

文章编号: 1002-0268 (2009) 11-0055-05

独柱塔自锚式悬索桥锚固横梁结构空间受力分析

李建慧¹, 李爱群¹, 李喜平², 袁辉辉¹

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 铁道第四勘察设计院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 南京江心洲大桥边跨主缆锚固大横梁设计独特, 结构受力非常复杂。为了获得锚固横梁局部应力的分布规律, 对其传力途径进行研究, 以通用有限元程序为计算平台, 采用空间索单元模拟横梁中配置的预应力束以及主缆束股, 三维块体元模拟混凝土锚固横梁, 应用二次开发技术, 建立精细三维有限元模型。在此基础上采用合理的加载模式对锚固横梁在空缆阶段和成桥状态 2 种不同工况进行应力计算与分析。结果表明: 在空缆与成桥 2 种状态下锚固横梁的应力值与分布规律变化较大; 为保证锚固横梁在施工过程中的受力状态处在合理的范围之内, 锚固横梁中配置的大量预应力束应配合主缆束股的内力变化而分批次张拉。

关键词: 桥梁工程; 自锚式悬索桥; 锚固横梁; 结构设计; 空间受力分析

中图分类号: U448.25; U443.38 **文献标识码:** A

Analysis of Spatial Load on Anchor Beam for Single Pylon Self-anchored Suspension Bridge

LI Jianhui¹, LI Aiqun¹, LI Xiping², YUAN Huihui¹

(1 Key Laboratory for Concrete and Prestressed Concrete Structures of Education Ministry,

Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096 China;

2 The 4th Survey and Design Institute of China Railways Wuhan Hubei 430063 China)

Abstract: Jiangxinzhou Bridge in Nanjing is a single-pylon spatial cable self-anchored suspension bridge, whose side span main cable anchorage beam design is unique and structural loading is complex. In order to get its partial stress value and distribution as well as its force transfer path, prestressing tendons and main cable was simulated by spatial cable element, concrete anchor beam was simulated by 3D block element, and a 3D refinement finite element model was established with secondary development technology based on the platform of general finite element program. On this basis, reasonable load pattern was used to its spatial structural analysis, by which its force transfer path and stress distribution under free cable construction stage and finished stage were obtained. The results show that (1) stress value and distribution change greatly between the two stages; (2) prestressing tendons of anchor beam should be tensioned by stages according to change of main cable internal force to ensure the mechanical state of anchor beam in a reasonable range in the construction process.

Key words: bridge engineering; self-anchored suspension bridge; anchor beam; structural design; space mechanical analysis

收稿日期: 2008-12-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (八六三计划) 资助项目 (2006AA04Z416); 国家杰出青年基金资助项目 (50725828)

作者简介: 李建慧 (1976-), 男, 山西洪洞人, 博士研究生, 从事大跨度桥梁结构分析及可靠度评估. (subway96@126.com)

0 引言

自锚式悬索桥不同于传统地锚式悬索桥之处是它不需要修建庞大的地锚,而是把主缆锚固在加劲梁上,从而降低了造价,也避开了在不良地质处修筑锚碇的技术难题,使得这种造型美观、结构新颖的桥型成为中小跨径内非常具有竞争力的桥型,近年来越来越受到设计者的关注和青睐^[1-4]。由于主缆直接锚固在加劲梁上,如何在合理的构造布置下将主缆的水平分力顺利地、均匀地传递到加劲梁上,同时保证主缆与加劲梁连接的强度、刚度和可靠性,保证局部稳定性,就成了自锚式悬索桥最为关键的技术之一^[7-11]。

南京江心洲大桥为主跨 248 m 的独柱塔空间缆索自锚式悬索桥,主梁为双幅、纵横梁结构体系,主缆在横桥向分为两股,在边跨位于竖直平面内,锚固于横梁中部,在主跨为空间索形,锚固于横梁两端。其边跨锚固横梁为框架受力,同时受弯、受剪和受扭,受力非常复杂,锚固构造设计独特,在主缆强大拉力下,锚下应力分布难以准确把握。本文首先介绍该桥锚固横梁结构设计的要点,并以大型通用有限元程序为平台,采用一定的建模策略和二次开发技术,建立精细化三维有限元模型,对锚固横梁在施工阶段及成桥状态的 2 种不同工况进行应力分析计算,获得锚固横梁局部应力的大小和分析规律,对其传力途径进行研究,为同类锚固结构设计和分析提供参考。

