

基于结构倒塌破坏模型的居住区紧急疏散空间评价

岳增书¹ 段春辉²

1 中国技术进出口集团有限公司, 北京 100055

2 中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京 210019

[摘要] 基于建筑物倒塌破坏模型, 推导了建筑物倒塌破坏影响宽度系数计算式, 并建立了适合城市居住区建筑物倒塌破坏瓦砾堆积影响范围的预测模型; 在此基础上提出了一种以空旷指数为指标评价居住区紧急疏散空间的方法, 考虑瓦砾堆积重叠部分的影响因素后对其进行修正。同时, 给出了评价居住区紧急疏散空间的简化分析方法。运用简化分析方法对 15 个居住区紧急疏散空间进行评价, 并与理论计算结果进行对比分析。分析结果表明: 该简化分析方法能较为精确地对居住区紧急疏散空间进行评价。

[关键词] 倒塌瓦砾堆积; 预测模型; 紧急疏散空间; 空旷指数

DOI: 10.33142/aem.v4i3.5586

中图分类号: TU984.116

文献标识码: A

Evaluation of Emergency Evacuation Space in Residential Area Based on Structural Collapse Failure Model

YUE Zengshu¹, DUAN Chunhui²

1 China National Technical Import and Export Group Co., Ltd., Beijing, 100055, China

2 MCC Huatian Nanjing Engineering & Technology Corporation, Nanjing, Jiangsu, 210019, China

Abstract: Based on the building collapse failure model, the calculation formula of the influence width coefficient of building collapse failure is deduced, and the prediction model suitable for the influence range of building collapse and debris accumulation in urban residential areas is established; On this basis, a method to evaluate the emergency evacuation space of residential area based on the vacancy index is proposed, which is modified after considering the influencing factors of the overlapping part of rubble accumulation. At the same time, a simplified analysis method for evaluating the emergency evacuation space in residential areas is given. The simplified analysis method is used to evaluate the emergency evacuation space of 15 residential areas, and the results are compared with the theoretical calculation results. The results show that the simplified analysis method can accurately evaluate the emergency evacuation space in residential areas.

Keywords: collapsed rubble accumulation; prediction model; emergency evacuation space; vacancy index

引言

地震作为一种突发性的自然灾害, 瞬间释放大量的能量, 短时间内会对承灾体造成极大破坏, 如建筑物倒塌, 桥梁、道路坍塌, 人员伤亡; 历次震害调查资料表明, 人们在面对地震灾害特别是强震、特大地震时, 显得无助、无能为力, 如 1976 年唐山大地震, 2008 年汶川地震, 3.11 日本地震等地震灾害, 造成了大量的人员伤亡和严重的经济损失。城市是以人为主体, 以利用空间为特点, 以经济效益聚集为目的的经济集约, 人口集约和科学文化集约的地域空间系统; 而居住区作为城市地域功能的重要空间组成部分, 人口密度大、人员复杂、建筑物分布较为集中, 并且居住区内基础建设相对滞后、应急救援设施配置不足, 使得城市居住区的防灾减灾能力较为薄弱; 一旦发生地震灾害, 将会造成大量的人员伤亡和严重的经济损失。

国内外研究学者对于人员安全紧急疏散和城市抗震空间进行研究并取得了不少研究成果, 人员疏散空间范围也由建筑物、机舱等内部密闭空间转向外部区域; 研究内

容不断丰富, 由初期疏散模型研究延伸到周边环境变化、人员疏散行为等影响因素及人员疏散仿真模拟的研究。然而这些研究成果仍然存在不足和一定的缺陷, 目前研究多侧重于封闭的建筑物内部空间, 建筑物外部环境变化、人员疏散行为、仿真模拟等人员疏散问题研究不足; 基于居住区层面上的防灾减灾空间研究不足, 难以满足城市居住区防灾减灾的实际需要。当破坏性地震发生时, 居住区内建筑物发生倒塌破坏后, 建筑物倒塌所产生的瓦砾堆积占据居住区空地、道路等空间, 进而居住区内的道路有效宽度、空旷场地等空间用地面积, 城市居住区内紧急疏散空间能否满足灾时居民紧急避震疏散的需求, 目前研究尚未给出统一明确的评价指标与参考标准。

