

基于 BIM 数据的建筑抗震弹塑性分析建模技术

曾翔, 陆新征, 许镇

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 针对建筑信息模型(Building Information Model, BIM)的共享数据标准为IFC标准,但现有软件导出的IFC格式模型缺少关键数据,不能满足结构非线性抗震分析数据需求的问题,提出建筑抗震弹塑性分析数据基于IFC标准的表达方法,编写C++转换程序将BIM包含的数据正确地转换成不同软件(如Marc和OpenSees等)的模型,从而可以使用不同的结构分析软件实现建筑抗震弹塑性分析.该方法为基于BIM数据实现建筑抗震弹塑性分析提供参考.

关键词: 建筑抗震分析; 纤维模型; 结构信息转换; IFC标准; IFC子信息模型; 前处理

中图分类号: TU318

文献标志码: B

Modeling technology for building aseismic elasto-plastic analysis based on BIM data

ZENG Xiang, LU Xinzheng, XU Zhen

(Department of Civil Eng, Tsinghua Univ, Beijing 100084, China)

Abstract: The data sharing standard of BIM (Building Information Model) is IFC. However, the IFC models exported by the current softwares lack some key data, which cannot satisfy the data requirements for nonlinear structural aseismic analysis. Therefore, the building aseismic elasto-plastic analysis data expression method is proposed on the basis of IFC standard; a conversion program is developed by C++, which can correctly convert the BIM data into the structural analytical models of different softwares (e.g. Marc, OpenSees, etc.); so the building aseismic elasto-plastic analysis can be performed by different kinds of structural analysis softwares. The method can provide reference for the building aseismic elasto-plastic analysis based on BIM data.

Key words: building aseismic analysis; fiber model; structural information conversion; IFC standard; IFC sub-model; pre-processing

0 引 言

随着城市化的发展,地震对经济发展和人民生活的潜在威胁越来越严重,城市建筑震害预测成为

防灾减灾的重要方面之一.城市区域内的建筑群震害预测包含2个层次:宏观层次和微观层次.宏观层次模型^[1]将建筑抽象为具有一个或少数个自由度的结构,进行不同烈度下的地震损失分析预测.微观

收稿日期: 2013-07-14 修回日期: 2013-08-16

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAJ07B012)

作者简介: 曾翔(1991—),男,湖南株洲人,博士研究生,研究方向为土木工程计算机仿真,(E-mail) cengx09@mails.tsinghua.edu.cn;
陆新征(1978—),男,安徽芜湖人,教授,博导,博士,研究方向为结构非线性计算和仿真,(E-mail) luxz@tsinghua.edu.cn

<http://www.chinacae.cn>

层次模型^[5]建立建筑物更加精细化的分析模型(例如杆系模型等),可以考虑结构足够多的自由度和精确的动力特性,进行高精度的震害分析预测。

城市建筑震害预测需要获取和存储城市建筑的基础数据,若只是建立宏观层次模型,则只需要建筑面积、年代、层数和结构类型等少量宏观数据,其数据来源可以是城市 GIS 数据库等。基于 GIS 的城市震害预测已经有一定的研究基础。^[6]建立微观层次的精细化模型需要更详细的数据,如梁柱的尺寸和配筋等,若采用手动方法建立精细化模型,不仅工作量太大,还容易出错,特别是对于某些开源的有限元软件(如 OpenSees),由于没有前处理界面,建模极不方便。比较合理的方法是利用建筑已有的数字化模型,从中提取建筑震害分析所需要的详细数据,自动建模供计算模块进行分析计算。然而,不同软件生成的建筑数字化模型其数据格式不同,而计算模块也可能由不同的结构分析软件组成(如 Marc 和 OpenSees 等)。因此,需要采用统一的数据标准,以实现不同软件之间的数据交换。

建筑信息模型(Building Information Model, BIM)致力于在建筑的全生命期实现不同建筑工程领域的信息共享和协同管理,基于 BIM 的建筑数字化模型是未来发展的重要方向。目前, BIM 采用 IFC 标准作为建筑产品的数据交换标准,不同软件之间通过 IFC 标准交换数据。研究表明,基于 IFC 标准的