1 工程概况

南京江心洲大桥为独柱塔空间缆索自锚式悬索桥,孔跨布置为 (35+77+60+248+35) m。主桥边跨跨度为 137 m,在边跨设置一个辅助墩,将边跨跨度划分为 (77+60) m;主跨跨度为 248 m,边跨与主跨跨度比为 0.55。主梁分为两幅设置,净距为 8.2 m,两幅主梁之间以多道横梁连为一体,形成纵横梁体系。主跨主梁采用钢箱梁,边跨及锚跨主梁采用预应力混凝土箱梁。主塔在桥面以上塔高为 80 m,桥塔高跨比为 0.32。主塔位于两幅主梁的横桥向中间位置,为独柱型式。主塔在主梁下方设置一道横梁,对主梁提供竖向支承。在主塔横梁端部设置有一对斜拉索,该斜拉索穿过主梁锚固在主塔上。在设计成桥状态下,主跨主缆理论垂度为 19.670 m,矢跨比为 1:12.43;边跨主缆理论垂度为 8.402 m,矢跨比为 1:15.83。主缆在横桥向分为两股,在边跨位于竖直平面内,锚固于横梁中部;在主跨为空间索形,锚固于横梁两端。吊索在边跨位于竖直平面内,锚固于横梁

中部。南京江心洲大桥总体布置如图 1 所示。

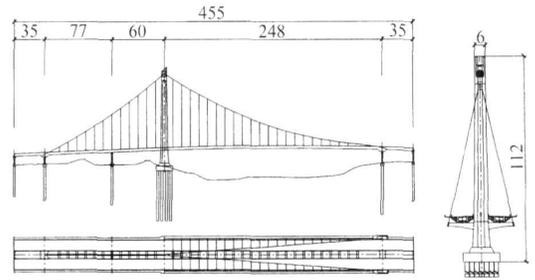


图 1 南京江心洲大桥总体布置图 (单位: m)

Fig 1 General layout of the Jiangxingzhou self-anchored suspension bridge (unit: m)

2 边跨锚固横梁设计

南京江心洲大桥主缆共 2 根,每根主缆中含 55 股平行钢丝索股。本桥边跨主缆为平行布置,采用散索套进行散索,锚固于横梁中部。边跨主缆锚固结构采用 C60 三向预应力混凝土的型式,锚固处设置一道高 4.965 m,厚 6 m 的实心矩形横梁,根据主缆索股分散锚固的需要开设槽口,并在主缆端部加厚以形成锚固面。边跨锚固横梁构造图如图 2 所示,图 3 为江心洲大桥施工中的边跨锚固横梁。

3 锚固横梁结构分析

3.1 空间有限元模型

国内外可用于复杂桥梁结构体系空间受力分析的专用软件较少,为了保证理论计算的客观性和准确性,以大型通用有限元 Ansys 程序为平台,采用二次开发程序对南京江心洲大桥锚固横梁进行空间受力分析。

3.1.1 建模策略

有限元结构模型是根据设计图纸构造的,常隐含理想化假定与简化。为使有限元分析预测的结构响应客观的反映实际结构行为,采用如下二次开发技术和建模策略。图 4 给出其参数化模型流程图。

(1) 采用块体元模拟混凝土主梁,根据刚度等效的原则,调整其弹性模量,来考虑普通钢筋对刚度的贡献。

(2) 预应力的模拟在大型通用有限元程序中是一个难点,合理客观的模拟预应力也是空间分析的关键。本文根据预应力筋的实际工作机理,采用“变形协调”的概念来合理模拟预应力效应。

(3) 精确建立实体和力筋(主缆及预应力束)空间几何位置,并分别划分单元,在相应节点将力筋单

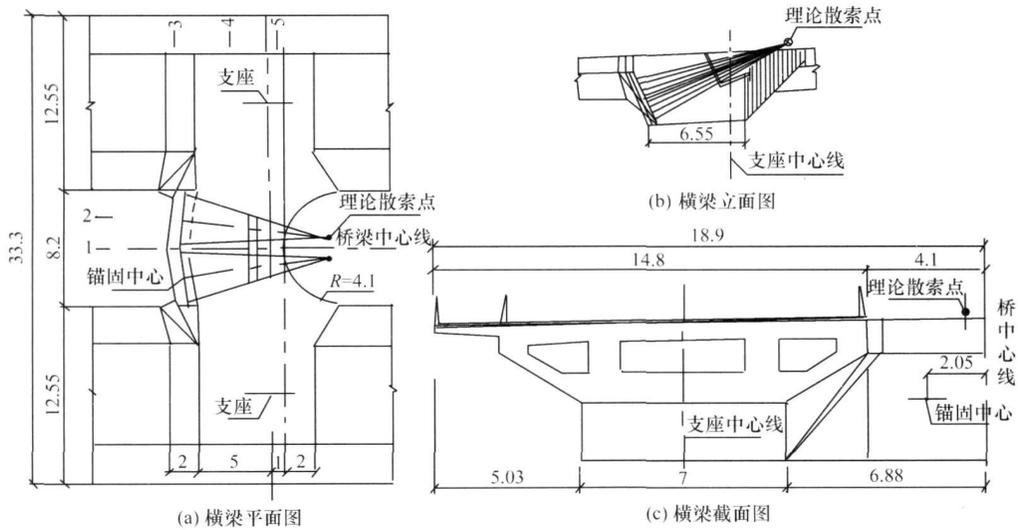


图 2 边跨锚固横梁构造图 (单位: m)

