

## 单层柱面网壳结构节点加速度反应谱研究

王多智<sup>1,2</sup>, 金友明<sup>1</sup>, 李奉泽<sup>3</sup>, 张 荣<sup>3,4</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 哈尔滨工业大学 土木工程智能防灾减灾工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**大量震害调查表明非结构构件所造成的损失不容忽视,同时随着反应谱方法的日渐成熟,其已成为非结构构件进行地震响应分析的重要方法。然而,目前反应谱的生成方法多针对于多高层结构,对于大跨空间结构的反应谱生成方法仍尚未明确。因此,该文基于 ABAQUS 与 Python 建立了九类单层柱面网壳结构模型。通过数值分析,比选确定了柱壳的代表性节点,研究分析了其三向加速度反应谱的谱形特征,确立了节点反应谱的拟合形式,并提出了单层柱面网壳节点三向加速度反应谱的拟合公式。此外,该文通过拟合分析,进一步确定了各特征参数的计算公式,并基于代表性节点研究探讨了加速度峰值放大系数、谱加速度峰值放大系数与节点有效距离、结构大跨比及屋面质量的关系。研究结果可用于单层柱面网壳结构非结构构件的地震响应近似计算,同时可为其他大跨空间结构反应谱生成提供了有价值的参考。

**关键词:**单层柱面网壳结构;节点加速度反应谱;地震作用;数值模拟;拟合分析

**中图分类号:**TU399; TU352.11

**文献标志码:**A

## Research on nodal acceleration response spectrum of single-layer cylindrical reticulated shell structures

WANG Duoqi<sup>1,2</sup>, JIN Youming<sup>1</sup>, LI Fengze<sup>3</sup>, ZHANG Rong<sup>3,4</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A large number of seismic investigations have shown that the damage caused by nonstructural components could not be ignored, and with the increasing maturity of the response spectrum method, it has become an important method for the seismic response analysis of nonstructural components. However, the current method of generating response spectrum was mostly used for multi-story structures, and the method of generating response spectrum for large-span structures was still not clear. Therefore, this article establishes nine types of single-layer cylindrical reticulated shell structural models on the basis of ABAQUS and Python. Through numerical analysis, the representative nodes of the single-layer cylindrical reticulated shell were identified by comparison, and the spectral characteristics of the three-way acceleration response spectrum were investigated and analyzed, and the fitting form of the node response spectrum was established, and the fitting formula of the three-way acceleration response spectrum of the single-layer cylindrical reticulated shell nodes was proposed. In addition, this article further determined the calculation formula of each characteristic parameter through the fitting analysis, and investigated the relationship between the peak acceleration amplification factor, the peak spectral acceleration amplification factor

收稿日期:2024-07-14; 修回日期:2024-08-07

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2023B15); 国家重点研发计划项目(2019YFE0112700)

作者简介:王多智(1982—),女,研究员,博士,主要从事非结构抗震及大跨空间结构研究。E-mail:wangdz@iem.ac.cn

通信作者:张 荣(1988—),男,副教授,博士,主要从事建筑结构抗震、抗冲击和抗爆炸研究。E-mail:zhangrong\_hit@163.com

and the effective distance of the nodes, the structural rise-to-span ratio and the roof mass based on the representative nodes. The research results in this article could be used to approximate the seismic response of the single-layer cylindrical reticulated shell non-structural components, and could provide a valuable reference for the generation of response spectrum for other large-span structures.

**Key words:** single-layer cylindrical reticulated shell; nodal acceleration response spectrum; seismic effects; numerical simulation; fit analysis

## 0 引言

近些年的震后灾害调查表明,建筑结构主体在地震中发生严重破坏的现象较少,而非结构构件(non-structural components, NSCs)破坏所导致的震害损失相较于主体更为严重<sup>[1-7]</sup>,因此对于 NSCs 抗震性能的研究十分重要。研究 NSCs 抗震性能的第一步是确定外部激励的输入,即构件与建筑物连接位置的结构反应或结构反应谱。尽管 NSCs 不全是加速度敏感型构件,但近些年来学者们的研究多集中于楼面加速度反应谱(floor response spectrum, FRS),简称楼面谱<sup>[8]</sup>。

VUKOBRATOVIĆ等<sup>[9]</sup>研究了地震动类型、结构延性等因素对 FRS 的影响,结果表明结构延性将显著降低 FRS 的谱值。同时,该学者提出了一种通过设计反应谱获取非线性结构楼面谱的近似方法,但该方法将结构与非结构均简化为单自由度体系,与实际工程情况存在偏差。因此,VUKOBRATOVIĆ等<sup>[10]</sup>通过对比单自由度和多自由度主体结构的数值分析结果,进一步完善了所提出的方法。然而完善后的方法并未考虑非结构构件的非线性,同时仅对弹性结构进行了有效性验证,对于非弹性结构仅给出了近似计算,且近似计算结果只能用于初步设计或校核。随后,VUKOBRATOVIĆ等<sup>[11-12]</sup>针对完善后方法提出了可供规范参考的简化方法,并将该方法适用范围拓展至非弹性结构。

ASGARIAN等<sup>[13-15]</sup>基于27座钢混结构的环境振动测量(ambient vibration measurements, AVN)数据,提出了一种基于一致危险性反应谱(uniform hazard spectra, UHS)生成楼面设计反应谱(floor design spectra, FDS)的方法。党育等<sup>[16]</sup>基于2栋实际建筑建立了隔震结构-设备耦合与非耦合2种动力分析模型,利用时程分析法获取了耦合体系各楼面的加速度放大系数均值谱并将其作为该研究的FRS,随后对比分析了隔震结构动力特性、场地类别及设备位置等因素对FRS的影响,发现当设备超过所在楼层质量1%时应当考虑二者的耦合效应,以及隔震结构周期和场地类别会显著影响FRS的谱值。随后,党育等<sup>[17]</sup>依据隔震结构-设备耦合体系FRS的谱形特征,对谱曲线进行分段回归,得到了一种适用于基础隔震结构的双峰型楼面设计反应谱分段拟合公式。该研究以拟合优度作为判断指标,利用正交试验法,分段研究并确定了各段谱曲线的特征参数,然后对各段谱曲线特征参数进行标定,从而给出了各段谱曲线的具体拟合公式。李文亮<sup>[18]</sup>对单层球面网壳结构节点三向加速度反应谱进行研究后参照规范谱形式给出了适用于单层球面网壳结构的节点反应谱拟合计算公式。

SHANG等<sup>[19]</sup>通过对框架结构进行数值分析,获取了非结构构件的动力放大系数(dynamic amplification factors, DAFs),给出了动力放大系数的分段计算公式,进而生成了FRS,并基于已有的框架结构振动台试验数据对所提出的FRS生成方法进行验证,然而该方法仅对框架结构的有效性进行了验证。

吴治邦等<sup>[20]</sup>通过对复杂结构的振动台试验数据进行统计分析,研究了场地卓越周期、结构周期对反应谱中楼面放大系数(floor acceleration amplification, FAA)的影响。

结构反应谱的研究对于非结构地震响应分析具有重要作用<sup>[8]</sup>,然而上述国内外学者们对FRS的研究主要集中在多高层结构,而对于大跨空间结构反应谱生成方法的研究较少。同时随着建筑科学的发展和现代化建筑功能需求的多样化,大跨空间结构建筑应用越发广泛,甚至已经成为国家建筑科学技术发展水平的重要标志之一<sup>[21]</sup>。柱壳结构作为大跨空间结构的重要形式之一,其反应谱的生成方法尚未见研究。

鉴于上述原因,本文结构参数选取屋面质量(60、120、180 kg/m<sup>2</sup>)及矢跨比(1/2、1/3、1/5),应用ABAQUS与Python的交互建模,共计建立九类三向网格型单层柱面网壳结构模型。从太平洋地震工程研究中心数据库中基于设计谱选取21条实测地震动数据,对柱壳模型的节点三向加速度反应谱展开了研究。随后,结合我国规范<sup>[22]</sup>中地震设计谱的相关内容,研究探讨了代表性节点三向加速度反应谱的拟合形式、拟合

公式及其特征参数;并拟合确定各特征参数的计算公式。此外,基于代表性节点,研究探讨了加速度峰值放大系数、谱加速度峰值放大系数与节点有效距离、矢跨比及屋面质量的关系。本文研究成果可用于单层柱面网壳结构非结构构件的地震响应近似计算,可为其他大跨空间结构反应谱生成提供有价值的参考。

## 1 地震动选取及输入

### 1.1 地震动选取

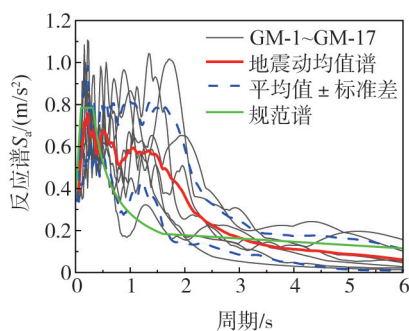
为了使时程分析得到的节点三向加速度时程响应具有普遍性和一般性,应选取一定数量的地震动作为输入。在不同研究中学者们针对不同的问题选取的地震动数量一般也不同,李文亮<sup>[18]</sup>在研究单层球面网壳结构节点三向加速度反应谱时采用了7条地震动以获取网壳结构节点的三向加速度时程响应,王江滨<sup>[23]</sup>在研究处于高烈度区的大跨空间网架结构的地震响应特征时采用了3条天然地震动并通过调幅从而对所选模型进行时程分析,尚玉珠<sup>[24]</sup>在研究下部支承结构对单层柱面网壳结构抗震性能的影响时选取了2条天然地震动并通过调幅从而对模型进行时程分析。

GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》<sup>[22]</sup>中规定,时程分析时可以选取7条时程曲线,并取其平均值;因此本文从PEER数据库,在二类场地,地震分组为第1组的地震动中,选取了3个地震动幅值(PGA为35、100、200 cm/s<sup>2</sup>),每个幅值各7条地震动,共计21条地震动作为输入。所选取地震动记录的相关信息见表1,对应的加速度反应谱见图1。

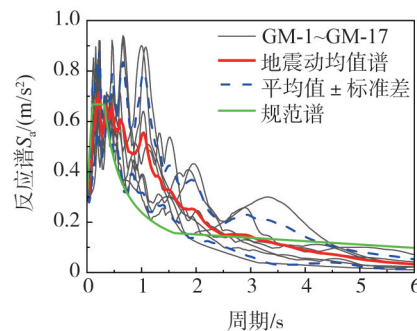
表1 地震动信息

Table 1 Ground motion information

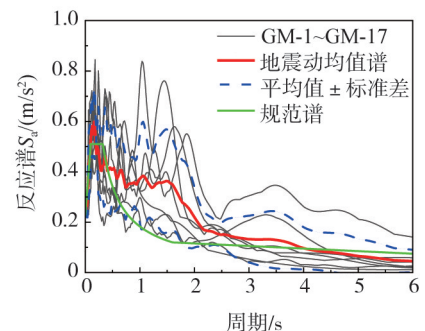
地震动幅值/(cm/s <sup>2</sup> )	地震动编号	地震名称与时间	记录台站名称	断层距/km	震级
35	70	San Fernando(1971年)	Lake Hughes #1	22.23	6.61
	740	Loma Prieta(1989年)	Anderson Dam (L Abut)	19.90	6.93
	4844	Chuetsu-oki(2007年)	Tokamachi Matsunoyama	23.01	6.80
	5776	Iwate(2008年)	Kami_Miyagi Miyazaki City	25.15	6.90
	3757	Landers(1992年)	North Palm Springs Fire Sta #36	26.95	7.28
	286	Irpinia(1980年)	Bisaccia	21.26	6.90
	4013	San Simeon(2003年)	San Antonio Dam-Toe	19.01	6.52
100	28	Parkfield(1966年)	Cholame-Shandon Array #12	17.64	6.19
	88	San Fernando(1971年)	Santa Felita Dam (Outlet)	24.69	6.61
	1614	Duzce(1999年)	Lamont 1061	11.46	7.14
	302	Irpinia(1980年)	Rionero In Vulture	22.68	6.20
	2490	Chi-Chi(1999年)	CHY074	27.84	6.20
	3757	Landers(1992年)	North Palm Springs Fire Sta #36	26.95	7.28
	6875	Joshua Tree(1992年)	Morongo Valley Fire Station	21.73	6.10
200	88	San Fernando(1971年)	Santa Felita Dam (Outlet)	24.69	6.61
	164	Imperial Valley(1979年)	Cerro Prieto	15.19	6.53
	827	Cape Mendocino(1992年)	Fortuna-Fortuna Blvd	15.97	7.01
	1083	Northridge(1994年)	Sunland-Mt Gleason Ave	12.38	6.69
	1208	Chi-Chi(1999年)	CHY046	24.10	7.62
	3472	Chi-Chi(1999年)	TCU076	13.53	7.62
	4843	Chuetsu-oki(2007年)	Matsushiro Tokamachi	18.16	6.80



(a) 地震动幅值35 cm/s<sup>2</sup> (X向)



(b) 地震动幅值35 cm/s<sup>2</sup> (Y向)



(c) 地震动幅值35 cm/s<sup>2</sup> (Z向)

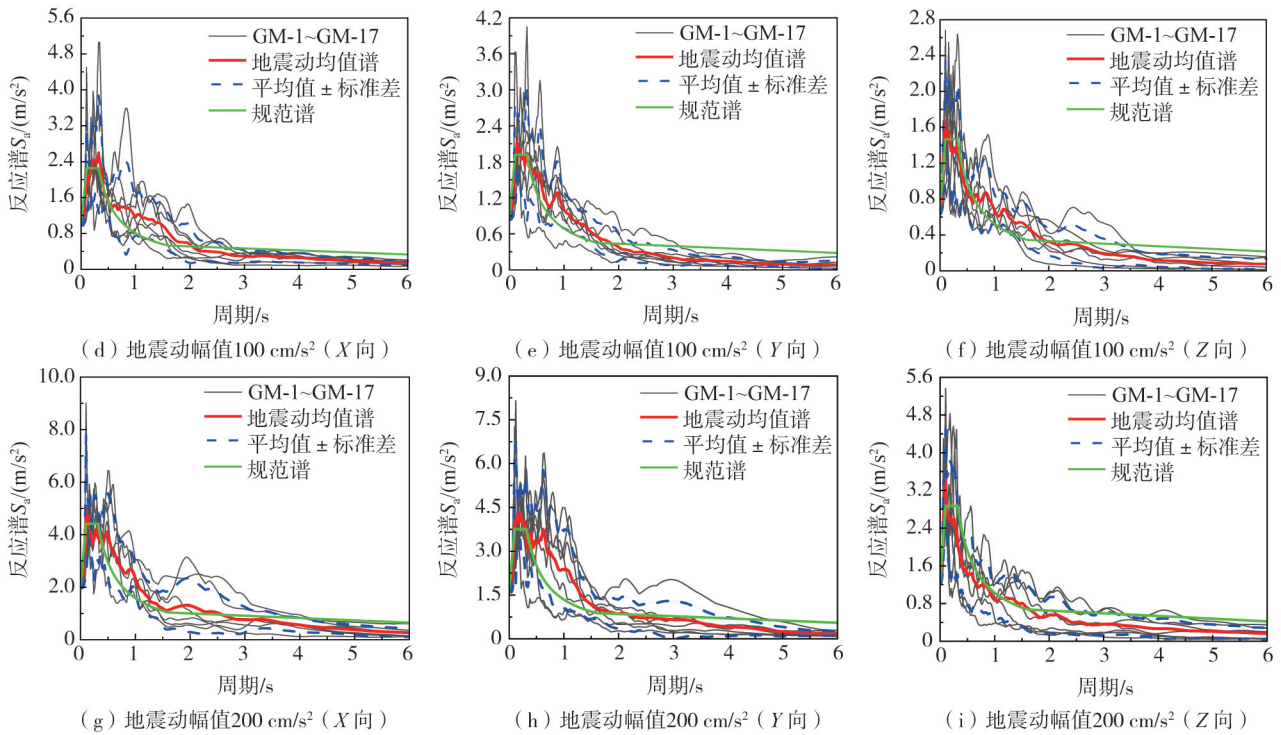


图1 支座节点处输入地震动各分量加速度反应谱

Fig.1 Acceleration response spectra for each component of earthquake motion input at the support node

### 1.2 地震动输入原则

由于大跨空间结构特殊的结构形式及复杂的空间特性,因此其破坏一般是水平地震和竖向地震共同作用的结果。GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》<sup>[22]</sup>中规定对于抗震设防烈度不低于8度的大跨度、长悬臂结构和抗震设防烈度9度时的高层建筑、盛水构筑物、贮气罐和储气柜等,应计算竖向地震作用。

鉴于本文所建立的单层柱面网壳结构属于大跨空间结构,因此为了保证时程分析的准确性,本文在进行模拟单层柱面网壳结构的地震响应时采用三向地震动输入,并在输入时根据 GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》<sup>[22]</sup>对所选地震动进行调幅处理。最终将结构长轴方向地震动加速度峰值调至指定数值后,以长轴方向的地震加速度峰值为基准,结构3个方向的地震加速度的峰值比是:结构长轴方向(X向):结构短轴方向(Y向):竖向(Z向)=1:0.85:0.65,将调幅后的三向地震动输入结构两纵向支座节点。

## 2 数值分析模型建立方法

### 2.1 结构信息及支承条件

根据 JGJ 7—2010《空间网格结构技术规程》<sup>[25]</sup>第3.3.2节的相关规定选取如图2所示的三向网格型单层柱面网壳为分析对象,结构参数选取矢跨比(1/2、1/3、1/5)与屋面质量(60、120、180 kg/m<sup>2</sup>),共建立了九类三向网格型单层柱面网壳结构,具体模型参数信息见表2,其中结构边界条件均采用三向铰接作为约束条件。本文模型编号各部分含义的详细说明示意图见图3。

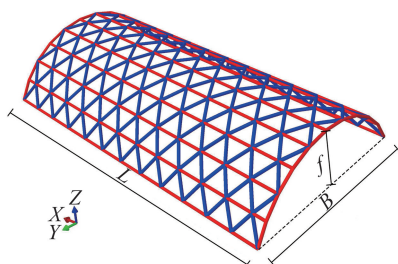


图2 三向网格型单层柱面网壳结构

Fig.2 Three-way grid single-layer cylindrical reticulated shell structure

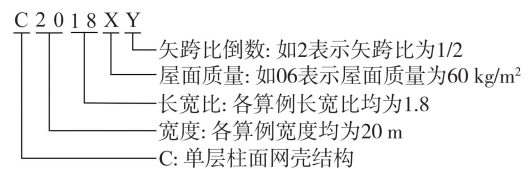


图3 模型编号说明

Fig.3 Description of model numbers

其次,本文柱壳杆件静承载力安全系数取为2.0。为保证柱壳结构承载力及杆件长细比等满足标准中的相关规定与要求<sup>[25-26]</sup>。因此,本文基于空间网格结构设计软件MST2008对结构承载力及杆件截面尺寸进行了初步设计,并利用ABAQUS进行了再次校核,各计算模型所采用的杆件截面尺寸具体信息见表2。

