

文章编号: 1000-4750(2007)02-0085-06

竖向多点输入下两种典型空间结构的抗震分析

*苏 亮, 董石麟

(浙江大学空间结构研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 以两种典型空间结构为研究对象, 考察了竖向地震作用下结构的地震反应以及竖向多点输入对结构地震反应的影响。分析表明, 竖向地震一致输入在门式桁架结构和周边支承网壳结构中产生较大的内力, 因此竖向地震作用在这两类结构的抗震设计中是必须考虑的。竖向多点输入对门式桁架结构地震反应的影响很小, 这种影响在结构抗震设计中可以忽略; 对周边支承网壳结构来说, 竖向多点输入使得网壳结构的地震内力降低, 同时由于拟静力作用在支承结构中产生的内力较小, 多点输入对支承结构的地震内力影响也很小。

关键词: 大跨空间结构; 多点输入; 抗震分析; 竖向地震动; 行波效应

中图分类号: TU393.3; TU311.3 **文献标识码:** A

SEISMIC ANALYSIS OF TWO TYPICAL SPATIAL STRUCTURES UNDER MULTI-SUPPORT VERTICAL EXCITATIONS

*SU Liang, DONG Shi-lin

(Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Seismic responses of two typical large-span structures to uniform vertical seismic excitation are investigated and the effects of multi-support vertical excitation on the responses are checked. Results indicate that uniform vertical seismic excitation causes relative large responses in both the trussed gable frame structure and the reticular dome supported by a substructure and thus it should be considered in the seismic design of these structures. When the effect of multi-support vertical excitation is taken into account, seismic responses of the gable frame structure are very close to those under the uniform excitation and thus the effect can be ignored in seismic design of such structures. Responses of the reticular dome are reduced by the effect of multi-support vertical excitation. Meanwhile, responses of the substructure of the dome changes a little since the pseudo-static component of multi-support excitation produces slight internal force in the substructure.

Key words: large-span structures; multi-support excitation; seismic analysis; vertical seismic excitation; wave passage effect

不同于一般建筑, 竖向地震作用在体育场馆、飞机库等大跨空间结构中产生较大的地震内力。因此设计大跨空间结构时, 竖向地震作用将是重要的分析荷载之一, 我国建筑抗震设计规范也特别规定了大跨空间结构中竖向地震作用的简化计算方法。

随着工程经验的积累和设计理论的完善, 空间

结构的跨度在不断地增加, 跨度的增加对大跨空间结构的抗震性能研究提出了新的课题, 其中之一就是较完善的结构抗震分析方法与相对简单的一致地震输入假定之间的矛盾。因此, 如何考虑多点输入对大跨空间结构的地震反应影响也成为了当前空间结构研究领域中的重要课题之一^[1]。近几年来,

收稿日期: 2005-12-30; 修改日期: 2006-03-20

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金; 中国博士后科研基金(20060391062)

作者简介: *苏 亮(1975), 男, 浙江嵊州人, 博士后, 主要从事空间结构抗震方面的研究(E-mail: suliang@zju.edu.cn);

董石麟(1932), 男, 浙江杭州人, 教授, 中国工程院院士, 长期从事空间结构教学、科研和设计工作。

国内外学者对空间结构的多点输入问题进行了一些开创性研究。丁阳,王波^[2]计算分析了行波效应对大跨空间网格结构的地震反应影响;加藤史郎,苏亮等^[3,4]在研究中考察了局部场地效应对大跨空间结构的地震反应影响;梁嘉庆,叶继红^[5]以大跨网格结构的跨度影响为着眼点,对多点输入的作用进行了讨论。以上研究均指出,在大跨空间结构的抗震设计中考虑多点输入的影响是必要的。

然而,对空间结构的工程实践来说,除了指出考虑多点输入影响的必要性外,更重要的是提出考虑多点输入的具体工程建议和适合工程人员应用的设计方法,而这仍是当前该领域中需要进一步深入和解决的研究课题。同时,以往的研究大多关注于水平地震的多点输入问题,有关竖向地震多点输入的研究则相对开展较少。基于以上研究背景和工程实际,本文选取两种典型的大跨空间结构为研究对象,考察了竖向地震作用下结构的地震反应同时深入分析了竖向地震的行波效应对结构地震反应的影响。在此基础上,为这两种空间结构考虑竖向地震的多点输入影响提出了抗震设计的具体建议。