基于此, 本文首先归纳研究了破坏性地震发生时建筑物结构破坏倒塌模式, 分析了建筑物结构倒塌破坏影响宽度系数的影响因素并提出了影响宽度系数的估算方法; 其次建立了建筑物倒塌破坏瓦砾堆积影响范围的预测模型; 最后, 提出以空旷指数为评价指标的建筑物结构破坏倒塌

模式下居住区紧急避震疏散空间的评估方法。

1 关于建筑物结构倒塌破坏影响宽度系数的考虑

1.1 关于建筑物倒塌模式的假定分析

建筑物结构倒塌影响宽度与建筑物倒塌瓦砾分布形状直接相关,瓦砾堆积分布形状与结构型式及其倒塌模式有关;高耸的建筑物结构和普通建筑物结构的倒塌模式就有较大的差别。为确定建筑物结构倒塌影响宽度系数,本文研究了不同的建筑物结构型式及其倒塌模式对瓦砾堆积形状的影响,进而分析相关的形状参数,确定结构倒塌影响宽度系数。

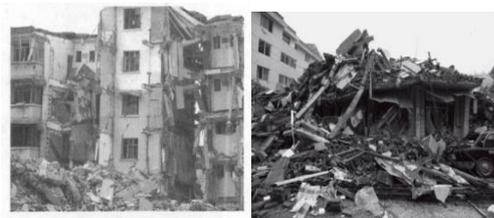
在通过总结分析我国唐山地震、汶川地震等大地震建筑物倒塌破坏资料(图1 建筑物结构倒塌破坏)基础上,对建筑物结构倒塌模式进行假定分析。



(a) 建筑底层倒塌



(b) 建筑物整体倒塌 (c) 半栋大楼完全倒塌



(d) 建筑物局部倒塌 (e) 建筑物坍塌

图1 建筑物结构倒塌破坏

本文研究基于结构倾倒塌模式下的建筑物结构倒塌破坏模式,对建筑物结构的地震破坏倒塌模式进行如下假定:

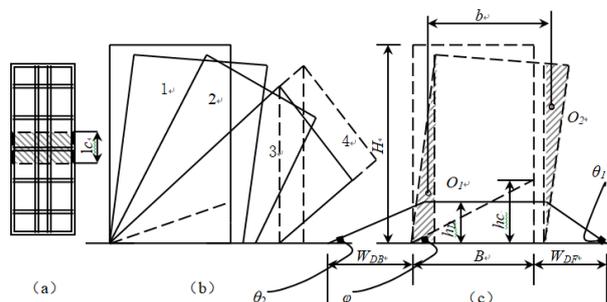
(1) 对地震灾害发生后居住区紧急避震疏散空间最不利的建筑物结构地震破坏倒塌破坏模式为底层发生破坏,结构整体倾倒塌破坏。

(2) 底层破坏引起的建筑物倾倒塌模式,假定建筑物结构底层破坏到上部结构撞击地面期间以倾倒塌为主,之后的倒塌以整体坍塌为主。

(3) 为估算建筑物结构倒塌破坏后的瓦砾堆积物的影响宽度,假定结构沿主要倾倒塌方向的断面形状为梯形;

(4) 假定建筑物在倒塌前后瓦砾总量不变,建筑物

的瓦砾主要是由建筑物的原有结构构件和室内物品构成。根据底层定向爆破倾倒塌时破坏的相关研究,通过同类比分析,破坏断面梯形上底宽度假定为两个塌落段(图2阴影部分)重心 O_1 、 O_2 之间的水平距离,主方向瓦砾堆积角度为 $\theta_1 = 25^\circ$,其它方向为 $\theta_2 = 22^\circ$ 。



1.2 建筑物结构倒塌破坏影响宽度系数的确定

图2 建筑物地震破坏倒塌模式示意图

1.2.1 建筑物正面倒塌破坏影响宽度系数的确定

假定建筑物正面地震破坏倒塌模式,如图2所示,则

(1) 当 $\frac{H-h_c}{B} \leq \frac{B}{h_c}$ 即 $H \leq \frac{B^2}{h_c} + h_c$ 时,

$$\alpha_1 = \frac{W_{DF}}{H} = \frac{B}{H} \frac{\left(\frac{h_c}{B}\right)^2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{3} \left(1 - \frac{h_c}{H}\right) \frac{\frac{h_c}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} + \frac{2k_c k_v k_{\theta_1}}{\sqrt{\left(b^2/B^2\right) + 2k_c k_{\theta} k_v \frac{H}{B} + b/B}}$$

$$\alpha_2 = \frac{W_{DB}}{H} = \frac{\frac{h_c}{B}}{\sqrt{\left(b^2/B^2\right) + 2k_c k_{\theta} k_v \frac{H}{B} + b/B}} - \frac{2}{3} \frac{\frac{h_c}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} \quad (2)$$

