

贾霞霞, 沈朝勇, 黄襄云, 等. 大跨度空间网架结构屋盖隔震设计研究[J]. 华南地震, 2021, 41(1): 123-131. [JIA Xiaxia, SHEN Chaoyong, HUANG Xiangyun, et al. Study on Roof Isolation Design of Long Span Space Grid Structure[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 123-131]

大跨度空间网架结构屋盖隔震设计研究

贾霞霞¹, 沈朝勇^{1, 2}, 黄襄云^{1, 2}, 黎静阳¹

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405)

摘要: 针对大跨度空间网架屋盖隔震结构响应的问题, 采用简化后的质点力学模型, 对其进行理论研究, 分析质量比、刚度比、阻尼比对屋盖隔震结构地震响应的影响, 以基底剪力最小为原则确定隔震层的最优参数。建立相应的三维有限元模型, 对其进行屋盖隔震设计, 分别与非隔震和基础隔震结构的响应对比。结果表明: 屋盖隔震结构由于隔震层直接设置在屋盖支撑处, 能明显减小上部网架的杆件轴力和支撑处的剪力。虽然其隔震层位置较高, 但对结构的基底剪力和屋盖的挠跨比仍有减震效果; 对于下部框架结构, 直接与隔震层连接的框架的层间位移角有所减少, 但未直接连接隔震层的较远部分框架的层间位移角略有增大, 在结构设计时不容忽视, 应适当加强。

关键词: 屋盖隔震; 隔震设计优化; 地震响应

中图分类号: TU352.12

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)01-00123-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.17

Study on Roof Isolation Design of Long Span Space Grid Structure

JIA Xiaxia¹, SHEN Chaoyong^{1, 2}, HUANG Xiangyun^{1, 2}, LI Jingyang¹

(1. *Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;*

2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510405, China*)

Abstract: Aiming at the response of the roof isolated structure with large-span space grid, the simplified particle mechanics model is adopted to analyze the influence of mass ratio, stiffness ratio and damping ratio on seismic response of this structure, and the optimal parameters of the isolation layer are determined based on the principle of minimum base shear. The corresponding three-dimensional finite element model is established to design the roof isolated structure, which is compared with the response of the base isolated structure and the non-isolated structure respectively. The results show that the axial force and the shear force at the support of the upper grid structure can be significantly reduced due to the isolation layer is directly located at the support of the roof, and the base shear force of the structure and the flexural span ratio of roof are also reduced. For the lower frame structure, the story drift ratio is reduced in part of the frame near the isolation layer, but increased

收稿日期: 2020-11-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500705)资助

作者简介: 贾霞霞(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾及防护工程方面的研究。E-mail: 1064344709@qq.com

通信作者: 黄襄云(1966-), 女, 博士, 教授, 主要从事工程隔震及抗震研究。E-mail: eertchxy@gzhu.edu.cn

slightly in the other part that not directly connected with the isolation layer, which can not be ignored in the structural design and should be strengthened appropriately.

Keywords: Roof isolation; Optimization of isolation design; Seismic response

0 引言

随着社会的全面发展,建筑科学技术水平的不断进步以及人类生活的不断改善,规模宏大、形式新颖、技术先进的大跨空间结构具有广阔的应用前景。然而,在地震作用下,空间结构的地震反应复杂,一旦发生破坏,将造成巨大的灾害和损失。屋盖隔震技术根据空间结构的特点,在屋盖支撑处设置隔震层,提高结构的抗震能力,国内外学者对大跨度空间网架屋盖隔震设计开展了大量的研究工作^[1-6]。Mokha^[7]等人采用摩擦摆隔震支座对旧金山国际机场新国际航班换乘站进行屋盖隔震设计,研究了隔震系统设计参数和上部结构在不同地震水平下的反应,取得了较好的减震效果。沈之容、唐柏鉴^[8]将屋盖隔震技术应用于大跨空间结构,既能保护柱、基础等下部结构,又能保证屋盖侧移和隔震支座的变形在正常范围内,极大的提高了大跨空间结构的抗震安全性能。郭丽娜^[9]等人对某典型的钢结构大跨屋盖进行隔震设计,通过隔震结构与非隔震结构的地震反应分析表明:大跨屋盖结构采用屋盖隔震,不仅可以使结构满足挠度要求,还对屋盖剪力减震效果明显。隔震支座可以起到耗能减震的作用,有助于地震能量的耗散,减小上部屋盖的振动。Chen-xiao Zhang^[10]等人对具有下部支撑结构的双层格构空间结构进行了振动台试验,研究其抗震性能。讨论了模型不同高度处的加速度、位移以及构件处的应变等地震反应。总结了两种双层格构空间结构的典型破坏模式,并探讨了可能的破坏模式原因。

