

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.026

连续刚构桥悬臂施工阶段预拱度曲线拟合研究*

陈才¹, 路鑫^{2,3}

(1.中交一公局西北工程有限公司, 陕西 西安 710199;2.西安公路研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

3.长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为抵消施工阶段各种因素产生的施工挠度,确保合龙的顺利进行和桥梁线形满足设计要求,连续刚构桥悬臂施工中设置施工预拱度。文中基于连续刚构桥施工阶段下挠变形特征,以某连续刚构桥为例建立 MIDAS/Civil 模型,提取合龙前每个施工阶段的节点下挠数据,运用 MATLAB 分别进行线性拟合和非线性拟合,得出施工预拱度估算公式;结合施工阶段下挠影响因素和施工预拱度估算公式,提出施工控制措施,使桥梁达到设计线形要求。

关键词:桥梁;连续刚构桥;悬臂施工;施工预拱度;曲线拟合

中图分类号:U445

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)05-0120-04

连续刚构桥悬臂施工中施工挠度对桥梁合龙的影响一直备受关注。蓝贤柏、关键分析了悬臂施工连续刚构桥(连续梁桥)施工阶段混凝土自重、预应力钢束、混凝土收缩徐变、挂篮变形等对结构下挠变形的影响^[1-2];郑万成、黄子雄提出了悬臂施工阶段应对下挠病害的施工控制措施^[3-4];邬晓光、唐杨、贺志军等通过对跨径等因素的分析,得到了各因素影响下连续刚构桥挠度计算公式,提出了施工预拱度控制措施^[5-7]。关于连续刚构桥施工挠度影响因素的研究已较成熟,但在挠度数值分析上仍存在一定不足。文献[5]以 62.5 m+4×115 m+62.5 m 连续刚构桥为例,结合施工挠度的特点,提出了线性和非线性两种拟合公式,其拟合方式对其他跨度连续刚构桥的施工挠度是否有效有待考证。本文选取主跨为 156 m 的连续刚构桥对施工预拱度设置进行研究。

1 工程概况

某预应力混凝土连续刚构桥的跨径组成为 86 m+156 m+86 m。悬臂浇筑时,前 3 个节段为 3.5 m,除合龙段和前 3 个节段外,其余节段均为 3 m。主梁混凝土采用 C50,预应力钢束采用最小抗拉强度不小于 1 860 MPa 的钢绞线。主梁横截面宽度为 15 m,根部截面梁高为 9.6 m,端部截面梁高为 3.4 m,主梁变截面采用 1.8 次抛物线拟合。1[#]、

2[#]墩采用 C40 混凝土,高度为 66 m。

建立该桥 MIDAS /Civil 模型,全桥共划分为 156 个节点、149 个单元,预应力钢束共 83 根(见图 1)。按照设计施工顺序从零号块开始依次悬臂施工。取合龙前最后一个施工阶段,以 1[#]墩顶及其两侧的悬臂施工段为例,运用 MATLAB 进行施工预拱度曲线拟合。

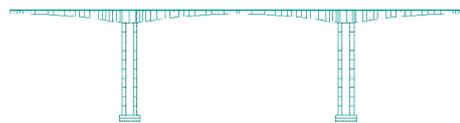


图 1 某预应力混凝土连续刚构桥有限元模型

2 施工预拱度曲线拟合

以合龙前一阶段的施工变形(见表 1)为例,拟合该桥的施工预拱度曲线。

表 1 主梁各节点的挠度

梁段节点 坐标/m	竖向挠 度/cm	梁段节点 坐标/m	竖向挠 度/cm	梁段节点 坐标/m	竖向挠 度/cm
-76.5	-3.352	-54.5	-4.145	-35.5	-1.516
-72.0	-5.739	-50.5	-3.476	-32.0	-1.229
-67.5	-5.762	-46.5	-2.842	-28.5	-0.992
-63.0	-5.473	-42.5	-2.277	-25.5	-0.847
-58.5	-4.800	-39.0	-1.873	-22.5	-0.772

