DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.031

独塔非对称斜拉桥π梁温度监控及受力分析

杨怡莹，孙全胜
（东北林业大学，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要：斜拉桥属于超高静定结构，受力较为复杂，为研究混凝土水化热反应时间规律及张拉横向预应力钢束对混凝土π梁的影响，在吉林某斜拉桥施工过程中进行30 d的温度监控，同时在张拉横向预应力钢束时，进行标高及应变的监测，得出π梁各部分混凝土水化热反应规律以及张拉横向预应力钢束会引起主梁起拱的结论，笔者运用Midas/Civil 2013进行建模分析，提出解决方案，较好地解决了主梁温度场效应引起裂缝和起拱引起主梁脱架的安全问题。

关键词：斜拉桥；π梁；温度场；脱架；裂缝

混凝土π梁具有横向刚度大、方便施工等优点，特别对于斜拉桥受力体系，非常合适，但国内外桥梁多采用箱梁、T梁等截面形式，原因是π梁在施工期间，由于温度场效应很容易产生裂缝，裂缝产生时间一般在混凝土硬化过程中，即混凝土收缩和水化热反应产生的拉应力可能会超过该龄期混凝土极限抗拉强度。虽然各国对于混凝土水化热反应和混凝土开裂问题进行了许多研究，但多数针对大体积混凝土，或者坝体结构防裂方面，而对于π梁的研究相对很少。

π梁与大体积混凝土相比较，具有与外界接触相对面积较大、横断面不规则等特点，这也导致其温度场效应分析较为复杂。因此该文以吉林省某在建斜拉桥为背景，研究探讨混凝土π梁各部位混凝土水化热反应变化规律及对产生裂缝进行理论分析。同时，在施工过程中，发现当单独张拉横向预应力钢束时，主梁会发生起拱，引起主梁提前脱架，脱架延伸至两侧主梁梁肋，待后期桥梁受力体系转变、张拉拉索时，很容易导致支架失稳，造成严重的施工事故。为此，笔者通过Midas/Civil 2013建模分析，调整施工顺序，以便解决该问题。

1 工程概况

实例桥位于吉林省，主桥采用(39.9＋89.1＋151) m“H”形独塔双索面预应力混凝土斜拉桥，按两幅桥设计，全桥采用满堂支架施工工艺，主桥全长280 m，每幅桥宽27 m，采用墩塔梁固结体系，桥面以上部分塔高67 m，主梁端部高2.3 m，索塔高度与主跨的比约为1/2.3，主梁主跨的高跨比为1/65.7，主桥两侧分别布置18对空间斜拉索，斜拉索在梁上的索距为7.8 m，边跨随着节段长度的变化，索距相应为7.8、7.3和4.25 m。主梁的基本断面形式为π形梁，截面顶全宽26.5 m，截面中心高2.565 m，设双向2%横坡。塔顶高程117.318 m，承台以上塔柱总高85.018 m，两上塔柱横向净距20.9 m。塔柱采用空心矩形截面，上塔柱及中塔柱顺桥向全宽6.8 m，横桥向全宽4.0 m。下塔柱顺桥向全宽由6.8 m向底部加宽到8.8 m，横桥向宽度渐变为7.5 m。全桥桥型总体布置图如图1所示。

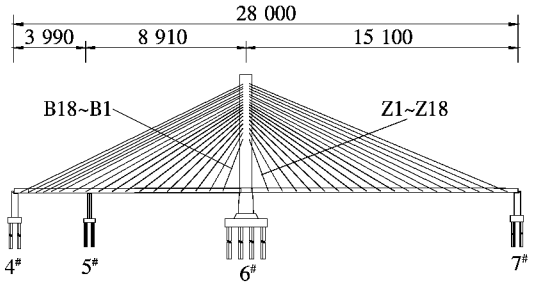


图1 桥梁整体布置图(单位:cm)

