

两种典型空间结构多维多点激励下抗震分析

白凤龙^{*1,2}, 李宏男¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连市建筑科学研究设计院股份有限公司, 辽宁 大连 116021)

摘要: 采用三角级数法模拟生成满足给定的相干函数和考虑三维地震分量相关性的非平稳人造地震动, 基于直接输入位移法建立了地震动多维多点激励时程分析模型, 选取两种典型大跨度空间结构为研究对象, 分别计算分析了两种结构在地震动一维一致激励、一维多点激励和多维多点激励下的反应, 并对多维多点激励下不同视波速情况引起的结构反应进行了对比分析. 分析结果表明: 地震动多点激励下两类结构大多数杆件的最大受力大于一致激励作用, 多维多点激励下杆件内力计算结果与单维多点激励下的结果变化规律基本相似, 单维多点激励给出偏于不安全的结果, 不同的地震波视波速情况多维多点激励作用对大跨度结构地震反应影响很大.

关键词: 空间结构; 多维多点激励; 抗震分析; 相干函数
中图分类号: TU393.3 **文献标志码:** A

0 引言

大跨度空间结构作为重要的公众设施, 世界各国一直都十分重视其抗震性能的研究. 理论研究和震害经验都表明, 地震时的地面运动是复杂的多维运动, 严格说来有 6 个分量, 即 3 个平动分量和 3 个转动分量. 对于重要或者复杂的结构, 仅考虑一维地震作用是不够的, 应该考虑多维地震动的联合作用. 而对于大跨度空间结构, 地震动的空间变化不可避免, 因而假定结构不同支承点处的地震输入相同是不符合实际的, 地震动的空间变化对结构抗震性能有何影响必然成为工程中急需解决的问题. 作为大跨度结构抗震分析最基础的问题, 地震动的多点激励存在较大的误差和不确定性^[1]. 如何在大跨度空间结构的工程设计中考虑地震动多维多点激励的影响, 仍然是该领域中需要进一步深入研究的课题.

基于以上研究背景, 选取在工程实际中被广泛应用的大跨度空间网架结构和双层柱面网壳结构为研究对象, 首先基于三角级数法模拟生成满

足给定相干函数和考虑三维地震分量相关性的非平稳人造地震动, 然后计算分析两种典型空间结构在地震动一维一致激励、一维多点激励和多维多点激励下的反应, 并对多维多点地震动激励不同视波速情况进行比较, 以期为大跨度结构的抗震设计提供参考.

1 多维多点激励地震波的模拟及地震动参数的选取

1.1 多维多点激励地震波的模拟

采用三角级数法模拟生成满足给定相干函数和考虑三维地震分量相关性的非平稳人造地震动. 一维地面运动 n 个测点的平稳地震动可以用加速度功率谱密度矩阵表示为

$$S(\omega) = \begin{pmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$S_{ij}(\omega) = \sqrt{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega)} |\gamma_{ij}(\omega)| \exp(-i\omega d_{ij}/v) \quad (2)$$

式中: $S_{ii}(\omega)$ 表示点*i*的自功率谱密度; $S_{ij}(\omega)$ 表示点*i*和点*j*之间的互功率谱密度; $\gamma_{ij}(\omega)$ 为相干函数,其模反映了点*i*和点*j*的相干程度;式(2)的指数项反映了地震波视波速为*v*的行波效应。

由于地震动转动分量的复杂性,而且缺乏可供实际应用的转动分量的观测资料^[2,3],文中的地震动仅考虑3个平动分量,即2个水平分量和1个竖直分量.在一维模型的基础上,考虑三维各分量间的互相关性,可得到如下任意点*i*的加速度功率谱密度矩阵:

$$\mathbf{S}_i(\omega) = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:*x*和*y*代表水平分量;*z*代表竖直分量。

对于两水平分量,自谱取为相同值,并认为它们完全相关,这样自谱和互谱密度函数取为相同的表达式:

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= S_{yy}(\omega) = \sqrt{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} = \\ S_{xy}(\omega) &= S_{yx}(\omega) \end{aligned} \quad (4)$$