1 两种典型大跨空间结构

1.1 结构分析模型

本文所选取两种大跨空间结构的分析模型如图 1 所示。图 1(a)所示门式桁架结构的跨度 $S=62\text{m}$;屋架上下弦杆之间的间距及柱子内外竖杆之间的间距 $d_1=d_2=2\text{m}$ 。图 1(b)所示的结构模型由上部单层网壳结构和下部结构组成:上部结构为 K8-10 凯威特型单层球面网壳,网壳的跨度和高度分别为 100m 和 18.2m ;下部结构由 40 根周边均匀分布的钢管柱和柱顶圈梁组成,柱子的高度为 5m 。网壳各构件之间以及柱子与基础的连接均假定刚接。

选择这两种空间结构作为研究对象是因为:(1)这两种空间结构形式经常被应用于如飞机库(图 1(a))、干煤棚(图 1(a))、体育场馆(图 1(b))以及大型展厅(图 1b)等实际工程的建设中。(2)以往的研究表明^[6,7],水平向的多点地震输入对这两种空间结构的影响是不同的,因此在考虑竖向地震的多点输入时这两种结构形式也应分别进行研究。

1.2 结构动力特性

表 1 列出了两种空间结构的动力特性。表中结果表明,桁架结构第一自振周期要大于网壳结构的

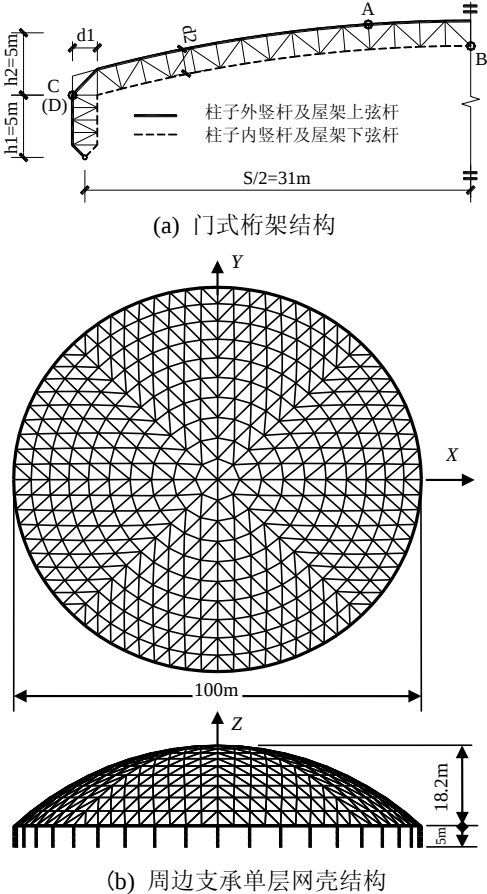


图 1 结构分析模型

Fig.1 Structural analysis models

第一自振周期,同时桁架结构的自振周期分布较为分散而网壳结构的周期分布则相当集中。需要说明的是,由于网壳结构是轴对称结构,结构的有些振型是成对出现的:如结构的第一振型和第二振型的变形模式和周期是完全相同的,只是其中一个振型的主要变形发生在 X 方向,而另一个振型的主要变形则在 Y 方向。表 1 同时列出了考虑竖向地震作用时广义质量归一化后振型的参与系数,其中网壳结构只列出了振型参与系数较大的前几阶振型。可以看出,门式桁架结构在垂直地震动的作用下主要是前几阶振型参与振动;而网壳结构由于自振周期分布相对集中,参与振动的振型则相对较多。

