

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220505005

基于位移-速度输入法结构多点激励FPS支座 隔震效果研究

王浩霆, 葛楠, 韩流涛, 于建东

(华北理工大学建筑工程学院, 河北唐山 063210)

摘要: 受行波效应、相干效应、场地效应的影响,大跨度结构的多点激励地震反应分析非常复杂,且考虑多点激励下对大跨空间网格结构隔震性能的影响是结构工程抗震方向中有重大意义的研究课题。以单层圆柱面大跨度空间网架结构为研究对象,基于直接位移法,应用SAP2000有限元软件建立了多点激励动力反应时程分析模型,进行结构在地震动一致激励和多点激励作用下的动力反应分析计算。结果表明:水平地震动多点激励效应对大跨度空间结构的影响十分显著,需采取使用多点激励输入方式。不设置隔震支座时,多点激励下,支撑柱弯矩与剪力随波速的减小而明显增加,柱顶位移变小,中柱轴力略微上升。基础隔震时,各支撑柱柱顶内力与位移的分配较无隔震时存在差异。边柱的弯矩、剪力及轴力均小于中柱的相应值,但柱顶位移增加明显。柱弯矩减震效率保持在45%~75%,柱剪力减震效率保持在60%~85%;柱顶隔震时,能得到比基础隔震更高的隔震效率,且柱弯矩隔震效率高达90%左右,柱剪力隔震效率保持在85%~90%。柱顶位移显著减小,柱轴力比基础隔震时略有增加。

关键词: 空间网架结构; 多点激励; 时程分析; FPS摩擦摆支座; 大质量法

中图分类号: TU393.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0165-10

Research on Seismic Isolation Efficiency of FPS Bearing under Multi-point Excitation of Earthquake Waves Based on Displacement-velocity Input Method

WANG Haoting, GE Nan, HAN Liutao, YU Jiandong

(North China University of Science and Technology, Architectural Engineering Institute, Tangshan 063210, China)

Abstract: Under the influence of the traveling wave effect, coherence effect and site effect, the seismic response analysis of long-span structures under multi-point excitation is very complex, and considering the influence of multi-point excitation on the isolation performance of long-span spatial grid structures is a significant research topic in seismic engineering. An analytical seismic dynamic model under multi-point excitation was presented using SAP2000 finite element software and displacement input method for a single-layer cylindrical lattice shell large-span structure. The seismic dynamic response for consistent excitation and multi-point excitation were executed respectively. Results show that the multi-point excitation effect could exert a notable influence on the seismic dynamic response of spatial large-span structures, and the use of multi-point excitation is necessary. When the seismic isolation is absent, the column moment and shear force increase significantly, displacement of column top de-

* 收稿日期:2022-05-05;修回日期:2022-06-22

作者简介:王浩霆(1997—),男,硕士研究生。主要从事结构工程抗震方面的研究。E-mail:123621801@qq.com

creases and the axial force in the middle column increases slightly with the decrease of seismic wave velocity. When the base isolations are considered, the mitigation efficiency is in the range of 45% to 75% for column moments and is maintained between 60% and 85% for column shear forces. The distribution of column inner forces and displacement is different from that without seismic isolation. The inner forces of side columns are all smaller than those of central columns while the relative displacement at the top of the columns increases obviously. When column top isolations are installed, higher seismic isolation efficiency can be expected, with a column moment damping efficiency of about 90% and a column shear force damping efficiency between 85% and 90%. The displacement at the top of the column notably decreases and the column axial forces slightly decline.

Keywords: lattice shell large-span structure; multi-point excitation; time-history analysis; FPS bearing; large mass method

0 引言

场地空间各点处地震动的振幅与频率存在差异,主要原因如下:行波效应、相干效应、场地效应。对于长、大跨结构或其它外荷载非一致激励的结构,动力分析中经常遇到外荷载多点激励的问题。相比一致激励,多点激励可以真实地模拟外荷载时空变化对结构的影响。有关的研究工作表明,在多点激励作用下,大跨度结构地震反应的影响因素非常复杂,与地震波传播速度、场地条件、结构动力特性等都有密切的关系^[1-2],目前常用的一致地面运动输入法的计算结果可能偏于不安全;在大跨度结构设计时应该采用多点激励输入法。

结构地震反应分析有确定性地震反应分析、概率性地震反应分析两大类方法,这里不再详细说明。其中确定性动力时程分析法是一种精确的分析方法,使用已有的地震加速度记录或人工生成的地震波进行结构的地震反应分析。该方法可以分析结构在地震作用下弹性与非弹性阶段的内力变化以及构件逐步开裂、损坏直至倒塌的全过程。但该法也存在如下缺点:(1)计算量较大,需要与有恢复力的模型联合使用。(2)需要输入多条地震波进行分析才能得到结构反应较为精确的统计结果。(3)计算结果过于依赖所选的加速度时程曲线,若选取相同峰值的不同地震波,计算响应可能相差若干倍。动力时程分析法存在一定的缺点,但却最容易改进,并且也是最直接的一种方法。此外,大跨空间结构的隔震技术已经较为普及^[3-5],但在动力时程分析中,却很少见到多点激励下使用FPS隔震支座的相关研究与报道。本文基于位移-速度输入法,

