

武汉阳逻长江大桥南锚碇工程 预应力锚固系统的施工测量

涂 潜

(中港第二航务工程局五公司 武汉市 430012)

摘 要: 介绍了武汉阳逻长江大桥南锚碇工程预应力锚固系统的三维坐标转换与施工测量控制方法, 并通过
对定位精度的分析与对设计要求和规范的研究, 提出了对结构物空间位置的质量评定应相对其轴线而定的看法。

关键词: 预应力锚固系统; 施工测量; 三维坐标转换; 精度分析; 轴线

1 阳逻长江大桥概况

武汉阳逻长江大桥位于武汉市东北郊, 桥长 2 725 m, 接线长 7 275 m。阳逻大桥是武汉市的第一座跨长江的悬索桥。大桥主桥为双塔单跨钢箱梁悬索桥, 主跨 1 280 m。二航局承担 D 标(南锚碇工程)、C 标(南塔、南引桥工程)的施工任务, 其中南锚碇工程号称“神州第一锚”, 是工程成败的关键。

南锚碇的锚体是采用后悬式重力式锚体, 锚固系统采用如图 1 所示的双向(横向、竖向)散索预应力锚固系统, 由索股锚固连接构造和预应力钢束锚固构造组成, 于前锚面处, 索股锚固拉杆一端与索股锚头相连, 锚固拉杆的另一端则与预应力锚固系统的连接器相连。锚块内预留预应力管道, 要求其方向与被锚固的索股散开方向一致。

本文主要对预应力锚固系统施工测量进行介绍与总结。

2 施工测量控制网布设

阳逻大桥首级平面控制网是按国家二等边角网布设的, 以桥轴线 YL01、YL02 为基准线在桥的两侧布设双大地四边形, 并建立桥轴坐标系, 平面控制网网形如图 2 所示, 大桥跨越长江, 由于受地形条件的影响, 边角网三角形最小内角近 17°, 最短边长为 211.256 m, 最长边长为 1 625.070 m, 不能满足国家二等平面控制网布设对图形条件的要求。由于采用测量仪器精度的提高, 我部采用的徕卡 TC1800 全

站仪(测角精度 1"、测距精度 1 mm+2 ppm), 对首级平面控制网采用测边网复核, 实测边长都进行温度、湿度、气压及投影改正, 事实证明有多余观测的测边网精度基本等同边角网。全桥水准网按照二等水准测量技术要求进行复核, 复核线路形成闭合环。

在锚体及预应力索道管施工期间, 因受锚固系统施工定位架的影响, 测量视线难通视, 为方便锚体及预应力锚固系统施工, 必须在锚块周围临时加密若干控制点, 每浇注一层锚块混凝土, 就施测一次控制网, 从而建立新的锚体及预应力钢管施工控制网(作为下一层锚体及预应力钢管施工控制网), 以确保施工测量的精度。加密按照《工程测量规范》三等精密导线或测边网技术要求进行布设与测设, 且在施工期间定期对大桥首级施工控制点进行复核。

3 预应力锚固系统的三维坐标转换

预应力锚固系统是三维空间结构, 设计提供的参数均在结构坐标系中, 施工之前首先要把预应力钢束要素从结构坐标系转变至桥轴测量坐标系(简称测量坐标系), 坐标系相对位置关系如图 3 所示。

在常规工程测量中, 坐标转换使用较多的是坐标平移与坐标系水平面内旋转, 而悬索桥预应力系统在测量数据计算中必须使用空间坐标系三维平移与旋转, 这在 GPS 测量数据处理中常见。其实不同坐标系统的转换本质就是不同基准间的转换, 在转

