

文章编号:文章编号:1673-9469(2010)01-0001-03

初始预应力值对张弦梁结构受力性能的影响

史三元,冉莉,李旭光

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:张弦梁结构的工作性能受到拉索初始预应力的影响。从内力和变形的角度对张弦梁结构进行了理论分析,并通过建立有限元模型运用 SAP2000 对张弦梁结构进行了有限元分析,验证了有限元分析结果与理论分析结果的一致性,进而由有限元计算结果分析初始预应力对结构受力性能的影响。分析结果表明,初始预应力的合理取值可以改善结构的内力分布,而对结构的竖向挠度和支座位移的影响很小。

关键词:张弦梁;受力性能;初始预应力

中图分类号: TU394

文献标识码: A

Research of initial pre - stress on mechanical performance of beam string structure

SHI San-yuan, RAN Li, LI Xu-guang

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: The value of the cable initial pre - stress has effect on the working performance of beam string structure (BSS). Theoretic and finite element methods were both used to analyze the inner force and deformation of BSS. It proved that finite element method which is accomplished by SAP2000 accorded with the theoretic one, thus SAP2000 were used to study the influence of initial pre - stress on mechanical performance. The result shows that rational value of the cable initial pre - stress can improve the internal force distribution of the structure, but do less influence on the vertical flexibility and support displacement.

Key words: beam string structure; mechanical performance; initial pre - stress

张弦梁结构(Beam String Structure,简称 BSS)是近二十年发展起来的一种大跨度预应力空间结构形式,是将刚性构件(通常为梁、拱或桁架)和柔性构件(通常为高强度拉索)用撑杆连接在一起的一种新型的杂交结构。工程实践及以往研究表明,在张弦梁下弦拉索中施加初始预应力对结构有着很重要的影响,预应力拉索使撑杆产生向上的分力,从而可以降低上弦的内力,减小结构的变形,改善结构的受力性能。此外,在结构受到向上的风荷载时,为了避免拉索出现松弛,需要有一定的预应力储备,以防止结构丧失整体受力能力。

文献[1]和文献[2]在初始预应力对张弦梁结构受力性能影响的研究上存在分歧,本文从理论

分析和有限元程序分析上对一榀张弦梁进行研究,更为全面的研究了初始预应力对结构受力性能的影响。

1 理论计算

张弦梁结构在荷载态的内力和位移由两部分组成,一部分由初始张拉预应力产生,一部分由荷载产生。相关研究表明,张弦梁结构在荷载态分析时,考虑几何非线性效应的分析结果和线性分析结果非常相近^[3]。因此研究分析时可不考虑非线性影响,将结构荷载态的两部分内力和位移分别线性叠加。张拉拉索时,张拉力作为一种外力,

此时体系属于静定结构,各杆件内力容易算出。在荷载阶段,结构为一次超静定结构,根据变形协调条件,用力法可以求得各杆件的内力。现在以结构力学为基础,计算初始张拉预应力产生的结构内力和位移。

在设计中上下弦通常取抛物线型布置,其曲线方程为

$$\begin{cases} y_1 = f_1 \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right) \\ y_2 = -f_2 \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中, f_1 、 f_2 分别为张弦梁的矢高和索的垂度。

设张拉拉索时,下弦跨中撑杆两端索段的张力为 T ,结构的受力分析图如图 1 所示。

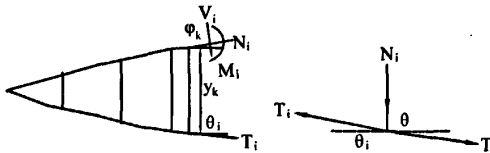


图1 张拉拉索时结构的受力分析图

Fig.1 Mechanical analysis diagram when tensioning beam string

由静力平衡关系可得各索段的张力

$$T_i = T \cdot \cos\theta / \cos\theta_i \quad (2)$$

上弦拱梁任意截面 K 处,弯矩(以使拱梁底部受拉为正)为

$$\begin{aligned} M_k &= -T_i \cdot \cos\theta_i \cdot y_k = -T \cdot \cos\theta \cdot \cos\theta_i \cdot y_k / \\ \cos\theta_i &= -T \cdot y_k \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (3)$$

