

文章编号:1673-2049(2007)02-0013-06

# 单层球面网壳的最不利简单动荷载分析

苑宏宇<sup>1,2</sup>, 叶继红<sup>1</sup>, 沈世钊<sup>3</sup>, 单建<sup>1</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 北京首都工程建筑设计有限公司南京分公司, 江苏 南京 210018; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**同时考虑了几何非线性与材料非线性, 分别对简谐荷载、阶跃荷载作用下的单层球面网壳进行了最不利动荷载分析; 通过变换简谐荷载的频率和阶跃荷载的持时, 明确了结构动力响应与其自振特性及荷载频谱特性之间的关系, 确定了何种条件下的荷载为结构最不利动荷载。结果表明: 无论是水平还是竖向简谐荷载, 当激励荷载频率与激励作用方向最大振型参与系数所对应的固有频率接近时, 为结构的最不利动荷载; 无论是水平还是竖向阶跃荷载, 当荷载持时为荷载作用方向最大振型参与系数所对应的固有周期的 1/2 时, 为结构的最不利动荷载。

**关键词:**单层球面网壳; 简谐荷载; 阶跃荷载; 最不利动荷载; 极限荷载; 动力响应

**中图分类号:** TU311 **文献标志码:** A

## Analysis of the Most Unfavorable Simple Dynamic Loads for Single-layer Spherical Latticed Shells

YUAN Hong-yu<sup>1,2</sup>, YE Ji-hong<sup>1</sup>, SHEN Shi-zhao<sup>3</sup>, SHAN Jian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Nanjing Branch of Beijing Capital Engineering Architectural Design Ltd, Nanjing 210018, Jiangsu, China;

3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Through simultaneously considering geometric non-linear and material non-linear, the dynamic responses of single-layer spherical latticed shells subjected to harmonic loads and step loads were researched respectively, and the most unfavorable dynamic loads of the structure were analyzed. Under the analysis of dynamic behavior of single-layer spherical latticed shells subjected to harmonic loads with different frequency and step loads with different duration, the relationships between the structural dynamic response and its self vibration characteristic, as well as the load frequency characteristic were built up, by which the most unfavorable loads of single-layer spherical latticed shells were determined. The results show that under either horizontal harmonic loads or vertical harmonic loads, when the excitation load frequency is closed to the natural frequency which corresponds to the largest vibration mode participation coefficient in the direction of excitation, the limit harmonic load is the lowest; when the duration of step load is closed to the half of natural period which is versus the largest modes of vibration participation coefficient in the direction of excitation, the limit step load is the lowest.

**Key words:** single-layer spherical latticed shell; harmonic load; step load; the most unfavorable dynamic load; limit load; dynamic response

收稿日期: 2007-02-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50338010)

作者简介: 苑宏宇(1979-), 女, 河北故城人, 东南大学工学硕士研究生, E-mail: zxfhappy2002@sohu.com。

0 引言

网壳结构因其受力合理、用料经济、造型美观多样、能覆盖较大的空间,已成为发展前景广阔的一种空间结构形式。尤其是近10 a来,网壳结构的应用日益增多,且结构形式逐渐多样化,跨度也越来越大,为此学者们对这类结构进行了广泛的研究<sup>[1-3]</sup>。

网壳结构的折算厚度相对于跨度较小,是一种缺陷敏感性结构,几何非线性是计算中必须考虑的因素<sup>[4-5]</sup>;在计算地震及其他一些反复荷载对结构的作用时,仅考虑材料处于弹性状态是不准确的,也是不经济的,因此,笔者在计算过程中同时考虑了几何非线性和材料非线性。对于荷载而言,简谐荷载和阶跃荷载是各种动力荷载的基本成分,如地震作用及其他复杂动力荷载均可以分解为不同频率和振幅的简谐荷载与阶跃荷载的组合,因此,本文中选取简谐荷载、阶跃荷载作为基本的动荷载进行单层球面网壳结构的最不利动荷载分析是具有代表性的。通过对不同频率的简谐荷载和不同持时的阶跃荷载作用下结构动力响应的研究,建立了结构动力响应与其自振特性及荷载频谱特性之间的关系。

