

文章编号:1673-2049(2011)03-0106-07

世纪莲体育中心动力特性及反应谱分析

冼耀强^{1,2}, 刘伯权¹, 丁江澍^{1,3}

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 招商局地产控股股份有限公司,
广东 佛山 528000; 3. 佛山市建筑工程质量检测站, 广东 佛山 528000)

摘要:以佛山市世纪莲体育中心大跨度轮辐式张拉索膜结构为研究对象,采用 ANSYS 程序建立有限元模型,分析其动力特性,并用振型分解反应谱法计算地震作用下结构的受力性能。研究结果表明:结构自振频率较低,频谱集中,频率跳跃现象不明显;结构以屋盖的竖向振动为主,具有较好的抗侧刚度和抗扭刚度;反应谱分析时,为保证各方向的模态质量参与系数在 90% 以上,建议其振型取 140 阶以上;地震作用对结构上压环、下压环及腹杆的内力影响较大,必须参与荷载组合;不同方向地震作用下,结构内力及位移存在显著差别,应同时考虑一维及多维地震作用的影响。

关键词:轮辐式大跨度张拉结构;动力特性;模态质量参与系数;反应谱分析;地震作用

中图分类号: TU245.2

文献标志码: A

Dynamic Characteristics of Century Lotus Stadium and Response Spectrum Analysis

XIAN Yao-qiang^{1,2}, LIU Bo-quan¹, DING Jiang-shu^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;
2. China Merchants Property Development Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong, China;
3. Construction Engineering Quality Testing Station of Foshan, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: Using the program ANSYS, finite element model of the rung-shape long-span tensile cable-membrane structure in Foshan Century Lotus Stadium was conducted to investigate its dynamic characteristics and its mechanical performance under seismic loading. Study results indicate that the natural frequencies of the structure are all lower and frequency spectrums concentrate in a small range, and the frequency jumping phenomenon isn't in evidence. The structure's vibration is mainly vertical vibration, and its lateral stiffness and torsion rigidity are well. To ensure that the modal mass participating coefficient is more than 90%, the contributions of the former 140 modes should be considered when the analysis of response spectrum is done. Because the seismic loading can greatly influence the internal force of the upper compression ring, the lower compression ring, and the truss web, it should be calculated in the load combination. When the seismic loading on the structure is from different directions, the internal force and displacement of the structure have significant difference. So the effects of the different directions of the waves and their combinations should be considered together.

Key words: rung-shape long-span tensile structure; dynamic characteristic; modal mass participating coefficient; response spectrum analysis; seismic loading

收稿日期:2011-04-26

基金项目:佛山市科技专项发展基金项目(2007055B)

作者简介:冼耀强(1973-),男,广东佛山人,招商局地产控股股份有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail: xianyq@yeah.net.

0 引 言

佛山市世纪莲体育中心为广东省第 12 届运会的主体育馆,由德国 GMP 建筑设计事务所及华南理工大学建筑设计研究院联合设计完成。该结构采用源于自行车车轮的大跨度轮辐式全张拉索膜结构,由上下受压环和一系列的径向谷索、脊索以及内部受拉环索组合而成,通过对拉索施加预应力,形成外环受压、内环受拉的自平衡体系。谷索和脊索之间通过悬挂索、PVC 薄膜连接,整个屋盖通过预应力钢筋混凝土立柱与下部结构相连。上压环标高 49 m,半径 155 m;下压环标高 29 m,半径 138 m;上下压环之间通过 V 形腹杆支撑;屋面膜材展开面积 72 181 m²。

