

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.06.029

# 基于 Midas/Civil 的钢箱主梁地锚式悬索桥 施工阶段正装分析

叶龙祥<sup>1</sup>, 柯红军<sup>2</sup>, 陈卓<sup>1</sup>

(1. 武汉二航路桥特种工程有限责任公司, 湖北 武汉 430071; 2. 长沙理工大学 土木工程学院)

**摘要:**目前国内外关于使用有限元软件正装分析地锚式悬索桥施工过程的文献很少且大多介绍不够全面。该文以太洪长江大桥为工程实例,基于有限元软件 Midas/Civil,提出一种对钢箱主梁地锚式悬索桥施工全过程正装分析的方法,并改良了主梁吊装时梁段间临时连接的模拟方法,分析过程中自动考虑主塔混凝土的收缩徐变。对比正装分析法与倒拆分析法的计算结果,主缆位移绝对差值最大不超过 9 mm,吊索力绝对差值最大为 15.9 kN,证明其正确性与优越性;对比主梁吊装时,有、无梁段间临时连接的吊索力,得出考虑临时连接计算的吊索力分布更加均匀,证明在对主梁吊装仿真分析时,梁段间临时连接不可忽略。并针对主梁吊装过程中,梁段间下缘开口宽度变化规律进行探究,得出相应结论:在主梁吊装初期,梁段间开口较大,沿纵桥向交错变化,随着主梁吊装,开口宽度趋近于 0。

**关键词:**悬索桥;有限元软件 Midas/Civil;施工阶段分析;正装分析法;下缘开口宽度

目前国内外对于地锚式悬索桥施工阶段的有限元分析,大多采用倒拆分析法。然而,若需要考虑施工阶段混凝土的收缩、徐变或其他与时间有关的特性,正装分析法就显得尤为重要。国内外一些学者提出正装分析悬索桥施工阶段的方法,但均不够全面,主要存在 3 方面的问题:① 未考虑主索鞍顶推;② 未考虑主塔混凝土的收缩徐变;③ 操作复杂,缺乏实用性。针对以上不足,该文基于有限元软件 Midas/Civil,提出一种正装分析法,能够连续正装模拟钢箱主梁地锚式悬索桥上部结构施工全过程;对比正装分析法与倒拆分析法的计算结果,以及有无梁段间临时连接模拟计算出的吊索力;并归纳总结在主梁吊装时,梁段间下缘开

口宽度变化规律。

## 1 工程概况

重庆太洪长江大桥为主跨 808 m 的单跨筒支钢箱梁地锚式悬索桥,总体布置图见图 1。桥梁全长 1 258 m,主缆计算跨径为(190+808+260) m,主跨矢跨比为 1/10。全桥布置 66 对吊索,吊索间距为 12 m。全桥共划分为 68 个架设梁段,其中标准梁段 64 个,合龙段 2 个,端节段 2 个,标准段长 12 m,合龙段长 9.0 m,端节段长 9.2、10.8 m。钢箱主梁按照从跨中往两侧主塔的顺序吊装,梁段间预留焊缝宽度,吊装过程中,顶

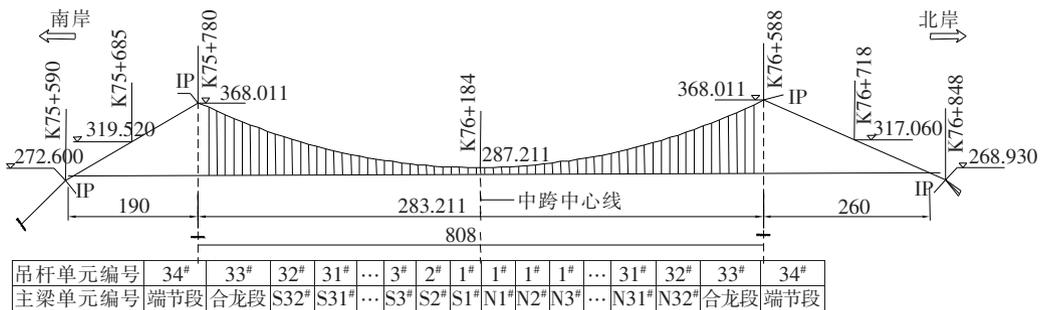


图 1 太洪长江大桥桥型布置图(单位:m)

收稿日期:2020-06-16(修改稿)

