

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221105002

地震下建筑倒塌及城市次生灾害链分析方法研究*

徐哲¹, 廖承帅¹, 林峰^{1,2}

(1. 同济大学建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 地震会导致建筑倒塌, 引发次生灾害在城市基础设施系统间传播。与建筑倒塌相关联的城市基础设施系统次生灾害链研究, 是评估城市抗震韧性的重要内容。本研究的目的是发展震后灾害链“建筑群倒塌-瓦砾堵塞致道路交通系统性能退化-消防系统功能下降”的分析方法。首先, 基于建筑倒塌瓦砾分布、道路交通系统通行效率与可达性、以及消防系统响应覆盖率与响应时间, 建立了“建筑群-道路交通-消防”多系统灾害链量化分析方法。其中, 引入有限元消失单元再现技术, 预测了地震下带填充墙混凝土框架倒塌瓦砾的完整分布。其次, 采用此方法分析了假想强震下上海市某区域震后的情景。最后, 提出城市抗震韧性提升建议。研究表明: 建立的方法可快速预测建筑倒塌瓦砾堵塞范围, 评估震后道路交通系统和消防系统性能水平。按此方法得到算例区域震后路网总通行时间最多增加26%, 路网节点可达性最多降低43%; 消防站响应覆盖率下降可达28%, 响应时间最多增加32%。

关键词: 地震倒塌; 灾害链; 韧性; 瓦砾分布; 道路交通系统; 消防系统

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0423-12

An Analytical Method for Earthquake-induced Building Collapse and Urban Secondary Disaster Chain

XU Zhe¹, LIAO Chengshuai¹, LIN Feng^{1,2}

(1. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structure of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Earthquakes can cause building collapse and trigger secondary disasters spreading among urban infrastructure systems. Hence, to assess urban seismic resilience, it is a critical issue to investigate the secondary disaster chain of urban infrastructure systems associated with building collapse. The purpose of this study is to develop an analytical method for the disaster chain of “collapse of building cluster, degradation of road traffic system performance due to debris blockage, and deterioration of fire protection system function”. Firstly, the analytical method was quantitative and achieved by using the distribution of collapsed debris, efficiency and accessibility of the road traffic system, as well as response coverage ratio and response time of the fire protection system. Especially, a technique was applied to reproduce disappearing elements in the finite element method. As a result, the comprehensive distribution of earthquake-induced debris was depicted for concrete frame structures with infill

* 收稿日期: 2022-11-05; 修回日期: 2022-12-31

基金项目: 国家重点研发计划专项(2022YFC3803000)、同济大学土木工程 I 类高峰学科建设项目(C233ZD03)资助

作者简介: 徐哲(1996—), 男, 博士研究生。主要从事地震下结构倒塌研究。E-mail: xuzhe@tongji.edu.cn

通讯作者: 林峰(1971—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事结构倒塌与韧性城市研究。E-mail: lin_feng@tongji.edu.cn

walls. Subsequently, as a case study, disaster scenarios were described for a region in Shanghai after a hypothetical strong earthquake. Finally, suggestions were proposed for improving urban seismic resilience. The results reveal that the proposed method effectively predicts the blocked range of debris, assesses the performance of both the road traffic system and fire protection systems post-earthquake. In the case study, the total travel time of the road network increased by up to 26%, and the accessibility of the road network nodes decreased by more than 43%. Regarding the fire protection system, the response coverage ratio decreased by a maximum of 28%, while the response time increased by up to 32%.

Keywords: earthquake-induced collapse; disaster chain; debris distribution; road traffic system; fire protection system; resilience

0 引言

城市汇聚了众多的人口、信息和财富。强烈地震将造成城市基础设施大量损毁和人员伤亡,并进一步引发次生灾害。开展震后城市灾害链的研究,对建设韧性城市具有重要意义。

针对城市基础设施单一子系统,已开展大量研究,如建筑群震损分析^[1]和人员伤亡预测^[2]、供水系统震后恢复阶段的韧性评估^[3]、震后医疗系统性能分析^[4]、城市轨道交通震后性能评价^[5]、城市道路网络地震易损性分析^[6]等。另一方面,考虑基础设施各系统关联性和灾害链的研究,近年渐获重视。比如,“地震引起建筑群倒塌-瓦砾堵塞致道路交通系统性能退化-救援系统功能下降”为一典型的灾害链形式,涉及建筑群、道路交通和救援(如医疗、消防等)等多个系统。相关研究包括意大利某城市震后瓦砾堵塞道路情景分析^[7]、印度孟加拉邦某镇震后因瓦砾堵塞无法通行道路的数量研究^[8]、北京某社区震后路网连通可靠度与医疗系统可达性评估^[9]、以及中国台湾台南市震后道路阻塞对医疗救援影响的分析^[10]。这些研究中,建筑倒塌形成瓦砾,其分布范围的确定主要基于倒塌前后结构几何形状的改变或经验性假设,也未区分不同的建筑结构类型(砌体、混凝土框架、钢框架等),不尽合理。另外,震后交通路网的分析集中于各路段瓦砾堵塞程度或连通性的计算,未涉及震后路网的通行能力。

准确预测不同结构类型的建筑倒塌瓦砾分布是目前研究的难点。有限元模拟作为倒塌研究常用方法之一^[11],一般采用“生死”单元技术实现连续体到非连续体的渐变。但这将导致失效单元消失和倒塌瓦砾分布不完整。近年来,在有限元分析的

基础上引入动画软件物理引擎^[12-13],可近似获得完整瓦砾分布。本文作者采用这一方法,获得了具有填充墙的钢框架建筑结构倒塌瓦砾分布并描述其特征^[13]。此外,针对砌体建筑结构,M.Domaneschi等^[14]采用应用单元法,预测了其倒塌瓦砾分布。

本研究的目的是发展一种定量评估震后灾害链“地震引起建筑群倒塌-瓦砾堵塞致道路交通系统性能退化-消防系统功能下降”的分析方法。特别地,针对带填充墙钢筋混凝土(RC)框架建筑结构,使用物理引擎再现消失单元并分析倒塌瓦砾的分布范围。作为算例,将所提方法应用于上海城区某区域,并给出城市抗震韧性提升建议。