虽然现行《膜结构技术规程》(CECS 158:2004)^[1]认为索膜结构可不考虑地震作用,但该索膜结构屋盖跨度很大,竖向刚度较弱,上下压环及腹杆分别由钢结构、钢混组合结构制作,与底部钢筋混凝土预应力墩柱相连,整个结构受力复杂。虽然世纪莲体育中心位于 7 度抗震设防区域,但设防烈度与实际烈度存在显著差异。中国 2008 年发生的汶川地震,其重灾区同样为 7 度设防区,但实际烈度达到 11 度^[2-4],并且 1966 年邢台地震、1976 年唐山地震、1995 年日本阪神地震、1999 年台湾集集地震等均表现出这一现象,即设防烈度远低于实际地震烈度^[5]。马玉宏等^[6]从“社会可接受死亡率”的角度出发,提出的“最优安全设防烈度”要比抗震规范^[7]规定的各地设防烈度高出 0~2 度,按现有设防烈度进行的抗震设计存在一定不足。世纪莲体育中心作为区域建筑的标志和大型的公共建筑,在地震等特殊情况下,不仅需要保证自身的安全使用,更应作为公众避难及营救场所,因此,对其动力特性及地震作用下的性能分析十分必要。本文中笔者根据世纪莲体育中心设计及施工情况,利用 ANSYS 有限元程序,分析其动力特性及其在地震反应谱作用下的结构受力性能,了解结构的位移、应力、应变等情况,为结构的参数识别和损伤评估及应急维修等提供参考。

1 有限元分析模型

世纪莲体育中心效果图见图 1,有限元分析模型见图 2。各种索均采用只受拉而不受压的空间杆单元模拟;上下压环、腹杆及墩柱采用空间梁单元模拟。分析过程中假定索与压环之间的连接以及相邻索段之间的连接为铰接,墩柱与压环、腹杆与压环之

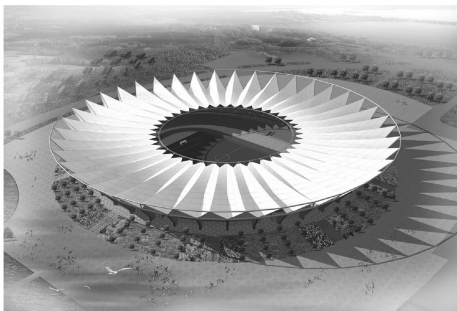


图 1 世纪莲体育中心效果图
Fig. 1 Effect Chart of Century Lotus Stadium

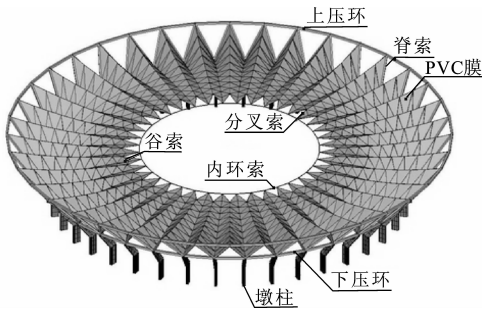


图 2 世纪莲体育中心有限元分析模型
Fig. 2 Finite Element Analysis Model of Century Lotus Stadium

间的连接为固接。
对世纪莲体育中心屋盖结构形状和内力影响最大的是脊索、谷索和内环索的索力^[8-10],其值见表 1,结构其他部位的内力计算值见表 2。根据计算结果可见,有限元计算值与结构设计内力吻合较好,模型可用于结构受力分析。

表 1 索内力计算值对比
Tab. 1 Comparisons of Calculation Values of Cable's Internal Force

构件	谷索	脊索	悬挂索	分叉索	内环索
索力设计值/kN	1 600	2 640	26	1 300	24 560
索力有限元计算值/kN	1 601	2 600	25	1 301	24 920
索力偏差/%	-0.1	1.5	3.8	-0.1	-1.5

注:索力设计值取自文献[8]、[9]。

表 2 其他构件内力计算值
Tab. 2 Calculation Values of Other Member's Internal Force

构件	轴应力/MPa	压力/kN	弯矩/(kN·m)
上压环	-102.70	-11 087.0	133.0
下压环	-3.90	-6 075.0	21.5
腹杆	-10.10	-689.0	527.0
墩柱	-0.87	-4 908.2	15 802.0

2 结构自振特性分析

作为结构的固有动力指标,自振特性直接影响

到结构的地震反应和受力性能,是结构动力荷载设计中的重要参数,也是结构动力分析的基础^[11-13]。根据自振特性的分析,可获得结构的刚度分配情况及其模态质量参与系数的大小。在 ANSYS 程序中,采用子空间迭代法计算了世纪莲体育中心前 300 阶自振周期和自振频率。定义结构的频率变化率 $p_i=100(f_{i+1}-f_i)/f_i$, f_i 为频率, $i=1,2,\cdots,300$, 频率曲线见图 3, 频率变化率曲线见图 4。

