

# 大跨预应力混凝土连续梁桥悬臂 施工结构控制分析

宋福春<sup>1</sup>,张 兴<sup>1</sup>,陈 冲<sup>1</sup>,李雪莲<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 国网辽宁省电力有限公司辽阳供电公司,辽宁 辽阳 111000)

**摘 要** 目的 研究大跨度预应力混凝土连续梁桥悬臂施工的成桥线形和受力情况,为施工控制提供理论依据,并指导桥梁的设计和施工. 方法 模拟分析大跨度预应力钢筋混凝土连续桥梁悬臂施工的受力状态和变形特点,得到桥梁结构各个施工阶段的受力状态和变形,利用 TDV 软件建立桥梁模型,分别采用正装分析法、倒装分析法和无应力状态分析法,对桥梁施工过程进行结构控制分析. 结果 模拟分析出桥梁结构在各个施工阶段的变形和受力状态以及它们的变化规律,保证桥梁成桥的线形和受力情况符合设计要求. 结论 根据结构控制原理并结合模拟分析数据特点,正装分析法适用于施工过程中结构应力计算,倒装分析法适用于施工过程中立模标高的确定,无应力状态分析法适用于预测成桥状态下的结构应力和线性情况.

**关键词** 正装分析法;倒装分析法;无应力状态分析法;悬臂施工

中图分类号 TU378;U441

文献标志码 A

## Structural Control Analysis during Construction of Cantilever of Long-span Pre-stressed Concrete Continuous Girder Bridge

SONG Fuchun<sup>1</sup>, ZHANG Xing<sup>1</sup>, CHEN Chong<sup>1</sup>, LI Xuelian<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Liaoyang Power Supply Company, Liaoyang, China, 111000)

**Abstract:** The bridge linearity and stress distribution in cantilever of a long-span pre-stressed concrete continuous girder bridge during construction were researched in this paper, which providing theoretical basis for construction control and guidance for bridge design and construction. The stress distribution and deformation characteristic of cantilever-construction of long-span pre-stressed concrete continuous girder bridge, were analyzed in this paper to obtain the stress distribution and deformation during each construction process. The software, TDV, was utilized in this paper, to analyze and control the bridge construction process based on three models, the orderly-erecting analysis method, the inversion analysis method, and the stress-free state analysis method. De-

收稿日期:2015-05-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51178279);住房和城乡建设部项目(2015-K5-021)

作者简介:宋福春(1971—),男,副教授,博士,主要从事组合结构桥梁、车桥耦合振动研究.

formation, stress distribution, and corresponding transformation law of bridge construction during each stage were obtained to ensure that the linearity and stress distribution of bridge could meet the design requirements. In accordance with the principle of structure control and combined with the characteristics of simulation analysis data, conclusions below were made. Firstly, the orderly-erecting analysis method is appropriate for structure stress calculation during construction process. Secondly, the inversion analysis model is appropriate for measurement of elevation. Thirdly, the stress-free state method is appropriate for the prediction on structural stress and linear conditions under the condition of shaping. The characteristics of structure control analysis and application situation were concluded in this paper in the end.

**Key words:** orderly-erecting analysis method; inversion analysis method; stress-free state analysis method; cantilever construction.

在庞大复杂的交通系统中,桥梁是该系统中的一个重要节点,对交通畅通和运营起着至关重要的作用。随着各种新型材料的开发应用、计算机理论的发展和其他相关领域的理论与技术成果的发展应用,桥梁建设取得了极大的发展。随着桥梁结构越来越复杂,桥梁跨度逐步增加,原有的常规设计和施工方法等桥梁建设相关环节已不能满足现代桥梁发展的需要<sup>[1]</sup>。施工监控已经成为桥梁施工技术的重要组成部分,同时也面临着新的发展机遇和挑战。

在现代桥梁施工结构控制分析理论中,桥梁结构施工控制的计算方法主要包括:正装分析法、倒装分析法和无应力状态分析法。正装分析法能较好地模拟桥梁结构的实际施工历程,得到桥梁结构在各个施工阶段的变形和受力状态。倒装分析法能得到桥梁结构在各个施工阶段的理想的安装位置和受力状态。无应力状态分析法通过设定无应力长度和无应力曲率保持不变,构建理想的桥梁施工中间状态,得到各种状态下结构的受力状况<sup>[2-3]</sup>。在实际桥梁工程中,各种结构控制方法被广泛应用到具体的工程之中,但是由于各种复杂因素的影响,各种结构控制分析方法具有各自的优缺点,其应用性有待进一步验证和提高。