1 灾害链分析方法

1.1 带填充墙 RC 框架建筑倒塌模拟和瓦砾分布

1.1.1 建筑设计

考虑建筑长宽比和高宽比两个参数及常见取值范围,设计9栋带填充墙的RC框架建筑,见表1。结构平面布置如图1所示。建筑的首层层高均为4.2 m,其余层层高为3.6 m。柱和梁的截面尺寸分别为500 mm×500 mm和500 mm×250 mm,楼板厚100 mm。填充墙采用宽度200 mm的MU10混凝土空心砌块砌筑。混凝土强度等级C30,钢筋采用HRB400。丙类建筑,抗震设防烈度为7度(0.1 g)。楼面与屋面恒荷载分别为4.5 kN/m²和7.0 kN/m²,活荷载均为2.0 kN/m²。

1.1.2 结构倒塌模型和验证

采用LS-DYNA软件和降维有限元方法建模。研究表明^[15],相较于精细化模型,降维有限元模型能够在保证计算精度的前提下显著减少计算成本。结构的梁和柱采用纤维梁单元模拟,楼板采用分层

表1 带填充墙RC框架建筑信息

Table 1 Information of RC frame buildings with infill walls

编号	层数	跨数	总高度/平面长/平面宽/			高宽比	长宽比
			m	m	m		
F4-1	4	4×3	15.0	24.0	14.7	1.02	1.63
F4-2	4	5×3	15.0	30.0	14.7	1.02	2.04
F4-3	4	6×3	15.0	36.0	14.7	1.02	2.45
F5-1	5	4×3	18.6	24.0	14.7	1.27	1.63
F5-2	5	5×3	18.6	30.0	14.7	1.27	2.04
F5-3	5	6×3	18.6	36.0	14.7	1.27	2.45
F6-1	6	4×3	22.2	24.0	14.7	1.51	1.63
F6-2	6	5×3	22.2	30.0	14.7	1.51	2.04
F6-3	6	6×3	22.2	36.0	14.7	1.51	2.45

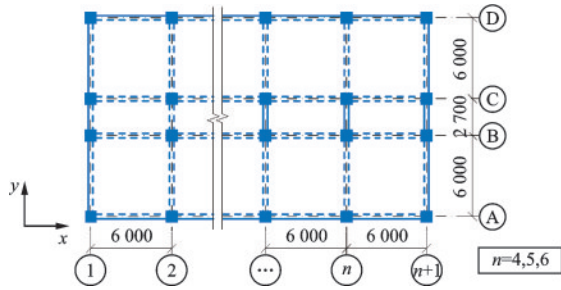


图1 结构平面布置

Fig.1 Structural plan of designed buildings

壳单元模拟,砌体填充墙等效为匀质单相材料^[16]。混凝土和钢筋采用广泛应用的*MAT172_CONCRETE_EC2材料模型,通过关键字FRACR分别定义混凝土和钢筋本构关系^[17],如图2和图3所示。砌体采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC模型。通过关键字*MAT_ADD_EROSION定义各材料失效准则。定义关键字*CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL描述倒塌过程中结构各部分间的碰撞。表2和表3分别给出了有限元模型中材料参数、失效准则和碰撞参数取值。模型地震波输入分两种工况:①沿水平x和y方向分别输入El-Centro

EW和NS地震波;②沿水平x和y方向分别输入Taft EW和NS地震波。

建立9栋建筑的结构有限元模型。其中,建筑F6-2有限元模型如图4所示。选取一带填充墙RC框架结构的振动台倒塌试验^[18]验证上述建模方法的正确性。图5比较了试验与模拟结果。其中,T1工况顶层横向加速度峰值相差6%;T8工况倒塌形态吻合。初步证明本文采用的建模方法具有较好精度。

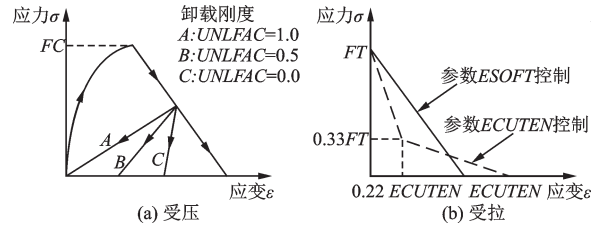


图2 混凝土本构模型^[17]

Fig.2 Constitutive model of the concrete

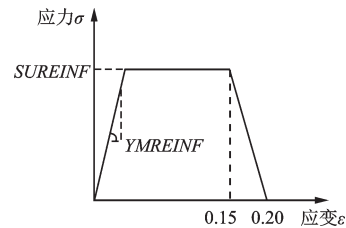


图3 钢筋本构模型^[17]

Fig.3 Constitutive model of reinforcing steel bars

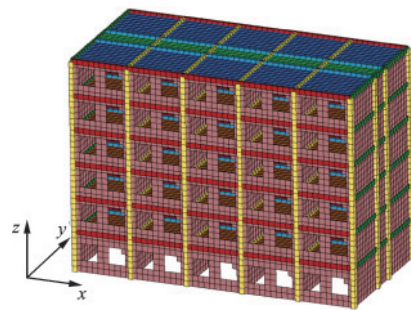


图4 建筑F6-2有限元模型

Fig.4 Finite element model of building F6-2

表2 材料模型参数

Table 2 Parameters in material models

参数	FC /MPa	$SUREINF$ /MPa	$ECUTEN$	$UNLAC$
取值	20.1	400	0.002 5	0.5
参数	FT /MPa	$YMREINF$ /MPa	E /MPa	$SIGY$ /MPa
取值	2.01	2×10^5	8 664	4.3

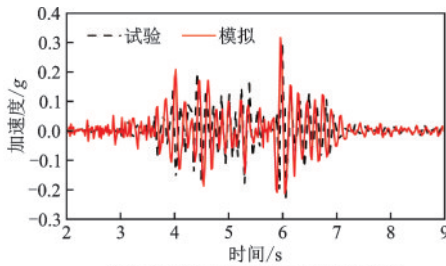
注:FC为混凝土抗压强度;FT为混凝土抗拉强度;ECUTEN为裂缝完全张开应变;UNLAC为混凝土压溃后刚度退化系数;YMREINF为钢筋弹性模量;SUREINF为钢筋抗拉强度;E为填充墙弹性模量;SIGY为填充墙抗压强度

表3 材料失效准则和单元碰撞参数

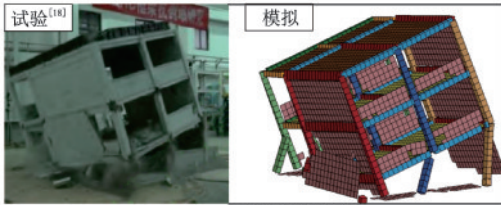
Table 3 Material failure criteria and parameters for element collision

