

文章编号:1673-9469(2015)02-0036-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.009

## 隔振支座对大跨度网壳的振动控制分析

史三元,刘郑,白佳楠,王帅

(河北工程大学 土木工程学院 河北 邯郸 056038)

**摘要:**本文通过建立了橡胶隔振支座与设置隔振支座的网壳结构的力学模型,研究了隔震支座控制下,大跨度空间单层柱面网壳结构在地震作用下振动响应,结果表明:隔震支座对结构的振动可以起到良好的控制作用,但地震强度对隔震支座耗能能力影响较大,在最大水平行程内,地震强度越大,耗能能力越强;在不同地震波作用下,隔振网壳结构体系的振动控制效果有所不同,其中:EL Centro 波作用的结构被动控制效果最佳。

**关键词:**橡胶隔振支座;大跨度网壳;弹塑性分析;振动控制

**中图分类号:**TU31 TG139.6

**文献标识码:**A

## Analysis on vibration control of long span reticulated shell with rubber isolation bearing

SHI San-yuan, LIU Zheng, BAI Jia-nan, WANG Shuai

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** Mechanical model of finite element of rubber isolation and reticulated shell is established, vibration response of single-layer cylindrical reticulated shell structure installed the rubber isolation bearing under earthquake is investigated by numerical method. The results show that isolation bearing can play a good control effect on vibration of the structure, however, seismic intensity can influence the energy dissipation capacity of isolation bearing, energy dissipation ability increases with the increase of the earthquake intensity in maximum range, under the effect of different seismic wave, the vibration control effect of the isolation structure is different; in addition, the vibration control effect of the isolation structure is the best under the seismic wave of EI Centro.

**Key words:** rubber isolation bearing; long span reticulated shell; elastic-plastic analysis; vibration control

基础隔震是在结构的基础放置隔震装置,使基础与上部结构分开,通过其吸收和反射地震能量,以减小上部结构的反应<sup>[1]</sup>,是一种较为成熟的振动控制技术,并编入了我国颁布的规程<sup>[2]</sup>,基础隔震常用的隔震技术包括:橡胶支座隔震、滑动式支座隔震、摩擦隔震<sup>[3-5]</sup>。

结构基础隔震技术主要应用于多、高层房屋及一些高耸结构中<sup>[6]</sup>。随着建筑形式的增多,网壳结构由于其自重轻、结构空间大等一系列特点被广泛用于体育场馆、文化建筑等领域中,且发展趋势为跨度越来越大、壳厚越来越薄,结构通常较柔,阻尼比较低,在地震中更易发生较大的振

动<sup>[7]</sup>。本文对大跨度网壳隔震控制进行研究,以验证隔震支座对网壳结构的振动控制效果。

### 1 结构模型

#### 1.1 橡胶隔震支座的力学模型

常用的橡胶隔震支座力学模型主要有等效线性模型、双线型模型、Wen 滞回模型与三线型模型<sup>[8-10]</sup>,本文采用 Wen-bonc 模型来模拟橡胶隔震支座的力学行为。

只考虑单向地震作用时,隔震支座的水平回复力  $F$  为

$$F = r \cdot k \cdot d + (1 - r)F_y \cdot z \quad (1)$$

收稿日期:2015-01-06

作者简介:史三元,(1959-),男,河北乐亭人,教授,从事钢结构和岩土方面的研究。

式中  $r$ —屈服后刚度与弹性刚度的比值; $k$ —弹性刚度; $d$ —隔震支座的横向变形; $F_y$ —屈服力; $z$ —考虑橡胶材料滞回性能的滞后变量,满足下式

$$\dot{z} = \frac{k}{\sigma_y} \begin{cases} d(1 - |\dot{z}|^{\exp}) & \dot{z} > 0 \\ 0 & \dot{z} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\exp$ —大于等于 1 的阻尼指数。

### 1.2 设置隔震支座的网壳结构的力学模型

设置隔震支座的网壳结构基本运动方程为

$$M \ddot{X}(t) + C \dot{X}(t) + KX(t) + F = M \ddot{X}_g(t) \quad (3)$$

式中  $M, C, K$ —无控网壳结构的总质量矩阵、总阻尼矩阵、总刚度矩阵; $\ddot{X}(t), \dot{X}, X(t)$ —有控网壳结构的加速度矩阵、速度矩阵和位移矩阵,  $F$ —橡胶隔振支座的回复力矩阵,  $\ddot{X}_g(t)$ —地震时的地面加速度。