表 1 结构动力特性
Table 1 Dynamic characteristics of the structures

门式桁架结构			周边支承网壳结构		
自振周期	主振方向	β_i	自振周期	主振方向	β_i
$T_1=0.761\text{s}$	水平	0.0	$T_1/T_2=0.383\text{s}$	水平	0.0
$T_2=0.654\text{s}$	竖向	177.8	$T_3/T_4=0.342\text{s}$	竖向	0.0
$T_3=0.279\text{s}$	水平	0.0	$T_{18}=0.312\text{s}$	竖向	90.5
$T_4=0.205\text{s}$	竖向	93.5	$T_{22}=0.302\text{s}$	竖向	229.0
$T_6=0.105\text{s}$	竖向	36.6	$T_{33}=0.279\text{s}$	竖向	-105.0

注:表中 T_i 表示结构的第 i 阶自振周期; β_i 为各阶振型的参与系数。

2 分析方法和输入地震动

本文采用当前应用较多的时程分析法对结构进行分析, 计算均由作者自行编制的有限元分析程序 DYNA-SPACE 完成, 程序中数值积分方法采用 Newmark β 法, β 的取值为 0.25。限于篇幅, 这里不再一一罗列多点输入的有限元方程式^[8]。

由于目前竖向地震动的部分相干效应还未有较为成熟的计算分析模型, 本文将只就竖向地震的行波效应影响展开具体研究。同时结合工程实际, 视波速 V_a 取无穷大、2000m/s、1000m/s 等三种情况, 其中视波速无穷大时即为地震波的一致输入。

时程分析法的局限性在于分析所得到的结构反应在一定程度上依赖于输入地震波的特性, 若选择不同性质的输入地震波, 结果可能差别很大^[1]。为克服以上局限性, 本文采用了 20 条具有不同位相特性的人工地震波对结构进行分别计算和统计分析, 从而使本文的结论更具有普遍性。人工地震波是拟合我国建筑抗震设计规范 GB 50011-2001^[9]所推荐的地震加速度反应谱模拟而成的, 各条人工地震波的位相特性由计算机随机产生。计算标准反应谱时, 抗震设防烈度为 8 度, 特征周期为 0.4s(II 类场地), 阻尼比为 0.02, 竖向地震影响系数则取为 0.137。GB 50011-2001 所推荐加速度反应谱曲线、人工地震波的反应谱均值曲线以及反应谱值的包络线如图 2 所示。图中所示结果可知, 人工地震波反应谱的均值曲线与标准反应谱基本一致, 而包络线与标准反应谱曲线之间的误差也在 10% 左右。

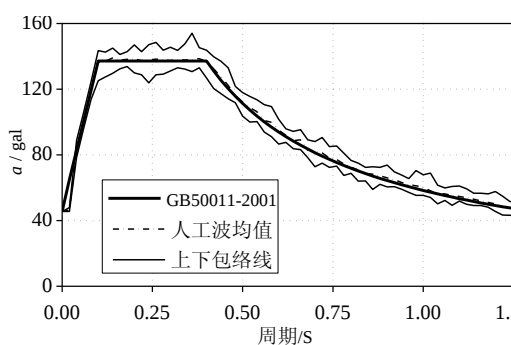


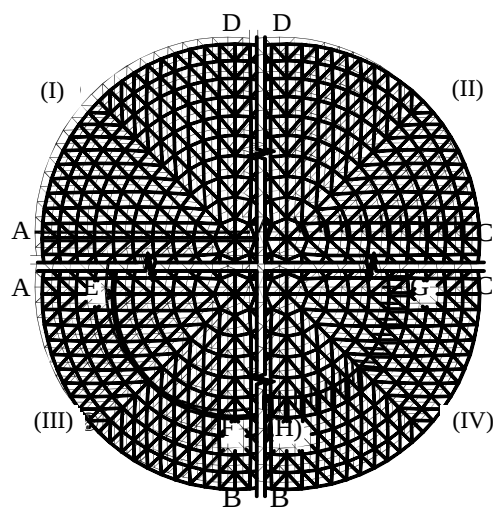
图2 地震波的加速度反应谱 (阻尼比=0.02)

