

文章编号 1000-5013(2001) 04-0389-05

含断层剪力墙框-剪结构的楼层地震剪力

王全凤 张波

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 在用数值分析法分析含断层剪力墙框-剪结构地震响应的基础上, 采用杆系-层间模型, 对不同剪力墙高度的剪力墙刚度中断的框-剪结构模型进行动力分析. 通过输入 EL-Centro 地震波, 将所得到的结构最大位移反应和楼层剪力与振动台的试验结果进行对比, 结果吻合较好. 文中得出反应点以上的截断剪力墙, 比在其下截断对于框-剪结构的抗震和受力更为有利的结论.

关键词 框-剪结构, 地震响应, 杆系-层间模型, 刚度中断, 楼层地震剪力

中图分类号 TU 973⁺.16; TU 973⁺.212

文献标识码 A

关于高层框-剪结构中的剪力墙中断问题^[1~2], 国内学者认为^[3~4], 剪力墙的布置, 原则上不应中断. 假如基于建筑功能的要求必须断层, 那么转换层应进行加固. 国外学者则认为^[5~7], 剪力墙可以不通到顶. 剪力墙在中部截断对结构的侧向刚度不会造成太大的影响, 对于顶部位移的影响可以忽略. 而且, 转换层的截面设计只跟分配到的绝对地震作用效应有关, 不必进行特殊加固. 框-剪结构在我国是最为常见的一种高层建筑结构型式. 如果剪力墙被证明可以不通到顶, 而且转换层在一定技术指标内不必加固, 则剪力墙混凝土用量将显著减少. 它不仅可以节省工程造价和发挥投资效益, 而且对于建筑结构顶部的空间布置也更灵活并可满足不同功能的要求. 本文继续探讨剪力墙中断对框-剪结构地震反应的影响.

1 分析的方法

1.1 运动方程

为了进行含断层剪力墙框-剪结构的动力时程分析, 运用 d'Alembert 原理及弹性阻尼的假定, 列出多质点体系在地震作用下的运动方程. 即

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\ddot{X}_g, \quad (1)$$

式中 X , \dot{X} 和 \ddot{X} 分别为 t 时刻各质点相对地面运动的位移、速度、加速度所组成的列向量. \ddot{X}_g 为地面运动加速度向量, M , C 和 K 分别为多质点体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵.

1.2 运动方程的解

目前, 进行动力时程分析多用层间模型. 其优点是压缩了自由度的数量, 但剪切型的层间模型不能考虑整体弯曲的影响, 剪弯模型也只考虑相邻层的影响. 它无法判断杆件的工作

状态, 局限性较大. 杆模型虽可反映每一时刻每根杆件的弹塑性状态, 但运动方程中自由度数目太多. 考虑到计算机容量以及计算精确性和稳定性, 本文采用杆系-层间模型. 它以各榀抗侧力构件为子结构, 最终集结为母结构, “静按杆系, 动按层间, 分别判断, 合并运动”^[8]. 由于作为输入地震的地面加速度时程曲线是很难用时间函数来表示, 对运动方程的求解只能用数值积分的方法进行. 本文采用逐步积分法中无条件稳定 Wilson- θ 法计算框-剪结构各层的地震动力响应, 程序用 Fortran 90 语言编制, 具有短小、精确、运行速度快等优点. 它运行在纯32位系统上, 突破了在 DOS 下只能够调用640 K 内存的缺点, 适合于进行大型结构的复杂分析.

2 含断层剪力墙框-剪结构的地震反应

为研究由于剪力墙截断高度不同, 其引起剪力墙刚度变化对框-剪结构地震反应的影响. 本文利用 Moeble 和 Sozen 采用的模型和实测数据^[9], 分别对4个不同剪力墙高度的模型进行动力分析和对比. 地震记录与9层模型振动台试验所采用的一样, 均为1940年 EL-Centro 地震记录的南北水平分量. 其地面运动加速度(a)的波形, 如图1所示. 与 Moeble 和 Sozen 所采用的

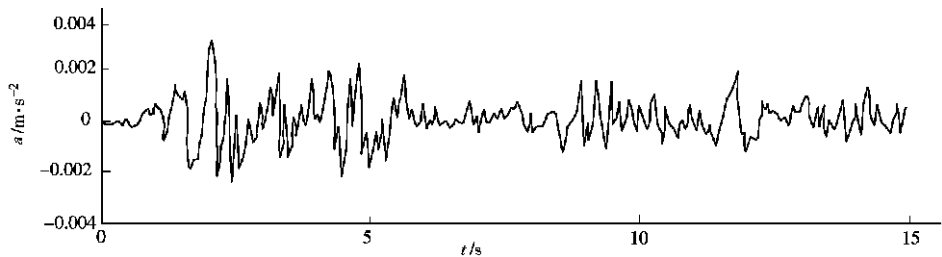


图1 EL-Centro 地震记录的南北水平分量(前20 s 记录)