表2 单层柱面网壳结构杆件信息

Table 2 Information of the members of single-layer cylindrical reticulated shell structure

模型编号	宽度 $B/m$	长宽比	屋面质量/( $kg/m^2$ )	矢宽比	纵杆、端杆/( $mm \times mm$ )	斜杆/( $mm \times mm$ )
C2018062	20	1.8	60	1/2	$\phi 121 \times 6$	$\phi 140 \times 8$
C2018063				1/3	$\phi 102 \times 4$	$\phi 114 \times 4$
C2018065				1/5	$\phi 95 \times 4$	$\phi 108 \times 4$
C2018122			120	1/2	$\phi 140 \times 8$	$\phi 152 \times 10$
C2018123				1/3	$\phi 114 \times 4$	$\phi 127 \times 5$
C2018125				1/5	$\phi 108 \times 4$	$\phi 121 \times 5$
C2018182			180	1/2	$\phi 146 \times 8$	$\phi 159 \times 10$
C2018183				1/3	$\phi 133 \times 5$	$\phi 146 \times 6$
C2018185				1/5	$\phi 121 \times 4$	$\phi 133 \times 5$

## 2.2 有限元建模

本文利用ABAQUS与Python交互完成单层柱面网壳结构的参数化建模。ABAQUS中B31梁单元能够很好地考虑梁的剪切变形情况,为使结构模型更加贴合实际工程情况,因此结构的所有杆件均采用该单元类型,所有杆件截面形式均采用pipe,同时每根杆件在划分单元时均划分为3个单元以模拟杆件在三维地震作用下的复杂受力变形和运动情况。结构杆件材料采用Q235B钢,材料本构模型采用考虑累计损伤的钢材本构模型<sup>[27]</sup>,不考虑材料损伤时钢材弹性模量为206 GPa,屈服强度为235 MPa,材料密度为7850  $kg/m^3$ ,本文建立了3种矢跨比共计9种单层柱面网壳结构,其中矢跨比为1/3的有限元模型见图4。

本文在有限元建模过程中,将屋面质量等效为节点荷载进行处理,主要是基于各节点处的节点面积将屋面质量等效为各节点处的节点质量。杆件与节点之间的连接方式采用刚体连接。在时程分析过程中采用隐式算法对模型开展动力分析计算,动力分析参数阻尼比采用Rayleigh阻尼,选择模型前2阶频率计算结构Rayleigh阻尼系数,各计算模型前5阶周期见表3。

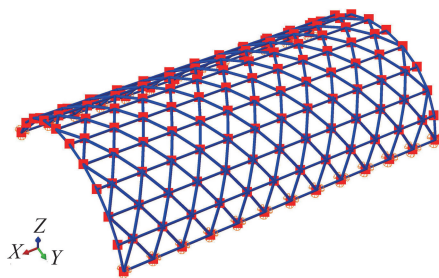


图4 单层柱面网壳结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of single-layer cylindrical reticulated shell structure

表3 各计算模型前5阶自振周期

Table 3 First 5 orders of natural vibration periods of each calculation model

模型编号	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
C2018062	2.65	0.87	0.83	0.44	0.43
C2018063	2.42	0.92	0.85	0.49	0.48
C2018065	1.70	0.73	0.67	0.42	0.39
C2018122	2.85	0.93	0.87	0.47	0.47
C2018123	2.55	0.97	0.90	0.52	0.51
C2018125	1.78	0.76	0.70	0.45	0.41
C2018182	3.13	1.02	0.96	0.52	0.51
C2018183	2.31	0.88	0.81	0.47	0.46
C2018185	1.85	0.79	0.73	0.48	0.43

## 3 代表性节点及拟合理论

### 3.1 代表性节点确立

在已有数值模型基础上,进行了21条地震动、9个柱壳模型,共计189个算例的计算与分析后,利用Python批量提取了各算例全部节点的三向加速度时程响应,共计83916条数据。计算同一PGA下,同一3个PGA幅值,9个柱壳模型,共计27组代表性节点,在200  $cm/s^2$ 水平下C2018062代表性节点所在位置的示意图见图5。图中: $h_i$ 为Node  $i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ )到柱面网壳下缘高度; $D_i$ 为Node  $i$ 距最近支座节点的有效距离,其中 $D_1 = 0, D_6 = D_{max}$ 。具体计算公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} D_i = \sqrt{D_{ix}^2 + D_{iy}^2 + D_{iz}^2} \\ D_{max} = \sqrt{D_{mid,x}^2 + D_{mid,y}^2 + D_{mid,z}^2} \end{cases} \quad (1)$$

统计发现各算例的代表性节点位置类似,由此可见所研究的单层柱面网壳结构加速度响应最大的位置主要集中在跨度方向的边界处。

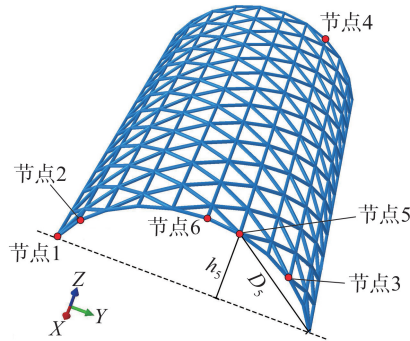


图5 200 cm/s<sup>2</sup>水平下 C2018062 代表性节点位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of representative node locations of C2018062 under the horizontal acceleration of 200 cm/s<sup>2</sup>

### 3.2 加速度反应谱谱形特征分析

计算获取各组中每个代表性节点的三向加速度反应谱,并求出每个代表性节点 7 条反应谱的均值谱。分析发现 21 条地震动作用下各代表性节点三向加速度反应谱具有相似的谱形特征;以 PGA 为 200 cm/s<sup>2</sup>时 C2018062 代表性节点三向加速度反应谱为例,见图 6,分析代表性节点三向加速度反应谱谱形特征,并基于此确立其拟合形式。

1) X 向加速度反应谱的主要特征是:①上升段:明显的陡直上升段,达到峰值时对应周期经统计基本在 0.08 s 左右;②水平段:只存在一个主要峰值,且峰值随着节点有效距离的增大而增大;③下降段:呈快速下降状态。

2) Y 向加速度反应谱的主要特征是:①上升段:明显的陡直上升段,达到峰值时对应周期经统计基本在 0.08 s 左右;②水平段:存在 2 个主要峰值,且第一主要峰值随节点有效距离的增大而减小。此外,第一主要峰值对应周期多数位于 [0.1, 0.3] s 内,第二主要峰值对应结构第 4 阶周期  $T_{s4}$ ,而两主峰间呈明显波谷段;③下降段:初始呈快速下降状态,且随着节点有效距离的增大曲线下下降趋势逐渐平缓。

3) Z 向加速度反应谱的主要特征是:①上升段:明显的陡直上升段,达到峰值时对应周期经统计基本在 0.08 s 左右;②水平段:多数存在一个主要峰值,其对应周期为  $T_{s4}$  及  $2T_{s4}$ ;③下降段:呈快速下降状态,且随着节点有效距离的减小曲线下下降趋势逐渐平缓。

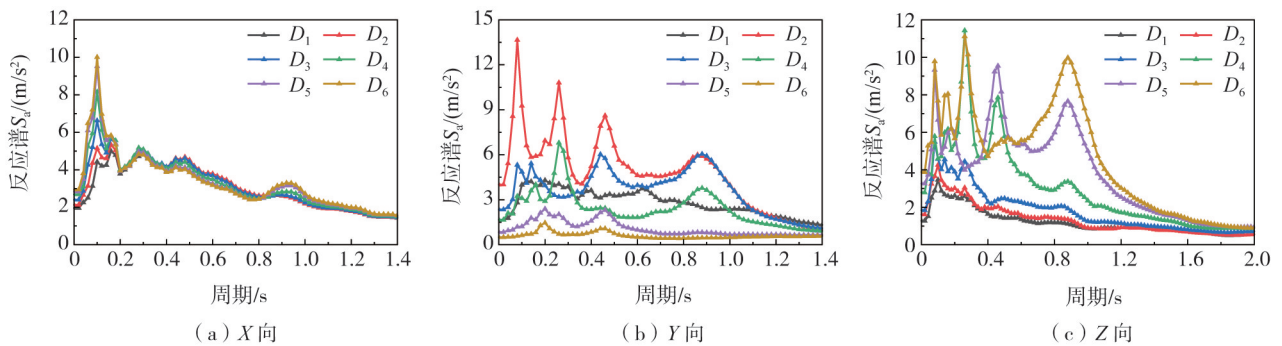


图6 200 cm/s<sup>2</sup>水平下 C2018062 代表性节点三向加速度反应谱(ζ=0.05)

Fig. 6 Three-way acceleration response spectrum of representative node C2018062 under the horizontal acceleration of 200 cm/s<sup>2</sup>(ζ=0.05)

鉴于上述分析,根据 GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》<sup>[22]</sup>中地震设计谱的相关内容,及党育等<sup>[17]</sup>楼面反应谱处理方法,将已获取的代表性节点三向加速度反应谱进行分段拟合。其中 X 向和 Z 向加速度反应谱采用单峰形式拟合;Y 向采用双峰形式拟合,Y 向波谷段则采用二次函数进行拟合。

