许多好处。然而, 到目前为止, 在建模和规划安全过程方面只开发了有限的自动化。本研究的目的是探讨如何在建筑项目的规划阶段的早期识别和消除潜在的跌落危险, 这些危险是不知不觉地纳入施工进度表的。

本文首先介绍了国内外建筑安全与 BIM 的研究概况。然后, 提出了一个包含 BIM 安全规则自动检查算法的框架。开发的原型使用模型进行了测试, 其中包括芬兰的一个办公室和一个住宅建筑项目。第一个案例研究突出了手动与自动交配的安全建模跌倒保护系统的比较。它还描述了保护安全设备模型的多种设计和建成方案的细节。第二个案例研究展示了将该框架应用于项目进度计划的结果。它特别模拟跌落危险的检测和预防。这项工作的贡献是一个自动化的规则检查框架, 有效地将安全融入 BIM, 并为从业人员提供一种检测和预防跌落相关危险的方法。会上还讨论了有关已开发的先进型产品商业化的公开问题, 并探讨了扩大传统安全管理做法对解决实地安全问题可能产生的影响。

**关键词:** 建筑信息模型, 建筑安全规则和代码检查, 防止坠落危险, 通过设计进行计划、调度和模拟预防

# Abstract

The applications of Building Information Modeling (BIM) in building design and construction planning are growing rapidly. BIM-based modeling and 4D simulation (3D and schedule) has brought many benefits to safety and logistics applications as well. However, only limited automation in modeling and planning safety processes has been exploited so far. The objective of this study is to investigate how potential fall hazards that are unknowingly built into the construction schedule can be identified and eliminated early in the planning phase of a construction project. A survey of research on construction safety and BIM is presented first. Then, a framework was developed that includes automated safety rule-checking algorithms for BIM. The developed prototype was tested using models including an office and a residential building project in Finland. The first case study highlights the comparison of manual vs. automated safety modeling of fall protective systems. It also describes the details to multiple design and as-built scenarios where protective safety equipment is modeled. The second case study presents results of applying the framework to the project schedule. It specifically simulates fall hazard detection and prevention. The contribution of this work is an automated rule-checking framework that integrates safety into BIM effectively and provides practitioners with a method for detecting and preventing fall-related hazards. Presented are also discussions of open issues regarding commercialization of the developed prototype and considerations which explore what impact it might have on resolving safety issues in the field by extending traditional safety management practices.

**Key Words:** Building Information Modeling, Construction safety rule and code checking, Fall hazard prevention, Planning; scheduling; and simulation, Prevention through Design

# 目 录

摘要	II
Abstract	III
第 1 章 介绍	1
第 2 章 背景	4
2.1 传统的风险分析和减轻灾害	4
2.2 施工安全规划中的信息建模	4
第 3 章 基于 BIM 的规则检查	6
3.1 规则检查方法	6
3.2 基于规则的算法在案例研究中的应用	6
第 4 章 基于 BIM 的跌落危险检测和 预防规划案例研究的经验教训	9
4.1 案例研究 1: 手工建模与自动建模的比较	9
4.2 案例研究 2: BIM 中的动态跌落危险检测和预防	15
4.3 讨论	21
第 5 章 审查 BIM 平台以支持安全规划	23
5.1 已知问题	23
第 6 章 总结	25
致谢	26
参考文献	26

## 第1章 介绍

工作场所伤害、疾病和死亡统计数据表明，建筑施工中的职业健康和安全 (OHS) 仍然是一个全球性问题。超过三分之一 (36%) 的美国工作场所的死亡事故发生在建筑业。同样，芬兰的建筑业造成了四分之一的死亡职业事故。与其他几个行业一样，安全规划在生产规划领域占有关键地位。然而，在建筑施工行业的安全，安全规划是与工程项目设计及规划阶段分开进行。尽管高处坠落仍然是建筑工地的一个主要安全风险。但是在大多数现有项目中，高处坠落保护计划通常要等到施工开始后才会制定。在施工计划阶段发现和解决安全问题时还会出现其他问题。例如，在建筑工程项目存在的恶劣天气 (气候、独特性) 和动态 (多种资源、时间限制) 条件下，工人层面的安全交流尤其具有挑战性。以前的几项研究也报告了类似的问题。

有效的安全规划的主要障碍之一是传统的安全规划仍然主要依赖纸质的二维图纸和时间表来了解建筑工地的安全装备需求。在防止高处坠落方面，图 1.1 提出了一个传统的防跌落计划的例子，其中各种防跌落系统已被标记为不同颜色的建设计划

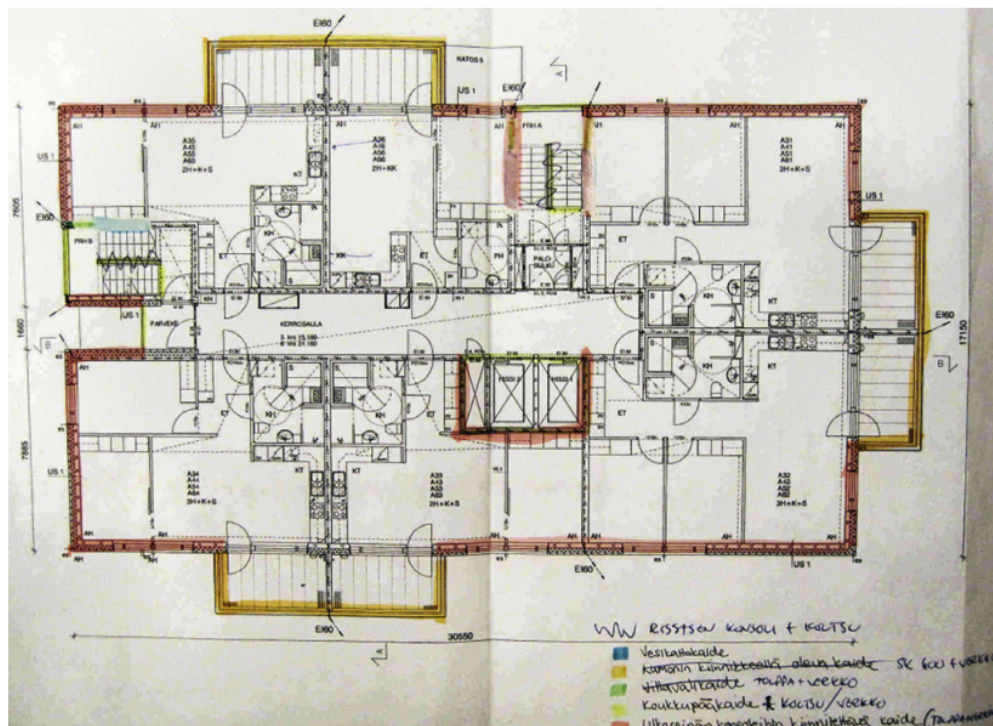


图 1.1 传统跌落保护计划的示例

这样手工的高处坠落危害辨识和计划会导致低效率，其中一些原因是：

- 它需要专业的安全工程师根据自己的经验发现潜在的安全隐患并确定安全设备。
- 许多安全问题是隐含的，因为建筑计划中没有标明部分完整的条件。
- 建设项目的动态性导致了安全需求的变化。基于静态图纸，很难确定不同施工阶段、进度表的潜在跌落危险。

- 施工进度会因天气、材料交付等因素而发生变化，导致安全计划发生变化。每次更改时间表都要更新安全计划，这既费时又费力。
- 举例来说，与小的孔洞能给足部造成伤害相比，人会更容易发现他们自己即将在边缘跌落到低处。这些漏洞很难或从未在纸质计划中绘制，因此可能永远不会被发现，即使是专家。

目前用于处理和报告建筑项目安全与健康相关问题的方法效率低下。新型技术可以协助施工安全专家更容易识别和解决安全隐患，同时解决施工现场条件的复杂性和动态性，从而可以更安全施工和更少的努力。

建筑信息模型 (BIM) 是一种对设备的物理和功能特性的数字表示建筑信息模型。BIM 是一种共享的知识资源，用于获取有关设施的信息，这些信息为设施在其生命周期中的决策提供了可靠的基础; 定义为从最初构想到拆除的存在。建筑信息模型 (BIM) 在建筑/工程/建筑 (AEC) 和设施管理 (FM) 行业的不断推广，正在改变人们对待安全的方式。建筑信息模型 (BIM) 在施工作业计划和管理以及安全管理中的应用正在迅速增加。一个出发点是在建筑设计和工程阶段的早期强调安全方面。Zhang 等人同时指出，建筑业需要解决目前使用的纸张和人工安全程序效率低下的问题。

基于 BIM 的方法正被应用于建筑设计和规划。在工地安全管理和监督方面也越来越多地实施这些措施。人工安全检查通常遵循以下程序:

- 使用建造工程进度表，以确定建造工程的施工动作、次序或工程任务项目的空间布局
- 确定造成安全隐患的临时条件
- 规划纠正措施以消除安全隐患
- 将这些纠正措施整合到方案中

然而，人类的认知技能仅限于心理模拟。复杂的环境表明，一个更加积极的、基于仿真的方法和使用预定义的模式检查可以大大加强这一系列活动的有效性。正如 Kiviniemi 所说，只有拥有一套完整的方法才能成功地提供所有领域的能力。

在前人研究成果的基础上，本研究旨在开发一个基于 BIM 的跌落危险自动识别与规划工具，该工具

- 基于施工进度动态识别潜在跌落危险
- 有效协助劳动密集型作业的防跌落系统的建模与规划任务
- 通过可视化潜在危险提高工人的安全意识

本案例研究还旨在评估自动化安全代码检查和规划的可能性、好处和开发需求。此外，我们还研究了开发的基于 BIM 的原型工具的可用性和成熟性，该工具用于支持建筑施工项目中的预防规划。

