

车辐式索桁架拉索松弛敏感试验及可靠性评估

刘占省¹, 韩泽斌², 何建², 王泽强³

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 北京市建筑工程研究院有限责任公司, 北京 100036)

摘要:大跨空间钢结在实际工程操作或环境影响下势必会造成一定程度的松弛,拉索出现松弛后力系必定重新调整达到新的平衡,会引起杆件内力的增加或减小,影响结构安全性,以设计的跨度为 6 m 的车辐式索桁架结构为对象,进行了车辐式索桁架结构拉索松弛敏感性试验,研究了不同种拉索发生松弛时对结构的影响,得出环索松弛对结构力学性能影响最大,定义环索为车辐式索桁架结构敏感性构件;全部下径向索发生松弛时对结构影响最为不利. 基于可靠性理论,运用响应面法和蒙特卡洛法得到可靠度指标,得到不同拉索发生松弛下对车辐式索桁架结构可靠度的影响和结构不同参数的灵敏度,可为车辐式索桁架结构发生预应力损失进行安全评估提供依据.

关键词:车辐式索桁架; 拉索松弛; 静力试验; 敏感性构件; 可靠性评估

中图分类号: TU394

文献标志码: A

A study was made of the influence to spoke cable-truss structure when different cable was loosened. It is concluded that the effect of relaxation on the loop cable is most obvious, and the loop cable is defined as the relaxation sensitive component, the most unfavorable structure occurs when all the lower radial cables are relaxed. Based on the reliability theory, the influence of different cable tensions on the reliability of the spoke cable truss structure and the sensitivity of different parameters of the structure were obtained by the response surface method and Monte Carlo method, the safety assessment could be performed for the prestress loss of the spoke cable truss structure.

Key words: spoke cable-truss; relaxation of cable; static test; sensitive component; reliability assessment

Sensitive Test on Relaxation of Cable and Reliability Assessment of Spoke Cable-truss Structure

LIU Zhansheng¹, HAN Zebin², HE Jian², WANG Zeqiang³

(1. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Beijing Building Construction Research Institute Co. Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Large-span steel structures will inevitably cause some relaxation under the influence of actual engineering operations or environmental influences. After the cables are loosened, the force system must be readjusted to a new equilibrium, which will cause the internal forces of the members increase or decrease, and affect the structural safety. The designed cable-truss structure with a span of 6 m as the object, the experiment on relaxation of cable was done.

车辐式索桁架结构中的索基本都是施加了设计好的预应力值的,但是在实际工程操作或环境影响下势必会造成一定程度的松弛. 预应力是结构体系中的一个自平衡力系,如果出现预应力损失,力系必定重新调整达到新的平衡,因此引起一些杆件内力增长,则可能是有害的,危害结构的安全使用.

目前,国内外对于结构预应力损失后的力学性能做了一些研究,郑君华^[1]以 Geiger 和 Levy 体系索穹顶结构为例,分析了部分索松弛或破断后的受力性能. 刘洪波^[2]研究了索撑节点处的滑移摩擦对弦支穹顶结构预应力分布的影响. 刘占省^[3]针对弦支筒壳结构中拉索预应力损失问题,基于可靠度理论进行研究. 王树^[4]模拟了施工过程中环索预应力损失并分析了预应力损失对弦支穹顶结构的影响. Kristek^[5]采用了蒙特卡洛拉丁超立方抽样方法对混凝土箱梁徐变引起的预应力损失进行了可靠性分析. YAN^[6]提出一种等效摩擦单元来模拟索杆节点

收稿日期: 2018-04-08

基金项目: “十三五”国家重点研发项目(2018YFF0300300, 2018YFF0300306)

第一作者: 刘占省(1983—),男,高级工程师,工学博士,主要研究方向为 BIM 技术及其工程应用、绿色建筑及建筑工业化、复杂钢结构设计与施工. E-mail: lzs4216@163.com

的摩擦,分析了索杆接头的摩擦引起的预应力损失对索支承结构的影响.上述研究大都针对于弦支穹顶、索穹顶空间结构,而对于车辐式索桁架结构拉索发生松弛的研究较少,且在结合试验、修正模型分析拉索松弛和从可靠性评估拉索松弛对车辐式索桁架结构的影响方面研究更少.

本文设计了一跨度为 6 m 的车辐式索桁架结构模型,并依据张拉成型后试验模型进行三维扫描得到修正理论模型,通过试验数据与理论数值、修正数值对比分析,对车辐式索桁架结构在拉索发生松弛下内力位移变化进行研究,确定其敏感性构件.基于可靠性理论,考虑实际工程中多种因素对拉索发生松弛的影响,运用响应面法和蒙特卡洛法得到拉索发生松弛下的可靠度指标 β ,得出拉索松弛对可靠度的影响和不同结构参数的灵敏度.

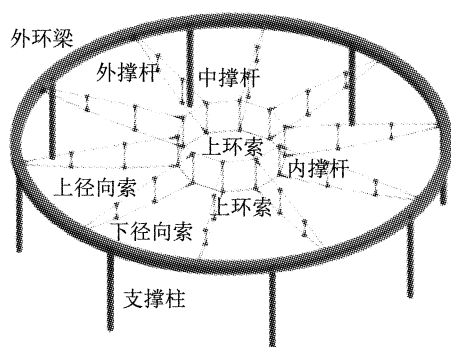
1 模型设计

本试验以某车辐式索桁架结构工程为背景,几

何缩尺比例为 1:10,应力比为 1:1.长度和弹性模量的相似系数、为设计时首先确定的条件,针对本试验几何相似系数 $S_l=1/10$,模型采用与原结构模型同样的材料,所以材料相似系数 $S_e=1/1$.从而,模型与原结构模型中拉索、撑杆的截面积比为 1:100.为了满足应力比 1:1 的要求,需对结构进行 9 倍自重荷载的质量补偿,并将质量补偿等效为在节点上施加相应的质量块.

该车辐式索桁架结构试验模型由 10 根径向索、两道环索、外环梁和柱子组成,每根索桁架包括径向索、环索和撑杆,拉索由厂家提供的材性数据为依据,试验模型图如图 1 所示,模型尺寸如图 2 所示.为了模拟预应力损失对构件的影响,在径向索索头、环索、撑杆中部设置调节套筒,调节量为 ± 60 mm,试验模型构件规格如表 1 所示.

