

城市桥梁短线法节段预制拼装关键技术控制研究

杨胜¹, 杨伟²

(1.河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000; 2.洛阳璟信公路工程科技发展有限公司)

摘要:城市高架桥梁作为城市快速化通道的重要结构,其形式不断更新,结构及线形亦是复杂化、多样化。目前节段预制拼装技术在国外城市高架桥梁中应用较为普遍,由于其工艺的复杂性和特殊性,在中国国内城市高架桥梁中暂未得到广泛的推广和应用,为确保桥梁合龙后的线形能满足设计要求,对其相关技术进行研究和总结具有非常重要的意义。该文以目前在建项目——郑州市四环线及大河路快速化工程为背景,对短线法预制拼装线形控制原理和方法进行深入研究,推导了预制阶段的线形转换公式,并提出了合理的线形控制方法及纠偏措施。

关键词:城市高架;节段预制拼装;线形控制

短线节段预制悬拼施工技术具备成本低、效率高、可控性好、受恶劣条件影响小等优点正在被桥梁界广泛采用。由于在实际预制及拼装工程中受各种因素及误差的影响,导致节段梁的线形与实际理论计算线形有所偏差,预制线形及拼装后的桥梁线形直接关系到成桥后的结构受力、结构耐久性、外观质量。为确保成桥后的线形能更好地满足设计要求,对于节段预制拼装箱梁桥施工来说,在各施工阶段其对线形控制的研究、监控量测非常重要。

1 工程概况

郑州市四环线及大河路快速化工程是郑州市主城区“两环三十一放射”快速路系统中“两环”的外环,由大河路、东四环、南四环及西四环组成闭合环线,路线全长约93.3 km,全程采用世界先进的工业化3.0节段预制拼装技术,要求的设计标准非常高,对精度的要求极高。

全线采用城市快速路标准,主线设计速度80 km/h,西四环、大河路、南四环采用高架快速路形式,标准横断面组成为:高架快速路(双向八车道)+地面主干路(双向八车道)+辅路;大河路(107辅道以东段)、东四环采用地面快速路形式,标准横断面组成为:主线地面快速路(双向十车道)+辅路。

主线路中分幅典型预制桥梁箱梁节段在预制场地

采用短线法预制,相邻节段采用连续浇注,利用已预制好的梁端作为相邻梁段的端模。箱梁竖曲线和平曲线可由高精度的折线拟合形成,通过梁段上下缘长度不同形成竖曲线或通过左右长度不同形成平曲线,梁段预制过程中保持各端面为正交面。墩顶0#块与预制节段间设置15 cm湿接缝,跨中合龙段采用现浇。

2 预制阶段线形控制原理及方法

2.1 预制线形控制原理

预制阶段短线法节段预制线形控制是通过改变相邻梁段的空间坐标来控制梁段的线形。预制时可先在底模上精准测量出箱梁平竖曲线,然后计算各梁段各控制点的空间坐标,同时加以控制,再把实测值同理论值进行对比,同时在下一预制阶段进行误差修正。可将箱梁设计中心线线形所在的实际空间位置、各待浇梁段分别作为整体坐标和局部坐标系,再根据坐标转换来确定匹配梁的理论坐标。

建立两个坐标系(OXY)和(oxy),将 OXY 坐标系上的坐标(X, Y)转换成 oxy 坐标系上的坐标(x, y),两坐标系的夹角设为 α ,设 oxy 坐标系的原点在 OXY 坐标系的坐标为(X_0, Y_0),坐标系如图1所示。

通过两个坐标系的相对位置进行坐标转换,得到如下关系:

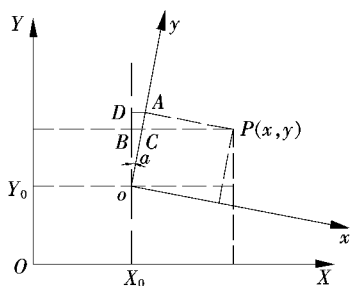


图 1 坐标系示意图

$$\begin{cases} x = (X - X_0) \cos \alpha - (Y - Y_0) \sin \alpha \\ y = (X - X_0) \sin \alpha + (Y - Y_0) \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 空间坐标转换原理

在节段梁每一拼接缝位置处布置如图 2 所示的 3 个坐标控制点,其中 L 、 R 分别为左、右边控制点,其主要控制节段梁高程; C 为箱梁中心线处在平面位置的主要控制点。设整体坐标系为 $(O-X, Y, Z)$,其中 X 轴方向沿桥梁纵向(方向同节段梁顶面中心线保持一致), Y 轴沿箱梁横向方向, Z 轴方向为箱梁高度方向,3 个方向满足右手螺旋法则。设第 i 个接缝处的控制点为 L_i 、 R_i 、 C_i , $(X_{L_i}, Y_{L_i}, Z_{L_i})$ 、 $(X_{R_i}, Y_{R_i}, Z_{R_i})$ 、 $(X_{C_i}, Y_{C_i}, Z_{C_i})$ 分别为控制点在整体坐标系中 3 个方向的坐标,3 个点的坐标构成了第 i 个接缝处的控制量,设 $\{\delta_{L_i}\} = [X_{L_i}, Y_{L_i}, Z_{L_i}]^T$ 、 $\{\delta_{R_i}\} = [X_{R_i}, Y_{R_i}, Z_{R_i}]^T$ 、 $\{\delta_{C_i}\} = [X_{C_i}, Y_{C_i}, Z_{C_i}]^T$,记向量 $\{\delta_i\} = [\delta_{L_i}, \delta_{C_i}, \delta_{R_i}]^T$ 。