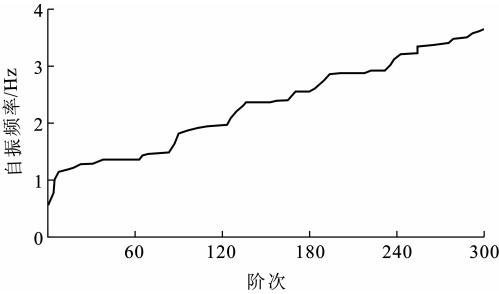


图 3 前 300 阶自振频率

Fig. 3 The First Three Hundred Natural Frequencies

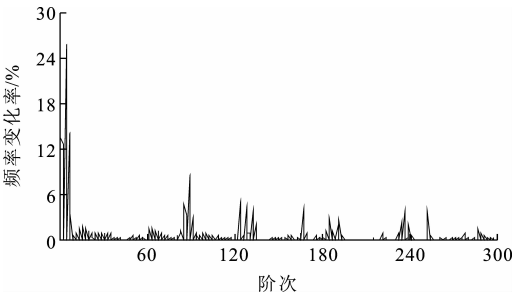


图 4 频率变化率

Fig. 4 Change Rates of Frequencies

结合图 3、4,分析频率和周期的特点可知:

(1)频率较低。结构 1 阶自振频率为 1.593 8 Hz,基本周期为 0.627 4 s。表明世纪莲体育中心的整体刚度较小,体现了柔性结构刚度小的特点。

(2)频谱集中。结构前 300 阶振型中,自振频率变化范围仅为 1.319 Hz。索膜结构的高阶频谱分布密集,其在动力反应中的参与不容忽视。

(3)频谱变化均匀。经过计算可得,周期递减变化率 61.87% 的数值分布在区间(0,0.1],27.09% 的数值分布在区间(0.1,1],9.70% 的数值分布在区间(1,10],变化率超过 10% 的共有 4 阶频率,主要分布在前 7 阶频率内。最大值为第 4 阶频率与第 5 阶频率之间的变化率,达到 25.84%。由此可见,结构频率分布密集,变化均匀,频率跳跃现象不明显,动力特性复杂。

(4)竖向振型为主。根据结构前 300 阶振型,结构主要以索膜屋盖的竖向振动为主,仅有少量的扭

转振动,且没有出现墩柱的振动,说明该结构竖向刚度较小,而抗侧刚度和抗扭刚度较大。与屋盖结构相比,墩柱的刚度要大许多,振动主要发生在屋盖部分。但在高阶振型中,上压环、下压环及腹杆等均参与了振动(图 5),说明该结构中,刚性受力构件的振动不可忽略。

