



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2400864

引用格式:昌毅,万凯,刘新权,等.基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估方法及应用[J].科学技术与工程,2025,25(1):76-83.

Chang Yi, Wan Kai, Liu Xinquan, et al. Application of seismic resilience evaluation method for building groups based on grid and radar maps [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 76-83.

# 基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性 评估方法及应用

昌毅<sup>1</sup>, 万凯<sup>2</sup>, 刘新权<sup>1</sup>, 甘嘉豪<sup>1</sup>, 江元琪<sup>1</sup>, 杨仁镪<sup>1</sup>, 杨子健<sup>1</sup>, 胡文君<sup>3</sup>, 丁星好<sup>4</sup>

(1. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 南昌 330013; 2. 南昌市政公用工程项目管理有限公司, 南昌 330009;  
3. 云南省地质环境监测院, 昆明 650216; 4. 湖南城市学院土木工程学院, 益阳 413000)

**摘要** 目前的抗震韧性评估主要是针对单一地震对单体建筑的影响,难以考虑对同一地区不同建筑群的抗震韧性评估。将研究区域按500 m×500 m进行网格划分,分析地震危险性。以建筑群设防所需费用、不同程度受损面积、房屋直接经济损失、修复时间、修复费用和伤亡人数6个指标作为抗震韧性评价指标,运用层次分析法确定各指标权重,建立基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估模型,并将该模型运用到成都市。研究表明:未提升设防时,成都市抗震韧性一般;在提升1度设防后,设防所需费用增加45.95%,不同程度受损面积、房屋直接经济损失、修复时间、修复费用、伤亡人数分别减少26.25%、37.75%、45.1%、44.24%、48.18%。通过对比分析该模型数据发现,提升1度设防后,成都市建筑群抗震韧性综合效益提升40.8%,灾害损失大量减少,提升效果明显。

**关键词** 抗震韧性; 网格划分; 雷达图; 建筑群; 综合效益

中图分类号 P315.9;

文献标志码 A

## Application of Seismic Resilience Evaluation Method for Building Groups Based on Grid and Radar Maps

CHANG Yi<sup>1</sup>, WAN Kai<sup>2</sup>, LIU Xin-quan<sup>1</sup>, GAN Jia-hao<sup>1</sup>, JIANG Yuan-qi<sup>1</sup>, YANG Ren-qiang<sup>1</sup>,  
YANG Zi-jian<sup>1</sup>, HU Wen-jun<sup>3</sup>, DING Xing-yu<sup>4</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;  
2. Nanchang Municipal Public Works Project Management Co., Ltd., Nanchang 330009, China;  
3. Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, Kunming 650216, China;  
4. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**[Abstract]** The current seismic toughness assessment is mainly aimed at the impact of a single earthquake on a single building, it is difficult to consider the seismic toughness assessment of different buildings in the same area. The research area was divided into grids according to 500 m×500 m, and seismic risk analysis was carried out. Six indexes, including the cost of building defense, damaged area of different degrees, direct economic loss of buildings, repair time, repair cost and casualties, were taken as the evaluation indexes of earthquake resilience. Analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the weights of each index, and an earthquake resilience evaluation model based on grid and radar map was established and applied to Chengdu City. The results show that the earthquake toughness of Chengdu City is normal when the fortification is not upgraded. After upgrading the fortification, the cost of fortification increases by 45.95%, and the damaged area, the direct economic loss of the house, the repair time, the repair cost and the number of casualties decreases by 26.25%, 37.75%, 45.1%, 44.24% and 48.18%, respectively. Through comparative analysis of the model data, it is found that after upgrading the fortification, the comprehensive benefit of earthquake resilience of Chengdu City buildings is increased by 40.8%, the disaster loss is greatly reduced, and the improvement effect is obvious.

**[Keywords]** seismic resilience; grid division; radar map; building groups; overall benefits

收稿日期: 2024-01-30 修订日期: 2024-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(52268020, 51568001)

第一作者: 昌毅(1979—),男,汉族,湖南益阳人,博士,副教授,硕士研究生导师。研究方向:工程结构可靠性分析工程结构抗震、结构全寿命设计与维护、工程防灾及结构安全等技术攻关。E-mail:changyi000814@sina.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

在城市抗震韧性提升中,如何评估既有建筑物抗震韧性并采取有效措施是迫在眉睫的问题。2012年美国联邦紧急措施署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)<sup>[1]</sup>提出了新一代建筑抗震性态评价方法 FEMAP-8,提出了韧性抗震的思想,奠定了城市建筑抗震韧性评定的理论基础。2013年 Arup 公司提出了 REDi 体系<sup>[2]</sup>,建立了建筑韧性评级系统。相较于国外,国内对城市安全韧性的研究起步较晚,王龙等<sup>[3]</sup>将韧性的概念引入结构领域,通过疲劳试验分析了地震作用对支座结构的抗震韧性的影响。张涵<sup>[4]</sup>对建筑群进行抗震韧性评估。2020年《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020)<sup>[5]</sup>开始实施。基于此标准,程桢钰<sup>[6]</sup>对呼和浩特市既有建筑群进行抗震韧性评估,并分析其提升效益。然而,以往的建筑群抗震韧性评估中,都是选取整个城市经受单一地震烈度进行抗震韧性分析。在评估抗震韧性提升效益时,难以考虑到同一地区的地震危险性存在差异的情况,也难以综合考虑当地的经济水平发展和人口密集程度,难以综合考虑各个抗震韧性指标对综合抗震韧性效益的影响。

