

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230308001

基于GIS数据与地域性特征的城乡建筑群信息 智能获取与抗震性能评估方法研究*

崔书豪, 董志骞, 李 钢, 余丁浩

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 我国城乡区域建筑群分布广、体量大, 强震作用下结构破坏和倒塌风险高, 既有的研究方法无法兼顾县区级别大范围建筑信息获取速度与地震模拟精度。为实现快速准确的城乡建筑群抗震性能评估, 提出了结合区域建筑地域性特征与GIS数据的建筑信息智能获取与抗震能力评估方法。通过GIS数据和高分卫星等遥感手段获取县区范围建筑群的屋盖信息、建筑外部尺寸等信息。基于上述信息和具体区域城乡人均GDP、建造风俗等实际特点, 建立了基于模糊理论和专家系统的模糊推断模型, 确定了建筑结构类型、材料属性、开洞情况等内部信息, 并通过数值模拟实现区域建筑群的震害分析。将该方法应用于我国西南地区某县城建筑群的参数获取与震害分析, 同时以鲁甸地震某村镇验证了本方法的适用性, 结果表明本方法对城乡建筑群的抗震性能评估具有较好的适用性。

关键词: GIS; 建筑信息获取; 地域性特征; 抗震性能评估

中图分类号: TU364 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0946-10

Research on Intelligent Information Acquisition and Seismic Performance Evaluation Method of Urban and Rural Buildings Based on GIS Data and Structural Regional Characteristics

CUI Shuhao, DONG Zhiqian, LI Gang, YU Dinghao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: China's vast urban and rural building clusters face a significant risk of structural damage and collapse when subjected to strong earthquake forces. Current research methods fall short in simultaneously meeting the demands of obtaining comprehensive building information at the county level and accurately simulating seismic events. To achieve rapid and accurate seismic performance assessment of urban and rural building clusters, a method combining regional architectural characteristics and GIS data for intelligent acquisition of building information and seismic capacity assessment was proposed. Roof information and external dimensions of building clusters in counties and districts were obtained through remote sensing methods such as GIS data and high-resolution satellites. Leveraging the above information and the actual characteristics of regional urban and rural per capita GDP, geographical location, and construction customs, a fuzzy inference model based on fuzzy theory and ex-

* 收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52225804)、中央高校基本科研业务费(DUT22RC3038)资助

作者简介: 崔书豪(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事建筑信息获取与抗震研究。E-mail: cuishuhaojg@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 李钢(1979—), 男, 教授, 博士。主要从事工程结构抗震评估等研究。E-mail: gli@dlut.edu.cn

pert system was established to determine the internal information such as building structure type, material properties, and opening conditions, and numerical simulation is used to realize seismic damage analysis of regional building clusters. This method was applied to acquire parameter and seismic damage analysis of building clusters in a county town in Southwestern China. The actual seismic damage situation in the partially affected areas of the Ludian earthquake was used to verify the applicability of this method. Results demonstrate that this method exhibits strong applicability in the seismic performance assessment of both urban and rural building clusters.

Keywords: GIS; acquisition of building information; regional architectural characteristics; seismic performance evaluation of buildings

0 引言

我国是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一,近年来地震灾害频发,2008年汶川地震^[1]、2010年玉树地震^[2]、2022年芦山地震等^[3]均造成了巨大的人员伤亡和财产损失。因此,对可能发生地震灾害的区域事先进行震害模拟,评估区域内建筑物抗震性能,对有较大地震风险的建筑结构进行抗震加固,是提升危险区地震应急准备水平、减少地震灾害损失的重要措施,具有重要科学意义和实用价值^[4]。

建筑信息的获取是进行地震模拟与抗震性能评估的前提和基础。目前,建筑信息获取方式主要有人工入户信息采集、无人机信息采集、卫星遥感影像信息采集等。人工现场实测的方法需通过技术人员实地测量与调研,是目前应用最普遍的信息采集方式,可详细、准确地获取目标区域建筑的信息及基本数据,而对于较大范围内的多个建筑群,该方法需要消耗大量的人力和时间,效率较低,存在不可操作性。

无人机技术已经广泛地应用到建筑及基础设施建设的全生命周期中,如勘探、规划、建造、维护、监测以及防灾减灾等。Z.Zhou等^[5]提出一种服务于工程管理的多维无人机系统框架;刘军等^[6]基于无人机技术建立了边坡体系的三维模型,为边坡稳定性的评估提供了理论依据。同时无人机的低空飞行功能弥补了传统测量手段的不足。李钢等^[7]通过无人机航拍结合手持地面拍摄的手段,获取内蒙省某村落建筑信息,并完成了村镇砌体结构建筑的地震模拟;熊琛^[8]提出基于无人机和卷积神经网络的建筑物地震损伤自动评估方法,实现了建筑物震害的快速评估,有助于改善地震易发地区的应急反应

和及时救援。利用无人机技术采集信息较人工采集的方式可以更加快速、经济的获取建筑信息,但仍然需要专业技术人员到达现场操作无人机,并且受到天气因素、航空管制、本身续航能力等问题限制,目前利用无人机获取全省、市级别的大范围建筑信息仍存在困难。

