

非线性建筑物上的附属结构响应分析

国巍*^{1,2}, 李宏男², 柳国环²

(1. 中南大学 土木建筑学院 高速铁路建造技术 国家实验室, 长沙 410075;
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 根据抗震规范设计的要求, 在强烈地震作用下建筑结构会进入屈服阶段, 对二次结构体系进行动力分析时需要考虑主体建筑结构的非线性。基于此, 本文利用随机振动和等效线性化方法推导了由非线性主体结构 and 支撑于其上的附属结构所组成的二次结构体系的随机响应表达式, 以此来分析了主体结构非线性对附属结构动力响应的影响, 进而以附属结构的均方响应为研究指标, 分析了主体结构非线性对附属结构最优位置的影响, 并对多个附属结构的相互影响进行了研究, 得到了一些有益的结论。

关键词: 主体结构; 非线性; 等效线性化; 附属结构; 最优位置

中图分类号: TU318 文献标识码: A

1 引言

二次结构体系是由主体结构和附属结构两部分组成的。一般将仪器设备、管线管道以及填充墙和天花板等称作附属结构, 而把直接与地面相连的建筑物主体结构称作主体结构。在地震作用下, 尽管建筑物主体结构并没有损坏, 但附属结构的损坏往往也会导致严重的后果, 如核电站、电厂、医院以及于其他生命线工程等, 其在地震作用下的完整性和持续运行性, 对灾中和灾后的生命安全和生产恢复有着重要意义。从上世纪 70 年代开始, 附属结构的安全性问题开始引起了人们的广泛关注和研究^[1-10], 然而早期的研究大多基于主体结构为线弹性的假设。由于强地震作用下主体结构往往进入屈服段, 考虑主体结构的非线性特性更符合实际工程情况, 可以得到更加合理的分析结果。因此, 由非线性主体结构与附属结构构成的非线性二次结构体系有着重要的研究价值和现实意义。国外学者上对考虑非线性特性的二次结构体系进行了多方面的研究, 主要包括非线性二次结构体系的动力特性^[11-15], 近似的计算方法^[16, 17], 非线性对楼层反应谱的影响^[18, 19]等, 而国内对二次结构体系非线性特性方面的研究则很少。

本文以高斯白噪声随机激励作为输入, 同时考虑主体结构的非线性特征, 以等效线性化的方法对支撑于非线性主体结构上的附属结构进行研究, 指出了附属结构响应的影响因素, 并与线性主体结构的情况进行比较, 分析了非线性特性对附属结构响应和最优位置(附属结构均方响应最小处)的影响, 同时本文还对多个附属结构之间相互作用的影响进行了分析。

2 理论方程

主体结构采用剪切模型, 并设 n 层主体结构上支撑有 m 个附属结构, 附属结构 s_1, \dots, s_m 分别位于主体结构上的 $s(1), \dots, s(m)$ 层。地震作用下主体结构往往进入非线性, 而附属结构为了保证安全以及工作性, 一般会确保其处于线性状态, 建立非线性主体结构与线性附属结构共同构成的二次结构体系的理论模型, 如图 1 所示。对于非线性分析, 有许多种方法, 本文采用等效线性化方法。由于非线性动力响应往往并不是高斯分布, 因此采用等效线性化方法与实际结果是存在着一定偏差的, 但是鉴于它的简单和适用性, 方便简捷, 在工程中有着广泛的应用。

2.1 滞回模型

本文采用应用较广泛的 Bouc-Wen 光滑非线性模型描述层间滞回恢复力特性^[20]。有关研究结果表明, 该模型能较好地反映很多结构的非线性特征。Y. K. Wen 假设结构的阻尼力是线性的基础

收稿日期: 2008-03-27; 修改稿收到日期: 2010-01-23
基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(2006BAJ03A 03)
重点资助项目。

作者简介: 国巍*(1982), 男, 博士
(E-mail: wei.guo.86@gmail.com);
李宏男(1957), 男, 博士, 教授;
柳国环(1980), 男, 博士。