本文结构如下: 第一部分对传统的减灾方法和信息建模在施工安全规划中的应用进行了综述。第二部分介绍了已开发的安全规则检验原型及其计算方法。第三部分介绍了原型在两个案例研究中的应用。在第一个案例研究中, 讨论了跌落保护系统的人工建模和自动建模, 并对设计方案与实际情况进行了比较。在第二个案例中, 以施工进度计划为例, 说明了样机产生的跌落危险检测和防护的动态特性。第四部分比较了几种 BIM 在建筑安全规划中的应用。论文的最后一部分对研究结果和贡献进行了总结和讨论。

## 第2章 背景

### 2.1 传统的风险分析和减轻灾害

Hinze 等人调查了使用历史信息的有效性。例如，他审查了职业安全与健康管理局 (OSHA) 可记录的伤害率，以提高建筑项目的安全绩效。利用历史信息的一个有价值的替代方法是使用领先的安全性能预测指标，作为未来安全性能水平预测指标的措施安全指标或安全风险分析是预防建筑安全事故发生的关键环节。发展「建造业工作安全分析」，以识别潜在的失控事件及评估事件发生的机会。Shapira 根据塔式起重机的运作情况，制订了一套全面的安全水平指标。与考虑在一般建筑场地上使用塔式起重机不同，他增加了一个因素，针对特定场地的个性化安全水平。Hallowell 和 Gambatese 建立了混凝土模板施工安全风险等级量化方法。尽管研究集中在积极利用技术提高安全风险水平上，但是迄今为止还没有实用的方法来解决如何将数据用于工业从业人员和 BIM 技术之中。因此，开发更先进的方法来整合这些信息就显得尤为重要。

### 2.2 施工安全规划中的信息建模

新兴技术包括数据库、计算机辅助模拟和可视化技术为安全规划提供了新的机遇。其中许多起源于传统的安全研究。例如 Hinze、Gibb、Choudhry、Toole、Gambatese、Lingard 和 Wakefield 等人通过设计 (PtD) 在建筑业的操作安全与健康 (OHSC) 的方式为预防工作贡献了基础研究。这些研究成果激励了其他研究人员，甚至更先进的方法，开发或应用新兴技术到 OHSC。

Hadikusumo 和 Rowlinson 开发了一个安全过程设计 (DFSP) 工具，以帮助用户识别建筑构件和过程中固有的安全隐患。DFSP 数据库包含建筑物目标、相关潜在安全隐患和可能的事故预防数据库。它引入一套综合安全及建造管理系统，使用现有的四维计算机辅助设计模型。发展概念框架采用虚拟原型技术，以协助建造业的安全管理。它由三个部分组成：建模与模拟、不安全因素的识别和安全培训。探讨了可视化技术在地铁施工安全管理和风险评估中的应用。然而，随着施工进度的提高，行业也需要探索更先进、更有效的方法来实现安全危害辨识和可视化。

BIM 已经被迅速认识到它可以改变建筑项目交付的过程。也认识到 BIM 可以用来促进安全管理，并与其他施工计划过程相结合。Turner 建筑公司建立了一个标准化的模型检查程序，以确保他们的项目符合严格的安全标准。他们的 BIM 专家开发了一个基于 Solibri 模型检查器 (SMC) 的规则集包。芬兰的 VTT 技术研究中心已经开发了一个详细的防坠落建模和 4D 可视化框架。工作内容包括临时安全构筑物和进行安全施工所需设备的建模。它还为建筑物中安全设备的永久安装建立模型，用于建造、运行和维护阶段。人们还尝试展开最佳实践，以改善承建商、设计师和分包商之间的协作规划程序。这些现有的研究无疑为使用 BIM 改进安全规划和危害辨识铺平了道路，而与手动过程相比，需要更智能的方法来提供自动化和时效性方式的安全规则检查。

将安全管理任务连接到 4D 模型中，为审查和评估作为施工操作一部分的安全提供了



全新的机会。例如，它可以加强安全规划方面的合作，增强整体安全沟通。4D 规划可以创建一个安全规划实践，这个实践在一个项目中比在传统的建筑项目中开始得更早。此外，它可以产生更详细的安全规划。例如，早期的安全计划，可能需要。与防跌落相关的建模包括护栏、保护罩和网以及安全带锚点的安全特征构成 4D 模型。Zhou 提出了一种基于 4D 建设规划的协作方法。他们提出建筑安全及数码设计的新研究方向，例如利用技术让建筑工人与设计师分享知识，以及利用视觉化技术将建筑地盘的知识融入设计。Zhang 开发了一个基于 BIM 的自动化工具，可以帮助检测潜在的坠落危险，包括从前面板边缘、板孔和墙壁开口处坠落。

除了自动的安全检查，还有能力自动建模建议的跌倒防护，这可以是一个劳动密集度很大的任务，当使用现有的 BIM 为基础的软件，自动规则检查的工业基础类 (IFC) 的模式，也已经得到了研究。然而，到年开发框架的可能性和目前的限制还不清楚。需要努力研究在现有的施工规划流程中实施这种原型的适用性、局限性和要求。

4D 方法的一个重大缺陷是依赖于计算机化的施工进度表。施工作业是动态的，可能会发生与原计划工程不符的变更。因此，数码时间表很少经常更新，以准确反映在任何特定时间点正在进行的所有行动。同时，建议安全建模与永久安装的建筑部件的设计和工程相同水平的细节，这使得计划和模型维护工作更加复杂。在这种基于 BIM 的规划活动中，需要额外的安全知识、时间和技术资源，使实际执行变得困难。因此，在大规模应用于该领域之前，对于从业人员来说，了解额外的建模要求和基于 BIM 的安全危险检测和预防工具的好处是有益的。

## 第3章 基于 BIM 的规则检查

### 3.1 规则检查方法

现有的安全规则、指南和最佳实践可以与现有的三维 (3D) 设计和进度信息结合使用, 以形成一个自动化的安全规则检查系统。其目的是在建筑物建造时自动识别这些动态条件, 在虚拟 3D 空间中识别它们的位置, 并交互式或自动地为多种危险提供解决方案和保护系统的可视化。

这个平台可以作为一种工具, 使人们能够方便地、易于理解地看到随着时间的推移在建筑和安全方面取得的最新进展, 特别是能够发现工地上的危险地点。安全措施的指示将有助于安全管理人员在施工计划阶段以及施工期间提前规划安全。规则检查程序包括以下程序:

- 规则解释: 从安全规则或最佳实践 (例如, OSHA) 对安全规则的解释是一个基于逻辑的映射, 从人类语言到机器可读的形式。可以从书面规则中分析和提取规则中的名称、类型和其他属性。构建模型准备: 必须很好地构建模型, 以包括用于进行规则检查的所需对象、属性和关系。此外, 由于防坠设备的需要取决于施工工作的状况, 因此需要一个包括建筑组件安装时间表/ 顺序的 4D 模型。
- 规则执行: 规则执行阶段将转换后的规则集与准备好的构建模型集合在一起。该规则可应用于数以千计的条件情形, 需要组合跟踪。规则的执行有两个步骤: (a) 自动检查模型以识别不安全的条件, (b) 识别和应用候选解决方案
- 纠正不安全情况的行动。这最后一步可以通过多种方式控制, 对每种情况进行人工干预, 通过应用规则来确定最佳修正, 从而完全自动地解决问题。
- 规则检查报告: 检查结果可以以多种形式报告:(a) 使模型中应用的安全防护设备可视化, (b) 基于 excel 的不安全状况报告和采取的纠正措施。此外, 为安全设备的资源平衡和将生成的信息导入项目进度表提供数量启动信息也是可能的。
- 安全纠正: 在建筑工地上采取的主要纠正措施是根据规则检查报告安排和跟踪 (安全) 材料的后勤运输。例如, 一个现场的实现可以是在 BIM 平台上报告, 该平台为建筑楼层安装和拆除安全设备分配工作任务。
- 这是对规则检查系统一般需求的扩展, 包括了安全改进步骤。

### 3.2 基于规则的算法在案例研究中的应用

一旦建立了良好的建筑物信息模型, 并且建立了模型对象与调度之间的联系, 就可以应用规则进行安全隐患的检测。Zhang 给出了如下的解释方法:

1. 板坯边缘保护: 图 3.1 解释了根据 OSHA 安全规则检测所需预防方法的算法对于每个任务, 它检查板对象是否链接到给定的工作任务。对于与任务相关联的每个板对象,

该算法检查板是否需要与现有的板合并。如果在同一水平面上没有现有的板，则计算板边界。此外，现有的墙壁膨胀检测，看看是否有任何部分的板边界不需要下降保护。因此，无保护的边缘需要护栏保护计算。另外，根据平板合并后的几何条件分别计算存在边、未保护边和重叠边。因此，新的护栏安装没有保护的边缘和现有的护栏重叠的边缘被删除。

2. 板坯孔保护: 一般有两种方法检测板坯孔洞: 基于几何的检测和基于对象的检测。由于某些孔洞是设计人员为建立复杂的板几何模型而切割的，因此不应将其归类为潜在落差孔洞。因此，即使基于几何的检测可以找到所有的内部多边形的板，这些将包括一些假阳性错误。对于基于对象的检测，它需要额外的标记努力，以协助从模型中的其他空洞对象的孔识别。在这项研究中，我们主要依靠基于物体的目标识别，但也通过比较板的深度和孔的深度来检查是否是一个会产生坠落危险的直通孔。理想情况下，为了清楚地区分这两种情况，在建模阶段，工程师应该有两种不同的工具/按钮来 (a) 为复杂几何和 (b) 为实际切割平板而切割。
3. 墙体开孔保护: 墙体开孔检测过程类似于板坯孔检测。要考虑的特殊情况是墙元件的位置: 它是内墙还是外墙。对于那些位于板的边缘的，一旦墙元素已经安装完毕后，可以拆除板坯边缘保护的护栏，同时，如果存在墙口需要进行保护。如果在靠近内墙的地方没有板孔 (例如电梯井的孔)，则不需要考虑或保护墙开口。