利用SAP2000有限元软件建立了一座单层柱面网壳结构地震多点激励动力反应分析模型,采用纵向输入模式,通过比较一致激励与多点激励下的柱顶内力与位移,探究行波效应对大跨空间结构的影响,同时在基础部分与柱顶部分分别设置FPS摩擦摆式隔震支座,评价其在大跨空间结构中的隔震效果。

1 大跨度空间结构多点地震激励运动方程及求解方法

对多点激励多自由度体系运动方程^[6]经过移项处理后到如下方程:

$$M\ddot{u}_a + C\dot{u}_a + Ku_a = -(M_b\ddot{u}_b + C_b\dot{u}_b + K_b u_b) \quad (1)$$

式中, M 、 C 、 K 分别为上部结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; M_b 、 C_b 、 K_b 分别为上部结构与支撑之间耦合的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; u_a 和 u_b 分别为结构和基础(看做是刚体)的绝对位移向量(包括平动与转动)。若在方程(2)中取基础位移 $u_b \approx u_g$ 、基础速度 $\dot{u}_b \approx \dot{u}_g$ 、基础加速度 $\ddot{u}_b \approx \ddot{u}_g$, u_g 、 \dot{u}_g 、 \ddot{u}_g 分别为地面位移、地面速度及地面加速度。

则方程(1)变成(2)的形式:

$$M\ddot{u}_a + C\dot{u}_a + Ku_a = -M_b\ddot{u}_g - C_b\dot{u}_g - K_b u_g \quad (2)$$

在方程(2)中引入不同的假定,即产生了相对位移法(RMM)^[6]、大质量法(LMM)^[7-8]、大刚度法(LSM)^[9]、位移输入法(DM)^[10-11],以及速度-位移输入法(DVM)^[3],由此可以看出这几种方法都为近似方法。

在式(2)中,若在不同的基础处分别输入 u_g 、 \dot{u}_g 、 \ddot{u}_g ,则可以实现多点激励输入。通常 M_b 为0

矩阵,则在方程表达式右侧只包含以地面速度和地面位移的输入。而在CSI类结构分析软件中(例如SAP2000,Etabs),结构动力分析模块只能输入位移 u_g ^[12],但不能输入速度 \dot{u}_g ,因此若在软件中只输入地面位移 u_g ,相当于忽略了 C_b 的影响。

当结构中不安装阻尼器、隔震支座等装置时, C_b 只包含结构固有阻尼的影响,可忽略不计。而当在基础与上部结构之间采用阻尼器一类的装置时,即 C_b 包含附加阻尼时,因其数值往往较大,必须考虑其影响。根据相关的研究结论^[13],与隔震支座第 r 个自由度(此自由度近似不与其他自由度相耦合)相对应的阻尼系数、刚度系数 C_{br} 、 K_{br} ,可以采用等效值 C_{eqr} 、 K_{eqr} 代替。 K_{eqr} 根据摩擦摆支座参数确定, C_{eqr} 按如下公式确定:

$$C_{eqr} = \frac{2\xi_{eqr}K_{eqr}}{\omega} = 2\xi_{eqr}K_{eqr}\left(\frac{T}{2\pi}\right) = \frac{\xi_{eqr}K_{eqr}T}{\pi} \quad (3)$$

其中,等效阻尼比为:

$$\xi_{eqr} = \frac{E_0}{2\pi K_{eqr}D^2} \quad (4)$$

式中, E_0 是一个周期内的耗能; D 为最大位移。

则等效阻尼系数为:

$$C_{eqr} = \frac{2\xi_{eqr}K_{eqr}}{\omega} = 2\xi_{eqr}K_{eqr}\left(\frac{T}{2\pi}\right) = \frac{\xi_{eqr}K_{eqr}T}{\pi} \quad (5)$$

式中, T 为摩擦摆的自振周期。而公式中的 E_0 、 D 、 T

可以根据FPS隔震支座构造特性参数确定。

这时每个基础支撑处输入经过修正的地面位移时程 $(C_{br}/K_{br})\dot{u}_{gr} + u_{gr} \approx (C_{eqr}/K_{eqr})\dot{u}_{gr} + u_{gr}$,就可以利用结构分析软件SAP2000,实现多点激励输入地震动力反应分析。使得大跨度地震动力反应分析工作得到极大地简化, u_{gr} 、 \dot{u}_{gr} 分别是第 r 个自由度上的地面位移与地面速度。

2 计算实例与结果

计算实例取参考文献[13],图1为单层柱面网壳结构模型,图2为El-centro波地面加速度时程与位移时程。输入归一化的El-centro加速度波,乘以调幅系数2以后,最大水平地面加速度为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。输入方向为纵向。由于地震烈度是按地面加速度幅值标定,因此位移波的调幅也应该采用与加速度波相同的调幅系数。在这里由于位移波采用归一化的加速度波积分得来,而且地面初位移及初速度为0,所以地面位移与加速度成正比,因此也乘以调幅系数2。计算结果见表1~表3、图3~图8。

