

基于软化效应的型钢混凝土节点抗剪承载力计算*

Calculation of Shear Capacity of SRC Joints Based on Softening Effect

赵航, 肖青战

(陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 根据现有试验资料, 对规范 YB 9082—2006《钢骨混凝土结构技术规程》和 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》中型钢混凝土节点抗剪承载力计算公式进行计算, 结果表明, 规范计算结果偏于保守, 且离散性较大, 主要原因在于混凝土项取值过于简化, 导致计算结果离散性大。基于软化效应, 考虑主拉方向对主压方向强度的弱化影响, 对混凝土强度、配箍率、型钢约束强度、轴压比等因素的影响进行量化分析, 并提出抗剪承载力计算公式中混凝土项的修正公式, 结果表明, 所提公式可以合理考虑各因素的影响, 提高计算结果的准确性并降低离散性。

关键词: 型钢混凝土; 节点抗剪承载力; 软化效应

中图分类号: TU398+.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0140-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.024

ZHAO Hang, XIAO Qingzhan

(Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: According to the existing test data, the shear bearing capacity calculation formula of medium steel concrete joints in the Technical Specification for Steel Reinforced Concrete Structures (YB 9082—2006) and the Code for Design of Composite Structures (JGJ 138—2016) are calculated. The results show that the calculation results in the code are conservative and have a large dispersion, mainly because the value of the concrete item is too simplified, resulting in a large dispersion of the calculation results. Based on the softening effect, considering the weakening effect of the main tensile direction on the strength of the main compressive direction, the influence of concrete strength, stirrup ratio, section steel restraint strength, axial compression ratio and other factors is quantitatively analyzed, and a modified formula for the concrete term in the shear bearing capacity calculation formula is proposed. The results show that the proposed formula can reasonably consider the influence of various factors, improve the accuracy of the calculation results and reduce the dispersion.

Keywords: steel reinforced concrete; shear bearing capacity of joint; softening effect

0 引言

型钢混凝土结构因其高强度、高刚度、高延性

等优点被广泛应用于高层及超高层建筑的抗震设计中。节点区抗剪承载力计算是结构设计的必然环节之一, 规范 YB 9082—2006《钢骨混凝土结构技术规程》^[1]及 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》^[2]给出了 SRC 节点区承载力计算公式, 两者均将节点区抗剪承载力划分为混凝土、箍筋、型钢三部分构成, 其中规范 YB 9082—2006 为了考虑轴压力的有利影响, 在钢骨混凝土柱的抗震等级为一级和二级的情况下引入轴压力附加项。

* 基金项目: 陕西工业职业技术学院科研计划项目 (2023YKZD-010)。

作者简介: 赵航 (1990—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 组合结构工程。

收稿日期: 2023-10-25

抗剪承载力公式中混凝土项抗剪承载力为与节点区尺寸和混凝土强度的线性关系, 该项系数采取固定值, 其中规范YB 9082—2006考虑了节点形式的差异性系数取值有所不同, 规范JGJ 138—2016则考虑了节点位置和梁的约束影响。系数采取固定值的考虑方式易于应用, 但文献 [3-6] 研究表明节点区混凝土主压方向强度会受到主拉方向的弱化, 弱化程度与混凝土强度、配箍率、轴压比等因素均有相关, 忽略相关因素的影响则会使得计算结果离散性大, 且偏于保守。

在此, 基于软化效应对节点区混凝土受力特征进行分析, 结合试验及有限元分析数据, 进一步探讨混凝土强度、配箍率、轴压比等因素与抗剪承载力混凝土项系数的相关性, 并基于分析结果, 在规范公式基础上提出系数取值的修正公式。通过试验数据与理论计算数值对比, 表明修正公式具有更好的适用性。

1 现有规范探讨

规范YB 9082—2006《钢骨混凝土结构技术规范》中节点核心区承载力计算公式如下:

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left(\delta_j f_t b_j h_j + \frac{f_{yv} A_{sv}}{s} h_j + f_{sv} t_w h_w + 0.1 N_c^c \right) \quad (1)$$