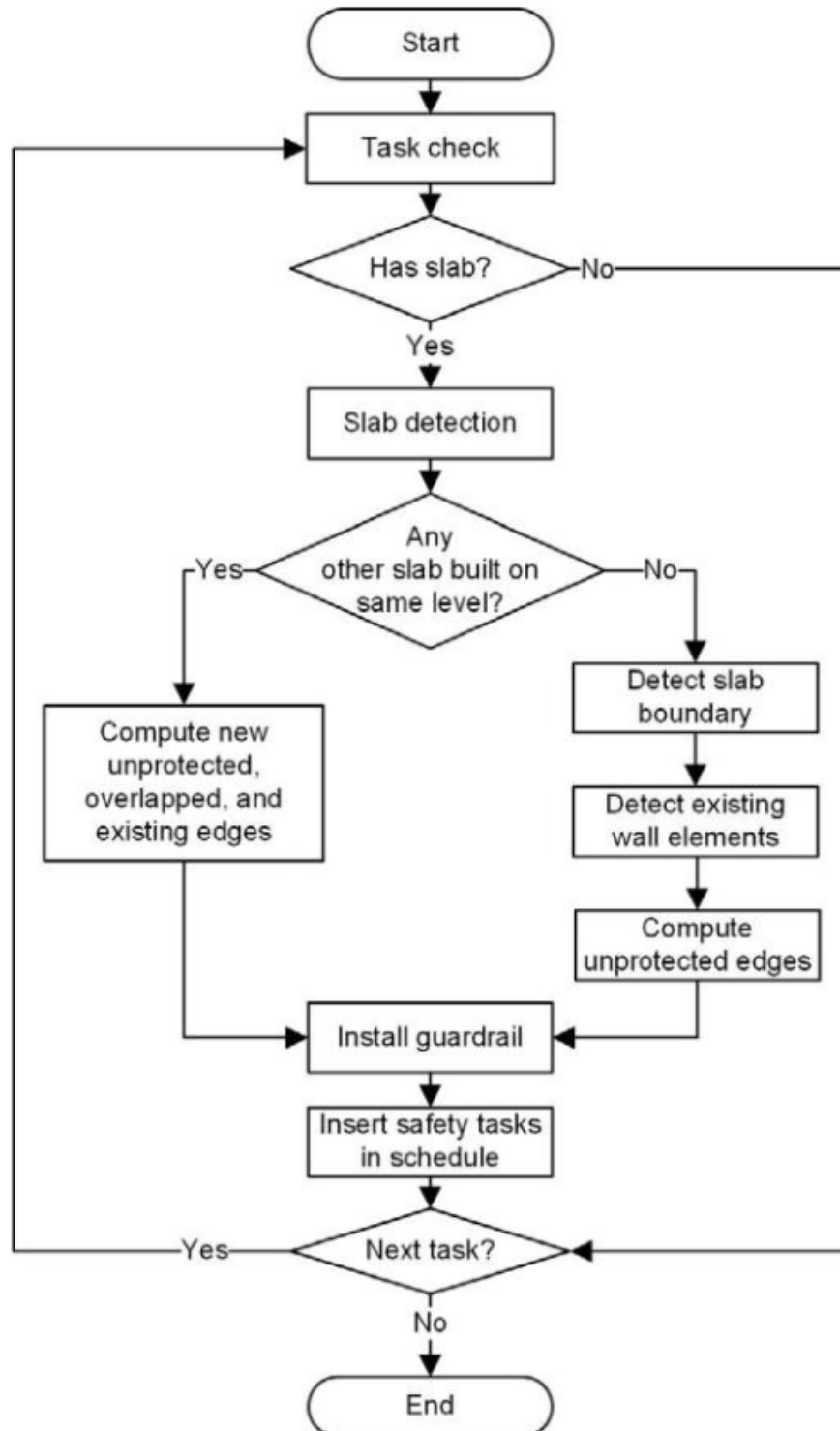


图 3.1 检测板坏边缘所需预防措施的规则检查算法

## 第4章 基于 BIM 的跌落危险检测和 预防规划案例研究的经验教训

### 4.1 案例研究 1: 手工建模与自动建模的比较

在第一个案例研究中，对办公楼地下室现浇混凝土的防坠落设备进行了人工和自动建模。比较了两种方法的优缺点。

#### (1) 安全防护装备的手工模型:

为了了解安全预防系统建模和计划编制工作的复杂性，图 4.1 首先在 BIM 中进行了人工建模和计划编制。展示了一张照片和模型化的 3D 安全栏杆组件，因为它通常用于芬兰的建筑项目。所选择的护栏解决方案为领先的边缘板表面包括护栏的职位和木材栏杆。定制安全部件的 3D 表示是手工建模的。现实的护栏解决方案是基于最佳实践信息承包商提供并在建筑工地使用。柱子的几何结构与芬兰的 Vepe 产品相对应。扶手、中间护栏和脚趾板的尺寸与现有规格相符。

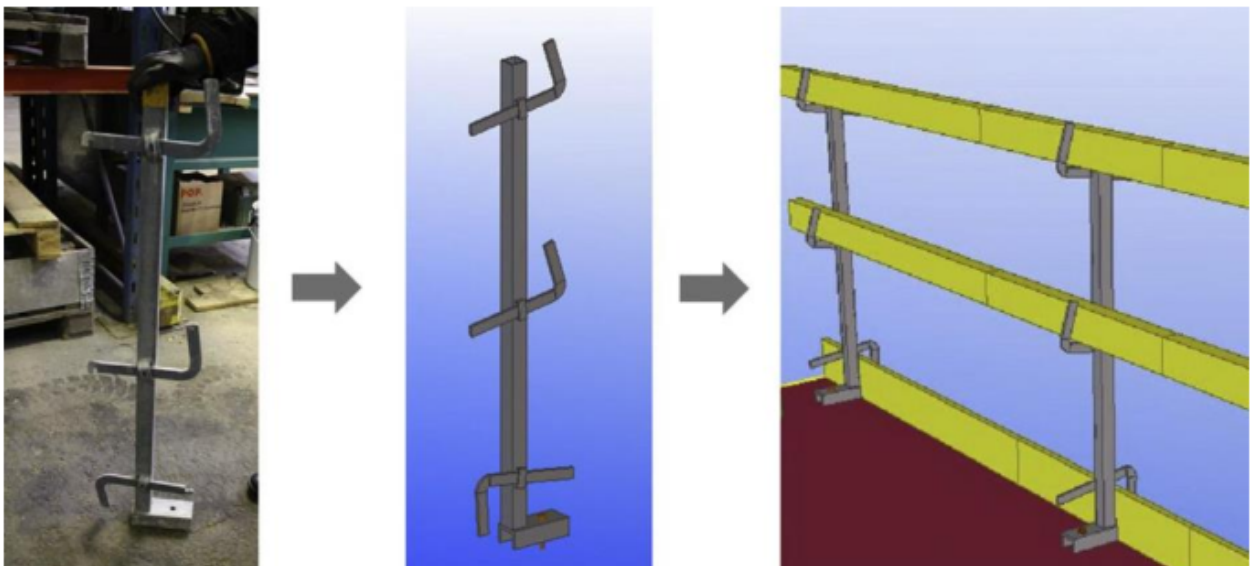


图 4.1 工程安全护栏设备模型 (表面安装护栏柱与木质护栏一起使用)

其想法是在板边缘规划护栏柱的位置，以便在施工期间无需移动护栏柱。这样既可节省时间，又可减低从高处堕下的风险。如果栏杆靠近混凝土柱 (见图 4.2)，栏杆柱与设计柱之间有一定距离。在钢梁上有预制孔的前缘使用相同的安全栏杆解决方案，确保安全设备的快速安装和拆卸 (见图 4.3)

手动生成的基于 BIM 的安全护栏平面图连同一些模型视图一起交付给承包商，这些模型视图提供了在现场实施的模型化解决方案。由于临时安全设备的 4D 调度与当前的 BIM 建模工具复杂，VTT 研究团队将混凝土和钢框架施工相关的防坠落可视化，并将永久性建筑结构和任何临时安全设备的工作流程计划和可视化。

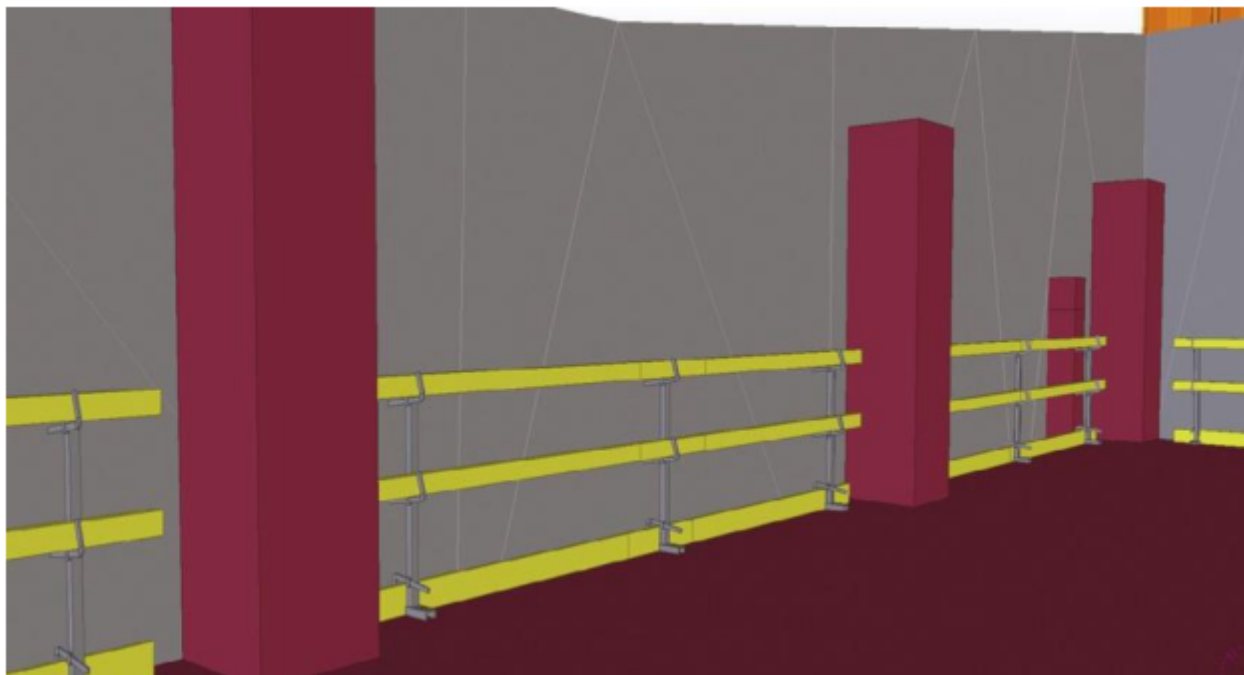


图 4.2 基于 BIM 的防坠计划: 现浇板边缘的安全栏杆)