笔者以沈阳四环快速路跨越沈西编组站立交桥工程为依托,应用桥梁专业分析软件

TDV,建立有限元分析模型,结合桥梁结构自身和施工工艺特点,分别采用正装分析法、倒装分析法和无应力状态分析法对桥梁结构进行结构控制分析,考虑桥梁建设过程各种影响因素,得到桥梁结构在各种状态下的应力状态和受力情况并加以分析,论证结构控制方法在桥梁施工监控的可应用性,以及各自的优缺点。为桥梁施工监控提供系统全面的理论计算依据及方法,进而为桥梁施工监控提供了借鉴,使得桥梁施工监控及桥梁建造事业更加完善。

## 1 工程背景

沈阳四环快速路跨沈西编组站立交桥为变截面预应力混凝土单箱连续梁桥,主桥上部结构为  $56\text{ m} + 3 \times 92\text{ m} + 56\text{ m}$ , 5跨超静定体系(见图1)。荷载等级为公路Ⅰ级,设计时速为  $100\text{ km/h}$ ,设计基准期 100 a,设计安全等级为一级,环境类别为Ⅱ级。立交桥采用 C50 混凝土,箱梁顶宽  $13.1\text{ m}$ ,梁底宽  $8.1\text{ m}$ ,悬臂长  $2.5\text{ m}$ ,箱梁中支点梁高  $5.8\text{ m}$ ,跨中及端部梁高  $2.9\text{ m}$ ,悬臂板端部厚  $0.25\text{ m}$ ,根部厚  $0.8\text{ m}$ 。箱梁根部底板厚  $0.9\text{ m}$ ,跨中底板厚  $0.3\text{ m}$ ,梁高及底板厚从根部到跨中采用圆曲线变化,腹板根部厚度  $0.7\text{ m}$ ,跨中厚  $0.5\text{ m}$ ,利用一个箱梁阶段直线变化,箱梁顶板厚度  $0.35\text{ m}$ ,箱梁桥面横向坡度为  $1.5\%$  单向横坡。箱梁中支点横隔

梁厚度 3.0 m,边支点横隔梁厚度 1.5 m,跨中横隔厚度 0.5 m.上部结构采用挂篮悬臂浇筑法施工,同时从 11 号~14 号墩向两边浇筑,

箱梁浇筑形成 4 个 T 构,由两边同时向中间合龙,完成桥梁施工,达到成桥状态.

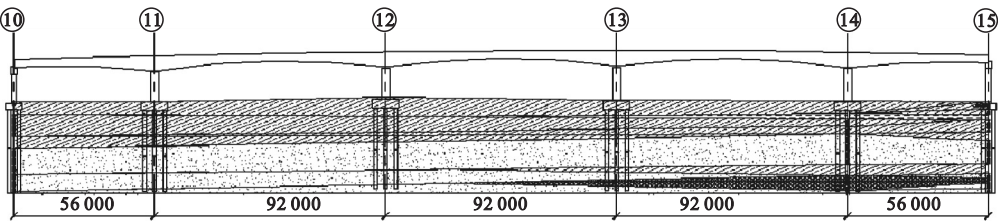


图 1 沈阳四环快速路跨越沈西编组立交桥总体立面图

Fig. 1 Elevation of overpass of fourth ring express in Shenyang

本桥施工采用悬臂浇筑法,简称悬浇.悬浇是近现代大跨度桥梁的主要施工方法,该方法具有自身灵活性好,技术含量高,适应性强,施工方便,不需要大量的施工支架和临时设备,不影响桥下通航、通车,施工不受季节、水位的影响,桥梁整体性好,桥梁箱梁的应力和弯矩的分布也更加合理等优点.但悬臂浇筑法在施工中也有不足:梁体部分不能与桥墩平行施工,工程施工周期较长,而且悬臂浇筑的混凝土加载龄期短,混凝土收缩和徐变影响较大,施工质量不容易控制,需要施工监控以保证桥梁结构的受力情况和成桥线性满足设计要求<sup>[4-8]</sup>.

2 桥梁施工控制理论与有限元模型

2.1 桥梁施工控制理论

在桥梁的成桥过程中,结构的应力状态和变形情况不仅受自身材料特点的影响,而且已成结构的受力状态和变形情况也受后续施工阶段的影响.而悬臂施工属于典型的自架设施工法,悬浇过程中的已成结构状态是事后无法调整的,所以施工控制主要采用预测控制法.对于混凝土连续梁桥的悬臂施工,主要是通过设置预拱度,来保证合龙前两悬臂端竖向挠度的变差和主梁轴线的横向位移不超过允许范围、合拢后桥面线形良好、施工过程中主梁截面不应出现过大的应力,实现理想的成桥状态,满足设计要求.

图 2 所示为悬臂结构的施工阶段划分情况和荷载工况简图.如果按照图中施工阶段及荷载工况进行施工,直到结构完成,得到悬臂结构在单个荷载工况下位移和累计荷载工况下位移如图 3 所示.由图 3 可知,结构完成后的实际状态明显偏离理想的设计状态.为了使结构完成后的最终状态达到设计时理想状态,实现预期设定的目标,需要在各个施工阶段施工前设置合理的预拱度,使桥梁达到理想的设计状态.

