

弧形预应力混凝土屋面箱梁的施工监测研究*

卜良桃[†], 郑孟辉

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 施工监测关系到工程结构的安全,而目前行业内关于建筑工程中弧形预应力混凝土箱梁的工程施工监测研究很少.结合某学生活动中心场馆的工程实际,为确保施工过程的安全,针对屋面结构中受力较大的异形箱梁构件,制定了专门的监测方案,进行施工全过程跟踪监测.采用有限元分析软件 Midas Gen 对该场馆“蝴蝶形”屋面结构的施工过程进行数值模拟,按照实际施工步骤,利用单元生死技术分析了屋面关键构件箱梁的应力和位移变化过程,并将实际监测数据与数值模拟结果进行对比.研究表明,实际监测结果与模拟结果吻合较好,证明该施工模拟方法的可行性;施工过程中箱梁的应力及位移在可控范围内,满足施工验收要求.该工作和研究成果对建筑工程中类似大型异形构件的设计和施工有重要的参考价值.

关键词: 施工监测; 施工模拟; 箱梁; 预应力混凝土

中图分类号: TU745.2

文献标志码: A

Study on Construction Monitoring of Curved Prestressed Concrete Roof Box Girder

BU Liangtao[†], ZHENG Menghui

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Construction monitoring is related to the safety of engineering structure. However, the research of construction monitoring is limited in building engineering involved with curved prestressed concrete box girder. Combined with engineering practice of a student activity center venue, the monitoring scheme was made and conducted to ensure the safety in erection process for the curved box girder subjected to large force at the same time, and to keep tracking the whole process of construction. Construction simulation for a butterfly-shaped roof structure of the venue was conducted based on Midas Gen finite element software. According to the actual construction process and the element birth and death technology, the stress and displacement changing tendency of the roof box girder were analyzed in detail. The results derived by the monitoring and simulation were compared. The results show that the simulation method was validated by the good agreement between the results obtained from monitoring and simulation. The stress and displacement of the box girder are in control, and the construction scheme can satisfy the need of con-

* 收稿日期:2016-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278187), National Natural Science Foundation of China (51278187); 国家火炬计划项目(2013GH561393), China Torch Program(2013GH561393)

作者简介:卜良桃(1963—),男,湖南南县人,湖南大学教授,工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: plt63@126.com

struction. The research results provide important reference for the design and construction of the similar large profiled component in building engineering.

Key words: construction monitoring; construction simulation; box girder; prestressed concrete

随着科技的进步和社会发展,现代建筑工程中出现了很多体型复杂的结构和构件,该类建筑满足了人们对审美和使用功能的最新要求,代表了社会经济和施工水平的新高度,但同时也对施工模拟和施工监测提出了更高的要求。

早在 20 世纪 80 年代,日本在修建日野预应力混凝土连续梁桥时,便开始在施工过程中对预应力梁进行应力和挠度等参数进行实时监控^[1]。随后,施工监测在不同类型的桥梁上展开和应用^[2-3]。21 世纪初,美国、日本等经济发达国家将施工监测应用到高层建筑和大型混凝土工程等建筑工程的健康监测中^[4-5]。近年来,国内的一些大型大跨空间结构也开始采用实时监控的方法进行施工控制和工程预警^[6-7]。如曾志斌等人^[8]对国家体育场“鸟巢”钢结构卸载过程中应力变化历程进行跟踪监测,取得满意的效果;赵中伟等人^[9]对于家堡交通枢纽站房网壳施工过程进行的施工仿真分析与监测,为施工的顺利进行和安全提供了技术保障。

然而,以往的施工监测研究都仅涉及桥梁工程、高层建筑和大跨空间网架钢结构等结构,所监测的结构中单个构件截面较简单、形状较规则,也未涉及建筑工程中单个大尺寸异形构件。目前行业内很少有关于房屋建筑中的变截面大尺寸弧形预应力箱梁的施工监测研究,由于箱梁构件在建筑工程中的边界条件、荷载状况和施工方法与其他领域有很大区别,为此,笔者结合工程实际,依托某学生活动中心场馆工程,对该工程两根跨度为 48.1 m 的弧形预应力混凝土屋面箱梁进行施工监测,研究箱梁构件在施工过程中的受力与变形情况。

1 工程概况

某学生活动中心场馆为“蝴蝶”式造型的钢筋混凝土结构,总建筑面积为 16 259 m²,地上 3 层,主体结构高度为 21.7 m。屋面为倾斜的整体式梁板结构,两根主梁为最大跨度 48.1 m 的预应力混凝土箱形截面连续梁,箱梁为小半径弯曲造型,半径为 100 m。箱梁截面宽度为 4.0 m,高度由 4.5 m 逐渐变化到 3.5 m,在箱梁顶板、底板和腹板共设置 26