模型一致, FW0代表纯框架结构, FW9代表剪力墙到顶, 表示整个结构抗侧移刚度沿高度方向分布均匀, FW1和FW4代表剪力墙分别只通到1, 4层, 表示抗侧移刚度沿高度方向分布不均匀. 对于 FW0, FW1, FW4和FW9, 其加速度峰值($m \cdot s^{-2}$)分别采用0.003 9, 0.003 4, 0.004 1和0.003 2. 时间间隔为0.02 s, 共1 000个点. 控制输入地震波点值的变量为 N_{IN} , N_{OUT} , 可根据不同的地震波进行调整. 地震波幅值调整系数定义为AMP, 可根据要求取不同的实型数值. 这些变量的赋值可在结构分析的输入信息文件中方便地更改.

2.1 结构位移的地震反应

2.1.1 结构最大位移 采用杆系-层间模型动力分析, 表1列出纯框架和不同剪力墙高度的框-剪结构4种模型的地震响应顶部最大位移值(δ_{max}), 并与各实测值进行比较. 可以看出, 除了FW9有一定的误差外, 其它3种结构的计算值与实测值均比较接近. 这表明本方法能够计算剪力墙不到顶的框-剪结构的动力

表1 不同计算模型的
顶部最大位移值(mm)

计算模型	实测值	计算值
FW0	26.30	24.151
FW1	22.40	20.168
FW4	23.20	20.112
FW9	26.10	17.125

反应. 由于振动台输入的地震波幅值并不相同, 尤以 FW4输入的幅值最大, 达到 $0.004 1 m \cdot s^{-2}$. 但从反应结果来看, FW4并没有出现较大的顶部位移. 用本文的杆系-层模型分析, 当对FW9输入 $0.004 1 m \cdot s^{-2}$ 的地震波时, 其顶部最大位移响应达到20.549 mm之多. 而FW1在输入 $0.004 1 m \cdot s^{-2}$ 的地震波后, 顶部最大位移响应达到24.159 mm. 由此可见, 在相同的地震波幅值下, FW4与FW9的地震位移反应几乎相同, 而FW1与FW9的反应值相差较大. 从以上分

析看, 不同剪力墙高度的框-剪结构, 当剪力墙在结构较上部截断时, 与剪力墙全高布置下的顶部最大位移反应没有什么不同。

2.1.2 结构的地震反应变形曲线 4种模型结构相应的地震反应变形曲线, 如图2所示. 从图中可以看出, 各模型结构的位移曲线形状与理论推导相一致. FW0的变形曲线是典型的剪切型. 对于FW1, 由于有第1层剪力墙存在, 在结构下部位移较FW0有明显地减少, 呈现比较明显的剪弯型变形的特征. 从第2层开始, 由于取消了剪力墙, 变形曲线由剪弯型过渡到剪切型, 可以看出在结构上部, 变形曲线有较显著的剪切型特点. 从计算结果也可看出, FW1在剪力墙截断的第3层出现了较大的层间变形, 由下向上层间变形逐渐减小. 这说明第3层是该模型结构的薄弱层. 究其原因是在较低位置截断造成自转换层起上部楼层刚度较低. 与FW0和FW1相比, FW4和FW9的位移曲线是典型的剪弯型, 虽然FW4的剪力墙仅仅通到第4层. 从变形曲线的反弯点的位置来看, 这两种模型结构的反弯点都位于结构的中部, 在第4至第5层范围内. 由于反弯点的位置与结构的刚度特征值有关, 说明FW4较FW9的刚度特征值没有下降.

