

部分叠合梁桥施工过程及成桥力学性能分析

蒙立和¹, 杨创捷², 谢肖礼^{2*}

(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530011; 2. 广西大学 土木建筑工程学院)

摘要:充分利用预应力箱形混凝土刚度大、梁相对高以及钢桁自重轻、容易获得力臂的优点,将两者进行有机结合,提出了一种新型梁桥。具体做法是:依据连续梁的弯矩分布规律,在正弯矩区及正负弯矩交替区均设置钢桁,而在负弯矩区设置以上弦杆为钢、下弦杆为预应力箱形混凝土、腹杆全钢的变高钢—预应力混凝土叠合的桁式结构,以使梁高最大化。为研究施工过程对其成桥应力的影响,以主跨 160 m 的新型梁桥为例,采用悬臂拼装法,并根据负弯区钢—预应力混凝土叠合段的特点,选取了两种不同施工顺序分别进行有限元模拟,对比分析各个施工阶段的应力及成桥的力学性能。研究表明:新型梁桥施工简单,在一定跨径内负弯区钢—预应力混凝土叠合段不同的施工顺序对成桥的应力影响较小,此外结构的刚度较大,动力特性及整体稳定性均满足要求。

关键词:部分叠合梁桥;悬臂拼装;施工阶段分析;成桥力学性能分析

1 前言

梁桥体系是所有桥梁结构中最简单,但同时也是工程使用最多的体系。梁桥按材料分类可以分为预应力混凝土梁桥、钢箱/钢桁梁桥和组合梁桥。预应力混凝土箱形梁桥由于具有优良的抗弯、抗扭性能和施工方便等优点,得到了广泛的应用。但是,由已建成的工程实例可知,预应力混凝土梁桥也存在一些问题,如因预应力筋松弛引起的预应力损失、梁体开裂和跨中下挠等。钢桁梁桥用桁架代替箱形或实腹截面,具有结构自重轻、易做高梁高等优点,因此具有较大的跨越能力,但用钢量较大。钢—混凝土/预应力混凝土组合结构梁桥因为充分发挥了不同材料各自的优势,具有自重轻、施工便利、经济性好等优点,故在当前的桥梁建设中被广泛应用。其主要分为 5 种形式:组合钢板梁桥、组合钢箱梁桥、组合钢桁梁桥、波折腹板组合梁桥及桁式腹杆组合梁桥。

传统梁桥主要有以上几种类型,根据其各自特点,采用不同的施工方法,包括悬臂、现浇、顶推等施工方法。悬臂施工法是以桥墩为中心向两岸对称地、逐段

悬臂接长的施工方法,可分为悬臂拼装和悬臂现浇。该方法可不用或少用支架,施工不影响通航或桥下交通。支架现浇法是在桥位处搭设支架,在支架上浇筑桥体混凝土,达到强度后拆除模板、支架。该方法无需预制场地,不需要大型起吊、运输设备。顶推施工法是将预制好的梁体,使用顶推装置纵向顶推就位的施工方法。顶推施工时不影响桥下交通,也没有高空作业;预制梁体的施工质量和施工进度容易得到保证。

为解决以上预应力混凝土梁桥及钢箱/钢桁梁桥所存在的问题,并将两者的优点进行结合,该文提出一种新型的预应力混凝土与钢桁组合连续梁桥,简称部分叠合梁桥(图 1)。部分叠合梁桥的结构布置及受力性能较传统梁桥有较大的区别,部分叠合梁桥充分利用了预应力混凝土刚度大以及钢桁自重轻的优点,将两者进行科学合理的结构布置。具体做法是:依据连续梁的弯矩分布规律,在正弯区及正负弯矩交替区均设置钢桁,而在负弯区设置以上弦杆为钢、下弦杆为预应力箱形混凝土、腹杆全钢的变高钢—混凝土叠合的桁式结构,以使梁高最大化。

该文所提出的部分叠合梁桥是一种新结构,根据其自身特点,整体可采用悬臂拼装的施工方法。但是,

收稿日期:2020-11-05(修改稿)

基金项目:广西重点研发计划项目(编号:桂科 AB18126047);广西防灾减灾与工程安全重点实验室系统性研究项目(编号:2016ZDX0001)

作者简介:蒙立和,男,大学本科,高级工程师。

* 通信作者:谢肖礼,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:270933087@qq.com

