

荣超,陈勇,周瑜.装配式钢混组合结构加固时抗震性能模糊综合评估模型研究[J].地震工程学报,2019,41(2):539-544.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.539
RONG Chao, CHEN Yong, ZHOU Yu. A Fuzzy Comprehensive Evaluation Model for Seismic Behavior of Assembled Steel-Concrete Composite Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 539-544. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.539

装配式钢混组合结构加固时抗震性能 模糊综合评估模型研究

荣超¹, 陈勇², 周瑜¹

(1. 云南大学滇池学院, 云南 昆明 650011; 2. 昆明理工大学, 云南 昆明 650051)

摘要: 参数化的装配式钢混组合结构建筑信息模型缺少结构信息描述, 无法实现装配式钢混组合结构图档的修正和自主更新, 对结构构件的损伤评估效果差, 抗震加固性能差。据此提出用于装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型, 模型框架包括建筑设计模型、结构设计模型、结构抗震加固设计和损伤评估; 通过结构构件的实体定义、属性定义和关联性定义, 全面描述柱、梁、板和墙等钢混组合结构构件的抗震加固性能信息; 采用模糊加固评估方法获取精准的结构构建综合损伤指数, 评估结构构件的加固等级, 提高抗震加固性能。经实验证明, 所设计模型得到的结构损伤指数与实际损伤指数的误差低于 0.03, 说明该模型分析装配式钢混组合结构抗震加固性能准确性较高。

关键词: 装配式; 钢混组合结构; 抗震加固; 建筑信息模型; 结构构件

中图分类号: TU201.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0539-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.539

A Fuzzy Comprehensive Evaluation Model for Seismic Behavior of Assembled Steel-Concrete Composite Structures

RONG Chao¹, CHEN Yong², ZHOU Yu¹

(1. Dianchi College of Yunnan University, Kunming 650011, Yunnan, China;

(2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: The current parameterized building information model of assembled steel-concrete composite structures lacks structural information and cannot realize the modification and self-renewal of the drawings of assembled steel-concrete composite structures. Therefore, both the damage assessment effect of structural members and the seismic reinforcement performance are poor. This paper presents a building information model for seismic reinforcement of assembled steel-concrete composite structures. The model framework included a building design model, a structural design model, a seismic reinforcement design of the building, and damage assessment. Through solid

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 教育部高教司 2018 年第一批有关企业支持的产学研协同育人项目(201801171009)

第一作者简介: 荣超(1979-), 男, 重庆人, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑施工与管理, 建筑信息化。E-mail: ya701j@163.com。

通信作者: 陈勇(1969-), 男, 云南昆明人, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 工程管理。

definition, attribute definition, and association definition of structural members, the seismic strengthening performance information regarding the steel-concrete composite structural members, i.e., columns, beams, slabs, and walls, was comprehensively described. The accurate comprehensive damage index of structural members was obtained to evaluate the reinforcement grade of the structural members by using a fuzzy reinforcement evaluation method. The experimental results showed that the error between the damage index obtained by the proposed model and the actual damage index was < 0.03 , which indicated that the accuracy of the model for seismic reinforcement of assembled steel-reinforced composite structures is relatively high.

Keywords: assembly type; steel-concrete composite structure; seismic strengthening; building information model; structural members

0 引言

装配式钢混组合结构作为我国建筑结构发展主要方向,具有节约钢材、提高混凝土利用系数、施工方便等优势^[1],但针对这一模型的抗震加固研究起步较晚,因此研究装配式钢混组合结构的抗震加固性能具有重要的现实意义^[2]。以往研究多采用节点试件,以参数化的形式对其进行反复地震荷载作用下的性能试验,并通过不同的相关软件模拟分析装配式钢混组合结构的抗震加固性能^[3]。该方法只能分析结构整体的抗震加固性能,无法分析结构中不同构件的抗震性能,分析结果准确性差^[4]。建筑信息模型是计算机复杂建筑设计领域的新手段,其由几何数据以及工程数据构成,可全方位分析和评估装配式钢混组合加固结构的抗震性能,是计算机辅助建筑设计的关键措施,具有重要的应用价值^[5]。