然而,对于大跨度空间网架屋盖隔震结构,结构的地震响应与基础隔震不同,由于其隔震层位置较高,可能会导致隔震层下部结构的地震作用加大。江宜城、刘朝强^[11]等人对某大跨体育馆结构屋盖隔震和不隔震两种情况下的动力反应进行了对比分析,结果表明:屋盖隔震结构的屋盖杆件内力明显地减小,但柱顶位移有所增大,对隔震层下部结构的不利影响。

本文以实际工程为例,采用简化后的力学模型,对屋盖隔震结构进行理论分析,以基底剪力

最小为目标,确定了隔震层的最优参数。采用最优隔震参数,建立三维有限元模型,对大跨空间网架结构进行屋盖隔震设计,分别与非隔震结构和基础隔震结构进行抗震性能对比研究。研究表明,在最优隔震参数情况下,隔震层下部部分框架的层间位移角可能会出现增大现象,在设计中需要特别关注。

1 工程实例

某国家甲级剧场,为混凝土框架支撑的空间网架结构(图1)。屋盖由上、下两部分网架组成,上部网架采用纵横向弦杆布置,下部落地区域的网架弦杆采用环形-竖直走向,环形走向的弦杆形成环箍,构件内力以轴力为主。为减少屋盖结构的挠度,下部的框架结构有两根柱伸到顶部支撑上部屋盖,四层(标高 15.125 m)、五层(标高 18.225m)刚度有突变,上部网架只与一层(标高 4.3 m)和顶层(标高 21.925 m)处的下部框架连接。

本工程为 II 类场地,地震设防烈度为 7 度(0.15g),根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)^[12]的要求选择地震动。考虑到在进行地震响应分析时,地震动记录选取的越多,地震动的不确定性就能得到充分的考虑。本文选择了 12 条满足要求的地震动记录,对结构进行弹塑性分析,其反应谱曲线如图 2 所示。