### 1.3 结构模型参数

本文选用单层柱面网壳计算模型,图 1 所示,网壳跨度为 60 m,矢高位 18 m,壳长为 150 m,矢跨比为 0.3,屋面重力荷载 1.0 kN/m<sup>2</sup>,网壳结构斜杆和横向杆均采用  $\Phi 325 \times 12$  mm 圆钢管,山墙框架柱采用直径为 1 200 mm 的钢筋混凝土圆柱,框架梁截面尺寸为 300 mm  $\times$  800 mm,结构阻尼比为 0.02;在网壳结构柱底设置隔震支座,支座直接与基础固接,其中,隔震支座基本力学参数为:水平刚度为 4 000 kN/m,屈服后刚度为 800 kN/m,水平屈服力为 40 kN,竖向刚度为  $3 \times 10^6$  kN/m。

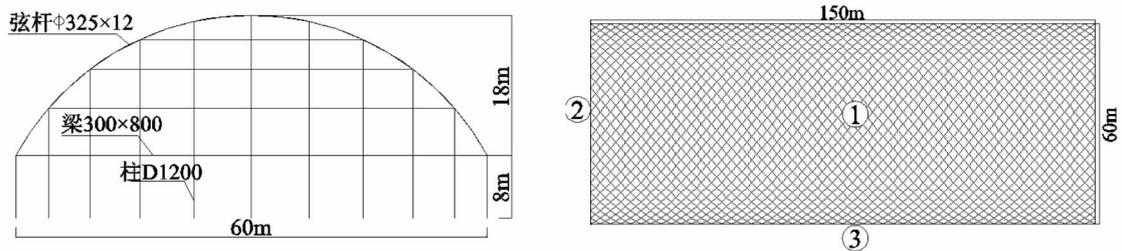


图1 单层柱面网壳结构模型

Fig.1 Model of single-layer cylindrical reticulated shell structure

## 2 模态分析

原结构与隔震结构前 10 阶模态的周期如表 1 所示,可以看出,设置了隔震支座的网壳结构前 4 阶的自振周期较无控结构均显著延长,自第五阶频率之后增大幅度稍减或略有提高。可见,通过设置隔震支座改变了结构的动力特性,使结构的自振周期避开场地卓越周期,以避免结构发生共振反应;同时结构自振周期的延长可以有效减小结构的地震作用。

## 3 隔震结构体系的振动控制分析

### 3.1 不同地震强度下隔震结构振动分析

计算了不同地震强度对隔震支座减震性能的影响,由于较横向水平刚度,网壳屋盖纵向水平刚度相当大,因此纵向水平地震作用对网壳屋盖影响很小,故只分析横向水平与竖向地震作用。地震波选用 1940 年的 EI Centro 波,水平峰值加速度分别调整为 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g;地震波双向输入,竖向峰值加速度调整为水平向的 0.65 倍,持时为 30 s。

表 2 列出了在不同地震强度下网壳结构各振动响应参数的峰值减震率;图 2 绘出了无控及有控网壳结构不同节点(节点位置如图 2(a)所示)在不同地震强度下的地震响应,图 3 绘出了 0.1 g 与 0.4 g 峰值加速度下,网壳结构隔震支座的输出力-位移曲线。从图 4 可以看出:

表 1 设置隔震支座后结构周期对比

Tab.1 Contrast of the cycle of structure installed the rubber bearing

结构周期	模态									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
无控	1.36	0.81	0.56	0.50	0.45	0.38	0.33	0.29	0.26	0.18
有控	3.13	2.53	1.89	1.52	0.70	0.29	0.18	0.16	0.14	0.13

1) 隔震结构体系在峰值加速度为 0.4g 条件下的减震效果最好, 其中: 水平最大位移减震率为 5.6%, 竖向最大位移减震率达到 54.1%, 水平最大加速度减震率达到 38.9%, 竖向最大加速度减震率达到 62.5%, 通过分析图 3(a) 隔震支座输出力-位移曲线可以得知: 在最大水平行程内, 橡胶隔震支座塑形变形越大, 耗能能力越强, 因此在大震下, 隔震体系可表现出较好的减震效果。

2) 较其他工况, 在峰值加速度 0.1g 条件下, 隔震结构体系各响应参数的峰值减震率均有大幅

降低, 分析图 3(b) 隔震支座输出力-位移曲线可知: 在小震作用下, 隔震支座处于弹性工作状态下, 只通过改变结构刚度来减小结构加速度反应, 不能提供附加阻尼来耗散地震能量, 因此减震效果不佳。