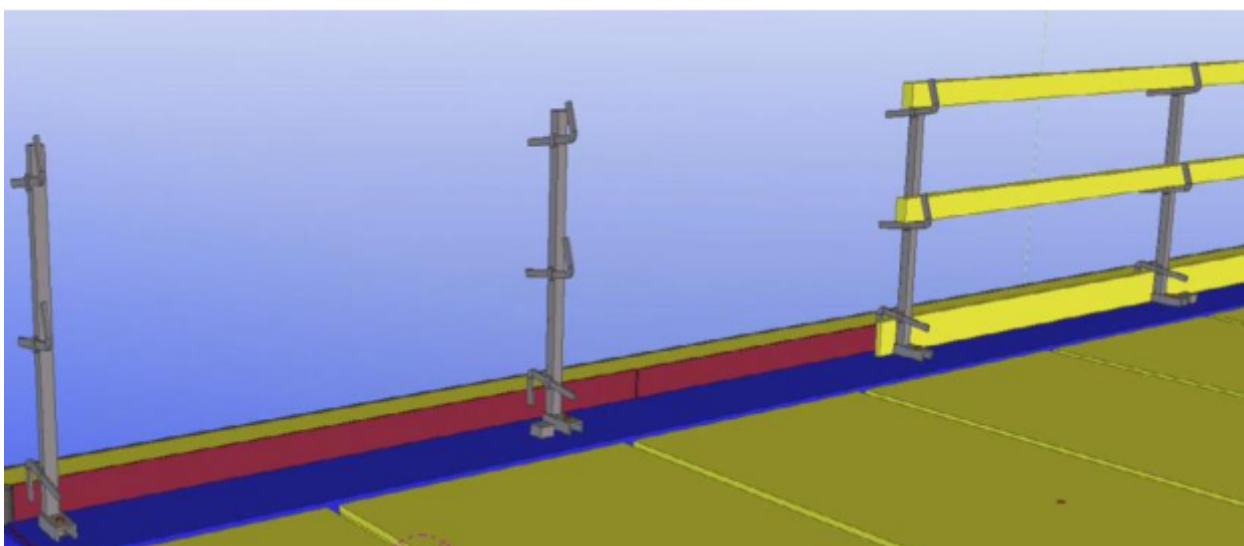


图 4.3 同样的安全栏杆解决方案模拟到上层办公楼: 护栏柱安装在预制钢梁的预先设计孔中)

在实际试验开始之前，对项目中的 4D BIM 工具的使用进行了功能测试。测试项目是一个办公楼，最初是由该项目的结构工程师使用 Tekla Structures 软件建模。结果表明，交互式 4D 坠落防护规划，特别是安全栏杆的调度和可视化，为实际工作者提供了一种可行的方法。

从实际出发，为了实现基于 4D BIM 的临时结构规划和可视化，需要对其建模和可视化进行一些特殊的要求或设置。例如，在 4D 模拟方面，临时结构在不再需要后需要从模型中移除或者是隐藏。

## （2）基于规则检测算法的坠落危险自动检测与防护

人工建模的坠落防护方法提供了对施工现场潜在坠落危险的良好理解，通常具有较高的详细程度。但是，由于手动建模的耗时性，建议使用自动建模方法。本文提出的系统已在同一试点工程中得到应用。图 4.4 展示了开发的系统在地下室一层的自动建模结果。

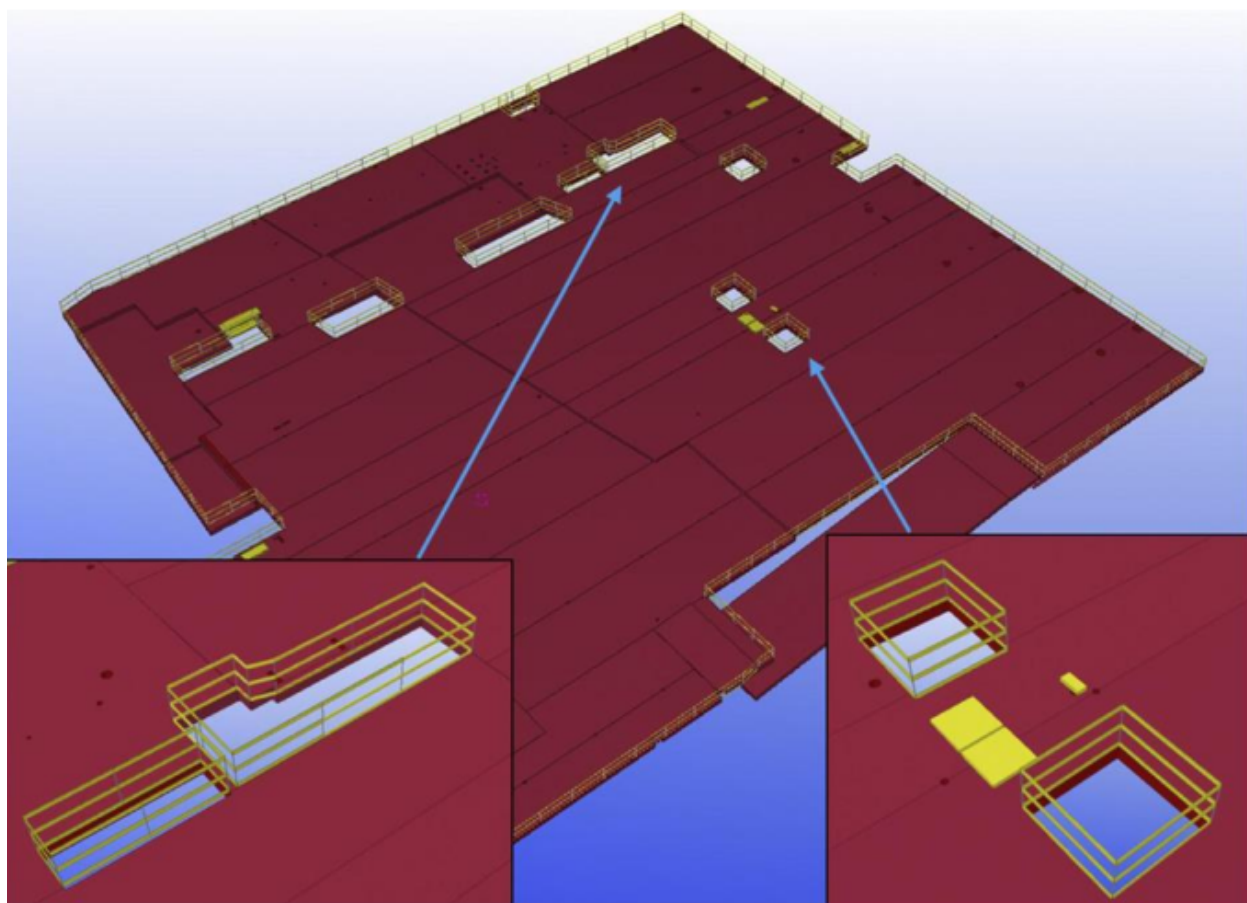


图 4.4 板边孔自动检测及护栏安装效果

## （3）基于手动 BIM 坠落保护方法建模经验

通过建立同一办公楼结构模型中的安全栏杆和楼盖模型，进行了坠落危险的检测和防



范规划。这种规划比传统的人工规划更为详细。

现场工作人员指导研究组实施的规划和建模。该规划和建模工作比工作阶段的开始早了三个月。在目前的规划实践中，此类详细的防坠落规划并没有在项目阶段的早期进行。只选择和采购所需的安全设备类型，并提出了更全面的防坠落安排计划。

图 4.5 (a-j) 展示了如何在 BIM 和施工现场实施基于模型的防坠落计划。由于视角稍有不同，图片之间存在一些视觉差异。一些图片还展示了混凝土模板的模型。当它影响到安全栏杆的位置时，它的各个部分的建模要比安全栏杆更抽象。

目前的一个区别是，材料、设备和其他暂时性的构造对象并没有在 BIM 中建模。然而，由于这些对象可能是事件的参与者或导致事件发生，因此也应该对它们进行建模。分析行业的详细工作活动和空间需求可能是有用的，因为行业在本质上是高度动态的。这些问题都不在本文的讨论范围之内。

板边缘安全栏杆的位置与平面图相比发生了实质性的变化（见图 4.5 c 和 d）。计划位置的最初想法是允许在靠近边缘的栏杆后面安装墙构件。在现场安全栏杆的实施阶段，决策者决定将护栏进一步放置在板内，以便栏杆形成连续的护栏。

临时楼梯是地下室较低楼层的紧急出口，如图 4.6 所示。由于脚手架建模需要其他工具，因此在建模时未计划设置护栏。改变安全栏杆位置的一个主要原因是占地面积需要三条腿支撑架的空间。一旦护栏向内移动，中间的栏杆必须拆除。另一个原因可能是，规划期间使用的最新 BIM 版本的结构模型确实包含了几个用于将立面元素固定到楼板边缘的方孔。

这些孔限制了护栏安装的可用区域。此外，由于安全规划是在施工前三个月完成的，因此最近的变更可能不会在 BIM 中实施。因此，使用 BIM 的详细安全隐患检测和预防计划应始终接近施工，并使用最新和最新版本的 BIM。基于 BIM 的详细安全规划还应与所有项目干系人，特别是最终负责安全设备实施的分包商进行协调。其他风险可能与使用其他工具类似。管理人员应当把建模结果作为最终确认的结果，当建模结果提示为危险时应该完全信任他；现场应该使用软件测算的结果来管理，应该避免管理者使用他们自己的技能和经验。