遥感影像技术在实现建筑震害调查等方面显示出极大的潜力和优势,具有覆盖面广、时效性强、辨识度高等特点,可以很好服务于大范围区域建筑群的外观信息获取,赵杰等^[9]利用高分辨率地图获取建筑外观信息后,依据建筑物层数和房屋用途大体估计建筑物抗震能力;张朝阳^[10]利用遥感影像和经验估计的方式,提出了以深度学习算法为基础的卷积神经网络房屋遥感信息自动化提取方法,完成湖北省1 060万余栋建筑的抗震能力等级判别。仅通过高分卫星影像中建筑阴影尺寸比例判别建筑高度的精确性还存在争议,而利用GIS实现区域建筑高度、占地面积以及位置坐标自动获取的研究已经相对完善。马成忠^[11]通过构建基于GIS的地震预评估决策系统,评估震后损伤程度,辅助决策制定抗震救灾方案。

上述通过高分卫星影像和GIS数据等遥感手段可以实现卫星覆盖范围内全域建筑外部尺寸和影像信息的快速获取。但是难以直接提取建筑内部墙柱尺寸、建筑材料属性等隐蔽信息,需要在遥感技术的基础上补充建筑信息获取手段。城市建筑结构有完备的信息资料档案,可供查阅和调用,林旭川等^[12, 13]针对于城市建筑群通过GIS数据结合CAD数据库,在高性能计算机的帮助下完成地震响应计算,同时实现了损伤分布分析、避难场所需求分析等。而城乡结合部及村镇地区存在建筑资料不完备,居民不按规范自筹、自建房屋等问题,给建筑信息的获取带来困难。规模较小的城乡地区建

筑群具有鲜明的地域性特点,在同一市、县范围内的建筑风格呈现显著的统一性,建筑物内部的隐蔽信息具有规律性。田得元^[14]整理分析了大量我国村镇房屋建筑资料,划分村镇房屋地理区域特点,总结各类结构破坏特点及成因,给出提升房屋抗震能力的措施和建议。各地区建筑群之间在结构形式、建筑材料、施工工艺上存在的差异受到地理位置、风俗习惯、经济发达程度等多种条件影响,并进一步导致抗震性能的差别。考虑建筑群的地域性特征,在有限调研的基础上通过模糊推断等^[15-17]手段获得建筑群的隐蔽信息较为合理可行,具有一定的研究价值。

针对现有研究成果和面临的实际问题,提出基于遥感手段结合建筑群地域性特征的区域建筑抗震能力评估方法,通过GIS数据快速获取建筑外部尺寸、地理位置、楼盖影像等外观信息,利用目标区域实际建筑特点,基于模糊推理方法推断^[18]补充遥感手段无法获取的数据参数,以解决震害模拟过程中由于相关参数获取不智能、不全面导致模拟速度慢、精度低等问题,建立高精度智能化的区域建筑群抗震能力评估方法,为城乡区域建筑群抗震能力评估提供参考。

1 基于GIS与高分卫星的建筑群信息获取

建筑物相关参数信息是建立力学分析模型的前提和基础。目前遥感技术已经在土木工程领域广泛应用,高分辨率卫星影像能够清晰地反应建筑楼面特征^[19],同时高精度的GIS数据能够满足建筑物外部尺寸信息提取的所需。通过遥感手段满足大范围复杂建筑群的信息获取需求是一种行之有效的方法^[20]。通过GIS数据与高分卫星数据获取大范围城乡建筑群的屋面影像及建筑尺寸等物理信息,为结构抗震性能分析提供基础数据。

1.1 建筑影像信息获取

遥感信息提取主要依据是对象的特征信息,包含光谱、形状、纹理等多种特征。

以Google Earth遥感影像作为主要数据来源,在宽幅成像模式下,卫星星下点分辨率优于16 m,成像范围大于800 km,一次成像可以覆盖6.4万平方公里的区域面积,能够实现大范围建筑影像信息

获取;高分卫星组包含地球同步卫星,能够对特定地区进行分钟级别甚至秒级的观测,实时反映地面建筑物楼面特征,保证了信息获取的实效性。

利用卫星地图开源平台截取建筑物楼面影像。获取信息主要包含有:(1)屋面特征:坡屋顶或平屋顶;是否设置有女儿墙;彩钢屋顶、混凝土屋顶或砖瓦屋顶;屋顶完好程度等。(2)建筑基本用途判定:通过建筑屋面信息和相对位置等判定建筑物基本用途,如一般民用住宅、公共建筑如政府机关大楼、大型商场、学校、工厂、临时性建筑等。(3)建筑相对位置判定:临街建筑、统一规划的密集建筑群、商圈建筑群等。

1.2 建筑尺寸信息获取

地理信息系统即GIS是对整个或部分地球表层空间中的有关地理分布数据进行采集、储存、管理、运算、分析、显示和描述的技术系统。目前我国GIS数据丰富,覆盖面广,获取成本低,可以有效地服务于建筑外部尺寸信息的获取。

通过开源平台获取数个城市、乡村GIS数据,其中包括地标建筑物、道路、空地等高度的地面高程模型,并可进一步通过建筑物轮廓等提取建筑物占地面积、长度宽度等信息。本文利用GIS可视化表达和空间分析查询等功能,在ArcMap平台调用可编辑的包含建筑外观信息的GIS数据,经过甄别剔除多余数据后提取建筑外部尺寸信息,处理后的数据可以实现一次性导出获取整个县城区域内全部建筑的编号、长度、宽度、高程等外部信息。

利用GIS获取建筑信息,实现大范围建筑信息批量提取,与人工入户及无人机等信息获取手段相比,不需要工作人员实地踏勘或设备辅助测量,在信息获取范围和效率上都有一定提升。