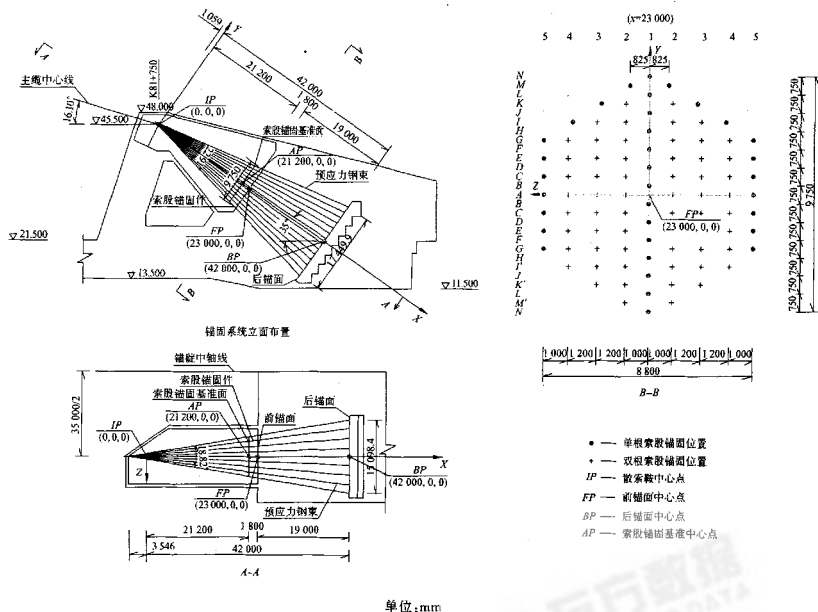


图1 锚体及锚固系统布置

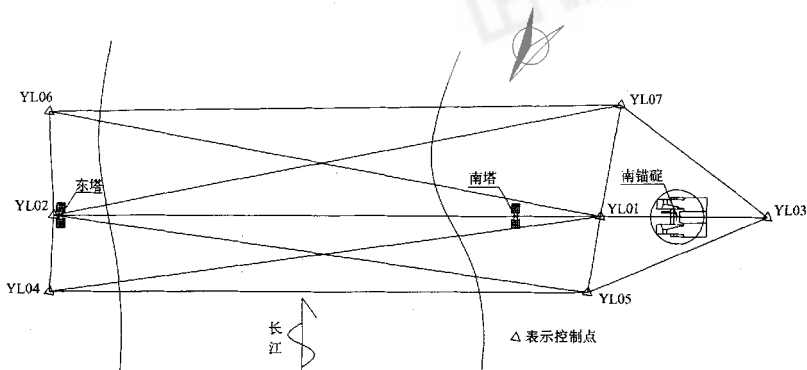
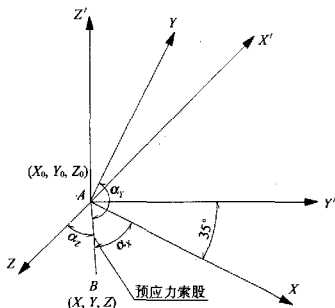


图2 武汉阳逻长江大桥施工平面控制网布置示意

换时,最为常用的方法是布尔沙模型(又称七参数转换法)。这里结合实际情况与布尔沙模型,说明三维坐标转换。

在预应力钢束数据计算过程中,引入空间解析几何的矢量表示索股,索股矢量 \overrightarrow{AB} 的B点的三维坐标在结构坐标系中表示为:



(1) X, Y, Z 轴为结构坐标系坐标轴, X', Y', Z' 轴为测量坐标系坐标轴, $\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z$ 分别为索股与结构坐标系 X, Y, Z 坐标轴的夹角;

(2) X 轴与 Y' 轴夹角为 35° , AB 为索股, A 为 IP 点;

(3) XY 平面与 $Y'Z'$ 平面平行, 结构坐标系符合右手螺旋法则, 测量坐标系符合左手螺旋法则。

图3 预应力锚固系统坐标系相对位置关系

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{结构}} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{\text{结构}} + |\overrightarrow{AB}| \times \begin{bmatrix} \cos \alpha_X \\ \cos \alpha_Y \\ \cos \alpha_Z \end{bmatrix}_{\text{结构}} \quad (1)$$

其中 $0^\circ \leq \alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z \leq 180^\circ$

索股矢量 \overrightarrow{AB} 的 B 点的三维坐标在桥轴测量坐标系中表示为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{\text{测量}} = \begin{bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{bmatrix}_{\text{测量}} + |\overrightarrow{AB}| \times \begin{bmatrix} \cos \beta_{X'} \\ \cos \beta_{Y'} \\ \cos \beta_{Z'} \end{bmatrix}_{\text{测量}} \quad (2)$$

其中 $\beta_{X'}, \beta_{Y'}, \beta_{Z'}$ 分别为索股矢量 \overrightarrow{AB} 与桥轴测量坐标系 X', Y', Z' 轴的夹角, $0^\circ \leq \beta_{X'}, \beta_{Y'}, \beta_{Z'} \leq 180^\circ$ 。

