

# 斜拉索张拉与主梁浇筑误差对无背索 斜拉桥的影响研究

荀敬川<sup>1,2</sup>, 刘吉诚<sup>1</sup>, 彭晶蓉<sup>3</sup>, 李源<sup>2</sup>

(1. 中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 050001; 2. 长安大学 公路学院; 3. 西安工业大学)

**摘要:** 该文以某混凝土无背索斜拉桥为工程依托, 根据桥梁结构施工过程中不确定的控制影响因素, 基于施工控制原理, 运用有限元软件, 探究了施工过程中索力超张拉与主梁顶板浇筑超方两种人为因素对结构受力的影响。分析探究表明: 主梁采用满堂支架施工的无背索斜拉桥因单根拉索超张拉对主梁线形、应力影响较小; 整体拉索超张拉 10% 时, 已接近主梁线形规定值。主梁顶板随机超方浇筑厚度为 2 cm 时, 若不对主梁刚度引起太大变化, 则对结构的主梁线形、拉索应力、主梁上、下缘截面应力变化较小, 且满足规范要求; 主梁的整体超方浇筑会影响主梁的刚度, 该依托工程建议主梁顶板整体超方厚度不应超过 1.5 cm, 否则影响主梁线形验收规定值。

**关键词:** 桥梁工程; 施工控制; 人为因素; 拉索张拉; 超方浇筑; 结构响应

无背索斜拉桥属于高次超静定结构, 其特点是设计与施工高度耦合, 即斜拉桥所采用的施工方法、施工中斜拉索张拉的顺序和张拉力的大小、施工节段的立模标高、混凝土的浇筑程序、材料性能以及施工过程中桥梁周围大气的湿度与温度都将直接影响成桥状态的结构内力分布与成桥线形。

该文以某无背索斜拉桥为背景, 结合现场的施工监控及相关科研工作, 选取该桥的主梁浇筑厚度误差作为不确定因素, 从概率角度对该桥的力学行为进行分析, 在结构受力和验收标准的基础上, 为该桥的施工控制精度提供参考依据。

## 1 工程概况

某混凝土无背索斜拉桥跨径布置为(80+40) m, 为独塔双索面斜拉桥, 平面位于直线上, 立面位于  $R=6\ 500$  m 的竖曲线上。设计荷载为公路 I 级, 结构安全等级为一级,  $\gamma_0=1.1$ 。

该桥为塔梁墩固结体系, 桥宽 30.5 m, 主梁横截面采用两个分离的箱形截面, 中间用横梁连接, 主梁两端采用支座支撑。采用分离式桥塔, 主塔倾角为  $59^\circ$ ,

两个桥塔主塔柱中心间距为 28 m, 桥面以上塔高约 66 m。主塔柱断面为矩形, 顺桥向长度 5.0~8.5 m, 横桥向宽度 3.0 m。主塔塔顶采用 3 根钢筋混凝土横梁相连, 横梁采用宽 1.7 m、高 3 m 的实心矩形截面。斜拉索锚固点在梁上间距为 4 m, 塔上间距为 3.414~3.454 m, 塔端作为固定端, 仅在梁端张拉。全桥桥型布置如图 1 所示。

## 2 研究方法

该桥施工主要流程为: 钻孔灌注桩、承台及桥台施工→支架上现浇混凝土箱梁及横梁、张拉预应力钢束→逐段浇筑桥塔并挂斜拉索→在梁端张拉斜拉索、调整索力→拆除支架, 完成桥面系及附属工程施工。计算模型中主要划分的施工阶段如表 1 所示。该桥计算分析采用 Midas/Civil, 主梁、主塔、桥墩、承台、桩基均采用梁单元; 斜拉索采用桁架单元模拟, 考虑垂度对斜拉索弹性模量的影响; 斜拉索锚固点与主梁、主塔之间采用刚臂连接。

