

东海大桥Ⅶ标主桥斜拉桥的施工控制

章曾焕¹, 卢永成¹, 艾伏平¹, 沈 洋¹, 刘国波²

(1. 上海市市政工程设计研究院 上海市 200092; 2. 路桥华东工程有限公司 上海市 200135)

摘 要: 东海大桥Ⅶ标主桥颗珠山大桥,是一座双塔双索面结合梁斜拉桥,通过对施工的精心控制及对各种因素的详细分析,大桥的线形和索力符合设计要求,合拢精度达到了 $\pm 1\text{ mm}$ 的水平。

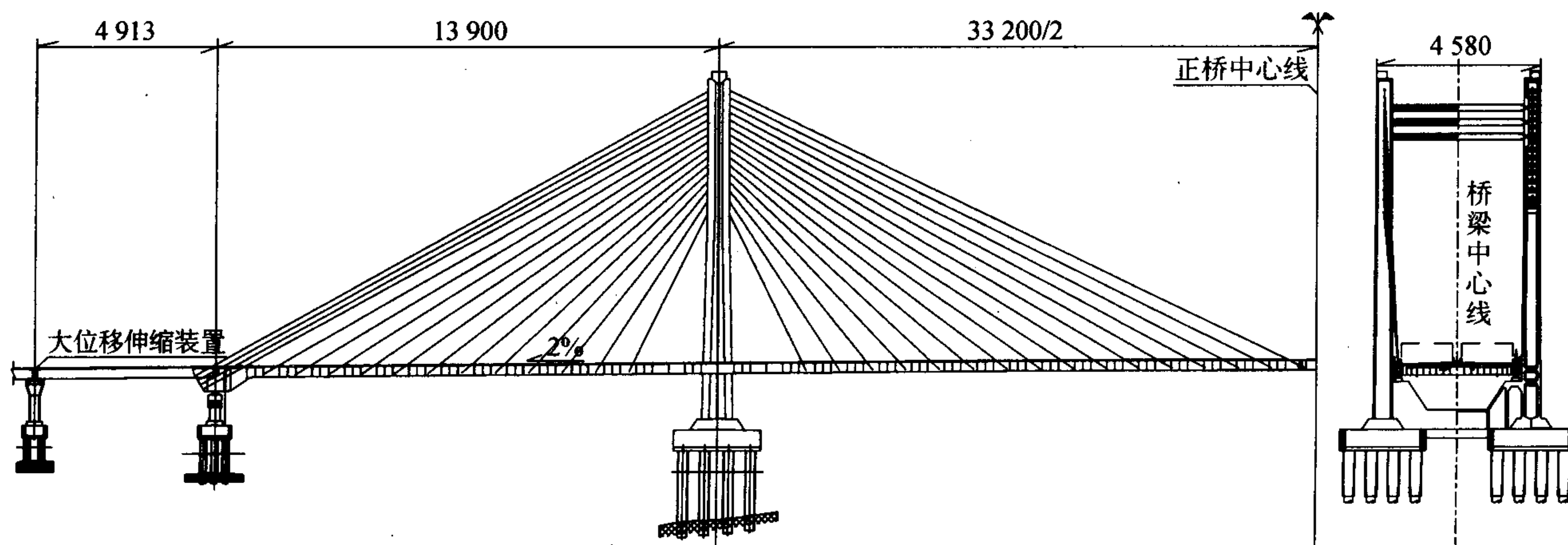
关键词: 东海大桥; 颗珠山大桥; 施工控制; 温度; 温差; 斜拉索

1 工程概述

东海大桥Ⅶ标主桥颗珠山大桥位于东海大桥港桥连接段,东接颗珠山岛,西连小城子山港区,距上海市南汇区芦潮港约 30 km,其主桥跨越最深处约为 40 m 的深槽。主桥的结构形式为双塔双索面结合梁斜拉桥,主跨跨径为 332 m,边跨长 139 m,斜拉桥全宽 35 m,不设辅助墩,过渡孔长 50 m。过渡孔单幅

宽 15.25 m,全宽 32 m,采用预应力混凝土简支箱梁结构。主桥布置见图 1 所示。

全桥按高速公路标准设计,双向六车道,设计行车速度为 80 km/h。设计荷载为汽车—超 20 级,挂车—120,并按全桥集装箱重车满布,车辆轴距为 10 m 进行计算复核。



