

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202107007

基于子结构频率匹配机制的城市综合体高层结构分层隔震性能研究*

朱春阳, 孙 丽, 杜仕伟, 崔艳青, 王馨辉, 于浩川

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:为实现城市综合体高层结构“可恢复功能”防震目标,建立了综合体高层结构分层隔震体系,以应对裙房—塔楼结合部刚度突变对整体结构动力特性的不利影响,缓解(超)高层塔楼因高宽比过大导致隔震应用受限的问题。基于振型参数分析假定裙房部分侧移形状函数,在此基础上建立整体系统简化动力学模型,通过求解频率响应传递函数,建立子结构间频率匹配关系,调整各子结构频率以优化整体结构动力特性,开展有限元分析验证综合体高层结构分层隔震机制。结果表明:与抗震及单层隔震相比,双层隔震能更有效地控制结构地震响应,基于子结构间频率匹配关系可优化结构整体地震动特性,因此,分层隔震体系是一种适用于复杂、高耸结构的有效防震手段。

关键词: 综合体高层; 隔震; 地震响应; 频率匹配; 有限元分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0902-07

Study on Seismic Performance of Urban Complex High Rise Building with Layered Isolation System based on Substructure Frequency Matching Mechanism

ZHU Chunyang, SUN Li, DU Shiwei, CUI Yanqing, WANG Xinhui, YU Haochuan
(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: For the purpose of achieving the goal of "resilience" of urban complex high-rise building, a layered isolation system for high-rise complex structure is proposed, which can avoid the adverse effect of sudden stiffness variation of podium-tower junction on the dynamic response of the whole structure, and alleviate the problem of limitation of using isolation in (super) high-rise tower due to large height-width ratio. Based on the analysis of modal parametric study, the lateral displacement shape function of the podium is determined, and a simplified dynamic model is established. By optimizing the frequency of each substructure, the seismic performance of the whole structure is improved. Finite element analysis is carried out to verify the principle of double layered isolation of high-rise complex. The results show that, comparing with the aseismic structure and single-layer isolation, double-layer isolation can more effectively control the seismic response of the structure, and the dynamic characteristics of the whole structure can be optimized by adjusting the frequency to match that of substructures.

* 收稿日期:2021-07-07;修回日期:2021-09-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504300)资助

作者简介:朱春阳(1986—),男,副教授,硕导,博士。主要从事抗震与组合结构方面的研究。E-mail:cyzhu1087@163.com

通讯作者:孙丽(1974—),女,教授,博导,博士。主要从事抗震与结构健康监测方面的研究。E-mail:sunli2000@163.com

Therefore, the layered isolation system is a high-efficiency earthquake prevention method for complex and high-rise structures.

Keywords: urban complex high rise building; isolation structure; seismic performance; frequency adjusting; finite element analysis

引言

城市综合体是集交通、居住、办公、商业、文娱等功能于一体的多功能建筑,是充分利用资源,促进建筑与城市交通、建筑与建筑、街区地下空间之间互联的高效实现方式,是城市核心区高密度开发的趋势^[1],目前,全国重点城市核心区综合体项目占比逐年上升,作为现代城市的重要基础设施,综合体高层结构已成为城市的“核心”与“枢纽”。

城市综合体高层结构通常由大体量裙房与(超)高层塔楼结构组成,具有复杂、大跨、高耸、平立面不规则等特点。针对此类结构,采用传统的抗震设计方法虽能保证罕遇地震下不发生倒塌,但倘若结构损伤或变形过大则很难实现其功能的快速恢复,作为城市基础设施的重要环节,城市综合体一旦产生震损将严重影响城市功能运营,带来严重经济、社会损失。

如今,“韧性城市”已成为国际地震工程界的共识,该理念对建筑结构的抗震性能要求由传统的“安全性”提升到了“韧性”层面^[2]。在保证人员生命安全的前提下,将维持建筑的功能或实现震后建筑功能的快速恢复(可恢复功能)作为最终目标。鉴于综合体结构在城市中的重要地位,开展基于功能可恢复的综合体高层结构防震研究势在必行。