式中, $k_{\theta} = (\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)) = k_{\theta_1} + k_{\theta_2}$; α_1 、 α_2 分别为建筑物倒塌破坏主方向、其他方向影响宽度系数; W_{DF} 、 W_{DB} 分别为建筑物倒塌主方向、其他方向结构倒塌影响宽度; k_c 为瓦砾堆积体积系数,根据经验其值可取为1.3; k_v 为体积比系数,根据试算,对一般民用建筑,其值可取为0.25~0.35之间;居住区内建筑物多为一般民用建筑,本文研究其值取为0.3; h_c 为建筑物底层破坏高度,可取底层净高。规划简化分析时,底层商场可取4.8~5.0m,住宅可取2.6~2.8m,办公室可取2.8~3.4m; b 为两个倒塌段重心 O_1 、 O_2 之间的水平距离; H 、 B 分别为建筑物高度、宽度。

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{B}{H} \frac{\left(\frac{h_c}{B}\right)^2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{h_c}{H}\right) \frac{\frac{B}{H}}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} + \frac{2k_c k_\theta k_v}{\sqrt{\left(\frac{b}{B}\right)^2 + 2k_c k_\theta k_v \frac{H}{B} + \frac{b}{B}}} \quad (3)$$

式中, α 为建筑物正面倒塌破坏方向上总影响宽度系数。

当 $\frac{H-h_c}{B} \geq \frac{B}{h_c}$, 即 $H/B \geq 2$ 时,

$$\alpha_1 = \frac{W_{DF}}{H} = \frac{\frac{h_c}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} + \frac{1}{3} \frac{B}{H \sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} - \frac{B}{H} + \frac{2k_c k_\theta k_v}{\sqrt{\left(\frac{b}{B}\right)^2 + 2k_c k_\theta k_v \frac{H}{B} + \frac{b}{B}}} \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \frac{W_{DB}}{H} = \frac{2k_c k_\theta k_v}{\sqrt{\left(\frac{b}{B}\right)^2 + 2k_c k_\theta k_v \frac{H}{B} + \frac{b}{B}}} - \frac{2}{3} \frac{B}{H} \sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\frac{h_c}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} - \frac{1}{3} \frac{B}{H} \frac{2 \cdot \left(\frac{h_c}{B}\right)^2 + 1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_c}{B}\right)^2}} - \frac{B}{H} + \frac{2k_c k_\theta k_v}{\sqrt{\left(\frac{b}{B}\right)^2 + 2k_c k_\theta k_v \frac{H}{B} + \frac{b}{B}}} \quad (6)$$

综合分析(1)、(2)两种情况, 根据公式(3)、(6)可得建筑物正面倒塌破坏影响宽度系数与高宽比之间关系(如图3所示)。

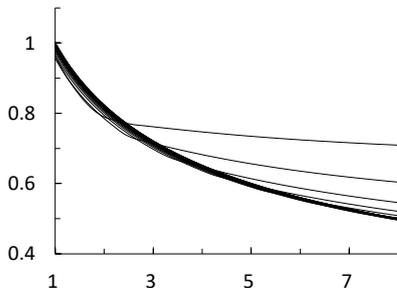


图3 结构倒塌影响宽度系数变化示意图

在 $1 \leq H/B \leq 8$, $0.03 \leq \frac{h_c}{B} \leq 1$, $k_c = 1.3$, $k_v = 0.3$,

$k_\theta = 4.662$, 简化分析时, α 可按公式(7)计算:

$$\alpha = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot \ln(H/B) \quad (7)$$

式中:

$$\kappa_1 = 0.1865 \times \frac{h_c}{B} - 0.296; \quad \kappa_0 = -0.141 \times \frac{h_c}{B} + 1.1264.$$