部分叠合梁与预应力混凝土梁及全钢桁梁在结构形式上有很大的区别,即负弯区为钢—预应力混凝土叠合结构,钢结构和混凝土的施工顺序不同对成桥应力有影响,因此该文以 160 m 跨径部分叠合梁为例,采用悬臂拼装的施工方法,并采用两种不同施工顺序的施工方案,对其进行施工过程及成桥力学性能分析。

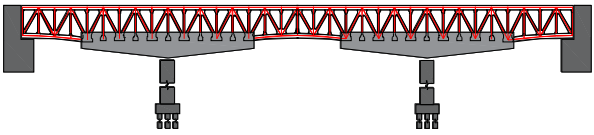


图1 部分叠合梁桥

2 力学原理及结构形式

部分叠合梁桥的结构形式简单,但其力学理念与现有预应力混凝土梁桥或组合梁桥均有许多差异,现对其力学原理进行阐述。

2.1 部分叠合梁桥力学原理

2.1.1 采用胡克定律减少正弯矩峰值

主要通过增加负弯矩区下弦杆混凝土用量并通过变高来增加负弯矩截面抗弯刚度,依据胡克定律(力与刚度成正比原理),负弯矩峰值会增加,而正弯矩峰值则减小;另外,因所增加的混凝土弯矩效应小(离支座近),而截面惯性矩也在增加,故负弯区域上弦杆正应力峰值变化不大,然而,正弯矩区域占了绝大部分,从而达到减少用钢量的目的。以下通过示例作进一步说明。

为便于理解,以下算例将负弯区进行等高简化(图2),设恒载集度为 q_1 ,钢结构部分抗弯刚度为 $E_1 I_1$,钢—混凝土组合部分抗弯刚度为 $E_2 I_2$ 。当 $E_2 I_2 / (E_1 I_1)$ 分别取值 1、2、4、8 时,即钢—混凝土组合部分刚度增加时,负弯矩峰值增加,而正弯矩峰值减小。

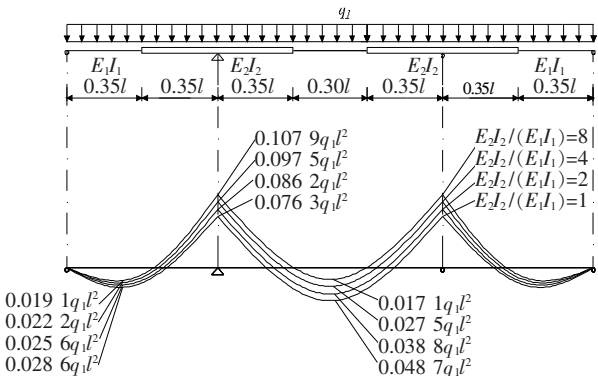


图2 三跨连续梁弯矩变化的影响举例

2.1.2 预应力混凝土与受压区混凝土形成抵抗弯矩
中性轴下移至混凝土内,使其上部出现受拉区域,通过对该区施加预应力与受压区混凝土形成附加抵抗弯矩。下文分析增加混凝土对中性轴下移的影响。

(1) 中性轴下移分析

图3(a)为桁架截面简化模型,下弦混凝土高度为 $2h$,弹性模量为 E_c ,上弦钢结构高度为 h ,弹性模量为 E_s 。如图3(b)所示,将混凝土截面等效变换为钢材截面,变换后的宽度 b_1 为:

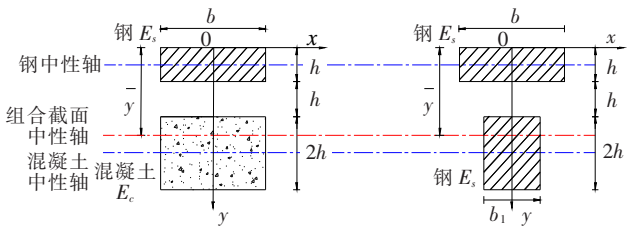
$$b_1 = \frac{E_c}{E_s} b \tag{1}$$

根据同一材料的中性轴计算公式,可知钢—混凝土组合截面的中性轴为:

$$\bar{y} = \frac{(1+12k)}{2(1+2k)} h \tag{2}$$

式中: $k = \frac{E_c}{E_s}$ 。

由式(2)可知:混凝土截面高度增大时, \bar{y} 随之增大,即中性轴逐渐下移。



(a) 桁架截面简化模型 (b) 混凝土截面高度为钢材截面

图3 中性轴下移分析图

(2) 下弦杆静力等效分析

由以上分析可知:随着下弦杆混凝土增加,中性轴会逐渐下移至混凝土内,在受拉区施加预应力后,预应力混凝土与受压区混凝土形成了附加抵抗弯矩 \bar{M} 。为方便分析,将下弦杆进行静力等效,如图4所示。