式中: V_j 为节点核心区剪力设计值; δ_j 为节点形式系数, 十字型节点取 3, T 字型节点取 2, L 型节点取 1; f_t 为混凝土抗拉强度设计值; f_{yv} 为节点核心区箍筋抗拉强度设计值; f_{sv} 为钢骨腹板的抗剪强度设计值; N_c^c 为柱混凝土部分所承担的压力; 其余为构件尺寸参数, 参见规范^[1]。

规范JGJ 138—2016《组合结构设计规范》中节点核心区承载力计算公式如下:

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left(1.2 \phi_j \eta_j f_t b_j h_j + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} (h_0 - a'_s) + 0.3 f_a t_w h_w \right) \quad (2)$$

式中: A_j 为节点位置影响系数, 对中间柱中间节点取 1, 边柱节点及顶层中间节点取 0.6, 顶层边节点取 0.3; η_j 为梁对节点的约束影响系数。

规范YB 9082—2006和JGJ 138—2016从形式上均将节点受剪承载力划分为混凝土、箍筋、型钢腹板三部分。不同点在于: ①规范YB 9082—2006考虑了

轴压力的有利影响。而规范JGJ 138—2016则是为了安全起见, 不考虑轴压力对混凝土受剪承载力的有利影响; ②规范JGJ 138—2016考虑了梁对节点的约束影响; ③对型钢参与抗剪强度考虑不同。

为验证规范公式的适用性, 选取文献 [7-10], 采用规范节点抗剪承载力公式进行计算并与试验结果进行对比, 对比结果如图 1 所示, 其中 V_c 为理论公式计算值, V_j 为试验值两种规范抗剪承载力公式。具体分项计算结果见表 1。

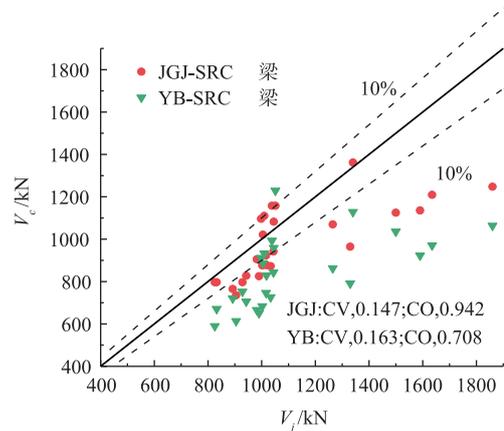


图 1 抗剪承载力理论与试验结果

Fig. 1 Comparison between theoretical and experimental results of shear capacity

计算结果表明, 两规范计算结果整体偏于保守, 规范 JGJ 138—2016 结果离散性较高, 规范 YB 9082—2006 计算结果则更低一些, 对比两规范混凝土项的抗剪承载力, 部分试件计算结果相差 2 倍以上, 是节点抗剪承载力计算结果离散性大的主要原因。分析其主要原因在于规范对混凝土项的抗剪强度计算公式中系数取值过于简单保守。而在结构设计中, 对构件承载力的准确预测是合理设计的基础。

2 基于软化效应的节点抗剪承载力分析

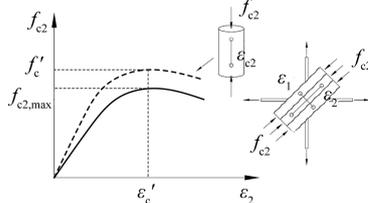
梁柱节点区的受力机制为“斜压杆机构”和“桁架机构”^[11-12]。斜压杆机构为节点核心区混凝土在主压力方向形成斜压杆, 承担梁柱受压区传入的荷载。桁架机构则主要为混凝土及箍筋承担由梁柱受拉区钢筋传入的剪应力, 进一步形成主拉应力。Hsu^[13]和 Collins^[3-4]基于钢筋混凝土板的剪切试验, 发现主拉应力对主压方向混凝土强度具有一定的软化作用, 并提出了相应的混凝土软化本构关系, 如图 2 所示。