在许多项目中，设计方案和施工方案也可能不同。混凝土板前缘的安全栏杆（见 4.5 e 和 f）在设计方案上是金属柱和木制护栏。然而，在现场施工则使用了一种使用木桩作为临时的解决方案。如果不遵守标准，偏差就可能会导致严重的安全问题。这种偏差和材料更换需要现场人员解释情况。在现场使用人造安全设备当然不遵循安全规定，除非是为了克服不可预见的现场条件。图 4.5 的 g 和 h 显示了试点项目的一个上层的安全栏杆，它使用了一种栏杆的解决方案——即用螺栓将立柱连接到钢梁的螺纹套筒上。这些固定件焊接到钢制车间的钢梁上。它们已经出现在钢框架的结构模型中，套筒为栏杆柱提供了一种快速可靠的固定方法。选定的工艺有利于安全安装和拆除安全栏杆，特别是在恶劣的现场条件（即天气）下。

试点大楼的内部有一个中庭空间，每一层都需要防坠落装置。设计的 BIM 模型建议在钢结构安装完毕后立即安装最终的护栏系统。这可以通过在吊装到位之前将护栏预先焊接到钢材上来实现。然而，最初设计的解决方案并没有在年实施由于护栏类型的改变而造



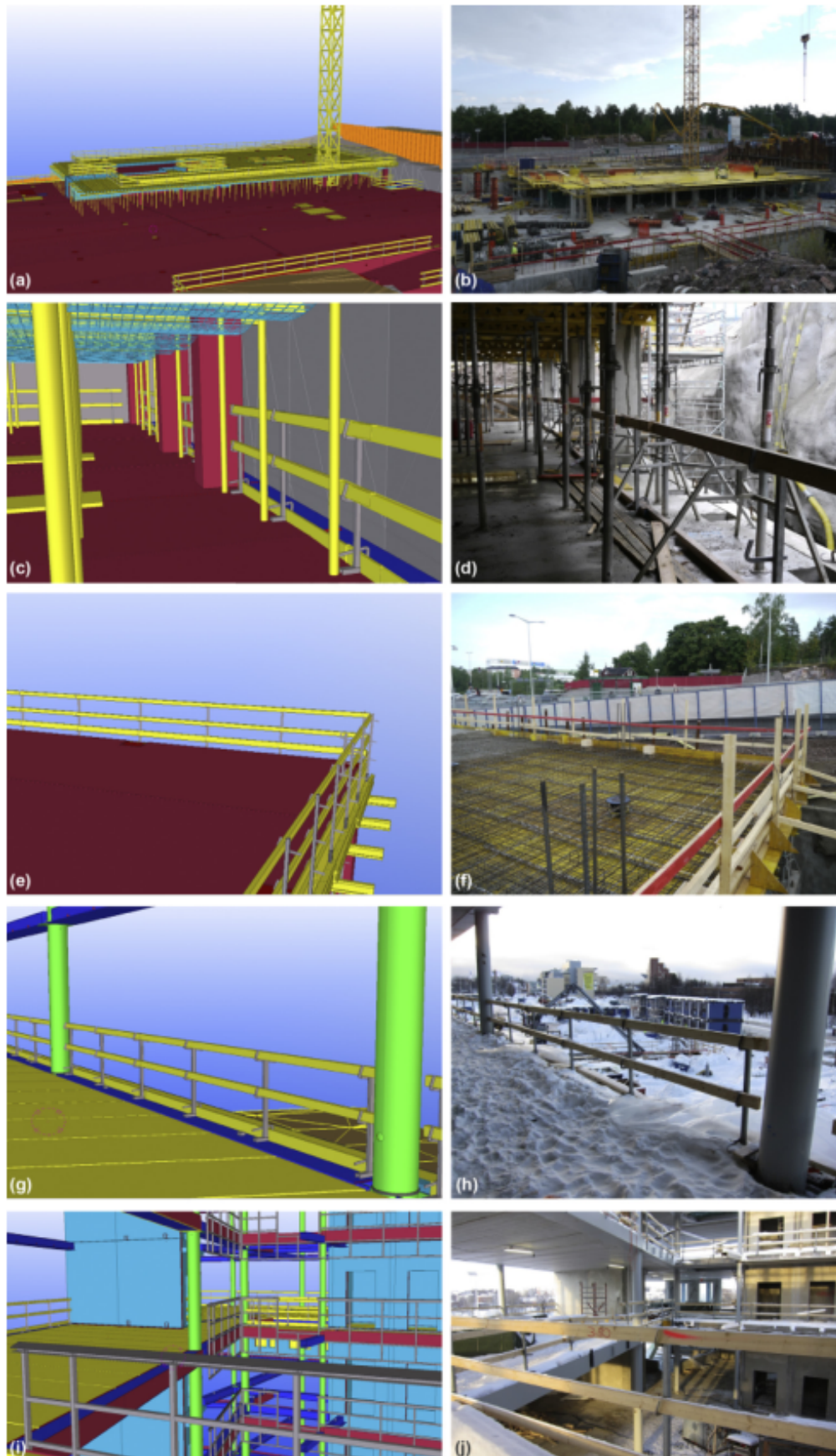


图 4.5 比较模型和现场情况：a, b 为地下室施工阶段试验现场的一般视图；c, d 是板前缘；e, f 为混凝土板模板；g, h 是安全轨柱用螺栓连接到钢梁上的焊接螺纹套筒，以及 i, j 为办公楼的中庭临时防坠落系统的一般视图)

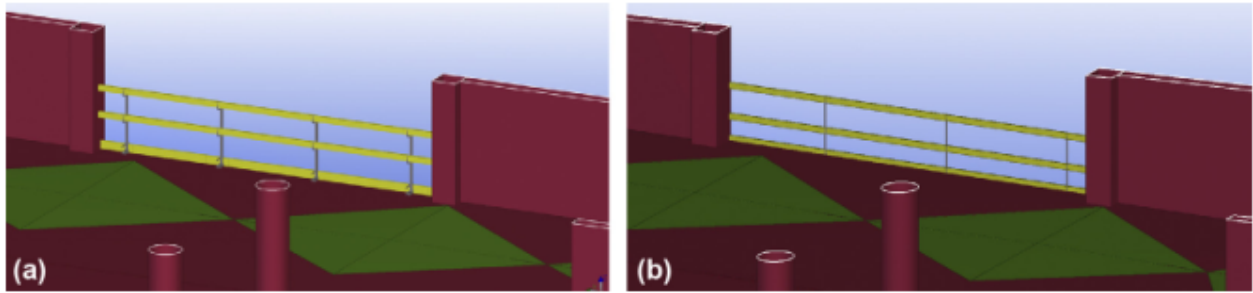


图 4.6 (a) 手动与 (b) 自动建模结果

成的场地。承建商不得不对这一变化迅速做出反应，并在施工期间实施了传统的护栏系统，后来被永久护栏系统所取代 (见图 4.5 i 和 j)。设置临时护栏系统的另一个常见原因是为了避免在施工过程中损坏固定的永久护栏。在这两种情况下，规则检查系统都可以有效地生成解决方案。

#### (1) 人工与自动高处坠落保护模型建立方法的比较

自动建模方法的优点如下 (见表4.1): (1) 使用自动建模方法所需的时间比手动建模大大减少。对于像案例研究项目这样复杂的建筑模型，通常需要几秒或几分钟才能生成结果。手动建模需要更高的安全专业知识和建模熟悉程度。建模人员需要充分理解模型，知道如何添加和调度栏杆组件，更重要的是，建模人员需要熟悉安全规则和需求。然而，安全专门知识并不是自动化方法的必要先决条件，因为已知边界已经存储在系统中并编入程序。(3) 一旦进行了设计变更或进度更新，手工更新相应的安全要求是困难和耗时的。相反，自动安全检查系统可以很容易地重新启动以生成新的结果。(4) 手动建模可以提供更高层次的细节的安全解决方案 (见)。在施工柱和墙体之前，板边护栏需要拆除。在 (a) 项中，栏杆柱被小心地安置在靠近柱子的位置，这样以后就不需要额外的柱子了。然而，自动化建模并没有考虑这些细节。在 (b) 中，在柱和墙的结构完成后，需要在靠近左侧柱的地方增加一个柱子。针对护栏无法延伸一定距离，必须自动设立立柱的问题，提出了一种解决方法。

表 4.1 手工和自动建模方法的比较

	手工建模	自动建模
时间需求	长	短
安全知识需求	非常多	少
更新困难性	困难	简单
细节的等级	高	低

## 4.2 案例研究 2: BIM 中的动态跌落危险检测和预防

在第二个案例研究中，开发的自动规则检查工具应用于多层预制公寓建筑模型（见图 4.7）。目标是根据项目进度动态演示安全检查结果。所有预制混凝土构件均已制造并运至施工现场，并将按照预先确定的顺序从 A 部分开始安装，然后是 B 部分和 C 部分。预制混凝土就位后，在现场建造外墙保温层和砖墙。该项目的结构模型已使用 Tekla Structures 17.0 建模软件进行建模。开发的自动规则检查平台所需的 4D 进度表是根据从承包商获得的信息添加到结构模型中的。该信息由现场工程师以施工进度表和涉及安装顺序的工作分解结构（WBS）的传统格式提供。

