

文章编号:1673-9469(2009)04-0001-03

斜拉桁架施加预应力后的节点位移分析与拟合

仲济涛,何丽丽,高瑞贞,张京军

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:斜拉桁架采用了卸载效应大,受力合理的三角形截面。运用 ANSYS10.0 软件建立了斜拉立体桁架模型,并对其斜拉索中施加不同预应力后的节点竖向位移进行了分析,通过 MATLAB7.0 软件对节点竖向位移进行拟合,得到了拟合曲线多项式,克服了以往单纯针对节点进行分析的缺陷。分析结果表明,斜拉索中施加预应力可以很好地控制结构的竖向位移。

关键词:斜拉桁架;预应力;位移;ANSYS;MATLAB

中图分类号: TU311.4

文献标识码: A

Analysis and fitting to nodal displacements of cable - stayed truss with triangular cross - section after applying prestressing force

ZHONG Ji-tao, HE Li-li, GAO Rui-zhen, ZHANG Jing-jun

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

Abstract: Cable - stayed truss with triangular cross - section has been adopted in this paper. It has great unloading effect and is more reasonable when bearing loads. The cable - stayed space truss model was built by ANSYS10.0 software. The analysis is performed for vertical displacements of nodes after applying various prestressing force to stayed cables. Then the vertical displacements of nodes are fitted by MATLAB7.0 software and the curve - fitting polynomials are obtained, which overcomes the disadvantage that only nodal analysis was performed before. The analysis results show that applying prestressing force to stayed cables can control the vertical displacements well.

Key words: cable - stayed truss; prestressing force; displacement; ANSYS; MATLAB

斜拉立体桁架中拉索的预应力会显著地影响结构内力及位移,因此合理地确定预应力大小可以很好地控制索力,保证结构处于合理的受力状态,这是斜拉结构设计中的关键问题。预应力分析方法主要有,等效力法^[1]、初应变法^[2]、初始缺陷法^[3]、初内力法^[4]、初应力法等。目前,大多数文献只针对具体预应力进行分析,如冯健等对斜拉网格结构进行了预应力分析^[5],严慧等对网架结构中的预应力进行了分析^[6]。本文采用倒三角形截面形式的立体桁架,利用 MATLAB 中的最小二乘法原理对有限多个预应力下的节点位移进行拟合,合理预测出节点在其他预应力下的位移,得出一些有益的结论。

1 结构形式的选取和模型的建立

1.1 结构形式的选取

立体桁架是斜拉立体桁架中的主要承重构件之一^[7]。立体桁架的截面形式可为矩形、梯形和三角形等。三角形截面又分为正三角形截面和倒三角形截面^[8]。倒三角形截面重心偏上,可产生较大卸载效应,且上弦双肢受压,下弦单肢受拉,受力合理。采用变截面倒三角形形式,施工相对困难^[8],本文选用的是钢材规格统一,施工方便的等截面倒三角形。

收稿日期:2009-09-23

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2008000731);河北省教育厅科学研究计划资助项目(2006107)

特约专稿

作者简介:仲济涛(1985-),男,山东寿光人,硕士研究生,从事斜拉结构优化设计研究。

1.2 模型的建立

用 ANSYS10.0 有限元软件分析斜拉立体桁架时,计算模型的选择和建立是分析计算的首要工作。由于构件受力性能不同,在分析时,结构构件须采用不同的计算单元进行模拟,通常视结构的实际构造予以确定^[9,10]。单元选择的正确与否以及精确程度会直接影响分析结果的正确性。

空间桁架采用的是铰接的二力杆单元(铰接模型);上下弦和腹杆采用 LINK8 单元,这种三维杆单元是杆轴方向的拉压单元,每个节点具有三个自由度;斜拉索采用 LINK10 单元, LINK10 单元独一无二的双线性刚度矩阵特性^[11]使其成为一个轴向仅受拉或仅受压的杆单元。使用只受拉选项时,如果单元受压,刚度就消失。LINK10 单元的这个特性使其恰好可以模拟斜拉结构中的拉索。

