

基于案例的主塔高横梁无支架施工研究

张满行

(上海浦兴路桥建设工程有限公司 上海 201206)

摘要：随着我国经济社会的发展，大跨径悬索桥、斜拉桥像雨后春笋般建成通车，作为大跨径悬索桥、斜拉桥的关键受力部位主塔的建造高度也是越来越来，主塔的结构断面也是越来越大，作为主塔的关键组成部分的横向系梁断面、跨度也是越来越大，同时主塔横向系梁的高程也是越来越高，给主塔横梁的施工带来很大的困难，同时造成施工成本的大幅增加，本文是基于案例的主塔高横梁无支架施工的研究，该案例主塔横梁施工采用 321 型贝雷片组装成多排贝雷桁架，放置于两侧塔柱的预埋临时钢牛腿上，作为横梁施工的承重体系；该案例为后续同类型的主塔横梁施工提供借鉴。

关键词：主塔高横梁、贝雷桁架、施工分析

1、工程概况

上海浦东**桥横跨**运河，主桥采用两跨独塔自锚式悬索桥，主桥全长 184m，主桥桥宽 32m，双向 4 车道布置，主桥跨径组合为 112m+72m，一跨跨越规划的**运河。主桥共有 3 个桥墩组成，其中主塔桥墩为 8°桥墩（位于河道东侧），9°边墩位于河道东侧，7°边墩位于河道西侧。

主塔结构设计为钢筋混凝土门式结构，由上、下塔柱及上横梁两部分组成，塔高（从承台顶面算起）为 57.06m，桥面以上塔高为 46.989m，主塔塔柱设计为斜塔柱，塔柱内斜率为 6%。主桥上部梁体采用钢结构，正交异性桥面板结构。

主缆共 2 根，空缆线型为悬链线，理论垂跨比为 1：10。每根主缆中含 19 股平行钢丝索股，每股含 91Φ5.0 的镀锌高强钢丝，每根主缆共 1729 丝。本桥在主跨和边跨均设置吊索，吊索采用 109Φ5.0 的镀锌高强钢丝，全桥共 48 根。

2、横梁设计参数

横梁为箱型断面，断面尺寸为 3.5m（宽）×2.5~3.992m（高），跨径 22.979m，梁底弧度半径 R=44985mm；该横梁为无预应力设计，横梁 C50 砼方量为 118m³，如图 1.5-1：

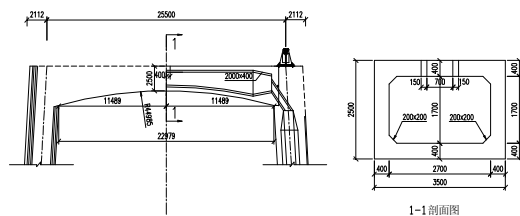


图 1 横梁设计图

3 施工方法

3.1 横梁施工方案的选择

该主塔横梁的常规施工方法为支架法和无支架法，支架法做法：采用大口径螺旋管在地面组装升高，支架顶采用贝雷主梁，在横梁施工时各项荷载通过大口径螺旋管直接作用在地面基础上；支架法优点：横梁荷载通过支架传递给地面，塔柱基本无偏心受压及扭矩；支架法缺点：支架搭设高度较高，搭设和拆除安全风险大，稳定性差及费用较高。无支架法基本做法：在两侧塔柱内侧适当位置预埋临时工字钢牛腿，临时钢牛腿上安装 4 组 3 排上下加强贝雷桁架+1 组双排上下加强贝雷桁架作为承重梁，在贝雷承重梁上搭设支架和模板进行横梁施工，优点：费用较低、搭设和拆除方便，缺点：两侧塔柱偏心受压，产生扭矩，同时需配置大型汽车吊对贝雷桁架进行分组整体安装和拆除，及两侧塔柱之间需设施临时横向支撑。

综合考虑以上的两种方法，同时考虑到两侧塔柱之间为已运营的地铁 2 号线，根据地铁运维监控部门的要求，在地铁盾构保护区内不宜增加过大的集中荷载，所以本主塔横梁施工拟选用无支架法施工。

