

螺杆，施加预拉力→安装托架横向联系→托架预压→安装分配梁、模板→绑扎钢筋→浇筑混凝土→混凝土养生等强→张拉预应力钢筋→管道压浆→拆模、拆除托架。

3 下弦 0# 块施工支架设计

下弦 0# 块托架主要由三角牛腿、支承钢管、纵、横分配梁组成。三角牛腿的横杆采用 2I45a，竖杆和斜撑采用 2I28a 组成的箱型截面。三角牛腿上为 2I45a 的横向分配梁，横向分配梁上为 I20a 纵向分配梁，纵向分配梁上为 φ48 钢管支架。

纵系梁、横系梁托架主要由三角牛腿、支承钢管、纵、横分配梁组成。三角牛腿的横杆采用 2I63a，斜杆，竖杆和斜撑采用 2I32a 组成的箱型截面，平联和剪刀撑采用 2I32a。三角牛腿上为 2I63a 的横向分配梁，横向分配梁上为 I25a 纵向分配梁，纵向分配梁上为 φ48 钢管支架。其中纵系梁托架在横杆位置处采用 4 根 φ32 精轧螺纹钢与下弦 0# 块牛腿横杆进行对拉锚固，牛腿下支点采用钢棒作为支撑。

横系梁托架在横杆位置处梁采用 4 根 φ32 精轧螺纹钢锚固在墩身上，牛腿下支点采用钢棒作为支撑。支架总体布置图下图所示。

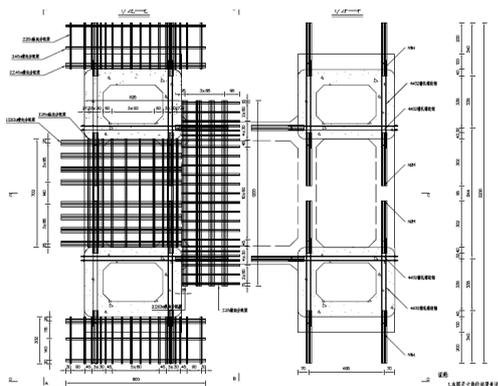


图 3 托架总平面布置示意图 (单位: cm)

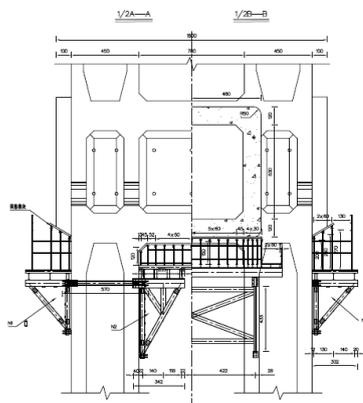


图 4 顺桥向下弦 0# 块及系梁施工立面示意图 (单位: cm)

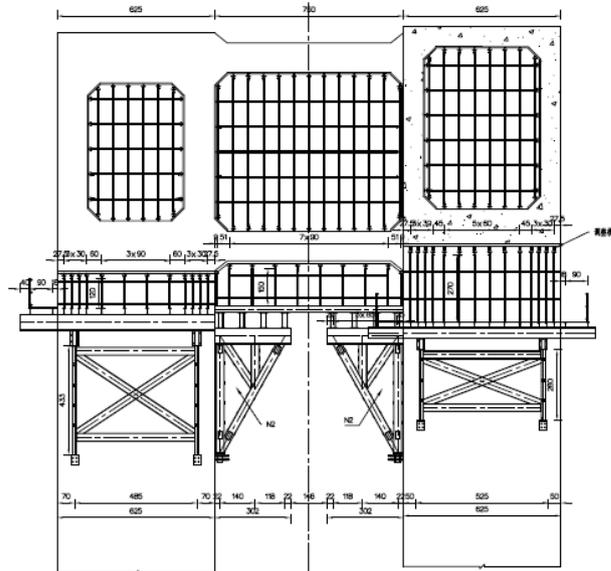


图 5 横桥向下弦 0# 块及系梁施工立面示意图 (单位: cm)

4 托架结构验算

4.1 基本计算参数

材料参数:

(1) 支架钢材为 Q235 材质。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015) 3.2.1, Q235 钢材强度设计值如下表所示。

表 1 钢材强度设计值

型号	厚度 (mm)	强度设计值 (MPa)		
		抗拉、抗压和抗弯 f_d	抗剪 f_{vd}	端面承压 f_{cd}
Q235	≤16	190	110	280
	16~40	180	105	

(2) 精轧螺纹钢: 根据托架设计图纸, 桁架上弦杆对拉螺纹钢直径 φ32mm, 屈服强度 830Mpa。单根螺纹钢公称面积 804.2mm², 抗拉设计强度 f_{pd} 取 690Mpa, 单根螺纹钢预紧力 15t。

(3) 墩身混凝土采用 C45 标号。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018) 3.1.4, C45 轴心抗压强度设计值 f_{cd} 取 20.5Mpa, 轴心抗拉强度设计值 f_{td} 取 1.74Mpa。

4.2 计算荷载

计算中考虑的各种荷载如下:

(1) 钢材自重: 支架钢结构密度取 7850kg/m³, 由软件自动添加。

(2) 混凝土结构自重: 钢筋混凝土容重取 26kN/m³,

下弦 0 号块分三层浇筑，分层高度 3.5m+3.5m+2.5m。考虑混凝土分层硬化承载，计算时对全截面荷载乘以折减系数。

建立系梁、下弦 0 号块实体模型，经过计算，浇筑过程混凝土下缘拉应力均小于抗拉。

设计强度。对实体模型分层浇筑施工阶段的 2 层、3 层荷载分别提取特征点变形（特征点取桁架片弦杆与最远端主横梁交点位置），再通过提取托架模型全截面混凝土荷载作用下的对应特征点变形，换算得到荷载折减系数。经过计算，混凝土荷载计算取 0.5^[1]。

(3) 模板自重：偏安全取 3KPa。

(4) 施工人员及机具荷载：2.5KPa。

(5) 混凝土振捣对底模产生的荷载：2KPa。

(6) 风荷载：根据《公路桥梁抗风设计规范》（JTJ/T 3360-01-2018）附表 A，1/20 基本风速取 22m/s，对应风压 0.3kPa。根据《公路桥梁抗风设计规范》（JTJ/T 3360-01-2018）4.2.4 及 4.2.6，托架高度处设计基准风速计算如下。

$$U_d = K_f K_r K_h U_{10}$$

式中： U_d ——设计基准风速（m/s）；

U_{10} ——基本风速；1/20 设计风速取 22m/s；

k ——抗风风险系数，根据表 4.2.6-1，取 1.0；

k ——地形条件系数，取 1.0；

$h k$ ——风速高度修正系数，基准高度 Z 为 182.4m，根据表 4.2.6-2， kh 取 1.58；

根据《公路桥梁抗风设计规范》（JTJ/T 3360-01-2018）5.3.1，结构风荷载按下式计算。

$$F_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_H D$$

式中： F_g ——作用于结构单位长度上的静阵风荷载（N/m）；

——空气密度（ kg/m^3 ），取 1.25；

U_g ——静阵风风速，根据规范 5.2.1，B 类别地表，静阵风系数取 1.35；

C_H ——结构阻力系数；经计算，2I45a、[]28a 的风阻系数均为 2.0，首节模板

风阻系数为 1.9；

D ——结构的投影高度（m），2I45a、28a、首节模板投影高度（m）分别取 0.45、0.28、3.5；

4.3 荷载组合

支架强度分析荷载组合：

$1.2 \times \text{支架自重} + 1.2 \times \text{模板自重} + 1.2 \times 1.05 \times \text{混凝土荷载} + 1.4 \times (\text{人群机具荷载} + \text{振捣混凝土荷载} + 1.1 \text{风荷载})$ 。

5 托架结构验算

采用 Midas Civil 结构有限元软件对托架进行建模计算。杆件均采用梁单元建模，小钢管支架在上文采用手算计算，模型中仅作为自重荷载及传递竖向荷载作用。混凝土荷载、模板自重、施工荷载均以面荷载形式施加，风荷载均以均布荷载形式施加^[2]。上述所有荷载在模型中施加标准值，并按照上文所述考虑分项系数。混凝土荷载加载时，根据不同截面荷载分布分别施加。混凝土荷载施加全高截面荷载标准值，并根据上文考虑荷载折减系数和分项系数。对结构主要荷载—混凝土全截面荷载标准值的加载如下所示。

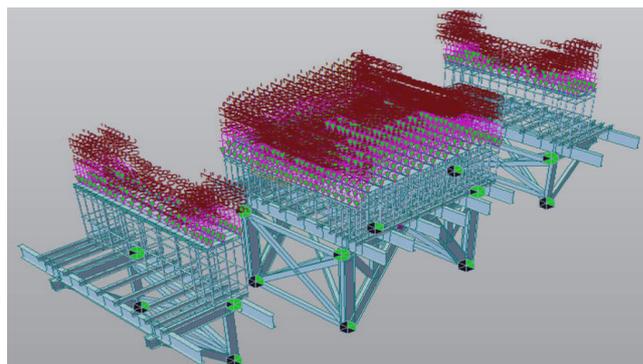


图 6 下弦 0# 块托架模型

托架强度、托架变形经过 Midas Civil 结构有限元软件对托架进行建模分析得出最终结果：组合应力、压杆稳定应力按 180Mpa 控制，剪切应力按 105Mpa 控制，变形按 L/400 控制，计算结果汇总如下表所示。

表 2 结果汇总表

结构名称	杆件规格	组合应力 σ (Mpa)	剪切应力 τ (Mpa)	弯压稳定 (Mpa)	强度是否满足	跨中相对变形 Z(mm)	计算跨度 L(mm)	变形是否满足
下弦 0 号块托架	I10	145.2	41.5	/	是	0.2	900	是
	I20a	79.1	55.5	/	是	0.9	1300	是
	I63a	123.8	48.3	/	是	4.5	4850	是
	2I45a	115.3	68.4	78.0	是	/	/	/
	[]28a	99.4	5.8	65.0	是	/	/	/