试验模型索力通过拉压传感器测量,索力测点布置为:上下径向索每隔一根布置一个测点,各 5 个测点,上下环索各布置一个测点,一共 12 个测点,测点布置图如 3 所示.



a 设计模型



b 试验模型

图 1 车辐式索桁架模型

Fig.1 Spoke cable-truss model

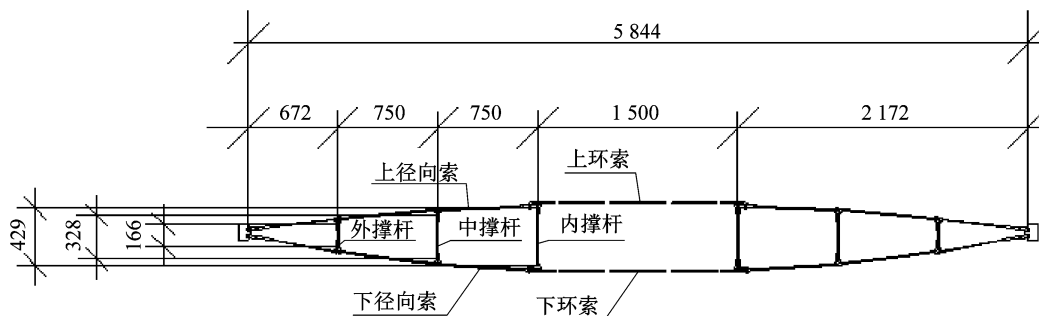


图 2 模型尺寸(单位:mm)

Fig.2 Model size(unit:mm)

表 1 试验构件规格

Tab.1 Specification of the test component

构件	位置	构件尺寸/mm	构件截面积/mm ²
径向索	上	$\phi 8$	24.6
径向索	下	$\phi 10$	33.3
环索	上圈	$\phi 8$	24.6
环索	下圈	$\phi 12$	49.1
撑杆	外圈	$\phi 12 \times 2$	62.8
撑杆	中圈	$\phi 12 \times 2$	62.8
撑杆	内圈	$\phi 12 \times 2$	62.8
环梁	外圈	$150 \times 150 \times 10 \times 10$	4 300

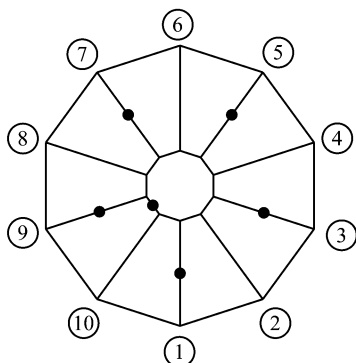
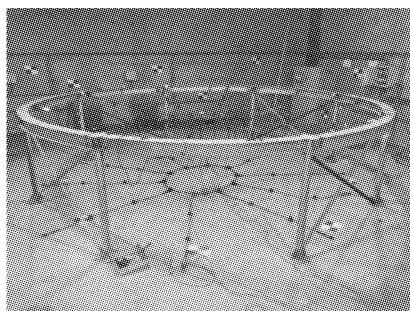


图 3 传感器测点布置

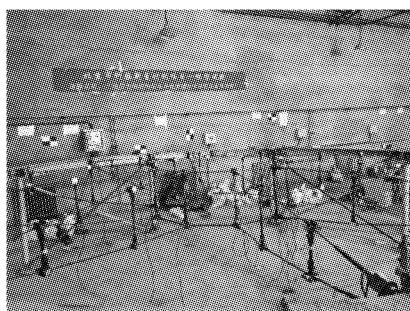
Fig.3 Sensor placement

2 试验流程

对结构进行张拉,将钢柱、外环梁和斜撑拼装完成,采用张拉径向索方案将结构张拉到位,构件组装和张拉成型图片如图 4 所示。



a 构件组装

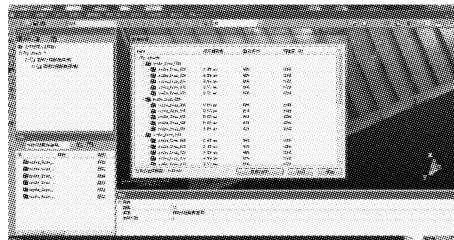


b 张拉成型

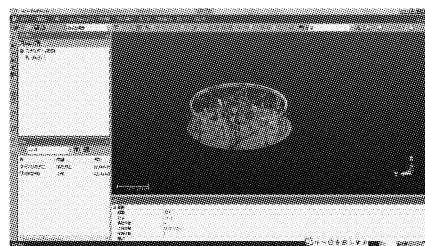
图 4 张拉成型过程

Fig.4 Tensioning process

考虑到加工误差,安装误差等一些不可控因素,会导致试验数据与理论数据有一定偏差,引入修正模型,在车辐式索桁架张拉完成后,采用三维扫描获取实体试验模型,并根据三维扫描得到的点云模型,点云模型如图 5 所示。



a 点云模型误差报告



b 获取点云模型

图 5 点云模型

Fig.5 Point cloud model

通过点云模型获取对应理论模型的关键节点坐标,依据节点坐标建立修正后有限元模型,由于修正模型排除了加工误差和施工误差对拉索松弛试验的影响,修正模型分析得到的数据更能反应实际试验模型的静力性能。

3 拉索松弛分析

拉索松弛试验中,活荷载取静力加载试验 $0.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 的三分之一,即 $0.167 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,与正常使用荷载为同一个量级。为了模拟拉索松弛极限状态,按照有限元模拟中施加的预应力的百分比 $0 \sim 100\%$ 进行定义。试验分别分析了单根上径向索、单根下径向索、上环索、下环索、全部上径向索、全部下径向索。通过有限元模拟可知单根上、下径向索松弛对结构静力性能影响很小,因此单根上、下径向索进行了有限元模拟中施加的预应力的 50% 和 100% 松弛两个工况,其余按照有限元模拟中施加的预应力的 20% 、 40% 、 60% 、 80% 、 100% 进行松弛,松弛试验通过调节套筒来控制拉索松弛程度。

为便于分析,取该结构的对称中心为原点,A-A轴对应 1 榀与 6 榀,在 A-A 轴线上原点以左为负值,原点以右为正值,如图 6 所示。

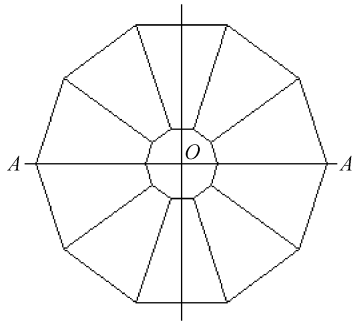


图 6 车辐式索桁架结构平面

Fig.6 Plane of spoke cable-truss structure

3.1 单根上径向索发生松弛分析

由表 2 和表 3 可知,实测值索力变化规律与理论、修正值变化趋势一致,单根上径向索松弛对结构内力影响较小,索力变化率随着索力松弛程度增大而增大.由图 7 可知,上径向索发生松弛的位置索力变化率最大,相邻两榀索力变化率最小,单根上径向索的松弛对下径向索索力影响较小.