根预应力钢束。图 1 为实际工程图,图 2 为屋面结构示意图,图 3 为箱梁截面示意图,图 4 为屋面结构布置平面图。



图 1 工程立面图

Fig.1 Engineering elevation

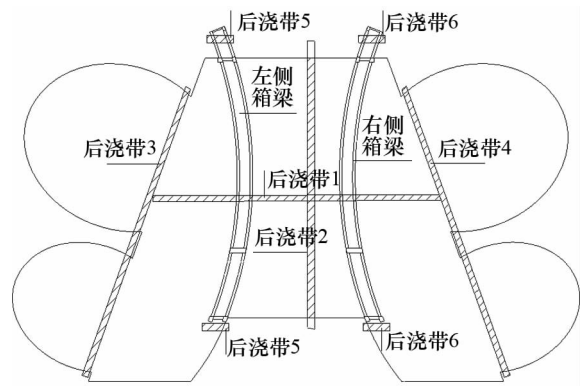


图 2 屋面结构示意图

Fig.2 Roof structure layout

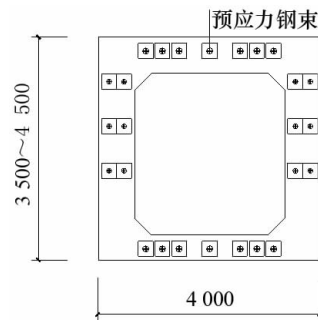


图 3 箱梁截面示意图

Fig.3 The section of box girder

本场馆屋面结构的主体承载部分是由两根预应力弧形箱梁、55 根预应力矩形梁和其余普通钢筋混凝土梁组成的倾斜平面,采用空间原位现浇法进

行施工,通过分段、分批张预应力钢筋束,将箱梁与其他梁板连成屋面整体结构.该屋面结构的主要施工工序为:支撑体系布置;分区浇筑混凝土;第1批张拉:封闭后浇带1和后浇带2,张拉预应力箱梁;第2批张拉:封闭后浇带5和后浇带6,张拉结构蝴蝶

蝶身体部分的预应力梁;第3批张拉:封闭后浇带3和后浇带4,张拉结构蝴蝶翅膀部分的预应力梁;待预应力混凝土屋面主体结构完成后,进行屋面的外保温、防水以及装饰等的施工.

