

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.019

悬臂施工桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法*

宋泽冈, 余成群, 纪云涛

(云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 针对预应力混凝土悬臂施工桥梁纵向预应力钢束张拉控制未考虑钢束长度差异从而影响应力控制的问题, 通过分析钢束单位长度伸长值误差引起的张拉应力偏差 $\Delta\sigma$, 将钢束长度 $L-\Delta\sigma$ 曲线最大曲率点对应的钢束长度作为长短束划分的临界长度, 提出以钢束临界长度为阈值的张拉控制准则; 对 6 座主跨跨径为 90~180 m 的悬臂施工桥梁进行应用分析, 结果表明, 采用悬臂施工桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法可实现长束、短束张拉施工的区分控制。

关键词: 桥梁; 悬臂施工; 张拉控制方法; 长短束划分; 纵向预应力; 临界长度

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0097-03

主跨跨径为 90~200 m 的桥梁广泛采用地形适应性强、跨越能力大、设计和施工技术成熟、造价合理、外形美观的预应力混凝土箱梁桥, 普遍采取分段悬臂浇筑法施工, 其纵向预应力钢束长度 L 为 10 m 至主跨跨径相当长度, 不管是前期束、后期束, 还是直束、弯束, 均呈现出预应力钢束长度规格较多的特点。据不完全统计, 目前国内部分在役大跨度连续箱梁桥由于施工中预应力张拉控制欠精细导致有效预应力不足, 运营期出现梁体开裂、主跨跨中持续下挠的现象, 造成巨大经济损失和严重社会影响^[1-2]。为确保大跨度桥梁悬臂施工安全及成桥时线形、受力状态符合设计预期, 必须对其预应力张拉进行精细控制。目前, 预应力张拉采用“双控”准则(预应力筋采用应力控制方法张拉时, 以伸长值进行校核, 实际伸长值与理论伸长值的差值应符合设计要求, 设计未提出要求时, 其偏差应控制在 $\pm 6\%$ 以内)^[3], 这是一种以张拉应力控制为主、伸长值控制为辅的准则, 未考虑钢束长度差异对应力控制的影响。文献[4]的研究结果表明, 对于短束, 较小的伸长值误差会引起较大的应力变化; 对于长束, 较小的应力误差会引起较大的伸长值变化。可见, 钢束长度差异对应力控制的影响不容忽视。本文在桥梁纵向预应力张拉控制中考虑钢束长度的影响, 提出一种悬臂施工桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法。

1 纵向预应力长短束划分张拉控制方法

为指导悬臂施工桥梁纵向预应力张拉控制, 考虑钢束长度差异对应力控制的影响, 提出一种以钢束临界长度为阈值的纵向预应力张拉控制方法——纵向预应力长短束划分张拉控制方法, 其流程(见图 1)如下:

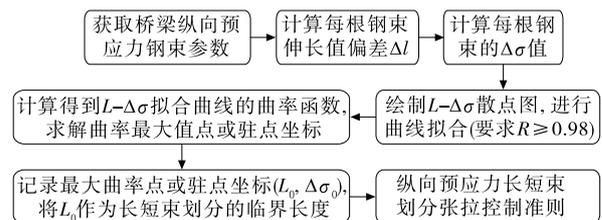


图 1 悬臂施工桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法的流程

(1) 获取桥梁纵向预应力钢束用于计算其张拉伸长值的参数及参数值, 定义 Δl 为每根钢束的伸长值偏差, 将设计张拉控制应力 σ_{con} 变动 $\pm\alpha\%$, 定义 $\Delta L_2(\alpha)$ 为此时每根钢束的伸长值, 则每根钢束的伸长值偏差 Δl 按式(1)计算。所述伸长值均指单端伸长值。

$$\Delta l = \Delta L_2(\alpha) - \Delta L_1 = \pm 0.01\alpha \times \frac{\sigma_{con} [1 - e^{-(kx + \mu\theta)}] L}{(kx + \mu\theta) E_p} \quad (1)$$