1.3 计算参数的选取

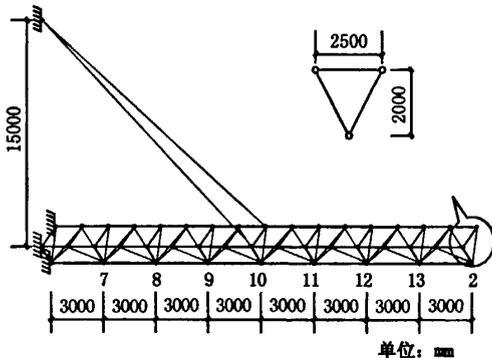


图1 斜拉桁架计算模型

Fig.1 Calculation model

采用的空间桁架共 8 个节间,节间 3m(图 1);

三角形截面的底边长 2 500mm,高 2 000mm。两根斜拉索下端分别铰接于桁架中部的两个上弦节点,上端则铰接于立柱(本文未考虑立柱变形对空间桁架和斜拉索的影响),上下弦采用 $\Phi 325\text{mm} \times 12\text{mm}$ 的无缝钢管,腹杆采用 $\Phi 159\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的无缝钢管^[12,13]。上下弦及腹杆的弹性模量为 $E = 2.0 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\rho = 7 800\text{kg/m}^3$;拉索采用弹性模量为 $E = 1.7 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\rho = 7 850\text{kg/m}^3$ 。

2 计算结果及分析

静力荷载作用下,每个上弦节点承受 25kN 的荷载。通过 ANSYS10.0 软件进行加载、求解。计算后的变形图如图 2 所示。

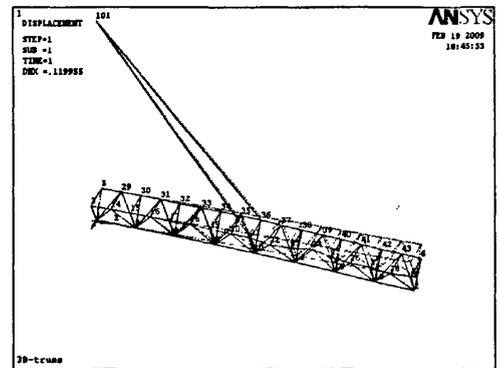


图2 求解后的变形图

Fig.2 Deformation figure of solution

2.1 下弦节点竖向位移分析

本文采用初始应变法,通过给斜拉索施加初始应变(从 0、0.000 2、0.000 4...0.002 分 11 种情况)对竖向位移进行分析(表 1)。

表 1 节点竖向位移

Tab.1 Vertical displacements of nodes

初始应变	7	8	9	10	11	12	13	2
0.000 0	-0.43	-1.21	-2.28	-3.60	-5.56	-7.68	-9.84	-11.96
0.000 2	-0.39	-1.11	-2.08	-3.30	-5.18	-7.20	-9.27	-11.30
0.000 4	-0.36	-1.00	-1.88	-3.00	-4.79	-6.73	-8.70	-10.65
0.000 6	-0.32	-0.89	-1.69	-2.70	-4.40	-6.25	-8.14	-9.99
0.000 8	-0.28	-0.79	-1.49	-2.40	-4.01	-5.77	-7.57	-9.34
0.001 0	-0.25	-0.68	-1.29	-2.10	-3.62	-5.29	-7.01	-8.68
0.001 2	-0.21	-0.58	-1.10	-1.80	-3.23	-4.82	-6.44	-8.03
0.001 4	-0.17	-0.47	-0.90	-1.50	-2.84	-4.34	-5.87	-7.37
0.001 6	-0.14	-0.37	-0.70	-1.20	-2.45	-3.86	-5.31	-6.72
0.001 8	-0.10	-0.26	-0.51	-0.90	-2.07	-3.38	-4.74	-6.06
0.002 0	-0.06	-0.16	-0.31	-0.60	-1.68	-2.91	-4.17	-5.41

斜拉索未施加预应力之前,自由端竖向位移为 -11.96cm,垂跨比^[14]为 1/200;施加预应力($\epsilon = 0.002$)之后,自由端竖向位移变为 -5.41cm,垂跨比为 1/443。自由端竖向位移减幅达 54.8%,垂跨比减小幅度同为 54.8%。

