

文章编号:1671-6833(2005)01-0042-05

非平稳地震作用下巨型一子控制结构体系反应分析

张洵安, 汪 宁

(西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 利用复模态方法, 对巨型一子控制结构体系和普通巨型框架结构进行了非平稳地震作用下的对比分析, 主框架顶层的位移响应降低了 95.70%, 加速度响应降低了 24.08%; 证明这种新的结构体系对地震作用的有效控制, 对结构安全性和舒适度均有明显提高. 探讨了次框架的剪切刚度与耗能阻尼器的阻尼对结构地震响应的影响, 当次框架与主框架的剪切刚度比大于 0.15 并避开 0.4; 耗能阻尼器与次框架的首层阻尼比为 1.0~3.0, 结构的地震响应可以得到进一步的控制, 给出的合理范围对结构设计起到了指导性作用.

关键词: 巨型一子控制结构体系; 复模态分析方法; 非平稳地震激励; 控振结构; 刚度; 阻尼

中图分类号: TU 698.1

文献标识码: A

0 引言

巨型框架结构(见图 1(a))是巨型结构中的一支, 因其顺应了高层建筑多功能、综合性的发展趋势, 且传力简明、整体性能好、工程造价低、可进行多种结构形式和材料的组合等优点, 是未来高层、超高层建筑结构体系发展和应用的主要方向之一. 随着巨型框架结构高度和体积的增大, 其所承受的风载荷或水平地震荷载必然很大. 因此在建筑物中考虑减振控振措施是未来高层、超高层建筑发展的必然要求.

结构振动控制是目前结构工程领域研究和应用的热点之一. 自 1995 年美国学者 Maria Q. F 提出巨型一子控制结构(Mega-Sub Controlled Structures)^[1,3]的概念以来, 巨型一子控制结构体系的研究就得到了结构工程界研究者的高度关注. 其中以我国东南大学蓝宗建等为代表的学者在此基础上又提出了多功能减振结构体系^[3], 即在各个次框架的底部设置隔振装置, 以达到结构减振的目的; 但由此结构而引出的其他问题, 如次框架与主框架之间的碰撞问题引起了学者的进一步重视, 形成了新的研究焦点之一. 笔者在深入讨论了巨型一子结构控制机理并结合巨型框架结构自身优势的基础上, 提出了一种新的结构控制体系——巨型一子控制结构体系(见图 1(b)), 阐述了

该结构体系的基本工作原理及其优越性, 对巨型一子控制结构体系及对应的普通巨型框架结构进行了非平稳地震作用下的对比计算研究分析, 并进一步探讨了影响控振效果的因素; 结果证明了巨型一子控制结构体系对地震作用的有效控制以及对结构的安全性和舒适性均有明显提高.

1 工作原理及其优越性

为方便起见, 现将巨型一子控制结构体系称为控振结构, 普通巨型框架结构称为原结构.

一般情况下, 巨型框架结构由主框架和次框架组成(图 1(a)). 主框架是一种大型的跨层框架, 对钢筋混凝土巨型框架每隔 3~5 层设置一巨型框架梁, 对钢结构巨型框架每隔 10~12 层设置一巨型框架梁, 每隔若干个开间设置一巨型框架柱. 主框架巨型梁之间的楼层另设柱网尺寸较小的次框架. 主框架承担水平荷载和由次框架传来的竖向荷载, 次框架只承担本身楼层的竖向荷载并传递给主框架, 其水平荷载通过各楼层楼盖直接传递到主框架.

为了降低巨型框架结构的地震反应, 提高其抗震性能, 笔者提出, 在放松主框架与次框架侧向约束的基础上, 将庞大的巨型框架结构分解为主框架和多个较小的次框架控振结构, 于主次框架之间设置耗能阻尼器, 而不采用次框架基础隔振

收稿日期: 2004-09-28; 修订日期: 2005-01-20

作者简介: 张洵安(1959-), 男, 陕西省西安市人, 西北工业大学研究员, 博士生导师, 主要从事结构抗震研究.

