

文章编号:1672-9331(2017)02-0041-08

# 双塔单跨混合梁自锚式悬索桥缆梁同步施工方案

李传习, 周群, 柯红军, 李游

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 针对双塔单跨混合梁自锚式悬索桥传统上“先缆后梁”总体架设方法修建临时锚固体系造价高、工期长,且由临时锚固体系转换到永久锚固体系过程中工序复杂及“先梁后缆”总体架设方法工期长、成本高、风险大的弊端和不足,以株洲枫溪大桥为工程背景,提出“缆梁同步”施工方案。分析了不同跨径、垂跨比下锚固处空缆水平力的大小,计算了单墩所能抵抗最大不平衡水平力的量值,确定了该施工方案的可行范围。研究表明:①锚固处空缆水平力随跨径的增大而增大,随垂跨比的增大而减小。②跨径100~300 m、垂跨比1/6.0~1/4.0,锚固处空缆水平力在2 900 kN以内;跨径100~300 m、垂跨比1/8.0~1/6.0以及跨径300~450 m、垂跨比1/6.0~1/4.0时,锚固处空缆水平力在6 400 kN以内;跨径300~450 m、垂跨比1/8.0~1/6.0时,锚固处空缆水平力都在6 400 kN以上,最大值超过10 000 kN。③该不平衡水平力由锚固处以下边墩承受,跨径100~300 m、垂跨比1/6.0~1/4.0的该类桥梁可实施该方案。④墩顶适量配重,或边墩受拉区配置一定预应力筋,或在设计阶段增大边墩截面或惯性矩,能使该方案在墩高更高、跨径更大而垂跨比更小的该类桥梁中实施。该成果在依托工程中的应用效果良好。

**关键词:** 自锚式悬索桥;混合梁;缆梁同步;单墩;水平力;跨径;垂跨比

**中图分类号:** U448.25

**文献标识码:** A

## Cable-girder synchronous construction scheme of self-anchored suspension bridge with double-tower single-span hybrid beam

LI Chuan-xi, ZHOU Qun, KE Hong-jun, LI You

(School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** Aiming at the construction of the "erecting cable before constructing beam" in the traditional erection of the self-anchored suspension bridge of the double-tower single-span hybrid beam, the temporary anchorage cost is high, and from the temporary anchor system to the permanent anchoring system process complex process defects, the overall erection method of "erecting cable before constructing beam" with long duration, high cost, lack of risk, the construction plan of "cable beam synchronization" based on the construction of Zhuzhou Fengxi Bridge is put forward, the difference of horizontal force of free cable anchorage between the span and raise-span ratio is analyzed, and the calculated value of the

**收稿日期:** 2017-03-08

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51378080)

**作者简介:** 李传习(1963-),男,湖南衡南人,长沙理工大学教授,博士生导师,主要从事桥梁结构理论与新技术方面的研究。

single-pier can resist the maximum unbalanced horizontal force and determine the feasible range of the construction scheme. The results show that: ①The horizontal force of free cable increases with the increase of the span, and decreases with the increase of the span ratio at the anchor. ②When Span of 100~300 m, raise-span ratio in the 1/6.0~1/4.0 the horizontal force of free cable is within 2 900 kN; when span of 100~300m, rise-span ratio in the 1/8.0~1/6.0, the span between the 300~450 m, rise-span ratio between 1/6.0~1/4.0, the horizontal force of free cable is within 6 400 kN; when span in the 300~450 m, rise-span ratio in 1/8.0~1/6.0, the horizontal force of free cable is above 6400 kN, the maximum value is more than 10 000 kN. ③The unbalanced horizontal force is supported by the lower pier of the cable anchor, which can meet the span of 100~300 m, and the rise-span ratio is between 1/6.0~1/4.0. ④The appropriate top of the dome or the edge of the pendulum area of a certain pre-stressed tendons, or in the design stage to increase the side pier section or moment of inertia can make the program implemented in the bridge with higher pier height, larger span and smaller span ratio. The engineering application showed the proposed method effective and accurate.