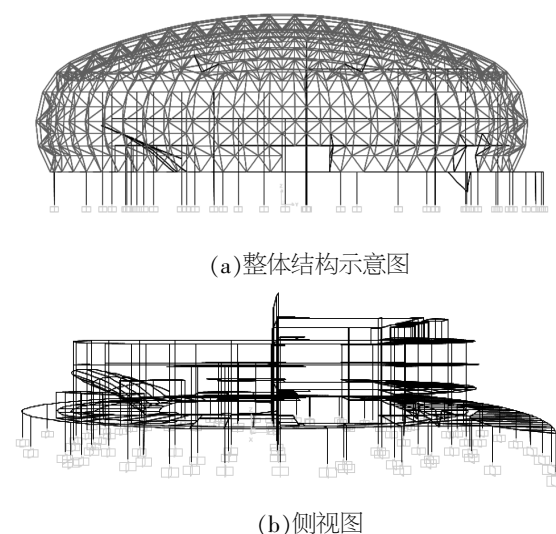


图 1 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of space truss

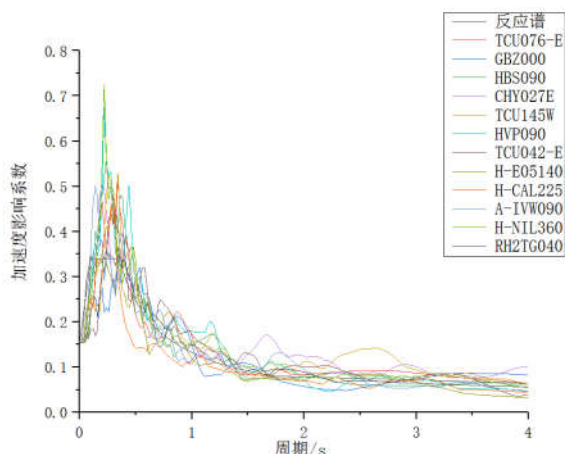


图 2 地震加速度谱与标准反应谱对比图

Fig.2 Comparison of seismic acceleration spectra with standard response spectra

2 屋盖隔震分析

2.1 质点模型

对于大跨度空间网架屋盖隔震结构,为便于采用数值分析方法进行结构地震反应分析,忽略竖向地震作用,只考虑结构水平方向的主振型,将整个结构简化为两质点隔震结构动力分析模型,如图 3 所示。假定屋盖结构平面内刚度无限大,认为空间结构在振动过程中网架仅发生整体平移,不产生水平变形。结构中同方向的各竖向结构有相同的变形特性,下部框架结构及隔震层各仅有一个侧移未知量。

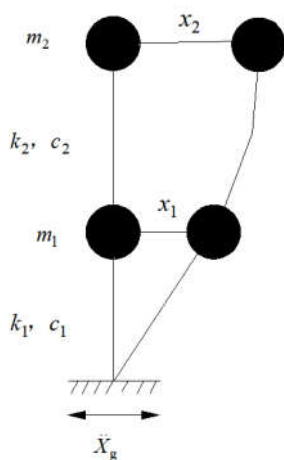


图 3 屋盖隔震结构质点体系模型

Fig.3 Particle system model of roof isolation structure

将上部网架结构质量集中于屋盖所在位置 m_2 , 为 1.692×10^5 kg。 k_2 为隔震层的等效刚度, 等于各

隔震支座的水平等效刚度之和。下部框架结构质量集中于 m_1 , 5.321×10^6 kg, 通过有限元模型模态分析计算得出的周期 T 以及提取出的质量 m_1 , 根据 $T=2\pi\sqrt{\frac{m_1}{k_1}}$ 计算得出下部结构等效刚度 $k_1=5.933 \times 10^5$ kN/m。 c_1 , c_2 分别为下部框架柱的阻尼和隔震支座的等效阻尼。 \ddot{X}_g 为地震时地面的水平向加速度, x_1 , x_2 分别为质点 1、2 相对于地面的绝对位移。

地震作用下,该结构的动力方程为: $M\ddot{X}+C\dot{X}+KX=MI\ddot{X}_g$

$$KX=MI\ddot{X}_g$$

隔震模型在水平地震激励下的基底剪力为 $F=$

$$m_1(\ddot{X}_g+\ddot{X}_1)+m_2(\ddot{X}_g+\ddot{X}_2)$$

式中 M , C , K 分别为质量矩阵, 阻尼矩阵, 刚度矩阵, I 为位置向量, \ddot{X} , \dot{X} , X 为相应的结构水平向的位移、速度、加速度响应。 $M=\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$,

$$K=\begin{bmatrix} k_1+k_2-k_2 & \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}, I=\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, C \text{ 采用 Rayleigh 阻尼计算。}$$

为验证质点模型正确性,在同一地震动 TCU076-E 作用下,选代表性隔震层刚度与三维有限元 (SAP2000) 模型进行对比研究,见表 1。

由表 1 可知,两质点模型与有限元二维模型计算结果趋势基本一致,且误差不超过 20%,两质点模型的计算结果具有合理性。

2.2 动力分析

选取上述 12 条地震动,采用两质点屋盖隔震结构动力分析模型,利用 MATLAB 对上述工程实例进行动力时程分析。

结构刚度、阻尼不变,质量比为 $m_2/m_1=0.001\sim 5$, 研究质量比对下部结构作用力的影响,如图 4。

从图 4 可以看出,随着上部网架结构的质量增大,下部结构的作用力越小,相应的减震效果越好。

本工程上部屋盖结构与下部框架结构的质量比为 3.08%, 考虑刚度比为 $k_2/k_1=0.0005\sim 0.3$, 阻尼比 $\zeta_2=0.01\sim 0.5$, 分别研究刚度比、阻尼比对减震系数 (屋盖隔震结构基底剪力/抗震结构基底剪力) 的影响,如图 5、6。