的方案;从而形成一种新型的具有自控制功能的结构体系——巨型一子控制结构体系(图 1(b)).该体系主要工作原理是:次框架可视为承座在巨梁上的具有办公或商住功能的多层框架结构;同时,也更为重要的是,各个次框架又具有调频质量 TMD(Tuned Mass Damper) 的作用,而且质量巨大,与主框架一起形成一个大型的调频质量控振系统,使次框架产生的惯性力由不利的作用转变为有利的作用.因此,在地震作用下,该结构体系在不增加结构自重的基础上转变为调频质量控振结构体系.

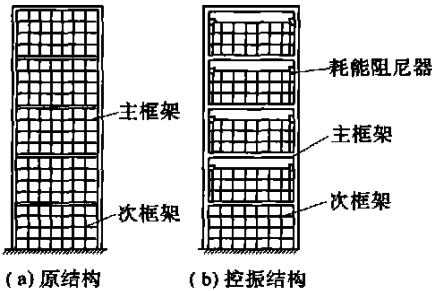


图 1 巨型框架结构体系
Fig. 1 Mega frame structures

巨型一子控制结构体系是一种新型的具有自控功能的结构体系,它除了具有普通巨型框架结构体系的优点之外,还具有:①控震效果明显、安全可靠.在控振结构体系中,不需要像普通 TMD 系统那样设置附加质量块,次框架本身就作为整体结构的调频质量存在,全部次框架的质量与主框架的质量比通常在 100% 以上,比普通 TMD 系统的 1%~5% 左右要大出很多,具有更大的控制能力和更好的控制效果,在该结构中设置多个次框架,即相当于在巨型框架中装置了多个 TMD 的大型 MTMD 控振系统,可以有效控制主框架多个振型的振动.②易于实现和降低工程造价.在结构中设置耗能阻尼器的技术已在国内外得到广泛应用,该结构中阻尼器位于主次框架之间,因而可以有效解决主、次框架之间的碰撞问题,并有利于施工和维护;由于该结构所承受的地震作用大大降低,这将使得结构的整体造价降低,可以创造出可观的经济效益.③巨型一子控制结构体系对于抗风和抗震均有效;不仅适用于钢筋混凝土结构,也同样适用于钢结构.

2 计算模型

对于巨型一子控制结构体系,在进行动力分析时,要比普通结构体系复杂得多.根据作者所提

出结构体系的特点和通过对该结构的变形分析:主框架采用弯曲模型,而次框架采用剪切模型的集中质量模型;由于底层次框架位于基础之上,其质量调频的作用较小,故暂不考虑其对整体结构的控制作用,计算模型如图 2 所示. $n_i(i=1,2,\dots,p-1)$ 为第 i 个次框架的层数,巨型一子控制结构体系的运动方程按式 (1) 确定:

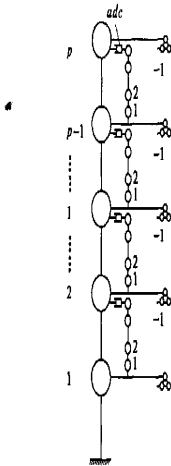


图 2 计算模型
Fig. 2 Computing ational model

$$MX+CX+KX=M\{1\}X_g \tag{1}$$

其中, $X=[X_p^T,X_1^T,\dots,X_i^T,\dots,X_n^T]^T$ 为系统相对于地面的位移向量; $X_p=[X_{p,1},\dots,X_{p,i},\dots,P_{p,p}]^T$ 为主框架相对于地面的位移向量; $X_i=[X_{i,1},\dots,X_{i,i},\dots,X_{i,n_i}]^T(i=1,2,\dots,p-1)$ 为次框架相对于地面的位移向量.系统总共 $p+\sum_{i=1}^{p-1}n_i$ 有个自由度,记 $s=p+\sum_{i=1}^{p-1}n_i$. $\{1\}$ 为单位向量. X_g 为地面运动加速度.

