

芜湖长江大桥主桥施工过程的 内力监测与分析

申爱国, 李 乔

(西南交通大学桥梁与结构工程系, 四川 成都 610031)

摘要: 芜湖长江大桥是本世纪我国在长江下游建造的一座投资和主桥跨度均为亚洲最大的公路与铁路两用桥。该桥的铁路桥部分全长10多km, 公路桥部分全长超过6km, 尤其是跨越长江主航道的主桥, 形式上采用的是钢桁架与斜拉索相结合的结构, 主跨达到312m, 但由于受到航空和长江航运, 以及地面现存铁路设施接轨的限制, 塔墩与主跨的设计比值仅为0.11, 这样的几何参数在全世界同类桥梁中也是绝无仅有的。不仅如此, 为了确保主桥在建设过程当中和建成后使用期间的安全, 主桥在设计和架设中还采用了多项新技术和新材料, 然而这一切都首先需要在施工过程当中进行检验, 因此, 芜湖长江大桥斜拉主桥施工过程中的内力监测工作就越发显得重要。本文详细介绍了该桥主要控制结构的内力监测方法和监测结果, 并进行了适当的分析, 以供同行在进行桥梁或其他重大工程项目的内力监测时参考。

关键词: 芜湖长江大桥; 应力测试; 分析

中图分类号: TU37 **文献标识码:** A

Stress monitoring and analysis for construction of the bridge spanning on Yangtze River in Wuhu City

SHEN Ai-guo, LI Qiao

(Department of Bridge & structural Engineering, South-West Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The bridge spanning on Yangtze River in Wuhu City and combining with highway and railway is the largest one in investment and spanning of key part of bridge in Asia which was built by China in 20th century. The key part of the bridge over the main channel of Yangtze River is designed in the shape of steel truss with cable staying and consisted by three spans, the longest span reaches 312m. To insure success on construction of bridge, many new techniques and materials were adopted, so it was necessary to apply internal stress measurement to the constructing process. In the paper, the main results of measurement are shown with brief analysis.

Key words: Yangtze River bridge in Wuhu City; stress measurement; analysis

1 芜湖长江大桥主桥的结构示意图和测点布置情况

如图1所示, 芜湖长江大桥斜拉主桥主要是由3跨连续钢桁架、两个主塔墩、 2×32 对斜拉索, 以及采用密切结合技术而铺设在钢桁架上面的公路桥面板构成。其中主跨为 26×12 m, 两个边跨均为 15×12 m。主桥钢梁的桁高为14m, 而塔墩高出公路桥面约30多m, 因此, 最外侧斜拉索与桥面所形成的

收稿日期: 2001-02-16; 修订日期: 2001-05-07

作者简介: 申爱国(1957-), 男, 河北武安人, 副教授, 博士, 主要从事桥梁结构动力学和抗震分析研究。

夹角仅为 15° 左右，这个角度远远小于通常意义下斜拉桥的外索应该具有的角度；即便是最内侧的索，其倾角也才达到 33°，由此可以看出，芜湖长江大桥斜拉主桥的设计的确非同一般。为了保证该桥的施工过程能够严格按照设计参数进行，因此，对该桥施工过程进行分阶段内力监测就成为不可或缺的重要程序。

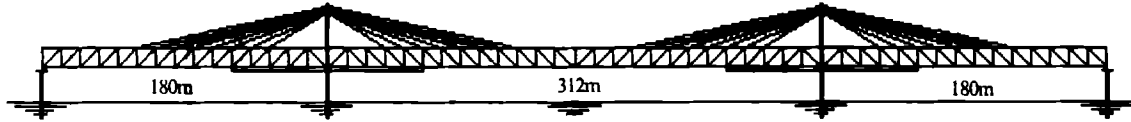


图1 芜湖长江大桥斜拉主桥示意图

根据该桥的结构特征和受力特点，我们将内力监测的重点放在塔墩附近对全桥施工过程起着控制作用的 3 个节间的部分钢梁杆件和桥面板上，并同时跟踪测试每一根斜拉索在全部施工过程中的张拉和调整。图 2 为塔墩附近钢梁主桁和桥面板测点的分布示意图，图 3 为钢梁副桁测点分布示意图。