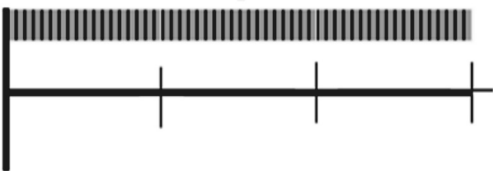


图 2 悬臂梁施工阶段荷载工况示意图

Fig. 2 The schematic diagram for loading case at the construction phase of cantilever beam

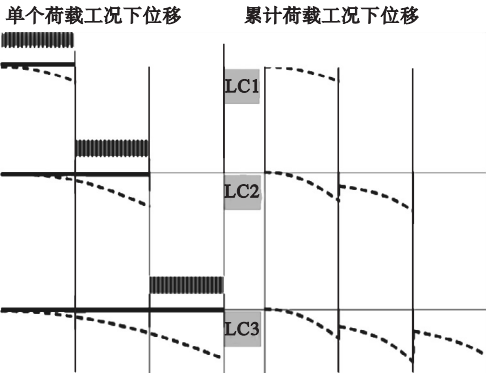


图 3 荷载作用下的位移图

Fig. 3 The displacement diagram under the action of load

预拱度的计算公式:

$$H_{lmi} = H_{sj i} + H_{ypgi} + f_{gi} \tag{1}$$

式中: $H_{lmi}$ 为*i*阶段立模高程; $H_{sj i}$ 为*i*阶段设计高程; $H_{ypgi}$ 为*i*阶段的预抛高值,各种荷载引起挠度总和; $f_{gi}$ 为挂篮变形值。

按照式(1)计算得到各个施工阶段的预拱度,然后添加在相应的施工阶段.得到悬臂结构施工完成后的结构位移和实际状态如图4所示,可以看出悬臂结构施工完成后的状态符合最初的设计状态<sup>[3]</sup>.桥梁施工控制就是通过这种方法实现桥梁成桥状态满足桥梁设计的理想状态。

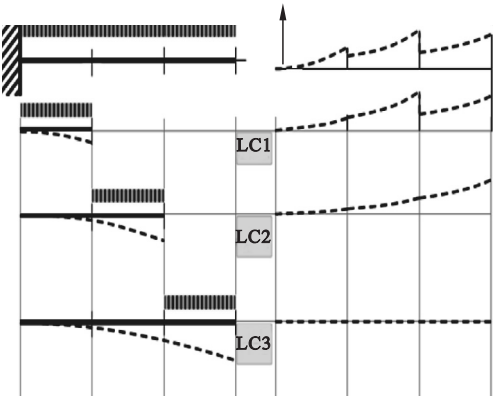


图4 考虑预拱度情况下的位移图

Fig. 4 The displacement diagram with considering pre-stressing camber

2.2 桥梁结构施工控制分析方法

桥梁结构施工结构控制分析是根据结构控制理论,结合具体的工程实例,建立有限元分析模型,研究桥梁结构在每一个施工阶段的变形和受力等问题,预测桥梁在施工过程中的状态.结构控制分析是施工监控的重要的理论依据,是保证成桥状态达到设计目标的直接体现<sup>[4]</sup>.

正装分析法又叫前进分析,是应用桥梁控制有限元原理,按照桥梁结构实际施工加载顺序来进行施工模拟,其过程与桥梁实际成桥过程完全相同.正装分析法主要研究桥梁结构在各个施工阶段的变形和受力情况,预测桥梁在建设过程中各个阶段的状态,为施工阶段理想状态的确定和完成桥梁结构施

工控制奠定基础.其研究结果不仅可以用来桥梁的设计和施工,而且也为桥梁的施工监控提供了理论依据.该方法被广泛应用到桥梁工程的建设中。

倒装分析法又叫倒退分析法,基本思想是在  $t = t_0$  时刻结构受力情况符合正装分析法计算  $t_0$  时刻的结果且线性满足设计要求的初始状态下,按照桥梁结构形成的相反顺序对结构进行倒拆分析,每次拆除一个施工阶段对剩余结构的影响分析.倒装分析法主要研究桥梁结构在各个施工阶段理想的安装位置(主要指高程)和理想的受力状态.倒装分析法只是对施工过程的倒装模拟,无法现实混凝土收缩、徐变等过程的倒装模拟计算。