由图 5、6 可知,以基底剪力最小为原则,最优刚度比在 0.025~0.05 之间,阻尼比对基底剪力的影响较小;由表 2 可知,以屋盖隔震支座层剪

表 1 模型结果对比
Table 1 Comparison of model results

隔震层刚度/(kN·m ⁻¹)	质点模型	有限元二维模型	误差比率/(%) (质点与二维)
	基底剪力/(kN)	基底剪力/(kN)	
8010	15096.68	12223.17	19
8250	14906.18	12237.26	17.9
12500	14309.06	12270.09	14.2
13036	14254.78	14253.90	14.1
19500	13519.66	12283.40	9.1
19580	13520.87	12268.44	9.3
25144	14813.68	12194.32	17.7
31200	15288.72	12301.98	19.5
46440	15487.10	13234.53	14.5
74400	15584.78	14468.88	7.2
81000	15565.65	14456.32	7.1
95000	15595.30	13911.73	10.8

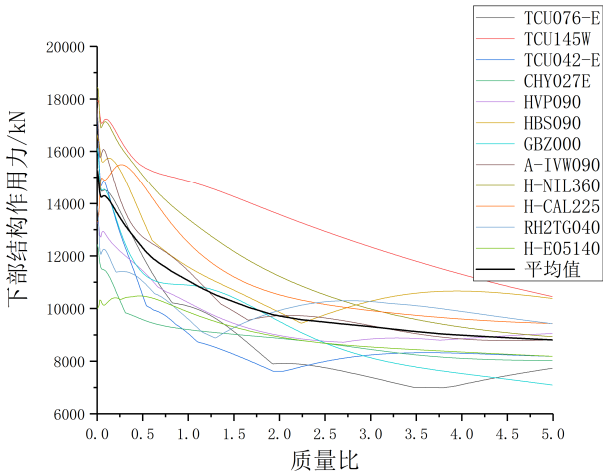


图 4 质量比对下部结构作用力的影响
Fig.4 Influence of mass ratio on substructure forces

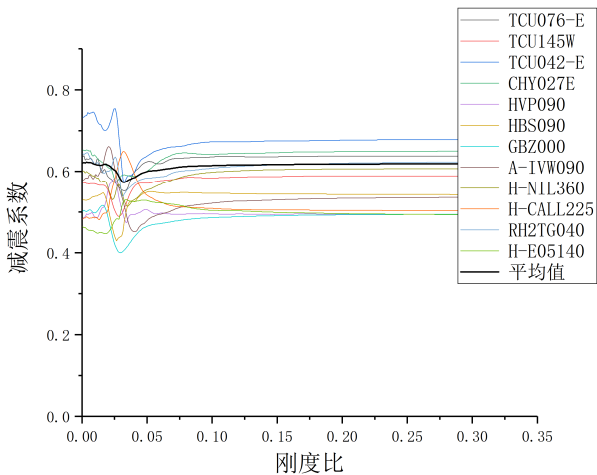


图 5 刚度比对基底剪力的影响
Fig.5 Influence of stiffness ratio on shear force of foundation

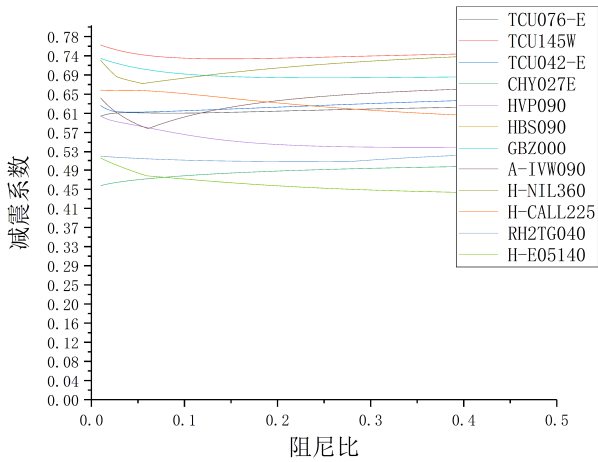


图 6 阻尼比对基底剪力的影响
Fig.6 Influence of damping ratio on shear force of foundation

力最小为原则,最优刚度比在 0.022 左右,与以基底剪力最小为原则的结论相差不大。

不同地震动作用下,屋盖隔震结构的地震响应趋势一致,选取 TCU076-E 进行分析,不同刚度时,屋盖支座层剪力与非隔震结构的比值如表 2 所示。

表 2 三维模型屋盖隔震支座层剪力比值
Table 2 The shear ratio of roof isolation bearing layer in three-dimensional model