* 基金项目:陕西省交通科技项目(19-12K)

续表 1

梁段节点 坐标/m	竖向挠 度/cm	梁段节点 坐标/m	竖向挠 度/cm	梁段节点 坐标/m	竖向挠 度/cm
-19.5	-0.735	9.5	-0.874	42.5	-2.272
-17.0	-0.734	12.0	-0.808	46.5	-2.836
-14.5	-0.762	14.5	-0.760	50.5	-3.469
-12.0	-0.810	17.0	-0.733	54.5	-4.137
-9.5	-0.875	19.5	-0.733	58.5	-4.791
-7.0	-1.063	22.5	-0.769	63.0	-5.460
-5.5	-1.066	25.5	-0.845	67.5	-5.725
0.0	-1.072	28.5	-0.989	72.0	-5.682
0.0	-1.072	32.0	-1.226	76.5	-3.304
5.5	-1.066	35.5	-1.512		
7.0	-1.062	39.0	-1.868		

2.1 多项式线性拟合

多项式拟合的计算公式简约明了,计算方便,是线性拟合的首选。选取四次多项式作为该桥施工预拱度拟合模型,目标函数如下:

$$\varphi(x) = \sum_{i=0}^4 c_i x^i = c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 x^4 + c_0 \quad (1)$$

式中: $\varphi(x)$ 为节点对应的竖向挠度(cm); $c_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 为多项式的系数; x 为主梁节点坐标(m),墩顶处记为原点,墩顶左侧节点坐标为负值,右侧节点坐标为正值。

根据最佳平方和逼近原则求解 $\varphi(x)$,其实质是求解最小的 $I(C)$,公式如下:

$$I(C) = \min \left(\sum_{i=0}^4 c_i x^i - x, \sum_{i=0}^4 c_i x^i - y \right) \quad (2)$$

式中: $C = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_0]^T$ 。

寻找最优参数 $\hat{C} = [\hat{c}_1, \hat{c}_2, \hat{c}_3, \hat{c}_4, \hat{c}_0]^T$,使 $I(C)$ 值最小,得到最佳拟合曲线。将表 1 中数据代入式(1)、式(2),运用 MATLAB 进行四次多项式拟合,得: $c_1 = 1.425 \times 10^{-7}, c_2 = 6.650 \times 10^{-8}, c_3 = -0.001 631, c_4 = -6.149 \times 10^{-5}, c_0 = -0.315 200$ 。

将上述参数值代入式(1),得到线性拟合公式[见式(3)]。拟合效果见图 2,拟合结果的可决系数 $R^2 = 0.868$,拟合结果可靠。

$$\varphi(x) = 1.425 \times 10^{-7} x + 6.650 \times 10^{-8} x^2 - 0.001 631 x^3 - 6.149 \times 10^{-5} x^4 - 0.315 200 \quad (3)$$

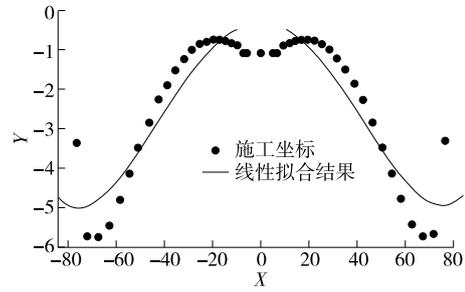


图 2 线性拟合效果

2.2 Sum of sine 函数非线性拟合

考虑到一般施工挠度曲线变化特点、正弦函数的形状及正弦函数在数值分析中应用广泛,选用非线性拟合模型中的 Sum of sine 函数进行施工预拱度拟合,目标函数如下:

$$\varphi(x) = \sum_{i=0}^3 a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (4)$$

式中: $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 为多项式的系数。

式(4)等价于求:

$$I(C) = \min \sum_{i=1}^3 g_i^2 = \min \sum_{i=0}^3 a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (5)$$