“隔震”技术是实现结构功能可恢复的有效手段,通过隔震可有效降低结构地震动响应,实现震后变形恢复。早期的隔震技术多用于以剪切变形为主的多层结构,后逐渐应用于高层结构,文献[3]讨论了高层建筑结构隔震设计关键问题,指出采用规范设计反应谱对高层隔震结构进行分析必须考虑高阶振型影响,否则会大幅降低减震效果。文献[4-5]着眼于基础隔震的高宽比限值问题,将隔震支座不出现拉应力与不超过抗压极限强度条件作为准则,相关问题的解答为隔震技术用于高层结构奠定基础。除了基础隔震外,层间隔震技术进一步拓宽了隔震技术的应用范围^[6],文献[7-11]讨论了层间隔震机理,明确了层间隔震体系的动力特性。文

献[12-13]针对裙房+塔楼典型结构层间隔震体系,讨论了不同隔震层布置位置对体系动力特性的影响。

与其他类型建筑结构相比,综合体高层结构裙房与塔楼结合部刚度突变,宜在此处设置隔震层将两者分割,使整体结构形成刚度均匀的子结构组合体系。此外,高层或超高层塔楼部分高宽比大,地震动下易产生弯曲型变形模式,对隔震支座产生不利影响(支座拉、压应力超限),可再次利用隔震层将塔楼划分成高宽比较小的子结构,以期将原塔楼整体弯曲变形模式转为子结构间的分块剪切变形模式,从而降低隔震层隔震支座的性能需求。

综合现有研究成果,针对综合体高层结构特点,建立综合体高层结构分层隔震体系,推导简化力学模型以讨论其整体动力学特性、分析隔震层最优性能参数,并开展有限元分析加以验证,为此类复杂、高耸结构实现功能可恢复的防震设计提供参考。

1 综合体高层双隔震体系简化模型

以典型综合体高层结构层间双隔震体系为例,建立相应三自由度体系动力学模型,如图1所示。将第一道隔震层下部裙房子结构等效为质量 m_n ,刚度为 k_n ,第二道隔震层再将塔楼分割为两部分子结构,等效为质量分别为 m_{T1} 和 m_{T2} ,两道隔震层刚度分别为 k_{T1} 和 k_{T2} 。

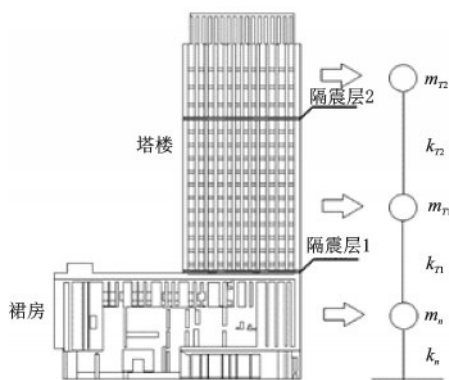


图1 综合体高层结构双隔震简化力学模型

Fig.1 Simplified model of complex high-rise structure with double isolation

1.1 裙房等效自由度模型

简化模型中,因裙房部分与基础连接,质量 m_n 及刚度 k_n 可基于主振型等效。首先开展裙房部分的模态分析,考虑上部塔楼质量影响,将裙房框架结构按楼层等效为串联质量模型,如图2所示,其中 m_{ni} 为第 i 层裙房质量, k_{ni} 为裙房第 i 层侧移刚度。

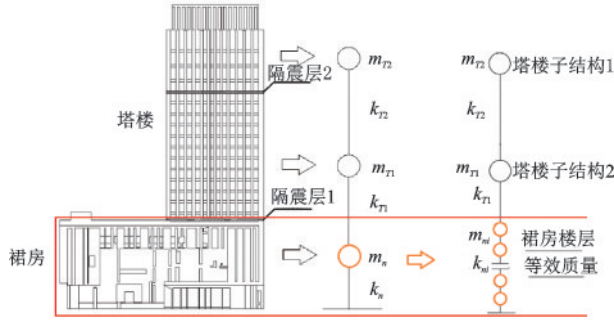


图2 裙房局部简化动力模型

Fig.2 Local simplified dynamic model of podium

基于此模型开展模态分析,模型参数涵盖多种裙房楼层质量分布模式、裙房层间刚度分布模式、塔楼子结构质量分布模式、隔震层刚度等,研究上述参数对体系模态的影响规律,发现各参数下体系主振型与普通多层框架结构类似,仍以剪切型为主。以楼层质量相差小于30%的随机分布九层裙房为例,其层间刚度 k_{ni} 均匀分布,塔楼质量 $m_{T1}/m_v = 4$, $m_{T2}/m_v = 2$ (m_v 为裙房楼层质量均值),隔震层刚度 $k_{T1} = 0.01k_{ni}$ 、 $k_{T2} = 0.005k_{ni}$,图3为此参数条件下整体结构的主要振型(累计振型质量占比 > 90%),基本符合剪切型侧移模式。通过对各参数下多种振型模式的归纳与总结,本文将裙房部分侧移形状函数简化为直线剪切型。