针对以上问题,现提出基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估方法。其中,网格化可以细化研究目标,雷达图法可以综合评价各个指标对抗震韧性的影响,从而考虑同一地区经济发展、人口密度和地震危险性存在差异性的情况。进而,运用层次分析法确定各指标权重,建立基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估模型。将该模型运用到成都市建筑群抗震韧性评估研究中,将研究区域按 500 m × 500 m 进行网格划分,再进行地震危险性分析和抗震韧性计算,以验证模型的有效性。

## 1 基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估方法

### 1.1 建筑群抗震韧性评估指标

根据《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020)规定的指标体系,从建筑群设防所需费用、不同程度受损面积、房屋直接经济损失、修复时间、修复费用和伤亡人数 6 个方面评估研究区域建筑群现有的抗震韧性水平。通过将每个区县所属网格的计算结果相加,得到研究区域各区县的影响结果。

#### 1.1.1 设防所需费用

考虑研究区域不同网格内,人均住房面积、人口密度和结构重置单价存在差异的情况,结合建筑成本提升系数<sup>[7]</sup>,计算研究区域不同设防烈度下某类结构建筑设防所需费用,表达式为

$$C = n\eta[m_1rP_1Q_1 + m_2(1-r)P_2Q_2]\alpha \quad (1)$$

式(1)中: $C$ 为不同设防烈度成本增加; $n$ 为网格个数; $\eta$ 为单位网格人口密度,人/ $\text{km}^2$ ; $m_1$ 为城市人均住房面积,人/ $\text{m}^2$ ; $m_2$ 为农村人均住房面积,人/ $\text{m}^2$ ; $r$ 为研究区域城镇化率; $P_1$ 为某类结构的农村重置价; $P_2$ 为某类结构的农村重置价; $\alpha$ 为不同烈度下建筑成本提升系数。

#### 1.1.2 不同程度受损面积

根据《地震现场工作-第四部分:灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2011)<sup>[8]</sup>的规定,将研究区域钢混结构、砖混结构、砖木结构、土坯结构和其他结构建筑群的受损等级分为轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏,并估算不同建筑群的不同程度受损面积,计算公式如下。

$$A_{i,s} = \sum_1^n R_h S_h \quad (2)$$

$$S_h = \eta[m_1rQ_1 + m_2(1-r)Q_2] \quad (3)$$

式中: $A_{i,s}$ 为破坏等级为  $i$  时  $s$  类建筑物受损总面积; $R_h$ 为某类建筑某种破坏等级的破坏比,其中  $h$  表示建筑类型,即钢混结构、砖混结构、砖木结构、土坯结构和其他结构; $S_h$ 为单位网格某类结构建筑面积; $Q_1$ 为某类结构城市占比; $Q_2$ 为某类结构农村占比。

#### 1.1.3 房屋直接经济损失

根据地震现场工作灾害直接损失评估给出的公式,研究区域某类房屋在某种破坏等级下的损失值  $L_h$ ,表达式为

$$L_h = A_h D_h P_h \quad (4)$$

式(4)中: $D_h$ 为某类房屋某种破坏等级下的损失比; $P_h$ 为某类房屋的重置单价。

#### 1.1.4 修复时间

建筑修复时间是建筑功能性修复所需时间。采用研究区域年建筑竣工面积来估算建筑受损修复时间<sup>[9]</sup>,表达式为

$$Q_{i,s} = K_{i,s} \frac{T_{i,s}}{T} \quad (5)$$

式(5)中: $K_{i,s}$ 为破坏等级为  $i$  时,  $s$  类建筑修复时间与  $s$  类建筑新建时间的比值; $T$ 为研究区域建筑年施工面积。

#### 1.1.5 修复费用

建筑群修复费用一般指建筑群功能性修复所需费用。修复费用计算公式为

$$R_{i,s} = A_{i,s} K_{i,s} B_s \quad (6)$$

式(6)中: $B_s$ 为  $s$  类建筑物单位面积价格。

#### 1.1.6 伤亡人数

根据中国地震的灾区伤亡统计情况,综合考虑建筑物的易损性、室内人口密度和地震发生时间 3 个因素<sup>[10]</sup>,研究区域死亡人数计算如式(7)所示,

受伤人数计算如式(8)所示。

$$M_{d1} = \sum_1^n \beta_i \eta S_h (0.037 2R_{h1} + 0.014 9R_{h2} + 0.002 34R_{h3}) \quad (7)$$

$$M_{h1} = \sum_1^n \beta_i \eta S_h (0.121R_{h1} + 0.034 4R_{h2} + 0.013 4R_{h3}) \quad (8)$$

式中： $R_{h1}$ 、 $R_{h2}$ 、 $R_{h3}$ 分别为某单位网格内某类结构在不同设防烈度下的毁坏、严重破坏、中等破坏的破坏比； $\beta_i$ 为时间调整系数；地震发生在白天  $\beta_i = 1$ ，地震发生在晚上  $\beta_i = 1.4$ 。