Fig 2 Layout Structure drawing of the side span anchor beam (unit : m)

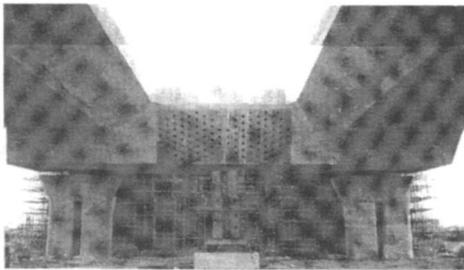


图 3 施工中的边跨锚固横梁

Fig 3 The side span anchor beam in construction

(5) 参照化建模, 根据实际工况, 施工相应荷载和约束边界条件。

3 1.2 精细化模型

基于上述建模策略, 对南京江心洲大桥锚固横梁进行参数化建模。主梁采用 SOLID 块体元模拟; 主缆束股及预应力束均采用 LINK 单元模拟。边跨锚固横梁局部有限元模型如图 5 所示, 共有单元 45 728 个, 节点 114 041 个。



图 5 锚固横梁有限元模型图

Fig 5 FEA model of the side span anchor beam

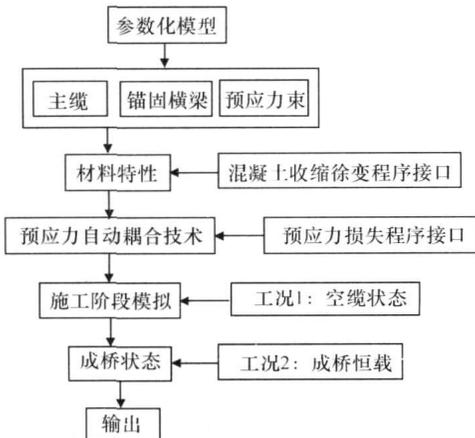


图 4 建模策略流程图

Fig 4 Flow chart of modeling strategy

元和实体单元进行耦合, 整个过程采用本文作者在文献 [12] 中二次开发的程序进行。

(4) 采用初应变模拟主缆的内力和预应力张力, 并结合桥梁规范编制预应力损失计算程序; 用温度来考虑混凝土的收缩徐变效应。

3 2 计算结果

自锚式悬索桥的结构特点决定了其先梁后索的施工工序, 其成桥状态是通过吊索张拉体系转换实现的。南京江心洲大桥从空缆到成桥, 其主缆索体现出很强的几何非线性^[13-14], 主缆在锚固点处轴力有很大的变化, 因此, 选取空缆和成桥状态 2 种工况, 进行锚固横梁的空间受力分析。

3 2.1 工况 1

南京江心洲大桥在空缆状态下, 单根主缆在边跨锚固点竖向分力 2 565 kN; 水平分力 5 615 kN; 主缆

与边跨锚固横梁的水平夹角为 24.274° 。图6、7为工况1作用下截面1~5正应力分面图，表1为其应力图标识别列表，截面位置见图2所示。

表1 工况1应力图标识别列表 (单位: MPa)

Tab 1 Labels for stress distribution in case 1 (unit: MPa)

标识	A	B	C	D	E	F	G	H	I
截面1	21.7	19.4	17.4	14.8	12.4	10.1	7.77	5.44	3.11
截面2	31.8	28.3	24.8	21.4	17.9	14.4	10.9	7.42	3.94
截面3	5.45	4.62	3.80	2.97	2.15	1.32	0.50	0.32	-
截面4	9.65	8.27	6.90	5.53	4.15	2.78	1.40	0.03	-
截面5	7.33	5.58	3.83	2.07	0.32	-	-	-	-

