

汶川地震都江堰市建筑震害空间分布及影响因素

贾俊峰¹, 侯爽^{*2}, 欧进萍^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 根据都江堰市建筑震害调查结果, 考虑城市空间演进及地震作用空间差异影响, 研究了汶川地震都江堰市建筑震害空间分布规律及其成因. 首先, 根据都江堰市城市区划及震害特点, 空间上将沿远离山体方向划分为内环和外环两部分; 然后, 考虑抗震设计规范体系演进对城市震害的空间分布影响将建筑按照典型建设时期分类, 对比研究了各时期建筑的震害在空间上的分布; 最后, 分析了城市空间演进、地形条件、场地条件以及与断层破裂距离等因素对震害空间分布的影响. 研究发现, 城市建筑的空间演进是影响震害空间分布的主要因素, 都江堰市早期建筑平均震害指数最大可达新建建筑的 6.5 倍; 地震作用的空间差异也是影响震害空间分布的重要原因, 内环区域的平均震害指数可达外环的 1.88 倍. 该研究为未来的建筑结构抗震设计以及震害预测提供了参考依据.

关键词: 汶川地震; 近场地震; 建筑震害; 震害空间分布

中图分类号: TU312.3; P315 **文献标志码:** A

0 引言

2008年5月12日汶川8.0级特大地震是继1976年唐山地震之后最为严重的一次地震, 这次地震是由于印度洋板块向亚洲板块俯冲过程中造成青藏高原抬高而形成的逆冲、挤压型右旋地震, 引发这次地震的构造断层是龙门山断裂带的中央断裂北川—映秀断层, 震中位于四川省阿坝州汶川县(北纬31.0°, 东经103.4°). 这次地震的发震断层地表破裂接近300 km, 主震持续时间长达2 min, 震源深度约为10 km, 破坏力大, 造成了严重的人员伤亡和财产损失以及工程结构的破坏.

作者参与了国家地震局2008年8月组织的都江堰市震害普查工作. 该市为小型城市, 市区人口约200 000, 市区距离震中断裂带8.6 km, 在汶川地震中属于典型的近场强震. 该市建筑包括各种典型结构形式, 震害也表现出各种典型形式, 为评估城市建筑抗震能力提供了较好的研究背景. 在调查中发现建筑结构震害在空间分布上具有一定规律性, 该市半面靠山呈扇形辐射状向外发展,

震害沿远离山体的方向逐渐变轻, 根据都江堰市区地形情况判断可能是由于地形条件等因素引起的. 在1971年San Fernando地震、1980年Friuli地震、1985年智利地震和1994年Northridge地震中得到的现场数据也证实地形条件对地震动的强度分布有比较显著的影响^[1].

本文采用震害等级和震害指数为参数, 并考虑城市空间演进和地震作用空间差异因素, 研究城市震害在空间上的分布规律以及影响因素, 以便为未来的建筑结构抗震设计以及震害预测提供参考依据.

1 都江堰市建筑震害调查概况

空间上都江堰市区背山呈辐射状向外扩展, 内环线和外环线为城市环向主干道. 内环老旧建筑较多, 内外环间新建建筑较多. 外环以外基本为农业用地, 建筑较少. 作者随机调查了外环以内多个街区房屋震害情况(如图1所示), 外环内城区面积约为16.2 km², 调查区域面积为5.3 km²,

收稿日期: 2009-05-20; 修回日期: 2009-08-03.

基金项目: “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714202)

作者简介: 贾俊峰(1982-), 男, 博士生, E-mail: jiajunfeng_HIT@126.com; 侯爽*(1977-), 男, 博士, 讲师, E-mail: hous@dlut.edu.cn; 欧进萍(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士.

约占 1/3,且空间上基本呈均匀分布.