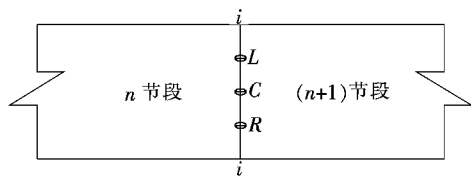


图 2 接缝处控制点平面示意图

在预制时可把第 n 节段的端模作为 $n+1$ 节段的端模,根据两节段接缝 i 处的位置关系可确定一个局部坐标系,将接缝 i 处的 C 点设为该局部坐标系的原点,可根据相邻两个接缝 C 点的连线确定局部坐标系 x 轴,即从 n 节段接缝的 C 点指向 $n+1$ 节段接缝的 C 点,局部坐标系 y 轴垂直于 x 轴,局部坐标系的 z 轴垂直于 xy 平面,方向满足右手螺旋法则。

在整体坐标系下,第 i 接缝处的 x 、 y 、 z 轴的坐标向量分别为 $\{x_i\} = \{\delta_{C_{i-1}}\} - \{\delta_{C_i}\}$ 、 $\{y_i\} =$

$\{\delta_{L_{i-1}}\} - \{\delta_{C_i}\}$ 、 $\{z_i\} = \{\overline{x_i}\} \times \{\overline{y_i}\}$, $\{x_i\}$ 、 $\{y_i\}$ 、 $\{z_i\}$ 同整体坐标各轴的夹角分别为 α_{1i} 、 β_{1i} 、 γ_{1i} 、 α_{2i} 、 β_{2i} 、 γ_{2i} 、 α_{3i} 、 β_{3i} 、 γ_{3i} ,即可得到各坐标轴的方向夹角余弦为:

$$\begin{aligned} [\cos \alpha_{1i}, \cos \beta_{1i}, \cos \gamma_{1i}]^T &= \frac{\{x_i\}}{|\{x_i\}|} \\ [\cos \alpha_{2i}, \cos \beta_{2i}, \cos \gamma_{2i}]^T &= \frac{\{y_i\}}{|\{y_i\}|} \end{aligned} \quad (3)$$

$$[\cos \alpha_{3i}, \cos \beta_{3i}, \cos \gamma_{3i}]^T = \frac{\{z_i\}}{|\{z_i\}|}$$

通过将向量转换,即可得到第 i 接缝处由整体坐标系转换至局部坐标系的转换矩阵,如式(4)所示:

$$[t_i] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{1i} & \cos \beta_{1i} & \cos \gamma_{1i} \\ \cos \alpha_{2i} & \cos \beta_{2i} & \cos \gamma_{2i} \\ \cos \alpha_{3i} & \cos \beta_{3i} & \cos \gamma_{3i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则第 j 接缝处的 3 个控制点在 i 接缝处位置局部坐标系中的坐标为:

$$\{\delta_j\}_i = [T_i] \{\delta_j\} + \{\Delta\} \quad (5)$$

式中: $\{\delta_j\}_i$ 为 j 接缝在 i 接缝处局部坐标系下的坐标; $\{\delta_j\}$ 为 j 接缝处在整体坐标系中的坐标; $[T_i]$ 为坐标转换对角矩阵; $\{\Delta\}$ 为两坐标系原点的相对偏移向量。

当 j 接缝处 C_j 为局部坐标系的原点时,即可得到:

$$\{\delta\} = -[\delta_{C_j}, \delta_{C_j}, \delta_{C_j}, \delta_{C_j}]^T \quad (6)$$

计算第 n 个预制节段向其相邻节段的偏移量,可先算出相邻节段接缝 i 处的局部坐标系,以此计算 $i-1$ 及 i 位置控制点的坐标 $\{\delta_{i-1}\}_i$ 、 $\{\delta_i\}_i$,最后计算 $i+1$ 接缝处为局部坐标系原点时前两个接缝处的坐标 $\{\delta_{i-1}\}_{i+1}$ 、 $\{\delta_i\}_{i+1}$,两者之差就是第 n 个预制节段的偏移量 $[D_i]$:

$$[D_i] = \begin{bmatrix} \{\delta_{i-1}\}_{i+1} - \{\delta_{i-1}\}_i \\ \{\delta_i\}_{i+1} - \{\delta_i\}_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

计算偏移量 $[D_i]$ 的关键是计算控制点 C 点位于局部坐标系下的 x 、 y 坐标以及 L 、 R 点的 z 坐标。

2.3 预制阶段线形控制方法

节段梁预制时必须设置合理的“制造提前量”,包括竖向、横向、轴向及转动方向变量数据。“制造提前量”与架设工法、架设装备等紧密相关,且全部在预制场内进行节段预制时考虑。作为预制场三维线形控制工作的一部分,计算“制造提前量”时需充分考虑整体结构施工工序与体系转换的过程、上下部各结构构件相互关系、现场实际混凝土弹性模量、预应力管道摩擦阻

等因素。

模板精度及相邻梁段精度、定位精度、精准测量精度是梁段预制的核心。为确保成桥线形能满足设计要求,预制阶段一定要做好实时精准测量,可在节段箱梁的顶板处设置如图3所示的6个控制点。