2 现场测试及分析计算

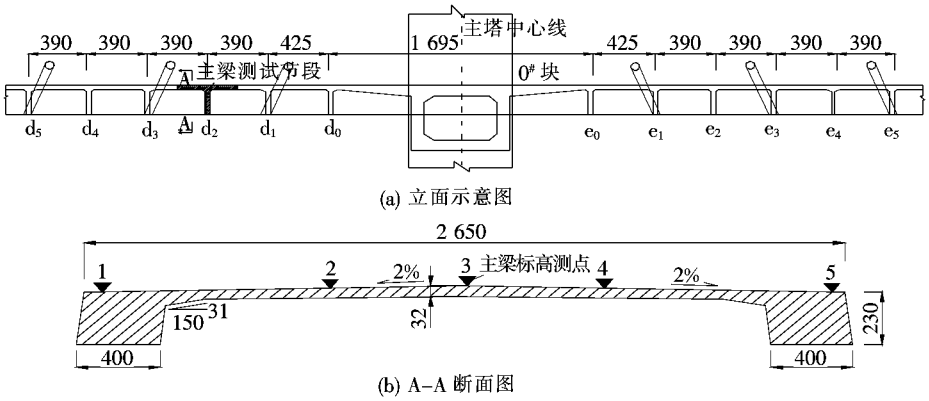
2.1 测点布置

π梁比大体积混凝土承台等的温度分析还复杂，为研究其温度场变化规律，根据其对称性及截面特点，进行1/2断面温度传感器(型号JMT－36B)和应变传

收稿日期：2018－10－09

作者简介：杨怡莹，女，硕士研究生，E－mail：m13199465265@163.com

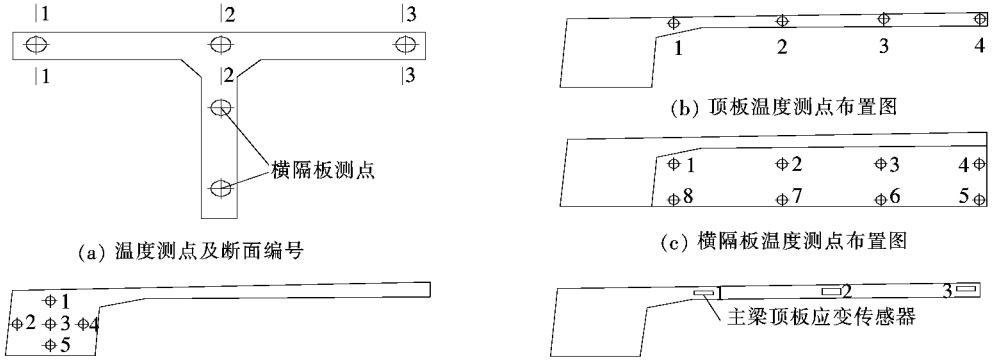
感器(型号 JMZX－215A)测点布置,分别在主梁顶板(12 个测点)、主梁肋(5 个测点)、主梁横隔板(6 个测点)布置,共计 23 测点,采用 JMZX2001 综合测试仪进行数据采集。具体测点布置如图 2、3 所示。



(a) 立面示意图

(b) A-A 断面图

图 2 主梁一般构造图(单位:cm)



(a) 温度测点及断面编号

(b) 顶板温度测点布置图

(c) 横隔板温度测点布置图

(d) 梁肋温度测点布置图

(e) 横隔板应变计测点布置图

图 3 主梁测点布置示意图

2.2 Midas/Civil 计算模拟

斜拉桥属于超高静定结构体系,在桥梁体系转化过程中,要严格控制各部分受力的整体性和协调性。在张拉横向应力钢束时,引起主梁起拱,主梁与支架提前脱空,待张拉拉索时,很容易引起支架失稳,导致严重的安全事故。横隔板一般构造图如图 4 所示。

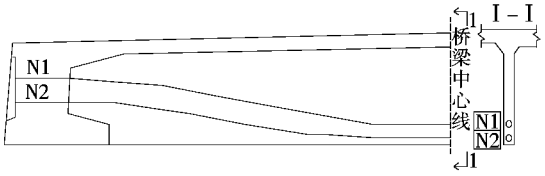


图 4 横隔板一般构造图

计算分析软件采用 Midas/Civil 2013 对桥梁施工进行仿真模拟计算和施工荷载影响分析,模型共建立 536 个节点,378 个单元。全桥模型如图 5 示。

针对张拉横隔板钢束起拱问题,笔者运用 Midas/Civil 2013 进行局部模拟,以确保有限元模型与实际工程绝对吻合。

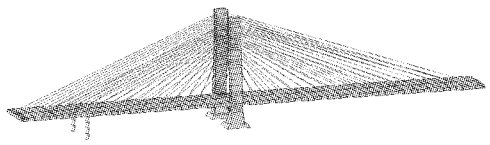


图 5 全桥空间有限元模型

单元建立:单元总长度取横隔梁长度和主梁肋宽度总和作为模拟单元总长度;截面选取:横隔梁截面取 2.3 m 高、0.3 m 宽,横隔梁截面和 4.0 m 宽桥面板 T 形作为横隔梁长度段模拟截面;边界条件:按照简支梁进行模拟计算,两端铰接。模型如图 6～8 所示。