$$M=\begin{bmatrix} M_p & & \\ & M_1 & \\ & & \ddots \\ & & & M_{p-1} \end{bmatrix}, K=\begin{bmatrix} K_p+K_{s,diag} & K_c \\ & K_s \end{bmatrix},$$

其中: M_p 和 $M(i=1,2,\dots,p-1)$ 分别为 $p\times p$ 阶主框架质量阵和 $n_i\times n_i$ 阶次框架质量阵. K_p 和 K_s 分别为主框架刚度阵和次框架刚度阵. $K_{s,diag}$ 为次框架对主框架刚度的增加阵,由下式计算: $K_{s,diag}=diag[k_{1,1},k_{2,1},\dots,k_{i,1},\dots,k_{n,1},0]$.其中: $K_i(i=1,2,\dots,p-1)$ 为第 i 个次框架的首层层间剪切刚度. K_c 为主框架与次框架的耦合刚度阵,是一个 $p\times\sum_{i=1}^{p-1}n_i$ 阶矩阵,其不等于 0 的元素为:

$$K_c(i,j)=-k_i,i=1,\dots,p-1,j=\sum_{k=1}^{i-1}n_k+1$$
.阻

尼矩阵 C 采用 Rayleigh 阻尼,主框架和次框架均取各自的第一和第十振型,阻尼比取为 2% , adc 是耗能阻尼器的阻尼,并对整体结构进行组装计算,其表达式与 K 阵相似, $C_{s,diag} = diag[c_{1,1}, c_{2,1} + adc, \dots, k_{i,1} + adc, \dots, k_{n,1} + adc, 0 + adc], c_{i,j} (i = 1, 2, \dots, p - 1)$ 为第 i 个次框架的首层层间 Rayleigh 阻尼. C_c 为主框架与次框架的耦合刚度阵,是一个 $p \times \sum_{i=1}^{p-1} n_i$ 阶矩阵,其不等于 0 的元素为

$$C_c(i,j) = \begin{cases} -c_{i,1} & (i=1, \dots, p-1, j = \sum_{k=1}^{i-1} n_k + 1) \\ -adc & (i=2, \dots, p, j = \sum_{k=1}^{i-1} n_k) \end{cases}$$

这样得到具有较高精确度的非经典阻尼阵,因此式(1)已无法使用传统的实模态分析来求解,利用复模态理论对式(1)解耦.

引入状态变量 $y = \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix}$,在状态空间求得其特征值及左右复模态矩阵 V_x, U_x ,然后对式(1)进行复模态变换,计算各个模态坐标在随机地震作用下的位移响应功率谱密度阵 $S_R(t, \omega)$,再利用状态空间的位移响应功率谱密度阵 $S_y(t, \omega)$ 与模态坐标下的位移响应功率谱密度阵 $S_R(t, \omega)$ 之间的关系:

$$S_y(t, \omega) = U_x S_R(t, \omega) U_x^T,$$

得到状态空间的位移响应功率谱密度阵 $S_y(t, \omega)$,将状态响应叠加,得到各个自由度在随机地震作用下的响应^[4].

在本文的算例中,主框架 3 层,从下到上质量分别为 $6.036 \times 10^6 \text{ kg}, 5.741 \times 10^6 \text{ kg}, 5.023 4 \times 10^6 \text{ kg}$;标高分别为 46 m, 94 m, 142 m.第一和第二框架均为 10 层,第一次框架 1 到 9 层的质量为 $1.212 1 \times 10^6 \text{ kg}$,10 层的质量为 $1.157 22 \times 10^6 \text{ kg}$,第二次框架的质量分布和第一次框架相同.地震加速度采用 Kanai-Tajimi^[4]模型,地面运动加速度功率谱密度取 $S_0 = 5.75 (\text{cm}^2 \text{ s}^{-4}) / \text{Hz}$ ^[4],时间轴长 30 s,步长 0.5 s.选取的强度调制函数为

$$I(t)^{[4]} = \begin{cases} t^2/1.5^2 & (0 \leq t \leq 1.5) \\ 1 & (1.5 \leq t \leq 15) \\ e^{-0.18(t-15)} & (15 \leq t \leq 30) \end{cases}$$