本文设计了一种用于装配式钢混组合加固结构的建筑信息模型,通过分析结构中不同构件,对其进行模糊损伤评估,利用损伤评估结果判断装配式钢混组合加固结构的抗震性能。

1 方法的提出

建筑信息模型是一种综合的建筑规划、施工以及控制措施,其将不同阶段的数据信息融合在一起,确保总体建筑生命周期中相关人员运用建筑信息模型,同理,这样就能够获取全面、准确且可靠得到装配式钢混组合结构加固构件的抗震性能信息^[6],为建筑结构抗震加固的分析、评估以及维修提供可靠地分析依据。

1.1 建筑信息模型架构设计

装配式钢混组合加固结构建筑信息模型的主要优势为:具有齐全的结构设计过程内所使用的信息内容,能够实现模型和图档的相关修正和自主更新,并完成相关软件间信息的相互转换。该模型架构如

图 1 所示。

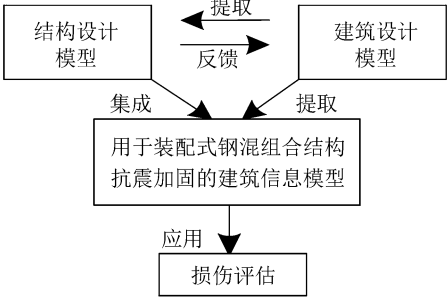


图 1 建筑信息模型架构

Fig.1 Framework of the building information model (BIM)

用于装配式钢混组合结构加固的建筑信息结构模型的设计流程如下:

- (1) 利用建筑设计软件,如 CAD 等构建建筑信息模型。
- (2) 导出建筑设计模型,获取 IFC (Industry Foundation Classes) 文件^[7],通过建筑信息模型提取同集成平台得到建筑设计模型内装配式钢混组合结构的构件信息,构建用于装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型。
- (3) 通过建筑设计模型能够获取结构设计模型内的几何模型,在实施结构抗震加固设计和分析的过程中,经由增加定义约束、荷载等信息将结构设计成果反映至建筑设计模型^[8],以实现模型修正。
- (4) 汇总结构抗震加固设计成果同经由建筑设计模型提取的用于装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型,构建齐全的用于装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型。
- (5) 根据此模型实施装配式钢混组合加固结构的抗震性能评估^[9]。

在装配式钢混组合结构抗震加固设计范畴内,已有的 IFC 标准能够完美地表达结构信息模型内的结构构件、构件属性和构件关联性等。

1.1.1 结构构件的实体描述

装配式钢混组合加固结构建筑信息模型中根本内容为结构构件,其余的模型信息均以结构构件为中心实施定义。在基于 IFC 的模型内,对建筑结构构件定义与内容的表述较为健全,能够全面地描述柱、梁、板和墙等装配式钢混组合结构构件。图 2 中描述的是基于 IFC 的模型内,以墙体构件为例的建筑结构构件的实体定义。