Fig.2 Acceleration response spectra

3 一致竖向地震输入下结构地震反应

图 4 和图 5 分别示意了门式桁架与网壳结构在一致竖向地震输入与恒载两种工况作用下的结构

反应, 所示杆件的具体位置详见图 1(a)及图 3。需要指出的是, 本文中的结构地震反应均为 20 条人工地震波作用下结构最大地震反应的均值。限于篇幅这里不再示意结构最大地震反应的包络线。

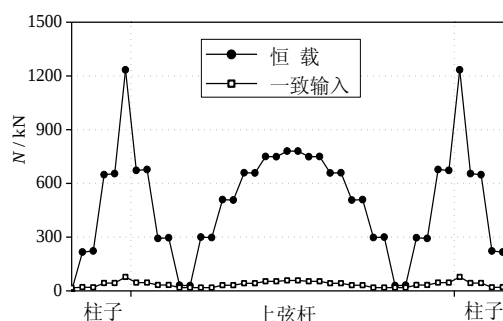


(I)/(II) 脊线杆/与其相连的环线杆

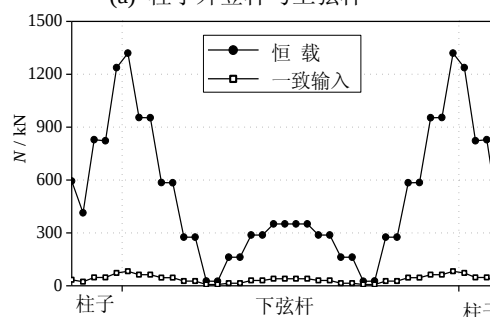
(III)/(IV) 中间环线杆/与其相连的其它杆

图3 网壳结构内力分析杆件位置示意图

Fig.3 Positions of the dome members for internal force analysis



(a) 柱子外竖杆与上弦杆



(b) 柱子内竖杆与下弦杆

图4 一致地震输入和恒载下门式桁架轴力分布

Fig.4 Axial force distributions of gable frame structure under uniform excitation input and dead load

比较图 4 中两种荷载工况下轴力的分布结果可以看出, 竖向地震作用在门式桁架结构中产生的地

震内力约为恒载作用下结构内力的 6%~10%，这个结果说明 GB 50011-2001 中规定竖向地震作用的标准值 8 度可取该结构重力荷载代表值的 10% 对本文的门式桁架结构来说是合理的。

由于跨度的增加以及结构形式的不同，有别于图 4 的结果，在竖向地震作用下网壳结构的脊线杆件以及与脊线相连环线杆件的地震内力约为恒载作用下的 20%~40% 左右(图 5)。这表明，对跨度较大的空间结构来说，GB 50011-2001 中所规定的竖向地震作用简化算法会低估结构的地震内力，在实际的抗震设计中应进行单独分析计算。

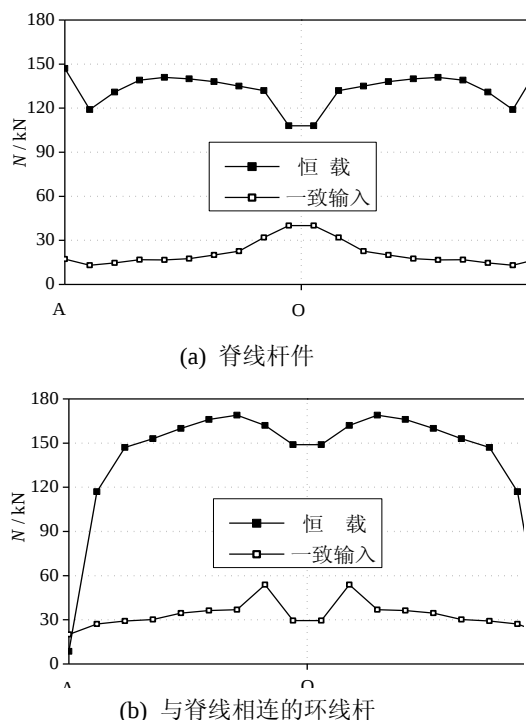


图 5 一致地震输入和恒载作用下网壳轴力分布

Fig.5 Axial force distributions of dome under uniform excitation input and dead load