参数	MNEPS_C	MXEPS_S	MXEPS_M
取值	-0.003 3	0.15	0.001 5
参数	FS	FD	VDC
取值	0.4	0.4	1.5

注:MNEPS_C为混凝土失效压应变;MXEPS_S为钢筋失效拉应变;MXEPS_M为填充墙失效拉应变;FS为接触静摩擦系数;FD为接触动摩擦系数;VDC为混凝土粘性阻尼系数



(a) T1工况顶层横向加速度时程比较



(b) T8工况倒塌形态比较

图5 试验结果与有限元模拟结果比较

Fig.5 Comparison between test results and finite element simulation

1.1.3 消失单元再现

在有限元软件LS-DYNA分析的基础上,借助动画软件Unity3D中的物理引擎PhysX再现消失单元。流程如图6所示。先获得LS-DYNA模拟结果,包括节点与单元的构成关系、节点运动信息、消失单元编号及消失时间。然后将这些结果输入至Unity3D中,再现消失单元。

1.1.4 倒塌过程模拟和瓦砾生成

将 x 、 y 方向地震波调幅至峰值加速度均等于 $0.24g$ 时,所有结构倒塌。以El-Centro波作用下模型F4-1倒塌过程为例,图7对比了从LS-DYNA中获取的倒塌过程(左)和经消失单元再现技术处理后的倒塌过程(右)。可见,2.26s时,填充墙率先破坏,LS-DYNA结果中出现消失单元。经消失单元再现技术处理后,破坏瓦砾坠落过程在Unity3D中再现。3.02s时,结构首层开始破坏,在Unity3D中观察到倒塌瓦砾在地面生成。随后至5.00s,柱先

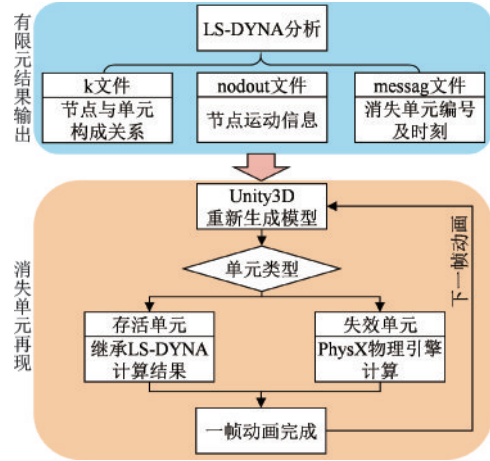


图6 消失单元再现技术流程

Fig.6 Flowchart of reproduction of disappearing elements

后失效,瓦砾逐渐积累,结构发生侧向倾斜倒塌。图7(c)展示了最终倒塌瓦砾分布对比。经统计,模型F4-1共有12112个单元,LS-DYNA结果中消失的9017个单元(74%)均在Unity3D中再现。

需要说明的是:文中倒塌瓦砾呈现粉碎状态,原因是本文基于有限单元法中的“生死”单元法,采用降维有限元模型模拟建筑倒塌,该方法无法较好地考虑混凝土压溃和钢筋压屈后的剩余承载力。倒塌过程中,上部结构下坠与地面撞击致使单元依次失效消失。经Unity3D再现消失单元后,结构倒塌过程中消失的部分将会以单个单元形式依次再现,因而呈现“粉碎”状。然而,粉碎状态仅会导致瓦砾分布形态在高度方向上失真,对本文所研究的瓦砾水平向分布形态的影响不大。

1.1.5 瓦砾分布特征

不同的地震波和震级如何影响建筑倒塌形态和瓦砾分布,目前的认识尚不清楚。本文暂假设建筑的倒塌形态和瓦砾分布不受地震波和震级的影响。本研究中,采用倒塌面积比 $S^{[19]}$ 、瓦砾分布长宽比 a_d/b_d 描述瓦砾分布特征。如图8所示,倒塌面积比 S 指倒塌瓦砾平面投影面积 A_d 与结构平面投影面积 A_r 之比。通过截取清晰度、视角等完全一致的建筑倒塌前和倒塌后俯视图,并采用商业图像处理软件获取倒塌前结构平面投影和倒塌后瓦砾平面投影对应像素,即可换算得到瓦砾平面投影面积 A_d 。经计算得到各模型倒塌面积比 S 见表4。

分析可知,倒塌面积比 S 与结构长宽比 a/b 和高宽比 h/b 均成线性关系。经拟合,倒塌面积比 S 由式(1)计算:

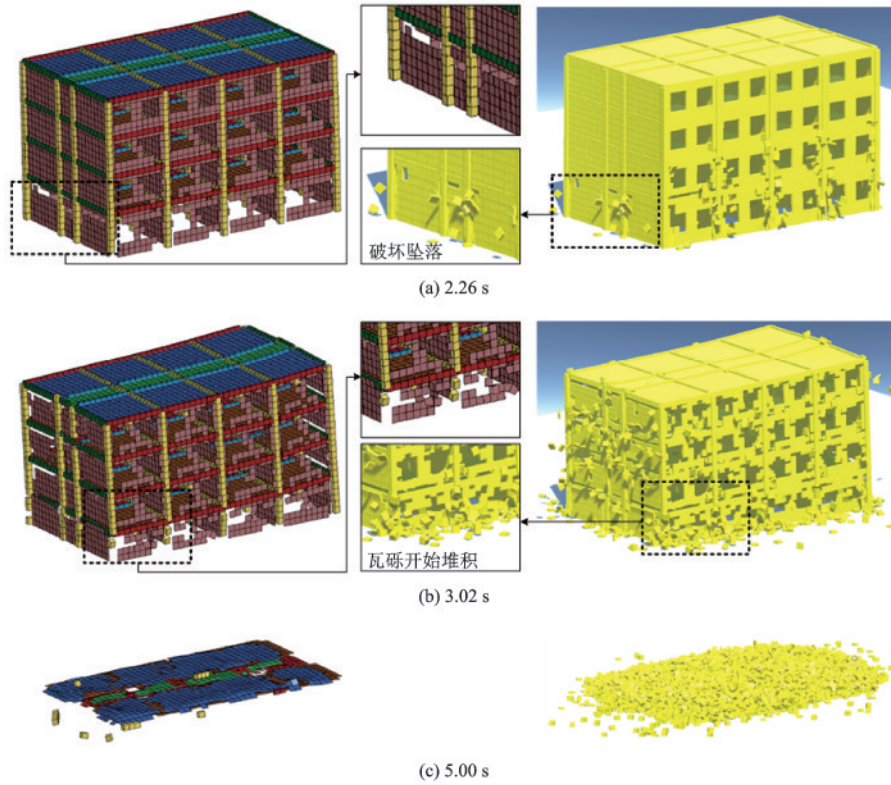


图7 El-Centro波作用下模型F4-1倒塌过程

Fig.7 Collapse process of model F4-1 excited by the El-Centro wave

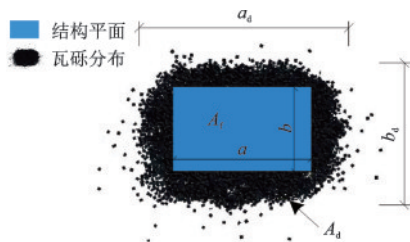


图8 倒塌建筑俯视图

Fig.8 Top view of a collapsed building

表4 瓦砾分布特征

Table 4 Characteristics of debris distribution

编号	A_t/m^2	A_d/m^2	S	a_d/b_d
F4-1	352.8	(771.8)775.6	(2.19)2.20	(1.41)1.46
F4-2	441.0	(924.0)902.0	(2.10)2.05	(1.67)1.70
F4-3	529.2	(1 037.9)1 025.0	(1.96)1.94	(1.79)1.87
F5-1	352.8	(879.6)854.4	(2.49)2.42	(1.34)1.42
F5-2	441.0	(1 031.0)987.5	(2.34)2.24	(1.67)1.66
F5-3	529.2	(1 188.9)1 125.9	(2.25)2.13	(1.83)1.87
F6-1	352.8	(978.4)939.7	(2.77)2.66	(1.39)1.42
F6-2	441.0	(1 118.0)1 098.2	(2.54)2.49	(1.62)1.65
F6-3	529.2	(1 295.8)1 250.2	(2.45)2.36	(1.87)1.88

注:括号内外数据分别为El-Centro波和Taft波作用下倒塌瓦砾分布特征数据

$$S = -0.335 \frac{a}{b} + 0.963 \frac{h}{b} + 1.776 \quad (1)$$

拟合优度 $R^2=0.96$ 。

倒塌瓦砾分布呈中部密集连续成片、四周点状分布的特点。瓦砾密集成片区域形状与结构平面形状较为相似,近似矩形。定义瓦砾分布长宽比为瓦砾密集成片区域长度 a_d 与宽度 b_d 之比,如图8所示。类似地,采用商业图像处理软件获取 a_d 和 b_d 对应像素,计算各模型的 a_d/b_d 见表4。分析可知,瓦砾分布长宽比 a_d/b_d 与结构平面长宽比 a/b 成线性关系,基本不受结构高宽比的影响。经拟合可按式(2)计算:

$$\frac{a_d}{b_d} = 0.546 \frac{a}{b} + 0.527 \quad (2)$$

拟合优度 $R^2=0.97$ 。

本文定义与结构平面共形心、长宽比 $a_{rec}/b_{rec} = a_d/b_d$ 且覆盖90%瓦砾的矩形为“瓦砾堵塞范围矩形”,用于确定瓦砾堵塞道路程度。这里,认为矩形外的零星瓦砾对交通通行影响不大^[14]。图9中红框为按此方法确定的模型F6-3的“瓦砾堵塞范围矩形”。统计各矩形面积与90%瓦砾面积比值的平均值为1.1,主要原因是该矩形包含90%瓦砾,但也包

含少量瓦砾未覆盖区域。据此,根据图 10 所示的推导流程,得到“瓦砾堵塞范围矩形”的长 a_{rec} 和宽 b_{rec} 按式(3)计算:

$$\begin{cases} a_{rec} = \sqrt{0.99 \cdot a \cdot S(0.546 \cdot a + 0.527 \cdot b)} \\ b_{rec} = \sqrt{\frac{0.99 \cdot ab^2 \cdot S}{0.546 \cdot a + 0.527 \cdot b}} \end{cases} \quad (3)$$

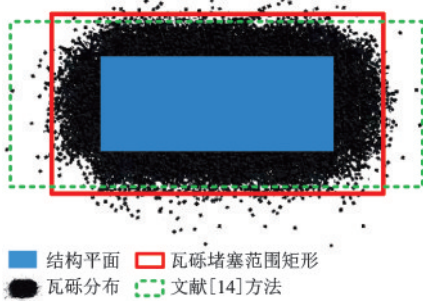


图9 瓦砾堵塞范围矩形

Fig.9 Rectangle used to describe debris blocked range

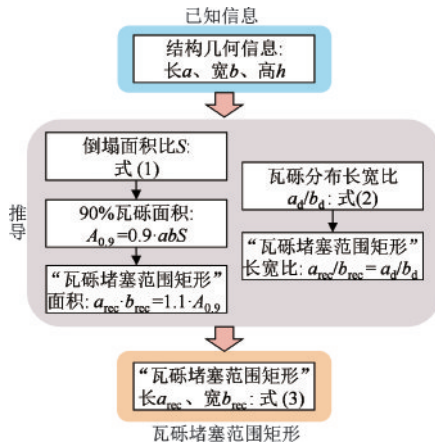


图10 参数 a_{rec} 和 b_{rec} 推导流程

Fig.10 Derivation flow of parameters a_{rec} and b_{rec}

相较于文献[14]提出的直接放大结构平面的“瓦砾堵塞范围矩形”计算方法,本文提出的方法考虑到了RC框架结构倒塌瓦砾在结构四周大致均匀分布,而非按照 a/b 比例分布。因此,通过引入瓦砾分布长 a_d 和宽 b_d ,修正了“瓦砾堵塞范围矩形”长宽,避免了按文献[14]方法计算导致的结构长边方向瓦砾堵塞范围被高估的问题,如图9所示。同时,本文提出的方法存在以下局限性:由于文中各模型结构布置规则,倒塌形式均为整体下座式。因此,“瓦砾堵塞范围矩形”与结构平面基本共形心。对于其他倒塌形式如整体倾覆式倒塌,式(3)可能不适用。此外,砌体结构和带填充墙的钢框架结构建筑的“瓦砾堵塞范围矩形”计算方法见文献[13]和[14]。

1.2 震后道路交通系统性能分析方法

通过构建震前交通路网并进行交通分配,可建立震前道路交通系统模型。根据“瓦砾堵塞范围矩形”修改震前各路段通行能力并重新进行交通分配,得到震后道路交通系统模型。引入交通系统评估指标,可分析震后道路交通系统性能退化。这里假定(1)震前和震后,区域内各交通小区间交通发生量与吸引量不变;(2)出行人员已知震后道路堵塞信息,选择通行时间最短路径出行。不考虑因不知道路堵塞信息而走错路造成的时间损失。