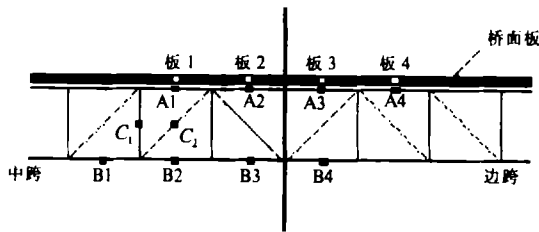


图2 钢梁主桁和桥面板测点分布

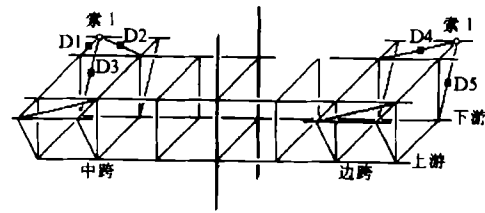


图3 钢梁副桁测点分布

在图 2 中，A1 ~ A4、B1 ~ B4 分别为主桁上弦杆件和下弦杆件的应力监测点，C1 和 C2 为桁间支撑杆件上的测点，而板 1 ~ 板 4 为公路桥面板内部的应力测点；在图 3 中，D1 ~ D5 均为副桁杆件上的测点，并通过这些杆件，将悬挂于“索 1”处的斜拉索力传递到主桁之上。在上述所有钢梁杆件的表面测点和混凝土桥面板的内部测点处，布置的都是钢弦式应变计。

2 主桥施工过程的内力测试和分析

芜湖长江大桥斜拉主桥的架设采用主塔两边节间对称架设的方法，这是斜拉桥架设的常规方法。对于芜湖桥来说，每一个完整节间的架设，实际上包含全部钢杆件的拼装、公路桥面板的铺设，以及桥面板之间接缝的浇注，最后是节间端部斜拉索的悬挂与张拉，我们将其称之为一个施工阶段。

在芜湖桥的设计当中，板梁结合是该桥采用的一项重要技术，这项技术的成功运用，将保证公路桥面在成桥后的长期运行中保持良好的路况。为了保证板梁的密切结合，一方面在主桁上弦杆布置了密集的剪力钉，在桥面板预制时在其四周预留了密集的钢筋接头（见图 4）；另一方面，利用倾角在 15° ~ 33° 之间的斜拉索张拉之后在水平面内为桥面板提供强大的压力，使桥面板深度受压，不仅消除了自重对桥面板所产生的张拉，还使得桥面板与上弦杆之间紧密地结合在一起，为以后公路桥面沥青混凝土的铺装奠定坚实的基础。

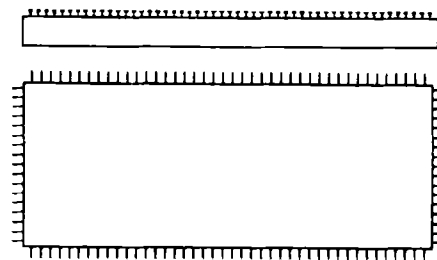


图4 上弦杆和桥面板示意图

钢梁和桥面板的内力测试都是按照施工阶段的进展在斜拉索的张拉前后进行的，直至主桥中跨合拢，边跨落至边墩。图 5 ~ 图 9 示出了上述各个测点的内力及斜拉索的索力随施工阶段的不断进展而变化的情况。

在主桥架设施工过程中，第 1 和第 2 对斜拉索是在经过两次张拉之后，其内力达到设计吨位，其余斜拉索都是一次张拉到位（见图 5）。为清晰起见，图 5 只给出了第 1 ~ 第 4 对斜拉索的索力测试结果，而第

5 ~ 第8对斜拉索在图中被略去。从图5可以看到, 后续斜拉索的张拉使得前期斜拉索逐步卸载, 最终每一对索的受力都稳定在10⁴kN吨左右。

主桥架设的初始阶段, 斜拉索的作用主要以平衡重力, 消除塔墩附近正弯矩的不利影响为主, 因此, 钢梁上弦杆件和桥面板受到的挤压和弯压是有限的, 其内力表现为轻度受压, 但这已经为桥面板在后续施工过程中的安全提供了初步保证。随着架设过程的进展, 斜拉索在水平面向桥面板施加的压力迅速增加 (见图9, 图中“正应力”表示受压), 从而实现了板与梁的紧密结合, 并且保证了桥面板在成桥以后的长期运营过程中处于受压状态。因此, 塔墩附近的桥面板在预制时, 不需要施加预应力。

