

文章编号: 1000-5013(2013)02-0186-06

框剪结构剪力墙中断的地震反应分析

黄鑫, 徐玉野, 王卫华

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 建立结构对称和非对称布置的框剪结构的三维有限元模型. 采用 3 种中断条件和 2 种中断形式研究剪力墙的适宜中断位置和中断形式, 并对各模型进行地震反应分析. 结果表明: 1) 上部剪力墙全部中断, 对顶点最大位移和振型周期的影响相对较小, 但中断处楼层层间位移增大 24.4%~41.5%, 框架柱的平均剪力增大 86.6%~137.1%, 而部分中断则可避免层间位移及框架柱平均剪力产生较大突变; 2) 剪力墙中断后, 非对称结构的层间位移、总剪力墙的剪力、框架柱的平均剪力沿结构高度的变化规律与对称结构的情况大致相同, 而框架柱平均剪力增大略大于对称结构的情况; 3) 剪力墙中断位置由低至高的顺序为反弯点位置、最大层间位移角处、剪力为零处. 其中, 剪力墙在剪力为零处以上中断, 框架柱平均剪力的突变最小.

**关键词:** 框剪结构; 剪力墙中断; 抗震性能; 有限元模型; 层间位移

**中图分类号:** TU 312.1                      **文献标志码:** A

在高层框剪结构设计中可能会遇到结构上部由于建筑需要等原因, 要减小或完全取消剪力墙的尺寸, 形成剪力墙中断的框剪结构的问题. 近 30 年来, 国内外学者对上部剪力墙中断的框剪结构的抗震性能进行了研究, 表明剪力墙可以不通到顶, 剪力墙的中断对结构的侧移刚度不会造成太大的影响, 对顶部位移的影响也可忽略不计<sup>[1-3]</sup>. 王全凤等<sup>[4-5]</sup>采用杆系-层间模型, 对在不同高度中断剪力墙的框剪结构模型进行地震响应分析, 表明剪力墙可以在框剪结构反弯点以上截断. 冯宏团等<sup>[6]</sup>建立了框剪结构的三维有限元模型, 通过地震反应分析表明, 在反弯点处中断剪力墙不可取, 而在剪力墙剪力为零处以上中断更合理. 施金平<sup>[7]</sup>证明了剪力墙中断后, 不会形成剪力突增的薄弱层, 反而减小了顶层水平位移及层间位移角. 方德平等<sup>[8-9]</sup>对中断剪力墙的框剪结构进行研究, 表明剪力墙可中断高度决定于上部框架的抗剪能力, 上部剪力墙中断的相对高度值决定于结构的顶部位移. 影响上部剪力墙中断位置的因素, 主要有上部结构的抗剪能力、结构顶部的位移、框剪结构的刚度特征值等, 但不同文献对各因素的影响程度的研究结论略有不同<sup>[8-9]</sup>. 剪力墙中断位置, 主要有剪力墙的反弯点处、最大层间位移角处和剪力为零处 3 种<sup>[4-7]</sup>. 然而已有的研究成果基本上未考虑水平荷载作用下, 结构的扭转效应对剪力墙中断位置的影响. 因此, 本文利用结构设计软件 PKPM, 分别建立结构对称和非对称布置的框剪结构的三维有限元模型, 并采用 3 种不同的中断条件进行中断, 分析剪力墙的中断对框剪结构抗震性能的影响规律.

1 结构对称布置

1.1 计算模型

建立结构对称布置和剪力墙沿全高布置的 15 层框架-剪力墙结构模型 DM0, X, Y 方向均为 5 跨, 在 X, Y 方向各布置 4 片剪力墙, 其结构平面布置如图 1 所示. 参数设置如下: 底层高为 4.2 m, 2~15 层的层高为 3 m, 框架梁的尺寸均为 250 mm×500 mm, 剪力墙的厚度底层为 300 mm, 其余均为 200 mm,

**收稿日期:** 2012-05-25

**通信作者:** 徐玉野(1978-), 男, 副教授, 主要从事混凝土结构的研究. E-mail: yuyexu@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50908091); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目(11FJRC03); 福建省高等学校杰出青年科研人才培育计划资助项目(JA10005); 福建省教育厅 A 类面上科研基金资助项目(JA11003); 福建省泉州市技术研究与开发重点项目(2011Z10); 中央高校基本科研业务费专项基金资助(JB-SJ1011)

