

桥梁施工控制技术

邱式中

(上海市基础工程公司特种基础设计所 上海 200002)

摘要:桥梁施工控制技术是确保桥梁变形和内力符合设计要求,确保桥梁结构安全的重要保证。本文介绍了桥梁施工控制技术的方法应用。

关键词:施工控制 变形控制 应力控制 稳定控制 安全控制 控制方法

1 概述

1.1 概念

桥梁施工控制技术,就是把现代控制理论应用在桥梁施工过程中,确保在施工过程中,桥梁结构的内力、变形一直处于允许的安全范围内,确保最终的实际桥梁变形和内力符合设计理想的变形和内力的要求。

1.1.1 变形控制

各类桥梁在施工过程中,无论采取何种方法,总会有变形,例如梁式桥梁的标高,拱桥拱轴线位移,斜拉桥梁的标高、塔的位移,悬索桥主缆(悬索)的位移等。施工控制中的标准为误差允许值。下面列举有关桥梁的变形控制标准。

1.1.1.1 悬臂浇注预应力混凝土连续梁、连续T形刚构桥误差限值(mm)

- (1) 成桥后线形(标高) ± 50 ;
- (2) 合拢相对高差 ± 30 ;
- (3) 轴线按《公路桥涵施工技术规范》(J1J 041—2000)执行。

1.1.1.2 混凝土斜拉桥误差限值(mm)

- (1) 索塔
 - ① 轴线偏位: 10;
 - ② 倾斜度 $\geq H/2500$ 且 ≥ 30 (或设计要求)(H 为桥面以上塔高);
 - ③ 塔顶高程 ± 10 。
- (2) 主梁

悬浇主梁时:

- ① 轴线偏位: 10;
- ② 合拢高差: ± 30 ;
- ③ 线形: ± 40 ;

④ 挠度: ± 20 ;

悬拼主梁时:

- ① 轴线偏差: 10;
- ② 拼接高程: ± 10 ;
- ③ 合拢高差: ± 30 。

1.1.1.3 悬索桥施工控制误差限值(mm)

- (1) 索塔,同斜拉桥。
- (2) 主缆线形

① 基准索标高 $>0 \leq 35$ (虎门大桥); ± 20 (汕头海湾大桥);

② 上下游基准索股高差 <10 (虎门大桥); 30(汕头海湾大桥);

③ 一般索股标高(相对值) ± 10 (虎门大桥);

④ 主缆线形建议竖直标高 ± 50 。

- (3) 索夹安装

纵横向偏位 ± 20 (虎门大桥); 纵向位置 ± 10 , 横向扭转6(汕头海湾大桥)。

- (4) 索鞍偏移、高程

① 纵横向位置 ± 10 , 标高 $+20 \sim 0$ (虎门大桥);

② 中线偏差 ± 2 , 高程偏差 ± 20 (汕头海湾大桥);