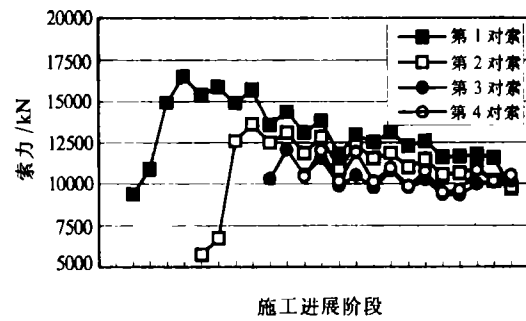


图5 第1至第4对索的索力测试结果

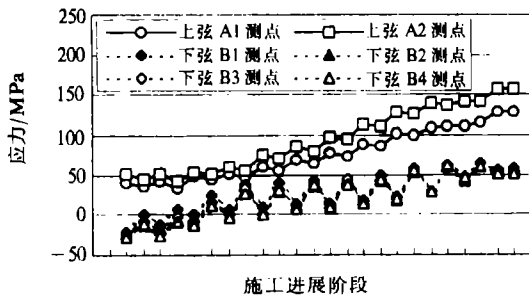


图6 上弦和下弦钢梁杆件应力测试结果

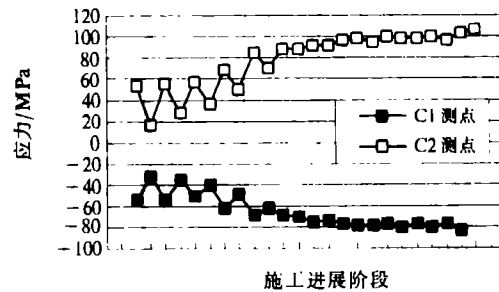


图7 主桁支撑杆件应力测试结果

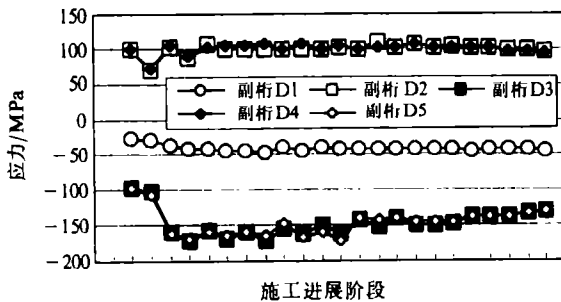


图8 副桁杆件应力测试结果

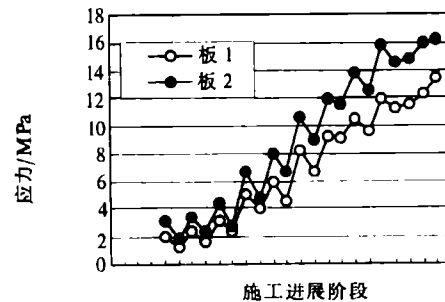


图9 桥面板中跨测点应力测试结果

图6显示了主桁上、下弦杆件在全桥施工过程中的受力情况。由于斜拉索悬挂于公路桥面的上弦杆件处, 因此, 斜拉索在压迫桥面板的同时, 也对上弦杆件施加了强大的水平压力, 强大的水平压力会削弱上弦杆件承受竖向荷载的能力。为了保证上弦钢梁杆件在强大压力作用下的稳定性, 所以, 芜湖斜拉主桥上弦杆件的设计截面要求很大, 从而使得杆件在整体装配节点的约束下, 其极限受压荷载可以达到 3×10^6 kN。相比之下, 斜拉索的水平分力对下弦杆件的影响就弱得多, 这是主桥桁架比较高的结果, 是芜湖桥设计本身所决定的, 这将有利于下弦杆件保持其应有的承受竖向铁路车辆荷载的能力。由于上弦杆件压应力水平较高, 下弦杆件压应力水平相对较低, 所以, 每一施工阶段所延伸出去的重力荷载和增加的竖向索力, 对塔墩附近被测试上弦杆件受力状态的影响很小, 使下弦杆件的内力产生了相对显著的变化。

图7显示了主桁内两根维持桁架稳定的杆件在桥梁架设过程中的受力状况 (杆件的位置见图2), 其中竖杆受拉, 斜杆受压, 并且二者的受力在图7中接近于镜面成像。竖杆受拉显然是由于受到下弦杆件及下平联重力荷载作用所致, 而斜杆受压与下弦杆件受压有关。