3) 相对于无控结构, 有控结构的水平位移响应降低不明显, 最大减震率为 18.1%, 甚至有些工况下还略有增大, 这是由于水平位移中大部分是由于隔震支座提供的, 隔震支座产生变形可以使上部构件在地震作用中的变形减小, 从而起到保护

表 2 结构峰值响应减震率

Tab.2 Reduction ratio of peak response of the structure

结构振动响应参数	0.1 g 条件下	0.2 g 条件下	0.3 g 条件下	0.4 g 条件下
	减震率	减震率	减震率	减震率
y 向位移	-6.4%	18.1%	4.3%	5.6%
z 向位移	20.1%	46.8%	50.3%	54.1%
y 向加速度	15.0%	27.7%	33.8%	38.3%
z 向加速	35.2%	52.9%	58.8%	63.2%
支座反力	30.1%	37.5%	41.7%	58.8%
支座反力	1.3%	-3.3%	-2.3%	10.0%

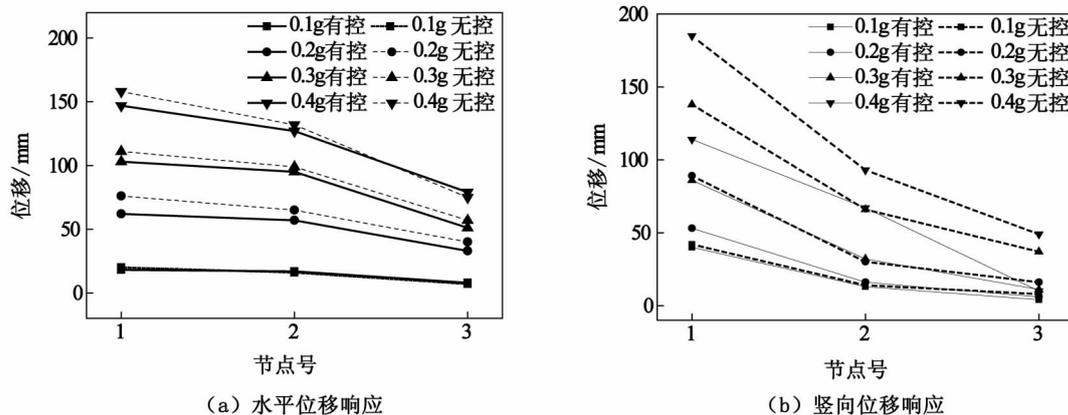


图 2 不同地震强度下结构地震响应

Fig.2 Vibration response of the shell structure under the different earthquake intensity

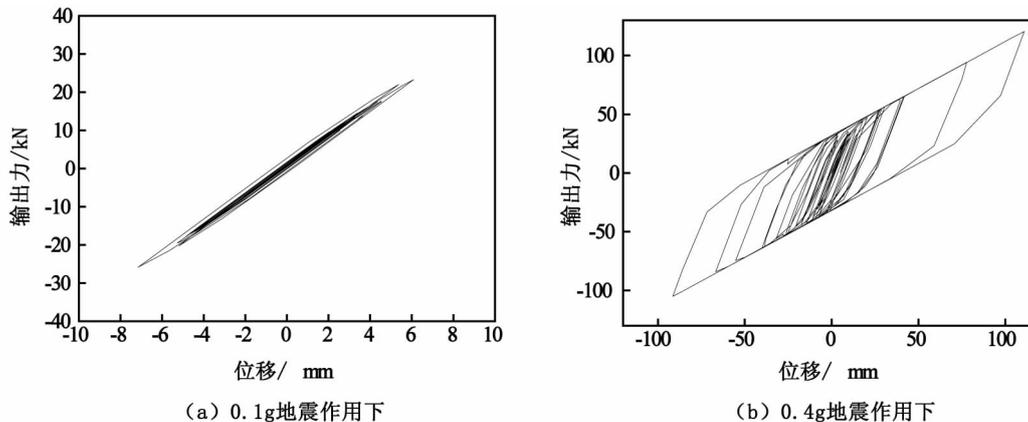


图 3 网壳结构隔震支座输出力-位移曲线

Fig.3 Force-displacement curve of the rubber bearing of the reticulated shell

结构、提高结构安全性的作用,符合隔震支座设计的思想。

4)值得说明的是,在小震作用下,网壳结构设置隔震支座后水平位移大于无控结构的位移,因此设置隔震支座时有必要对上部结构的稳定性进行验算。

### 3.2 不同地震波种类下隔震结构振动分析

选取二、三、四类场地中具有代表性的地震波,分别为1952年Taft波、1940年EL Centro波与1976年天津波将地震作用调整为8度设防时的大震,峰值加速度为 $400\text{ cm/s}^2$ 。地震波双向输入,竖向峰值加速度调整为水平向的0.65倍,持时为30s。