③ 索鞍偏移建议值 ± 5 。

1.1.2 应力控制

(1) 结构在自重下的应力: 实际应力与设计相差宜控制在 $+5\%$ 。

(2) 结构在施工荷载下的应力: 实际应力与设计相差宜控制在 $+5\%$ 。

(3) 结构预加应力: 结构预加应力除对张

拉实施双控（压力表控制和伸长量控制），伸长量误差允许在±6%以内，还必须考虑管道摩擦影响（对于后张结构）。

(4) 斜拉桥拉索张力，允许误差为±5%。

(5) 悬索桥主缆吊杆拉力、中下承式拱桥吊杆拉力允许偏差宜控制在±5%。

(6) 温度应力，特别是大体积基础、墩柱等。

(7) 其他应力，如基础变位、风荷载、雪荷载等引起的结构应力。

(8) 施工中用到的对桥梁施工安全有直接影响的支架、挂篮、缆索吊装系统等的应力在安全范围内。

1.1.3 稳定控制

是指在施工过程中严格地控制施工各阶段的结构构件的局部和整体稳定。

要通过稳定分析计算和结合结构应力、变形情况的一系列完整监控系统，综合评定其稳定性。

1.1.4 安全控制

桥梁施工安全是变形控制，应力控制、稳定性控制的综合体现，必须根据实际情况，确定其安全控制重点。

1.2 桥梁施工控制方法

桥梁施工控制方法可分为事后控制法、预测控制法、自适应控制法和最大宽容度控制法几种。

1.2.1 事后控制法

事后控制法是指在施工中，当已成结构状态与设计不符时，可通过一定手段对其进行调整，使之达到要求。这种方法现应用不多。

1.2.2 预测控制法

预测控制法，是在考虑施工方案和影响桥梁状态的诸因素而确定桥梁的应变和应力的理想状态后（称控制理想状态），针对施工过程中，由于实际情况和假定诸因素之间不一致而产生误差（这些误差值由监测测试系统反馈），在调试系统中进行修正，再给定下一步施工的数据，这样，对结构的每一个施工阶段形成的前后的状态

进行预测，使施工实际沿着预定的理想状态进行的控制方法。

这种方法是桥梁施工控制的主要方法，常见的有我国泖港斜拉桥采用的卡尔曼滤波法（Kaman）、灰色理论法等，其基本结构见图1。

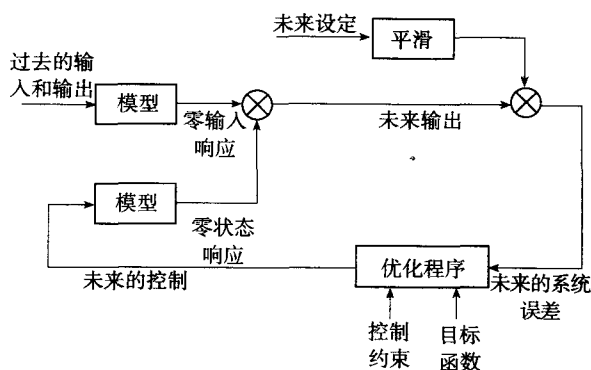


图1 预测控制的基本结构图

1.2.3 自适应控制法

也称为参数识别修正法，它是指在控制开始时，控制系数的某些设计参数与实际情况不完全相符，系统不能按设计要求得到符合实际的输出结果，但是在系统的运行过程中，通过系统识别或参数估算、不断修正参数，使设计输出与实际输出相符，从而得到控制，像我国温州大桥（斜拉桥）便采用该方法，见图2。

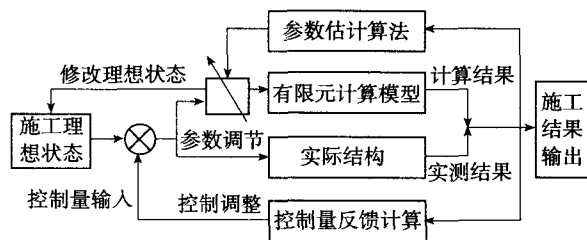


图2 某桥自适应施工控制情况图

1.2.4 最大宽容度法

设计时给予主梁标高和内力的最大误差允许值，如香港某斜拉桥主梁线形设计的宽容度为±15cm（悬臂长215m）。同时对每一节段误差也要限制。

1.3 影响桥梁施工控制的因素

1.3.1 结构参数

结构参数是指施工控制中结构施工模拟分析的基本资料，其准确性直接影响分析结果。结构

参数主要包括下列内容。

1.3.1.1 材料容重

材料容重是引起结构内力与变形的重要因素,例如混凝土材料及钢筋含量对钢筋混凝土容重的取值有很大影响。在计算中,由于假定的容重的数值和实际的容重是存在差异的,施工控制中必须对其进行准确识别。