**Key words:** self-anchored suspension bridge; hybrid beam; cable-girder synchronization; single-pier; horizontal force; span; raise-span ratio

地锚式悬索桥总体架设方法为“先缆后梁”,即先架设主缆,安装吊索,然后吊装主梁<sup>[1-3]</sup>。自锚式悬索桥由于主缆锚固于主梁,若采用“先缆后梁”的总体架设方法,则需设置临时锚固体系来抵抗施工中的主缆不平衡水平力。文献[4-6]对“先缆后梁”总体架设方法在自锚式悬索桥中的应用做了一定的研究,但由于修建临时锚固体造价高、工期长,且由临时锚固体系转换到永久锚固体系过程中工序复杂,风险极大,故实际工程中很少采用这一架设方法。一般采用“先梁后缆”的总体架设方法,即主梁大多采用顶推法或支架法先于主缆架设并合龙,然后架设主缆,张拉吊索完成体系转换<sup>[7-11]</sup>。但这种方法对于北方地区每年有几个月因气温太低而无法施工、南方地区河流汛期来临水流湍急需加快施工进度以降低施工风险等特殊条件下的施工多有不利。

双塔单跨混合梁自锚式悬索桥主跨为钢箱梁,一般采用顶推法施工;边跨为混凝土梁,一般采用支架法施工。在边墩及部分主梁施工完成后,部分主梁自重抵消掉锚固处空缆竖向力后对边墩压力仍足够大,足以使梁墩间的摩擦力大于锚固处空缆水平力(必要时还可以采取梁顶适量堆载、墩梁临时固结等措施),即该不平衡水平力可以由锚固处以下抗推力较大的边墩承受。

因此,为了克服双塔单跨混合梁自锚式悬索桥传统上“先缆后梁”或“先梁后缆”总体架设方法的弊端,作者以株洲枫溪大桥为工程背景,首次提出在边墩及部分主梁施工完成后同步架设猫道及主缆,在主梁合龙前或合龙时完成主缆架设,即采用“缆梁同步”的施工方案。通过分析不同跨径、垂跨比下锚固处空缆水平力的大小,计算单墩所能抵抗最大不平衡水平力的量值,确定该施工方案的可行范围,以期在极大程度上缩短该类桥梁的施工周期,降低施工成本和风险。

## 1 工程简介

株洲枫溪大桥主桥为一座  $3 \times 45 \text{ m} + 300 \text{ m} + 3 \times 45 \text{ m}$  双塔单跨混合梁自锚式悬索桥(如图1所示),边跨和锚跨为支架现浇混凝土箱梁,主跨主梁为采用顶推法施工单箱三室扁平流线型钢箱梁。

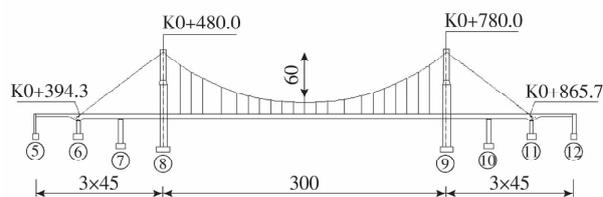


图1 桥梁立面布置图(单位:m)

Fig. 1 Layout of bridge elevation(Unit: m)

主缆主跨跨径为 300 m,垂跨比为 1/5.0,边跨理论跨径为 85.715 m。主缆施工采用预制平行钢丝索股逐根架设的施工方法(PPWS),共 2 根主缆,单根主缆由 33 股高强平行钢丝组成。

主梁施工中后期,由于多次强降雨,湘江水位长时间居高不下,出于安全及工期考虑,在边跨 5#~7#号(10#~12#)墩混凝土箱梁现浇完成强度合格后,提前架设猫道及主缆,加劲梁架设与主缆架设同步进行,即采取“缆梁同步”施工。

## 2 自锚式悬索桥锚固处水平力的分析与计算

目前,国内外建造的现代双塔自锚式悬索桥垂跨比基本在 1/8.0~1/4.0,最大跨径 406 m,故本研究将双塔单跨混合梁自锚式悬索桥垂跨比限定在 1/8.0~1/4.0、跨径限定在 100~450 m 进行研究。

### 2.1 基本假定与参数设定

图 2 所示为一座普通的双塔单跨混合梁自锚式悬索桥结构示意图。

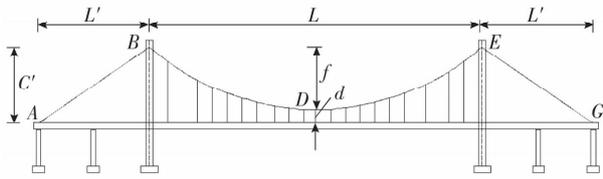


图 2 双塔单跨混合梁自锚式悬索桥结构示意图

Fig. 2 Structure illustration of self-anchored suspension bridge with double tower and single span

为使问题相对简化,对结构作如下基本假定。

- 1) 结构对称,塔高相等,边跨设一辅助墩。
- 2) 主缆为理想柔性索,只受拉,不受压,也不抗弯;应力—应变符合胡克定律;受力前后计算均使用变形前的主缆横截面面积;荷载沿跨度均布。
- 3) 主塔所能承受不平衡水平力有限,两侧主缆水平分力大小相同。