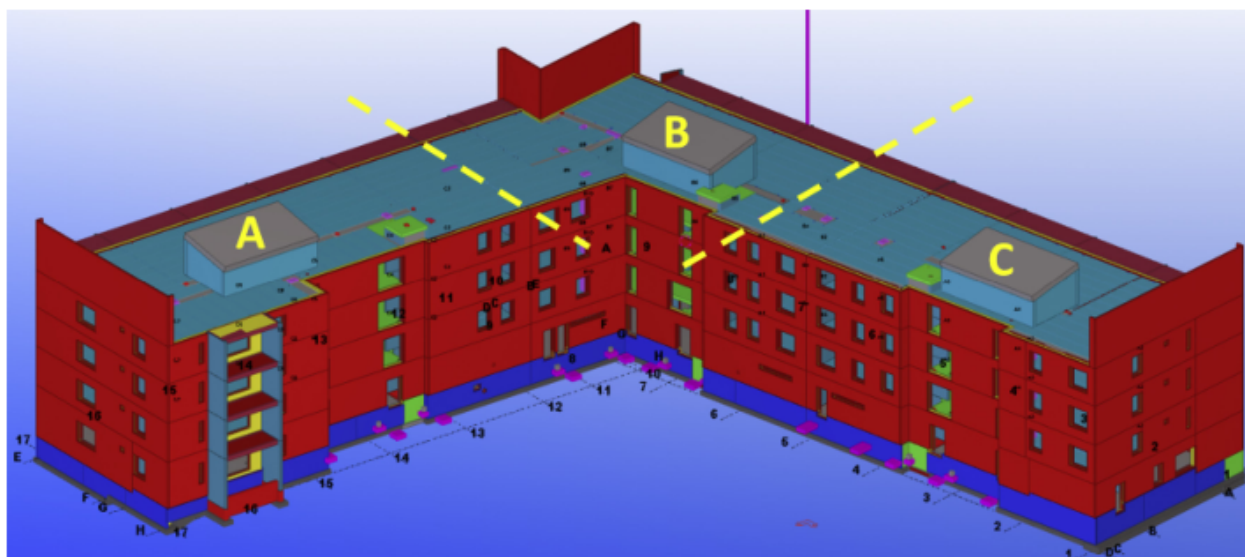


图 4.7 多层预制公寓建筑模型及其剖面图

图 4.8 可以近距离观察到混凝土板块。在楼板安装完毕之后，对楼板的连接部分进行加固和浇筑，而在下一层楼板安装之前，墙板安装已经开始。墙体和升降机井与楼板一起作为一个结构系统工作，将荷载传递到基础上。楼板部分是按层安装的。一个截面的一层楼大约需要 7 天的时间，一个截面的搭建大约需要 5-6 周的时间。护栏解决方案需要根据板截面的增长进行更新，例如，当两个板截面在同一水平面上合并时，需要移除中间的护栏。

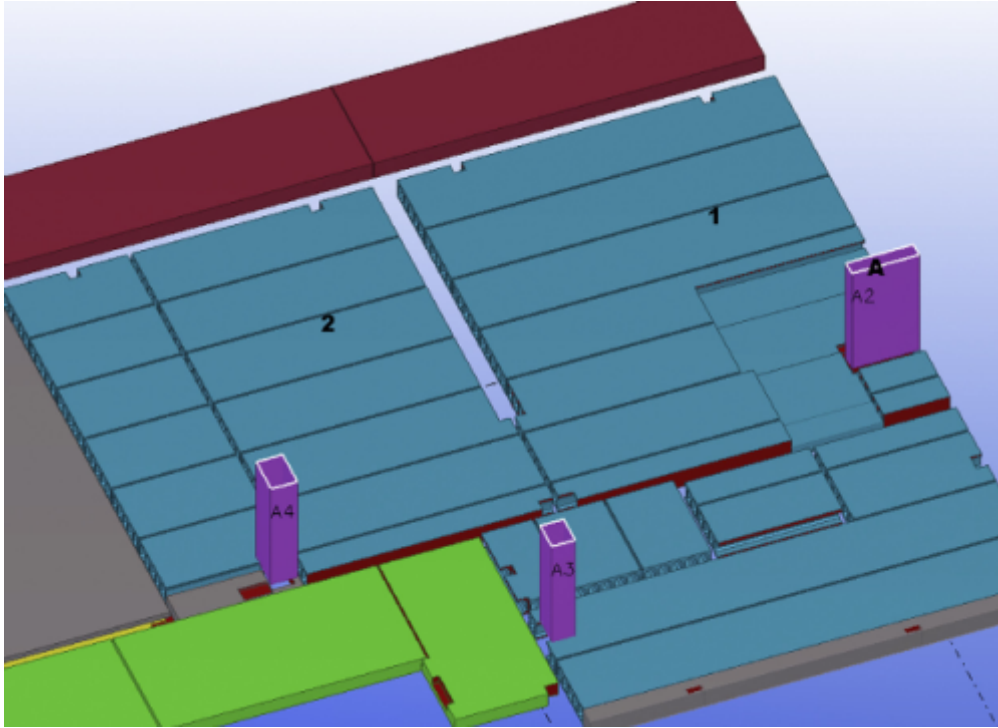


图 4.8 预制板面板近景

在完成规则检查算法的基础上，它实现了包括护栏在内的防坠落系统的自动可视化。

它还为了施工进度中安装和拆除安全相关设备创建了子任务。并将其纳入施工进度表。图 4.9 示出了部分更新的具有所需安全解决方案的时间表。图 4.10 示出了模型模拟的四个不同阶段，可以实现安全设备嵌入模型和施工进度的时间可视化。4D 模拟的对象表示如图 4.11 所示。一楼的楼板从 A 段到 B 段，由于施工过程中有时会合流，中间的护栏必须拆除，拆除也改善了现场的工作流程，因为工人现在可以安全地从 A 段走到 B 段而不必绕道。建筑顺序的安装和拆除如图 4.12 (a) 和 (b) 所示。



	Task Name	Planned Start Date	Planned End Date
1	Foundation	4/30/2012	5/4/2012
2	▢ Section C	5/7/2012	6/14/2012
3	▢ 1st floor	5/7/2012	5/15/2012
4	Walls and Balcony panels	5/7/2012	5/10/2012
5	▢ Staircase slabs, Stairs, Balcony slabs	5/11/2012	5/11/2012
6	Slab Edge Protection	5/11/2012	5/11/2012
7	Slab Hole Protection	5/11/2012	5/11/2012
8	▢ Hollow core slabs	5/14/2012	5/14/2012
9	Slab Edge Protection	5/14/2012	5/14/2012
10	Slab Edge Protection Removal	5/14/2012	5/14/2012
11	Slab Hole Protection	5/14/2012	5/14/2012
12	Precast ducts	5/15/2012	5/15/2012
13	▢ 2nd floor	5/17/2012	5/25/2012
14	▢ Walls and Balcony panels	5/17/2012	5/22/2012
15	Slab Edge Protection Removal	5/22/2012	5/22/2012
16	Wall Opening Protection	5/22/2012	5/22/2012
17	▢ Staircase slabs, Stairs, Balcony slabs	5/22/2012	5/22/2012
18	Slab Edge Protection	5/22/2012	5/22/2012
19	Slab Hole Protection	5/22/2012	5/22/2012
20	▢ Hollow core slabs	5/23/2012	5/23/2012
21	Slab Edge Protection	5/23/2012	5/23/2012
22	Slab Edge Protection Removal	5/23/2012	5/23/2012
23	Slab Hole Protection	5/23/2012	5/23/2012

