

文章编号: 0451-0712(2005)09-0016-04

中图分类号: U448.271

文献标识码: B

单排索单索面部分斜拉桥受力分析

刘世忠

(兰州交通大学土木工程学院 兰州市 730070)

摘 要: 通过对国内首次采用环氧全涂平行钢绞线斜拉索的同安银湖部分斜拉桥多工况三维可视化模拟分析、鞍座局部三维有限元分析以及成桥状态三维有限元分析,掌握了该桥结构的受力特点及其环氧全涂平行钢绞线斜拉索的工作性能。所得结论对同类工程具有参考价值。

关键词: 部分斜拉桥; 环氧全涂钢绞线; 模拟分析

预应力混凝土部分斜拉桥又称预应力混凝土矮塔斜拉桥,为国内外新兴的一种桥型。它的结构特点是:塔矮、梁刚、斜拉索集中布置,主梁分为有索区和无索区;力的分配特点是:斜拉索仅仅部分地承担荷载,还有相当部分的荷载由梁的受弯、受剪能力来承担。总体而言,连续梁是以梁的直接受弯、受剪来承受竖向荷载,斜拉桥则是以梁的受压、受弯和索的受拉在桥塔上汇交转换为桥塔、墩的受压来承受竖向荷载的,而部分斜拉桥是以梁的受弯、受压和受剪以及索的受拉共同承担竖向荷载,因此 3 者最大的差别在于梁的受力行为不同,研究部分斜拉桥主梁的受力行为是这种桥型研究的本质。

从结构特点上分析,部分斜拉桥是介于连续梁与斜拉桥之间的一种新桥型,如果称连续梁为刚性梁桥型,斜拉桥为柔性梁桥型,部分斜拉桥则为刚柔相济的桥型。根据部分斜拉桥主梁受弯、受剪和拉索受拉共同承受竖向荷载的特点,可以理解为部分斜拉桥的索对主梁起体外预应力的加劲作用,超过梁体承载力部分的荷载效应由拉索来承担,因此可人为限制二者的分配比例。当梁体较刚承载力较大时,可减少斜拉索弱化其作用;反之,当梁体较柔,承载力较小时,可适当增加斜拉索以强化其作用^[1,2]。从连续梁、斜拉桥到部分斜拉桥,其发展过程类似于混凝土结构从普通钢筋混凝土、预应力混凝土到部分预应力混凝土结构的历程,部分预应力混凝土的出现,填补了普通钢筋混凝土结构与全预应力混凝土

结构之间的空白;同样,部分斜拉桥的发展,必将填补刚性梁桥型与柔性梁桥型之间的空白,为桥梁事业的发展提供更为广阔的发展空间。

1 结构有限元模型的建立

1.1 结构设计特点及全桥三维有限元模型的建立

同安银湖大桥主跨为 80 m+80 m 的预应力混凝土独塔单索面单排索部分斜拉桥,采用塔梁墩固结的结构形式,两侧引桥分别为 32 m 简支梁和 4×32 m 连续梁,引桥通过牛腿与主跨连接。

主梁采用单箱三室大悬臂截面,中支点处梁高为 3.8 m,边支点处梁高为 2.4 m,梁高按二次抛物线变化。箱梁顶宽 27 m,翼板悬臂长 4.5 m,箱梁底宽 16.24~17.0 m,中室净宽 1.8 m,斜拉索锚固在中室。主梁设三向预应力束,纵向预应力束为高强精轧螺纹钢和钢绞线两种,竖向预应力束为高强精轧螺纹钢,横向预应力束为钢绞线,布置在顶板和横隔板内,横隔板仅在拉索锚固断面和端支点处设置。全桥双向四车道,设计行车速度为 60 km/h,两侧 2×2.5 m 人行道。主塔为实心钢筋混凝土结构,截面尺寸为 2 m×3.5 m,桥面以上塔高为 30.25 m,斜拉索为竖琴式单排索单索面,位于中央分隔带上,塔上索距为 1.54~1.57 m,梁上索距为 4.0 m。斜拉索采用 1 860 MPa 环氧全涂平行钢绞线,共 10 根, C1~C2 每束为 55 根 $\phi 15.24$ 钢绞线, C6~C10 每束为 43 根 $\phi 15.24$ 钢绞线。斜拉索在塔顶连续通过索

基金项目:兰州交通大学“青蓝”基金,国家自然科学基金(503780436)

收稿日期:2005-04-01

鞍,两侧对称锚固于梁体上。

根据桥梁结构的实际情况,主梁(单箱三室箱梁)、横隔板用 ANSYS 三维板壳单元 shell63 模拟;墩及主塔采用三维实体单元 solid45、索用三维杆单元 link8 模拟,可精确地模拟结构的物理力学特性。