1 简谐荷载下的动力响应分析

本文中以跨度为40 m的 K8 型单层球面网壳结构为例<sup>[6]</sup>,矢跨比为 1/5、1/7,主肋杆件及环向杆件均采用  $\Phi 121 \times 3.5$  钢管,腹杆采用  $\Phi 114 \times 3$  钢管,支座为三向不动铰支座,分布在网壳最外环的每一节点处,承受的均布荷载为  $2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。采用大型有限元分析软件 ANSYS<sup>[7]</sup>对网壳结构进行简谐荷载、阶跃荷载下的动力响应分析,杆件采用三节点的梁单元(Beam189)。材料为 Q235 钢(屈服强度  $\sigma_s = 2.35 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,破坏强度  $\sigma_u = 3.75 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,弹性模量  $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$ )。为与实际情况更接近,采用考虑了 Bauschinger 效应的 Mises 随动强化模型。Rayleigh 阻尼比为0.02时,可不考虑结构的初始缺陷。

1.1 线性响应分析

对单层球面网壳分别施加水平和竖向正弦荷载( $P_0 \sin 2\pi ft$ ),荷载振幅  $P_0 = 100 \text{ kN}$ ,激励荷载频率从0.2 Hz递增到12 Hz,每递增0.2 Hz计算 1 次结构的线性动力响应。由于结构各节点的规律相同,笔者以结构中的某个节点为例,其节点位移与激励荷载频率的关系曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出,不同激励荷载频率的水平或

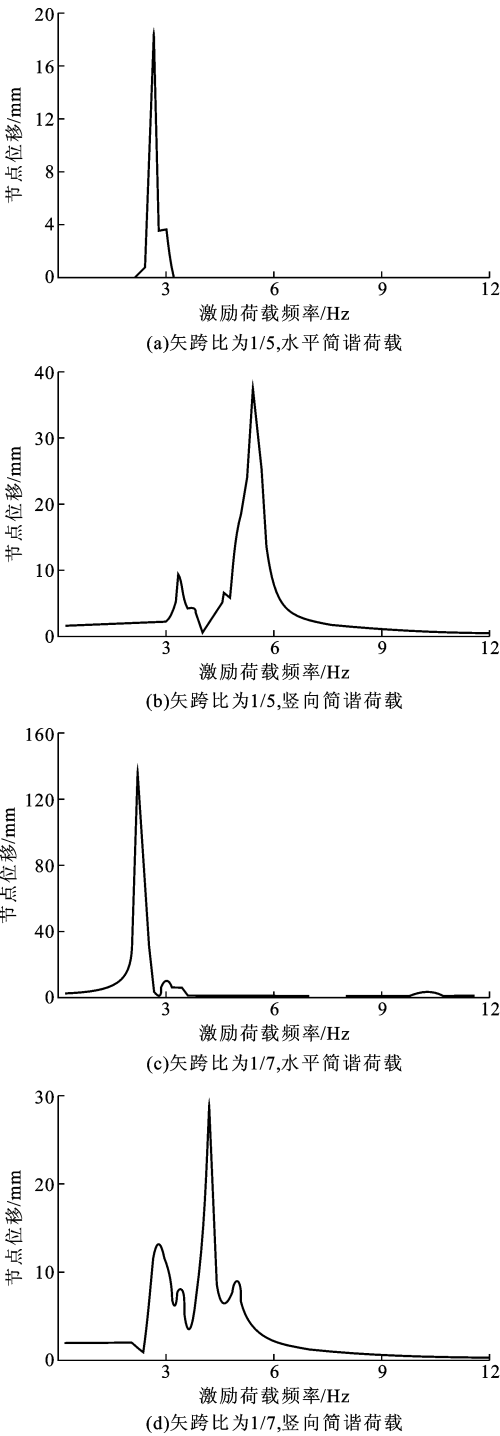


图 1 节点位移与激励荷载频率的关系  
Fig. 1 Relation Between Joint Displacements and Excitation Load Frequencies

竖向简谐荷载作用于结构时,结构都存在明显的共振区域。为说明结构发生共振时激励荷载频率与结构固有频率的关系,本文中选取单层球面网壳结构固有频率小于12 Hz,且水平和竖向振型参与系数不同时为 0 的 11 阶振型,各阶振型的频率及其振型参与系数见表 1。

表 1 矢跨比为 1/5、1/7 时结构振型频率和振型参与系数  
Tab.1 Structural Vibration Mode Frequencies  
and Vibration Mode Participation Coefficients  
Under 1/5 and 1/7 Rise-span Ratio