图 4.9 更新的包括防坠落方法的安装和拆除的施工进度表

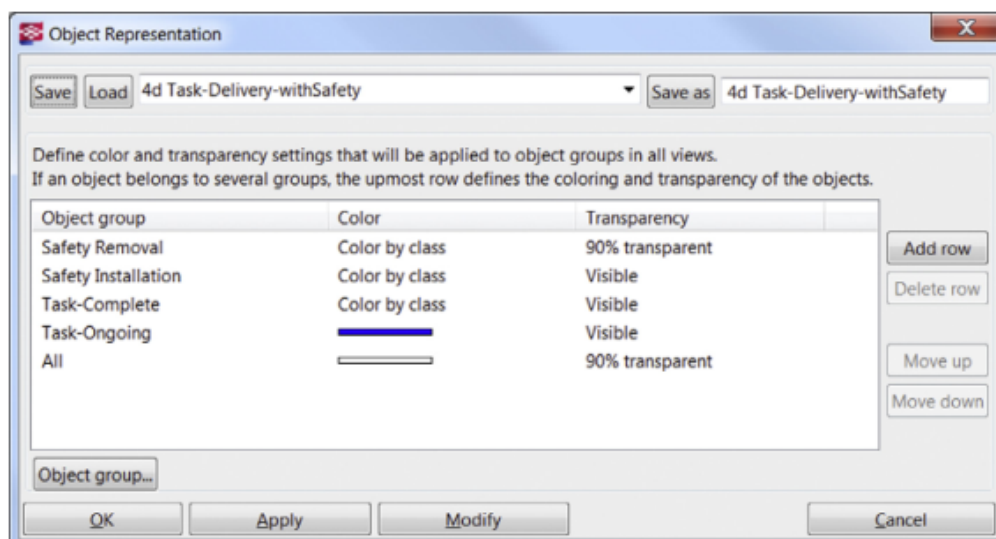


图 4.10 4D 模拟的对象表示设置

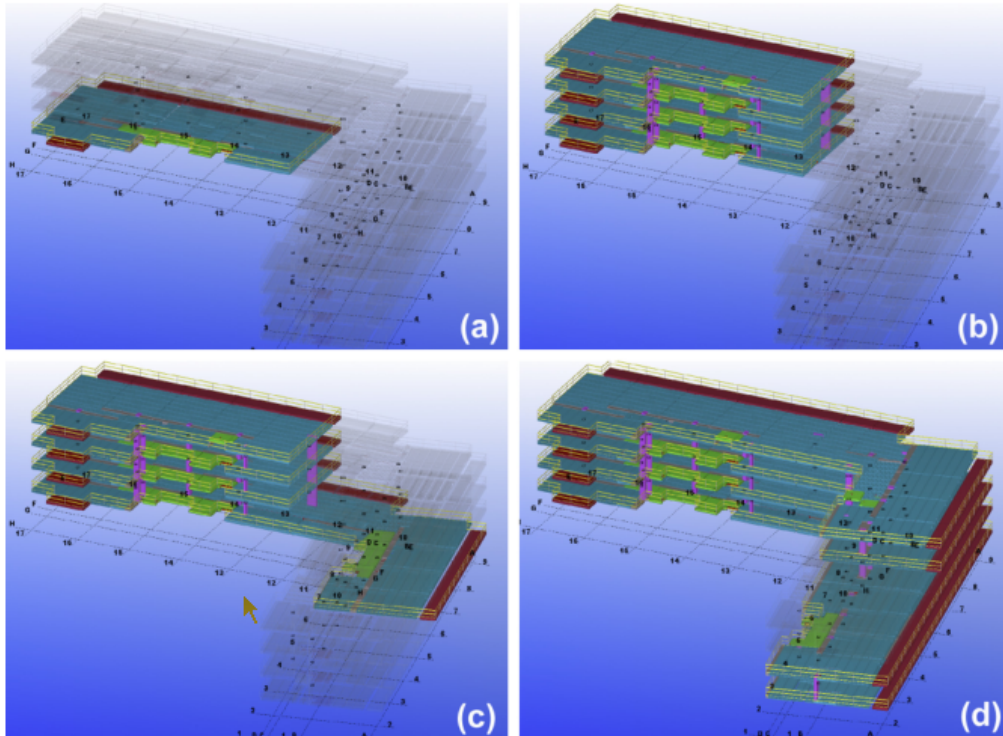


图 4.11 模型板、柱和护栏防护系统的 4D 仿真

图 4.12 示出了板边缘保护和墙洞口保护的更详细视图。在模型中生成安全防护系统后，也会自动生成检查报告。然后，可以将该报告导出为 MS-Excel 格式，如图 4.13 所示。这种文件格式允许现场安全或监督人员简化生成数据的使用。例如，他们可以计算保护工作场所所需的安全设备。最终，该清单还可能支持详细安全解决方案的预制，这些解决方案可以在场外预制，并以与定制预制混凝土板类似的方式安装。因此，开发的工具及其生成的数据支持多种安全设计 (Design-for-Safety, DfS) 概念。该清单也可用作检查清单，以确保所有必需的安全防护系统已在施工现场到位。

板坯开孔检查的用户界面如图 4.14 所示。用户可以使用工具的界面根据不同的预防方法定义自己的需求。规则执行后，安全防护设备将在模型中可视化，检查结果将在单独的对话框中列出，安全管理人员可以从中预览结果，并在必要时手动进行更改。这使得人类决策者随时处于安全防护危险检测和预防的循环中。

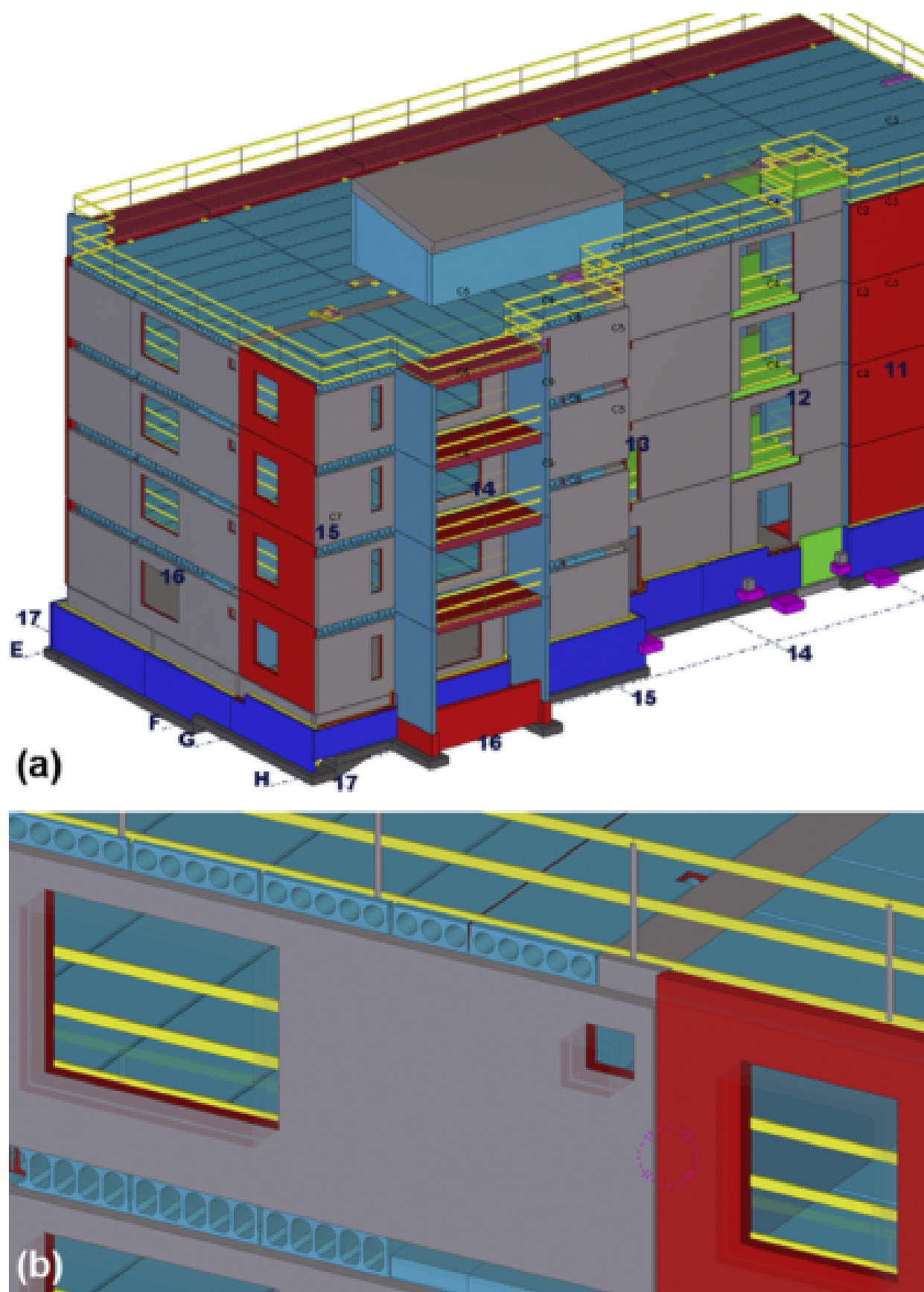


图 4.12 (a) 建筑物 a 区的防坠落保护系统和 (b) 墙洞保护的近景

Slab Hole Checking Results								
Project Name:				Analyst:			Date: 1/28/2013 2:36:10 PM	
No.	GUID	Level	Distance to Lower Level (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area(m2)	Prevention Method	Check
1	2301919	1	3185	235.86	235.86	0.05	Cover	FALSE
2	1862884	1	3185	110	150	0.02	Cover	FALSE
3	1845126	1	3185	200.01	120	0.05	Cover	FALSE
4	1807649	1	3185	200	200	0.04	Cover	FALSE
5	1808525	1	3185	270	180	0.05	Cover	FALSE
6	1808623	1	3185	200	200	0.04	Cover	FALSE
7	1808591	1	3185	260.91	200	0.05	Cover	FALSE
8	1808719	1	3185	200	200	0.04	Cover	FALSE
9	3390930	1	3185	942.25	614.51	0.09	Cover	FALSE
10	1862931	1	3185	150	110	0.02	Cover	FALSE
11	3390851	1	3185	460	305.03	0.17	Cover	FALSE
12	3390827	1	3185	610	390	0.23	Cover	FALSE

图 4.13 材料清单：板孔检查结果为安全设备的估算和预制提供了 Excel 表

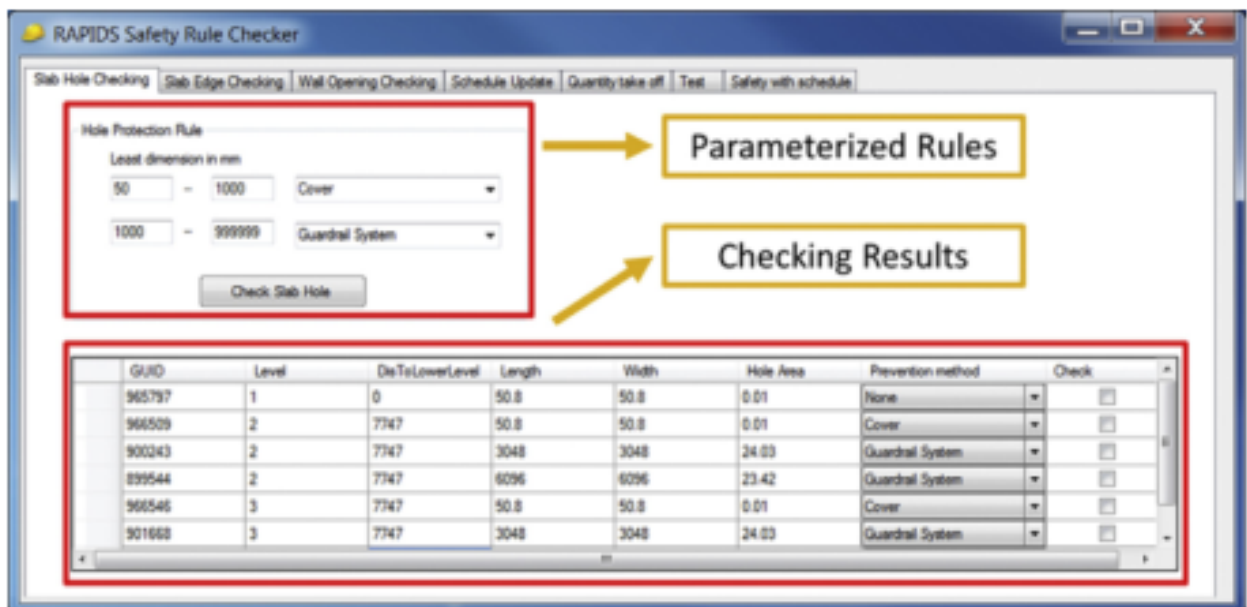


图 4.14 板孔检查的用户界面



### 4.3 讨论

该工具能够自动、成功地检测出无防护板边缘并安装护栏系统。利用 BIM 软件的内置功能，可以方便地计算护栏的起吊量。此外，自动安装的板边缘和窗口护栏可以由用户手动修改。

