

上海轨道交通拦路港部分斜拉桥设计分析

李国鹏

上海市隧道工程轨道交通设计研究院 上海 200235

摘要: 轨道交通领域拦路港部分斜拉桥采用塔梁固结体系, 主要由主梁、索塔和斜拉索三大部分组成, 主梁采用预应力混凝土结构, 施工工艺为悬臂浇筑法。部分斜拉桥以主梁受力为主, 拉索、索塔为辅, 斜拉索的多点弹性支承作用, 可以提高结构的整体竖向刚度, 有利于增强行车稳定性和安全性, 并且可以有效控制主梁工后徐变值。本文介绍了苏申外港线拦路港部分斜拉桥的设计要点和设计思路, 可供其他同类工程的设计借鉴和参考。

关键词: 轨道交通; 部分斜拉桥; 塔梁固结体系; 悬臂浇筑法; 多点弹性支承

Design Analysis of Cable-stayed Bridge in Shanghai Rail Transit Port

Guopeng Li

Shanghai Tunnel Engineering Rail Transit Design and Research Institute Shanghai, 200235

Abstract: The cable-stayed bridge in the rail transit field adopts tower beam consolidation system, mainly composed of main beam, cable tower and cable. The main beam adopts prestressed concrete structure, and the construction technology is cantilever pouring method. Some of the cable-stayed bridge is mainly stressed by the girder, supplemented by cable and tower. The multi-point elastic support of the cable can improve the overall vertical stiffness of the structure, is conducive to enhance the stability and safety, and can effectively control the xu value of the main beam. This paper introduces the design points and design ideas of the cable-stayed bridge, which can be used for other similar projects.

Keywords: Rail transit; Partial cable-stayed bridge; Tower beam consolidation system; Cantilever pouring method; Multi-point elastic support

一、工程概况及设计条件

拦路港部分斜拉桥^[1]位于上海市轨道交通17号线西延伸工程青浦区境内, 跨越苏申外港线拦路港, 线路中心线与拦路港航道交角 61.9° , 高架区间自西向东主要沿既有G50沪渝高速南侧走行, 跨越拦路港后转向北跨越沪渝高速, 向东北方向走行, 接入东方绿舟站。拦路港部分斜拉桥跨径布置为(100+180+100)m, 桥面宽度为12m。北侧为G50沪渝高速跨河桥, 老桥跨径为(65+102+65)m。桥位平面布置见图1。

该工程拟建场地位于上海市青浦区, 工程沿线主要为农田、林地、沟塘、河流和村落等。拟建场地水系发育, 河网密布, 其中拦路港水面高程为+3.73m, 水面宽度达119m, 为市级航道(III级航道)。拟建工程所在的上海地块自新生代以来开始缓慢下沉, 自全新世以来无活动迹象, 工程所在场区区域地质构造较稳定。据勘探

揭露, 拟建场地115m深度范围内土层由第四系全新统至中更新统沉积地层组成。根据本场地所揭露的地基土层的分布情况及其工程性质, 结合建筑物荷载及结构特点, 选择第⑩层砂质粉土、⑪层粉细砂作为桥梁桩基持力层。地震基本烈度为7度, 地震动峰值加速度值为0.10g, 桥梁抗震设防类别为特殊设防类。

上海地区属于亚热带海洋性季风气候区, 具有温暖潮湿多雨、季风明显、四季分明、冬夏季长、春秋季节短等特点, 年平均气温 15.4°C , 最热为7月份, 月平均气温为 27.8°C , 极端最高气温达 40.6°C ; 最冷为1月份, 月平均气温 3°C , 极端最低气温为 -12.1°C 。

二、工程主要技术标准

线路标准: 双线地铁、线间距7.4m;

列车活载: 地铁A型车, 6节编组;

设计最高行车速度: 100 km/h;