2 城乡建筑地域性特征研究

为详细获取建筑内部信息,本文引入地域性建筑特点作为信息获取依据。预先在震害评估区域内选取典型建筑群,通过人工调研和资料查询等手段获取该范围内建筑群共有的地域性特征范围,以此为基础按照具体城乡实际情况推断建筑物内部隐蔽信息,用以补充遥感手段难以获得的隐蔽信息(材料信息、构造信息、墙体配筋情况),提高地震模拟精度。

2.1 区域建筑地域性特征获取

我国幅员辽阔、民族众多,气候条件、生活习惯千差万别,多元化的文化和地理气候条件形成了丰富多彩的房屋建筑形式^[21]。独具民族和地理特色的建筑结构被广泛使用,如北方黄土高原地区创造性地利用有利地形建造的窑洞建筑、云贵地区的吊脚楼、藏区具有藏族特色的石结构房屋等。

中小型城市以及城乡地区建筑的结构形式和建筑风格特点常表现出明显的区域性,同时各地城乡在一定范围内的建筑群之间的地域性特征具有一致性,同一市县区域内的民居建筑形式基本相同,格调基本一致。

预先选取具有典型代表性的建筑群作为地域性特征采集点,通过人工实地调查和网络资料查询等方式,统计该地区建筑风俗习俗、材料属性、结构类型占比等信息,并整理以上数据信息与建造年代、人均可支配收入、抗震设防意识变化等的模糊函数关系,用以推导建筑内部隐蔽信息参数。本文调研我国多个城乡建筑群,包括东北地区的黑龙江省双鸭山市下辖县镇、辽宁省大连市周边乡镇、西南地区阿坝自治州数个县市等,获取并统计整理不同地区建筑群的地域性特征,得到一套区域建筑地域性特征获取流程,并应用于实际城乡地区的建筑抗震能力评估中。以我国西南地区城乡建筑群为例介绍:

选取四川省阿坝自治州具有典型地域性特征的某城乡作为信息采集点。通过实地调研结合资料查询作为调研手段,利用无人机技术航拍获取目标建筑点云数据,通过三维重现技术和图像测量技术结合三维模型获取建筑长宽、层高等外观信息;结合实地走访调查和查阅相关资料,结合模糊推断确定建筑材料强度、是否有构造措施等隐蔽信息;甄别和统计村镇建筑结构类型。

针对西南地区某镇的建筑地域性特征普查统计结果有如下结论:该建筑群中底框结构占比34.6%,砌体结构占比49.2%,框架结构占比15.4%,其余少量砖木结构占比约1%。建筑隐蔽信息统计结果显示:该建筑群绝大多数该建筑为08年震后重建。对于框架结构,混凝土标号一般为C30,钢筋标号HRB335,柱距小于6 m,柱尺寸为500*500 mm,层高3~3.3 m,此类建筑结构一般为成片住宅群或公用建筑;对于砌体结构外墙厚370 mm,

墙高2.8~3.2 m,内部开间即隔墙间距为3~5 m,纵横墙门窗开洞尺寸为1.8~2.0 m,设有圈梁构造柱等抗震构造措施,砂浆强度为 $\text{Mu}0.9\text{-Mu}1.0$,砌块强度多为 $\text{Mu}6\text{-Mu}7$ 。

2.2 建筑隐蔽信息获取

虽然城乡建筑之间的共有特点有一定随机性,但普遍遵循当地的风俗习惯和传统建造规律。在确定区域建筑地域性特征后,隐蔽信息参数主要有以下几方面确定:

人均可支配收入与建筑年代。对于中小型城市,特别是发达程度较低的地区,人均可支配收入是衡量建筑材料、建筑构造措施的重要条件。在政府门户网站中获得各地详细的人均收入水平数据,可将月收入水平从0~10 k划分为低、中下、中、中上、高五个等级;随建造工艺和科技的进步,建筑工程质量不断提高,同时年代久远的建筑老化也会对结构强度产生影响。依据人均可支配收入结合建筑物大致建造年代可以建立模糊推断函数,估算推导出建筑物材料属性,特别是砂浆砌块、混凝土强度等级等信息。

地理位置与气候条件。墙体作为村镇砌体结构的主要承重构件,同时也起到抗寒保温,提高居住舒适性的作用。地理位置与气候环境是决定建筑墙体属性的重要因素,尹之潜等^[22]在《地震损失分析与设防标准》中将我国按经度划分为三类地区:一类为北纬43度以北地区,该地区气候寒冷,冬季漫长,外墙厚度一般为490 mm;二类是为位于北纬35~43度之间的地区,外墙厚度一般为370 mm;三类为北纬35度以南地区,气候温暖,冬季短暂,外墙厚度一般为240 mm。另外如云贵地区降雨丰盈,气候潮湿,相比御寒属性其建筑的防潮通风更为重要。

建筑风俗和抗震意识。我国有广袤的土地和人口,孕育了风俗各异的生活习惯和房屋建造习惯,如东北地区气候寒冷而地震发生率较低,城乡民居以砖混结构、砌体结构为主并有少数土木结构或框架结构建筑,地震发生概率低,民居大多不设置圈梁构造柱等抗震构造措施,建筑整体抗震能力相对较低;西南地区多山区丘陵地震发生频发,特别是2008年汶川地震后,居民抗震意识显著提高,建筑结构以砖混结构特别是底框结构、框架结构等抗震能力较好的结构形式为主,少数有砖石结构或土木结构建筑。

