

斜拉桥索塔锚固区节段模型分析中 预应力筋的模拟研究

孙松松, 陈紫云

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要:为了得到斜拉桥索塔锚固区节段模型分析中模拟预应力筋更好的方法,以某公铁两用斜拉桥为研究背景,应用Ansys对该桥进行索塔锚固区节段模型分析。建立模型时分别采用实体分割法与约束方程法来模拟预应力筋。通过对比两种方法下塔体关键部位的应力差异,并对产生差异的原因及规律进行分析。

关键词:斜拉桥;索塔锚固区;节段模型分析;预应力筋;实体分割法;约束方程法

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

斜拉桥索塔锚固区具有荷载大、空间小、传力路径多、受力机理复杂等特点,是斜拉桥分析中的重点和难点之一。目前工程上主要采用有限元法进行斜拉桥索塔锚固区计算分析,最精确的方法是建立足尺度实体有限元模型,但是当索塔较高时,足尺度实体模型需要花费非常高的计算费用,一般很难实现。实际中为了减少计算费用,提高工作效率,经常从索塔的顶部开始取 n 个节段进行分析,因为索力最大的拉索多数位于索塔的顶部,且该部位的拉索与索塔的夹角最大,该部位受到的水平拉力最大,如此能够得到索塔上最危险部位的应力分布。

索塔锚固区节段模型分析主要研究塔体局部位

的应力水平,因此对于采用预应力筋锚固形式^[1]的索塔模型来说,对预应力筋的模拟越精确结果越可靠。预应力混凝土结构的传统有限元分析方法之一是等效荷载法^[2],此方法具有建模简单、模型易进行网格划分的优点,但不宜做结构细部受力分析。为了精确获得结构细部力学行为,宜采用“实体力筋法”,即分别用不同的单元来模拟混凝土与预应力筋,预应力通过降温法或者初应变法进行施加。实体力筋法在力学模型上有3种处理方法,即实体分割法、节点耦合法和约束方程法。文献[2]对这3种方法的基本思路做了详细的介绍。实体分割法是混凝土实体模型创建之后,用预应力筋线拖拉形成的面和工作平面对实体切分,用面

- *****
- [7] SHAKYA A M, KODUR V K R. Effect of Temperature on the Mechanical Properties of Low Relaxation Seven-Wire Prestressing Strand[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 74—84.
- [8] WANG X X, CHEN Z H, LIU H B, et al. Experimental Study on Stress Relaxation Properties of Structural Cables[J]. Construction and Building Materials, 2018, 175: 777—789.
- [9] MOYO P, et al. Development of Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Civil Infrastructure[J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1 828—1 834.
- [10] SHEN S, WANG Y, MA S L, et al. Evaluation of Prestress Loss Distribution during Pre-Tensioning and Post-Tensioning Using Long-Gauge Fiber Bragg Grating Sensors[J]. SENSORS, 2018, 18(12): 4 106.
- [11] FAN G X, LIN F T, HAN J G, et al. Strain Conditions Monitoring on Corroded Prestressed Steel Strands in Beams Based on Fiber Bragg Grating Sensors[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2 288.
- [12] 覃荷瑛, 霍婷婷, 张贺丽, 等. 用于钢绞线大应变测量的光栅传感技术研究[J]. 激光杂志, 2017, 38(10): 60—64.
- [13] 覃荷瑛, 朱万旭, 张贺丽, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 216—223.
- [14] 朱万旭, 沈全喜, 覃荷瑛. 体内预应力钢绞线光纤光栅监测技术及其应用[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 68—75.

面相交形成的与预应力筋线形相同的线模拟为预应力筋。其优点在于力筋位置精确、求解结果可靠,但当力筋线形复杂时,建模比较麻烦,有时甚至导致布尔运算失败^[3],不易进行网格划分。但只要熟练掌握了建模与网格划分方法,实体分割法是可以实现的^[4]。节点耦合法和约束方程法在 Ansys 计算分析中均是建立与混凝土实体模型相对独立的线单元来模拟预应力筋。节点耦合法需要寻找距离力筋单元节点最近的混凝土单元节点进行点点自由度耦合来模拟混凝土与预应力筋的相互作用,略显麻烦,如果混凝土网格划分不够密,混凝土单元节点距离力筋节点较远,则会造成一定的误差。而约束方程法是自动选择混凝土单元在一定容差范围内的数个节点与力筋的每个节点建立约束方程,如此通过多组约束方程,将力筋与混凝土连接为整体。与节点耦合法相比,约束方程法更容易实现,且对混凝土网格密度要求不高,也比较符合实际情况,计算结果也较为可靠。