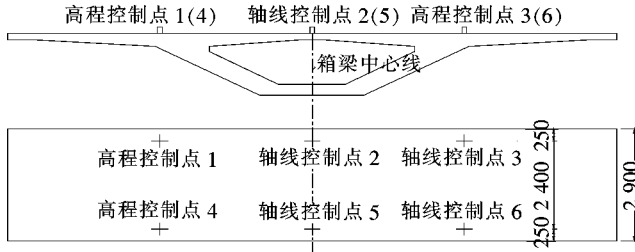


图3 节段测量控制点示意图(单位:mm)

通过对6个控制点的三维空间坐标进行测量,再根据上述转换公式得出偏移量即可确定下一预制节段的空间相对位置。

在实际预制阶段,不同线形的节段箱梁可通过如下方法实现:

(1) 当箱梁为直线时, $n+1$ 节段可利用 n 节段平移实现。

(2) 当预制线形为平曲线时,可先将相邻待匹配的梁段移动至预定位置,最后在平面上旋转一定的夹角 α 即可。

(3) 当预制线形为竖曲线时,可先将相邻匹配梁段移开,最后通过在立面上旋转一定的夹角 α 来实现。

节段梁在预制过程中处于零应力状态,其制作预拱度可根据切线初始位移法计算出的主梁竖向变形累计值反号获得。

2.4 节段预制误差控制分析

在预制节段及时将匹配节段的水平位移、竖向高程的实测值同理论计算值进行对比,如发现误差为避免误差传递,必须采取措施进行误差控制。该过程中可能出现的误差主要有梁长误差和偏角误差。偏角误差是指在梁体浇筑过程中相邻匹配梁段位置出现偏移引起角度改变。

假设以 $n-1$ 号节段作为端模来预制第 n 号块时,若 $n-1$ 号节段发生了偏角,那么 n 号节段的线形就会产生误差,为避免误差往下传递,此时可对 n 号节段箱梁的坐标值进行修正,尽可能使 $n+1$ 号节段箱梁的线形误差减小,以此消除在预制过程中误差的累积。

假设以 $n-1$ 号块为端模预制 n 号块时,其角度发生偏移 α ,如图4所示。

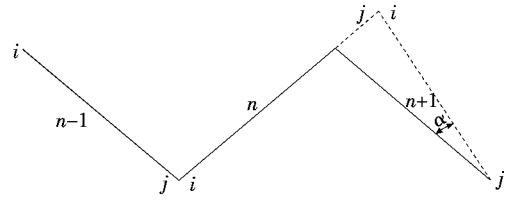


图4 节段误差示意图

根据拼装先后顺序,先拼装 $n-1$ 号节段,再拼装第 n 号节段,此时假定 $n-1$ 号节段未出现偏移,但第 n 号节段出现了一个偏角 α , n 号节段由 j 移动到了 j' 位置, $n+1$ 号节段由 i 移动到 i' 位置。如图5所示。

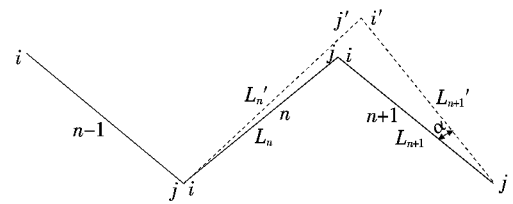


图5 线形修正示意图

为使后续梁段线形准确,可通过修正第 $n+1$ 号节段的 j 端坐标。根据 n 号块中线梁长的实测结果对 $n+1$ 号节段的理论梁长进行修正:

$$L'_{n+1} = L_{n+1} - (L_{Cn} - L_n) \quad (8)$$

式中: L'_{n+1} 为 $n+1$ 号节段修正后的理论梁长; L_{Cn} 为 n 号节段实测梁长; L_n 、 L_{n+1} 分别为 n 号、 $n+1$ 号节段的理论梁长。平面误差角计算:

$$\begin{cases} \alpha_P = \arcsin\left(\frac{X_{bh}^m - X_{fh}^m}{L_{ll}}\right) - \arcsin\left(\frac{X_{bh}^{ml} - X_{fh}^{ml}}{L_{sc}}\right) \\ L_{ll} = \sqrt{(X_{bh}^m - X_{fh}^m)^2 + (Y_{bh}^m - Y_{fh}^m)^2} \\ L_{sc} = \sqrt{(X_{bh}^{ml} - X_{fh}^{ml})^2 + (Y_{bh}^{ml} - Y_{fh}^{ml})^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: α_P 为平面误差引起的角度变化; L_{ll} 为 $n-1$ 号节段 fh 与 bh 点间的距离在平面上的理论投影长; L_{sc} 为 $n-1$ 号节段 fh 与 bh 点间的距离在平面上的实际投影长; X_{bh}^m 、 X_{fh}^m 为 $n-1$ 号节段 fh 、 bh 点在局部坐标系下理论匹配 X 坐标; Y_{bh}^m 、 Y_{fh}^m 为 $n-1$ 号节段 fh 、 bh 点在局部坐标系下理论匹配 Y 坐标; X_{bh}^{ml} 、 X_{fh}^{ml} 为 $n-1$ 号节段 fh 、 bh 点在局部坐标系下实测匹配 X 坐标; Y_{bh}^{ml} 、 Y_{fh}^{ml} 为 $n-1$ 号节段 fh 、 bh 点在局部坐标系下实测匹配 Y 坐标。