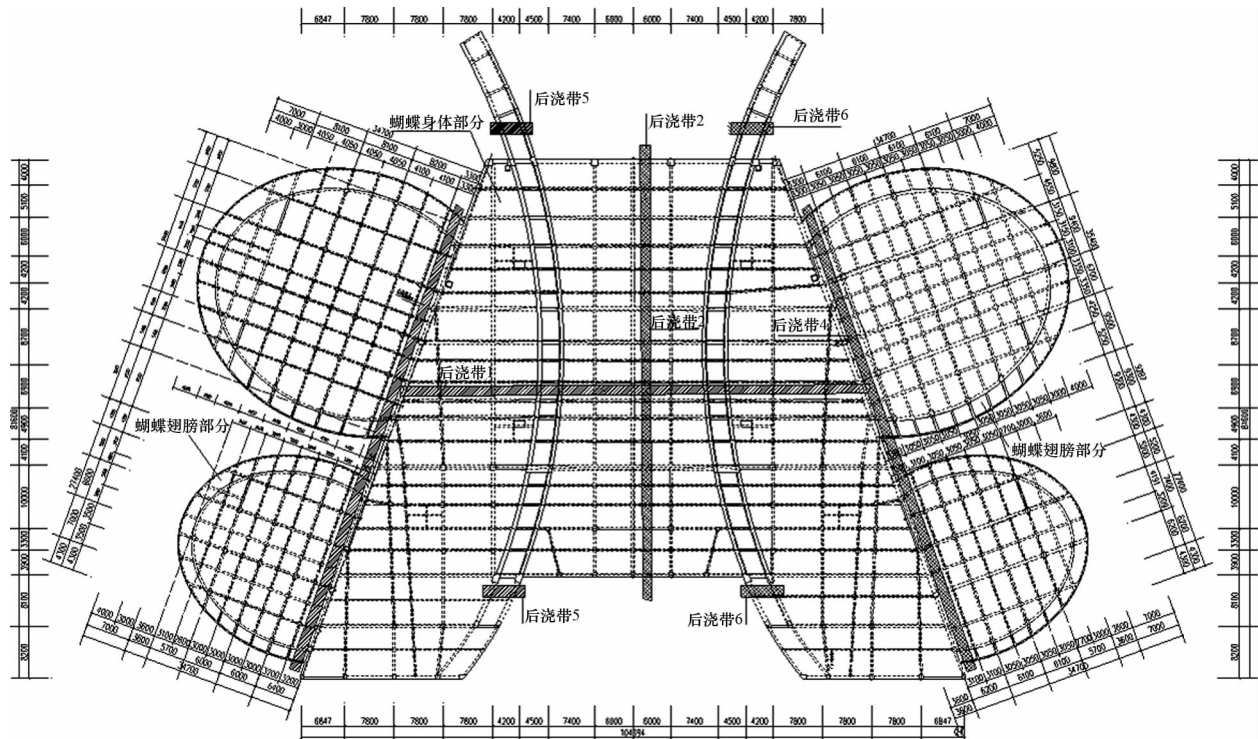


图4 屋面结构布置平面图

Fig.4 Roof structure layout plan

2 监测方案

2.1 监测系统

根据结构受力特点及控制结构性能的关键参数,确定如下监测内容:1)箱梁控制截面的混凝土应变及普通钢筋应力;2)箱梁控制截面的竖向变形;3)箱梁控制截面的横向变形.监测系统由测量子系统、数据采集子系统和数据分析子系统组成^[10].

1)测量子系统.根据监测内容,在箱梁控制截面测点处布设传感器,用于获得荷载作用下箱梁构件的响应信息.测量子系统由电阻应变片、振弦传感器和数字全站仪组成.

通过应变监测得到箱梁测点的混凝土应力,分别在控制截面处箱梁顶板、腹板和底板表面粘贴电阻应变片测量不同测点处混凝土的应变.考虑到现场箱梁表面温度变化较大,箱梁本身会产生一定的温度变形,应变测试仪器需要进行温度修正.现场进行混凝土应变监测时,设置温度补偿片,采用桥路

补偿法消除温度的影响.考虑到导线电阻、温度变化和分布电容等可能对测量结果造成影响,布置测量导线时,同一桥路的应变片采用等长的导线并沿途固定在一起,减少导线间的相互移动,并采用尽可能短的连接导线.

采用振弦式应力计量测箱梁混凝土应变测点位置处的钢筋应力.在控制截面钢筋测点处将钢筋应力计与结构受力钢筋对焊,待混凝土初凝后测量各种施工荷载下的普通钢筋应力.

箱梁浇筑完毕后,通过设定的基准点利用数字全站仪测量箱梁控制截面定位点的实际高程和横向位移,并以此数值作为参考,量测箱梁各个施工阶段的竖向变形和横向变形.

2)数据采集子系统.采集传感器传来的信息,对模拟信号进行调制、处理,转换为数字信号.数据采集子系统由静态电阻应变仪、振弦读数仪和计算机组成.

3)数据分析子系统.处理、分析传输来的数字信号,得到所需要的图、表,并判别是否需要预警.

2.2 测点布置

本次监测中,在两根箱梁间对称地设置控制截面,控制截面位于箱梁各跨的支座、跨中和 1/4 跨的位置.在箱梁每个控制截面上布置 8 个混凝土测点, Y1, Y2, Y3 布置在箱梁顶板; Y4, Y5 布置在箱梁两侧腹板; Y6, Y7, Y8 布置在箱梁底板.在相应混凝土测点附近布置普通钢筋测点.测点布置如图 5 所示,控制截面位置如图 6 所示.

2.3 量测频次

据设计要求和现场施工方案,本工程屋面施工分为以下 5 个施工阶段:1)工况 1,第 1 批张拉前;2)工况 2,第 1 批张拉后;3)工况 3,第 2 批张拉后;4)工况 4,第 3 批张拉后;5)工况 5,施工完毕.为了

全过程跟踪结构的内力和位移变化,分别在各施工阶段测量屋面箱梁的控制参数.