注: 负号为压应力。

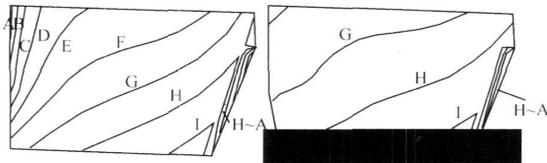


图6 工况1时的1~2截面正应力分布图

Fig 6 Positive stress distribution from 1st section to 2nd section in case 1

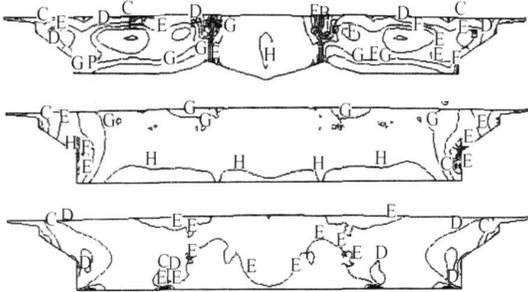


图7 工况1时的3~5截面正应力分布图

Fig 7 Positive stress distribution from 3rd section to 5th section in case 1

3.2.2 工况2

南京江心洲大桥在成桥恒载作用下，单根主缆在边跨锚固点竖向分力为20864 kN；水平分力为51172 kN；主缆与边跨锚固横梁的水平夹角为 22.500° 。图8、9为工况2作用下截面1~5正应力分面图，表2为其应力图标识别列表，截面位置如图2所示。

表2 工况2应力图标识别列表 (单位: MPa)

Tab. 2 Labels for stress distribution in case 2 (unit: MPa)

标识	A	B	C	D	E	F	G	H	I
截面1	27.2	24.5	21.9	19.3	16.7	14.0	11.4	8.78	6.15
截面2	42.6	38.2	33.9	29.5	25.1	20.8	16.4	12.1	7.72
截面3	8.84	7.47	6.11	4.75	3.39	2.03	0.67	-	-
截面4	10.9	9.38	7.83	6.28	4.73	3.18	1.63	0.08	-
截面5	8.19	6.50	4.81	3.11	1.42	0.27	-	-	-

注: 负号为压应力。

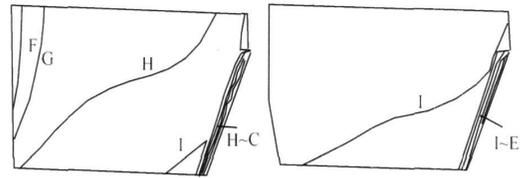


图8 工况2时的1~2截面正应力分布图

Fig 8 Positive stress distribution from 1st section to 2nd section in case 2

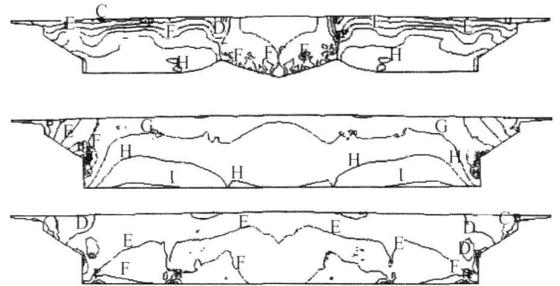


图9 工况2时的3~5截面正应力分布图

Fig 9 Positive stress distribution from 3rd section to 5th section in case 2

4 结语

基于客观的基准空间有限元模型和在此基础上对江心洲大桥锚固横梁所做的空间受力分析，获得锚固横梁在施工阶段及成桥状态下的应力分布状态，主要结论如下：

- (1) 主缆锚固系统的合理选择和设计是自锚式悬索桥最为关键的技术之一，要准确合理的把握其受力状态和传力体系，必须采用空间有限元程序，考虑空间效应。设计时应力求其构造简单，传力体系明确。
- (2) 在整个施工过程中，混凝土锚固横梁的受力复杂且状态变化较大，结构设计时根据成桥结构受力需要而配置了大量的预应力束，为保证施工过程中横梁的结构安全，应根据吊索张拉方案，针对主缆产生的竖向分力，分批张拉相应的预应力束。
- (3) 自锚式悬索桥在成桥状态强大主缆水平分力作用下，主梁会产生压缩。如江心洲大桥在主、边跨锚固横梁处分别产生4.5 cm和9.2 cm轴向位移，施工时应对锚固横梁设置相应的预偏量。

参考文献:

References:

[1] OCHSENDORF J A, BILLINGTON D P. Self-anchored Suspension Bridges [J] . Journal of Bridge Engineering ASCE, 1999, 4 (3): 151-155.