基于直线剪切型侧移形状函数计算裙房框架的等效质量与等效刚度^[14],如下:

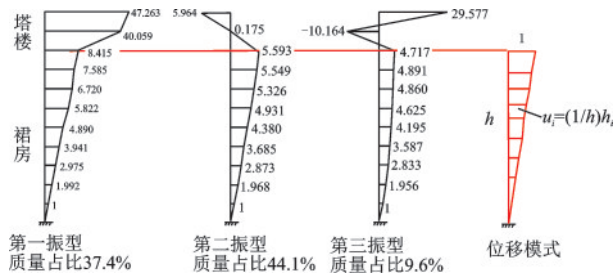


图3 裙房局部振型

Fig.3 Mode shapes of podium

$$m_n = m_{\text{eff}} = \left| \sum_{i=1}^n m_i u_i \right| / u_{\text{eff}} \quad (1)$$

$$u_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n m_i u_i^2 / \sum_{i=1}^n m_i u_i \quad (2)$$

$$k_n = k_{\text{eff}} = \left| \frac{2\pi}{T_{\text{eff}}} \right|^2 m_{\text{eff}} \quad (3)$$

式中, m_{eff} 为等效质量; u_{eff} 为等效位移, k_{eff} 为等效刚度; T_{eff} 为等效周期,由整体模态分析求出。

1.2 模型动力学方程及解答

确定裙房部分等效质量及等效刚度后,暂不考虑阻尼影响,建立综合体高层结构双隔震体系三自由度动力学方程,如下:

$$m_n \ddot{x}_n + k_n x_n + k_1 (x_n - x_1) = -m_n \ddot{x}_g \quad (4)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 - k_1 (x_n - x_1) + k_2 (x_1 - x_2) = -m_1 \ddot{x}_g \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 (x_1 - x_2) = -m_2 \ddot{x}_g \quad (6)$$

式中, x_n, x_1, x_2 分别为裙房、子结构 I、子结构 II 位移,令 $\omega_n = \sqrt{k_n/m_n}$, $\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$, $\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$, $\eta_1 = m_1/m_n$, $\eta_2 = m_2/m_n$ 。则方程为:

$$\ddot{x}_n + \omega_n^2 x_n + \omega_1^2 \eta_1 (x_n - x_1) = -\ddot{x}_g \quad (7)$$

$$\ddot{x}_1 - \omega_1^2 (x_n - x_1) + \omega_2^2 \eta_2 (x_1 - x_2) = -\ddot{x}_g \quad (8)$$

$$\ddot{x}_2 - \omega_2^2 (x_1 - x_2) = -\ddot{x}_g \quad (9)$$

设地面加速度为谐振加速度 $\ddot{g} = e^{i\omega t}$,各质点位移分别为: $x_n = H_n(\omega)e^{i\omega t}$, $x_1 = H_1(\omega)e^{i\omega t}$, $x_2 = H_2(\omega)e^{i\omega t}$,各质点的加速度表示为: $\ddot{x}_n = -\omega^2 H_n(\omega)e^{i\omega t}$, $\ddot{x}_1 = -\omega^2 H_1(\omega)e^{i\omega t}$, $\ddot{x}_2 = -\omega^2 H_2(\omega)e^{i\omega t}$,其中 H_n, H_1, H_2 分别表示简谐地震动下 x_n, x_1, x_2 的频率响应传递函数。求解动力方程,获得频率响应传递函数的解答为:

$$H_n = \frac{\Pi_n}{M} \quad (10)$$

$$H_1 = \frac{\Pi_1}{M} \quad (11)$$

$$H_2 = \frac{\Pi_2}{M} \quad (12)$$

$$\Pi_n = \omega^4 + ((-\eta_2 - 1)\omega_2^2 + (-\eta_1 - 1)\omega_1^2)\omega^2 + (1 + (\eta_2 + 1)\eta_1)\omega_1^2\omega_2^2 \quad (13)$$