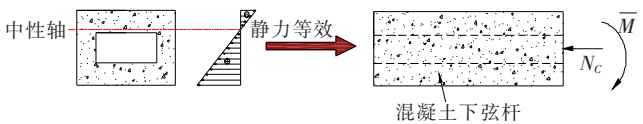


图4 下弦杆静力等效示意图

2.1.3 依据杠杆原理,增大力偶间的距离以减少用钢量

通常情况下,对钢结构而言,桁式结构更容易获得较长的梁高;对混凝土结构而言,箱形结构更容易获得较长的梁高。因此为获得更长的抵抗力偶矩,将两种

结构进行有机结合,从而使力臂最大化,因此负弯区设计成钢—混凝土叠合的桁式结构。

如图 5 所示,对桁架截面进行静力等效,可分别求出主矢、主矩表达式为:

$$N = N_s - N_c = 0 \quad (3)$$

$$M = N_s y_1 + N_c y_2 + \bar{M} \quad (4)$$

且有,

$$y_1 + y_2 = H \quad (5)$$

将式(5)、(3)代入式(4)可得:

$$M = N_s H + \bar{M} \quad (6)$$

由式(6)可知:① \bar{M} 为常数时,力臂 H 增大, N_s 减小,从而可以减少用钢量;② H 为常数时, \bar{M} 增大, N_s 减小,亦可减少用钢量。

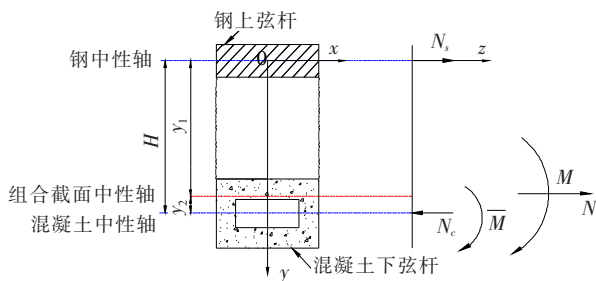


图 5 桁架截面静力等效示意图

2.2 部分叠合梁桥结构布置

根据上述部分叠合梁桥力学原理,对部分叠合梁桥结构进行如下布置:在负弯区,下弦杆用混凝土箱形结构(对结构的荷载效应小),上弦杆用钢结构,腹杆为全钢的变高桁架结构;在正负弯矩交替出现区,因梁段截面上部及下部均可能出现拉应力,故采用钢结构;在正弯区,采用钢结构以减小荷载效应。

3 施工方案

以主跨径 160 m 的部分叠合梁桥为例,采用悬臂拼装的施工方法,根据叠合段中钢、预应力混凝土不同的施工顺序,具体分成两种施工方案。

3.1 施工方案 1

该方案在叠合段施工时,预应力混凝土、钢交替逐节拼装,如此反复直至叠合段施工完成,之后进行叠合段两端全钢桁架悬臂拼装,施工阶段描述如下(图 6):

