

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220815001

# 基于建筑群震害仿真的应急疏散路径规划方法研究\*

周亦威<sup>1</sup>, 陈辉<sup>2,3</sup>, 林旭川<sup>2,3</sup>, 陈子峰<sup>2,3</sup>

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093; 2. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080; 3. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080)

**摘要:**地震中沿街建筑的破坏通常会造成邻近道路大面积瓦砾堆积导致道路不畅,对应急救援产生不利影响。传统区域瓦砾堆积分析通常由单体结构分析并推演至区域层面,其过程需要大量数据支持且计算过程繁重。为突破这一瓶颈,使用弹塑性时程分析工具对研究区域内建筑地震损伤情况进行计算,并将精确到每一时刻的建筑动力响应和损伤指标结果进一步用于区域瓦砾堆积仿真计算,其计算速度和精确性可进一步匹配应急救援的时间和精度需求。所采用的震害仿真工具能考虑建筑结构类型差异,并且可充分考虑结构动力特性与地震动破坏力特征。最后,以龙头山镇建筑群为例,基于区域瓦砾堆积仿真结果,采用Frank-Wolfe算法为各受灾点进行疏散路径规划,研究方法可为震后应急疏散提供参考。

**关键词:**鲁甸6.5级地震;建筑群震害模拟;村镇建筑群;震后应急交通分配;应急疏散

**中图分类号:** P315; U491.1<sup>+</sup>23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1174-09

## Research on Emergency Evacuation Route Planning Method based on Building Groups Seismic Damage Simulation

ZHOU Yiwei<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2,3</sup>, LIN Xuchuan<sup>2,3</sup>, CHEN Zifeng<sup>2,3</sup>

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

3. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The destruction of buildings along the street in earthquakes usually causes large areas of rubble accumulation on adjacent roads, which leads to road blockage and adversely affects emergency rescue. The traditional analysis of regional debris accumulation is usually deduced from the analysis of a single structure to the regional level. The process needs a lot of data support and the calculation process is arduous. In order to break through this bottleneck, this paper uses the elastic-plastic time-history analysis tool to calculate the seismic damage of buildings in the study area, and further applies the results of building dynamic response and damage index of each moment to the simulation of regional

\* 收稿日期:2022-08-15;修回日期:2022-10-30

**基金项目:**国家自然科学基金(U1901602)、教育部人文社科青年基金(22YJC790189)、上海高校青年教师培养资助计划资助

**作者简介:**周亦威(1987—),男,讲师,硕导,博士。主要从事交通出行行为分析等研究。E-mail: zywadam@163.com

**通讯作者:**陈辉(1997—),男,硕士研究生。主要从事抗震方面的研究。E-mail: m17730174707@163.com

gravel accumulation. The calculation speed and accuracy can further match the time and accuracy requirements of emergency rescue. The adopted seismic damage simulation tool can consider the difference between building structure types, and fully consider the dynamic characteristics of the structure and the characteristics of seismic destructive force. Finally, taking the building group of Longtoushan Town as an example, based on the simulation results of regional gravel accumulation, the Frank-Wolfe algorithm is used to plan the evacuation path for each disaster point. The research method can provide references for emergency evacuation after earthquakes.

**Keywords:** LuDian Ms6.5 earthquake; seismic damage simulation of buildings; rural buildings; seismic damage analysis; emergency traffic distribution after earthquake; emergency evacuation.

## 引言

地震通常具有突发性、影响范围大等特点,且震后建筑瓦砾阻塞一般会导致应急疏散过程中出现交通拥堵、组织混乱等问题。因此,合理地规划应急疏散路径对震后应急救援具有重要意义。有研究表明,沿街建筑的瓦砾阻塞是影响震后城市道路通行能力的最主要因素之一<sup>[1]</sup>。由于路段上的瓦砾堆积宽度通常由建筑结构类型、结构高度、与路段的相对位置等多种因素决定,理论上可以利用单体结构分析并预测瓦砾堆积情形,但是将建筑群作为研究对象时,此方法需要大量的数据支持,计算繁重,难以在实践中应用<sup>[2]</sup>。

考虑瓦砾堆积阻塞情况下的路段剩余通行能力可搭建应急疏散路网,进而可使用交通流分配算法获取该路网中指定起讫点间的疏散最优路径。目前,获取路段通行能力的方法主要有三种:第一种是通过实地调查,获得路段的实际通行能力,如美国《道路通行能力手册》(Highway Capacity Manual, HCM)的研究<sup>[3-4]</sup>;第二种是通过仿真软件对道路通行能力进行分析,如基于 VISSIM 仿真软件对交通事故下道路通行能力的分析<sup>[5]</sup>;第三种是利用相似情况下的统计数据,获取路段通行能力折减系数,通过对理想通行能力进行折算进而获得路段实际的通行能力<sup>[6]</sup>。由于前两种方法无法应对震后应急疏散的时间要求,且第三种方法主要统计了交通事故造成原有路段宽度变小,进而导致路段通行能力下降相关的海量数据。瓦砾阻塞情形下同样会造成原有路段宽度变小,故在瓦砾堆积情形下评估震后路段剩余通行能力可参考方法三,即考虑将沿街建筑在震后产生的坠落物纳入道路通行能力的