建筑模型与结构模型之间的信息传递和共享还不十分成熟。^[7]张剑涛等^[8]和刘照球等^[6-7]开发 IFC 与 PKPM 结构模型的数据转换接口,初步实现两者的几何和材料等信息的转换,但缺乏载荷信息等的转换。也有学者尝试建立通用建筑结构模型转换平台,以 IFC 为通用数据转换标准,实现任意常用结构分析软件间的结构分析模型数据转换。这类研究尚处于起步阶段,目前仅实现 SATWE、ETABS 和 SAP2000 等软件与 IFC 标准的转换接口,所能实现的数据转换也仅限于几何和材料等信息。

因此,能否利用 BIM 的共享性,解决城市建筑震害预测的数据获取以及自动建模问题,具有重要的研究价值。

1 建筑震害分析和数据需求

对于钢筋混凝土框架结构,通常采用纤维梁模型作为抗震弹塑性分析的精细化计算模型。不少软件都具备建筑抗震弹塑性分析能力,其中 2 类典型的软件是 Marc 和 OpenSees。

由于城市建筑信息以单体建筑为基础,因此,本文利用 C++ 编写模型转换程序,从一个单体钢筋混凝土建筑的数字化模型(IFC 格式)中,提取建筑震害分析所需的信息,自动生成 Marc 和 OpenSees 软件模型,验证转换后的模型能否用于分析建筑结构在地震作用下的响应,分析流程见图 1。

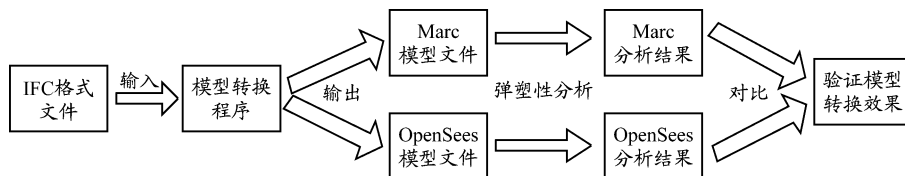


图 1 基于 IFC 标准的建筑抗震弹塑性分析流程

Fig. 1 Process of building aseismic elasto-plastic analysis based on IFC standard

1.1 Marc 和 OpenSees 软件

Marc 是一款功能齐全的高级非线性通用有限元软件。^[9]用 Marc 进行建筑震害模拟可以得到较为理想的分析结果,且适用于大多数分析需求。

基于纤维模型原理,清华大学土木工程系陆新征等^[10]利用 Marc 提供的二次开发接口,编写 THUFIBER 程序,使 Marc 能对钢筋混凝土结构进行纤维模型计算。THUFIBER 将混凝土构件的截面分为 36 个混凝土纤维以及 4 个钢筋纤维(纤维划分方法也可以由用户自定义),各纤维的面积由截面尺寸和配筋决定。对每根纤维定义特定的本构关系,便可以进行不同精度的有限元分析。

OpenSees 是能够进行结构抗震弹塑性分析的

开源软件^[11],相比内部代码不透明的商用有限元软件,OpenSees 的开源性使得研究者能全面掌握其运行机制,并能根据自身需求进行二次开发,因此,OpenSees 是进行建筑震害研究的重要工具。在 OpenSees 中,混凝土梁柱也用纤维模型模拟。

选用上述 2 种软件进行震害分析,可以同时利用商业软件的健壮性和开源软件的透明性。

1.2 建筑震害分析的数据需求

为从 IFC 文件中提取足够的信息,以自动生成 Marc 和 OpenSees 结构模型,需要了解这 2 种软件的建筑震害分析建模方法,并总结震害分析所需的数据信息。这些数据信息分为 2 类:一类与混凝土结构模型有关,如结构构件的位置、几何信息、材料

信息和载荷等;另一类则与震害分析的方法和过程有关,如地震波的选取、载荷工况的增量步总数和每个增量步的时间步长等,这类数据随着分析方法和要求的变化而变化,并且在软件中可以很方便地实现这类参数的调整.因此,应该重点关注第一类数据需求,即与混凝土结构模型有关的数据.

通过考察这 2 种软件的建筑抗震分析模型,得到抗震分析的数据需求,见表 1.

表 1 建筑抗震分析的数据需求
Tab. 1 Data requirements for building aseismic analysis

项目	震害分析的数据需求
单元	单元编号、总数、类型,单元所包含的节点
节点	节点编号、总数、坐标
钢筋 混凝土 材料	(核心区 and 保护层的) 混凝土弹性模量、混凝土的应力应变关系,混凝土保护层厚度,截面配筋情况,钢筋弹性模量、屈服强度,配筋截面对应的单元编号
截面几何 性质	截面尺寸,截面局部坐标 x 轴在整体坐标系中的方向,截面几何性质对应的单元编号
支座约束	支座自由度约束状况、约束名称及其对应的单元编号
载荷	恒、活载荷,其他载荷,载荷对应的单元编号

2 抗震分析数据需求的 IFC 表达

2.1 IFC 标准概述

IFC 标准是针对建筑信息模型的开源的产品模型标准.2013 年 3 月正式发布版本 IFC 4^[1].