从图3中可看出, 索股结构坐标系与测量坐标系的相对关系, 由结构坐标系转换至测量坐标系需依次经过以下转换。

(1) X, Y 轴绕 Z 轴向上旋转 35° , 得 Y', Z' 轴表示为:

$$R_Z(35^\circ) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \cos 35^\circ & \sin 35^\circ & 0 \\ -\sin 35^\circ & \cos 35^\circ & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) Z 轴反向得 X' 轴, 表示为:

$$F_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 坐标系平移量表示为:

$$\Delta U = (\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z)^T = (1\ 000 \pm 17.5 \ 81\ 750$$

45.5)^T (上游侧取+, 下游侧取-) (5)

结合式(3)、式(4)、式(5)得结构坐标系与测量坐标系的转换关系:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{\text{测量}} = R_Z(35^\circ) \times F_Z \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{结构}} + \Delta U$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ \cos 35^\circ & \sin 35^\circ & 0 \\ -\sin 35^\circ & \cos 35^\circ & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1\ 000 \pm 17.5 \\ 81\ 750 \\ 45.5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于阳逻大桥施工坐标系采用的是桥轴测量坐标系, 如采用大地测量坐标系, 坐标系还得在水平面内旋转, 如绕 Z' 轴旋转角度为 γ , 则在式(6)等号右边 F_Z 后面还得再乘以矩阵 $R_{\gamma}(\gamma)$, 相应常数项平移数据也得改变。

$$R_{\gamma}(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

在三维坐标系转换时注意旋转的顺序, 在这里不讨论水平方向的旋转, 把式(1)代入式(6)得:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{\text{测量}} = \begin{bmatrix} -Z_0 + 1\ 000 \pm 17.5 \\ X_0 \cos 35^\circ + Y_0 \sin 35^\circ + 81\ 750 \\ 45.5 - X_0 \sin 35^\circ + Y_0 \cos 35^\circ \end{bmatrix} + |\overrightarrow{AB}| \times \begin{bmatrix} \sin(180^\circ + \alpha_X) \\ \cos 35^\circ \times \cos \alpha_X + \sin 35^\circ \times \cos \alpha_Y \\ -\sin 35^\circ \times \cos \alpha_X + \cos 35^\circ \times \cos \alpha_Y \end{bmatrix} \quad (8)$$

对比式(8)与式(2)得:

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta_{X'} &= \cos(180^\circ + \alpha_X) \\ \cos \beta_{Y'} &= \cos 35^\circ \times \cos \alpha_X + \sin 35^\circ \times \cos \alpha_Y \\ \cos \beta_{Z'} &= -\sin 35^\circ \times \cos \alpha_X + \cos 35^\circ \times \cos \alpha_Y \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$0^\circ \leq \beta_{X'}, \beta_{Y'}, \beta_{Z'} \leq 180^\circ$

依据式(9)可计算索股矢量在测量坐标系中的方向角, 由于在测量行业中, 点的位置用坐标表述, 有向线段用三维坐标与方位角、竖直角表示, 故方向角要变换成方位角 T 、竖直角 V :

$$\begin{cases} T = \arctan(\cos \beta_{Y'} / \cos \beta_{X'}) \\ V = 90^\circ - \beta_{Z'} \end{cases} \quad (10)$$

计算时注意索股所在的象限。

4 预应力锚固系统的施工测量控制

预应力锚固系统是一个复杂的三维空间体结构, 技术含量高、施工工艺复杂, 锚块施工过程中, 应特别注意锚固系统定位支架及预应力管道、前后锚

面锚垫板的预埋, 预应力锚固系统施工测量的质量标准是:

- 结构轴线允许偏差 ± 10 mm;
- 顶面高程允许偏差 ± 20 mm;
- 结构预埋件轴线允许偏差 ± 10 mm;
- 前、后锚孔道中心坐标允许偏差 ± 5 mm;
- 前锚面孔道角度允许偏差 $\pm 0.2^\circ$ 。