### 1.2 基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估模型的提出

设指标矩阵  $Z$  是由  $n$  个评价对象构成的集合  $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ 。其中，每个评价对象均包含  $k$  个评价指标，则所有评价对象的指标组成的矩阵如式(9)所示。如  $z_{i,j}$  表示指标矩阵  $Z$  中第  $i$  个评价对象的  $j$  个评价指标，其计算公式如式(10)所示。然后，根据指标矩阵  $Z$  的数据，绘制雷达图，可建立基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估模型。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{2,1} & \dots & z_{i,1} \\ z_{1,2} & z_{2,2} & \dots & z_{i,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{1,j} & z_{2,j} & \dots & z_{i,j} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$z_{i,j} = V_{i,j} W_{i,j} \quad (10)$$

式(10)中： $V_{i,j}$ 为评价指标  $z_{i,j}$ 的变化比例； $W_{i,j}$ 为评价指标  $z_{i,j}$ 的权重。采用层次分析法确定评价指标权重，根据对所有评价指标进行相互重要性对比得出的数据<sup>[11]</sup>，构造出判断矩阵  $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 。采用方根法计算判断矩阵的最大特征根  $\lambda$ ，通过特征根法  $AM = \lambda M$ ，计算特征向量  $M$ ，特征向量归一化处理即为该评价指标的权重  $W$ 。

指标矩阵  $Z$  包括 2 个评价对象：未提升设防和提升 1 度设防。其中，每个评价对象均包括 6 个评价指标：设防所需费用、不同程度受损面积、房屋直接经济损失、修复时间、修复费用和伤亡人数。由于未提升设防时，评价指标相对没有变化，因此，未提升设防时，各个评价指标的变化比例均为 1。

在提出的建筑群抗震韧性评估模型中，通过引入抗震韧性综合效益系数  $H$  的概念[式(11)]来衡量未提升设防和提升 1 度设防的抗震韧性综合效益。

$$H_i = \sum_{j=1}^6 S_j \quad (11)$$

式(11)中： $H_i$ 为第  $i$  个评价对象的抗震韧性综合效益系数，在雷达图中为第  $i$  个多边形的面积； $S_j$ 为第  $i$  个多边形里的  $j$  个三角形面积。 $H$  越小，表示抗震

韧性综合效益损失越小，抗震韧性效益越好。通过对比本模型中的抗震韧性综合效益系数，分析提升 1 度设防的综合效益。

### 1.3 基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估方法步骤

基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估方法实施步骤如下，流程图如图 1 所示。

**步骤 1** 确定研究区域的目标和范围。评估前需要明确评估的目标和范围，包括评估区域的地理位置、建筑群类型和规范规定的抗震设防等级。

**步骤 2** 研究区域的网格划分和数据分析。以往抗震研究的网格划分都是  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ <sup>[12]</sup> 或  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ <sup>[13]</sup>，为了更精细化对研究区域进行研究，将其按照  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  等距离进行网格划分。并收集分析研究区域内人口密度、城镇化率、人均住房面积、建筑破坏比、重置单价、年竣工面积以及研究区域周边历史地震数据等数据。

**步骤 3** 研究区域的地震危险性分析。根据研究区域的地理位置，选取地震动衰减关系式，结合其周围历史地震数据，计算所有网格的峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA)。并根据中国地震烈度表<sup>[14]</sup>中的烈度转换公式  $I_{\max} = 3.17 \lg \text{PGA} + 6.59$ ，计算研究区域所有网格的最大地震烈度  $I_{\max}$ 。

**步骤 4** 评估建筑群的抗震韧性指标综合效益。根据单位网格的地震危险性分析结果，计算提升设防前后，各个建筑群抗震韧性评价指标(设防所需费用、不同程度受损面积、房屋直接经济损失、修复

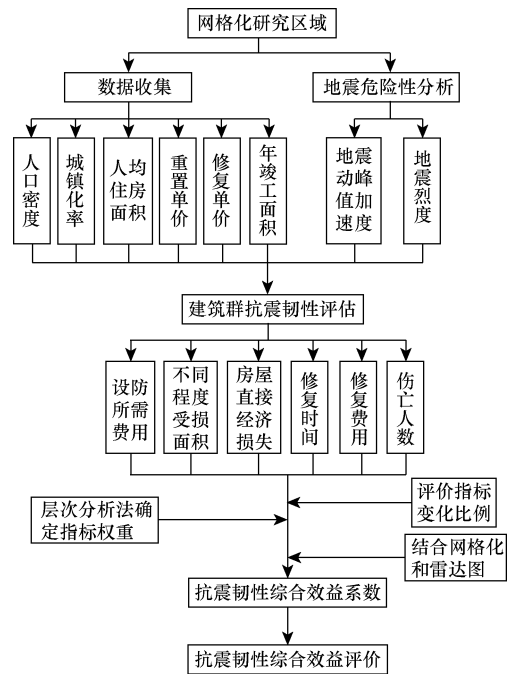


图 1 抗震韧性评估流程图

Fig. 1 Flow chart of seismic toughness evaluation

时间、修复费用和伤亡人数)。运用层次分析法确定各指标权重,并计算各评价指标提升1度设防的变化比例,根据评价指标变化比例及其权重,确定评价指标矩阵。建立结合网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估模型,通过计算抗震韧性综合效益系数,对比分析提升设防前后的抗震韧性综合效益。