式中: $C = [a_i, b_i, c_i]^T (i=1, 2, 3)$ 。

求最佳拟合曲线的实质就是确定最优参数 $\hat{C} = [\hat{a}_i, \hat{b}_i, \hat{c}_i]^T (i=1, 2, 3)$,使 $I(C)$ 值最小。将表 1 中数据代入式(4)、式(5),运用 MATLAB 进行非线性拟合,得: $a_1 = 27.430 00, b_1 = 0.044 83, c_1 = -1.567 00; a_2 = 931.500 00, b_2 = 0.056 44, c_2 = 1.574 00; a_3 = 905.100 00, b_3 = 0.056 75, c_3 = -1.568 00$ 。

将上述参数值代入式(4),得到 Sum of sine 函数非线性拟合公式[见式(6)]。拟合效果见图 3,拟合结果的可决系数 $R^2 = 0.982$,拟合效果优秀。

$$\varphi(x) = 27.430 00 \sin(0.044 83x - 1.567 00) + 931.500 00 \sin(0.056 44x + 1.574 00) + 905.100 00 \sin(0.056 75x - 1.568 00) \quad (6)$$

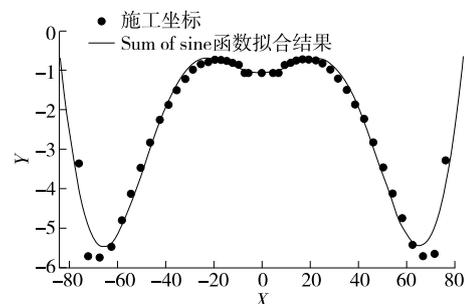


图 3 Sum of sine 函数拟合效果

2.3 傅里叶函数非线性拟合

考虑到三角函数的曲线形状,选用非线性拟合模型中的傅里叶函数进行拟合,目标函数如下:

$$\varphi(x) = a_0 + a_1 \cos \omega x + b_1 \sin \omega x + a_2 \cos 2\omega x + b_2 \sin 2\omega x + a_3 \cos 3\omega x + b_3 \sin 3\omega x \quad (7)$$

式中: $a_i, b_i, c_i (i=0, 1, 2, 3)$ 为多项式的系数。

依据 2.2 节中的求解原理,将表 1 中数据代入式(7),得: $a_0 = 1.561 \times 10^9$; $a_1 = -2.343 \times 10^9$; $\omega = 0.001 114$; $b_1 = 4.324 \times 10^4$; $a_2 = 9.379 \times 10^8$; $b_2 = -3.461 \times 10^4$; $a_3 = -1.565 \times 10^8$; $b_3 = 8 657$ 。

将上述参数值代入式(7),得到傅里叶非线性拟合公式[见式(8)]。拟合效果见图 4,拟合结果的可见系数 $R^2 = 0.993$,拟合效果优秀。

$$\begin{aligned} \varphi(x) = & 1.561 \times 10^9 - 2.343 \times 10^9 \cos 0.001 114x + \\ & 4.324 \times 10^4 \sin 0.001 114x + 9.379 \times \\ & 10^8 \cos 0.002 228x - 3.461 \times 10^4 \sin 0.002 228x - \\ & 1.565 \times 10^8 \cos 0.003 342x + \\ & 8 657 \sin 0.003 342x \end{aligned} \quad (8)$$

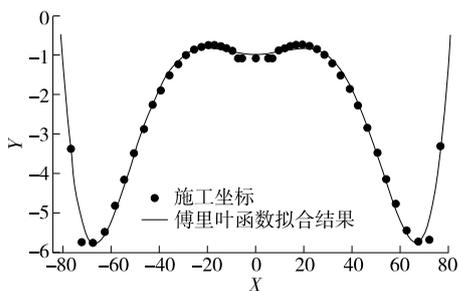


图 4 傅里叶函数拟合效果

综上,对比 3 种函数的拟合结果,傅里叶函数的拟合结果更符合工程实际,推荐使用傅里叶函数进行拟合,且计算过程中考虑各项施工挠度的影响因素。预拱度估算公式如下:

$$F(x) = \varphi(x) + \sum \Delta_i + \sum Z_i + \sum \Gamma_i + \sum \Phi_i + \sum N_i$$