1.3.1.2 结构部件截面尺寸

任何施工都存在误差,这种误差值将直接导致截面特性误差,从而影响了结构内力和变形的分析结果。截面尺寸误差通常控制在规范允许的范围之内。

1.3.1.3 材料弹性模量

材料弹性模量和结构变形有直接的关系,施工成品的弹性模量与设计采用值是不一致的,所以在施工过程中,要根据施工进度经常性地进行现场实际抽样试验,作必要的修正。

1.3.1.4 材料的热膨胀系数

热膨胀系数的准确与否也将对施工控制带来影响,例如合拢段施工等,尤其对钢结构更要特别注意。

1.3.1.5 施工荷载

施工荷载取值误差,对内力和变形均有影响,故不能忽视。

1.3.1.6 预加应力或索力

梁的预应力是预应力混凝土结构内力和变形控制的重要参数,施工控制要对其误差作合理控制。面对斜拉桥、斜拉索力的控制直接影响梁的标高和塔的倾斜值,因而预应力或索力是梁和斜拉桥控制的主要因素。

1.3.2 施工因素

无论怎样优秀的施工单位,即使是掌握了先进的施工技术和新颖的施工设备以及良好的施工管理,也不可避免地存在施工误差,例如构件制作、安装误差等。这些误差直接影响了施工控制,反过来,使这些误差均控制在规范允许范围之内,优化在调试的控制之中,最终实施的结果才能符合理想的结构形态要求。

1.3.3 监测因素

监测包括结构温度监测、应力监测、变形监测等内容。监测是施工的眼睛,可以直接反映施工的成果。然而监测设备、监测方法、监测数据采集方法等均存在误差,这些误差,在调试过程中要考虑在内。

1.3.4 其他因素

例如结构分析的计算模型、温度变化影响和材料收缩、徐变等因素也应作适当考虑。

1.4 施工控制是个系统工程

1.4.1 桥梁施工控制系统

桥梁施工控制是一个系统工程,在该系统中,设计图只是一个理想的状态、目标,而施工过程,就是将设计图付诸于实践,建设成为一个实体。在目标变为实体的过程中,通过监测系统又将诸多因素影响而产生的偏离误差反馈到设计部门,再通过调试系统使误差得到调整和控制,如此逐步地使实际与理想状态趋于吻合。这样就涵括了设计、施工、监测、监理、业主等各单位共同努力来实现理想状态的目标,故这是一个系统工程。图3为日本白屋桥施工控制图。

1.4.2 设计

在桥梁施工控制中,设计单位主要是提供施工控制的理想状态图和通过调试系统给出施工单位下步施工的误差控制值,是实现实际与理想状态趋于吻合的关键部门。概括起来,它包含以下两方面内容:

(1) 根据选定的施工法对施工的每一个阶段进行理想计算,求得各施工阶段施工控制参数的理论计算值,形成施工控制文件。

(2) 针对实际施工过程中由于诸多因素所引起的理论计算值与实测值不一致的问题,采取一定的方法在施工中加以控制、调整。

1.4.2.1 通过理论计算,求得各施工阶段施工控制参数的理论计算值,形成施工控制文件。

(1) 桥梁施工过程模拟分析方法

桥梁施工过程模拟分析方法,是形成施工控制理想状态、目标的过程,可分为正装算法、倒装算法和无应力算法三种。

① 正装算法

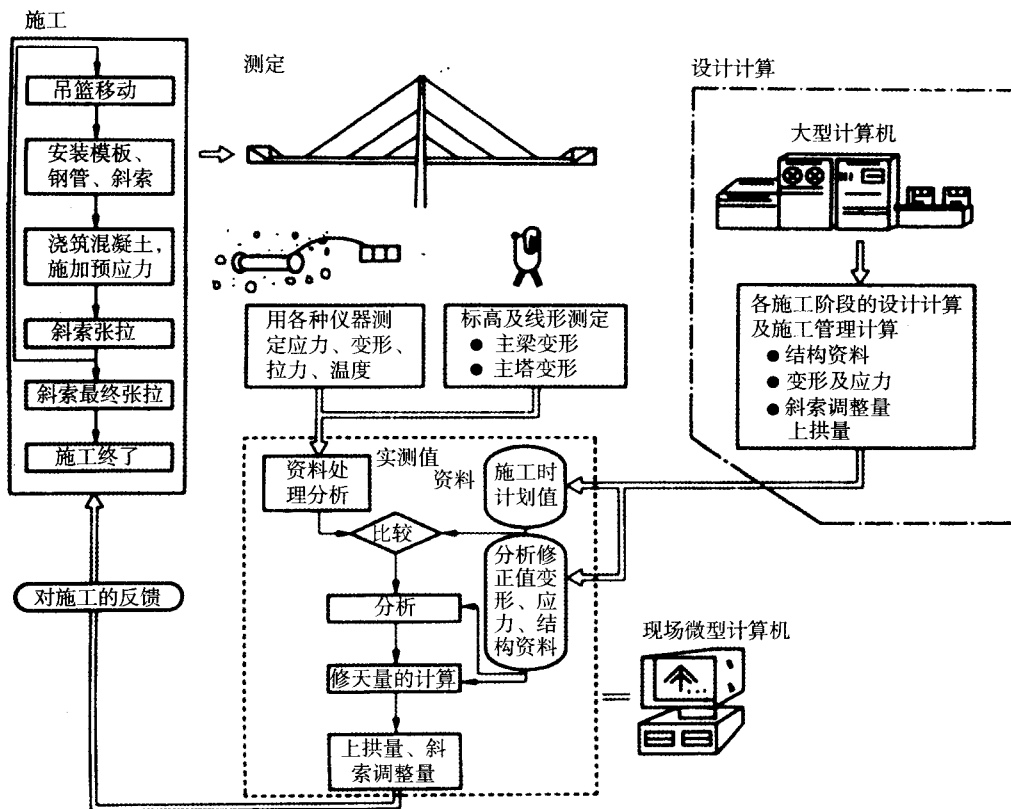


图3 日本白屋桥施工控制图

正装计算法是按照桥梁结构实际施工加载顺序来进行结构变形和受力分析，它能较好地模拟桥梁结构施工过程，能得到桥梁结构在各个施工阶段的位移和受力状态，为桥梁施工控制提供依据。正装计算法在桥梁结构计算分析中占有重要位置，对于各种形式的大跨度桥梁，要想得到桥梁结构在施工各阶段的位移和受力状态，都应当首先进行正装计算。其特点是随着施工阶段的推进、结构形式、边界约束、荷载形式和数量不断地改变，前期结构将发生徐变，其几何位置、应力状态也在改变，因而，前一阶段结构状态将是本次施工阶段结构分析的基础。

② 逆（倒）装计算法

倒装计算法是按照桥梁结构实际施工加载顺序的逆过程来进行结构变形和受力分析。倒装计算法是从设计图中给出的最终成桥状态开始，逐步地倒拆计算来获得施工各阶段的控制参数，施工单位据此按正装顺序施工完毕时，理论上桥梁的恒载内力和线形便可达到预期的理想状态。

③ 无应力状态法

在桥梁施工中或建成后，不论结构温度如何变化，位移和荷载如何变化，即在任何受力条件下，各构件或单元的无应力长度和曲率恒定不变，只是构件或单元的有应力长度和曲率不相同而已。用构件或单元的无应力长度和曲率保持不变的原理进行结构状态分析的方法叫无应力状态法。

(2) 有限元法的模拟计算

施工控制结构分析方法有有限元法和解析法。对于多元超静定大跨度桥梁结构，宜采用有限元法。

计算中的单元选择应以能准确描述施工过程中的结构受力与变形状态为准，可以模拟施工构件的安装和拆除过程，可以满足随着施工的不断推进而不断变化的要求。有限单元分析中的单元类型较多，模型中的单元可以是杆单元、梁单元、板单元、体单元、索单元等；一个模型可以由一种单元组成，也可以由几种单元组成。

桥梁结构模型化后, 编成软件程序利用微机进行计算。

1.4.2.2 针对实际施工过程中, 由于诸多因素所引起的理论计算值与实测值不一致, 采取一定的方法在施工中加以控制、调整。

从现代工程学角度出发, 可以把桥梁施工看作为一个复杂的运动系统, 运用现代控制理论, 根据结构理想状态、现场实测状态和误差信息进行误差分析, 拟订出调变量的最佳调整方案, 指导施工现场调整的做法, 使结构的施工实际状态趋于理想状态。这便是调试系统, 是施工控制的关键, 而这部分工作是由设计部门完成的。