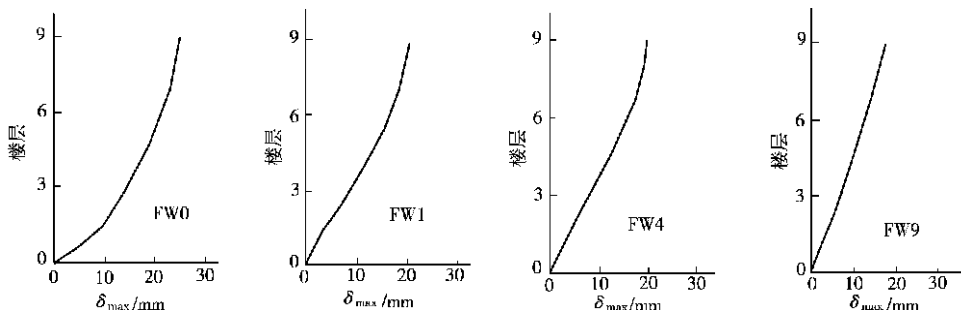


图2 4种模型结构的最大位移

2.1.3 结构的层间位移 图3绘出了4种模型结构的最大层间位移(x_{max}). 可以看出, FW0因是纯框架, 各层层间位移值的最大值分布于底层, 尤以第1层与第2层之间的位移突变较大.

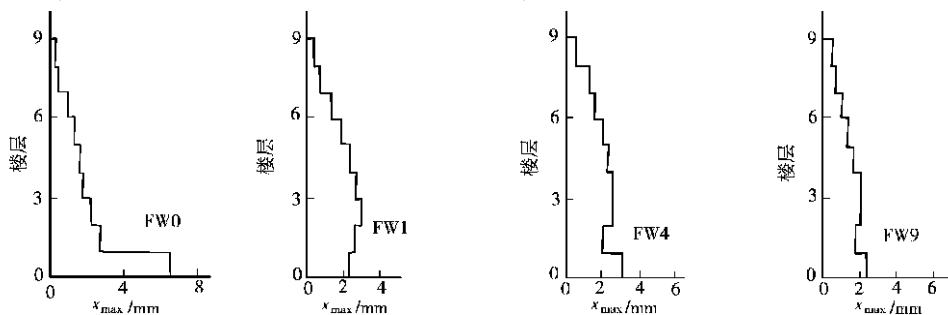


图3 层间位移图

其它层的层间位移逐次收进, 没有较大的突变. 框架底层即为薄弱层. FW1由于剪力墙过低截断, 导致第3层转换层及上一层出现较大的层间位移, 而且都比底层的值大, 其薄弱层就是第3层和第4层. 由于一般框-剪结构的控制截面为楼高的 $0.5 \sim 0.8$ ^[6], 而从FW1的层间位移来看, 薄弱层不在结构的中上部, 而在因剪力墙截断而产生刚度突变的楼层. 对于框-剪结构来说, 其变形曲线的反弯点位置体现了框剪结构的整体刚度特性, 在反弯点以上框架除了要承受外部弯矩, 还要承受剪力墙弯曲变形所产生的弯矩. 一般来说, 结构刚度特征值大, 反弯点位置低,

反之则高. 因此, 就 FW1模型来说, 剪力墙在较低的楼层截断, 即在框-剪结构的反弯点以下截断时, 必然过早地使框架承受本应由剪力墙所承担的那一部分外力. 由于框架柱的水平刚度与剪力墙相差较大, 导致框架变形也较大. 这从 FW1的层间变形在转换层上部较大也可以看出. 所以, 在框-剪结构反弯点以下截断剪力墙, 若不能保证转换层的刚度, 将因为刚度突变而使结构产生显著的薄弱层, 对结构抵抗水平地震作用不利. 从此意义上说, 剪力墙截断位置较低时, 如不采取其它的加强措施, 结构安全性是得不到有效保证的. FW4和 FW9的层间位移图比较接近, 各层的层间位移均匀变化, 没有较大的突变, 中部楼层和底层具有相似的层间位移值. 这符合一般框-剪结构的变形特点. 从两者层间位移图相似可看见, 它们之间抗震性能是相当的. 在第5层截断剪力墙对本模型结构来说, 并没有影响到其抗震能力. 由此可见, 在反弯点以上截断剪力墙不会对框-剪结构的抗震能力产生不利的影响. 值得注意的是, 顶部两层层间位移值 FW4的要比FW9的为小, 说明全高剪力墙的框-剪结构上部几层要承受着较大的地震作用. 这将导致结构的底层剪力加大, 同时结构的倾覆弯矩也将加大. 就这一点看, FW4比 FW9有着更好的抗震性能.

2. 2 结构的地震反应楼层剪力

表2列出了4个计算模型底部剪力(σ)的实测值和计算值, 两比较接近. 这说明本文的动力分析的计算结果是准确的. 图4反映了4种模型结构的楼层剪力分布情况. 由图中可以看出, 当剪力墙较高, 刚度较大时, 结构承受的地震作用也就相应地变大.