矢跨比	振型阶数	振型频率/Hz	水平振型 参与系数	竖向振型 参与系数
1/5	1	2.61	0.13	0.00
	7	2.97	0.05	0.00
	19	3.15	0.03	0.00
	22	3.25	0.00	0.01
	38	3.52	0.00	0.01
	48	3.72	0.01	0.00
	95	4.63	0.00	0.05
	111	4.93	0.00	0.02
	115	5.03	0.00	0.01
	121	5.46	0.00	0.72
	124	10.14	0.02	0.00
1/7	1	2.20	0.10	0.00
	5	2.45	0.05	0.00
	18	2.65	0.03	0.00
	19	2.68	0.00	0.02
	31	2.97	0.00	0.01
	36	3.03	0.00	0.01
	53	3.37	0.00	0.01
	85	4.18	0.00	0.68
	96	4.51	0.00	0.09
	114	4.86	0.00	0.01
	124	10.41	0.04	0.00

对比图 1 与表 1 可知,水平简谐荷载作用下,矢跨比为 1/5、1/7 的单层球面网壳共振区域均只有 1 个,如图 1(a)、(c) 所示,振型频率分别以 2.6、2.2 Hz 为中心,其中 2.6、2.2 Hz 分别为矢跨比 1/5、1/7 网壳结构的第 1 阶最大水平振型参与系数所对应的频率。竖向简谐荷载作用下,结构的共振区域有 2 个或更多,其中心为前几阶最大竖向振型参与系数所对应的频率,且竖向振型参与系数越大,结构的共振区峰值响应越高;在图 1(b)中,结构在振型频率为 3.2、4.6、5.4 Hz 附近形成共振区,尤其在振型频率为 5.4 Hz 的共振区,因与最大竖向振型参与系数所对应的固有频率  $f=5.46$  Hz 接近,故结构的动力响应最强烈;在图 1(d)中,结构在振型频率为 2.6、3.4、4.2 Hz 附近形成共振区,而振型频率为 4.2 Hz 的共振区因与最大竖向振型参与系数的固有频率  $f=4.18$  Hz 相接近,故结构的动力响应最强烈。

1.2 考虑双非线性的最不利动荷载分析

根据网壳结构的线性响应分析结果可知:矢跨

比为 1/5 的结构选取水平简谐荷载的振型频率为 1.3、2.6、3.0、5.2 Hz,竖向简谐荷载的振型频率为 1.7、3.4、4.0、5.4、6.8、10.8 Hz;矢跨比为 1/7 的结构选取水平简谐荷载下的振型频率为 1.1、2.2、3.0、4.4 Hz,竖向简谐荷载的振型频率为 1.4、2.8、3.2、4.2、5.6、8.4 Hz。上述频率既有共振频率,亦有非共振频率,同时还有可能发生参数共振的频率。

以跨度为 40 m、矢跨比为 1/5 的 K8 型单层球面网壳在固有频率  $f=2.6$  Hz 的水平简谐荷载作用下的双非线性动力响应分析为例。图 2 为结构最大节点位移随荷载幅值的变化曲线。由图 2 可以看出:当作用结构的荷载幅值  $P\leq 4.5$  kN 时,随着荷载幅值  $P$  的增大,结构各节点的位移有所增大,但增加幅度有限,结构进入新的平衡位置且围绕该平衡位置稳定振动;当荷载幅值  $P$  增大到 4.6 kN 时,随着荷载作用时间的增加,结构凹陷区的深度及凹陷区区域的面积会迅速扩大,直至结构发生倒塌破坏,因此,本文中算例的极限荷载定义为  $P=4.5$  kN,其他算例的极限荷载也据此定义。

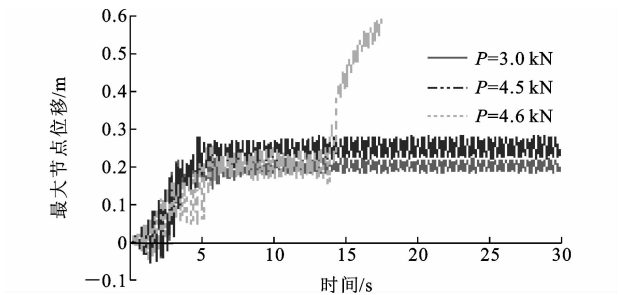


图 2  $f$  为 2.6 Hz 时最大节点位移时程  
Fig.2 Time-history of Utmost Joint Displacement  
Under  $f=2.6$  Hz