桥梁施工控制的四种方法, 已在前章节叙述了。例如斜拉桥中泖港桥卡尔曼滤波法, 温州大桥自适应控制法, 通过索力调整值控制梁的标高、塔的倾斜在误差控制范围内, 实现实际状态与理想状态的吻合。对于梁式桥, 主要是顶推工艺和悬臂施工工艺, 其施工控制是变形控制和内力控制, 像重庆黄花园大桥(主桥上部结构为 $137.16\text{m} + 3 \times 250\text{m} + 137.16\text{m}$ 五跨预应力混凝土连续T形刚构桥)便是采用卡尔曼滤波法实现施工控制的。对于拱桥, 其结构形式和施工方法均为最多, 在不同的方法下其施工控制也各具特点, 但总的施工控制的目的是为了在全桥施工完成后, 主拱结构的线形和桥面系线形达到设计理想线形, 并使主拱结构的内力分布与设计理想的内力状态一致。像主跨 420m 的万县长江大桥, 采用了参数识别的方法来调整结构设计值与实测值不一致的误差。对于悬索桥, 其施工过程可分为两个阶段, 一是主缆架设阶段, 即从索塔完成至成缆状态; 二是钢梁吊装架设阶段, 即从空缆到成桥阶段。在第一个阶段施工控制目标是利用卡尔曼滤波法选出最优控制值, 确保主缆线形最大限度地接近设计空缆状态。第二阶段吊索和加劲梁的安装, 控制吊索长度和加劲梁标高实质是一个基于卡尔曼滤波的最优终点控制问题。

1.4.3 施工

施工单位负责将图纸变为现实的重任, 具体要做好下列工作。

1.4.3.1 做好施工前的准备工作

(1) 阅读有关设计图纸, 了解设计意图, 并在此基础上编制施工控制的施工组织设计。

(2) 落实设备组织人员进场, 安排工作、明确职责。例如泖港斜拉桥, 具体落实挂篮设备(控制在 70t 内), 安排四次张拉、一次放松、三次就位的人员及其起重、混凝土、钢筋、木工及机电钳大索张拉各工种的安排和职责。

(3) 做好施工测量和监测的准备工作。

1.4.3.2 实施过程

贯彻精心施工原则, 严格按照施工控制要求进行施工。

1.4.3.3 按要求负责施工测量和监测工作。

例如泖港桥中配合设计进行桥面标高、塔柱倾斜、张拉时油压泵数据、大索延伸量及螺帽拧进圈数等测量和监测工作。

1.4.3.4 认真反馈有关信息数。

1.4.3.5 按调试系统要求完成调整工作。

1.4.4 监测单位

施工控制监测最基本的是眼睛。对于大跨度的桥梁其监测量很大, 常由专门监测单位负责, 其责任是: ①按照设计要求提出埋放监测点的具体要求, 并监督施工单位实施或由本单位人员在施工单位施工时具体落实埋设; ②拟订监理计划, 并按计划具体实施; ③及时监测并及时反馈信息; ④完成每一阶段的监测任务; ⑤完成全桥监测任务, 并提出总结资料。

1.4.5 业主

业主负责整个施工控制的组织和监督工作, 对施工控制的内容、方案和目标发表意见, 对施工控制实施过程中的有关问题进行协调。

整个施工控制系统工程只有团结一致, 参加各方各负其责, 有条不紊地开展, 才能顺利地实现施工误差的控制, 使实际桥梁的状态与理想的状态趋于吻合。

2 梁式桥的施工控制技术

在梁式桥的施工中, 支架法、大型设备吊装法多采用在简支梁桥中。等截面连续梁除用上方法外, 还可以用顶推法和旋转法, 而变截面的连

续梁则还可用悬臂施工法。对于变截面的T形刚构带挂孔形式及变截面的连续T形刚构桥则大多采用悬臂施工法。

2.1 连续梁桥顶推施工控制

等截面连续梁桥顶推施工包括以下几个内容：一是在桥台处（在岩石土或搭设排架）预制箱梁，要求与桥轴线一致；二是为了减小梁体挠度和改善梁受力采用轻型钢导梁引导；三是在大跨径时，墩间设置临时墩；四是顶推方式可是单点或多点方式（水平—竖直千斤顶方式或是顶拉杆方式）；五是就位后落梁等五大部分内容。其施工控制的主要内容是顶推过程中的结构理想状态预测、顶推施工状态监测和施工过程中的调整，使实际桥轴线与理想桥轴线趋于吻合。