刚度/ (kN·m ⁻¹)	比值(隔震/ 非隔震)	刚度/ (kN·m ⁻¹)	比值(隔震/ 非隔震)
8010	0.067	25144	0.054
8250	0.066	31200	0.067
12500	0.052	46440	0.112
13036	0.050	74400	0.155
19500	0.054	81000	0.158
19580	0.054	95000	0.177

3 隔震设计

根据最优隔震层参数确定屋盖隔震设计方案。隔震支座选用 2 个 LRB600, 16 个 LRB400, LRB600 布置在中部支撑柱柱顶(标高 21.925m), LRB400 的支座布置在框架柱柱顶(标高 4.3m)。隔震支座的布置如图 7 所示。隔震支座参数见表 3。

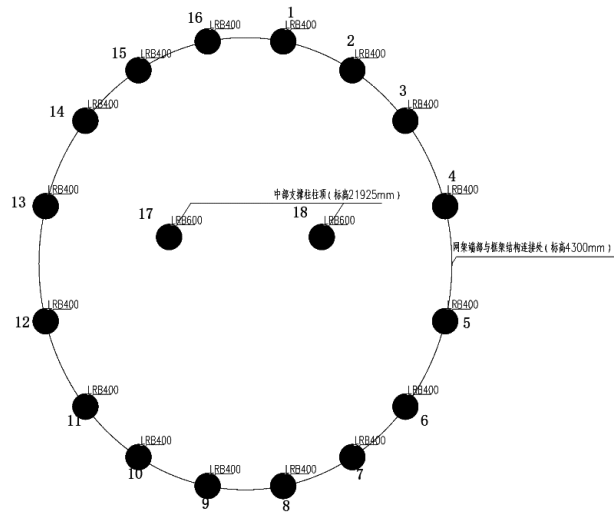


图 7 屋盖隔震支座布置图
Fig.7 Layout of roof isolation bearings

表 3 层间隔震支座主要力学性能
Table 3 Main mechanical properties of inter story isolation bearings

型号 G4.0	LRB600	LRB1000
竖向刚度/ (kN·mm ⁻¹)	2667	5197
等效水平刚度/ (kN·m ⁻¹)	1834	-
等效阻尼比/(%)	26.5	26.5
屈服后刚度/ (kN·m ⁻¹)	1014	1696
屈服力/kN	90.2	202.9

采用基础隔震设计方案时,隔震层设置在标高±0.00m 处框架结构的柱底。隔震支座选用 2 个 LRB700, 2 个 LRB600, 42 个 LRB500, 2 个 LNR1000, 2 个 LNR900, 4 个 LNR800, 5 个 LNR700, 10 个 LNR600, 26 个 LNR500。隔震支座的布置如图 8 所示。主要隔震支座参数见表 4。

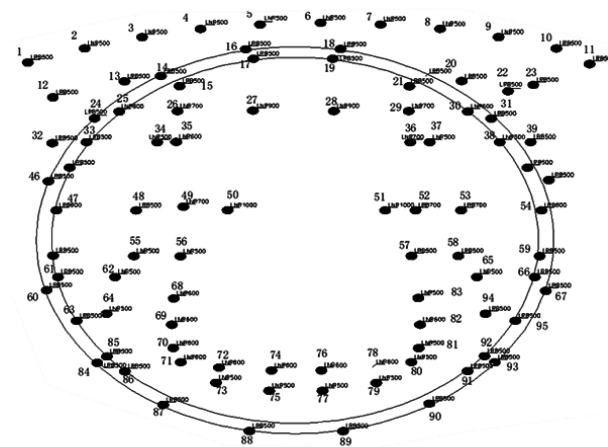


图 8 基础隔震支座布置图
Fig.8 Layout of base isolation bearings

表 4 基础隔震支座主要力学性能
Table 4 Main mechanical properties of base isolation bearings

型号 G4.0	LRB500	LRB600	LRB700
竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	1688	2667	3259
水平刚度/(kN·m ⁻¹)	1401	1834	1961
等效阻尼比/(%)	26.5	26.5	26.5
屈服后刚度/(kN/m)	775	1014	1084
屈服力/kN	62.6	90.2	122.7