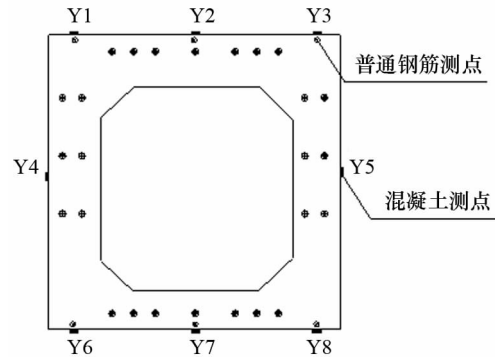


图 5 控制截面测点布置图

Fig.5 Distribution of monitoring points on control section

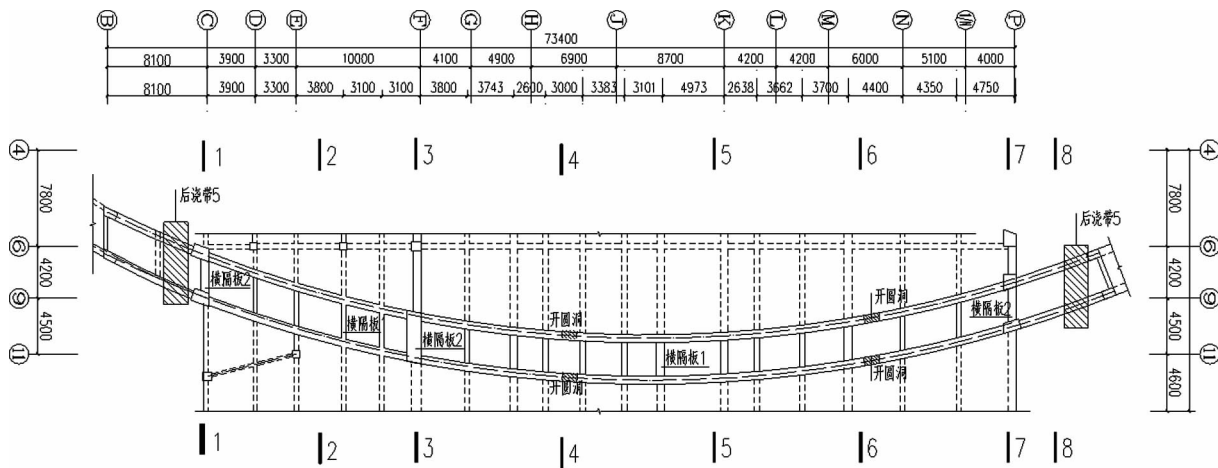


图 6 箱梁控制截面位置

Fig.6 Control section position of box girder

3 监测结果

3.1 混凝土应力

本文以箱梁关键性控制截面 5 处混凝土应变测点 Y1, Y3, Y6 和 Y8 所埋设传感器所采集的数据为研究对象,其结果见表 1.

表 1 箱梁截面应力监测值

测点位置	工况				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
左 Y1	-0.19	-3.09	-6.37	-6.53	-8.74
左 Y3	-0.16	-2.96	-6.24	-6.50	-8.48
左 Y6	0.13	-1.46	1.49	1.62	3.64
左 Y8	0.16	-1.30	1.72	1.69	3.54
右 Y1	-0.16	-2.96	-6.18	6.34	-8.61
右 Y3	-0.09	-3.38	-6.53	-6.27	-8.64
右 Y6	0.09	-1.59	1.56	1.72	3.67
右 Y8	0.16	-1.49	1.66	1.72	3.70

3.2 普通钢筋应力

对于普通钢筋的应力,本文以箱梁关键性控制截面 5 处混凝土应变测点 Y1 和 Y3 附近所布置的钢筋应力计所采集的数据为研究对象,用来验证混凝土监测数据的可靠性,其结果见表 2.

表 2 截面 5 钢筋应力监测值

测点位置	工况				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
左 Y1	-0.9	-17.5	-37.8	-38.2	-51.8
左 Y3	-0.8	-17.2	-36.4	-37.3	-51.2
右 Y1	-0.7	-16.7	-38.0	-39.3	-52.7
右 Y3	-0.6	-18.8	-38.2	-38.6	-52.4

3.3 竖向位移

表 3 中列出了箱梁竖向变形最大处控制截面 5 在施工过程中各个施工阶段的监测值.

表3 截面5竖向位移监测值
Tab.3 Monitoring value of vertical deformation
of 5th section mm

测点 位置	工况				
	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
左侧	-6.23	-3.67	-23.17	-24.77	-32.33
右侧	-6.45	-1.95	-22.55	-25.21	-31.48

3.4 横向位移

预应力屋面箱梁平面呈弧形,张拉预应力钢筋束后会产生侧向位移,对平面内其他梁板构件的内力产生影响,因此需在箱梁预应力张拉过程中对箱梁的横向位移进行监测,即对工况2中箱梁的横向位移进行量测.表4中列出了工况2中箱梁横向变形的施工监测值,变形值以水平向右为正.

表4 箱梁横向位移监测值
Tab.4 Monitoring value of vertical deformation
of 5th section mm

工况2	控制截面							
	1	2	3	4	5	6	7	8
左侧	1.94	1.45	-1.21	-3.42	-5.28	-3.32	0.45	1.12
右侧	-2.04	-1.56	1.08	3.23	5.12	3.12	-0.79	1.02