由表1可以看出,设置FPS隔震支座后。各阶的自振周期均有所增加,前三阶显著增加了7倍以上。

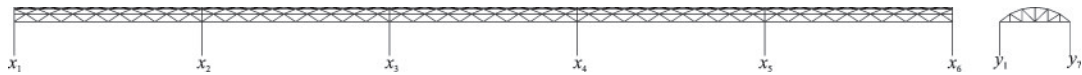


图1 单层柱面网壳结构模型

Fig.1 Single-layer cylindrical lattice shell structure model

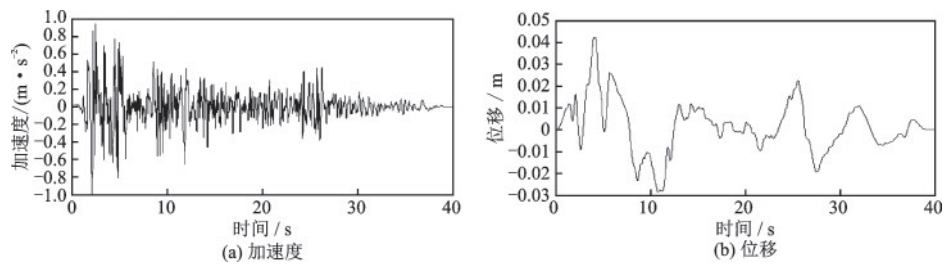


图2 El-centro波地面加速度时程与位移时程

Fig.2 El-centro wave ground acceleration and displacement time histories

表1 无隔震与有隔震自振周期对比

Table1 Natural vibration periods for structures with and without seismic isolation

振型阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
无隔震周期 T/s	0.641	0.619	0.576	0.535	0.531	0.527	0.518	0.508
有隔震周期 T^*/s	4.923	4.804	4.731	1.204	1.067	1.045	0.895	0.891
比值 T^*/T	7.680	7.761	8.214	2.251	2.009	1.983	1.728	1.754

表 2 无隔震时各支撑柱柱顶内力和位移(幅值)

Table 2 Internal force and displacement (amplitude) at the top of each support column without isolation

编号	一致激励				多点激励($v=250$ m/s)			
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m
1	698.0	149.2	47.1	0.076	699.7	164.0	38.5	0.063
2	692.3	144.3	12.1	0.082	694.6	155.4	25.4	0.068
3	692.0	143.1	3.3	0.083	693.8	151.6	18.9	0.069
4	692.0	143.1	3.7	0.083	694.2	153.4	20.8	0.069
5	690.0	144.0	12.6	0.082	694.1	160.0	31.1	0.068
6	697.8	149.2	47.1	0.076	700.8	172.0	37.5	0.063

表 2 续表

编号	多点激励($v=500$ m/s)				多点激励($v=1\ 000$ m/s)			
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m
1	698.4	156.5	45.2	0.072	697.8	150.4	45.9	0.075
2	692.6	148.6	17.6	0.078	692.1	144	13.3	0.08
3	692	143.9	12	0.08	691.7	142.2	6.5	0.082
4	692.3	146.6	13.6	0.08	691.8	142.5	7.9	0.082
5	691.6	152.5	22.9	0.078	690	144.7	17.2	0.08
6	699.2	161.3	43.2	0.072	698	152.5	45.9	0.075

表 3 基础隔震时各支撑柱柱顶内力和位移(幅值)

Table 3 Internal force and displacement (amplitude) at the top of each support column during foundation isolation

编号	一致激励				多点激励($v=250$ m/s)			
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m
1	197.4	28.3	14.9	0.095	206.9	29.3	20.3	0.1
2	312.9	44.8	20.8	0.095	321.6	45.1	41.6	0.1
3	355.9	51.1	7.3	0.095	359	50.3	28	0.1
4	359.7	51.6	15.5	0.095	340.5	47.6	29	0.1
5	292.1	41.1	16.8	0.095	281.4	39.2	19.4	0.1
6	200.5	28.7	7.1	0.095	183.4	26.4	11.8	0.1

表 3 续表

编号	多点激励($v=500$ m/s)				多点激励($v=1\ 000$ m/s)			
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m
1	221.4	31.8	18.2	0.092	212.5	30.4	17.3	0.097
2	319.7	45.3	33.1	0.092	320.5	45.7	27.3	0.097
3	347.1	49.5	22.3	0.092	354.2	50.8	16.6	0.097
4	341.7	49.2	22.7	0.092	364.0	52.2	13.4	0.097
5	281.0	39.3	19.0	0.092	277.6	39.4	12.2	0.097
6	186.5	26.9	8.7	0.092	190.6	27.5	6.7	0.097

表 4 柱顶隔震时各支撑柱柱顶内力和位移(幅值)

Table 4 Internal force and displacement (amplitude) at the top of each support column during top isolation

编号	一致激励				多点激励($v=250$ m/s)			
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m
1	70.6	20.2	49	0.003 85	70.6	20.2	66	0.001 97
2	70.6	20.2	12	0.003 85	70.6	20.2	122	0.001 97
3	70.6	20.2	19	0.003 85	70.6	20.2	144	0.001 97
4	70.6	20.2	17	0.003 85	70.6	20.2	146	0.001 97
5	70.6	20.2	10	0.003 85	70.6	20.2	132	0.001 97
6	70.6	20.2	46	0.003 85	70.6	20.2	67	0.001 97