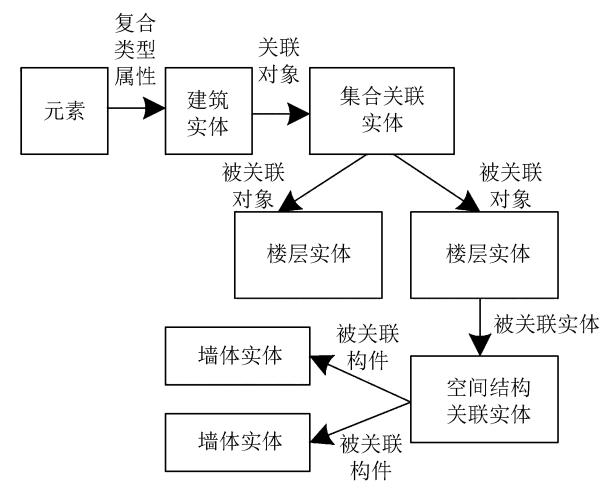


图 2 基于 IFC 的模型内墙体的实体

Fig.2 Entity definition of the wall in IFC-based model

在基于 IFC 装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型内,定义结构墙体模型的过程为:第一步定义装配式钢混组合结构实体;第二步基于汇总关联实体结果形成装配式钢混组合结构实体同楼层实体的关联;第三步对墙体实体定义,形成墙体石头与楼层实体间的关联时采用空间关联实体^[10],最终达到定义墙体模型的目的。

1.1.2 结构构件的属性选取

在装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型内结构构件存在许多例如几何、成本、材料和力学性能等工程属性^[11]。基于 IFC 的模型能够实现几何、材料等属性定义。

(1) 材料属性

在建筑信息模型内的结构设计中,材料属性是必须的物理属性,不仅能够定义单一的材料属性,还能够定义多层材料属性。获取材料属性定义和分层材料模型的依据分别是材料实体定义和材料分层实体、材料层集合实体与材料层集合使用实体,根据材料关联实体构建墙体和墙体材料之间的关联性。

(2) 钢筋属性

在装配式钢混组合结构中,配筋信息是较为关键的设计结果。在基于 IFC 的模型内存在较为完

善的钢筋形容体系,形容结构构件配筋信息的依据是钢筋构件实体机与其衍生出的各种不同钢筋实体。基于关联实体形成装配式钢混组合结构构件同配筋信息之间的关联性。

1.1.3 结构构件的关联性设计

建筑信息模型的核心特点之一为结构构件的关联性,其能够保障修正信息模型后信息的相同性与无缺性^[12]。将梁、柱构件作为例子进行说明,描述基于 IFC 模型内结构构件间的关联性设计。在基于 IFC 的模型内,经由构建关联实体形成梁实体和柱实体之间的关联性(图 3)。在调节梁实体的条件下,基于梁、柱共享节点的机制与构件关联实体,两个连接着梁实体的柱实体能够修正实体的信息,完成柱实体的关联修正。相反,在修正柱实体的过程中相连的梁实体同样会实现修正。

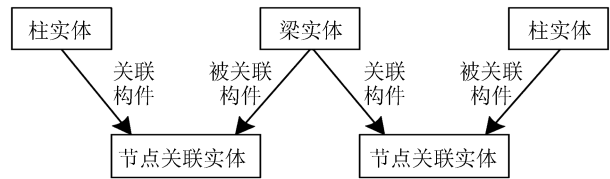


图 3 梁实体与柱实体间的关联性

Fig.3 Relevance between beam and column entities

1.2 加固结构构件的抗震性能模糊综合评估模型设计

采用模糊数学的评估方法,对装配式钢混组合加固结构的抗震易损性进行评估^[13]。

用 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 和 $N = c_1/m_1 + c_2/m_2 + \dots + c_n/m_n$ 分别描述结构构件节点关联实体的损伤和加固模糊子集,其中 m_i 和 c_i 分别表示节点关联实体的损伤与加固隶属度。将结构构件的损伤等级定为五级,描述为: $M = \{\text{大致完整, 轻度受损, 中度受损, 重度受损, 塌陷}\}$ 。用 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 表示结构构件加固向量,若构建因素论域 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 的损伤评估因子为 n 个,描述为全局损伤指数、最大层间位移角、滞回能耗反复次数和楼层能量聚合系数^[14]。评定受损等级受不同因素域 $r_i (i = 1, \dots, m)$ 影响程度的量度时采用因素模糊向量 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$, A 内不同元素相加最后得到的和为 1。确定加固向量 C 的依据是论域 R 与 M 之间的模糊关系。