### 3.3 加速度反应谱拟合公式及其特征参数

首先,将周期为  $T_a=0$  时刻各组代表性节点三向加速度峰值与其输入地震动幅值的比值,记为  $AF_0$ ,其含义是在加速度幅值为  $S_g(T_a=0, \zeta)$  的地震动作用下,单层柱面网壳结构各代表性节点三向加速度峰值的放大系数,具体公式如式(2)所示:

$$AF_0 = \frac{S_n(T_a=0, \zeta)}{S_g(T=0, \zeta)} \quad (2)$$

式中:  $S_n(T_a=0, \zeta)$  为柱壳各代表性节点周期为 0 ( $T_a=0$ ) 时刻三向加速度反应谱值;  $S_g(T_a=0, \zeta)$  为柱壳支座节点处输入的三向地震动幅值。

同时, 将各代表性节点三向加速度反应谱峰值与其周期为  $T_a=0$  时刻三向加速度反应谱值的比值, 记为  $AF_{\max}$ , 其含义是在加速度幅值为  $S_g(T_a=0, \zeta)$  的地震动作用下, 单层柱面网壳结构各代表性节点三向加速度反应谱峰值的放大系数, 具体公式如式(3)所示:

$$AF_{\max} = \frac{\text{MAX}(S_n(T_a, \zeta))}{S_n(T_a=0, \zeta)} \quad (3)$$

其次, 将各代表性节点  $Y$  向加速度反应谱周期为  $T_a = T_{s4}$  时刻的谱值, 与其周期为  $T_a = 0$  时刻三向加速度反应谱值的比值, 记为  $AF_{T_{s4}}$ , 其含义是在加速度幅值为  $S_g(T_a=0, \zeta)$  的地震动作用下, 单层柱面网壳结构各代表性节点周期为  $T_a = T_{s4}$  时刻三向加速度反应谱的放大系数, 具体公式如式(4)所示:

$$AF_{T_{s4}} = \frac{S_{ny, T_{s4}}(T_a = T_{s4}, \zeta)}{S_{g,0}(T_a = 0, \zeta)} \quad (4)$$

式中:  $S_{ny, T_{s4}}(T_a = T_{s4}, \zeta)$  为柱壳各代表性节点周期为结构第 4 阶周期 ( $T_a = T_{s4}$ ) 时刻  $Y$  向加速度反应谱值。

进而, 节点三向加速度反应谱拟合公式如式(5)~式(8)所示:

$$S_{ni,0} = AF_{0,i} S_{g,0} \quad (5)$$

$$S_{a,x}(T_a) = \begin{cases} \frac{T_a \cdot S_{nx,0}}{0.08} (AF_{\max,x} - 1) + S_{nx,0}, & T_a \leq 0.08 \\ AF_{\max,x} S_{nx,0}, & 0.08 < T_a \leq T_{s4} \\ AF_{\max,x} S_{nx,0} \left(\frac{T_{s4}}{T_a}\right)^{\gamma_x}, & T_{s4} < T_a \end{cases} \quad (6)$$

$$S_{a,y}(T_a) = \begin{cases} \frac{T_a \cdot S_{ny,0}}{0.08} (AF_{\max,y} - 1) + S_{ny,0}, & T_a \leq 0.08 \\ AF_{\max,y} S_{ny,0}, & 0.08 < T_a \leq 0.3 \\ aT_a^2 + bT_a + c, & 0.3 < T_a \leq T_{s4} \\ AF_{T_{s4}} S_{g,0}, & T_{s4} < T_a \leq 2T_{s4} \\ AF_{T_{s4}} S_{g,0} \left(\frac{2T_{s4}}{T_a}\right)^{\gamma_y}, & 2T_{s4} < T_a \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{a,z}(T_a) = \begin{cases} \frac{T_a \cdot S_{nz,0}}{0.08} (AF_{\max,z} - 1) + S_{nz,0}, & T_a \leq 0.08 \\ AF_{\max,z} S_{nz,0}, & 0.08 < T_a \leq \beta T_{s4} \\ \frac{AF_{\max,z} S_{nz,0}}{1 + \lambda (T_a / \beta T_{s4} - 1)^{1.5}}, & \beta T_{s4} < T_a \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $S_{g,0}$  为柱壳支座节点处输入的三向地震动幅值;  $S_{ni,0}$  为节点  $i$  方向周期为 0 ( $T_a=0$ ) 时刻加速度反应谱值;  $AF_{0,i}$  为节点  $i$  方向加速度峰值放大系数;  $AF_{\max,i}$  为节点  $i$  向谱加速度峰值放大系数;  $AF_{T_{s4}}$  为节点  $Y$  向周期为结构第 4 阶周期 ( $T_a = T_{s4}$ ) 时刻加速度反应谱放大系数即第二平台放大系数;  $a, b, c$  为节点  $Y$  向加速度反应谱低谷段二次函数的特征参数及对应的一次项系数和常数项;  $\gamma_x, \gamma_y, \lambda, \beta$  为节点三向加速度反应谱衰减段特征参数, 其中当  $D_i/D_{\max} \geq 0.8$  时,  $\beta=2$ , 当  $D_i/D_{\max} < 0.8$  时,  $\beta=1$ 。

最后, 本文选取柱壳的矢跨比 ( $f/B$ )、屋面质量 ( $Q_r$ ) 及各节点有效距离与跨中节点有效距离之比 ( $D_i/D_{\max}$ ), 作为后续节点三向加速度反应谱各特征参数拟合的自变量。同时, 本文后续拟合过程均基于最小二乘原理, 并选用可决系数  $R^2$  作为评价拟合优劣程度的指标。

## 4 反应谱特征参数计算公式拟合

### 4.1 加速度峰值放大系数

经过统计分析获得了九类柱壳模型代表性节点三向加速度峰值变化曲线见图 7,其中支座节点三向加速度峰值放大系数为 1,故不做专门统计。对代表性节点三向加速度峰值放大系数变化规律分析认为:

1) X 向(柱壳长度方向)加速度峰值放大系数变化规律是:①随着屋面质量的增大而增大;②随着节点有效距离的增大而增大;③随着矢跨比的增大先增大后减小,其中矢跨比为 1/3 时放大系数最大。

2) Y 向(柱壳跨度方向)加速度峰值放大系数变化规律是:①随着屋面质量的增大而增大;②随着节点有效距离的增大而减小;③随着矢跨比的减小,节点有效距离对放大系数的影响降低。

3) Z 向加速度峰值放大系数变化规律是:①随着屋面质量的增大而增大;②矢跨比显著改变了节点加速度峰值放大系数。

矢跨比为 1/3 和 1/5 时,放大系数随着节点有效距离的增大先减小后增大,在跨中节点处( $D_i/D_{max} = 1$ )出现小幅下降现象;矢跨比为 1/2 时,放大系数随着节点有效距离的增大而增大。

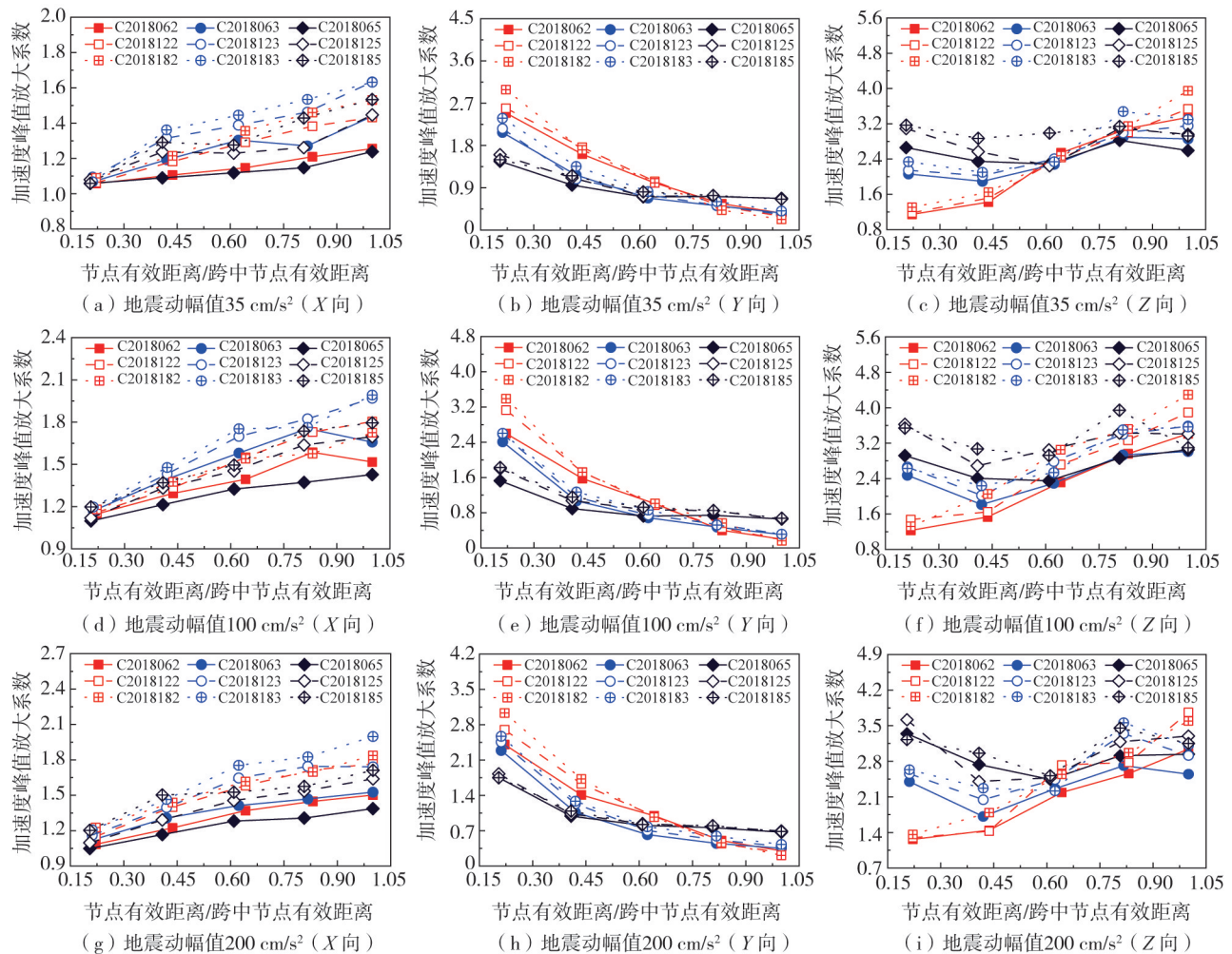


图 7 代表性节点三向加速度峰值放大系数

Fig. 7 Amplification factor of peak three-way acceleration at representative nodes