在副桁被测试杆件中 (见图3), 索力主要通过D3和D5传递给下弦杆件, 因此D3和D5始终受到很强的张拉 (见图8)。D2和D4则对副桁系统的稳定发挥重要作用, 它们在图8所示强大压力作用下的稳定性是设计该杆件的关键, 测试结果表明, D2和D4的截面可以保证它们在实际荷载作用下保持稳定。

通过对测试结果和被测试杆件实际受力状态的分析, 以及与设计单位计算结果的比较, 芜湖长江大桥主桥施工过程中的内力测试是可以接受的, 对于指导大桥安全、顺利地完施工过程起到了不可或缺的作用。

3 测试经验总结和应当注意的问题

近 10 多年来, 由于新技术、新工艺、新材料的不断涌现, 以及计算技术的突飞猛进, 使得各种造型新颖、结构轻巧、跨度超长的桥梁大量出现在我国广大的国土上, 但与此同时, 也暴露出越来越多的问题, 甚至酿成桥毁人亡的重大事故。

从事故发生的原因来看, 主要是施工, 或设计, 或材料等方面出现的问题造成的; 从事故发生的时间来看, 有些发生在施工过程中, 有些发生在桥梁建成以后的使用期间。其中有些事故, 如果能够在施工过程当中对某些关键控制部位实施同期监测, 那么就完全有可能将事故的发生消灭在萌芽状态。近年来, 我国许多科研单位已成功地进行了多座大跨度桥梁的施工监测, 为这些桥梁的安全施工作出了贡献, 芜湖长江大桥和厦门海昌大桥就是其中成功的例子。

通过对芜湖长江大桥斜拉主桥施工全过程的同期监测, 我们在混凝土、斜拉索和钢结构的测试方面获取了很多宝贵的资料和经验, 但毕竟这项工作在我国还刚刚起步, 今后类似的工作将会进一步得到发展, 因此, 我们愿意在这里谈谈经验和体会, 以供同行们参考。

3.1 混凝土内力测试中应当注意的问题

通常情况下, 测试元件都是在浇注混凝土时同时埋入, 并在埋入之前读取和记录测试元件的初始值, 当施工进入到适当的阶段以后, 便可以按照合同要求分阶段进行测试。按道理, 后期每一次测试结果与初始值进行比较就应该得到当时测试状态下元件所在处的混凝土内应力, 但实际上并非如此。这是因为在混凝土的初期硬化过程中(如图 10 所示), 混凝土的收缩徐变会产生非线性增加的内应力, 并进入到后期的测试结果当中, 对测试结果产生很大影响。鉴于目前硬化过程所产生的应力还不能精确测试, 因此, 最佳方案是将硬化过程产生的应力从测试当中滤去, 也就是说, 以混凝土收缩过程基本稳定以后的某一次测试作为初始值, 这样就可以很准确地测试到以后施工过程中在外荷载作用下混凝土中的应力变化情况。在芜湖桥的测试工作中, 按照连续钢梁施工的要求, 我们有意地对桥面板接缝处的现浇混凝土硬化过程进行了追踪测试, 每隔 7 天进行一次测试, 共测试了 5 次。测试结果表明, 14 天以后的读数就已经达到了可以接受的稳定状态。当然, 这个时间段的长短对于不同标号水泥、不同砂石配比、不同添加剂和不同环境温度会有所变化, 测试人员可以根据具体情况进行试验后确定。

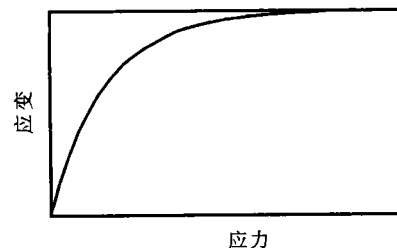


图 10 混凝土硬化过程示意图

3.2 钢构件内力测试中应当注意的问题

钢构件的内力测试通常采用表面测试元件进行。由于大型工程施工周期长, 外部环境变化显著, 因此, 目前都采用性能稳定、对外部环境适应性强、使用寿命长的钢弦式应变计进行测试。元件的安装通常有点焊、螺栓固定和粘接等方式, 可视具体情况而定。由于任何钢弦式应变计都只能在一定的有效应变区间内工作, 因此, 必须合理地设定元件初值, 才能确保钢构件在外力作用下, 其应变值不超出元件的测试范围。为此, 必须在安装元件之前, 对所要测试的钢构件在施工过程中的受力状况作出基本判断, 特别是对受压还是受拉不能错判。当元件安装完毕, 并且设定好初值之后, 还要特别注意施工过程中某些冲击荷载可能会给测试元件带来的影响, 一旦出现这种情况, 应当及时对元件的读数进行修正, 通过与前期测试结果和附近其他元件测试结果的比较, 将冲击荷载的影响剔除。

