

天津永乐桥摩天轮结构设计

马明¹, 王卫东², 宋涛¹, 张玉林², 符龙彪¹, 朱礼敏¹, 张宏¹

(1. 中国建筑科学研究院, 北京 100013; 2. 中国建筑工程总公司, 北京 100026)

摘要: 天津永乐桥摩天轮建于子牙河上, 轮桥一体, 建筑造型新颖。摩天轮轮盘采用预应力拉索支承结构, 直径达 110m。介绍了永乐桥预应力拉索支撑摩天轮设计中主要问题, 重点介绍了游艺类结构的设计要求。摩天轮设计分析时重点考虑了地震作用的影响, 并采用了时程分析的方法进行了计算对比, 结果表明振型分解反应谱法分析结果应当调整后再用于结构设计。摩天轮轮盘是受压结构, 设计时针对结构整体稳定问题进行了专题研究, 分析结果表明永乐桥摩天轮结构稳定性满足要求。节点设计是摩天轮结构设计的重要部分, 设计中对各节点进行了实体受力分析, 得到了满意的结果。受施工条件的限制, 摩天轮结构施工方法也成为结构可行性的控制因素, 设计中针对摩天轮结构施工方法进行了分析, 提出了适合施工现场情况的施工方法与施工过程。

关键词: 摩天轮; 拉索支撑结构; 结构设计; 施工过程分析

中图分类号: TU393.304 文献标志码: A

Structure design of Great Wheel on Tianjin Yongle Bridge

MA Ming¹, WANG Weidong², SONG Tao¹, ZHANG Yulin², FU Longbiao¹, ZHU Limin¹, ZHANG Hong¹

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2. China State Construction Engineering Corporation, Beijing 100026, China)

Abstract: A great wheel, built on Tianjin Yongle Bridge, takes a new architecture form. The wheel supported by pre-stressed cable, is 110m in diameter. The main problems in the design process are discussed in this paper, especially the requirements of the amusement device. Time-history analysis is used while studying the seismic action, and the results show that the seismic action from response spectrum method analysis should be adjusted when used for design. The stability of the wheel is a key problem for the great wheel, which is studied in the structure analysis and the results show that the stability of the wheel meet the requirements of the Code. The joint design is an important part of the structure design, and joint analysis is done and satisfactory results are obtained. Another key problem is the construction process analysis, which is extensively studied, and a construction sequence is proposed.

Keywords: great wheel; cable supported structure; structure design; construction process analysis

作者简介: 马明(1977—), 男, 河北石家庄人, 工学硕士, 高级工程师。E-mail: maming@cabrtech.com
收稿日期: 2009 年 4 月

0 前言

天津永乐桥(原名慈海桥)工程位于天津市河北区、红桥区交界处的子牙河上,地处传统历史文化区。永乐桥西侧为中国近代民族工业发祥地的三条石地区,两侧建有大悲院、古文化街等反映中国传统文化的特色建筑,毗邻大胡同商业区。

永乐桥规划为城市主干道,主桥部分全长 204m,主桥中央的河面上竖立起直径为 110m 的摩天轮(图 1)。摩天轮轮盘为辐射状预应力拉索和钢管桁架轮箍组成的结构,支撑于 2 个高度达 65m 的人字形钢结构塔架。人字形塔架结构由互成 120° 的 3 条直线型钢箱体组成,摩天轮轮盘支承于顶部连接 2 个人字形钢结构塔架的横梁,横梁同时起到摩天轮轮盘转动主轴的作用。

永乐桥主桥分上下两层,上层为机动车道,下层为非机动车和步行通道以及商业空间,摩天轮登仓站台设在下层桥面。永乐桥将桥梁与摩天轮结合在一起,建筑造型新颖,在功能上集交通功能、商业功能和观光功能为一体。