迄今为止,已经有很多学者对预应力筋的模拟做了研究。赵志刚^[5]以一座单塔双索面花瓶形斜拉桥为例,取该桥塔上索力最大拉索锚固点上下各 1.05 m,总高度 2.1 m 的节段模型进行分析,其中预应力筋用实体分割法模拟,同时建立了与节段模型大小相同的足尺度试验模型,将试验结果与理论计算进行对比;万利军^[6]以一座索塔采用单轴对称六边形箱形截面的特大桥为例,取其索塔锚固区节段模型进行分析,采用实体分割法交会出预应力筋的位置,为简化分析,只考虑了拉索的水平分力作用,同时也建立了试验模型,将结果在同一条件下进行比较;余浪^[7]以一座单塔双索面 H 形斜拉桥为例,取塔上最上 3 个节段为研究对象,采用节点耦合法模拟预应力筋的作用;赵曼等^[3]以一座矩形截面简支梁为例,采用等效荷载法、实体分割法、节点耦合法及约束方程法 4 种方法建立了结构的有限元模型,并将计算结果与初等梁理论计算结果进行了比较,得到了一些有益的结论;龙琮等^[8]以一座两等跨连续梁为例,采用实体分割法建立曲线预应力筋模型,并将其计算结果与等效荷载法计算结果加以比较;孙艳等^[9]以一座预应力混凝土简支梁为例,分别采用实体分割法、节点耦合法及约束方程法 3 种方法建立预应力筋模型,对这几种方法的结果进行了比较;李律等^[10]以一座简支空心板梁为例,用等效荷载法、节点耦合法及实体分割法 3 种方法建立了结构的预应力筋模型,并对计算结果进行了比较,总结了各个方法的优劣及其应用范围。

以上学者对索塔锚固区节段分析模型中预应力筋的模拟研究均从单一方法的角度进行,而采用不同方法模拟进行对比分析的研究也仅涉及简支梁或者连续梁的整体分析中。实际进行索塔锚固区节段模型分析,当采用不同方法模拟预应力筋时,计算结果往往存在一定的差异。该文以某公铁两用大桥为工程背景,采用 Ansys 对该桥箱形主塔进行索塔锚固区单节段模型应力分析,采用工程上普遍得到认可的实体分割法和约束方程法建立预应力筋模型,预应力的施加通过降温法实现,验证计算结果存在一定差异这一现象,并对产生差异的原因及规律进行分析,以便为同类桥梁进行索塔锚固区节段模型分析提供一些帮助和建议。

1 工程背景

跨径布置为(81+243+567+243+81) m 的五跨连续钢桁梁双塔双索面斜拉桥,其主塔为 H 形混凝土塔,塔高 190.5 m。全桥布置为上、下两层,上层为双向四车道高速公路,下层为双线铁路。斜拉桥全桥立面布置见图 1,主塔结构示意图见图 2。

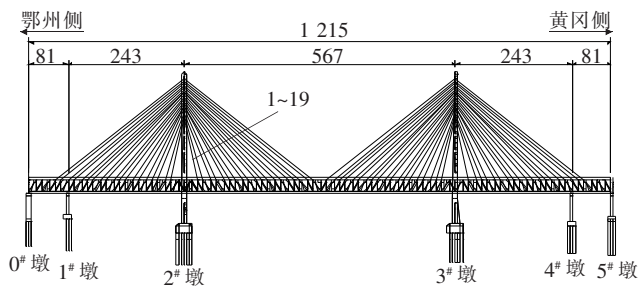


图 1 斜拉桥立面布置图(单位:m)

由全桥整体模型分析得知,靠近塔顶的拉索(19[#]索)索力最大,因此选择 19[#]索附近塔段建立高 10.77 m 的单节段模型进行局部分析,其截面为单箱单室截面,横桥向壁厚 1 m,顺桥向壁厚 1.5 m。拉索锚固形式为塔壁内设井字形预应力钢束^[11],构造采用箱壁锚固形式,拉索直接锚固于索塔内壁的锚固齿块上。节段模型基本截面及预应力钢束布置见图 3。

2 有限元模型及计算分析

采用有限元法分析索塔锚固区局部应力,无论采用哪种方法建立预应力筋的模型,计算结果的精度很大程度上取决于所建立的模型是否合理,比如单元选择、边界条件、网格划分等因素将直接影响计算结果。