轴力(以受拉为正)为

$$N_k = T \cdot \cos\theta (\tan\theta_i \sin\varphi_k - \cos\varphi_k) \quad (4)$$

剪力(以使隔离体绕顺时针方向转动为正)为

$$V_k = T \cdot \cos\theta (\tan\theta_i \sin\varphi_k + \cos\varphi_k) \quad (5)$$

结构竖向挠度(忽略剪切变形和轴向变形对竖向位移的影响)为

$$w_k = \sum \int \frac{\overline{MM}_p ds}{EI} \quad (6)$$

将下弦多折索近似成光滑的抛物线,令

$$T^0 = T \cdot \cos\theta = T / \sqrt{1 + \frac{64f_2^2 x^2}{l^4}} \quad (7)$$

则由式(3)~(6)可得

$$M(x) = -T^0 (f_1 + f_2) \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right) \quad (8)$$

$$N(x) = T^0 \left(\frac{64f_1 f_2 x^2}{l^4 \sqrt{1 + \frac{64f_1^2 x^2}{l^4}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{64f_1^2 x^2}{l^4}}} \right) \quad (9)$$

$$V(x) = -T^0 \left(\frac{8f_2 x}{l^2 \sqrt{1 + \frac{64f_1^2 x^2}{l^4}}} + \frac{8f_1 x}{\sqrt{1 + \frac{64f_1^2 x^2}{l^4}}} \right) \quad (10)$$

$$w_k(u) = \sum_{s=-l/2}^{l/2} \frac{\overline{MM}_p ds}{EI} = \frac{1}{E_1 I_1}$$

$$\left[\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} T^0 (f_1 + f_2) \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right) \sqrt{1 + \frac{64f_1^2 x^2}{l^4}} dx \right] \cdot$$

$$\left[\int_{-\frac{l}{2}}^u \left(\frac{1}{2} - \frac{u}{l}\right) \left(\frac{1}{2} + x\right) dx + \int_u^{\frac{l}{2}} \left(\frac{1}{2} + \frac{u}{l}\right) \right.$$

$$\left. \left(\frac{1}{2} - x\right) dx \right] \quad (11)$$

因为在实际设计中,仅考虑内力和变形的最大值,所以,由式(8)~(11)得

$$\begin{cases} M_{\max} = -Tf & (x=0) \\ N_{\max} = -T & (x=0) \\ V_{\max} = -4Tf/l & (x=l/2) \\ w_{\max} = \frac{Tf}{E_1 I_1} \left(\frac{f_1^2}{10} + \frac{5l^2}{48} \right) & (x=0) \end{cases} \quad (12)$$

求解荷载产生的内力和位移时,结构为一次超静定结构,根据变形协调条件,用力法可以求得拉索在荷载作用下的张拉力,然后按照上述方法求解结构的内力和位移,不再赘述。

2 有限元算例验证

某张弦梁屋架由 8 榀单向张弦梁构成,跨度为 60m,每两榀间距为 9m,中间设置纵向支撑和檩条以保证结构的平面外稳定。由于单向张弦梁结构的对称性,取其中的一榀进行分析,如图 2 所示。上弦和下弦均采用抛物线型进行布置,上下弦矢高均为 4m,结构端部采用一端固定铰支座,一端滑动铰支座的支承形式。上弦拱梁截面采用规格为 600mm × 300mm × 12mm × 20mm 的 H 型钢,撑杆采用 φ152mm × 8mm 的热轧无缝钢管,拉索采用 φ5mm × 109mm 国产高强度冷拔镀锌钢丝。拱梁及撑杆的材料均为 Q-345B,弹性模量为 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,索弹性模量 $E = 1.85 \times 10^5$ MPa。

分析采用的基本单元包括空间梁单元、空间杆单元和索单元。本文拟采用有限元软件

SAP2000 进行计算分析,对上述三种单元均采用 Frame Element 模拟,由文献[3]可知,释放撑杆两端的弯矩,对拉索进行属性修正后,该软件可以较为精确的模拟张弦梁结构。