表 4 续表

编号	多点激励($v=500$ m/s)				多点激励($v=1\ 000$ m/s)			
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	柱顶位移/m
1	70.6	20.2	48	0.003	70.6	20.2	50	0.003 6
2	70.6	20.2	104	0.003	70.6	20.2	64	0.003 6
3	70.6	20.2	94	0.003	70.6	20.2	75	0.003 6
4	70.6	20.2	105	0.003	70.6	20.2	72	0.003 6
5	70.6	20.2	76	0.003	70.6	20.2	52	0.003 6
6	70.6	20.2	52	0.003	70.6	20.2	38	0.003 6

将支撑柱编号(1#~6#)设置为横坐标,地震动力反应参数为纵坐标绘图。可得到 El-centro 波纵向输入下无隔震时,各支撑柱在不同波速下的柱顶内力及位移的变化,如图 3 所示。

为了将多点激励较一致激励时对结构地震反应的放大效果直观的展现出来,现定义参数 $\zeta =$

$Y_{\text{多点激励}}/Y_{\text{一致激励}}$,表示多点激励对一致激励的放大倍数。如图 4 所示,将行波波速设置为横坐标(一致激励视为 $V=\infty$), ζ 为纵坐标绘图,可以展示出 1#~6#支撑柱各反应参数在不同波速下的变化情况。处于 $\zeta=1.0$ 横线上方的数据点表示多点激励下的地震动力反应参数较一致激励时具有放大效果。

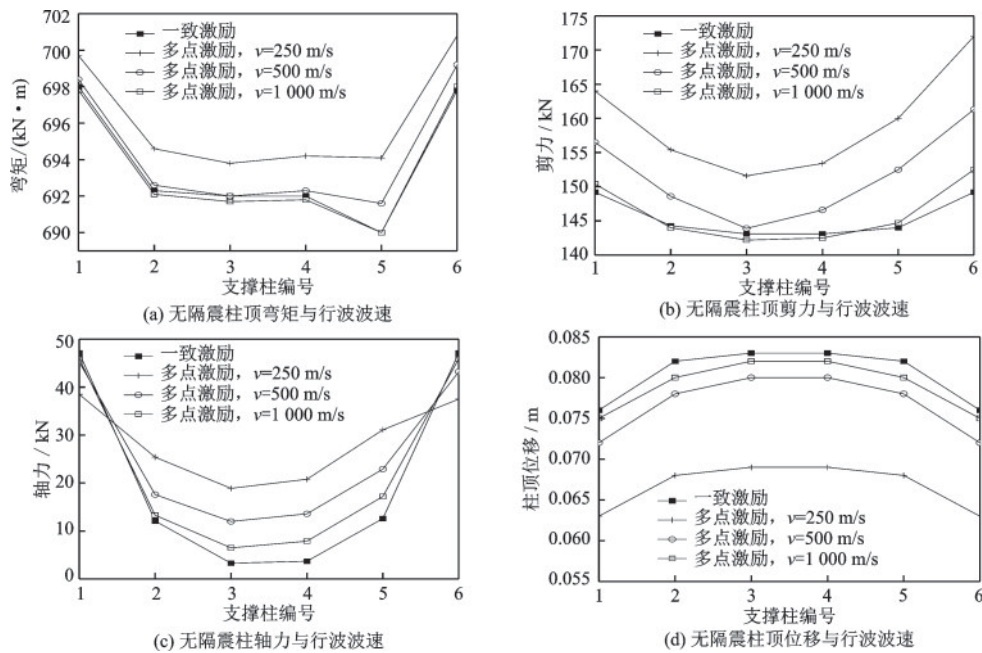


图 3 无隔震时柱顶内力及位移与波速之间的关系

Fig.3 Internal force and displacement versus wave velocity at the top of the column without isolation

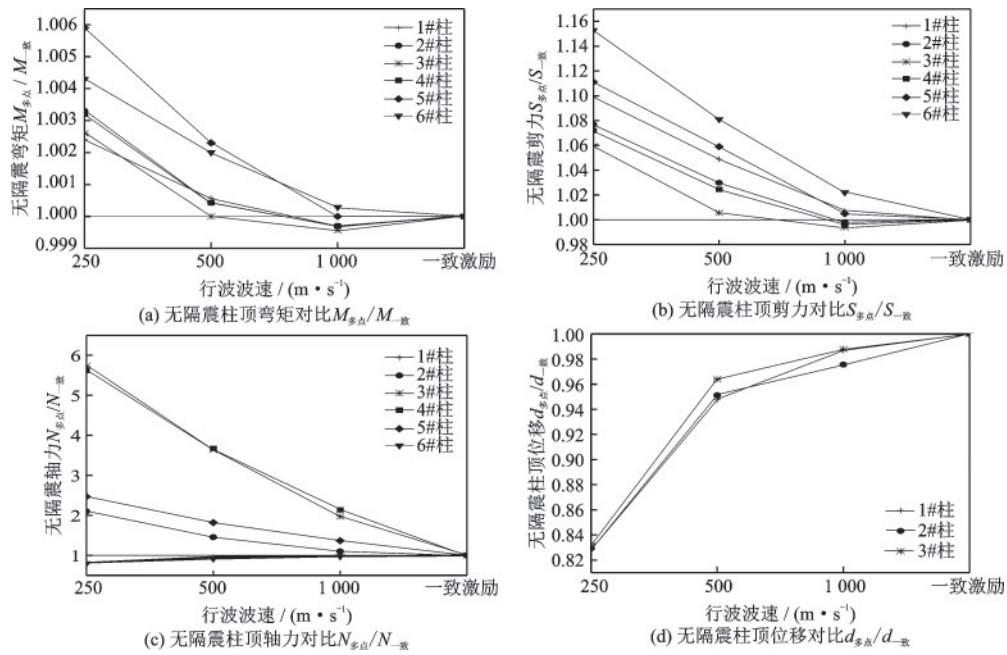


图4 无隔震时一致激励与多点激励地震反应参数之间对比关系

Fig.4 Comparison of seismic response parameters between consistent excitation and multi-point excitation for structures without isolation