建筑结构

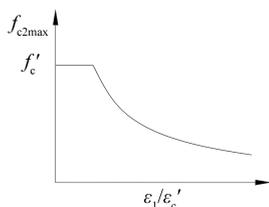
表 1 抗剪承载力对比
Table 1 Comparison of shear bearing capacity

试件编号	连接梁形式	$1.2\phi_j\eta_j f_i b_j h_j / \text{kN}$	$\delta_j f_i b_i h_j / \text{kN}$	$V_{j,JGJ} / \text{kN}$	$V_{j,YB} / \text{kN}$	V_j / kN	$V_{j,JGJ} / V_j$	$V_{j,YB} / V_j$	
曾磊 ^[10]	J-1	SRC 梁	213.6	144.6	796.97	589.63	825.30	0.97	0.71
	J-2	SRC 梁	173.5	117.5	796.97	670.95	832.37	0.96	0.81
	J-3	SRC 梁	409.4	144.6	796.97	752.27	928.27	0.86	0.81
	J-4	SRC 梁	368.3	130.1	877.46	829.26	1017.87	0.86	0.81
	J-5	SRC 梁	510.7	222.0	765.18	720.48	892.11	0.86	0.81
王秋维 ^[9]	SSRCJ1	SRC 梁	510.7	222.0	735.42	613.45	904.86	0.81	0.68
	SSRCJ2	SRC 梁	510.7	222.0	827.62	705.66	942.56	0.88	0.75
Kitano ^[7]	SRC-1-W*	SRC 梁	591.2	257.0	1069.88	862.59	1265.00	0.85	0.68
	SRC-1-BW16	SRC 梁	478.9	208.2	1124.95	1035.76	1500.00	0.75	0.69
	SRC-7	SRC 梁	422.9	183.9	964.31	790.71	1330.00	0.73	0.59
	SRC-1-WH8	SRC 梁	422.9	183.9	1209.60	970.75	1635.00	0.74	0.59
	SRC-8-W	SRC 梁	514.1	223.5	1135.43	922.80	1590.00	0.71	0.58
	SRC-11-W	SRC 梁	317.4	138.0	1361.65	1128.32	1340.00	1.02	0.84
	SRC-12-W	SRC 梁	448.5	195.0	1314.14	1030.12	1965.00	0.67	0.52
	SRC-1-WH9	SRC 梁	653.8	284.3	1247.55	1063.59	1860.00	0.67	0.57
	闫长旺 ^[8]	SRC-RC-I-40-1.0	SRC 梁	579.6	252.0	825.14	607.71	990.32	0.83
SRC-RC-I-35-1.6		SRC 梁	644.0	280.0	905.52	650.69	982.07	0.92	0.66
SRC-RC-I-40-1.6		SRC 梁	758.3	329.7	876.36	665.85	1002.21	0.87	0.66
SRC-RC-I-45-1.6		SRC 梁	691.7	300.8	873.03	683.60	1033.39	0.84	0.66
SRC-RC-I-40-2.2		SRC 梁	1175.5	511.1	923.15	725.90	1016.35	0.91	0.71
SRC-RC-I-45-2.2		SRC 梁	624.4	246.8	941.81	746.34	1044.05	0.90	0.71
SRC-RC-II-40-1.0		SRC 梁	653.6	258.3	1021.26	843.02	1004.67	1.02	0.84
SRC-RC-II-35-1.6		SRC 梁	624.4	246.8	1096.25	886.77	997.82	1.10	0.89
SRC-RC-II-40-1.6		SRC 梁	621.1	245.5	1110.21	911.65	1009.44	1.10	0.90
SRC-RC-II-45-1.6		SRC 梁	617.3	244.0	1082.55	932.49	1044.85	1.04	0.89
SRC-RC-II-40-2.2		SRC 梁	636.0	251.4	1157.53	958.66	1038.16	1.11	0.92
SRC-RC-II-45-2.2		SRC 梁	608.1	240.3	1157.53	992.89	1051.12	1.10	0.94