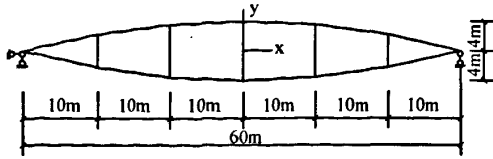


图2 单幅张弦梁计算模型
Fig.2 Model of single beam string

对图2所示张弦梁施加 10kN 的初始张拉预应力,并将初始张拉阶段结构内力和位移的理论解与有限元程序计算结果进行比较,见表1。

表 1 上弦拱梁内力和位移计算结果

	上弦最大轴力 /kN	上弦最大弯矩 / (kN·m)	上弦最大剪力 /kN	最大竖向挠度 /m
理论计算	-10	-80	5.33	0.124
有限元计算	-9.975	-80.03	5.06	0.126

由表1可以看出有限元程序的计算结果与理论解结果基本上相等,误差较小,因此运用有限元软件 SAP2000 对张弦梁结构进行分析计算是可行的。

3 初始预应力值对结构受力性能的影响

对结构分别施加 5kN、10kN、15kN、20kN 的初始预应力,结构的自重由程序自动计算,屋面恒荷载取 0.5kN/m²,屋面活荷载取 0.5kN/m²。运用 SAP2000 有限元软件研究初始张拉预应力值大小对结构受力性能的影响,计算结果见图3~图5。

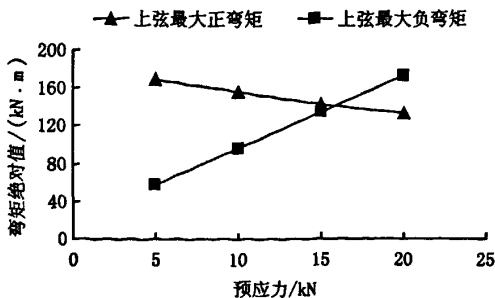


图3 上弦最大弯矩与预应力值的关系
Fig.3 Relation curves between maximum moment of upper chord and prestress value

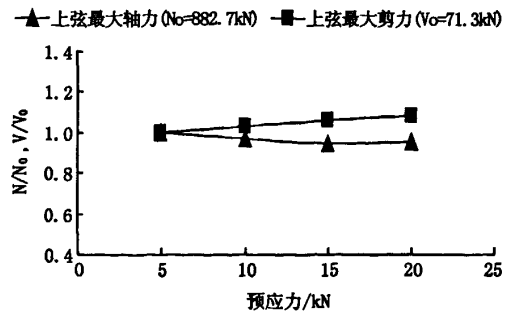


图4 上弦最大轴力和最大剪力与预应力值的关系
Fig.4 Relation curves between maximum axial force & shear force and pre-stress value

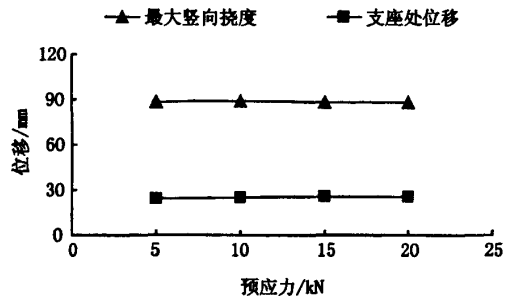


图5 结构位移与预应力值的关系
Fig.5 Relation curves between structure displacement and pre-stress value

计算结果分析如下:

1)由图3可以看出,初始预应力在降低上弦正弯矩的同时,也会增大上弦负弯矩,两者相互影响,且上弦负弯矩的增长幅度大于正弯矩的降低幅度,预应力超过 15kN 时,上弦负弯矩大于上弦正弯矩,所以对于本文的张弦梁初始预应力取 15kN 时,结构的弯矩绝对值最小。

2)当初始预应力小于 15kN 时,上弦梁的绝对最大弯矩随着预应力的增大而减小,大于 15kN 后,上弦梁的绝对最大弯矩随着初始预应力的增大而增大,所以预应力的取值不能过大。