在基础部分设置FPS隔震支座,得到各支撑柱在不同波速下的地震动力反应参数并绘图,如图5所示。

同样以行波波速为横坐标, $\zeta = Y_{多点激励} / Y_{一致激励}$ 为纵坐标绘图,可以看出,隔震后各个反应参数对行波波速变化的情况,如图6所示。

将隔震前后各波速下1#~6#柱的地震动力反

应参数放在一张图上表示,可以较为直观的看出FPS隔震支座设置在基础顶面后的隔震效果,如图7所示。可以看出,FPS隔震支座在基础部分的设置对支撑柱截面弯矩及剪力具有良好的隔震效果。

图8是基础隔震时按波速给出的1#~6#柱在各波速下的地震反应隔震效率与位移变化率。

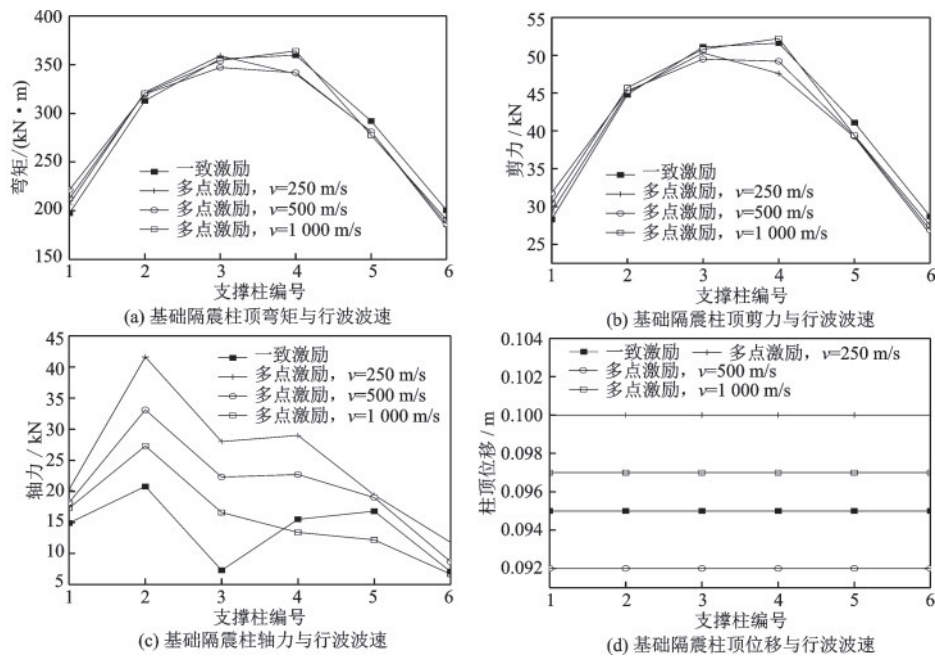


图5 基础隔震时柱顶内力及位移与波速之间的关系

Fig.5 Variations of internal forces and displacement with wave velocity at the top of columns with base seismic isolation

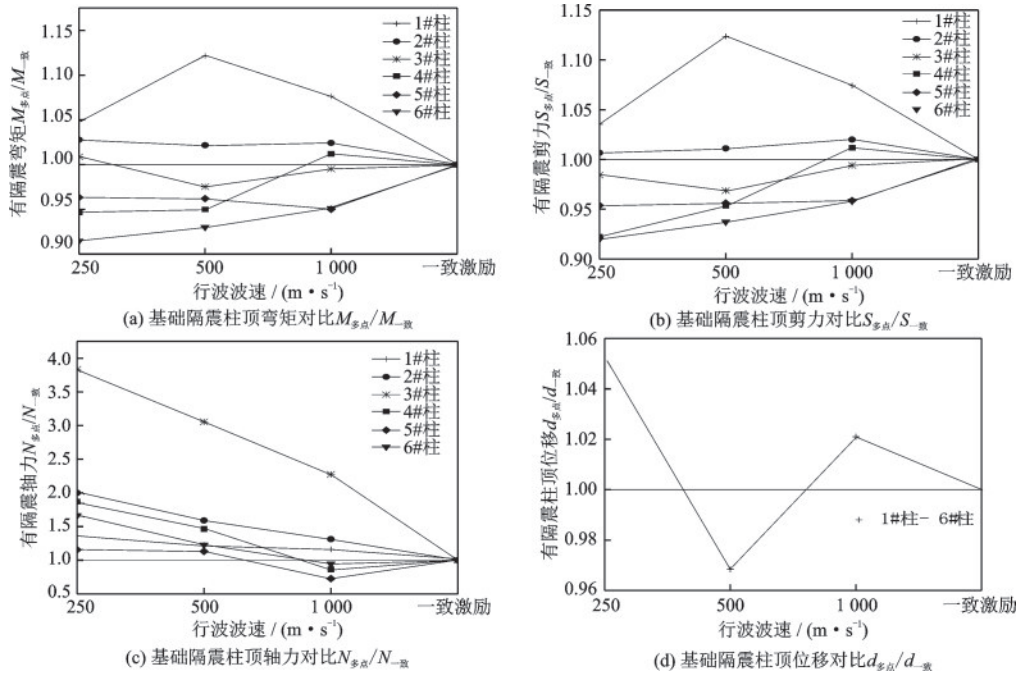


图6 基础隔震时一致激励与多点激励地震反应参数之间对比关系

Fig.6 Comparison of seismic response parameters between consistent excitation and multi-point excitation for structures with base isolation