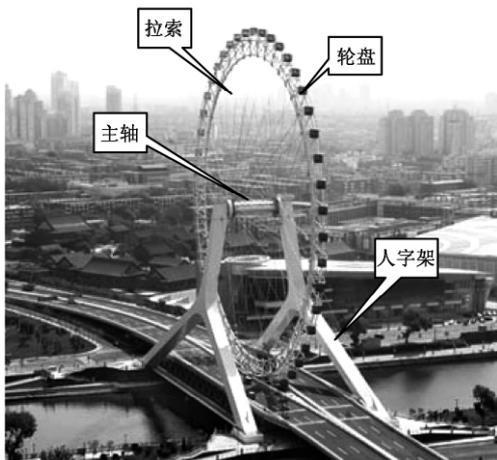


图 1 永乐桥摩天轮实景

Fig. 1 Photo of Great Wheel on Yongle Bridge

1 结构设计要求

永乐桥摩天轮是永久性的游乐设施,设计时不仅需遵守建筑结构相关规范,还需遵守游乐设施相关规范。永乐桥摩天轮基本设计要求如下:

(1) 根据文献[1]规定,风速小于 15m/s 时,摩天轮可以正常运营,应按正常运营状态进行设计,设计方法采用容许应力法,结构的安全系数,对于重要轴、销轴及重要焊缝取大于等于 6,其他部分取大于等于 4;根据文献[1]的规定,该状态下可动部分结构

需考虑动载系数 1.3。

(2) 风速大于 15m/s 时,摩天轮关闭运营,需按极限状态进行设计。极限状态下结构设计按照 GB 50017—2003《钢结构设计规范》^[2]和其他有关现行规范的规定设计。

(3) 摩天轮设计基本参数见表 1。

表 1 摩天轮设计基本参数

Table 1 Design parameters of Great Wheel on Yongle Bridge

顶点高度	119.8m	轿厢形式	带平衡装置的悬挂式
转速	30 分钟/转	轿厢数量	48 个
轿厢线速度	0.2m/s	乘客额定数量	8 人/轿厢
驱动方式	液压摩擦轮驱动	设计运营时间	12h/d
回转支承	直径约 3.6m,共 2 个	设计使用年限	50a

摩天轮建造地的极限最大风速为 31m/s (百年一遇);抗震设防烈度 7 度,设计基本地震加速度值为 $0.15g$,设计地震分组为第一组,抗震构造措施按 8 度进行设计,场地类别为 III 类。

2 结构分析

2.1 结构布置

永乐桥摩天轮结构布置图见图 2(图中高程采用大沽高程)。摩天轮塔架起于子牙河两岸,根部间距 125.4m 。塔架作为轮盘支承结构承受轮盘传递来的力与弯矩作用,构件采用箱型截面,规格为 $4000 \times 3500 \times 40$ 。从侧立面上来看,塔腿和塔柱的三肢构件在同一个与竖平面夹角 9.624° 的倾斜空间平面内,塔柱顶端的横梁(主轴)沿横桥向水平放置,工作原理类似一个大的门式刚架,主轴采用截面 $\Phi 2800 \times 60$ 钢管。

从正立面上来看,塔架塔腿与塔柱成 120° 夹角,在塔柱顶端和塔腿底端之间设置稳定索,对整个塔架起平面内的稳定作用。塔腿与水平面夹角为 30° ,在竖向荷载作用下塔脚基础承受水平推力较大。为平衡塔腿向外的水平推力,在 4 个塔脚之间,沿顺桥向设置预应力水平平衡索,平衡索采用两根平行钢索,隐藏于永乐桥外侧悬挑的水平梁内。塔架支腿采用桩承台基础,根部固接。

摩天轮转动部分为直径 110m 的轮箍,轮箍采用三角形断面钢管桁架式结构,轮箍外弦杆采用 2 根截面 $\Phi 457 \times 30$ 钢管,间距 3.1m ,内弦杆采用 1 根 $\Phi 530 \times 30$ 钢管。轮箍与回转支承通过 48 根交替布置的径向索相连接。在轮箍上布置 16 条沿回转支承切向方向的切向索以驱动摩天轮。轮箍通过回转支承支承于主轴之上。摩天轮整个轮盘位于永乐桥之