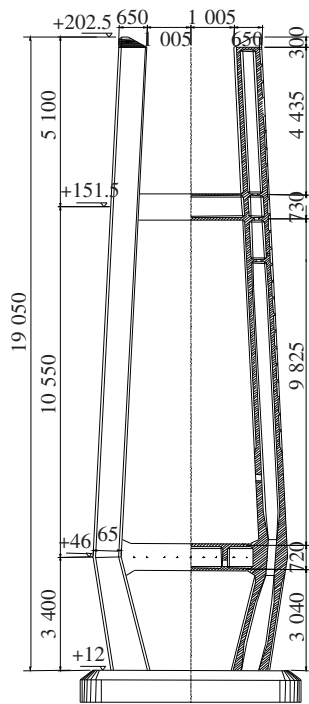


图 2 主塔结构示意图(除标高为 m 外,其余单位:cm)

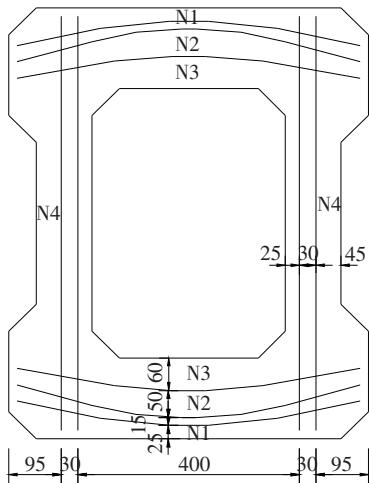


图 3 模型基本截面及预应力筋布置图(单位:cm)

鉴于以上因素,为了真实获得实体分割法和约束方程法这两种方法在模拟预应力筋时的差异,在建立两种方法下的有限元模型时,单元选择、边界条件、荷载以及网格划分时单元的大小都一致,采用 Solid92 单元模拟混凝土块,Link8 单元模拟预应力筋,预应力的施加采用降温法实现。为了减弱边界条件对结果的影响^[12],对几何模型进行了分块,计算分析后仅仅对模型中拉索锚固点上下各 2.25 m,总高度为 4.5 m 的区域结果进行比较。采用 3 种单元尺寸(0.2、0.3、0.4 m)对模型进行网格划分,比较在网格划分精细程度不

同时,两种方法计算结果的差异。

2.1 有限元模型

索塔采用 C50 混凝土,材料基本参数为:重度 25 kN/m³,弹性模量 3.55×10^4 MPa,线膨胀系数 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,抗压极限强度 33.5 MPa,抗拉极限强度 3.1 MPa。锚固区预应力钢筋采用 24- $\phi 7$ mm 高强度低松弛钢丝束镦头锚,材料基本参数为:预应力标准强度 1 670 MPa,锚下张拉控制应力 1 252.5 MPa,弹性模量 2.05×10^5 MPa,线膨胀系数 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

实体分割法与约束方程法几何模型分块及网格划分对比见图 4(网格划分仅示出单元尺寸为 0.3 m 的工况)。3 种工况下单元统计见表 1。

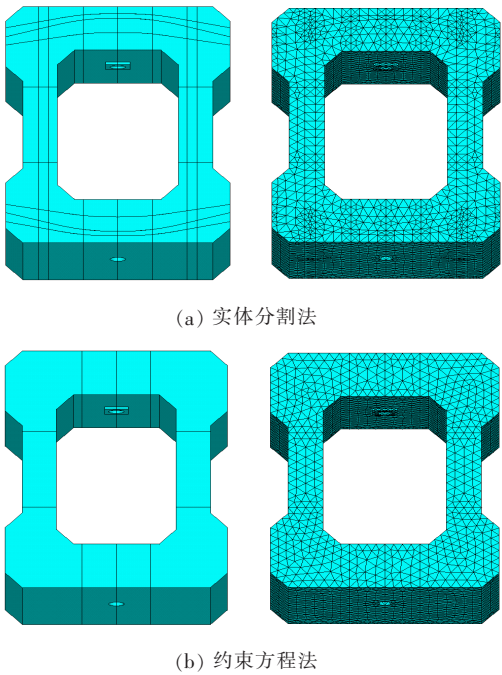


图 4 几何模型分块及网格划分对比图

表 1 不同工况下单元统计

工况	模型单元尺寸/m	实现方法	单元总数/个	畸形单元数/个
1	0.4	SSM	92 417	1
		CEM	47 630	2
2	0.3	SSM	148 790	0
		CEM	108 589	0
3	0.2	SSM	410 347	3
		CEM	332 798	0