预应力锚固系统定位与验收以全站仪三维坐标法为主, 以其他测量方法作校核。

(1) 前、后锚面槽口模板及锚垫板的安装测量。

前、后锚面是互相平行的两个面, 它与预应力钢束并不一定垂直, 必须通过异型的槽口模板来保证混凝土面与预应力钢束的垂直关系, 槽口模板及锚垫板的安装精度直接关系到主缆的线型与结构受

力, 故设计图中对此做了明确规定。

槽口模板的安装步骤: ①安装前, 验收槽口模板的加工尺寸及模板的三维轴线, 是否准确; ②槽口模板纵、横轴线准确放样(即前锚面 P_1 轴线、后锚面 P_2 轴线), 注意后锚面槽口模板是在后锚面模板调整好后, 直接在模板上放样, 而前锚面槽口模, 则是先焊槽钢用仪器放出虚拟前锚面, 再在槽钢上放样槽口模板纵、横轴线; ③最后根据轴线安装、调整槽口模板; ④用全站仪三维坐标法检查 P_2 、 P_3 点, 调整模板及锚垫板位置。

(2) 预应力钢管安装测量。

南锚碇预应力钢管, 一侧锚室有 94 根, 两侧共 188 根。上、下游侧锚块内预应力钢管对称于桥轴线, 锚固系统预应力钢管编号见图 4 所示。

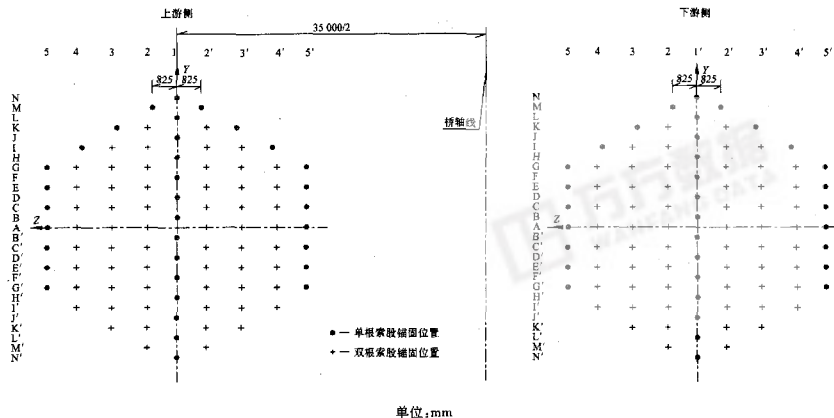


图 4 锚固系统预应力钢管编号示意图

预应力钢管由基准架和定位架来支撑与定位, 定位架由型钢组拼成框架, 用定位板将预应力钢管固定在定位架上。预应力钢管基准架和定位架分为若干节段, 每个节段分为若干层, 每层分为两个半体, 以满足分层浇注、分节支撑、分段接管、实时监控的设计要求。定位架沿 X 轴分为 3 段(6 个定位片), 沿 Y 轴分为 3 层, 沿 Z 轴分为 2 段, 共计 18 个制作单元。

锚垫板预应力钢管施工控制步骤如下:

①在加工房拼装、焊接预应力钢管施工定位基准架, 同时根据结构坐标预开钢管孔位, 在定位板标示钢管中心轴线, 以便于现场预应力钢管安装定位;

- ②现场吊装预应力钢管定位基准架并精确定位;
- ③在基准架斜面上放出定位架安装纵、横控制线;
- ④采用全站仪三维坐标法校核预应力钢管中心轴线, 并精确放样预应力钢管安装定位控制点;
- ⑤预应力钢管安装完后, 同理采用全站仪三维坐标法进行预应力钢管安装定位检查, 检查部位为预应力钢管中心轴线点或钢管中心轴线投影点。