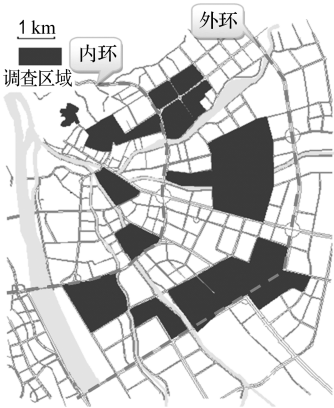


图 1 都江堰调研区域

Fig. 1 The investigation area of Dujiangyan City

该市结构类型主要包括多层砌体结构、多层钢筋混凝土结构、底层框架结构、单层工业厂房(单厂)以及建设年代较早的低矮民居等,如图 2 所示.其中,多层砌体结构房屋最多,占 53.2%;其次为底层框架建筑房屋,单层厂房结构数量最少.按照建筑用途分类主要包括住宅、商业、商业和住宅两用建筑、政府和医疗建筑、学校等教育用建筑,另外还有厂房和其他用途的建筑等.各种用途的建筑所占的比例如图 3 所示,即超过 60%的房屋建筑用于住宅,调查中发现这些建筑主要是多层砌体结构建筑;约 15%的建筑是商业和住宅两用建筑,这类建筑主要是底层框架结构,底层框架结构作为商铺,上部多层砌体为住宅,少部分为多层钢筋混凝土框架结构.都江堰市市区内每种结构类型都有不同程度的破坏,震害调查时的评定标准采用国家标准^[2],将结构破坏分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌等五个等级.调查得到的各类型结构的破坏比 R 如图 4 所示,从图中可以直观看出,单层厂房结构和多层

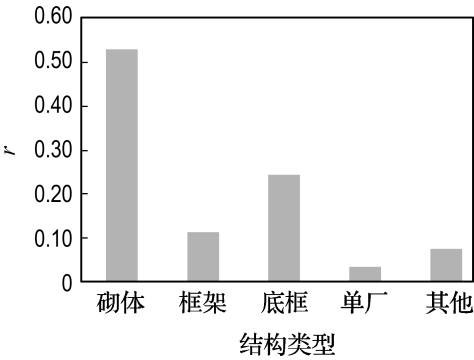


图 2 各结构类型房屋的比例

Fig. 2 Proportion of each type of structures

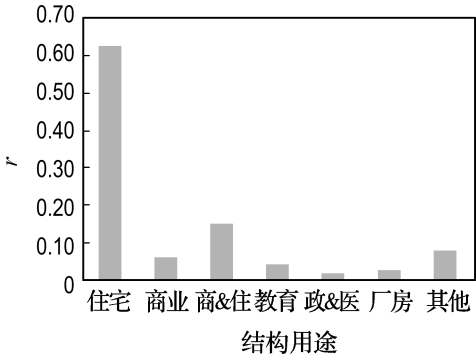


图 3 各种用途房屋的比例

Fig. 3 Proportion of each functional building

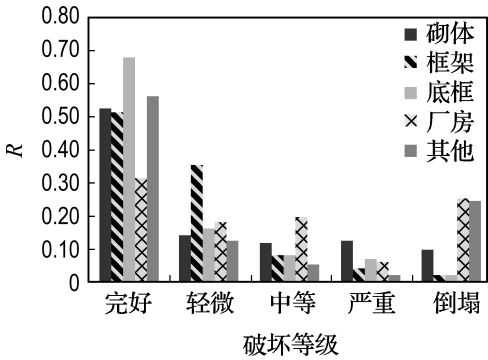


图 4 各种结构类型的破坏比例

Fig. 4 Proportion of each type of structural damage

砌体结构以及其他未知类型结构的破坏较为严重,结构严重破坏和倒塌的比例较大,而框架结构和底层框架结构破坏相对较轻,说明框架结构的整体抗震性能较好.

为方便比较各类建筑结构的破坏程度,采用《地震现场工作第三部分:调查规范》(GB/T 18208.3—2000)^[3]中给出的震害等级和震害指数的对应关系,如表 1 所示.某一类房屋的平均震害指数按下式计算:

$$d_i = \sum d_{ij} n_{ij} / \sum n_{ij} \quad (1)$$

式中: d_{ij} 为第 i 类房屋破坏等级为 j 的震害指数; n_{ij} 为第 i 类房屋破坏等级为 j 的房屋幢数.为方便计算,本文中各类建筑各破坏等级对应的震害指数取该规范中附录 A1 中各震害指数范围的中间值,即基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌对应的震害指数分别取为 0.050、0.200、0.425、0.700 和 0.925.采用式(1)分别计算各类结构的平均震害指数,如表 2 所示.可以看出,工业厂房破坏最为严重;其次是其他未知类型结构,这些结构很多是已经彻底倒塌不便判断结构类型的房屋,另外还包括一些老旧单层民居等,因此,平均震害指数较大;然后是多层砌体结构破坏比

较严重,而框架结构和底框结构的破坏相对较轻.