应注意三维实体单元仅有 3 个自由度,而三维板单元为 6 个自由度,故板单元与实体单元连接处应考虑自由度的耦合。全桥三维有限元模型如图 1 所示。利用该模型进行施工过程三维仿真分析,已经安装的单元将其激活,而尚未安装的单元为死单元。

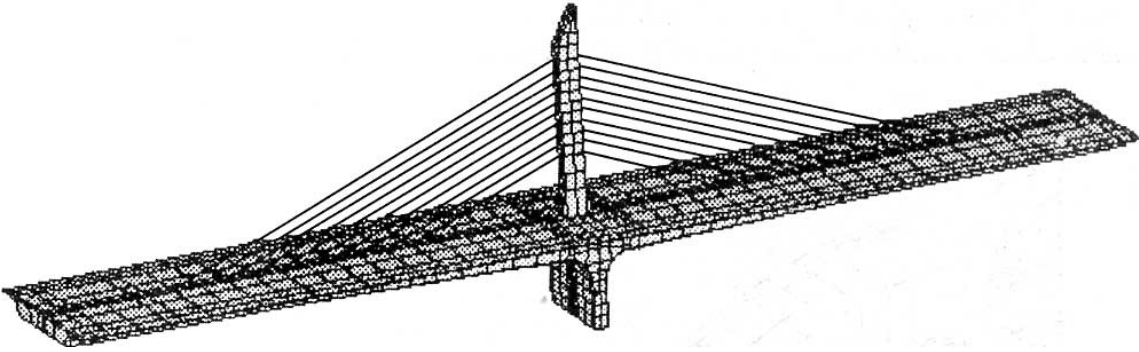


图 1 全桥三维有限元模型

1.2 银湖大桥斜拉索体系

全桥斜拉索采用韩国进口环氧全涂钢绞线和 VSL SSI 2000 体系锚具组组件,夹片为瑞士生产 V6CN 型 VSL 专用工作夹片。每束钢绞线设 4 层防腐,如图 2 所示。4 层防护体系为:(1)环氧涂层;(2)钢绞线防腐油脂;(3)热挤压黑色 PE 管;(4)白色 PE 外套。白色 PE 外套全桥直径相同以利于美观、整洁,位于索鞍处的钢绞线为裸索,仅留有环氧涂层,待施工完毕后,在鞍座钢管内灌注高强环氧砂浆封闭保护。斜拉索锚具对应不同根数的斜拉索而采用 DR6-55 和 DR6-43 VSL 锚具。斜拉索由梁体锚固段、自由端和主塔索鞍等组成。梁体锚固段由锚板、夹片、螺母、支撑筒、密闭装置、承压板、预埋管、减振器和防松装置等组成。自由端由带 HDPE 护套的环氧全涂钢绞线、索夹及外护套防护白色 HDPE 组成。索鞍段由鞍座内外钢管、锚固座、减振器、防护罩以及内灌环氧砂浆组成。对于这种新材料及其锚固组件在使用前进行了多项力学性能试验。

银湖大桥平行钢绞线拉索体系的一个突出特点是在施工现场将钢绞线逐根穿挂、张拉来完成制索。平行钢绞线通过技术人员的研究实践,总结出了单根张拉一次到位的成套张拉控制技术,使单根钢绞线拉力误差控制在 1% 以内。整根 55-7 ϕ 5 和 43- ϕ 5 斜拉索的拉力与设计安装索力的误差控制在 3% 以内,而且成桥后不再进行二次调索。开创了环氧全涂 PE 防护单根张拉平行钢绞线用于斜拉桥拉索的先河。主桥合拢后索力实测值和理论值如表 1。

同安银湖大桥于 2001 年 11 月 16 日正式开工建设,经过参战各方的共同努力,特别是斜拉索单根张拉一次到位控制技术成功应用,桥梁于 2002 年 9 月 9 日竣工通车,比合同工期提前近 3 个月。通车前对斜拉索索力的测试与静动载试验的结果表明,斜拉索实测索力与理论计算值吻合良好。

1.3 索鞍局部结构有限元模型

应用 ANSYS 大型分析软件,对该桥桥塔部分进行三维有限元分析。该模型首先建立一个由多个四边形组成的一组面,然后顺孔方向拖拉成体,最后做中间切割,形成 1/4 模型;尔后做反射形成几何模型主要部分,要稍加修整,形成整体几何模型。进行上述操作以后,就可以用影射网格,剖分单元,合并结点、关键点,形成最终的有限元模型。该模型包含 7 000 个单元、9 989 个结点,ANSYS 单元自动剖分中间没有出现坏单元,说明模型建立恰当合理。桥塔有限元模型及其中一孔局部剖面如图 3 所示。