因预应力钢管安装采取分节拼装定位基准架, 分段接长预应力钢管, 施工时实时测量预应力钢管方向及中心轴线点空间三维坐标。

(3) 预应力钢管检查定位方法。

预应力钢管安装完后, 采用全站仪三维坐标

法进行预应力钢管安装定位检查,检查部位为中心轴线点,如图5所示。因预应力钢管安装采取分节拼装定位基准架,分段接长预应力钢管,每根预应力钢

管共分3段,故采取实时测量预应力钢管中心轴线的三维坐标及方向。

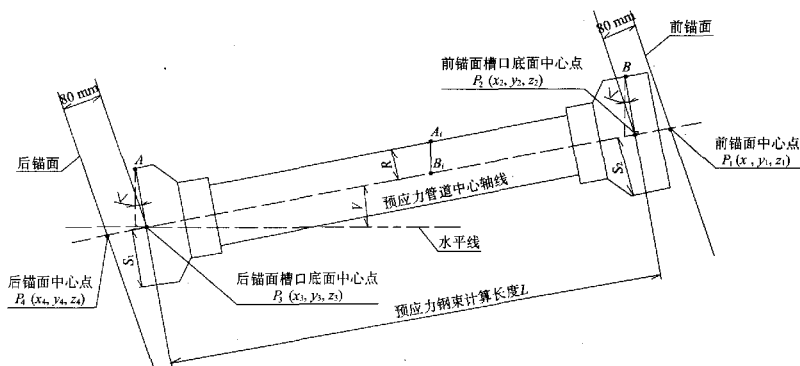


图5 预应力钢管坐标计算及定位检查示意

预应力钢管中心轴线任意点 B_i 在测量坐标系中的设计三维坐标计算公式:

$$\begin{cases} Z=Z_0 \\ X=X_3+(Z_0-Z_3)/\tan(-V)\times\cos(180^\circ+T) \\ Y=Y_3+(Z_0-Z_3)/\tan(-V)\times\sin(180^\circ+T) \end{cases} \quad (11)$$

式中: T 为预应力钢管中心轴线方位角,方向由 P_2 指向 P_3 ; V 为预应力管道中心轴线的垂直角,即与水平面的夹角; Z_0 为全站仪实测预应力钢管中心轴线上任一点的 Z 坐标; X_3, Y_3, Z_3 为 P_3 点在测量坐标系中的三维坐标。

预应力钢管安装完毕后,进行预应力钢管精确定位检查,检查部位为预应力钢管与通过钢管中心轴线的铅垂面的交线,交线上任一点 A_i 的三维坐标计算公式为(R 为预应力钢管外半径):

$$\begin{cases} Z=Z_0 \\ X=X_3+(Z_0-R/\cos(-V)-Z_3)/\cos(-V)\times\cos(180^\circ+T) \\ Y=Y_3+(Z_0-R/\cos(-V)-Z_3)/\cos(-V)\times\sin(180^\circ+T) \end{cases} \quad (12)$$

Z_0 为全站仪实测预应力钢管中心轴线上任一点的 Z 坐标;

其中 A, B 点三维坐标计算公式为(以 A 点为例):

$$\begin{cases} X=X_3+S_1\times\sin V\times\cos(T'-180^\circ) \\ Y=Y_3+S_1\times\sin V\times\sin(T'-180^\circ) \\ Z=Z_3+S_1\times\cos V \end{cases} \quad (13)$$

根据全站仪实测预应力钢管轴线任一点的 Z 坐标,计算相应高程处预应力钢管中心轴线理论三维坐标,如预应力钢管中心轴线点的理论三维坐标与实测三维坐标不符,则重新调整预应力钢管直至满足要求。对于不能直接测定的预应力钢管中心轴线点,可根据已测定的点与不能直接测定的预应力钢管中心轴线点的相对几何关系,用边长交会法或对称轴线法求得。

(4) 施测时间。

为了减少大气、日照、风力等外界条件对锚体、预应力钢管定位的影响,测量作业选择在气候条件较为稳定、日照变化影响较小的时间段内进行。

5 预应力锚固系统定位的精度分析

由于预应力锚固系统定位方法均是采用全站仪三维坐标法,根据全站仪三维坐标法测量原理,全站仪三维坐标法计算原理图见图6所示,建立定位点 P 的三维坐标方程式:

$$\begin{cases} x=D\sin\alpha\cos\alpha \\ y=D\sin\alpha\sin\alpha \\ h=D\cos\alpha \end{cases} \quad (14)$$