混凝土强度等级均为 C30. 设混凝土的容重为  $27\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ , 钢材的容重为  $78\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ , 楼面恒荷载为  $5\text{ Pa}$ , 活荷载为  $2\text{ Pa}$ , 抗震设防烈度为  $7^\circ$ , 基本风压为  $0.6\text{ Pa}$ , 地面粗糙度为 B 类, 场地类别为 II 类, 地震设计分组为第一组, 特征周期  $T_g=0.35\text{ s}$ , 地震影响系数最大值  $\alpha_{\max}=0.12$ , 阻尼比为  $5\%$ .

采用 PKPM 软件的 SATWE 模块对模型 DM0 进行地震反应分析, 结果显示反弯点出现在第 9 层, 最大层间位移角出现在第 10 层, 剪力墙剪力为零的点出现在第 12 层. 根据已有的中断条件, 建立 3 种剪力墙中断模型, 分别为在反弯点处、最大层间位移角处和剪力墙剪力为零处开始中断剪力墙.

剪力墙中断形式分部分剪力墙中断和全部中断两种形式: 1) 对于部分剪力墙中断的情况, 分别在第 9 层, 第 10 层和第 12 层中断墙 1、墙 3、墙 5 和墙 8, 对应的模型分别为 DMP9, DMP10 和 DMP12; 2) 对于全部中断的情况, 分别在第 9 层, 第 10 层和第 12 层中断墙 1~8, 对应的模型分别为 DMA9, DMA10 和 DMA12. 中断剪力墙时, 不中断剪力墙的端柱. 对上述剪力墙中断的 6 种模型和 DM0 分别采用振型分解反应谱法进行计算分析.

1.2 计算结果及对比分析

DM0 和 6 种剪力墙中断模型的前 3 阶振型的周期 ( $T$ )、 $X$  方向顶层最大水平位移 ( $\Delta_{\max,X}$ ) 和  $X$  方向底部最大剪力 ( $F_{\max,X}$ ) 的对比情况, 如表 1 所示. 由于结构对称,  $X$  和  $Y$  方向的计算结果相同, 因此, 表 1 中的顶部最大位移和基底最大剪力仅给出  $X$  方向的结果. 从表 1 中可得 3 点结论.

表 1 对称结构各模型的参数对比  
Tab. 1 Parameter comparison of symmetrical structures

参数		DM0	剪力墙部分中断			剪力墙全部中断		
			DMP9	DMP10	DMP12	DMA9	DMA10	DMA12
T/s	第 1 振型	1.238 8	1.233 9	1.229 0	1.228 5	1.274 4	1.244 4	1.224 7
	第 2 振型	1.238 8	1.233 8	1.228 9	1.228 4	1.274 4	1.244 4	1.224 7
	第 3 振型	0.883 1	0.882 6	0.875 5	0.871 3	1.001 0	0.939 5	0.872 7
$\Delta_{\max,X}/\text{mm}$		27.97	28.07	27.91	27.75	28.69	28.21	27.39
$F_{\max,X}/\text{kN}$		5 724.8	5 552.8	5 578.5	5 632.5	5 197.7	5 266.7	5 410.0

1) 剪力墙部分中断后结构前三阶振型的周期均略有降低, 降低程度的大小顺序为: 剪力为零处中断 > 最大层间位移角处中断 > 反弯点处中断. 顶部最大位移, DMP10 和 DMP12 略有减少, 而 DMP9 略有增加. 从总体上看, 部分中断后结构的自振周期和顶部最大水平位移和未中断的结构相比相差不大.

2) 剪力墙全部中断对结构自振周期和顶部最大位移的影响程度略大于部分中断的情况, 特别是对高阶振型(第三振型)的自振周期影响相对较大. 其中, 模型 DMA9 和 DMA10 的自振周期和顶部最大位移均比模型 DM0 略有增加, 而模型 DMA12 的自振周期和顶部最大位移均比模型 DM0 略有减小. 因此, 就剪力墙全部中断的情况而言, 在剪力为零处中断剪力墙的框剪结构的抗震性能比其他两种位置处中断的结构要好.