立面误差角计算:

$$\Delta Y = Y_j - Y_i \quad (10)$$

式中: Y_j 、 Y_i 分别为 $n-1$ 号节段 j 、 i 端位于整体坐标系中的坐标。

当 $\Delta Y > 0$ 时,有:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_L &= \arctg\left(\frac{Z_{bl}^{ml} - Z_{fl}^{ml}}{L_1} + \frac{Z_{br}^{ml} - Z_{fr}^{ml}}{L_2}\right) - \\ &\quad \arctg\left(\frac{Z_{bl}^m - Z_{fl}^m}{L_3} + \frac{Z_{br}^m - Z_{fr}^m}{L_4}\right) \\ L_1 &= \sqrt{(Z_{bl}^{ml} - Z_{fl}^{ml})^2 + (Y_{bl}^{ml} - Y_{fl}^{ml})^2} \\ L_2 &= \sqrt{(Z_{br}^{ml} - Z_{fr}^{ml})^2 + (Y_{br}^{ml} - Y_{fr}^{ml})^2} \\ L_3 &= \sqrt{(Z_{bl}^m - Z_{fl}^m)^2 + (Y_{bl}^m - Y_{fl}^m)^2} \\ L_4 &= \sqrt{(Z_{br}^m - Z_{fr}^m)^2 + (Y_{br}^m - Y_{fr}^m)^2} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

当 $\Delta Y < 0$ 时,有:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_L &= -\arctg\left(\frac{Z_{bl}^{ml} - Z_{fl}^{ml}}{L_1} + \frac{Z_{br}^{ml} - Z_{fr}^{ml}}{L_2}\right) + \\ &\quad \arctg\left(\frac{Z_{bl}^m - Z_{fl}^m}{L_3} + \frac{Z_{br}^m - Z_{fr}^m}{L_4}\right) \\ L_1 &= \sqrt{(Z_{bl}^{ml} - Z_{fl}^{ml})^2 + (Y_{bl}^{ml} - Y_{fl}^{ml})^2} \\ L_2 &= \sqrt{(Z_{br}^{ml} - Z_{fr}^{ml})^2 + (Y_{br}^{ml} - Y_{fr}^{ml})^2} \\ L_3 &= \sqrt{(Z_{bl}^m - Z_{fl}^m)^2 + (Y_{bl}^m - Y_{fl}^m)^2} \\ L_4 &= \sqrt{(Z_{br}^m - Z_{fr}^m)^2 + (Y_{br}^m - Y_{fr}^m)^2} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中: L_1, L_3 为 $n-1$ 号节段 fl 与 bl 点间距在立面上的实际投影值与理论投影值; L_2, L_4 为 $n-1$ 号节段 fr 与 br 点间距在立面上的实际投影值与理论投影值; $Z_{bl}^m, Z_{fl}^m, Z_{br}^m, Z_{fr}^m, Y_{bl}^m, Y_{fl}^m, Y_{br}^m, Y_{fr}^m$ 分别为 $n-1$ 号节段 fl, bl, fr, br 等 4 点在预制梁局部坐标系中的理论匹配 Z 坐标值、 Y 坐标值; $Z_{bl}^{ml}, Z_{fl}^{ml}, Z_{br}^{ml}, Z_{fr}^{ml}, Y_{bl}^{ml}, Y_{fl}^{ml}, Y_{br}^{ml}, Y_{fr}^{ml}$ 分别为 $n-1$ 号节段 fl, bl, fr, br 共 4 点在预制梁局部坐标系的实测匹配 Z 坐标值、 Y 坐标值。

n 号节段 i 端的理论坐标可先以 n 号节段 j 端为原点建立如图 6 所示的局部坐标系,假设 n 号节段 i 端在平面及立面上转动 α_p, α_l 到修正后的理论位置 i' ,可先计算 α_p, α_l ,再通过平立面旋转,把旋转后的 i' 在局部坐标下进行投影,再通过坐标系转换,旋转时忽略对 x, y 坐标的影响。由于梁段旋转方向和所在象限不同,偏角 α' 的计算有所不同,该文仅对图 6 中象限进行说明。

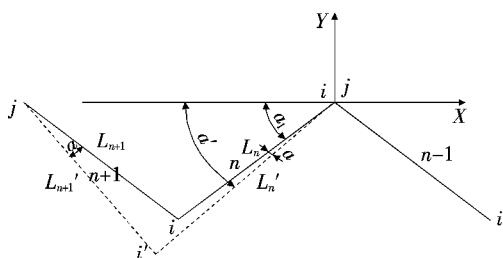


图 6 线形修正计算示意图

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_1 &= \arctg\left(\frac{x_j - x_i}{y_j - y_i}\right) \\ \alpha'_p &= \alpha_1 + \alpha_p \end{aligned} \right. \quad \left\{ \begin{aligned} \alpha_2 &= \arctg\left(\frac{z_j - z_i}{y_j - y_i}\right) \\ \alpha'_L &= \alpha_L + \alpha_2 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中: $x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j$ 分别为 n 号节段 i, j 端修正前处于整体坐标系中的坐标值; α_1, α_2 分别为 n 号节段在平面及立面投影后同 Y 轴的夹角; α'_L, α'_p 分别为 n 号节段经标高方向、平面误差修正后在立面及平面投影后同 Y 轴的夹角; α_L, α_p 分别为在标高方向误差、平面误差引起的角度变化。