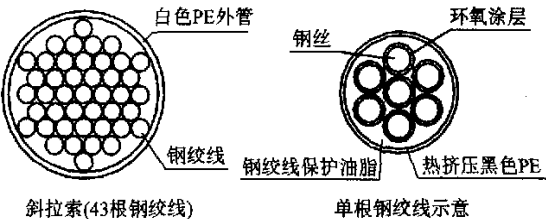


图 2 斜拉索防腐示意

表 1 主桥合拢后索力实测值和理论值

索号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
理论值	5 725	5 864	5 866	5 965	5 597	5 114	4 978	4 884	4 737	4 520
实测值	5 758.9	6 000.3	5 836.0	5 994.4	5 571.3	5 072.9	4 996.6	4 847.9	4 657.5	4 380.4
误差	0.59%	2.32%	-0.51%	0.49%	-0.46%	-0.80%	0.37%	-0.74%	-1.68%	-3.09%
索号	C1'	C2'	C3'	C4'	C5'	C6'	C7'	C8'	C9'	C10'
理论值	5 681	5 822	5 823	5 922	5 566	5 084	4 948	4 854	4 707	4 491
实测值	5 674.7	5 959.8	5 821.3	6 008.7	5 527.4	5 233.8	4 993.5	4 865.0	4 627.4	4 357.9
误差	-0.11%	2.37%	-0.03%	1.46%	-0.69%	2.95%	0.92%	-0.23%	-1.69%	-2.96%

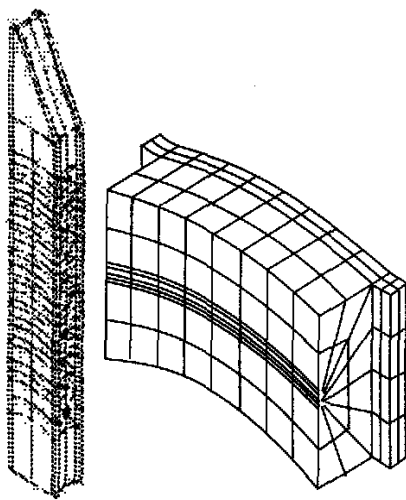


图 3 桥塔整体有限元模型及其局部大样

在进行有限元分析加载时,首先要确定主塔鞍座圆弧外管内侧法向压力 q ,该法向力由主塔两侧拉索索力作用于内管,通过内管作用于外管内侧,并由此传向混凝土。先做平面分析,取一微元体,该微元体法向力为 $q \cdot ds$,其相应竖向分量为 $q \cdot ds \cdot \cos\theta$,对整个索孔圆弧法向力竖向分量求和,可得:

$$\int_{-\alpha_1}^{\alpha_2} \cos\theta \cdot q \cdot R \cdot d\theta = F(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2)$$

从而得: $F = q \cdot R \Rightarrow q = F/R$

在外管径向,荷载一般按二次抛物线分布,如图 4 所示。

基于上述理论分析,首先进行施工阶段仿真分析,求得施工阶段最大索力,然后进行汽车—超 20 级加载,求得活载作用下各索力极大值,并按规范要求组合,最终确定三维实体分析所需拉索索力,在索鞍的对应节点上按比例施加,如图 4;荷载工况为:自重+桥面二期恒载+汽车—20 级设计荷载。

计算结果:

限于篇幅,仅列出 2 号索孔第 3 主应力,2 号索孔端部下缘出现了 26.7 MPa 的主压应力,应力变化

万方数据

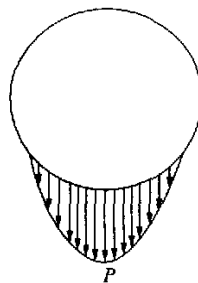


图 4 孔内径向荷载

比较迅速。中间部位应力变化比较平缓,这是由于从端部的二维应力状态向三维应力状态变化时圣维南效应所致;由于是三维应力状态,不会造成严重后果,但应在施工中严格控制索力,使其尽可能减少施工索力的正偏差。

桥塔部分最大主拉应力为 2.75 MPa,发生在 10 号索索孔边缘;最大主压应力为 26.7 MPa,发生在 2 号索索孔边缘处。索孔端部出现了高压应力区和高拉应力区。随着部分斜拉桥跨径的增大,索力也将随之上升,因而有必要在索孔端部做一定的技术处理或结构优化,这样部分斜拉桥的优势将会得到更好的发挥。索鞍局部结构有限元分析结果如下。