表 2 SJXS1 松弛 50% 索力变化率

Tab.2 Slack 50% change rate of cable force SJXS1

构件单元号	理论变化率/%	修正变化率/%	实测变化率/%
SJXS1	-3.84	-4.67	-3.31
SJXS3	-2.87	-3.49	-1.71
SJXS5	-2.88	-3.72	-1.23
SJXS7	-2.77	-3.70	-1.33
SJXS9	-2.92	-4.06	-1.25
XJXS1	-1.30	-1.65	-1.90
XJXS3	-1.27	-1.87	-1.48
XJXS5	-1.32	-1.73	-1.00
XJXS7	-1.32	-2.53	-1.23
XJXS9	-1.40	-2.15	-1.52
SHS	-2.84	-2.57	-1.85
XHS	-1.34	-0.51	-0.94

变化率=(荷载态索力-初始态索力)/初始态索力 $\times 100\%$

表 3 松弛 100% 索力变化率

Tab.3 Slack 100% change rate of cable force

构件单元号	理论变化率/%	修正变化率/%	实测变化率/%
SJXS1	-7.57	-8.12	-7.63
SJXS3	-5.71	-7.47	-7.05
SJXS5	-5.68	-6.12	-6.37
SJXS7	-5.58	-6.85	-6.87
SJXS9	-5.77	-6.50	-6.02
XJXS1	-2.67	-2.83	-3.61
XJXS3	-2.59	-3.17	-2.35
XJXS5	-2.63	-2.86	-2.59
XJXS7	-2.63	-3.65	-2.11
XJXS9	-2.73	-3.29	-2.85
SHS	-5.64	-4.17	-4.85
XHS	-2.65	-0.66	-2.35

3.2 单根下径向索发生松弛分析

由表 4 和表 5 可知,单根下径向索松弛对结构

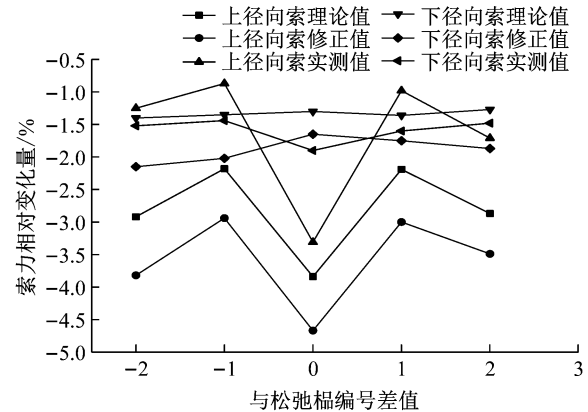


图 7 索力变化量与径向索松弛存在位置的关系(松弛 50%)

Fig.7 The relation between the variation of cable force and the location of radial cable relaxation. (Slack 50%)

内力影响较小,索力松弛程度与索力变化率成正比.由图 8 可知,对于下径向索而言,发生松弛的位置索力变化率最大,相邻两榀索力变化率最小,单根下径向索的松弛对上径向索索力影响较小.

单根径向索发生松弛时,经过结构预应力重分布,引起的索力变化分配到整个结构索系中,因此对结构内力影响较小.

表 4 XJXS1 松弛 50% 索力变化率

Tab.4 Slack 50% change rate of cable force XJXS1

构件单元号	理论变化率/%	修正变化率/%	实测变化率/%
SJXS1	-1.67	-2.62	-1.78
SJXS3	-1.58	-2.70	-1.07
SJXS5	-1.62	-2.72	-1.25
SJXS7	-1.50	-3.51	-1.33
SJXS9	-1.63	-3.06	-1.25
XJXS1	-2.37	-2.82	-2.14
XJXS3	-1.47	-2.54	-1.68
XJXS5	-1.51	-1.96	-2.00
XJXS7	-1.50	-2.77	-1.53
XJXS9	-1.60	-2.40	-1.78
SHS	-1.58	-1.57	-1.85
XHS	-1.52	-0.75	-1.76

表 5 XJXS1 松弛 100% 索力变化率

Tab.5 Slack 100% change rate of cable force XJXS1

构件单元号	理论变化率/%	修正变化率/%	实测变化率/%
SJXS1	-3.30	-4.14	-4.07
SJXS3	-3.16	-5.54	-3.42
SJXS5	-3.17	-4.18	-2.45
SJXS7	-3.06	-4.93	-2.22
SJXS9	-3.22	-4.53	-3.26
XJXS1	-4.77	-5.12	-4.83
XJXS3	-2.97	-4.66	-3.53
XJXS5	-2.97	-3.31	-2.59
XJXS7	-2.97	-4.10	-2.46
XJXS9	-3.11	-3.76	-3.99
SHS	-3.15	-2.24	-3.42
XHS	-2.99	-1.07	-3.29

3.3 单根上环索发生松弛分析

不同松弛程度下的索力增量如图 9~图 11 所示, A-A 轴线下节点竖向位移的变化情况如图 12 所示. 由图 9~图 11 可知, 实测值索力变化规律与理论、修正值变化趋势一致, 索力变化率随松弛程度呈线性变化, 上环索松弛对上部索系影响较大, 变化率最大为 -20%, 对下部索系影响较小, 变化率最大为 -9%, 说明上部索系对上环索松弛较为敏感. 由图

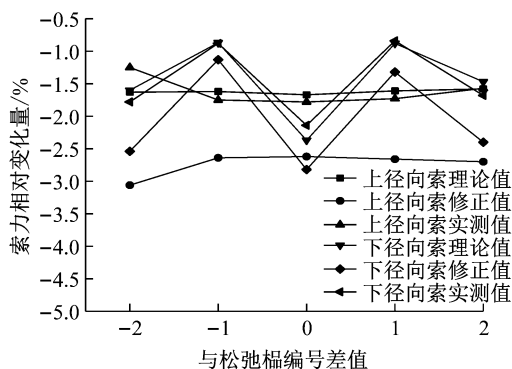


图 8 索力变化量与径向索松弛存在位置的关系
XJXS1 (松弛 50%)

Fig. 8 The relation between the variation of cable force and the location of radial cable relaxation XJXS1 (Slack 50%)