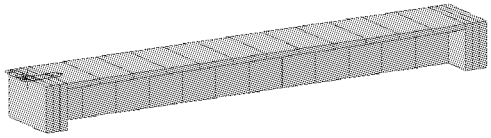


图 6 横隔板空间有限元模型图

由图 6～8 可知:单独张拉钢束 N1,主梁跨中挠度为－0.3 mm,未脱离支架,张拉钢束N1、N2主梁跨中

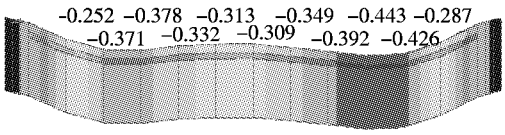


图 7　张拉钢束 N1 主梁位移图(单位：mm)

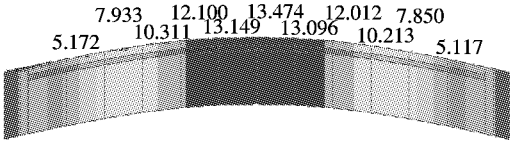


图 8　张拉钢束 N1、N2 主梁位移图(单位：mm)

挠度为 13 mm，已经脱离支架。

2.3　现场数据采集

为总结 π 梁混凝土水化热反应时间规律，笔者对主梁进行 30 d 连续温度数据采集，2015 年 5 月 31 日浇筑试验段混凝土，于 2015 年 6 月 1 日—2015 年 6 月 30 日对混凝土温度进行连续监测，测试时间安排为：浇筑后达到峰值前，每隔 2 h 进行一次测量，峰值后，每隔 6 h 进行一次测量；待温度值达到一个趋于平稳的状态时，每天进行 2 次测量。同时，对大气温度进行实时采集，经过实际测量，整月温度较为平稳，无特殊天气，夜间最低温度为 8～12 ℃，白天最高气温为 19～28 ℃。

同时，待后期张拉横向预应力钢束时，在横隔板断面处，桥面均匀布置 5 个测点(图 2)，进行标高的测定，并采集预先埋置好的应变传感器进行相关读数，根据应变、应力、弹性模型之间的关系，换算应力值。

3　数据结果与分析

3.1　温度测试结果

根据 30 d 混凝土温度监测结果，水化热反应大致可以分为 3 个阶段：升温阶段、降温阶段、稳定阶段。从浇筑混凝土到升至最高温度，大约需要 14 h，从最高温度降至稳定温度，大约需要 200 h，而对于 π 梁不同位置所达到的最高温度也不一样，梁肋最高温度明显高于其他位置，横隔板和顶板最高温度较低一些。由于各个位置混凝土水化热反应整体规律大致一样，限于篇幅，笔者仅给出顶板截面 1－1～1－4 的温度－时刻曲线作为参考(图 9)，具体温度变化规律如表 1～3 所示。

从实测数据和表 1～3 可以明显看出：主梁梁肋峰值温度要高于顶板和横隔板，顶板和横隔板厚度较小，

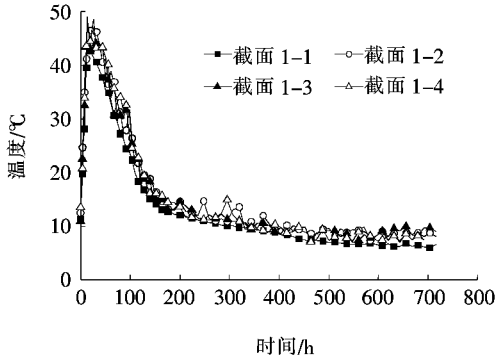


图 9　顶板截面 1 横断面图

表 1　主梁梁肋各测点峰值温度

测点	最高温度/℃	经历时间/h
1	49.8	12
2	53.2	10
3	86.4	22
4	65.2	14
5	56.1	14

表 2　主梁顶板各测点峰值温度

横断面	测点	最高温/℃	经历时间/h
横断面 1	1	44.5	12
	2	47.4	14
	3	49.1	10
	4	48.7	14
横断面 2	1	41.3	14
	2	38.9	16
	3	44.9	10
	4	40.5	18
横断面 3	1	38.3	10
	2	41.9	12
	3	44.3	12
	4	45.2	16