作者简介:叶龙祥,男,工程师, E-mail:275034891@qq.com

板临时连接,底板不连接,合龙以后,进行环缝焊接。施工阶段 CS1 为建造主塔,按照 4 m/7 d 的施工进度设置,施工阶段 CS1 分为 48 个小阶段,其余施工阶段如表 1 所示。

表 1 阶段施工内容

施工阶段	施工内容
CS2	主塔预抬高
CS3	主索鞍预偏
CS4	主缆架设
CS5	安装索夹
CS6	安装吊索
CS7	主索鞍第 1 次顶推
CS8	吊装 N1 <sup>#</sup> 、S1 <sup>#</sup>
CS9	主索鞍第 2 次顶推
CS10	吊装 N2 <sup>#</sup> 、S2 <sup>#</sup>
CS11	主索鞍第 3 次顶推
CS12~14	吊装 N3 <sup>#</sup> ~N5 <sup>#</sup> 、S3 <sup>#</sup> ~S5 <sup>#</sup>
CS15	主索鞍第 4 次顶推
CS16~22	吊装 N6 <sup>#</sup> ~N12 <sup>#</sup> 、S6 <sup>#</sup> ~S12 <sup>#</sup>
CS23	主索鞍第 5 次顶推
CS24~36	吊装 N13 <sup>#</sup> ~N25 <sup>#</sup> 、S13 <sup>#</sup> ~S25 <sup>#</sup>
CS37	主索鞍第 6 次顶推
CS38~44	吊装 N26 <sup>#</sup> ~N32 <sup>#</sup> 、S26 <sup>#</sup> ~S32 <sup>#</sup>
CS45	吊装端节段
CS46	吊装合龙段
CS47	梁段刚结、二期恒载施加以及主索鞍复位

## 2 成桥模型确定

基于文献[9]、[11]中提出的“先梁后缆”的悬索桥成桥状态确定方法,采用软件 Midas/Civil 建立太洪长江大桥平面有限元模型(图 2)。主缆和吊杆采用只受拉单元模拟,主梁和主塔采用梁单元模拟,全桥共有 564 个节点,429 个单元,其中 180 个只受拉单元,249 个梁单元。边界条件:塔底固结,两边主缆固结,主梁与主塔下横梁处节点采用主从节点连接,约束竖桥向、顺桥向平动。

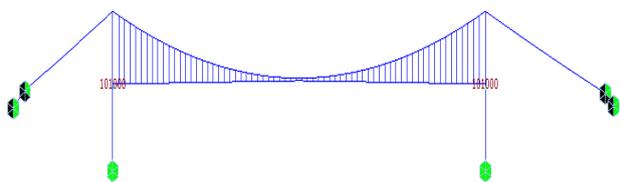


图 2 有限元模型示意图

## 3 梁段间临时连接的模拟

在吊装过程中,为使加劲梁的线形适应主缆的变形,已安装的加劲梁节段间采用临时连接,梁段间先预留焊缝宽度,待某一区段或全桥加劲梁吊装完毕后,再进行环缝焊接。临时连接一般只将顶板连接,底板不连接,梁段间微小的转角致使钢箱梁下缘产生了开口。传统方法是在梁段间直接释放转动约束,这样存在难收敛的问题,即使收敛,梁段之间也会出现与实际不相符的反向转动。目前,一些学者提出对其精细化模拟的方法,示意图如图 3 所示。在梁段连接处用垂直于主梁单元的刚臂单元模拟箱梁截面,在主梁单元间释放转动约束,并在刚臂单元下端用只受压单元模拟箱梁底板之间可以开口但不能被压缩的单向变形。通过试验发现其仍存在难收敛的问题,于是对其进行改进,单元示意图如图 4 所示。

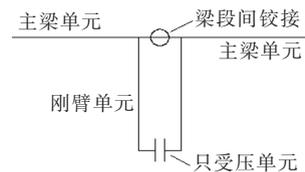


图 3 临时连接示意图

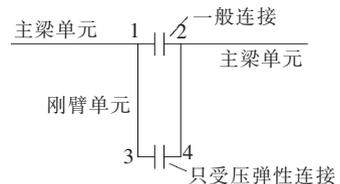


图 4 改进后临时连接示意图

相邻主梁单元焊接端的节点 1 与节点 2 之间的距离等于预留焊缝宽度,该文取值 2 cm。然后从节点 1、2 竖直向下建立刚臂单元,刚臂单元的长度等于钢箱梁的高度,该文取值 3 m,刚臂单元可以使用梁单元模拟或者通过添加边界条件(弹性连接中的刚性连接)进行模拟。在节点 1 和节点 2 之间添加边界条件(弹性连接中的一般连接),将其参数  $SD_x$  和  $SD_y$  设置成一个很大的值,该文设置为 1 000 kN/mm,将参数  $SR_y$  设置为 0。在节点 3 和节点 4 之间添加边界条件(弹性连接中仅受压连接),将其参数  $SD_x$  设置成一个很大的值,该文设置为 1 000 kN/mm。如此便可模拟梁段间的单方向转动。