4 多点输入下门式桁架结构地震反应

文献[6]的研究表明，水平行波效应的不一致输入将激起门式桁架结构中附加对称振型的较大振动，从而使得结构的地震反应不仅在分布上有所改变，其最大值也将相应的增加，而这种增加在结构的抗震设计中是必须考虑的。文献[6]因此也提出了基于随机振动理论上的平均反应谱法来计算多点输入对结构地震反应的影响。

图 6 则示意了考虑竖向行波效应时门式桁架结构的最大轴力分布图。图示结果表明，竖向地震行波效应的考虑使得门式桁架结构的地震反应有略

微减小的趋势，但内力变化很小，这种变化在实际工程设计中是可以忽略不计的。显然，水平地震的行波效应对门式桁架结构反应的影响与竖向地震行波效应的影响是不同的。这是因为，竖向行波效应的不一致输入虽然也将激起门式桁架结构中附加反对称振型的振动，但不同于水平行波效应，附加反对称振型的振动产生的地震内力很小，在实际工程设计中该内力的影响是可忽略的。

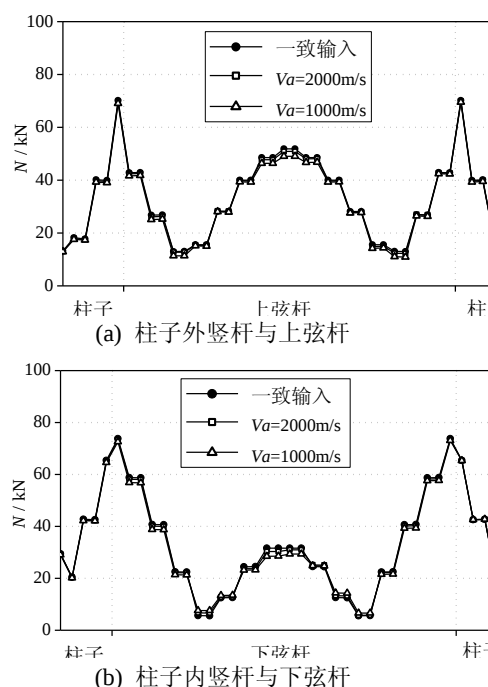
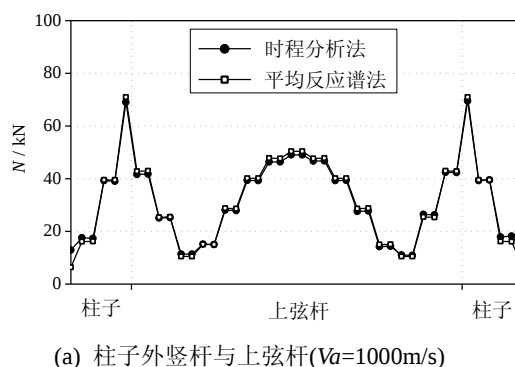


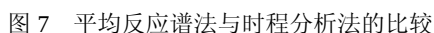
图 6 考虑行波效应时门式桁架结构的轴力分布

Fig.6 Axial force distributions of gable frame structure considering wave propagation effect

图 7 进一步比较了 $V_a=1000m/s$ 时平均反应谱法和时程分析法的计算结果。平均反应谱法取结构的前 6 阶振型进行振型组合。比较表明，时程分析法所得到的结构反应与平均反应谱法近似计算得到的结果基本一致，这再次证实了平均反应谱法的有效性同时从另一角度证实了以上关于竖向地震行波效应对门式桁架结构地震反应影响的结论。



(a) 柱子外竖杆与上弦杆($V_a=1000m/s$)