影响范畴<sup>[7]</sup>。

为探析高效减灾途径,突破传统基于经验和震害统计分析建筑群震害的方法瓶颈<sup>[8]</sup>,考虑使用震害仿真方法进行震害模拟。目前城市建筑震害模拟方法主要有易损性矩阵方法<sup>[9]</sup>和能力-需求方法<sup>[10]</sup>等,前者主要以数据驱动,对历史震害数据依赖性强;后者基于单自由度静力推覆分析,对结构高阶振型考虑欠缺,结果准确性不足。本文基于震害模拟器对建筑群进行震害仿真,仿真过程中建立的是以层为单位的简化倒塌模型,匹配了快速建模的时间要求。模型可给出建筑各层在任意倒塌时刻的动力响应,其输出参数在用于瓦砾仿真计算时可进一步考虑地震动特性和建筑倒塌的方向性,匹配了瓦砾堆积范围预测的精确性要求。在区域瓦砾堆积仿真计算结果基础之上,采用静态交通分配模型,并使用非线性规划算法 Frank-Wolfe 算法进行求解。静态分配模型即使未考虑交通参与者的主观选择性对路阻函数的影响,但其规避了动态交通分配过程所需时间更久、输入参数多且精度要求高、迭代收敛困难等问题<sup>[11]</sup>。以龙头山镇建筑群为研究对象,验证了震害模拟器的有效性,并计算了实测地震动下的瓦砾堆积仿真计算结果,最后给出了各受灾点至避难场所的最优疏散路径。研究方法可为震后应急救援提供一种可参考的技术手段。

## 1 方法介绍

本文结合建筑群震害仿真方法,对震后路段剩余通行能力进行评估并据此搭建应急疏散路网,最后运用静态交通分配模型进行应急疏散路径规划,主要研究方法如下。

### 1.1 区域建筑群震害及瓦砾堆积仿真原理

进行建筑群震害仿真过程中使用的震害模拟器<sup>[12-13]</sup>如图1所示,可分为自动化建模、高性能计算、深度分析和可视化三个模块。其中建模模块是通过GIS数据中所包含的结构高度推算结构周期,建筑几何轮廓估算结构质量,进而获取结构层刚度。根据我国大震反应谱,以及地震剪力与结构承载力、延性的关系估算结构层间极限承载力,根据结构特点选择合适的弹塑性恢复力模型,可建立多剪切弹簧模型;高性能计算模块根据输入的双向地震动信息对建筑群进行弹塑性时程分析,可获取各建筑各层的位移、速度、层间变形、损伤等结构动力响应信息的时程数据。深度分析和可视化模块可获取损伤分布、建筑倒塌情况等信息。

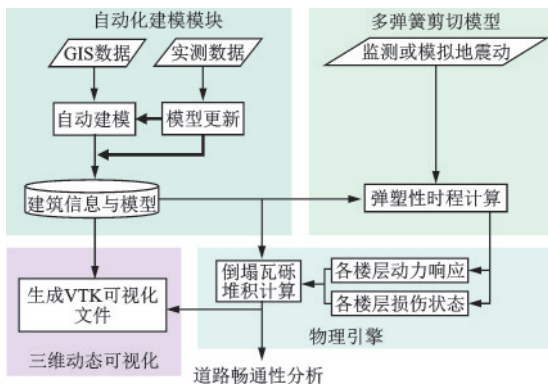


图1 仿真系统功能模块组成

Fig.1 Composition of simulation system function modules

采用基于震害模拟器的建筑损伤输出参数,模拟出震后建筑瓦砾对原有路段的覆盖范围<sup>[7]</sup>,故将传统的单体建筑倒塌仿真模拟拓展至区域层次。由于研究区域内建筑群缺乏详细的结构信息,导致难以建立精细化倒塌模型进行计算,所以方法将研究区域建筑群建立成以层为单位的简化倒塌模型,通过弹塑性时程分析计算出各建筑的倒塌时刻及该时刻各层动力响应,基于上述信息再计算瓦砾堆积范围。在建筑震后废墟仿真过程中,由于进一步考虑了地震动特性和建筑倒塌的方向性,匹配了区域瓦砾仿真结果的精确性要求,可为后续的道路剩余通行能力评估奠定良好基础。