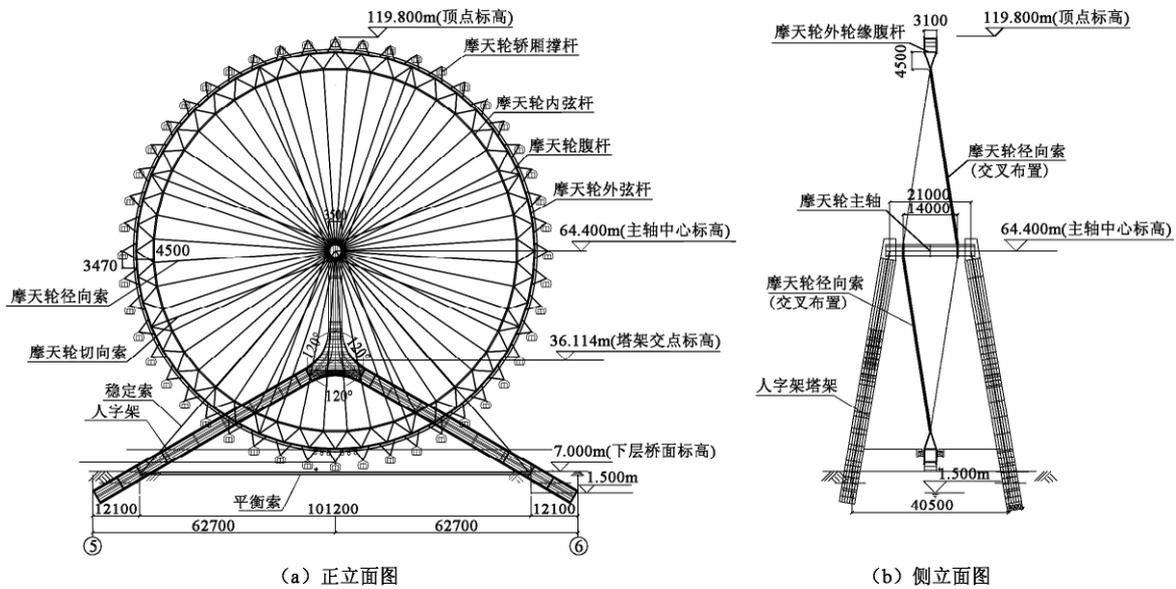


图2 摩天轮结构布置图
Fig.2 Layout of Great Wheel

上在永乐桥桥面中间留缝供轮盘通过。轮盘的驱动系统也布置于此,驱动系统对轮盘可提供顺桥向约束。正常运行时在横桥向轮盘不受约束,当轮盘变形较大时,桥面可对轮盘产生一定的约束作用。

2.2 结构分析

作为一个非常规的建筑,永乐桥摩天尚轮需进行除常规建筑以外的特别分析:

(1) 结构强度分析分两类情况:正常运行情况与极限情况。正常运行情况考虑轮盘运行时的动力系数,对各种可能荷载工况进行标准组合,按容许应力法进行构件校核。极限情况下采用极限状态设计方法进行结构受力校核。

(2) 摩天轮轮盘为预应力结构,受拉索中预应力影响,轮箍处于受压状态。决定轮盘状态的控制因素是拉索的预应力,轮盘的稳定决定了轮盘设计的可行性。

(3) 永乐桥作为市内交通主干道,摩天轮设计必须考虑可能出现的破坏情况。

(4) 摩天轮建造场地位于子牙河上,轮盘施工时只能以永乐桥为施工场地,因此设计需考虑合适的施工方法与施工顺序,以保证摩天轮设计的实现。

摩天轮设计采用 ANSYS 软件进行结构分析。

2.2.1 摩天轮结构模态分析

摩天轮轮盘与人字塔架主要通过拉索与主轴相连接,刚度较弱,多数振型以轮盘自身振动为主。表2列出了摩天轮结构的前10阶频率,图3列出了前4阶振型图,其中1阶振型为轮盘绕主轴旋转振型,2阶振型为轮盘在水平面内平动振型,3~4阶振型为轮盘在自身平面内的弯曲变形。

表2 摩天轮结构前10阶频率
Table 2 Frequency of Great Wheel

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	0.353	6	0.820
2	0.483	7	1.119
3	0.576	8	1.133
4	0.645	9	1.189
5	0.691	10	1.304