从 FW4和 FW9的基底剪力来看, 两者相差不大, 但 FW4的基底剪力值较 FW9有所降低. 这是由于上部楼层承受的楼层剪力下降的原因. 若考虑由于截断剪力墙所引起整个结构的重心下降, 也会使剪力墙刚度中断的框-剪结构的基底剪力下降, 使整个结构的抗震性能得到提高. 另

表2 不同计算模型底部
剪力(kN)比较

计算模型	实测值	计算值
FW0	12.2	13.656
FW1	12.8	14.384
FW4	13.2	14.948
FW9	14.0	15.141

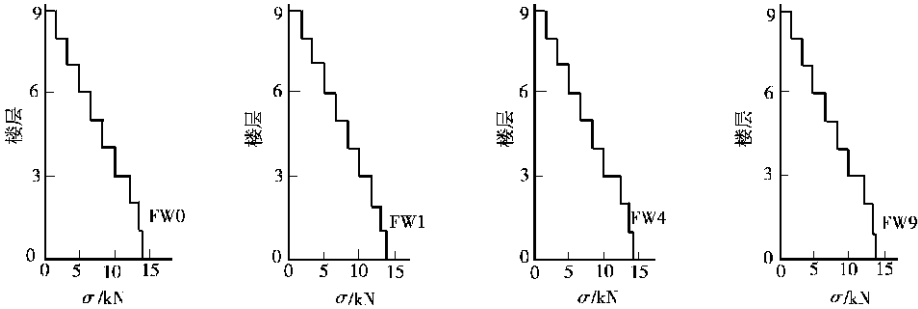


图4 4种模型结构的楼层剪力

外, 由于上部框架是柔性结构, 这也使得结构在抵抗地震作用时具有了比原全高剪力墙的框-剪结构更好的延性. 因此在消耗地震能量过程中, 也具有比传统的框-剪结构更好的性能.

3 结束语

从对此模型结构在不同剪力墙高度和刚度情况的动力响应分析来看, 计算模型 FW4与剪力墙全高的 FW9结构性能接近, 而且在结构的上部楼层, 有更小的层间变形和楼层剪力. 与 FW1相比, 在抵抗结构位移反应及楼层剪力上有更好的性能. 由于 FW1截断剪力墙的位置较低, 使得其性能与 FW4有比较大的差距. 因此可以得出, 在反弯点以上截断剪力墙比在其下截

断对于框-剪结构的抗震和受力更趋有利. 本文针对的是一种结构, 因而其结论是否具有普遍性, 还需要继续进一步研究.

参 考 文 献

- 1 Wang Quanfeng, Wang Lingyun, Liu Qiansheng. Seismic response of stepped frame-shear wall structures by using numerical method[J]. Int. J., Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1999, 173(1-2): 31 ~ 39
- 2 Wang Quanfeng, Wang Lingyun, Liu Qiansheng. Effect of shear wall height on earthquake response[J]. Int. J., Engineering Structures, 2001, 23(4): 376 ~ 384
- 3 赵西安. 高层建筑结构实用设计方法[M]. 第3版. 上海: 同济大学出版社, 1998. 236 ~ 238
- 4 秦 荣. 高层框剪结构分析的新方法[J]. 工程力学, 1988, 5(2): 35 ~ 45
- 5 Jack P. Moehle seismic analysis of R/C frame-wall structures[J]. J. of Structural Engineering, 1984, 110: 2 619 ~ 2 634
- 6 Safak E, Frandel A. Structural response to 3D simulated earthquake motions[J]. J. of Structural Engineering, 1994, 120(10): 2 820 ~ 2 839
- 7 Moehle J P. Seismic analysis of R/C frame-wall structures[J]. J. of Structural Engineering. 1984, 110(11): 2 619 ~ 2 634
- 8 孙业扬, 余安东. 高层建筑杆系-层间模型弹塑性动态分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1980, 8(1): 87 ~ 98

Seismic Shear of Floor in a Frame-Shear Structure Containing Fault Shear Wall

Wang Quanfeng Zhang Bo

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract The present work is based on the numerical analysis of the seismic response of a frame-shear structure containing fault shear wall. By adopting member-relative storey model, a dynamic analysis is made on a model of frame-shear structure containing shear wall with stiffness interruption at different heights of shear wall. After inputting El-Centro seismic wave, maximum displacement reaction and floor shear of the structure are obtained and are compared to the results from test of vibrostand, both results are well-coincided. It is also concluded that truncation of shear wall above inflection point will be favourable to seismic resistance and force condition of the frame-shear structure more than that below inflection point.

Key words frame-shear structure, seismic response, member-relative storey model, stiffness interruption, seismic shear of floor