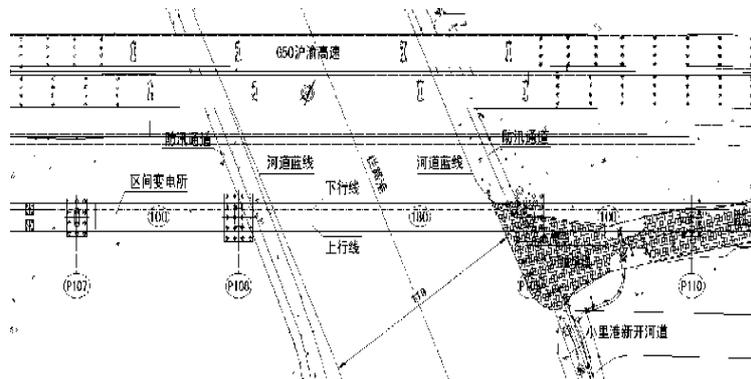


图1 桥位平面布置图

桥梁设计使用年限: 主体工程为100年;

桥梁设计安全等级: 一级;

抗震设防标准: 地震基本烈度7度, 地震动峰值加速度0.1g, 抗震设防类别为特殊设防类;

设计洪水频率: 1/300;

苏申外港线通航标准: 三级航道, 通航净空101×7.5m;

苏申外港线河道: 现状河口蓝线宽119m, 最高通航水位+3.73, 最低通航水位+2.1

三、桥型方案比选

上海市轨道交通17号线西延伸工程需跨越拦路港,

根据航道通航条件影响评价报告, 桥梁需采用一跨过河布置, 承台立柱全部布设于河道蓝线以外, 为了保证拦路港的通航要求, 另避免改移防汛通道, 增加永久征地, 对连续梁-钢管混凝土拱桥方案、连续梁方案、混凝土部分斜拉桥方案进行比选。

竖向刚度是轨道交通桥梁设计控制的重要指标, 连续梁-钢管混凝土拱桥具有承载力高、竖向刚度大等特点, 但钢管混凝土内核心混凝土收缩徐变特性, 对拱肋挠度、主梁挠度、钢管应力等均有较明显的影响。施工方法通常采用先梁后拱的施工顺序, 同时拱肋安装时需要大吨位驳船配合, 施工阶段工期较长, 造价较高。