两水平分量与竖直分量间的互谱为^[4]

$$\begin{aligned} S_{xz}(\omega) &= S_{yz}(\omega) = S_{zx}(\omega) = S_{zy}(\omega) = \\ 0.6 \sqrt{S_{xx}(\omega)S_{zz}(\omega)} &= \\ 0.6 \sqrt{S_{yy}(\omega)S_{zz}(\omega)} \end{aligned} \quad (5)$$

考虑三维分量相关性和各支承点地震动相干性的多维多点地震动加速度功率谱密度矩阵 $\mathbf{S}^0(\omega)$,就是将一维地震分量加速度功率谱密度矩阵式(1)按式(3)的三维地震分量功率谱矩阵进行扩展。

进行Cholesky分解, $\mathbf{S}^0(\omega)$ 可分解为以下两项的乘积:

$$\mathbf{S}^0(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{H}^{\text{T}*}(\omega) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H}^{\text{T}*}(\omega)$ 是 $\mathbf{H}(\omega)$ 的转置共轭矩阵; $\mathbf{H}(\omega)$ 的各个元素可写成如下形式:

$$H_{jm}(\omega) = |H_{jm}(\omega)| \exp[j\theta_{jm}(\omega)]; j > m \quad (7)$$

其中

$$\theta_{jm}(\omega) = \arctan \left(\frac{\text{Im}[H_{jm}(\omega)]}{\text{Re}[H_{jm}(\omega)]} \right) \quad (8)$$

则生成*n*个测点3个方向分量的平稳地震动可以由下式来模拟:

$$f_j(t) = 2 \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_l)| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_l t -$$

$$\theta_{jm}(\omega_l) + \varphi_{ml}];$$

$$j = 1, 2, \dots, n; N \rightarrow \infty \quad (9)$$

式中: $\Delta\omega = \omega_{\max}/N$; φ_{ml} 是均匀分布于 $[0, 2\pi)$ 的随机相位角.非平稳地震动可用上述方法模拟生成的平稳地震动 $f_j(t)$ 乘以强度包络函数的形式表示:

$$g_j(t) = f_j(t) \cdot \xi(t) \quad (10)$$

模拟中强度包络函数取为如下的形式:

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2; & t < t_1 \\ 1; & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \exp[-c(t-t_2)]; & t > t_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中:*c*为衰减系数; t_1 和 t_2 分别为主震平稳段的首末时间。

1.2 地震动参数的选取

自功率谱密度初值采用修正的Clough-Penzien谱^[5]:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2} \times \\ &\frac{\omega^4}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_1^2\omega_1^2\omega^2} S_0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: S_0 为谱强度因子; ξ_g 和 ω_g 分别为地基土的阻尼比和卓越频率; ξ_1 和 ω_1 是滤波参数.场地抗震设防烈度为8度,II类场地土,罕遇地震作用,地震分组为第3组,水平地震动参数取值为^[6] $\xi_g = 0.792$, $\omega_g = 16.498 \text{ rad/s}$, $\xi_1 = 0.626$, $\omega_1 = 0.322 \text{ rad/s}$, $S_0 = 277.576 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$.竖向地震动各参数根据与水平地震动各参数的关系进行取值,根据文献^[7]中的研究:

$$\omega_{gv} = 1.58\omega_{gh}; \zeta_{gv} = \zeta_{gh}; S_{0v} = 0.281S_{0h} \quad (13)$$

地震动场的相干函数采用Hao等提出的模型^[8],表达式为

$$\begin{aligned} |\gamma(\omega, d_{ij})| &= \exp(-\beta d_{ij}) \times \\ &\exp[-\alpha(\omega) \sqrt{d_{ij}}(\omega/2\pi)^2] \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$\alpha(\omega) = 2\pi a/\omega + b\omega/2\pi + c \quad (15)$$

d_{ij} 为支承处两点*i*和*j*在波传播方向上的投影距离,这里采用由SMART-1台阵的45号地震记录得到的回归系数,取值分别为^[8] $\beta_1 = 1.109 \times 10^{-4}$, $a_1 = 3.853 \times 10^{-3}$, $b_1 = -1.811 \times 10^{-5}$, $c_1 = 1.177 \times 10^{-4}$.