式中: $\Delta L_2(\alpha)$ 为设计张拉控制应力 σ_{con} 变动 $\pm\alpha\%$

* 基金项目: 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交科教便[2021]86号;云交科教便[2020]18号)

时的钢束伸长值; ΔL_1 为钢束理论伸长值; α 为张拉控制应力变动率, $1 \leq \alpha \leq 5$,取整数; σ_{con} 为设计张拉控制应力; k 为管道每米局部偏差对摩擦的影响系数; x 为从张拉端至计算截面的管道长度; μ 为预应力筋与管道壁的摩擦系数; θ 为从张拉端至计算截面曲线管道部分切线的夹角之和; L 为钢束长度; E_p 为弹性模量。

(2) 定义 $\Delta\sigma$ 为钢束单位长度伸长值误差引起的张拉应力偏差,每根钢束的 $\Delta\sigma$ 值按式(2)计算。

$$\Delta\sigma = \frac{0.01\alpha\sigma_{\text{con}}}{|\Delta l|} \quad (2)$$

(3) 绘制纵向预应力钢束长度 L 与 $\Delta\sigma$ 关系图,即 $L-\Delta\sigma$ 图;对 $L-\Delta\sigma$ 散点图进行曲线拟合,得到拟合曲线回归方程及相关系数 R ($R \geq 0.98$)。 $L-\Delta\sigma$ 拟合曲线的函数类型为负指数幂函数。

(4) 确定 $L-\Delta\sigma$ 拟合曲线的临界点。根据拟合曲线回归方程计算得到 $L-\Delta\sigma$ 拟合曲线的曲率函数 K ,求解曲率最大值点或驻点坐标 (L_0, K_{max}) ;将 $L-\Delta\sigma$ 拟合曲线最大曲率点或驻点作为临界点,记录临界点坐标 $(L_0, \Delta\sigma_0)$;将该点横坐标值 L_0 作为纵向预应力长短束划分的临界长度。

(5) 将长短束划分的临界长度 L_0 作为纵向预应力张拉控制阈值,确定纵向预应力长短束划分张拉控制准则。 $L \leq L_0$ 时,采用以张拉应力控制为主、伸长值校核为辅的准则; $L > L_0$ 时,采用以张拉伸长值控制为主、应力校核为辅的准则。

悬臂施工桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法的适用范围:采用分段悬臂浇筑法施工的桥梁;预应力钢束材料为 1×7 (7股)、 $\phi^s 15.2$ mm 低松弛钢绞线,抗拉强度标准值 $f_{\text{pk}} = 1\ 860$ MPa,弹性模量 $E_p = 1.95 \times 10^5$ MPa。

2 实桥应用分析

如表1所示,6座悬臂施工桥梁主梁采用单箱单室截面,纵向预应力钢束分为前期顶板束、腹板束和后期顶板束、底板束四类。纵向预应力钢束参数值如下: L 分别为10.00~98.01 m、9.80~88.04 m、12.00~118.00 m、13.00~148.22 m、12.00~164.00 m、18.24~178.14 m; $k = 0.001\ 5$; $x = L/2$ (取跨中截面); $\mu = 0.20$; θ 值按各桥每根钢束分别计算; $E_p = 1.95 \times 10^5$ MPa; $\sigma_{\text{con}} = 1\ 395$ MPa。以主跨跨径为150 m的预应力混凝土连续刚构桥为例,悬臂施工