基于震害模拟器输出的建筑倒塌时各楼层的运动状态与损伤情况如图2所示,可在物理引擎中建立建筑物的倒塌模型并计算。在区域研究中,较

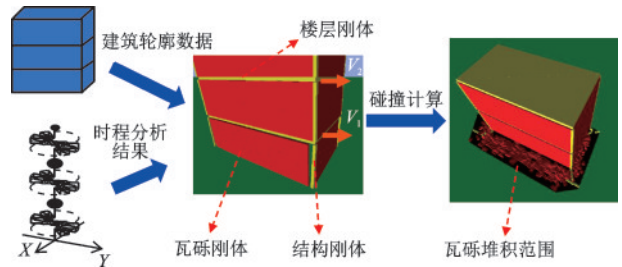


图2 建筑简化倒塌模型

Fig.2 Composition of simulation system function modules

难识别每栋建筑结构构件的实际分布。因此,建筑简化模型中将建筑简化由三类刚体单元组成,即结构刚体、瓦砾刚体和楼板刚体。

(1)结构刚体代表主体结构的承载功能(包括柱、承重墙等构件的承重功能),保证结构稳定。在倒塌过程中,根据震害计算结果,倒塌层结构刚体端部的约束被放松,上部结构即可按倒塌时的运动状态开始倒塌。

(2)瓦砾刚体用于模拟建筑的外墙体,包括砌体填充墙、承重墙等,在倒塌模拟中作为非结构部件参与计算。在倒塌的过程中,瓦砾刚体受到上部结构挤压碰撞而飞出,形成瓦砾堆积范围的主要区域。

(3)楼板刚体包含建筑实际质量、几何形状和运动状态等信息。参考已有震害<sup>[14]</sup>,结构倒塌时楼板通常具有整体性,且楼板的结构信息很难获取。因此,将每层楼板都假定为刚体单元。

考虑沿街建筑在震后对路段造成的瓦砾堆积范围,可对震后路段剩余通行能力进行评估。

### 1.2 瓦砾阻塞情况下剩余通行能力评估

#### 1.2.1 路段基本通行能力

理论上的道路基本通行能力<sup>[15]</sup>是指在理想交通条件下,单位时间内通过某一断面的最大车辆数,但现实中难以达到理想交通条件。根据通行能力定义,假设单车道同一时刻仅通行以人为要素(由于疏散点和避难场所的距离近,且震后路段大多无法通车,故将人作为研究的主要交通流成分)的单条队列,可利用式 1.2.1<sup>[15]</sup>( $N = \frac{1000 \times V}{D}$ ,  $V$  为人的步行速度,假设为 4.5 km/h<sup>[16]</sup>;  $D$  为人与人的最小间隔,假设为 1.5 m;该式适用于单车道单列通行的情形)计算得到单车道理论基本通行能力大约

在3 000人/h。其中假设研究区域单车道(宽度约3.5 m)实际通行能力约为2 500人/h,双向车道(宽度约7 m)实际通行能力约为5 000人/h(上述各通行能力均针对行人为单列通行的情况)。

### 1.2.2 震后路段剩余通行能力

合理评估震后路段实际通行能力对应急疏散等抢险救灾活动至关重要,由于灾害条件下应急响应时间要求较为苛刻,若通过实地调查或利用仿真软件进行震后实际通行能力评估将无法完成应急疏散等工作的开展的时间需求。本文拟利用路况相似的统计数据获取路段通行能力折减系数,并对理想通行能力进行折减后获得道路实际通行能力。统计数据主要来源为美国《HCM2000》中基于对海量观测数据统计得出的交通事故所占车道数与剩余通行能力之间的定量关系<sup>[17]</sup>,表1为瓦砾阻塞情况下的道路通行能力折算系数。根据瓦砾堆积仿真计算结果,获得震后剩余路段宽度,计算可得路段实际通行能力,该参数可作为应急交通分配的输入数据。

表1 瓦砾阻塞情况下的道路通行能力折算系数<sup>[17]</sup>

Table 1 Conversion coefficients of road capacity under debris obstruction

原车道数	阻塞车道数量							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2	0.35	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3	0.49	0.17	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
4	0.58	0.25	0.13	0	N/A	N/A	N/A	N/A
5	0.65	0.40	0.20	0.10	0	N/A	N/A	N/A
6	0.71	0.50	0.26	0.14	0.07	0	N/A	N/A
7	0.75	0.57	0.36	0.17	0.08	0.05	0	N/A
8	0.78	0.63	0.41	0.23	0.09	0.05	0.04	0

### 1.3 应急交通分配模型及求解

获取到研究区域的路网中各路段震后剩余通行能力后可搭建应急疏散路网,在已有的应急路网中找寻各起讫点间的最优疏散路径需借助交通流分配模型并对其进行求解,为规避动态交通分配过程所需时间更久、输入参数多且精度要求高、迭代收敛困难等问题<sup>[11]</sup>,本文使用静态交通分配模型中的用户均衡模型对其进行构建并计算。