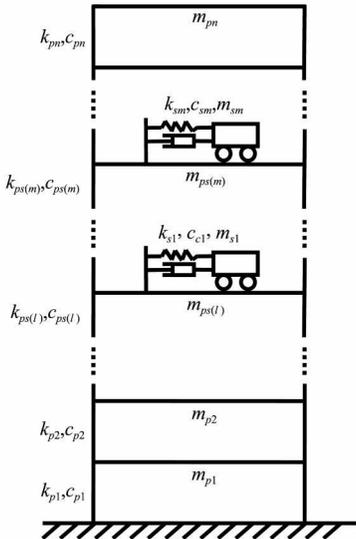


图 1 二次结构体系的模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model of primary-secondary systems

上, 引入了滞变恢复力的概念:

$$g(x, \dot{x}) = \dot{\alpha} + \alpha \dot{x} + (1 - \alpha)kz \quad (1)$$

式中后一项是滞变恢复力, α 是屈服后刚度与屈服前刚度之比。同时 Y. K. Wen 给出了参数 z 和 x 的关系式:

$$\dot{z} = A \dot{x} - \gamma |\dot{x}| |z|^{n-1} z - \beta \dot{x} |z|^n \quad (2)$$

式中 A 为表示恢复力幅值的常数, 一般取为 1, β 和 γ 为控制恢复力曲线形状的常数, n 为控制恢复力曲线光滑程度的参数, 常取为 1。参考文献[13]和[21], 本文取 $A = n = 1, \beta = 0.05, \gamma = 0.95$, 等效线性化方法可以得到较好的精度, 同时滞回曲线较为饱满, 并可避免混沌的产生, 则上式可以简化为

$$\dot{z} = A \dot{x} - \gamma |\dot{x}| z - \beta \dot{x} |z| \quad (3)$$

根据式(3)可以定义表达式:

$$h(x, \dot{x}, z) = \dot{z} - A \dot{x} + \gamma |\dot{x}| z + \beta \dot{x} |z| \quad (4)$$

对式(4)进行等效线性化处理, 假设 $\dot{z} = c_e \dot{x} + k_e z$, 可以简化为另一种形式:

$$h_e(x, \dot{x}, z) = \dot{z} - c_e \dot{x} - k_e z \quad (5)$$

式中 $e = h(x, \dot{x}, z) - h_e(x, \dot{x}, z)$, 为确定等效线性化的参数, 令上面两式的差 e 的均方值最小, 从而可得 c_e 和 k_e 的表达式:

$$c_e = E \left[\frac{\partial h}{\partial \dot{x}} \right] = A - \gamma E \left[z \frac{\partial |\dot{x}|}{\partial \dot{x}} \right] - \beta E [|\dot{x}| z] = A - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\gamma \frac{E(\dot{x} z)}{\alpha} + \beta \sigma_z \right] \quad (6)$$

$$k_e = E \left[\frac{\partial h}{\partial z} \right] = -\gamma E [|\dot{x}|] - \beta E \left[\dot{x} \frac{\partial |z|}{\partial z} \right] = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\gamma \sigma_{\dot{x}} + \beta \frac{E(\dot{x} z)}{\alpha} \right] \quad (7)$$

2.2 运动方程

假定主体结构各层滞回特性相同, 地震动 \ddot{x}_g 为强度为 S_0 的平稳高斯白噪声, x_{pi} 为主体结构 i 层的层间位移, x_{si} 为第 i 个附属结构的相对于支撑层的位移, 建立 n 层非线性主体结构上支撑有 m 层附属结构的二次结构体系的运动方程, 并写成状态向量的表达式:

$$\{\dot{u}\} + [F]\{u\} = -\{V\}\ddot{x}_g \quad (8)$$

式中

$$\{u\}^T = [\{u_{p(1)}\}^T, \dots, \{u_{p(n)}\}^T, \{u_{s(1)}\}^T, \dots, \{u_{s(m)}\}^T]^T$$

$$\{u_{p(i)}\}^T = [x_{p(i)}, \dot{x}_{p(i)}, z_{p(i)}], 1 \leq i \leq n$$

$$\{u_{s(j)}\}^T = [x_{s(j)}, \dot{x}_{s(j)}], 1 \leq j \leq m$$

$$\{V\}^T = [\underbrace{0, 1, 0, \dots, 0}_{n+m}]$$

$$[F] = [F_d] + \sum_{i=1}^{n+m} [F_{ni}] + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m [F_{sij}]$$