主要参数描述如下。

$L$  为主跨跨径, m;  $f$  为主跨成桥时的主缆垂度, m; 垂跨比  $\lambda = f/L$ 。

$w_b$  为主跨主梁荷载集度, kN/m, 考虑了二期铺装、活载等荷载。

$w_c$  为主跨主缆等效荷载集度, kN/m,  $w_c = w_d + (\rho_c A_c S)/L$ , 其中,  $S$  为主跨有应力索长,  $w_d$

为猫道荷载集度,本研究分析计算时按 0.6 kN/m 考虑。

采用抛物线理论近似计算方法<sup>[12]</sup>。

主跨主缆曲线方程为:

$$y = \frac{4fx}{L^2}(x - L)。 \quad (1)$$

主跨主缆有应力近似索长为:

$$S \approx L \left( 1 + \frac{8f^2}{3L^2} - \frac{32f^4}{5L^4} \right)。 \quad (2)$$

主跨主缆弹性伸长  $\Delta S$  为:

$$\Delta S = \frac{wL}{E_c A_c} \left( \frac{L^2}{8f} + \frac{2f}{3} \right)。 \quad (3)$$

主跨主缆无应力索长为:

$$S_0 = S - \Delta S。$$

### 2.2 锚固处空缆水平力的分析

图 3 为“缆梁同步”施工方案示意图( $K$  表示空缆状态,下同)。基于假设 3),有锚固处空缆水平力计算公式为:

$$H = \frac{w_c L_k^2}{8f_k} = \frac{\rho_c A_c S_K + w_d L_K}{8\lambda_K}。 \quad (4)$$

由式(4)可知,空缆下主跨跨径、垂跨比、主缆截面面积等是锚固处空缆水平力计算的关键参数,参数的求解可根据无应力索长不变的原则由成桥状态主缆各参数计算出空缆各参数。

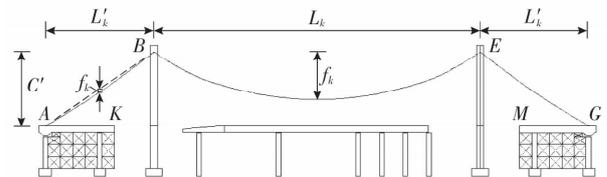


图 3 “缆梁同步”施工方案示意图

Fig. 3 Illustration of “Cable beam synchronization”

不同成桥主跨跨径、垂跨比下主缆截面面积取值则可根据主缆强度进行确定,应满足方程:

$$\sigma_{c \max} = \frac{T_{\max}}{A_c} = \frac{w_b L}{8\lambda A_c} \sqrt{1 + 16\lambda^2} \leq [\sigma_c]。 \quad (5)$$

式(5)右边取等号即可确定一定成桥主跨跨径、垂跨比下主缆截面面积,基于假设(2)该截面面积不变。

根据无应力索长不变的原则,有成桥状态与空缆下主跨主缆索长关系为:

$$S_0 = S - \Delta S_0 = S_K - \Delta S_K。 \quad (6)$$

式(6)按式(2)完整展开式为:

$$L \left[ 1 + \frac{8\lambda^2}{3} - \frac{32\lambda^4}{5} - \frac{w_b}{E_c A_c} \left( \frac{L}{8\lambda} + \frac{2\lambda L}{3} \right) \right] =$$

$$L_K \left[ 1 + \frac{8\lambda_K^2}{3} - \frac{32\lambda_K^4}{5} - \frac{\omega_c}{E_c A_c} \left( \frac{L_K}{8\lambda_K} + \frac{2\lambda_K L_K}{3} \right) \right]. \quad (7)$$

在实际工程中,主索鞍预偏量相对主跨跨径来说是个小量,即  $L_K \approx L$ ,  $\omega_c$  相对  $E_c A_c$  来说更是一个微小量,本研究为简化计算,取  $L_K = L$ ,并约去式(7)等号右边所有负的小量,化简得:

$$\lambda_K \approx \sqrt{\frac{3}{8} \left[ \frac{8\lambda^2}{3} - \frac{32\lambda^4}{5} - \frac{\omega_b}{E_c A_c} \left( \frac{L}{8\lambda} + \frac{2\lambda L}{3} \right) \right]}. \quad (8)$$

背景工程成桥主跨  $L = 300$  m,垂跨比  $\lambda = 0.2$ ,空缆下主索鞍预偏量为  $0.887$  m,跨中空缆垂度  $f_K = 56.954$  m,则空缆垂跨比  $\lambda_K = 0.1887$ ,成桥主跨钢箱梁标准段  $\omega_b$  为  $282.7$  kN/m,  $A_c = 0.1227$  m<sup>2</sup>,  $E_c$  近似取  $E_c = 2.06 \times 10^8$  kPa,采用式(8)计算所得空缆垂跨比  $\bar{\lambda}_K = 0.1876$ ,  $|\lambda_K - \bar{\lambda}_K|/\lambda_K = 0.57\%$ 。由此可见,已知成桥主跨垂跨比,由式(8)近似确定空缆下主跨垂跨比应具有足够的精度,可用于实际工程的分析与计算。