表3列出了不同地震波种类下网壳结构各振动响应参数的峰值减震率,分析表3可得出以下

表3 结构峰值响应减震率

Tab.3 Reduction ratio of peak response of the structure

地震响应参数	Taft波			El centro波			天津波		
	无控	有控	减震率	无控	有控	减震率	无控	有控	减震率
y 向位移/mm	139	121	13.6%	158	147.1	5.6%	323	305	5.5%
z 向位移/mm	127	82	35.4%	185	85.7	54.1%	178	142	20.2%
y 向加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	8.3	5.6	32.5%	9.4	5.8	38.3%	9.3	5.8	37.6%
z 向加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	17.6	8.2	53.4%	13.6	5.0	63.2%	14.1	6.81	51.7%
支座反力 $10^3/\text{kN}$	7.2	5.0	30.1%	8	3.3	58.8%	10.2	6.4	20.4%
支座反力 $10^3/\text{kN}$	4.3	3.9	10.2%	4	3.6	10.0%	2.3	2.4	-4.3%

结论:

1)三种地震波作用下,隔震网壳结构减震效果不同,其中,El Centro波作用下,减震效果最佳,水平位移最大减震率达到5.6%,竖向位移最大减震率达到54.1%,水平加速度最大减震率达到38.3%,竖向加速度最大减震率达到63.2%,基底剪力最大减震率达到58.8%。

2)Taft波作用下,隔震结构的位移与加速度响应减震率均略小于El Centro波,其中,水平位移最大减震率达到13.6%,竖向位移最大减震率达到35.4%,水平加速度最大减震率达到32.5%,竖向加速度最大减震率达到53.4%,基底剪力最大减震率达到30.1%。究其原因,较El Centro波,隔震结构在taft波作用下,结构的地震反应较小,隔震支座变形不充分,因此耗能能力要略小于El Centro波。

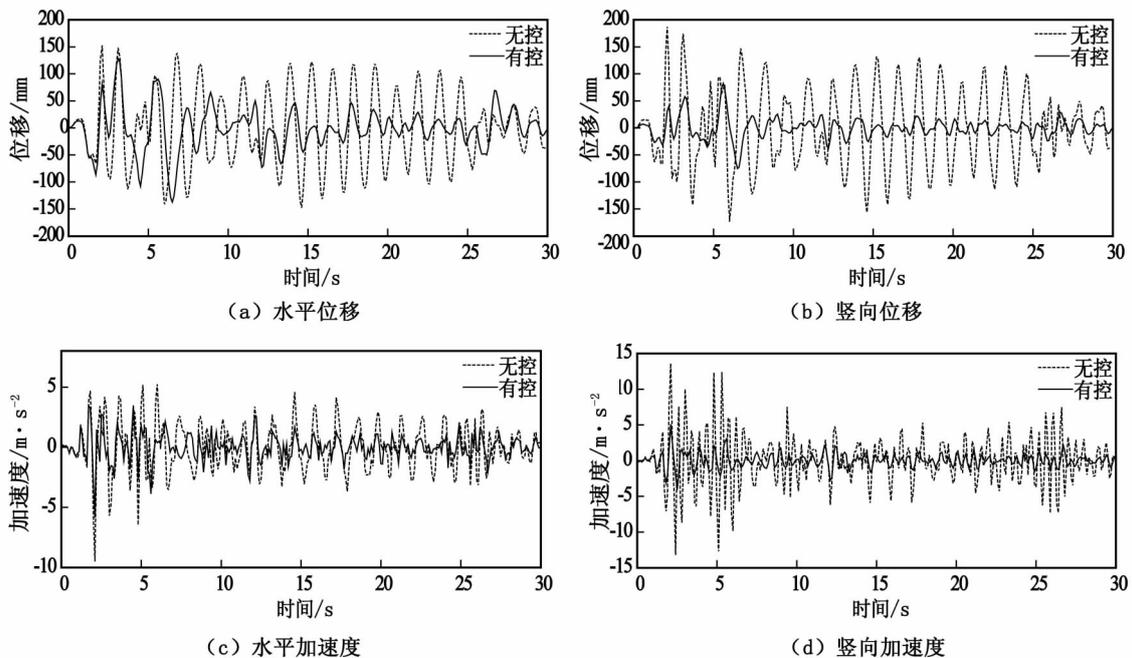


图4 网壳结构振动响应时程曲线

Fig.4 Vibration response time history curve of the reticulated shell structure

限状态,而计算值是按照极限状态来计算的。悬臂段土体还要受到墙体的被动土压力的影响而增加,二级开挖段墙体还要继续向前移动,土压力继续减小<sup>[9]</sup>。

