

基于 BIM 的建筑基础设施可靠性评估

郑意德, 张 熠, 林佳瑞

(清华大学土木水利学院土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 可靠度评估对建筑设施和基础设施的设计与运营维护具有重要意义, 已成为设计方法与维护策略优化的重要指标之一。与此同时, 建筑信息模型技术以其多平台协同工作、数字化建模等优势在建筑设施的生命周期分析、文本审查、精益建造等领域也得到广泛应用。然而, 建筑设施韧性的更精确评估需要实时的检测数据输入, 这些数据往往都完备地储存在 BIM 模型数据库中, 且目前基于 BIM 的生命周期分析方法缺乏概率层面的指标运算与考量。本文提出了一个基于 BIM 的可靠性评估框架来计算建筑生命周期分析中的概率指标。可靠度理论考虑了构件设计信息的随机性以及退化效应, 而 BIM 的数据交互技术让数据信息的传递与共享成为可能。该框架被应用到一个基于可靠性设计的四层钢筋混凝土框架结构, 结果表明提出的方法可以有效地将 BIM 储存的设计信息转换成可靠度信息, 从而为建筑设施的设计与运营维护提供参考依据。

关键词: BIM 可靠度 基础设施 设计 运营维护

BIM-BASED RELIABILITY ASSESSMENT FOR DESIGN AND MAINTENANCE OF BUILDINGS AND INFRASTRUCTURES

ZHENG Yi-de, ZHANG Yi, LIN Jia-rui

(Department of civil engineering, Tsinghua university, Beijing, 100084)

Abstract: Reliability evaluation plays a crucial role in the design, operation and maintenance of building and infrastructure facilities. Meanwhile building information modelling (BIM) technology has been widely used in life cycle assessment (LCA), rule checking and lean construction for its advantages in multi-platform collaboration and digital modelling. However, in the combination of traditional reliability theory and BIM-based life cycle assessment is still lacking, especially for component level computations. This paper proposes a reliability assessment framework based on BIM to realize the complementarity of these two technologies. The method is developed based on reliability model of different facilities and data interoperability function of BIM technology. The former considers the randomness and degradation effect of a component, and the later makes it possible to transmit and share data information among different platforms. A reliability assessment example for a reliability-based design for a four-story reinforced concrete frame structure are performed to demonstrate the proposed method. The results show that the proposed method can easily transform the design information in BIM into reliability information and the reliability for each component can well feedback to BIM model. The calculated reliability index can provide more valuable reference and theoretical basis for life cycle assessment.

Key words: BIM; reliability; infrastructure; design; maintenance

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52111540161)。

通讯作者: 张 熠(1987-), 男, 副教授, 博士, 主要从事可靠度理论及结构健康检测研究(E-mail: zhang-yi@tsinghua.edu.cn)。

作者简介: 郑意德(1998-), 男, 博士生, 主要从事可靠度理论研究(E-mail: zhengyd20@mails.tsinghua.edu.cn);

林佳瑞(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事 BIM 及数字防灾与韧性城市研究(E-mail: lin611@tsinghua.edu.cn)。

1 背景介绍

建筑信息模型(Building information modelling, BIM)的出现给建筑和基础设施的设计、施工、维护阶段带来了重大变革和发展^[1]。基于 BIM 的建筑信息可视化^[2]、建筑工程协同工作^[3]以及生命周期分析^[4]等研究为建筑土木行业的自动化、智能化应用提供有效的技术支撑。然而 BIM 技术的出现与快速发展到如今也只有不到 20 年的时间^[5], 尽管 BIM 在最新的基础设施与建筑中得到了广泛的应用和拓展, 但是对于一些 BIM 技术出现以前已建成并仍在服役年限的建筑, BIM 技术的应用和发展也应得到关注。例如, 有学者调查研究发现在 19 世纪末以及 20 世纪初铺设的管道, 现如今最有可能面临安全隐患^[6], 而在美国超过一半的石油运输网络工作年限超过 40 年^[7], 这类基础设施以及建筑与 BIM 技术结合往往存在一定的限制。前期图纸与后期人工测绘技术结合^[8]以及点云技术的应用^[9]使得重建早期建筑的三维模型成为可能。但由于建筑设备退化以及设计规范更新等原因, 这类建筑设施的风险评估仍是很大的挑战。