由求出的  $\lambda_K$  代回式(2),即可求出  $S_K$  和  $\omega_K$ 。将求得的各参数代入式(4),即可求出锚固处空缆水平力。

### 2.3 锚固处空缆水平力的计算

本研究双塔单跨混合梁自锚式悬索桥主跨钢主梁考虑采用 Q345 钢梁,  $\omega_b = 282.7$  kN/m。主缆考虑采用当下常用的平行钢丝,材料容重  $\rho_c = 78.5$  kN/m<sup>3</sup>,标准强度为  $1670$  MPa,主缆安全系数取  $3.0$ ,则容许应力  $[\sigma_c] = 556.7 \times 10^3$  kPa

基于前文分析,求得锚固处空缆水平力  $H$  与主跨跨径、垂跨比关系如图 4 所示。

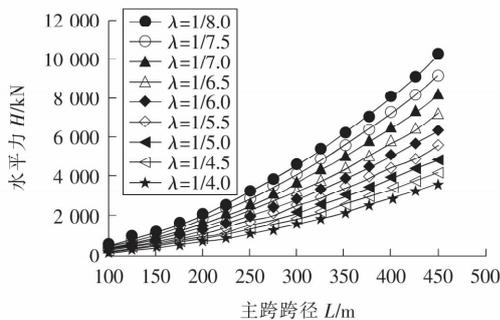


图 4 锚固处空缆水平力与主跨跨径、垂跨比关系图

Fig. 4 The relation chart of between horizontal force of free cable anchorage and main span and rise-span ratio

由图 4 可知:①锚固处空缆水平力  $H$  随垂跨比的增大而减小,随主跨跨径的增大而增大,垂跨比越小,水平力随跨径增大得越快。②跨径  $100 \sim 300$  m、垂跨比  $1/6.0 \sim 1/4.0$ ,锚固处空缆水平力在  $2900$  kN 以内;跨径  $100 \sim 300$  m、垂跨比  $1/8.0 \sim 1/6.0$  以及跨径  $300 \sim 450$  m、垂跨比  $1/6.0 \sim 1/4.0$  时,锚固处空缆水平力在  $6400$  kN 以内;跨径  $300 \sim 450$  m、垂跨比  $1/8.0 \sim 1/6.0$  时,锚固处空缆水平力都在  $6400$  kN 以上,最大值超  $10000$  kN。

### 3 锚固处空缆单墩的分析与方案可行性研究

如引言所述,一定主跨跨径及垂跨比锚固处空缆竖向力并不是很大,墩顶部分主梁自重抵消掉锚固处空缆竖向力后,对边墩压力仍足够大,足以使梁墩间的摩擦力大于锚固处空缆水平力,即该不平衡水平力由锚固处以下边墩承受。

如图 5(a)所示,设单墩墩顶受水平力作用为  $H_d$ ,受竖向力作用为  $V_d$ ,假设受拉区边缘受预应力作用为  $F_d$ ,其总的作用效应可用图 5(b)所示进行等效,墩身设计为图 5(c)矩形截面进行分析 ( $a' = b' = 0$  表示截面为实心截面),则墩底截面应力(受压为正)应满足以下 2 个约束方程:

$$\begin{aligned} f_{ck} &= \\ \gamma_0 \left( \frac{V_d + F_d}{A_d} + \rho_d h + \frac{H_d h - F_d b/2}{W_d} \right) &\leq [f_{ck}], \\ f_{tk} &= \\ \gamma_0 \left( \frac{V_d + F_d}{A_d} + \rho_d h - \frac{H_d h - F_d b/2}{W_d} \right) &\geq [f_{tk}]. \end{aligned} \quad (9)$$