其中 $[F_d] = [F_{dp}, 0_{n \times m}; 0_{m \times n}, F_{ds}]$

$$[F_{dp}] = [F_{p(1), p(1)}, F_{p(1), p(2)}, 0_{1 \times (m-2)}, \dots, 0_{1 \times (n-2)}$$

$$F_{p(i), p(i-1)}, F_{p(i), p(i)}, F_{p(i), p(i+1)}, 0_{1 \times (n-i-1)}, \dots$$

$$0_{1 \times (n-2)}, F_{p(n), p(n-1)}, F_{p(n), p(n)}]$$

$$[F_{ds}] = \text{diag}([F_{s(1), s(1)}], \dots, [F_{s(j), s(j)}], \dots, [F_{s(m), s(m)}])$$

$$F_{p(i), p(i-1)} = [0_{1 \times 3}; -h_{p(i-1)} \alpha_{p(i-1)} k_{p(i-1)}$$

$$-h_{p(i-1)} c_{p(i-1)}, -h_{p(i-1)} (1 - \alpha_{p(i-1)}) k_{p(i-1)}; 0_{1 \times 3}]$$

$$F_{p(i), p(i)} = [0, -1, 0; (h_{p(i)} + h_{p(i-1)}) \alpha_{p(i)} k_{p(i)}$$

$$(h_{p(i)} + h_{p(i-1)}) c_{p(i)}, (h_{p(i)} + h_{p(i-1)}) (1 - \alpha_{p(i)}) k_{p(i)}$$

$$0, -c_{e(i)}, -k_{e(i)}]$$

$$F_{p(i), p(i+1)} = [0_{1 \times 3}; -h_{p(i)} \alpha_{p(i+1)} k_{p(i+1)}$$

$$-h_{p(i)} c_{p(i+1)}, -h_{p(i)} (1 - \alpha_{p(i+1)}) k_{p(i+1)}; 0_{1 \times 3}]$$

当 $i = 1$ 时, $F_{p(1), p(0)}$ 不存在; 当 $i = n$ 时, $F_{p(n), p(n+1)}$

不存在, $F_{s(i), s(i)} = [0, -1; (h_{p(r)} + h_{s(i)}) k_{s(i)}, (h_{p(r)} + h_{s(i)}) c_{s(i)}]$, $s(i) = r, h_{p(i)} = 1/m_{p(i)}, h_{s(i)} = 1/m_{s(i)}$ 。

假设第 i 个附属结构位于主体结构第 r 层, 则

$$[F_{ni}]_{r, n+i} = [0, 0; -h_{p(r)} k_{s(i)}, -h_{p(r)} c_{s(i)}; 0, 0]$$

$$[F_{ni}]_{r+1, n+i} = -[F_{ni}]_{r, n+i}$$

$$[F_{ni}]_{n+i, r} = [0_{1 \times 3}; -h_{p(r)} \alpha_{p(r)} k_{p(r)}, -h_{p(r)} c_{p(r)}$$

$$-h_{p(r)} (1 - \alpha_{p(r)}) k_{p(r)}]$$

$$[F_{ni}]_{n+i, r+1} = [0_{1 \times 3}; h_{p(r)} \alpha_{p(r+1)} k_{p(r+1)}, h_{p(r)} c_{p(r+1)},$$

$$h_{p(r)} (1 - \alpha_{p(r+1)}) k_{p(r+1)}]$$

$[F_{ni}]$ 中其他元素均为 0, 并且当附属结构位于顶层时, $F_{p(n+1), s(i)}, F_{s(i), p(n+1)}$ 不存在。如 $s(i) \neq s(j)$,

则 $[F_{sij}] = [0]_{(3n+2m) \times (3n+2m)}$; 如 $s(i) = s(j), i \neq j$, 则 $[F_{sij}]_{n+i, n+j} = [0, 0; h_{p(r)} k_{s(j)}, h_{p(r)} c_{s(j)}]$ 。