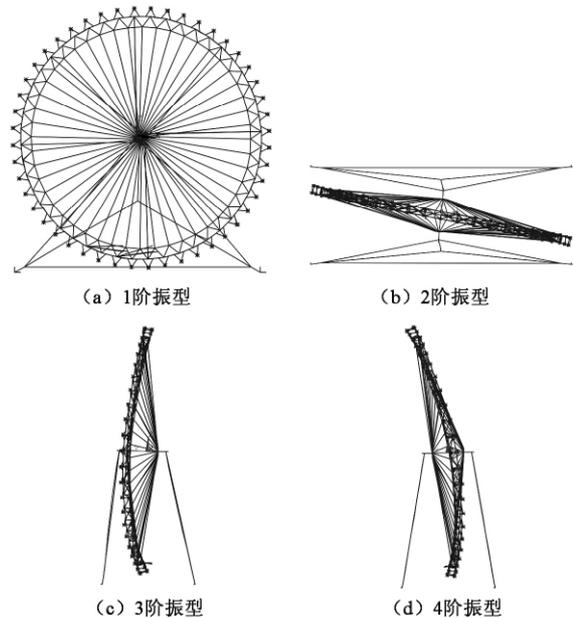


图3 摩天轮前4阶振型
Fig.3 Natural mode shapes of Great Wheel

2.2.2 地震作用

摩天轮结构地震作用分析主要采用振型分解反应谱法。考虑到结构受力相对复杂,结构跨度大,高度大于100m,根据 GB 50011—2001《建筑抗震设计

规范》^[3]要求,采用时程分析法进行多遇地震作用下的补充计算。时程分析计算时,按照场地类别和设计地震分组,选用 El Centro 波、Taft 波和天津宁河波,分别在结构的两个主轴方向进行了弹性时程分析,并与振型分解反应谱法的计算结果进行了比较^[4]。根据比较结果,设计分析时应将振型分解反应谱法所得到的地震作用加大 50%。

2.2.3 稳定分析

拉索支承式轮缘的刚度是建立在预应力基础上的,轮箍在其全使用寿命期内均处于受压状态,因此需要对轮箍的整体稳定性问题进行研究;人字塔架是摩天轮轮盘的支承结构,在各种荷载作用下整体的稳定性也需加以分析。稳定分析主要进行了线性屈曲分析和考虑初始缺陷的几何非线性屈曲分析^[5],分析工况包括:

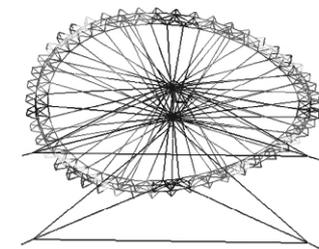
- 工况 1: 满载 + 风速 15m/s 下风荷载;
- 工况 2: 满载;
- 工况 3: 恒荷载 + 极限风速 31m/s 下风荷载。

表 3 列出了不同工况下摩天轮结构屈曲系数,图 4 列出了工况 1 作用下摩天轮结构整体屈曲模式。

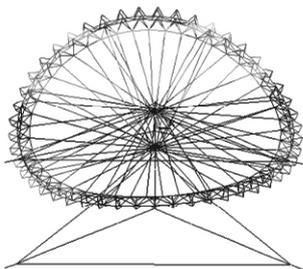
表 3 摩天轮结构屈曲系数

Table 3 Buckling coefficient of Great Wheel

加载工况	特征值屈曲系数	非线性屈曲系数
工况 1	6.9094	4.7
工况 2	6.9150	5.1
工况 3	4.6804	3.4



(a) 第 1 阶线性屈曲模式



(b) 考虑缺陷的非线性屈曲模式

图 4 屈曲分析工况 1 屈曲模式

Fig. 4 Buckling mode shape caused by buckling analysis case 1

2.2.4 径向索破坏分析

永乐桥摩天轮建造于桥上,尽管桥面设置有安

全防护措施,但仍然存在汽车撞击摩天轮,使摩天轮径向索破坏的可能。考虑这一情况,设计进行了拉索连续 3 根失效状态分析(图 5)。该工况分析主要考虑结构不出现屈服,且不出现失稳情况,以便维修。