3 建筑结构类型判别与时程分析

在时程分析计算中,首先应确定建筑的结构类型,并根据不同结构类型调用相应骨架曲线进行力学参数计算。在评估建筑物损伤程度时,特别是在地震或强风等极端条件下,层间位移角的大小可以提供重要的参考信息,本文以层间位移角作为结构损伤程度判定标准。

3.1 建筑结构类型判别

此类研究^[23]对建筑类型的判断一般基于主观判断,一些学者提出将结构类型与建筑外观信息进

行关联,通过建筑外立面^[7]或屋面信息判断建筑大致用途和结构形式^[24]。

本文基于高分卫星影像中提取的建筑屋面信息作为建筑结构类型判别主要依据,通过建筑屋面影像中屋面是否设有女儿墙或其他屋面结构;彩钢屋顶或混凝土屋顶;屋面是否存在破损;相对位置等条件作为主要判断依据。并结合该地区建筑地域性特征,如算例城乡中临街建筑以底框结构建筑居多、石木等类型结构占比极少等;GIS数据中的建筑尺寸如低矮单层结构一般为砌体结构、大面积建筑或高层建筑结构类型一般为框架结构等,推断建筑物结构类型。

本文整理总结了适用于我国西南地区阿坝自治州常见建筑结构类型的划分依据,见表1。

表1 建筑结构类型分类依据汇总

Table 1 Summary for types of structural classification basis

结构类型	划分依据
土木、石木结构	该结构房屋屋顶多铺有不规则褐色或灰色瓦片,一般为单层建筑,这类建筑物占地面积一般小。
砌体结构	该类型房屋屋顶在形态上多呈现尖顶形状,并铺有暗红色或褐色瓦片,瓦片整齐纹理平整无条纹,建筑层数一般为1-2层,这类建筑物建筑面积较小。
砖混(底框)结构	该类房屋多为灰色平顶屋盖或彩钢屋盖,部分有女儿墙,临街建筑由于商业用途以该类结构为主,层数多为2-5层,建筑物占地面积中等。
RC框架结构	该类结构多为混凝土屋盖或彩钢屋盖,有明显的防水措施,一般设有女儿墙,学校、医院、图书馆等特种建筑多为此类结构,民用建筑中层数多为6层及以上,占地面积较大。

3.2 时程分析

建筑结构的恢复力模型及其参数是结构弹塑性反应、损伤和倒塌分析的基础,恢复力模型由其骨架曲线和滞回规则共同确定。针对于不同建筑结构类型,分别依据欧进萍等^[25]、L.Yu等^[26]、杨昀等^[27]提出的骨架曲线。部分结构类型的骨架曲线如图1、2所示,其中, K_s 为强化刚度, K_c 为软化刚度, K_e 为弹性刚度, F_p 为峰值抗剪强度, F_c 为屈服抗剪强度。

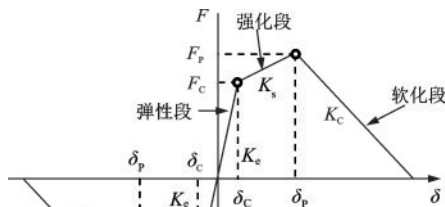


图1 结构骨架曲线

Fig.1 Schematic diagram of skeleton curve for frame structure

在模型建立中将建筑物等效为剪切层模型,如图2所示,结构的运动方程可以表示为:

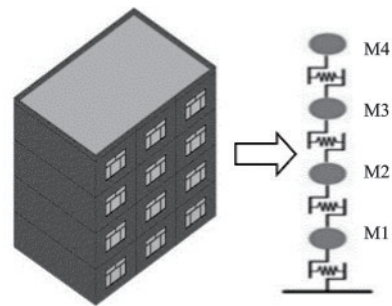


图2 等效剪切层模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of equivalent shear layer model

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F(X) = -M\ddot{X}_g(t) \quad (1)$$

采用改进 Ibarra-Medina-Krawinkler 模型进行地震模拟^[28]。针对于建筑数量大,结构种类繁多的问题,通过计算程序相互调用一次性建立区域内所有独立建筑的单体力学模型,同步完成区域内全部建筑的建模、计算、分析工作。输出层间转角、底部剪力、建筑周期等,以结构周期作为模型建立合理

性的初步检验,以层间转角作为建筑损伤指标。城乡建筑分布广、范围大,在遭受地震灾害时,作用于不同建筑的地震动会因其所处位置或场地条件的不同而产生较大的差异。计算程序批量模拟不同建筑类型、不同层数的区域建筑在不同地震动、不同地震强度下的地震响应,本研究流程相较于常规的逐层逐栋建模过程大大降低了人工成本,提升了计算效率。

既有研究^[29]对上述结构恢复力模型以及其参数标定方法进行了验证,结果表明,该方法能够考虑到影响结构抗震性能及整体性的随机因素,并且具有适中的简化度和较高的准确性。

4 区域建筑抗震性能评估方法

综合上述的高分辨率卫星、GIS技术在建筑信息获取中的应用和建筑内部隐蔽信息的推断方法。本文提出的基于遥感数据与地域性特征的城乡建筑群信息智能获取与抗震性能评估方法,具体流程如图3所示,主要包括:

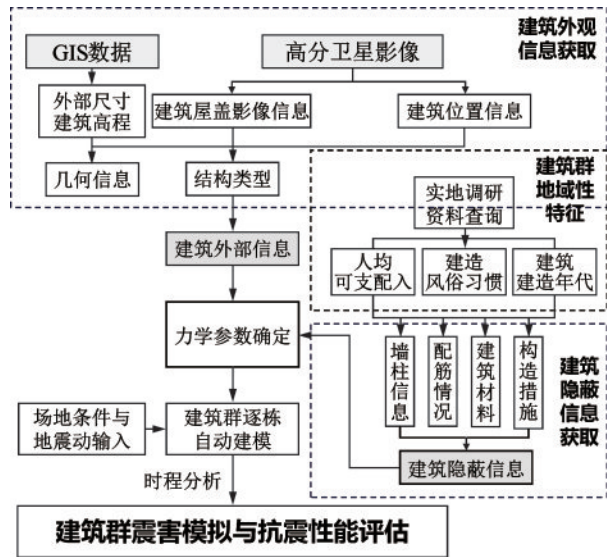


图3 研究方法流程

Fig.3 Flowchart of research methodology

(1) 建筑外部信息获取,通过遥感手段特别是利用GIS和高分卫星分别提取建筑物外部尺寸信息和影像信息。(2) 建筑地域性特征,选取目标辖区内具有典型代表性的建筑群作为该地区建筑地域性特征采集点,通过调研或整理既有研究成果,确定该地区建筑风俗习惯、经济水平、建材偏好等,进一步以该范围内建筑地域性特征和变化规律,作为

建筑群隐蔽信息推断的基础。(3) 力学参数确定与时程分析,利用GIS提取建筑外部尺寸信息,通过高分卫星影像信息和地域性特征判别建筑结构类型,地域性特征结合具体城乡GDP、建筑物建造年代等因素确定建筑内部墙柱布置、建筑材料、构造措施等隐蔽信息。在获取上述各项数据信息后,对区域内建筑群进行逐一建模,并开展地震反应分析,以最大层间位移角作为建筑物破坏状态控制目标,评估建筑物抗震性能。

5 案例分析

为验证本方法可行性与适用性,将本文提出的基于遥感数据和区域建筑地域性特征的建筑抗震性能评估方法,应用于我国西南地区阿坝自治州周边数个城乡建筑群,共计一千五百余栋建筑的抗震性能评估当中,并以其中一个县城建筑群进行成果展示。同时以鲁甸地震部分受灾区建筑为算例验证本方法的适用性。

5.1 基于遥感手段获取建筑外部信息

通过ArcMap软件平台处理建筑群GIS数据并提取建筑尺寸信息,一次性提取了算例中县城每栋建筑的高程、面积、长宽尺寸、编号、坐标等数据,同时利用高分卫星获取建筑物楼盖影像信息,本文以Google Earth的开源遥感影像作为主要数据来源,分割提取包含建筑物的位置分布、形态、屋面状态等的外观信息,并与GIS数据匹配判断建筑结构类型。

以图4所示高分卫星影像中标注的248号建筑为例,从GIS数据中提取获得建筑物长度为9.78 m,宽度为6.33 m,高度为6.2 m,占地面积61.91 m²。利用高分卫星获取的影像信息可以得到,该建筑物为灰色平顶屋盖占地面积较小,位置信息为临街建筑,利用上述信息分别确定建筑结构类型、隐蔽信息等。

5.2 结合地域性特征获取建筑隐蔽信息

通过人工调研和资料查询等方式对具有当地典型特点的建筑群展开地域性特征信息获取工作,整理总结该区域建筑的地域性特点与变化规律,本地区建筑群共有的地域性特征如2.1节所示。相关资料显示该县位于8度抗震设防区,设计地震分组

第一组,建筑场地属二类场地,地图坐标位于北纬31°与东经103°附近,建造时间为2008年震后重建。

由建筑结构类型判别标准从建筑物屋面特征、功能和相对位置、高度和占地面积等因素,可以判断该县城500余栋建筑中,258栋建筑为框架结构,183栋为砖混结构,72栋为砌体结构,另外还有极少数土木结构。通过结合地区建筑地域性特征与该县城实际情况,特别是人均可支配收入、建筑建造时间、建造风格和抗震意识等因素,建立模糊推断函数关系并判断建筑材料强度等属性。