3) 剪力墙中断后, 结构基底的最大剪力都有不同程度的减小, 大致为  $1.6\%\sim9.2\%$ . 总体上, 剪力墙中断数量越多, 中断的位置越低, 中断后结构基底的最大剪力降低越多. 这也在一定程度上表明剪力墙的数量不是越多越好.

多遇地震作用下的层间位移, 是确保结构正常使用、防止非结构构件破坏的关键指标. 结构对称布置时剪力墙中断对层间位移变化 ( $\Delta$ ) 的影响情况, 如图 2 所示. 从图 2 中可以得出以下 3 点结论.

1) 与剪力墙至顶的模型 DM0 相比, 剪力墙中断后, 中断处以下楼层 ( $n$ ) 的层间位移均略有减小; 剪力墙中断位置越低(反弯点处)、中断数量越多, 下部楼层的层间位移减小越多.

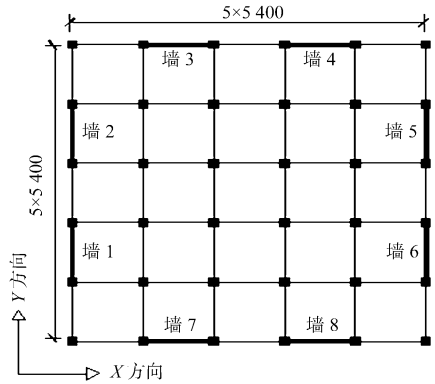
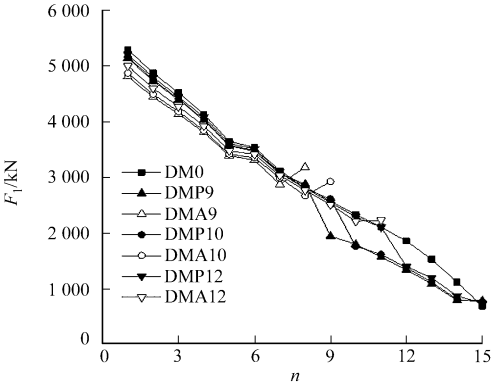


图 1 模型 DM0 的结构平面图(单位: mm)  
Fig. 1 Structural plan of model DM0 (unit: mm)

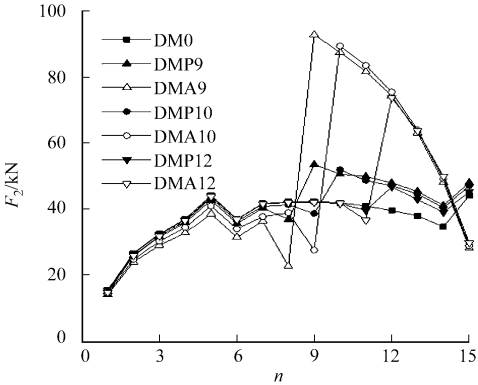
2) 中断楼层处,剪力墙全部中断比部分中断时的层间位移发生了较为明显的突然增大. 与未中断的 DM0 相比,剪力墙全部中断时中断处的楼层层间位移, DMA9, DMA10 和 DMA12 分别增大 40.6%, 39.2% 和 24.4%; 而剪力墙部分中断时,中断处的楼层层间位移增加相对较少, DMP9, DMP10 和 DMP12 分别增大了 5.7%, 5.3% 和 2.3%.

3) 剪力墙全部中断时,中断处以上的结构楼层出现层间位移显著大于未中断的情况. 这也从另外一个角度反应了部分中断比全部中断后结构的抗震性能要好.

结构对称布置时剪力墙的中断对剪力墙总剪力 ( $F_1$ ) 和框架柱平均剪力 ( $F_2$ ) 的影响, 如图 3 所示. 剪力墙总剪力对剪力墙全部中断的模型 DMA9, DMA10 和 DMA12 而言, 在中断楼层处及以上各楼层均为 0, 框架柱平均剪力指每层框架的总剪力除以该层框架柱的根数. 结合图 3(a), (b) 可得如下 4 点结论.