阶段 1:墩顶设置临时固结装置,以桥墩为中心,向两边悬臂拼装混凝土段 1,最后张拉预应力束。

阶段 2:吊装叠合段钢桁段 1 与混凝土段 1 预留

孔洞连接。

阶段 3:以预应力混凝土段 1 为中心,向两边悬臂对称拼装混凝土段 2,采用环氧树脂胶连接,最后张拉预应力束。

阶段 4:以叠合段钢桁段 1 为中心向两边吊装叠合段钢桁段 2 与混凝土段 2 预留孔洞连接。

阶段 5:以叠合段为中心,向两边悬臂对称拼装全钢钢桁段 1。

阶段 6:进行边跨合龙,设置边跨永久支座。

阶段 7:进行中跨合龙,设置墩顶永久支座,拆除墩顶临时支座。

阶段 8:进行桥面铺装,即上二期恒载。

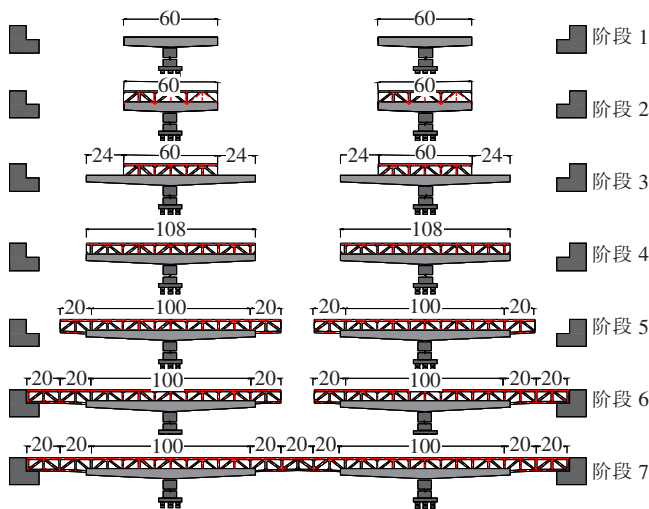


图 6 施工方案 1 图集(单位:m)

3.2 施工方案 2

该方案在叠合段施工时,待预应力混凝土全部施工完成后,再分段架设叠合段钢桁架,之后进行叠合段两端全钢桁架悬臂拼装,施工阶段描述如下(图 7):

阶段 1:墩顶设置临时固结装置,以桥墩为中心,向两边悬臂拼装预应力混凝土段 1,最后张拉预应力束。

阶段 2:以预应力混凝土段 1 为中心,向两边悬臂对称拼装混凝土段 2,采用环氧树脂胶连接,最后张拉预应力束。

阶段 3:吊装叠合段钢桁段 1 与混凝土段 1 预留孔洞连接。

阶段 4:以叠合段钢桁段 1 为中心向两边吊装叠合段钢桁段 2 与混凝土段 2 预留孔洞连接。

阶段 5:以叠合段为中心,向两边悬臂对称拼装全钢钢桁段 1。

阶段 6:进行边跨合龙,设置边跨永久支座。

阶段 7:(成桥)进行中跨合龙,设置墩顶永久支座,拆除墩顶临时支座。

阶段 8:进行桥面铺装,即上二期恒载。

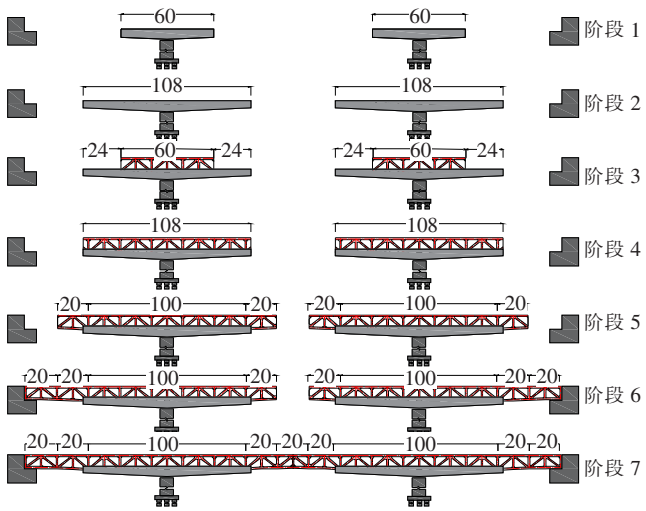


图 7 施工方案 2 图集(单位:m)

方案 1 与方案 2 的区别在于叠合段的施工顺序不同:方案 1 的叠合段施工时,钢桁架在预应力混凝土施工达到一定长度后就开始架设,使得该部分钢桁架提前参与受力,可在叠合段施工时为预应力混凝土分担恒载,一定程度上降低叠合段施工时预应力混凝土的应力;方案 2 叠合段施工时,待预应力混凝土部分全部施工完成后再架设钢桁,此时钢桁架设完成与混凝土形成结构后才参与受力。