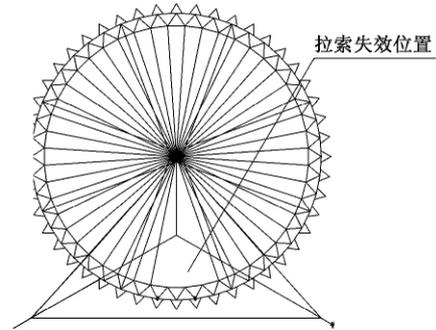


图 5 径向索失效位置示意图

Fig. 5 Failure radial cables

径向索破坏是一种偶然荷载工况,分析时主要考虑正常运营工况:

- (1) 工况 1: 1.3 恒荷载 + 1.3 活载;
- (2) 工况 2: 1.3 恒荷载 + 1.3 活载 + 风速 15m/s 下风荷载。

针对径向索连续 3 根失效状态进行屈曲分析得出,工况 1 荷载组合作用于结构时,非线性稳定系数为 4.5,工况 2 荷载组合作用下,非线性稳定系数为 4.2,均满足稳定要求。

3 关键节点分析

3.1 轮毂与回转支承

摩天轮轮盘拉索均连接于轮毂,通过轮毂将摩天轮受力传递至人字塔架主轴。轮毂与人字塔架主轴之间通过回转支承连接,以实现转动功能。回转支承需保证荷载传递,并采取有效方法消除因变形产生的主轴与回转支承间夹角变化。回转支承外圈直径 3444mm,轮毂外圈直径 4053mm,轮毂与主轴连接详见图 6。

3.2 轮盘拉索节点

轮盘拉索节点外形为 U 形,节点通过两块 40mm

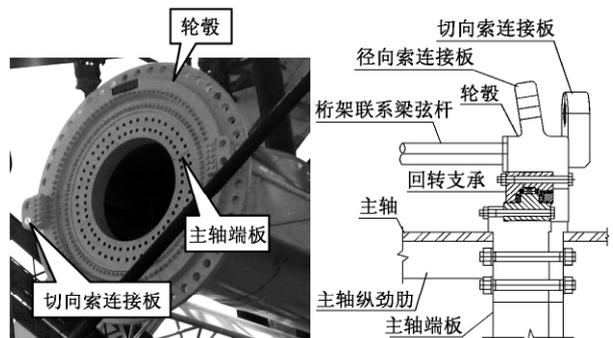


图 6 轮毂与主轴连接图

Fig. 6 Connection of hub and main spindle

厚钢板将拉索拉力传递到弦杆上,拉索采用冷铸镦头锚具,通过固定螺母锚固拉索。节点的盖板上布置4个 $\Phi 54$ 的螺栓孔,张拉施工时可穿过 $\Phi 52$ 螺杆,以便于固定千斤顶反力架(图7)。

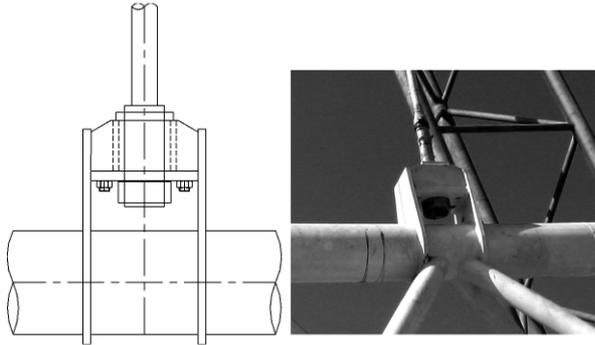


图7 轮盘拉索节点构造

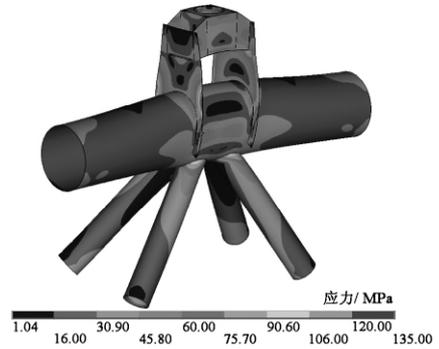
Fig. 7 Connect joint of cable and wheel

设计分析时针对节点进行了有限元分析,得到轮盘拉索节点正常运营状态下的应力云图(图8),可以看出,节点最大应力为135MPa,同样发生在弦杆连接受拉钢板的一侧,满足受力要求。