IFC 4 包含类型、实体、函数、规则、属性集(预定义)和量集等元素.其中,实体对应于面向对象思想中的“类”,每个实体都拥有一条或多条属性,与“类”中的数据成员对应.然而,为更灵活、全面地表达实体的属性,IFC 体系中引入“属性集”概念^[2],即属性的集合:通过关联实体的关联机制,将某个属性集与某个实体相关联,实现对该实体属性的扩展.

IFC 4 标准既能描述建筑模型,又能描述结构分析模型,但这 2 类模型的内容有很大差异,例如同一根梁,在 IFC 4 建筑模型中由 IfcBeam 实体表示,是由一个封闭截面拉伸而形成的实体(或者其他实体生成方式),且具有颜色和渲染材质等属性,而在结构分析模型中由 IfcStructuralCurveMember 表示,是由 2 个顶点及其之间的连线组成的实体.某建筑模型和对应结构分析模型的对比示意^[3]见图 2.

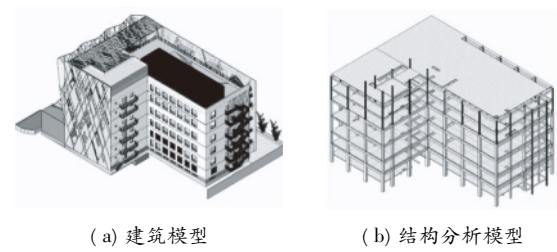


图 2 建筑模型与结构分析模型的对比

Fig. 2 Comparison between building model and corresponding structural analysis model

2.2 IFC 标准在结构分析中的应用

目前,IFC 在建筑设计和施工等领域的研究和应用十分丰富,而在结构分析领域相对缺乏.

WAN 等^[4]通过对比结构分析软件 SAP2000 所需信息和 IFC 2x2 标准所能描述的信息之间的差异,分析 IFC 标准对结构分析模型的支持程度,发现 IFC 可以提供简单的静力载荷、静力工况和部分材料力学属性等数据,但无法描述弯矩释放和材料剪切性能等部分信息.

虽然 IFC 标准本身具备描述基本结构分析模型的能力,但其应用并不成熟,常用建筑设计软件和结构分析软件的 IFC 模型导出效果见表 2,导出的 IFC 文件最高版本为 IFC 2x3.由表 2 可以看出,现有软件的 IFC 结构分析模型导出能力较差,不能满足结构抗震弹塑性分析的要求.

表 2 部分软件的 IFC 文件导出能力测试

Tab. 2 IFC file exportation performance tests for some softwares

测试软件	几何 属性	材料 属性	结构分 析模型 实体	配筋 信息	载荷	支座 约束
Revit Structure 2013	√	√	×	×	×	×
Etabs 9	√	×	√	×	×	×
ArchiCAD 16	√	√	×	×	×	×
SAP2000 v15	√	×	×	×	×	×
Tekla Structures 18.1	√	√	×	√	×	×
本文建立的 IFC 4 结 构分析子信息模型	√	√	√	√	√	√
注“√”为有能力,“×”为没有能力						

2.3 IFC 4 结构分析子信息模型

由于现有常用软件导出的 IFC 文件中缺少建筑结构抗震弹塑性分析的关键数据,因此有必要建立完整的 IFC 结构分析模型,如表 2 所示.子信息模型是指整个 IFC 标准体系的一个子集.作为建筑产品通用数据标准,IFC 提供丰富的建筑描述方法以适

应各种描述需求,但同时也导致 IFC 标准非常复杂,例如描述一根梁的配筋至少有 4 种方法。

(1) 用 IfcMaterialLayer 实体定义层状材料,将一个构件的材料分成若干钢筋层、混凝土层,这种方法更适合表达剪力墙和楼板等的配筋。

(2) 用 IfcReinforcementDefinitionProperties 实体定义配筋,这种方法通常用于早期设计阶段。

(3) 用 IfcReinforcingBar 实体描述钢筋,并通过关系实体将钢筋与梁相关联,然而钢筋的位置既能用全局坐标表达,又能用局部坐标表达;既可以为每根钢筋定义一个 IfcReinforcingBar 实体,又可以仅定义一根钢筋,用映射方法 IfcMappedItem 生成任意数量相同类型的钢筋;既可以为每根钢筋指定屈服强度等属性,又可以为 IfcReinforcingBarType 指定属性从而一次性给所有同类型钢筋指定该属性。因此,用这种方法定义配筋可描述大多数类型的配筋方式,但若要从其中提取配筋信息,实现起来非常复杂。