3 主框架地震反应对比分析

图 3(a)、(b) 分别给出了强度函数为 $I(t)$ 时控振结构和原结构主框架顶点的位移和加速度响应时间对比曲线.从图 3(a)、(b) 可以看出,原结构顶点的最大位移响应为 20.425 cm,而控振结构

的最大位移响应为 0.877 32 cm,降低幅度为 95.70%;原结构顶点的最大加速度响应为 75.511 cm/s^2 ,而控振结构最大加速度响应为 57.327 cm/s^2 ,降低幅度为 24.08%.其主要原因是:在地震作用下,次框架产生一个与主框架振动方向相反的惯性力作用在主框架上,每个次框架相当于一个大型的调频质量块(TMD),整个结构成为一个大型调频质量控振系统,使主框架的地震反应得到有效的控制并较原结构加快了衰减,这对于保证结构安全、提高结构舒适程度、减少主框架材料的用量、降低工程造价具有重要意义.

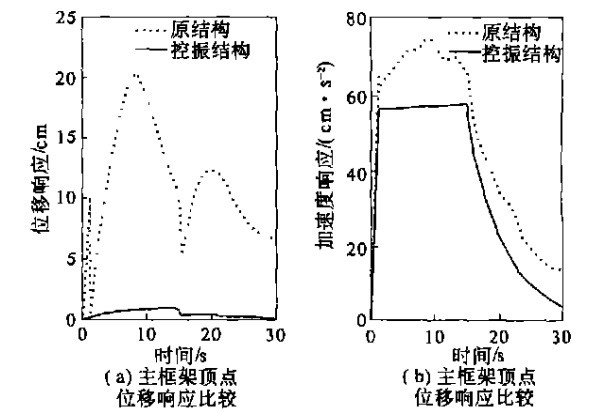


图 3 主框架的位移和加速度对比图
Fig. 3 Displacement and acceleration response compare of main frame culmination

4 耗能阻尼器的阻尼对结构响应的影响

图 4(a)、4(b) 分别给出了强度函数为 $I(t)$ 时,主框架在不同阻尼下的顶点最大位移和加速度响应曲线;图 4(c)、4(d) 分别给出了上部次框架在不同阻尼下的顶点最大位移和加速度响应曲线;横坐标是耗能阻尼器的阻尼与次框架首层层间阻尼的比值.由图可见,结构响应在阻尼比值为 0.1 到 1.0 随着阻尼增大而减小;在 1.0 到 3.0 曲线无明显变化;在 3.0 到 4.0 增幅较大.因此,耗能阻尼器与次框架首层层间阻尼比在合理范围内变化可以有效控制主、次框架的位移和加速度,当不在这个范围时,耗能阻尼器对位移和加速度成倍的放大,不利于结构的控振;在进行结构设计时,应根据次框架的层间阻尼,采用阻尼为次框架首层层间阻尼的 1.0~3.0 倍的耗能阻尼器可以有效控制结构地震响应.