5 多点输入下周边支承网壳结构地震反应

以往在对一层刚性楼板结构进行水平地震多点输入研究时表明^[10], 由于刚性楼板和下部支承结构之间的相互约束作用, 多点输入的考虑使刚性楼板在产生扭转效应的同时也减小了水平向的振动效应。本节的结果同样可以看出, 由于下部支承结构对不一致输入的约束作用, 多点输入的考虑也减小了上部结构垂直向的振动效应, 从而降低了网壳脊线和环线杆件的地震轴力。由多点输入所产生的扭转效应则表现为网壳结构中小部分斜杆轴力的增加(图 8(d))。但实际工程中, 恒载及一致竖向地震作用下这些斜杆的内力均较小, 结构所选截面往往具有较大的安全储备, 由多点输入的扭转效应引起的斜杆轴力增加并不会导致整个结构的不安全。由此可见, 对周边支承网壳结构来说, 竖向地震的行波效应对网壳结构反应的影响在实际设计中也是可以不考虑的。

x/B	N/kN (一致输入)	N/kN ($V_a=2000m/s$)	N/kN ($V_a=1000m/s$)
-1.0	15	14	13
-0.8	12	11	10
-0.6	16	14	13
-0.4	17	15	13
-0.2	22	18	14
0.0	40	35	28
0.2	32	28	22
0.4	20	18	15
0.6	16	15	14
0.8	14	14	13
1.0	13	13	12

t	一致输入 (N/kN)	Va=2000m/s (N/kN)	Va=1000m/s (N/kN)
0.0	18	18	18
0.1	28	25	22
0.2	30	28	28
0.3	32	30	30
0.4	35	32	30
0.5	54	50	42
0.6	28	28	25
0.7	54	50	42
0.8	35	32	30
0.9	35	32	30
1.0	28	25	22

Figure 10 is a line graph showing the relationship between the normalized load N/kN (Y-axis) and the normalized horizontal distance x/B (X-axis). The Y-axis ranges from 0 to 36 kN, and the X-axis is marked with E, F, G, and H. Three curves are plotted:

- 一致输入 (Consistent input): Represented by a line with square markers.
- $Va=2000m/s$: Represented by a line with circle markers.
- $Va=1000m/s$: Represented by a line with triangle markers.

The curves show that the normalized load N/kN varies with x/B , with the highest values occurring around $x/B = 0.5$ and the lowest values around $x/B = 0.75$. The load is highest for the consistent input case and lowest for the $Va=1000m/s$ case.

Figure 10 is a line graph showing the number of nodes N (in thousands) versus time t (in seconds) for three different input scenarios. The y-axis ranges from 0 to 18, and the x-axis ranges from 0 to 10. The legend indicates three series: '一致输入' (Consistent Input, squares), ' $Va=2000\text{m/s}$ ' (circles), and ' $Va=1000\text{m/s}$ ' (triangles). The '一致输入' series shows a periodic oscillation between approximately 5 and 17. The ' $Va=2000\text{m/s}$ ' and ' $Va=1000\text{m/s}$ ' series show similar oscillations but with lower peaks and troughs, generally staying between 6 and 15.

(d) 与中间环杆相连的杆件

图 8 考虑行波效应时网壳构件的地震轴力分布

对网壳下部支承结构的地震影响，其中图 9(a)及图 9(b)分别为柱顶圈梁弯矩和柱轴力的比较图。图 9 同时也示意了 $Va=1000\text{m/s}$ 时竖向地震行波效应的拟静力分量在网壳下部支承结构中所产生的内力。比较一致输入下结构内力的分布，竖向地震行波效应的拟静力分量在下部结构中所产生的内力较小，

如柱顶圈梁弯矩是一致输入的 1/4 倍~1/2 倍, 而柱轴力则只有一致输入的 10%左右。因此不同于水平平行波效应的影响, 图 9 所示意的结果表明竖向地震的行波效应对网壳下部支承结构的地震内力影响很小。