考虑地震动的强度非平稳性,选取式(11)所示的三段式强度包络函数,各参数取值为^[9] $t_1 = 0.8\text{ s}, t_2 = 7.0\text{ s}, c = 0.35$.

2 多维多点激励时程反应分析模型

考虑到对于大跨度结构的抗震分析,在支承处输入地震动的位移时程更加方便合适,这里的多点激励采用输入位移时程进行分析,可根据三角级数法合成各个支承点各个方向地震分量的加速度

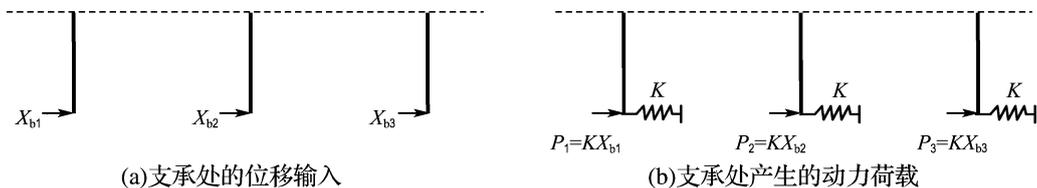


图 1 多点激励时程分析实现过程

Fig. 1 Realization process of time history analysis under multi-support excitations

3 地震反应分析实例

为了考察地震动多维输入和多点激励对文中两种典型空间结构的影响,首先分别进行了两种结构在一维地震动一致激励和多点激励以及三维多点激励下的内力反应分析,这里的一维地震激励方向与地震波传播方向相同,多点激励情况的视波速取为结构所在场地地震波视波速下限 250 m/s;然后全面分析了不同地震波视波速情况下三维多点地震动作用对两种结构内力反应的影响,视波速分别取为 250、500、800 m/s 和无穷大,视波速取为无穷大时即为不考虑行波效应的情况.每一种地震激励工况分别生成 10 组地震动时程进行输入,结构反应取 10 次内力反应的平均值.限于篇幅,这里仅给出部分结构杆件内力反应的计算结果.

3.1 空间网架结构

大跨度空间网架结构的计算模型主要由上部平板网格结构和下部支承柱结构两部分组成,整个结构共有 1 993 个节点单元,7 696 个杆件单元.网格结构的形式为正放四角锥形,平面尺寸为 124 m×124 m,厚度 4 m;结构下部采用 8 柱支承,支承柱高 10 m,相邻柱子间距为 40 m,柱子支承形式和布置位置如图 2 所示,表 1 给出了网

时程曲线通过二次积分转换为输入的位移时程曲线.Fenves^[10]提出在结构的支承处底部的地震波激励方向上添加刚性弹簧的方法引入位移时程,输入指定方向的地震动位移时程产生的动力荷载,就等于弹簧刚度乘以输入支点处的位移,实现过程如图 1 所示.进行地震动多维多点激励,只需在 2 个水平和 1 个竖直 3 个方向上添加刚性弹簧并输入生成的各方向相关的三维地震分量的位移时程.

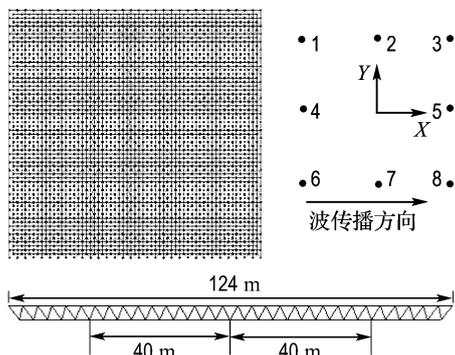


图 2 空间网架结构计算模型

Fig. 2 Calculating model of spatial truss structure

表 1 网架结构振动周期

Tab. 1 Vibration period of the truss structure

振型号	振动周期/s	振型号	振动周期/s
1	0.757 3	6	0.414 9
2	0.731 9	7	0.412 4
3	0.731 9	8	0.412 3
4	0.591 2	9	0.357 1
5	0.414 9	10	0.349 7

架结构的前 10 阶振动周期.