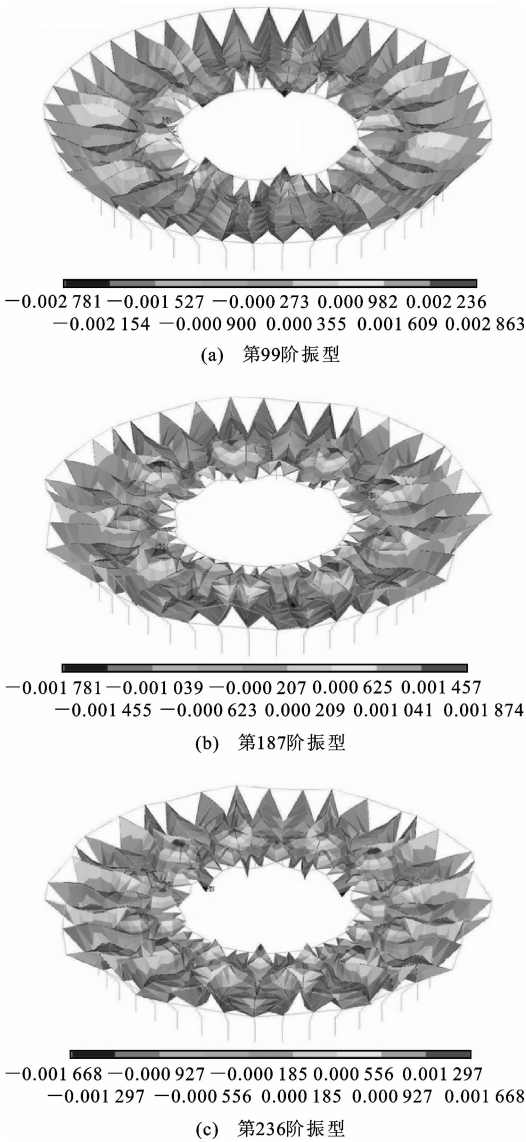


图 5 部分高阶振型

Fig. 5 Some Higher Vibration Modes

以上振动特点与大跨悬索、斜拉结构特点^[14]相似,说明大跨索膜结构的振动特性与此类结构具有相似性,可将其作为一类结构进行分析。

文献[8]中对世纪莲体育中心进行的自振特性参数分析还表明:预应力度与结构前几阶自振频率的关系呈线性变化,随着预应力度的增加,结构自振频率增加,刚度增大;膜材的张拉刚度增大,结构的整体刚度增大,自振频率也相应增大。

3 地震作用下的反应谱分析

在分析世纪莲体育中心动力特性基础上,采用振型分解反应谱法对其进行地震作用分析。根据设计资料,世纪莲体育中心所处建筑场地类别为Ⅱ类,抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.1g (g 为重力加速度),地震作用分组为第 1 组,水平地震影响系数最大值为 0.08,特征周期为 0.45 s,阻尼比为 0.02。

3.1 模态质量参与系数

中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)等规定:在高层建筑结构分析中,计算水平地震作用时,对于单体结构,不考虑扭转耦联时,只取 3~5 个振型;考虑扭转耦联时,取前 9~15 个振型;对多塔结构则振型数不应小于多塔数乘以 9,且计算振型数应保证振型参与质量不小于总质量的 90%。采用振型分解反应谱法对大跨索膜结构进行抗震分析设计时,由于其频谱集中、竖向刚度小、频率低等特性,必须确定取多少阶振型进行参与组合,保证各方向的模态质量参与系数在 90%以上,从而防止地震力偏小,保证振型分解反应谱法得到的结果正确。

采用 ANSYS 进行模态分析,考虑预应力效应,选取子空间迭代法,分别计算前 100、200、300 阶模态的质量参与系数,结果见表 3 和图 6。由于 x 方向和 y 方向振动完全对称,故图 6 中仅给出 x 方向和 z 方向的模态质量参与系数。结合结构的自振特性计算可知:

(1)仅计算前 100 阶振型时,前 37 阶振型均以 z 方向的竖向振动以及 x 、 y 方向的转动为主,其质量参与系数分别高达 74.689%、60.801%、60.801%。增加 2 阶模态后, x 、 y 方向的水平振动质量参与系数突然增加到 92.798%, z 方向的转动质量参与系数增加到 95.556%,这种情况一直持续到 83 阶模态。85 阶模态后,各方向上模态质量参与系数均在 90%以上。

(2)仅计算前 200 阶振型时,前 22 阶振型均以 z 方向的竖向振动为主,其质量参与系数高达 67.651%,而其他方向的质量参与系数均低于 10%。增加 1 阶模态后, z 方向的转动成为振动的主要方面,模态质量参与系数增加到 95.428%,而 z 方向的竖向振动质量参与系数不变,这种情况一直持续到 86 阶模态。90 阶模态以后, z 方向的 2 个方向模态质量参与系数均在 90%以上。直到 132 阶