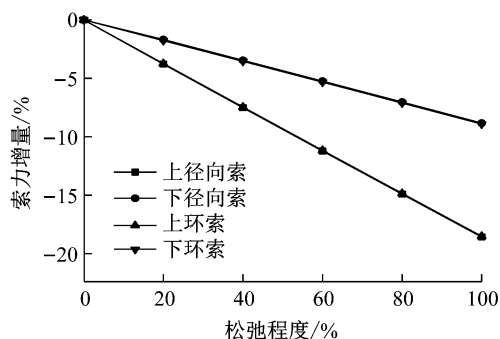


图 9 SHS 理论索力变化率

Fig. 9 Theoretical force change rate of SHS

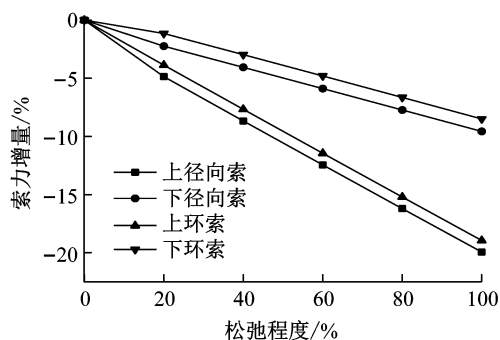


图 10 修正索力变化率 SHS

Fig. 10 Modified force change rate of SHS

13 可知, 实测位移略微小于理论位移、修正位移, 但变化趋势一致, 当上环索发生松弛时, 内撑杆下节点位移最大, 最大位移为 2.3 mm, 约为结构跨度的 1/3 000.

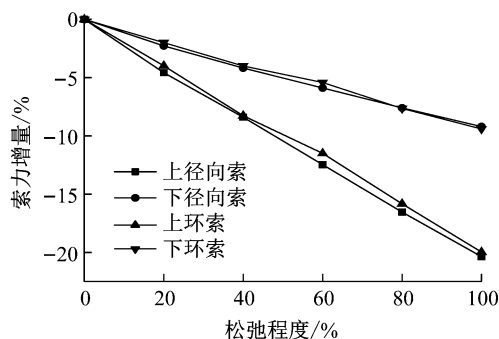


图 11 SHS 实测索力变化率

Fig. 11 Measured force change rate of SHS

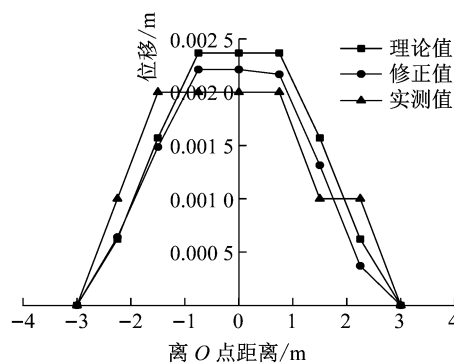


图 12 SHS 松弛 60% 撑杆下节点位移

Fig. 12 Displacement of brace lower node on cable slack 60% of SHS

3.4 单根下环索发生松弛分析

由图 13~图 15 可知, 上径向索、下径向索、上环索、下环索索力增量基本一致, 实测索力增量最大为 -9%, 说明下环索发生松弛时结构索系敏感性基本相同. 由图 16 可知, 当下环索发生松弛时, 内撑杆下节点位移最大, 最大位移为 -2.5 mm, 约为结构跨度的 1/2 400.

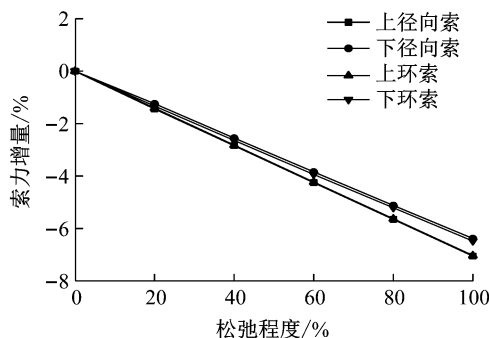


图 13 XHS 理论索力变化率

Fig. 13 Theoretical force change rate of XHS

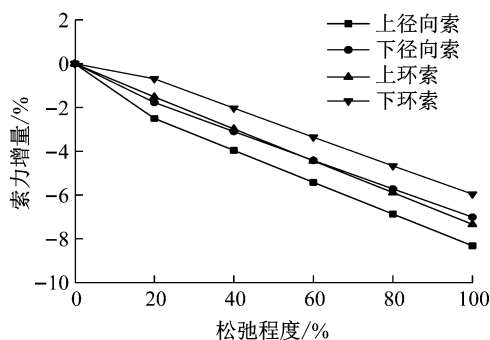


图 14 XHS 修正索力变化率

Fig.14 Modified force change rate of XHS

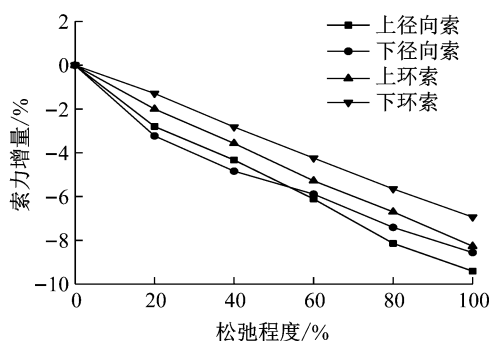


图 15 实测索力变化率

Fig.15 Measured force change rate

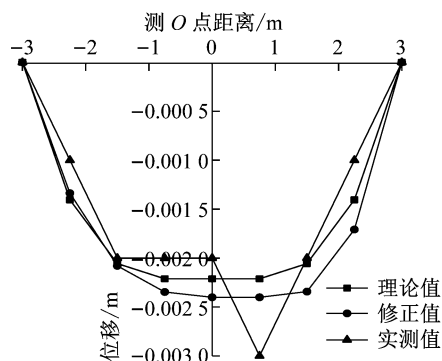


图 16 XHS 松弛 60% 撑杆下节点位移

Fig.16 Displacement of brace lower node on cable slack 60% of XHS

3.5 全部上径向索发生松弛分析

由图 17~图 19 可知,实测索力增量略大于理论、修正索力增量,全部上径向索松弛对上径向索和上环索影响很大,变化率最大为 -59% ,对下径向索和下环索影响较大,变化率最大为 -27% 。由图 20 可知,当全部上径向索发生松弛时,内撑杆下节点位移最大,最大位移为 7 mm ,约为结构跨度的 $1/850$ 。