- [2] 张元凯, 肖汝城, 金成棣. 自锚式悬索桥的设计 [J] . 桥梁建设, 2002 (5): 30—32
ZHANG Yuankai, XIAO Rucheng, JIN Chengdi Design of Self-anchored Suspension Bridge [J] . Bridge Construction, 2002 (5): 30—32
- [3] KIM C Y, LEE M J, CHANG S P. Non-linear Shape-finding Analysis of a Self-anchored Suspension Bridge [J] . Engineering Structures, 2002 (24): 1547—1559.
- [4] 周永涛, 李毅谦, 涂金平, 等. 天津富民桥主缆设计与计算 [J] . 公路, 2006 (12): 1—4
ZHOU Yongtao, LI Yiqian, TU Jinping, et al Main Cable Design and Computing of Tianjin Fumin Haihe Bridge [J] . Highway, 2006 (12): 1—4
- [5] 胡建华, 陈冠雄, 向建军, 等. 平胜大桥设计构思与创新技术 [J] . 桥梁建设, 2006 (2): 28—31
HU Jianhua, CHEN Guanxiang, XIANG Jianjun, et al Design Considerations and Innovative Techniques of Pingsheng Bridge [J] . Bridge Construction, 2006 (2): 28—31
- [6] 贾界峰, 涂金平, 周咏涛, 等. 空间索面自锚式悬索桥主鞍鞍计算方法 [J] . 桥梁建设, 2007, 3 (5): 38—41
JIA Jiefeng, TU Jinping, ZHOU Yongtao, et al Calculation Methods for Main Cable Saddles of Spatial Cable Plane Self-anchored Suspension Bridge [J] . Bridge Construction, 2007, 3 (5): 38—41
- [7] GIL H, CHOI Y. Cable Erection Test at Splay Band for Spatial Suspension Bridge [J] . Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2002, 7 (5): 300—307.
- [8] SUN J, MANZANAREZ R, NADER M. Design of Looping Anchorage System for New San Francisco-Oakland Bay Bridge Main Suspension Span [J] . Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2002, 7 (6): 315—324
- [9] 邵旭东, 邓军, 李立峰, 等. 自锚式悬索桥主缆锚固结构研究 [J] . 土木工程学报, 2006, 39 (7): 81—87.
SHAO Xudong, DENG Jun, LI Lifeng, et al Cable Anchorage Structure of Self-anchored Suspension Bridge [J] . China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (7): 81—87.
- [10] 邱文亮, 张哲. 自锚式悬索桥施工中的非线性误差调整研究 [J] . 公路交通科技, 2005, 22 (6): 72—74
QIU Wengliang, ZHANG Zhe Study on Nonlinear Error Adjustment of Self-anchored Suspension Bridge in Construction [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (6): 72—74
- [11] 楼庄鸿. 自锚式悬索桥 [J] . 中外公路, 2002, 22 (3): 49—51.
LOU Zhuanghong. Self-anchored Suspension Bridges [J] . Journal of China & Foreign Highway, 2002, 22 (3): 49—51.
- [12] 李建慧, 李爱群, 罗世东, 等. 广珠城际西江特大桥主桥空间受力分析研究 [J] . 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39 (1): 96—100
LI Jianhui, LI Aiqun, LUO Shidong, et al 3-Dimensional Finite Element Analysis of Xijiang River Bridge on Guangzhou-Zhuhai Intercity Rapid Rail Transit [J] . Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39 (1): 96—100
- [13] 李建慧, 李爱群, 袁辉辉, 等. 空间缆索自锚式悬索桥主鞍座结构设计与分析 [J] . 公路交通科技, 2009, 26 (8), 73—76
LI Jianhui, LI Aiqun, YUANG Huihui, et al Design and Analysis of Main Saddle Structure for Self-anchored Suspension Bridge with Spatial Cables [J] . Journal of Highway and Transportation, 2009, 26 (8), 73—76

《公路交通科技》2010 年征订启事

《公路交通科技》杂志创刊于 1984 年, 为中华人民共和国交通部主管、交通部公路科学研究院主办的中央一级学术性期刊, 国内外公开发行, 大 16 开本, 为全国中文核心期刊。本刊主要刊登公路交通运输及其相关、相邻学科的学术论文, 主要栏目有: 道路工程、桥梁工程、智能运输系统与交通工程、汽车工程、环境工程以及运输经济等。本刊的读者对象为各大专院校的师生, 从事公路交通运输的科研人员、工程技术人员及管理人员。

国内邮发代号: 2—480 每册定价 12 元, 全年 12 期共计 144 元。

读者也可通过邮局或银行汇款至编辑部直接订阅。

地址: 北京市海淀区西土城路 8 号 收款单位: 《公路交通科技》编辑部 邮编: 100088

开户行: 工商银行北京北太平庄支行 户名: 交通部公路科学研究所 帐号: 0200010009014418686

电话: (010) 62079198 转 804 传真: 010—62058207 电子信箱: editor@rioh.cn 联系人: 杨老师