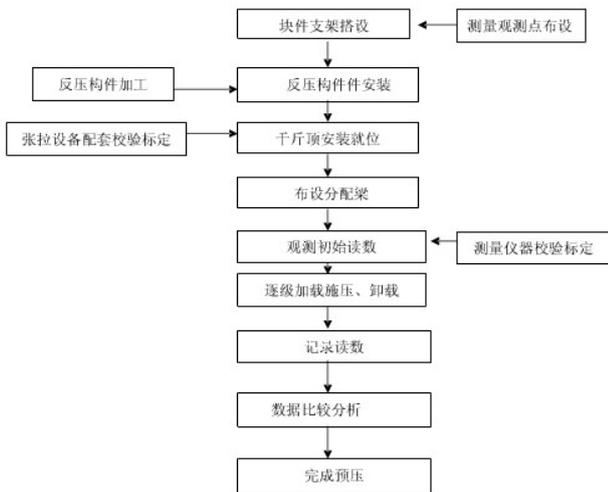
6 支架预压

6.1 支架预压的目的

- (1) 验证支架的可靠性。
- (2) 消除支架的非弹性变形。

(3) 测定支架在不同荷载条件下的实际变形, 为下弦 0# 块处联系梁施工线形控制提供可靠依据。

6.2 支架预压流程



6.3 支架预压原理

前期施工承台过程中预埋反力装置, 托架安装完成后, 在系梁及 0# 块处墩侧托架上设置千斤顶压力架, 同时利用钢绞线连接承台上的反力装置和千斤顶, 然后用千斤顶对托架进行分级模拟施压, 以得到支架变形的各类技术参数, 指导托架施工。

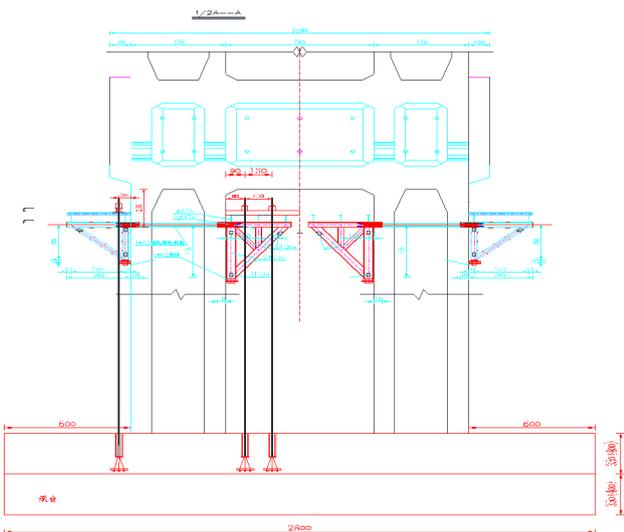


图 7 支架荷载试验示意图

6.4 预压施工、变形监测、预拱度设置

横系梁托架单侧两个支架同时加载, 即 4 个千斤顶

同时加载。纵系梁托架和 0# 块托架, 单墩 4 个托架同时加载, 即 6 个千斤顶同时加载。加载前测量各观测点压载前的标高 H1, 然后分级加载 (荷载等级分别为 0%G、50%G、75%G、100%G、120%G) 根据油顶校验曲线观测每段油表数, 每级荷载施加到位后, 持荷 2h, 荷载施加至 120%G 后, 持荷载 24h。在加载期间, 测出各级加载重量后各沉降控制点标高 H2, 然后卸载, 完毕后再测量一次各点标高 H3。

根据测出的各控制点各阶段的标高, 计算系梁支架系统弹性变化值及非弹性变形值:

$$\text{弹性变形值 } f1 = H3 - H2, \text{ 非弹性变形值 } f2 = H1 - H3$$

各支架施工控制标高由设计标高 H0 及预拱度组成, 其中预拱度值与下列几项有关:

- f1—支架弹性变形值
- f2—支架非弹性变形值
- f3—阶段张拉后的预拱度值
- f4—各悬浇阶段的自重引起的下挠值

最后确定支架模板系统施工控制标高为:

$$H = H0 + f1 + f2 - f3 + f4$$

支架在卸载后重新调整模板标高时, 由于非弹性变形已经消除, 因此控制标高:

$$H = H0 + f1 - f3 + f4$$

7 结语

由于托架采用精轧螺纹钢的方式和墩身进行锚固, 而非常规设计 (墩身上预埋钢板然后焊接牛腿), 大大节约托架安装时间, 牛腿托架设计 20 个, 前后安装用时 5 天, 下弦 0# 块及墩间系梁从 2019 年 8 月 20 日开始施工到 10 月 20 日完成, 前后用时 60 天, 过程中顺利, 下弦 0# 块施工完成证明了此次托架设计合理, 荷载试验方式可行, 值得后期推广。

参考文献

- [1] 于凤伍, 徐博. 三角托架在共和乌江特大桥施工中的应用 [J]. 西部交通科技 (6):75-80.
- [2] 熊峻. 空腹刚构桥三角区形成方式与施工过程分析 [D]. 重庆交通大学.