#### 1.3.1 用户均衡模型介绍

众多静态分配模型中应用较为广泛的用户均

衡模型为:没有任何一个出行者可以通过改变出行路线来缩短其出行时间<sup>[18]</sup>。Wardrop则提供了用户均衡模型的等价定义<sup>[19]</sup>,即Wardrop第一准则:对任意一个O-D对来说,所有被选择路径的出行时间都相等,并且要与未被选择路径的出行时间相等或者更短。采用的数学模型是Beckmann(1956)等交通规划学者所提出的一种满足Wardrop第一准则的交通规划数学模型<sup>[20]</sup>:

$$\min_{f \geq 0} z(f) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a(f)} p_a(\omega) d\omega \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r \in R \quad \forall s \in S \quad (2)$$

$$x_a(f) = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad (3)$$

$$c_k^{rs} = \sum_a t_a \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall k \in K_{rs} \quad \forall r \in R \quad \forall s \in S \quad (4)$$

式中, $a$ 为路网中所有的一条路段; $A$ 为路网中路段的集合; $R$ 为起点集合; $S$ 为终点集合; $r-s$ 为路网中的一个O-D对; $f_k^{rs}$ 为表示O-D对间的第 $k$ 条路径; $\delta_{a,k}^{rs}$ 为表示 $a$ 路段属于第 $k$ 条路径,且该路径属于O-D对 $r-s$ 间路径集合,则为1,否则为0。 $c_k^{rs}$ 为O-D对 $r-s$ 之间第 $k$ 条路径上所需花费的旅行时间; $x_a(f)$ 为表示途经路段 $a$ 所需的旅行时间和路段 $a$ 上的流量之间的关系,常用BPR函数进行表示:

$$p_a(x_a) = t_0 \left( 1 + \alpha \left( \frac{x_a}{c} \right)^\beta \right) \quad (5)$$

其中, $x_a$ 为路段 $a$ 上的流量; $t_0$ 为自由流情况下途经 $a$ 路段所需的旅行时间; $\alpha, \beta$ 为模型参数,分别取0.15和4; $C$ 为路段通行能力。

模型中,根据路网中任意O-D对 $r-s$ 之间每条被使用的径路上确定的流量 $f = (f_k^{rs})_{k \in K_{rs}}^{r \in R, s \in S}$ ,根据式(3)计算出各个路段上的流量 $x = (x_a)_{a \in A}$ ,据此根据式(5)算得每个路段上的旅行时间 $t = (t_a)_{a \in A}$ ,再利用式(4)算得 $r-s$ 间第 $k$ 条路径上的旅行时间 $(c_k^{rs})_{k \in K_{rs}}^{r \in R, s \in S}$ 。当指定的O-D对之间,存在 $c_{rs} > 0$ ,对于 $f_k^{rs} > 0$ 的路径,其 $c_k^{rs} \equiv c_{rs}$ 对于 $\forall k \in K_{rs}$ 都应当成立,而对于 $f_k^{rs} = 0$ 的路径,其旅行时间应当满足 $c_k^{rs} \geq c_{rs}$ 。

#### 1.3.2 Frank-Wolfe算法

Frank-Wolfe算法是解决上述非线性规划问题的有效方法之一,且在无路段容量限制的条件下, Frank-Wolfe算法可归结为最短路问题<sup>[21]</sup>。其算法

步骤为:

步骤0:初始化。令所有路段流量均为0以获得  $\{c_a^0\}=\{c_a(0)\}$ ,依次确定所有 O-D 对  $r-s$  间的最短路径  $k_{rs}^0$ ,将  $r-s$  间的交通流量  $q_{rs}$  全部加载至  $k_{rs}^0$ ,即:  
 $f_{k_{rs}^0}^{rs} = q_{rs}$

此时的所有路段流量集合即为:  $\{x_a^1\}$

步骤1:更新。令  $t_a^n = p_a(x_a^n) \forall a \in A$ 。

步骤2:寻找下降方向。基于  $(t_a^n)_{a \in A}$ ,依次寻求当前所有 O-D 对  $r-s$  之间的最短路径  $k_{rs}^n$ ,并将  $r-s$  间的交通流量  $q_{rs}$  分配到路径  $k_{rs}^n$  上,即:  $f_{k_{rs}^n}^{rs} = q_{rs}$

得到附加路段流量集合  $(y_a^n)_{a \in A}$ 。

步骤3:线性搜索。确定  $\theta \in [0, 1]$ ,使得(6)式取得最小值

$$\min_{0 \leq \theta \leq 1} z(\theta) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^n + \theta(y_a^n - x_a^n)} p_a(\omega) d\omega \quad (6)$$

观察发现:

$$z'(\theta) = \sum_{a \in A} p_a(x_a^n + \theta(y_a^n - x_a^n))(y_a^n - x_a^n) \quad (7)$$

$$\tilde{z}''(\theta) = \sum_a p_a'(x_a^n + \theta(y_a^n - x_a^n))(y_a^n - x_a^n)^2 \quad (8)$$

路阻函数  $p_a$  是严格递增的,所以当  $\theta \in [0, 1]$  时  $\tilde{z}''(\theta) \geq 0$  恒成立,可以使用二分法或者黄金分割法等数学方法对  $\theta$  进行求解。