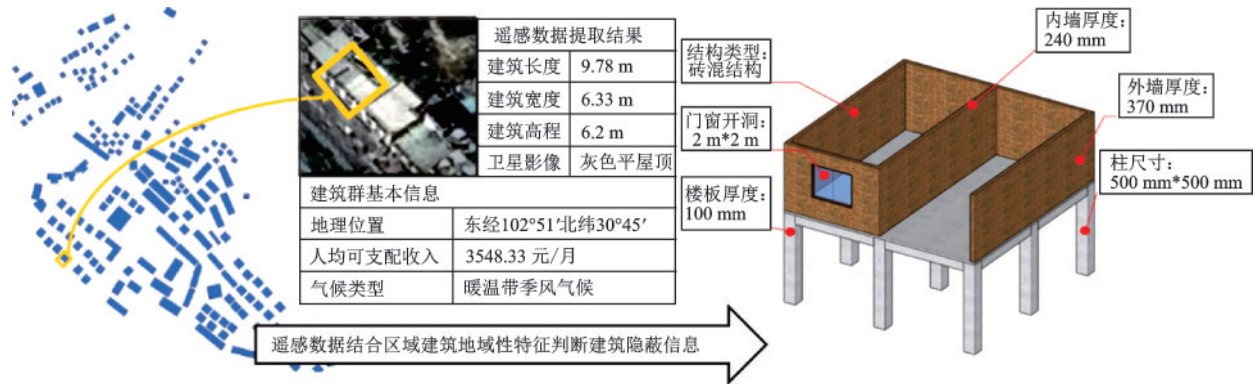


图4 建筑隐蔽信息获取示例

Fig.4 Schematic diagram for obtaining concealed information in buildings

5.3 建筑群抗震性能评估

以上文中获取的建筑信息和场地条件信息为基础,通过第三章中的地震响应计算分析方法,逐一建立区域内所有建筑的力学模型,调用不同滞回规则和骨架曲线计算相关参数^[30],采用改进Ibarra-Medina-Krawinkler劣化模型进行地震模拟,在8度罕遇地震(PGA 为 $0.4g$)条件下,FEMA的44条远场地震动作为地震动输入,计算结果输出各层间位移角、底部剪力、建筑周期等,同一建筑在不同地震动下地震响应不同,取层间位移角和底部剪力最大值作为该建筑地震响应输出值。以相关规范和文献^[31, 32]中给出的最大层间位移角限值,作为建筑物破坏标状态控制目标,见表2。

通过循环建模和命令流实现计算程序相互调用,逐一计算所有建筑的地震响应,一次性完成建筑群全部建筑的建模和计算工作。

在8度罕遇地震下,县域内建筑的抗震性能见图5~图6。仅有3%的建筑处于完好状态,23%的建筑处于轻微破坏状态,53%的建筑处于中等程度破坏状态,18%的建筑处于严重破坏状态,3%的建

如图4所示,建筑大致落成于2010年,由建筑地域性特征和影像信息判断该建筑结构类型为底框结构,底层框架部分层高约为4.0 m,平均层砌体结构层高3.3 m;底层框架部分,柱距为4.5 m,柱尺寸450 mm*450 mm;由人均收入和建造年代的模糊函数判断:混凝土标号C30钢筋标号HRB335配筋率0.6%;上层砌体部分外墙厚370 mm,内部隔墙厚240 mm,砌体强度为 $Mu7.0$,砂浆强度为 $Mu1.0$ 。对其余建筑均采用相同方法获取建筑隐蔽信息。

表2 结构破坏状态与层间位移角关系

Table 2 The relationship of damage status and inter-storey drift ratio

结构类型	完好	轻微 损伤	中等 破坏	不严重 破坏
RC框架	1/550	1/250	1/120	1/60
RC抗震墙	1/1 000	1/500	1/250	1/135
RC框支层	1/1 000	1/500	1/250	1/110
钢结构	1/300	1/200	1/100	1/55
砌体结构	1/1 000	1/800	1/400	1/250

筑严重破坏或倒塌。

在不同结构类型的建筑中,砌体结构的抗震性能最差,轻微破坏建筑占比8%,中等程度破坏建筑占比36%,严重破坏建筑占比高达43%,另外13%的建筑严重破坏或倒塌;框架结构的抗震性能相对较好,无严重破坏建筑,完好和轻微破坏建筑占比分别为6%和18%,半数以上建筑处于中等程度破坏状态占比为66%。

砌体结构的严重破坏和倒塌现象较为严重,而砖混结构和框架结构的抗震性能相对良好,破坏程度相对轻微。总体上,建筑震害损伤情况与实际规

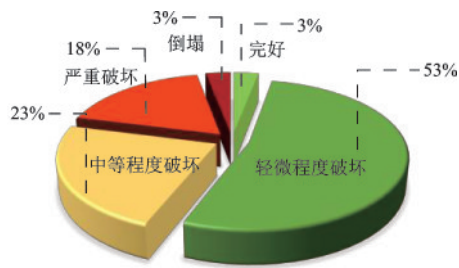


图5 算例区域建筑群破坏程度统计

Fig.5 Statistical diagram of damage degree of case study building group

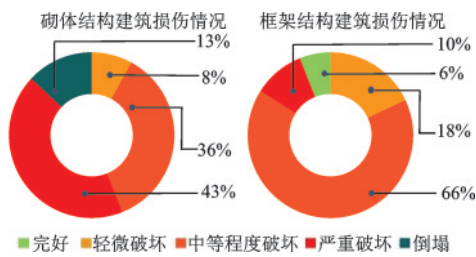


图6 县城各类建筑损伤情况统计

Fig.6 Statistical map of various types of building damage within the county

律相符,证明本方法对于房屋抗震性能分析具有较高的准确性和适用性。

针对砌体结构建筑的抗震性能问题,需要进一步加强设防和加固工作,提高建筑的抗震性能,减少地震灾害造成的损失。

利用本文所提出的基于遥感数据和区域性特征的建筑抗震能力评估方法,对我国四川省某县城的抗震能力评估结果可以看出,县城建筑群整体抗震性能较好,仅有3%的建筑出现严重破坏或倒塌,大部分建筑能够保障人员安全,符合“三水准两阶段”的抗震设防要求,这也与该地区实际情况相符合,我国西南地区遭受多次巨大震害,居民有较高的抗震意识,建筑平均抗震水平相对其他地区更高。