BIM 等软件的互操作性使得 BIM 模型可以更智能化、更方便地解决建筑力学以及性能指标计算问题。BIM 的互操作性是指在建筑、结构、机械、电气设计和施工的不同软件之间传递和交互信息的能力。传输的数据多为部件截面信息、材料、几何特征^[10]。此外, BIM 也可以将信息导出到 ODBC (Open Database Connectivity)开发数据库, 这使 BIM 能够与更广泛的分析软件进行交互。因此, BIM 与能量分析工具^[11]、结构分析软件^[12]、地理信息软件^[13]很好地结合应用, 从而进行建筑设施的可持续性以及生命周期分析。Santos 等^[14]将 BIM 在建筑可持续性领域的贡献划分为社会、环境和经济三个维度。社会维度的研究主要包括建筑的灾害风险分析、舒适度分析和历史建筑的维护。这些研究主要利用灾害模拟技术和使用后评价(POE)指标进行分析计算。环境方面的研究主要是生命周期评估与 BIM 技术的结合。在对废弃物处理和给水系统进行能量分析时, 采用了结构关键绩效指标(KPI)的计算。在经济层面, 主要关注建筑的成本效益优化, 延伸到减少建筑设计错误和基于 BIM 的成本估算的研究。建筑可持续性研究是建筑设施成本量化和性能评价的重要组成部分。然而, 目前许多基于 BIM 的建筑可持续性研究主要基于材料在设计阶段的价值^[14], 很少有分析从长期的角度考虑构件退化和剩余寿命的预测。特别是在构件层面, 缺乏对构件物理信息的不确定性分析, 会使计算结果绝对化, 失去参考价值。

目前退化模型与可靠度理论在可持续建筑的研究分析中也得到了广泛的应用。Guan 等人^[15]将经济环境效应与路面劣化结合进行路网维修策略优化。Zhang 等人^[16]运用马尔科夫链退化模型对港口设施的全生命周期运营维护策略进行分析。Xie 等人^[17]则通过对桥梁失效概率的计算来进行桥梁结构的预防性维护方案分析。Wu 等人^[18]将 BIM 与腐蚀仿真结合, 评估了停车场钢筋混凝土构件的腐蚀风险。但他们的工作没有形成系统框架, 可靠度理论应用有所不足。因此, 可以通过搭建数据交互通道使退化模型的计算更加自动化, 更加实时地反应建筑设施的功能状态信息。

为了让基于 BIM 模型的基础设施评估具备概率层面的指标计算, 且可靠度的计算数据提取更为方便, 本文提出了基于 BIM 的基础设施评估框架。第 2 节将介绍如何根据 BIM 模型中存储的建筑信息计算和可视化构件可靠性的框架。第 3 节介绍了供水管道系统模型和四层钢筋混凝土框架模型的实例研究, 以演示所开发的方法。最后, 在第 4 节讨论了本研究的结论和评论。

2 基于 BIM 的可靠性评估框架

为了进行基于可靠性的抗力评估方法, 确定构件的失效模式和随机变量的不确定性是非常重要的。BIM 技术在评估中应用的关键问题是可靠性计算方法与三维模型之间构件属性信息的传递和共享。整个框架可以分为以下三个阶段: 1) BIM 模型的建立以及构件信息提取; 2) 构件极限状态方程的建立以及构件可靠度、重要性指标、系统可靠度计算; 3) 对可靠度计算结果评估并反馈到 BIM 模型中。图 1 展示了基于 BIM 的可靠性评估的整个流程。目前的工作旨在为建筑结构的设计和维护提供基于 BIM 的可靠性评估;然而, 该框架不仅适用于建筑结构的整个生命周期, 也适用于所有可以在 BIM 中建模的基础设施。