简谐荷载下单层球面网壳的动力响应分析结果见表 2。图 3 为矢跨比为 1/5、1/7 的单层球面网壳的极限荷载与激励荷载频率的关系。

考虑结构的非线性,其刚度随着加载历程不断变化,结构不存在传统意义上的振型和频率。由表 2、图 3 可以看出:结构非线性分析结果与线性响应分析结果具有较好的对应关系,共振区内的激励荷载频率引起的结构动力响应较大,此时结构对应较小的极限荷载;与共振区内的激励荷载频率相比,共振区外包括参数共振区的激励荷载频率引起的结构动力响应较小,此时结构对应较大的极限荷载。由此可知,线性响应的峰值越高,所对应的结构非线性极限荷载越低,并且线性响应的峰值和振型参与系数的大小密切相关。

表 2 矢跨比为 1/5、1/7 时简谐荷载下结构的极限荷载  
Tab.2 Limit Loads of Structure Under Harmonic Loads and  
1/5 and 1/7 Rise-span Ratio

矢跨比	荷载类型	激励荷载频率/Hz	极限荷载/kN
1/5	水平简谐	1.3(参数共振区)	24.5
		2.6(共振区内)	4.5
		3.0(共振区内)	9.6
		5.2(共振区外)	37.2
	竖向简谐	1.7(共振区外)	33.0
		3.4(共振区内)	7.4
		4.0(共振区内)	14.6
		5.4(共振区内)	6.0
		6.8(共振区内)	22.0
		10.8(共振区外)	105.0
1/7	水平简谐	1.1(参数共振区)	10.5
		2.2(共振区内)	1.1
		3.0(共振区内)	7.4
		4.4(共振区外)	21.0
	竖向简谐	1.4(共振区外)	15.7
		2.8(共振区内)	6.3
		3.2(共振区内)	7.2
		4.2(共振区内)	3.2
		5.6(共振区内)	17.6
		8.4(共振区外)	56.5

2 阶跃荷载下的动力响应分析

2.1 线性响应分析

对于无阻尼单自由度体系,当如图 4 所示的阶跃荷载作用于结构时,结构动力响应随着阶跃荷载持时与结构固有周期的比而变化。结构的动力放大系数  $D$  为<sup>[8]</sup>

$$D=\begin{cases} 2\sin \frac{\pi t}{T} & \frac{t}{T}<\frac{1}{2} \\ 2 & \frac{t}{T}\geq\frac{1}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t$  为阶跃荷载持时; $T$  为结构固有周期。

根据式(1),选取不同的荷载持时分别对矢跨比为 1/5、1/7 的 K8 型单层球面网壳进行水平与竖向阶跃荷载的线性分析。所选用的荷载持时包含了  $t<T/2$ 、 $t=T/2$ 、 $t>T/2$  三个区域。矢跨比为 1/5 的单层球面网壳,水平阶跃荷载时,选取第 1 阶和第 7 阶振型周期,振型参与系数分别为 0.13、0.05;竖向阶跃荷载时,选取第 95 阶和第 121 阶振型周期,振型参与系数分别为 0.05、0.72。矢跨比为 1/7 的单层球面网壳,水平阶跃荷载时,选取第 1 阶和第 5 阶振型周期,振型参与系数分别为 0.10、0.05;竖向