式(8)给出了状态方程所有的向量矩阵的表达式, 通过后乘 $\{u\}^T$ 取期望, 并将所得方程与它

的转置相加, 则得方程:

$$[S(t)] + [F(t)][S(t)] + [S(t)][F(t)]^T = [P(t)] \quad (9)$$

式中 $[S(t)] = E[\{u(t)\}\{u(t)\}^T]$ 为状态向量的协方差函数, $[P(t)]$ 可以写成 $[P(t)] = \{V\}\{V\}^T \times 2\pi I(t)$ 的形式。如果输入激励强度为 S_0 的高斯白噪声, 并对上述方程只考虑稳定解, 则可以写成如下形式:

$$[F][S] + [S][F]^T = \{V\}\{V\}^T \times 2\pi S_g \quad (10)$$

该方程为李雅谱诺夫方程。可以通过矩阵代数来求解。利用上述式(6, 7, 10) 进行迭代求解, 其步骤如下。

(i) 指定 c_{ei} 和 k_{ei} 的初始值, $1 \leq i \leq n$ 。

(ii) 利用(i) 指定的等效参数, 通过求解李雅谱诺夫方程来得到协方差矩阵 $[S]$ 的各个元素值。

(iii) 利用上面方程得到新的 c_{ei} 和 k_{ei} 的值。

(iv) 再次计算对应新的等效参数的协方差矩阵 $[S]$ 。

(v) 检验计算的收敛条件, 看是否满足。如果不满足收敛条件, 重复 (iii) ~ (v) 步, 直到得到一个收敛的解。

3 数值分析

本文考虑了主体结构的非线性, 采用等效线性化方法计算支撑与主体结构之上的附属结构的动力响应。基于上文推导的理论方程, 以附属结构随机响应的均方根值为研究指标, 分析了单个附属结构响应的几个影响因素, 包括附属结构的质量、频率以及所在位置等, 并对附属结构的最优位置(附属结构均方响应最小处) 进行了分析, 同时还研究了主体结构非线性的影响, 与线性主体结构情况相比较。而对于主体结构上支撑多个附属结构的情况, 这里研究了两个附属结构之间的相互作用对附

属结构响应的影响。为了便于分析规律, 分别建立了两种剪切型主体结构模型: 3 层和 10 层建筑结构。3 层主体结构为最简单的多层建筑结构, 分析的因素简单而明了, 便于分析; 而 10 层主体结构相对而言更具一般性, 可以用来验证基于 3 层主体结构得到的规律。同时为了简化起见, 设建筑物各层采用相同的非线性滞回参数, 每层的质量均为 $m_{pi} = 1000 \text{ kg}$, 刚度为 $k_{pi} = 2 \times 10^6 \text{ N/m}$, 阻尼比为 $\xi_p = 0.05$, 附属结构阻尼比为 $\xi_s = 0.02$ 。

3.1 3 层主体结构

3.1.1 单个附属结构

定义描述主体结构非线性影响的指标: $r_{non} = \alpha_{s, nonlinear} / \alpha_{s, linear}$, 其中 $\alpha_{s, linear}$, $\alpha_{s, nonlinear}$ 分别为主体结构线性和非线性时对应的附属结构响应均方根值。图 2 给出了指标 r_{non} 随着附属结构频率变化的规律。从图 2 可以看到, 在低频段, 非线性对附属结构的响应影响较小, 在接近主体结构基频时主体结构的非线性极大降低附属结构的响应; 另外, 不同质量比情况下, 附属结构的响应变化规律并不相同, 同时, 当附属结构处于不同的楼层位置时, 主体结构非线性对附属结构响应的影响也不相同。以附属结构在底层上的响应为基准, 建立分析指标: $r_{flo} = \alpha_{s, floor=2, or 3} / \alpha_{s, floor=1}$, 其中 $\alpha_{s, floor=i}$ 为附属结构处于主体结构的 i 层时响应均方根值, 通过对指标 r_{flo} 的分析得到了图 3。从图 3 可以看出, 小质量附属结构受主体结构非线性的影响较小, 随着附属结构质量的增加, 低频段非线性的影响仍然较小, 而中高频段非线性的影响明显; 随着附属结构质量的增加, 在中高频范围内 2、3 层附属结构的响应趋向于增大, 大于底层附属结构的响应。对应主体结构的每阶振动频率, 图 3 中曲线体现为一个波峰和两