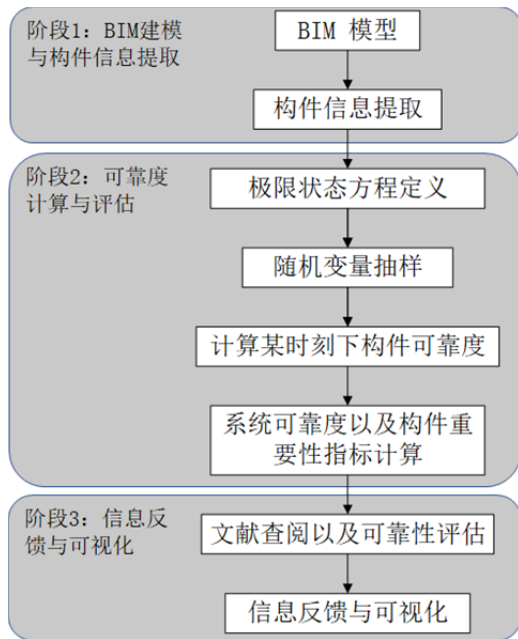


图1 基于BIM的可靠度评估框架

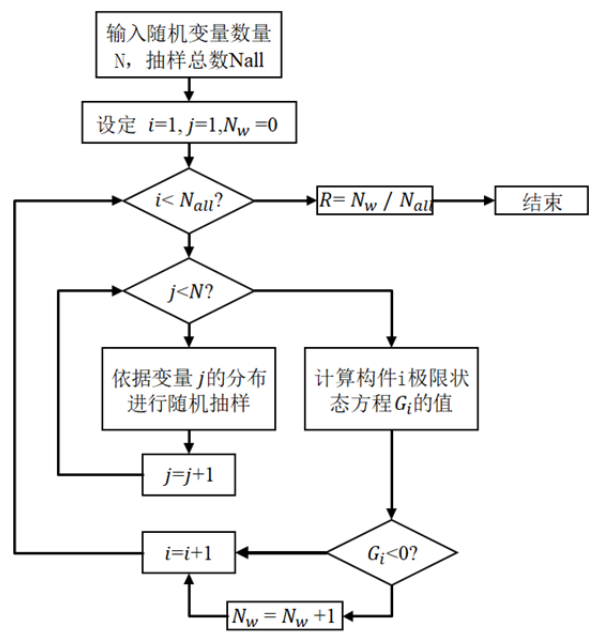


图2 数值抽样法流程图

框架的第一步是基于现有的或三维重建的BIM模型。BIM技术最大的优势之一是它可以存储所有建筑构件的设计和使用信息，并可以通过BIM-API将这些数据导入外部开放数据库，从而实现基于物理的模型集成。本工作采用Autodesk-Revit的Dynamo模块来传输和利用模型信息。Dynamo是一个可视化编程环境，它可以通过组件查询、提取、修改、添加和删除来扩展参数化建模功能，从而进行信息的传递与交互。

阶段2进行构件与系统的可靠性评估。在可靠性理论中，一个构件的安全可靠由极限状态函数定义，如式(1)所示：

$$G(R, S, t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

其中： $R(t)$ 表示构件在 t 时刻的承载力， $S(t)$ 表示构件在 t 时刻所受的荷载效应， $G(R, S, t)$ 表示构件在 t 时刻的极限状态方程。当 $G(R, S, t) < 0$ 时，表示构件在 t 时刻所受的荷载效应大于构件的抗力，构件发生破坏失效，反之当 $G(R, S, t) \geq 0$ 时，构件正常工作，对应构件在 t 时刻的失效概率表示为公式(2)：