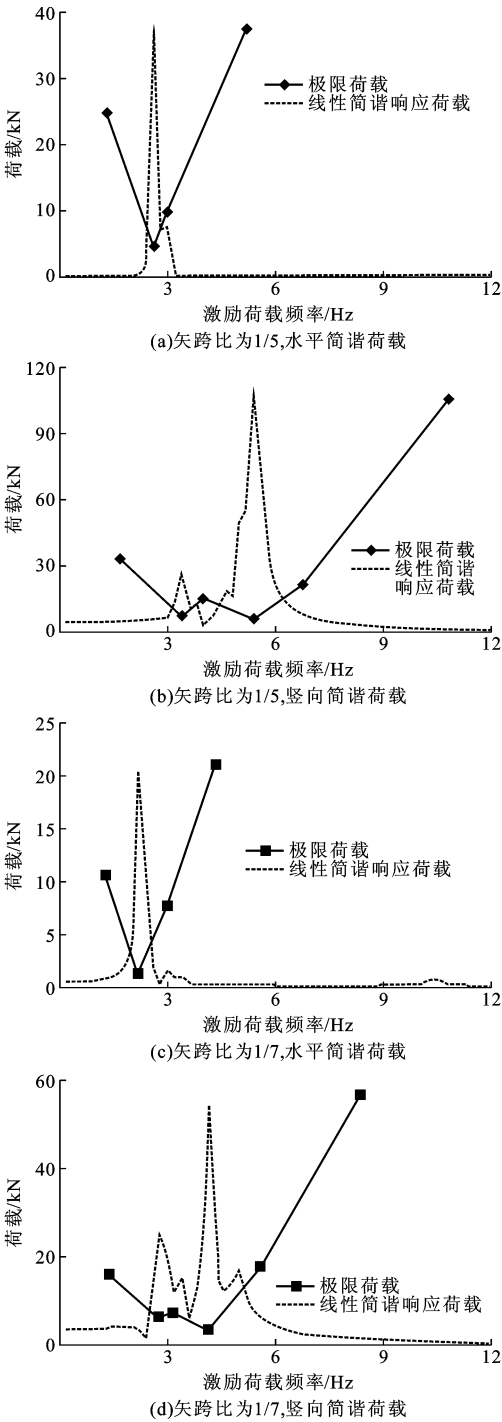


图 3 结构荷载与激励荷载频率的关系  
Fig.3 Relation Between Load and Excitation  
Load Frequency of Structure

阶跃荷载时,选取第 85 阶和第 96 阶振型周期,振型参与系数分别为 0.68、0.09。图 5 为结构在所选取的不同持时阶跃荷载作用下的位移时程曲线。

对于网壳这种多自由度结构体系,结构动力响应与阶跃荷载持时及结构固有周期比值  $t/T_i$  ( $T_i$  为结构第  $i$  阶振型的自振周期) 存在着明确的关系:无论是水平还是竖向阶跃荷载,当阶跃荷载持时  $t =$

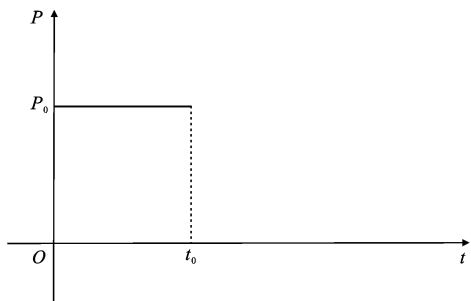


图 4 阶跃荷载

Fig. 4 Step Load

$T_i/2$  时,结构发生较大的动力响应;当阶跃荷载持时分别小于  $T_i/2$  或大于  $T_i/2$  时,结构的动力响应明显减弱。

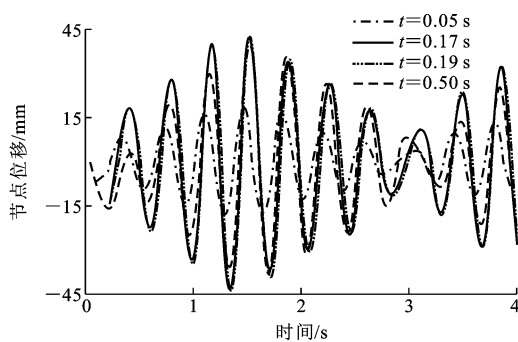
### 2.2 考虑双非线性的最不利动荷载分析

以跨度为 40 m、矢跨比为 1/5 的 K8 型单层球面网壳在阶跃荷载持时  $t=0.05$  s 的竖向阶跃荷载作用下的双非线性动力响应分析为例。图 6 为结构最大节点位移时程的变化曲线。由图 6 可以看出:当竖向阶跃荷载幅值  $P \leq 55.8$  kN 时,结构处于稳定状态;当竖向阶跃荷载幅值  $P$  增加到 55.9 kN 时,结构已因倒塌而失效。故本文算例中,结构的极限荷载定义为  $P=55.8$  kN,其他算例的极限荷载也据此定义。