单位:cm

图 1 主桥桥型布置

2 施工控制的方法和原则

斜拉桥是由塔、梁、索三大部分组成的空间复杂结构体系。在施工过程中,由于结构的多项参数、线型、索力与设计值有一定的差异,需要通过对施工进行控制,达到既要确保施工过程中的结构安全,又要保证成桥后的线型、索力和结构受力满足运营要求,并符合设计的期望值。

斜拉桥施工中,对于斜拉索的控制有“一次到位、不再调整”和“分次张拉、逐步到位”两种不同的

方法。“一次到位法”往往采用“倒拆法”确定索力,实践表明,采用“倒拆法”控制的斜拉桥,在监控条件较完备、主梁抗弯刚度较大和设有纵向预应力束、桥面系荷载比例很小和挂篮质量较轻时,其控制精度较高;“分次到位法”以主梁合拢为界,合拢前以主梁标高为准,主梁合拢后通过索力的调整形成合理的线形和大桥内力,比较适合于主梁刚度小、桥面质量大、挂篮质量大、主梁采用预制拼装等斜拉桥的施工控制。

颗珠山大桥主梁采用结合梁,钢梁部分采用预制拼装、桥面板采用预制加湿接缝的施工方法,综合考虑后决定采用“少次张拉、逐步到位”的施工控制方法,其实质是在满足主梁受力的情况下,一期恒载(钢主梁、桥面板)合拢之前线形按设计标高控制,后期调索的目标是调节二期恒载引起的结构变形,从而达到减少张拉次数的目的。

在主桥边跨、中跨合拢前(含合拢)施工控制实行以标高(线型)、索力、拉索引伸量“三控”,以标高(线型)控制为主。

斜拉桥合拢后,施工控制实行以标高、索力、拉索引伸量“三控”,以拉索索力控制为主。

3 施工控制和测量的项目及内容

根据同类工程的施工经验,主要从主塔变形及应力、主梁变形及应力、拉索应力三方面进行监测和控制,以确保整个施工过程处于可控状态。每节段主梁安装前后测量相邻5节段的主梁变形及应力和拉索应力。因此主要测试内容包括:变形测试、应力测试、温度测试等。

在边跨、中跨合拢时各进行一次24 h跟踪测量。

为避开日照温差对索力,尤其对变形所造成的影响,施工控制时,变形标高的量测时间应在日出前的0:00~4:00之间进行。

在和施工单位进行广泛交流后,对施工单位提出的施工流程进行了多次正装、倒拆分析计算,并考虑到施工工期等综合因素,优化了施工流程;在满足结构安全的情况下,确定了桥面板安装滞后钢主梁两个节段的主要施工步骤。考虑到叠合梁施工工序复杂、内容繁多,建立了双层有限元模型来模拟钢梁与桥面板的安装,对桥面板的龄期、斜拉索的张拉等,都进行了较准确地模拟。

根据颗珠山大桥主桥施工设计图,本桥施工过程以标准节段为例,循环框图见图2所示,施工流程见图3所示。

4 施工控制参数的优化与确定

斜拉桥实际施工过程十分复杂,影响参数较多。如:结构刚度、拉索张力、温度、施工荷载、混凝土的收缩徐变、梁段重量等。为消除因设计参数取值的不确切而引起的施工误差,在施工过程中需要对这些参数进行识别和预测,然后进行优化调整。