无应力状态法是一个理念分析方法,即当结构构件单元的无应力长度和无应力曲率保持不变时,结构的最终内力状态和位移状态与结构的施工过程无关<sup>[9]</sup>.大型桥梁的施工采用多阶段施工,而桥梁结构设计采用一次成桥的理念,这使得结构成桥过程和设计理念之间“脱节”.无应力状态法解决了这个问题.图5(a)所示为两端固定梁及其受力情况,图5(b)为该结构一次成桥状态的弯矩图,图5(c)为结构悬臂施工的弯矩图.在悬臂施工过程中,节点  $C(C')$  会产生转角,与设计一次成桥状态不符.通过在  $C(C')$  处附加广义力,使得  $C(C')$  处的转角为零,达到与设计一次成桥状态一致,而后进行下一阶段的施工.无应力状态法就是通过这种方法解决多阶段施工与一次成桥之间的差异.虽然桥梁结构的无应力状态只是在特殊情况下的一种理想结构状态,但却是桥梁结构各种受力状态分析的一种有效方法,在各种类型桥梁施工结构控制分析中广为应用<sup>[10]</sup>.

以上3种结构控制分析方法中,正装分析法可以通过试算的办法建立结构施工的中间状态,通过控制结构施工过程的中间状态使桥梁成桥状态满足设计要求;倒装分析法以结构的倒拆计算为基础建立了施工中间状



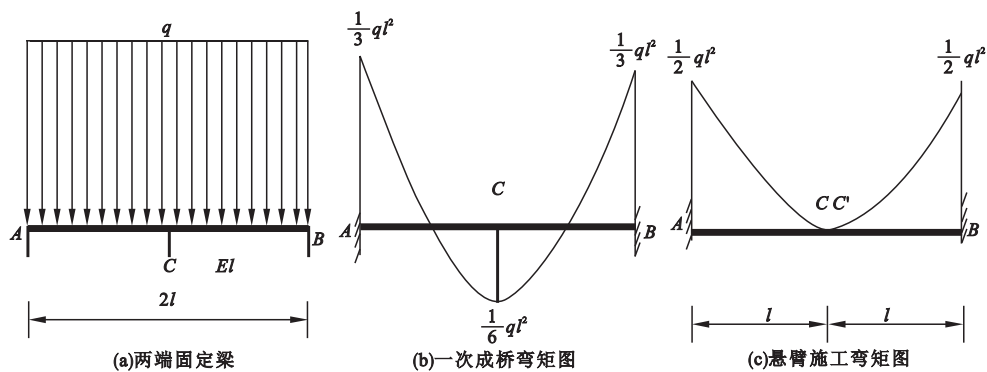


图 5 固定端梁

Fig. 5 The beam of fixed end type

态与最后成桥目标状态之间的联系,提供理想的安装标高和受力状态. 无应力状态分析法通过一种相对稳定或恒定不变的量建立桥梁各个施工阶段中间状态和成桥状态的联系.

2.3 有限元分析模型

采用桥梁专业分析软件 TDV, 根据桥梁

自身结构的特点和施工过程, 将梁体离散为 137 个节点、136 个单元(见图 6). 施工状态的模拟通过对相应单元的激活与钝化来实现. 主梁采用梁单元模拟, 根据工况施加预应力, 算出预应力的行程预应力损失, 施加到梁单元节点. 桥梁有限元分析模型如图 7 所示.

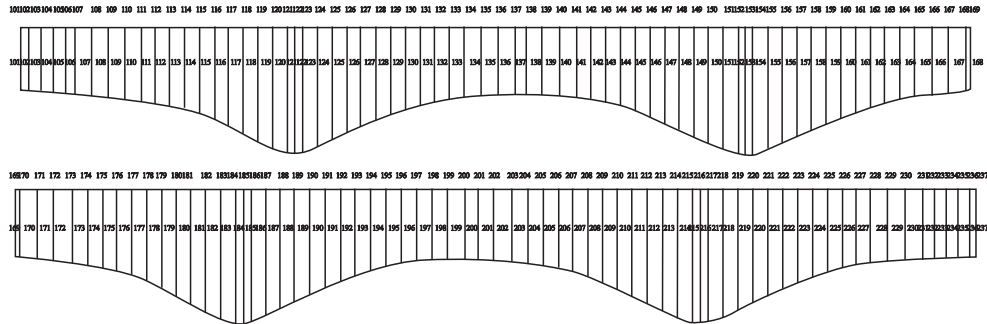


图 6 桥梁有限元分析离散图

Fig. 6 The discrete figure of bridge under the analysis of finite element

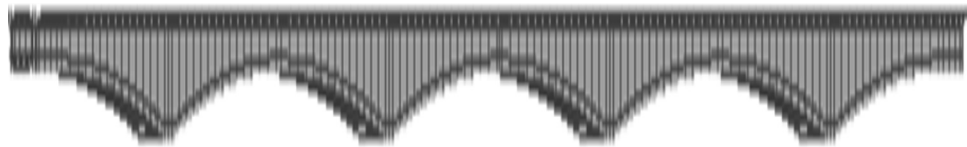


图 7 桥梁空间有限元分析模型图

Fig. 7 The analysis model for the bridge space under the analysis of finite element

无应力状态法在每个施工阶段完成之后下一个施工阶段开始之间通过添加相应的广义力, 来保持结构无应力长度和无应力曲率不变, 使结构在无应力状态下完成计算分析. TDV 软件自身附有“施工控制”和“偏差施工”计算分析模块, 应用此方法达到了与逐步添加广义力相同的计算分析效果, 省略大量的计

算时间, 并且能够避免计算过程中的迭代错误, 这是选用 TDV 软件计算分析的一大优点.