1.2.1 路段通行能力

路段通行能力的计算需要考虑车道通行宽度、车速等因素。车道通行的最小宽度取 2.5 m,这主要是考虑到我国规范规定的车道最小宽度为 2.8 m^[20]、各类车辆宽度范围^[21]以及震后紧急状态。如瓦砾堵塞使车道剩余宽度小于 2.5 m,则车辆无法通行。对于部分堵塞但仍可通行的车道,考虑行车速度下降(车道宽度减小 1 m,车速下降约 17 km/h^[22])。假设车头最小间隔 l_0 不变,即车道通行能力与车道行车速度 v 成线性关系^[23]:

$$C_i = \frac{1000v}{l_0} \quad (4)$$

则路段通行能力 C 为各同向车道(车道数量为 n)通行能力 C_i 之和,按式(5)计算:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (5)$$

1.2.2 道路交通系统性能评估指标

采用总通行时间(TTT)^[24]和各节点间的可达性评估道路交通系统性能。其中,总通行时间可从宏观层面反映路网通行效率,按式(6)计算:

$$TTT = \sum_{a=1}^m q_a t_a \quad (6)$$

式中, q_a 为 a 路段车流量; t_a 为路段通行时间; m 为区域内路段总数。

可达性反映各区位间通行的便利程度^[25]。对于某一给定区位,可达性可细分成可动性和易达性^[26],分别体现该区位到达其它区位和其它区位到达该区位的便利性。相比于基于路径距离的可达性计算方法^[9],考虑到本研究中震后消防需求的实际情况,认为基于通行时间的可达性计算方法较优。据此,提出基于通行时间的可动性 α 与易达性 β 计算方法:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{n_1}{n-1} \\ \beta = \frac{n_2}{n-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中, n 为区域内路网节点总个数; n_1 为震后某一路网节点 a 在 T_1 时间内能到达的其它路网节点个数; n_2 为震后在 T_2 时间内能到达路网节点 a 的路网节点个数; T_1 为震前从 a 前往区域内其它节点的最长用时; T_2 为震前其他节点前往 a 最长用时。

1.2.3 分析流程

图 11 给出了震后道路交通系统性能分析流程。其中, 建筑群倒塌建筑数量与分布可通过多自由度集中质量模型^[27]结合相关倒塌判定指标^[28]确定, 或由建筑震害矩阵^[29-30]获得。

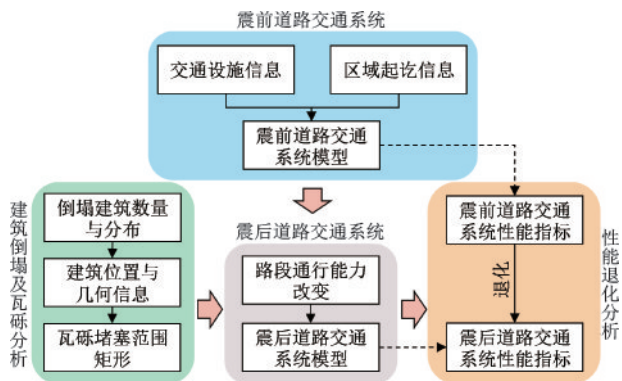


图 11 震后道路交通系统性能分析流程

Fig.11 Flowchart for analyzing road traffic system performance after an earthquake

1.3 震后消防系统性能分析方法

地震可引发火灾。消防系统依赖道路交通系统到达着火点实施救援。结合消防站与着火点分布, 建立震前和震后消防系统模型。采用响应覆盖率^[31]和响应时间分析震后消防系统的性能退化。

响应覆盖率可衡量消防站救援范围, 指在某行车时间段内, 从消防站出发的消防车能到达的路径总长度占城市所有路径总长的比例。根据我国《城市消防站建设标准》^[32]规定的消防时间分配, 取行车时间段时长为 4 min。响应时间反映救援速度, 指消防车从消防站驶至着火点所需的时间。着火点的数量根据文献^[33]确定。图 12 给出了震后消防系统性能分析流程。

本文分析暂不考虑地震导致的消防站性能受损和着火点附近供水系统性能受损。

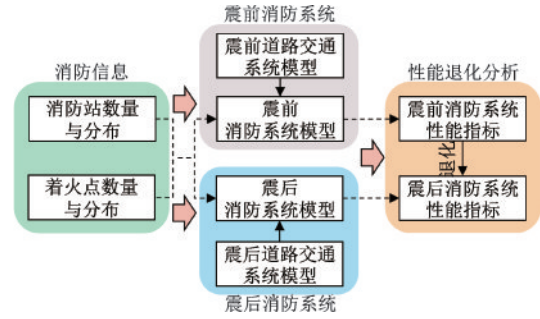


图 12 震后消防系统性能分析流程

Fig.12 Flowchart for analyzing fire protection system performance after earthquake

2 震后建筑倒塌及灾害链实例分析

以上海市静安区某区域为例, 采用所提方法分析震后灾害链沿“建筑群-道路交通-消防”多系统的传播情景和系统性能退化。

2.1 区域信息

区域面积约 5.4 km²。区域内主要为 20 世纪 70~90 年代建造的 4~6 层砌体结构建筑, 共 2 201 栋, 以及少部分多层 RC 框架建筑, 共 251 栋, 无钢结构框架建筑。位于道路两侧的建筑共 1 065 栋 (占比 43.4%)。建筑几何尺寸大致符合 1.1.1 节和文献^[14]中的参数取值范围。区域内路网由主干道、次干道、支路 1 和支路 2 组成, 如图 13 所示。道路通行能力与行车速度参考我国《城市道路工程设计规范》^[21], 见表 5。区域内有 a 、 b 和 c 三处消防站。假定该区域遭遇 8 度地震。