经过平面、立面旋转后, n 号节段 i 端位于整体坐标系中的坐标值分别如下式所示:

$$\left\{ \begin{aligned} x'_i &= x_j - L'_n \sin \alpha'_p \\ y'_i &= y_j - L'_n \cos \alpha'_p \\ z'_i &= z_j \end{aligned} \right. \quad \left\{ \begin{aligned} x''_i &= x_i \\ y''_i &= y'_i \\ z''_i &= z'_i - L'_n \sin \alpha'_p \end{aligned} \right. \quad (14)$$

式中: L'_n 为 n 号节段梁长修正后的理论值; α'_L, α'_p 分别为 n 号节段经标高方向误差修正后、平面误差修正引起的角度变化; x_j, y_j, z_j 分别为 n 号节段 j 端在整体坐标系的坐标值; $x'_i, y'_i, z'_i, x''_i, y''_i, z''_i$ 分别为 n 号节段 i 端经平面、立面修正后在整体坐标系的坐标值。

根据误差纠偏后的线形即可得到已浇筑节段 6 个控制点在相邻匹配段的坐标值了。根据这 6 个控制点的坐标值来对相邻的匹配节段进行定位控制,即可减小已浇筑梁段误差对后续梁段线形的影响。

3 节段箱梁施工线形计算

主线 16.5 m 典型高架预制桥梁采用连续—刚构体系预制梁,中墩刚构,边墩采取方支座的形式,主梁采用单箱单室等高斜腹板预应力混凝土箱梁,节段预制拼装。中墩和边墩墩顶 0 号节段采用现浇。根据构造及施工架设需要,36~40 m 跨径的中跨、边跨均划分为 12 个预制节段,采用对称悬臂拼装的工艺成型,预制节段长度分别为 2.9 与 2.4 m,桥宽 16.5 m,梁高 2.2 m。墩顶现浇 0 号节段与 1 号预制节段间设置 15 cm 现浇湿接缝,跨中合龙段采用现浇施工。

主线路中分幅 16.5 m 宽典型预制桥梁主梁采用单箱单室等梁高斜腹板预应力混凝土箱梁。顶板设单向横坡,利用箱梁整体旋转来形成。单个箱梁宽度为 16.5 m,底板宽度 2.8 m,悬臂长度为 4.0 m,箱梁梁高为 2.2 m,翼缘板设横向扁锚预应力钢束。箱梁跨中断面如图 7 所示,节段梁参数如表 1 所示。

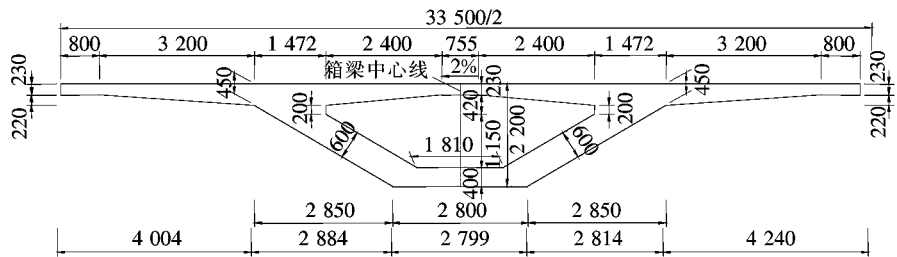


图 7 跨中横断面图 (单位:mm)

表 1 边跨及中跨节段参数

节段编号	L/ mm	顶板厚/ mm	腹板厚/ mm	底板厚/ mm
边墩 0# 现浇	2 170	—	—	—
湿接缝	150	230	600	400
1#~2# 预制	2 900	230	600~380	400~270
3#~6# 预制	2 900	230	380	270
湿接缝	600	230	380	270
中墩 0# 现浇	4 500/2	—	—	—

3.1 模型建立

选取一联路中分幅 3×40 m 典型跨径直线段节段拼装桥梁进行研究,采用 Midas/Civil 建立有限元模型,全桥共划分 4 846 个节点,4 829 个单元,主梁及下部结构均采用梁单元模拟,桩基桩土效应采用节点弹性支撑进行模拟;桥墩采用 C50 混凝土,上部结构预制拼装部分采用 C60 混凝土,预应力筋采用 1 860 MPa 钢绞线,施工阶段划分如表 2 所示。计算荷载:

表 2 施工阶段划分

施工阶段	施工内容
CS1	边中墩下部结构
CS2	中墩 0# 横梁
CS3	拼装 1# 块、张拉顶板钢束 T1、体外临时预应力
CS4	拼装 2# 块、张拉顶板钢束 T2、体外临时预应力
CS5	拼装 3# 块、张拉顶板钢束 T3、体外临时预应力
CS6	拼装 4# 块、张拉顶板钢束 T4、体外临时预应力
CS7	拼装 5# 块、张拉顶板钢束 T5、体外临时预应力
CS8	拼装 6# 块、张拉顶板钢束 T6、体外临时预应力
CS9	边墩 0# 横梁
CS10	支架拼装边跨 1#~6# 节段梁、体外临时预应力
CS11	浇筑边跨合龙段、张拉边跨顶板钢束 H 钢束
CS12	浇筑中跨合龙段、张拉腹板通长钢束、张拉边跨及中跨底板短钢束
CS13	拆支架、张拉边中墩剩余横梁钢束
CS14	二期恒载
CS15	10 年收缩徐变