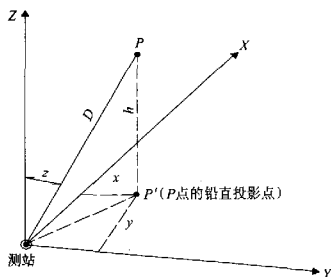


图6 全站仪三维坐标法计算原理示意

由定位点 P 的三维坐标方程式可知,影响定位点 P 的精度有三个因素,第一个因素是斜距 D ,第二个因素是天顶距 Z 角,第三个因素是水平角 α 。按误差传播定律得:

$$\left. \begin{aligned} M_x^2 &= (\sin z \cos \alpha M_D)^2 + (D \cos z \cos \alpha M_Z / \rho)^2 + \\ &\quad (D \sin z \sin \alpha M_\alpha / \rho)^2 \\ M_y^2 &= (\sin z \sin \alpha M_D)^2 + (D \cos z \sin \alpha M_Z / \rho)^2 + \\ &\quad (D \sin z \cos \alpha M_\alpha / \rho)^2 \\ M_z^2 &= (\cos z M_D)^2 + (D \sin z M_Z / \rho)^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

全站仪三维坐标施工放样的主要误差来源有:测角误差、测距误差、大气折光和地球曲率误差、前视水准高误差、前视对中杆对点误差、测站仪高误差、全站仪对中误差及测量员观测误差。由于施工加密网达到三等精密导线或三等测边网的技术要求,其点位误差相对施工放样误差很小,基本可以忽略不计。

我部采用高精度的徕卡 TC1800 和徕卡 TCA1800 全站仪三维坐标施工放样,其测角误差 $M_\alpha = M_Z = M_\alpha = \pm 1''$,测距误差 $M_D = \pm 1 \text{ mm}$ 。根据预应力锚固系统施工放样测站布设及定位点 P 的空间位置,取 $Z = 60^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $D = 100 \text{ m}$ (最大值), $\rho = 206\,265''$ 。假定大气折光和地球曲率误差 $M_{\text{折}} = \pm 1 \text{ mm}$,前视水准高误差 $M_{\text{水准}} = \pm 1 \text{ mm}$,前视对中杆对点误差 $M_{\text{对点}} = \pm 1 \text{ mm}$,测站仪高误差 $M_{\text{站仪}} = \pm 1 \text{ mm}$,全站仪对中误差 $M_{\text{对中}} = \pm 1 \text{ mm}$,测量员观测误差 $M_{\text{观测}} = \pm 1 \text{ mm}$ 。

根据测量原理的等影响原则,徕卡 TC1800 (徕卡 TCA1800) 全站仪三维坐标施工放样的精度估算分别为:

$$m_{\text{横}} = \pm (M_x^2 + M_y^2 + M_z^2)^{1/2} \approx \pm (0.61^2$$

$$+ 1^2 + 1^2 + 1^2)^{1/2} \approx \pm 1.84 \text{ mm}$$

$$m_{\text{纵}} = \pm (M_y^2 + M_z^2 + M_{\text{折}}^2 + M_{\text{水准}}^2)^{1/2} \approx \pm (0.61^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)^{1/2} \approx \pm 1.84 \text{ mm}$$

$$m_{\text{高}} = \pm (M_x^2 + M_y^2 + M_{\text{折}}^2 + M_{\text{水准}}^2 + M_{\text{站仪}}^2 + M_{\text{对中}}^2)^{1/2} \approx \pm (0.5^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)^{1/2} \approx \pm 2.06 \text{ mm}$$

取 2 倍中误差作为容许误差,则 $2 \times |m_{\text{横}}| = 3.68 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$; $2 \times |m_{\text{纵}}| = 3.68 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$; $2 \times |m_{\text{高}}| = 3.68 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$ (5 mm 为设计要求,验收规范中要求为 10 mm)。故施工放样精度能满足设计及规范要求。

在这里需要提出一点看法。设计图纸与公路工程质量检验评定标准 (JTG F80/1-2004) 对预应力锚固系统的施工精度要求都是规定为前锚而孔道中心坐标误差,由于预应力锚固系统中存在结构坐标系与测量坐标系,它们之间存在一定的旋转关系,假设在结构坐标系中的孔道中心坐标误差为: $M_x = \pm 5 \text{ mm}$, $M_y = \pm 5 \text{ mm}$, $M_z = \pm 5 \text{ mm}$,则在阳逻大桥的测量坐标系中,乘以式(6)等号左侧第一项常数则得: $M_x = \pm 5 \text{ mm}$, $M_y = \pm 7.0 \text{ mm}$, $M_z = \pm 1.2 \text{ mm}$ 。由此可见,相同的测量点位误差在不同的测量坐标系中分配就不一样,造成标准不明确。类似情况有:桩基位置、模板位置的验收允许偏差是轴线偏差还是坐标偏差,结合结构设计及施工要求,测量误差是在一定坐标系中来规定的,故在工程施工中对结构物空间位置的验收与质量评定,应相对结构物的纵、横轴线来衡量,以避免引起争议。

