

[文章编号] 1003—4684(2023)05-0100-05

# 不同烈度下框剪结构的抗连续倒塌对比分析

柯长仁, 周玉洁

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 为探究不同烈度下框剪结构的抗连续倒塌性能,运用 SAP2000 有限元分析软件,结合拆除构件法对不同烈度条件下的 11 层框剪结构进行非线性动力分析。分析结果表明:抗震设防烈度这一参数对框剪结构各构件在结构整体抗连续倒塌性能中的作用排序影响不大;不同烈度下,相同构件的失效,剩余框剪结构响应相似,L 形剪力墙由于双向约束作用,可提高结构的抗连续倒塌性能;框剪结构随着烈度的提高,抗连续倒塌性能有所提高;框剪结构在  $7^\circ(0.15g)$  和  $8^\circ(0.20g)$  条件下的抗震设计与  $6^\circ(0.05g)$  相比,混凝土用量变化不大,钢筋用量分别增加 11.6% 和 33.8%,伴随的失效点竖向位移最大能降低 8.1% 和 30.4%;高烈度地区对框剪结构进行抗连续倒塌设计时易出现“强梁弱柱”的设计。

**[关键词]** 连续倒塌; 框剪结构; 不同烈度; SAP2000

**[中图分类号]** TU375 **[文献标识码]** A

结构由于意外荷载而发生与初始破坏不成比例的倒塌破坏被国际工程界定义为结构的连续倒塌,结构的连续倒塌一般伴随着重大的人员伤亡与财产损失,因此针对结构的抗连续倒塌研究成为了结构安全研究的重点。众多学者在此方向取得了重大研究成果,但大多数研究都针对框架结构,对框剪结构的研究较少,现有关于框剪结构的研究大多是针对框剪结构这一结构的受力形式。林旭川等<sup>[1]</sup>从剪力墙受力性能出发,通过有限元模拟和试验的分析对比,验证了用分层壳单元模拟剪力墙的可行性;覃礼根<sup>[2]</sup>研究表明第一竖向构件失效准则是判断 RC 剪力墙结构倒塌临界状态的一个有效标准;Kim 等<sup>[3-4]</sup>认为确保剪力墙破坏形式为弯曲破坏可以增加结构的延性;张淑云等<sup>[5-6]</sup>研究发现框剪结构构件失效后,荷载传递符合就近传递原则;Nelson<sup>[7]</sup>对框剪非对称结构的扭转效应进行研究,给出了在结构设计时布置剪力墙应遵循的原则。以上研究均未考虑实际工程中结构设计参数对其抗连续倒塌性能的影响,而现有抗连续倒塌研究表明,不同设计参数对结构有一定的影响。郭海峰<sup>[8]</sup>对框架结构进行了不同抗震等级的设计,发现框架结构随着抗震等级的提高抗连续倒塌能力有所提升;罗开海<sup>[9]</sup>运用概率统计的方法发现 RC 框架结构的倒塌性能与结构设防烈度有明显的相关性。因此,在进行框剪结构的连续倒塌研究时,有必要考虑实际工程设计中不同

设防烈度对其的影响。

本文根据中国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[10]</sup>、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[11]</sup>等规范对 11 层框剪结构在不同烈度条件下进行设计,采用拆除构件法,运用 SAP2000 有限元分析软件对其进行非线性动力分析,探究在不同抗震设防烈度下不同受力构件以及相同构件对框剪结构的影响,不同抗震等级设计下材料用量与结构抗连续倒塌能力之间的关系,多方面显化工程设计中的抗震设防烈度这一参数对框剪结构连续倒塌的影响,所取得成果可为框剪结构的抗连续倒塌研究,以及实际工程设计能提供参考和借鉴。

## 1 模型的建立

### 1.1 混凝土框架—剪力墙结构基本信息

模型参考文献[12]中设计的框剪结构,运用 PKPM 根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等规范对 11 层框剪结构进行  $6^\circ(0.05g)$ 、 $7^\circ(0.15g)$ 、 $8^\circ(0.2g)$  三种烈度下的抗震设计。图 1 为本文模型平面图。对墙、柱、梁的确定规则为:墙体范围不变,改变墙厚,以轴压比接近限制为主要控制指标;柱截面以轴压比接近限值为主要控制指标;梁截面都以配筋率  $0.8\% \sim 1.5\%$  确定。