3.1.1 地震动多维输入和多点激励的影响 图 3 给出了空间网架结构杆件在一维地震动一致激励和多点激励以及三维多点激励下的最大内力情况,其中上部网格结构控制杆件为地震动一维一

致激励下与每个支承柱相连杆件中受力最大的两根下弦杆和两根腹杆。从图中可以看出,腹杆的轴力远小于下弦杆的轴力,支承柱剪力较大。无论下弦杆、腹杆还是支承柱,在一维一致地震激励下,杆件最大内力相差不大,在一维多点和三维多点激励下却相差较大,一维多点地震动激励下大多数杆件的最大内力大于一维一致激励,表现了地

震动的空间变化对网架结构的影响。虽然三维多点地震动激励下杆件受力变化规律与一维多点激励相似,但是结构在三维多点激励下的杆件受力明显大于一维多点地震动激励作用,因此地震动的非一致激励仅考虑单维地震作用,杆件受力计算结果偏于不安全。

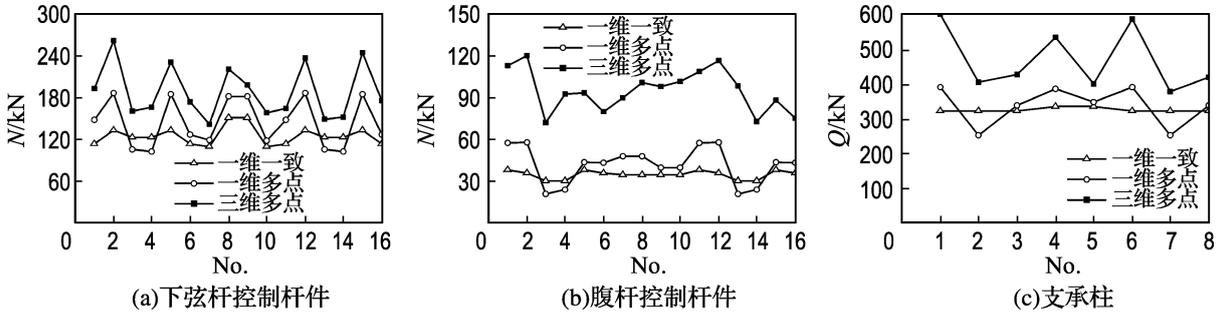


图 3 不同地震动激励下网架结构杆件内力变化图

Fig. 3 Change of element internal forces of truss structure under different seismic excitations

3.1.2 视波速的影响 图 4 比较了多维多点地震动作用下杆件内力随视波速的变化情况。从图中可以看出,随着视波速的增大,大多数杆件的内力逐渐减小,结构反应逐渐趋近于不考虑地震动行波效应下的反应,其中视波速 500 m/s 和 800 m/s 两种情况下杆件内力相差不大,但同视波速 250 m/s 的反应情况相比差别较大,说明该结构对低波速的地震动敏感性较大。同时注意到与不考虑行波效应相比,支承柱在考虑行波效应的三维多点地震激励下剪力反应值有的增大,有的减

小,通常情况下,地震波先到达的支承柱受力更不利,出现增大的可能性较大,而地震波后到达的支承柱受力则较小。这里分析的是地震波沿 X 坐标轴正方向传播的情况,如果地震波沿反方向或 Y 方向传播,则原来受力相对有利的支承柱将承受不利的荷载作用。因此为保证抗震安全性,应按三维多点激励下受力最大的支承柱承受的荷载进行设计,而且应对结构所在场地可能出现的地震波视波速情况进行全面的分析。