$$\Pi_1 = \omega^4 + ((-\eta_2 - 1)\omega_2^2 + (-\eta_1 - 1)\omega_1^2 - \omega_n^2)\omega^2 + ((1 + (\eta_2 + 1)\eta_1)\omega_1^2 + \omega_n^2(\eta_2 + 1))\omega_2^2 \quad (14)$$

$$\Pi_2 = \omega^4 + ((-\eta_2 - 1)\omega_2^2 + (-\eta_1 - 1)\omega_1^2 - \omega_n^2)\omega^2 + ((1 + (\eta_2 + 1)\eta_1)\omega_1^2 + \omega_n^2(\eta_2 + 1)\omega_2^2) + \omega_1^2\omega_n^2 \quad (15)$$

$$M = \omega^6 + ((-\eta_2 - 1)\omega_2^2 + (-\eta_1 - 1)\omega_1^2 - \omega_n^2)^2 +$$

$$(((1+(\eta_2+1)\eta_1)\omega_1^2+\omega_n^2(\eta_2+1))\omega_2^2+\omega_1^2\omega_n^2)\omega^2-\omega_1^2\omega_2^2\omega_n^2 \quad (16)$$

式中, ω 为外部激励频率, ω_1 、 ω_2 为相应子结构 I、子结构 II 的频率, 通过分析传递函数揭示各子结构在外部激励下的动力特性匹配关系, 进而实现整体结构体系动力响应最优化。

1.3 频率响应传递函数

由式(10)~(12)可知, 传递函数为地震激励频率、各子结构频率与质量比的函数, 以某工况下 ($\eta_1=2$ 、 $\eta_2=1$ 、 $\omega_n=14.4$ 、 $\omega=15.7$) 的传递函数为例加以说明, 通过对传递函数图像(图4)分析, 可以总结如下结论: ①在 $\omega_1-\omega_2$ 平面内, 沿某特定双曲函数轨迹, 传递函数出现极值, 说明在此轨迹的频率组合下, 某一子结构趋于共振; ②在传递函数极值轨迹附近, 特定频率组合条件下, 传递函数出现 0 值, 说明此种频率匹配可使得某一子结构振动消失(止振), 即可利用子结构间频率匹配机制对结构进行振动控制。

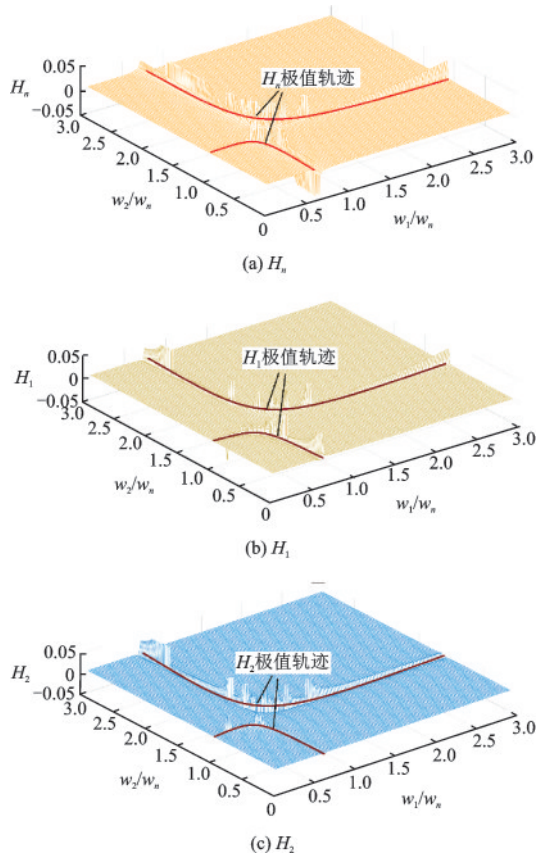


图4 各子结构频率响应传递函数

Fig.4 Frequency response transfer function for each sub-structure

考虑传递函数 0 值的三种情况, 图5中表示出式(10)~(12)中 $\Pi_n=0$ 、 $\Pi_1=0$ 、 $\Pi_2=0$ 在 $\omega_1-\omega_2$ 平面上的投影轨迹, 其上的频率组合可用来指导结构双隔震设计, 通过调整子结构间频率匹配, 实现对整体结构的振动控制。

其次考虑 H_n 、 H_1 及 H_2 的极值情况, 对应于式(10)~(12)中 $M=0$, 图5中同时也表示出 $M=0$ 在 $\omega_1-\omega_2$ 平面上的轨迹线, 即为某一部分子结构发生共振的频率组合, 子结构频率设计应给予规避。