3 结构控制结果与分析

3.1 正装分析法结果和分析

确定结构的初始状态, 按照预先确定的施工方案顺序, 在每一个桥墩两侧依次添加

各个块件以及相应的荷载工况,直至合拢并完成桥面铺装<sup>[11-13]</sup>.模拟过程中的新增杆件通过单元(节点)的激活与钝化完成,并完成施工过程中的体系转换.得到桥梁各个施工阶段和成桥状态的内力和变形.12号桥墩最大悬臂端的受力状况和竖向位移值为本桥梁施工控制过程中合龙前的典型状态,笔者选取12号桥梁最大悬臂端状态进行分析.12号桥墩最大悬臂端的弯矩值、竖向位移值如图8、图9所示.最大悬臂的弯矩值达3 006 417 kN·m,竖向位移值达到0.157 m.

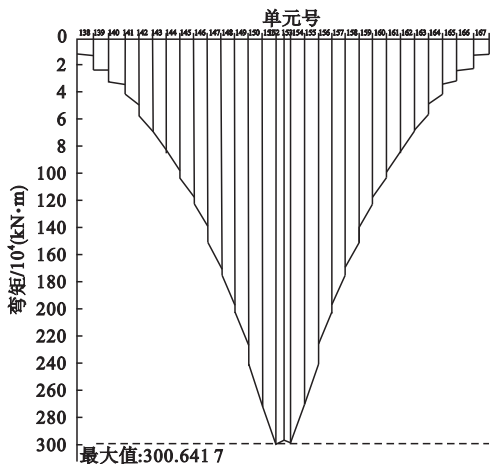


图8 正装分析法最大断臂端弯矩图

Fig. 8 The max end bending moment diagram under the orderly-erecting analysis method

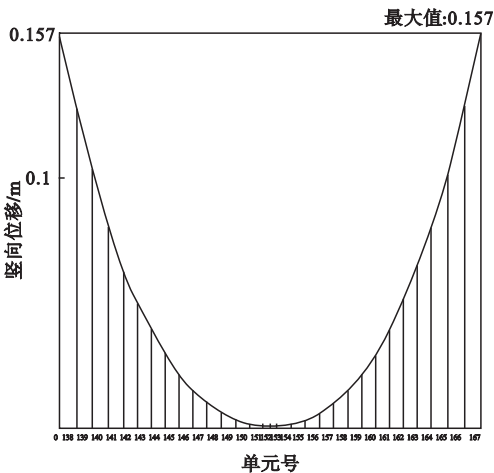


图9 正装分析最大悬臂端竖向位移图

Fig. 9 The max vertical displacement diagram under the orderly-erecting analysis method

在分析过程中考虑结构几何非线性、混

凝土材料非线性和混凝土收缩、徐变问题等因素,由此可见所得结果为施工中间过程中的理想状态.但是随着施工阶段的进行,结构形式、边界约束、荷载形式等在不断改变,前期已成结构将随着施工的进行而发生徐变,其几何位置也会发生改变.综上,控制分析结果为施工监控提供了桥梁中间状态、施工过程中结构受力状态和位移情况,但是不能提供施工过程的立模标高.

3.2 倒装分析法结果与分析

根据倒装法的基本思想和分析原理,在理想状态下进行结构倒拆分析,其中混凝土的收缩、徐变通过正装分析保存的结果进行迭代计算而得<sup>[14-15]</sup>.倒装分析过程中各个阶段的状态与正装分析的状态(实际施工状态)保持一致.得到结构在理想状态下的内力和变形.12号桥墩最大悬臂端的弯矩值、位移值如图10、图11所示.