## 4 施工阶段设置

Midas/Civil 对于施工阶段的几何非线性分析有独立模型和累加模型。累加模型是累加各个施工阶段的结果来进行几何非线性分析,新激活构件会依据上个施工阶段的计算结果进行初始预偏。应用累加模型进行几何非线性分析的同时,还可以考虑时间依存特性的效果,如混凝土的收缩、徐变。而对主梁吊装正装分析时,一般应用切线位移法,即将新吊装梁段沿着已吊装梁段悬臂端的切线方向预偏再进行分析。

结合累加模型的特点和切线位移法原理,进行施工阶段模拟时,需设置:① 未吊装梁段重度为 0,这样保证未吊装梁段不会对已安装结构施加荷载;② 未吊装主梁必须是悬臂的,这样保证未吊装梁段不会因为受到约束发生变形,从而对已安装结构产生影响。以太洪长江大桥为工程背景,具体介绍使用正装分析法进行施工阶段设置的几个要点。

(1) 应用累加模型分析时,新激活构件具有初始切线位移。为了防止施工阶段 CS4(主缆架设)中激活的主缆锚固点处节点根据上个施工阶段的计算结果与实际不相符的初始预偏,需要提前在上个施工阶段中先激活主缆锚固处的节点。这样便可避免施工阶段

CS4 中激活的主缆锚固点处节点由于初始预偏形成的误差。

(2) 进行主梁吊装施工阶段设置时,需要以下准备工作:① 修改主梁材料的重度为 0,并给主梁单元施加梁段自重的等效梁单元荷载;② 通过在吊杆上吊点处添加等效吊杆自重的节点荷载来模拟施工阶段 CS6(安装吊索)。

(3) 以施工阶段 CS10(吊装 N2<sup>#</sup>、S2<sup>#</sup> 钢箱梁)为例,主梁吊装的施工阶段设置如下:CS8、CS9、CS10 的施工内容及设置如表 2 所示,CS8、CS10 的施工阶段示意图如图 5、6 所示。为保证对施工阶段 CS10 分析时,N2<sup>#</sup>、S2<sup>#</sup> 主梁单元位于已吊装主梁单元(N1<sup>#</sup>、S1<sup>#</sup>)的切线方向且悬臂,需在施工阶段 CS8(吊装 N1<sup>#</sup>、S1<sup>#</sup> 钢箱梁)提前激活 N2<sup>#</sup>、S2<sup>#</sup> 主梁单元,并将其与 N1<sup>#</sup>、S1<sup>#</sup> 主梁单元悬臂端刚结,刚结采用边界条件(弹性连接中的刚性连接)模拟。接着进行施工阶段 CS10 分析时,需要将主梁单元 N2<sup>#</sup> 与 N1<sup>#</sup>、S2<sup>#</sup> 与 S1<sup>#</sup> 之间的边界条件(刚结)换成第 3 节中介绍的临时连接;施加梁段(N2<sup>#</sup>、S2<sup>#</sup>)自重的等效梁单元荷载;激活主梁(N2<sup>#</sup>、S2<sup>#</sup>)对应的 2<sup>#</sup> 吊杆单元,并钝化其对应的等效吊杆自重节点荷载。至此,便完成了对施工阶段 CS10(吊装 N2<sup>#</sup>、S2<sup>#</sup> 钢箱梁)的模拟设置。按照这种方法可以连续正装模拟所有的钢箱主梁吊装过