4 施工过程模拟

本工程采用有限元分析软件 Midas Gen 基于一次性建模的正装分析法进行模拟,该软件可以真实模拟其屋面结构的施工全过程.施工阶段的分析需要考虑以下两方面内容:①时间依存性材料的特点,材料的徐变、收缩和强度变化.②施工阶段所包含的内容,施工阶段中单元的激活与钝化;施工阶段中荷载的添加或删除;构件或结构边界条件的变化.首先建立了该场馆主体结构的整体三维有限元模型,再按照施工步骤、工期进度进行施工阶段定义,程序按照控制数据进行分析.整体模型见图7,预应力箱梁模型见图8.利用软件程序中单元生死功能,在分析某一施工步骤时,钝化该施工步骤之后的所有构件及需要加载的荷载工况,仅激活该步骤之前完成的构件参与运算,以实现箱梁不同施工阶段的受力分析^[1].根据设计要求和现场施工方案,施工模拟工况分为:1)第1批张拉前,箱梁承受结构自重,由于此时支撑系统的存在,箱梁基本处于无应力状态.2)第1批张拉后,箱梁内力在自重和预应力作用下重新分布.3)第2批张拉后,需考虑由其他屋面梁传来的蝴蝶身体部分的屋面梁、板自重.4)第3批张拉后,需考虑由其他屋面梁传来的蝴蝶

翅膀部分的屋面梁、板自重.5)施工完毕后,需考虑屋面的外保温、防水以及装饰等荷载.

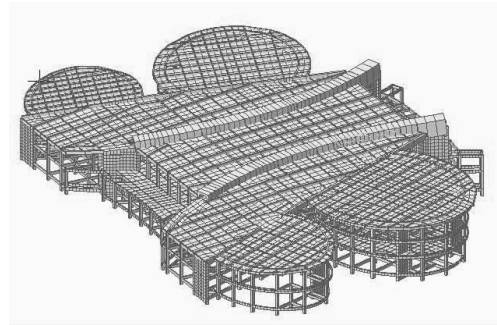


图7 有限元分析整体模型图

Fig.7 Finite element model of engineering

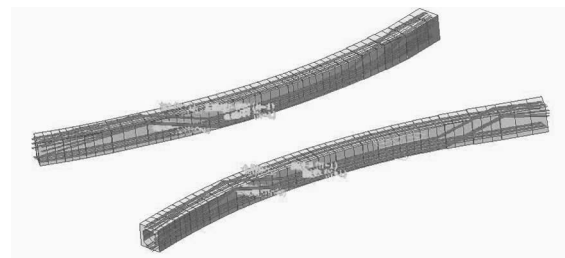


图8 箱梁有限元分析模型图

Fig.8 Finite element model of box girder

施工模拟结果表明:箱梁构件在整个施工过程中,应力和变形变化比较平稳,箱梁的应力始终保持在合理水平.箱梁最大应力 10.6 MPa,最大竖向变形为 36.23 mm,在第5工况出现;箱梁的横向变形主要产生在第2工况,工况2以后的施工过程中横向位移很小,变化基本在 1 mm 以内.施工全过程中箱梁构件均具有较高安全储备.

5 对比分析

5.1 混凝土应力

混凝土应力作为施工监测的主控参数,控制截面5处箱梁的混凝土应力实测值与理论计算结果的对比曲线如图9所示.

通过对比可知,实测值曲线与理论值曲线的变化趋势一致,吻合较好,各工况下的监测值与理论值之间误差大部分小于 10%,可见施工过程中箱梁混凝土应力状态处于安全可控范围内,达到了监测与控制的目的.

5.2 普通钢筋应力

箱梁控制截面5的钢筋应力曲线如图10所示.