3.3 斜拉索索力测试中应当注意的问题

由于斜拉桥具有卓越的跨越能力, 因而在我国的交通建设中被大量采用。在斜拉桥的施工过程中, 斜拉索的索力能否按照设计要求进行张拉和调整, 是决定施工安全和顺利的最重要因素, 也是斜拉桥建成的通车后能否长期安全运营的根本保障。因此, 在斜拉桥的施工过程中, 对索力进行追踪测试是十分必要的。

目前, 索力测试的方法基本上都可以称作频率测试法。也就是说在展开测试工作之前, 应首先确定斜拉索的几项技术参数, 它们是索长 L 、单位长度的重量 w 、钢丝材料的弹性模量 E 、截面惯性矩 I 和倾角 θ 等, 以后的测试工作实际上只进行斜拉索振动频率的现场测试。当用频率测试仪测得斜拉索在某一张拉力 T 作用下的振动频率 f 之后, 利用 T 与 f, L, w, E, I, θ 之间的关系计算当前的索力 $T = T(f, L, w, E, I, \theta)$ 。理论和实践表明, 影响索力 T 计算精度的最主要因素是索长和测试频率的精度, 由此引起的索力相对误差 $\Delta T/T$ 直接与 $2\Delta L/L$ 和 $2\Delta f/f$ 成正比。

对于短索而言, 索长的误差将会造成比较显著的索力计算误差, 因此, 要特别注意短索的“有效索长”的确定。其实, 无论短索还是长索, 确定有效索长的最佳方法是在制索现场进行校准; 否则, 应当选取索两端截面特性发生最大突变点之间的距离作为有效索长。芜湖桥的斜拉索是典型的短索, 并且单根索的受力都在 5×10^3 kN 左右, 这使得索的振动基频主要都处于 1Hz 至 3Hz 之间, 因此, 频率测试精度很高, 相对误差对于索力计算的影响很小, 可以忽略, 但是, 索长参数的误差给索力计算造成的影响则比较明显。

对于长索而言, 频率测试的误差是影响索力计算精度的主要因素。这是因为长索大都出现在大跨度公路斜拉桥中, 并且索的分布比较密集, 每根索分担的荷载有限, 通常只有几百 kN 左右, 这就使得斜拉索相对比较松弛, 振动基频非常低, 往往都在 0.4Hz 以下, 甚至到达 0.1Hz, 再加上目前国内厂家生产的振动传感器在低频区段的灵敏度比较低, 测试环境的影响 (主要是风的影响) 很容易引起低频测试的误差。特别是当风速较大时, 索的振动实际上已经成为强迫振动, 基频振动部分已被风噪声所淹没, 测试工作失去意义。此时, 必须选择晴朗无风或微风的夜晚进行反复测试, 才有可能获得比较准确的测试结果。

3.4 国产钢弦式应变计的问题

前面曾经谈过, 对于大跨度桥梁结构的混凝土和钢构件的内应力测试, 目前常用的传感元件都是钢弦式应变计。通过芜湖斜拉桥的应力测试, 深感国产钢弦式应变计的各项技术指标较进口同类产品逊色很多, 如外观、几何尺寸, 尤其是可操作性、稳定性等方面。我们认为国内生产厂家应该和有关使用单位和科研单位加强合作和沟通, 开发、生产出优质价廉的国产钢弦式应变计, 这样, 不仅可以获得可观的经济效益, 还可使我国大跨度桥梁结构施工过程中的内力监测再上一个新的台阶。

参考文献:

- [1] 西南交通大学土木学院. 芜湖长江大桥斜拉主桥应力测试总结报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2000.
- [2] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.
- [3] 申爱国, 李乔, 朱敏. 芜湖长江大桥斜拉桥地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2000, 16(3): 90-94.