[收稿日期] 2021—12—29

[第一作者] 柯长仁(1974—),男,湖北阳新人,工学博士,湖北工业大学副教授,研究方向为结构优化及连续倒塌。

[通信作者] 周玉洁(1996—),女,湖北随州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为结构抗连续倒塌。

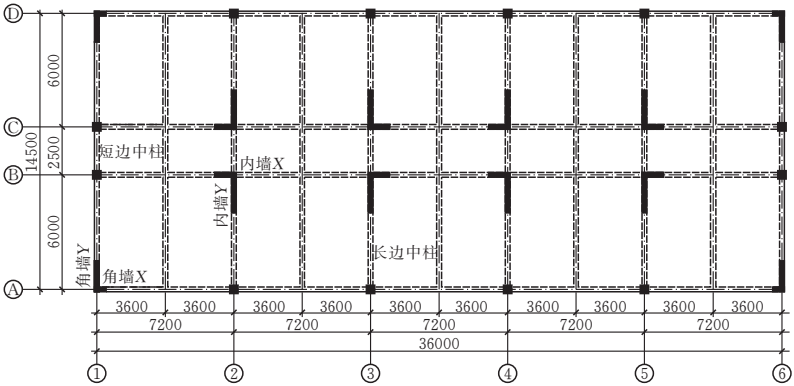


图 1 平面布置

表 1 结构设计基本参数

结构设计参数	参数取值
基本风压/(kN·m <sup>-2</sup> )	0.3
基本雪压/(kN·m <sup>-2</sup> )	0.3
设计地震动分组	第一组
设计场地类别	Ⅱ类
楼面恒载/(kN·m <sup>-2</sup> )	1.5
楼面活载/(kN·m <sup>-2</sup> )	2
屋面恒载/(kN·m <sup>-2</sup> )	5
屋面活载/(kN·m <sup>-2</sup> )	2
梁、柱、墙主筋等级	HRB400
箍筋等级	HPB335
混凝土强度(底部加强区:1—2层)	C35
混凝土强度(3—11层)	C30

该框剪结构在不同烈度下进行设计后的钢筋和混凝土用量见表 2,不考虑钢筋的弯折长度。由表中可知,该框剪结构的钢筋用量随烈度的增高而加大,7°(0.15 g)钢筋用量比 6°(0.05 g)的钢筋用量增加了 11.6%,8°(0.20 g)比 6°(0.05 g)增加了 33.8%。在混凝土用量统计中,三种设防烈度下用量变化不大,6°(0.05 g)和 7°(0.15 g)的材料用量中,主要是钢筋用量产生了变化,这说明随着烈度的增高,配筋的比例在抗震设计中占据更大的作用。

表 2 不同烈度下该框剪结构的钢筋和混凝土用量

烈度	钢筋用量/ (kg·m <sup>-2</sup> )	混凝土用量/ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )
6°(0.05 g)	25.43	0.21
7°(0.15 g)	28.37	0.21
8°(0.20 g)	34.04	0.23

1.2 有限元建模分析平台模型的验证

本文有限元分析软件选用 SAP2000,该软件对于处理高度非线性问题非常擅长,符合本次研究的基本要求。本文中梁柱选用 SAP2000 中的框架单元,该单元可以体现构件双轴弯曲、扭转、轴向变形、双轴剪切变形等效应,可以较好体现梁和柱的受力特性;剪力墙选用分层壳单元,该单元基于复合材料力学原理,将壳单元分为多层,每层根据需求,设置不同的材料属性和厚度来体现实际构件的力学性