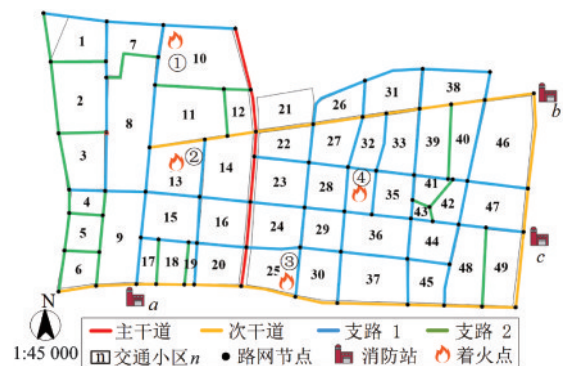


图 13 区域信息

Fig.13 Region information

表 5 区域道路信息

Table 5 Information of roads in the region

类别	同向 车道数	车道宽 度/m	单车道通行能力/ (pcu·h ⁻¹)	速度/ (km·h ⁻¹)
主干道	4	3.5	1 350	50
次干道	2	3.5	1 300	40
支路1	1	3.5	1 200	25
支路2	1	2.8	1 000	15

2.2 倒塌建筑分布与“瓦砾堵塞范围矩形”

倒塌建筑数量的确定参考震害易损性矩阵^[29-30],确定8度地震下砌体结构和RC框架结构的倒塌概率分别为0.9%和0.2%。因此区域内有约20栋砌体和1栋RC框架结构发生倒塌。其中,约有(20+1)×43.4%≈9栋位于道路两侧。这些建筑倒塌可能会影响道路交通系统。

考察震后8种随机产生的道路两侧倒塌建筑分布,记为工况1~8。其中,工况1~6中,9栋位于道路两侧的倒塌建筑均为砌体。工况7和8中,8栋砌体和1栋RC框架结构倒塌在道路两侧。图14为工况1倒塌建筑分布情况。

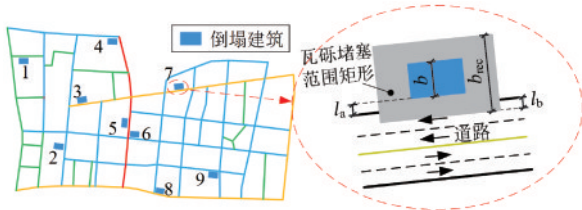


图 14 工况1倒塌建筑分布

Fig.14 Distribution of collapsed buildings in Case 1

建筑几何信息通过商业地图软件获取。RC框架和砌体结构倒塌建筑的“瓦砾堵塞范围矩形”分别按式(3)和文献[14]计算获得。计算所需的砌体结构构件(墙+板+构造柱+圈梁等)体积由结构自身总质量除以砌体结构平均密度得到。其中砌体结构自身总质量可根据单位面积自重(约11.3 kN/m²^[34])和结构几何信息及层数计算。

2.3 区域道路交通系统性能退化计算与分析

基于交通软件 transCAD 建立道路交通系统模型。模型中路网和各个交通小区分布如图13所示。采用O-D(起-讫)矩阵反推方法^[35]得到交通小区间的交通发生量与吸引量。根据O-D矩阵按用户平衡进行交通分配,得到震前路网各路段的交通流量

和通行时间。

依据倒塌建筑的“瓦砾堵塞范围矩形”,考虑建筑与道路的距离以及人行道宽度 l_a ,计算路段被瓦砾堵塞的宽度 b ,如图14所示。按照1.2.1节计算区域内各路段震后通行能力。重新进行交通分配,得到震后路网各路段的交通流量和通行时间。

图15(a)中,结构倒塌瓦砾造成次干道部分车道堵塞,路段通行能力下降,饱和度(路段交通流量 V 与路段通行能力 C 的比值)上升,通行时间延长。图15(b)中,倒塌瓦砾导致支路完全堵塞,被迫选择绕行路线,通行时间显著增加。计算震前及震后各工况路网总通行时间,结果见表6。统计震后路网节点可动性 α 和易达性 β ,结果如图16所示。

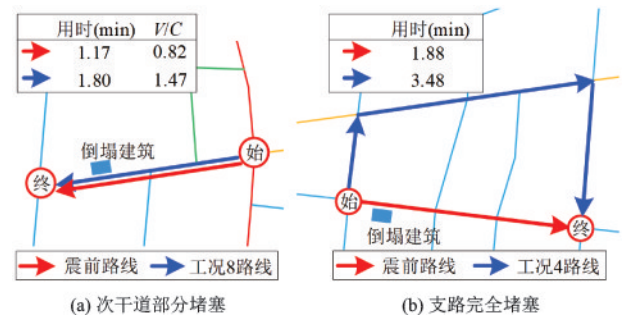


图 15 路段通行能力下降

Fig.15 Decline in the road link capacity

表 6 震前和震后路网总通行时间 TTT

Table 6 TTT of road network before and after earthquake

道路实况	总通行时间/(h·pcu·h ⁻¹)	相较于震前增加/%
震前	2 155	—
工况1	2 570	19
工况2	2 410	12
工况3	2 336	8
工况4	2 306	7
工况5	2 412	12
工况6	2 710	26
工况7	2 449	14
工况8	2 320	8
平均	2 439	13

根据以上结果可知:(1)建筑倒塌瓦砾使得区域路网的总通行时间平均增加13%,区域交通系统通行效率降低。其中,工况6路网总通行时间增加最多(26%)。原因是工况6中倒塌建筑多分布于区域西北角。而西北角路网较稀疏,且未有通行能力大的主、次干道通过,对瓦砾堵塞道路敏感。因此

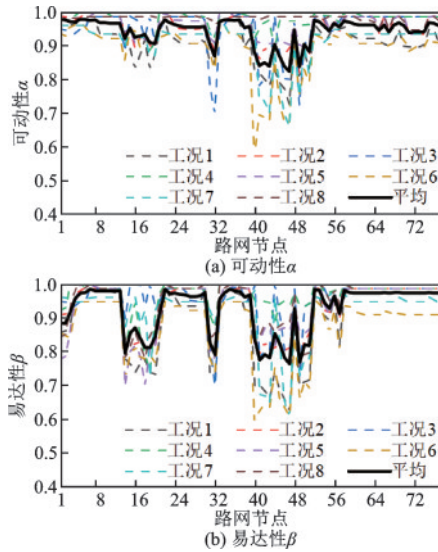


图16 震后路网节点可达性分析

Fig.16 Accessibility of road network nodes after an earthquake

工况6中西北角道路通行受阻严重,导致区域路网总通行时间显著增加;(2)震后各路网节点可动性和易达性下降,最多降低43%。通行能力大、通行速度快的主、次干道以及冗余度大的路网分布,能保证震后节点的可动性和易达性。如位于图13中区域东北角的61~77节点,通过纵横两条次干道及密集的支路路网与其他节点相通,受道路堵塞影响较小。而区域西北角道路以支路为主,且路网较稀疏,位于西北角的14~20与40~50节点震后可动性与可达性明显下降,震后救援难度增加。