用 $k_i = [k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{im}]$ 表示不同评定因素 r_i 同 M 间的模糊关系向量,其确定的依据为 r_i 对不同结构构件损伤等级 m_i 的隶属度, k_i 表示单因素 r_i 评定 M 得到的结论, $K_{ij} = \mu_{vj}(r_i)$ 。汇

总不同因素 $r_i(i=1,2,3)$ 对 M 的模糊向量能够得到模糊关系矩阵:

$$K=\begin{Bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_m \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & \cdots & k_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

归纳单因素的评定结论,能够得到总的综合损伤指数 $G,G=A \cdot K$,即:

$$[g_1,g_2,\cdots,g_n]=[a_1,a_2,\cdots,a_m]\cdot\begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & \cdots & k_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 实验分析

由于无法准确预测地震,不同的地震产生的地震波不同,且建筑物对不同地震波的响应也不同。为验证本文提出的建筑抗震加固分析方法性能,分别以两个不同的装配式钢混组合结构作为实验对象,对实验对象附加 2 条有所差异的地震波,以减小地震波差异性对建筑结构抗震设计的影响。其中地震波 1 的峰值加速度为 $0.1g\sim0.9g$,地震波 2 的峰值加速度为 $0.2g\sim1.8g$ 。

采用本文模型获取不同实验对象在不同地震波下的定点位移与滞回耗能等性能信息,如表 1~表 2 所示。

表 1 地震波 1 下实验对象的信息分析结果
Table 1 Information analysis results of experimental objects under seismic wave 1

实验对象	峰值 加速度/ g	顶点位移 /mm	滞回能耗 /($N \cdot m^{-1}$)
1	0.1	17	165
	0.2	40	918
	0.3	63	1 880
	0.4	84	4 201
	0.5	103	7 447
	0.6	135	12 545
	0.7	170	18 616
	0.8	214	26 730
	0.9	241	35 835
2	0.1	13	68
	0.2	29	801
	0.3	40	2 115
	0.4	69	5 209
	0.5	101	13 226
	0.6	162	19 882
	0.7	185	28 786
	0.8	211	35 671
	0.9	220	44 052

表 2 地震波 2 下实验对象的信息分析结果
Table 2 Information analysis results of experimental objects under seismic wave 2

实验对象	峰值 加速度/ g	顶点位移 /mm	滞回能耗 /($N \cdot m^{-1}$)
1	0.4	83	3 603
	0.6	135	9 472
	0.8	182	19 626
	1.0	238	32 422
	1.2	302	58 705
	1.4	355	97 860
	1.6	426	141 088
	1.8	447	188 927
2	0.2	40	476
	0.4	78	1 740
	0.6	141	6 551
	0.8	197	16 444
	1.0	246	32 219
	1.2	302	54 408
	1.4	364	84 822
	1.6	470	134 220
	1.8	636	204 564

依据表 1~表 2 内的性能信息,根据 1.2 节中的综合损伤指数,判断建筑结构的损伤指标。采用本文信息模型获取实验装配式钢混组合结构整体损伤评估结果,用图 4 描述。

分析图 4 能够得到,本文模型得到的损伤指数与实际情况之间的差距较小,最大误差约为 0.03,说明本文模型可以准确地评估装配式钢混组合结构。图中实验对象 1 和实验对象 2 在 2 条地震波作用下的损伤指标均随着峰值加速度的提升而有所提升,无论实验对象的改变或是地震波的改变,本文评估方法都可以得到与实际情况几近相同的地震波作用下建筑综合损伤指标,提高建筑结构的抗震性能提供基础依据。