(a) 剪力墙总剪力



(b) 框架柱平均剪力

图 3 对称结构各模型剪力墙中断对不同剪力的影响

Fig. 3 Influence of wall interruption on shear force in symmetrical structure

1) 剪力墙的中断, 会略微降低中断处下一层以下楼层的剪力墙总剪力和框架柱的平均剪力, 且剪力墙中断数量越多, 中断位置越低, 降低的程度越大.

2) 与未中断的情况相比, 中断处下一层总剪力墙的剪力增大, 而框架柱的平均剪力降低. 这一现象在反弯点处和最大层间位移角处中断时非常明显, 而在剪力墙剪力为零处, 中断时较不明显. 表明在剪力为零处中断剪力墙对中断位置下一层的剪力墙和框架柱的剪力影响相对较小.

3) 在中断楼层处, 部分中断时总剪力墙的剪力较未中断时降低, 此时剪力墙的数量减少, 单片剪力墙承受的剪力是增大的. 剪力墙全部中断时, 框架柱的平均剪力较未中断时明显加大, DMA9, DMA10 和 DMA12 在中断处框架柱的平均剪力较未中断时分别增大 119.4%, 113.9% 和 86.6%; 剪力墙部分中断时, 框架柱的平均剪力增大较小, DMP9, DMP10 和 DMP12 在中断处框架柱的平均剪力分别增大 26.5%, 24.2% 和 15.4%. 可见, 剪力墙部分中断后框架柱的平均剪力变化明显小于全部中断的情况.

4) 全部中断时, 中断处以上楼层(顶层除外)框架柱的平均剪力显著大于未中断的情况, 但随着高度的增大, 框架柱的平均剪力衰减较快, 至顶层时降低至小于未中断的情况. 部分中断时, 中断处以上楼层框架柱的平均剪力沿高度的变化相对较小, 与未中断的情况一致, 数量上约为未中断的 102.6%~126.4%, 且随着高度的增大两者之间的差值减小.

2 结构非对称布置

2.1 计算模型

以往对框剪结构剪力墙中断的研究, 仅局限于结构对称布置的情况, 因此, 有必要分析当结构刚度

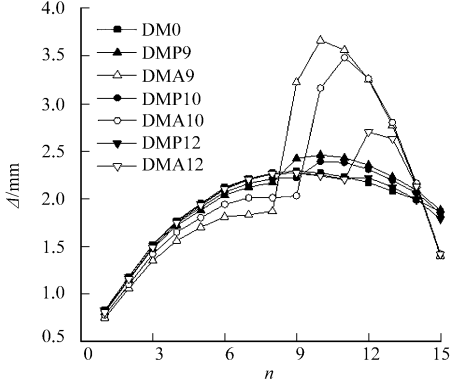


图 2 对称结构各模型的层间位移

Fig. 2 Storey drift of symmetrical structure

在中断楼层处及以上各楼层均为 0, 框架柱平均剪力指每层框架的总剪力除以该层框架柱的根数. 结合图 3(a), (b) 可得如下 4 点结论.

中心与质量中心相差较大时,上述中断条件是否依然适合.建立剪力墙沿结构全高非对称布置的框剪结构模型 FM0(简称非对称结构),结构平面布置如图 4 所示.非对称结构除了剪力墙的布置与对称结构不同以外,其他各项信息均与对称结构相同.模型 FM0 的首层质量中心与刚度中心之间的距离(即扭转偏心距),X 方向为 2.089 m,Y 方向为 2.046 m,2~5 层 X 方向为 1.771 m,Y 方向为 1.770 m,6~15 层 X 方向为 2.032 m,Y 方向为 2.039 m.

由于扭转效应的存在,结构中不同位置剪力墙的内力不一样.对模型 FM0 进行地震反应分析,结果显示:墙 1~5 的反弯点出现在第 8 层,墙 6~8 的反弯点出现在第 9 层;层间最大位移角出现在第 10 层,墙 1~2 和墙 5~8 剪力为零处出现在第 12 层,墙 3~4 剪力为零处出现在第 11 层.