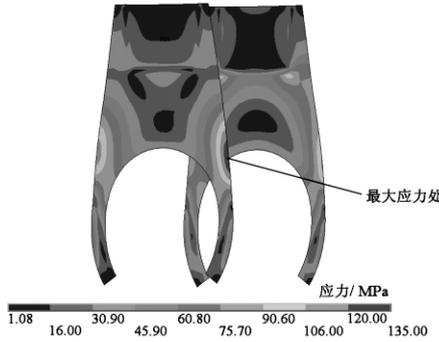
4 安装过程

天津永乐桥摩天轮采用全部由柔性轮辐索支承的结构形式,轮箍合拢前,仅由轮辐索和轮箍组成的机构不能形成受力体系,也就不能保持几何形状的不变性,不能维持体系平衡的稳定性。永乐桥摩天轮建于桥上,受施工现场实际情况影响,摩天轮要采用非常规施工方法进行安装。

摩天轮的顺利施工取决于摩天轮设计的可实施



(a) 整体模型应力分布



(b) 连接板应力分布

图8 轮盘拉索节点正常运营状态下应力云图

Fig. 8 Stress contour of the connection joint of cable and wheel

性,设计中对安装方法进行研究。

经过多方案比较和多轮计算分析,确定共采用6对临时性支承臂,支承臂采用三角形截面的格构式桁架。轮箍采取单向旋转、逐段拼装的方式进行安装,并穿插进行临时支承臂和轮辐索的安装。轮盘安装流程示意图9。

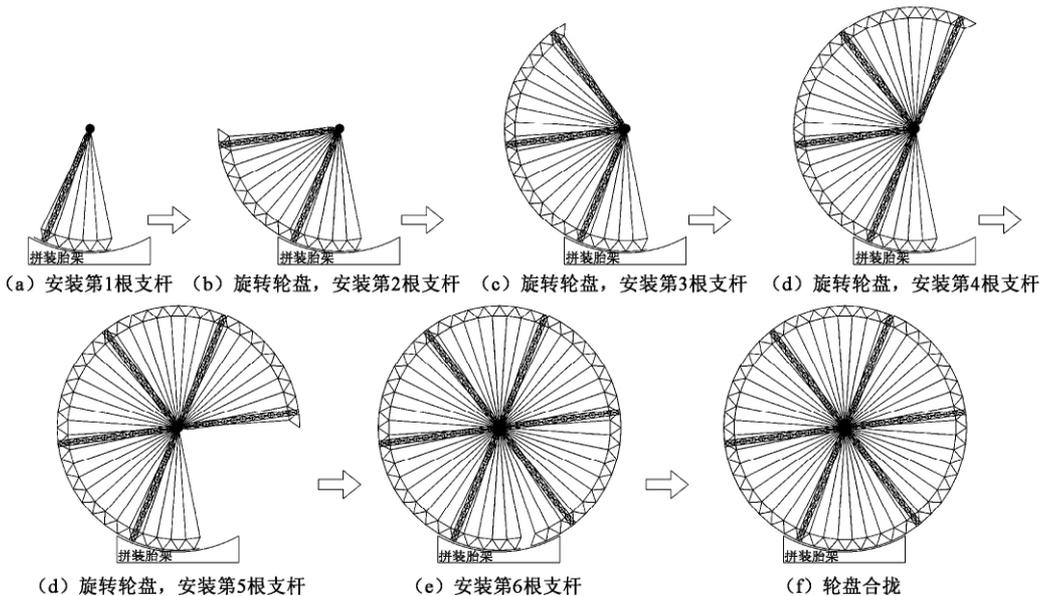


图9 轮盘安装流程示意图

Fig. 9 Wheel installation procedures

(下转第110页)