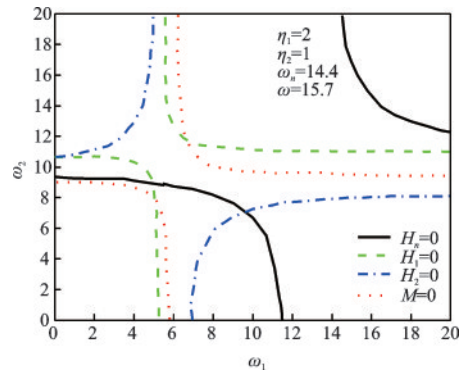


图5 频率响应传递函数 0 值/极值轨迹

Fig.5 Transfer function 0 / extremum value trace

2 综合体高层结构双隔震体系分析

2.1 结构概况与模型建立

选取某综合体高层结构, 其裙房部分为 8 层框架, 高度 48 m, 塔楼部分为 48 层框剪结构, 高 232.8 m。平面布置与梁、柱设计如图 6 所示。抗震设防烈度为 VIII 度, II 类场地, 设计地震分组为第一组, 不考虑地下结构的土-结相互作用, 选择取裙房-塔楼一榀框架-剪力墙作为计算单元进行分析。

仅考虑一榀框架面内变形, 基于 ABAQUS 平台建立平面有限元模型, 梁、柱采用 Beam 单元, 采用基于 vumat 子程序的 qblfiber 本构模型, 混凝土剪力墙采用 Shell 单元, 采用塑性损伤本构。隔震层通过 Translator 单元模拟, 通过改变单元水平向刚度实现隔震层等效刚度调节, 进而实现各子结构频率调整。按规范要求对每层施加重力荷载代表值后, 对裙房柱底施加地震动。有限元模型如图 7 所示。

开展 VIII 度 (0.15g) 设防罕遇地震作用下结构弹塑性时程分析, 依规范要求, 选取 7 组地震动时程输入, 每条地震动记录的反应谱、设计反应谱、均值反应谱如图 8 所示。