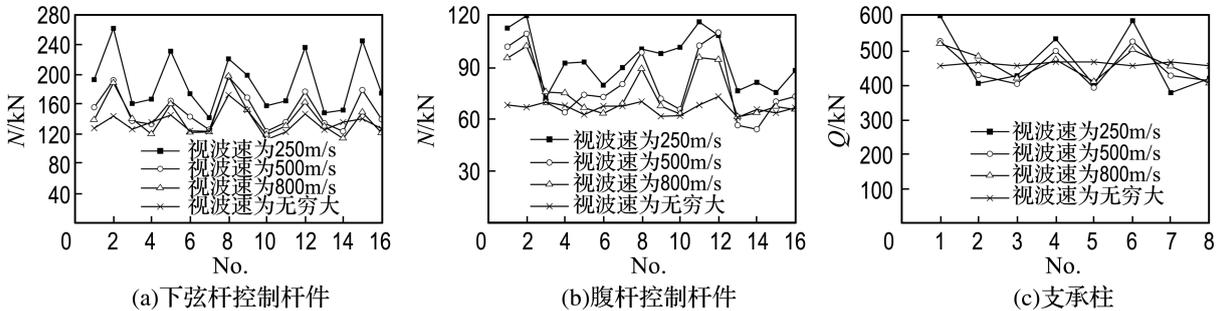


图 4 多维多点地震动作用下网架结构杆件内力随视波速的变化

Fig. 4 Change of element internal forces with apparent wave velocities of truss structure under multi-dimensional and multi-support excitations

3.2 柱面网壳结构

图5所示的柱面网壳结构为两边纵向支承,该类结构在工业厂房中经常被采用.该结构跨度100 m、长120 m、高25 m,矢跨比为1/4,壳厚3 m.结构由7 200个杆件单元和1 861个节点单元模拟,共有32个支座.在数值模拟中,采用集中点质量形式,结构阻尼比为0.02,结构杆件之间的连接方式全部为铰接.图6显示了中间跨节点和杆件分布形式(按照顺时针方向,上弦杆的30根杆件进行1至30号编号;下弦杆进行1至29号编号).表2给出了网壳结构的前10阶振动周期.

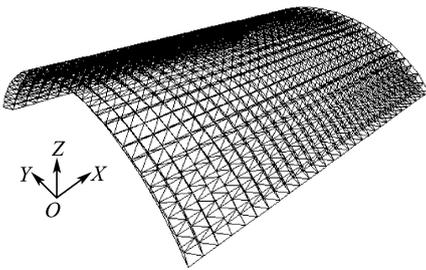


图5 柱面网壳计算模型

Fig. 5 Calculating model of cylindrical reticulated shell

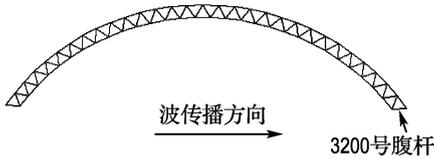


图6 中间跨节点和杆件分布形式

Fig. 6 Distribution pattern of nodes and elements of the mid span

表2 网壳结构振动周期

Tab. 2 Vibration periods of the reticulated shell structure

振型号	振动周期/s	振型号	振动周期/s
1	0.604 7	6	0.249 3
2	0.529 8	7	0.232 6
3	0.337 9	8	0.230 9
4	0.320 8	9	0.192 5
5	0.254 2	10	0.189 8

3.2.1 地震动多维输入和多点激励的影响 图7给出了柱面网壳结构中间跨杆件在一维地震动一致激励和多点激励以及三维多点激励下的内力变化情况,其中中间跨腹杆受力相对较小,起不到控制作用,因此这里仅分析与支座相连的3200号腹杆的内力变化情况(图7(c)).从图中可以看出,不同地震动激励下与支座相连的上弦杆受力都明显大于其他部位杆件,与支座相连的3200号腹杆在三维多点地震激励下杆件最大轴力比简单的一维一致激励作用提高了约58%.在地震动一维一致激励下,结构1/4跨和3/4跨处的杆件轴力反应较大,结构跨中部分杆件的轴力反应较小.地震动空间变化对结构各部分杆件的轴力反应影响不同,与一致地震动激励情况相比,多点激励使上弦杆跨中部分以及与支座相连部分的杆件轴力增加较大,考虑多点激励使下弦杆跨中部分杆件轴力增加较大.而三维多点激励下结构上弦杆和下弦杆轴力反应明显大于一维多点激励作用.