能。运用分层壳模型建立剪力墙模型涉及的材料包括混凝土和钢筋。在混凝土层选用与实际相符的混凝土强度,并设置相应的厚度,在钢筋层,使用材料角属性定义钢筋分布的方向<sup>[13]</sup>。图 2 为选用 SAP2000 建立有限元模型图。有限元模型建立的准确性直接影响到后续的分析,对比有限元模型和 PKPM 建模所得周期,误差均在合理范围之内,说明 SAP2000 模型建立可靠。

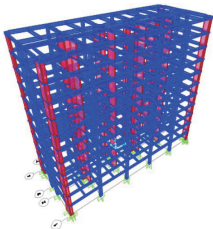


图 2 有限元模型

表 3 各模型周期对比

	PKPM	SAP2000	误差/%
6°(0.05 g)	1.2509	1.2365	1.15
7°(0.15 g)	1.2384	1.2132	2.03
8°(0.20 g)	1.1986	1.1768	1.81

1.3 分析方法及破坏准则

国内外各规范中对结构的抗连续倒塌分析的方法主要有概念设计法,拉结强度设计法,拆除构件设计法和关键构件设计法,其中拆除构件法为现今抗连续倒塌设计与研究的主要方法。在本次研究中,选用最常见的拆除构件法。利用 SAP2000 有限元分析软件对拆除构件后的剩余结构进行非线性动力分析,结构阻尼选用瑞利阻尼。具体方法为:第一步,建立有限元模型,确定拆除构件并获取该构件的内力;第二步,拆除关键构件,并在失效点添加与之相反的结构反力,保证剩余结构静力平衡;第三步,以一定的速度移除结构反力,构件失效时间参考 GSA2013<sup>[14]</sup>的建议,取残余结构自振周期的 0.1 倍。本次研究分别拆除不同烈度下的长边中柱,短边中柱,角墙 X,角墙 Y,角墙,内墙 X,内墙 Y 和内墙,其中角墙为同时拆除角墙 X 和角墙 Y,内墙为同时拆除内墙 X 和内墙 Y。对连续倒塌的破坏准则参考 GSA2013 的建议,以破坏转角大于 6°作为结构连续倒塌破坏的标准。