3.2 塔柱上预埋临时钢牛腿

拟采用在两侧塔柱上预埋临时工字钢牛腿和贝雷桁架的组合支撑体系。所以该横梁在主塔适当高程处预埋 63b 工字钢，每侧塔柱各 5 根（见图 2），主要承受主塔横梁施工时的荷载；由于主塔 45.6m 高程处主筋间距为 0.15m，主筋净距为 0.118m，所以在插入工字钢位置需适当调整主筋间距；箍筋遇工字钢牛腿截断位置焊接于工字钢牛腿上，并满足单面焊 10d，双面焊 5d 的要求；在工字钢牛腿上下各 1 米范围内，调整箍筋间距由@150 调整为@100。

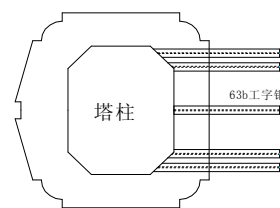


图 2

3.3、安装贝雷桁架及搭设支架体系

利用两侧塔柱的牛腿支撑，采用 200 吨汽车吊，把地面组装好的 4 组 3 排加强型和 1 组双排加强型贝雷桁架利用 1 台 200 吨汽车吊进行提升，安放在主塔两侧钢牛腿上，安装就位后的贝雷桁架两头固定，并与后续安装的贝雷桁架采用连接片连接，安装完成的贝雷桁架作为横梁施工的承重体系，在其上铺设分配工字钢及搭设扣件式钢管脚手架体系（如图 3、4）。

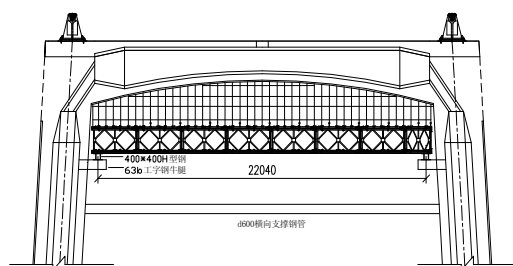


图 3 贝雷桁架纵向布置图

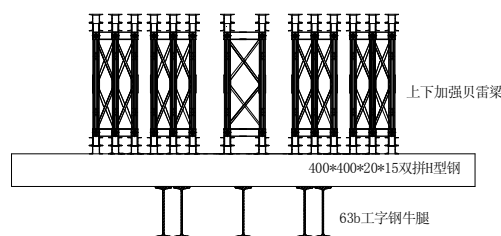


图 4 工字钢牛腿及贝雷桁架横向布置图

图 4

3.4 临时钢牛腿及贝雷桁架验算

3.4.1 塔柱上临时钢牛腿验算

上部荷载

(1) 横梁钢筋混凝土荷载 $118 \times 2.6 \times 10 = 3068\text{KN}$ (整根横梁荷载, 在实际浇筑时分两次浇筑)。

(2) 钢管脚手架及模板荷载, 计 $30 \times 10 = 300\text{KN}$

(3) 贝雷桁架荷载, 贝雷片单片重量 270Kg , 加强弦杆 $80 \times 2 = 160\text{Kg}$ /根, 加上支撑架连接件等不超过 460Kg /片, 贝雷桁架荷载: $0.46 \times 8 \times 14 \times 10 = 515\text{KN}$

(4) 施工荷载: 2KN/m^2

(5) 风荷载: 2.19KN/m^2

上部总荷载为: $P = 1.2 \sum P_{\text{静}} + 1.4 \sum P_{\text{活}}$

$= 1.2 \times (3068 + 300 + 515) + 1.4 \times (2 + 2.19) \times 3.5 \times 23$

$= 5131.8\text{KN}$

按均布荷载 $\gamma = P/A = 5131.8 / (3.5 \times 23) = 63.7 (\text{KN/m}^2)$

线荷载 $q = P/L = 5131.8 / 23 = 223.1 (\text{KN/m})$

单侧主塔位置钢牛腿所承受的竖向荷载为:

$5131.8 / 2 = 2565.9\text{KN}$, 见下图 5

每只 63b 工字钢牛腿所承受的剪力为: $2565.9 / 5 = 513.18\text{KN}$

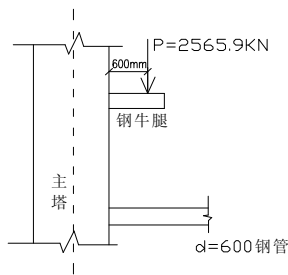


图 5

临时钢牛腿受力验算

1)、强度验算

$\sigma = M_{\text{max}} / W = P \times L / W = 513.18 \times 0.6 \times 10^3 / 1 \times 3164 \times 10^{-6} = 97.32\text{Mpa} < [140]\text{Mpa}$