2.1.1 顶推施工过程模拟结构分析

(1) 确定顶推施工方案并决定导梁钢结构形式与尺寸及墩间是否设置临时墩和确定顶推方式。

(2) 在假定参数的情况下，在施工控制中对确定的施工方案作模拟计算分析，预测出施工过程中梁体、支墩的内力与变形状态，形成施工控制系统。

2.1.2 实施

(1) 梁体预制

① 消除排架非弹性变形，控制预留拱度量，使预制箱梁在顶推前处于正确标高上。

② 采用灵活的搓板，装拆自如，保证浇筑质量。

(2) 保证导梁的刚度，保证与梁体连接处的质量。

(3) 临时墩的刚度和非弹性变形，消除承受水平推力及垂直力的变形。

(4) 落实顶推设备，按顶推方式要求保证顶推的连动性、受力均匀性。

(5) 保证同时落梁，满足受力及安全要求。

2.1.3 监测

(1) 预制平台变形与水平平整度监测

在预制平台上设置长期观测点，按要求进行

变形观测。

(2) 临时支墩变形观测

在临时墩上设置观测点，按要求进行观测。

(3) 顶推同步性与施力监测

顶推方式主要包括单点顶推和多点顶推两种。对单点顶推，要求两侧顶推同步；对多点顶推(间断、连续)，除两侧同步顶推外，还要求各墩上顶推同步，要求全桥实施顶推千斤顶集中管理与控制。

(4) 主梁轴线位置监测

(5) 主梁应力监测

一般预埋应力仪监测。

(6) 导梁端部标高监测

2.1.4 调整

多为最大宽容度控制，并对顶推每一个误差值作控制。在正常情况下施工中梁内力与设计时无大变化，其标高无调控余地，故需对每一阶段严格控制，以达到理想效果。尤其是对落梁控制更要做到精心施工。因为墩顶千斤顶的不同步会造成力的不均衡，如超出误差允许范围，会造成梁体开裂，故要慎重对待之。