表 3 质量参与系数计算结果
Tab. 3 Calculation Results of Mass Participating Coefficients

模态 振型	阶次	质量参与系数/%					
		x 方向 水平	y 方向 水平	z 方向 竖向	x 方向 竖向	y 方向 转动	z 方向 转动
前 100 阶	5	3.622	3.622	74.639	60.801	60.801	3.977
	10	3.622	3.622	74.639	60.801	60.801	3.977
	37	3.622	3.622	74.639	60.801	60.801	3.977
	39	92.798	92.798	74.639	83.118	83.118	95.556
	60	92.798	92.798	74.639	83.118	83.118	95.556
	80	92.798	92.798	74.639	83.118	83.118	95.556
	83	99.999	99.999	100.000	99.999	99.999	95.556
前 200 阶	10	0.425	0.425	67.651	7.126	7.126	3.972
	22	0.425	0.425	67.651	7.126	7.126	3.972
	23	0.425	0.425	67.651	7.126	7.126	95.428
	40	10.892	10.892	67.651	9.742	9.742	95.428
	90	11.737	11.737	90.638	11.720	11.720	99.866
	130	86.156	86.156	90.638	76.235	76.235	99.866
	132	99.872	99.872	100.000	99.557	99.557	99.866
	180	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	99.866
前 300 阶	22	0.373	0.373	25.152	5.728	5.728	3.972
	23	0.373	0.373	25.152	5.728	5.728	95.428
	90	10.310	10.310	33.699	9.422	9.422	99.866
	120	75.680	75.680	33.699	61.284	61.284	99.866
	140	87.727	87.727	37.180	80.033	80.033	99.866
	250	87.993	87.993	40.245	82.925	82.925	99.999
	278	99.999	99.999	40.245	99.997	99.997	100.000
	279	99.999	99.999	99.999	99.999	99.999	100.000

模态以后,各方向的质量参与系数才全部在 90%以上。

(3)仅计算前 300 阶振型时,前 22 阶振型均以 z 方向的竖向振动为主,质量参与系数为 25.152%,而其他方向的质量参与系数均低于 10%。增加 1 阶模态后, z 方向的转动成为振动的主要方面,模态质量参与系数增加到 95.428%,而 z 方向的竖向振动质量参与系数不变,这种情况一直持续到 86 阶模态。90 阶模态以后, z 方向的竖向振动质量参与系数增大到 33.699%。107 阶模态后, x 、 y 方向水平振动及转动质量参与系数均超过 z 方向竖向振动,但低于 z 方向转动。直到 279 阶模态以后,各方向的质量参与系数才全部在 90%以上。

以上分析再次说明世纪莲体育中心动力特性复杂。仅计算 100 阶振型,其模态质量参与系数与计算 200、300 阶振型时的差异较大,尤其 x 、 y 方向的水平振动和转动的质量参与系数差异最为显著。建议进行反应谱分析时,结构的振型取 140 阶以上。