采用多元多项式模型对节点加速度峰值放大系数进行拟合,具体拟合公式如式(9)~式(11)所示:

$$AF_{0,x} = A + B \cdot Q_r + C \cdot D \cdot \left(\frac{f}{B}\right)^2 + E \cdot \left(\frac{D_i}{D_{max}}\right) + F \cdot \left(\frac{D_i}{D_{max}}\right)^2 \quad (9)$$

$$AF_{0,y} = A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + \left(\frac{D_{max}}{D_i}\right)^{0.6} + D \cdot \left(\frac{f}{B} \cdot \frac{D_i}{D_{max}}\right)^2 \quad (10)$$

$$AF_{0,z} = A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + D \cdot \frac{D_i}{D_{max}} + E \cdot \left( \frac{f}{B} \cdot \frac{D_i}{D_{max}} \right)^{1.5} \quad (11)$$

拟合所涉及的相关系数见表4。可见当 $R^2 \geq 0.75$ 时,拟合效果较好。PGA为 $200 \text{ cm/s}^2$ 时,代表性节点三向加速度峰值放大系数的拟合值与计算值对比图见图8,可见二者吻合较好。

表4 三向加速度峰值放大系数拟合系数表

Table 4 Fitting coefficients for peak acceleration amplification factors in three ways

加速度方向	地震动幅值( $\text{cm/s}^2$ )	A	B	C	D	E	F	$R^2$
X向	35	0.271	0.143	3.373	-4.774	0.574	-0.093	0.882
	100	-0.017	0.124	4.893	-6.862	1.302	-0.465	0.909
	200	0.079	0.218	3.317	-4.386	1.230	-0.524	0.930
Y向	35	-1.134	0.079	2.257	-3.321	0	0	0.907
	100	-1.209	0.144	2.670	-4.875	0	0	0.917
	200	-1.028	0.102	1.991	-3.603	0	0	0.929
Z向	35	3.789	0.273	-6.189	-0.912	10.309	0	0.899
	100	4.000	0.429	-6.701	-0.943	10.636	0	0.852
	200	4.229	0.271	-6.734	-1.120	9.690	0	0.779

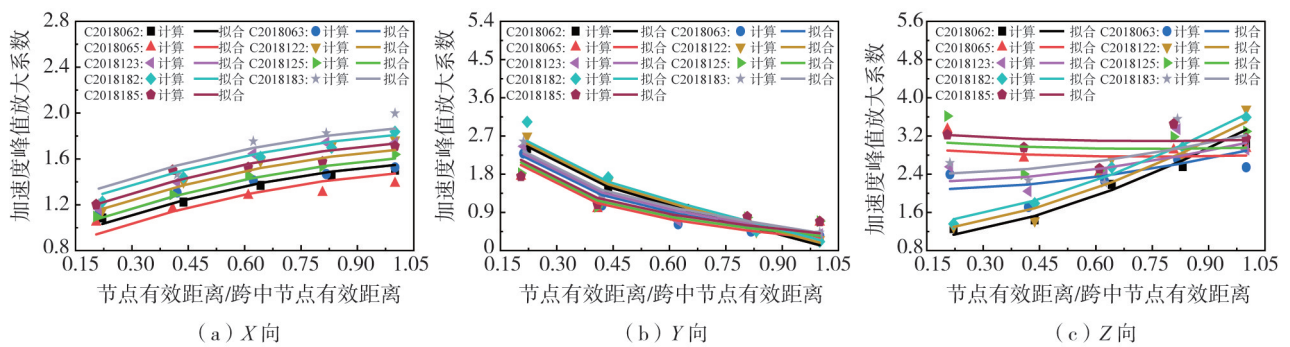


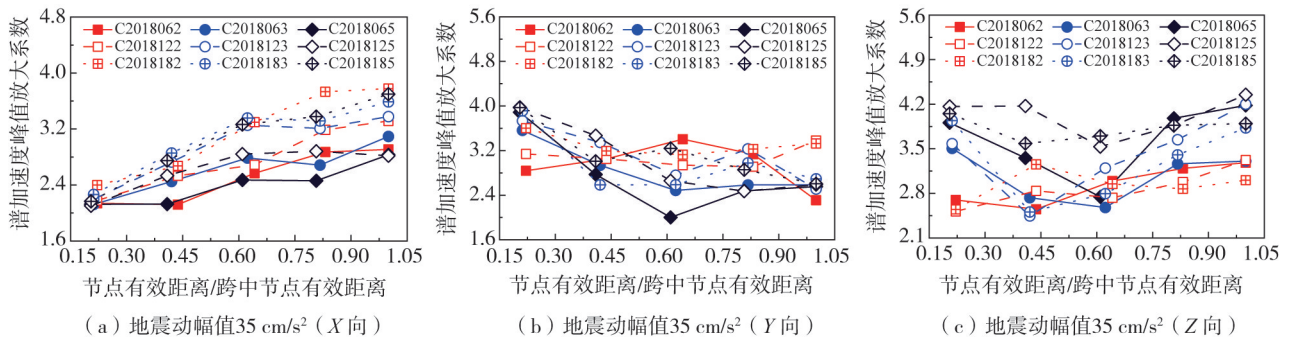
图8  $200 \text{ cm/s}^2$ 水平下代表性节点三向加速度峰值放大系数拟合对比

Fig. 8 Comparison of fitted amplification factors of peak three-way acceleration for representative nodes under the horizontal acceleration of  $200 \text{ cm/s}^2$

### 4.2 谱加速度峰值放大系数

经过统计分析获得了九类柱壳模型代表性节点三向谱加速度峰值变化曲线见图9。对代表性节点三向谱加速度峰值放大系数变化规律分析认为:

- 1) X向(柱壳长度方向)谱加速度峰值放大系数变化规律是:①随节点有效距离的增大而增大;②随屋面质量和矢跨比的增大无明显变化趋势。
- 2) Y向(柱壳跨度方向)谱加速度峰值放大系数变化规律是:随节点有效距离、屋面质量及矢跨比的增大无明显变化趋势。
- 3) Z向谱加速度峰值放大系数变化规律是:随节点有效距离、屋面质量及矢跨比的增大无明显变化趋势。



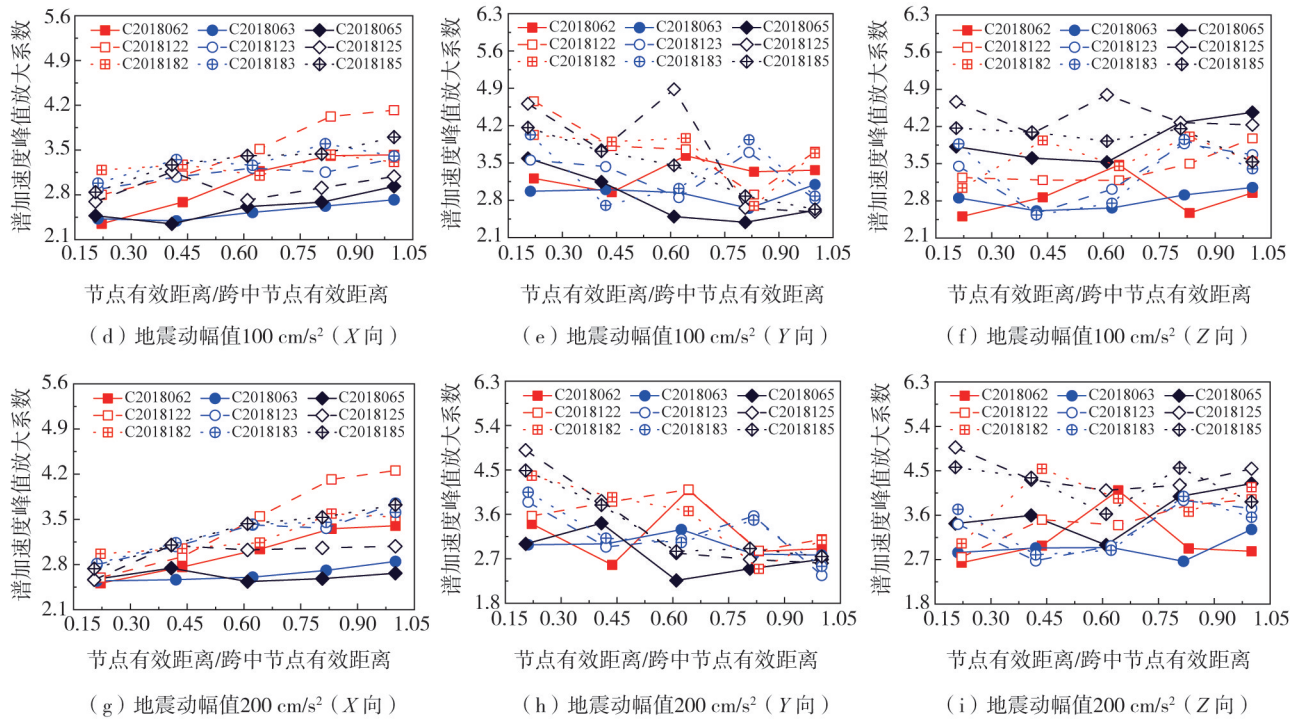


图9 代表性节点三向谱加速度峰值放大系数

Fig. 9 Amplification factors of peak three-way spectral acceleration for representative nodes