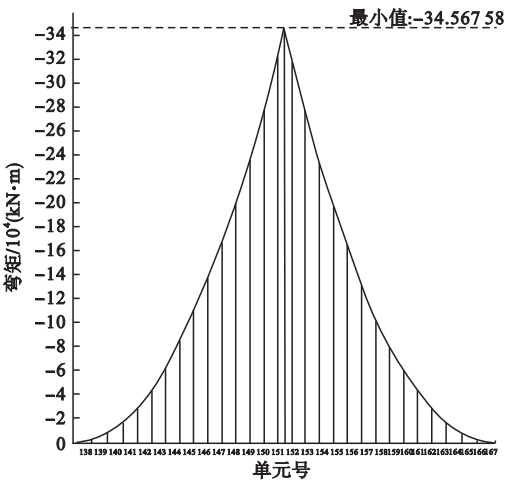


图10 倒装分析法最大悬臂端弯矩图

Fig. 10 The max end bending moment diagram under the inverted assembly analysis

从图中可以看出,最大悬臂端弯矩值达到345 675 kN·m,竖向位移值达到0.09 m.在分析过程中考虑了结构几何非线性问题的影响,与正装分析法相比较,各个阶段的内力和变形考虑到了后期施工对已成结构的影响,所以状态下的得到的立模更为合理.但是由于混凝土的收缩、徐变采用的正装计算结

果迭代计算,在计算中仍然存在不足.

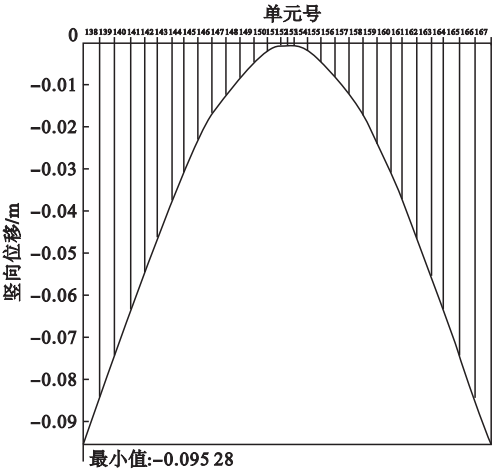


图 11 倒装分析法最大悬臂端竖向位移图

Fig. 11 The max vertical displacement diagram under the inverted assembly analysis

3.3 无应力状态法结果与分析

无应力状态法模拟分析过程与正装法模拟分析的过程一致,结构控制分析计算时,通过软件自身附有“施工控制”和“偏差施工”模块来控制结构的无应力状态<sup>[16-17]</sup>,得到桥梁结构在无应力状态的各个施工状态的结构内力和变形. 12 号桥墩最大悬臂端的弯矩值、竖向位移值如图 12、图 13 所示.

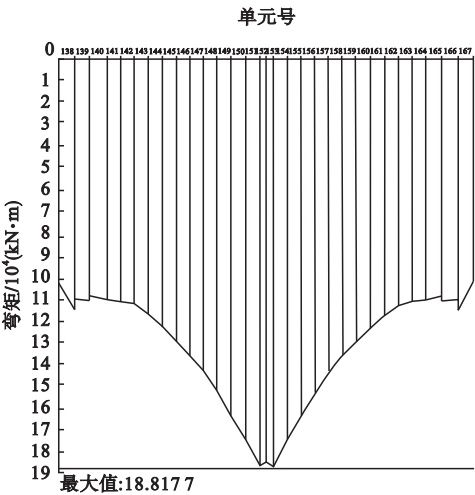


图 12 无应力状态法最大悬臂端弯矩图

Fig. 12 The max end bending moment diagram under the stress-free state method

从图中可以看出,最大悬臂端弯矩值达到188 177 kN·m,相比于正装法和倒装法,

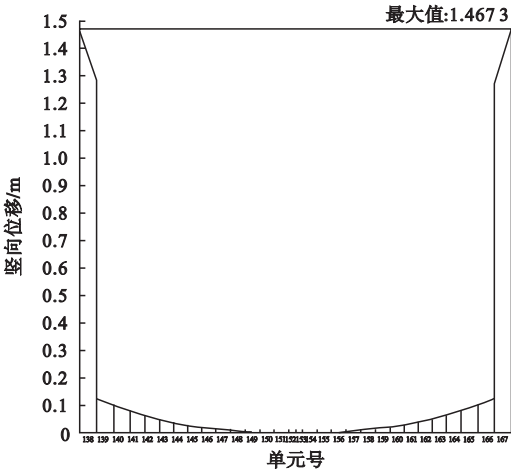


图 13 无应力状态法最大悬臂端竖向位移图

Fig. 13 The max vertical displacement diagram under the stress-free state method

此状态下的弯矩值要减小很多,主要是由于附加广义力的影响,此时结构虽然还是临时固结,但是实际结构的受力状态已经趋近连续梁结构的受力状态. 悬臂端竖向位移值达到 1.5 m,显然受到附加力的影响,最后一个阶段的变形不是结构的真正变形情况,其真实变形情况可以在下一个施工阶段中读取. 无应力状态端竖向位移变化如图 14 所示,其最大值为 0.035 m. 因为在模拟过程中进行了施工偏差的调整,各个施工段在本阶段的位移值不符合结构实际变形情况,下一阶段的分析所得结果才是对象节点的实际变形情况.