(4) 用自定义属性集的方式为梁添加配筋属性,表达灵活也便于编程提取信息。

IFC 的复杂性也是限制其发展、导致常用软件普遍无法导出满足抗震分析的 IFC 文件的原因之一。因此,在仔细考察 IFC 4 体系的基础上,选择其中的常用部分建立 IFC 4 结构分析子信息模型。例如配筋的描述仅保留方法(4),虽然这样会降低 IFC 的全面性,但仍能描述抗震分析所需的关键信息,实用性增强。

描述 IFC 子信息模型最方便的工具是 EXPRESS-G^[13],其部分图例见图 3。

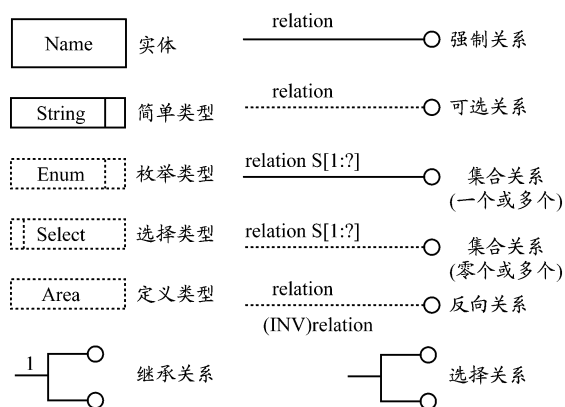


图 3 EXPRESS-G 部分图例

Fig. 3 Partial legends of EXPRESS-G

2.3.1 IFC 4 结构分析模型描述

在任何一个 IFC 4 模型文件中,有且仅有一个 IfcProject 实体。因此,任何 IFC 子信息模型都包含 IfcProject 实体,用于表征一个建筑项目。在 IFC 4

中,用 IfcStructuralAnalysisModel 实体表示一个结构分析模型,该实体有结构分析类型、全局坐标系、所包含的载荷工况等属性。载荷工况由 IfcStructuralLoadGroup 实体的子类,即 IfcStructuralLoadCase 表达,该实体的主要属性有载荷类型(永久载荷、可变载荷和偶然载荷等)和载荷模式(恒载荷、活载荷和风载荷等)。一个 IfcProject 可对应几个 IfcStructuralAnalysisModel,两者之间通过 IfcRelDeclares 关系实体建立关联关系,其 EXPRESS-G 表达见图 4,图中实体属性未全部列出,灰色底纹标出的为主要实体。

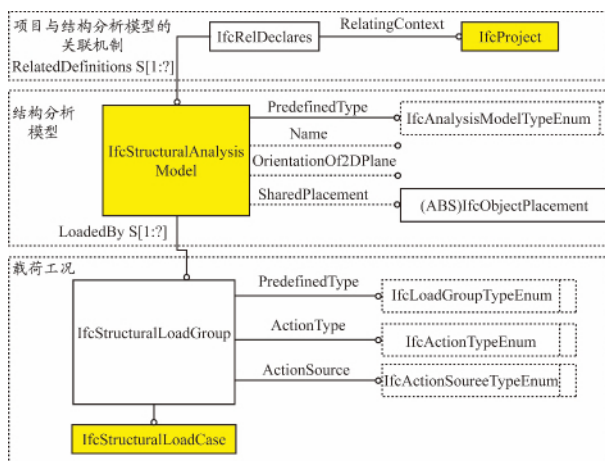


图 4 IFC 4 结构分析模型描述方法

Fig. 4 Description method of IFC 4 structural analysis model

2.3.2 其他建筑抗震分析数据的 IFC 4 描述方法

与第 2.3.1 节类似,建立包含结构构件、载荷、支座约束、材料和截面几何特性等信息的 IFC 4 描述方法。以载荷为例,见图 5,图中实体属性未全部列出。IFC 4 能描述线性变化的分布载荷,但为降低复杂性,将这类载荷转换成等效均布载荷,用 IfcStructuralLinearAction 实体表达。