采用多元多项式模型对节点谱加速度峰值放大系数进行拟合,具体拟合公式如(12)~式(14)所示:

$$AF_{\max,x} = A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + \left(\frac{D_i}{D_{\max}}\right)^D + E \cdot \left(\frac{f}{B} \cdot \frac{D_i}{D_{\max}}\right)^2 \quad (12)$$

$$AF_{\max,y} = \exp\left(A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + D \cdot \ln \frac{D_{\max}}{D_i} + E \cdot \left(\frac{f}{B} \cdot \ln \frac{D_{\max}}{D_i}\right)\right) \quad (13)$$

$$AF_{\max,z} = A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + D \cdot \left(\frac{D_i}{D_{\max}}\right)^E + F \cdot \ln\left(\frac{f}{B} \cdot \frac{D_i}{D_{\max}}\right) \quad (14)$$

拟合所涉及的相关系数见表5。可见当 $R^2 \geq 0.5$ 时,拟合效果良好。PGA为 $200 \text{ cm/s}^2$ 时,代表性节点三向谱加速度峰值放大系数的拟合值与计算值对比图见图10,可见二者吻合良好。同时,经过统计分析发现,支座节点( $D_i/D_{\max} = 0$ )三向谱加速度峰值放大系数均在 $[2.45, 2.70]$ 内,因此为了提高拟合精度与效率,将其统一取值为2.7进行拟合。

表5 三向谱加速度峰值放大系数拟合系数表

Table 5 Fitting coefficients for the amplification factors of peak acceleration in the three-way spectrum

加速度方向	地震动幅值/( $\text{cm/s}^2$ )	A	B	C	D	E	F	$R^2$
X向	35	1.600	0.500	-0.344	1.000	1.772	0	0.851
	100	1.600	0.500	-0.281	0.300	2.390	0	0.681
	200	1.600	0.500	-0.392	0.300	3.247	0	0.726
Y向	35	0.626	0.085	0.790	0.510	-0.900	0.850	0.643
	100	0.724	0.100	0.770	0.400	0.663	0.860	0.434
	200	0.709	0.100	0.539	0.320	-0.440	1.510	0.521
Z向	35	-2.590	0.110	2.120	3.659	1.100	-1.721	0.691
	100	-50.580	0.350	15.050	42.281	0.160	-5.886	0.608
	200	-61.000	0.490	15.530	52.368	0.125	-5.752	0.534

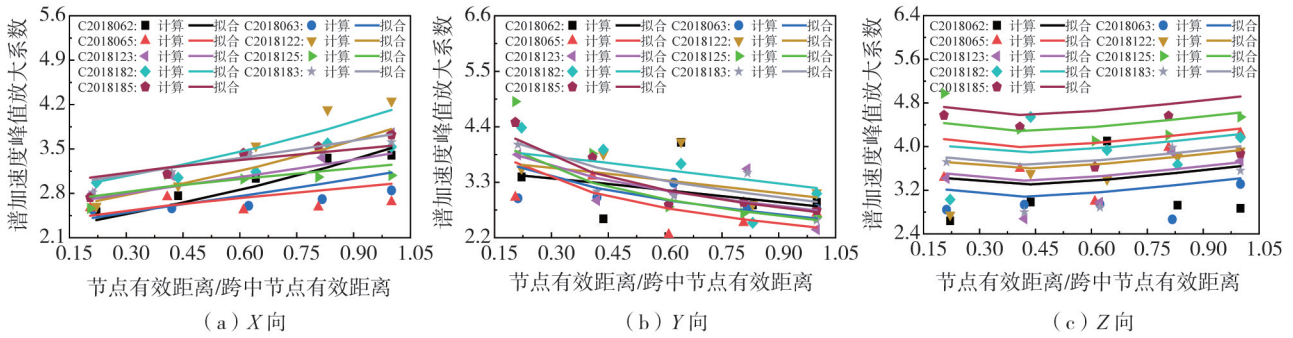


图 10 200 cm/s<sup>2</sup>水平下代表性节点三向谱加速度峰值放大系数拟合对比

Fig. 10 Comparison of the fitted amplification coefficients of peak three-way spectral acceleration for representative nodes under a horizontal acceleration of 200 cm/s<sup>2</sup>

4.3 Y 向第 2 平台放大系数及波谷段特征参数

采用多元多项式模型对 Y 向第 2 平台放大系数  $AF_{T_{34}}$  进行拟合,采用多元多项式结合极值模型对波谷段特征参数  $a$  进行拟合,二者具体拟合公式如式(15)~式(17)所示:

$$AF_{T_{34}} = A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + D \cdot \frac{D_i}{D_{max}} + E \cdot \left( \frac{f}{B} \cdot \frac{D_i}{D_{max}} \right)^F \quad (15)$$

$$a = \exp\left(A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + D \cdot \exp(-\exp(-z) - z + 1)\right), \quad z = \left(\frac{D_i}{D_{max}} - E\right) / F \quad (16)$$

$$b = \frac{p_1 - p_2 - a \times (t_1^2 - t_2^2)}{t_1 - t_2}, \quad c = p_1 - a \times t_1^2 - b \times t_1 \quad (17)$$

式中:  $t_1$ 、 $t_2$  为代表性节点 Y 向第 1 平台段终点处周期和第 2 平台段起点处周期,分别取 0.3 s 和结构第 4 阶周期;  $p_1$ 、 $p_2$  分别为  $t_1$ 、 $t_2$  时刻对应的反应谱值。

拟合所涉及的相关系数见表 6,可见当  $R^2 \geq 0.75$  时,拟合效果较好。同时,经过统计发现支座节点处 Y 向第 2 平台放大系数均在 [1.85, 2.05] 内,因此为了提高拟合精度与效率,将其统一取值为 2.0 进行拟合。代表性节点 Y 向第 2 平台放大系数  $AF_{T_{34}}$  和波谷段特征参数  $a$  的拟合值与计算值对比见图 11~图 12,可见二者吻合较好。

表 6 Y 向第 2 平台放大系数及波谷段特征参数拟合系数表

Table 6 Y-way the second platform amplification factors and fitting coefficients of characteristic parameters of wave valley section

特征参数	地震动幅值 (cm/s <sup>2</sup> )	A	B	C	D	E	F	R <sup>2</sup>
$AF_{T_{34}}$	35	2.370	-0.120	17.740	2.887	-20.304	0.605	0.935
	100	2.880	0.128	17.190	3.513	-21.218	0.529	0.918
	200	5.600	-0.080	17.500	4.863	-24.760	0.410	0.900
$a$	35	-5.560	-0.070	0.160	7.146	0.350	1.026	0.816
	100	1.120	-0.060	0.250	0.691	0.295	0.260	0.765
	200	4.450	-0.300	0.700	2.430	0.267	0.200	0.912

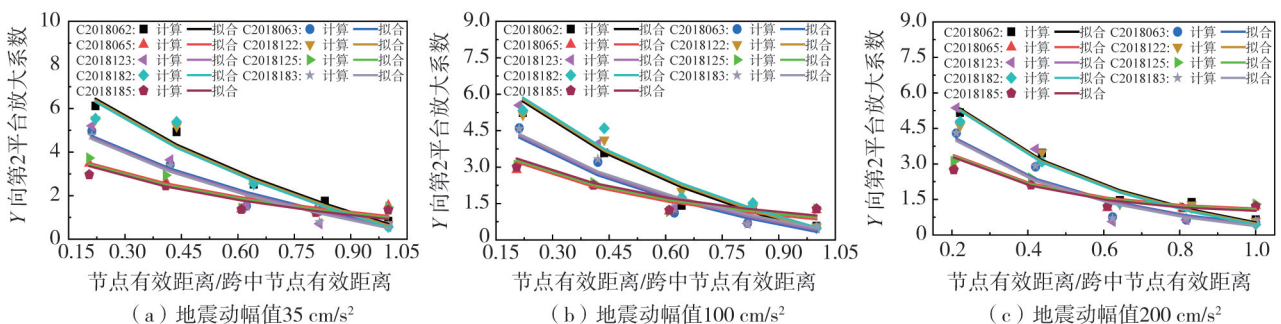


图 11 代表性节点 Y 向第 2 平台放大系数拟合对比

Fig. 11 Fitting comparison of the amplification factors of the second platform in the Y direction of representative nodes