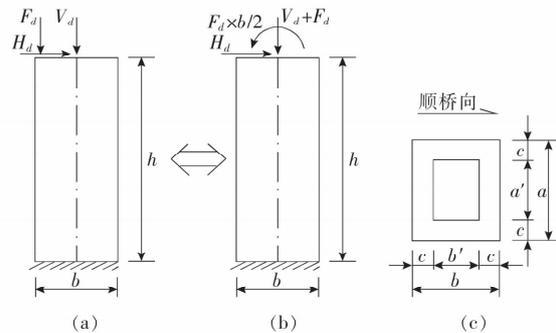


图 5 锚固处空缆边墩受力计算简图

Fig. 5 The calculation of the force at side pier of free cable anchorage

式(9)中,墩底截面面积  $A_d = ab - a'b'$ , 抗弯截面系数  $W_d = (ab^3 - a'b'^3)/(6b)$ , 结构作用效应分项系数  $\gamma_0$  取 1.2。墩身材料考虑采用 C40 钢筋混凝土, 材料容重  $\rho_d = 26 \text{ kN/m}^3$ , 抗压强度标准值  $[f_{ck}] = 26.8 \times 10^3 \text{ kPa}$ , 抗拉强度标准值  $[f_{tk}] = -2.4 \times 10^3 \text{ kPa}$ , 边墩数量按 2 根考虑。将满足式(9)的单墩墩顶最大水平力称之为单墩抵抗最大不平衡水平力, 即单墩抗推力, 用  $H_{d\max}$  表示。下文将从墩顶作用竖向力  $V_d$ 、受拉区边缘预应力  $F_d$  及不同墩身截面三个方面对单墩抗推力  $H_{d\max}$  进行分析, 确定“缆梁同步”施工方案的可行范围。

### 3.1 竖向力对单墩抗推力影响分析与方案可行性研究

取墩身截面  $a = 4.0 \text{ m}$ ,  $b = 2.8 \text{ m}$ ,  $a' = b' = 0$ , 受拉区边缘不考虑配置预应力筋, 墩顶部分主梁自重除去空缆下主缆锚固处竖向力, 传递给单根边墩竖向力  $V_d$  取值  $8\,000 \sim 12\,000 \text{ kN}$  (按每级  $1\,000 \text{ kN}$  增加), 则满足式(9)不同竖向力  $V_d$  作用下单墩最大抵抗水平力  $H_{d\max}$  与墩高关系(如图 6 所示)。

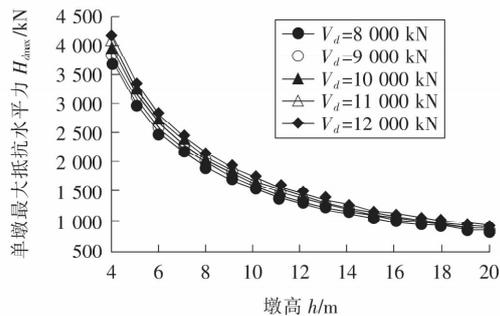


图 6 单墩最大抵抗水平力与墩高关系图

Fig. 6 The relation chart between the maximum resistance level and the pier height of single pier

由图 6 可知: ①单墩所能抵抗最大水平力随竖向力的增大而增大, 随墩高的增大而减小; ②在墩高不超过  $10 \text{ m}$ 、竖向力为  $8\,000 \text{ kN}$  时, 单墩所能抵抗最大水平力超过  $1\,550 \text{ kN}$ , 能满足跨径  $100 \sim 300 \text{ m}$ 、垂跨比  $1/6.0 \sim 1/4.0$  的双塔单跨混合梁自锚式悬索桥“缆梁同步”施工, 即满足国内大部分该类桥梁的施工; ③对于墩高  $10 \sim 12 \text{ m}$ 、跨径  $100 \sim 300 \text{ m}$ 、垂跨比  $1/6.0 \sim 1/4.0$  的双塔单跨混合梁自锚式悬索桥, 可在锚固处主梁顶部施加适

量配重, 即增大竖向力  $V_d$  而增大单墩最大抵抗水平力值, 以便采取“缆梁同步”施工方案。

### 3.2 预应力对单墩抗推力影响分析与方案可行性研究

对于墩高较高、跨径较大及垂跨比较小的双塔单跨混合梁自锚式悬索桥, 可考虑在边墩受拉区配置一部分临时预应力筋而增大单墩最大抵抗水平力, 以便采用“缆梁同步”施工方案。

同样, 取墩身截面  $a = 4.0 \text{ m}$ ,  $b = 2.8 \text{ m}$ ,  $V_d = 8\,000 \text{ kN}$ ,  $F_d$  取  $0 \sim 4\,000 \text{ kN}$  (按每级  $1\,000 \text{ kN}$  增加), 在保持其他条件不变情况下, 满足式(9)不同预应力  $F_d$  作用下单墩最大抵抗水平力  $H_{d\max}$  与墩高关系(如图 7 所示)。

由图 7 可知, 墩身受拉区边缘配置一部分预应力筋, 能在一定程度上提高单墩最大抵抗水平力, 也能保证“缆梁同步”施工方案在墩高较高、跨径较大及垂跨比较小的双塔单跨混合梁自锚式悬索桥中实施。