3 模型转换程序设计

根据第 2 节所建立的完整的 IFC 4 结构分析子信息模型框架,可以构建满足抗震分析数据需求的 IFC 4 模型文件,进而采用 C++ 语言设计模型转换程序,解析 IFC 模型文件,自动生成 Marc 和 OpenSees 软件模型。

IFC 模型由 EXPRESS 语言定义,是 ASCII 格式纯文本文件形式,因此 IFC 文件需要经过解析识别,才能供程序代码处理。使用 IFCEngine.dll 作为 IFC 文件解析工具。IFCEngine.dll 是一款免费工具包,但要求编程者对 IFC 体系十分熟悉。

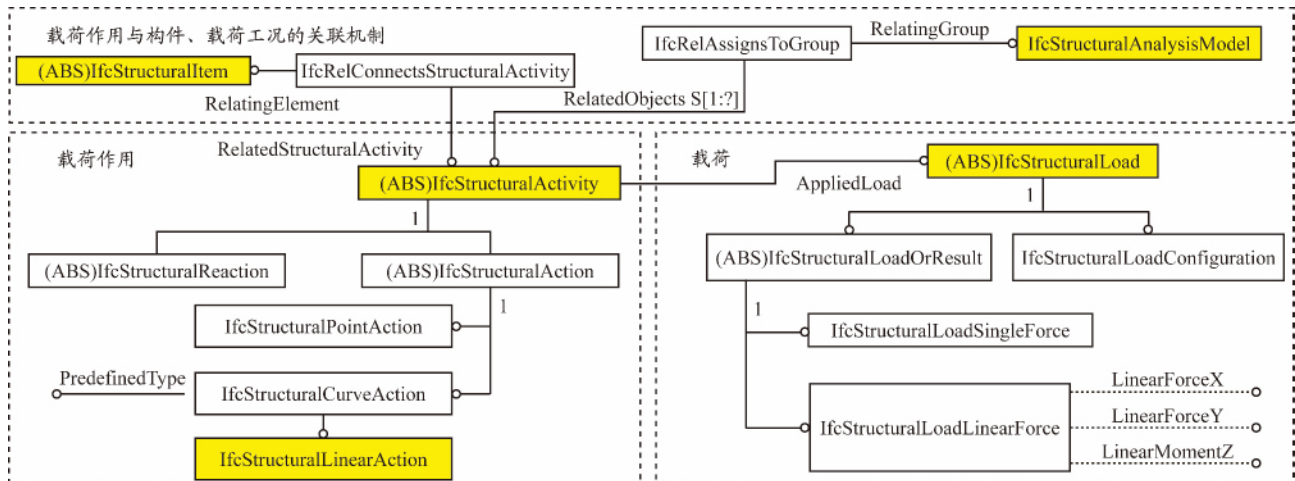


图5 荷载信息在 IFC 4 中的描述方法

Fig. 5 Description method of load information in IFC 4

根据表1所示建筑震害的数据需求,设计节点、单元、支座约束、截面几何和材料等5个类,并用 Map 和 Vector 等 C++ 标准模板库中的容器将各个类的不同对象有序地组织起来。程序的输入模块通

过调用类的成员函数,从 IFC 模型文件中提取所需数据,赋值给相应的数据成员,例如节点类 Node 调用 SetCoordinate 函数提取并设置节点坐标。模型转换程序的 IFC 解析及数据提取部分的流程见图6。