- [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1999: 1065-1066. (in Japanese)
- [6] 鈴木英之,西原寛,松崎育弘. 柱高さの途中まで存在する鉄骨がRC柱のせん断性状に及ぼす影響[J]. コンクリート工学年次論文報告集, 1999, 21(3): 577-582. (Suzuki H, Nishihara H, Matsuzaki Y. Shear performance of RC columns effected by the shape steel truncated in the midway of the columns[J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 1999, 21(3): 577-582. (in Japanese))
- [7] 鈴木英之,西原寛,松崎育弘. SRC造からRC造へ構造形式が切り替わる柱のせん断性状[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 東京: 日本建築学会, 1999: 1069-1070. (Suzuki H, Nishihara H, Matsuzaki Y. Shear performance of the column where structural form changes from SRC to RC [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1999: 1069-1070. (in Japanese))
- [8] 山口美有希,木村潤一,鄭真安,等. SRC-RC混合柱部材の骨格曲線モデル[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 東京: 日本建築学会, 2004: 1177-1178. (Yamaguchi M, Kimura J, Chung J, et al. Skeleton curve model of SRC-RC mixed columns[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004: 1177-1178. (in Japanese))

(上接第82页)

轮盘安装方案具体步骤如下:①搭设拼装胎架,安装第1根临时支杆桁架,安装第1段圆心角为 30° 的轮箍及径向索;②绕主轴顺时针旋转 30° ,安装拼接第2根临时支杆桁架,安装第2段轮箍及径向索,索力张拉至设计预应力的20%;③绕主轴依次旋转 30° ,逐段安装轮箍及径向索,并在每 60° 圆心角处设置临时支杆桁架,张拉径向索至设计预应力的20%;④轮盘全部安装完毕后,张拉径向索的索力至设计预应力的50%,逐个拆除临时支杆桁架,最后将径向索的索力张拉至设计预应力的100%。轮盘安装完成后安装切向驱动索。

施工验算考虑了恒载、预应力及施工期间风荷载的影响,对不同施工时期的结构进行受力、变形等方面验算。摩天轮轮盘未闭合前仅依靠临时支杆支撑,刚度较小,施工验算重点对各施工阶段的整体稳定性进行了验算。分析表明,在轮盘安装施工的过程中,通过设置可靠的临时支撑和采取适当的施工措施,轮盘结构的强度及稳定性均能满足安全性的要求。

5 结论

永乐桥摩天轮建造于永乐桥之上,轮桥合一,建筑形式新颖。摩天轮轮盘结构采用预应力拉索支撑的结构形式,外形优美,但对结构设计带来了一定挑战。通过对摩天轮结构的分析研究,得到以下结论:

(1) 通过地震反应分析,可以发现振型分解反应谱法所得到的地震作用偏小,该类型结构尚应进行地震时程分析对比。

(2) 摩天轮轮盘在正常使用情况下受到较大的压力,轮盘的稳定是决定结构可行性的的重要因素。

(3) 汽车偶然撞击不影响整个结构的安全性,但应做相应的布置防止该情况发生。

(4) 摩天轮建造地点位于桥上,施工方案设计影响到整体结构可行性。

摩天轮结构设计中,对以上要素进行了详细分析,保证了结构的可行性与可靠性。目前该摩天轮已经运行2年,成为了天津市的一张城市名片。

参 考 文 献

- [1] GB 8408—2000 游艺机和游乐设施安全[S]. 2000. (GB 8408—2000 Amusement device safety code[S]. (in Chinese))
- [2] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 2003. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. (in Chinese))
- [3] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2001. (GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. (in Chinese))
- [4] 朱礼敏,宋涛,马明. 天津慈海桥摩天轮结构的抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2008, 38(2): 70-73. (Zhu Limin, Song Tao, Ma Ming. Seismic behavior of skyscraper wheel structure in Tianjin Cihai Bridge[J]. Building Structure, 2008, 38(2): 70-73. (in Chinese))
- [5] 朱洪祥,马明,宋涛,等. 天津慈海桥摩天轮结构的稳定性分析[J]. 建筑结构, 2007, 37(3): 69-71. (Zhu Hongxiang, Ma Ming, Song Tao, et al. Stability analysis of skyscraper wheel structure in Tianjin Cihai Bridge[J]. Building Structure, 2007, 37(3): 69-71. (in Chinese))