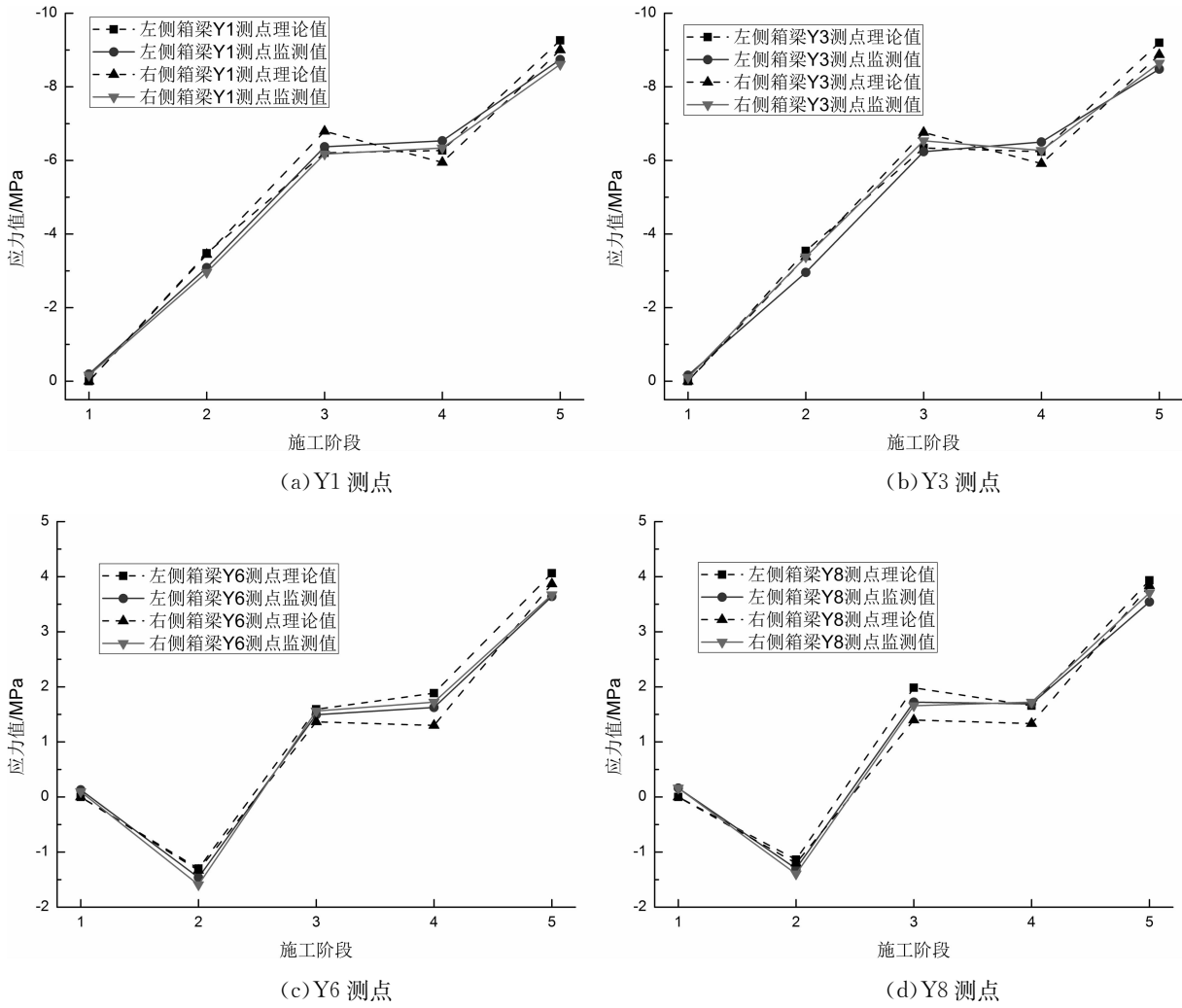


图 9 截面 5 的混凝土应力曲线图
Fig.9 Curve of concrete stress of 5th section

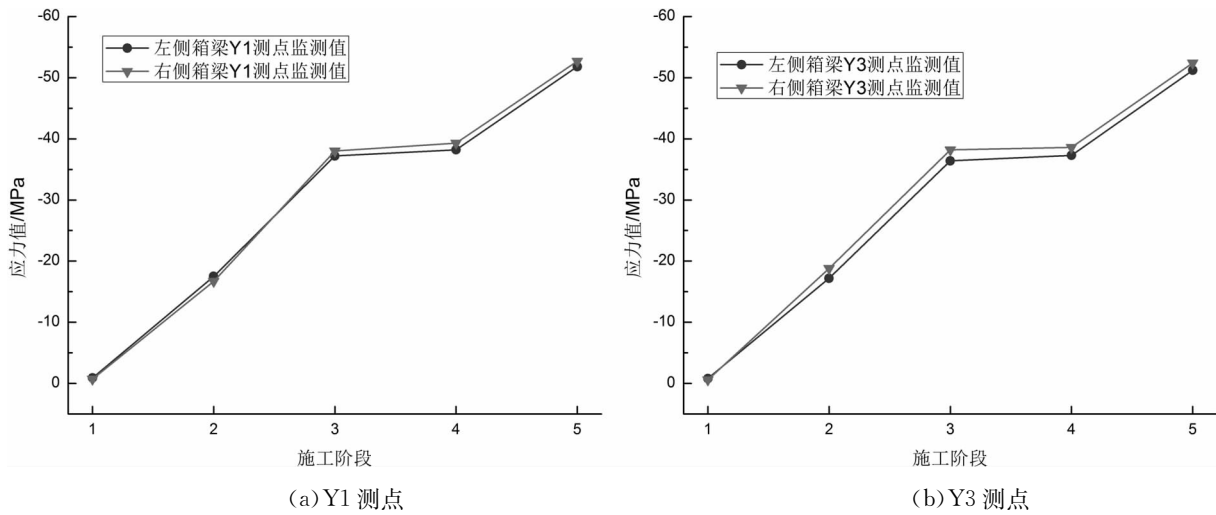


图 10 截面 5 的钢筋应力曲线图
Fig.10 Curve of steel stress of 5th section

比较图 10 和图 9 可知,普通钢筋测点应力值与相应位置处的混凝土应力变化趋势基本一致,且将

钢筋应力等效为混凝土应力,两者数值基本相等,考虑到钢筋与混凝土的协同作用,从而验证了混凝土

土应力监测数据的可靠性^[12].