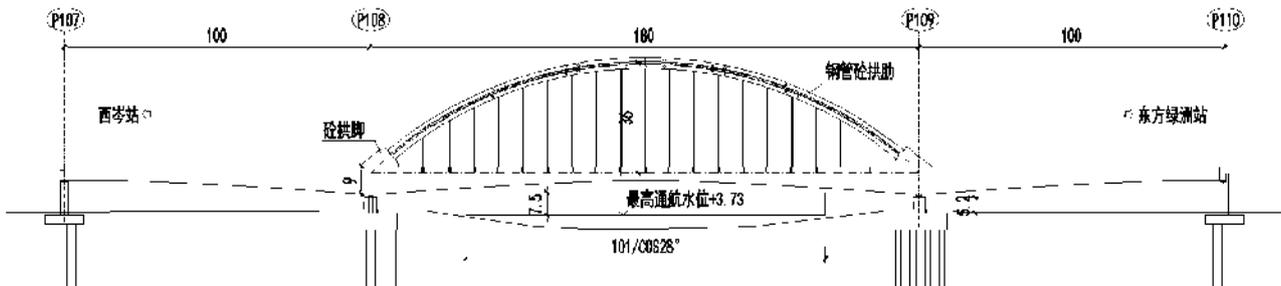


图2 连续梁-钢管混凝土拱桥方案立面布置图

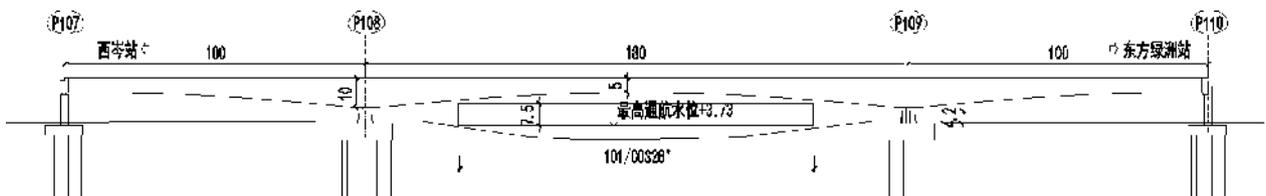


图3 连续梁方案立面布置图

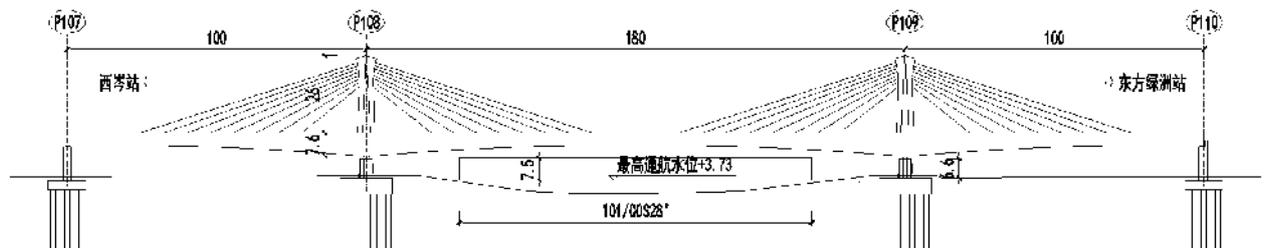


图4 混凝土部分斜拉桥方案立面布置图

连续梁是常用的桥型之一，而部分斜拉桥受力性能介于梁式桥和斜拉桥之间，结构整体竖向刚度大，在大跨度桥梁比选中具有很强的竞争力，根据本工程实例，对等跨径部分斜拉桥和连续梁桥两种桥型进行对比分析。桥型方案刚度指标对比见表1。

表1 桥型方案刚度指标对比表

参数	部分斜拉桥	连续梁
静活载跨中挠度/mm	107.9	138.8
中跨跨中挠跨比	L/1668	L/1296
梁端转角/rad	1.2‰	1.3‰
工后徐变/mm	30.2	224.5

由表1分析可知：部分斜拉桥方案，中跨跨中在静活载下位移为107.9mm，对应的跨中挠跨比为1/1668；连续梁方案，中跨跨中在静活载下位移为138.8mm，对应的跨中挠跨比为1/1296。设置斜拉索后在列车静活载作用下主梁刚度提高28.6%，对于梁端转角影响有限。

塔梁固结体系的部分斜拉桥实质为对连续梁用斜拉索进行体外加劲，兼顾连续梁和斜拉桥的受力特点，在节段施工过程中梁体自重由梁部和斜拉索共同承担，成桥之后二期恒载及活载由梁体、拉索、索塔按照刚度重新分布，运营之后斜拉索对主梁的多点弹性支承作用，使主梁弯矩值大大减低，从而起到降低梁高作用。

由于轨道交通多采用无砟轨道，而轨道的铺设多按照理论线形进行铺设，工后徐变值过大势必影响后期铺轨的平顺性、客车乘坐舒适度、平稳性要求，部分斜拉桥方案，中跨跨中工后徐变值为30.2mm，徐变变形量为计算跨度的1/5960，连续梁方案，中跨跨中工后徐变值为138.8mm，徐变变形量为计算跨度的1/1297，设置斜拉索后主梁工后徐变值降低至22%，由于斜拉索的多点弹性支承作用，对主梁工后徐变下挠可以得到很好的控制。

上述三个桥型方案均能满足拦路港通航要求，连续梁-钢管混凝土拱桥方案技术成熟，采用先梁后拱的施工顺序，施工阶段工期较长，造价较高，但拱肋钢构件及吊杆需定时维护，运营阶段维护较为困难；连续梁方案技术成熟可靠，与部分斜拉桥对比，竖向刚度较小，同时不能很好的控制工后徐变，该方案不成立；混凝土斜拉桥方案立面造型好，景观效果更佳，运营阶段维护简单，总工程造价低。综合各项因素考虑，采用混凝土部分斜拉桥方案。