表 3　横隔板各测点峰值温度

测点	最高温/℃	经历时间/h
1	45.7	12
2	40.2	10
3	39.8	12
4	46.9	14
5	29.6	8
6	30.8	8
7	27.1	6
8	32.4	10

其各自峰值温度大致相同，且各自经历时间也相差不多；同时，梁肋中心温度要高出其周围位置 20～35 ℃，大于施工规范要求的 25 ℃，这也是引起主梁裂缝的重要原因之一。

3.2 标高测试结果

预应力钢束可大大改善混凝土受力性能、提高耐久性等，在桥梁设计和施工过程中是不可缺少的部分。在该斜拉桥施工过程中，采用 WILDNAK2 型水准仪配套 GFS1 平板测微器（可估读至 0.01 mm）量测主梁起拱，发现当张拉横向预应力钢束时，主梁跨中起拱最大值达到 13.12 mm（理论计算值为 13.47 mm），且起拱脱架延伸至主梁两侧梁肋处，待张拉拉索时，很可能会发生支架失稳，主梁倒塌的严重施工后果。为安全起见，仅选择 d0～d2，e0～e2（具体编号见图 2、3）横隔板作为试验对象，具体数据如表 4 所示。

从表4可以明显看出：当张拉钢束N1、N2后，主梁横向会发生明显的起拱现象，如果按照原设计施工顺序进行施工，即钢束张拉完毕后进行拉索张拉，将会有严重的安全隐患，如果不张拉钢束进行索力张拉，很可能会使主梁跨中产生拉应力，引起裂缝。

表 4 主梁各测点起拱数据

测点 d0	起拱/mm	测点 d1	起拱/mm	测点 d2	起拱/mm	测点 e0	起拱/mm	测点 e1	起拱/mm	测点 e2	起拱/mm
1	0.32	1	0.22	1	0.18	1	0.29	1	0.11	1	0.32
2	10.42	2	9.89	2	9.79	2	9.78	2	9.12	2	10.32
3	12.61	3	13.12	3	12.03	3	11.83	3	12.14	3	11.52
4	9.45	4	10.23	4	10.12	4	9.27	4	9.66	4	9.44
5	0.21	5	0.19	5	0.28	5	0.16	5	0.25	5	0.21

4 问题分析及解决办法

4.1 裂缝分析及处理方法

根据该桥的试验研究和国内外研究理论可以总结出 π 梁裂缝产生原因主要有：① 混凝土水化热反应，引起中心和外层混凝土温差较大，最终导致开裂；② 混凝土浇筑时间过长，时间一般要大于混凝土初凝时间 12 h，在这期间，混凝土没有得到较好的养护，硬化过程中缺少洒水而导致裂缝；③ 振捣质量不好，有大量气泡；④ 拆模时间过早，水面会有较强烈的风，在这种情况下，混凝土会因水分过快收缩，容易产生裂缝。

根据以上分析，建议采取以下方法避免混凝土 π 梁发生早期开裂：① 根据混凝土温度变化规律，选择合适的浇筑时间，同时采取合理的时间进行混凝土养护，降低内外温差过大的影响；② 加强混凝土振捣质量，防止振捣不均匀；③ 选择合理时间进行模板拆除，避免过早拆模产生裂缝，同时注意拆模后混凝土的保温、洒水等养生工作；④ 混凝土浇筑过程中，禁止随意加大水量，要求控制好混凝土坍落度。

在该桥主梁施工过程中，严格依靠所述方法和理论进行控制，未发现大面积裂缝出现，起到了较好的预防作用。

4.2 起拱问题解决方案

考虑工期等原因，该桥索力采用 2 次张拉到位的方案。结合 Midas/Civil 模型，将张拉拉索和张拉钢束较好地结合进行施工。在模型分析及实际工程中，采取了以下几种对比方案：① 单独张拉钢束 N1，然后 2 次张拉索力到成桥索力，会引起主梁顶板上缘拉应力最大值达到 2.24 MP，接近混凝土抗拉极限强度；② 张拉钢束 N1、N2，而后张拉索力，索力未全部张拉到位前，会导致主梁脱架失稳；③ 首先张拉钢束 N1，然后初张拉索力，而后二次张拉拉索，同时张拉此拉索附近的钢束 N2（如张拉 1# 索，此时张拉 d0、d1、d2、e0、e1、e2 的钢束 N2），这样施工安全问题迎刃而解。