满足要求

2)、最大挠度

$y_{\text{max}} = PL^3 / 3EI = 513.18 \times 10^3 \times 0.6^3 / 3 \times 210 \times 10^9 \times 98080 \times 10^{-8} = 1.8 \times 10^{-4}\text{m} < [15 \times 10^{-4}\text{m}]$

变形满足要求。

3)、剪切强度

$\tau = Q * S_{\text{max}} / I_z * d = 513.8 \times 10^3 / 53.5 \times 10^{-2} \times 0.015 = 64.02\text{Mpa} < [85]\text{Mpa}$

为保证绝对安全, 把钢牛腿横向采用 20a 工字钢焊接成整体; 同时混凝土浇筑时分次进行。

3.4.2 贝雷桁架荷载验算

上部荷载

(1) 横梁钢筋混凝土荷载: $118 \times 2.6 \times 10 = 3068\text{KN}$ (整根横梁荷载, 在实际浇筑时分两次浇筑)。

(2) 第一次浇筑时横梁钢筋混凝土荷载: $79.2 \times 2.6 \times 10 = 2059.2\text{KN}$

(2) 钢管脚手架及模板荷载, 计 $30 \times 10 = 300\text{KN}$

(3) 施工荷载: 2KN/m^2

(4) 风荷载: 2.19KN/m^2

注: 因主塔自身刚度较大, 水平风荷载由塔身钢筋混凝土承受, 故水平方向受力的垂直力计算中可不予考虑。

上部总荷载为: $P = 1.2 \sum P_{\text{静}} + 1.4 \sum P_{\text{活}}$

$= 1.2 \times (3068 + 300) + 1.4 \times (2 + 2.19) \times 3.5 \times 23$

$= 4513.8\text{KN}$

按均布荷载 $\gamma = P/A = 4513.8 / (3.5 \times 23) = 56.1 (\text{KN/m}^2)$

线荷载 $q = P/L = 4513.8 / 23 = 196.3 (\text{KN/m})$

说明: 主塔 48.9m 处贝雷片桁架实际跨径约为 22.04m, 偏于安全保守计算取 22.5m 跨径计算, 如下图 6。

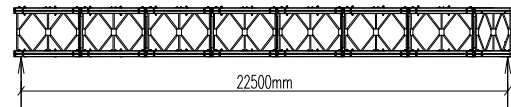


图 6 贝雷桁架计算跨径

由贝雷桁架桁架内力表查得^[1]:

表 1 贝雷桁架桁架几何特性表

几何特性		W(cm ³)	J(cm ⁴)
结构构造	单排单层	3578.5	250497.2
	加强	7699.1	577434.4
双排单层	不加强	7157.1	500994.4
	加强	15398.3	1154868.8
三排单层	不加强	10735.6	751491.6
	加强	23097.4	1732303.2
双排双层	不加强	14817.9	2148588.8
	加强	30641.7	4596255.2
三排双层	不加强	22226.8	3222883.2
	加强	45962.6	6894390

表 2 贝雷桁架桁架容许应力表

桥型	不加强桥梁					加强桥梁				
	单排	双排	三排	双排	三排	单排	双排	三排	双排	三排
容许内力	单排	单排	单排	双排	双排	单排	单排	单排	双排	双排
弯矩 (kN·m)	788.2	1576.4	2246.4	3265.4	4653.2	1687.5	3375.0	4809.4	6750.0	9618.8
剪力 (kN)	245.2	490.5	698.9	490.5	698.9	245.2	490.5	698.9	490.5	698.9

由于主塔为内斜塔柱, 在主塔 48.9m 高处, 贝雷桁架与主塔临时钢牛腿为简支连接, 所以对于贝雷桁架的受力分析计算可简化为单跨简支形式:

3.4.2.1 平均荷载下贝雷桁架的计算:

1)、强度验算

贝雷桁架最大跨径为 22.5m, 其跨中最大弯矩 $M_{\text{max}} = qL^2 / 8 = 196.3 \times 22.5^2 / 8 = 12422.1\text{KN} \cdot \text{m}$, 弯矩示意图见图 7