根据简化公式(7)进行计算, 将其计算结果与理论模型计算公式(3)、(6)计算结果进行对比分析, 可得相关系数 $R=0.995$ 。

1.2.2 建筑物侧面倒塌破坏影响宽度系数的确定

建筑物侧面倒塌破坏考虑同样倒塌模式, 考虑最不利情况, 假定一栋建筑物结构计算宽度为 L_s , 建筑物倒塌破坏后塌落在如图4所示的范围内, 则有

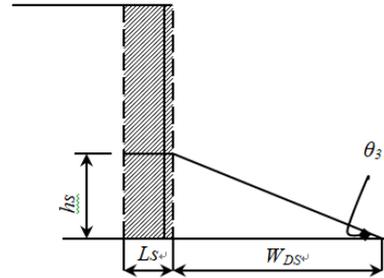


图4 建筑物侧面倒塌模型示意图

$$\beta = \frac{W_{DS}}{H} = \frac{2k_{\theta 3} k_c k_v}{\sqrt{1 + 2k_{\theta 3} k_c k_v \frac{H}{L_s} + 1}} \quad (8)$$

式中, β 为建筑物侧向倒塌影响宽度系数; W_{DB} 为建筑物侧向倒塌影响宽度; L_s 为建筑物结构计算宽度;

$k_{\theta 3} = \tan(\theta_3)$ 。

简化分析时, 取 $k_c = 1.3$, $k_v = 0.3$, $k_{\theta 3} = 2.15$, $L_s = 3\text{m}$, 则有:

$$\beta = \frac{1.68}{\sqrt{1 + 0.56H + 1}} \quad (9)$$

根据简化公式(9)进行计算, 将其计算结果与理论模型计算公式(8)计算结果进行对比分析, 可得相关系数 $R=0.998$ 。

2 居住区紧急疏散空间评价

考虑破坏性地震发生后建筑物倒塌瓦砾堆积对居住区紧急避震疏散空间的最不利影响, 通常建筑物倒塌后瓦砾分布在建筑物四周, 计算分析时假定建筑物倒塌后瓦砾堆积平面图形为矩形(如图5所示)。

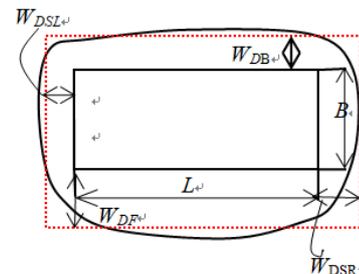


图5 建筑物倒塌破坏瓦砾分布示意图

2.1 建筑物倒塌瓦砾堆积影响范围预测模型

若破坏性地震发生后城市居住区内建筑物完全倒塌,计算建筑物倒塌后瓦砾堆积影响区域面积;考虑瓦砾堆积分布的不均匀性,在建筑物侧面倒塌模式下,侧面瓦砾堆积主方向上影响宽度是建筑物另一方向的二倍,则居住区内第*i*栋住宅建筑物倒塌后瓦砾堆积影响区域面积为

$$S'_i = (L_i + W_{DSL_i} + W_{DSR_i}) \cdot (B_i + W_{DF_i} + W_{DB_i}) \quad (10)$$

$$= (L_i + 1.5\beta_i \cdot H_i) \cdot (B_i + \alpha_i \cdot H_i)$$

式中, S'_i 为居住区内第*i*栋住宅建筑物倒塌瓦砾堆积影响区域面积; L_i 、 B_i 分别为第*i*栋住宅建筑物长度、宽度; α_i 、 β_i 分别为第*i*栋住宅建筑物倒塌破坏正面、侧面影响宽度系数 W_{DSL_i} 、 W_{DSR_i} 、 W_{DF_i} 、 W_{DB_i} 分为第*i*栋住宅建筑物倒塌破坏影响宽度; H_i 为居住区第*i*栋住宅建筑物高度。

居住区内建筑物完全倒塌后瓦砾堆积影响区域面积

$$S' = \sum_{i=1}^n (L_i + W_{DSL_i} + W_{DSR_i}) \cdot (B_i + W_{DF_i} + W_{DB_i}) \quad (11)$$

$$= \sum_{i=1}^n (L_i + 1.5\beta_i \cdot H_i) \cdot (B_i + \alpha_i \cdot H_i)$$

式中, S' 为居住区内建筑物倒塌影响区域面积; n 为居住区内建筑物总栋数。

2.2 居住区紧急避震疏散空间评价指标的确定

将空旷指数 γ 定义为扣除震后建筑物结构倒塌破坏瓦砾堆积影响区域占地面积后的居住区用地面积占居住区总用地面积的比例,反映的是震后建筑物结构完全倒塌破坏后,居住区内可用于紧急避震疏散的开敞空间占有比率,本文将作为居住区内紧急避震疏散空间的评价指标,其计算公式为(12):