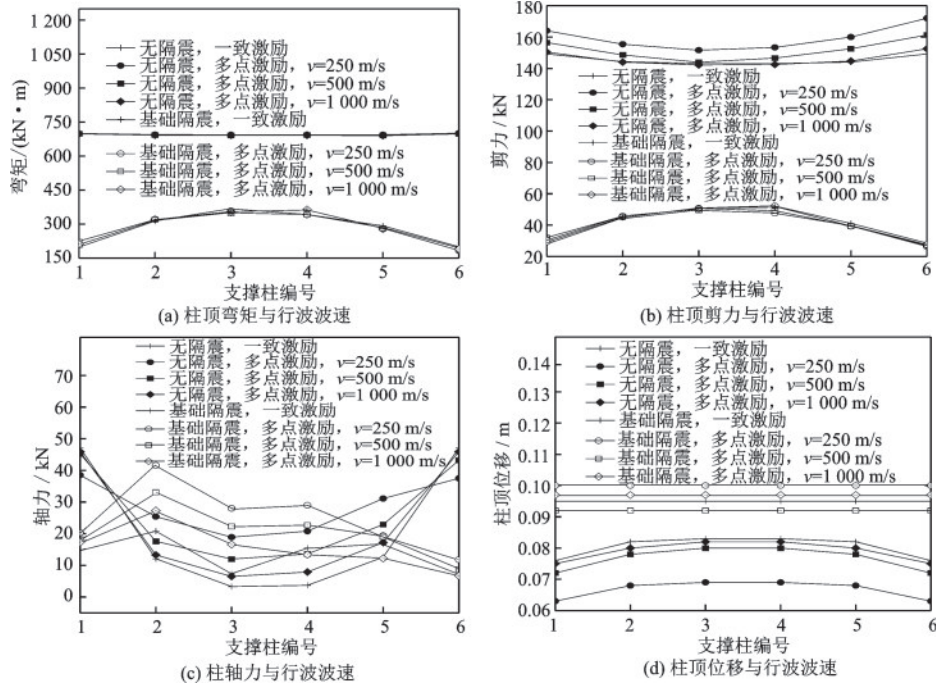


图7 无隔震及基础隔震时地震动力反应对比

Fig.7 Comparison of seismic responses for columns without seismic isolation and with base seismic isolation

在空间网格结构的实际工程中,由于结构基础地面不在同一标高、部分地下室区域被隔等无法安装基础隔震支座的情况,则在支承结构层间隔震或结构顶部进行隔震成为另一类常用方案。将FPS

隔震支座设置在柱顶部分,得到各支撑柱在不同波速下的地震反应隔震效率与位移变化率并与基础隔震的相关值进行比较,如图9所示。为方便比较,将横坐标改为各支撑柱编号进行绘图。

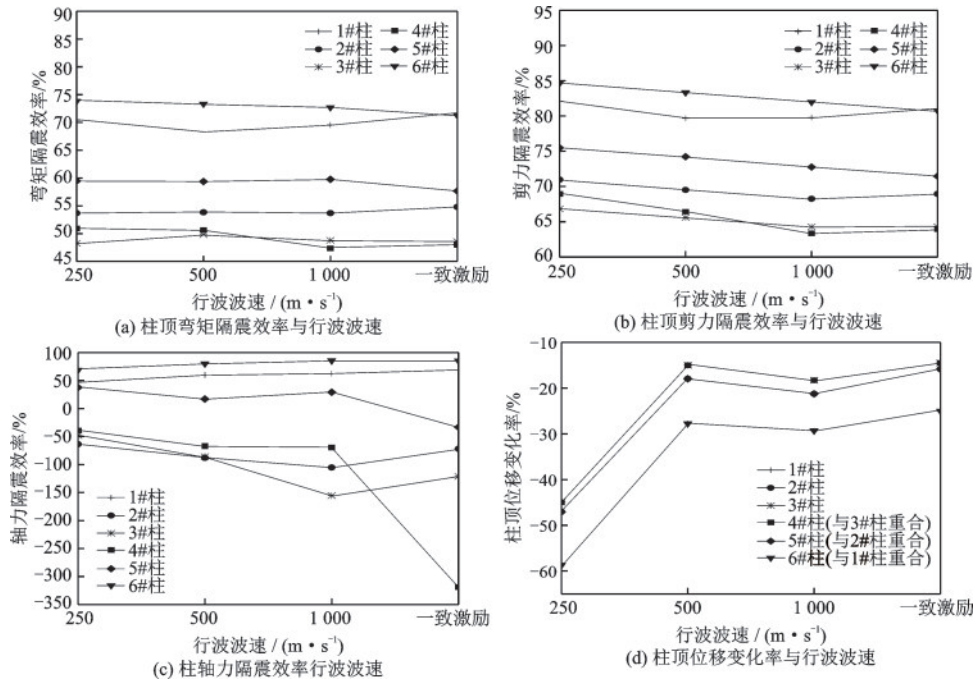


图8 基础隔震效率、位移变化率与行波波速关系示意

Fig.8 Variation of seismic isolation efficiency and displacement ratio with wave velocity