3 结论

装配式钢混组合结构能够反映我国桥梁建设的最高水平,其抗震加固性能的研究是桥梁建设领域内的重中之重。而建筑信息模型中不仅包含建筑设计信息,同时还能够评估建筑的各种性能,因此被广泛地应用在建筑领域内。本文设计用于装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型,该模型由建筑设计模型、结构设计模型、结构抗震加固设计和损伤评估四部分组成。分别从实体、属性和关联性定义模型内的结构构件;采用模糊损伤评估方法评估用于装配式钢混组合结构抗震加固的建筑信息模型中

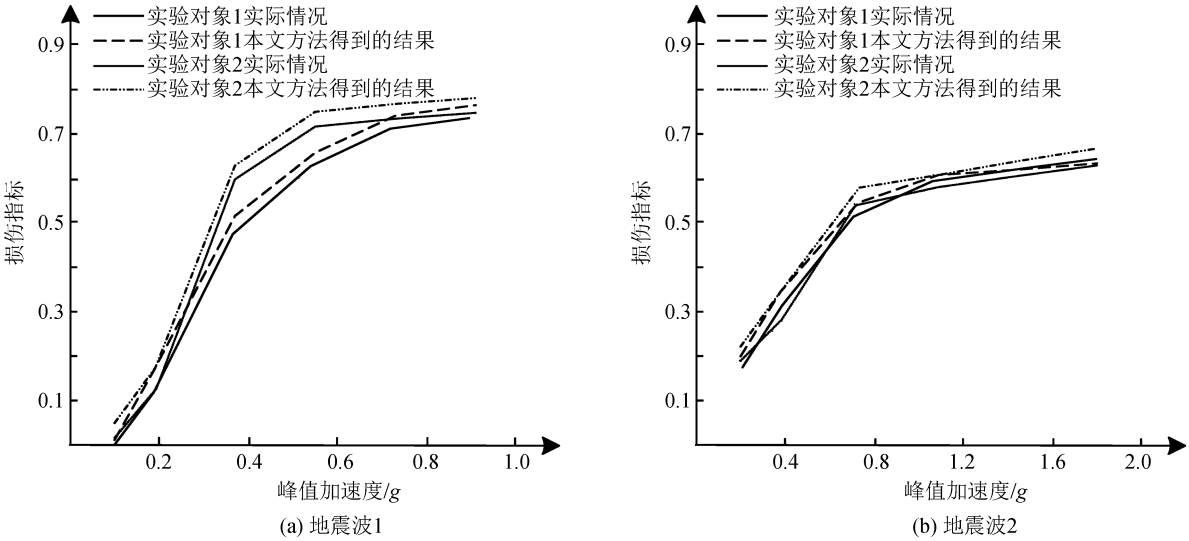


图 4 结构损伤评估结果对比

Fig.4 Comparison between structural damage assessment results

结构构件的损伤等级,实现结构抗震性能的有效分析。经实验证明本文模型得到的结构损伤指数与实际情况之间的差距较小,最大误差约为0.03,说明本文模型能够准确评估装配式钢混组合结构的损伤程度,准确分析其抗震加固性能。

鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的技术环节恕在这里不能做更多描述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。作者水平有限,文中遗漏之处及错误难免,望阅者给予批评指正。

参考文献(References)

[1] 高燕梅,刘东,周志祥.装配式钢桁-混凝土组合连续刚构桥的预制桥道板安装过程有限元模拟方法[J].科学技术与工程,2017,17(20):91-97.
GAO Yanmei, LIU Dong, ZHOU Zhixiang. A Finite Element Analysis Method for the Precast Slabs' Assemblage in a Prefabricated Steel-concrete Composite Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 91-97.

[2] 马怀发,张坤,王立涛.混凝土坝抗震安全评价指标和方法研究[J].水利水电技术,2017,48(5):110-119.
MA Huaifa, ZHANG Kun, WANG Litao. A Preliminary Study on Performance-based Seismic Safety Evaluation Index of Concrete Dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 110-119.

[3] LIU X, YANG Z, WANG H, et al. Seismic Performance of Beam-column Connection in Bolted Assembled Multi-high-rise Steel Structure[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6):34-42.