3)由图4可知,初始预应力的变化对上弦轴力及剪力的影响很小。

4)由图5可以看出,随着初始预应力值的增大,结构的挠度和支座位移几乎不变,说明初始预应力的改变对结构位移的影响很小。

4 结论

1)通过 SAP2000 有限元计算(下转第 15 页)

4.3 腹杆内力分布

对于腹杆,拉压均存在,受力适中。取网架一角连续五跨范围内的腹杆为例(图 3),横线上为杆件静内力,横线下为最大动内力。

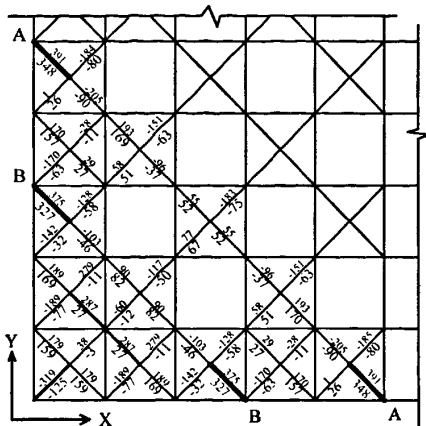


图 3 五跨腹杆内力分布图

Fig. 3 Internal force distribution of 5-span interlayer bars

A-A 和 B-B 位置上,两端的四角锥内腹杆内力比中间四角锥内的偏大,图中已用粗线表示内力较大杆件位置。沿轴的腹杆内力由两端向中间递减,且沿垂直轴方向的对角线对称分布。由前面下弦内力分布可知,A-A 位置上杆件内力比 B-B 大,由此可以得出,下弦杆件内力越大,杆件所在轴两端的四角锥内腹杆内力越大。

5 结论

(上接第 3 页)结果与理论分析对比证明,采用 SAP2000 进行张弦梁的分析是可行的。

2) 初始预应力在降低上弦正弯矩的同时,也会增大上弦负弯矩,所以初始预应力虽然能改善结构的受力性能,但是其取值不宜过大。

3) 初始预应力值的大小对结构的挠度和支座位移的影响较小,说明预应力对结构整体刚度的贡献很小,所以施加预应力的主要作用是使结构形成一个整体共同受力。

参考文献:

- [1] 丁博涵. 张弦梁结构的静力、抗震和抗风性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [2] 白正仙, 刘锡良, 李义生. 单榀张弦梁结构各因数的

1) 大跨度棋盘形四角锥网架基本周期受荷载等级、跨度影响,当只改变其一个因素时,周期随其增大而呈增大趋势。

2) 通过对棋盘形四角锥网架的模式分析和时程分析对比, SAP2000 的分析结果比 ANSYS 偏大;但相差不大,且都呈现相同的变化规律。

3) 棋盘形四角锥网架无论是在静荷载还是在竖向地震作用下,上弦平面内力分布规律清晰,由四周的拉力向中间压力过渡,隔跨杆件呈明显递变规律;下弦内力分布则比较复杂,在 1/4 平面的中部为大;腹杆受下弦影响,下弦内力较大杆件所在轴两端的锥体内腹杆内力较大。

参考文献:

- [1] 网架结构设计手册编辑委员会. 网架结构设计手册(实例与图集)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 李国强, 陈素文. 从汶川地震灾害看钢结构在震区的应用[J]. 建筑钢结构进展, 2008(4): 1-8.
- [3] 田黔, 孟文清, 赵鹏燕. 焊接空心球网架节点的质量控制[J]. 河北建筑科技学院学报, 2003, 6(2): 52-54.
- [4] 白那. 正放四角锥网架屋盖的固有振动与竖向地震作用研究[D]. 大庆:大庆石油学院, 2004.
- [5] 彭俊生, 罗永坤, 彭地. 结构动力学、抗震计算与 SAP2000 应用[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2006.
- [6] JGJ7-91. 网架结构设计与施工规程[S].
- [7] 网架结构设计与施工规程编写组. 网架结构设计与施工(规程应用指南)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995.


(责任编辑 马立)

影响分析[J]. 钢结构, 2001, 16(3): 42-46.