为保证桥梁成桥线形及受力状态基本符合设计要求, 必须通过理论分析来确定桥梁结构施工过程中, 每

收稿日期: 2019-12-02(修改稿)

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号: 310821161012); 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2015M572511)

作者简介: 荀敬川, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: 76201366@qq.com

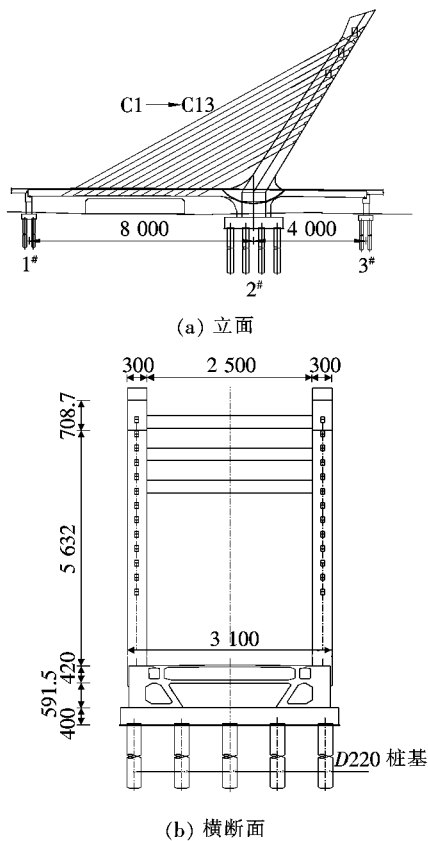


图 1 依托工程桥跨布置图(单位:cm)

表 1 主要施工阶段

施工顺序	主要施工内容	施工顺序	主要施工内容
1	桩、承台等下部结构	14	张拉 C8 索
2	现浇混凝土箱梁、张拉主梁钢束	15	张拉 C7 索
3	主塔 1# 节段	16	浇筑 7# 节段
4	主塔 2# 节段	17	张拉 C6 索
5	主塔 3# 节段	18	张拉 C5 索
6	张拉 C13 索	19	浇筑 8# 节段
7	主塔 4# 节段	20	张拉 C4 索
8	张拉 C12 索	21	张拉 C3 索
9	张拉 C11 索	22	浇筑 9# 节段
10	浇筑 5# 节段	23	张拉 C2 索
11	张拉 C10 索	24	张拉 C1 索
12	张拉 C9 索	25	桥面铺装
13	浇筑 6# 节段		

个阶段在受力和变形方面的理想状态,以便控制施工过程中每个阶段的结构行为,使其最终的成桥线形和受力状态满足设计要求。对于混凝土无背索斜拉桥的施工,主要不确定因素为斜拉索的张拉和主梁浇筑过

程中模板搭设精度引起的主梁厚度误差。该桥共有 C1~C13 共 13 对拉索,选取 C1、C5、C7、C9 和 C13 编号的拉索共计 5 对分别为单一随机变量进行分析;主梁在浇筑过程中,每个梁段顶板厚度浇筑超方的量是随机分布的,因随机变量较多,主梁节段划分经过简化,以 20 m 为一节段作为一随机变量进行分析。

3 斜拉索初张拉力误差对结构的影响

对于单根斜拉索初张拉力误差分析,考虑拉索初张拉力误差为设计张拉力的±5%、±10%,选取部分拉索对斜拉索张拉阶段进行分析,工况如表 2 所示。

表 2 单根斜拉索初张拉力误差工况表

工况	工况内容
1	拉索 C1 初张拉力误差
2	拉索 C5 初张拉力误差
3	拉索 C7 初张拉力误差
4	拉索 C9 初张拉力误差
5	拉索 C13 初张拉力误差