## 2 基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估方法的应用

### 2.1 研究区域概况及地震危险性分析

成都市位于四川盆地,全市下辖12个市辖区、3个县、代管5个县级市,总面积14 335 km<sup>2</sup>,常住人口2 093.78万人<sup>[15]</sup>。根据历史资料和中国地震台网数据显示,自公元前180—2020年以来,成都市及其周围发生4.0级以上地震700多起(如图2所示)。将成都市按照500 m×500 m等距离进行网格化,共得到56 662个网格。计算所有网格的最大地震烈度 $I_{max}$ 为5.9~9.4度,如图3所示。

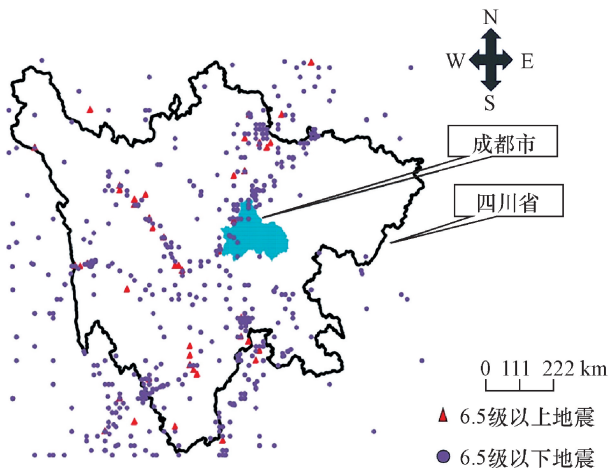


图2 成都市周围历史地震点分布示意图

Fig. 2 Distribution diagram of historical earthquake points around Chengdu

通过图3可以看出,地震的影响明显从西南部向东北部减弱,其原因是根据历史地震数据进行的地震危险性分析受历史大地震影响较严重。考虑网格受地震影响最危险的情况,所以大地震所造成的影响会覆盖周围小地震的影响。

### 2.2 未提升设防时建筑群抗震韧性指标

#### 2.2.1 设防所需费用

未提升设防时,成都市按第5代地震动区划图规定进行设防,根据式(1)计算得到成都市设防所需费用204.05亿元。其中,钢混结构110.23亿元、砖混结构66.94亿元、砖木结构21.08亿元、土坯结构3.16亿元、其他结构2.64亿元,各类结构占比和未提升设防所需费用,如表1所示。

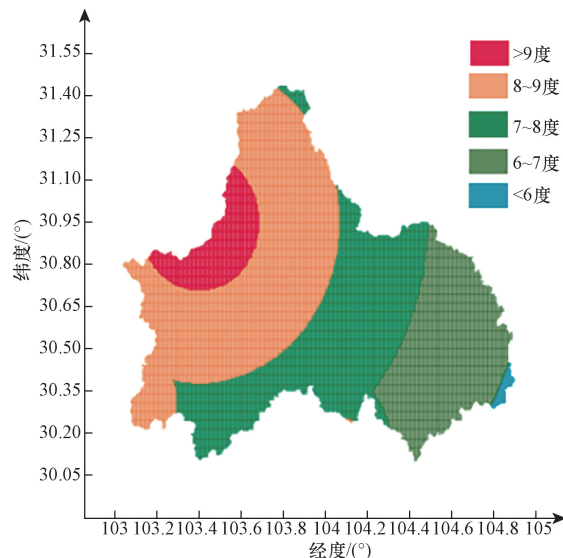


图3 地震烈度影响图

Fig. 3 Influence diagram of seismic intensity

表1 未提升设防时设防所需费用表

Table 1 The defense cost table when the fortification is not upgraded

结构类型	结构占比/%	设防所需费用/亿元
钢混	49.56	110.23
砖混	31.48	66.94
砖木	14.78	21.08
土坯	2.55	3.16
其他	1.64	2.64

#### 2.2.2 不同程度受损面积

根据式(2)和式(3)计算所有网格的受损面积,将每个区县所属网格的破坏面积相加,得到成都市各区县总破坏面积,并绘制成都市各区县总破坏面积分布图,如图4所示。

结果显示,成都市不同程度受损面积2.99亿m<sup>2</sup>,各区县破坏面积范围为185.28万~3 117.67万m<sup>2</sup>,成都市西北部和东南部区县总破坏面积较大。其中,由于简阳市设防烈度较低,破坏面积最大,

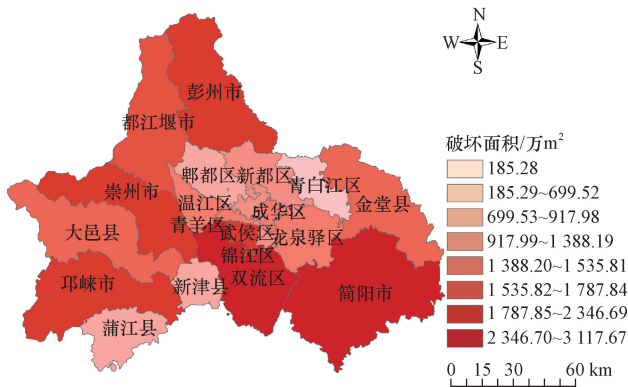


图4 成都市各区县总破坏面积分布图

Fig. 4 Distribution map of total damaged area in Chengdu

约 3 117.7 万 m<sup>2</sup>, 双流区总破坏面积其次, 约 3 070 万 m<sup>2</sup>, 青白江区总破坏面积最小, 约 185.3 万 m<sup>2</sup>。

