

竖向地震下超高层建筑结构的简化波动分析

何政, 张昊强

(大连理工大学 土木工程学院, 116024 辽宁 大连)

摘要: 为研究近断层地区竖向地震下超高层建筑结构的脉冲波动效应, 将典型超高层建筑结构体系分别简化为一维和二维模型, 在弹性范围内, 确定纵波通过集中质量的反射和透射系数, 以时域差分延时和 FFT 频域滤波为求解策略, 用简化波动分析方法计算结构在竖向地震下的宏观响应, 评估结构在竖向地震下的抗震性能. 分析表明, 与振动分析方法相比, 波动分析方法在计算结构竖向地震响应时更具有针对性, 特别是近场脉冲型竖向地震下. 竖向地震引起轴向构件的轴力波动和相对错动不容忽视.

关键词: 超高层建筑; 竖向地震; 波动分析; 脉冲型地震动; 相对错动效应

中图分类号: TU352; TU355

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)10-0093-07

Simplified wave propagation analysis of high-rise buildings under vertical earthquakes

HE Zheng, ZHANG Haoqiang

(Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To study the impulse wave effect of high-rise buildings under vertical earthquake near fault region, simplified wave propagation method is adopted. In elastic range, typical structural system is simplified as one and two dimensional model, and reflection and transmission coefficients of longitudinal wave through lumped mass are determined. Structural vertical seismic macro response is calculated by simplified wave propagation method in which difference time delay and FFT filter are used. The analysis shows that, compared with the vibration method, the wave propagation method is more targeted in calculating structural vertical seismic response, especially under impulse-type vertical earthquake. The axial force fluctuation and relative movement caused by vertical earthquake can not be ignored.

Key words: high-rise building; vertical earthquake; wave propagation analysis; impulse-type earthquake; relative movement effect

为满足水平抗侧力和建筑功能的要求, 典型的超高层建筑结构存在竖向构件的轴向刚度和质量沿结构高度不均匀变化, 内部核心筒和外部框架柱的轴向刚度差距较大等情况. 同时, 竖向地震纵波传播速度快, 能将较大能量在短时间输入结构, 且对结构中的质量和刚度不均匀变化较为敏感. 这些不利因素可能会给结构的抗震性能埋下

潜在隐患. 特别在近断层区域, 较大的 V/H 值和脉冲型竖向地震动无疑会加大这种脉冲波动效应. 一些研究和调查也发现了竖向地震对结构的危害性, 如竖向地震动引起了桥墩轴力的波动, 进而导致剪切承载力的下降^[1]; 竖向地震动引起了框剪、框筒等多、高层建筑结构显著的竖向相对错动效应^[2]; 竖向地震下, 多塔结构的连体部分和悬臂部分的结构内力响应较显著^[3]; 竖向脉冲型地震作用使结构梁柱节点处出现了较大的动应力集中^[4].

对于结构在竖向地震动下响应的分析计算及抗震性能评估, 贾俊峰等^[5]、周靖等^[6]均采用基于振动力学的时程分析方法分析结构的响应. 但

收稿日期: 2012-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90915005); 教育部新世纪优秀人才资助项目(NCET-08-0096); 国际自然科学基金重大国际合作与交流项目(51161120359).

作者简介: 何政(1971—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 何政, hezheng1971@126.com.

是基于振动力学的方法不能考虑到地震波传播的时延性^[7]和波的反射叠加^[8]等不利因素.而且超高层建筑的高度很大,波在结构中传播一个来回的时间相对较长,会造成结构的宏观振动显著滞后于波传播^[9].同时波传播方法能够包含更多模态,对结构中的不均匀变化更具敏感性.因此,用波传播方法分析计算超高层建筑结构在竖向地震下的响应更具有针对性.