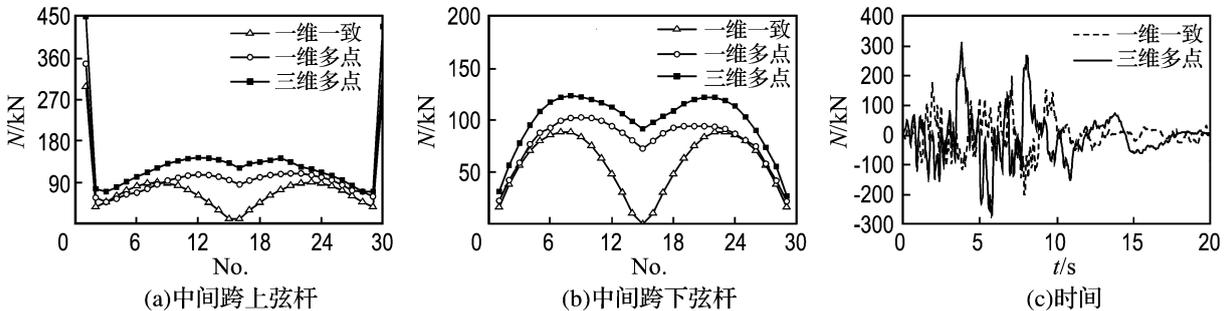


图7 不同地震动激励下网壳结构模型杆件内力变化图

Fig. 7 Change of element internal forces of reticulated shell structure under different seismic excitations

3.2.2 视波速的影响 图8比较了多维多点地震动作用下网壳结构杆件内力反应随视波速的变

化情况,从图中可以看出,在地震动不同视波速的情况下,对于上弦杆,网壳1/4跨至3/4跨处的杆

件以及与支座相连的杆件内力相差较大,其他部位杆件内力相差不大;对于下弦杆,情况与上弦杆相似,网壳 1/4 跨至 3/4 跨处的杆件内力相差较大,其他部位杆件内力相差不大.随着视波速的增大,大多数杆件的内力逐渐减小,结构反应逐渐趋近于不考虑地震动行波效应的情况.比较与支座相连的 3200 号腹杆在不同视波速地震动作用下的内力时程曲线可以看出,与视波速 800 m/s 地震动作用相比,视波速 250 m/s 情况下杆件最大

内力提高了约 32%.

分析结果表明,与双层柱面网壳结构地震反应不同,空间网架结构的一些杆件在多点地震动激励作用下的内力反应小于一致激励作用,少数网架结构杆件在低波速情况下内力反应相对较小,说明空间变化地震动对大跨度结构杆件内力反应的影响还与结构形式、杆件类型以及杆件所在位置有关.

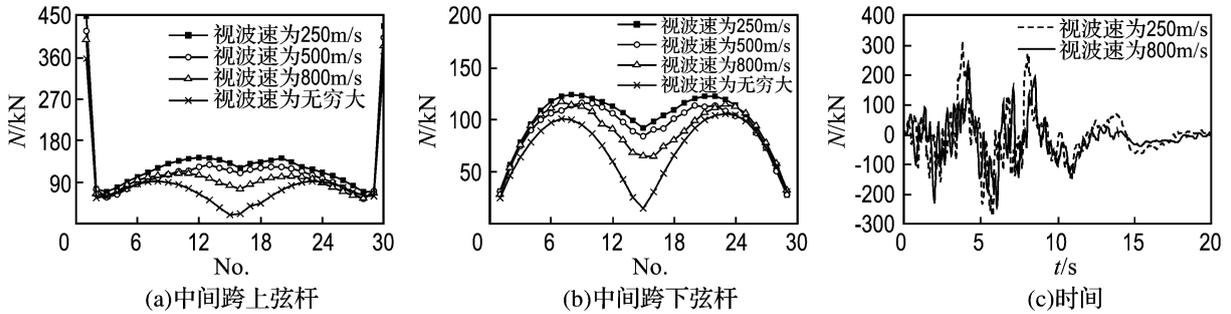


图 8 多维多点地震动作用下网壳结构杆件内力随视波速的变化

Fig. 8 Change of element internal forces of reticulated shell structure with apparent wave velocities under multi-dimensional and multi-support excitations

4 结 论

(1)在地震动一致激励作用下,空间结构同类杆件的地震反应相差不大,而在多点激励下反应值相差较大,多点地震动激励下大多数杆件的内力反应大于一致激励作用,说明考虑地震动的空间变化对大跨度结构反应的影响十分必要.