注：其中， $V_{j,JGJ}$ 和 $V_{j,YB}$ 分别为规范 (JGJ 138—2016) 和 (YB 9082—2006) 节点抗剪承载力计算值； V_j 为试验实测剪力值； $1.2\phi_j\eta_j f_i b_j h_j$ 和 $\delta_j f_i b_i h_j$ 分别为规范 (JGJ 138—2016) 和 (YB 9082—2006) 节点抗剪承载力公式中混凝土项计算值。



(a) 开裂混凝土受压应力-应变关系



(b) 混凝土最大压应力

图 2 混凝土软化系数

Fig. 2 Concrete softening coefficient

规范将节点抗剪分为混凝土、箍筋、型钢三部分，节点区受剪承载力可采用简图 3 进行解释：
(1) 混凝土受压杆所受压力在水平截面产生剪应力；
(2) 型钢发生剪切变形，在水平截面直接提供剪应力；
(3) 核心区水平估计及混凝土提供的水平拉力

在水平截面产生剪应力，通常节点承受峰值剪力时，产生斜向裂缝，水平截面剪应力则主要由箍筋提供。

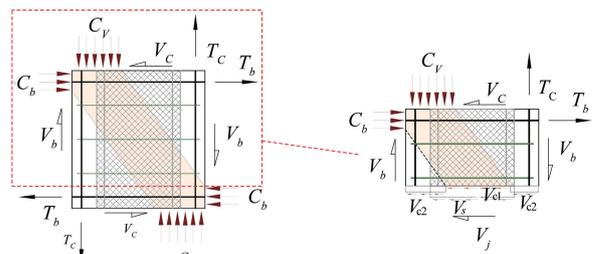


图 3 节点区受力隔离体

Fig. 3 Stressed free body in joint area

从受力图可知，混凝土部分提供的抗剪承载力主要为混凝土斜压杆所受压力在水平面上的分量，可表达为式 (3)，与规范形式比较，则可看出规范形式中的系数与混凝土软化系数 φ 具有相关性。

$$V_{ac} = \varphi f_c b_j h_c \cos \theta = 1.2 \phi_j \eta_j f_i b_j h_j \cos \theta \quad (3)$$

由于软化系数 φ 主要受主拉方向应力影响，而轴压力、混凝土强度、配箍率、型钢对混凝土的约束作用等均对主拉应力产生影响。因此有必要分析相关因素与主拉应力的关系。

3 节点承载力的修正公式

采用有限元软件 DIANA 进行扩充分析，设计试件轴压比 n_t 取 0.1~0.7 之间，混凝土强度取 30~80 MPa 之间，节点核心区配箍率取 0.1%~0.6%，型钢约束混凝土面积与节点截面面积比取 0.1~0.4，型钢强度取 235~500 MPa 等。

采用 DIANA 中总应变裂缝模型模拟混凝土特性，总应变裂缝模型将裂缝弥散在混凝土单元中，可考虑裂缝的张开闭合状态；在开裂状态下泊松比采用正交异性理论，以考虑开裂状态下材料拉伸不会引起垂直方向的收缩。

边界条件为柱底采用铰接，参考点 RP1 与柱底耦合，RP2、RP3 与梁端耦合铰接，并放开其水平自由度，RP4 与柱顶耦合，并在其上施加轴向压力及水平力和位移，如图 4 所示

基于试验数据及大量模拟结果，分析轴压比、混凝土强度、型钢约束面积与混凝土截面面积之比、

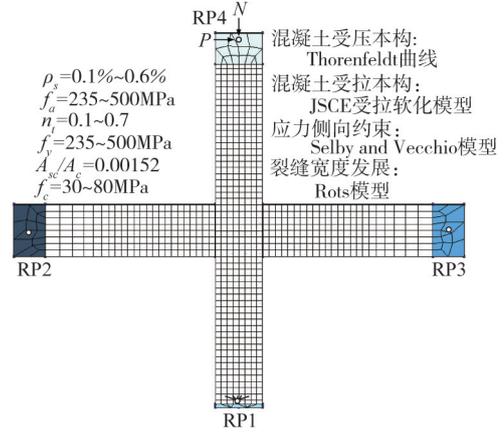


图 4 有限元模型
Fig. 4 Finite element model

配箍率等因素对混凝土抗剪承载力项的影响，建立各因素与软化系数之间的关系，分析结果如图 5 所示。从模拟结果中可见，各影响因素中轴压比、混凝土强度、配箍率对系数 ϕ 影响较为显著。