作为初步探讨,剪力墙的中断位置取同一楼层,并按前述的 3 种中断条件进行中断.由于每片剪力墙的反弯点位置、剪力为零处的位置略有不同,因此,剪力墙的反弯点、剪力为零处的中断位置分别取各片剪力墙反弯点位置、剪力为零的位置的较高值.中断形式分部分非对称剪力墙中断和剪力墙全部中断两种:1) 对于部分非对称剪力墙中断的情况,分别在第 9 层、第 10 层和第 12 层中断墙 5~8,对应的模型分别为 FMP9,FMP10 和 FMP12;2) 对于全部中断的情况,分别在第 9 层、第 10 层和第 12 层中断墙 1~8,对应的模型分别为 FMA9,FMA10 和 FMA12.中断剪力墙时,不中断剪力墙的端柱.对以上剪力墙部分中断和全部中断的六种模型和 FM0 分别采用振型分解反应谱法进行计算分析.

2.2 计算结果及对比分析

FM0 和 6 种剪力墙中断模型的前 3 阶振型的周期、顶层最大水平位移和基底最大剪力的对比情况,如表 2 所示.从表 2 中可以得出以下 4 点结论.

表 2 非对称结构各模型的参数对比  
Tab. 2 Parameter comparison of asymmetric structure

参数		FM0	剪力墙部分中断			剪力墙全部中断		
			FMP9	FMP10	FMP12	FMA9	FMA10	FMA12
T/s	第 1 振型	1.287 3	1.279 8	1.277 5	1.276 2	1.311 2	1.287 7	1.275 3
	第 2 振型	1.241 5	1.238 7	1.233 1	1.231 0	1.280 2	1.249 1	1.227 1
	第 3 振型	1.024 3	1.018 4	1.015 4	1.014 6	1.093 2	1.050 2	1.011 4
$\Delta_{\max,X}/\text{mm}$		32.35	32.52	32.40	32.27	32.49	32.21	31.53
$\Delta_{\max,Y}/\text{mm}$		32.66	32.55	32.47	32.38	32.55	32.29	31.66
$F_{\max,X}/\text{kN}$		5 253.0	5 271.9	5 254.0	5 231.9	4 966.7	4 988.4	5 016.4
$F_{\max,Y}/\text{kN}$		5 222.0	5 270.7	5 251.1	5 220.6	4 960.2	4 980.9	5 004.4

- 1) 对于非对称的框剪结构,中断上部剪力墙后结构的自振周期、顶部最大位移和基底最大剪力总体上与未中断时相差不大.这表明对非对称的框剪结构中断上部剪力墙也是可行的.
- 2) 剪力墙部分中断后结构前三阶振型的周期均略有降低,降低程度的大小顺序为:剪力为零处中断>最大层间位移角处中断>反弯点处中断.顶部最大位移,X 方向上 FMP9,FMP10 略有增加,而 FMP12 略有减少;Y 方向上均略有减少.
- 3) 模型 FMA12 的自振周期、顶部最大位移和基底最大剪力均比模型 FM0 略有减小.这表明对非对称结构在合适的位置中断上部剪力墙可改善结构的抗震性能.
- 4) 当剪力墙部分中断时,结构的基底最大剪力出现大于未中断时的情况(如 FMP9 和 FMP10).这与对称结构剪力墙中断时的情况略有不同,对称结构剪力墙中断后结构的基底最大剪力总是下降的.非对称的框剪结构剪力墙全部中断后,结构的基底最大剪力均略有降低,FMA9,FMA10 和 FMA12 的基底最大剪力较未中断时,X 方向分别降低 5.5%,5.0%,4.5%,Y 方向分别降低 5.0%,4.6%和 4.2%.