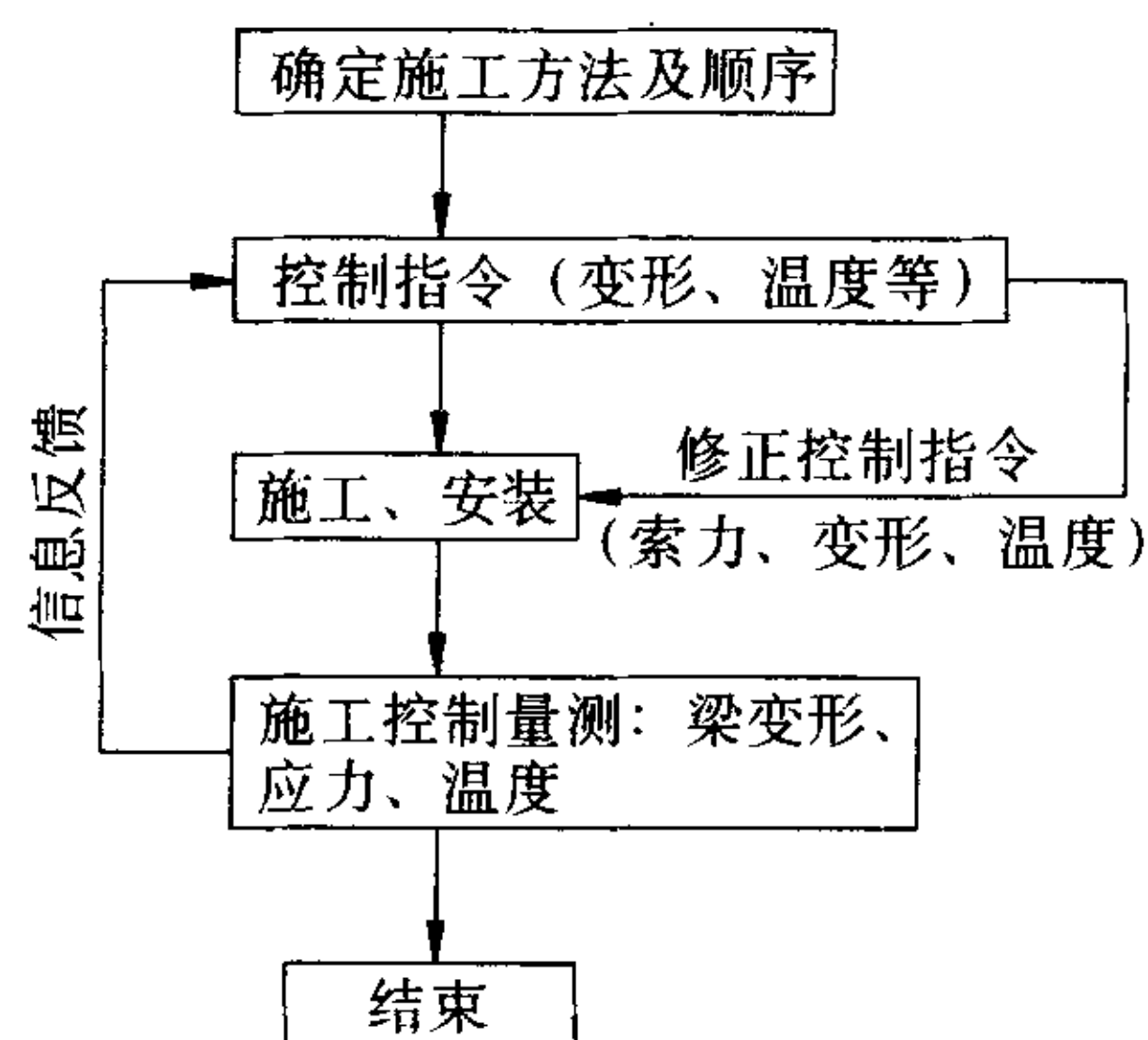


图2 标准节段循环

颗珠山大桥采用悬臂拼接的方法进行施工,悬臂刚开始时施工误差并不明显,设计参数可以不做调整和优化,但在实际的施工过程中发现结构刚度、节段重量是影响施工精度的主要因素。通过分析、并结合下一阶段的预测,优化了结构刚度(增加15%),调整了节段计算重量(增加5%),后续阶段桥梁的线形和索力比较理想。

5 其他施工控制参数的考虑

5.1 温度

温度变化,特别是日照温差的变化对于斜拉桥结构内力和变形的影响是复杂的。温度变化将在一定程度上影响结构变形实测值的真实性。

(1)当斜拉桥整体升温或降温时,温度变化对结构的影响较小。因此施工控制可以不考虑季节温差对结构的影响。

(2)日照温差对主梁挠度的影响要比季节温差影响大得多。随着主梁悬臂施工长度的增加,日照温差的影响愈加明显。但将日照温差结构变形从挠度实测值中分离出来是相当困难的。一般采用的方法是采用一天中日照温差对结构变形影响最小的时候(凌晨日出之前)进行测量。

5.2 非线性

影响斜拉桥施工控制的非线性因素主要有以下几点:

- (1)斜拉索自重作用下垂度引起的几何非线性;
- (2)主塔和主梁的梁柱效应($P-\delta$ 效应);
- (3)结构大位移效应。

在实际施工控制过程中发现,影响比较大的是(1)、(2)类的非线性,同时构件的初始内力对计算分析结果的影响也非常大。


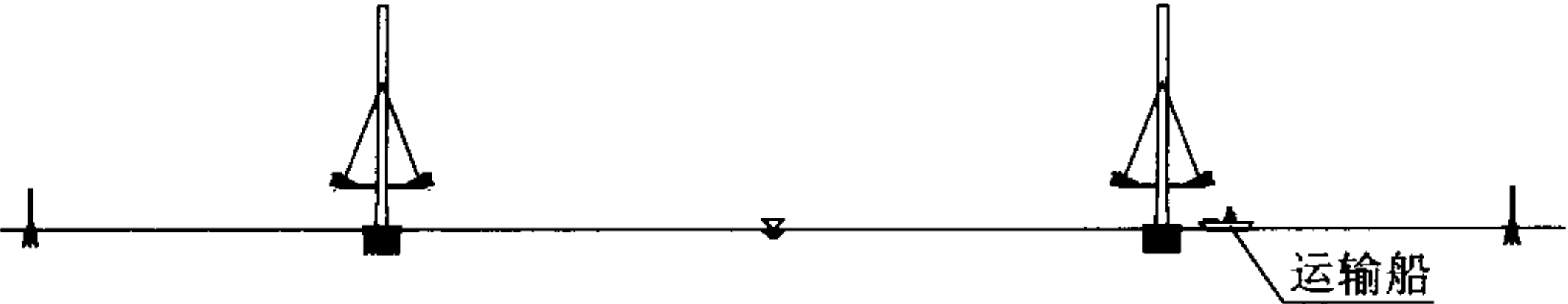
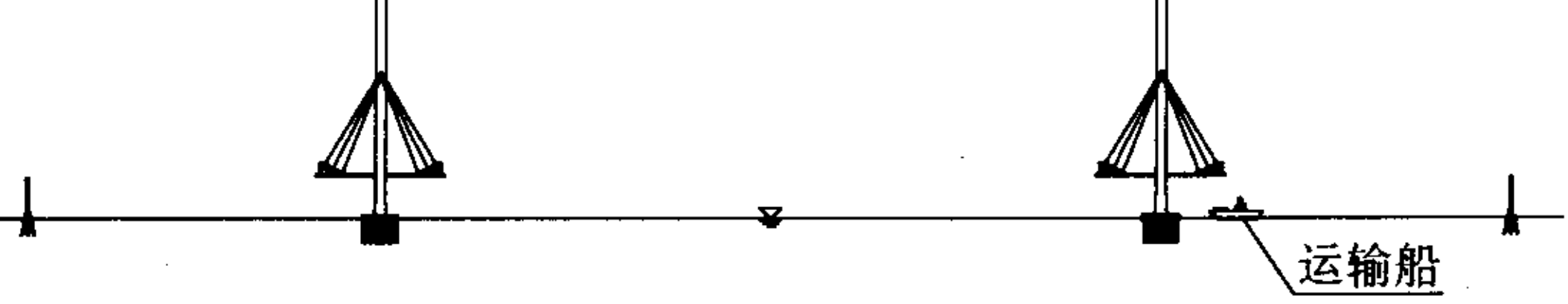
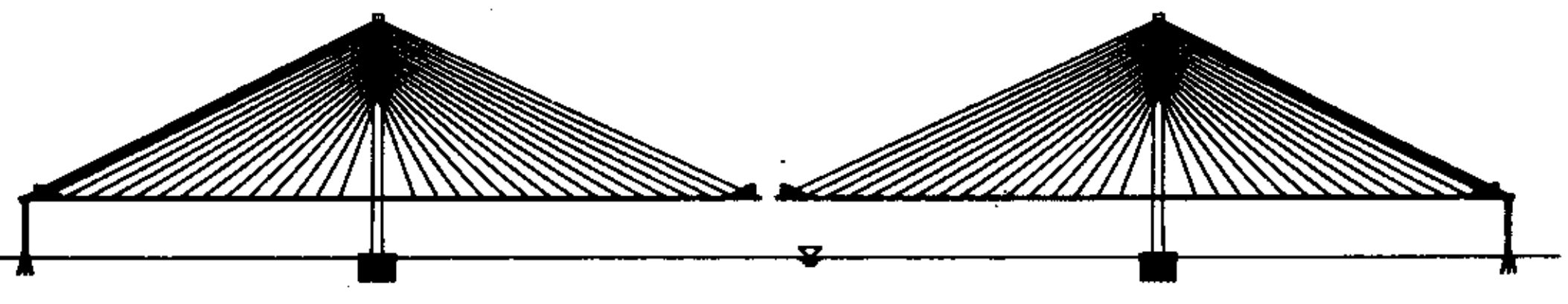
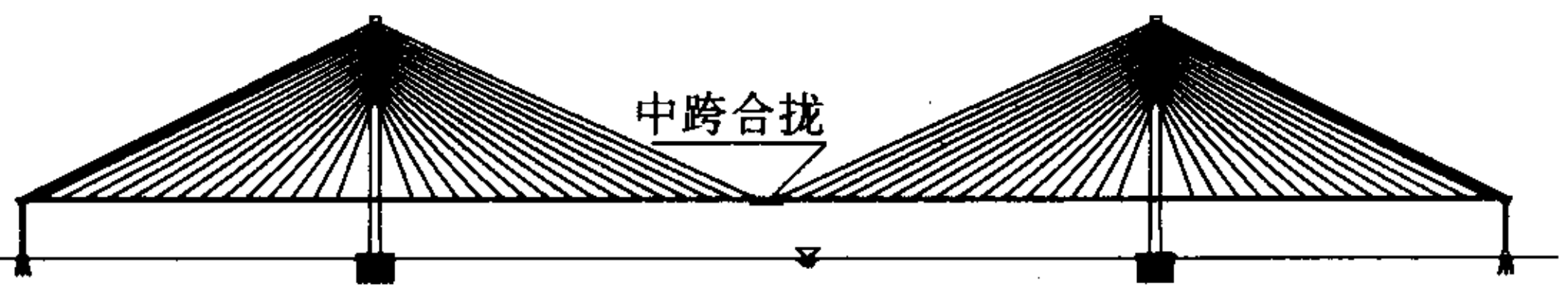
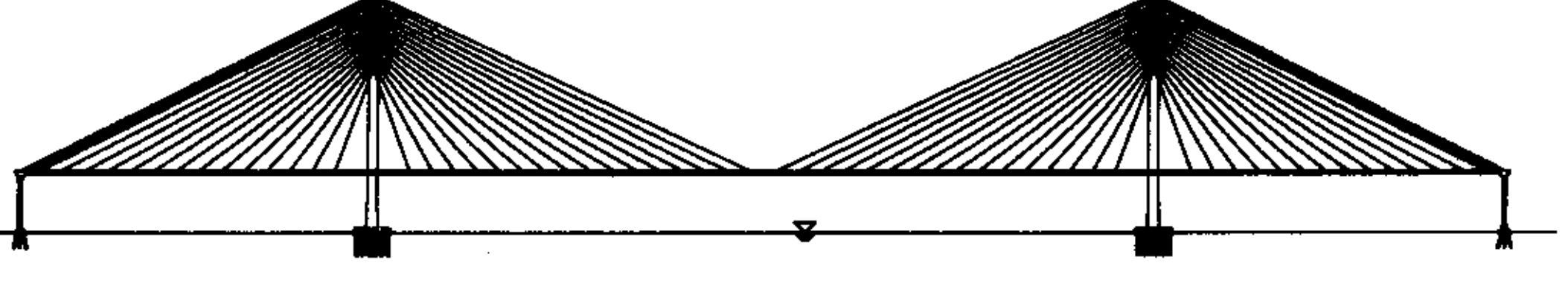
施 工 流 程 图	说 明
<p>颍珠山侧 ⇐ ⇨ 小洋山岛</p> <p>主梁施工</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1 安装 0 号节段钢梁, 塔梁临时固结 2 对称张拉 B0、Z0、B1、Z1 斜拉索
<p>主梁施工</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1 安装梁上吊机 2 钢梁、桥面板从 0 号、1 号拉索间吊运至桥面
<p>主梁施工</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1 利用梁上吊机安装主梁、横梁, 张拉相应斜拉索 2 安装两个节段前的预制混凝土板 3 现浇混凝土板间接缝混凝土, 张拉板内相应预应力钢束
<p>主梁施工</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1 继续对称悬臂施工 2 边跨安装至边墩 3 在锚墩墩顶安装钢主梁尾段, 现浇尾段横梁 4 边跨钢梁合拢, 张拉边跨板内纵向预应力钢束 5 中跨继续悬臂施工
<p>中跨合拢</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1 中跨钢梁合拢 2 放松塔梁临时固定措施 3 张拉中跨合拢段桥面板内纵向预应力钢束
<p>竣工</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1 铺装和防撞栏杆施工 2 调整索力 3 照明、避雷针等附属工程施工 4 荷载试验、竣工