步骤4:移动。

$$x_a^{n+1} = x_a^n + \theta(y_a^n - x_a^n) \quad \forall a \in A \quad (9)$$

步骤5:判定收敛性。如果:

$$\sqrt{\sum_a (x_a^{n+1} - x_a^n)^2} / \sum_a x_a^n \leq \epsilon \quad (10)$$

成立,程序结束,否则  $n = n + 1$ ,跳转至步骤2。

## 2 震害模拟器有效性验证

为验证震害模拟器有效性,以2014年鲁甸6.5级地震为例进行震害仿真计算并验证。

### 2.1 实例概况

研究区域共有建筑192栋,其中老集镇167栋,新集镇25栋。震后的建筑损伤分布结果如图3所示,其中老集镇域内建筑大部分发生严重破坏甚至倒塌,而新集镇域内建筑表现出良好的抗震性能。二者震害出现巨大反差,主要是由于老集镇地处洪积扇缓坡,坡度大,导致老集镇场地土质复杂多样,场地非线性效应显著;而新集镇位于河流阶地,地势平坦;其次,老集镇域内建筑大多建造年代早且

多为非抗震房屋,而新集镇域内建筑多为经过正规抗震设防的新建建筑<sup>[22]</sup>。

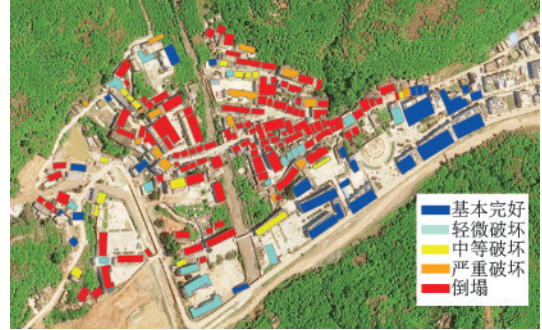


图3 龙头山镇震后结构损坏分布

Fig.3 Distribution map of structural damage after earthquake in Longtoushan village

### 2.2 震害仿真结果及验证

地震动数据采集自龙头山台站(053LLT),该台站位于老集镇区域内,将其作为仿真计算中的输入地震动可反应研究区域震后真实情况。仿真计算中,地面加速度峰值PGA分别为943 gal(EW方向)、629 gal(NS方向)的一组双向水平地震动输入至震害模拟器,基于震害指数<sup>[23]</sup>对建筑震后损伤等级进行划分,二者的对应关系见表2。震害仿真结果如图4所示,从震害仿真结果中可明显看出新老集镇的震害仿真结果同样表现出显著差异。将各单元震害等级和对应建筑实际震害等级进行对比

表2 震害等级与震害指数对应关系

Table 2 Correspondence between earthquake damage level and earthquake damage index

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏或倒塌
	好	坏	坏	坏	倒塌
震害指数	0.10	0.30	0.55	0.85	>0.85

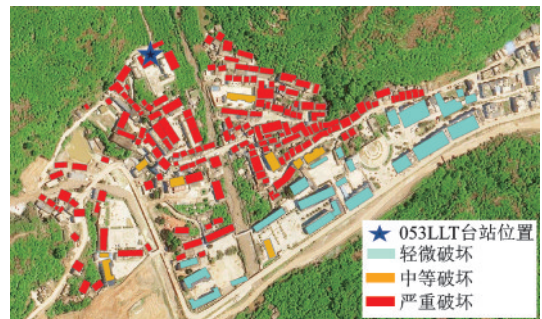


图4 震害仿真结果

Fig.4 Earthquake damage simulation results

得出震害等级差分布图,如图5所示。其中实际震害等级和仿真结果一致的单元数量占61%。等级差分布图中的深色单元表明震害模拟结果与实际情况存在一定误差。实际上,一次震害仿真结果精度不仅取决于分析软件的参数设置,同时仿真结果也会受震害调查结果及场地条件等多方面原始数据的影响,如现场调查人员对震害等级的主观性偏差、建筑结构强度的随机性等扰动因素。所以在区域层次可以认为该次震害模拟结果误差在可接受范围内,说明当前龙头山镇建筑群震害仿真模型具有一定有效性,模型的输出参数为后续区域瓦砾堆积仿真计算奠定基础。



图5 模拟震害与实际震害等级差分布  
Fig.5 Distribution map of grade difference between simulated earthquake damage and actual earthquake damage

### 3 应急疏散路径分析

#### 3.1 数据准备

基于实例中震害仿真方法和建筑几何模型,将建筑群震害仿真结果运用至瓦砾堆积仿真计算,获得沿街建筑对交通系统影响范围,其结果如图6所示。从图中可以看出震害相对严重的老集镇建筑均对其自身邻近范围内造成了不同程度的瓦砾堆积,而新集镇建筑在震后几乎不会对其邻近范围造成影响,瓦砾堆积仿真结果在新老集镇间表现出的差异性与实际震害在二者之间的差异性趋于一致。