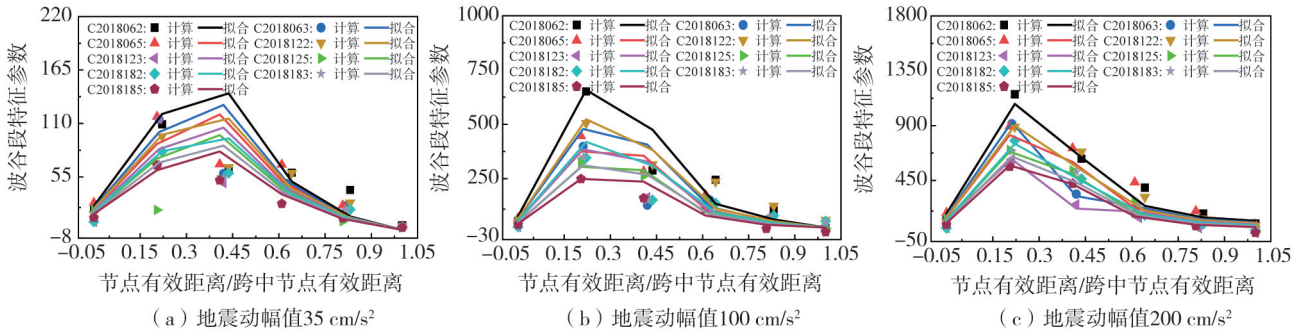


图 12 代表性节点 Y 向波谷段特征参数 a 拟合对比

Fig. 12 Fitting comparison of the characteristic parameter  $a$  of the valley section in the Y direction of representative nodes

4.4 加速度反应谱衰减段特征参数

对 X 向与 Y 向加速度反应谱衰减段特征参数采用多元多项式模型进行拟合,对 Z 向加速度反应谱衰减段特征参数采用多元多项式结合极值模型进行拟合,具体拟合公式如式(18)~式(20)所示:

$$\gamma_x = A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + D \cdot \left(\frac{D_i}{D_{max}}\right) + E \cdot \left(\frac{f}{B} \cdot \frac{D_i}{D_{max}}\right)^F \quad (18)$$

$$\gamma_y = A + B \cdot Q_r + C \cdot \frac{f}{B} + D \cdot \frac{D_i}{D_{max}} + E \cdot \left(\frac{f}{B} \cdot \frac{D_i}{D_{max}}\right)^F \quad (19)$$

$$\lambda = \exp(A + B \cdot Q_r + C \cdot f + D \cdot \exp(-\exp(-z) - z + 1)), z = \left(\frac{D_i}{D_{max}} - E\right) / F \quad (20)$$

拟合所涉及的相关系数见表 7,并发现当  $R^2 \geq 0.75$  时,拟合效果较好。PGA 为 200  $\text{cm/s}^2$  时,代表性节点三向加速度反应谱衰减段参数的拟合值与计算值对比图见图 13,可见二者吻合较好。

同时,经过统计发现支座节点处的 Y 向衰减段特征参数均在 [1.35, 1.6] 内,因此为了提高拟合精度与效率,将其统一取值为 1.5 进行拟合。

表 7 三向衰减段特征参数拟合系数表

Table 7 Fitting coefficients of characteristic parameters of three-way attenuation section

加速度方向	地震动幅值 ( $\text{cm/s}^2$ )	A	B	C	D	E	F	$R^2$
X	35	0.460	0.060	0.168	0.356	-0.290	0.950	0.800
	100	0.860	0.160	0.125	0.480	-2.100	5.400	0.881
	200	0.800	0.400	0.176	0.300	0	0	0.890
Y	35	1.700	-0.010	1.330	-0.833	-2.663	1.078	0.745
	100	1.943	0.324	0.690	-1.230	2.865	1.477	0.834
	200	2.092	-0.010	4.560	1.000	-7.220	0.500	0.924
Z	35	2.900	0.110	-1.350	-3.824	0.157	0.410	0.891
	100	3.630	0.074	-1.330	-3.729	0.155	0.390	0.917
	200	2.911	0.334	-0.153	-3.988	0.174	0.390	0.923

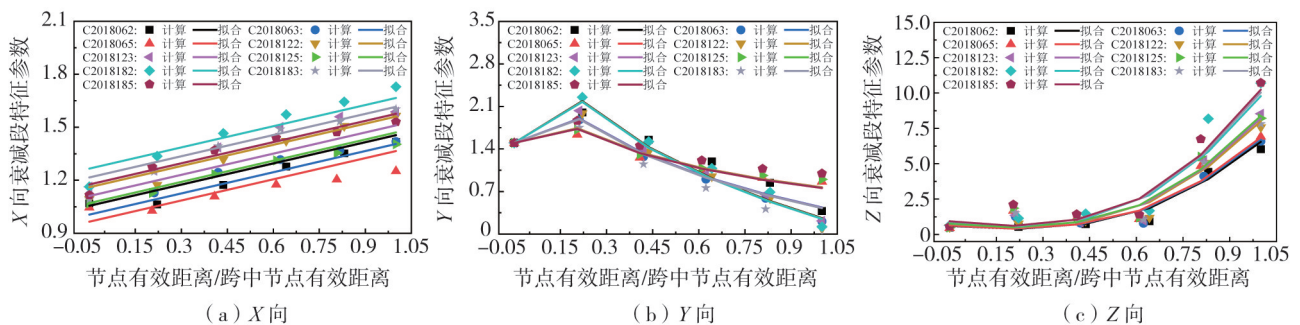


图 13 200  $\text{cm/s}^2$  水平下代表性节点三向衰减参数拟合对比

Fig. 13 Comparison of fitted three-way attenuation parameters for representative nodes under the horizontal acceleration of 200  $\text{cm/s}^2$

## 5 结果与讨论

本文通过数值分析获取了单层柱面网壳结构的节点加速度时程数据,并利用拟合分析获得了适用于单层柱面网壳节点三向加速度反应谱的计算公式。为验证拟合式(5)~式(8)的效果,以  $200 \text{ cm/s}^2$  水平下 C2018062 代表性节点加速度反应谱为例,对比计算值和拟合值见图 14。可见拟合曲线与计算曲线形状和峰值位置吻合较好,同时拟合曲线能够较好的包络计算曲线,验证了本文所提出拟合公式的有效性。

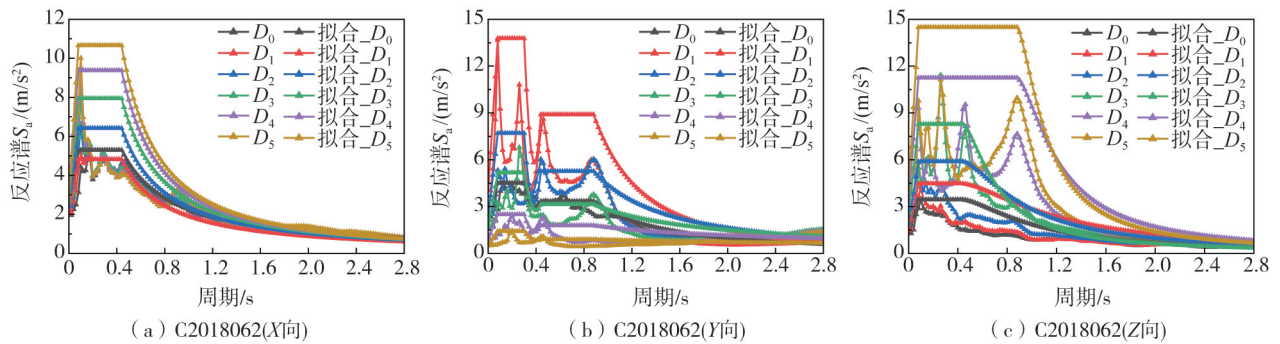


图 14  $200 \text{ cm/s}^2$  水平下 C2018062 代表性节点三向加速度反应谱拟合对比

Fig. 14 Comparison of three-way acceleration response spectra fitted to representative nodes of C2018062 under the horizontal acceleration of  $200 \text{ cm/s}^2$

此外,本文同样建立了联方网格型及双斜杆型 2 种不同网格形式的单层柱面网壳结构,同时经校核后均采用与屋面质量为  $60 \text{ kg/m}^3$ 、矢跨比为 1/2 的 3 向网格型单层柱面网壳结构一致的结构尺寸、杆件尺寸、杆件材料、材料本构关系和地震动输入。提取 3 种不同网格形式单层柱面网壳结构跨中节点处的三向加速度反应谱与对应的节点拟合谱的对比曲线图见图 15。可见拟合曲线与计算曲线形状和峰值位置吻合较好,但对于不同网格形式的节点反应谱峰值大小的拟合工作仍需进一步探索。