图 3 施工流程

6 合拢段长度的考虑

颍珠山大桥主梁钢结构部分采用栓结拼装, 实际要求工厂应首先进行预拼装, 然后号孔、除锈、涂装, 一个节段完整的施工周期在半个月以上, 为了工期和进度, 决定合拢段提前预制。

影响合拢段长度的因素有: 当前线形与合拢段线形的差异、主梁梁段的压缩变形、温度的变化等。

为准确确定合拢段的长度, 首先查阅了大桥所处位置预计合拢时间段近 5 年的气象资料, 确定合拢温度; 然后选择合适的天气连续 48 h 观测悬臂段的距离(高差对水平距离的影响非常小)、两端的曲率; 正

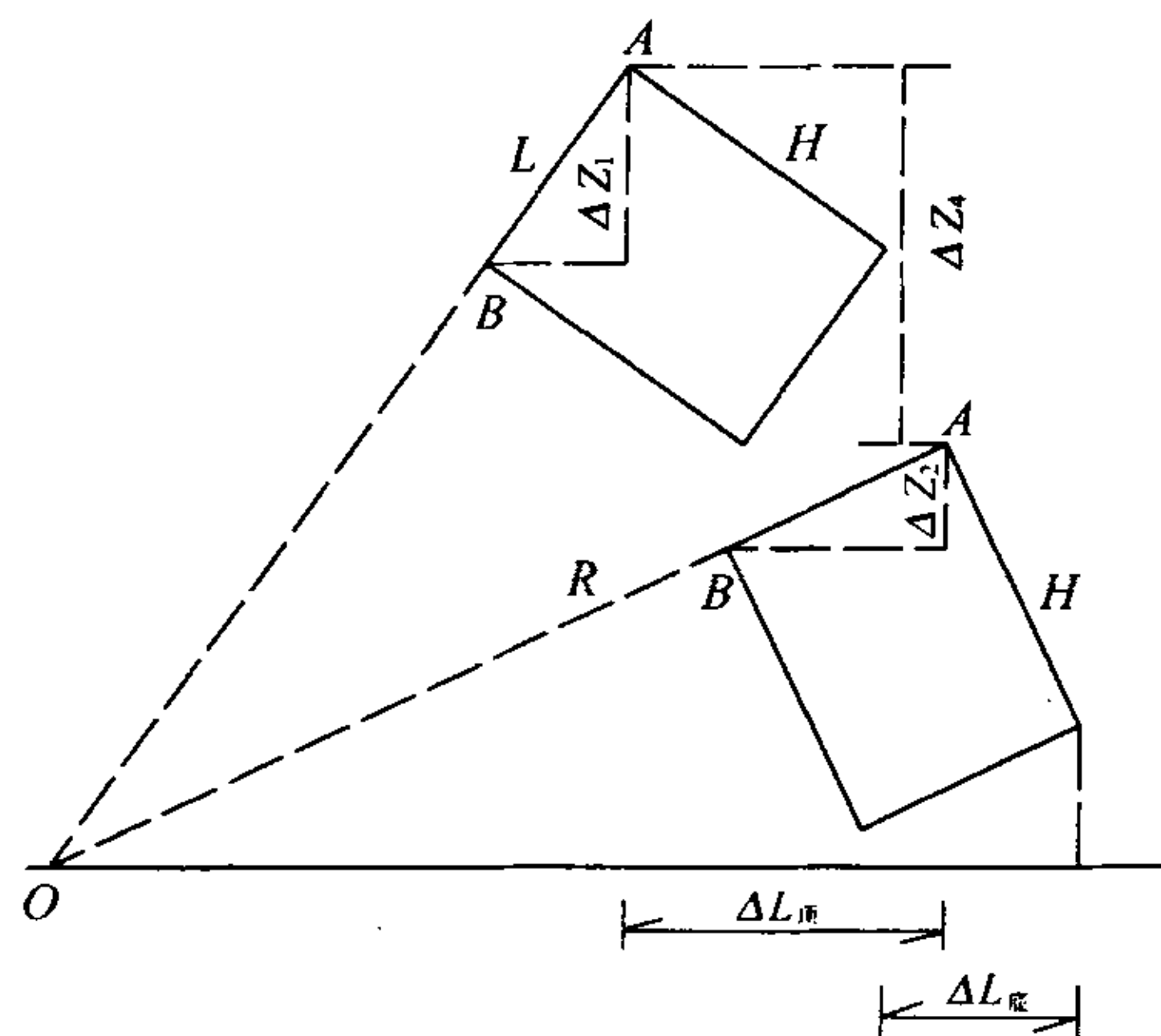
装计算后续节段拼装引起的主梁压缩变形; 通过图 4 所示的计算线形影响, 最后确定理论合拢段长度。