依据路段剩余宽度,将公路划分为三个等级,见表3。

根据瓦砾堆积仿真分析得到震后道路可通行情况,如图7所示。图中震害相对严重的老集镇出现大量路段被大面积覆盖或完全覆盖,其路段通行能力严重下降,在未清障之前几乎无法通车,故交

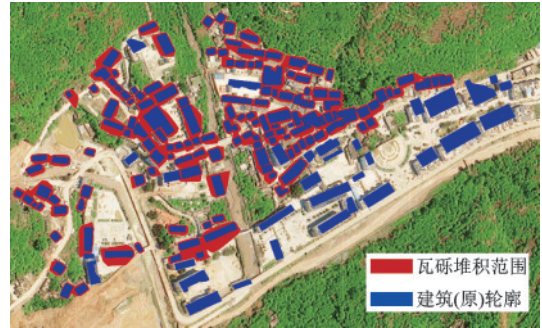


图6 龙头山镇震后瓦砾堆积分布  
Fig.6 Distribution map of rubble accumulation after Longtoushan earthquake

表3 震后道路通行能力

Table 3 Definition of post-earthquake road capacity

道路状态	剩余道路宽度/m	说明
堵塞	0~3.5	单人通行
单向通行	3.5~7	双人并排通行
双向通行	7以上	双人或多人并排通行

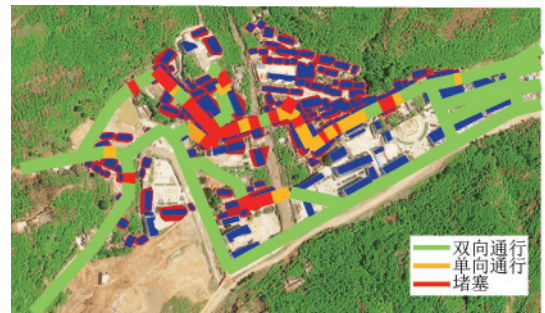


图7 瓦砾阻塞情况下的路网  
Fig.7 Road network blocked by rubble

通流分配以人作为主要考虑对象。

根据原有路段宽度和瓦砾阻塞情况下剩余路段宽度,可以获得瓦砾阻塞情况下的路段实际通行能力,其中瓦砾阻塞情况下的道路通行能力折算系数见表1。震前的双向通行车道在震后可划分为阻塞路段、单向通行、双向通行三个等级,据表1在假设阻塞情况下的折减系数取0.1,可得三类路段的实际通行能力分别为:双向通行路段为5000人/h,单向通行路段为 $2500 \times 0.35 = 875$ 人/h,阻塞路段为 $2500 \times 0.1 = 250$ 人/h。

对比各路段震前原有宽度及震后剩余宽度信息可搭建如图8所示的城市应急路网,其构成条件为43个节点,59条路段即 $G(N=43, A=59)$ 。其中,节点表示平面交叉口。为简化分析未考虑交叉口的交通延误等因素,59条路段的道路层次结构

为:9条单向通行路段、9条阻塞路段以及41条双向通行路段。本文中把人考虑为主要交通流成分时,对于瓦砾完全覆盖路段的情形下,若没有更优的可选择路段,则将瓦砾阻塞道路纳入可通行路段,并假设路段通行能力折减系数为0.1。本次研究旨在为灾点的受灾群众规划出最短疏散路径,故算法仅考虑群众从灾点到避难场所的路径选择。计算过程中假定各交通设施(如道路、桥梁等)在震后使用功能正常,此时双向通行路段的通行能力假定为单向通行路段的两倍。疏散起点为震后震害相对严重的老集镇(见图8圆形框选区域),疏散终点的选择可参考文献[24](见图8矩形框选区域),表4为该区域震后路网的基本信息。

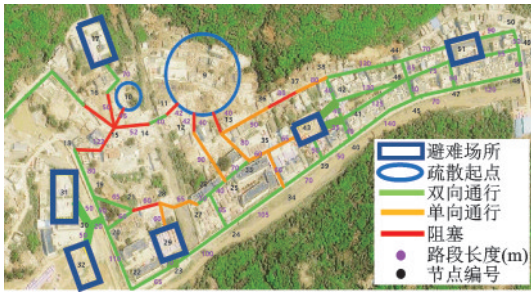


图8 龙头山镇震后应急路网

Fig.8 Emergency road network after Longtoushan earthquake

表4 应急路网基本信息

Table 4 Basic information of emergency road network

道路类型	通行能力/(人/h)	速度/(km·h) <sup>-1</sup>	并排通行人数
阻塞路段	250	2	1
单向通行	875	4.5	1
双向通行	5 000	4.5	2