对于建筑结构,当竖向地震波通过墙、柱等轴向构件到达楼板,再在楼板中不断地反射、透射和衍射,这个过程的完整力学描述以及数值求解一般较为复杂. Desmond^[10]研究了应力波通过简单三杆桁架的连接节点的反射透射问题,其计算过程就需要大量的数值迭代.显然,对于以关注宏观反应为主的建筑结构来说,这种精细的波动分析方法在数值上既不可行,也不实用. Zhang 等^[11]将建筑结构的柱和墙简化为一系列的剪切梁,楼板考虑为集中质量,计算了结构在剪切波下的响应. Safak^[12]将结构简化为层模型,考虑楼板质量,计算了结构在水平地震下的响应. Todorovska 等^[13]利用二维波传播模型分析了建筑结构的水平地震响应. 以上简化波动分析方法均是针对水平地震的计算,而结构在竖向地震下波动计算的文献相对较少.

本文将典型的超高层建筑结构简化为一维模型和二维模型,如将筒体、成束筒等结构体系简化为图 1 所示的糖葫芦串模型,所有层间竖向构件的质量均匀分布于轴向弹簧,楼层质量简化为集中质量;而将框架-核心筒等结构体系简化为图 2 所示模型,内部核心筒简化为左侧糖葫芦串,外部框架柱简化为右侧糖葫芦串,同时转换桁架等水平构件简化为横梁. 然后,分别针对两种简化模型,结合结构振动力学和结构波动力学确定竖向纵波通过集中质量的反射和透射系数. 最后,采用时域差分延时和 FFT 频域滤波相结合的策略计算结构在竖向地震下的响应,方法简单又能有效体现波动效应.

1 纵波在结构中传播的模拟

1.1 相关假定

对于两种不同的简化模型,均采用一维纵波理论模拟竖向地震波在结构中的传播. 推导计算中的一些假定包括:

1) 由于结构轴向刚度较大,竖向地震下结构中的非弹性反应较小,因此假定结构变形在弹性范围,并符合平截面假定.

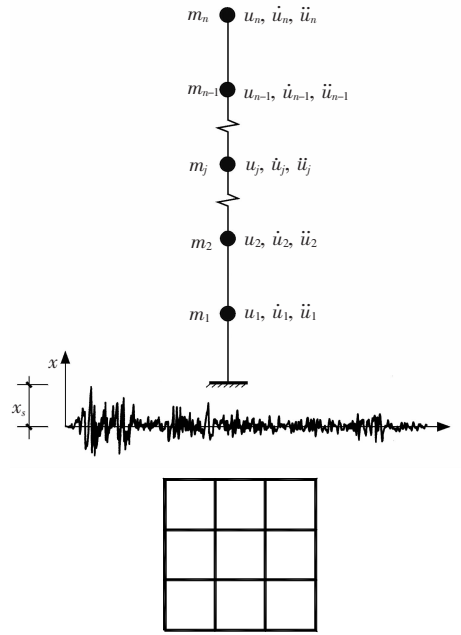


图 1 简化模型 1

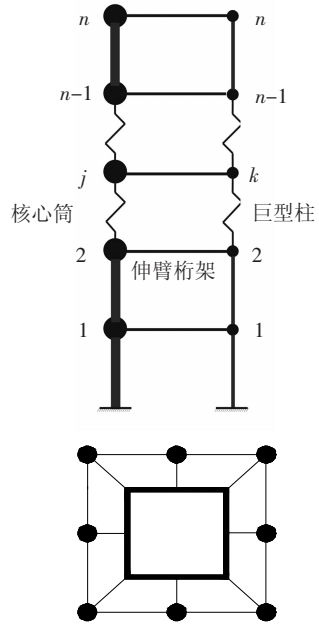


图 2 简化模型 2

2) 将楼层简化为集中质量. 本文研究工作主要关注竖向地震下建筑结构的宏观响应,特别是竖向脉冲波动效应;竖向纵波通过楼板的衍射能量已通过集中质量的宏观振动进行考虑,此外,据相关试验表明,竖向纵波通过横向构件时几乎不引起横向构件的纵向振动.

3) 忽略集中质量尺寸的影响,即忽略了楼板的变形. 在针对层模型的简化分析中,这种简化是可以接受的. 同时,忽略轴向构件横向变形.

4) 忽略纵波的衍射现象,即不考虑水平杆件中的纵波能量.