4 结构地震响应对比

4.1 结构剪力对比

设防地震作用(峰值加速度为 150 cm/s²) 下, 屋盖隔震结构、非隔震结构和基础隔震结构的 X 向基底剪力对比见表 5 所示。

设防地震作用下, 屋盖隔震结构、非隔震结构和基础隔震结构的屋盖支座层 X 向剪力对比见表 6 所示。

由表 5 可知, 屋盖隔震结构的基底剪力减震系数平均值为 0.926, 基础隔震结构的基底剪力减震系数平均值为 0.428, 有较好的减震效果。由表 6 可知, 屋盖隔震结构的屋盖隔震支座层 X 向剪力减震系数平均值为 0.015, 基础隔震结构的屋盖支座层 X 向剪力减震系数平均值为 0.168, 屋盖隔震结构对上部屋盖的减震效果优于基础隔震结构。

表 5 设防地震作用下结构的 X 向基底剪力对比

Table 5 Comparison of X-direction base shear of structures under earthquake fortification

地震工况	非隔震结构	屋盖隔震结构	比值(隔震/非隔震)	基础隔震结构	比值(隔震/非隔震)
	基底剪力/(kN)	基底剪力/(kN)		基底剪力/(kN)	
AIVW090	30977.00	28755.82	0.928	7958.76	0.257
CHY027E	19257.71	18336.22	0.952	12891.51	0.669
GBZ000	31742.09	30358.86	0.956	14579.53	0.459
HBS090	31874.79	27346.26	0.858	10166.12	0.319
HVP090	27929.93	26772.43	0.959	7642.03	0.274
H-CAL225	21599.07	20409.70	0.945	8200.82	0.380
H-E05140	21331.14	21204.38	0.994	9346.91	0.438
H-NIL360	27974.28	23561.94	0.842	10797.59	0.386
RH2TG040	22741.51	22228.07	0.977	11875.15	0.522
TCU042-E	24181.51	21749.11	0.899	13252.69	0.548
TCU076-E	24489.73	20615.56	0.842	13478.46	0.550
TCU145W	31488.69	29482.13	0.936	9960.71	0.316
Respon	24703.64	23307.73	0.943	10869.34	0.440
平均值			0.926		0.428

表 6 设防地震作用下屋盖支座层 X 向剪力对比

Table 6 Comparison of X-direction shear force of roof support layer under earthquake fortification

地震工况	非隔震结构	屋盖隔震结构	比值(隔震/非隔震)	基础隔震结构	比值(隔震/非隔震)
	剪力/(kN)	剪力/(kN)		剪力/(kN)	
AIVW090	58090.29	724.88	0.012	6457.66	0.111
CHY027E	48353.39	659.35	0.014	7922.98	0.164
GBZ000	54996.52	858.35	0.016	8881.47	0.161
HBS090	51511.98	961.84	0.019	11633.38	0.226
HVP090	49763.76	811.35	0.016	10097.57	0.203
H-CAL225	48621.31	629.06	0.013	6908.92	0.142
H-E05140	51203.76	839.22	0.016	11154.33	0.218
H-NIL360	54952.18	867.39	0.016	6461.22	0.118
RH2TG040	58510.94	963.87	0.016	8217.49	0.140

(转下表)

(接表 6)

地震工况	非隔震结构	屋盖隔震结构	比值(隔震/非隔震)	基础隔震结构	比值(隔震/非隔震)
	剪力/(kN)	剪力/(kN)		剪力/(kN)	
TCU042-E	46273.96	707.84	0.015	10079.82	0.218
TCU076-E	58897.18	866.92	0.015	8978.88	0.152
TCU145W	61764.29	919.48	0.015	11477.19	0.186
平均值	53578.3	817.46	0.015	9022.58	0.168