可见,两种施工方案的施工阶段应力和成桥力学性能会有所不同,因此该文以 160 m 跨径部分叠合梁为例,对两种方案分别进行施工过程及成桥力学性能分析。

4 有限元施工过程及成桥分析

采用有限元软件 Midas/Civil 进行两种不同施工顺序的施工阶段模拟,并分别进行各施工阶段应力分析及成桥应力分析。

4.1 结构布置

梁桥全长 340 m,桥跨布置为(90+160+90) m,如图 8 所示。为使预应力混凝土全部布置于负弯矩区段,通过合理设计、反复试算,计算得预应力混凝土段布置长度为 100 m。算例中的桥面板及桥面铺装总厚度为 200 mm,仅作为恒载,不参与结构受力,在有限元模型分析计算中以单元荷载模拟。

采用有限元软件 Midas Civil 建模,全桥节点 197 个,单元 449 个,如图 9 所示。主梁横断面为上宽下窄

的变高梯形形式,上缘宽 16 m,下缘宽 8 m,高度为 10~17 m。主梁横断面有两种形式,在负弯区为钢—混凝土叠合断面,其他区域为全钢横断面,其中钢采用 Q345 钢材,混凝土采用 C60 混凝土。部分叠合梁桥钢材用量为 1 485 t(0.27 t/m²),混凝土用量为 5 480 t(0.41 m³/m²),预应力筋用量为 99.96 t(18.38 kg/m²)。

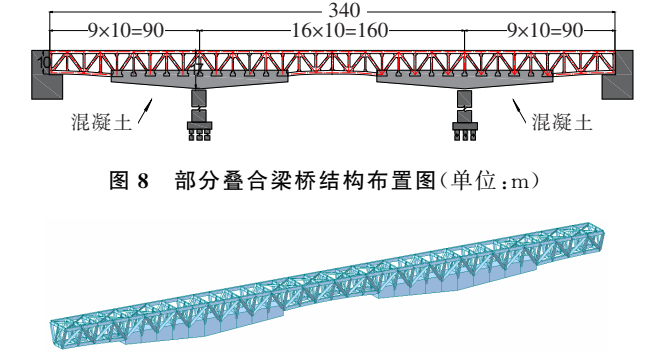


图 8 部分叠合梁桥结构布置图(单位:m)

图 9 部分叠合梁桥有限元模型

4.2 施工过程分析

- (1) 设计荷载
一期恒载:按实际断面并考虑构造因素计取;
桥面系恒载:按 80 kN/m 计;
汽车荷载:公路—Ⅰ级,双向四车道;
温度荷载:初始温度 15℃,升温至 45℃,降温至 -5℃。

- (2) 施工阶段分析内容
结构强度:分别分析各施工阶段结构的应力水平。
稳定性分析:取最不利施工工况进行稳定性分析。
- (3) 强度分析

两种施工方案下,各个施工阶段各构件最大应力计算结果见表 1、2。结果表明:两种施工方案各个施工阶段钢结构应力值均较小,且差别不大。此外,施工

| 表 1 施工方案 1 下各构件最大施工应力 MPa | | | | | |
|---------------------------|------|------|-------|-------|------|
| 施工阶段 | 钢上弦杆 | 钢下弦杆 | 混凝土 | 腹杆 | 横向连接 |
| 1 | — | — | -9.9 | — | — |
| 2 | 1.9 | — | -9.8 | -5.2 | 3.1 |
| 3 | -5.3 | — | -14.1 | -12.0 | 3.6 |
| 4 | 7.5 | — | -13.8 | -14.3 | 3.5 |
| 5 | 20.8 | -6.5 | -13.0 | -16.8 | 4.1 |
| 6 | 22.2 | 8.6 | -12.9 | -20.0 | 4.4 |
| 7 | 22.7 | 12.7 | -12.3 | -31.1 | 6.1 |
| 8 | 63.0 | 61.9 | -13.7 | -40.0 | 15.5 |

注:“—”表示构件受压,下同。

表 2 施工方案 2 下各构件最大施工应力 MPa

| 施工阶段 | 钢上弦杆 | 钢下弦杆 | 混凝土 | 腹杆 | 横向连接 |
|------|------|------|-------|-------|------|
| 1 | — | — | −9.9 | — | — |
| 2 | — | — | −14.6 | — | — |
| 3 | 2.2 | — | −14.5 | −5.2 | 3.1 |
| 4 | 7.7 | — | −14.1 | −7.1 | 3.6 |
| 5 | 20.7 | −6.5 | −13.3 | −16.8 | 4.6 |
| 6 | 22.3 | 8.7 | −13.3 | −19.9 | 4.8 |
| 7 | 19.4 | 12.6 | −12.7 | −31.4 | 6.2 |
| 8 | 66.3 | 61.8 | −13.6 | −40.5 | 15.4 |