5 次框架刚度对结构响应的影响

图 5(a)、5(b) 分别给出了强度函数为 $I(t)$ 时,主框架在不同次框架刚度下的顶点最大位移

和加速响应曲线;图 5(c)、5(d) 分别给出了上部次框架在不同次框架刚度下的顶点最大位移和加速度响应曲线;横坐标是次框架刚度与主框架刚度的比值. 由图可见,主框架的地震响应随着次框架的刚度增大而增大;主框架的加速度、次框架的位移和加速度随着次框架刚度的增大而减小;主次框架的地震响应均在 0.4 附近出现波动,但总的变化趋势明显. 因此,次框架的刚度与主框架的

刚度比在合理的范围内变化可以有效控制主、次框架的位移和加速度,当不在这个范围时,主次框架的位移和加速度会被放大,不利于结构的控振;在进行结构设计时,应根据主框架的层间刚度确定次框架的合理层间刚度,当次框架与主框架的刚度比大于 0.15 并避开 0.4 附近,可以有效控制结构地震响应.

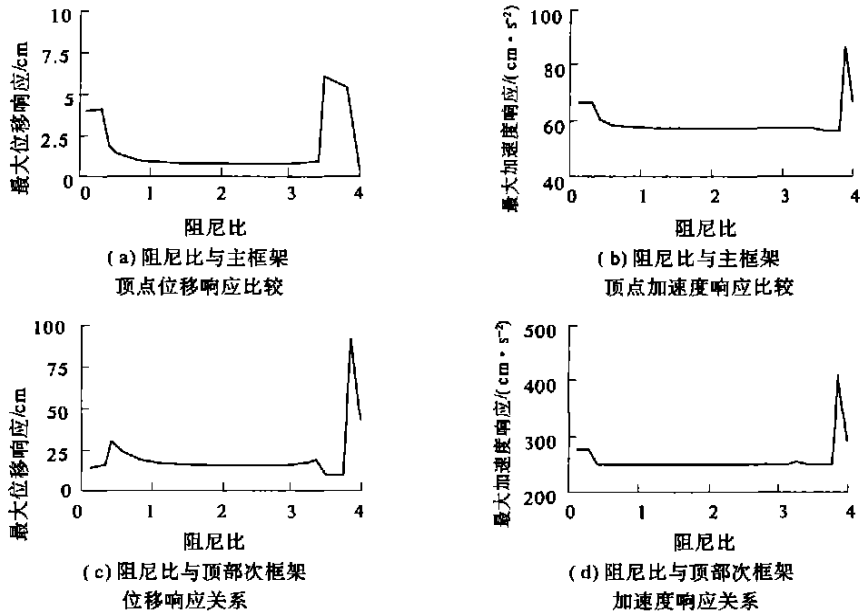


图 4 阻尼比对结构响应的影响
Fig. 4 The relationship of damp ratio and the structures response

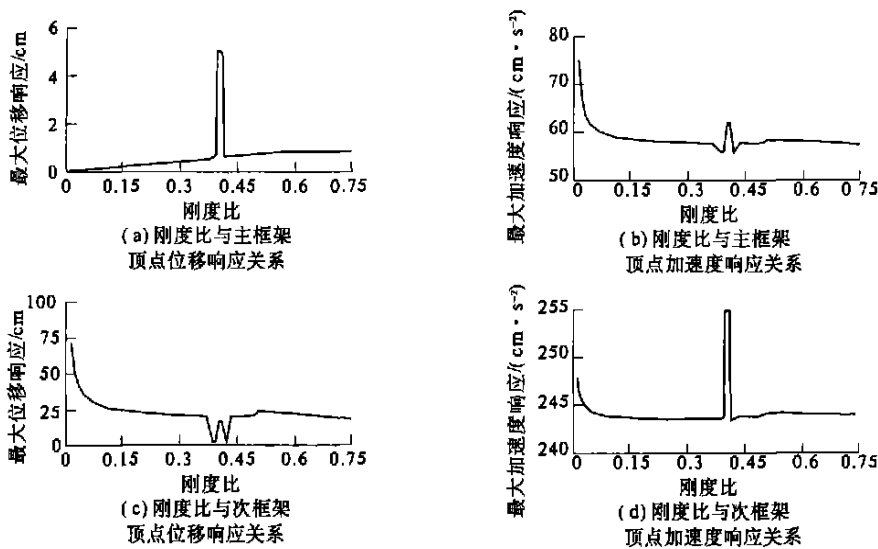


图 5 次框架刚度对结构响应的影响
Fig. 5 The relationship of rigidity ratio and the structures response