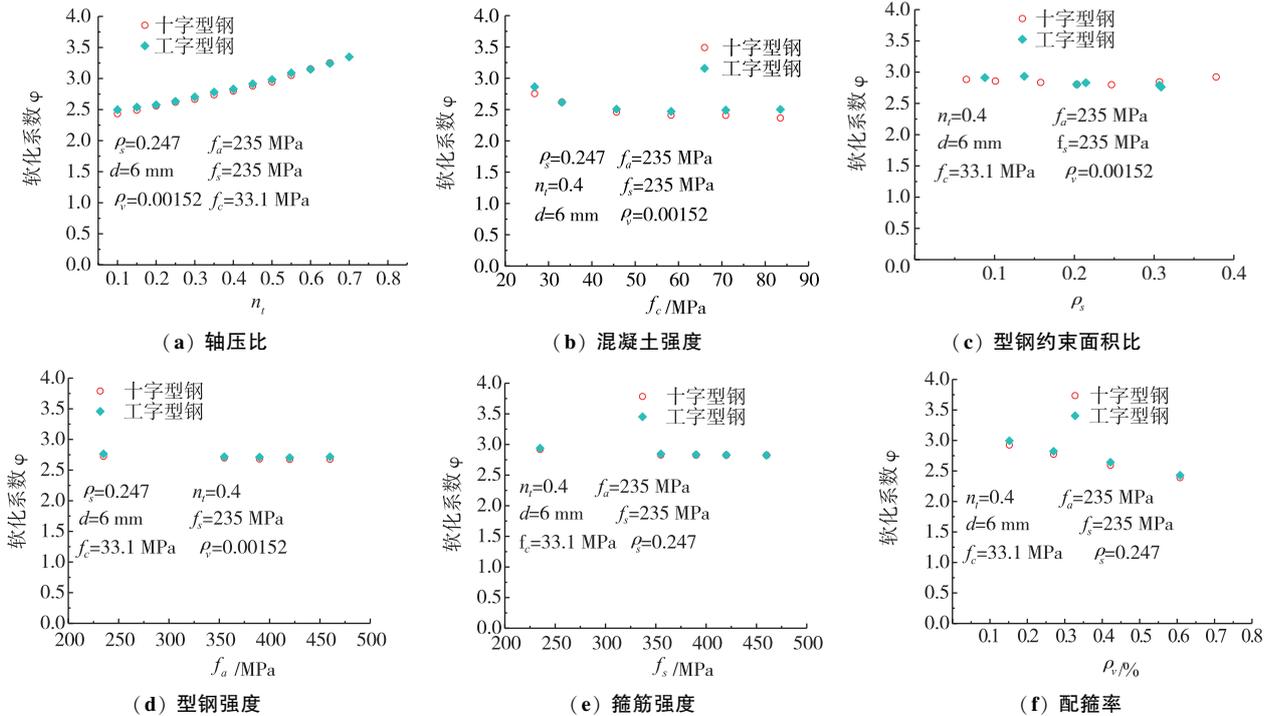


图 5 参数分析
Fig. 5 Parameter analysis

(1) 图 5 (a) 显示，随轴压比增大，斜压杆剪力逐渐增大，轴压力的增大在一定程度上减小了混凝土在 y 向的变形，提升了混凝土在主方向的速度。而影响系数 ϕ 呈先下降后上升的趋势，主要原因