表 2 CS8 和 CS10 施工阶段设置

施工内容	CS8(吊装 N1 <sup>#</sup> 、S1 <sup>#</sup> )	CS9(主索鞍第二次顶推)	CS10(吊装 N2 <sup>#</sup> 、S2 <sup>#</sup> )
单元 激活	4 段主梁 S2 <sup>#</sup> 、S1 <sup>#</sup> 、N1 <sup>#</sup> 、N2 <sup>#</sup> ; 主梁 S1 <sup>#</sup> 、N1 <sup>#</sup> 对应的 2 根吊索	无	2 段主梁 S3 <sup>#</sup> 、N3 <sup>#</sup> ;主梁 S2 <sup>#</sup> 、 N2 <sup>#</sup> 对应的 2 根吊索
钝化	无	无	无
荷载 激活	等效主梁 S1 <sup>#</sup> 、N1 <sup>#</sup> 自重的梁单元荷载	温度荷载	等效主梁 S2 <sup>#</sup> 、N2 <sup>#</sup> 自重的梁单元荷载
钝化	等效主梁 S1 <sup>#</sup> 、N1 <sup>#</sup> 对应的 2 根 吊索自重的节点荷载	无	等效主梁 S2 <sup>#</sup> 、N2 <sup>#</sup> 对应的 2 根 吊索自重的节点荷载
边界 激活	S2 <sup>#</sup> 与 S1 <sup>#</sup> 、N2 <sup>#</sup> 与 N1 <sup>#</sup> 之间刚结; S1 <sup>#</sup> 与 N1 <sup>#</sup> 之间临时连接	无	S3 <sup>#</sup> 与 S2 <sup>#</sup> 、N3 <sup>#</sup> 与 N2 <sup>#</sup> 之间刚结; S2 <sup>#</sup> 与 S1 <sup>#</sup> 、N2 <sup>#</sup> 与 N1 <sup>#</sup> 之间临时连接
条件 钝化	无	无	S2 <sup>#</sup> 与 S1 <sup>#</sup> 、N2 <sup>#</sup> 与 N1 <sup>#</sup> 之间刚结

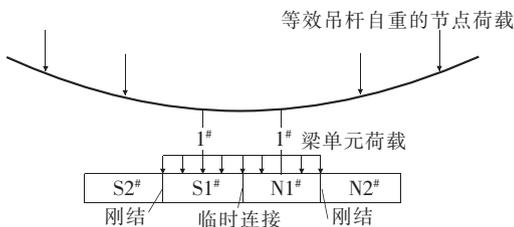


图 5 施工阶段 CS8

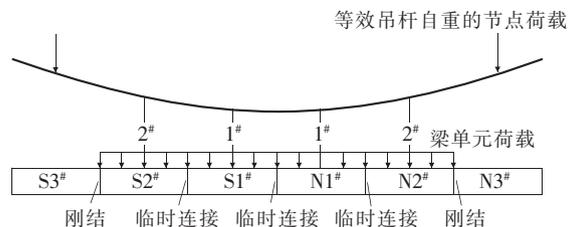


图 6 施工阶段 CS10

程。最后合龙阶段,通过施加节点强制位移,使加劲梁合龙,合龙以后,再将施加的节点强制位移钝化。注意CS8可能不收敛,可以采用分阶段激活的方式(先激活吊杆再激活主梁)来增加其收敛性。

## 5 结果对比

### 5.1 正装与倒拆主缆结果对比

为了验证该正装分析法的正确性,该文采用倒拆分析法对太洪长江大桥的施工过程进行计算分析。由于倒拆分析法不能自动考虑主塔混凝土的收缩、徐变,需统计正装分析法得到的各个施工阶段的主塔对应的收缩徐变量,然后通过修改模拟预抬高的温度荷载使得倒拆分析法中塔顶高程与正装分析法相同。将正装分析法的主缆线形、吊索力与之对比。列出主缆位移绝对差值包络图如图7所示,吊索力绝对差值包络图如图8所示。