2 计算结果分析

2.1 底层柱拆除结果分析

对图 3,表 4,表 5 和表 6 的分析结果进行分析。

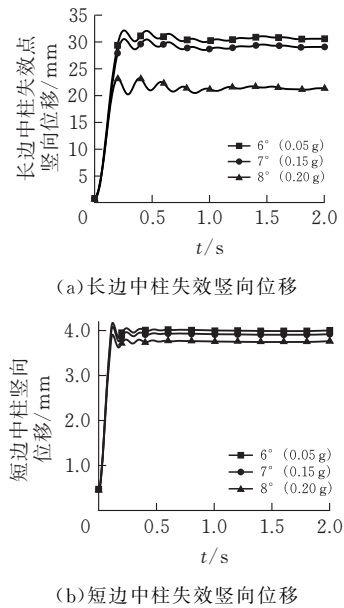


图 3 柱竖向位移时程曲线

表 4 6°(0.05 g)柱失效竖向位移表

	竖向最大 位移/mm	稳定竖向 位移/mm	失效点最大 塑性转角/(°)
长边中柱	32.3	30.6	0.308
短边中柱	4.2	4.0	0.040

表 5 7°(0.15 g)柱失效竖向位移表

	竖向最大 位移/mm	稳定竖向 位移/mm	失效点最大 塑性转角/(°)
长边中柱	30.6	29.1	0.292
短边中柱	4.1	3.9	0.039

表 6 8°(0.20 g)柱失效竖向位移表

	竖向最大 位移/mm	稳定竖向 位移/mm	失效点最大 塑性转角/(°)
长边中柱	23.2	21.3	0.222
短边中柱	3.9	3.7	0.037

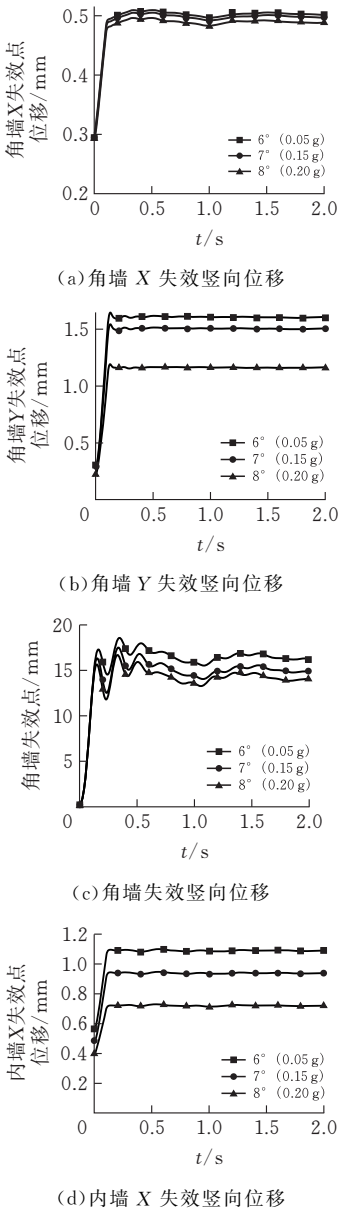
- 1)框剪结构在柱失效工况中,结构塑性转角均小于 6°结构均未发生连续倒塌。
- 2)不同烈度下,相同位置构件失效后失效点的位移变化走向相同,都是在失效柱刚失效时竖向位移加速加大,再小范围上下波动,最后趋于平稳。长边中柱竖向位移以及稳定竖向位移均大于短边中柱,这是因为,短边中柱处的刚度强于长边中柱处的刚度,这和框架结构中短边中柱和长边中柱失效效果基本相同。
- 3)从位移变化看出,在 8°(0.02 g)情况下,结构的竖向位移变化最小,而 6°(0.05 g)和 7°(0.15 g)的位移变化差距不大,这是因为在 6°(0.05 g)和 7°

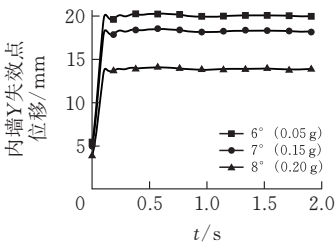
(0.15 g)中,柱和梁的抗震设防等级为三级,而 8°(0.20 g)中的梁和柱的抗震设防等级为二级,说明在柱失效时,结构随抗震等级的提高抗连续倒塌性能有所增强。从结构失效点最大塑性转角出发,也可发现 8°(0.20 g)塑性铰明显小于 6°(0.05 g)和 7°(0.15 g),说明该框剪结构在 8°(0.20 g)下的抗连续倒塌能力高于在 6°(0.05 g)和 7°(0.15 g)设防烈度下的抗震设计,再次验证上述结论。

4)柱失效工况中,失效点最大稳定失效位移工况为长边中柱失效工况,而在此位置 7°(0.15 g)比 6°(0.05 g)相比,失效点竖向位移降低 4%;8°(0.20 g)柱失效后稳定竖向位移比 6°(0.05 g)降低了 30.4%。

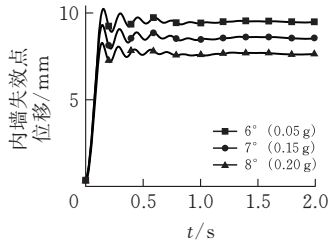
2.2 底层剪力墙拆除结果分析

对图 4,表 7,表 8 和表 9 的分析结果进行以下分析。





(e)内墙 Y 失效竖向位移



(f)内墙失效竖向位移

图 4 墙竖向位移时程曲线

表 7 6°(0.05 g)墙失效竖向位移表

	竖向最大 位移/mm	稳定竖向 位移/mm	失效点最大塑 性转角/(°)
角墙 X	0.518	0.515	0.005
角墙 Y	1.613	1.503	0.014
角墙	18.502	16.110	0.177
内墙 X	1.103	1.095	0.011
内墙 Y	2.201	2.105	0.021
内墙	10.1	9.5	0.096