6 结束语

与普通的巨型框架结构相比,由于每个次框架相当于一个质量巨大的调频质量(TMD),多个

次框架相当于多个质量巨大的调频质量(MIT-MD);将两种控制方法集于一体,整个结构体系成为一个大型调频质量控制系统,有效控制主框架的多个振型振动,使得主框架的地震反应降低. 在

进一步探讨了耗能阻尼器的阻尼和次框架刚度对结构控振的影响后,提出了耗能阻尼器与次框架刚度的合理取值范围,对结构设计具有指导性作用.因此,巨型一子控制结构体系既具有普通巨型框架结构体系的优点,又具有控振功能,且控振效果明显,不仅适用于钢筋混凝土结构,也适用于钢结构,对于抗风抗震都适用,有广阔的应用前景.

参考文献:

[1] MARIA Q.Feng vibration control of tall building using mega subonfiguration[J].Journal of Engineering Mechanics 1995,10:1082~1087.

[2] WINSTON C, MARIA Q.Feng vibration control of super tall buildings subjected to wind loads [J] .Non -Linear Mechanics ,1997,(2) :657~668.
[3] 蓝宗建.钢筋混凝土巨型框架多功能减振结构地震反应分析[J].建筑结构学报,2001,22(4) :77~83.
[4] 方 同.工程随机振动[M] .北京:国防工业出版社.1995.
[5] 胡聿贤.地震工程学[M] .北京:地震出版社.1988.
[6] 张洵安,张建林,姜节胜.子结构刚度对巨型框架减震结构体系的动态特性影响[J].西北工业大学学报,2004,22(1) :59~63.
[7] 彭 刚,张国栋.土木工程结构振动控制[M] .武汉:武汉理工大学出版社,2002

Study on Mega -Sub Controlled Systems Subjected to Non -stationary Seis m Loads

ZHANG Xun -an , WANG Ning

(School of Mechanics and Civil Engineering ,Northwestern Polytechnical University , Xi ' an 710072,China)

Abstract : Vibration -control mechanism and superiority of a new control system -mega -sub controlled systems are studied .Based on the complex mode analysis theory of radom vibration for comparison , a megafame without control and one with sub control are studied under the same non -stationary seismload conditions the displacement response of mega frame coping reduces 95.70%the acceleration response reduces 24.08%the significant cost -effectiveness of the mega -subframe systems is demonstrated in controlling the acceleration and demonstrated responses of mega frame to seismloads , not only enhancing the safety of structure but also improving the confort of occupants . Two factors subsidiary frame shearing rigidity and the damp of damper effecting on the response of systems the rigidity ratio is more than 0.15and avoids 0.4and the damp ratio from 1.0to 3.0.The response of the system is reduced .

Key words : mega -sub controlled system ; complex mode theory ; non -stationary seismic excitation ;tuned mass damper ; vibration -control structur ; rigidity ; damp

(上接第 27 页)

Study on Structural Layout Choice of Large -span Prestressed Concrete Floor

TONG Li -ping , WANG Yan -chao

(School of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China)

Abstract : There are various styles of large span prestressed concrete floor . Different floor need suitable structural layout of different structural behavior . This paper selects the floor structure arrangement of ZZCEC , and calculates 5 floor framing systems of RC floor system the long prestressed span beam system and the concrete cross beam system . Through the analysis of the static behavior and the comparison of the merits and faults , the reasonable structure arrangement of the floor structure can be acquired . This paper can also be useful for such large span prestressed concrete floor .

Key words : prestressed concrete ;large span floor ; structural behavior