

石景山体育馆网壳结构加固研究

徐丽丽^{1,2} 吕晓寅¹ 高 日¹

(北京交通大学土木建筑工程学院¹,北京 100044;博来思(北京)管道技术有限公司²,北京 100085)

摘要 石景山体育馆网壳结构始建于1989年,杆件锈蚀、设计规范和计算方法的改变,需对石景山体育馆网壳结构进行静动力分析,找出结构存在的问题:结果部分杆件强度不足,部分杆件刚度不足。碳纤维加固混凝土结构的工程较多,而加固钢结构,特别是轴心受压构件的工程较少。本文依据钢结构加固原理,采用了新型加固方法——碳纤维(FRP)加固法来增大杆件的强度,通过增设附加支撑来改变杆件的刚度。分析了FRP粘贴长度和厚度对受压构件屈曲荷载的影响,并提供了本结构中所需的粘贴长度及厚度。

关键词 网壳结构 钢结构加固 支承 FRP

中图法分类号 TU398.9; **文献标志码** A

石景山体育馆经过近20年的使用,由于防水层老化,造成了钢筋混凝土边梁上的球节点以及杆件出现锈蚀,又由于设计规范和计算方法的变迁,有必要对此在役网壳结构进行受力分析,进而确定加固方案^[1,2]。

1 工程概况

石景山体育馆网壳总建筑面积8 459 m²,固定坐席3 000座,该馆采用下沉式结构^[3]。屋盖结构平面为正三角形,边长99 m,由三片四边形的双曲抛物面双层钢网壳组成,覆盖面积为4 244 m²,各网壳支承在中央的三叉形格构式刚架和外缘的钢筋混凝土边梁上,如图1所示。

本工程中每个网壳的短边长29.0 m(水平投影26.2 m),长边长46.9 m(水平投影45.4 m),设计中将每边十等分,所形成的网格尺寸比较适中。由于在20世纪80年代时对双曲抛物面网壳的稳定问题研究得还不够,对于这种中等跨度的网壳,不敢贸然设计成单层,网壳的厚度为1.5 m。

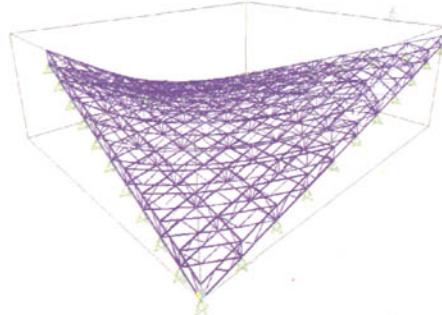


图1 石景山体育馆外观及模型图

2 网壳结构静动力性能分析

采用SAP2000有限元软件对此在役双层网壳结构进行静动力性能分析。

2.1 建立模型

网壳结构的边缘构件为大截面混凝土边梁和

三叉的格构钢架梁,可视为网壳结构的弹性支承,将这种弹性支承和刚性支承下的分析结果进行对比,内力变化最大为1.6%,位移变化为0.4%。说明这两种边缘构件刚度很大,对结构的内力位移影响很小,可以按刚性支承来分析整个结构。

2.2 杆件截面

在混凝土边梁处的杆件由于锈蚀截面削弱,需要重新选择截面。经检测该处杆件大约锈蚀厚度为2 mm左右。

2.3 设计荷载

恒荷载(包括屋面荷载、网壳自重、设备重)、活荷载、雪荷载及风荷载,并通过计算程序设置地震作用及温度荷载。对以上各种作用进行工况组合。

2.4 结构分析

分析结果表明结构存在两个方面的问题:强度不足和刚度不足。

2.4.1 强度不足

图2为静力作用下结构的应力图,部分杆件应力超限,具体位置是支座处腹杆,超限杆件应力比见表1。

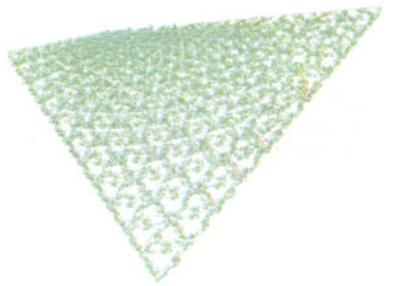


图2 静力作用下应力比

表1 超限杆件应力比

| 编号 | 721 | 741 | 761 | 781 | 801 | 669 | 1 544 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 应力比 | 1.339 | 1.354 | 1.387 | 1.192 | 1.355 | 1.273 | 1.483 |