2.4 区域消防系统性能退化计算与分析

比较震前和震后消防站响应覆盖率。这里将行车时间段细分为0~2 min和0~4 min。表7给出了震前及震后消防站响应覆盖率变化。图17比较了震前和震后工况6中消防站4 min的响应覆盖范围。

表7 消防站响应覆盖率

Table 7 Response coverage ratios of fire stations

道路实况	消防站	0~2 min		0~4 min	
		响应覆盖率/%	下降/%	响应覆盖率/%	下降/%
震前	a/b/c	19.7/16.3/17.4	—	58.8/52.6/48.6	—
工况1	a/b/c	16.2/15.9/16.8	18/2/3	46.2/43.0/40.8	22/18/16
工况2	a/b/c	18.4/15.3/17.2	7/6/1	49.4/41.0/41.1	16/22/15
工况3	a/b/c	16.4/14.9/17.1	17/9/2	49.0/50.6/44.4	17/4/9
工况4	a/b/c	17.2/15.4/17.3	13/6/1	51.3/47.5/38.1	13/10/22
工况5	a/b/c	17.6/15.3/17.3	11/6/1	50.2/41.0/40.3	15/22/17
工况6	a/b/c	19.1/14.1/16.7	3/13/4	47.3/38.0/35.4	20/28/27
工况7	a/b/c	18.0/15.9/17.3	9/2/1	50.2/48.4/46.0	15/8/5
工况8	a/b/c	18.1/14.4/16.4	8/12/6	55.3/42.1/40.1	6/20/17
平均	a/b/c	17.6/15.2/17.0	11/7/2	49.9/43.9/40.8	15/17/16

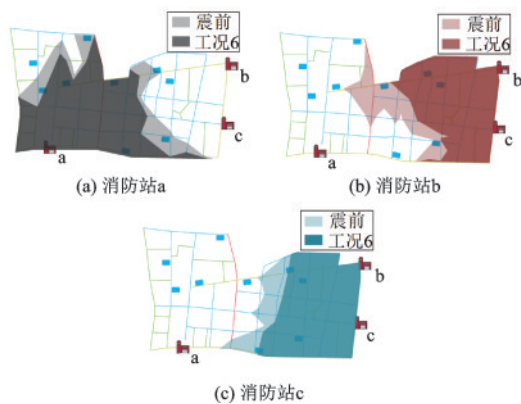


图17 震前与震后工况6中消防站响应覆盖范围比较

Fig.17 Comparison of response coverage of fire stations before earthquake and in post-earthquake Case 6

进一步计算震前和震后消防站响应时间。首先,根据地震烈度确定地震峰值加速度^[36],进而确定区域着火率(单位建筑面积着火点数量)^[33]。地震烈度8度时,区域着火率为0.004 8/万 m²。该区域建筑面积约892 万 m²,则着火点数量约为4且随机分布,如图13所示。简化起见,认为消防车到达与着火点垂直距离最近的路段处,即到达着火点。最后,统计消防站震前响应时间和震后各工况响应时间平均值,见表8。

由表7和表8结果可知:(1)相比震前,震后消防站2 min和4 min响应覆盖率降低,最多下降28%。消防站响应时间增加,最高增加32%;(2)相

表 8 消防站响应时间

Table 8 Response time of fire stations

着火点	震前(震后)	响应时间/min		
		消防站 a	消防站 b	消防站 c
①	震前(震后平均)	4.2(5.0)	5.7(7.5)	7.1(8.9)
	增加/%	19	32	25
②	震前(震后平均)	2.5(2.8)	4.1(5.2)	5.5(6.6)
	增加/%	12	27	20
③	震前(震后平均)	1.7(1.8)	4.6(5.2)	3.2(3.8)
	增加/%	6	13	19
④	震前(震后平均)	3.7(4.0)	3.4(3.6)	2.8(3.3)
	增加/%	8	6	18

比震后 0~2 min,震后 0~4 min 的响应覆盖率降低更多。主因是消防站位于次干道,震后 0~2 min 内消防响应覆盖范围主要由次干道贡献。而次干道车道数多,与两侧建筑距离较大,受倒塌瓦砾影响相较于支路小。与此不同,震后 0~4 min 内,支路对消防响应覆盖范围的贡献增多。而支路车道数量少,与两侧建筑距离近,受倒塌瓦砾影响大易堵塞,导致响应覆盖率下降较多。

3 城市抗震韧性提升建议

(1)提升既有建筑抗震性能。控制建筑与道路的间距。通过技术手段控制关键建筑的倒塌方向。比如,对于 RC 框架结构底层相对侧的柱群,设计两侧柱群间在罕遇地震下的抗力存在显著差异,可实现罕遇地震下结构向抗力较小的柱群一侧倒塌。同时,做好瓦砾快速清理应急预案。

(2)确保主、次干道的畅通和支路网的高冗余度。确保消防站的数量,使消防救援在部分道路受阻情况下能及时到达着火点。

(3)建立城市基础设施信息综合平台,模拟震后灾变场景,制定救援方案。

4 结 论

(1)建立了灾害链“地震引起建筑群倒塌-瓦砾堵塞致道路交通系统性能退化-消防系统功能下降”分析方法。

(2)该方法考虑了系统间的关联性,通过计算

建筑倒塌瓦砾堵塞范围、道路交通系统通行效率与可达性、以及消防系统响应覆盖率与响应时间,分析震后“建筑群-道路交通-消防”多系统的灾变情景和性能退化。

(3)通过对上海某区域的分析,倒塌瓦砾导致路网总通行时间最多增加约 26%,区域内路网节点可达性降低超过 40%。同时,道路交通系统性能下降导致消防站响应覆盖率下降最多可达 28%,响应时间最多增加约 32%。道路通行能力及路网冗余度对消防站震后功能的发挥具有重要影响。

参考文献:

- [1] Lin X C, Zhang H Y, Chen H F, et al. Field investigation on severely damaged aseismic buildings in 2014 Ludian earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2015, 14(1): 169-176.
- [2] Li S, Yu X H, Zhang Y J, et al. A numerical simulation strategy on occupant evacuation behaviors and casualty prediction in a building during earthquakes [J]. *Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2018, 490: 1238-1250.
- [3] 缪惠全,钟紫蓝,侯本伟,等.基于系统动力学的城市供水管网动态抗震韧性评估方法[J/OL]. *工程力学*: 1-15 [2022-10-22]. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.02.0154>.
- [4] Miao H Q, Zhong Z L, Hou B W, et al. Dynamic seismic resilience assessment method for water distribution networks based on system dynamics[J/OL]. *Engineering Mechanics*: 1-15 [2022-10-22]. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.02.0154>. (in Chinese)
- [4] Cimellaro G P, Piqué M. Resilience of a hospital emergency department under seismic event[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(5): 825-836.
- [5] 范世杰,游丹,侯本伟,等.基于网络效率的城市轨道交通网络震后性能评估[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(6): 1165-1173, 1190.
- [5] Fan S J, You D, Hou B W, et al. Post-earthquake performance evaluation of urban rail transit network based on network efficiency[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(6): 1165-1173, 1190.(in Chinese)
- [6] 王鼎,王晓文,冯德成,等.基于蒙特卡洛模拟的城市

- 道路网络地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 558-567.
- Wang D, Wang X W, Feng D C, et al. Seismic fragility analysis of urban road network based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 558-567. (in Chinese)
- [7] Marasco S, Cardoni A, Noori A Z, et al. Integrated platform to assess seismic resilience at the community level[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 64: 102506.
- [8] Golla A P S, Bhattacharya S P, Gupta S. The accessibility of urban neighborhoods when buildings collapse due to an earthquake[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 86: 102439.
- [9] 方东平, 李全旺, 李楠, 等. 社区地震安全韧性评估系统及应用示范[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 28-44.
- Fang D P, Li Q W, Li N, et al. An evaluation system for community seismic resilience and its application in a typical community[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 28-44. (in Chinese)
- [10] Ke S S, Hsu C H. Developing a disaster chain method to evaluate transportation systems: a pilot study of predicting debris blockages in disaster-response road systems[J]. Transportation Research Record, 2023, 2677(1): 475-489.
- [11] 袁景, 刘海卿, 刘东. 强震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌破坏的三维仿真分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增1): 115-119.
- Yuan J, Liu H Q, Liu D. Three-dimensional simulation analysis of collapse of reinforced concrete frame structure under strong earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Sup1): 115-119. (in Chinese)
- [12] Xu Z, Lu X Z, Guan H, et al. Physics engine-driven visualization of deactivated elements and its application in bridge collapse simulation[J]. Automation in Construction, 2013, 35: 471-481.
- [13] Xu Z, Lin F. Seismic collapse and debris distribution of steel frame structures with infill walls[C]//Proceeding of the Tenth International Conference on Advances in Steel Structures. Chengdu: [s.n.], 2022.
- [14] Domaneschi M, Cimellaro G P, Scutiero G. A simplified method to assess generation of seismic debris for masonry structures[J]. Engineering Structures, 2019, 186: 306-320.
- [15] Bao Y, Main J A, Noh S Y. Evaluation of structural robustness against column loss: Methodology and application to RC frame buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(8): 04017066.
- [16] Asteris P G, Cotsovos D M, Chrysostomou C Z, et al. Mathematical micromodeling of infilled frames: state of the art[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1905-1921.
- [17] Livermore Software Technology Corporation. Keyword user's manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2020.
- [18] 杨伟松, 陶柱, 郭迅, 等. 填充墙外廊式RC框架结构倒塌振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 160-171.
- Yang W S, Tao Z, Guo X, et al. Shaking table collapse test on exterior corridor RC frame with infill walls[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 160-171. (in Chinese)
- [19] 周蓉. 基于结构倒塌分析的区域防灾规划[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- Zhou R. Regional disaster planning based on the analysis of structural collapse[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese)
- [20] 城市道路交叉口设计规程: CJJ152—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [21] 城市道路工程设计规范: CJJ37—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [22] 马莹莹, 杨晓光, 曾滢. 城市道路自由车速与车道宽度关联性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 1621-1626.
- Ma Y Y, Yang X G, Zeng Y. Association analysis of urban road free-flow speed and lane width[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(12): 1621-1626. (in Chinese)
- [23] 周伟, 王秉纲. 路段通行能力的理论探讨[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 92-98.
- Zhou W, Wang B G. Theoretical study about road section capacity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 92-98. (in Chinese)
- [24] Clark S, Watling D. Modelling network travel time reliability under stochastic demand[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(2): 119-140.
- [25] Morris J M, Dumble P L, Wigan M R. Accessibility in-

- dicators for transport planning[J]. Transportation Research Part A: General, 1979, 13(2): 91-109.
- [26] 杨涛, 过秀成. 城市交通可达性新概念及其应用研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(2): 25-30, 73.
Yang T, Guo X C. New concept of urban traffic accessibility and its application[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(2): 25-30, 73. (in Chinese)
- [27] Lu X, Guan H. Earthquake disaster simulation of civil infrastructures[M]. Singapore: Springer, 2017.
- [28] 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [29] 胡峻, 赵鹏. 上海市建筑物震害损失快速评估系统[J]. 智能城市, 2019, 5(18): 3-5.
Hu J, Zhao P. Earthquake damage fast evaluation for urban buildings in shanghai[J]. Intelligent City, 2019, 5(18): 3-5. (in Chinese)
- [30] 尹之潜. 结构易损性分类和未来地震灾害估计[J]. 中国地震, 1996, 12(1): 49-55.
Yin Z Q. Structural vulnerability classification and future earthquake disaster estimation[J]. Earthquake Research in China, 1996, 12(1): 49-55. (in Chinese)
- [31] 吴美文, 吴军, 胡传平. 城市消防站布局评估指标量化分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 162-167.
Wu M W, Wu J, Hu C P. Quantitative analysis of evaluation indexes about layout of fire station in a city[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5): 162-167. (in Chinese)
- [32] 城市消防站建设标准: 建标 152—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [33] FEMA. Multi-hazard loss estimation methodology earthquake model technical manual (HAZUS-MH 2.1) [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2015.
- [34] 陈文琪. 对国内五种体系住宅的技术经济分析[J]. 湖南大学学报, 1986, 13(1): 36-44.
Chen W Q. Technical and economic analysis of five domestic housing systems[J]. Journal of Hunan University, 1986, 13(1): 36-44. (in Chinese)
- [35] 闫小勇, 刘博航. 交通规划软件实验教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Yan X Y, Liu B H. Experiment course of traffic planning software [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)
- [36] 丁宝荣, 孙景江, 杜轲, 等. 地震烈度与峰值加速度、峰值速度相关性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(2): 26-36.
Ding B R, Sun J J, Du K, et al. Study on the relationships between seismic intensity and peak ground acceleration, peak ground velocity [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(2): 26-36. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)