1.2 应变率效应

由于 P 波传播速度较快, 由此带来的应变率效应较为显著. 地震作用引起的应变率在 $10^{-4}/s$ 到 $10^{-2}/s$ 之间. 在此应变率范围内, 对于钢筋材料, 随应变率的增加, 屈服强度和极限强度都增加, 但是弹性模量基本保持不变^[14]. 对于混凝土材料, 随应变率的增加, 混凝土的抗拉强度, 抗压强度和弹性模量都有所增加^[15-16]. 同时, 轴压比的存在也会增加材料的率敏感性^[14]. 欧洲混凝土协会 CEB^[17] 推荐了不同应变率下混凝土的抗压强度和弹性模量的相对变化系数. 据此, 地震作用下混凝土材料的弹性模量提高 1.031 8 ~ 1.163 0 倍. 计算中考虑钢筋和混凝土的组合、轴压比和应变率效应, 根据所用材料采用具体数值.

1.3 轴向构件的控制方程

对于轴向构件 j ($j = 1, 2, \dots, n$) 它的轴向波动方程为

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v_j} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

式中: $v_j = \sqrt{E_j/\rho_j}$ 是纵向波速, E_j 和 ρ_j 分别是轴向构件 j 的弹性模量和密度.

1.4 集中质量的控制方程

1.4.1 简化模型 1

从结构振动力学的角度, 可列出集中质量 j 受惯性力、弹性恢复力和阻尼力的平衡方程; 从结构波动力学的角度, 可列出集中质量 j 上下表面的位移波动方程. 依据相邻构件在集中质量 j 处的位移连续条件可结合振动和波动方程得到

$$E_j A_j \left. \frac{\partial u_b}{\partial x} \right|_{x=0} - E_{j+1} A_{j+1} \left. \frac{\partial u_a}{\partial x} \right|_{x=0} + c_j \left. \frac{\partial u_b}{\partial t} \right|_{x=0} - c_j \left. \frac{\partial u_g}{\partial t} \right|_{x=0} + M_{f,j} \left. \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} \right|_{x=0} = 0. \quad (2)$$

式中: A_j 是第 j 层所有轴向构件的横截面面积之和 (包括该层墙柱等构件的截面面积); u_a 和 u_b 分别表示集中质量 j 上下表面的绝对位移, 即与构件 $j+1$ 和构件 j 连接处的位移; x 表示距集中质量 j 的距离, 等于 0 意味着在集中质量 j 处, 此时 $u_a = u_b$; c_j 表示楼层 j 的阻尼系数, 其取值及合理性讨论见文献^[18]; u_g 表示地面位移; $M_{f,j}$ 表示楼板 j 的质量.

由式(2)可得上行纵波通过集中质量 j 的反射和透射系数 $R_{u,j}$ 和 $T_{u,j}$, 同理可得下行纵波通过集中质量 j 的反射和透射系数 $R_{d,j}$ 和 $T_{d,j}$, 详见文献^[18].

1.4.2 简化模型 2

对于简化模型 2 (如框架 - 核心筒结构体

系), 由于内部核心筒和外部框架柱的轴向刚度存在较大差距, 在竖向地震下, 两者之间难免产生竖向相对错动位移. 这种相对错动位移将会对水平梁产生剪切效应. 如图 3 所示, 由结构力学基本原理可知, 当水平梁两端发生相对位移 Δ 时, 梁的两端将产生剪力 $Q = K\Delta$, K 是水平梁的剪切刚度, 与梁的截面尺寸、材料性质和边界条件有关. 如两边固定端情况下, $K = 12EI/l^3$, 其中 E 是弹性模量, I 是截面惯性矩, l 是横梁跨度.

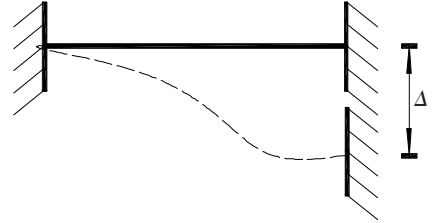


图 3 水平梁产生相对位移

如图 4 所示, 从结构振动力学的角度, 可分别列出集中质量 j 和 k 受惯性力、弹性恢复力、阻尼力和剪切力的平衡方程; 从结构波动力学的角度, 可分别列出集中质量 j 和 k 上下表面的位移波动方程. 依据相邻构件在集中质量 j 和 k 处的位移连续条件可结合振动和波动方程得到式(3)、(4). 其中 Ku 是横梁对集中质量的剪力, 考虑了两侧结构的相互作用.