4.2 上部网架结构挠跨比比

设防地震作用下，屋盖隔震结构、非隔震结构和基础隔震结构的上部网架挠跨比(上部网架竖向位移/结构跨度)对比见表 7。

由表 7 可以看出，屋盖隔震结构与非隔震结构挠跨比比值的平均值为 0.990，基础隔震结构与非隔震结构挠跨比比值的平均值为 0.980。对于上部网架结构的挠跨比，屋盖隔震结构和基础隔震结构的均有一定的减震效果。

表 7 设防地震作用下结构挠跨比比
Table 7 Comparison of deflection span ratio of structures under earthquake fortification

地震工况	非隔震结构	屋盖隔震结构	比值(隔震/非隔震)	基础隔震结构	比值(隔震/非隔震)
	挠跨比	挠跨比		挠跨比	
AIVW090	1/439	1/441	0.995	1/444	0.989
CHY027E	1/487	1/493	0.988	1/489	0.996
GBZ000	1/304	1/309	0.984	1/321	0.947
HBS090	1/264	1/267	0.989	1/263	1.004
HVP090	1/445	1/451	0.987	1/454	0.980
H-CAL225	1/409	1/414	0.988	1/417	0.981
H-E05140	1/529	1/536	0.987	1/544	0.972
H-NIL360	1/586	1/592	0.990	1/595	0.985
RH2TG040	1/340	1/347	0.980	1/361	0.942
TCU042-E	1/285	1/283	1.007	1/289	0.986
TCU076-E	1/460	1/458	1.004	1/460	1.000
TCU145W	1/365	1/365	1.000	1/367	0.995
平均值	1/386	1/390	0.990	1/394	0.980

4.3 上部网架结构杆件轴力对比

设防地震作用下，选取 A-IVW090 波和 H-CAL225 波的分析结果。通过对比有限元分析结果，发现屋盖下部网架环箍处的杆件轴力响应最大，鉴于网架结构杆件繁多，选取这类杆件作为代表性杆件。选取杆件 770、2570、3525 轴力时程分析结果作为研究依据，杆件的位置示意图如图 9。杆件的轴力对比如表 8。由表 8 可知，杆件 770、2570、3525 的轴力在屋盖隔震结构和基础隔震结构中减震效果显著，并且屋盖隔震结构的减震效果优于基础隔震结构。

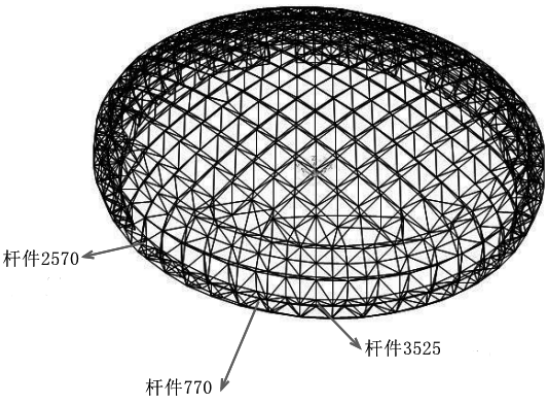


图 9 屋盖杆件 770、2570、3525

Fig.9 Location schematic diagram of roof bar 583、2570、3525

表 8 设防地震作用下屋盖杆件轴力对比

Table 8 Comparison of axial forces of roof bars under earthquake fortification

杆件号	时程工况	轴力峰值/(kN)					
		非隔震	屋盖隔震	屋盖隔震	减震系数	基础隔震	基础隔震 减震系数
770	A-IVW090	962.99	728.26		0.756	849.39	0.882
	H-CAL225	899.49	696.42		0.774	808.50	0.899
2570	A-IVW090	276.23	24.95		0.090	42.87	0.155
	H-CAL225	124.35	23.50		0.189	43.89	0.353
3525	A-IVW090	458.15	236.17		0.515	287.32	0.627
	H-CAL225	398.67	219.57		0.551	274.42	0.688

4.4 下部框架结构层间位移角对比

设防地震作用下，非隔震结构、屋盖隔震结构和基础隔震结构下部结构的层间位移角对比见表 9。

由表 9 可以看出，屋盖隔震结构对于下部部分框架柱的位移在局部有放大作用，基础隔震结构对下部框架结构的位移有减震效果。

表 9 设防地震作用下结构层间位移角对比

Table 9 Comparison of inter story displacement angles of structures under earthquake fortification