表 1 结构破坏等级和震害指数对应关系
Tab. 1 Damage grades and damage indexes of structures

破坏等级	震害指数
基本完好	0~0.1
轻微破坏	0.1~0.3
中等破坏	0.3~0.55
严重破坏	0.55~0.85
倒塌	0.85~1.0

表 2 各结构类型的平均震害指数
Tab. 2 Averaged damage indexes of every type of structure

结构类型	平均震害指数
砌体结构	0.279
框架结构	0.176
底框结构	0.163
工业厂房	0.410
其他	0.315

2 都江堰市建筑震害空间分布

都江堰市区呈扇形分布,一环路将都江堰市区分为内环和外环两部分.市区西北部背靠山体,地势略高;东南部地势略低.在都江堰市震害调查过程中发现市区内的建筑结构破坏呈现明显的空间分布特征,内环的建筑结构破坏要比外环的结构破坏严重.从空间上看远离山体的方向震害变轻,为定量研究震害的这种空间分布规律,将市区内分为内环和外环两部分进行对比.内环背靠山体,半径约 5 km;外环距离山体稍远,半径约 9 km.

从图 1 和图 4 以及表 2 可以看出,多层砌体结构所占比例最大,且结构震害较为严重,因此本文以多层砌体结构为例研究震害的空间分布规律.震害调查区域内多层砌体结构建筑共 1 065 栋,大体均匀分布在都江堰市内环和外环两个区域,其中内环和外环的多层砌体建筑分别为 392 栋和 673 栋.图 5 为各个年代内环和外环建设的砌体结构建筑分别占各自区域砌体建筑总量的比例,该图体现了城市建筑空间演进过程.可以明显看出,在所统计的建筑数量上,内环砌体结构建筑在 20 世纪 80 年代、90 年代建设较多,2000 年以后建设很少;但是外环的砌体结构建筑建设在逐渐增加.

图 6 为内环与外环砌体结构破坏比比较,可见内环震害程度明显大于外环.根据式(1)计算内环和外环的震害指数分别为 0.395 和 0.212,内环震害指数是外环震害指数的 1.86 倍.

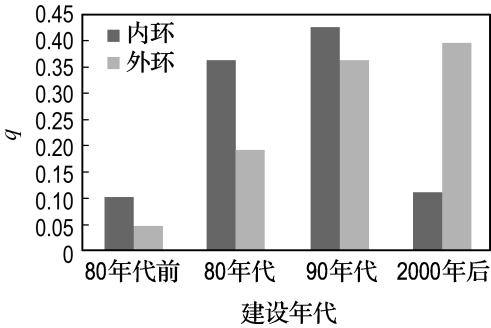


图 5 各年代内外环砌体结构比例
Fig. 5 Ratios of masonry structures in inner and outer ring region during each period

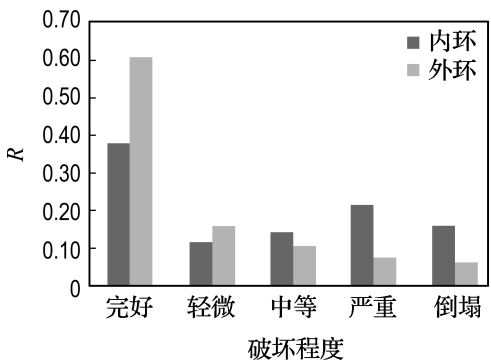


图 6 内外环砌体结构破坏比
Fig. 6 Damage ratios of masonry structures in inner and outer ring region

由于结构震害在空间上明显呈现多龄期特征,即不同建成年代建筑结构的抗震能力差别较大,而不同年代内环和外环所完成的建筑面积也有较大差别.本文根据我国建筑抗震设计规范的演进特点,大致在建设时间上将建筑结构分为 20 世纪 80 年代之前建筑、20 世纪 80 年代建筑、20 世纪 90 年代建筑和 2000 年后建筑,在各建设时期内,可认为各类建筑具有相近的抗震能力,这样可在相同抗震水平上分析震害在空间上的分布特征.