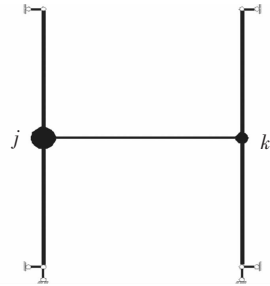


图 4 考虑横梁作用时反射和透射系数推导

$$E_j A_j \left. \frac{\partial u_{b,j}}{\partial x} \right|_{x=0} + M_{f,j} \left. \frac{\partial^2 u_{b,j}}{\partial t^2} \right|_{x=0} + c_j \left. \frac{\partial u_{b,j}}{\partial t} \right|_{x=0} + K u_{a,j} \Big|_{x=0} = E_{j+1} A_{j+1} \left. \frac{\partial u_{a,j}}{\partial x} \right|_{x=0} + c_j \left. \frac{\partial u_{g,j}}{\partial t} \right|_{x=0} + K u_{a,k} \Big|_{x=0}, \quad (3)$$

$$E_k A_k \left. \frac{\partial u_{b,k}}{\partial x} \right|_{x=0} + M_{f,k} \left. \frac{\partial^2 u_{b,k}}{\partial t^2} \right|_{x=0} + c_k \left. \frac{\partial u_{b,k}}{\partial t} \right|_{x=0} + K u_{a,k} \Big|_{x=0} = E_{k+1} A_{k+1} \left. \frac{\partial u_{a,k}}{\partial x} \right|_{x=0} + c_k \left. \frac{\partial u_{g,k}}{\partial t} \right|_{x=0} + K u_{a,j} \Big|_{x=0}. \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得到考虑了横梁剪切效应的反射系数, 见式(5).

$$\begin{cases} R_{u,k} = \frac{(b' + \frac{bK}{a})}{(a' - \frac{K^2}{a})}, \\ R_{u,j} = (b + KR_{u,k})/a. \end{cases} \quad (5)$$

式中 a, b, a', b' 与结构参数和频率相关. 同样可得到透射系数和下行波通过集中质量的反射和透射系数.

这种处理方式是用一维波动方法考虑二维波动问题的近似方法, 显然相对于二维波动分析, 省去了结构构件中弯曲波和剪切波的传播计算的复杂.

由于 R 和 T 是频率相关的函数, 相当于信号分析中的系统函数, 轴向构件中的纵波通过集中质量时涉及滤波问题. Safak^[12] 通过等效差分格式滤波, 这种方式针对特定频率的入射波会带来计算误差, 特别是时间步长不满足要求的情况下, 同时较难将集中质量的阻尼效应考虑进去, FFT 频域滤波能够克服这些不足, 但必须以降低计算效率作为代价.

1.5 层间阻尼等效

波动计算中的阻尼计算通常考虑复刚度, 这将导致复的波速, 复的传播时间. 这需要全过程的频域计算. 为提高计算效率又利用频域滤波的优点, 而对波传播采用时域差分延时, 采用式(6)等效振动分析方法中的阻尼^[12].

$$A_j(f) = e^{-\pi\kappa_j f_j}. \quad (6)$$

如文献[19]所述, 结构阻尼因数 κ_j 可通过比较共振频率的谐波荷载在结构的振动幅值得到, 为粘滞阻尼因数的两倍. 式中 A_j 表示频率为 f 的正弦波通过杆件 j 时幅值衰减. 式(6)同前述的反射和透射系数相似, 相当于系统函数, 应用时在频率域内考虑. 集中质量的阻尼则通过宏观振动阻尼考虑.

1.6 波动计算策略

波在结构中传播的过程, 在集中质量处的反射和透射不断衍生出新的波(反射波和透射波), 致使整个传播过程较为繁琐. 为有效管理波动计算, 假定纵波在各层间传播时间相等, 对每一质点处的一次反射和透射采用图 5 所示的波动计算策略, 即质点 j 处每发生一次反射和透射(上行波和下行波同时到达质点 j) 时, 将质点 j 处的两条上行波叠加为一条上行波, 两条下行波叠加为一条下行波, 以减少之后计算管理的复杂性, 并将叠加的上行波记为 T_{j+k*n} , 下行波记为 R_{j+k*n} , 其中 k 表示质点 j 处发生第 k 次反射和透射, n 为总自由度, 即层数. 对每个质点都进行这样的处理, 可得

到波动计算管理的规律性, 利用程序循环命令便可实现结构波动计算的整个过程.