- [3] 黄明鑫. 大型张弦梁结构的设计与施工[M]. 济南:山东科学技术出版社, 2005.
- [4] 陈侃. 预应力张弦拱结构的理论分析和受力性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2001.
- [5] 董石麟, 罗尧治, 赵阳, 等. 新型空间结构分析、设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.
- [6] 许曙东, 张开臣. SAP2000 软件在预应力空间索结构设计分析中的应用[C]. 第一届金土木结构软件全国用户大会会议论文集, 2008: 199-202.
- [7] 史三元, 景晓昆. 冷弯薄壁型钢轴心受压构件局部屈曲后强度分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(3): 1-3.

(责任编辑 马立)

初始预应力值对张弦梁结构受力性能的影响

作者: [史三元](#), [冉莉](#), [李旭光](#), [SHI San-yuan](#), [RAN Li](#), [LI Xu-guang](#)
作者单位: [河北工程大学土木工程学院, 河北, 邯郸, 056038](#)
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2010, 27(1)

参考文献(7条)

1. 丁博涵 [张弦梁结构的静力、抗震和抗风性能研究](#)[学位论文] 2005
2. 白正仙;刘锡良;李义生 [单榀张弦梁结构各因数的影响分析](#)[期刊论文]-[钢结构](#) 2001(03)
3. 黄明鑫 [大型张弦梁结构的设计与施工](#) 2005
4. 陈侃 [预应力张弦拱结构的理论分析和受力性能研究](#) 2001
5. 董石麟;罗尧治;赵阳 [新型空间结构分析、设计与施工](#) 2006
6. 许曙东;张开臣 [SAP2000软件在预应力空间索结构设计分析中的应用](#) 2008
7. 史三元;景晓昆 [冷弯薄壁型钢轴心受压构件局部屈曲后强度分析](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(03)

本文读者也读过(10条)

1. [周书敬](#), [薄涛](#), [史三元](#), [ZHOU Shu-jing](#), [BO Tao](#), [SHI San-yuan](#) [混合算法在轻钢结构优化设计中的应用](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2011, 28(2)
2. [史三元](#), [郭周超](#), [商冬凡](#), [边智慧](#), [SHI San-yuan](#), [GUO Zhou-chao](#), [SHANG Dong-fan](#), [BIAN Zhi-hui](#) [超声法结合钻芯法检测大体积混凝土内部缺陷](#)[期刊论文]-[混凝土](#)2011(4)
3. [史三元](#), [郭周超](#), [边智慧](#), [商冬凡](#), [SHI Shan-yuan](#), [GUO Zhou-chao](#), [BIAN Zhi-hui](#), [SHANG Dong-fan](#) [增大超声测距在大体积混凝土结构检测中的应用研究](#)[期刊论文]-[建筑科学](#)2011, 27(5)
4. [胡启平](#), [史三元](#) [变截面芯筒—框架结构受扭简化计算](#)[期刊论文]-[煤矿设计](#)2001(3)
5. [史三元](#), [杨砚宗](#), [王浩然](#), [SHI San-yuan](#), [YANG Yan-zong](#), [WANG Hao-ran](#) [垫层对载荷试验成果影响的试验分析](#)[期刊论文]-[煤炭工程](#)2008(7)
6. [杜海金](#), [史三元](#), [尹建设](#), [王志军](#), [李志波](#) [静力触探试验估算粉喷桩承载力的试验研究](#)[期刊论文]-[煤矿设计](#) 2000(1)
7. [王翠莲](#), [史三元](#) [取样扰动对饱和粉土动力特性的影响](#)[期刊论文]-[河北建筑科技学院学报\(自然科学版\)](#) 2003, 20(1)
8. [李巨文](#), [史三元](#), [王世飞](#) [两厂房基础下沉的调查与分析](#)[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#)2000(2)
9. [刘金荣](#), [史三元](#) [变截面门式刚架的几何非线性性能](#)[期刊论文]-[河北建筑科技学院学报\(自然科学版\)](#)2004, 21(1)
10. [常永平](#), [杨林](#), [苏幼坡](#), [CHANG Yong-ping](#), [YANG Lin](#), [SU You-po](#) [河北省地震工程研究中心隔震设计与分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2007, 33(14)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb201001001.aspx