3.6 全部下径向索发生松弛分析

由图 21~图 23 可知,全部下径向索松弛对上径向索和上环索影响很大,变化率最大为 -35% ,对下径向索和下环索影响较大,变化率最大为 -25% 。由

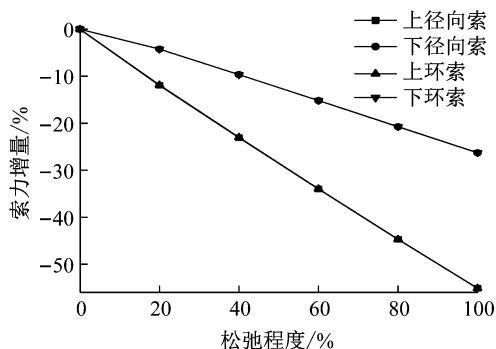


图 17 SJXS 理论索力变化率

Fig.17 Theoretical force change rate of SJXS

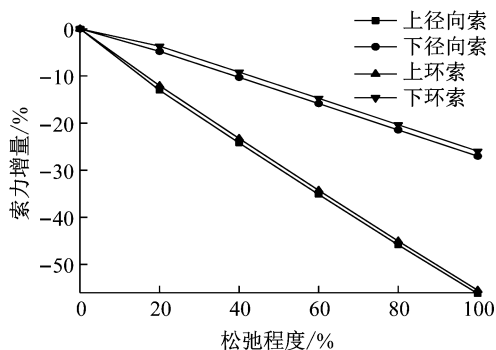


图 18 SJXS 修正索力变化率

Fig.18 Modified force change rate of SJXS

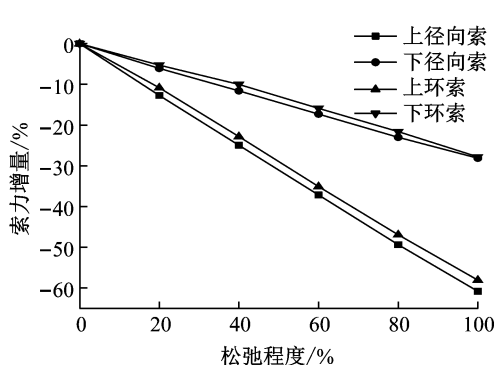


图 19 SJXS 实测索力变化率

Fig.19 Measured force change rate of SJXS

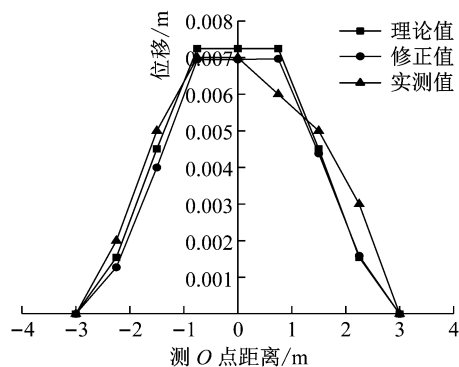


图 20 SJXS 松弛 60% 撑杆下节点位移

Fig.20 Displacement of brace lower node on cable slack 60% of SJXS

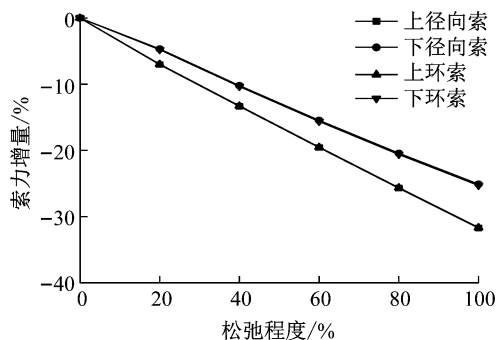


图 21 XJXS 理论索力变化率

Fig. 21 Theoretical force change rate of XJXS

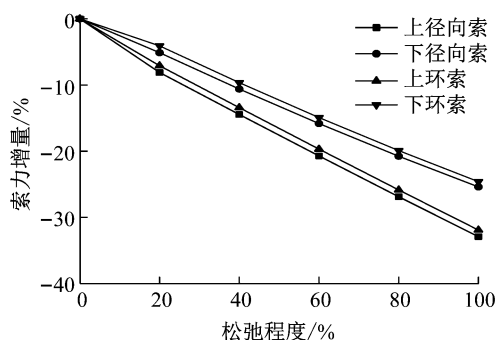


图 22 XJXS 修正索力变化率

Fig. 22 Modified force change rate of XJXS

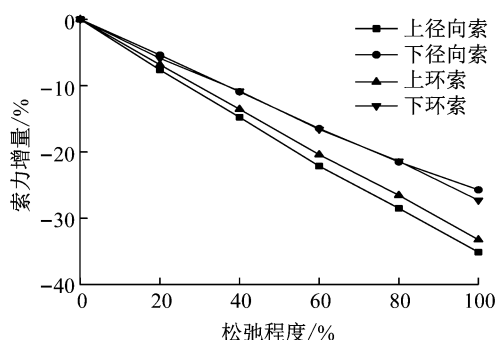


图 23 XJXS 实测索力变化率

Fig. 23 Measured force change rate of XJXS

图 24 可知,当全部下径向索发生松弛时,内撑杆下节点位移最大,最大位移为 -11 mm,约为结构跨度的 $1/600$ 。

从拉索松弛索力变化可得出,当结构中单根索发生松弛时,环索松弛对结构力学性能影响最大,定义环索为车辐式索桁架结构敏感性构件;上径向索和上环索为稳定索,下径向索和下环索为承重索,稳定索变化趋势一致,承重索变化趋势一致;当稳定索发生松弛时,稳定索产生的索力偏差远远大于承重索的索力偏差,承重索发生松弛时,稳定索与承重索索力偏差变化基本一致;全部下径向索发生松弛对结构内力最为不利,其次是全部上径向索松弛,为避免结构在服役期间径向索松弛过大导致结构失效,

可在车辐式索桁架施工张拉阶段对径向索初始预应力适当补偿. 依据拉索不同松弛程度下节点位移变化情况可得出,拉索松弛时,内撑杆节点位移最大,内撑杆节点位移对拉索松弛最敏感;单根索发生松弛时,结构竖向变形较小,全部径向索发生松弛时,结构竖向变形较大,最大可达结构跨度的 $1/600$,结构在较大变形情况下容易出现索膜破裂导致结构失效,上述对径向索初始预应力适当补偿措施也能够缓解结构变形较大问题。

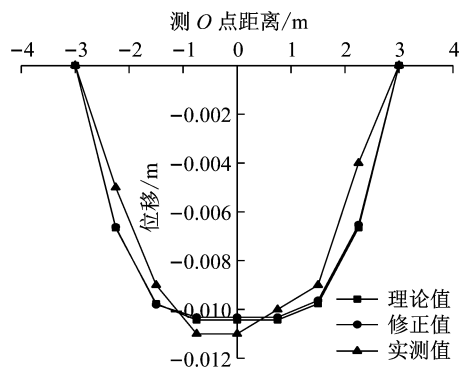


图 24 XJXS 松弛 60% 撑杆下节点位移

Fig. 24 Displacement of brace lower node on cable slack 60% of XJXS

4 拉索松弛可靠性分析

通过抽样方法拟合结构的响应面,继而用响应面方程代替结构有限元模型,之后采用蒙特卡罗方法对车辐式索桁架结构在正常使用极限状态下进行可靠性分析. 分析流程如图 25 所示。