### 2.2.3 房屋直接经济损失

损失比根据《中国大陆地震灾害损失汇编》<sup>[16]</sup> 确定。通过式(4) 计算成都市各区县房屋经济损失, 绘制成都市各区县房屋直接经济损失分布图, 如图 5 所示。

结果显示, 成都市房屋直接经济损失 1 198.76 亿, 各区县房屋直接经济损失房屋为 6.2 亿 ~ 117.1 亿元, 房屋直接经济损失由西北部地区向东南部地区逐渐减小, 其中崇州市和都江堰市房屋直接经济损失最大, 分别为 117.1 亿元和 116.4 亿元, 青白江区房屋直接经济损失最小, 为 6.2 亿元。

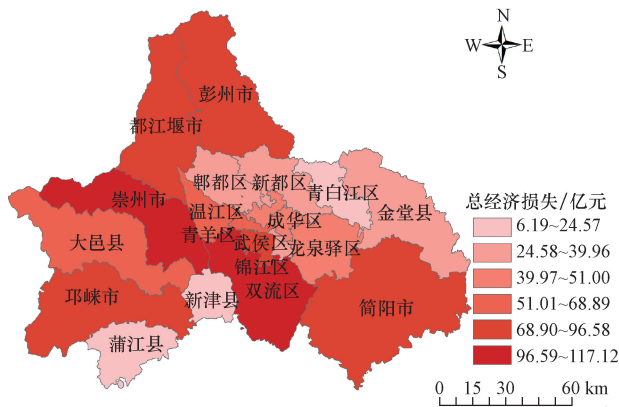


图 5 成都市各区县房屋直接经济损失图  
Fig. 5 Direct economic losses of houses by district and county in Chengdu City

### 2.2.4 修复时间

根据式(5), 计算成都市各区县总破坏修复时间, 绘制成都市各区县总破坏修复时间图, 如图 6 所示。

结果显示, 仅考虑成都市现有的施工能力, 总破坏修复时间为 11.84 a。其中, 崇州市和彭州市总

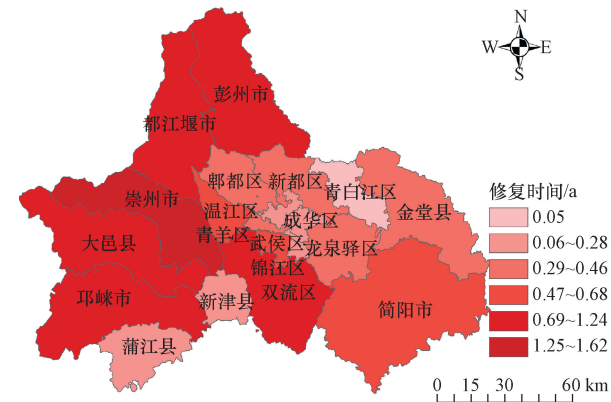


图 6 成都市各区县总破坏修复时间图  
Fig. 6 Total damage repair time of each district and county in Chengdu City

破坏修复时间最长, 分别约为 1.62 a 和 1.24 a。青白江区和锦江区总破坏修复时间最短, 分别约为 0.05 a 和 0.2 a。

### 2.2.5 修复费用

根据式(6), 计算成都市各区县总破坏修复费用, 并绘制成都市各区县修复费用图, 如图 7 所示。

结果显示, 成都市总修复费用 1 575.56 亿元, 各区县修复费用为 5.73 亿 ~ 443.07 亿元, 修复费用由西北部地区向东部、南部地区逐渐减少。其中, 都江堰市修复费用最多, 为 443.07 亿元。青白江区修复费用最少, 为 5.73 亿元。

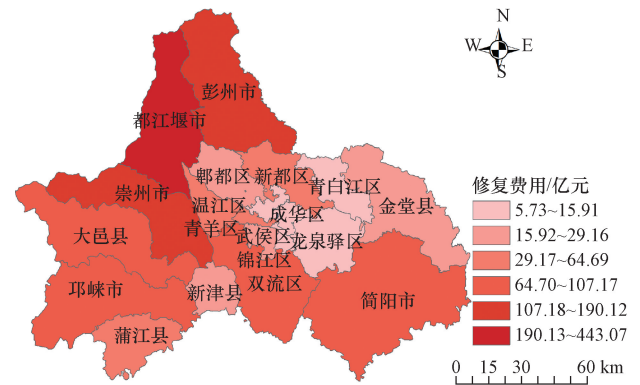


图 7 成都市各区县修复费用图  
Fig. 7 Restoration cost map of districts and counties in Chengdu City

### 2.2.6 伤亡人数

根据式(7) 和式(8), 计算地震造成的成都市人员伤亡数, 绘制成都市各区县伤亡人数分布图, 如图 8 所示。

结果显示, 成都市伤亡人数 251 305 人。其中, 死亡人数 60 244 人, 受伤人数为 191 061 人, 各区县伤亡人数范围为 986 ~ 42 364 人。其中, 崇州市伤亡人数最多, 死亡 10 229 人, 受伤 32 136 人; 青白江区伤亡人数最少, 死亡 231 人, 受伤 754 人。