自重、二期恒载、预应力荷载、收缩徐变、活载、温度荷载、汽车撞击力荷载等。

3.2 变形计算分析

预制阶段的关键是要考虑梁体的施工预拱度。在各荷载组合作用下主梁变形曲线如图 8 所示,各荷载作用下变形值累加即可得节段梁的制作预拱度(图 9),以此为节段梁的预制线形提供依据。

由图 8、9 可以看出:在未施加预应力之前,主梁在自重作用下产生的最大累计挠度为 60 mm,施加完预应力以后,预应力作用下产生的最大累计挠度为 75 mm;在荷载组合作用下,在施加预应力以后,全桥的预拱度曲线明显下移,其全桥的最大值从 76.3 mm 下降到 12.6 mm,变化幅度达 63.7 mm。综上所述可以看出预应力的作用是明显的,验证了节段箱梁在连续状态下张拉通长预应力以后用于抵抗二期恒载以及活荷载作用的有效性。

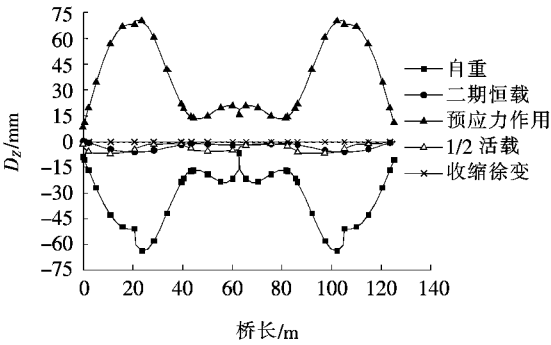


图 8 荷载作用下主梁挠度图

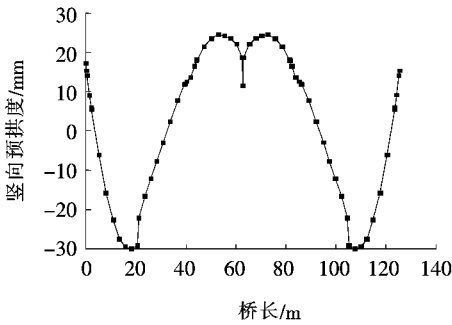


图 9 主梁预拱度

3.3 线形控制计算

通过有限元模拟分析计算得出的预拱度是节段梁在预制阶段线形控制的目标值。根据 6 个控制点的坐标值,同时进行误差纠偏,即可得到各梁段在匹配位置的理论数据,以此指导梁段制造。现场预制控制测点如图 10 所示,限于篇幅,该文仅列出路中分幅 3×40 m(墩号 09Z108~09Z111)典型跨径桥梁,边跨靠近 09Z109 号墩侧 1#~6#块的控制点坐标,如表 3~5 所示。

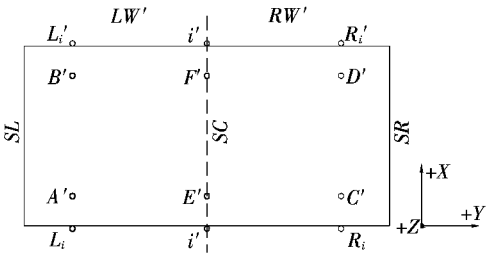


图 10 各控制点平面示意图

表 3 预制阶段控制线 1 坐标 mm

节段编号		X	Y	Z
09Z-109-	B'	61 497.305 9	67 675.938 3	103.525 4
108-R01	A'	61 497.386 0	67 673.241 8	103.503 3
09Z-109-	B'	61 497.390 6	67 673.041 4	103.499 0
108-R02	A'	61 497.470 5	67 670.340 2	103.468 1
09Z-109-	B'	61 497.475 5	67 670.136 9	103.470 7
108-R03	A'	61 497.563 2	67 667.443 9	103.438 8
09Z-109-	B'	61 497.569 0	67 667.240 0	103.442 5
108-R04	A'	61 497.651 5	67 664.541 3	103.407 4
09Z-109-	B'	61 497.664 8	67 664.344 6	103.409 1
108-R05	A'	61 497.737 0	67 661.630 8	103.379 1
09Z-109-	B'	61 497.744 8	67 661.446 0	103.370 4
108-R06	A'	61 497.807 6	67 658.747 4	103.346 5

表 4 预制阶段中心线坐标 mm

节段编号		X	Y	Z
09Z-109-	F'	61 493.505 1	67 675.819 3	103.454 8
108-R01	E'	61 493.587 4	67 673.122 4	103.433 6
09Z-109-	F'	61 493.597 4	67 672.921 7	103.429 9
108-R02	E'	61 493.673 1	67 670.229 8	103.400 1
09Z-109-	F'	61 493.677 2	67 670.031 2	103.403 8
108-R03	E'	61 493.771 6	67 667.322 1	103.374 6
09Z-109-	F'	61 493.770 5	67 667.120 9	103.371
108-R04	E'	61 493.857 6	67 664.427 3	103.339 5

续表 4

节段编号		X	Y	Z
09Z-109-	F'	61 493.854 6	67 664.232	103.335 9
108-R05	E'	61 493.948 9	67 661.519 6	103.301 8
09Z-109-	F'	61 493.955 2	67 661.324 7	103.299
108-R06	E'	61 494.031 9	67 658.631	103.277