表 8 7°(0.1 g)墙失效竖向位移表

	竖向最大 位移/mm	稳定竖向 位移/mm	失效点最大塑 性转角/(°)
角墙 X	0.512	0.472	0.005
角墙 Y	1.519	1.492	0.014
角墙	17.121	14.811	0.163
内墙 X	0.956	0.923	0.009
内墙 Y	1.862	1.828	0.017
内墙	9.212	8.704	0.088

表 9 8°(0.20 g)墙失效竖向位移表

	竖向最大 位移/mm	稳定竖向 位移/mm	失效点最大塑 性转角/(°)
角墙 X	0.485	0.482	0.005
角墙 Y	1.183	1.161	0.011
角墙	16.202	14.105	0.155
内墙 X	0.714	0.703	0.007
内墙 Y	1.411	1.380	0.013
内墙	8.201	7.205	0.078

- 1)框剪结构剪力墙失效工况中,失效点塑性转角均小于 6°,结构未发生连续倒塌。
- 2)不同烈度下,相同位置构件失效,结构响应相似,L 形墙体半墙失效时,失效点位移波动甚微,角墙和内墙整体失效工况中,结构的竖向位移波动较大。L 形墙体拆除一半的墙体,结构竖向位移变化甚微,这是因为,半面墙体失效后,另一面墙体能够

及时相应的结构倒塌抗力。而 X 方向墙体失效,竖向位移比 Y 方向墙体失效竖向位移大,这是由于 X 方向墙肢相对与 Y 向墙肢短,竖向承载力主要由 Y 向墙肢承担。对比全墙失效和半墙失效,可以看出,结构全墙失效时,结构的抗连续倒塌能力降低。角墙失效的竖向位移比内墙失效的竖向位移大,这是因为内墙失效后的与内墙相连的四根梁两端具有足够的约束,可以以梁端抗弯承载力提供倒塌抗力,而角墙失效后,内力由两根悬挑梁承担,梁端没有有效的支座约束,这和框架结构角柱失效和内柱失效效果基本相同。

3)从位移变化图可以看出结构在 8°(0.20 g)情况下,结构的竖向位移变化最小,7°(0.15 g)次之,6°(0.05 g)失效点位移最大,这是因为在 8°(0.20 g)时,剪力墙的抗震设防等级为一级,7°(0.15 g)时,剪力墙抗震等级为二级,6°(0.05 g)时,剪力墙的抗震设防等级为三级,说明在剪力墙失效时,结构随抗震等级的提高抗连续倒塌性能有所增强。从结构失效点最大塑性转角出发,也可再次验证上述结论。

4)墙体失效工况中,失效点最大稳定失效位移为角墙,而在此位置 7°(0.15 g)与 6°(0.05 g)相比,失效点竖向位移降低 8.1%;8°(0.20 g)角墙失效后稳定竖向位移比 6°(0.05 g)降低了 12.4%。

3 结论

本文对 11 层典型框剪结构进行不同烈度下的抗震设计,对在不同烈度下的进行抗震设计的框剪结构使用 SAP2000 有限元分析软件,采用拆除构件法,对结构底层的长边中柱,短边中柱,角墙 X,角墙 Y,角墙,内墙 X,内墙 Y,内墙进行拆除(其中角墙为同时拆除角墙 X 和角墙 Y,内墙为同时拆除内墙 X 和内墙 Y),对 24 种拆除工况进行非线性时程分析,得出以下结论:

- 1)该框剪结构各受力构件对结构的抗连续倒塌性能影响均相同:短边中柱<内墙<角墙<长边中柱,抗震设防烈度这一参数对各构件在整体结构抗连续倒塌性能中的作用排序影响不大。
- 2)相同构件在不同设防烈度下失效,剩余结构响应相似:失效点都在构件失效时竖向位移加速加大,再小范围上下波动,最后趋于平稳。L 形剪力墙半面墙体失效时,由于另一面墙体可以及时提供约束,失效点内力重分布更快,结构更快到达新的受力平衡,失效点竖向位移变化甚微,因此在实际工程中可将敏感竖向构件设计为剪力墙。
- 3)结构整体抗连续倒塌性能随着抗震等级的提高而增加。在混凝土和钢筋用量上,7°(0.15 g)地区