合拢段长度修正: 合拢段精确长度与现场温度条件、梁长拼装误差、横桥向扭转及竖向标高等有关, 经现场实测后计算确定。

修正合拢段长度: $L_i = a_i - b_i - c_i$

式中: a_i 为理论合拢段长度; b_i 为合拢段在厂内实际加工长度, 此值应在与合拢温度相同的条件下进行测量确定; c_i 为温度修正及标高修正。

大桥中跨合拢时, 误差仅仅 $\pm 1 \text{ mm}$, 从节段吊装到完全合拢, 用时不到 20 h。



ΔZ_1 : 当前节段合拢前 A、B 点标高差值

ΔZ_2 : 当前节段合拢后 A、B 点标高差值

ΔZ_4 : 当前节段合拢前后 A 点标高差值

L、H: 当前节段的节段长、梁高

$$\Delta L_{顶} = \frac{\Delta Z_1 - \Delta Z_2}{\Delta Z_4} (\sqrt{L^2 - \Delta Z_1^2} - \sqrt{L^2 - \Delta Z_2^2})$$

$$\Delta L_{底} = \Delta L_{顶} + \frac{\Delta Z_1 - \Delta Z_2}{L} H$$

图 4 计算图示

7 施工控制结果

7.1 标高

悬臂施工过程中,主梁标高误差在 ± 10 mm 范围内,达到了控制目标的要求。

中跨合拢时,合拢段长度误差小于 1 mm,达到比较高的合拢精度。

合拢后,全桥主梁线形与设计线形高差各节段均小于 20 mm,成桥线型与设计线型保持一致,符合设计要求及施工和验收标准的要求。

7.2 索力

成桥实际索力与设计索力的误差小于 5%,达到了控制目标的要求。

7.3 主梁应力

斜拉桥成桥状态纵桥向主梁应力符合设计目标。

7.4 荷载试验

荷载试验结果证明大桥成桥状态完全符合设计要求。

Construction Control of Main Bridge in VII Contract Section of Donghai Sea Crossing Project

ZHANG Zeng-huan¹, LU Yong-cheng¹, AI Fu-ping¹, SHEN Yang¹, LIU Guo-bo²

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China;

2. Road & Bridge East China Engineering Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: Kezhushan Bridge is the main structure of the VII Contract Section in Donghai Sea Crossing Project, with a double-pylon double-plane composite structure. Both design of alignment and cable force has satisfied the requirement of specifications with closure precision up to ± 1 mm on the basis of meticulous control of construction and detailed analysis to various factors.

Key words: Donghai Sea Crossing Project; Kezhushan Bridge; construction control; temperature; temperature differential; stayed cable

2005 年 12 月 10 日,路桥建设参建的东海大桥建成通车

作为国内第一座外海跨海大桥,东海大桥是路桥建设深海“试航”的首个扛鼎之作,对提升“路桥建设”的品牌影响力贡献甚巨。东海大桥全长 32.5 km,是上海国际航运中心深水港工程的一个重要组成部分,2002 年 6 月 26 日开工建设。其中施工难度最大的第Ⅳ标(3 个辅通航孔桥)和第Ⅶ标(颍珠山斜拉桥)都由路桥建设承建。路桥建设充分发挥资本、技术和管理优势,在较短的时间内打造了国内公路施工行业第一支装备精良、技术过硬的“海上施工舰队”,攻克了一系列世界级施工难题,确保了各节点工程的按期或提前完成,为整个东海大桥的全线贯通打下了坚实的基础。在东海大桥指挥部和上海市人民政府等单位组织的各种评比中,路桥建设始终名列前茅,先后荣获立功竞赛流动红旗、上海市文明工地、质量先进集体等诸多荣誉和奖励,并取得了多项具有国内领先水平的科技创新成果,确立了路桥建设在国内深海施工领域的强企地位。