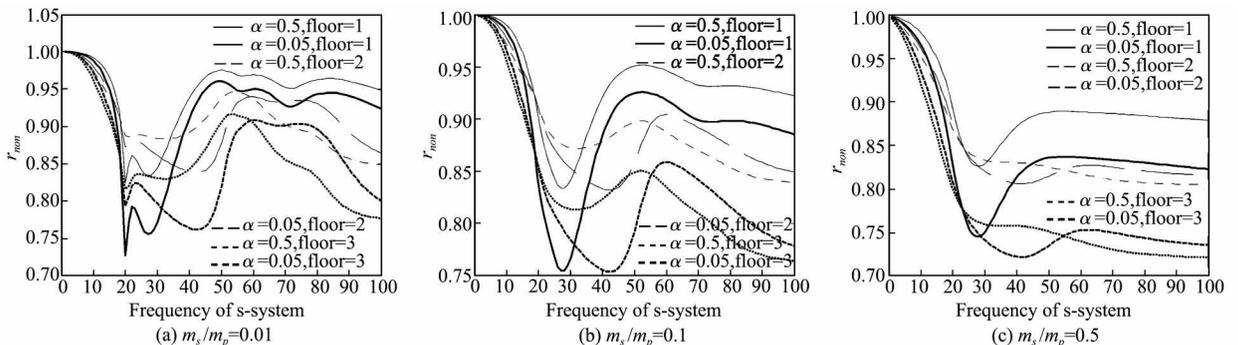


图 2 主体结构非线性对不同频率附属结构的影响

Fig. 2 Effect of nonlinearity of primary system on seismic response of secondary system of different frequencies

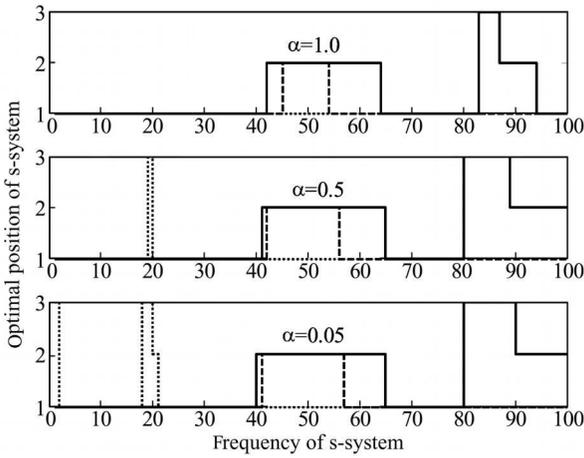


图 3 不同参数组合下附属结构的最优位置分布
Fig. 3 Optimal position of secondary system

个波谷,且在附属结构质量较小时体现最为明显。图 4 给出了附属结构的最优位置随着质量和非线性参数改变的变化情况。

3.1.2 多个附属结构

同一个建筑物上放置有多个附属结构,当附属结构的质量较小时相互之间的影响往往很小,当质量足够大时,多个附属结构会通过主体结构来产生相互之间的影响。令 $m_{s1}/m_p = 0.1$, $m_{s2}/m_p = 0.1$, 附属结构 m_{s1} 放置在主体结构的底层,取附属结构

m_{s1} 响应的均方根值 rms_{s1} 为研究指标,分析附属结构 m_{s2} 的存在对附属结构 m_{s1} 动力响应的影响。图 5 给出了附属结构 2 的质量变化对附属结构 1 动力响应的影响变化。从图 5 可以看到,随着附属结构 2 质量的增大,对附属结构 1 的影响随着增大,而影响随着频率变化的大致规律并没有改变。从图中还可以看到,附属结构 2 在与附属结构 1 调谐共振的频率范围附近时,对附属结构 1 影响的变化最为明显,与主体结构调谐频率范围附近和高频段次之,低频段变化最小。同时可以看到,附属结构 2 的存在对附属结构 1 的最优位置的影响较小。