[4] 周学军,王振,张慧武,等.装配式梁柱铰接钢框架-屈曲约束钢板剪力墙体系抗震性能有限元分析[J].钢结构,2016,31(10):20-24.
ZHOU Xuejun, WANG Zhen, ZHANG Huiwu, et al. Fem Analysis of the Seismic Performance of Fabricated Steel Frame-Buckling-restrained Steel Plate Shear Wall System with Pinned Beam-column Connections [J]. Steel Construction, 2016, 31(10):20-24.

[5] 吴从晓,张玉凤,张超,等.装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究[J].工程抗震与加固改造,2015,37(1):83-90.
WU Congxiao, ZHANG Yufeng, ZHANG Chao, et al. Study on Seismic Performance of Prefabricated Concrete Beam-column Joint[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(1):83-90.

[6] 刘占省,张禹,郑媛元,等.装配式风电塔架钢混连接段力学及可靠性研究[J].建筑技术,2017,48(11):1135-1138.
LIU Zhansheng, ZHANG Yu, ZHENG Yuanyuan, et al. Mechanical Behaviors and Reliability Analysis of Connection of Fabricated Wind Turbine Tower[J]. Architecture Technology, 2017, 48(11):1135-1138.

[7] 徐照,徐夏炎,李启明,等.基于 WebGL 与 IFC 的建筑信息模型可视化分析方法[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(2):444-449.
XU Zhao, XU Xiayan, LI Qiming, et al. Combining WebGL and IFC to Create 3 D Visualization for Building Information Models[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(2):444-449.

[8] 张晨,周宇凌,蔡小宁,等.后张无粘结混合装配式框架节点抗震性能试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(5):1063-1069.
ZHANG Chen, ZHOU Yuling, CAI Xiaoning, et al. Experiment-

tal Study on Seismic Behaviors of Unbonded Post-tensioned Hybrid Precast Concrete Frame Joints[J].Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2016,46(5):1063-1069.

[9] 张颢,李昌华,李智杰.基于拓扑特征的建筑信息模型检索方法[J].计算机应用研究,2016,33(3):916-921.

ZHANG Jie, LI Changhua, LI Zhijie. Building Information Model Retrieval Based on Topological Features[J].Application Research of Computers,2016,33(3):916-921.

[10] LIU C, CAO W, DONG H, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Semi-assembled Recycled Concrete Shear Wall with Single Row of Steel Bars under Low Axial Compression Ratio[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6):23-33.

[11] 张海燕.建筑结构一体化协同设计中的建筑信息模型运用探讨[J].建筑技术,2017,48(8):876-878.

ZHANG Haiyan. Building Information Model in Collaborative Design of Building Structure[J]. Architecture Technology, 2017, 48(8):876-878.

[12] 胡荣,张喜铭,李金,等.变电站 IEC61850 第 2 版信息及服务模式探讨[J].电力工程技术,2017,36(6):38-45.

HU Rong, ZHANG Ximing, LI Jin, et al. The Discussion on Information Model and Service Model of IEC 61850 Edition 2 Used in Smart Substation[J].Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(6):38-45.

[13] 刘超,赵天怡,张吉礼,等.基于建筑信息模型的建筑热工系统与暖通空调系统设计应用分析[J].暖通空调,2016,46(3):27-32.

LIU Chao, ZHAO Tianyi, ZHANG Jili, et al. Application of Building Information Model to Building Thermodynamic System and HVAC System Design[J].Heating Ventilating & Air Conditioning, 2016, 46(3):27-32.

[14] 郑顺义,魏海涛,赵丽科,等.基于建筑信息模型的房建施工木模板计算及管理方法[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(1):17-26.

ZHENG Shunyi, WEI Haitao, ZHAO Like, et al. BIM-based Method for Calculating and Managing Wooden Template Required for Housing Construction[J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(1):17-26.