方案 1 中桁架虽然对混凝土预应力造成一定损失,但因钢结构更早参与受力,故两方案混凝土应力差别不大。因此,叠合段中钢结构与预应力混凝土的施工顺序对构件应力影响不大。

(4) 施工阶段最不利工况稳定性分析

方案 1 下,对施工阶段 5 时的结构进行整体稳定性分析,结果见表 3。由表 3 可知:1 阶失稳模态的系数为 525.6,满足要求。

表 3 施工阶段 5 结构整体稳定系数(方案 1)

| 模态号 | 临界荷载系数 | 模态 |
|-----|--------|----------|
| 1 | 525.6 | 边跨钢桁面外扭转 |
| 2 | 537.8 | 边跨钢桁面外扭转 |
| 3 | 560.7 | 边跨钢桁面外扭转 |
| 4 | 676.7 | 边跨钢桁面内扭转 |

施工方案 2 下,对施工阶段 2 时的结构和施工阶段 5 时的结构进行整体稳定性分析,结果见表 4。由表 4 可见:160 m 跨径的叠合梁桥中,预应力混凝土的稳定性远高于钢的稳定性,故在施工方案 2 中施工阶段 5 才是施工阶段的最不利状态,1 阶失稳模态的系数为 525.6,满足要求。

表 4 施工阶段 2、5 结构整体稳定系数(方案 2)

| 模态号 | 施工阶段 2 | | 施工阶段 5 | |
|-----|--------|---------|--------|----------|
| | 临界荷载系数 | 模态 | 临界荷载系数 | 模态 |
| 1 | 1 874 | 混凝土面外扭转 | 525.6 | 边跨钢桁面外扭转 |
| 2 | 4 280 | 混凝土面外扭转 | 537.8 | 边跨钢桁面外扭转 |
| 3 | 9 192 | 混凝土面内扭转 | 560.7 | 边跨钢桁面外扭转 |
| 4 | 13 130 | 混凝土面外扭转 | 676.7 | 边跨钢桁面内扭转 |

4.3 成桥应力分析

(1) 荷载组合

组合 1:恒载;

组合 2:1.2×恒载+1.4×活载;

组合 3:1.2×恒载+1.4×活载+1.05×降温。

(2) 分析内容

结构强度:在组合 1、2、3 作用下,分别分析各结构的应力水平。

结构刚度:在移动荷载作用下分析结构的位移水平。

整体稳定性:在满布活载及恒载共同作用下,提取结构前 5 阶整体屈曲模态及相应的稳定系数。

动力特性:分析结构前 5 个振型及其自振频率、周期。

(3) 强度分析

两种施工方案下,各构件最大成桥应力计算结果见表 5、6。表 5、6 表明:在 160 m 级跨径的部分叠合梁桥中,两种施工方案下各构件最大成桥应力差别不大,且应力值均较小。

表 5 施工方案 1 下各构件最大成桥应力

| 构件 | 成桥应力/MPa | | |
|------|----------|--------|--------|
| | 组合 1 | 组合 2 | 组合 3 |
| 钢上弦钢 | 63.0 | −157.1 | −154.1 |
| 钢下弦钢 | 61.9 | 141.6 | 137.9 |
| 混凝土 | −13.7 | −20.0 | −19.9 |
| 腹杆 | −40.0 | −152.5 | −155.2 |
| 横联 | 15.5 | 94.4 | 92.6 |

注:“−”表示构件受压,下同。

表 6 施工方案 2 下各构件最大成桥应力

| 构件 | 成桥应力/MPa | | |
|------|----------|--------|--------|
| | 组合 1 | 组合 2 | 组合 3 |
| 钢上弦钢 | 66.3 | −156.9 | −154.0 |
| 钢下弦钢 | 61.8 | 141.5 | 137.7 |
| 混凝土 | −13.6 | −19.9 | −16.1 |
| 腹杆 | −40.5 | −153.4 | −156.2 |
| 横联 | 15.4 | 95.8 | 93.4 |

(4) 结构刚度分析

分析部分叠合梁桥在移动荷载作用下主梁挠度,结果见表 7。表 7 表明:在移动荷载作用下,主梁最大上、下挠度值之和为 29.61 mm,为 $l/5\ 403$,可见部分叠合梁桥刚度很大。