各质点的波动响应可相应表示为

$$\begin{aligned} a(1) &= T_1 + \sum_{k=1} S_{k,1} + \sum_{k=0} R_{2+k*n,2}, \\ a(2) &= T_2 + \sum_{k=1} T_{1+k*n,1} + \sum_{k=0} R_{3+k*n,2}, \\ &\dots\dots \\ a(j) &= T_j + \sum_{k=1} T_{(j-1)+k*n,1} + \sum_{k=0} R_{(j+1)+k*n,2}, \\ &\dots\dots \\ a(n-1) &= T_{n-1} + \sum_{k=1} T_{(n-2)+k*n,1} + \sum_{k=0} R_{n+k*n,2}, \\ a(n) &= \sum_{k=1} T_{k*n}. \end{aligned}$$

式中: $a(j)$ 表示质点 j 的波动响应; T_j 表示质点 j 处的透射波; R_j 表示质点 j 处的反射波; S_k 表示纵波第 k 次在结构底部反射的反射波; R_{j+k*n} 和 T_{j+k*n} 分别表示纵波在质点 j 处第 k 次反射和透射的反射波和透射波; $R_{j+k*n,2}$ 和 $T_{j+k*n,1}$ 分别是其在质点 $j-1$ 和 $j+1$ 处发生再透射的透射波; τ 为纵波在层间传播所需时间. 根据计算总时长的要求, 可取不同的 k_{max} 值. 如 $\tau = 0.01$ s, 计算总时长 $t = 20$ s, 则循环次数 $k_{max} = t/2\tau = 1000$, 即可达到计算要求.

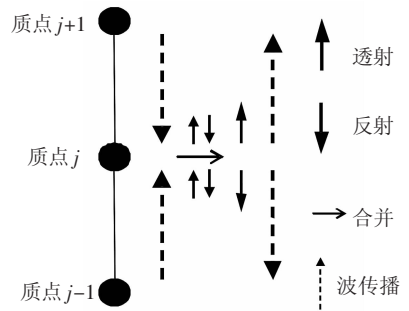


图 5 质点 j 处波动计算策略

波在各层间传播时间相等的假定限制了该波动计算策略的适用范围. 但是, 对于各层间传播速度不相等的情况, 同样可采用上述各质点处的处理方式, 只不过得到计算的规律性需要更多的计算步数.

2 算例

为验证上述波动计算策略并和振动方法比较, 分别对简化模型 1 和简化模型 2 进行波动计算和振动计算(精细积分法), 并做相关参数分析.

2.1 简化模型 1 算例

取表 1 所示的结构参数, 弹性模量 E 考虑应

变率效应取 $4 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 用上述波动分析策略计算结构动力响应, 并与振动分析方法进行比较.

其中振动方法输入加速度地震波, 波动方法输入相应的位移时程(如图 6、7 所示).

表 1 结构参数(共 10 层)

高度/m	层高/m	截面面积/ m ²	层间质量/ 10 ⁶ kg	楼板质量/ 10 ⁶ kg	层间刚度/ (10 ¹⁰ N · m ⁻¹)
0 ~ 8	4	10.0	0.100	0.100	10.0
8 ~ 16	4	9.5	0.095	0.095	9.5
16 ~ 24	4	9.0	0.090	0.090	9.0
24 ~ 32	4	8.5	0.085	0.085	8.5
32 ~ 40	4	8.0	0.080	0.080	8.0