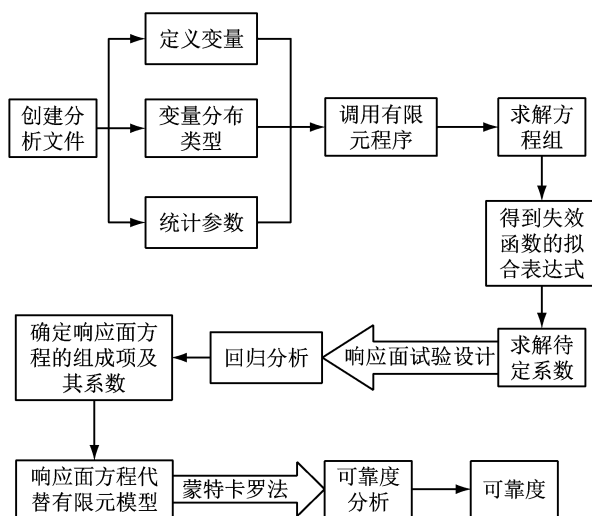


图 25 可靠性分析流程

Fig. 25 Reliability analysis process

4.1 可靠度分析

假设材料均为理想弹塑性,荷载工况取 1.0 恒

荷载+1.0 活荷载,计算时分别考虑各种索长度误差进行分析。

对于车辐式索桁架结构的整体变形失效模式,构造功能函数如下:

$$g = [u] - u_{\max} \quad (1)$$

式中: u_{\max} 为结构中竖向位移绝对值的最大值; $[u]$ 为规定的位移变形限值; $L/300$ 为规范规定的位移变形限值。为研究不同位移限值条件下结构可靠度的变化,本文 $[u]$ 分别取 $L/350$ 、 $L/300$ 、 $L/250$,其中 L 为车辐式索桁架跨度。运用响应面法得到响应方程后,结合拉丁超立方抽样(LHS)执行 100 万次抽样模拟,得到结构的失效概率。

随机输入参数即车辐式索桁架结构有限元模型中的不确定影响因素。根据结构有限元模型的具体特点和计算需求,输出参数为结构荷载之后的响应参数,通过 ANSYS 软件计算可以得到输入参数对于输出参数的影响程度一灵敏度,根据定义输出参数的失效判别公式,得到结构的失效概率,进而求出结构的可靠指标。其中定义的随机输入变量和输出变量如表 6、表 7 所示。

表 6 定义随机输入变量

Tab.6 Defining random input variables

随机变量	分布类型	平均值	变异系数
SJXS 预应力/N	高斯分布	6 060.6	0.288
XJXS 预应力/N	高斯分布	8 060.6	0.288
SHS 预应力/N	高斯分布	5 860.6	0.288
XHS 预应力/N	高斯分布	8 042.6	0.288
SJXS 截面积/ m^2	高斯分布	2.46×10^{-5}	0.288
XJXS 截面积/ m^2	高斯分布	3.33×10^{-5}	0.288
SHS 截面积/ m^2	高斯分布	2.46×10^{-5}	0.288
XHS 截面积/ m^2	高斯分布	4.91×10^{-5}	0.288
撑杆弹性模量/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	高斯分布	2.06×10^{11}	0.060
拉索弹性模量/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	高斯分布	1.3×10^{11}	0.060
索杆密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	高斯分布	7 850	0.050
拉索极限抗拉强度/Pa	高斯分布	1.67×10^9	0.080
恒荷载/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	高斯分布	1.0	0.070
活荷载/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	均匀分布	0.5	0.288

表 7 不同标准下的最大位移输出变量

Tab.7 Defining random input variables

提取位移位置	最大位移	极限状态方程
$L/350$ 跨度	DMAX1	$6\,000 \times L/350 - \text{DMAX1}$
$L/300$ 跨度	DMAX2	$6\,000 \times L/300 - \text{DMAX2}$
$L/250$ 跨度 ²	DMAX3	$6\,000 \times L/250 - \text{DMAX3}$

由单根索发生松弛静力分析可知,单根径向索松弛对结构位移影响最小,对结构可靠度影响较小,所以可靠性分析仅提取发生全部径向索发生松弛、环索发生松弛时的结构各输出变量的失效概率,通过 Matlab 标准正态分布计算进行计算分析,得到不

同标准下位移的可靠指标。研究拉索松弛对结构可靠性的影响,由《建筑结构可靠度设计统一标准》可知,结构构件在正常使用极限状态的可靠指标,根据其可逆程度宜取 0~1.5,其正常使用极限状态下的可靠指标取选择 0。

提取发生松弛时的结构各输出变量的失效概率,得到不同标准下位移的可靠指标,如图 26~图 29 所示。由图 26 可知,在上径向索预应力松弛至 60%前,上径向索随着松弛程度越大,在下径向索张力下结构出现起拱现象,结构可靠指标增大,可适当提高结构变形控制下的安全性,但当松弛程度达到 60%以后,上径向索松弛程度较大,结构拉索预应力无法支撑下压荷载,结构位移会突然下降,导致可靠指标突然下降。

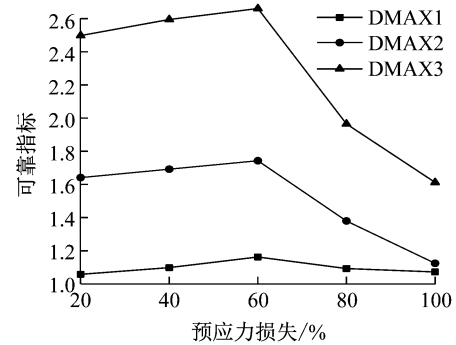


图 26 全部上径向索预应力损失可靠指标

Fig.26 Reliability index under prestress loss of all upper radial cable

DMAX1 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$\begin{cases} y = 0.0524x + 1.0018 & (x < 60\%) \\ y = -0.0452x + 1.1996 & (x > 60\%) \end{cases} \quad (2)$$

DMAX2 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$\begin{cases} y = 0.2545x + 1.5902 & (x < 60\%) \\ y = -1.5465x + 2.6528 & (x > 60\%) \end{cases} \quad (3)$$

DMAX3 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$\begin{cases} y = 0.4077x + 2.4211 & (x < 60\%) \\ y = -2.6207x + 4.1758 & (x > 60\%) \end{cases} \quad (4)$$

式中: y 为可靠度指标; x 为预应力松弛程度。

由图 27 可知,结构可靠指标随着全部下径向索松弛程度线性降低,结构安全性越低。随着位移限值逐渐增大,可靠度指标增加,结构更加可靠。从整体来看,下径向索松弛对于最大位移可靠指标影响程度较高,在 DMAX2 位移限值条件下,松弛程度达到

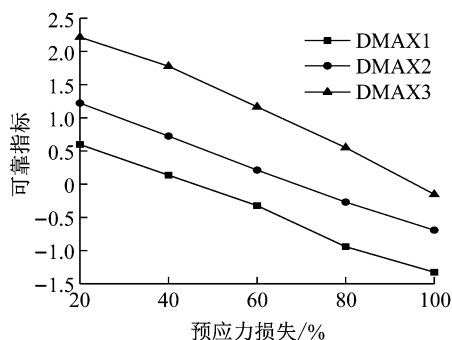


图 27 全部下径向索预应力损失可靠指标

Fig. 27 Reliability index under prestress loss of all lower radial cable

70%时,结构可靠度为0,结构失效.在 DMAX3 位移限值条件下,松弛程度达到 42%时,结构可靠度为0,结构失效.