表1 6座悬臂施工箱梁桥的情况及计算结果

桥型	主跨跨径/m	钢束长度 L /m	$L-\Delta\sigma$ 回归 方程表达式	回归方程曲率函数 K		临界点坐标 $(L_0, \Delta\sigma_0)$
				表达式	曲率最大值点 坐标 (L_0, K_{max})	
连续梁	100	10.00~98.01	$y = 3\ 976.9x^{-0.993\ 0}$	$K = \frac{ 7\ 870.5x^{-2.993\ 0} }{[1 + (-3\ 949.1x^{-1.993\ 0})^2]^{3/2}}$	(63.7, 0.011 05)	(63.7, 64.3)
	90	9.80~88.04	$y = 3\ 785.5x^{-0.967\ 6}$	$K = \frac{ 7\ 207.0x^{-2.967\ 6} }{[1 + (-3\ 662.8x^{-1.967\ 6})^2]^{3/2}}$	(64.6, 0.010 74)	(64.6, 67.1)
	120	12.00~118.00	$y = 3\ 807.2x^{-0.977\ 5}$	$K = \frac{ 7\ 359.3x^{-2.977\ 5} }{[1 + (-3\ 721.5x^{-1.977\ 5})^2]^{3/2}}$	(63.8, 0.010 94)	(63.8, 65.5)
连续刚构	150	13.00~148.22	$y = 3\ 474.6x^{-0.945\ 7}$	$K = \frac{ 6\ 393.4x^{-2.945\ 7} }{[1 + (-3\ 285.9x^{-1.945\ 7})^2]^{3/2}}$	(63.9, 0.010 72)	(63.9, 68.1)
	166	12.00~164.00	$y = 3\ 443.7x^{-0.949\ 8}$	$K = \frac{ 6\ 377.5x^{-2.949\ 8} }{[1 + (-3\ 270.8x^{-1.949\ 8})^2]^{3/2}}$	(63.2, 0.010 86)	(63.2, 67.1)
	180	18.24~178.14	$y = 3\ 431.9x^{-0.946\ 3}$	$K = \frac{ 6\ 320.8x^{-2.946\ 3} }{[1 + (-3\ 247.6x^{-1.946\ 3})^2]^{3/2}}$	(63.4, 0.010 80)	(63.4, 67.6)

注: L_0 的单位为 m; $\Delta\sigma_0$ 的单位为 MPa/cm。

桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法的步骤如下:

(1) 获取纵向预应力钢束参数值。 $L = 13.00 \sim$

148.22 m; $k = 0.001\ 5$; $x = L/2$ (取钢束跨中截面); $\mu = 0.20$;计算每根钢束的 θ 值; $E_p = 1.95 \times 10^5$ MPa; $\sigma_{\text{con}} = 1\ 395$ MPa。将 σ_{con} 增大 5%,根据

式(1)计算每根钢束的伸长值偏差 Δl 。

(2) 根据式(2)计算钢束单位长度伸长值误差引起的张拉应力偏差 $\Delta\sigma$ 。

(3) 绘制 $L-\Delta\sigma$ 关系图并进行曲线拟合,结果见图 2,得到式(3)所示回归方程。

$$y=3\ 474.6x^{-0.945\ 7}, R=0.999 \quad (3)$$

式中: x 表示横坐标参数 L ; y 表示纵坐标参数 $\Delta\sigma$ 。

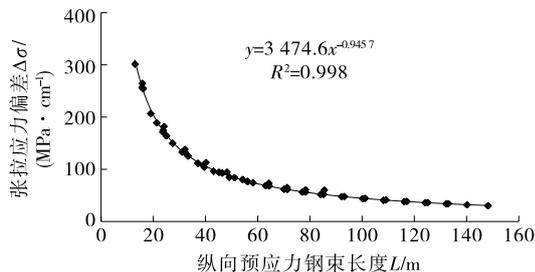


图 2 $L-\Delta\sigma$ 关系图及拟合曲线

(4) 换算得到式(4)所示回归方程的曲率函数。应用数学软件绘制 $L-\Delta\sigma$ 拟合曲线曲率函数图(见图 3),求解得到曲率最大值点或驻点坐标为(63.9, 0.010 72),则对应 $L-\Delta\sigma$ 曲线临界点为(63.9, 68.1),钢束长短束划分的临界长度 $L_0=63.9$ m。

$$K = \frac{|6\ 393.4x^{-2.945\ 7}|}{[1+(-3\ 285.9x^{-1.945\ 7})^2]^{3/2}} \quad (4)$$