式中: $F(x)$ 为考虑各种影响因素的预拱度设计值; $\varphi(x)$ 为傅里叶函数拟合的预拱度设计值; $\sum \Delta_i$ 为节段自质量带来的挠度影响值; $\sum Z_i$ 为混凝土收缩徐变带来的挠度影响值; $\sum \Gamma_i$ 为钢筋预应力带来的挠度影响值; $\sum \Phi_i$ 为挂篮变形带来的挠度影响值; $\sum N_i$ 为其他因素带来的挠度影响值。

3 施工挠度影响因素及控制措施

连续刚构桥悬臂施工中影响施工挠度的因素包

括梁段自质量、预应力钢筋、混凝土收缩徐变、挂篮变形及其他不确定因素^[8]。

3.1 节段自质量

悬臂施工的连续刚构桥,从墩顶零号块开始依次往两边对称悬臂施工,本节段浇筑的混凝土由于自质量产生弹性变形,对其后节段的弹性变形不会产生影响,但其后节段的自质量作用会影响本节段的弹性变形^[9]。因此,悬臂施工阶段自质量作用对第 i 节段挠度的影响值为第 i 节段自质量作用和第 $i+1, i+2, \dots, i+n$ 节段对 i 节段产生的弹性变形影响值之和,用 $\sum \Delta_i$ 表示。

3.2 混凝土收缩徐变

混凝土收缩是指混凝土因含水量变化、化学反应及温度降低等因素引起的体积缩小^[10],混凝土徐变是在持续荷载作用下混凝土结构变形随时间不断增加的现象^[11]。悬臂施工的连续刚构桥,施工过程中某一节段的收缩徐变会影响本节段及其前面所有节段的挠度。因此,悬臂施工阶段混凝土收缩徐变对第 i 节段挠度的影响值为第 i 节段收缩徐变及第 $i-1, i-2, \dots, i-n$ 节段收缩徐变产生的挠度值之和,用 $\sum Z_i$ 表示。

3.3 钢筋预应力

悬臂施工的连续刚构桥,从墩顶零号块开始,每一节段先浇筑混凝土再张拉钢束,张拉过程会影响本节段的挠度和其前面所有节段的挠度。因此,悬臂施工阶段预应力钢束对第 i 节段挠度的影响值为穿过第 i 节段的所有钢束产生的挠度值之和,用 $\sum \Gamma_i$ 表示。

3.4 挂篮变形

悬臂施工的连续刚构桥,从墩顶零号块开始,先施工挂篮再悬臂浇筑混凝土,随着混凝土的浇筑,挂篮在混凝土的影响下产生变形,但不影响其余节段的变形^[12]。因此,悬臂施工阶段挂篮变形对第 i 节段挠度的影响值仅为第 i 节段混凝土现浇产生的挂篮变形值,用 $\sum \Phi_i$ 表示。

3.5 其他不确定因素

实际工程施工中,会因为施工环境等不同出现其他影响施工挠度的因素,如施工周期、施工进度、施工是否连续、温度和湿度等,其影响值用 $\sum N_i$ 表示。

3.6 影响因素综合

大跨连续刚构桥悬臂施工阶段挠度影响因素分

为确定因素和不确定因素。对于确定的影响因素,如节段自质量、混凝土收缩徐变、钢筋预应力、挂篮变形等,设计时可以预先估算施工预拱度,及时调整设计参数确保施工线形可靠、美观;对于不确定的影响因素,如施工温度和湿度、施工周期、施工间隔等,为尽可能减少其影响,应严格把控施工流程和精度,确保每一节段的线形和正常合龙^[13]。