DMAX1 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$y = -2.4618x + 1.106 \quad (5)$$

DMAX2 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$y = -2.4114x + 1.6866 \quad (6)$$

DMAX3 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$y = -2.9806x + 2.8998 \quad (7)$$

式中: y 为可靠度.

由图 28 可知,结构可靠指标随着上环索松弛程度线性升高,结构更加可靠.当上环索发生松弛时,随着位移限值逐渐增大,可靠度指标增加,结构更加可靠,且在不同位移限值条件下,可靠指标都大于0,可靠度符合相关规范的要求.

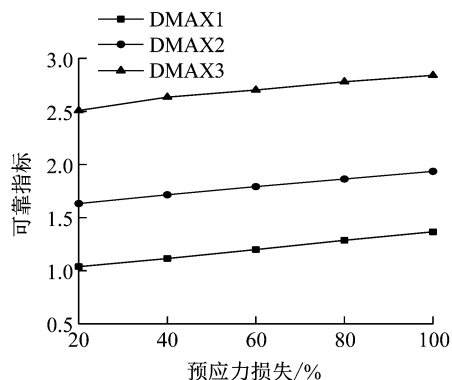


图 28 上环索预应力损失可靠指标

Fig. 28 Reliability index under prestress loss of upper loop cable

DMAX1 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合

方程为

$$y = 0.414x + 0.9525 \quad (8)$$

DMAX2 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$y = 0.3775x + 1.5612 \quad (9)$$

DMAX3 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为:

$$y = 0.4037x + 2.4506 \quad (10)$$

式中: y 为可靠度指标; x 为预应力松弛程度.

由图 29 可知,结构可靠指标随着下环索松弛程度线性降低,结构安全性越低,但变化较为平缓,下环索松弛对结构可靠度影响较小,在不同位移限值条件下,可靠指标都大于0,可靠度符合相关规范的要求.

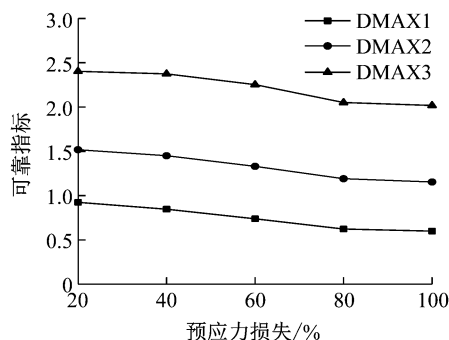


图 29 下环索预应力损失可靠指标

Fig. 29 Reliability index under prestress loss of lower loop cable

DMAX1 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$y = -0.4365x + 1.0081 \quad (11)$$

DMAX2 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$y = -0.494x + 1.625 \quad (12)$$

DMAX3 位移限值下松弛程度-可靠度指标拟合方程为

$$y = -0.5469x + 2.5478 \quad (13)$$

式中: y 为可靠度指标; x 为预应力松弛程度.

4.2 灵敏度分析

输出参数为结构荷载之后的响应参数.确定输出参数后,通过有限元模拟计算可以得到输入参数对于输出参数的影响程度,即灵敏度.模拟发生拉索松弛时,随机输入变量对输出变量—结构最大位移(DMAX2)的灵敏性分析,提取具体的灵敏度数值.

分析得到不同索松弛下输入变量灵敏度基本相同,因此只列出上径向索松弛时的灵敏度,分析取位

移限值为 1/300 时,对各随机输入变量与输出变量之间的线性相关系数进行整理,得出各个影响因素的灵敏度,如表 5 所示.由表 5 可知,对于发生预应力损失,随机输入变量中下径向索施加的预应力

(PREJ1)和活荷载(D2)对位移限值的灵敏度最大,且灵敏度系数随着温度变化不明显.其次灵敏度较大的为下环索施加的预应力(PREH2)和恒荷载(D1).

表 5 拉索松弛下随机输入变量的灵敏度

Tab.5 Sensitivity of random input variables under the cable relaxation

松弛程度/%	PREJ1	PREJ2	PREH1	PREH2	AJ1	AJ2	AH1
20	0.605	-0.053	-0.023	0.132	-0.006	小	小
40	0.612	-0.039	-0.027	0.125	-0.020	小	小
60	0.611	小	-0.045	0.107	小	小	小
80	0.591	小	-0.158	0.014	小	小	小
100	0.613	小	-0.223	0.102	小	小	小
松弛程度/%	AH2	FYS	E1	E2	DENS1	D1	D2
20	0.011	小	0.006	0.029	-0.003	-0.111	-0.751
40	小	小	小	0.039	小	-0.103	-0.749
60	小	小	小	小	小	-0.081	-0.738
80	-0.04	小	小	小	小	-0.089	-0.476
100	-0.01	小	小	小	小	-0.092	-0.535

4.3 可靠性分析验证

为验证可靠性分析的准确性,将缩尺模型与实际工程有限元模型(跨度 60 m)进行可靠性分析,验证缩尺模型可靠性分析所得到的拟合方程和不同因素的灵敏度.

(1) 可靠度验证

单根索发生松弛的可靠度验证以下环索发生松弛为例,对实际模型进行可靠性分析,得到实际模型下环索发生松弛的最大位移限值 1/300 可靠度,并将其与缩尺模型可靠度进行对比,如图 30、表 12 所示.