图 7~10 分别是 4 个时期在内环建设的多层砌体结构的震害统计情况.可以明显看出,几乎每个时期内环砌体建筑的破坏程度都要明显比外环的砌体结构破坏严重,特别是 2000 年以前建设的房屋,结构震害体现出明显的空间分布特征;2000 年后建设的房屋破坏程度都相对较轻,内外环差别不大.也可以直观看出,20 世纪 80 年代以前的建筑结构破坏最为严重;而 2000 年以后建设的房屋破坏最轻,绝大部分为基本完好或轻微破坏.另外,值得注意的是,20 世纪 90 年代建设的房屋破坏要稍微严重于 80 年代建设的房屋,具体原因有

待进一步研究分析。

根据式(1)计算各年代内环和外环多层砌体结构的平均震害指数,如图 11 所示.内环外环的建筑震害基本上都随着建设年代显著变轻.在内环 80 年代前、80 年代、90 年代的震害分别是 2000 年后建筑的 5.7、3.6、3.4 倍,而在外环则分别是 6.5、2.6、3.4 倍.在 20 世纪 80 年代前、80 年代、90 年代和 2000 年后 4 个时期内,内环结构平均震害指数分别为外环结构平均震害指数的 1.16、1.88、1.30 和 1.34 倍,在远离山体的方向震害明显变轻.

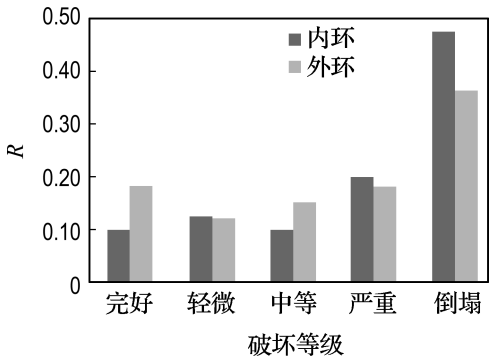


图 7 20 世纪 80 年代前砌体结构的破坏比
Fig. 7 Damage ratios of masonry structures in Pre80s'

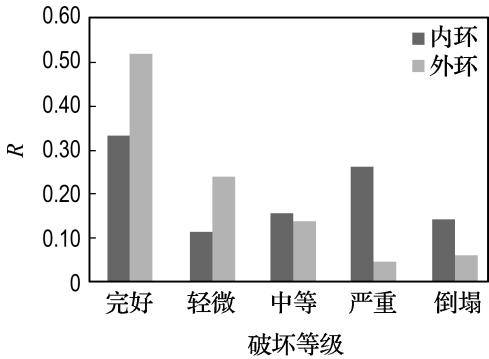


图 8 20 世纪 80 年代砌体结构的破坏比
Fig. 8 Damage ratios of masonry structures in 1980s'

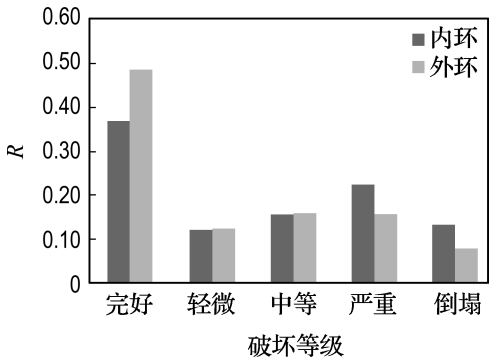


图 9 20 世纪 90 年代砌体结构的破坏比
Fig. 9 Damage ratios of masonry structures in 1990s'