6 预应力锚固系统施工体会与建议

武汉阳逻长江大桥南锚碇工程于 2003 年 10 月开始动工,预应力锚固系统在 2004 年 9 月开始施工,2005 年 3 月完工,整个工程在 2005 年 5 月提前完工,在预应力锚固系统施工过程中施工测量精度要求高、技术含量高、工作量大,二航局测量人员克服重重困难,配合施工,圆满地完成了该工程。通过该项目的施工及在实际工作的不断钻研、学习与摸索,获益匪浅,主要表现在:

(1) 三维空间坐标系的平移、旋转,可以参考布尔沙模型,结合实际,进行计算;

(2) 空间解析几何与测量专业对空间的点与线的表述存在不同之处,在工程施工中,注意参数的转换;

(3) 复杂的三维空间体—预应力锚固系统的施工,要严格控制每个环节,预应力钢管定位采用实时

文章编号: 0451-0712(2006)02-0046-03

中图分类号: U442.5

文献标识码: B

洛卢公路洛河大桥设计简介

金文成, 陈智俊

(华中科技大学土木工程与力学学院 武汉市 430074)

摘要: 介绍了洛卢公路洛河大桥所采用的技术标准、桥型、截面型式及结构计算, 并介绍了该桥设计在构造上所做的特殊处理及施工要点。

关键词: 连续梁桥; 桥梁设计; 施工

1 工程概况

洛卢公路洛河大桥位于洛阳市内, 跨洛河, 为洛阳市重点工程, 为与风景区相适应, 洛河大桥主桥采用8跨连续梁方案, 南、北引桥均为10孔跨径为30 m

的空心板梁。

1.1 桥型

主桥桥孔为8孔一联(50 m+6×80 m+50 m)的预应力混凝土连续箱梁, 主桥布置见图1所示。

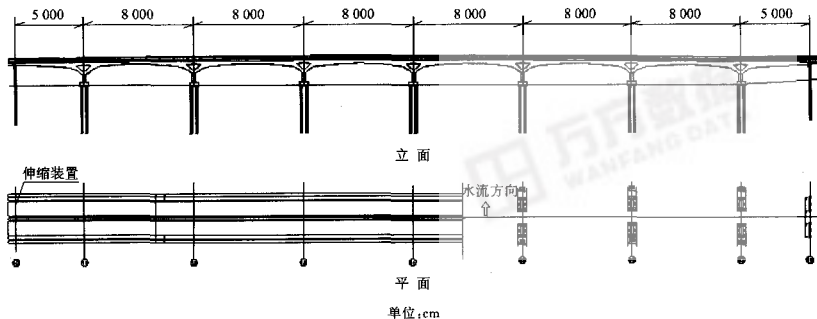


图1 洛河大桥主桥布置

1.2 技术标准

荷载等级: 公路—Ⅰ级;
设计洪水频率: 1/300;
行车道数: 双向六车道;
桥面宽度: 36.5 m;
地震基本烈度: Ⅵ度;
坡度: 桥上最大纵坡为1.36%, 横坡为1.5%。

1.3 气象水文

洛阳市属亚热带向暖温带过渡地带, 四季分明, 季风环流明显, 风向变化较明显, 冬季时间较长且寒冷, 雨雪较少, 春季时间短且干旱, 大风较多, 夏季炎热, 雨水较多且集中, 秋季晴朗, 日照时间长, 年平均气温15.6℃, 多年平均降水量为603.8 mm, 降水多集中在7月~9月。

收稿日期: 2005-10-20

测量监控的方法;

通过定位精度分析与对规范、设计文件的研究, 提出一点建议: 在工程施工当中, 对结构物空间位置的质量评定, 应相对结构物的轴线而定。

参考文献:

- [1] 雷俊卿, 郑明珠, 徐恭义. 悬索桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社.
- [2] 中交公路规划设计院. 阳逻大桥南辅道工程施工图[Z].