2.4.2 刚度不足

图3为地震作用下应力图,无杆件出现应力超限,但部分杆件刚度不足,长细比过大,见表2,即图3中的红色杆件。

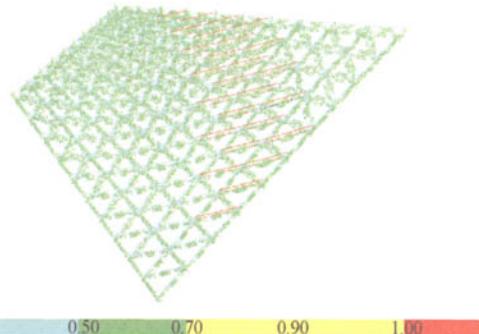


图3 地震作用下应力比

表2 长细比计算

| 编号 | 2 168 | 2 170 | 2 186 | 2 188 | 2 196 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| λ | 155 | 163 | 155 | 171 | 163 |
| $[\lambda]$ | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |

3 加固方案研究

加固从两个方面进行,一是增大杆件的强度,二是改变杆件的长度。考虑到杆件的刚度是平面外不足,而杆件应力是在静力下超限,因此首先增大杆件的强度,然后再改变杆件的计算长度。

3.1 粘碳纤维增大杆件的强度

近年来,由于纤维增强复合材料(FRP)具有优异的物理、力学性能,如强度和刚度高、抗疲劳性能和耐腐蚀性能好、施工方便、施工周期短、不损伤原结构等,已广泛应用于土木工程结构的加固和修复中^[4]。

根据功能原理推导出FRP加固轴心受压构件屈曲荷载的计算公式^[5]

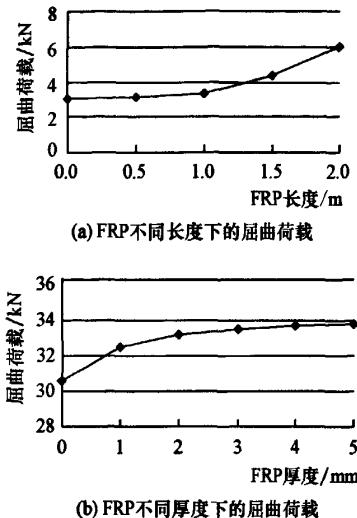
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_r}{L^2} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{(EI)_r}{E_s I} - 1 \right] \left[\frac{\pi(L - L_d)}{L} + \sin \left(\frac{\pi(L - L_d)}{L} \right) \right]} \quad (1)$$

式中:(EI)_r为加固区域截面的组合抗弯刚度;

$$(EI)_r = E_p \frac{\pi [(D_d + 2t_p)^4 - D_d^4]}{64} + E_s \frac{\pi [D_d^4 - d^4]}{64} \quad (2)$$

L_d 为钢构件中粘贴 FRP 区域的长度; D_d 为损伤区域的外径; d 为钢管的内径; E_p 为 FRP 沿钢构件轴线方向的弹性模量; E_s 为钢构件的弹性模量; t_p 为 FRP 的厚度。

利用以上公式分析 FRP 长度及厚度对构件承载能力的影响,并绘制对比图 4。



4 FRP 加固轴心受压钢管的屈曲荷载

由此图可以看出增加 FRP 的粘贴长度能够有效增大构件的刚度,提高屈曲荷载;而增加 FRP 的厚度对提高屈曲荷载并不明显。因此可以对这些杆件实施如下加固方法:FRP 的厚度为 2 mm,粘贴长度为 2 m,从中部开始两边各 1 m。表 3-1 列出了加固杆件的实际内力和加固后的承载力。

表 3-1 加固杆件内力

| 编号 | 721 | 741 | 761 | 781 | 801 | 669 | 1 544 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 内力/N | 55 844 | 57 981 | 60 449 | 52 470 | 59 711 | 52 433 | 64 628 |
| 加固前承载力/N | 42 939 | 44 065 | 44 628 | 45 271 | 45 271 | 42 376 | 44 628 |
| 加固后承载力/N | 59 455 | 64 445 | 68 189 | 70 482 | 70 900 | 57 155 | 68 320 |