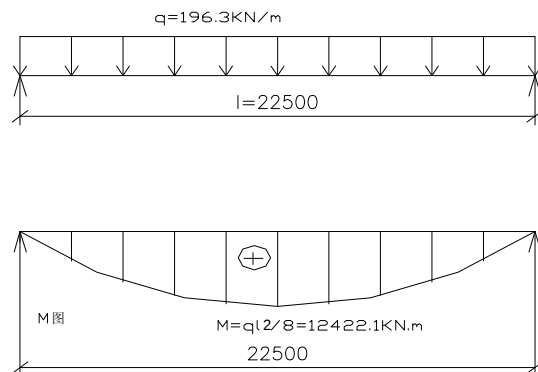


图 7 弯矩示意图

其支点处最大剪力 $Q_{\text{max}} = 196.3 \times 22.5 / 2 = 2208.4\text{KN}$, 支座剪力示意图见图 8

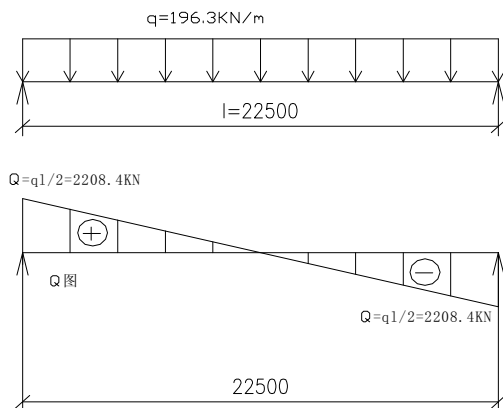


图8 支座处剪力示意图

本桁架为14排加强贝雷桁架组合而成, 可视为14个“加强单排单层”侧容许内力如下:

容许弯矩 (kN·m) = $1687.5 \times 14 = 23625.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$

容许剪力 (kN) = $245.2 \times 14 = 3432.8 \text{ kN}$

贝雷桁架跨中最大弯距 $M_{\max} = 12422.1 \text{ kN} \cdot \text{m} < \text{容许弯矩 (kN} \cdot \text{m)}$
= 23625.0×0.8 (不均匀系数) = $18900.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$

贝雷桁架其支点最大剪力 $Q_{\max} = 2208.4 \text{ kN} < \text{容许剪力 (kN)}$
= $3432.8 \text{ kN} \times 0.8$ (不均匀系数) = 2746.3 kN

可满足强度规范要求!

2)、刚度验算

线荷载 $q = P/L = 4513.8/23 = 196.3 \text{ (kN/m)}$

$E = 210 \text{ GPa}$

$I = 577434.4 \times 14 = 8084081.6 \text{ cm}^4$

跨中挠度: $f_{\max} = (5ql^4) / (384EI_0) = (5 \times 196.3 \times 1000 \times 22.5^4) / (384 \times 210 \times 10^9 \times 8084081.6 \times 10^{-8}) = 0.049 \text{ m} = 39 \text{ mm}$

相对挠度 $0.039/22.5 = 1/577 < 1/400$, 满足要求; 实际施工中根据观测, 跨中最大挠度为29mm, 与理论值接近 (实际施工中顶板后浇筑, 荷载减少)

可满足刚度规范要求!

3.4.2.2 单根贝雷桁架承受最大荷载下贝雷桁架的计算, 横梁腹板作用在3排单层上下加强贝雷桁架上 (集中荷载作用示意图9):

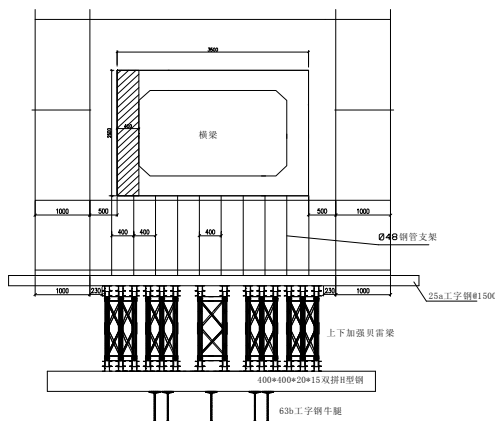


图9 集中荷载作用示意图

(1) 横梁钢筋混凝土荷载 $q = 3.0 \times 0.4 \times 1 \times 26 = 31.2 \text{ kN/m}$

(2) 模板支架及模板荷载 ($30 \text{ t} \times 10/3.5$) $\times 0.4/22.5 = 1.52 \text{ kN/m}$,