5.4 鲁甸地震某村镇震害评估与验证

本研究以2014年8月3日鲁甸地震部分受灾地区实际震害情况为验证对象,验证本方法的适用性。鲁甸某镇震前(2014-6-25)建筑卫星图如图7所示。在实际震害中,选中区域建筑基本完好的占比为1.4%,轻微破坏建筑占比为8.4%,中等破坏建筑占比为4.2%,严重破坏建筑占比为5.6%,其余80.3%的建筑在地震中倒塌。与此相比,本方法按照前文

建筑抗震能力评估流程得到的模拟结果显示,建筑轻微破坏占比为8.4%,中等破坏建筑占比为4.2%,严重破坏建筑占比为8.5%,倒塌占比为77.5%。如图8所示,与实际震害对比结果表明,本方法与建筑实际破坏情况有较好的符合度和适用性。综上,本方法在鲁甸地震的实际应用中表现出较好的精度和适用性,证明了其在房屋抗震性能分析方面具有一定的可行性和应用价值。



图7 鲁甸县某镇震前建筑卫星图

Fig.7 Satellite image of a town before the earthquake in Ludian County

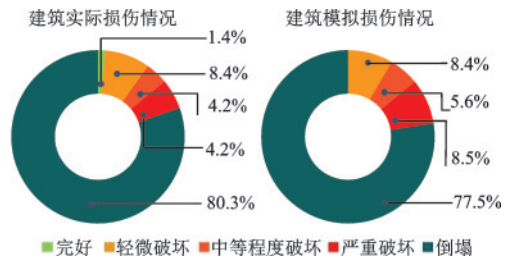


图8 实际震害与模拟结果对比

Fig.8 Comparison of actual earthquake damage and simulation results

6 结论

本文提出了一种结合区域建筑地域性特征与GIS数据的建筑信息智能获取与抗震能力评估方法,并通过实际案例应用验证其可行性与准确性。并得出以下结论:

(1)本文提出的建筑地域性特征与GIS数据相结合的建筑信息智能获取方法,能够有效地解决传统研究方法在大范围建筑群物理信息获取中,无法兼顾信息获取广度和精度的问题。

(2)中小城市建筑群具有显著的地域性特征,具体体现在建材强度、建筑风格、结构形式、墙柱布置等方面,利用已知建筑地域性特征类比推断,是获取较大范围内其他建筑群的隐蔽信息的有效手

段。由此能够快速准确地获取建筑结构类型、材料属性、开洞情况等内部信息,为城乡建筑群的抗震性能评估提供了重要参考。

(3)通过对比评估结果与实际震害,可知提出的研究方法具有较好的适用性,可以为大范围建筑群的防灾规划、抗震加固和地震应急管理工作提供技术支持。

参考文献:

- [1] 苏原,孙明.汶川地震中部分建筑震害现象分析及其启示[J].工业建筑,2009,39(增1):344-347.
Su Y, Sun M. Analysis of the seismic damage of some buildings by wenchun earthquake and its inspiration[J]. Industrial Construction, 2009, 39(Sup1): 344-347. (in Chinese)
- [2] 郑建军,廖永石,杜雷,等.青海玉树地震民用建筑震害调查和分析[J].建筑结构,2013,43(增1):1051-1054.
Zheng J J, Liao Y S, Du L. Investigation and analysis of building damage in Yushu city caused by earthquake[J]. Building Structure, 2013, 43(Sup1): 1051-1054. (in Chinese)
- [3] 蔡晓光,孙有为,郭晓云.芦山地震建筑震害统计分析[J].自然灾害学报,2015,24(6):112-119.
Cai X G, Sun Y W, Guo X Y. Statistical analysis of building damage in M_r 7.0 Lushan Earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(6): 112-119. (in Chinese)
- [4] 林向洋,文鑫涛,郑通彦.2018年中国大陆地震灾害损失述评[J].防灾科技学院学报,2020,22(2):10-17.
Lin X Y, Wen X T, Zheng T Y. Review of losses from Mainland China's 2018 earthquake disaster[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2020, 22(2): 10-17. (in Chinese)
- [5] Zhou Z, Irizarry J, Lu Y. A Multidimensional framework for unmanned aerial system applications in construction project management[J]. Journal of Management in Engineering, 2018, 34(3): 1-15.
- [6] 刘军,王鹤,王秋玲,等.无人机遥感技术在露天矿边坡测绘中的应用[J].红外与激光工程,2016,45(增1):118-121.
Liu J, Wang H, Wang Q L, et al. Application of UAV remote sensing technology in open-pit slop mapping[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(Sup1): 118-121. (in Chinese)
- [7] 李钢,张鹏程,董志骞,等.村镇砌体建筑群信息智能获取与震害预测[J].建筑结构学报,2022,43(8):196-208.
Li G, Zang P C, Dong Z Q, et al. Intelligent information acquisition methods and seismic damage prediction of rural masonry building groups[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(8): 196-208. (in Chinese)
- [8] 熊琛.基于时程分析和三维场景可视化的区域建筑震害模拟研究[D].北京:清华大学,2016.
Xiong C. Study on the regional building seismic damage simulation based on time-history analysis and 3d scene visualization[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [9] 赵杰,郑树平,王飞剑.基于遥感影像的区域房屋抗震能力评估——以山西省忻州市为例[J].山西地震,2022,50(1):17-20,52.
Zhao J, Zheng S P, Wang F J. Seismic performance assessment of regional houses based on remote sensing images[J]. Earthquake Research In Shanxi, 2022, 50(1): 17-20, 52. (in Chinese)
- [10] 张朝阳.基于遥感技术的房屋抗震等级评估方法研究[D].廊坊:防灾科技学院,2022.
Zhang C Y. Research on the evaluation method of housing seismic rating based on remote sensing technology [D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2022. (in Chinese)
- [11] 马成忠.基于GIS的地震应急预评估辅助决策系统设计与实现[J].地理信息世界,2022,29(2):62-66.
Ma C Z. Design and Implementation of earthquake emergency pre-assessment decision-making system based on GIS[J]. Geomatics World, 2022, 29(2): 62-66. (in Chinese)
- [12] 陈夏楠,张令心,林旭川,等.基于地震动库的城市地震灾害情景快速匹配算法研究[J].地震工程与工程振动,2021,41(2):76-83.
Chen X N, Zhang L X, Lin X C, et al. Study on matching algorithm of urban seismic scenarios based on ground motion database[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(2): 76-83. (in Chinese)
- [13] 林旭川.城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制[J].城市与减灾,2017,20(3):18-22.
Lin X C. Numerical simulation and risk control of earthquake disaster in urban buildings[J]. Cities and Disaster Reduction, 2017, 20(3): 18-22. (in Chinese)
- [14] 田得元.农村建筑区域特点及典型结构地震易损性分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2021.
Tian D Y. Analysis of rural residential regional characteristics and seismic vulnerability of typical structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, 2021. (in Chinese)
- [15] 卜海峰,蒋欢军,和留生.基于模糊理论的建筑震后功