3.2 10 层主体结构

上文已经对 3 层主体结构进行了规律探讨,模型虽然简单,但是已包含了所研究问题的基本特征,可以体现某些规律性。建立了 10 层主体结构与其上附属结构共同构成的二次结构模型,对单个附属结构的最优位置进行计算,并通过图 6 分析非线性对最优位置的影响。图 6 可以看出,当附属结构质量较小时,低频范围内最优位置位于底层,高频范围内最优位置趋向底层,而在中间频率范围附属结构的最优位置位于中间各层,具体的位置可以根据前文所述迭代方程优化求解。主体结构非线性对

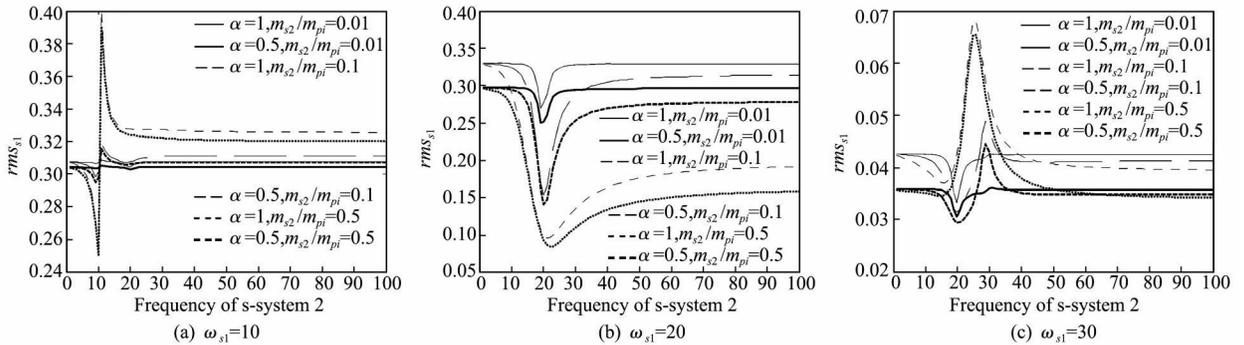


图 4 不同质量的附属结构 2 对附属结构 1 的影响

Fig. 4 Effect of different mass ratio of secondary system 1 on seismic response of secondary system 2

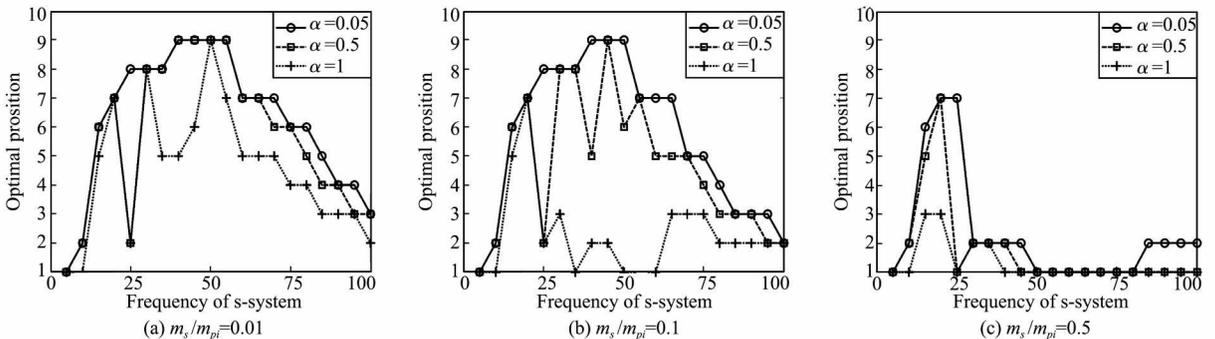


图 5 10 层主体结构的非线性对其上附属结构的最优位置的影响

Fig. 5 Effect of nonlinearity of 10 floor primary system on the optional position of secondary system

中间频率范围内的附属结构最优位置有影响,且影响不明显。如图 6(b,c)所示,随着附属结构质量的增大,线性主体结构上的附属结构的最优位置首先趋向于底层,非线性特性使得附属结构的最优位置受质量的影响较小;当附属结构质量增大到一定程度时,除了振动能量较大的前几阶频率段附近之外,非线性主体结构上的附属结构的最优位置均趋向于底层。