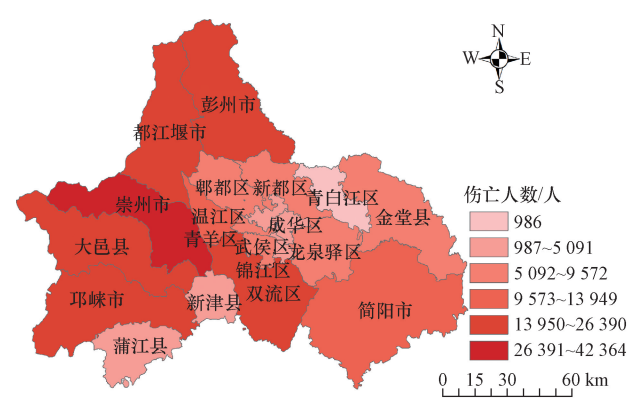


图 8 成都市各区县伤亡人数分布图  
Fig. 8 Distribution of casualties by district and county in Chengdu City

### 2.3 提升一度设防后建筑群抗震韧性指标

通过工程手段对成都市建筑群进行抗震韧性提升,在获取成都市现有韧性评估的基础上,分析提升1度设防所需费用。并对比分析提升前后,设防所需费用、不同程度受损面积、房屋直接经济损失、修复时间、修复费用和伤亡人数的变化比例,以研究抗震韧性的综合效益。

#### 2.3.1 设防所需费用及变化比例

根据式(1)计算成都市建筑群提升1度设防所需费用,并计算各类结构相比未提升时,设防所需费用的变化比例,如表2所示。

结合表1中结构占比数据,对比未提升设防和提升1度设防的设防所需费用的变化比例,得到成都市提升1度设防所需费用增加45.95%。

表2 提升1度设防所需费用表

Table 2 Cost table for raising fortification by 1 degree

结构类型	提升费用/亿元	变化比例/%
钢混	144.75	31.3
砖混	105.19	57.1
砖木	36.9	75
土坯	5.98	89.2
其他	5	89.4

#### 2.3.2 不同程度受损面积及变化比例

提升1度设防后,成都市建筑群破坏程度减轻,如图9所示,不同程度受损面积总体减少7856.3万m<sup>2</sup>,减少比例26.25%。其中,钢混结构、砖混结构、砖木结构、土坯结构和其他结构受损面积相比于设防烈度提升前,破坏面积减少比例分别为28.03%、27.90%、22.67%、9.56%和16.51%。

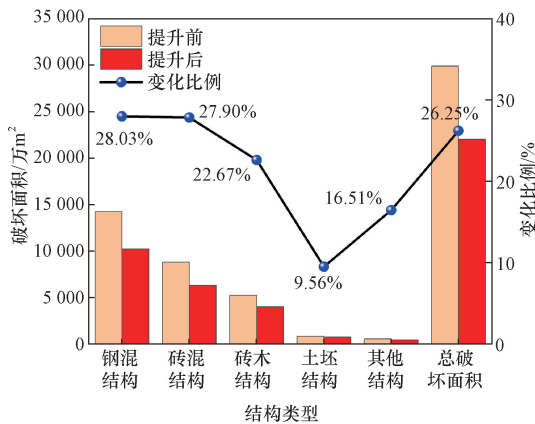


图9 受损面积对比图

Fig. 9 Comparison of damaged area

#### 2.3.3 房屋直接经济损失及变化比例

提升1度设防后,成都市房屋直接经济损失减少442.78亿元,减少比例为37.75%,如图10所示。其中,钢混结构、砖混结构、砖木结构、土坯结构和其他结构的房屋直接经济损失相比于设防烈度提升

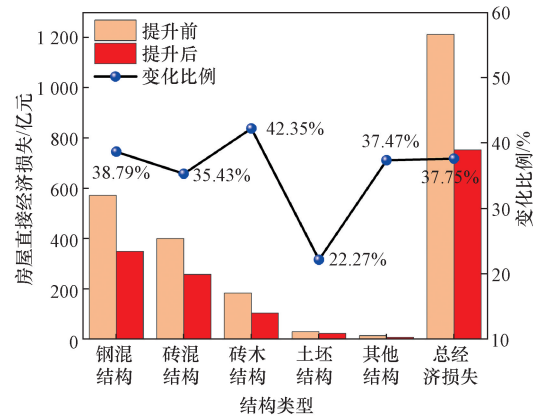


图10 房屋直接经济损失对比图

Fig. 10 Comparison of direct economic losses of houses

前,减少比例分别为37.08%、35.43%、42.35%、22.27%和37.47%。

#### 2.3.4 修复时间及变化比例

提升1度设防后,成都市总修复时间减少5.34年,减少比例为45.08%,如图11所示。其中,钢混结构、砖混结构、砖木结构、土坯结构和其他结构修复费用相比于设防烈度提升前,减少比例分别为53.23%、37.28%、52.55%、24.16%和38.52%。

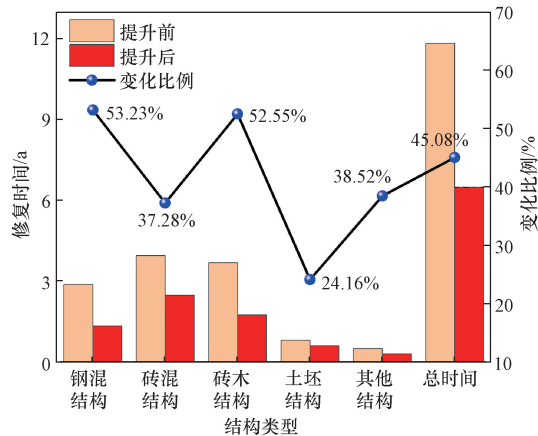


图11 修复时间对比图

Fig. 11. Comparison of repair time

#### 2.3.5 修复费用及变化比例

提升1度设防后,成都市总建筑修复费用减少442.78亿元,减少比例为44.24%,如图12所示。其中,钢混结构、砖混结构、砖木结构、土坯结构和其他结构的修复费用相比于设防烈度提升前,减少比例分别为49.61%、39.62%、48.1%、23.43%和35.84%。