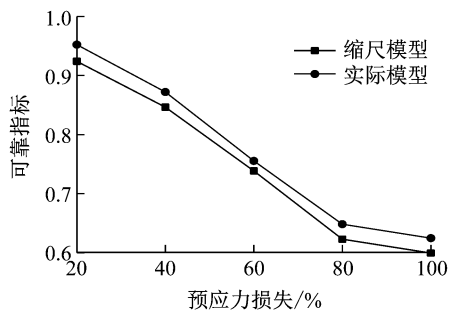


图 30 可靠指标对比

Fig.30 Reliability index comparison

表 6 可靠指标误差

Tab.6 Reliability index error

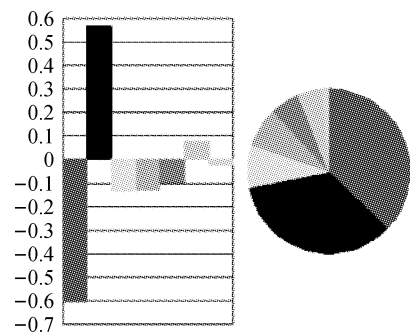
预应力损失/%	缩尺模型可靠度	扩大模型可靠度	误差/%
20	0.924	0.952 3	3.1
40	0.846 4	0.872 1	3.0
60	0.738 4	0.755 3	2.3
80	0.622 9	0.648 2	4.1
100	0.599 3	0.624 5	4.2

由图 30 可知,两模型随预应力损失变化的可靠指标变化趋势一致,且由表 12 可知,缩尺模型与实

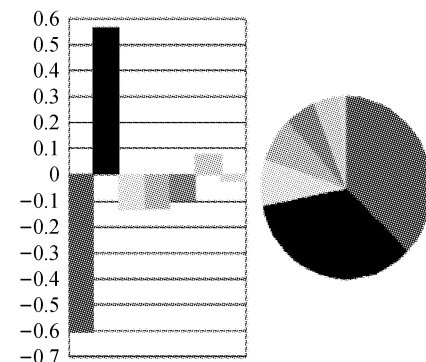
际模型可靠度相差较小,最大误差为 4.2%,因此对缩尺模型进行可靠性分析得到的拟合方程可为实际工程拉索松弛时的可靠度做参考.

(2) 灵敏度验证

对实际模型在下环索松弛 60%下进行灵敏度分析,得到实际模型最大位移限值 1/300 时的灵敏度,并将其与缩尺模型灵敏度进行对比,如图 31 所示.



a 缩尺模型灵敏度



b 实际模型灵敏度

图 31 灵敏度对比

Fig.31 Sensitivity comparison

由图 31 可知,在下环索松弛 60%时,两种模型影响位移限值变量的因素基本相同,影响较大的为下径向索施加的预应力(PREJ1)和活荷载(D2)。

5 结论

通过对车辐式索桁架模型试验,研究了拉索松弛对结构的影响,并对其可靠性能进行分析,可以得出以下结论:

(1) 在结构单根索发生松弛时,索杆对结构内力影响程度依次为:下环索>上环索>下径向索>上径向索;全部上径向索发生松弛对结构内力最为不利,可在车辐式索桁架施工张拉阶段对径向索初始预应力适当补偿来减小拉索松弛对结构的影响;在不同拉索松弛程度达 60%时,全部下径向索发生松弛时下节点竖向位移最大。一榀索桁架上内撑杆节点竖向位移变化最大,内撑杆节点位移对拉索松弛最敏感。

(2) 可靠性分析方面,当全部上径向索松弛程度达到 60%后,结构竖向位移发生突变,可靠指标突然下降,在结构服役期间监测拉索预应力时,在上径向索松弛程度较大(接近松弛程度 60%)时,应及时对上径向索进行预应力补偿,防止结构发生突变;上环索预应力松弛对结构可靠度影响较小;对于下径向索和下环索,结构可靠指标随着松弛程度增大线性降低;全部下径向索发生松弛,预应力损失较大时可靠度指标变为负值,结构失效。

(3) 从各结构参数的灵敏度来看,下径索施加的预应力和活荷载的线性相关系数最大,下径向索施加的预应力对可靠度影响呈正相关,适当提高下径向索初始预应力可提高结构安全性能,活荷载对可靠度影响呈负相关,在结构进行维修时,应注意减少活荷载对其影响,导致结构安全性能下降较多。

参考文献:

- [1] 郑君华,袁行飞,董石麟.两种体系索穹顶结构的破坏形式及其受力性能研究[J].工程力学,2007(1):44.
ZHENG Junhua, YUAN Xingfei, DONG Shilin. Failure mode and behavior analysis of two types of cable domes[J]. Engineering Mechanics, 2007(1):44.
- [2] 刘红波.弦支穹顶结构施工控制理论与温度效应研究[D].天津:天津大学建筑工程学院,2011.
LIU Hongbo. Study on the construction control theory and temperature effect of suspen-dome structure [D]. Tianjin: School of Architectural Engineering of Tianjin University, 2011.
- [3] 刘占省,王欢欢,李斌等.考虑拉索锈蚀与松弛的弦支筒壳结构可靠性分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(S1):48.
LIU Zhansheng, WANG Huanhuan, LI Bin, *et al.* Reliability analysis of cable supported barrel vault considering lasso's corrosion and relaxation [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016,49(S1):48.
- [4] 王树,张国军,葛家琪,等.2008 奥运会羽毛球馆预应力损失对结构体系影响分析[J].建筑结构学报,2007(6):45.
WANG Shu, ZHANG Guojun, GE Jiaqi, *et al.* Influence of prestress loss on structural behavior of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [J]. Journal of Building Structures, 2007(6):45.
- [5] KRISTEK V, KADLEC L. Probabilistic analysis of prestress loss due to creep in concrete box girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22 (12): 10. 1061/(ASCE) BE. 1943-5592.0001079.
- [6] YAN R Z, CHEN Z H, WANG X D, *et al.* A new equivalent friction element for analysis of cable supported structures [J]. Steel and Composite Structures, 2015,18(4):947.
- [7] 田广宇.车辐式张拉结构设计理论与施工控制关键技术研究 [D].北京:清华大学,2012.
TIAN Guangyu. Research on key technology of design theory and construction control in spoke tension structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [8] 俞福利,刘中华.月牙轮辐式索桁架结构的预张力偏差分析及调整技术[J].空间结构,2013,19(4):67.
YU Fuli, LIU Zhonghua. Pretension deviation analysis and adjustment of crescent and spokes cable truss structure [J]. Spatial Structures, 2013,19(4):67.
- [9] 张守峰,朱炳寅,何相宇,等.东营会展中心结构设计中的关键技术[J].建筑结构,2009,39(7):5.
ZHANG Shoufeng, ZHU Bingyan, HE Xiangyu, *et al.* Key structural technology in design of Dongying Convention and Exhibition Center [J]. Journal of Building Structures, 2009, 39 (7):5.
- [10] 于滨,梁存之,董越,等.深圳宝安体育场轮辐式索桁架屋盖成形关键技术[J].建筑结构学报,2011,41(11):74.
YU Bin, LIANG Cunzhi, DONG Yue, *et al.* Key techniques of roof construction of spoke cable truss structure in Shenzhen Bao'an Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2011, 41 (11):74.