四、主桥设计

拦路港桥平面位于直线-缓和曲线上，与苏申外港线航道斜交28.77°，线间距7.4m，轨顶设计标高20.4m

(平坡)。主桥采用塔梁固结体系^[2]的单索面部分斜拉桥，跨径布置为100m+180m+100m，边中跨径比0.55，主桥长380m。索塔结构高度26.0m。每个桥塔设置8对斜拉索，每对斜拉索为双股，索塔和斜拉索布置在双线之间。

1. 主梁结构设计

主梁采用预应力混凝土单箱双室直腹板箱梁，按“不允许出现拉应力构件”^[3]进行设计。中支点梁高7.6m，中跨跨中及边支点梁高4.2m，梁底按二次抛物线变化。箱梁顶板宽12.0m，顶板厚0.3m；

箱梁底板宽8.5m，底板厚0.32m~1.0m；边腹板厚0.35m~0.4m；中腹板厚0.35m~0.5m；梁端设1.6m端横梁，中支点处设6.5m宽中横梁。箱梁跨中断面见图5，箱梁中支点断面见图6。

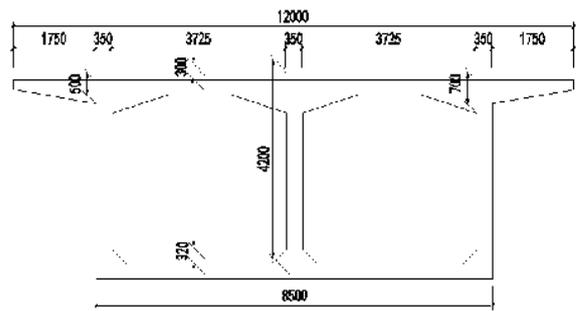


图5 箱梁跨中断面

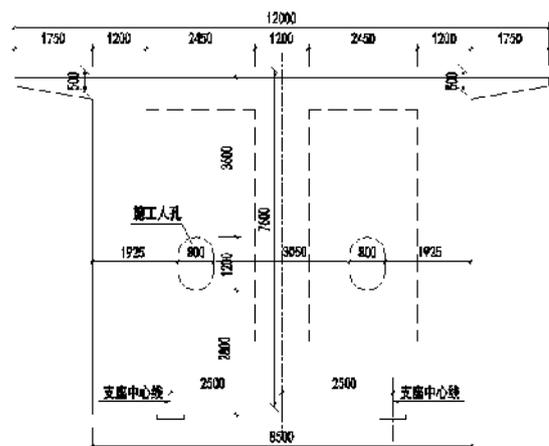


图6 箱梁中支点断面

悬臂梁沿梁长的分段取决于结构体系、边中跨比、主梁无索区长度、拉索间距等条件，并根据主梁的截面变化情况和挂篮设备的总重来确定悬臂浇筑的节段长度，权衡利弊予以综合考虑。

拦路港部分斜拉桥纵向节段共划分为22个，其中0号块长度17 m，合龙段按2 m设计。悬臂浇筑节段20个，按(1×3.5+17×4+2×4.5) m划分。

2. 索塔设计

索塔采用独柱式桥塔形式, 桥面以上塔高26.0m, 桥面以上塔的高跨比为1/6.9。为适应分丝管索鞍, 塔柱采用矩形实体截面, 索塔底截面顺桥向宽6.0m、横桥向宽2.8m, 塔上斜拉索的理论中心距为1.0m。塔身上设有鞍座, 鞍座预埋管采用分丝管, 弯曲半径3.0m~5.5m。

3. 斜拉索

斜拉索采用扇形布置, 索面设置为单索面(双股), 斜拉索采用单丝涂覆环氧涂层钢绞线拉索体系, 外套HDPE, 斜拉索在塔端采用分丝管索鞍贯通, 塔上中心距1.0m, 梁上中心距8.0m, 全桥共设 2×8 对斜拉索, 每对斜拉索有两根, 横向间距1.2m。斜拉索规格为43- $\phi^{15.2}$, 斜拉索与水平线的夹角为 $17.95^\circ \sim 38.96^\circ$, 斜拉索两端锚固在箱室内, 在中腹板两侧设有锚固齿块, 斜拉索在梁端采用拉索群锚固体系, 张拉端设置在梁上, 施工时需预埋 $\phi 351 \times 10\text{mm}$ 钢管。