标高(m)	非隔震	屋盖隔震	减震系数	基础隔震	减震系数
	平均值	平均值		平均值	
21.925	1/1132	1/1324	0.855	1/5482	0.206
18.225	1/413	1/380	1.087	1/785	0.526
15.125	1/175	1/156	1.122	1/1154	0.152
11.525	1/353	1/445	0.793	1/518	0.681
7.9	1/363	1/379	0.958	1/440	0.825
4.3	1/725	1/844	0.859	1/806	0.900

5 结语

本文针对大跨度空间网架屋盖隔震结构响应的问题，采用简化后的质点力学模型，对其进行理论研究，并进行了屋盖隔震设计。屋盖隔震结构分别与非隔震结构、基础隔震结构进行对比，研究三种结构的抗震性能，得到以下结论：

(1)质点模型与有限元二维模型计算结果趋势基本一致，且误差不超过 20%。误差原因主要在于下部框架结构柱的标高不同，且仅有部分柱与上部网架结构连接，MATLAB 两质点模型的计算结果具有合理性；以基底剪力最小为原则，最优刚度比在 0.025~0.05 之间，阻尼比对基底剪力的影响较小；根据最优刚度比对比大跨度空间网架进行屋盖隔震设计。

(2)对屋盖隔震结构与非隔震结构、基础隔震

结构的抗震性能进行了对比分析，主要结论如下：屋盖隔震结构与非隔震结构基底剪力

比值平均值为 0.926，对于上部网架结构的挠跨比，屋盖隔震结构与非隔震结构挠跨比比值的平均值为 0.990。屋盖隔震结构虽然隔震层位置较高，但对结构的基底剪力和上部网架结构的挠跨比仍有减震效果。屋盖隔震结构的屋盖隔震支座层 X 向剪力减震系数平均值为 0.015，屋盖隔震结构代表性杆件轴力峰值的减震系数均小于基础隔震结构。屋盖隔震由于隔震层直接设置在上部屋盖与下部框架连接处，能明显减小上部大跨空间网架结构的杆件轴力和连接处的剪力。对于下部框架结构，直接与隔震层连接的框架的层间剪力和层间位移角有所减少，但未直接连接隔震层的部分框架的层间位移角略有增大，在结构设计时不容忽视，应适当加强。

参考文献

- [1] 陈奕玮,杜东升. 基于损伤的大跨隔震结构抗震性能评价[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(04): 87-93
- [2] 许伟志,王曙光,刘伟庆,杜东升,顾镇媛. 大跨隔震结构竖向地震响应的振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(04): 19-31.
- [3] 顾镇媛,沈吴钦,陈润波. 正放四角锥网架结构最佳跨高比及隔震性能分析[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2020, 19(03): 73-82.
- [4] Lu Y, Hao G, Han Q, et al. Steel tubular friction damper and vibration reduction effects of double-layer reticulated shells[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 169: 106019.
- [5] Yang Y, Spencer Jr B F, Li Y, et al. Seismic performance of double-layer spherical reticulated shell with replaceable bar-type dampers[J]. International Journal of Space Structures, 2011, 26(1): 31-44.
- [6] Chen Z, Ding Y, Shi Y, et al. A vertical isolation device with variable stiffness for long-span spatial structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 543-558.
- [7] Mokha A.S, Peter L Lee, X Wang, P Yu. Seismic isolation design of the new international terminal at San. Francisco international airport. Proc. Structures Congress, 1999: 95-98
- [8] 唐柏鉴,沈之容,李亚明. 屋盖结构柱顶隔震技术的研究[J]. 特种结构, 2005(04): 49-51.
- [9] 郭丽娜,郝金鑫,李凯辉,张怀升. 大跨屋盖隔震设计与地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(S1): 849-852.
- [10] Zhang C, Nie G, Dai J, et al. Experimental studies of the seismic behavior of double-layer lattice space structures I: experimental verification[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 64: 85-96.
- [11] 刘朝强. 某大跨体育馆屋盖隔震研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [12] 建筑结构抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016 年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.