$$\gamma = \frac{S - S'}{S} = \frac{S - \sum_{i=1}^n (B_i + \alpha_i \cdot H_i) \cdot (L_i + 1.5\beta_i \cdot H_i)}{S} \quad (12)$$

$$= 1 - \rho - \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot B_i \cdot (\alpha_i \cdot \eta_i + 1.5\beta_i \cdot \iota_i + 1.5\alpha_i \cdot \beta_i \cdot H_i^2 / A_i)}{S}$$

式中, ρ 为居住区内建筑物密度; S 为居住区总用地面积; A_i 为居住区内第*i*栋住宅建筑物占地面积。

考虑居住区内建筑物结构完全倒塌瓦砾堆积面积出现重叠部分的影响时,可按公式(13)计算:

$$\gamma = \frac{S - \varphi \cdot S'}{S} = \frac{S - \varphi \cdot \sum_{i=1}^n (B_i + \alpha_i \cdot H_i) \cdot (L_i + 1.5\beta_i \cdot H_i)}{S} \quad (13)$$

$$= 1 - \varphi \cdot \rho - \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot B_i \cdot (\alpha_i \cdot \eta_i + 1.5\beta_i \cdot \iota_i + 1.5\alpha_i \cdot \beta_i \cdot H_i^2 / A_i)}{S}$$

式中, φ 为考虑瓦砾堆积重叠部分影响的调整系数,取0.9~1.0。

规划简化分析时,

$$\gamma = \psi [1 - \rho \cdot (1 + \lambda)] \quad (14)$$

式中, ψ 为调整系数,城市居住区规划设计基于安全因素考虑时进行的调整,其值取1.0~1.5。 λ 为简化系数,

$$\lambda = 2.4614 \left(\frac{\bar{H}^2}{\bar{A}} \right)^{0.3329}$$

, \bar{H} 为居住区建筑物的平均高度, \bar{A} 为居住区内建筑物平均占地面积。

对简化系数 λ 进行回归分析(如图6所示),通过分析对比,可得相关系数R为0.992。

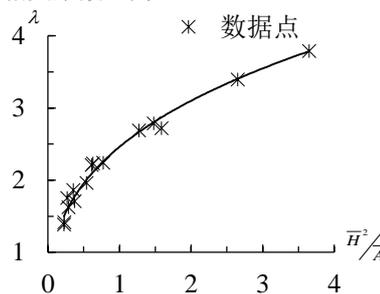


图6 λ 回归分析模型

3 验证分析

计算破坏性地震发生后建筑物倒塌瓦砾堆积影响区域,是为了计算城市居住区内空旷指数,并以其作为评估居住区内紧急避震疏散空间的指标;在对实地调研的15个城市居住区基础数据进行研究分析之上,采用考虑建筑物倒塌破坏瓦砾堆积重叠部分修正后的空旷指数计算公式(13)与规划简化公式(14)分别进行计算,(计算结果如表1所示),空旷指数 λ 理论分析计算值与简化分析计算值折线图如图7所示。

表1 空旷指数 λ 理论分析与简化分析对比

编号	S (m ²)	ρ	λ		绝对误差	相对误差
			理论值	简化值		
1	136100	0.207	0.218	0.220	0.002	0.9
2	135400	0.271	0.398	0.371	0.027	6.9
3	55760	0.263	0.172	0.186	0.014	8.3
4	40970	0.290	0.242	0.247	0.005	2.0
5	103200	0.217	0.393	0.423	0.030	7.6
6	61060	0.237	0.396	0.415	0.019	4.7
7	104185	0.167	0.372	0.402	0.031	8.2
8	143300	0.123	0.739	0.761	0.022	3.0
9	72051	0.182	0.378	0.397	0.019	5.1
10	79631	0.166	0.360	0.351	0.009	2.5
11	125155	0.227	0.399	0.411	0.012	3.1
12	189033	0.116	0.679	0.714	0.034	5.1
13	158145	0.257	0.390	0.393	0.003	0.6
14	166046	0.188	0.421	0.457	0.036	3.4
15	113088	0.160	0.262	0.269	0.007	2.8