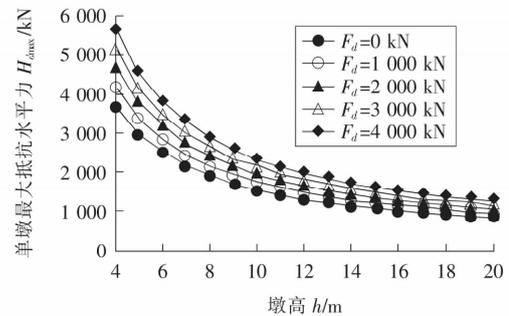


图 7 不同预应力单墩最大抵抗水平力与墩高关系图

Fig. 7 The relation chart between maximum resistance level and the pier height of different pre-stressed single pier

### 3.3 墩身截面对单墩抗推力影响分析与方案可行性研究

取 3 组墩身截面: ①  $a = 4.0 \text{ m}$ ,  $b = 2.8 \text{ m}$ ,  $c = 0 \text{ m}$ ; ②  $a = 4.0 \text{ m}$ ,  $b = 3.6 \text{ m}$ ,  $c = 1.0 \text{ m}$ ; ③  $a = 4.0 \text{ m}$ ,  $b = 3.6 \text{ m}$ ,  $c = 0 \text{ m}$ 。截面 2 与截面 1 面积相同而惯性矩不等, 截面 3 与截面 2 外缘一致。设  $V_d = 8\,000 \text{ kN}$ , 在保持墩身其他条件不变的情况下, 满足式(9)不同截面单墩最大抵抗水平力  $H_{d\max}$  与墩高关系(如图 8 所示)。

由图 8 可知: ①相同的截面面积, 空心墩抗弯惯性矩大大增大, 其单墩最大抵抗水平力也大大

增大;②增大截面面积也大大增加了单墩最大抵抗水平力;③2种方案都能保证“缆梁同步”施工方案在墩高较高、跨径较大及垂跨比较小的双塔单跨混合梁自锚式悬索桥中实施。

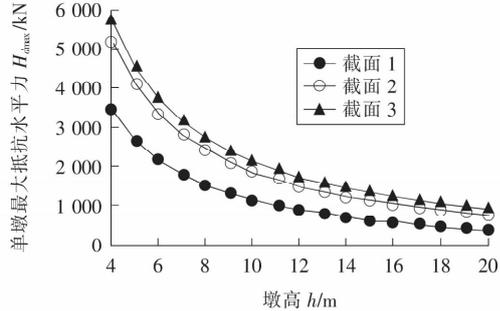


图8 不同墩身截面单墩最大抵抗水平力与墩高关系图

Fig. 8 The relation chart between the maximum resistance level and the pier height of the single pier of different pier sections

## 4 工程应用

### 4.1 锚固处空缆水平力的计算

采用桥梁通用有限元软件 Midas Civil 中悬索桥分析控制模块计算(即主缆锚固点、理论顶点、跨中目标点位置不变,让程序自动迭代,得到空缆(单根包括猫道,下同,略)各节点坐标及内力)<sup>[8]</sup>,得到空缆跨中点水平力为 1 221.3 kN,锚固处轴力为 1 390.6 kN。采用式(4)计算得到空缆跨中点水平力为 1 256.0 kN,锚固处轴力为 1 422.1 kN ( $H=1\ 256.0\text{ kN}$ ,  $V=H_y'=667.0\text{ kN}$ ),两者跨中点水平力相差百分比为 2.84%,锚固处轴力相差百分比为 2.31%。由此可见,采用式(4)进行空缆下主缆水平力分析与计算具有很高的精度。

故锚固处空缆水平力取  $H=1256.0\text{ kN}$ ,  $V=667.0\text{ kN}$ ,并以此对梁底边墩进行验算。

### 4.2 空缆下梁底边墩的验算

本工程墩柱都为混凝土结构,强度等级为 C40,钢筋等级为 HRB335。6<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>,10<sup>#</sup>,11<sup>#</sup>桥墩断面一致,仅高度不同,6<sup>#</sup>墩高 10.0 m,7<sup>#</sup>墩高 24.7 m,10<sup>#</sup>墩高 34.7 m,11<sup>#</sup>墩高 28.0 m,都为矩形双柱式混凝土结构,钢筋直径 36 mm,其断面及钢筋布置如图 9(a)所示。5<sup>#</sup>墩高 7.5 m,为方形盖梁柱式混凝土结构,顺横桥向尺寸为 1.8 m,

钢筋直径 25 mm;12<sup>#</sup>墩高 29.0 m,亦为方形盖梁柱式混凝土结构,顺横桥向尺寸为 2.0 m,钢筋直径 28 mm。其断面及钢筋布置如图 9(b)所示。