在于计算斜压杆的理论强度（即斜压杆混凝土强度不受软化的情况）时，所选用的斜压杆宽度计算公式与轴压比相关。

(2) 图 5 (b) 显示，随着混凝土强度增大，斜

建筑结构

压杆剪力逐渐增大,但影响系数逐渐减小,主要原因在于斜压杆增长剪力随混凝土强度的增长较理论强度慢,这表明混凝土强度越大,受软化影响越明显。

(3) 由图 5 (c) (d) 可知,而型钢的强度及约束面积比的大小影响并不明显,主要原因在于两点:①节点主要受剪切作用,主方向的受力及变形最为显著,型钢翼缘对混凝土的约束主要在 x 方向, y 方向缺乏有效限制,使得整体对主方向的变形约束并不明显。②混凝土在弹性阶段的泊松比小于钢材(混凝土通常在 0.2 左右,钢材在 0.3 作用),往往在峰值荷载之后,混凝土的各向异性特征突显,横向膨胀急剧增大。型钢腹板在剪力作用下亦发生剪切变形,与混凝土变形相近,节点型钢主要通过腹板来抗剪,其主拉压方向均有较大的作用力,型钢自身具有较大的变形,在节点达到峰值荷载时,型钢对混凝土的约束并不充分。③型钢翼缘与纵筋有类似传递剪力的作用,将引起混凝土在主压方向的软化。从参数分析结果来看,可近似忽略型钢对混凝土的约束作用。

(4) 由图 5 (e) 箍筋强度的变化对系数 φ 影响不大,而图 5 (f) 则显示 φ 值随配箍率的增大而有所减小。原因在于,箍筋截面面积不变时,混凝土发生破坏时的箍筋应变相近,当混凝土破坏时箍筋尚未屈服,再增大箍筋屈服强度,对其承载力影响不大。而当配箍率增大时,在相近的应变下,箍筋提供了更高的抗剪能力,试件整体抗剪能力增大,但混凝土承担抗剪能力则有所下降,主要是在更高的剪力容易引起更多的软化。将不同影响因素对应的系数 φ 进行归一化处理并拟合,拟合公式如式 (4) ~ (7) 所示, R^2 (COD) 分别为: 0.994、0.87、0.98。

$$\alpha_1 = 0.81 + 0.24 \cdot n_t + 0.32 \cdot n_t^2 \quad (4)$$

$$\alpha_2 = 1.05 - 0.033 \ln(f_c - 26) \quad (5)$$

$$\alpha_3 = 1.1 - 42.8 \rho_v \quad (6)$$

$$\varphi = 2.8 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \quad (7)$$

将公式计算结果与试验结果进行对比,如图 6 所示。由对比结果可知,采用所提修正系数计算规范公式混凝土项,可显著提高计算结果的准确性,并降低计算结果的离散性。

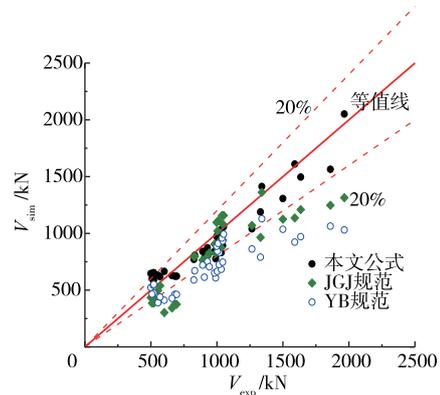


图 6 抗剪承载力理论与试验结果
Fig. 6 Comparison between theoretical and experimental results of shear capacity

4 结论

(1) 规范 YB 9082—2006 和规范 JGJ 138—2016 节点承载力计算结果偏于保守,相比之下规范 JGJ 138—2016 计算结果更接近试验值,但其计算结果离散性更大。

(2) 分析了规范公式离散性高的主要原因在于抗剪承载力公式中混凝土项的计算离散性大,基于试验结合有限元分析,发现混凝土强度、轴压比和配箍率对混凝土抗剪承载力影响最为显著。