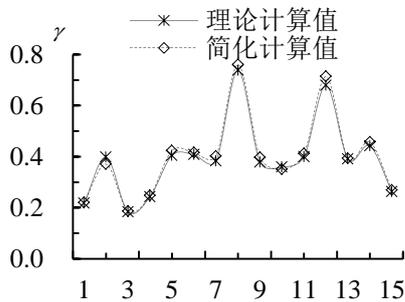


图7 理论计算值与简化计算值折线图

通过表1对比分析可以得出,考虑建筑倒塌破坏瓦砾堆积重叠部分及城市居住区规划设计时安全因素的两个影响因素后,规划简化分析计算值已基本达到本文建立规划简化分析公式,并用以进行居住区紧急避震疏散空间评价的目的;在十进制的级数上保证了理论计算值与简化计算值二者间小误差,在合理范围之内。

4 结论

(1) 基于建筑物结构破坏倒塌模式的假定,提出了建筑物倒塌破坏影响宽度系数的含义及其估算方法;该估算方法可用于计算地震灾害发生后任意建筑物结构倒塌破坏影响宽度,进而评估城市临街道路有效宽度及其通行概率。

(2) 建立了建筑物倒塌破坏瓦砾堆积影响范围的预测模型,并提出了以空旷指数作为评价指标的城市居住区紧急避震疏散空间的评估方法。

(3) 通过对居住区实际案例分别采用理论计算和简化分析方法进行计算,并对简化分析方法计算结果与理论计算结果进行分析研究,验证了简化分析计算方法能较为准确地对城市居住区紧急避震疏散空间进行评价,可用于实际城市防灾规划中。

本文研究成果可用于震后城市居住区紧急避震疏散空间的评价,同时可为震后城市道路通行性研究提供参考。

【参考文献】

[1] 完颜斗劲. 空间框架结构连续倒塌分析与破坏模式控制[D]. 陕西: 西京学院, 2021.
 [2] 姜健, 吕大刚, 陆新征, 等. 建筑结构抗连续性倒塌研究进展与发展趋势[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 1-28.
 [3] 薛辰, 田石柱. 基于刚度损伤的钢框架结构 IDA 抗震倒

塌方法研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2021, 34(3): 35-42.

[4] 罗开海, 保海娥, 左琼. 不同设防烈度 RC 框架结构的地震倒塌风险统计与分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(11): 137-144.

[5] 魏强, 肖东升. 基于弹塑性时程分析的结构地震倒塌时间研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 7-13.

[6] 郭远翔, 张超, 陆艺诗. 带大跨度空心楼板的高层框架结构抗连续倒塌性能分析[J]. 科技通报, 2021, 37(6): 77-84.

[7] 詹鸣晨. 考虑楼板参与的不同 RC 结构体系空间抗连续性倒塌机制研究[D]. 江西: 南昌大学, 2021.

[8] 王坤. 多层轻钢龙骨复合剪力墙结构强震倒塌预测方法研究[D]. 江苏: 中国矿业大学, 2021.

[9] 刘有权. 基于新型梁柱节点的装配式 RCS 组合框架结构抗连续倒塌性能研究[D]. 江西: 南昌大学, 2021.

[10] 刘流, 姬淑艳, 李英民. 基于构件性能的掉层框架结构抗倒塌能力评估方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1610-1620.

[11] 魏圣明. 强震作用下浅埋地铁车站结构倒塌破坏机理研究[D]. 江苏: 中国矿业大学, 2021.

[12] 姚刚峰, 熊学玉. 基于 ABAQUS 准静态显式分析的 RC 框架梁柱子结构倒塌模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 296-307.

[13] 柯长仁, 雷欣琳. 基于非线性动力分析的大跨度框剪结构的抗连续倒塌分析[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(5): 38-41.

[14] 柯长仁, 雷欣琳. 基于非线性动力分析的大跨度框剪结构的抗连续倒塌分析[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(5): 38-41.

[15] 韩小雷, 庄朝禄, 季静, 等. 基于构件变形的 RC 剪力墙结构地震抗倒塌准则对比研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 34-39.

作者简介: 岳增书(1983-)男, 北京工业大学, 土木工程, 中国技术进出口集团有限公司, 工程师; 段春辉(1987-)男, 北京工业大学, 土木工程, 中冶华天南京工程技术有限公司, 结构设计, 工程师。