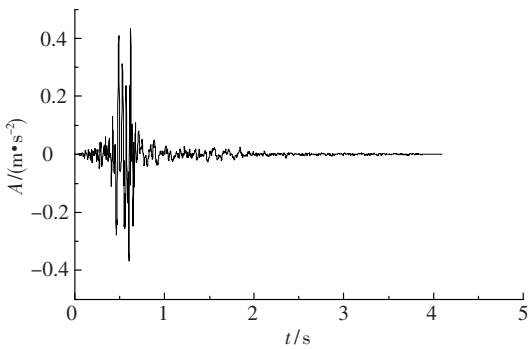


图 6 输入的加速度时程

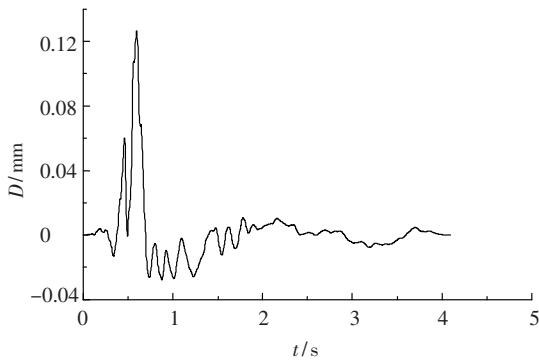


图 7 输入的位移时程

图 8 所示为用波动方法和振动方法得到的顶层位移时程. 由图可见两种方法得到的峰值基本相当, 但是波动结果具有更多毛刺. 底层构件轴向变形均在 0.1 mm 左右. 由此引起的轴压比变化为 $\Delta n = \Delta N / f_c A = 10 / (19.1 \times 10) = 5.24\%$. 这种引起轴力波动的现象必然会降低结构的延性, 降低结构抗侧刚度. 特别是在近断层处, 较大的 V/H 值无疑会给结构带来较大损伤. 同时, 较多毛刺说明结构响应变化剧烈, 显然对结构十分不利.

2.2 简化模型 2 算例

为模拟巨型框架或带加强层的建筑结构, 左右结构各取 5 个质量点, 质点间高度 40 m. 总高 200 m, 左侧参数是右侧参数的 5 倍, 质点质量 10 倍. 横梁截面取 $600 \times 1\,000 \text{ mm}$ 以模拟伸臂桁架

等水平联系构件, 跨度 8 m, 按两端固定情况 $K = 0.468\,75 \times 10^8 \text{ N/m}$. 用上述考虑横梁剪切效应的一维波动分析方法和杆系有限元法分别计算, 得到的顶层位移差时程见图 9. 相比振动方法, 波动方法的计算结果更大一些.

最大的位移差约为 $\Delta = 1.5 \text{ mm}$, 相应的横梁剪力为

$$Q = K\Delta = 70.31 \text{ kN}.$$

可见在竖向地震下, 左右两侧结构的轴向刚度差异会引起较大的剪切效应. 而左右两侧结构单独存在时的结构特性差异是剪切效应存在的根本原因.

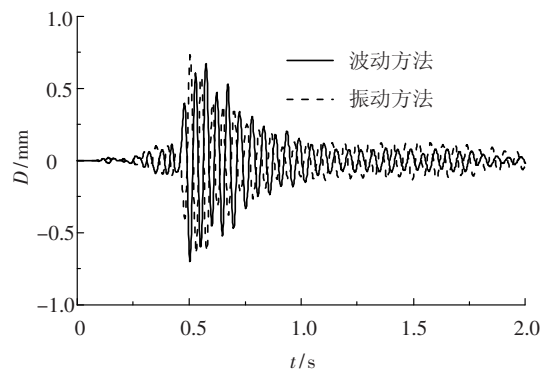


图 8 顶层位移时程

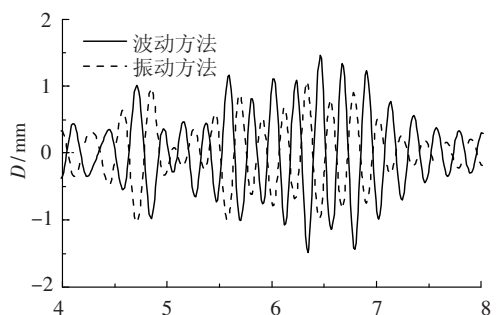


图 9 顶层位移差时程

2.3 简化模型间对比

为比较同一结构采用不同简化模型的计算差异,取图 10 所示的简单结构用以考察两种计算的差别.其中两个结构所取参数等效.对于简化模型 2,取两侧结构的响应均值.从图 11 的计算结果可看出,两个结果在计算结构宏观响应时并无太大区别,但是要考察横向水平构件的剪切效应必须采用简化模型 2.