(3) 提出 SRC 节点抗剪承载力公式中混凝土项系数的修正公式,并采用试验数据进行验证,结果表明所提公式能显著提高节点抗剪承载力公式计算精度。

参 考 文 献

- [1] YB 9082—2006. 钢骨混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [2] JGJ 138—2016. 组合结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] VECCHIO F J, P. COLLINS M. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. ACI Journal, 1986, 83 (2): 219-231.
- [4] VECCHIO F J, COLLINS M P. Compression response of cracked reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (12): 3590-3610.
- [5] PANG, XIAO-BO DAVID, THOMAS TC HSU. Behavior of reinforced concrete membrane elements in shear [J]. Structural Journal, 1995, 92: 665-679. (下转第 162 页)

研究与应用

塌, 顶层最后倒塌。在 8 度中震作用下, 人员有 9.89~10.89 s 的逃生时间; 在 8 度大震作用下, 人员有 8.72~9.57 s 的逃生时间。采取合理有效的抗震设防措施, 增加结构抗震能力, 有效利用可用的疏散时间, 是减少伤亡的关键。

(4) 对比 ASET 与 RSET, 在 8 度中震作用下和大震作用下, ASET 均远小于 RSET, 不满足人员安全疏散的条件。假如地震造成居民楼倒塌, 则将会产生大量人员伤亡。

参 考 文 献

- [1] 刘杰. 基于 ABAQUS 整体式模型下砌体结构抗震性能影响因素研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [2] XIAO M L, CHEN Y, YAN M J, et al. Simulation of household evacuation in the 2014 Ludian earthquake [J]. Bull Earthquake Eng, 2016, 14 (6): 1757-1769.
- [3] 李天贝, 肖梅玲, 徐子祺, 等. 基于社会力模型的教室内地震疏散仿真 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (3): 281-286.
- [4] 徐子祺, 肖梅玲, 邢倩倩, 等. 昆明市城中村砌体结构地震易损性与疏散能力分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (24): 299-305.
- [5] 贺安特, 王宪杰, 张帆, 等. 地震预警对室内人员疏散影响 [J]. 湖南师范大学学报, 2021, 44 (3): 81-88.
- [6] HELBING D. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature, 2000, 407 (6803): 487-90.
- [7] BERNARDINIG, D' ORAZIO M, QUAGLIARINI E, et al. An agent-based model for earthquake pedestrians' evacuation simulation in Urban scenarios [J]. Transportation Research Procedia, 2014, 2: 255-263.
- [8] L. A. L., J. A. M. Modeling the Occurrence of M-5 Caldera Collapse-Related Earthquakes in Kilauea Volcano, Hawaii [J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49 (1): 5-11.
- [9] 钱向东, 崔赛飞, 程玉瑶. 由地震危险性分析估计场地震动持续时间 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2015, 37 (3): 1-4.
- [10] 马恺泽, 王彦鹏, 张少磊. 基于增量动力分析的钢框架-混凝土剪力墙结构地震易损性 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (20): 339-344.
- [11] 于晓辉. 钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [12] 张菊辉. 基于数值模拟的规则梁桥墩柱的地震易损性分析 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [6] PANG, XIAO-BO DAVID, THOMAS TC HSU. Fixed angle softened truss model for reinforced concrete [J]. Structural Journal, 1996, 93 (2): 196-208.
- [7] KITANO A, GOTO Y, JOH O. Investigation on ultimate shear strength of SRC interior beam-column joints [J]. WIT Transactions on The Built Environment, 1970, 41. 1999.
- [8] 闫长旺. 钢骨超高强混凝土框架节点抗震性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [9] 王秋维, 田贺贺, 史庆轩, 等. 扩大十字形截面型钢混凝土柱-SRC 梁节点抗震承载力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (10): 96-104.
- [10] 曾磊. 型钢高强高性能混凝土框架节点抗震性能及设计计算理论研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [11] HWANG S J, LEE H J. Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128 (12): 1519-1526.
- [12] 傅剑平, 游渊, 白绍良. 钢筋混凝土抗震框架节点传力机构分析 [J]. 重庆建筑大学, 1996, (2): 43-52.
- [13] 徐增全. 钢筋混凝土薄膜元理论 [J]. 建筑结构学报, 1995, 16 (5): 10-19.

(上接第 144 页)