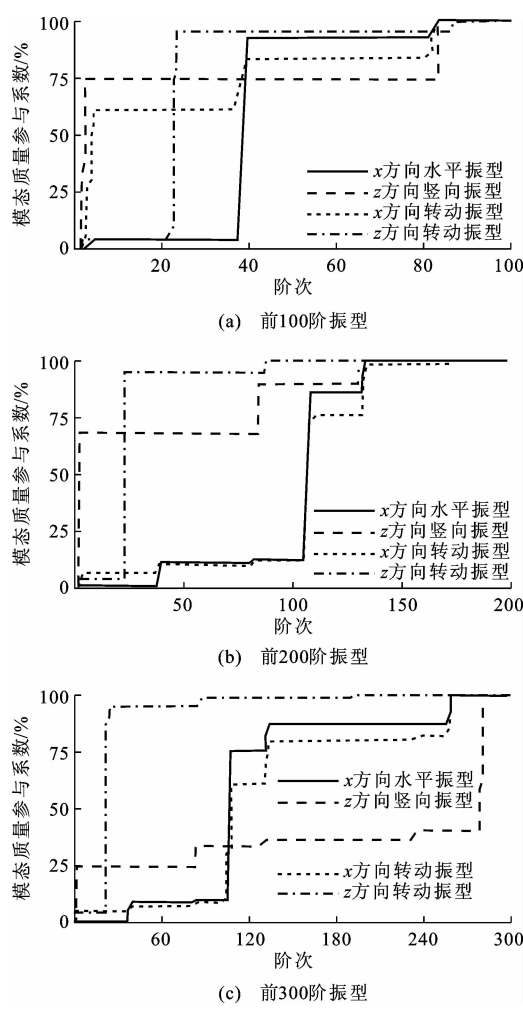


图 6 模态质量参与系数

Fig. 6 Modal Mass Participating Coefficients

3.2 反应谱

根据中国现行抗震规范,计算用于结构的反应谱曲线,采用有限元程序 ANSYS 对结构进行谱分析,计算中考虑预应力效应,有限元模型同图 2。ANSYS 的谱分析基于振型分解反应谱理论,根据上述分析,考虑前 200 阶振型的贡献。由于频率分布密集,采用完全平方组合法(CQC 法)进行振型的组合^[15],分别考虑水平 x 方向、水平 y 方向、竖直 z 方向的一维地震动输入。多维地震作用时, x 、 y 方向组合按 $1:0.85$ 输入, x 、 y 、 z 三向组合按 $1:0.85:0.65$ 输入,分别记为 xy 、 xyz 。由于世纪莲体育中心是一个轮辐式索膜结构,形式上完全对称,在计算精度允许范围内,根据其受力特点和工作机理,选取图 7 所示的节点作为控制点,对其进行谱分析,以掌握结构在地震作用下的动力反应。其中包括内环索节点(节点 1)、脊索节点(节点 2、6、10)、谷索节点(节点 13、16、21)、上压环节点(节点 11)、下压环节点(节点 22)、腹杆节点(节点 22)、膜节点(节

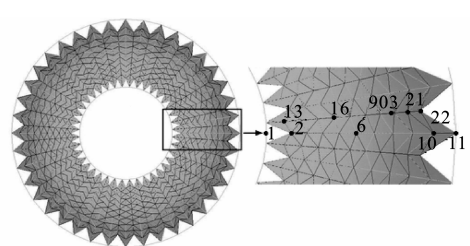


图 7 结构控制点分布

Fig. 7 Distributions of Structure's Controlling Points

点 6、10、13)、墩柱节点(节点 903)。

地震反应谱作用下结构主要杆件内力见表 4。

表 4 地震反应谱作用下结构反应最大值

Tab. 4 Maximum Values of Structure's Responses Under

Seismic Response Spectrum

预应力度			0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
轴应力/ MPa	脊索		347.8	347.8	357.5	346.7	348.0
	谷索		266.9	266.9	268.2	263.6	262.4
	内环索		461.2	461.2	454.5	460.4	459.6
弯矩/ (kN·m)	上压环		73.5	73.5	42.3	67.9	62.8
	下压环		255.7	255.7	112.3	184.9	303.6
	腹杆		47.4	47.4	29.8	45.4	42.8
	墩柱		9 625.9	9 625.9	8 268.7	9 655.6	8 652.6
反力/kN	墩柱		1 494.8	1 494.8	1 106.3	1 315.2	1 284.3
位移/ mm	脊索 节点 6	x 方向	31	31	31	31	35
		y 方向	0.04	38.00	0.04	24.00	22.00
		z 方向	76	76	77	78	77
	谷索 节点 16	x 方向	39	39	36	41	41
		y 方向	2.00	32.00	0.50	31.00	32.00
		z 方向	90	90	88	89	93
	内环索 节点 1	x 方向	24	24	22	23	24
		y 方向	0.03	8.00	0.03	5.00	6.00
		z 方向	84	84	213	83	196
	上压环 节点 11	x 方向	88	88	87	87	81
		y 方向	0.02	5.00	0.02	0.50	3.00
		z 方向	63	63	76	63	69
	下压环 节点 22	x 方向	34	34	32	34	34
		y 方向	1	3	1	2	2
		z 方向	21	21	23	22	23

根据表 4 中数值可得出如下结论:

- (1)一维及多维组合作用下,脊索、谷索以及内环索的应力较为接近。与自重作用下的索内力相比,脊索最大应力要小于自重作用下的应力,为其 0.91 倍;谷索最小应力要大于自重作用下的应力,为其 1.08 倍;而内环索最小应力同样大于自重作用下的应力,为其 1.02 倍。
- (2) z 方向地震作用下,上压环弯矩最小;而 x 方向和 y 方向地震作用下,上压环弯矩最大,前者为