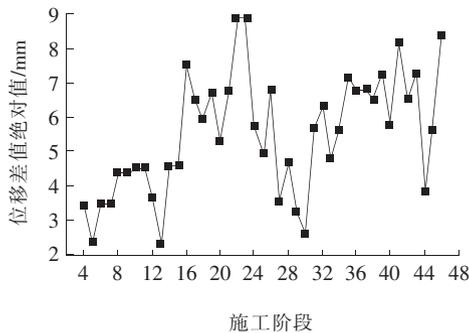


图7 正装与倒拆主缆位移绝对差值(最大值)包络图

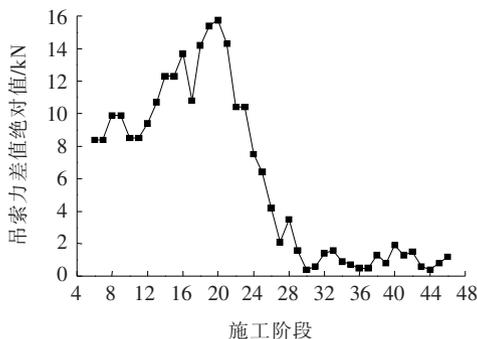


图8 正装与倒拆吊索力绝对差值(最大值)包络图

从图7可以看出:两者计算的主缆位移绝对差值最大不超过9 mm。从图8可以看出:两者计算的吊索力绝对差值最大为15.9 kN。该误差主要是由于统计主塔收缩徐变的误差以及程序计算分析时收敛条件的略微不同引起的。由图7、8可得正装分析法的正确性。相比倒拆分析法,正装分析法能够自动考虑主塔

混凝土的收缩、徐变,免去计算人员的大量人力。综上所述可得正装分析法的正确性与优越性。

### 5.2 有、无临时连接吊索力对比

为了探究梁段间临时连接对施工过程中结构受力的影响,将有无梁段间临时连接的结果进行对比分析。无梁段间临时连接是指在模拟主梁吊装时,梁段间采用刚结。主梁吊装过程中,两者吊索力包络图以及施工阶段CS14、CS20、CS26、CS31、CS36、CS42的吊索力分布图如图9、10所示。

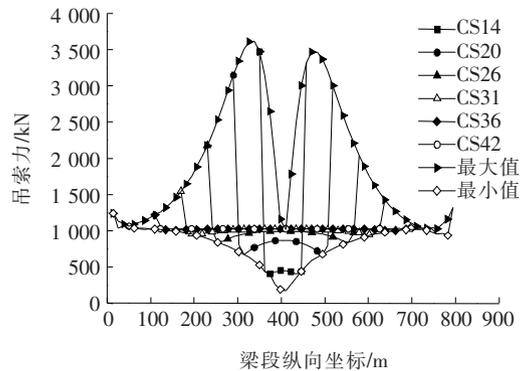


图9 刚性连接吊索力包络图

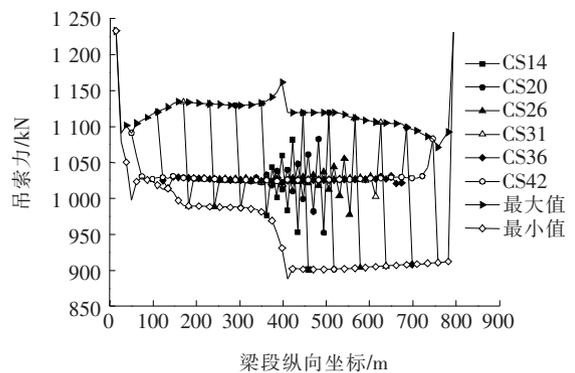


图10 临时连接吊索力包络图

由图9可知:梁段间采用刚性连接时,在主梁吊装初期,吊索力分布极不均匀,在施工阶段CS14中,边缘主梁对应的吊索力达到3470 kN,中间主梁对应的吊索力只有451 kN,随着主梁继续吊装,吊索力逐渐平均,稳定在1000 kN左右;从图10可知:梁段间采用临时连接时,在主梁吊装过程中,吊索力始终稳定在1000 kN左右,除了靠近主塔的两对吊索力,这是由于靠近主塔的吊杆两侧主梁相对较长,因此承担的梁段自重较大。对比图9、10可知:具有梁段间临时连接的模拟,吊索力在主梁吊装过程中分布更均匀。由此可知,在主梁吊装时采用临时连接对吊索力十分有利。可得在对主梁吊装进行仿真分析时,梁段间临时连接的模拟不可忽略。

## 6 梁段下缘开口分布规律

### 6.1 同一施工阶段中纵桥向各开口的规律

为了研究同一施工阶段中下缘开口宽度沿梁段纵向的分布规律,列举施工阶段 CS16、CS17、CS25、CS26、CS31、CS32 的主梁下缘开口分布规律如图 11 所示,该文的开口宽度不包括梁段间预留的焊缝宽度。