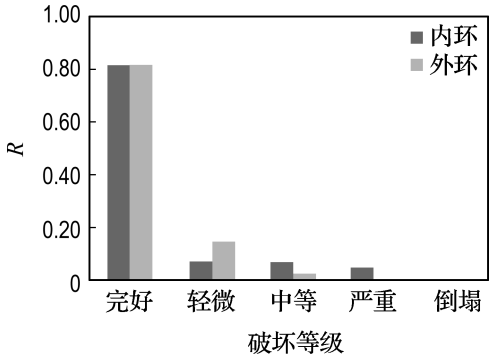


图 10 2000 年后砌体结构的破坏比
Fig. 10 Damage ratios of masonry structures after 2000

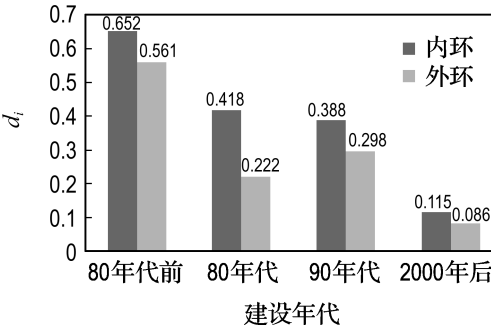


图 11 内环与外环各时期砌体结构的平均震害指数
Fig. 11 Averaged damage index of masonry structures of inner and outer ring part in each period

3 震害空间分布特征影响因素

3.1 城市空间演进的影响

随着城市空间演进新旧建筑在城市空间上出现不同的分布.伴随规范体系的更新,新建结构的抗震性能将显著好于早期的结构.由图 11 可知早期建筑平均震害指数最大可达新建建筑的 6.5 倍,该因素是影响城市震害空间分布的最主要因素,远大于地震动作用空间差异的影响.但随着旧城改造以及老旧建筑的抗震加固,该因素的影响将逐渐降低.

3.2 地震动作用空间差异

地震动作用空间差异将造成震害城市震害空间分布差异.而造成这种差异的原因极其复杂,可能包括地形、地质、地震传播甚至结构性能等多层面的因素.本文就这些因素做简要分析:

(1) 地形条件

研究表明^[4],地形条件是影响一个区域震害的重要因素,例如盆地边缘效应会造成盆地边缘地区的结构破坏更为严重,这主要是由于地震传

播过程中,遇到盆地边缘的高地,剪切波就会转变成面波,同时地震波遇到山地反射回来的波形与入射波叠加,造成更严重的结构破坏.在 San Fernando 地震、Friuli 地震、智利地震和 Northridge 地震中得到的现场数据也证实了这种地形条件的影响.在日本的 Matsuzaki 台阵数据中也到了证实,Jibson^[5]采用该台站记录的 5 次地震的峰值加速度数据作为地形上升的函数,并规格化到山丘顶部的加速度,从得到的回归曲线来看,从山脚沿山坡到山顶,地形升高不到 200 m,但山顶峰值加速度相对于山脚的放大系数约为 2.5,如图 12 所示.尽管 5 次地震的峰值加速度范围有限,但已明显体现出地形条件对地震动的影响.

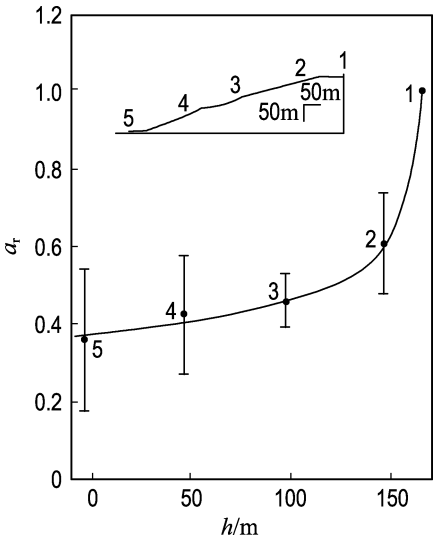


图 12 日本 Matsuzaki 台阵沿山脊峰值加速度相对分布^[5]

Fig. 12 Relative distribution of PGA along a ridge flank from Matsuzaki array in Japan^[5]

都江堰市在地质构造体系上,属华夏构造体系,地跨川西龙门山地带和成都平原岷江冲积扇扇顶部位,地貌单元属于岷江冲积扇一级阶地.西北部紧靠玉垒山,市区呈扇形分布,地势西北高、东南低,高山、中山、低山、丘陵和平原呈阶梯分布,一环路将市区分为内外环两部分.由于内环更靠近山体,而且地势相对较高,这种地形条件很可能是引起如图 11 所示都江堰市内环建筑的震害比外环建筑震害严重的原因之一.当然,这种地形条件的影响程度如何,需要根据强震观测台站记录到的地面运动来证实.