### 3.2 疏散路径规划

根据震后瓦砾堆积仿真分析结果可假设震后受灾人员只通过步行进行疏散。在未获取研究区域震前人口分布情况详细数据情况下,利用当地建筑GIS数据假设平均每户3人,并对图8中疏散起点9、10的疏散需求进行估计,估算结果分别约为250人、100人。考虑到避难场所的距离受灾点的远近、容量、次生灾害及灾民居住地理位置等因素<sup>[25]</sup>,对各受灾点的疏散需求进行划分,见表5。

仿真过程中设置迭代精度  $\epsilon=1e-5$ ,可以发

表5 各受灾点疏散需求

Table 5 Evacuation needs of each disaster site

疏散起点	疏散终点					
	17	29	31	32	43	51
9	30	30	40	40	70	40
10	40	20	20	20	0	0

现,由于疏散需求基数小,基于Frank-Wolfe算法的前后两次迭代的最短路径一致,此时算法均衡解实质为直接找寻各起讫点之间的最短路径,并将各起讫点之间的交通需求所对应的流量直接加载至该路径。分析计算可得图9~10所示的交通流量分配结果。

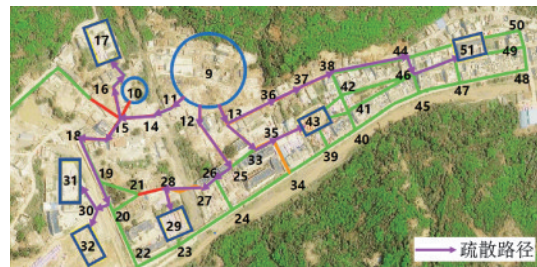


图9 受灾点9到各避难场所的疏散路径

Fig.9 Evacuation route from disaster-affected point 9 to each evacuation site

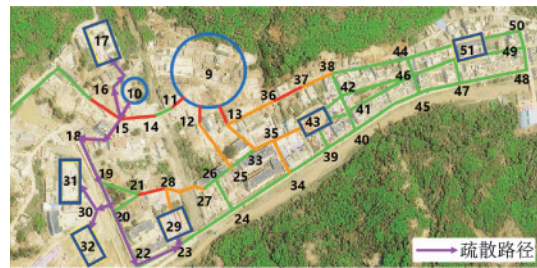


图10 受灾点10到各避难场所的疏散路径

Fig.10 Evacuation route from disaster-affected point 10 to each evacuation site

表6给出各疏散起讫点间的疏散路径的路段组成及疏散所需时间。由于研究实例中受灾群众数量较少,在计算过程中未出现某路段饱和度<sup>[26]</sup>过高的情况,其中饱和度相对较高的路段有:9-11、9-13、14-15、15-18,其饱和度分别为:0.44、0.44、0.44、0.56。可见,将震害仿真和交通流分配模型的结合,可快速定位应急路网中的易阻塞路段,对救援工作具有参考价值。

表6 疏散路径及疏散所需时间

Table 6 Evacuation route and time required for evacuation

O-D对	疏散路径	疏散时间/s
9-17	9→11→14→15→16→17	348
9-29	9→12→25→26→28→29	300
9-31	9→11→14→15→18→19→20→30→31	585
9-32	9→11→14→15→18→19→20→30→32	585
9-43	9→13→33→35→43	236
9-51	9→13→36→37→38→44→51	512
10-17	10→15→16→17	227
10-29	10→15→18→19→20→22→23→29	556
10-31	10→15→18→19→20→30→31	464
10-32	10→15→18→19→20→30→32	464

## 4 结论

利用震害仿真模型对区域建筑群进行建模和震害仿真,以龙头山镇建筑群作为震害仿真计算实例,其验证结果表明基于建筑群的震害仿真方法可用于震后应急疏散路径的规划和选择。本文主要工作及结论如下:

(1)运用震害模拟器的弹塑性时程分析功能与实测强震动数据对龙头山镇建筑群震害进行了仿真,对建筑的震害情况进行了再现,验证了建筑群模型的合理性。

(2)基于建筑震害模拟、瓦砾堆积计算等手段,以建筑群震害模拟结果作为瓦砾堆积仿真模型参数,提出了基于物理的震后路网的剩余通行能力评估方法。

(3)使用 Beckmann 模型及对应的 Frank-Wolfe 算法,实现了从道路剩余通行能力到疏散路径规划的静态交通流分析。

(4)以龙头山镇为例,开展了从建筑群地震破坏情况、瓦砾堆积分布、交通通行能力到交通流变化的全过程分析,该方法考虑了建筑地震响应的影响并快速定位应急路网中的易阻塞路段,可为震后人员疏散与应急救援的路径规划提供参考。