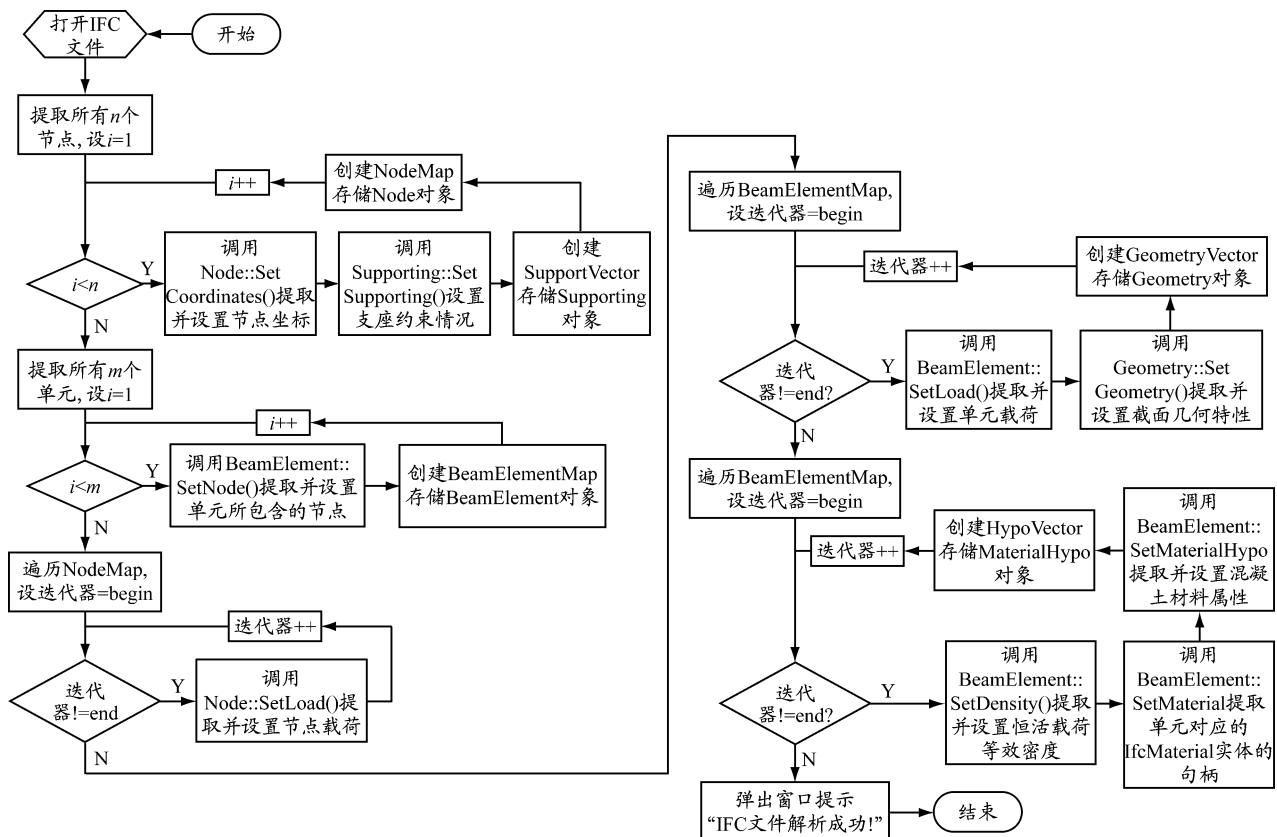


图6 模型转换程序的 IFC 解析及数据提取的流程

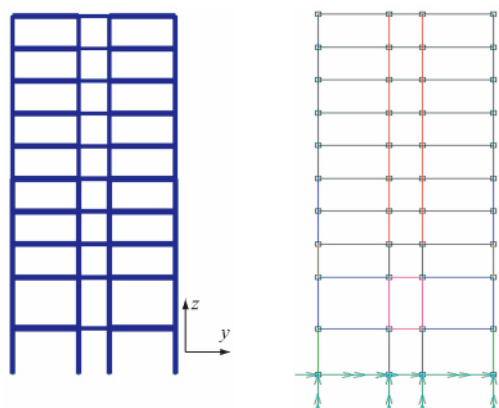
Fig. 6 Flow chart of IFC parse and data extraction of model conversion program

由于数据结构设计合理,程序的输出模块实现比较方便,分别遍历相应容器,按照 Marc 和 OpenSees 的建模规则输出节点、单元和材料等类的的数据成员,便可自动生成这2种软件模型。

4 实例验证模型转换效果

为验证模型转换程序的正确性,用 IFC 4 标准建立一个钢筋混凝土框架模型。模型为清华大学主

楼的一榀 10 层 3 跨平面框架^[4], 边跨 7.5 m, 中跨 3.5 m, 框架总高度 45.05 m, 模型详细尺寸及配筋等信息见文献^[6]. IFC 模型以及转换后的 Marc 模型见图 7. OpenSees 没有显示模型的界面, 所以此处不予显示. 由图 7 可知单元、节点和支座约束转换正确. 检查模型参数, 截面、材料和载荷等均转换正确.



(a) IFC 模型 (b) 自动生成的 Marc 模型

图 7 IFC 模型和自动生成的 Marc 模型

Fig. 7 IFC model and auto-generated Marc model

分别用 Marc 和 OpenSees 对自动生成的模型进行模态分析, 得到的前 3 阶振型所对应的圆频率相差小于 1%, 见表 3.