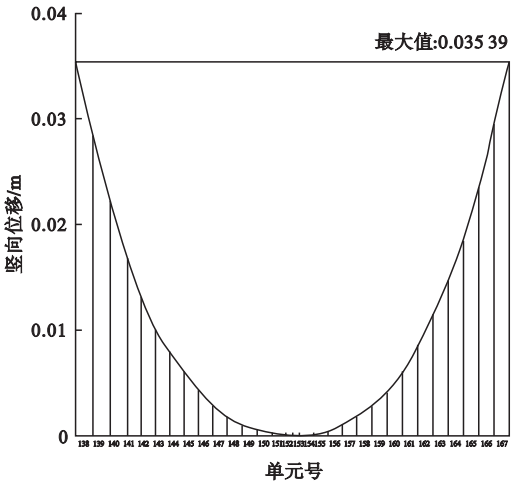


图 14 无应力状态法竖向位移图

Fig. 14 The vertical displacement diagram under the stress-free state method

3.4 计算结果比较分析

笔者根据三种结构控制方法自身特点,并结合工程实例分析数据,分析比较可知,正装法得到桥梁施工阶段状态的受力情况与实际工程各个阶段的受力情况较为吻合(见图15),适用于桥梁施工监控的应力控制。

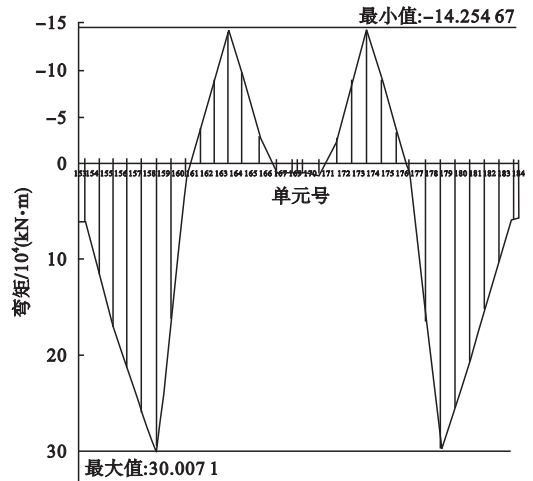


图 15 正装法成桥状态中跨弯矩图

Fig. 15 The bending moment diagram of the middle span under normal assembly method

倒装分析法充分考虑后续施工阶段对前期已成结构的影响,所得竖向位移值与成桥状态实际位移较吻合.图16为倒装分析过程中成桥状态下中跨竖向变形情况.倒装分析法中竖向位移结果可用于施工过程中立模标高的确定。

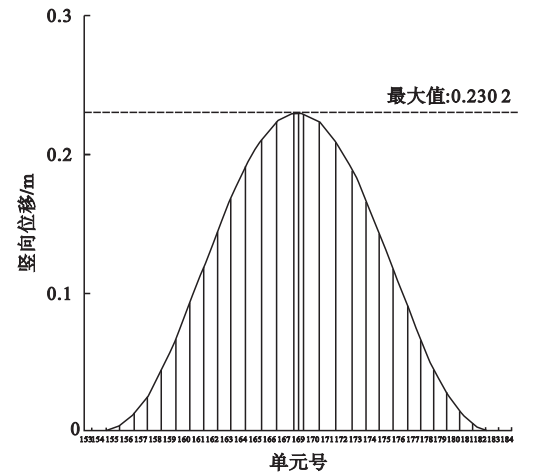


图 16 倒装法成桥状态中跨竖向位移图

Fig. 16 The vertical displacement diagram of the middle span under the inverted assembly analysis

无应力状态法建立了理想的桥梁中间状态与成桥状态的联系,图17、图18所示为成桥状态下中跨的弯矩图和竖向位移图.可以看出,结构受力状态与变形均有大幅度改善,使桥梁结构向着“完美”状态逼近,对于在施工阶段预测成桥下结构状态有重要意义。