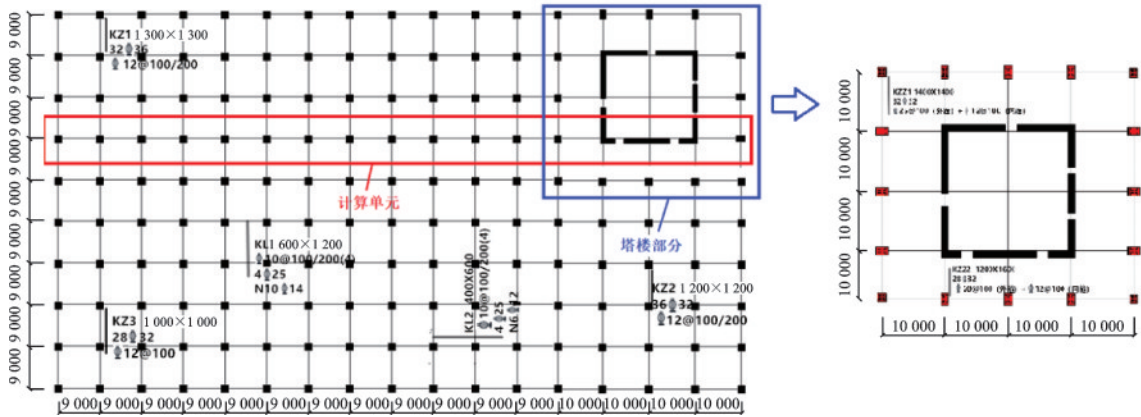


图6 裙房部分标准层平面

Fig.6 Plan of standard floor of podium

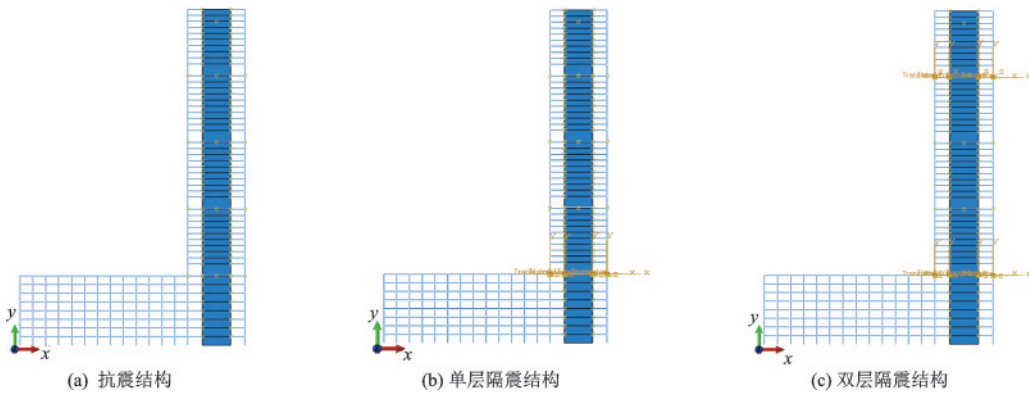


图7 综合体结构有限元模型

Fig.7 Finite element model of complex structure

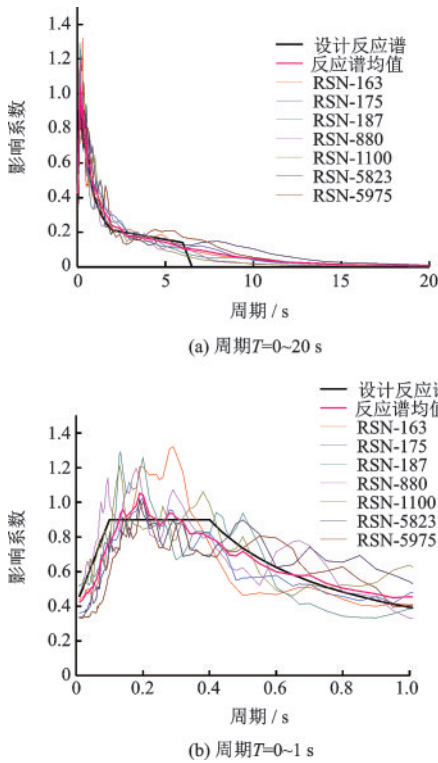


图8 地震动记录反应谱

Fig.8 Response spectrum of ground motion record

2.2 单层隔震结构响应

单层隔震结构中,隔震层布置于裙房—塔楼结合部(图7(b))。以获得最大加速度减震率为目标,经多次试算确定隔震层等效刚度为340.56 kN/m,计算获得7条地震动下层加速度与层间位移角响应均值如图9(a)所示。可见,在强调对层加速度减震效果的情况下,隔震层对结构层间位移角降低效果不理想,塔楼顶部甚至出现了层间位移角放大。

2.3 双层隔震体系响应

在单层隔震的基础上,在塔楼部分38层位置布置第二道隔震层,将塔楼划分为子结构I(塔楼下半部,高宽比3.3)和子结构II(塔楼上半部,高宽比1.2)。按式(1)~(3)计算裙房部分等效质量与刚度,进而确定等效频率为 $\omega_n = 14.4 \text{ rad/s}$,子结构II、子结构I、裙房三部分(等效)质量比为 $m_2 : m_1 : m_n = 0.9 : 3.1 : 2.3$ 。依照1.3节中所述方法作出子结构传递函数在 $\omega_1 - \omega_2$ 平面的0值轨迹,如图10所示,其中外部激励频率依据设计反应谱场