2.2 拟合曲线与拟合多项式

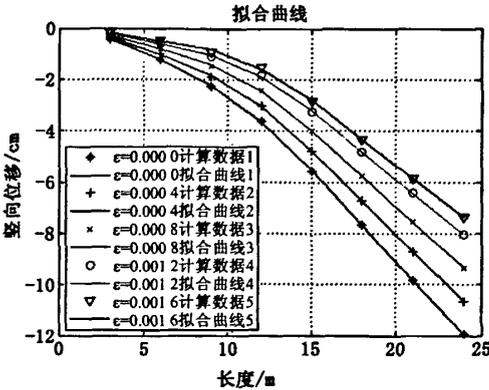


图3 节点位移拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of the nodal displacement

利用 MATLAB7.0 软件进行分析,做出节点位移的拟合曲线,如图 3 所示。初始应变为 $\epsilon = 0, \epsilon = 0.0004, \epsilon = 0.0008, \epsilon = 0.0012, \epsilon = 0.0016$ 时下弦节点的拟合多项式分别为

$$\begin{cases}
 y = -4.5 \times 10^{-6}x^5 + 0.00036x^4 - 0.0098x^3 + 0.097x^2 - 0.66x + 0.92 \\
 y = -5.6 \times 10^{-6}x^5 + 0.00043x^4 - 0.012x^3 + 0.12x^2 - 0.75x + 1.1 \\
 y = -5.8 \times 10^{-6}x^5 + 0.00045x^4 - 0.013x^3 + 0.14x^2 - 0.78x + 1.2 \\
 y = -6.1 \times 10^{-6}x^5 + 0.00048x^4 - 0.014x^3 + 0.15x^2 - 0.82x + 1.2 \\
 y = -6.3 \times 10^{-6}x^5 + 0.00050x^4 - 0.014x^3 + 0.16x^2 - 0.84x + 1.3
 \end{cases} \quad (1)$$

在 MATLAB7.0 软件中,利用 linear 选项^[15]对自由端 2 节点在不同应变下的节点位移进行了拟合(图 4),所得拟合曲线多项式为

$$y = 3.27 \times 10^3 x - 12 \quad (2)$$

现在通过向 ANSYS 中输入两个额外的应变项($\epsilon = 0.0022, \epsilon = 0.0024$)来验证公式(2)的正确性。经 ANSYS 软件计算,当 $\epsilon = 0.0022$ 时,2 节点的位移 $y_{0.0022} = -4.75\text{cm}$;当 $\epsilon = 0.0024$ 时,2 节点的位移 $y_{0.0024} = -4.10\text{cm}$ 。利用公式(2),当 $x_1 =$

0.0022 时, $y_1 = -4.81\text{cm}$;当 $x_2 = 0.0024$ 时, $y_2 = -4.15\text{cm}$ 。误差分析见表 2。

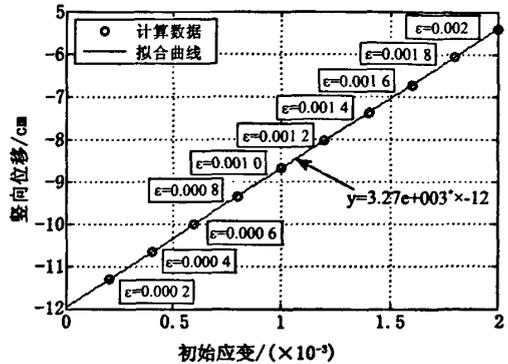


图4 2节点竖向位移拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of the vertical displacement of node 2

表 2 相对误差分析

Tab. 2 Analysis for relative error

初始应变	ANSYS 计算结果		公式计算结果	相对误差
	y_1/cm	y_2/cm		
0.0022	-4.75	-4.81	-4.81	1.26%
0.0024	-4.10	-4.15	-4.15	1.22%