#### 2.3.6 伤亡人数及变化比例

提升1度设防后,成都市伤亡人数减少121072人,减少比例为48.18%,如图13所示。其中,钢混结构、砖混结构、砖木结构、土坯结构和其他结构相比于设防烈度提升前,伤亡人数分别减少54.44%、

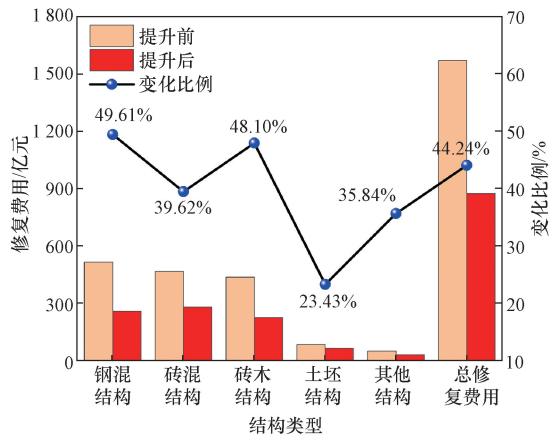


图 12 修复费用对比图

Fig. 12 Comparison of restoration costs

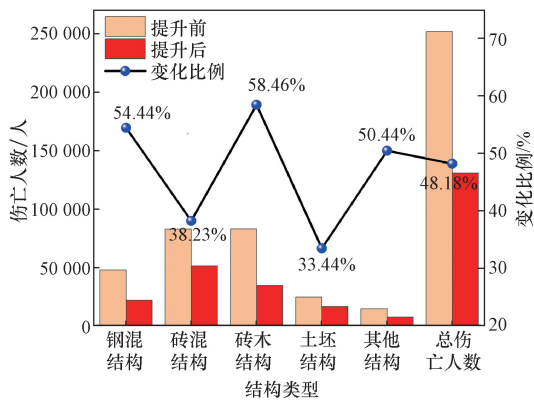


图 13 伤亡人数对比图

Fig. 13 Comparison of casualties

38.23%、58.46%、33.44%和50.44%。

#### 2.4 建筑群抗震韧性综合效益分析

根据前文计算结果,提升1度设防后,设防所需费用增加45.95%、不同程度受损面积减少26.25%、房屋直接经济损失减少37.75%、修复时间减少45.1%、修复费用减少44.24%、伤亡人数减少48.18%。根据1.2节层次分析法,构造判断矩阵,并得到各指标权重如表3所示。由于研究中有2个评价对象(未提升设防和提升1度设防),因此,评价指标组成的指标矩阵如式(12)所示。

$$Z_1 = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{21} \\ z_{12} & z_{21} \\ z_{13} & z_{31} \\ z_{14} & z_{41} \\ z_{15} & z_{51} \\ z_{16} & z_{61} \end{pmatrix} \quad (12)$$

根据式(10),计算出式(12)中2个评价对象的各个评价指标,如表4所示。结合所提出的建筑群抗震韧性评估模型,绘制抗震韧性综合效益雷达图,如图14所示。其中,雷达图中的数据为无量纲量,仅帮助计算雷达图中多边形的面积,从而衡量式(11)中的抗震韧性综合效益系数的大小。

根据式(11)计算可知,未提升设防的抗震韧性

表 4 评价指标表

指标	未提升设防	提升1度设防
设防所需费用	0.330 1	0.481 8
不同程度受损面积	0.054 7	0.040 3
房屋直接经济损失	0.058 8	0.036 6
修复费用	0.123 5	0.067 8
修复时间	0.130 9	0.073 0
伤亡人数	0.302 0	0.145 0

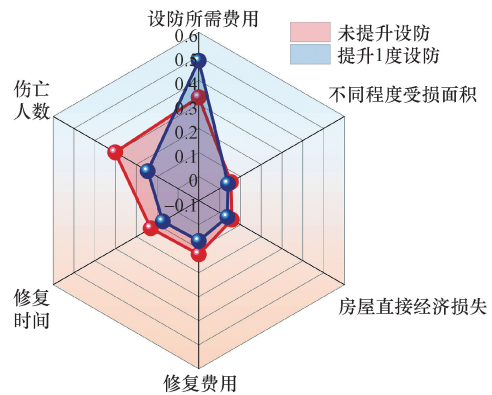


图 14 抗震韧性综合效益雷达图

Fig. 14 Seismic toughness comprehensive benefit radar map

表 3 判断矩阵及指标权重

Table 3 Judgment matrix and index weight

指标	设防所需费用	不同程度受损面积	房屋直接经济损失	修复费用	修复时间	伤亡人数	权重/%
设防所需费用	1	5	5	4	3	1	33.01
不同程度受损面积	1/5	1	1	2	4	5	5.47
房屋直接经济损失	1/5	1	1	2	3	4	5.88
修复费用	1/4	1/2	1/2	1	2	3	12.35
修复时间	1/3	1/4	1/3	1/2	1	3	13.09
伤亡人数	1	1/5	1/4	1/3	1/3	1	30.20