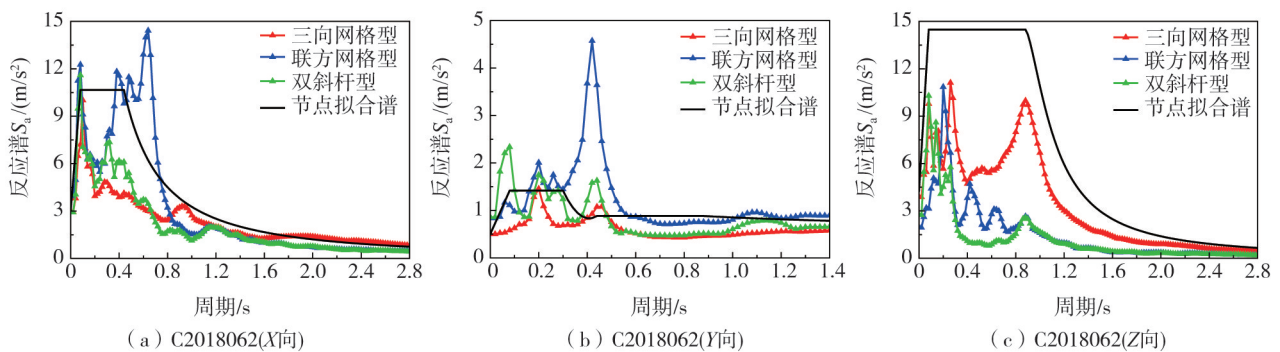


图 15  $200 \text{ cm/s}^2$  水平下 3 种不同网格形式 C2018062 代表性节点三向加速度反应谱与拟合谱对比

Fig. 15 Comparison of three-way acceleration response spectra fitted to representative nodes of C2018062 with three different grid forms under the horizontal acceleration of  $200 \text{ cm/s}^2$

## 6 结论

本文首先建立了单层柱面网壳地震响应分析模型,其中结构参数选取矢跨比(1/2、1/3、1/5)与屋面质量( $60$ 、 $120$ 、 $180 \text{ kg/m}^2$ ),共建立了九类三向网格型单层柱面网壳结构模型;地震动选取 3 个地震动幅值为  $35$ 、 $100$ 、 $200 \text{ cm/s}^2$ ,每个幅值各 7 条地震动,共计 21 条地震动作为输入。

比选确定了单层柱面网壳代表性节点,对其加速度反应谱进行了谱形特征分析,并确立了反应谱的拟合形式、拟合计算公式及其特征参数。在此基础上,通过拟合分析提出了适用于单层柱面网壳结构节点加速度反应谱的简化计算公式,并拟合确定了其特征参数的计算公式。

最后,本文对节点加速度反应谱拟合公式的有效性进行了验证,研究结果可用于单层柱面网壳结构非结

构件地震响应的近似计算。此外,基于代表性节点,探讨了加速度峰值放大系数、谱加速度峰值放大系数与节点有效距离、矢跨比及屋面质量的关系:

1) X向(柱壳长度方向):①加速度峰值放大系数随屋面质量和节点有效距离的增大而增大,随矢跨比的增大先增大后减小,其中矢跨比为1/3时放大系数最大;②谱加速度峰值放大系数随节点有效距离的增大而增大,随屋面质量和矢跨比的增大无明显变化。

2) Y向(柱壳跨度方向):①加速度峰值放大系数随屋面质量的增大而增大,随节点有效距离的增大而减小,随矢跨比的增大先增大后减小,节点有效距离对放大系数的影响降低;②谱加速度峰值放大系数随节点有效距离、屋面质量和矢跨比的增大均无明显变化趋势。

3) Z向:加速度峰值放大系数随屋面质量的增大而增大,矢跨比对放大系数产生显著影响,在矢跨比为1/3和1/5时,放大系数随着节点有效距离的增大先减小后增大,在跨中节点处( $D_i/D_{\max} = 1$ )出现小幅下降现象;在矢跨比为1/2时,放大系数随着节点有效距离的增大而增大。谱加速度峰值放大系数随节点有效距离、屋面质量和矢跨比的增大均无明显变化趋势。

## 参考文献:

- [1] 刘渊,王自法,赵登科.基于新西兰详细地震破坏数据的建筑物构件损失分析[J].地震工程与工程振动,2021,41(5):186-195.  
LIU Yuan, WANG Zifa, ZHAO Dengke. Building component level loss analysis based on detailed earthquake loss data in New Zealand[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 186-195. (in Chinese)
- [2] SAGBAS G, SHEIKHI GARJAN R, SARIKAYA K, et al. Field reconnaissance on seismic performance and functionality of Turkish industrial facilities affected by the 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2024, 22(1): 227-254.
- [3] 黄锐,姚佩歆,黄兆升,等.积石山6.2级地震公共建筑震害及分析[J/OL].建筑结构,DOI:10.19701/j.jzjg.20240452.  
HUANG Rui, YAO Peixin, HUANG Zhaosheng, et al. Seismic damage and analysis of public buildings in the  $M_s$ 6.2 Jishishan earthquake[J]. Building Structure, DOI: 10.19701/j.jzjg.20240452. (in Chinese)
- [4] 潘毅,彭鑫,王腾,等.泸定6.8级地震医疗建筑震害调查与分析[J].建筑结构学报,2024,45(5):14-29.  
PAN Yi, PENG Xin, WANG Teng, et al. Seismic damage investigation and analysis of hospital buildings in Ms 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(5): 14-29. (in Chinese)
- [5] RODGERS J, HASSAN W, MOTTER C, et al. Impacts of the 2018  $M7.1$  anchorage earthquake on schools[J]. Earthquake Spectra, 2021, 37(3): 1849-1874.
- [6] CHEN Z F, LIN X C, LU X Z, et al. Analysis on damage of a RC frame and its non-structural components in the  $M_s$ 6.4 YangBi earthquake[J]. Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics, 2024, 41(1): 138-148.
- [7] SAMADIAN D, EGHBALI M, RAISSIDEHKORDI M, et al. Recovery and reconstruction of schools after  $M7.3$  Ezgeleh-Sarpole-Zahab earthquake of Nov. 2017; part I: Structural and nonstructural damages after the earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 139: 106305.
- [8] WANG T, SHANG Q X, LI J C. Seismic force demands on acceleration-sensitive nonstructural components: A state-of-the-art review[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 20(1): 39-62.
- [9] VUKOBRATOVIĆ V, FAJFAR P. A method for the direct determination of approximate floor response spectra for SDOF inelastic structures[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(5): 1405-1424.
- [10] VUKOBRATOVIĆ V, FAJFAR P. A method for the direct estimation of floor acceleration spectra for elastic and inelastic MDOF structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(15): 2495-2511.
- [11] VUKOBRATOVIĆ V, FAJFAR P. Code-oriented floor acceleration spectra for building structures[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(7): 3013-3026.
- [12] VUKOBRATOVIĆ V, FAJFAR P. Direct floor response spectra for nonlinear nonstructural components[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2024, 22(3): 1033-1053.
- [13] Asgarian A. New methodology to generate floor design spectra (fds) directly from uniform hazard spectra (UHS) for seismic assessment of non-structural components (NSCS) of buildings[D]. McGill University (Canada), Michigan, 2017.
- [14] ASGARIAN A, MCCLURE G. Direct generation of floor design spectra (FDS) from uniform hazard spectra (UHS): Part I: Formulation of the method[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2020, 47(12): 1372-1386.
- [15] ASGARIAN A, MCCLURE G. Direct generation of floor design spectra (FDS) from uniform hazard spectra (UHS): Part II: Extension and application of the method[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2020, 47(12): 1387-1400.
- [16] 党育,谢鹏飞.隔震结构-设备耦合体系的楼面反应谱影响因素分析[J].兰州理工大学学报,2021,47(6):108-114.  
DANG Yu, XIE Pengfei. Analysis of floor response spectrum factors influencing of isolated structure-equipment coupled system[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2021, 47(6): 108-114. (in Chinese)
- [17] 党育,李国宝,谢鹏飞.基础隔震结构的楼面设计反应谱研究[J].振动与冲击,2023,42(7):321-332.

- DANG Yu, LI Guobao, XIE Pengfei. Floor design response spectrum of base-isolated structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(7): 321-332. (in Chinese)
- [18] 李文亮. 屋面系统及悬挂设备对单层球面网壳静动力性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
LI Wenliang. Influence of roofing system and suspended equipment on static and dynamic performance of single layer spherical reticulated shells[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] SHANG Q X, LI H, LI J, et al. Floor response spectra for seismic performance tests of nonstructural components[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2023, 39(4): 350-360.
- [20] 吴治邦, 樊圆, 任祥香, 等. 基于振动台缩尺模型的复杂体型建筑结构楼面加速度反应分布研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2024, 44(2): 10-18.  
WU Zhibang, FAN Yuan, REN Xiangxiang, et al. Research on floor acceleration response distribution of complex building structure based on shaking table scale models[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2024, 44(2): 10-18. (in Chinese)
- [21] 聂桂波, 王薇, 杜柯, 等. 大跨空间结构抗震理论发展综述[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(2): 21-34.  
NIE Guibo, WANG Wei, DU Ke, et al. A review and prospect of the seismic design theory for large span spatial structures[J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(2): 21-34. (in Chinese)
- [22] GB/T 50011—2010 建筑抗震设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB/T 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [23] 王江滨. 高烈度区大跨空间网架结构的地震响应特征与减震应用技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.  
WANG Jiangbin. Study on seismic response characteristics and damping application of large space grid structure in high intensity area[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese)
- [24] 尚玉珠. 地震作用下单层柱面网壳的支承结构及填充墙效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
SHANG Yuzhu. Study on the support structure and infilled wall effect of single-layer cylindrical reticulated shell subjected to earthquakes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [25] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
JGJ 7—2010 Technical specification for space frame structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [26] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [27] 聂桂波, 支旭东, 尚玉珠, 等. 考虑下部支承效应的单层柱面网壳结构抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(增刊1): 10-16.  
NIE Guibo, ZHI Xudong, SHANG Yuzhu, et al. Seismic performance of single-layer cylindrical latticed shell considering effect of lower supporting structure[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup. 1): 10-16. (in Chinese)