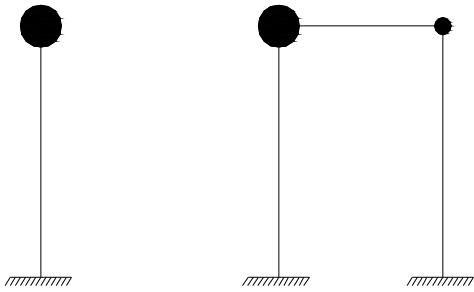


图 10 两等效结构

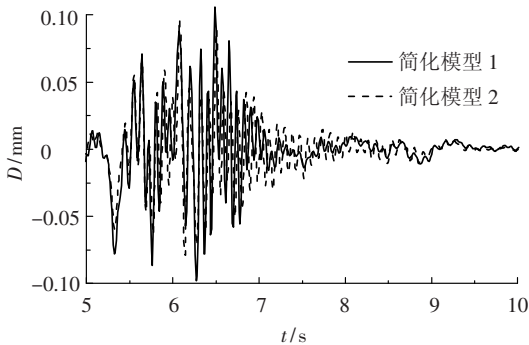


图 11 质点位移过程

3 结论

通过以时域差分延时和 FFT 频域滤波为特点的一维波动分析方法模拟竖向地震波在典型超高层建筑结构中的传播,并与振动分析方法进行对比,得到以下结论:

1) 波动分析方法在计算结构在竖向地震下的响应时,更具有针对性,能够考虑波传播的时延性和反射叠加效应,特别是对于近场脉冲型地震动.

2) 结构在竖向地震下,竖向构件的轴力可能会有较大波动.特别是有较大的竖向 PGA 时,可能会给结构带来较大的损伤,对结构抵抗后继水平地震的延性性能产生较大削弱.

3) 在竖向地震下,超高层结构的平面内的轴向刚度差异会造成竖向相对错动,引起水平横梁较大的剪切效应,对结构造成不可预见的损伤.为降低这种效应,需使两侧结构的动力特性接近.

4) 文中采用的两种简化模型在计算结构宏观响应时并无太大差别,但要分析研究横向水平构件的剪切效应等时,简化模型 2 更合适.

虽然超高层建筑的设计选址一般都远离断层,但是并不能够完全排除有脉冲型竖向地震动、碰撞和爆炸冲击波等对结构的影响.本文用简化的波动计算方法初步研究了针对这种特定脉冲激励的分析计算,尽管在计算时长等方面需进一步研究提升,但已能较全面地考虑到最主要的波动效应.更精确的计算方法有待采用波谱单元方法做进一步研究.

依据本文研究工作及结论,对结构抗震设计提出相应建议:

1) 对于一些超限结构进行弹塑性分析时,尽可能地依据结构自身和场地条件等因素适当考虑竖向地震对结构造成的损伤累积.

2) 从建筑结构自身来讲,应加强应力集中、脉冲效应显著的竖向构件,如与结构质量和刚度突变处相邻的竖向构件.

3) 对于超高层建筑结构,应充分考虑竖向纵波的波动效应对结构薄弱部位的影响.

参考文献

- [1] KIM S J, HOLUB C J, ELNASHAI A S. Analytical assessment of the effect of vertical earthquake motion on RC bridge piers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(2):252-260.
- [2] 黄吉锋, 邵弘, 杨志勇. 复杂建筑结构竖向地震作用的振型分解反应谱分析 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 增刊 1:110-114.
- [3] 石文龙, 孙飞飞, 李国强. 某多塔连体高层建筑的竖向地震反应分析 [J]. *建筑结构*, 2007, 34(8):65-69.
- [4] HAYASI P, MASUDA Y, HASHIMOTO S, et al. Photoelastic analysis of stress waves in building subjected to vertical impact under laboratory earthquake experiments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 1150-1155.
- [5] 贾俊峰, 欧进萍. 近断层竖向地震动对斜拉桥地震反应的影响 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(增刊 2):189-191.
- [6] 周靖, 周飞, 蔡健, 等. 脉冲型竖向地震作用下大跨度 RC 带腋撑框架结构弹塑性动力响应分析 [J]. *工程力学*, 2010, 27(6):113-119.
- [7] LI D S, LI H N, REN L, et al. Time delay of earthquake excitation in high-rise building [C]//*Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operation in Challenging Environments*. Hawaii: [s. n.], 2010: 3416-3426.