综合效益系数为 0.079 6,提升 1 度设防的抗震韧性综合效益系数为 0.047 1。通过对比未提升设防和提升 1 度设防的抗震韧性综合效益系数的变化,得到成都市提升 1 度设防的抗震韧性综合效益提升 40.8%,提升效果明显。

### 3 结论

以建筑群设防所需费用、不同程度受损面积、房屋直接经济损失、修复时间、修复费用和伤亡人数作为抗震韧性综合效益评价指标,运用层次分析法确定指标权重,建立了基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估模型。通过对比分析该模型中的抗震韧性综合效益系数发现,相比于未提升设防,提升 1 度设防后,成都市建筑群抗震韧性综合效益提升 40.8%,提升效果明显。提出的基于网格化和雷达图的建筑群抗震韧性评估方法,可以根据不同城市的建筑群和经济情况,因地制宜调整模型参数,为不同城市的防震减灾工作提供参考。

#### 参 考 文 献

- [1] Gobbo D M G, Williams S M, Blakeborough A. Seismic performance assessment of Eurocode 8-compliant concentric braced frame buildings using FEMAP-58 [J]. *Engineering Structures*, 2018, 155: 192-208.
- [2] Almufti I, Willford M. Resilience-based earthquake design (REDiTM) rating system [R]. London: Arup, 2014.
- [3] 王龙,李海旺,宋夏芸,等. 橡胶板式支座锚栓超低周疲劳断裂分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(24): 9996-10002.  
Wang Long, Li Haiwang, Song Xiayun, et al. Analysis of ultra-low cycle fatigue fracture of rubber plate bearing anchor [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(24): 9996-10002.
- [4] 张涵. 社区建筑群的抗震韧性评估研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
Zhang Han. Community building community earthquake resilience assessment research [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Seismic toughness evaluation standards for buildings: GB/T 38591—2020 [S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- [6] 程桢钰. 呼和浩特市既有建筑群抗震韧性评估及其提升对策 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2022.  
Cheng Zhenyu. Earthquake resilience assessment of existing buildings in Hohhot City and its improvement measures [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2022.
- [7] 李树楨, 李冀龙. 房屋建筑的震害矩阵计算与设防投资比确定 [J]. *自然灾害学报*, 1998(4): 106-114.  
Li Shuzhen, Li Jilong. Earthquake damage matrix calculation and investment ratio determination of building fortification [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1998(4): 106-114.
- [8] 全国地震标准化技术委员会. 地震现场工作-第 4 部分 灾害直接损失评估: GB/T 18208.4—2011 [S]. 北京: 地震出版社, 2011.  
National Technical Committee for Earthquake Standardization. Earthquake field work-Part 4: assessment of direct damage from disasters. GB/T 18208.4—2011 [S]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2011.
- [9] 刘迅, 赵媛媛, 路炫腾, 等. 城市既有住宅抗震韧性评价及提升策略——以张家口市为例 [J]. *河北科技大学学报(社会科学版)*, 2023, 23(1): 77-84.  
Liu Xun, Zhao Yuanyuan, Lu Xuanteng, et al. Evaluation and improvement strategy of seismic toughness of existing residential buildings: a case study of Zhangjiakou City [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology (Social Science Edition)*, 2023, 23(1): 77-84.
- [10] 张洁, 高惠瑛, 刘琦, 等. 基于汶川地震的地震人员伤亡预测模型研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(3): 59-64.  
Zhang Jie, Gao Huiying, Liu Qi, et al. Model based on Wenchuan earthquake casualties of the earthquake prediction research [J]. *Chinese Journal of Safety Science*, 2011, 21(3): 59-64.
- [11] 严淳鯤, 吕红刚, 孙巧雷, 等. 基于风险矩阵和层次分析法的深水气井测试作业风险评估 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(23): 9851-9855.  
Yan Chunjun, Lü Honggang, Sun Qiaolei, et al. Risk assessment of deepwater gas well test operation based on risk matrix and analytic hierarchy process [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(23): 9851-9855.
- [12] 李云珠. 基于地震动小区划的重庆市主城区设计地震动参数确定 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.  
Li Yunzhu. Determination of design ground motion parameters in Chongqing main urban area based on ground motion microzoning [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [13] 何芳芳. 宝鸡市地震危险性分析 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.  
He Fangfang. Seismic risk analysis of Baoji City [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [14] 全国地震标准化技术委员会(SAC/TC 225). 中国地震烈度表: GB/T 17742—2020 [S]. 北京: 地震出版社, 2020.  
National Earthquake Standardization Technical Committee (SAC/TC 225). China earthquake intensity scale: GB/T 17742—2020 [S]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2020.
- [15] 成都市统计局. 2022 年成都市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.  
Chengdu Bureau of Statistics. Chengdu statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [16] 中国地震局震灾应急救援司. 2006—2010 年中国大陆地震灾害损失评估汇编 [M]. 北京: 地震出版社, 2015.  
Department of Earthquake Emergency Rescue, China Earthquake Administration. 2006—2010 Chinese mainland earthquake disaster loss assessment compilation [M]. Beijing: Earthquake Press, 2015.