(5)在后续研究中,可在本文基础上分析疏散人员的疏散行为、震后道路自身的损毁以及次生灾害等因素对道路畅通性的影响。

## 参考文献:

- [1] 杜鹏. 交通系统震害预测中瓦砾堆积问题的改进[J]. 世界地震工程, 2007, 23(1):161-164.  
Du P. Improvement for the calculating method of debris piling problem in the earthquake damage forecasting of the transportation system [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(1):161-164. (in Chinese)
- [2] 肖佳. 城市交通系统震后应急韧性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
Xiao J. Resilience of urban transportation system in the post-earthquake emergency period: evaluation, analysis and optimization [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] Berry D S. Highway capacity manual[M]. Highway research board. Special Report 87. National Academy of Sciences. National Research Council. Publication 1328. Washington D C.1965.
- [4] Rahmi Akcelik. Australian Road Research Board. Proceedings of the second international symposium on highway capacity [M]. Australia: [s.n], 1994.
- [5] 邹家翠. 基于 VISSIM 仿真的交通事故下城市道路通行能力影响分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.  
Zou J C. Impact analysis of urban road capacity under traffic accident based on VISSIM simulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [6] 牛世峰, 姜桂艳. 灾害条件下公路通行能力折算方法研究[J]. 公路, 2013, 58(3):128-132.  
Niu S F, Jiang G Y. Research on highway traffic capacity conversion method under disaster conditions [J]. Highway, 2013, 58(3):128-132. (in Chinese)
- [7] 陈子峰. 基于物理的城市建筑群地震倒塌情景模拟方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.  
Chen Z F. Research on the simulation method of earthquake collapse scenarios for urban buildings based on physics [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [8] 潘毅, 易督航, 游文龙, 等. 泸县 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J/OL]. 土木工程学报: 1-14. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21121289.  
Pan Y, Yi D H, You W L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in M<sub>s</sub> 6.0 Luxian earthquake [J/OL]. China Civil Engineering Jour-

- nal: 1-14. DOI: 10.15951/j. tmge. 21121289. (in Chinese)
- [9] Rojahn C, Sharpe R L. Earthquake damage evaluation data for California[M]. Washington DC: Applied Technology Council, 1985.
- [10] Mr H M. Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model[M]. Washington, DC: Department of Homeland Security, FEMA, 2003: 235-260.
- [11] 龙建成, 郭嘉琪. 动态交通分配问题研究回顾与展望[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 125-138.  
Long J C, Guo J Q. Review and prospect of dynamic traffic assignment research[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 125-138. (in Chinese)
- [12] 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(3): 18-22.  
Lin X C. Numerical Simulation and risk control of earthquake hazards in urban building groups[J]. Cities and Disaster Mitigation, 2017(3): 18-22. (Chinese)
- [13] Lin X, Wang K, Zhang L, et al. Development of a simulation platform to model, assess and visualize the earthquake disasters in city level[C]//Chania, GREECE: The 2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure 23-26 June, 2019.
- [14] Schweier C, Markus M. Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2006, 4(2): 177-192.
- [15] 贾晓敏. 城市道路通行能力影响因素研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
Jia X M. Research on influence factors of urban road capacity[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [16] Shi L, Xie Q, Cheng X, et al. Developing a database for emergency evacuation model[J]. Building and Environment, 2009, 44(8): 1724-1729.
- [17] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2000 [M]. Washington D C: National Research Council, 2000: 1059.
- [18] Sheffi Y. Urban transportation networks[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985.
- [19] Wardrop J G. Road paper. some theoretical aspects of road traffic research[J]. Proceedings of the institution of civil engineers, 1952, 1(3): 325-362.
- [20] Beckmann M, Mc Guire C B, Winsten C B. Studies in the Economics of Transportation[R]. Yale University Press, New Haven, 1956.
- [21] 李峰, 王书宁. 基于 Frank-Wolfe 算法的路径交通量求解方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(6): 70-74.  
Li F, Wang S N. Solution for route traffic flows based on Frank-Wolfe algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(6): 70-74. (in Chinese)
- [22] 刘雪艳. 龙头山镇建筑群精细化地震破坏模拟及震害风险评估[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.  
Liu X Y. Detailed earthquake damage simulation and earthquake damage risk assessment of longtoushan town buildings [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese)
- [23] 胡仁康. 基于建筑群震害仿真的地震人员伤亡分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.  
Hu R K. Research on the analysis method of earthquake casualties based on earthquake damage simulation of buildings[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [24] 林旭川, 刘雪艳, 胡仁康, 等. 鲁甸地震宏观震中建筑群震害分析与抗震韧性评估[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 449-455, 601.  
Lin X C, Liu X Y, Hu R K, et al. Regional damage analysis and resilience evaluation of buildings in the epicenter region of 2014 ludian earthquake [J]. Journal of Seismological Research., 2020, 43(3): 449-455, 601. (in Chinese)
- [25] 刘强, 阮雪景, 吴绍洪. 重大自然灾害应急避难场所选址原则与模型建构[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(5): 45-50, 54.  
Liu Q, Ruan X J, Wu S H. A study of principles on disaster emergency shelter site selection and modeling[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(5): 45-50, 54. (in Chinese)
- [26] 赖君. 基于路段饱和度的动态交通拥挤定价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
Lai J. Dynamic congestion pricing study based on the sections of saturation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)