表7 移动荷载作用下主梁挠度

| 挠度统计类型 | 挠度值/mm |
|-----------------|--------|
| 主梁最大下挠 | 26.97 |
| 主梁最大上挠 | 2.64 |
| 主梁最大上下挠度(绝对值)之和 | 29.61 |

(5) 整体稳定性分析

考虑恒载+全桥满布活载工况,对结构进行整体稳定性分析,提取稳定系数及失稳模态,结果见表8。表8表明:部分叠合梁桥整体稳定系数较高,为49.9,满足要求。

表8 结构整体稳定系数

| 模态号 | 临界荷载系数 | 失稳模态 |
|-----|--------|----------|
| 1 | 49.9 | 中跨钢桁面外扭转 |
| 2 | 50.1 | 中跨钢桁面外扭转 |
| 3 | 59.2 | 边跨钢桁面内扭转 |
| 4 | 59.4 | 边跨钢桁面内扭转 |

(6) 动力特性分析

结构的动力响应按线弹性理论进行分析,结果见表9。表9表明:结构首次发生面内振动的频率为1.17 Hz,周期为0.85 s;首次发生面外振动的频率为2.58 Hz,周期为0.39 s。

表9 施工方案1下自振频率

| 模态号 | 频率/Hz | 周期/s | 振型 |
|-----|-------|------|-------|
| 1 | 1.17 | 0.85 | 面内 |
| 2 | 1.83 | 0.55 | 面内正对称 |
| 3 | 2.58 | 0.39 | 面外正对称 |
| 4 | 2.73 | 0.37 | 面内 |
| 5 | 2.92 | 0.34 | 面内 |

5 结论

提出了一种新型梁桥,并以160 m跨径为例,通过有限元对其进行两种施工过程(①叠合段预应力混凝土、钢交替逐节拼装,钢结构提前承担该部分的恒载;②叠合段先悬臂拼装完所有预应力混凝土,再逐节拼装钢结构)及成桥力学性能分析,得出以下结论:

(1) 采用两种不同的施工方案,施工阶段各构件应力差别不大且满足要求,对成桥应力的影响基本相同。

(2) 两种施工方案的最不利工况均出现在最大悬臂阶段(阶段5),此时施工阶段稳定性系数均较高,能够满足施工阶段稳定性的要求。

(3) 在移动荷载作用下,主梁最大上、下挠度值之和为29.61 mm,为 $l/5\ 403$,可见部分叠合梁桥刚度很大。

(4) 部分叠合梁桥的1阶失稳模态的系数为49.9;结构首次发生面内振动的频率均为1.17 Hz,首次发生面外振动的频率为2.58 Hz。可见结构的整体稳定及基频均较大。

参考文献:

[1] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2008.

[2] 廖娟,叶贵如,徐兴. 预应力混凝土箱形连续梁桥裂缝成因分析及对加固方案的评价[J]. 中国公路学报, 2004(1).

[3] 朱志伟,章世祥,王丹,等. 典型病害对中小跨径钢箱梁的影响研究[J]. 公路交通技术, 2019(4).

[4] 刘永健,高诣民,周绪红,等. 中小跨径钢-混凝土组合梁桥技术经济性分析[J]. 中国公路学报, 2017(3).

[5] 邵长宇. 梁式组合结构桥梁[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.

[6] Robert DUBOIS. Three Recent Composite Bridges in France[J]. Composite Bridges Composite Bridges Proceedings of the 3rd International Meeting, Madrid, 2001: 113—127.

[7] 赵磊,王学敏,成文,等. 波形钢腹板与混凝土腹板箱拱受力性能对比分析[J]. 中外公路, 2018(4).

[8] 窦文林,安康月. 高速公路特大桥预应力连续梁桥悬臂施工控制研究[J]. 公路工程, 2019(3).

[9] 郭坚. 满堂支架现浇法在城市变截面预应力砼连续梁桥中的应用[J]. 公路与汽运, 2015(3).

[10] 屈云峰. 大跨度斜拉桥主梁钢箱顶推施工控制计算分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2017.

[11] 谢道平,刘益平,吴明威,等. 大跨度钢桁梁顶推技术研究及应用[J]. 中外公路, 2017(4).

[12] 孙训方,方孝淑,关来泰. 材料力学[M]. 北京:人民教育出版社, 2009.