$$P_f(t) = P_f[G(R, S, t) < 0] = P_f[R(t) - S(t) < 0] \quad (2)$$

构件的极限状态方程分为三类：1) 承载力极限状态；2) 有条件的极限状态；3) 正常工作极限状态。建立不同的极限状态方程，可以对构件不同的荷载模式工况，不同的工作环境下的失效概率进行模拟求解，因此BIM与可靠度理论结合可以让现有的BIM软件开发更多评估构件安全性的指标。对于已建立的极限状态方程，有两种方法求解失效概率，解析法与数值抽样法。解析法通过对结构状态函数求积分得到对应概率，而数值抽样法的流程图如图2所示。数值抽样法主要依据蒙特卡洛模拟，对服从特定概率分布的随机变量，利用随机数生成器生成随机样本，通过不断重复这一过程生成 n 个样本，失效概率 P_f 大致可以用公式(3)进行表示，其中 k 表示满足 $G(R, S) < 0$ 的样本个数：

$$P_f = P_f[G(R, S) < 0] = k / n \quad (3)$$

阶段3是利用建筑设施的三维模型使构件信息的显示更加直观和方便，为用户直接反馈BIM模型的可靠度评价结果，其描述组件状态变化的最常用的方法是在模型中改变它们的颜色。为了实现信息的反馈和可视化，首先需要在BIM模型中添加各构件的可靠性信息作为属性。这可以通过将计算结果映射到信息提取步骤中获得的元素id来实现。然后在发电机中采用一种颜色编码方案，根据每个元件的可靠性属性来定义颜色。同时，Dynamo的计算结果也可以通过数据传输导入其他分析软件(如MATLAB、EXCEL等)，实现可视化结果的多样化。

3 四层钢筋混凝土框架设计分析

现需设计一个四层钢筋混凝土框架结构，一楼层高 4.5m，其余各楼层高 3m，如图 3 所示。横跨(X 方向)6 m，纵跨(Y 方向)5m。图 3 中有 24 个柱构件，28 个梁构件。本文采用中国抗震设计规范规定的最大允许层间位移来判断结构设计是否安全。其性能函数如公式(4)所示：

$$G(\Delta u_e, [\theta_e], h) = [\theta_e]h - \Delta u_e \quad (4)$$

其中 Δu_e 表示多次地震标准值产生的最大弹性层间位移； $[\theta_e]$ 表示弹性层间位移角限值，且对于钢筋混凝土结构，规范值规定为1/550； h 表示层高，因此楼层的失效概率表示为公式(5)：

$$p[G(\Delta u_e, [\theta_e], h) < 0] = p([\theta_e]h - \Delta u_e < 0) \quad (5)$$

定义任何层间位移的破坏都会导致框架体系的破坏。串联系统失效概率计算公式可用于计算框架的系统可靠性，如式(6)所示：

$$r_{system} = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4 \quad (6)$$

其中， r_{system} 表示系统可靠度， $r_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示楼层 i 在层间位移极限状态函数下的可靠度。为了进行抗震分析，采用 Opensees 进行结构分析，根据图 1 框架采用如下四步实现基于 BIM 的可靠度评估三阶段。首先，根据设计要求(地理信息)和输入的结构设计方案，用 Dynamo 进行参数化建模，完成三维模型的构建，并将构件 ID、构件类型与相应信息映射，将构件信息输出到 excel 文件中。然后，随机数发生器将构件信息与不确定性信息相结合，得到样本。第三步，将每个试件的信息输出成固定格式的.txt 文件，由 Dynamo 外部调用 OpenSees 软件进行结构分析，得到各试件在荷载作用下的楼板位移结果。最后，利用 BIM 对各层可靠性信息和系统可靠性进行计算和可视化。对表 1 中两种设计方案的可靠度评估结果进行，其中同一层中柱截面与梁截面设计方案相同。设计信息如图 4 所示，包括截面宽度 b ，截面高度 h ，钢筋数量 n ，钢筋面积 ϕ ，混凝土保护层厚度 a 。考虑的随机变量包括混凝土强度 σ_c ，钢筋屈服强度 σ_y ，弹性模量 E ，混凝土峰值应变 ϵ_{pc} ，重力荷载 F 等，所选地震波加速度反应谱、四层框架应力分析模型及随机变量值见附录。