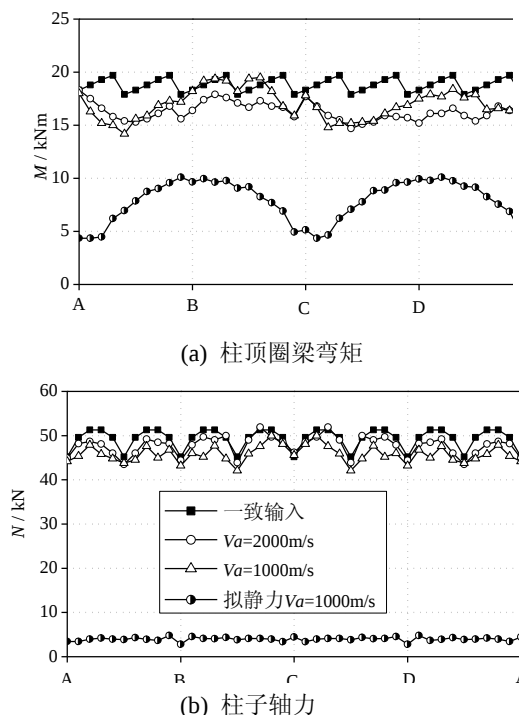


图 9 考虑行波效应时支承结构的地震内力分布

Fig.9 Internal force distributions of substructure considering wave propagation effect

6 结论

本文以门式桁架结构和周边支承单层球面网壳结构为研究对象, 考察了竖向地震的行波效应对结构反应的影响, 通过比较分析后得出以下结论:

(1) 对跨度较大的空间结构来说, 如本文所分析的单层网壳结构, 我国建筑抗震设计规范 GB50011-2001 中所规定的简化算法会低估竖向地震的荷载作用, 在设计中应进行单独分析计算。

(2) 比较于一致输入, 竖向地震的行波效应对门式桁架结构地震反应的影响很小, 在实际工程设计中这种影响可以忽略不计。

(3) 由于下部结构对多点输入的约束作用, 竖向地震行波效应的考虑将降低网壳脊线和环线杆件的地震内力。同时多点输入所引起的扭转效应将使得小部分斜杆内力的增加, 但实际工程中, 网壳结构的这些斜杆所选截面往往具有较大的安全储备, 斜杆轴力的增加并不会导致整个结构的不安

全。

(4) 由于拟静力作用在下部支承结构中产生的内力较小, 竖向地震行波效应对网壳的下部支承结构的地震内力影响很小。

参考文献:

- [1] 苏亮, 董石麟. 多点输入下结构地震反应的研究现状与对空间结构的见解[J]. 空间结构, 2006, 12(1): 6~11.
Su Liang, Dong Shilin. State of structural seismic response under multi-support excitations and suggestions on spatial structures [J]. Space Structures, 2006, 12(1): 6~11. (in Chinese)
- [2] 丁阳, 王波. 大跨度空间网格结构在地震行波作用下的响应[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 71~76.
Ding Yang, Wang Bo. Seismic response of long-span spatial lattice structure considering traveling-waves effects [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(5): 71~76. (in Chinese)
- [3] Kato S, Su L. Effects of surface motion difference at footings on the earthquake responses of large-span gable structures [J]. Steel Construction Engineering, JSSC, 2002, 9(36): 113~128.
- [4] Kato S, Nakazawa S, Su L. Effects of wave passage and local site on seismic responses of a large-span reticular dome structure [J]. Steel Construction Engineering, JSSC, 2003, 10(37): 91~106.
- [5] 梁嘉庆, 叶继红. 结构跨度对非一致输入下大跨度空间网格结构地震响应的影响[J]. 空间结构, 2004, 10(3): 13~18.
Liang Jiaqing, Ye Jihong. The influence of structural span on seismic response of space lattice structures under non-uniform excitation [J]. Space Structures, 2004, 10(3): 13~18. (in Chinese)
- [6] Su Liang, Dong Shiliang, Kato S. A new average response spectrum method for linear response analysis of structures to spatial earthquake ground motions [J]. Engineering Structure, 2006, 28(13): 1835~1842.
- [7] 苏亮, 董石麟. 水平行波效应下周边支承大跨度单层球面网壳的地震反应[J]. 空间结构, 2006, 12(3): 24~30.
Su Liang, Dong Shiliang. Seismic response of a large span single layer reticular dome with surrounding columns considering horizontal wave passage effect [J]. Space Structures, 2006, 12(3): 24~30. (in Chinese)
- [8] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1993.
- [9] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 GB 50011-2001 [S].
National Standard of The People's Republic of China. Code for seismic design of buildings GB 50011-2001 [S]. 2001.
- [10] Hao H, Duan X N. Multiple excitation effects on response of symmetric buildings [J]. Engineering Structure, 1996, 18(9): 732~740.