根据表 2 工况,可得到主梁挠度变化计算结果如图 2、3 所示。

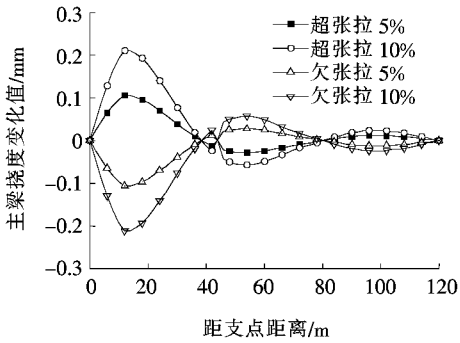


图 2 工况 1 主梁挠度变化量

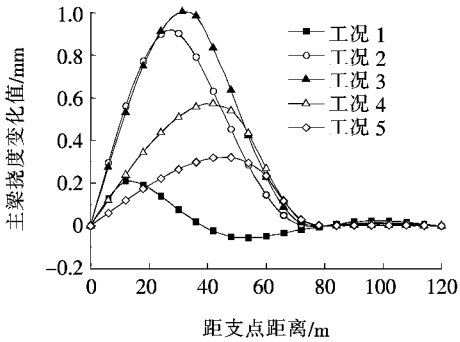


图 3 各工况主梁挠度变化量(拉索索力超张拉 10%)

由图 2 可知:在工况 1 时,拉索 C1 初张拉力出现误差时,主梁在 C1 锚固点处的挠度变化量最大,在主跨跨中约 40 m 处,有最小值。且索力增大一定数值与索力减小相同数值对主梁挠度的影响值互为相反数。

由图 3 可得:由于该桥的主梁施工方式为满堂支架施工,初张拉力误差对主梁变形影响较小,当对应的各工况拉索索力超张拉+10%时,C1 对应主梁最大挠度变化约为 0.2 mm;C5、C7、C9、C13 分别为 0.9、1.0、0.5 和 0.3 mm。由此可见,索力增大会引起该索及其相邻范围内的主梁挠度均有一定增加,且在该索锚固处有峰值,整个线形呈光滑的曲线。其中,越靠近中跨处的拉索,引起的变化量峰值越大。

图 4、5 为工况 1、2 拉索索力变化图。

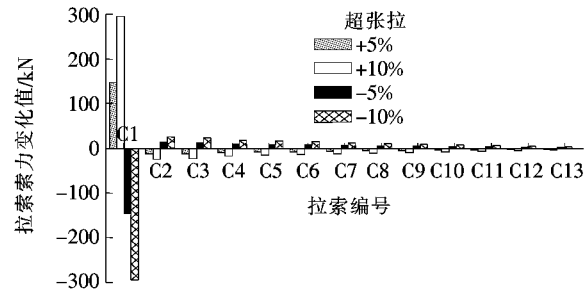


图 4 工况 1 拉索索力变化量

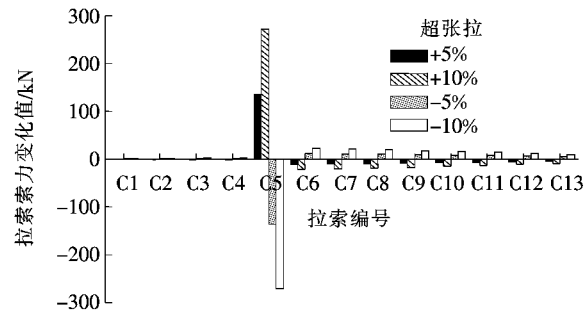


图 5 工况 2 拉索索力变化量

由图 4、5 可得到 1 根拉索索力变化对其他拉索索力变化量的影响。拉索 C1 的初张拉力误差对于主跨其他拉索的索力影响随着其距离 C1 越远而逐渐减小。拉索 C5 的初张拉力误差对于主跨长索的索力影响亦随着其距离 C5 越远而逐渐减小,对短索 C1~C4 的影响可忽略不计。在单根斜拉索初张拉力出现误差时,对主梁的线形、索力都有影响。斜拉索在出现张拉力误差时,对于其所在节段的挠度影响最大,对已施工的斜拉索索力随其距离增大而变小,而对该斜拉索之后施工的斜拉索拉力影响均较小。总体来说,中间索