5.3 竖向位移

竖向位移是预应力混凝土工程验收标准中的一个重要指标^[13].箱梁控制截面5处的竖向位移监测值与理论值的对比曲线见图11,施工完毕后箱梁的实际线形与模拟计算线形的对比见图12.

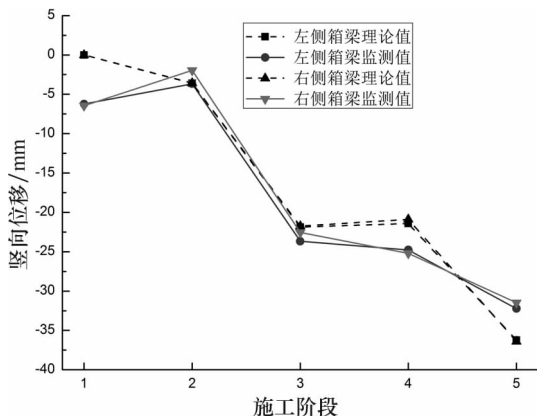


图11 箱梁竖向变形曲线

Fig.11 Curve of vertical deformation of box girder

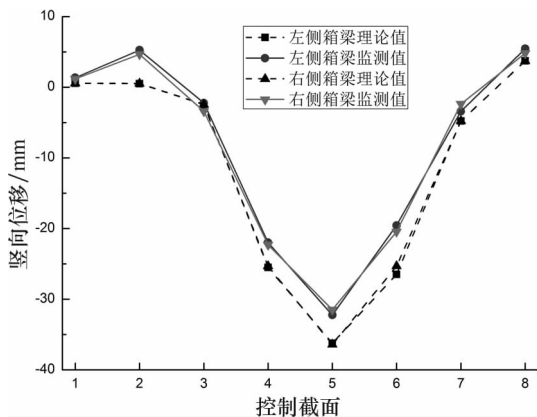


图12 施工完毕后箱梁线形图

Fig.12 Curve of box girder after the completion of construction

通过对比可知,施工完毕后箱梁最大竖向变形值为32.33 mm,小于理论计算值,且该变形量对于整个箱梁的挠度规范允许值而言处于安全可控范围内,满足相关验收标准要求.左右两根箱梁的竖向变形变化规律基本一致,箱梁的实测挠度与理论计算挠度相差都控制在10 mm以内,大部分测点的实际挠度小于理论计算挠度.

5.4 横向位移

图13给出了工况2中箱梁的横向位移监测值与理论值的对比曲线.对比结果表明,两根箱梁的实测横向位移与理论计算值相差控制在2 mm以内,在工况2以后箱梁的实际横向位移较小,这主要是

施工到后期,与箱梁连接的梁板会对箱梁的侧向位移产生约束作用.

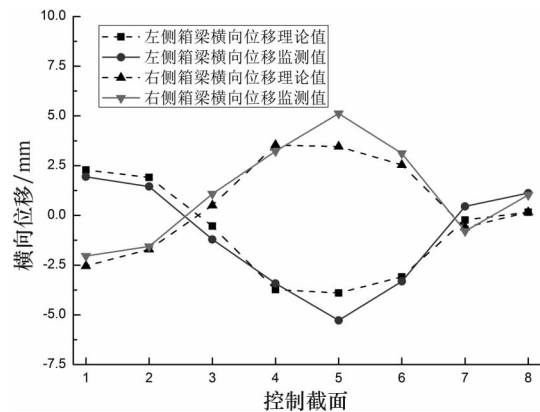


图13 箱梁横向变形曲线

Fig.13 Curve of horizontal deformation of box girder

通过实际工程现场的实时监测,各工况下箱梁未出现不稳定状况或其他质量缺陷.本工程全工期进展顺利,大大减少了工程结构的施工风险.笔者所参与的研究团队对该弧形屋面箱梁的监测成果实现了实时通报上传,及时分析反馈,解决了工程施工控制风险大的难题.

6 结论

本文对某学生活动中心场馆弧形屋面箱梁施工过程进行了施工监测与有限元模拟计算,得出以下结论:

1)通过测量系统和采集系统实测弧形预应力箱梁的应力与变形,获得了准确详实的现场数据,对施工过程控制和屋面结构安全监测起到了重要作用.

2)运用有限元软件模拟屋面结构的施工全过程,计算出各种工况下箱梁的应力与变形,为监测研究提供了理论依据.