后者的57.6%,且上压环最大弯矩为自重作用下弯矩的55.3%。下压环弯矩同样为 z 方向地震作用下最小,但三维组合作用下为最大,前者为后者的37.0%,且下压环最大弯矩达到自重作用下的14.1倍。腹杆弯矩同样为 z 方向地震作用下最小,而 x 方向和 y 方向地震作用下最大,前者为后者的62.9%,且最大弯矩仅为自重作用下弯矩的9.0%。

(3)墩柱弯矩同样为 z 方向地震作用下最小,而 x 方向和 y 方向地震作用下最大,前者为后者的85.9%,且最大弯矩仅为自重作用下弯矩的60.9%。墩柱反力亦如此,最大反力为最小的79.0%。

(4)不同地震作用下,脊索和谷索的位移反应基本相同:水平 x 方向以三维组合作用下的位移为最大,脊索为35 mm,谷索为41 mm;水平 y 方向则以 y 方向地震作用下位移最大,脊索为38 mm,谷索为32 mm;二维组合作用下脊索竖向位移最大,为78 mm,而三维组合作用下谷索竖向位移最大,为93 mm。

(5)不同地震作用下,内环索水平 x 方向位移基本相同。水平 y 方向则以 y 方向地震作用下位移为最大,但仅为8 mm。 z 方向地震作用下的竖向位移达到最大值213 mm,有 z 方向地震作用参与组合的三维地震作用下,其竖向位移亦达到了196 mm,而其他3种情况下仅为84 mm。

(6)不同地震作用下,上压环和下压环的位移反应基本相同,仅 z 方向地震作用下,压环的竖向位移略大于其他方向地震作用时的位移值。

(7)由以上结构反应可见,结构竖向刚度较低,地震作用需参与荷载组合,且一维及多维组合地震作用下,结构反应处于同一量级,应同时考虑其影响。

4 结 语

(1)世纪莲体育中心的自振频率较低,频谱集中,频谱变化均匀,频率跳跃现象不明显,结构动力特性复杂。

(2)结构以索膜屋盖的竖向振动为主,具有较好的抗侧刚度和抗扭刚度。高阶振型中,上压环、下压环及腹杆等均参与了振动,说明该结构中,刚性受力构件的振动不可忽略。

(3)结构模态质量参与系数与考虑的振型阶次有关,不同阶次时差异较大,尤其 x 、 y 方向的水平振动及转动的质量参与系数差异最为显著。为保证各方向的模态质量参与系数在90%以上,建议反应

谱分析时,其振型取140阶以上。

(4)地震作用对结构上压环、下压环及腹杆的内力影响较大,尤其下压环,其最大弯矩为自重作用下的14.1倍,虽小于设计荷载,但地震作用必须参与荷载组合。

(5)结构竖向位移在不同方向地震作用下变化较大,地震作用的危害主次不明显,应同时考虑一维及多维地震组合作用的影响。

参考文献:

References:

- [1] CECS 158:2004,膜结构技术规程[S].
CECS 158: 2004, Technical Specification for Membrane Structures[S].
- [2] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Southwest Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on Seismic Damage of Buildings in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [3] 周果行.“5·12”汶川地震震区建筑受损的内在原因分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(2):109-115.
ZHOU Guo-xing. Analysis of Internal Factors of Damaged Buildings in “5·12” Wenchuan Earthquake Zone[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 109-115.
- [4] 刘健新,赵国辉.“5·12”汶川地震典型桥梁震害分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(2):92-97.
LIU Jian-xin, ZHAO Guo-hui. Typical Bridge Damage Analysis in “5·12” Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 92-97.
- [5] 叶列平,曲哲,陆新征,等.提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J].建筑结构学报,2008,29(4):42-50.
YE Lie-ping, QU Zhe, LU Xin-zheng, et al. Collapse Prevention of Building Structures: a Lesson from the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42-50.
- [6] 马玉宏,谢礼立,赵桂峰.抗震设防烈度的决策分析方法研究[J].世界地震工程,2007,23(1):86-90.
MA Yu-hong, XIE Li-li, ZHAO Gui-feng. Research on Decision Analysis Method of Seismic Fortification Intensity[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(1): 86-90.