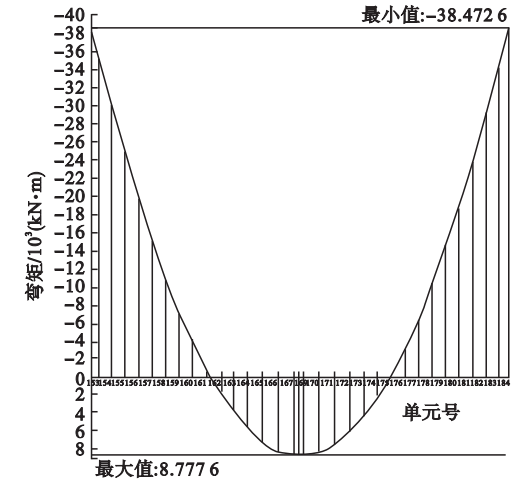


图 17 无应力状态法成桥状态中跨弯矩图

Fig. 17 The mid-span moment diagram under the stress-free state method

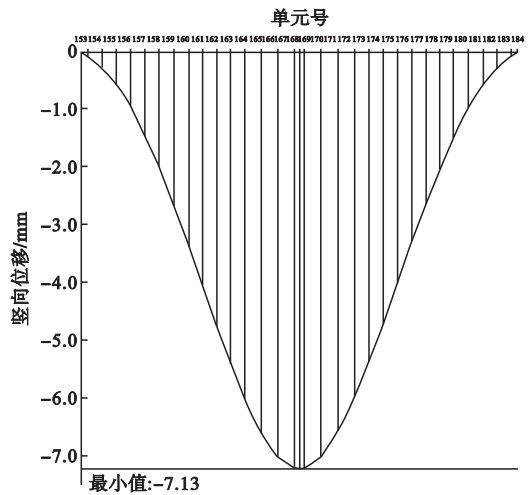


图 18 无应力状态法成桥状态中跨竖向位移图

Fig. 18 The mid-span vertical displacement diagram under the stress-free state method

4 结 论

(1)正装分析法适用于桥梁施工中的应力状态监控,是桥梁施工控制必须方法之一.同时也是其他结构控制分析的初始条件。



(2)倒装分析法适用于桥梁施工中的立模标高的确定,对保证成桥线形至关重要.但是对于几何非线性明显的大跨桥梁可能会失准,有待于改善和提高,是桥梁施工控制的重要方法.

(3)无应力状态分析法因自身理念局限,适用于预制安装的各种桥梁,但是理论分析可用于所有形式的桥梁结构,并且通过该方法可以全面预测桥梁结构在形成期间的状态,为桥梁理论分析提供了新的可能性方法.随着施工工艺技术的提高和新型材料开发应用,未来桥梁施工可能达到或逼近无应力状态,该方法尚有发展空间和改善之处.

## 参考文献

- [1] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.  
(FAN Lichu. Prestressed concrete continuous girder bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.)
- [2] 顾安邦. 桥梁施工检测与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
(GU Anbang. Inspect and control the bridge construction[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.)
- [3] 向中富. 桥梁工程控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
(XIANG Zhongfu. Bridge engineering control[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.)
- [4] 夏伟. 预应力混凝土连续梁桥施工监控研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.  
(XIA Wei. The research of prestressed concrete continuous girder bridge construction monitoring[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.)
- [5] 徐君兰. 大跨度桥梁施工控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.  
(XU Junlan. The construction control of long-span bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.)
- [6] 肖忠诚. 大跨径预应力混凝土连续梁桥施工控制研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.  
(XIAO Zhongcheng. Study on the construction control of long-span prestressed concrete continuous bridge[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [7] 苏伟. 大跨径预应力混凝土连续梁桥施工监控分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
(SU Wei. Study on the construction control of long-span prestressed concrete continuous bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)
- [8] 杨涛. 大跨径连续梁桥施工控制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
(YANG Tao. Construction control of long-span girder bridge[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2009.)
- [9] 薛兴伟. 大跨PC梁式桥长期下挠控制的新方法[J]. 桥隧施工与机械, 2015, 33(1): 80-82.  
(XUE Xingwei. A new method of long-term deflection control for long-span PC beam-bridge[J]. Bridge and tunnel construction and machinery, 2015, 33(1): 80-82.)
- [10] 秦顺全. 桥梁施工控制无应力状态法理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
(QIN Shunquan. The bridge construction control and theory and practice of unstress state analysis method[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.)
- [11] LEANDER J, ANDERSON A. Monitoring and enhanced fatigue evaluation of a steel railway bridge[J]. Engineering structures, 2010, 32(3): 854-863.
- [12] ATES S. Numerical modeling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages[J]. Applied mathematical modeling, 2011, 35(8): 3809-3820.
- [13] RICHARD M, HAKAN S. Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges[J]. Engineering structures, 2010, 32(4): 1038-1045.
- [14] LIU Chunho, DENNIS Y C, ALEX C S. Computational fluid dynamics simulation of the wind flow over an airport terminal building[J]. Journal of Zhejiang university (applied physics & engineering), 2010(6): 389-401.
- [15] SELEZNEV V. Numerical simulation of a gas pipeline network using computational fluid dynamics simulators[J]. Journal of Zhejiang university (applied physics & engineering), 2007(5): 755-765.
- [16] TRAVIS S. In-depth analysis of traffic congestion using computational fluid dynamics(CFD) modeling method[J]. Journal of modern transportation, 2011(1): 58-67.
- [17] WIELAND R, REICHE M, FUNK R, et al. A computational fluid dynamics model for wind simulation; model implementation and experimental validation[J]. Journal of Zhejiang university (applied physics & engineering), 2012(4): 274-283.