表 3 Marc 与 OpenSees 模态分析结果对比

Tab. 3 Modal analysis result comparisons of Marc and OpenSees

分析软件	1 阶 圆频率/ s^{-1}	2 阶 圆频率/ s^{-1}	3 阶 圆频率/ s^{-1}	基本 周期/s
Marc	4.07	11.48	21.69	1.53
OpenSees	4.11	11.57	21.82	1.54

对框架输入 y 方向地震动加速度, 分别用 Marc 和 OpenSees 进行弹塑性时程分析. 选用 El Centro 地震波, 地震峰值加速度设为 400 Gal, 顶点的位移时

程曲线见图 8, 吻合得很好.

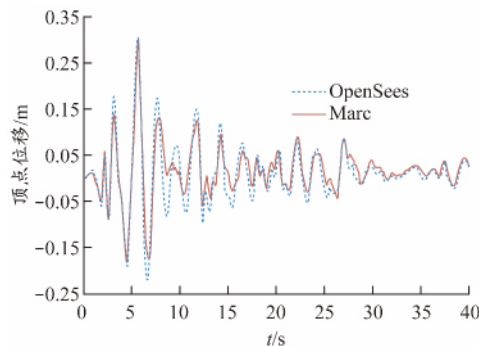


图 8 Marc 与 OpenSees 弹塑性时程分析结果对比

Fig. 8 Elasto-plastic time-history analysis result comparison of Marc and OpenSees

2 个软件的模态分析和时程分析结果的一致性进一步说明模型的单元和材料等各参数都得到正确转换.

5 结束语

从建筑震害分析的数据需求出发, 逐一分析这些数据需求在 IFC 4 中的表达方法, 建立完整的 IFC 4 结构分析子信息模型. 利用该子信息模型, 就能通过 IFC 4 标准描述建筑抗震弹塑性分析的钢筋混凝土结构模型.

根据建立的 IFC 4 结构分析子信息模型以及 Marc 和 OpenSees 的建模规则, 编写模型转换程序, 实现节点、构件、载荷、支座约束、材料和截面几何等所有抗震分析所必要的信息的正确转换, 进行 IFC 文件到 Marc 和 OpenSees 之间的数据转换的新尝试.

在此基础上, 还有很多研究内容可以继续开展. 例如, 扩展本文建立的 IFC 4 结构分析子信息模型, 使之能描述楼板、剪力墙等其他结构构件; 考虑城市建筑群信息的 IFC 表达方法等.

参考文献:

- [1] 韩博, 陆新征, 许镇, 等. 基于高性能 GPU 计算的城市建筑群震害模拟[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(5): 16-22.
HAN Bo, LU Xinzhen, XU Zhen, et al. Seismic damage simulation of urban buildings based on high performance GPU computing[J]. J Nat Disasters, 2012, 21(5): 16-22.
- [2] 卢啸, 陆新征, 张万开, 等. 特大地震下超高层建筑的倒塌模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(11): 1405-1416.
LU Xiao, LU Xinzhen, ZHANG Wankai, et al. Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2011, 41(11): 1405-1406.
- [3] XU Feng, CHEN Xuping, REN Aizhu, et al. Earthquake disaster simulation for an urban area, with GIS, CAD, FEA, and VR integration[J]. Tsinghua Sci & Technol, 2008, 13(S1): 311-316.
- [4] Applied Technology Council. Project ATC-75 [EB/OL]. (2012-11-12) [2013-07-01]. <https://www.atccouncil.org/Projects/atc-75-project.html>.
- [5] 张剑涛, 刁波, 唐春风, 等. IFC 标准在 PKPM 结构软件中的实现[J]. 建筑科学, 2006, 22(4): 103-106.
ZHANG Jiantao, DIAO Bo, TANG Chunfeng, et al. The exchange of information between IFC and PKPM[J]. Building Sci, 2006, 22(4): 103-