- [7] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [8] 孙文波, 王剑文, 刘永桂, 等. 车辐式大跨度张拉索膜结构的自振和静风作用分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(增 1): 672-675, 690.
SUN Wen-bo, WANG Jian-wen, LIU Yong-gui, et al. Research on Natural Vibration Frequency Analysis and Static Wind Loads for a Rung-shape Tensile Cable-membrane Structure [J]. Industrial Construction, 2007, 37(S1): 672-675, 690.
- [9] 王文胜, 薄燕培, 胡庆卫. 佛山世纪莲体育中心索膜结构[C]//吕志涛. 第十一届空间结构学术会议论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 2005: 604-609.
WANG Wen-sheng, BO Yan-pei, HU Qing-wei. The Cable-membrane Structure of Foshan Century Lotus Stadium[C]//LU Zhi-tao. The 11th Conference on Shell and Spatial Structures. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2005: 604-609.
- [10] 赵煜, 贺拴海, 宋一凡. 在役索桁组合连续钢桥承载力综合评估方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 47-50.
ZHAO Yu, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Evaluation Methodology for Existing Truss-cable Composite Continuous Steel Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 47-50.
- [11] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of Structures [M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [12] RUIZ-TERAN A M, APARICIO A C. Dynamic Amplification Factors in Cable-stayed Structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300(1/2): 197-216.
- [13] 刘伟, 钱锋. 体育建筑中可开合屋面的应用与发展[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(4): 121-126.
LIU Wei, QIAN Feng. Application and Development of Retractable Roof in Sport Architecture[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 121-126.
- [14] REN Jun-chao, ZHANG Qi-lin, TONG Li-ping. Static and Dynamic Pre-tension Influence Analysis About Zhengzhou International Conference Exhibition Center [C]//IASS. Proceedings of the 8th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures. Beijing: IASS, 2006: 256-257.
- [15] SMEBY W, KIUREGHIAN A D. Modal Combination Rules for Multicomponent Earthquake Excitation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13(1): 1-12.

《建筑结构》2012 年征订通知

《建筑结构》是由中华人民共和国住房和城乡建设部主管, 亚太建设科技信息研究院、中国建筑设计研究院、中国土木工程学会共同主办的学术期刊; 为中国建筑科学类核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、中国科学引文数据库核心期刊、《中国学术期刊文摘》收录期刊、建设部优秀科技期刊。

《建筑结构》面向广大工程设计人员, 主要内容包括工业与民用建筑中的混凝土结构、钢结构、空间结构、砌体结构、木结构、地基与基础、工程抗震、风工程、工程检测、房屋加固与改造、建筑新技术新材料开发等方面的研究应用成果、设计施工经验以及工程事故分析处理、结构软件的开发与应用、规范和规程的修编及背景介绍、国内外建筑结构科技综述、重点工程报道、科技简讯、问题和讨论等, 以实用性、科学性、导向性和资料信息性为特色, 自 1971 年创刊以来发行量一直在本专业领先。

《建筑结构》关注国内重大工程进展, 以专刊或专栏的形式集中报道了国内知名设计院近年来的优秀作品设计; 关注行业时事, 曾先后推出过汶川地震专栏、国庆 60 周年专栏等; 关注行业规范修编, 对新规范、规程进行持续报道, 在行业里引起了较大的反响。

《建筑结构》为月刊, 每期定价为 15 元, 全年共 180 元(含邮费)。凡订阅全年杂志的读者均可得到单期出版的《建筑结构·技术通讯》, 全年 6 期, 欢迎读者订阅! 国内邮发代号: 2-755, 也可直接联系《建筑结构》编辑部订阅。

电 话: (010) 57368777

联系人: 秦 强

地 址: 北京市德胜门外大街 36 号德胜凯旋大厦 A 座 4 层

邮 编: 100120

网 址: www. buildingstructure. cn