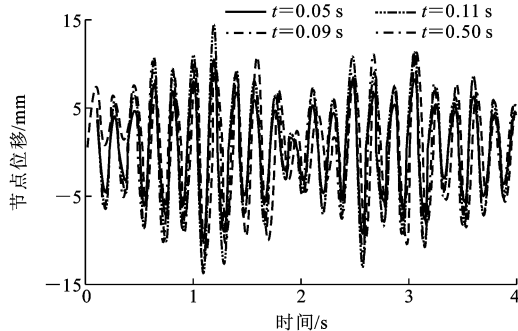
阶跃荷载下单层球面网壳的动力响应分析结果见表 3。考虑结构的非线性,其刚度随着加载历程不断变化,结构不存在传统意义上的振型和频率。由表 3 可以看出:结构非线性分析结果与线性阶跃荷载分析结果存在较好的对应关系,无论是水平阶跃荷载还是竖向阶跃荷载,当阶跃荷载持时等于荷载作用方向最大振型参与系数所对应的固有周期的  $1/2$  时,引起的结构动力响应最大,此时结构的极限承载力最小。与简谐荷载相一致,当阶跃荷载持时等于结构某一固有周期的  $1/2$  时,该周期所对应的振型参与系数越大,则结构在该方向阶跃荷载下的极限荷载越小。

## 3 结 语

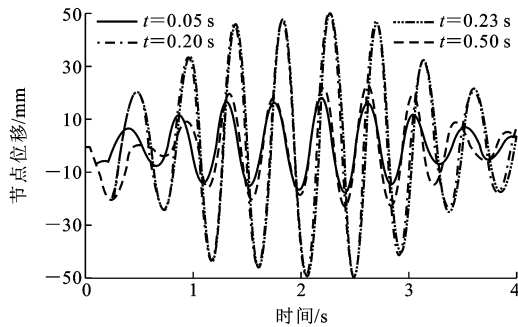
(1)由简谐荷载的线性响应分析可知:结构存在明显的共振区域:水平简谐荷载作用下,共振区域只有 1 个,且以第 1 阶最大水平振型参与系数所对应的频率为中心;竖向简谐荷载作用下,共振区域有 2 个或更多,其中心为前几阶最大竖向振型参与系数所对应的频率,且振型参与系数越大,其共振区峰值响应越高。



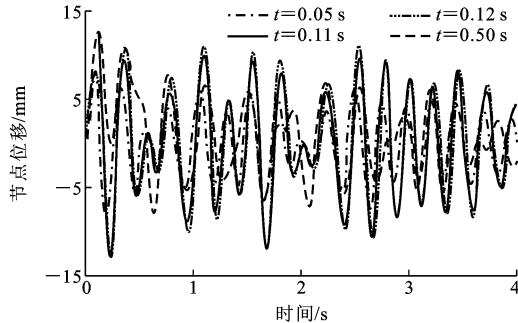
(a)矢跨比为1/5,水平阶跃荷载



(b)矢跨比为1/5,竖向阶跃荷载



(c)矢跨比为1/7,水平阶跃荷载



(d)矢跨比为1/7,竖向阶跃荷载

图 5 阶跃荷载作用下的位移时程

Fig. 5 Time-histories of Displacement Under Step Loads

(2)由简谐荷载的非线性分析可知:当激励荷载频率与激励作用方向较大振型参与系数所对应的振型频率相接近时,结构动力响应较大,结构具有较小的极限荷载,反之,结构具有较大的极限荷载。无论是水平还是竖向简谐荷载作用于结构,当激励荷载频率与激励作用方向最大振型参与系数所对应的固

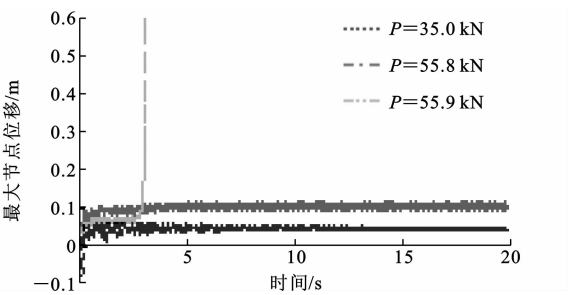


图 6 结构最大节点位移时程

Fig. 6 Time-history of Utmost Joint Displacement of Structure

表 3 矢跨比为 1/5、1/7 时阶跃荷载下结构的极限荷载  
Tab. 3 Limit Loads of Structure Under Step Loads and Rise-span Ratio 1/5 and 1/7