取 $q_m = 2.0 \text{ kN/m}$

(3) 施工荷载: $q_s = 2 \text{ kN/m}^2 \times 0.4 = 0.8 \text{ kN/m}$

(4) 风荷载: $\omega_1 = 2.19 \text{ kN/m}^2 \times 0.4 = 0.88 \text{ kN/m}$

合计线性荷载 $q = 1.2 \times (31.2 + 2.0) + 1.4 \times (0.8 + 0.88) = 42.2 \text{ kN/m}$

1)、强度验算

贝雷桁架最大跨径为22.5m, 其跨中最大弯距 $M_{\max} = qL^2/8 = 42.2 \times 22.5^2/8 = 2670.5 \text{ kN} \cdot \text{m} < 1687.5 \text{ kN} \cdot \text{m} \times 3 \times 0.8 = 4050 \text{ kN} \cdot \text{m}$

其支点处最大剪力 $Q_{\max} = 42.2 \times 22.5/2 = 474.8 \text{ kN} < 245.2 \text{ kN} \times 3 \times 0.8 = 588.5 \text{ kN}$

可满足强度规范要求!

2)、刚度验算

线荷载 $q = 1.2 \times (31.2 + 2.0) + 1.4 \times (0.8 + 0.88) = 42.2 \text{ kN/m}$

$E = 210 \text{ GPa}$

$I = 577434.4 \times 3 = 1732303.2 \text{ cm}^4$

跨中挠度: $f_{\max} = (5ql^4) / (384EI_0) = (5 \times 42.2 \times 1000 \times 22.5^4) / (384 \times 210 \times 10^9 \times 1732303.2 \times 10^{-8}) = 0.0387 \text{ m} = 39 \text{ mm}$,

相对挠度 $0.039/22.5 = 1/577 < 1/400$, 满足要求。

可满足刚度规范要求!

3.5、贝雷桁架预压

为确保主塔高横梁现浇施工的安全, 必须对贝雷桁架进行预压试验, 检验贝雷桁架的承载能力和挠度值, 预压加载按照横梁现浇施工的实际工况进行, 预压最大荷载按照设计荷载的120%进行控制; 为确保预压的绝对安全, 贝雷桁架按照实际的设计及工况在地面模拟进行, 通过超载预压, 得出贝雷桁架的承载能力和挠度值满足要求。

3.6、横梁贝雷桁架拆除

在塔顶和横梁上装饰罩施工完成后, 同时横梁混凝土强度达到设计强度的100%后, 对横梁支架进行拆除, 拆除时首先拆除扣件式脚手架及工字钢分布梁, 在拆除过程中利用塔吊进行拆除材料的垂直运输; 在贝雷桁架拆除时同样利用1台200吨汽车吊先行吊出最外侧一组贝雷桁架, 在钢丝绳捆扎完成后, 汽车吊起吊钢丝绳进行预紧, 需吊除的单组贝雷桁架两头设缆风绳对贝雷桁架进行临时固定, 同时利用千斤顶把贝雷桁架往横梁外侧缓慢顶出, 贝雷桁架吊点顶至与汽车吊吊钩垂直时, 启动吊钩缓慢吊出, 在起吊的瞬间利用缆风绳控制吊出的方向贝雷桁架吊出需对称进行; 如此反复, 直至贝雷桁架吊除完毕。

3.7 结论

通过该主塔高横梁无落地支架的施工实例, 顺利完成了该工程主塔及高横梁的施工, 通过监控及分析, 在施工过程中贝雷桁架的变形及应力均在相关规范范围内; 通过该案例再次验证了组合贝雷桁架的组装方便快捷, 安装方便, 节约工期等优点; 通过贝雷桁架各种形式的组合来适用不同的跨径和不同的荷载, 同时贝雷桁架又可以周转使用, 节约了成本, 为后续同类工程的施工提供借鉴。

参考文献:

- [1]交通部文件交计发[1998]23号《装配式公路钢桥使用手册》
- [2]《路桥施工计算手册》周水兴等编著
- [3]广州军区工程科研设计所 黄绍金 刘陌生 编著《装配式公路钢桥多用途使用手册》
- [4]彭锋 贝雷架在高支模的应用 中外建筑 发表时间2018年9月1日