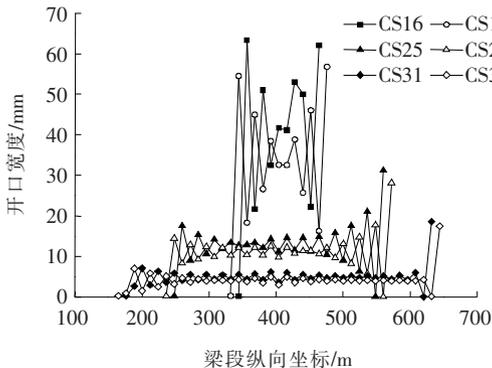


图 11 单个施工阶段中各开口宽度分布图

从图 11 可以看出:

(1) 主梁吊装初期,梁段间的开口宽度偏大,随着主梁的吊装,开口宽度逐渐减小。这是由于钢箱梁刚度较小,而且梁段间采用临时连接,主梁线形会与主缆线形协调。吊装初期,主梁的线形为凹曲线,此时梁段间下缘开口偏大,随着主梁吊装,主梁线形慢慢变成凸曲线,此时梁段间下缘开口渐渐闭合,逐渐趋向于 0。

(2) 主梁吊装前中期,靠近南岸的新吊装梁段与相邻梁段的下缘开口是闭合的,靠近北岸的新吊装梁段与相邻梁段的下缘开口偏大。这是由于加劲梁在吊装过程中,吊点并不是都布置在梁段的中点,当悬臂段比连接段长时,新吊装梁段与相邻梁段间偏向于闭合;当悬臂段比连接段短时,新吊装梁段与相邻梁段间偏向于开口的。太洪长江大桥标准段的长度为 12 m(图 12)。从跨中往南岸吊装时,悬臂段为 6.8 m,连接段为 5.2 m,故新吊装梁段与相邻梁段间下缘开口是闭合的;从跨中往北岸吊装时,悬臂段为 5.2 m,连接段为 6.8 m,故新吊装梁段与相邻梁段间下缘开口偏大。



图 12 太洪长江大桥标准段(单位:m)

(3) 同一个施工阶段的开口宽度沿纵桥向呈锯齿状,新吊装梁段对附近梁段的开口宽度影响较大,离得

稍远的开口宽度影响较小。

### 6.2 同一开口在不同施工阶段下的变化规律

梁段间下缘开口宽度在吊装初期数值较大,而且变化也比较明显。主跨  $L/3$ 、 $L/2$ 、 $2L/3$  处的开口宽度随着施工阶段的变化如图 13 所示。

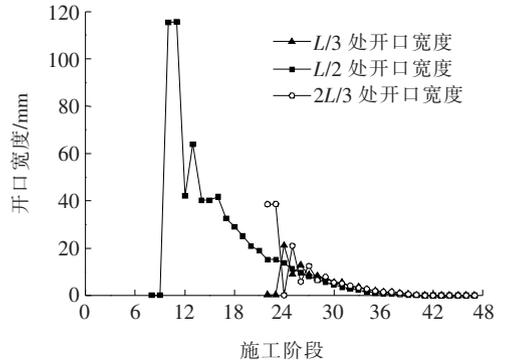


图 13 单个开口变化规律图

由图 13 可以看出:在主梁吊装初期,开口宽度偏大,中跨  $L/2$  处开口宽度在第 10 个施工阶段达到最大值 115.5 mm,随着主梁吊装,开口宽度呈锯齿状变化,总体呈下降趋势,主梁吊装后期,开口宽度趋近于 0。主索鞍顶推对开口宽度的影响很小。

## 7 结论

(1) 提出一种能够连续正装模拟钢箱主梁地锚式悬索桥上部结构施工全过程的方法。该方法操作简单,易收敛,且能自动考虑主塔混凝土收缩徐变。对比倒拆分析法的计算结果,主缆位移绝对差值最大不超过 9 mm;吊索力绝对差值最大为 15.9 kN。对比可得正装分析法的正确性与优越性。

(2) 基于有限元软件 Midas/Civil,改良了梁段间临时连接的模拟方法。对比了有无梁段间临时连接模拟的吊索力。无梁段间临时连接的模拟,在主梁吊装前期,吊索力分布极不均匀;有梁段间临时连接的模拟,在主梁吊装过程中,吊索力只在 1 000 kN 上下波动(除靠近主塔的两对吊索外)。综上可得,对主梁吊装仿真分析过程中,梁段间临时连接的模拟十分重要。