5 结论

结合 Midas/Civil 建立有限元模型，与实际工程相结合，针对斜拉桥 π 梁各部分混凝土水化热反应规律和张拉横向钢束起拱问题进行研究，得出以下结论：

（1）混凝土水化热反应大致可以分为 3 个阶段：升温阶段，降温阶段，稳定阶段。大约 14 h 可以达到温度峰值，经过 200 h 会达到温度稳定阶段；π 梁顶板和横隔板各个位置温度相差不大，而对于梁肋处，其中心温度要高于周围温度 20～35 ℃。基于此规律，笔者提出选择合适时间浇筑混凝土、提高振捣质量、控制浇筑混凝土坍落度、注意拆模时间和养护等方法解决早

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.032

悬索桥浅滩区钢桁梁吊装施工新技术

袁理，黄影，赵宇清
（湖南路桥建设集团有限责任公司，湖南 长沙 410004）

摘要：以解决悬索桥浅滩区钢桁梁吊装为目的，该文以大岳高速洞庭湖大桥A1标钢桁梁吊装施工为背景，开发了一种新的悬索桥浅滩区梁段吊装施工技术。该技术根据悬索桥主缆与钢桁加劲梁的空间结构特点，对悬索桥主缆施工时已有的卷扬机、钢丝绳、转向轮、滑轮组等设备进行二次利用，在浅滩区范围进行施工布置，使之能应用于后续的浅滩区钢桁梁吊装施工，并在洞庭湖大桥钢桁梁施工中取得了良好的效果。该技术操作简便、经济性好、安全性高、对环境影响小。

关键词：钢桁梁；临时起吊系统；钢栈桥；浅滩区

1 工程概况

大岳高速洞庭湖大桥位于洞庭湖入长江的湘江洪道，全长2 390.18 m，主桥设计为(1 480＋453.6) m双跨钢桁加劲梁悬索桥，钢桁梁主桁架为带竖腹杆的华伦式结构，标准梁段长16.8 m，桁高9.0 m，桁宽35.4 m，最大重量约320 t。

该标段浅滩区的钢桁加劲梁共计17个梁段，其中需跨越防洪大堤、七里山港区及湘江航道，水上交通繁忙，施工环境复杂，安全风险大。根据海事要求，浅滩区梁段施工应尽量减少对航道及港口的影响。经过安全、成本、可操作性等方面比选，决定采用临时起吊系统将浅滩区钢桁梁吊装至栈桥，平移到位后再采用缆载吊机垂直吊装。

2 方案比选

大桥下方湘江航道水运繁忙，主航道靠近岳阳岸一侧，按照海事部门要求，施工期间不得断航。根据以上施工条件，先后拟定了以下3种施工方案：

方案1：搭设运梁栈桥至深水区域，通过浮吊将钢桁梁直接吊装至栈桥上，之后将梁段移运至设计位置，通过缆载吊机进行吊装。

方案2：在运梁栈桥前端增加一台缆载吊机，专门用作钢桁梁起吊荡移上栈桥的设备。

方案3：采用一套由25 t卷扬机、钢丝绳、转向轮、临时索夹、滑车组、吊索及水平牵引索组成的临时起吊系统，将钢桁梁起吊荡移上栈桥。

各方案的技术指标比选见表1。

****

期温度场开裂问题，应用于实际工程，起到了良好的效果。

(2) 针对张拉横向预应力钢束引起主梁起拱、脱架，导致主梁失稳。笔者运用Midas/Civil建立有限元模型，结合实际工程，提出“张拉钢束N1→初张拉索力→二次张拉索力(同时张拉附近钢束N2)”的方案，确保施工安全，很好地解决该问题。

参考文献：

[1] 李琦，陈骑彪，王鹏.混凝土斜拉桥π型主梁早期温度场测试分析[J].公路交通技术，2012(4).
[2] 郭健.混凝土斜拉桥主梁的非稳态温度场与应力场分析[J].中国公路学报，2005(2).
[3] 汪建群.大跨预应力混凝土箱梁桥早期开裂和远期下挠控制[D].湖南大学博士学位论文，2011.
[4] 王宗林，孙勇，李国栋.寒冷地区冬季施工大体积混凝土温度控制[J].中外公路，2015(5).
[5] 李巍，石振武，姜洪伟，等.寒区独塔斜拉桥支架施工控制过程仿真分析[J].中外公路，2015(1).

收稿日期：2018－11－30