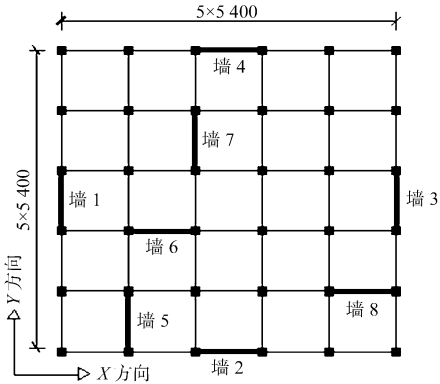


图 4 模型 FM0 的结构平面图(单位: mm)  
Fig. 4 Structural plan of model FM0 (unit: mm)

结构非对称布置时,剪力墙中断对层间位移变化的影响情况,如图 5 所示.从图 5 中可知:非对称结构在剪力墙中断后,层间位移呈现出与剪力墙对称布置结构相同的变化规律.与未中断的 FM0 相比,剪力墙全部中断时,中断处的层间位移,FMA9,FMA10 和 FMA12 分别增大 41.5%,38.7%和 24.6%,而剪力墙部分中断时中断处的楼层层间位移增加相对较少,FMP9,FMP10 和 FMP12 分别增大了 5.8%,4.9%和 2.4%.可见,非对称的框剪结构剪力墙中断后,中断楼层处层间位移的增加值与对称结构的对应情况相差不大.

结构非对称布置时剪力墙的中断对剪力墙总剪力( $F_1$ )和框架柱平均剪力( $F_2$ )的影响情况,如图 6 所示.此处,剪力墙总剪力对于剪力墙全部中断的模型 FMA9,FMA10 和 FMA12 而言,在中断楼层处及以上各楼层均为 0.

由图 6 可知:非对称结构的剪力墙中断后,剪力墙总剪力和框架柱平均剪力沿高度的变化规律与结构对称布置的框剪结构剪力墙中,断后的变化规律类似.FMA9,FMA10 和 FMA12 在中断处框架柱的平均剪力较未中断时分别增大 137.1%,128.2%和 99.8%;剪力墙部分中断时,框架柱的平均剪力增大较小,FMP9,FMP10 和 FMP12 在中断处框架柱的平均剪力分别增大 34.4%,31.6%和 25.7%.部分中断时中断处以上楼层框架柱的平均剪力约为未中断的 110.1%~134.4%.可见,非对称框剪结构剪力墙中断后引起的框架柱平均剪力增大略大于对称结构的情况.因此,非对称结构特别是扭转偏心距较严重的结构,框剪结构的剪力墙中断要慎重一些.

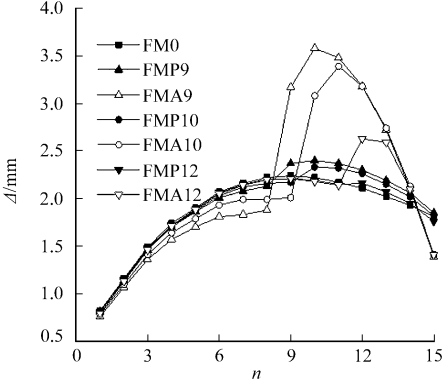
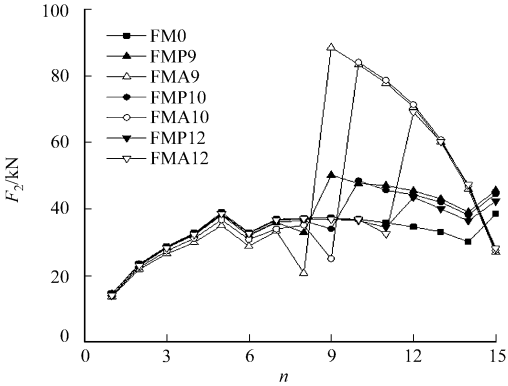
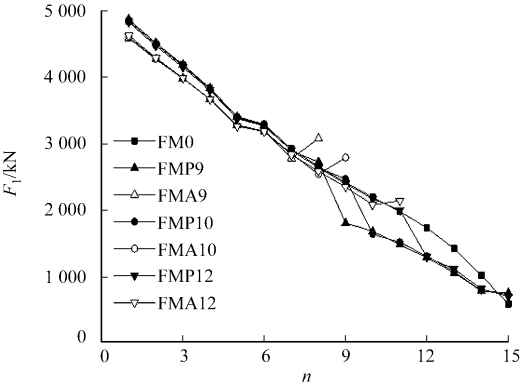