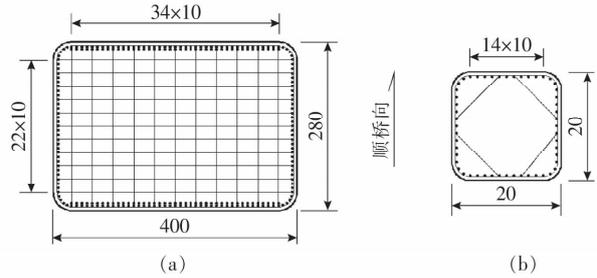


图9 边墩断面及钢筋布置图(单位:cm)

Fig. 9 Layout of side pier section and reinforcement

### 1) 最不利工况下边墩有限元模型的建立

根据实际施工情形,本工程采用“缆梁同步”施工方案,其最不利工况如图 10 所示。即 10<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>墩顶主梁施工完成,主缆亦架设完毕,10<sup>#</sup>~11<sup>#</sup>墩间临时钢管支架已部分拆除,墩顶临时水平约束于 11<sup>#</sup>墩。

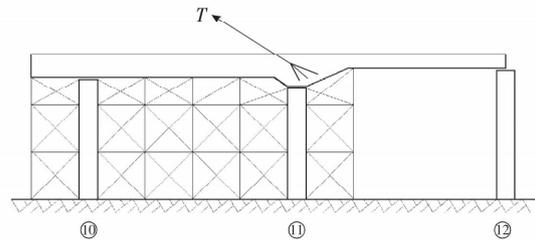


图10 边墩验算最不利工况示意图

Fig. 10 Illustration of most unfavorable working conditions of the side pier

如图 11 所示,依据施工图纸,采用桥梁通用有限元软件 Midas Civil 建立结构最不利工况下空间杆系有限元模型,主梁、桥墩、横梁、钢管支架均采用梁单元模拟,合计 1 010 个单元,853 个节点。

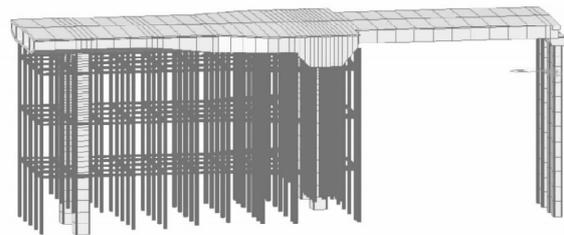


图11 边墩验算有限元三维模型图

Fig. 11 Illustration of three-dimensional model of finite element calculation of side pier

在计算模型中,墩柱底部与支架底部完全固结,支架顶部与主梁采用仅约束竖向的刚性连接,墩柱顶部与主梁采用仅约束竖向和横向的刚性连接。此外,11#墩顶与主梁在顺桥向刚性连接。

2) 最不利工况下边墩底部的计算结果。

通过 Midas 整体模型计算得最不利工况下各墩柱底部计算内力如表 1 所示。

表 1 最不利工况单墩底部内力(标准值)

Table 1 The most unfavorable conditions single pier bottom internal force(standard value)

墩号	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN
10#	0.00	0.00	-20 490.40
11#	35 021.41	1 250.80	-40 353.10
12#	0.00	0.00	-5 849.81

3) 最不利工况下单墩底部截面的验算。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD 62-2004),进行承载能力极限状态验算应满足  $\gamma_0 S_d \leq R$ ,其中, $\gamma_0$  为结构重要性系数,取 1.1。

本次计算为施工阶段验算,荷载仅考虑恒载, $S_d = \gamma_d S_{GK}$ ,其中, $\gamma_0$  为作用效应分项系数,取 1.2。各墩柱组合内力计算结果如表 2 所示。

表 2 最不利工况单墩底部组合内力

Table 2 The most unfavorable conditions single pier combined internal force

墩号	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN
10#	0.00	0.00	-27 047.30
11#	46 228.26	1 651.06	-53 266.10
12#	0.00	0.00	-7 721.75

采用桥梁通用有限元软件桥梁博士截面设计程序,对墩柱短暂状况承载能力极限状态进行验算,其验算结果如表 3 所示(进行墩柱验算时其计算长度系数 1.5)。

表 3 最不利工况单墩底部截面验算结果

Table 3 Checking results of the bottom section of the most unfavorable working conditions

墩号	$\gamma_0 S_d$	R	受力状态	验算结果
10#	27 047.3	186 000	轴心受压	满足要求
11#	53 266.1	102 000	下拉偏压	满足要求
12#	7 721.8	49 700	轴心受压	满足要求

## 5 结论

1) 锚固处空缆水平力随跨径的增大而增大,随垂跨比的增大而减小;垂跨比越小,水平力径增大得越快。

2) 跨径 100~300 m、垂跨比 1/6.0~1/4.0,锚固处空缆水平力在 2 900 kN 以内;跨径 100~300 m、垂跨比 1/8.0~1/6.0 以及跨径 300~450 m 垂跨比 1/6.0~1/4.0 时,锚固处空缆水平力在 6 400 kN 以内;跨径 300~450 m、垂跨比 1/8.0~1/6.0 时,锚固处空缆水平力都在 6 400 kN 以上,最大值超过 10 000 kN。