- 106.
- [6] 刘照球, 李云贵, 吕西林, 等. 建筑结构信息集成的程序实现[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(3): 467-473.
LIU Zhaoqiu, LI Yungui, LYU Xilin, *et al.* Program realization for integrated information in architectural and structural design field [J]. J Shenyang Jianzhu Univ: Nat Sci, 2009, 25(3): 467-473.
- [7] 刘照球, 李云贵, 吕西林, 等. 基于BIM建筑结构设计模型集成框架应用开发[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 948-953.
LIU Zhaoqiu, LI Yungui, LYU Xilin, *et al.* BIM-based integrated information framework for architectural and structural design model [J]. J Tongji Univ: Nat Sci, 2010, 38(7): 948-953.
- [8] 蒋学武, 吴新跃, 朱石坚. 综合应用UG, HyperMesh和MSC Marc软件进行有限元分析[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(2): 11-14.
JIANG Xuewu, WU Xinyue, ZHU Shijian. Comprehensive application of UG, HyperMesh and MSC Marc in finite element analysis [J]. Comput Aided Eng, 2007, 16(2): 11-14.
- [9] 陆新征, 叶列平, 缪志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析: 原理、模型与在Abaqus, MSC Marc和SAP2000上的实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 143-162.
- [10] MCKENNA F. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation [J]. Comput Sci & Eng, 2011, 13(4): 58-66.
- [11] Building SMART. Industry foundation classes IFC 4 official release [EB/OL]. (2013-03-20) [2013-07-01]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/>.
- [12] 张洋. 基于BIM的建筑工程信息集成与管理研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [13] 秦领, 刘西拉. 建筑物理模型与结构分析模型的数据映射研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2010, 2(2): 28-36.
QIN Lin, LIU Xila. Research on data mapping between architectural physical models and structural analysis models [J]. J Inform Technol Civil Eng & Architecture, 2010, 2(2): 28-36.
- [14] WAN Caiyun, CHEN P H, TIONG R L K. Assessment of IFCS for structural analysis domain [J]. Inform Technol Construction, 2004(9): 75-95.
- [15] Data modelling using EXPRESS-G for IFC development [EB/OL]. (2013-03-10) [2013-07-01]. [http://www.stanford.edu/group/narratives/classes/08-09/CEE215/ReferenceLibrary/Industry%20Foundation%20Classes%20\(IFC\)/IFC%20General/Data_Modelling_Using_EXPRESS-G_for_IFC_Development.pdf](http://www.stanford.edu/group/narratives/classes/08-09/CEE215/ReferenceLibrary/Industry%20Foundation%20Classes%20(IFC)/IFC%20General/Data_Modelling_Using_EXPRESS-G_for_IFC_Development.pdf).
- [16] 邹积麟. 空间RC框架结构全过程静力弹塑性分析[D]. 北京: 清华大学, 2001.

(编辑 武晓英)

(上接第4页)

- [2] 刘学庆. 大跨连续槽形梁混合支架体系的设计与施工[J]. 桥梁建设, 2003, 1(6): 48-50.
LIU Xueqing. Design and construction of combined scaffolding system for long-span continuous channel girder [J]. Bridge Construction, 2003(6): 48-50.
- [3] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 341-365.
- [4] 邢静忠, 王永岗, 陈晓霞. ANSYS分析实例与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 85-114.
- [5] 朱照清, 龚维明, 戴国亮. 大直径钢管桩水平承载力现场试验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 36-39.
ZHU Zhaoqing, GONG Weiming, DAI Guoliang. Field test research of horizontal bearing capacity of large diameter steel pipe pile [J]. Building Sci, 2010, 26(9): 36-39.
- [6] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
- [7] 舒兴平, 邹浩, 袁智深. 钢框架风荷载作用下侧移限值研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 71-78.
SHU Xingping, ZOU Hao, YUAN Zhishen. Research review on drift limit of steel frame under wind load [J]. J Building Structures, 2011, 32(12): 71-78.
- [8] 陈波, 李明, 杨庆山. 基于风振特性的多目标等效静风荷载分析方法[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 152-157.
CHEN Bo, LI Ming, YANG Qingshan. Equivalent static wind loads for multiple targets based on wind-induced response [J]. Eng Mech, 2012, 29(11): 152-157.
- [9] 冯东, 朱莎, 汪一骏. 建筑围护结构风荷载的计算与取值[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 119-122.
FENG Dong, ZHU Sha, WANG Yijun. Calculation and selection of wind load for enclosure structures of buildings [J]. J Beijing Jiaotong Univ, 2013, 37(4): 119-122.
- [10] 冯若强, 丁静鹤, 李庆祥, 等. 单层折面空间网格结构风荷载特性及等效静风荷载研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(1): 58-64.
FENG Ruoqiang, DING Jinghu, LI Qingxiang, *et al.* Wind load and equivalent static wind load of single-layer spatial reticulated structure [J]. J Building Structures, 2012, 33(1): 58-64.

(编辑 武晓英)