在试验过程中，工具中成功地集成了所谓钩柱的详细三维模型（见图 17）。用户现在可以为安全扶手建模选择简化的模型表示或详细的表示（自定义构件）。此外，更详细的护栏模型和相关的安全设备零部件，如焊接配件，可以自动添加到钢梁或混凝土面板中进行护栏安装建模。在钢梁或混凝土面板的制作中可以预先考虑相应的连接，从而减少高空作业。然而，如果用户的目标是提供详细和自动化的安全建模，那么还需要进一步开发一个程序来改进岗位规则。

目前开发的系统的一个限制是它严重依赖于 BIM 提供的信息，如几何结构和时间表。如果 BIM 中的信息不完整、不正确或不准确，安全分析的正确性将受到很大影响。此外，建筑模型几何结构（例如，具有复杂空间相关性的对象形状）或场地条件（例如，有助于施工过程且通常未建模的临时结构）可能导致当前版本的规则检查系统的应用失败，或者最多产生经验丰富的安全专家能够理解和解决的结果。为了获得更准确的结果，建议首先运行自动系统来对照模型进行检查

目前开发的系统的一个局限性是，它严重依赖 BIM 提供的信息，如几何图形和时间表。如果 BIM 中的信息不完整、不正确或不准确，安全分析的正确性将受到很大影响。此外，构建模型的几何形状（例如，具有复杂空间依赖性的对象形状）或场地条件（例如，有助于构建过程且通常未建模的节奏元结构）可能会导致规则检查系统当前版本的应用失败，或者产生经验丰富的安全专家能够理解和解决的最好结果。为了获得准确的结果，建议先运行自动化系统对照模型进行检查。安全专家随后会审核结果，并提供意见。目前，Zhang 等人使用开发的原型工具会自动创建概念性防坠落计划。未来研究的另一个领域是生成工艺流程图，以及安全工程师、专家和检查员的作用，因为他们应该充分利用基于 BIM 的安全隐患探测预防规划工具。朝着这一方向迈出的第一步是自动化工作危害分析（JHA）。

根据已进行的测试结果，今后可能需要改进的地方包括：

1. 为安全元素提供高层次的细节：例如，例如，护栏的柱子和板子可以通过带有抽象线条的 BIM 可视化。经验不足的用户可能更喜欢高层次的视觉细节以及它看起来像什么，比如如果需要锚定，这些位置需要被确定。有经验的用户可能对附加功能的高层次细节感兴趣，例如，当某些安全设备可以预制时。了解护栏柱与建筑构件之间的复杂连接可以加快此类构件在现场的安装过程。
2. 使用独立于软件的数据交换格式：独立于软件的数据交换格式便于多个项目涉众之间的通信。出于安全规划的目的，需要探索一种基于 IFC 的解决方案。使用 IFC 模型进行自动安全检查和规划的能力将使在各种 BIM 模型创作工具中创建的模型具有更广泛的检查能力。

3. 在复杂模型测试：未来，更全面的基于 BIM 的防坠落规划解决方案需要在复杂模型几何结构上进行测试，并提供全系列安全解决方案的高水平细节。例如，在施工期间以及设施运行和维护期间，安装备用解决方案，如安全网和挂钩。

## 第 5 章 审查 BIM 平台以支持安全规划

### 5.1 已知问题

对一些商业化 BIM 平台的支持安全规划的能力进行了检查。若干功能性先决条件被认为对于启用基于 BIM 的安全规划非常重要。它们的名单如下:

1. 调度和模拟: 建筑业的复杂和动态特性及其现场工作模式已经被广泛的认同。为了在施工过程中发现和预防安全隐患, 需要将工程进度与 BIM 联系起来。此外, 如何根据施工进度计划进行施工进度的可视化, 提高施工人员的安全意识和沟通能力是施工进度计划可视化的关键。
2. 建模: 建筑安全不仅是管理或控制工人的安全行为, 还包括设计、采购、安装和拆除安全和节奏设备, 如护栏、脚手架和安全网或挂钩。为了可视化和量化的目的, 在 BIM 中对这些临时对象进行设计和建模是非常必要的。因此, 一个理想的平台需要能够创建和修改模型项, 并提供可视化。
3. 施工现场布置建模与可视化: 认识施工现场物流的重要性的施工现场的动态性, 从安全角度考虑施工现场布置的重要性。现场布局的建模和可视化能力可以支持详细、准确的现场逻辑分析, 从而提高生产率和工作场所安全性。
4. 模型格式: 如前所述, 使用 IFC 数据格式允许对各种 BIM 创作工具中包含的模型进行更一般的检查。
5. 规则检查能力: BIM 平台配备了自己的规则引擎, 可以为用户提供自定义或用户配置的规则检查过程安全规则的机会。

几个现有的商业化 BIM 软件解决方案的比较及其结合安全的潜力见表 5.1

表 5.1 四种 BIM 应用的比较分析

应用软件	功能					
	计划	模拟	主体建模	施工平面图建模	基于 IFC 格式	规则检查
<b>Autodesk Revit</b>	-	-	√	√	-	-
<b>Autodesk Navisworks</b>	√	√	-	-	-	-
<b>Solibri Model Checker</b>	-	-	-	-	√	√
<b>Tekla Structures</b>	√	√	√	-	-	-

SMC 作为一种基于 BIM 的工具的优势在于它能够使用 IFC 数据交换格式,这使得基于 BIM 的建模软件的检查工作可以成为一种独立的工具来使用。规则检查功能和用户界面还提供了合并安全解决方案的可能。然而,尽管自动化被用来进行日常的检查工作,仍然需要人工对所有与安全相关的临时设备和结构进行建模,这些设备和结构在基于 BIM 的建模软件中现有的对象库中有的不被支持,有的缺乏项目。根据项目的规模或复杂程度,冗长的模型修改过程通常需要几天甚至几周的时间。在 Navisworks 上也发现了类似的问题,由于缺乏建模功能,很难添加与安全相关的设备。施工现场的动态特性无论是在施工现场管理系统中还是在施工现场管理系统中都无法体现出来,这使得施工现场管理系统在不同的施工阶段都需要进行规范检查。由于本文侧重于建筑物相关的跌落危险,场地布局建模和可视化不属于本文研究的范围。因此,在比较分析的基础上,选择 Tekla Structures 作为本文研究的安全规则检测算法的实现平台。另外,为了使建筑信息模型能够应用于施工过程规划或分析,需要进行大量的现场布局和操作建模工作。

## 第6章 总结

开发的建筑物信息模型跌落危险检测与预防安全规则检查平台已在两个案例中成功实现。该算法能够检测混凝土板和前缘中潜在的坠落危险的位置,并提供相应的坠落防护装置的安装指南(例如,材料清单、可视化),实际上解决了 BIM 中确定的坠落危险。结果表明,该方法在安全设计和规划阶段能够有效地探测和可视化潜在的跌落危险。

由于自动生成的防坠落计划必须由安全专家检查,但如果遵循其他安全指南或有更好地实践方法,也允许进行调整。开发的平台显示出强大的潜力,可以创建基于 BIM 的安全计划,可视化施工进度表中的安全性,安排安装和拆除工作,并提供包括永久性建筑部件和临时安全设备在内的选项和程序,并模拟它们。

未来的一个目标可能导致安全行业最佳做法的重大变化,即基于 BIM 的安全规划可能成为标准建筑物建设规划过程的一部分。基于 BIM 的建模还可以增加安全理解和交流,尤其是在工程设计和施工计划阶段。由于建筑信息模型中的施工进度表与模型对象之间只有几个星期的时间,因此在施工对象的结构模型、施工进度表或原始安装顺序发生变化之后,有必要检查模型是否发生了变化,并更新检查结果。开发的系统通过消除设计和规划阶段的危险,确保采购安全设备,并在需要时在正确的地点和时间准备好安装,协助人类决策制定者进行这一审查过程。

在考虑基于 BIM 的安全规划自动化取代人工建模的优点时,发现通过减少时间和人工建模工作,自动化有可能显著提高基于 BIM 的计划编制过程。一旦发生设计变更,就需要使用手动建模进行额外的工作。需要时间和其他人力资源仔细检查模型,以确保模型护栏或其他防护设备仍然有效和准确。虽然人工建模的优点是人类参与了每一步,但是它很耗时,而且可能容易出错。一个系统,提供自动化和一致的结果,然后由一个人审查,可以提供更频繁和更快的更新。

目前对所开发系统应用的关注包括:(1)以模型为基础的设计和施工图纸在动态的施工环境中经常发生变化,因此有必要定期检查模型,以确保安全状况识别和纠正措施是最新的;(2)自动安全模型的质量和详细程度可能需要进一步发展,以满足设计部门和建筑工地从业员的实际需要,并非所有模型都能提供安全规划及检查所需的资料,例如墙体与平板部分之间的关系(例如连接)可能未能妥善建立或正确建模。这可能会防止识别拆除护栏的建设进展。这种与安全相关的设计标准或者延伸的 BIM 要求需要被研究和正式化。

## 致 谢

本报告中介绍的结果是基于 RAPIDS 建筑安全技术实验室、芬兰 VTT 技术研究中心、芬兰斯堪斯卡公司和 Tekla 公司的合作。这项研究由芬兰研究项目 BIMCON (工业化建筑供应链中基于信息模型的产品数据管理) 资助, 该项目是芬兰研究项目 PRE 的一部分。是由 RYM 有限公司和芬兰研究机构、大学和公司联合组织的。资金由 Tekes(芬兰技术和创新基金机构) 提供。项目由芬兰 Skanska 公司协调, 其他项目参与方包括芬兰 VTT 技术研究中心、ParmaOy、WeberOyAb、RautaruukkiOyj、TeklaOyj 和阿尔托大学。