4 结 论

本文采用 Y. K. Wen 提出的非线性模型,以等效线性化的方法对非线性主体结构上单个和多个附属结构的动力响应进行了计算,研究了主体结构非线性对附属结构的影响,分析了附属结构动力响应的影响因素,并对多个附属结构之间的相互影响进行了分析,进而得到了一些有意义的结论。

(1) 对小质量附属结构而言,在低频和高频段主体结构非线性对其影响较小;在中间频率段,特别是在主体结构低阶频率处非线性对附属结构的响应有着明显影响;随着附属结构质量的增加,附属结构与主体结构之间的相互作用增大,非线性对低频段大质量附属结构的影响仍然较小,在高频段的影响相对明显。同时,主体结构非线性对不同楼层位置处附属结构响应的影响也不相同,在主体结构中间频率范围内中间层附属结构受非线性的影响较大,这是由与附属结构相调谐频率对应的振型决定的。

(2) 在线性主体结构上,附属结构的最优位置在低频段位于底层,在中间频率段位于主体结构的中间层,在高频段则比较复杂。在非线性主体结构上,当附属结构质量较小时,与线性主体结构类似,随着附属结构质量的增加,附属结构的最优位置也会发生较大的变化。但是与线性主体结构不同的是,此时在某些中低频率段附属结构的最优位置仍然可能位于主体结构的中间层甚至高层。

(3) 主体结构上存在两个附属结构时,当附属结构 2 与主体结构的振动频率相调谐时,附属结构 1 的响应也会随着减小;当附属结构 2 频率与附属结构 1 的对应频率附近时,小范围的频率摄动可能会导致附属结构 1 响应的急剧起伏;当附属结构 1 和 2 的频率都处于主体结构的振动频率附近时,附属结构 1 的响应相应减小。

(4) 不同楼层位置处的附属结构 2 对附属结构 1 有不同影响;主体结构的非线性减小附属结构 2 对附属结构 1 的影响,影响规律不变。

(5) 随着附属结构 2 质量的增大,其对附属结构 1 的影响随着增大,而影响随着频率变化的大致

规律并没有改变,附属结构 2 的存在对附属结构 1 的最优位置的影响较小。

参考文献(References):

- [1] Soong T T, Chen Y K. Seismic response of secondary systems[J]. *Engineering Structures*, 1988, **10**: 218-228.
- [2] 闰书亮,孙峰,满振勇.附属结构地震反应的隔震方法[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1993, **26**(4): 19-26. (MIN Shu-liang, SUN Feng, MAN Zhen-yong. An isolation method for the earthquake responses of secondary structures[J]. *Journal of Harbin Architecture and Civil Engineering Institute*, 1993, **26**(4): 19-26. (in Chinese))
- [3] 朱海华.基于性能的隔震结构非结构构件抗震性能研究[D].北京:北京工业大学,2006. (ZHU Hai-hua. Performance-Based Seismic Design of Nonstructural Elements on Base Isolated Building[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [4] 王歆玫,刘季.在双向水平地震作用下建筑楼层反应谱法[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1992, **25**(2): 24-34. (WANG Xin-mei, LIU Ji. A floor response spectrum method of building subjected to bidirectional horizontal earthquake excitation[J]. *Journal of Harbin Architecture and Civil Engineering Institute*, 1992, **25**(2): 24-34. (in Chinese))
- [5] 秦权,聂宇.非结构构件和设备的抗震设计和简化计算方法[J].建筑结构学报,2001, **22**(3): 15-20. (QIN Quan, NIE Yu. Seismic design and simplified analytical method of nonstructural components and equipment in buildings [J]. *Journal of Building Structures*, 2001, **22**(3): 15-20. (in Chinese))
- [6] 张建霖,杨智春.随机输入条件下的楼层反应谱分析[J].西北工业大学学报,2003, **21**(6): 650-653. (ZHANG Jian-lin, YANG Zhi-chun. A better analysis of floor response spectrum under random input for seismic design [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, **21**(6): 650-653. (in Chinese))
- [7] 汪嘉春,傅激扬,才来中.试验堆主厂房楼板谱计算与比较[J].核动力工程,2001, **22**(4): 308-312. (WANG Jia-chun, FU Ji-yang, CAI Lai-zhong. Analysis and comparing the dynamic response of test reactor main workshop [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2001, **22**(4): 308-312. (in Chinese))
- [8] 李忠献,陈岩,梁万顺,等.核电厂结构的楼层反应谱分析[J].福州大学学报,2005, **33**: 62-67. (LI Zhong-xian, CHEN Yan, LIANG Wan-shun, et al. Floor response spectrum under random input for seismic design [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2005, **33**: 62-67. (in Chinese))