- 能损失评价方法[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增2): 11-18.
- Bu H F, Jiang H J, He L S. Method for assessment of building function loss in an earthquake based on fuzzy theory[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (Sup2):11-18.(in Chinese)
- [16] 胡涛. 模糊数学和灰色系统理论在岩土及结构工程中的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- Hu T. The study of fuzzy mathematics and gray system theory application in geotechnical and structural engineering[D]. Nanning: GuangXi University, 2007. (in Chinese)
- [17] 刘锡荟, 刘立泉. 模糊数学在结构工程中的应用[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(5): 32-45.
- Liu X H, Liu L Q. Application of fuzzy mathematics in structural engineering[J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(5): 32-45. (in Chinese)
- [18] 王海超. 特征展开模糊推理在震害预测中的应用研究[J]. 燕山大学学报, 1999, 23(3): 260-262.
- Wang H C, Application of feature expansion fuzzy reasoning in earthquake damage prediction[J]. Journal of Yanshan University, 1999, 23(3): 260-262. (in Chinese)
- [19] Wei J Y, Qi X L. Research and design of field and office work integration system for historical buildings conservation: case study on Guangzhou[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1550: 042-069.
- [20] 王建飞. 基于遥感技术的建筑抗震因子提取与应用研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.
- Wang J F. Research and application of extracting building anti-seismic factors based on remote sensing technology[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, 2021. (in Chinese)
- [21] 郭宁. 南北地震带具有区域特殊性的典型房屋建筑抗震性能分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
- Guo N. The seismic capability analysis of typical building with regional and characteristics in north-south seismic belt[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, 2012. (in Chinese)
- [22] 尹之潜, 杨淑文. 地震损失分析与设防标准[M]. 北京: 地震出版社, 2004: 123.
- Yin Z Q, Yang S W. Seismic loss analysis and fortification standard[M]. Beijing: Seismological Press, 2004: 123. (in Chinese)
- [23] Geiss C, Pelizari P A, Marconcini M, et al. Estimation of seismic building structural types using multi-sensor remote sensing and machine learning techniques[J]. International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 104:175-188.
- [24] 吴浩霖. 基于无人机影像和深度学习技术的建筑物分类和统计[D]. 哈尔滨: 中国地震局地质研究所, 2020.
- Wu H L, Building classification and statistics based on drone imagery and deep learning technology[D]. Harbin: China Institute of Seismology, 2020. (in Chinese)
- [25] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动, 1999, (1): 21-30.
- Ou J P, He Z, Wu B, et al. Seismic damage performance-based design of reinforced concrete structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics. 1999, (1): 21-30. (in Chinese)
- [26] Yu L, Dong Z, Li G. Simplified mechanical models for the seismic collapse performance prediction of unreinforced masonry structures[J]. Engineering Structures. 2022, 258: 114-131.
- [27] 杨昀, 徐赵东, Shah A A, 等. 考虑震损的混凝土框架结构改进建模方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 371-377.
- Yang J, Xu Z D, Shah A A, et al. A modeling method for retrofitting concrete frame structures considering earthquake damage[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2021, 51(3): 371-377. (in Chinese)
- [28] Ibarra L F, Medina R A, Krawinkler H. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 34(12): 1489-511.
- [29] 龙沐恩. 基于改进IMK恢复力模型的应用与参数识别[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- Long M E. Application and parameter identification based on modified Ibarra-Medina-Krawinkler hysteretic model [D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [30] Huang X, Kim S H, O-SKWON. Lumped spring model parameters of RC frame elements for seismic performance assessment[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(11): 2553-2574.
- [31] 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [32] 蒋利学, 王卓琳, 张富文. 多层砌体结构的损坏程度与层间位移角限值[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增2): 263-270.
- Jiang L X, Wang Z L, Zhang F W. Damage degree and inter-story drift angle limit of multi-story masonry structures[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (Sup2):263-270. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)