表 1 两种结构设计方案

构件	设计方案一(b, h, n, ϕ, a)	设计方案二(b, h, n, ϕ, a)
一层柱	(0.65m, 0.6m, 4, $\phi 18, 50\text{mm}$)	(0.75m, 0.7m, 5, $\phi 18, 50\text{mm}$)
一层梁	(0.5m, 0.45m, 4, $\phi 16, 50\text{mm}$)	(0.5m, 0.5m, 4, $\phi 18, 40\text{mm}$)
二层柱	(0.6m, 0.6m, 4, $\phi 18, 50\text{mm}$)	(0.7m, 0.65m, 5, $\phi 16, 50\text{mm}$)
二层梁	(0.45m, 0.45m, 4, $\phi 16, 50\text{mm}$)	(0.5m, 0.45m, 4, $\phi 16, 40\text{mm}$)
三层柱	(0.55m, 0.5m, 4, $\phi 14, 40\text{mm}$)	(0.6m, 0.6m, 5, $\phi 14, 40\text{mm}$)
三层梁	(0.4m, 0.4m, 4, $\phi 12, 40\text{mm}$)	(0.45m, 0.4m, 4, $\phi 14, 30\text{mm}$)
四层柱	(0.5m, 0.5m, 4, $\phi 14, 40\text{mm}$)	(0.6m, 0.5m, 5, $\phi 14, 40\text{mm}$)
四层梁	(0.4m, 0.35m, 4, $\phi 12, 40\text{mm}$)	(0.4m, 0.4m, 4, $\phi 14, 30\text{mm}$)

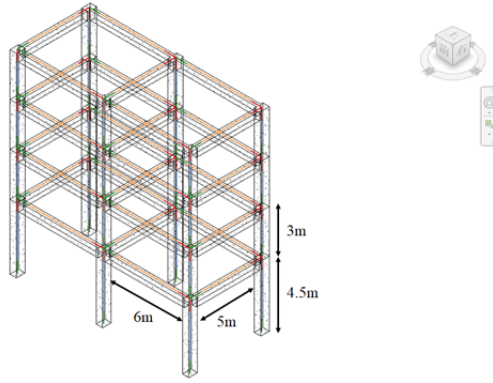


图 3 四层框架混凝土结构 BIM 模型

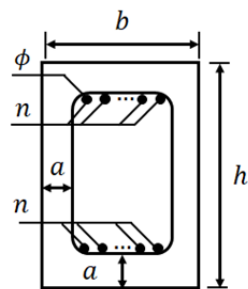


图4 钢筋混凝土截面设计示意图

每种设计方案通过蒙特卡洛抽样 1000 个样本,两种设计方案下弹性层间位移超过标准值的概率及由式(5)计算得到的系统可靠度如表 2 所示,可靠度可视化如图 5(a)、图 5(b)所示,同样,通过计算 1000 个样本中每个样本的首次失效时间,可以得到所选地震波下不同设计方案的时变可靠度,如图 6(a)和 6(b)所示。图 6 每个数据点 $i(t_i, p_{fi})$ 表示楼层 j 在 $t = t_i$ 时的失效概率。

表 2 计算得到各层弹性层间位移的可靠度

设计方案	一层可靠度	二层可靠度	三层可靠度	四层可靠度	系统可靠度
方案一	0.322	0.119	0.092	0.088	0.00031
方案二	0.989	0.834	0.628	0.687	0.356