- [9] 李忠献,李忠诚,沈望霞.核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析[J].核动力工程,2005,26(1):44-50.(LI Zhong-xian, LI Zhong-cheng, SHEN Wang-xia. Sensitivity analysis for floor response spectra of nuclear reactor buildings[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2005, 26(1): 44-50. (in Chinese))
- [10] 荣峰,汪嘉春,何树延,等.CARR堆反应堆厂房土壤-结构相互作用与楼层反应谱分析[J].核动力工程,2006,27(5):19-23.(RONG Feng, WANG Jiachun, HE Shuyan, et al. Analysis of Soil-structure interaction and floor response spectrum of reactor building for China advanced research reactor[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2006, 27(5): 19-23. (in Chinese))
- [11] Lin J, Mahin S A. Seismic response of light subsystems on inelastic structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111: 400-417.
- [12] Igusa T. Response characteristics of inelastic 2-DOF primary-secondary systems[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116: 1160-1174.
- [13] Zhu W Q, Huang C D, Soong T T. Response and reliability of secondary systems in yielding structures [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1994, 9: 145-155.
- [14] Zhu W Q, Huang C D, Soong T T. Nonlinear Stochastic Response and Reliability of Secondary Systems[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, 120(1): 177-196.
- [15] Adam C, Fotiu P A. Dynamic analysis of inelastic primary-secondary systems[J]. *Engineering Structures*, 2000, 22: 58-71.
- [16] Villaverde R. Simplified approach to account for nonlinear effects in seismic analysis of nonstructural components [J]. *Seminar on Seismic Design, Retrofit and Performance of Non-Structural Components* 1998, ATG-29-1: 187-200.
- [17] Villaverde R. Simple method to estimate the seismic nonlinear response of nonstructural components in buildings [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28: 1209-1221.
- [18] Singh M P, Chang R S, Suarez L E. Floor response spectrum amplification due to yielding of supporting structure[A]. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Acapulco, 1996, Paper no.1444.
- [19] Ioannis P, Feau C. Some aspects of floor spectra of 1DOF nonlinear primary structures[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36: 975-993.
- [20] Wen Y K. Method for random vibration of hysteretic systems [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1976, 12: 249-263.
- [21] 李鸿光,何旭,孟光. Bouc-Wen 滞回系统动力学特性的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 2009-2011.(LI Hong-guang, HE Xu, Meng-guang. Numerical simulation for dynamic characteristics of Bouc-wen hysteretic system [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(9): 2009-2011. (in Chinese))

Seismic response analysis of secondary system mounted on nonlinear primary structure

GUO Wei^{*1,2}, LI Hong-nan², LIU Guo-huan²

(1. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;

2. State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the code for seismic design of building in China, primary systems usually yield before secondary systems' destruction under the severe earthquake loading in practice, so the non-linearization characteristic of primary systems usually plays an important role in the dynamic analysis for primary secondary systems. Owing to this reason, the dynamic response expressions of primary-secondary systems are studied and proposed in this paper, which are based on the theory of random vibration and the equivalent linearization method. Then, the response expressions are used for explain the effect of nonlinearity of primary system on the response of secondary systems, while the response variance is adopted as the analysis index. In the numerical analysis, two simple and generic structures, which is 3-degree of freedom and 10-degree of freedom respectively, are used to study the response properties. Moreover, the optimal position of secondary systems represented by the minimum response variance, and the interaction between multiple secondary systems are also calculated and analyzed. In the end, some valuable conclusions are studied.

Key words: primary system; non-linearization; equivalent linearization; secondary system; optimal position