注:“SSM”代表实体分割法,“CEM”代表约束方程法。

由图 4 及表 1 可知:约束方程法对应的模型网格划分后单元大小较均匀,且不易产生畸形单元;各个工况网格划分后实体分割法对应的模型单元总数远大于约束方程法对应的模型,这是由于对实体进行分割,相当于对网格划分加了很多约束条件,从而使得单元数明显增多,造成计算时效率偏低。

2.2 计算分析

图 5 所示的 6 个应力路径是为比较两种方法的计算结果而假定的,其中路径 3 和路径 6 是沿塔柱高度方向向下,其他路径方向如图 5 所示。路径 1~3 提取的是顺桥向的应力,路径 4~6 提取的是横桥向的应力。

图 6~11 分别为 6 个应力路径在不同计算工况下,两种方法计算结果的差异对比图。表 2 为不同工况下各个路径的平均差值百分比。

由图 6~11 中的(a)图可知:两种方法的计算结果存在一定差异,但规律基本相同;工况 1 与工况 2、工

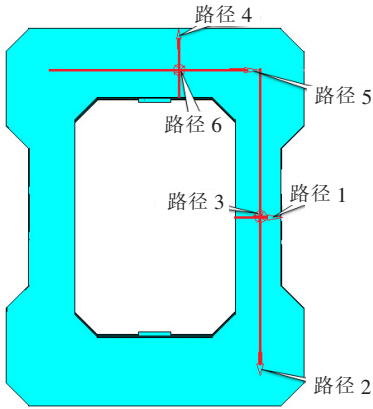
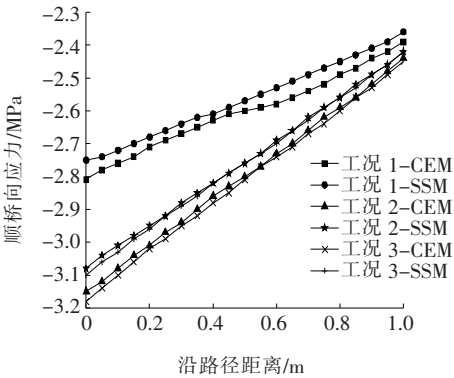
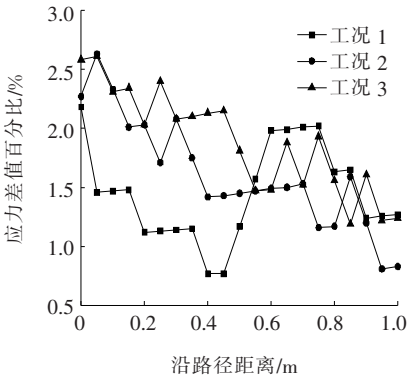


图 5 应力路径图示

况 3 的计算结果相差略大,说明工况 1 网格划分精度略低,虽然计算效率略高,但误差较大;工况 2 与工况 3 的计算结果较接近,说明网格划分采用工况 2 的精度即可,即采用 0.3 m 的单元尺寸进行网格划分即可,进一步细化网格对结果影响不大,反而会降低计算效率。