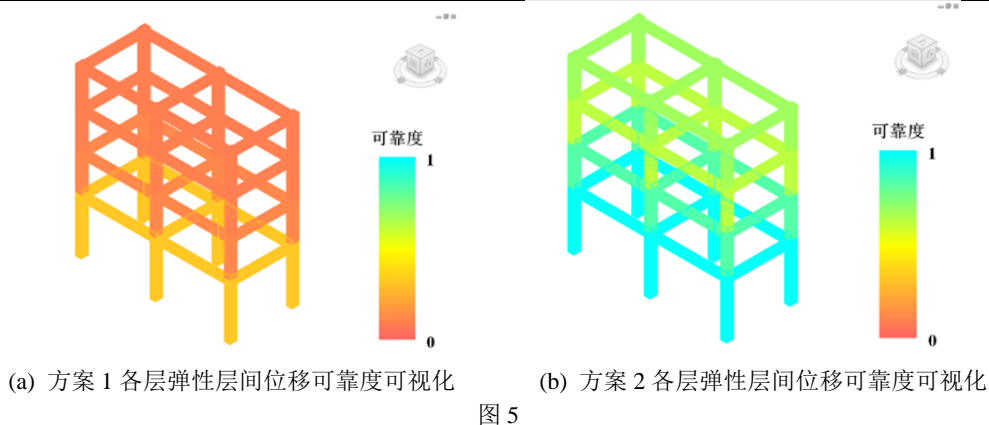


图 5

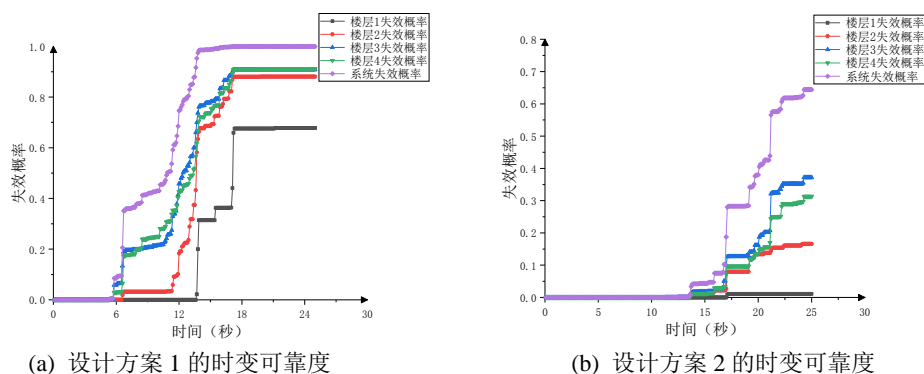


图 6

通过不同颜色的变化,将各楼层的可靠度信息可视化后,便于发现各楼层可靠性较低的构件。由图 5 可知,设计方案 2 各层可靠度均大于设计方案 1,说明设计方案 2 具有更高的结构安全性。也可以从表 3 和图 6 发现设计方案 2 的系统可靠性较高,在同样的地震波,设计方案 2 的时变可靠性的突变比设计方案 1 滞后,这意味着结构设计方案 2 的韧性更强。比较两种设计方案信息,方案 2 的每层配筋数量和直径与方案 1 相同,但各截面尺寸有所增加。因此,计算结果能有效反映设计方案的优缺点,为设计人员进一步优化提供建议。例如,若将第一层柱截面改变为 800 毫米×700 毫米,第一层梁截面更改为 600 毫米×500 毫米,和第三层柱截面更改为 650 毫米×600 毫米,这将增加每层的可靠性,一楼的可靠性增加到 1.000,二层可靠性

提高到 0.999，三层可靠性提高到 0.982，四层可靠性提高到 0.773。

根据图 6a 的计算结果，图 7 给出了不同地震波作用时间(0-5.3 秒、6 秒、8 秒、12 秒、16 秒、20-25 秒)下 BIM 模型时变可靠性的可视化结果。可以发现，在设计方案 1 中，第一、二层可靠性突变主要在 13.7 秒左右，这也与附录中所示的 13.7 秒左右地震波强度最大值一致。而三、四层可靠性突变时间约为 6.6 秒，系统失效概率对各层失效概率的变化更为敏感，这也是串联系统的特点之一。