由表 2 可知,相对误差在工程误差允许的范围之内,因此公式(2)具有普遍意义上的正确性。利用此公式可以预测表 1 之外的初始应变项对节点位移造成的影响。

3 结论

1) 研究表明,斜拉索中的预应力是控制结构竖向位移的关键因素。因此,在斜拉桁架的斜拉索中施加预应力是很有必要的。

2) 斜拉索施加预应力后对拉索外侧节点竖向位移的影响大于对拉索内侧节点的影响。

3) 通过 MATLAB7.0 计算得知,次数为五的多项式可以很好地拟合节点的竖向位移。

4) 随着初始应变的线性增加,自由端节点竖向位移也呈现出线性变化的趋势。根据此规律求得的公式可以用来预测其他初始应变项对节点位移造成的影响。

(下转第 12 页)

用量越少,粉煤灰用量也相应的减少,强度降低。

2)最佳胶凝效率 K 的取值与龄期和设计强度有关。当选用长龄期的抗压强度作为设计标准值时,最佳胶凝效率可取较大值;并且设计强度越高,最佳胶凝效率取值宜越小。需指出的是,该结论仅在 90d 龄期内而言,超过 90d 的情况如何有待研究。

3)随着龄期的增长,当用粉煤灰替代部分水泥时,试件抗压强度在 90d 内一直持续增长。但对于不同胶凝效率 K ,后期增长的幅度相仿。

4)桩身强度随胶凝效率、粉煤灰掺入比等桩身材料性能和龄期的不同而变化。

5)CFG 桩单桩承载力随桩身弹性模量的增加而变大,桩身弹性模量与粉煤灰的掺入量、胶凝效率等桩身材料性能和龄期有关。

参考文献:

[1] 阎明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践

[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[2] 范云, 汪英珍. CFG 复合地基桩材特性的试验分析[J]. 地质与勘探, 2002, 38(4): 94-96.

[3] 郭明田, 丁勇. 利用正交试验分析进行 CFG 桩复合地基优化设计[J]. 岩土工程技术, 2003(4): 233-236.

[4] 阎明礼, 吴春林, 杨军. CFG 桩复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 55-66.

[5] JGJ55-2000, 普通混凝土配合比设计规程[S].

[6] 王大通, 袁童民, 石海. CFG 桩桩身材料强度试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(1): 57-60.

[7] 赵延林, 景海河, 曹洋. 复合土钉支护中土钉内力实验[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(5): 377-379.

[8] 安景波, 赵思远, 邓志辉. 大抗拔灌注桩优化设计方法[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(4): 295-297.

(责任编辑 马立)

(上接第 3 页)

参考文献:

[1] 孙建琴. 大跨度斜拉立体桁架静动力非线性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.

[2] 汪长林. 斜拉空间桁架结构在静力和竖向地震作用下的受力性能[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.

[3] 邓华. 拉索预应力空间网格结构设计的几个概念[J]. 工业建筑, 2002, 30(10): 64-67.

[4] 董石麟, 邓华. 预应力网架结构的简捷算法及施工张拉全过程分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 18-22.

[5] 冯健, 张耀康. 预应力斜拉网格结构的静力优化分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 33(5): 583-587.

[6] 严慧, 熊卫. 斜拉网架结构静力、动力特性的研究[J]. 工程力学, 1994(增刊), 1379-1384.

[7] 蓝天. 空间钢结构的应用和发展[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4), 2-8.

[8] 曹亮良. 某车站雨棚斜拉立体桁架结构的静力有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.

[9] RAJENDRAN M, MURUGADOSS J, JUSTIN S. Optimal de-

sign of space truss using ant colony metaphor and genetic algorithm - a comparative study[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 33(3): 215-224.

[10] 缪正华, 于月民, 丁元柱. 形状记忆聚合物复合材料梁的弯曲变形[J]. 黑龙江科技学院学报, 2008, 18(1): 73-76.

[11] GRECO M, GESUALDO F, VENTURING W, et al. Non-linear positional formulation for space truss analysis[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42(12): 1079-1086.

[12] 孙伟. 预应力钢桁架结构的设计与极限承载力分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 46-50.

[13] 肖汝诚, 项海帆. 斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, 26(3): 235-240.

[14] 高永强, 王秀红. 考虑弯曲刚度的斜拉索固有振动特性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 20-24.

[15] 张圣勤. MATLAB7.0 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

(责任编辑 马立)