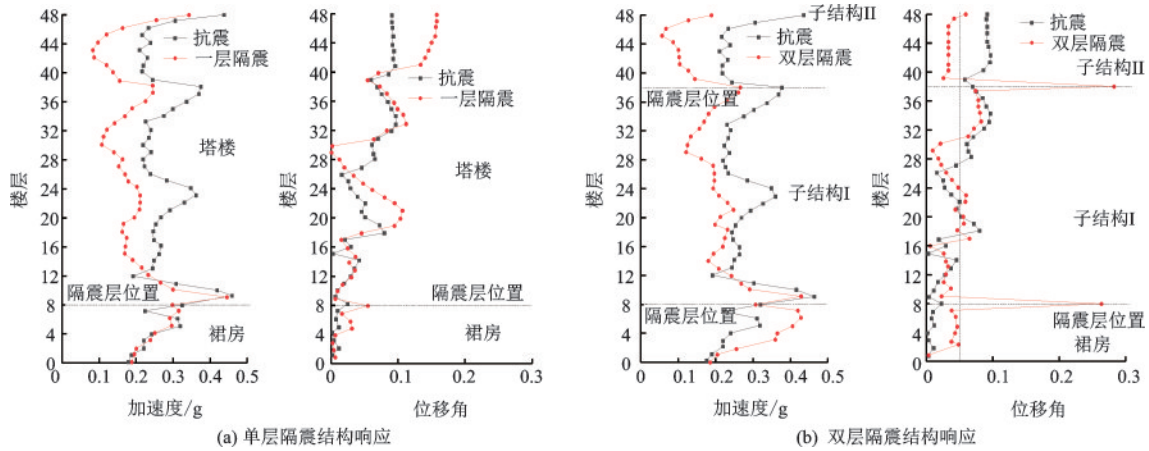


图9 隔震结构地震响应

Fig.9 Dynamic response of isolated structure

地特征周期 $T_g=0.4$ s 计算获得 $\omega=15.7$ rad/s。由图可见在此双层隔震结构体系在频率 $8\sim 20$ rad/s, $H_1=0$ 与 $M=0$ 轨迹十分接近,说明此区域内子结构 I 对频率响应异常灵敏,这可能因 m_1 质量占比过大引起,在子结构频率匹配设计时应尽量避开此段频率,避免子结构 I 产生过大位移。

针对单层隔震结构塔楼顶部位移角过大的问题,以降低塔楼顶部位移响应为目标,频率组合选取在 $H_2=0$ 轨迹附近,选取子结构 I 与子结构 II 三种目标组合频率工况 ω_A 、 ω_B 、 ω_C ,如图 10 所示。确定频率目标组合后换算确定两隔震层刚度,见表 1。

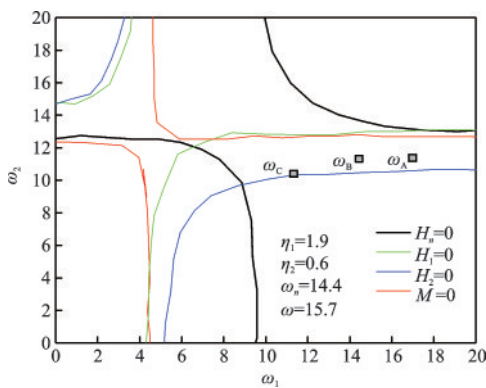


图 10 频率响应传递函数 0 值/极值轨迹

Fig.10 Transfer function zero/extremum value trace

图 9(b)为目标频率组合工况 ω_A 条件下模拟获得的结构加速度与位移角响应最大值均值,可见引入第二道隔震层后,塔楼顶部的位移角显著降低。但与单层隔震相比,裙房部分地震动效应有所放大,可能是频率组合偏离 $H_n=0$ 轨迹较远所致(仍

表 1 双层隔震结构有限元模拟方案

Table 1 Finite element simulation scheme of double-layer isolation structure

工况	频率组合 (ω_1, ω_2)	隔震层等效刚度 (k_{T1}, k_{T2})/(kN·m ⁻¹)
ω_A	(17.0, 11.2)	12.46
ω_B	(14.4, 11.2)	80.39
ω_C	(11.4, 10.5)	205.79

满足文献[15]中有关隔震层以下地面以上结构在罕遇地震下弹塑性位移角限值 1/200 的规定)。

图 11 为目标频率组合工况 ω_B 和 ω_C 条件下体系模拟结果,与工况 ω_A 相比,工况 ω_B 和 ω_C 更趋近于 $H_n=0$,即更倾向于对裙房的控制。模拟结果可见,随着频率组合的调整,裙房的层间位移角响应降低趋势较为明显,与预期相符,验证了子结构频率匹配方法的合理性与可行性。

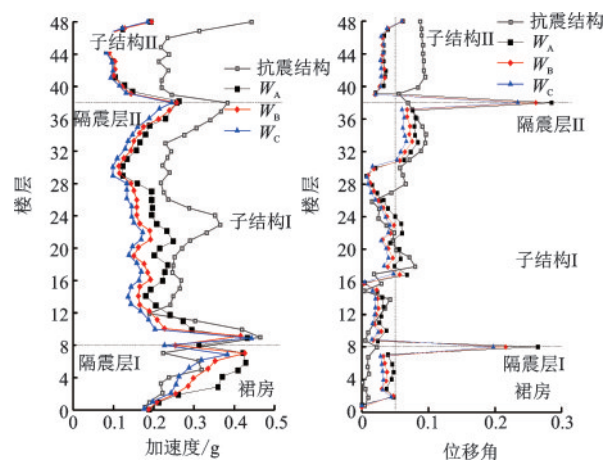


图 11 子结构频率影响

Fig.11 Effect of frequency of substructure

3 结 论

建立了综合体高层结构分层隔震体系,基于振型参数分析确定裙房侧移形状函数,以此为基础建立了整体结构简化动力学模型,通过求解频率响应传递函数,获得子结构间的调谐频率匹配关系,通过各子结构频率匹配优化整体结构动力特性,并开展有限元分析对综合体高层双隔震机理进行验证。结论如下:

(1)对于综合体高层结构双层隔震体系,裙房部分形状函数仍可简化为剪切型,以此计算裙房部分等效质量与等效刚度,实现对隔震层下裙房子结构单自由度等效。

(2)求解综合体高层结构双隔震体系内子结构的频率响应传递函数,明确频率空间内传递函数特征,各子结构“共振”及“止振”频率组合轨迹基本符合双曲线分布。

(3)建立子结构间的调谐频率匹配关系,通过合理选择各子结构频率组合,实现整体结构地震响应优化,为综合体高层结构体系分层隔震设计提供参考。

参考文献:

[1] 张昕然.与高密度街区融合的超高层建筑综合体设计策略[J].工业建筑,2020,50(10):39-42,48.
Zhang X R. Design strategies of super high-rise building complex integrated with high-density blocks [J]. Industrial construction, 2020, 50 (10): 39-42, 48. (in Chinese)

[2] 任军宇,潘鹏,王涛,等.GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》解读[J].建筑结构学报,2021,42(1):48-56.
Ren J Y, Pan P, Wang T, et al. Interpretation of GB / T 38591—2020 'standard for seismic resilience assessment of buildings' [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 48-56 (in Chinese)

[3] 王曙光,杜东升,刘伟庆.高层建筑结构隔震设计关键问题[J].南京工业大学学报(自然科学版),2009,31(1):71-77.
Wang Sh G, Du D Sh, Liu W Q. Key problems of seismic isolation structural design in high-rise buildings [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2009,31 (1): 71-77. (in Chinese)

[4] 祁皓,商昊江.高层基础隔震结构高宽比限值分析[J].振动与冲击,2011,30(11):272-280.
Qi A, Shang H J. Analysis on Limit of height-width ratio of high-rise base-isolated structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (11): 272-280. (in Chinese)

[5] 李宏男,吴香香.橡胶垫隔震支座结构高宽比限值研究[J].建筑结构学报,2003,24(2):14-19.
Li H N, Wu X X. Study on limit of height-to-width ratio for base-isolated buildings with rubber bearings under earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(2): 14-19. (in Chinese)

[6] 周福霖,张颖,谭平.层间隔震体系的理论研究[J].土木工程学报,2009,42(8):1-8.
Zhou F L, Zhang Y, Tan P. Theoretical study on story isolation system [J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(8): 1-8. (in Chinese)

[7] 祁皓,林云腾,郑国琛.层间隔震结构工作机理研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(4):239-243.
Qi A, Lin Y T, Zheng G Ch. Research on working mechanism of story isolation structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(4): 239-243. (in Chinese)

[8] 祁皓,郑国琛,阎维明.考虑参数优化的层间隔震结构振动台试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(2):8-16.
Qi A, Zheng G Ch, Yan W M. Shaking table test of story isolation structure considering parameter optimization [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 8-16. (in Chinese)

[9] 李爱群,轩鹏,徐义明,等.建筑结构层间隔震技术的现状及发展展望[J].工业建筑,2015,45(11):1-8.
Li A Q, Xuan P, Xu Y M, et al. Status and development prospects of story isolation for buildings [J]. Industrial Architecture, 2015, 45 (11): 1-8. (in Chinese)

[10] Zhou Q, Singh M P, Huang X Y. Model reduction and optimal parameters of mid-story isolation systems [J]. Engineering Structures, 2016, 124(1):36-48.

[11] Chang K C, Hwang J S, Wang S J, et al. Analytical and experimental studies on seismic behavior of buildings with mid-story isolation[C]//ATC and SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. California, San Francisco: Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009:201-219.

[12] 徐忠根,周福霖.底部二层框架上部多塔楼底隔震数值模拟与试验研究[J].地震工程与工程振动,2005,25(1):126-132. (本文责编:赵霞)

(下转第916页)