矢跨比	荷载类型	荷载持时/s	极限荷载/kN
1/5	水平阶跃	0.05( $t < T/2$ )	36.5
		0.17( $t = T/2$ )	10.9
		0.19( $t = T/2$ )	3.9
		0.50( $t > T/2$ )	16.1
	竖向阶跃	0.05( $t < T/2$ )	55.8
		0.09( $t = T/2$ )	10.2
		0.11( $t = T/2$ )	14.6
		0.50( $t > T/2$ )	22.2
1/7	水平阶跃	0.05( $t < T/2$ )	22.5
		0.20( $t = T/2$ )	8.3
		0.23( $t = T/2$ )	3.5
		0.50( $t > T/2$ )	14.9
	竖向阶跃	0.05( $t < T/2$ )	31.3
		0.11( $t = T/2$ )	7.3
		0.12( $t = T/2$ )	4.8
		0.50( $t > T/2$ )	11.7

有频率接近时,结构动力响应最强烈,所对应的极限荷载最小,为结构的最不利荷载。

(3)由阶跃荷载的线性分析可知:对于单层球面网壳这种多自由度结构体系,无论是水平还是竖向阶跃荷载作用于结构,当荷载持时  $t = T/2$  时,结构发生最大的动力响应;当荷载持时  $t < T/2$  或  $t > T/2$  时,结构的动力响应明显减弱。

(4)由阶跃荷载的非线性分析可知:当荷载持时  $t$  等于荷载作用方向较大振型参与系数所对应的固有周期的 1/2 时,结构动力响应较大,结构极限承载力较小;当荷载持时  $t$  小于  $T/2$  或大于  $T/2$  时,结构动力响应明显减弱,结构极限承载力明显提高。无论是水平还是竖向阶跃荷载作用于结构,当荷载持时为荷载作用方向最大振型参与系数所对应的固有周期的 1/2 时,结构动力响应最强烈,所对应的极

限荷载最小,其为结构的最不利荷载。

参考文献:

References:

[1] 沈世钊,陈 昕.网壳结构稳定性[M].北京:科学出版社,1999.  
SHEN Shi-zhao, CHEN Xin. Stability of Spherical Shell Structure[M]. Beijing: Science Press, 1999.

[2] 楼梦麟,邸 龙.考虑土-结构相互作用双层柱面网壳在多点输入下的地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2006,26(3):228-231.  
LOU Meng-lin, DI Long. Seismic Response Analysis of Double-layer Cylindrical Reticulated Shell Under Multiple-support Excitations Considering Dynamic Soil-structure Interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 228-231.

[3] 支旭东,范 峰,沈世钊.简谐荷载下单层球面网壳动力失效机理研究[J].地震工程与工程振动,2005,25(4):76-84.  
ZHI Xu-dong, FAN Feng, SHEN Shi-zhao. Failure Mechanism of Latticed Shells Subjected to Harmonic Actions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 76-84.

[4] 郭海山,沈世钊.单层网壳结构动力稳定性分析方法[J].建筑结构学报,2003,24(3):1-9.  
GUO Hai-shan, SHEN Shi-zhao. Analysis Method of Dynamic Stability of Single-layer Spherical Shells[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(3): 1-9.

[5] 沈世钊,支旭东.球面网壳结构在强震下的失效机理[J].土木工程学报,2005,38(1):11-20.  
SHEN Shi-zhao, ZHI Xu-dong. Failure Mechanism of Spherical Shells Subjected to Dynamic Loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 11-20.

[6] 包 伟,叶继红,沈世钊.基于响应面法的单层球壳简谐荷载下的破坏形式判别[J].建筑科学与工程学报,2007,24(1):7-11.  
BAO Wei, YE Ji-hong, SHEN Shi-zhao. Failure Types Identification of Single-layer Spherical Shells Under Harmonic Loads Based on Response Surface Method [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 7-11.

[7] 刘 涛,杨凤鹏.精通 ANSYS[M].北京:清华大学出版社,2002.  
LIU Tao, YANG Feng-peng. Master ANSYS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[8] CLOUGH R W, PENZIEN J. Structure Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1981.