3) 该不平衡水平力由锚固处以下边墩承受,满足跨径 100~300 m、垂跨比 1/6.0~1/4.0 的该类桥梁实施“缆梁同步”施工方案要求。

4) 墩顶适量配重或边墩受拉区配置一定预应力筋,或在设计阶段增大边墩截面或惯性矩,能使“缆梁同步”施工方案在墩高更高、跨径更大、垂跨比更小的该类桥梁中实施。

该成果在依托工程中的应用效果良好。

## 〔参考文献〕

- [1] 杨春会.山区大跨度地锚式悬索桥主缆架施工技术革新[J].中外公路,2013,33(5):184-186.  
YANG Chun-hui, Technical innovation of main cable erection of large span anchor anchorage bridge in mountain area [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33(5): 184-186.
- [2] 王达,张永健,杨琴,等.大跨度悬索桥施工期主缆索股线形区域分段控制法[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(5):57-64.  
WANG Da, ZHANG Yong-jian, YANG Qin, et al. Sub-regional and subsection linear control method during the construction of main cables strands long-span suspension bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(5): 57-64.
- [3] 王晓明,贺耀北,陈多.空间索形悬索桥吊装施工过程分析方法[J].同济大学学报:自然科学版,2016,44(7):1017-1023.  
WANG Xiao-ming, HE Yao-bei, CHEN Duo. Analysis method for hoisting construction process of suspension bridge with spatial cables [J]. Journal of

- tongji University: Natural Science Edition, 2016, 44(7):1017-1023.
- [4] 文曙东,郑凯峰,黄军.“先缆后梁”施工建造自锚式悬索桥的研究[J].西南交通大学学报,2005,40(6):750-753.  
WENG Shu-dong, ZHENG Kai-feng, HUANG Jun. “Erecting cable before constructing girder” construction method of self anchored suspension bridges[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(6):750-753.
- [5] 安丽勇,王健,王培晓.自锚式悬索桥“先缆后梁”施工方法研究[J].城市道桥与防洪,2007(10):40-42.  
AN Li-yong, WANG Jiang, WANG Pei-xiao. “Erecting cable before constructing girder” study on self anchored suspension bridges [J]. Urban Road and Bridge and Flood Control, 2007(10):40-42.
- [6] 王晓明,雷晓鸣,王成树,等.自锚式悬索-斜拉桥吊装施工方法及其性能分析[J].桥梁建设,2016,46(4):114-119.  
WANG Xiao-ming, LEI Xiao-ming, WANG Cheng-shu, et al. Hoisting construction method and performance analysis of a self-anchored suspension and cable-stayed bridge construction [J]. Bridge, 2016, 46(4):114-119.
- [7] 张玉平,董创文.江东大桥双塔单跨空间主缆自锚式悬索桥的施工控制[J].公路交通科技,2010,27(7):76-82.  
ZHANG YU-ping, DONG Chuang-wen. Construction control of self-anchored suspension bridge with two pylons and single span spatial cables in Jiangdong bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7):76-82.
- [8] 肖勇刚,陈伟华.大跨度悬索桥动力特性的参数分析[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2016,13(1):28-32.  
XIAO Yong-gang, CHEN Wei-hua. Parameter analysis of long span suspension bridge dynamic characteristics [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2016, 13(1):28-32.
- [9] 路韡,刘文齐.湟水河自锚式悬索桥缆索系统施工技术[J].施工技术,2015,44(11):52-55.  
LU Wei, LIU Wen-qi. Construction technology of cable system of Huangshui river self-anchored suspension bridge [J]. Const Ruction Technology, 2015, 44(11):52-55.
- [10] 闫维明,于浩,陈彦江,等.自锚式悬索桥施工过程中索力变化规律的试验研究[J].公路交通科技,2015,32(11):55-60.  
YAN Wei-ming, YU Hao, CHEN Yan-jiang, et al. Experimental research on cable force evolution in construction process of self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11):55-60.
- [11] 杨继承,张铃.自锚式悬索桥体系转换施工控制研究[J].重庆大学学报:自然科学版,2016,35(1):5-9.  
YANG Ji-cheng, ZHANG Ling. Construction control in system transformation for the self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2016, 35(1):5-9.
- [12] 唐茂林.大跨径悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D].成都:西南交通大学,2003:17-18.  
TANG Mao-lin. 3D geometric nonlinear analysis of long-span suspension bridge and its software development [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003:17-18.