C7 的影响最大,距 C7 距离增大影响量均有减小趋势,因此,在施工控制中,对于中间部分斜拉索张拉时控制应更严格。

#### 4 主梁顶板厚度浇筑超方对结构的影响

##### 4.1 浇筑超方厚度随机分布

在主梁浇筑过程中,往往会由于各种原因导致主梁顶板厚度浇筑超方或欠方,如立模定位不准、模板尺寸误差、浇筑过程控制不到位等。在浇筑过程中,每个梁段顶板厚度浇筑方量是随机分布的,根据概率设计函数蒙特卡罗方法直接进行 5 次随机抽样,分别为工况 2~6,如表 3 所示,对主梁的影响换算为均布荷载施加于主梁单元上。浇筑过程中理想状态为工况 1。

表 3 浇筑超方工况对应超方厚度

工况号	不同主跨方向坐标(m)对应的超方厚度/cm				
	0~20	20~40	40~60	60~100	100~120
1	0	0	0	0	0
2	1.0	0.3	1.8	1.2	0.9
3	1.6	0.3	0.4	0.6	0.2
4	0.9	1.1	0.3	1.0	0.2
5	1.1	1.4	0.9	0.5	1.4
6	0.4	0.2	0.2	0.9	2.0

主梁顶板厚度浇筑超方对主跨主梁变形的影响结果如图 6 所示。

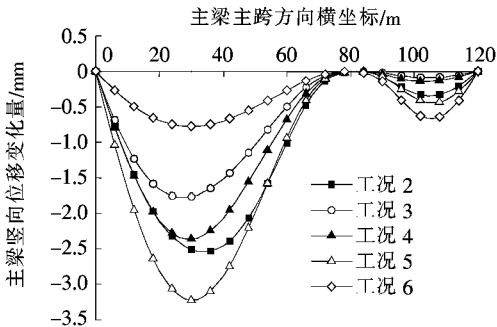


图 6 超方浇筑主梁厚度成桥挠度变化量

由图 6 可知:与工况 1 相比,由于主梁各节段顶板厚度的增加,导致主梁的自重增加,因此工况 2~6 的成桥线形下挠值均有所增加,最大增加值为 3.3 mm,从成桥控制目标分析,远小于 JTG/F80-1-2017《公路工程质量检验评定标准》中成桥高程控制量  $(L/5\ 000+20)=36\text{ mm}$ ,满足施工控制精度需要。

主梁顶板厚度浇筑超方对斜拉索索力的影响结果如图 7 所示。

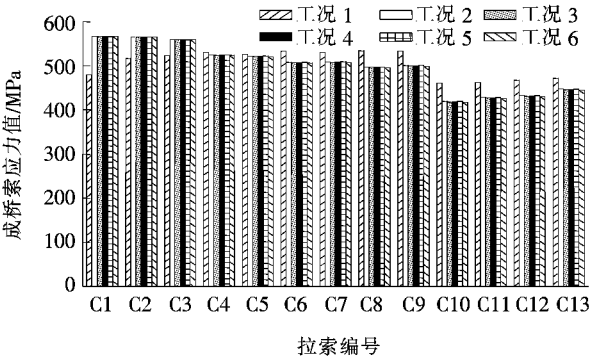


图 7 各工况索力变化值

由图 7 可知:与工况 1 相比,工况 2~6 的成桥索力均有变化,其中最长索 C1~C3 索力增大,而 C4~C13 均有所减小。其中,C1 成桥拉索索力最大增加约 17.8%,数值为 565 MPa,拉索应力均满足规范需要。

主梁顶板厚度浇筑超方对主跨主梁应力的影响结果如表 4 所示。

表 4 不同工况下主梁应力

工况	主梁最大应力/MPa	
	上缘	下缘
1	-8.93	-8.63
2	-8.91	-8.49
3	-8.87	-8.80
4	-8.88	-8.65
5	-8.87	-8.70
6	-8.84	-8.80