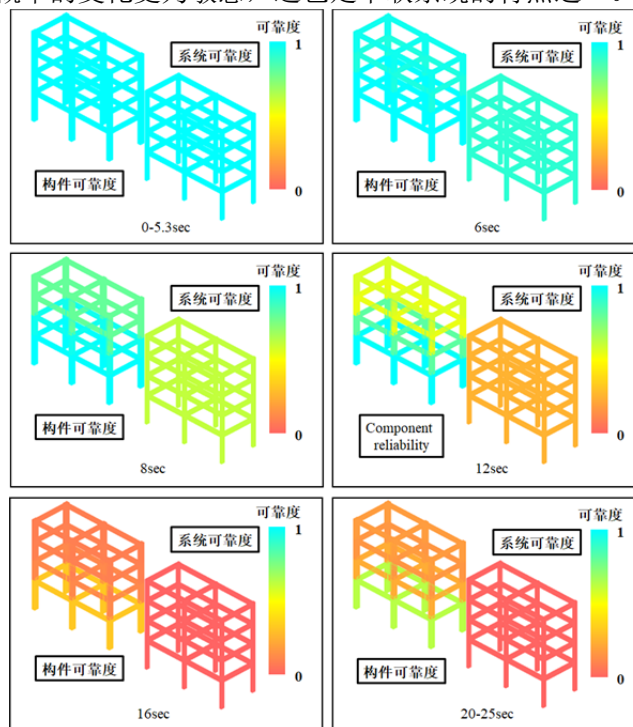


图 7 设计方案 1 时变可靠性 BIM 可视化结果

4 结论

本文提出了利用 BIM 模型将构件设计信息转化为可靠性信息的框架。在多平台之间建立数学建模与计算机建模相结合的方法进行可靠性评估。可靠性的概念被用于评估考虑构件退化的建筑结构的长期安全性。四层钢筋混凝土框架算例的表明，所提出的框架能有效地评价不同设计方案下结构的安全状况。在需要进行维修工作时，根据可靠性计算对系统分析中的高危部件进行识别是很有帮助的。将 BIM 模型中关键的组件可视化，对设计和维护具有重要意义。然而，必须认识到某些局限性。一、抗力在极限状态函数中的值往往需要参考规范内容，而每一个极限状态函数的定义都要参考相应的规范是很费时的。此外，通过 Dynamo 或 Revit-API 可以应用精度高、效率高的更先进的可靠性方法，减少了计算中的计算负担。考虑基于结构实时监测数据的可靠性评估还需要进一步研究，以获得实时可靠性评估体系。

参考文献：

- [1] Antwi-Afari, M. F., Li, H., Parn, E. A., & Edwards, D. J. (2018). Critical success factors for implementing building information modelling (bim): a longitudinal review [J]. Automation in Construction, 91(JUL.), 100-110.
- [2] Fox, S., & Hietanen, J. (2007). Interorganizational use of building information models: potential for automational, informational and transformational effects [J]. Construction Management and Economics, 25(3), 289-296.
- [3] Lin, J. R., & Wu, D. P. (2021). An approach to twinning and mining collaborative network of construction projects [J]. Automation in Construction, 125, 103643.
- [4] Sobhkhiz, S., Taghaddos, H., Rezvani, M., & Ramezani-pour, A. M. (2021). Utilization of semantic web technologies to improve BIM-LCA applications [J]. Automation in Construction, 130, 103842. doi:https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103842.
- [5] Eastman, C. M. (2008). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers [M].

[6] Deb, A. K., Grablutz, F. M., and Hasit, Y. (2002). Prioritizing water main replacement and rehabilitation, American Water Works Association Research Foundation, Denver.

[7] DeSilva,D.,Moglia,M.,Davis,P.,andBurn,S.(2006).“Conditionassessment to estimate failure rates in buried metallic pipelines.” [R] J. Water Supply Res. Technol., 55(3), 179–191.

[8] Yin, M. , Tang, L. , Zhou, T. , Wen, Y. , & Deng, W. . (2020). Automatic layer classification method-based elevation recognition in architectural drawings for reconstruction of 3d bim models [J]. Automation in Construction, 113, 103082.

[9] Wang, B., Wang, Q., Cheng, J. C. P., Song, C., & Yin, C. (2022). Vision-assisted BIM reconstruction from 3D LiDAR point clouds for MEP scenes [J]. Automation in Construction, 133, 103997. doi:https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103997.