2.1.5 工程实测

塞浦路斯共和国L~P高速公路桥—罗密欧桥。

2.1.5.1 工程概况

罗密欧 (Romieu) 桥为双线曲线桥，见图4，其主要技术指标如下：

① 桥长425m，单幅桥面宽12m，曲线半径1257m。

② 桥面纵坡2.25%，横坡4.1%。

③ 桥跨布置：45.25m + 6 × 55.35m + 45.25m。

④ 基础：1~6号墩各墩均有194根微桩，桩长全为25m，桩基上均是27.3m × 11m × 2.5m的承台。

⑤ 墩为外截面5.3m × 3m、壁厚40cm的等截面空心墩。

⑥ 梁为等截面预应力混凝土连续梁，高为3.8m。

2.1.5.2 顶推模拟结构分析

(1) 顶推施工方案：

① 顶推最大跨径55.35m，为上坡顶推。

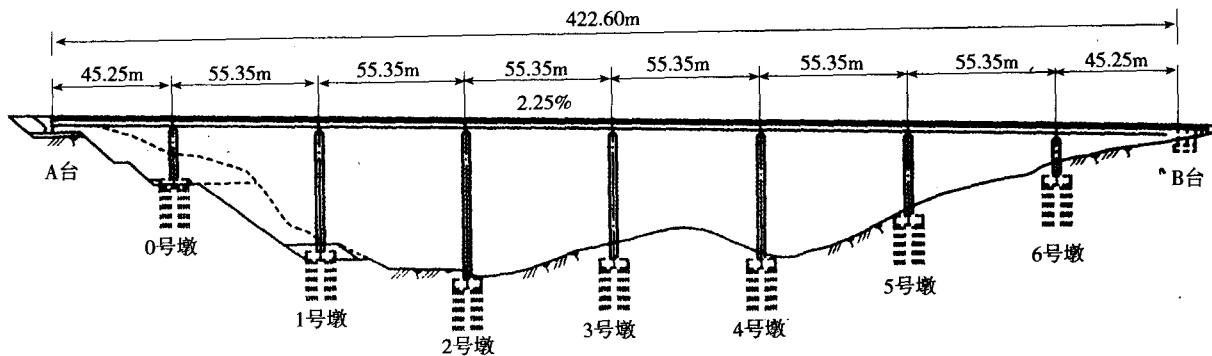


图4 罗密欧桥布置图

② 中间不设临时墩。

③ 桥全长420m，梁重近一万吨，采用预制单点集中顶推方案。

(2) 桥梁顶推分23个阶段进行，由于每个阶段桥墩上所支承的梁的重力不同，所需的顶推力不同，桥墩位移量的理论值在不同顶推阶段是不一样的，限定一定的垂直沉降误差和水平变形误差值，以达到理想的状态是施工控制的目标。

3) 设计中考虑地震力的作用。

2.1.5.3 实施

要做到精心施工。

(1) 预制构件制作

① 预制台座的精度控制：控制台座变形，消除非弹性变形；采用整体自升降式底模系统，其升降状况如图5、图6。

开模：旋拧底模上尾部的丝杠即可将其升起。

脱模：顶推过程中，底模在顶推力作用下将自行脱离混凝土而下落。

② 做好成品钢筋和预应力束管绑扎工作。

③ 做好混凝土浇筑及振捣工作。

(2) 采用单点顶推施工法

顶推过程中，在顶推力作用下，使墩顶和梁体在相对运动时产生摩阻力，桥墩在这个摩阻力作用下将有向顶推方向产生水平位移的趋势，对于该桥单点顶推，尤其在有纵坡情况下，又是高墩，为了满足稳定要求，采取用钢绞线将每个墩顺序连接后施加适当预应力的措施。该桥采用了一种新型钢绞线连接器，即周边内置连接器（图7），同目前国内采用的周边悬挂式比较具有安全可靠、使用方便、无需专用设备等优点。