(2)场地条件影响

结构抗震设计中都江堰市场地一般按二类场

地,但都江堰半面环山,与山体距离的不同可能造成其地质情况及场地条件有所差异.一般而言,距离山体较近的山脚处属于基岩地段,都江堰市背靠山体部分几乎都是构造作用形成的岩石山体,则内环场地可能比外环场地更坚硬.都江堰市高耸结构震害相对较轻,说明都江堰市的地震动长周期分量较小,主要为短周期分量,这样在内环较坚硬场地上的地震动强度有可能稍大于外环的地震动强度,这也可能是造成都江堰市工程震害空间分布的重要因素之一.如果获得都江堰市地质勘探及场地条件资料,则可以进一步研究场地条件对这种工程震害空间分布差异的影响程度.

(3)断层破裂影响

这次地震属于龙门断裂带的汶川—映秀断层破裂,都江堰市距离震中仅 21 km,明显属于近场地震.已有的研究表明,断层破裂时近场地震可能具有破裂方向性效应和上盘效应等近断层地震动特征.由于汶川地震的发震断层位于都江堰市的西北方向,这样内环的建筑距离震中和破裂断层相对较近;因此,断层破裂的传播及其他近断层地震动特征的影响也可能是造成都江堰市工程震害空间分布差异的另一个重要因素.

4 结 论

(1)城市空间演进是引起城市空间震害分布的最主要因素,都江堰市早期建筑的平均震害指数最大可达新建建筑的 6.5 倍.

(2)地震动作用空间差异也是影响震害空间分布的重要原因.对比相同时期的建筑在内环和外环的震害发现,各个时期内环的平均震害指数均大于外环的平均震害指数,最大相差 0.88 倍.

(3)引起地震动作用空间差异的原因是十分复杂的,可能有多种因素,包括都江堰市区地形条件、不同的地质条件造成场地条件的不同,以及断层破裂产生的地震动传播过程等因素.具体原因还需要根据地质勘探、强震记录等相关资料进一步深入分析研究.

致谢:感谢国家地震局工程力学研究所对地震科考工作的组织和支持,感谢来自国家地震局工程力学研究所、北京交通大学、烟台大学和南京航空航天大学在地震科考工作中的配合.

参考文献：

[1] FINN W D L, VENTURA C E, SCHUSTER N D. Ground motions during the 1994 Northridge earthquake [J]. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 1995, **22**(2):300-315

[2] 中华人民共和国建设部. 建抗字第 377 号 建筑地震破坏等级划分标准[S]. 北京:[s n], 1990

[3] 国家质量技术监督局. GB/T 18208. 3—2000 地震现场工作第三部分——调查规范 [S]. 北京:中国标准

出版社, 2000

[4] GELI L, BARD P Y, JULLIEN B. The effect of topography on earthquake ground motion:a review and new results [J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1988, **78**(1):42-63

[5] JIBSON R. Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability [R] // Open File Report No. 87-268. California: United States Geological Survey, 1987

Damage spatial distribution and its influential factors in Dujiangyan City subjected to Wenchuan earthquake

JIA Jun-feng¹, HOU Shuang^{* 2}, OU Jin-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Base on the outcomes of seismic damage assesment in Dujiangyan City, spatial distribution of building seismic damage subjected to Wenchuan earthquake was investigated and the possible causes were analyzed with the two key factors of the spatial evolution of urban area and the spatial earthquake inputs taken into account. Firstly, urban layout and characteristics of seismic damage in Dujiangyan City were considered along the direction normal to the mountains, and the city was divided into two regions spatially by the inner ring road and the outer ring road. Then, considering that the evolution of seismic codes would cause remarkable changes on seismic performance of buildings, buildings were divided into groups in chronological order, and the seismic damages of building groups were compared spatially by each period. Finally, the influential factors of spatial urban evolvement, topographical condition, site condition and distance to fault on the spatial distribution of seismic damage were discussed. It is found that the spatial evolution of urban area is the key cause to the spatial seismic damage distribution. From the analysis, early-age buildings has up to 6.5 times higher average damage level than the new buildings. And the spatial ground motion input is also an important cause for the damage distribution. In Dujiangyan City, seismic damage in inner ring road part is significantly higher than that of the outer ring road part, with the amount of up to 1.88 times higher than the latter. This study will provide solid references for future aseismic design and damage prediction.

Key words: Wenchuan earthquake; near-field earthquake; building seismic damage; seismic damage spatial distribution