表 4 表明:依据前述假定工况,即主梁顶板浇筑厚度超方不超过 2 cm 时,在施工过程中,主梁上、下缘截面应力变化较小,也均未超过设计所规定的应力控制值。

4.2 主梁顶板厚度整体浇筑超方影响

在施工控制中,若因某种因素导致浇筑整体超方,其对桥梁施工控制的影响假定 5 种工况进行分析研究,各工况如表 5 所示。

当主梁顶板浇筑厚度超方时,给主梁造成的影响不仅是其自重发生变化,而且主梁截面也相应发生变化,刚度随之改变,经计算分析,与工况 1 相比,工况 2~5 各截面的刚度分别增加 1.44%、2.88%、4.30%与 5.72%,在进行计算分析时,要考虑刚度的影响。

主梁顶板厚度浇筑超方对主跨主梁变形的影响结

果如图 8 所示。

表 5 整体超方工况

工况号	工况内容
1	未出现浇筑超方现象
2	主梁顶板浇筑厚度超 1 cm
3	主梁顶板浇筑厚度超 2 cm
4	主梁顶板浇筑厚度超 3 cm
5	主梁顶板浇筑厚度超 4 cm

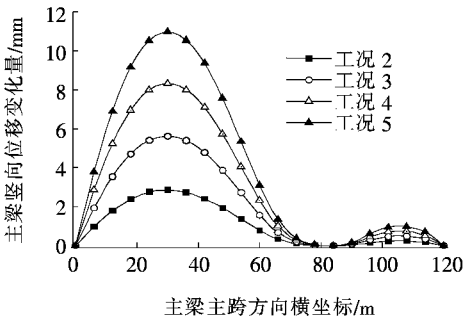


图 8 各整体浇筑工况主梁变形

由图 8 可知:工况 2~5 与工况 1 相比,虽然主梁自重增加,但随着顶板厚度增加,结构刚度增大,其变形反而有所减小。工况 2 比工况 1 最大变形值小 2.85 cm;工况 3~5 比工况 1 分别小 5.62、8.32 和 11.00 cm;因此,从上述计算结果分析,当每节梁段浇筑超方时,对主梁刚度影响更为明显。从成桥控制目标分析,JTG/F80-1-2017《公路工程质量检验评定标准》中成桥高程控制量为 $(L/5\ 000+20)=36\text{ mm}$ ,可推断主梁顶板超方浇筑厚度不应大于 1.5 cm。

主梁顶板厚度浇筑超方对斜拉索索力的影响结果如图 9 所示。

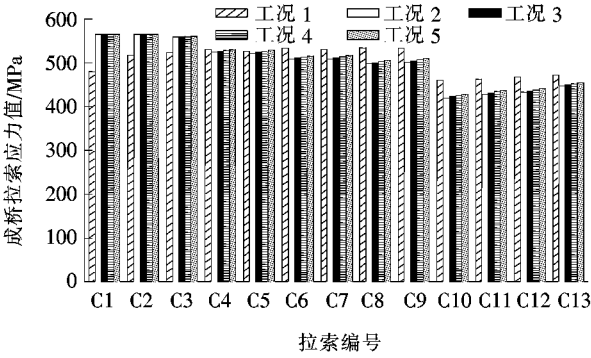


图 9 不同工况下拉索应力分布

图 9 表明:在各工况下,斜拉索成桥索力与工况 1 相比,最长索成桥索力变化最为明显,最大变化量为 17.8%;C4、C5 两根索变化量最小,C6~C13 变化量较

平均。从桥梁施工监控角度考虑,上述工况的索力值变化均未超过成桥索力控制值。

主梁顶板整体浇筑厚度超方时,主梁截面也相应发生变化,刚度随之改变,经计算分析,主梁上、下缘应力计算结果如表 6 所示。

表 6 不同工况下主梁应力

工况	主梁最大应力/MPa	
	上缘	下缘
1	-8.91	-8.49
2	-8.72	-8.72
3	-8.53	-8.94
4	-8.36	-9.17
5	-8.19	-9.40