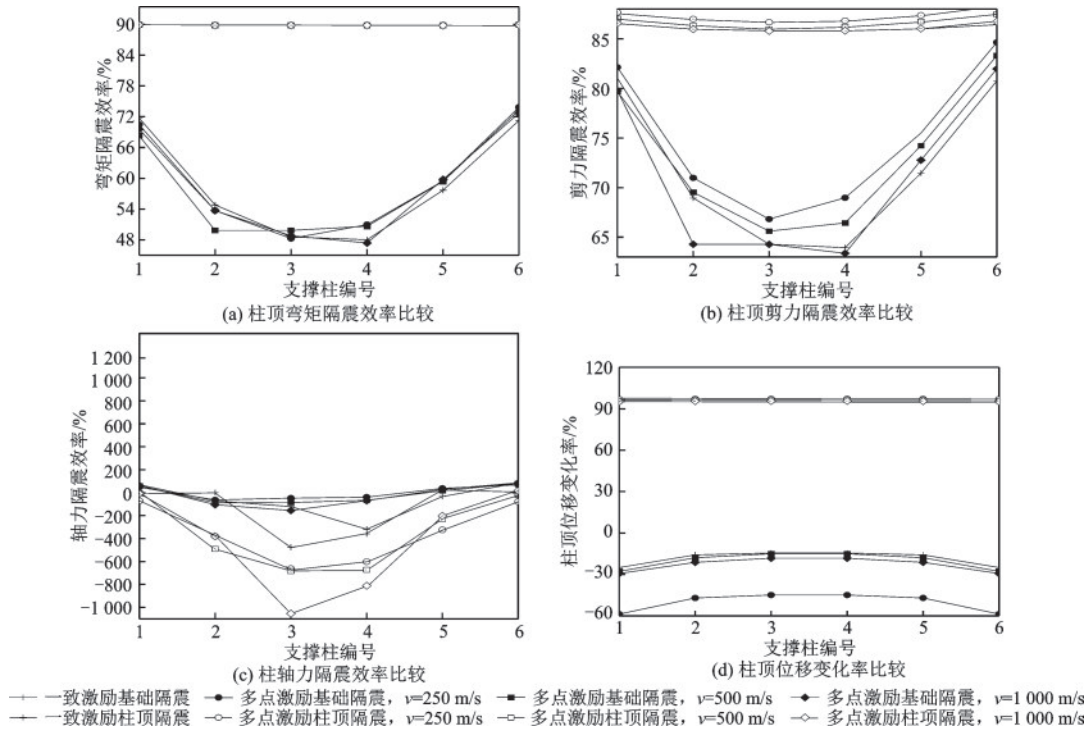


图9 隔震效率、位移变化率对比

Fig.9 Comparison diagram of isolation efficiency and displacement change rate

3 计算结果分析

图3是无隔震时支撑柱地震动力反应参数幅值图,图4是无隔震时参数 ζ 图。可以看出,隔震前,边

柱弯矩与剪力最大。多点激励较一致激励弯矩与剪力增大,波速越低, ζ 越大。 $v=250$ m/s时,对所有柱,弯矩与剪力的 ζ 值均大于1,之后随着波速增加 λ 值也降低,也出现略小于1的情况。而输出端(5#柱及6#柱)的 λ 值最大。中柱轴力增加得多,而

边柱的轴力基本不变,但在一致激励时中柱的轴力就比较小,所以也不易出现轴力超标超限的情况。而对柱顶位移,对所有的支撑柱,一致激励时总是最大,而且各柱之间差别也较小;波速越小,柱顶位移越小。

图5是基础隔震时支撑柱地震动力反应参数幅值图,图6是基础隔震时参数 ζ 图。可以看出,隔震后各支撑柱柱顶内力与位移的分配较无隔震时存在差异。最明显的差异是:(1)边柱的弯矩与剪力小于中柱;(2)一致激励时的弯矩与剪力大于多点激励时的参数的数据点占60%以上;除了输入端1#柱之外,多点激励比一致激励的反应参数无明显增加,与无隔震时正好相反。柱顶位移的变化趋势有波动,但柱与柱之间的差别较小。在波速为250 m/s时柱顶位移最大,在波速为500 m/s时最小。

图7及图8分别是设置隔震支座前与基础部分设置隔震支座后地震动力反应参数对比图以及隔震效率图。从图7可以看出,基础部分设置隔震支座后,支撑柱弯矩及剪力明显减小。从图8可以看出,柱弯矩隔震效率保持在45%~75%,柱剪力隔震效率保持在60%~85%。边柱轴力小于中柱轴力,但中柱轴力值本来(未隔震时)就处于较低的水平,因此也不易出现设计计算超标的情况。柱顶位移增加明显。