(1) 桥塔最大主拉应力出现在 10 号索孔边缘,为 2.75 MPa,虽然已超出设计允许的范围,但由于处于三维应力状态向二维应力状态的变化部位,混凝土抗拉强度有所提高,不致造成混凝土的开裂。

(2) 桥塔最大主压应力为 26.7 MPa,出现在 2 号索孔端部。建议在索孔端部镶一钢板,以增强混凝土的端部约束,使此处混凝土始终处于三向受力状态下工作,从而提高其工作强度,并减小索孔端部的混凝土主拉应力值,增强索鞍结构的承载能力。

1.4 塔梁墩固结局部三维有限元模型

塔梁墩固结局部三维有限元分析主要研究塔梁墩固结处及部分主梁的应力分布,尤其是主梁顶板及底板上的剪力滞效应,所以只取了塔的一部分。该有限元模型对所关注部分做了详细的三维模拟,共

包含23 552个节点,12 558个单元。有限元模型如图5所示。本桥结构计算参数为:C50混凝土,弹性模量 $E=3.5 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.1667$ 。所用单元是ANSYS中的SOLID95单元,该单元包含20个节点,每个节点有个3自由度。可进行缩减积分。

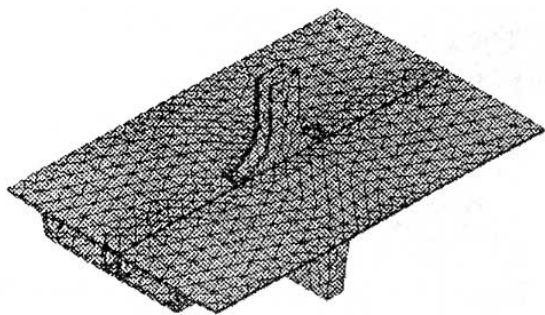


图5 塔梁墩固结局部有限元模型

首先对施工过程进行三维有限元模拟获得塔上及图5梁端荷载,然后根据三维实体单元特点施加在节点上进行计算,并与现场实测值进行对比。

在分析过程中发现局部出现了2.7 MPa的主拉应力,这是由于局部应力引起的,不会影响到结构的安全度。

塔梁墩固结处应力分布比较复杂,但分布模式是有规律可循的,除结构形式外,它伴随着外荷载及约束条件的变化而变化。

塔梁墩固结处局部有限元分析结果表明,结构能够在正常条件下工作,理论应力与实测应力吻合较好,变化规律一致,工作应力符合规范要求。

1.5 施工过程高程应力控制

部分斜拉桥施工中的监控过程实质上是一个信息的采集、处理、反馈的控制过程。实时测量体系和现场测试体系是施工过程监控系统信息的采集系统。在信息采集之后,按照控制理论对施工信息进行分析处理,对施工过程中的施工误差进行评价分析,并根据情况提出控制的目标量以及调整、修正的对策,反馈给施工单位指导下阶段施工,从而完成控制的工作。

在银湖大桥施工中,我们以标高控制为主,兼顾控制拉索索力与梁体应力。主梁线型得到了有效控制,合拢时标高最大误差仅7 mm。在监控过程中温度对结构的内力和变形的影响是极为复杂的。施工阶段,日照温差对斜拉桥主梁挠度和塔柱水平位移的影响尤为明显。温度变化在一定程度上将影响结

构变形观测的真实性。我们通过考虑温度效应的多工况理论计算与实际控制的效果对比分析,得出了如下两点认识。

(1)斜拉桥整个结构均匀升温或降温时,温度变化对主梁挠度的影响较小。这是因为混凝土和钢的线膨胀系数相近,梁、塔索在相同的温度变化下所产生的变形是吻合的。因此施工控制可不考虑季节温差对主梁线型的影响。我们运用此理论进行主梁施工控制并成功合拢即是证明。

(2)日照温差对主梁挠度的影响要比季节温差的影响大得多(在最大悬臂状态我们曾观测到同一天悬臂端日出与14:00~15:00左右高程差竟达4 cm)。日照温差一般可采用在一天中日照温差影响最小的时候(即凌晨~日出之前),进行测量和控制抛高量来消除这种影响。