- [8] KOHLER M D, HEATON T H, BRADFORD S C. Propagating waves in the steel, moment-frame factor building recorded during earthquakes [J]. Bulletin of Seismological Society of America, 2007, 97 (4): 1334 - 1345.
- [9] TODOROVSKA M I, IVANOVI S S, TRIFUNAC M D. Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building II: Observed wavenumbers [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21: 225 - 236.
- [10] DESMOND T P. Theoretical and experimental investigation of stress waves at a junction of three bars [J]. Journal of Applied Mechanics, 1999, 48(1): 148 - 154.
- [11] ZHANG R R, SNIEDER R, GARGAB L, *et al.* Modeling of seismic wave motion in high-rise buildings [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2011, 26 (4): 520 - 527.
- [12] SAFAK E. Propagation of seismic waves in tall buildings [J]. The Structural Design of Tall Building, 1998, 7(4): 295 - 306.
- [13] TODOROVSKA M I, IVANOVIC S S, TRIFUNAC M D. Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building I: Theoretical models [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21: 211 - 223.
- [14] LI M, LI H N. Effects of strain rate on reinforced concrete structure under seismic loading [J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 12(3) 465 - 475.
- [15] 肖诗云, 林皋, 王哲, 等. 应变率对混凝土抗拉特性影响 [J]. 大连理工大学学报, 2001, 41 (6): 721 - 725.
- [16] FU H C, ERKI M A, SECKIN M. Review of effects of loading rate on concrete in compression [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117 (12): 3645 - 3659.
- [17] Comité euro-international du béton. CEB-FIP MODEL CODE [S]. London: T. Telford, 1993.
- [18] 张昊强, 何政. 竖向脉冲激励作用下结构简化波动分析之反射与透射系数 [J]. 工程力学, 2013, 30 (7): 153 - 160.
- [19] THOMSON W T. Theory of vibration with applications [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(编辑 赵丽莹)

(上接第 92 页)

- [11] GUO Wei, YU Zhiwu, LIU Guohuan, *et al.* Possible existing seismic analysis errors of long span structures and bridges while utilizing multi-point earthquake calculation models [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, Published Online, 2013, DOI:10.1007/s10518-013-9462-3.
- [12] GUO Wei, YU Zhiwu, GUO Zhen. Error study of displacement model for seismic analysis of long-span structures subjected to multi-support earthquake excitations [C]//International Conference on Structures and Building Materials 2011. Guangzhou: Trans Tech Publications Inc, 2011: 163 - 167.
- [13] 柯世堂. 多点输入下大跨空间结构地震反应分析方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2007.
- [14] 柳国环, 李宏男, 国巍. 求解结构地震响应位移输入模型存在的问题及其 AMCE 实效对策 [J]. 计算力学学报, 2009, 26(6): 862 - 869.
- [15] 柳国环, 李宏男, 国巍, 等. 求解结构地震响应位移输入模型中存在问题的一种新解决方法 [J]. 工程力学, 2010, 27(9): 55 - 62.
- [16] 柳国环, 陆新征. 基岩地震谱与地震动位移输入的土-结构相互作用 (SSI) 计算模型改进 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (5): 884 - 892.
- [17] SU Liang, DONG Shilin, KATO S. A new average response spectrum method for linear response analysis of structures to spatial earthquake ground motions [J]. Engineering Structures, 2006, 28(13): 1835 - 1842.
- [18] 林海, 张学辉. 基于位移加载的地震时程分析在 SAP2000 中实现 [C]//金土木用户大会论文集. 深圳: 北京金土木软件技术公司, 2011: 1 - 6.
- [19] 刘树屯, 关忆卢. 首都机场 306m 跨飞机库屋盖钢结构设计施工中的的一些问题 [J]. 钢结构, 1996, 11 (4): 4 - 8.
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Guide specifications for seismic isolation design [S]. Washington DC: AASHTO, 1991.

(编辑 赵丽莹)