表 5 预制阶段控制线 2 坐标 mm

节段编号		X	Y	Z
09Z-109-	D'	61 489.707 0	67 675.702 8	103.377 0
108-R01	C'	61 489.791 8	67 673.007 0	103.352 1
09Z-109-	D'	61 489.798 9	67 672.807 1	103.351 8
108-R02	C'	61 489.877 2	67 670.111 5	103.323 9
09Z-109-	D'	61 489.878 1	67 669.910 8	103.322 1
108-R03	C'	61 489.969 1	67 667.208 5	103.292 4
09Z-109-	D'	61 489.975 7	67 667.007 2	103.291 4
108-R04	C'	61 490.056 6	67 664.313 7	103.260 1
09Z-109-	D'	61 490.065 0	67 664.120 6	103.260 8
108-R05	C'	61 490.136 8	67 661.402 5	103.224 5
09Z-109-	D'	61 490.134 3	67 661.211 2	103.222 2
108-R06	C'	61 490.239 0	67 658.514 3	103.192 8

梁段预制好后,将各梁段各控制点的局部坐标值通过转化即可得到在拼装节段线形控制的目标值,如表 6~8 所示。

表 6 拼装阶段控制线 1 坐标 mm

节段编号		X	Y	Z
09Z-109-	B'	67 658.718	61 497.834	103.358
108-R01	A'	67 661.416	61 497.751	103.386
09Z-109-	B'	67 661.616	61 497.745	103.388
108-R02	A'	67 664.315	61 497.662	103.416
09Z-109-	B'	67 664.515	61 497.655	103.418
108-R03	A'	67 667.214	61 497.572	103.446
09Z-109-	B'	67 667.414	61 497.566	103.448
108-R04	A'	67 670.113	61 497.483	103.475
09Z-109-	B'	67 670.313	61 497.477	103.477
108-R05	A'	67 673.012	61 497.394	103.504
09Z-109-	B'	67 673.213	61 497.387	103.506
108-R06	A'	67 675.911	61 497.304	103.532

表 7 拼装阶段中心线坐标 mm

节段编号		X	Y	Z
09Z-109-	F'	67 658.601	61 494.037	103.282
108-R01	E'	67 661.299	61 493.954	103.310
09Z-109-	F'	67 661.499	61 493.948	103.312
108-R02	E'	67 664.198	61 493.864	103.340
09Z-109-	F'	67 664.398	61 493.858	103.342
108-R03	E'	67 667.096	61 493.775	103.370
09Z-109-	F'	67 667.297	61 493.769	103.372
108-R04	E'	67 669.996	61 493.686	103.399
09Z-109-	F'	67 670.196	61 493.680	103.401
108-R05	E'	67 672.895	61 493.596	103.428
09Z-109-	F'	67 673.096	61 493.590	103.430
108-R06	E'	67 675.794	61 493.507	103.456

表 8 拼装阶段控制线 2 坐标 mm

节段编号		X	Y	Z
09Z-109-	D'	67 658.483	61 490.240	103.206
108-R01	C'	67 661.182	61 490.157	103.234
09Z-109-	D'	67 661.382	61 490.150	103.236
108-R02	C'	67 664.081	61 490.067	103.264
09Z-109-	D'	67 664.281	61 490.061	103.266
108-R03	C'	67 666.979	61 489.978	103.294
09Z-109-	D'	67 667.180	61 489.972	103.296
108-R04	C'	67 669.879	61 489.889	103.323
09Z-109-	D'	67 670.079	61 489.882	103.325
108-R05	C'	67 672.778	61 489.799	103.352
09Z-109-	D'	67 672.979	61 489.793	103.354
108-R06	C'	67 675.677	61 489.710	103.380

根据有限元计算出来的制造线形结合预制现场实测数据进行梁段预制计算,得出了已成梁段在匹配位置的理论值,这是预制阶段线形控制的目标值。梁段预制好后,根据安装线形将各梁段在现浇位置各控制点的局部坐标值转化到安装线形整体坐标系下,得出安装阶段线形控制的坐标值。预制节段梁在架设过程中,经现场实际测量发现实测与理论平面线形差值较小,标高的差值能控制在±5 mm 以内,误差均能满足设计要求。说明在预制时产生的误差,能够及时地进行调整,保证了合龙时的精度。

3.4 施工临时预应力

梁段在拼装后需施加临时预应力,其作用是给予

节段断面施加一定的压力,使环氧树脂胶更好地固化,从而将梁段连接成整体,确保已拼装节段在永久预应力钢束张拉之前各接缝处不会发生错动。临时预应力应在全跨节段拼接完毕及第一批纵向通长预应力钢绞线施力完毕后按顺序拆除。

该项目临时预应力利用顶板和腹板上的钢锚块通过精轧螺纹钢与梁体锚固,两节段间采用 5 根 $\phi 32$ 精轧螺纹钢,节段在预制时利用模具精确预留锚固孔,每节段 4 处,顶板 2 处,腹部 2 处,挤压力作用在节段断面形心轴上。

为满足环氧树脂胶的固化要求,需对临时预应力张拉力进行控制,确保接缝截面位置在临时预应力张拉时不出现拉应力,计算模型如图 11 所示,节段截面面积 $A=8.58\text{ m}^2$, $I=4.06\text{ m}^4$, $G=647\text{ kN}$ 。

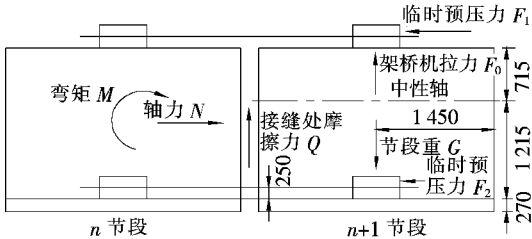


图 11 临时预应力简化计算模型(长度单位:mm)