的设计与  $6^{\circ}(0.05\text{ g})$ 相比,混凝土用量不变,钢筋用量前者比后者增加了 11.6%,伴随的失效点竖向位移最大能降低 8.1%; $8^{\circ}(0.20\text{ g})$ 地区的设计与  $6^{\circ}(0.05\text{ g})$ 相比,混凝土用量变化不大,钢筋用量前者比后者增加了 33.8%,伴随的失效点竖向位移最大能降低 30.4%。在实际工程设计中需考虑实际情况,均衡结构造价与结构抗连续倒塌性能之间的关系。

4)随着抗震设防烈度的提高,结构失效点竖向位移均有所降低,这是由于烈度的提高伴随着钢筋混凝土用量的增多,梁的刚度增大,因此在高烈度地区设计中,需均衡结构的抗连续倒塌性能和“墙柱弱梁”的设计标准。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 林旭川,陆新征,缪志伟,等.基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用[J].土木工程学报, 2009, 42(03):49-54.

[2] 覃礼根.基于构件变形的 RC 剪力墙结构地震倒塌准则对比研究[D].广州:华南理工大学,2019.

[3] KIM T, Foutch D A.Application of FEMA methodology to RC shear wall buildings governed by flexure[J]. Engineering Structures,2007,29(10):2514-22.

[4] RAD B R, ADEBAR P. Seismic design of high-rise concrete walls: reverse shear due to diaphragms below flexural hinge[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(08):916-924.

[5] 张淑云,郭珊,马尤苏夫,等.方钢管框架钢板剪力墙核心筒结构抗倒塌分析[J].建筑科学,2020,36(01): 18-25.

[6] 胡超.大跨度预应力混凝土框—剪结构抗连续倒塌性能仿真研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.

[7] LAM N T K, WILSON J L, HUTCHINSON G L. Review of the torsional coupling of asymmetrical wall-frame buildings[J].Engineering Structures, 1997, 19(03):233-246.

[8] 郭海峰.不同抗震等级框架结构的抗连续倒塌能力研究[D].南京:东南大学,2018.

[9] 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.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范 GB 50010-2010(2015 年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范 GB 50011-2010(2016 年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[12] 徐铭阳.基于新型强度指标与 CPU 并行计算的框剪结构地震易损性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.

[13] 北京金土木技术有限公司.中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南[M].北京:人民交通出版社,2006.

[14] GSA2013, Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance[S]. Washington D. C.:the U.S.General Services Administration, 2013.

# Comparative Analysis of Progressive Collapse Resistance of Frame Shear Wall Structures Under Different Intensities

KE Changren, ZHOU Yujie

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China )

**Abstract:** In order to explore the progressive collapse resistance of frame shear wall structures under different intensities, the nonlinear dynamic analysis of 11-story frame shear wall structures under different intensities is carried out using SAP2000 finite element analysis software and the demolition member method. The results show that the seismic fortification intensity has little effect on the sequence of the action of each member in the overall anti-progressive collapse performance of the frame shear wall structure. Under different intensities, the response of the remaining frame shear wall structure is similar to the failure of the same member. Due to the bidirectional restraint, the L-shaped shear wall can improve the progressive collapse resistance of the structure. With the increase in intensity, the progressive collapse resistance of the frame shear wall structure is improved. Compared with  $6^{\circ}(0.05\text{ g})$ , the seismic design of the frame shear wall structure at  $7^{\circ}(0.15\text{ g})$  and  $8^{\circ}(0.20\text{g})$  has little change in the amount of concrete, the amount of reinforcement increases by 11.6% and 33.8%, respectively, and the maximum vertical displacement at the failure point can be reduced by 8.1% and 30.4%. The design of "strong beam and weak column" is easy to see when the frame shear wall structure is designed to resist progressive collapse in high-intensity areas.

**Keywords:** progressive collapse; frame shear wall structure; different intensity;SAP2000

[责任编辑:裴 琴]