(2)大跨度结构在多维多点地震动激励下杆件的内力反应与单维多点激励下的内力反应变化规律基本相似,但幅值不同,多维多点激励下杆件的内力反应变化幅度更大,单维多点激励给出偏于不安全的结果,因此对于大跨度空间结构的抗震分析,应考虑地震动多维激励的影响.

(3)进行大跨度结构在地震动多维多点激励作用下的反应分析,不同的地震波视波速情况对结构的地震反应影响很大.随着视波速的增大,两种空间结构的大多数杆件内力反应逐渐减小.因此为保证结构的安全,建议全面考虑结构所在场地可能出现的地震波视波速,选取最不利视波速的地震动作用进行大跨度空间结构的抗震分析与设计.

参 考 文 献:

- [1] 白凤龙,李宏男,王国新. 多点输入下大跨结构反应谱分析方法研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(4):35-42
- [2] 李宏男. 地震动的转动分量及有关的结构反应分析[J]. 世界地震工程, 1991, 7(4):44-51
- [3] LI H N, SUN L Y, WANG S Y. Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 232(2): 131-137
- [4] 薛素铎,王雪生,曹 资. 空间网格结构多维多点随机地震响应分析的高效算法[J]. 世界地震工程, 2004, 20(3):43-49
- [5] CLOUGH R W, PENZIEN J. *Dynamics of Structures* [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1993
- [6] 潘晓东. 非平稳随机地震下堤坝非线性有效应力动力响应可靠度分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004
- [7] 薛素铎,曹 资,王雪生,等. 多维地震作用下网壳结

- 构的随机分析方法[J]. 空间结构, 2002, **8**(1):44-51
- [8] HAO H, OLIVEIRA C S, PENZIEN J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data [J]. **Nuclear Engineering and Design**, 1989, **111**(3):293-310
- [9] 薛素铎,王雪生,曹 资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. 土木工程学报, 2003, **36**(5):5-10
- [10] FENVES G L. Earthquake analysis and response of multi-span bridges and viaduct structures [C] // **Seminar Proceedings, Seismic Design and Retrofit of Bridges**. Berkeley: University of California at Berkeley, 1992:214-244

Seismic analysis of two typical spatial structures under multi-dimensional and multi-support earthquake excitations

BAI Feng-long^{*1,2}, LI Hong-nan¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Dalian Architectural Scientific Research and Design Institute Company Limited, Dalian 116021, China)

Abstract: Artificial non-stationary earthquake motions being compatible with the given coherency loss function and considering the correlated three-dimensional component are generated by trigonometric series method, and time history analysis model under multi-dimensional and multi-support excitations is established based on displacement direct input method. Seismic responses of two typical long-span spatial structures subjected to one-dimensional uniform excitation, one-dimensional and multi-support excitations and multi-dimensional and multi-support earthquake excitations are investigated. Furthermore, seismic responses of these structures under multi-dimensional and multi-support earthquake excitations with many cases of apparent wave velocities are comprehensively investigated and compared. The results show that the internal force responses of most bars in these two typical spatial structures under multi-support excitations are larger than those under uniform excitation. The amplitude changing of analytical results under multi-dimensional and multi-support excitations of long-span structure are close to those obtained by one-dimensional and multi-support excitations, but the latter is to give the unsafe values of the seismic responses. When different cases of seismic wave velocities are considered, responses of long-span structures change a lot under multi-dimensional and multi-support earthquake excitations.

Key words: spatial structure; multi-dimensional and multi-support excitations; seismic analysis; coherency loss function