[10] Ozturk, G. B. . (2020). Interoperability in building information modeling for aeco/fm industry [J]. Automation in Construction, 113(C-103122).

[11] D Utkucu, & Szer, H. . (2020). Interoperability and data exchange within bim platform to evaluate building energy performance and indoor comfort [J]. Automation in Construction, 116, 103225.

[12] Tixier, A.J.P., Hallowell, M.R., Rajagopalan, B., & Bowman, D.. (2017). Construction Safety Clash Detection: Identifying Safety Incompatibilities among Fundamental Attributes using Data Mining [J]. Automation in Construction, 74, 39-54.

[13] Lu XZ, Gu DL, Xu Z, Xiong C, Tian Y, CIM-powered multi-hazard simulation framework covering both individual buildings and urban areas [J], Sustainability, 2020, 12(12), 5059. DOI:10.3390/su12125059.

[14] Santos, R. , Costa, A. A. , Silvestre, J. D. , & Pyl, L. . (2019). Informetric analysis and review of literature on the role of bim in sustainable construction [J]. Automation in Construction, 103(JUL.), 221-234.

[15] Guan, J., Yang, X., You, L., Ding, L., & Cheng, X. (2021). Multi-objective optimization for sustainable road network maintenance under traffic equilibrium: Incorporating costs and environmental impacts [J]. Journal of Cleaner Production, 130103. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.13010.

[16] Yi, Z. , Kim, C. W. , Kong, F. T. , & Lam, J. . (2017). Optimal sustainable life cycle maintenance strategies for port infrastructures [J]. Journal of Cleaner Production, 142(4), 1693-1709.

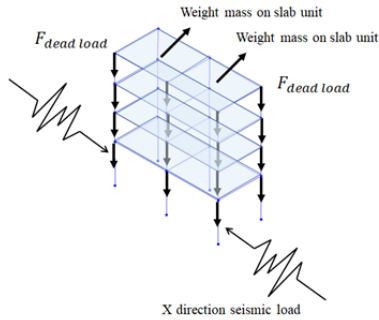
[17] Xie, H. B. , Wu, W. J. , & Wang, Y. F. . (2018). Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering lca and lcc [J]. Journal of Cleaner Production, 176(MAR.1), 36-45.

[18] Wu, J. , & MD Lepech. (2020). Incorporating multi-physics deterioration analysis in building information modeling for life-cycle management of durability performance [J]. Automation in Construction, 110.

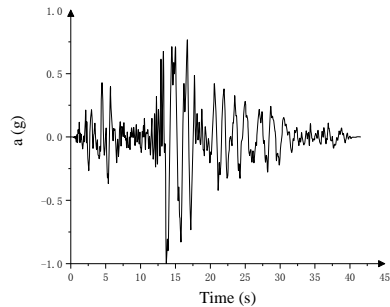
[19] Ministry of Construction. (2016). Code for seismic design of buildings GBJ11-89 [S]. China Architecture and Architecture Press.

附录：

本文 OpenSees 中四层框架的建模信息如附件图 1 所示。如附件图 1 所示，每层设置两个楼板，符合刚性楼板假设。质量集中在楼板上，静荷载通过各节点施加。地震波作用于 X 方向。变量参数信息的不确定性如附件表 1 所示。



附图 1 Opensees 模型示意图



附图 2 地震波反应谱

附表 1 两种结构设计方案

随机变量	概率分布	均值	标准差
混凝土压强	正态分布	34.47MPa	0.5MPa
混凝土残余压强	正态分布	24.13MPa	0.3MPa
混凝土峰值应变	对数正态分布	-0.005	0.0001
混凝土屈服应变	对数正态分布	-0.02	0.001
钢筋屈服强度	正态分布	248MPa	1MPa
钢筋弹性模量	正态分布	2.06×10^5 MPa	0.001MPa
自重荷载	正态分布	30kN	0.1kN
死荷载	正态分布	75kN	0.1kN