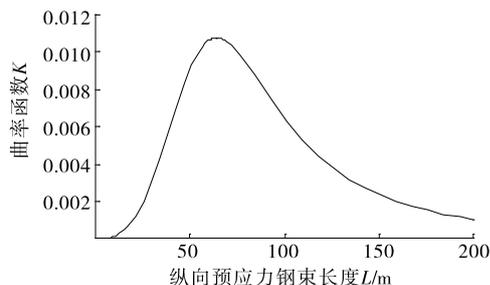


图 3 $L-\Delta\sigma$ 拟合曲线曲率函数图

(5) 将钢束长短束划分的临界长度 63.9 m 作为钢束张拉控制的阈值,确定该桥纵向预应力张拉控制准则。 $L \leq 63.9$ m 时,采用以张拉应力控制为主、伸长值校核为辅的准则; $L > 63.9$ m 时,采用以张拉伸长值控制为主、应力校核为辅的准则。

另外 5 座悬臂施工桥梁的计算结果见表 1。从表 1 可看出:6 座悬臂施工箱梁桥主跨跨径为 90~180 m,纵向预应力钢束长度为 9.80~178.14 m,按上述方法得到的长短束划分临界长度 L_0 为 63.2~64.6 m, L_0 数值差异较小(均方差为 0.48 m),其均值(63.8 m)可作为同类型桥梁纵向预应力张拉控制的钢束临界长度参考值。

3 结论

本文针对悬臂施工桥梁不同长度规格的纵向预应力钢束,根据钢束单位长度伸长值误差对其张拉应力偏差 $\Delta\sigma$ 的敏感程度,通过求解钢束长短束划分的临界长度,提出悬臂施工桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法,并对 6 座悬臂施工箱梁桥进行应用分析。主要结论如下:

(1) $L-\Delta\sigma$ 拟合曲线临界点就是其最大曲率点,临界点对应钢束长度 L_0 。即为长短束划分的临界长度,可将 L_0 作为纵向预应力张拉控制阈值。

(2) 纵向预应力张拉中, $L \leq L_0$ 时, L 对 $\Delta\sigma$ 敏感,采用以张拉应力控制为主、伸长值校核为辅的准则; $L > L_0$ 时, L 对 $\Delta\sigma$ 欠敏感,采用以张拉伸长值控制为主、应力校核为辅的准则。

(3) 悬臂施工桥梁纵向预应力长短束划分张拉控制方法考虑了钢束长度差异对应力控制的影响,可实现长短束张拉施工的区分控制,还可得到预应力张拉施工中是以“应力控制为主”还是以“伸长值控制为主”的判据准则,对现行预应力张拉“双控”技术进行了改进,使预应力张拉施工更加精细化,张拉控制准则更加科学合理。

(4) 6 座典型跨径悬臂施工箱梁桥钢束临界长度 L_0 数值差异较小,其均值(63.8 m)可作为同类型桥梁纵向预应力张拉控制的钢束临界长度参考值。

(5) 现实中,通常将关系曲线的拐点作为临界点,当曲线的函数类型属于负指数幂函数(无拐点)时,其临界点位置可参考本文方法取曲线的最大曲率处。

参考文献:

- [1] 詹建辉,陈卉.特大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝成因分析[J].中外公路,2005,25(1):56-58.
- [2] 杨志平,朱桂新,李卫.预应力混凝土连续刚构桥挠度长期观测[J].公路,2004,49(8):285-289.
- [3] 中交一公局集团有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650-2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [4] 宋泽冈,杨敏,邓旭东.基于参数敏感性分析的预应力筋张拉双控技术[J].中外公路,2013,33(3):84-86.