3.7 施工控制措施

针对连续刚构桥悬臂施工中施工挠度的影响因素,为减少过大的挠度,提出如下施工控制措施:

(1) 选用高性能、高强度轻质混凝土,既确保连续刚构的大跨度,又能减轻自质量,降低梁体自质量对施工挠度的影响^[14]。

(2) 严格控制预应力钢束施工,精准控制预应力管道,确保考虑预应力损失后仍具有相当的预应力。预应力张拉后及时进行压浆,并保证其密实度,避免因压浆不严密造成钢筋锈蚀而导致预应力降低、主梁挠度过大。

(3) 严格控制每一节段的立模标高。采用相对高程立模标高,确保施工进度和结构线形,避免施工中产生误差。因为误差一旦累积,可能导致后期无法正常合龙,造成主梁开裂等。

4 结语

根据施工挠度的特点,对连续刚构桥悬臂施工阶段施工挠度曲线进行线性(四次多项式)和非线性拟合,多项式拟合计算简单但拟合程度较低,非线性拟合计算过程较复杂但拟合程度较高,建议采用傅里叶函数进行非线性拟合,且计算过程中考虑施工挠度的各种影响因素。

针对施工挠度影响因素,悬臂施工中可采取选用高性能和高强度轻质混凝土、严格控制预应力钢

束施工并精准控制预应力管道、严格控制每一节段立模标高的控制措施,确保施工质量和精度。

参考文献:

[1] 蓝贤柏.悬臂施工连续梁桥施工预拱度影响因素分析[J].交通世界,2018(21):106-107.
 [2] 关键.某高速公路预应力 T 梁桥上拱度影响因素分析[D].广州:华南理工大学,2016.
 [3] 郑万成.大跨径刚构桥梁跨中下挠病害治理对策研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(5):194-196.
 [4] 黄子雄.预应力混凝土连续梁预拱度研究[J].山西科技,2017,33(2):139-141.
 [5] 邬晓光,安平和,黄叙钦,等.悬臂施工连续梁桥施工预拱度影响因素分析及曲线拟合[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(3):1-4+21.
 [6] 唐杨.大跨径连续刚构桥预拱度设置研究[J].工程建设,2019,51(12):18-22+52.
 [7] 贺志军.大跨度连续刚构桥施工预拱度控制分析[J].建筑技术开发,2016,43(7):6+11.
 [8] 李青锋.预应力混凝土连续刚构桥悬臂现浇施工监控研究[J].湖南交通科技,2019,45(1):96-98.
 [9] 张禹筭.连续梁桥悬臂施工过程中的线形控制[J].浙江建筑,2018,35(7):29-31.
 [10] 李建梅.浅析大跨度连续刚构桥施工控制关键技术[J].中国公路,2019(22):112-113.
 [11] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.
 [12] 齐晓东.大跨度预应力混凝土连续刚构造桥长期挠度分析和施工控制措施[J].四川水泥,2019(4):71+74.
 [13] 刘宇.谈大跨度预应力混凝土桥梁施工控制技术[J].山西建筑,2018,44(4):178-180.
 [14] 刘义才.连续刚构桥施工监控及挠度控制分析[J].交通世界,2018(20):99-100+103.

收稿日期:2022-04-24

 (上接第 106 页)

大,如何平衡连通岔数与缺省岔数、合理把握工程规模与地面交通组织压力有待研究。

(3) 交叉方案中,跨通航水系抬升的那一岔连通岔数不宜超过三岔,交通流线数量不宜超过 6 条。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部.内河通航标准:GB 50139-2014[S].北京:中国计划出版社,2015.

[2] 中华人民共和国水利部.堤防工程设计规范:GB 50286-2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
 [3] 杨少伟.道路勘测设计[M].3 版.北京:人民交通出版社,2009.
 [4] 邵旭东.桥梁工程[M].5 版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
 [5] 中国公路工程咨询集团有限公司.公路立体交叉设计细则:JTG/T D21-2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

收稿日期:2022-07-12