(3) 主梁吊装时,下缘开口宽度变化规律:主梁吊装初期,下缘开口较大,随着主梁吊装的进行,开口逐渐闭合;主梁吊装前中期,新吊装梁段与相邻梁段的下缘是否开口与悬臂段和连接段的长度有关;同一个施工阶段的开口宽度沿纵桥向呈锯齿状,新吊装的梁段对附近梁段开口宽度影响较大,离得远的开口宽度影响

# 基于仿真分析的桥梁组合式护栏设计优化

赵庆云<sup>1</sup>, 张运清<sup>1</sup>, 孟涛<sup>1</sup>, 卜倩森<sup>2</sup>

(1. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031; 2. 交通运输部公路科学研究院)

**摘要:** 为提升大量在用的 NJ 型桥梁护栏防护等级, 按照增设金属横梁及防阻块增强变形吸能的思路, 兼顾施工方便及改造成本, 利用三维有限元仿真分析方法, 对 6 种护栏提升改造方案逐一进行了分析和优化, 最终确定了一种安全、适用、经济的组合式护栏方案, 并将其应用于实际工程, 达到了预期效果。

**关键词:** 桥梁护栏; 组合式护栏; 碰撞条件; 仿真分析; 防护等级

## 1 引言

目前, 中国桥梁护栏常用的形式主要有钢筋混凝土墙式护栏、金属梁柱式护栏和组合式护栏。钢筋混凝土墙式护栏为刚性护栏, 一般迎撞面设置为坡面, 利用车辆爬高将车辆的动能转换为势能, 该类护栏耐久性好, 养护方便, 但自重较大, 对桥面板连接强度要求高; 金属梁柱式护栏属半刚性护栏, 自重轻, 通透美观,

通过横梁变形吸能可有效减小碰撞荷载, 但该类护栏造价较高, 防落物能力较差。

组合式护栏兼顾刚性与柔性, 既可通过上部结构变形吸能大大减小传递至桥面板的碰撞荷载, 又可延迟并抑制车辆在混凝土基座护栏的坡面爬升而减小翻车概率。传统的组合式护栏一般为混凝土护栏+一根钢管横梁, 且 2006 年以前修建的桥梁混凝土护栏基座多采用 NJ 型护栏(图 1)。NJ 型护栏的下坡面坡度小, 变坡点距离地面较高, 容易导致车辆倾覆或车体严

较小; 同一开口随着施工阶段呈锯齿状变化, 总体呈下降趋势, 趋近于 0, 主索鞍顶推对开口宽度影响很小。

## 参考文献:

[1] 郑宪政. 悬索桥架设过程结构分析方法[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十三届年会论文集(上册), 1998.

[2] Süleyman Adanur, Murat Günaydin. Construction Stage Analysis of Bosphorus Suspension Bridge[C]. Proceeding of 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, 2010; 5 492-5 505.

[3] Murat Günaydin, Süleyman Adanur. Construction Stage Analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2012, 42(4): 489-505.

[4] Murat Günaydin, Süleyman Adanur, Ahmet Can A-ltu-nişik. Determination of Structural Behavior of Bosphorus Suspension Bridge Considering Construction Stages and Different Soil Conditions[J]. Steel and Composite Struc-

tures, 2014, 17(4): 405-429.

[5] 李小珍, 胡大琳, 陈祥宝. 大跨度悬索桥施工状态的计算机仿真分析[J]. 中国公路学报, 1998(4).

[6] 陈彩霞. 悬索桥钢箱加劲梁安装过程及临时连接的研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2007.

[7] 陆文亮. 三塔悬索桥钢箱梁架设方案研究及施工过程分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2009.

[8] 姚增峰. 龙江桥钢箱加劲梁安装过程焊接时机及顺序的研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2016.

[9] 柯红军. 复杂悬索桥合理设计及合理施工状态确定[D]. 长沙理工大学博士学位论文, 2014.

[10] 钟继卫. 大跨度悬索桥钢箱梁吊装精细化分析[J]. 桥梁建设, 2010(6).

[11] 葛俊颖. 桥梁工程软件 Midas Civi 使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[12] 许世展. 桃花峪黄河大桥主桥成桥状态确定及基准索股架设[J]. 中外公路, 2013(4).

[13] 杨兴旺. 大跨度斜拉桥施工全过程非线性行为研究[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2007.

收稿日期: 2020-03-16(修改稿)

作者简介: 赵庆云, 男, 硕士, 工程师, E-mail: zhaopingyun18987@126.com