3.2 增设附加杆件增大杆件的刚度

对于上下弦杆各有一个支撑点的构件,在上弦杆件所在平面内对上弦杆件加支撑,在下弦杆件所在平面内对下弦杆件加支撑。如图 5(a)所示。采取

就近原则,在节点 1 和节点 2 之间、节点 3 和节点 4 之间加支撑杆件。支撑杆件一端与原有球节点焊接,另一端与待加固弦杆相贯。

对于上弦杆有 3 个支撑点,对下弦杆有 1 个支撑点,加固原则同图 5(a)一样,加固后图形如图 5(b)。加固后,长细比满足要求。

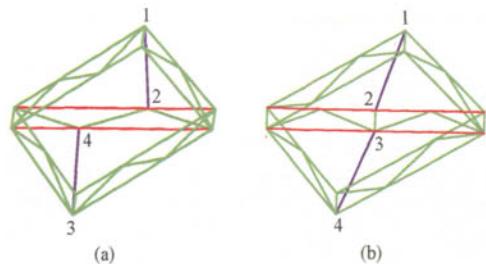


图 5 弦杆加固方案

加固完成后对结构进行校核分析,采用 SAP2000 有限元软件重新计算,包括各种工况下的静力分析及动力分析。分析结果为:杆件的最大应力:193.5 MPa < 215 MPa;节点的最大位移:28.65 mm < 52 417 mm/400 = 131.04 mm。杆件的应力和节点的位移均在允许范围以内,所以加固后该结构是安全的。

4 结语

对在役网壳结构进行受力性能分析后,引进了新型加固方法——粘贴 FRP 加固轴心受压构件,并分析了影响加固效果的两个因素——FRP 厚度及长度。但并没有具体考虑各种缺陷的影响,而国内外对 FRP 加固钢结构的研究和应用则相对较少,因此研究 FRP 在钢构件的拉压、损伤、疲劳等方面的应用原理和具体加固措施成为加固钢结构的关键。

参 考 文 献

- 1 完海鹰,郭 裴. CFRP 加固钢结构的现状与展望. 安徽建筑工业学院学报,2006;14(6):63~64
- 2 清华大学土木工程系. CECS77:96. 1996.《钢结构加固技术规范》. 北京:1996;6—22

(下转第 6152 页)

Study on the Relations between Soil Intensity and Density of Different Water Content Conditions

JIN Juan-juan, ZHANG Lin-hong, WU Hua-Jin¹, LI Hong-bo

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, P. R. China;
Yunnan Traffic Advisory Limited Company¹, Kunming 650031, P. R. China)

[Abstract] In order to explore the relations between the intensity and density of soil in different water content conditions, particularly in high-moisture conditions, so goes the following test of two kinds of clay soil. After experimentize unconfined compressive strength test, the results showed: in low moisture conditions (less than the plastic limit), soil intensity increases along with the density continuously improving. In high moisture conditions (greater than or equal to the plastic limit), the intensity of soil will happen with a critical density (the density usually about 0.90 ~ 0.95) corresponding to the peak, much finer the soil, much lower the critical density. So in the actual project construction process, the proposal is to strictly control the moisture of the filling soil. In high moisture environment construction, it is advisable to control the proposed reclamation soil compactness around the critical density.

[Key words] clay soil intensity water content plastic-limit critical-density unconfined compressive strength test

(上接第 6147 页)

(3):62—62

3 沈世钊,顾年生. 亚运会石景山体育馆组合双曲抛物面网壳屋盖结构. 建筑结构学报,1990;11(1):21—29

5 吕烈武,沈世钊,沈祖炎,等. 钢结构构件稳定理论. 北京:中国建筑工业出版社,1993

4 王静娟,陈占峰. 结构构件常用加固方法的优略. 河南建材,2006;

Research on Strengthening of Shell Structure Named Shijingshan Stadium

XU Li-li^{1,2}, LÜ Xiao-yin¹, GAO Ri¹

(School of Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University¹, Beijing 100044, P. R. China;
BRASS (Beijing) Pipeline Technologies, Ltd², Beijing 100085, P. R. China)

[Abstract] The shell structure of Shijingshan Stadium was established in 1989. The shell structure of Shijingshan Stadium is analyzed on the aspects of static and dynamic, then the problems of the structure will be found. : the strength of some bars is inadequate and the stiffness of some bars is not enough. FRP reinforce method is used in concrete structure widely, but fewer in steel structure, especially for components in axial compression. In this paper, Based on the strengthening principles, the intensity of bar is increased with new method of FRP. Additional braces are used to change the stiffness of bars. The effects on bars' buckling load by FRP paste length and thickness are analyzed and the needed length and thickness in the structure is provided.

[Key words] shell structure the strengthening of steel structure support FRP