根据简化模型可得到以下方程:

$$\begin{cases} G = Q + F_0 \\ N = F_1 + F_2 \\ \sum M = 0 \end{cases} \quad (15)$$

临时预应力张拉过程中,为避免接缝位置上下缘出现拉应力,需满足下式:

$$\begin{cases} \sigma_{\pm} = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} y_1 \\ \sigma_{\mp} = \frac{N}{A} - \frac{M}{I} y_2 \end{cases} \quad (16)$$

主要材料力学性能参数如表 9 所示。

表 9 主要材料力学性能

节段类型	顶板张拉力/kN	底板张拉力/kN
边墩 1#	400	700
中墩 1#	400	400
2#~6#	400	650

如预应力张拉顺序不合理,将会对桥梁线形造成不利影响。如解除顺序不当,箱梁节段下缘可能产生拉应力,节段将产生有害裂缝。张拉时采用顶板与底

板上下同时张拉,横向按先中间再两侧的顺序对称张拉。临时预应力解除时,必须在全桥钢束所有永久钢束张拉完成后进行。

3.5 线形纠偏措施

悬臂拼装的关键是主梁的变形控制,即使已经考虑了制作预拱度,由于在现场架设过程中受各种因素的影响,会引起拼装线形与理论线形有一定偏差。因此有必要采取纠偏措施对后续拼装梁段的标高加以调整,以保证预应力张拉完后桥梁的整体线形接近设计线形。

梁端在某个拼装阶段的目标高程可根据下式得到:

$$h_{nn} = h_{nd} - h_{n1} - h_{n2} \quad (17)$$

式中: h_{nn} 为设计标高; h_{nd} 为下部结构在后续拼装过程中的累计变形量; h_{n1} 为该位置在后续阶段的累计变形量; h_{n2} 为当前拼装阶段的目标标高值。

在悬臂拼装时若发现测量数据结果超出线形控制允许的误差范围,必须对下一拼装梁段进行纠偏。可采取的调整措施有:临时预应力的调整,临时配重调整,拼接缝涂胶层的厚度调整,以及必要时对主梁增加现浇缝等。

(1) 改变胶层厚度(图 12):根据对上部结构变形特点的计算,对不同位置的涂胶层厚度进行调整。此过程可通过材质为环氧树脂的垫片进行调整,材料强度应不小于混凝土强度。加设垫片后,拼缝垫圈厚度也要随之增加,增厚方法将两层黏在一起,此时涂胶厚度也应随之改变。

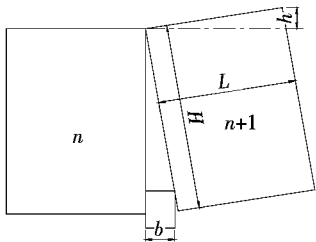


图 12 立面调整示意图

由于垫块厚度较薄,可根据:

$$\frac{b}{H} = \frac{h}{L} \quad (18)$$

得到: $h = bL/H$

式中: b 为垫块厚度; H 为节段梁梁高; L 为节段梁梁长; h 为该梁段可调节高度。

平面调整可把式(18)中 h 改为梁宽即可,根据不同厚度的垫块可以调整的误差范围,再进行相应调整,尽可能确保拼装线形的精度。

(2) 临时预应力:根据临时预应力钢筋的张拉时间,通过顶、底板和内外侧的临时预应力张拉力的不同,在保证胶结强度和厚度的要求下,微调悬拼梁段前端的位置。

(3) 湿接缝:当线形定位出现错误或线形误差过大致使不能采取上述两种方法调整时,可利用无收缩水泥砂浆增设湿接缝的方式进行调整。此外节段预制误差、悬拼误差以及断链问题都可以采用此方法。该方法会引起节段梁的拼接长度增长,导致预制阶段控制点坐标在箱梁架设时会有不同,使用该方法需找出两者的不同,重新计算新的坐标架设数据。

4 结论

以郑州市四环线及大河路快速化工程为实际工程背景,对箱梁在不同施工阶段的线形控制原理进行研究,得到了箱梁在预制阶段的坐标转换公式,同时对预制阶段的预制误差及线形纠偏做了说明。通过对一联 3×40 m 桥梁建立模型,计算得到梁段在预制过程中的预拱度,在预制过程中考虑各种误差修正,然后根据制造线形结合梁场实测数据,将各梁段各控制点的局部坐标值通过转化得到在拼装节段线形控制的目标值,以此来指导施工,同时考虑了节段梁在架设阶段的线形纠偏措施,以此保证预应力张拉完后桥梁的整体线形接近设计线形,对实际施工具有指导意义。

参考文献:

- [1] 王英.城市桥梁预制箱梁节段拼装关键技术的研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2011.
- [2] 方蕾.短线预制悬臂拼装连续梁桥施工线形控制研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2008.
- [3] 刘海东,侯文崎,罗锦.短线节段预制拼装桥梁几何线形三维控制方法[J].铁道科学与工程学报,2017(4).
- [4] 王志刚,余顺新,陈亚莉.桥梁快速建造技术[J].中外公路,2018(4).
- [5] 张鸿,张喜刚,丁峰.短线匹配法节段预制拼装桥梁新技术研究[J].公路,2011(2).
- [6] 张校昌.短线匹配法节段箱梁施工技术应用研究[D].山东大学硕士学位论文,2015.