图 5 非对称结构各模型的层间位移  
Fig. 5 Storey drift of asymmetric structure



(a) 剪力墙总剪力  
(b) 框架柱平均剪力  
图 6 非对称结构各模型剪力墙中断对不同剪力的影响

Fig. 6 Influence of wall interruption on shear force in asymmetrical structure

### 3 结束语

- 研究结构对称和非对称布置的框剪结构剪力墙中断前后的地震反应分析,得出以下 3 点结论.
- 1) 结构对称布置或非对称布置的框剪结构中断上部剪力墙后,结构的自振周期、顶部最大位移、基底最大剪力总体上变化不大.结构非对称布置的框架-剪力墙结构,在剪力墙中断后结构的层间位移、总剪力墙的剪力、框架柱的平均剪力沿结构高度的变化规律与对称结构的情况大致相同.非对称框剪结构剪力墙中断后引起的框架柱平均剪力增大略大于对称结构的情况.
  - 2) 剪力墙中断后,中断处以下楼层的层间位移均略有减小.中断处楼层的层间位移增大 24.4%~41.5%、框架柱的平均剪力增大 86.6%~137.1%,而部分中断则可避免层间位移角、框架柱平均剪力产生较大突变,显得更为合理.
  - 3) 3 种中断条件中,剪力墙中断位置由低至高的顺序:反弯点位置、最大层间位移角处、剪力为零

处. 其中, 在剪力墙剪力为零处以上中断上部剪力墙后框架柱平均剪力的突变最小.

参考文献:

[1] MOEHLE J P. Seismic analysis of R/C frame wall structure [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(10): 2619-2634.

[2] WANG Quan-feng, WANG Ling-yun, LIU Qian-sheng. Seismic response of stepped frame-shear wall structures by using numerical method [J]. Int J Computer Method in Applied Mechanics & Engineering, 1999, 173(1/2): 31-39.

[3] WANG Quan-feng, WANG Ling-yun, LIU Qian-sheng. Effect of shear wall height on earthquake response [J]. Engineering Structures, 2001, 23(4): 376-384.

[4] 王全风, 张波, 罗漪. 框-剪结构剪力墙中断和楼层刚度比分析[J]. 建筑结构, 2003, 33(5): 39-41.

[5] 王全风, 张波. 含断层剪力墙框-剪结构的楼层地震剪力[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2001, 22(4): 389-393.

[6] 冯宏团, 张海龙. 框-剪结构剪力墙中断分析[J]. 建筑结构, 2005, 35(12): 45-46.

[7] 施金平. 框-剪结构剪力墙局部中断的设计探讨[J]. 结构工程师, 2007, 23(6): 6-10.

[8] 方德平, 王全风. 框剪结构剪力墙中断条件的数值分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2006, 27(3): 273-276.

[9] 方德平, 王全风. 框-剪结构剪力墙可中断高度的分析研究[J]. 工程力学, 2007, 24(4): 124-128.

## Seismic Response Analysis of Shear Wall Interruption in Frame-Shear Wall Structure

HUANG Xin, XU Yu-ye, WANG Wei-hua

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The three dimension finite element model of both symmetrical and asymmetric frame-shear wall structure was established. Adopting three interrupt conditions and two interrupt forms, the suitable interrupt position and form of shear wall were studied, the seismic response of these models was analyzed. The calculation results show that: 1) the influence of whole upper shear wall interruption on the top maximum displacement and natural vibration period is relatively small, but the displacement between layers in intermitting position increases by 24.4%~41.5% and the average shear force of the frame column increases by 86.6%~137.1%. The partial interruption of upper shear wall can avoid the above abrupt change. 2) The variation of story drift, the shear force of total shear wall and the average shear force of the frame column along the height in asymmetrical structure is close to the variation in symmetrical structure, but the average shear force of frame column in asymmetrical structure is slightly greater than the one in the symmetric structure. 3) The shear wall interruption position from low to high is: contraflexure point, the position with maximum story drift angle and the position with zero shear force. Among them, the abrupt change of average shear forces of frame column is minimum when the shear wall is interrupt from the position with zero shear force to the top.

**Keywords:** frame-shear wall structure; shear wall interruption; seismic performance; finite element model; storey drift

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 方德平)