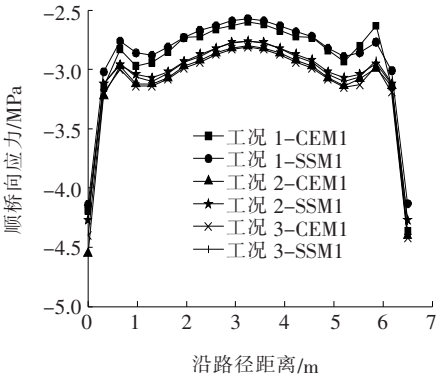


(a) 不同工况下应力分布图

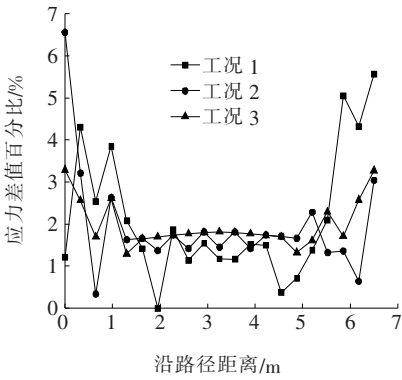


(b) 不同工况下应力差值百分比分布图

图 6 路径 1 应力及差值百分比分布图

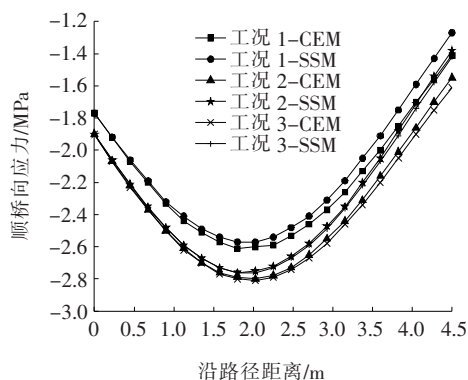


(a) 不同工况下应力分布图

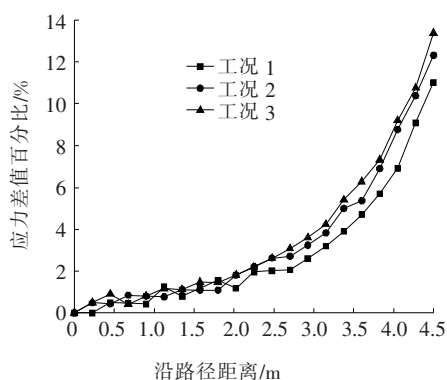


(b) 不同工况下应力差值百分比分布图

图 7 路径 2 应力及差值百分比分布图

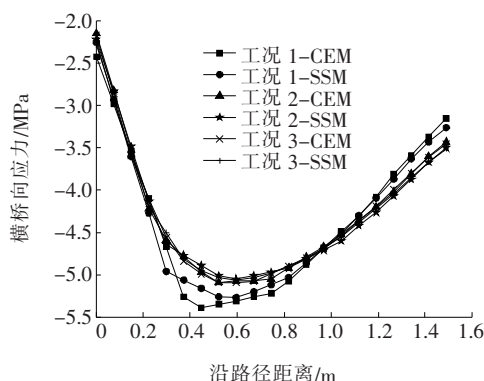


(a) 不同工况下应力分布图

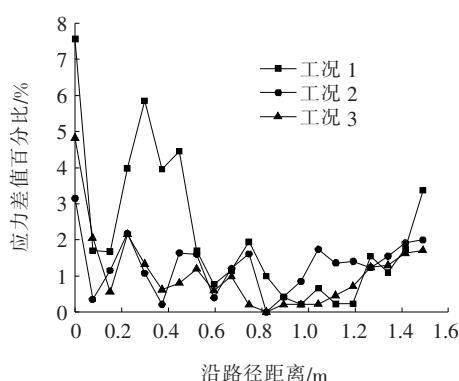


(b) 不同工况下应力差值百分比分布图

图8 路径3应力及差值百分比分布图

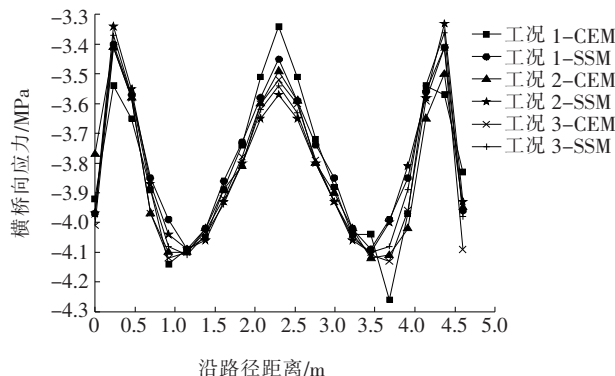


(a) 不同工况下应力分布图

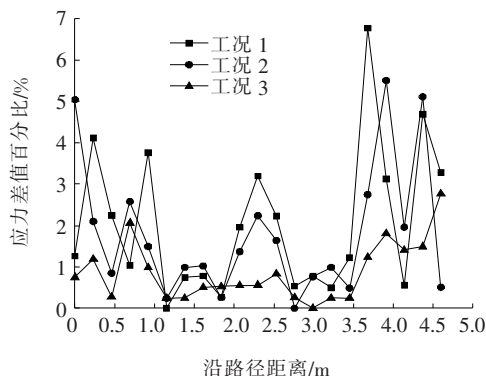


(b) 不同工况下应力差值百分比分布图

图9 路径4应力及差值百分比分布图



(a) 不同工况下应力分布图



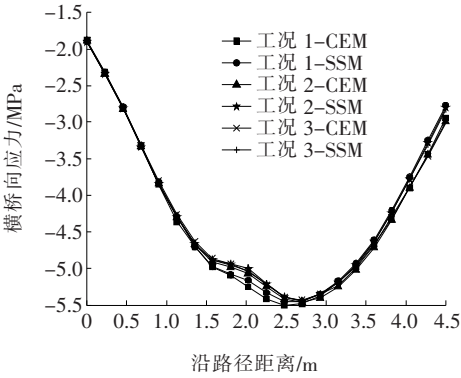
(b) 不同工况下应力差值百分比分布图

图10 路径5应力及差值百分比分布图

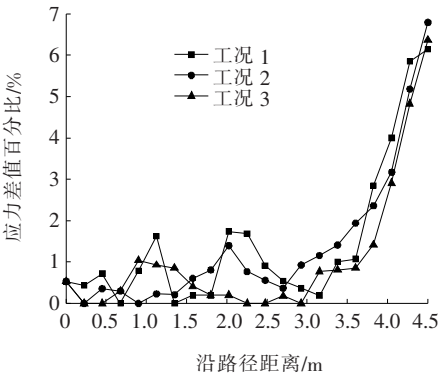
由图6~11中的(b)图可知:两种方法下的应力差值百分比大部分在7%之内,仅仅在路径3的部分区域超过了7%,因为该部分区域应力水平很低,导致了差值百分比略大。并且从表2可知:不同工况下各个路径的平均差值百分比均为2%左右,说明两种方法

的计算结果总体相差不大。

综上所述:在网格划分精度足够高时,两种方法的结果差异很小,因此实际建模分析时可以用计算效率更高、建模更简便的约束方程法来代替建模复杂、网格划分较困难的实体分割法。



(a) 不同工况下应力分布图



(b) 不同工况下应力差值百分比分布图

图 11 路径 6 应力及差值百分比分布图

表 2 平均差值百分比

路径	平均差值百分比/%		
	工况 1	工况 2	工况 3
1	1.45	1.61	1.89
2	2.13	1.94	1.98
2	2.88	3.42	3.70
4	2.16	1.29	1.10
5	2.05	1.80	0.87