图9为基础隔震与柱顶隔震的隔震效率对比。从图9中可以看出,柱顶部分相较于基础部分设置隔震支座后,弯矩、剪力隔震效率均有明显增大,且各支撑柱的柱顶弯矩隔震效率保持在90%左右,柱顶剪力隔震效率保持在85%~90%。柱顶隔震对支撑柱轴力的放大效果高于基础隔震,但柱轴力值本来(未隔震时)就处于较低的水平,因此也不易出现设计计算超标的情况。基础隔震下柱顶位移显著增加,但柱顶隔震下柱顶位移显著减小。

4 结 论

(1)在不设置隔震支座时,多点激励下,支撑柱弯矩与剪力随波速的减小而明显增加,柱顶位移变小,中柱轴力略微上升。可见大跨度结构受行波效应影响较大,需采取使用多点激励输入方式。

(2)基础隔震时,各支撑柱柱顶内力与位移的分配较无隔震时存在差异。边柱的弯矩、剪力及轴力均小于中柱的相应值,柱顶位移增加明显。同

时,柱弯矩隔震效率保持在45%~75%,柱剪力隔震效率保持在60%~85%。

(3)柱顶隔震时,能得到比设置在基础更高的隔震效率,且柱弯矩隔震效率高达90%左右,柱剪力隔震效率保持在85%~90%。并且将FPS隔震支座设置在柱顶时,柱顶位移会显著减小。柱轴力比基础隔震时略有增加。

参考文献:

- [1] 李正农,楼梦麟.大跨度桥梁结构地震动输入问题的研究现状[J].同济大学学报,1999,27(5):592-597.
Li Z N, Lou M L. Research status in earthquake input of long-span bridges [J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(5):592-597. (in Chinese)
- [2] 周国良,鲍叶欣,李小军,等.结构动力分析中多点激励问题的研究综述[J].世界地震工程,2009,25(4):25-32.
Zhou G L, Bao Y X, Li X J, et al. Review on dynamic analyses of structures under multi-support excitation [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4):25-32. (in Chinese)
- [3] 单明岳.大跨网壳结构隔震性能理论研究及振动台试验[D].北京:北京工业大学,2017.
Shan M Y. Theoretical research and shaking table experiment on isolation performance of large span latticed shell [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [4] 薛素铎,单明岳,李雄彦,等.多点激励的高位隔震单层柱面网壳振动台试验[J].世界地震工程,2017,33(3):24-33.
Xue S D, Shan M Y, Li X Y, et al. Shaking table experiment for high position seismically isolated single-layer latticed cylindrical shell under multi-support excitations [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3):24-33. (in Chinese)
- [5] 张爱林,牟俊霖,刘学春,等.北京大兴国际机场航站楼屋盖大跨度钢结构动力特性及多维地震响应分析[J].建筑结构,2019,49(14):1-7,17.
Zhang A L, Mou J L, Liu X C, et al. Dynamic characteristics and multi-dimensional seismic response analysis of long span roof steel structure of Beijing Daxing international airport terminal building [J]. Building Structure, 2019, 49(14):1-7, 17. (in Chinese)
- [6] Léger P, Idé I M, Paultre P. Multiple-support seismic analysis of large structures [J]. Pergamon, 1990, 36(6):1153-1158.

- [7] 周国良,李小军,刘必灯,等.大质量法在多点激励分析中的应用、误差分析与改进[J].工程力学,2011,28(1):48-54.
Zhou G L, Li X J, Liu B D, et al. Error analysis and improvements of large mass method used in multi-support seismic excitation analysis [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 48-54. (in Chinese)
- [8] 柳国环,李宏男,林海.结构地震响应计算模型的分析与比较[J].工程力学,2009,26(2):10-15.
Liu G H, Li H N, Lin H. Comparison and evaluation of models for structural seismic responses analysis [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 10-15. (in Chinese)
- [9] 周国良,李小军,刘必灯,等.大刚度法在结构动力分析中的应用、误差分析与改进[J].工程力学,2011,28(8):30-36,44.
Zhou G L, Li X J, Liu B D, et al. Error analysis and improvements of large sparing/stiffness method for structural dynamic response analysis [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 30-36, 44. (in Chinese)
- [10] 白凤龙,李宏男.地震动多点激励下大跨空间网架结构的反应分析[J].工程力学,2010,27(7):67-73,102.
Bai F L, Li H N. Seismic response analysis of long-span spatial truss structure under multi-support excitations [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 67-73, 102. (in Chinese)
- [11] 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.
Liu G H, Li H N, Guo W, et al. A new method for solving existing problem of current displacement input model for calculating structural seismic responses [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 55-62. (in Chinese)
- [12] 北京筑信达工程咨询有限公司. SAP2000技术指南及工程应用[M].北京:人民交通出版社,2018.
Beijing Zhuxinda Engineering Consulting Co., Ltd.. SAP2000 technical guide and engineering application [M]. Beijing: People's Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [13] 王浩霆,葛楠,韩流涛,等.基于位移输入法结构竖向多点激励FPS支座隔震效果研究[J].华北理工大学学报(自然科学版),2023,45(1):66-74.
Wang H T, Ge N, Han L T, et al. Research about seismic isolating efficiency for FPS bearing under vertical multi-point input of earthquake waves [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Nature Sciences Edition), 2023, 45(1): 66-74. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)