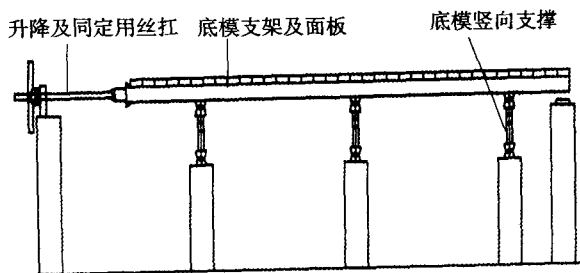


图5 底模就位，浇灌混凝土情况图

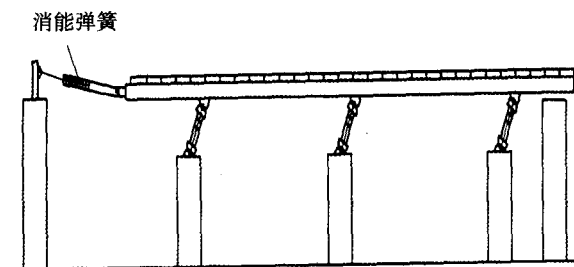


图6 底模下降顶推过程中情况图

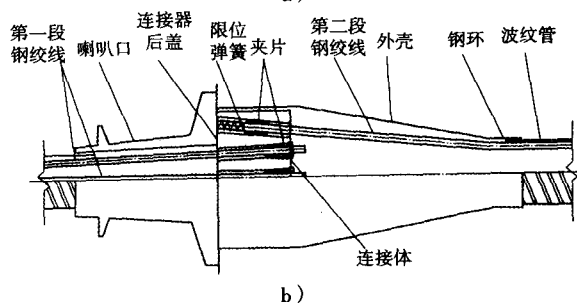
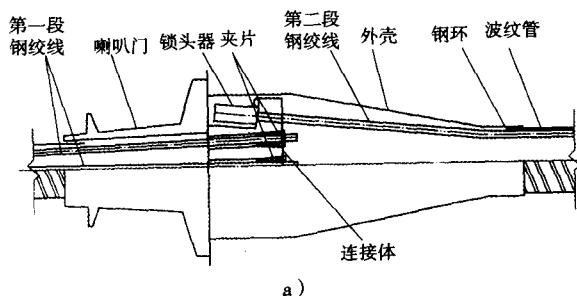


图7 新老式连接器构造图

a) 老式连接器构造；b) 新型连接器构造

(3) 安置防地震力作用下梁体沿纵向移动的装置

由于塞浦路斯地处欧亚地震带的地中海中, 属地震多发区, 为提高施工期间的安全保障, 采用了纵向防地震制动装置。

① 结构

该装置的基本构件为3500kN顶力的自锁千斤顶和与之连为一体、位于其上的糙板(摩擦系数 μ 为0.5), 利用墩梁之间的空隙, 在墩的四角, 即支座支承垫块两端, 分别放置一套千斤顶和相应的附件, 然后用2根直径32mm的预应力粗钢筋(每根张拉力600kN), 将每侧的两套千斤顶固定在支承垫块上, 从而形成一个稳固的制动体系。

② 原理

升起千斤顶, 使梁体完全支承在千斤顶上, 则千斤顶上糙板在梁体自重作用下产生较大的摩擦力而无法移动, 起到制动作用。

③ 使用

根据计算, 该桥共需4套该装置, 随着顶进的不断前移, 分别将其放置在5~1号墩上。最多

时使用4套, 即1~4号墩上。

每段梁顶推完后, 将千斤顶升起并将梁从滑道(支座)上升起至小1mm, 以确保梁的全部竖向力由千斤顶支承, 然后旋拧固定带丝扣的锁定装置, 并释放液压力, 使液压系统退出工作。

顶推操作前, 降下千斤顶, 使梁完全支承在滑道(支座)上, 顶推得以进行。

(4) 监测

桥墩顶部位移及顶推力自动监控系统。

1) 采用自动监控系统要求

① 动态监测桥墩顶部水平位移并实时显示其数值和曲线;

② 测出瞬间总顶推力并实时显示;

③ 桥墩水平位移或顶推力超限报警, 并输出控制信号, 停止推进。

2) 自动监控系统

监测墩顶水平位移是通过测量墩顶转角的间接测量方式完成的。就桥墩本身而言, 可以近似认为是一个悬臂, 因此, 只要知道墩顶的转角就可以推算出墩顶位移。

(下期待续)

· 简 讯 ·

项海帆院士荣获 国际桥协Anton Tedesko奖

刚刚闭幕的美国芝加哥第17届国际桥梁与结构工程协会(International Association for Bridge and Structural Engineering, 简称IABSE或国际桥协)四年一届的轮值大会上传来喜讯, 国际桥协将2008年Anton Tedesko大奖授予国际桥协副主席、中国同济大学教授项海帆院士, 以表彰他长期以来在结构工程领域和人才培养方面所作出的杰出贡献, 这是我国学者在国际上首次获得这一殊荣。

1929年创办于瑞士的国际桥协是目前全世界会员国最多的桥梁与结构工程协会。该协会从

1998年起, 为纪念杰出的德裔美国工程师和知识传授者Anton Tedesko先生, 专门设立了以Anton Tedesko名字命名的大奖, 以表彰长期从事结构工程领域工作、并在工程技术和知识传授方面作出杰出贡献的得奖者, 该奖项每两年颁发一次。作为该奖项的另外一个组成部分, 每一位获奖者将挑选一名来自其他国家的青年工程师, 由国际桥协基金会提供的25,000瑞士法郎, 资助该青年工程师在获奖者所在国及世界其它地区的国际著名工程公司学习实践半年。

(摘自中国土木工程学会网站)