2 结语

为适应海洋性气候对斜拉索防腐性能的特殊要求,在国内首次选用了4层防腐环氧全涂钢绞线索;为证实这一新材料的防腐性能,专门进行了加速盐雾防腐性能试验,斜拉索及锚固组件的强度、疲劳性能等多项专项试验。结果表明,其抗腐蚀性明显优于以往使用的镀锌钢绞线,多组静载锚固效率和疲劳性能试验结果的各项指标均满足规范要求。且由于其强度高于镀锌钢绞线而使材料用量少,索截面较小以利美观。同时为了简化施工,采用单根张拉一次就位技术,总结出一套严格控制单根索力张拉的张拉方法,大幅度简化了施工工艺,使此桥工期得以提前。实时跟踪监控系统的测试结果表明,单根索力张拉误差小于1%,整束索力误差小于3%。单根张拉一次就位这一新技术,成功地克服了以往整体张拉斜拉索受箱梁内空间限制,整体张拉设备笨重,劳动强度大等缺陷,也为斜拉索的更换提供了一种新途径。

参考文献:

- [1] 陈亨锦,等. 浅谈部分斜拉桥[J]. 桥梁建设,2002,(2).
- [2] 严国敏. 试谈“部分斜拉桥”[J]. 国外桥梁,1996,(1).
- [3] 吴鸿庆,任侠. 结构有限元分析[M]. 北京:中国铁道出版社,2000.
- [4] 谭建国. 使用ANSYS6.0有限元分析[M]. 北京:北京大学出版社,2002.
- [5] JTJ023-85,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

文章编号: 0451-0712(2005)09-0020-03

中图分类号: U448.225.72

文献标识码: B

绍兴斗门大桥刚架拱桥加固

赵时建¹, 李大为²

(1. 绍兴县中源设计咨询有限公司 绍兴市 312000; 2. 绍兴市交通设计院 绍兴市 312000)

摘 要: 对 20 世纪 80 年代修建的载重为汽车—15 级的多跨刚架拱的加固工程做扼要介绍。事实证明加固工程实用、经济, 通行重型车辆, 安全、平稳。

关键词: 刚架拱桥; 加固

绍兴市 5 县市在 20 世纪 80 年代, 曾修建混凝土刚架拱桥 100 余座, 绝大部分在县乡公路、机耕路、专用公路上, 少数在国、省道上。这类桥梁损坏较多, 损坏程度轻重不一。为了满足交通量日益增长的需要, 绍兴斗门大桥进行了加固改建。

斗门大桥建于 1982 年, 为 1 孔跨径 $L_0 = 40$ m, 另

1 孔跨径 $L_0 = 38$ m 的双孔刚架拱桥, 全长 90.6 m, 3 片拱肋腿部插入拱座未做固结。桥宽为 $6\text{ m} + 2 \times 0.2\text{ m}$, 设计荷载为汽车—15 级。2 孔矢跨比分别为 $1/8.7$ 和 $1/8.64$, 浆砌块石墩台置于基岩上。

肋间横向搁置预制微弯板, 其上现浇混凝土, 全桥立面见图 1 所示。

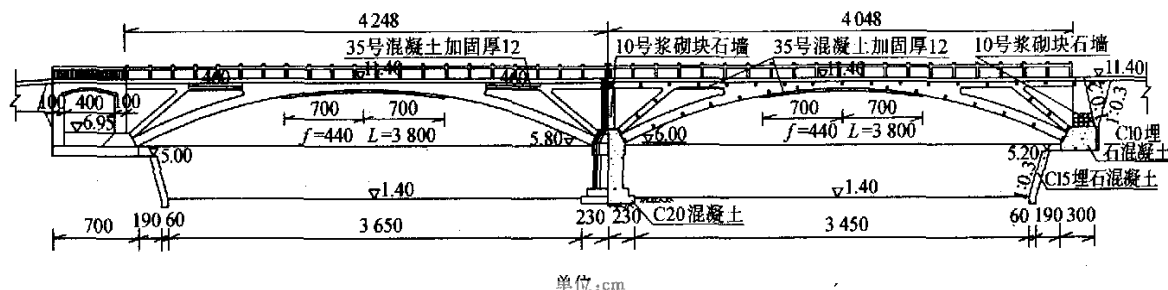


图 1 斗门大桥立面

收稿日期: 2005-03-17

Mechanics Analysis of Partially Cable-Stayed Bridge with Single Plane Cable and Single Pylon

LIU Shi-zhong

(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The epoxy coating parallel cable steel strand is first used on Yinhu Bridge in Tongan of China, which is a partially cable-stayed bridge with single pylon and single-plane cable. The structural mechanics characteristics and the behavior of the epoxy coating cable steel stand are understudied by using visualization simulate analysis on many load conditions. The stress distribution of the tower saddle is studied with the finite solid element method, the results have practical significance for the design and construction of same kinds of bridge.

Key words: partially cable-stayed bridge; epoxy coating cable steel strand; simulate analysis