### 3 结论

1)墙体水平位移首先是悬臂开挖的墙顶向外发生三角形分布的位移,然后随着支撑的架设,墙体发生转动,与实际监测值基本符合。

2)在开挖面附近的土压力,随着墙体高度的增加而增大。在支撑以上部分,模拟值要小于计算值;而在开挖面以下部分,则模拟值大于计算值。

3)随着悬臂段开挖深度的增加,悬臂段最大土压力值也在逐渐增加,墙底土压力值在逐渐减小;二级开挖面附近土压力随着悬臂开挖深度的增加而逐渐减小;同样随着二级开挖深度的增加,墙底土压力和二级开挖段土压力值逐渐减小。

#### 参考文献:

[1]卢廷浩.岩土数值分析[M].北京:中国水利水电出版

(上接第39页)3)在天津波作用下,隔震结构减震效果最差,由于EI Centro波与Taft波的能量分布较为分散,天津波能量相对集中,为冲击型地震波,隔震支座耗能能力有限,因此从耗能角度来讲,天津波较前两类波不利于能量的耗散。

图4绘出在EI Centro波地震激励下,网壳结构最大节点地震响应的时程曲线,可以明显看出,结构的各振动参数响应均得到良好的控制。

### 4 结论

1)隔震支座对结构的振动可以起到良好的控制作用,但地震强度对隔震支座耗能能力影响较大,在最大水平行程内,地震强度越大,橡胶隔震支座塑性变形越大,耗能能力越强。

2)在不同地震波作用下,隔振网壳结构体系的振动控制效果有所不同,其中:EL Centro波作用的结构被动控制效果最佳,Taft波次之,天津波作用的结构振动控制效果最差。

#### 参考文献:

[1]沈聚敏,周锡元,高小旺,等.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.

[2]中国建筑科学研究院,JG 118-2000,建筑橡胶隔震支

座,2008.

[2]朱有奇,周云东,赵元海,等.非对称深基坑变形规律现场监测[J].水利与建筑工程学报,2013,11(6):157-161.

[3]费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[4]张磊.某深基坑工程施工监测及有限元模拟分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[5]卢国胜.考虑位移的土压力计算方法[J].岩土力学,2004(4):586-589.

[6]刘波,刘清楠,赵一燕.超深基坑内支撑拆除过程中基坑变形规律研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(3):17-21.

[7]徐日庆,龚慈,魏纲,等.考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(1):119-122.

[8]龚慈,俞建霖,徐日庆,等.绕墙底向外转动刚性挡土墙的土压力计算[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(11):1690-1694.

[9]章瑞文,徐日庆,郭印.考虑挡土墙墙体平移的墙后分层填土主动土压力分布[J].水利学报,2008,39(2):250-255.

(责任编辑 王利君)

座[M].北京:中国建筑业出版社,2000.

[3]SOONG T T, DARGUSH G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering [M]. New York: John Wiley and Sons,1997.

[4]刘文光,周福霖,庄学真,等.铅芯夹层橡胶隔震垫基本力学性能研究[J].地震工程与工程振动,1999,19(1):93-99.

[5]苏经宇,曾德民.我国建筑结构隔震技术的研究和应用[J].地震工程与工程振动,2001,21(4):94-101.

[6]李慧,刘迪,杜永峰.附设耗能装置的高层基础隔震建筑抗震性能研究[J].土木工程学报,2010(Z1):276-281.

[7]徐赵东,李爱群,叶继红.大跨空间网壳结构减震控制的研究与发展[J].振动与冲击,2005,03:59-61.

[8]KOH C G, KELLY J M. A simple mehcnaieal model of elastomeric beamngs used in the isolation [J]. J. Mech. Sci. 1988. 30(12):933-943.

[9]FENG DEMIN, MIYAMA TAKAFUMI. A new analytical model for the lead rubber bearing [A]. 12WCEE [C]. NewZealand,2000.

[10]李秋英,刘丽丽,董宏伟.基础隔震异形柱框架结构的参数优化[J].河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(3):5-8.

(责任编辑 刘存英)