表 6 表明:当混凝土浇筑厚度增加,在施工过程中,主梁上缘的最大拉应力有所减小,而下缘最大压应力均会增大。

针对上述结果,增加工况 6,对主梁顶板厚度浇筑超方量 1.5 cm 进行计算,计算结果为工况 6 比工况 1 最大变形值小 3.48 cm。从线形、索力及应力等多方面综合考虑,在施工控制过程中,若主梁顶板厚度浇筑超方量在 1.5 cm 以上时,不满足施工控制精度要求。

## 5 结论

(1) 索力增大一定数值与减小相同数值对主梁挠度的影响互为相反数。越靠近中跨处的拉索,引起的变化量峰值越大。

(2) 索力增大会引起该索及其相邻范围内的主梁挠度均有一定增加,且在该索锚固处有峰值。但满堂支架对主梁线形影响均较小,C7 索索力增大 10% 时对主梁的挠度影响量仅为 1 mm。

(3) 主梁的随机超方浇筑控制为 2 cm 时,对结构的主梁线形、拉索应力、主梁上、下缘截面应力变化较小,且满足规范要求。

(4) 主梁的整体超方浇筑会影响主梁的刚度,依托工程建议主梁整体超方不应超过 1.5 cm,否则影响

主梁线形验收。

## 参考文献:

- [1] 陈明宪.斜拉桥的发展与展望[J].中外公路,2006(4).
- [2] A.C. Aparicio, PE&J. R. Casas, The Alamillo Cable-Stayed Bridge Special Issues Faced in the Analysis and Construction[J].Journal of Proc Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs,1997,122(6):432-450.
- [3] 黄月超.无背索斜拉桥施工控制关键技术[D].长安大学硕士学位论文,2014.
- [4] 项海帆.21 世纪世界桥梁工程的展望[J].土木工程学报,2000(3).
- [5] Kovacs I,Svensson H.Analytical Aerodynamic Investigation of Cable-Stayed Helgeland Bridge[J].Journal of Structure Engineering,1992,118(1):147-168.
- [6] 李春.外倾式矮塔斜拉桥墩塔设计实践[J].中外公路,2019(3).
- [7] Mark Andrew Bradford. Deflections of Composite Steel-Concrete Beams Subject to Creep and Shrinkage[J].Journal of ACI Structural,1991,88(5):191-205.
- [8] 舒林,许红胜,曾毅杰,等.影响斜拉索运营寿命的各种因素分析[J].中外公路,2017(1).
- [9] WON J H, PARK S J, YOON J H, et al. Structural Effects of Partially Earth-Anchored Cable System on Mediumspan Cable-Stayed Bridges [J]. International Journal of Steel Structures,2008,8(3):225-236.
- [10] 曾洋,冯仲仁.混合梁斜拉桥塔梁同步施工中主塔偏位影响因素分析[J].中外公路,2017(6).
- [11] 陈爱军,邵旭东.无背索竖琴式斜拉桥合理结构体系分析[J].中外公路,2009(4).
- [12] 杨婧.斜塔无背索部分斜拉桥静力性能与动力性能分析[D].长安大学硕士学位论文,2008.
- [13] 游峰.独塔无背索弯坡斜拉桥受力分析与施工控制研究[D].武汉理工大学硕士学位论文,2007.
- [14] 熊飞,陈从春.矮塔斜拉桥与普通斜拉桥经济特性比较研究[J].中外公路,2016(1).
- [15] 胡荣金.无背索独塔斜拉桥几何非线性分析[D].合肥工业大学硕士学位论文,2009.
- [16] 徐林,刘琪.基于无应力状态控制法的斜拉桥安装计算方法研究[J].中外公路,2019(1).