6	1.47	1.39	1.08

3 结 论

通过对比分析实体分割法和约束方程法的计算结果,再结合建模、网格划分的难易程度以及计算效率的高低,得出以下结论:

(1) 利用 Ansys 进行斜拉桥索塔锚固区节段分析模型中预应力筋的模拟研究,实体分割法与约束方程法各有优缺点;实体分割法虽然具有力筋位置精确、结果更可靠的优点,但是建模及网格划分比较困难,计算效率也较低,尤其当力筋曲线布置较多时;约束方程法虽然力筋位置不够精确,但是其主要优势在于建模及网格划分比较方便,计算效率较高。

(2) 经过有限元模型对比分析,推荐采用 0.3 m 的单元尺寸进行网格划分,既满足计算精度,又保证计算效率。

(3) 在一定的网格划分精度条件下,约束方程法也能得到较理想的结果,并且相对于实体分割法可以

节省计算时间,减少计算费用,因此在索塔锚固区节段模型分析中推荐使用约束方程法。

参考文献:

[1] 魏奇芬,叶文海,范史文,等.大跨度斜拉桥混凝土索塔锚固区理论与设计的研究进展综述[J].现代交通技术,2010,7(6):45—48.

[2] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

[3] 赵曼,王新敏,高静.预应力混凝土结构有限元数值分析[J].石家庄铁道学院学报,2004,17(1):84—88.

[4] 何美仲,王敏丰,董秀文.普通钢筋与预应力筋在 ANSYS 中的实现方法的探讨[J].中国高新技术企业杂志,2007(12):158—162.

[5] 赵志刚.紫金斜拉桥索塔锚固段局部应力分析与试验研究[D].长沙:中南大学,2007.

[6] 万利军.斜拉桥索塔锚固区塔壁环向应力体系研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.

[7] 余浪.斜拉桥锚固区应力分析研究[D].成都:西南交通大学,2003.

[8] 龙琼,熊焱.曲线预应力的有限元模拟[J].森林工程,2003,23(4):70—72.

[9] 孙艳,马崇亮.预应力混凝土结构在 ANSYS 中的实现与比较[J].山西建筑,2010,36(6):52—53.

[10] 李律,钱济章,李敦.基于 ANSYS 的预应力筋数值模拟[J].公路工程,2007,32(4):177—183.

[11] 肖勇刚,黄炎,谢鹏.斜拉桥索塔锚固区节段足尺模型试验研究[J].中外公路,2012,32(5):154—159.

[12] 刘超,徐书缘,孙利军,等.斜拉桥索塔锚固区环向预应力布置形式研究[J].世界桥梁,2018,46(5):7—12.