3)通过实测值与理论值的对比分析,该箱梁混凝土应力、钢筋应力、箱梁竖向变形、横向变形的实测值均小于理论计算值,表明本研究所采用施工监测方法可靠,监测研究结果对施工全过程控制起到了很好的效果.

4)文中提出的弧形预应力屋面箱梁监测研究方法解决了箱梁在建筑工程应用的施工控制难题,对相似建筑工程中大尺寸异形构件的结构安全和施工控制具有重要的借鉴意义.

参考文献

- [1] 李斌.大跨预应力混凝土连续梁桥施工控制[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2012:6-7.
LI Bing. Large span prestressed concrete continuous beam bridge's construction control[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2012: 6-7. (In Chinese)
- [2] 汪剑,方志.大跨预应力混凝土连续梁桥施工控制研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2003,30(3):130-133.
WANG Jian, FANG Zhi. Construction control for large-span prestressed concrete continuous girder bridge [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(3): 130-133. (In Chinese)
- [3] 杨孟刚,陈政清.自锚式悬索桥施工过程模拟分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2006,33(2):26-30.
YANG Menggang, CHEN Zhengqing. An analysis of construction stages simulation for self-anchored suspension bridges [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(2): 26-30. (In Chinese)
- [4] MOONEY M A, TAWFIK E F, CHAN G B, *et al.* Health monitoring during vibratory plate compaction of soil[C]// Proceedings of the SPIE, Smart Structures and Materials 2002, Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways. San Diego: SPIE, 2002: 112-123.
- [5] IWAKI H, YAMAKAWA H, SHIBA K, *et al.* Structural health monitoring system using fbg-based sensors for a damage tolerant building [C]// Proceedings of the SPIE, Smart Structures and Materials 2003, Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures. San Diego: SPIE, 2003: 392-399.
- [6] 张慎伟,罗晓群,张其林.双曲索网结构施工张拉成形数值模拟分析与试验验证[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(1):8-13.
ZHANG Shenwei, LUO Xiaoqun, ZHANG Qilin. Numerical simulation analysis and model test for the tension process of hyperbolic cable net structures [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(1): 8-13. (In Chinese)
- [7] 刘红波,陈志华,牛犇.弦支穹顶结构施工过程数值模拟及施工监测[J].建筑结构学报,2012,33(12):79-84.
LIU Hongbo, CHEN Zhihua, NIU Ben. Numerical simulation and in-situ monitoring of pre-stressing construction of suspend-dome structures [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12): 79-84. (In Chinese)
- [8] 曾志斌,张玉玲.国家体育场大跨度钢结构在卸载过程中的应力监测[J].土木工程学报,2008,41(3):1-6.
ZENG Zhibin, ZHANG Yuling. Stress monitoring of the large-span steel structure of the National Stadium during unloading [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 1-6. (In Chinese)
- [9] 赵中伟,陈志华,王小盾,等.于家堡交通枢纽站房网壳施工仿真分析与监测[J].建筑结构学报,2015,36(1):136-142.
ZHAO Zhongwei, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, *et al.* Simulation and monitoring of whole erection process for the Yujiapu Railway Station Building [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 136-142. (In Chinese)
- [10] 钱稼茹,张微敬,赵作周,等.北京大学体育馆钢屋盖施工模拟与监测[J].土木工程学报,2009,42(9):13-20.
QIAN Jiaru, ZHANG Weijing, ZHAO Zuozhou, *et al.* Simulation and monitoring for the construction of the steel roof of the Peking University Gymnasium [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 13-20. (In Chinese)
- [11] 韩杰,黄浩,赵超.某超高层建筑悬挑钢结构施工模拟分析及现场监测[J].施工技术,2013,42(8):40-42.
HAN Jie, HUANG Hao, ZHAO Chao. Construction simulation and monitoring of the cantilever steel structure of a high-rise building [J]. Construction Technology, 2013, 42(8): 40-42. (In Chinese)
- [12] 薛伟辰,姜东升,徐壮涛,等.上海旗忠网球中心预应力混凝土看台结构施工监测研究[J].建筑结构,2010,40(6):81-84.
XUE Weichen, JIANG Dongsheng, XU Zhuangtao, *et al.* Study on construction monitoring for prestressed concrete stand of Shanghai Qizhong Tennis Center [J]. Building Structure, 2010, 40(6): 81-84. (In Chinese)
- [13] 张爱林,刘学春,王冬梅,等.2008奥运会羽毛球馆新型预应力弦支穹顶结构全寿命健康监控研究[J].建筑结构学报,2007,28(6):92-99.
ZHANG Ailin, LIU Xuechun, WANG Dongmei, *et al.* Health monitoring of the prestressing suspend-dome of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 92-99. (In Chinese)