4. 索鞍

索鞍由锚垫板、加强筋、导向钢管等构件拼装焊接而成, 导向钢管承受由于单根钢绞线张拉后造成的相互挤压, 索鞍很好地起到了分散、均匀传递荷载作用, 索鞍下部不会形成不利的应力集中, 能有效改善塔内应力分布。索鞍横断面见图7。

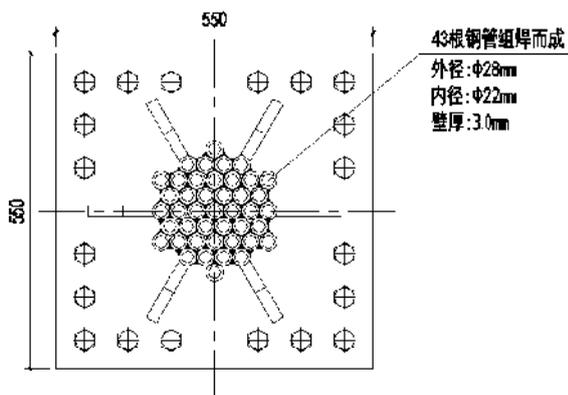


图7 索鞍横断面

5. 主墩及基础设计

该工程位于河道范围外, 主墩墩高6.6 m, 采用独柱矩形墩柱, 截面尺寸顺桥向为4.0~5.0m, 横桥向为8.5m, 由于墩高矮, 采用分片、凹槽的设计手法削弱桥墩的厚度观感, 采用折面的设计手法弱化宽度方向的单调性, 横桥向外设2.2m渐变切角, 顺桥向设置0.5m渐变切角。

主墩承台顺桥向 \times 横桥向 \times 厚度为 $17.4\text{m} \times 22.2\text{m} \times 5.5\text{m}$ 。桩基础采用20根 $\phi 1.8\text{m}$ 钻孔灌注桩, 行列式布置, 桩中心距4.8m。

五、耐久性设计

根据该工程区域的岩土工程详勘报告, 拟建场区

及附近未发现环境污染源, 拟建场区地下水对混凝土具微腐蚀性。根据《铁路混凝土结构耐久性设计规范TB 10005-2010》, 混凝土结构的环境类别为碳化环境, 环境作用等级(主梁、索塔为T2, 桥墩为T3, 桩基、承台为T1), 所处环境无化学侵蚀。主梁采用C60混凝土, 索塔、桥墩采用C50混凝土, 桩基采用C35水下混凝土, 承台采用C40混凝土。

六、结构计算分析

采用Midas Civil软件建立空间有限元模型, 主梁、索塔、桥墩采用梁单元模拟, 斜拉索采用桁架单元模拟, 支座采用弹性支承模拟, 整体结构共计635个节点, 612个梁单元, 64个桁架单元。设计荷载包括恒载、列车活载、温度变化、风载、列车制动力、摇摆力等。主桥空间有限元模型见图8。

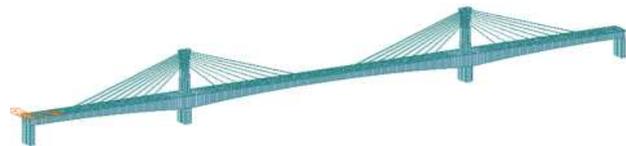


图8 主桥空间有限元模型

1. 主梁位移计算

轨道交通桥梁的荷载、刚度、变形等指标与公路桥梁有所不同, 竖向刚度是设计控制的重要指标, 通过调整结构跨度、主梁梁高、桥塔高度等参数, 控制桥梁的整体刚度, 满足轨道交通列车通行的要求, 梁体竖向挠度主要计算结果见表2。

表2 梁体竖向挠度汇总表

荷载	部位	挠度 (mm)	挠跨比	限值
A型车	中跨跨中	107.9	L/1668	L/600

主梁在静活载作用下最大梁端转角为 1.2‰ rad, 小于规范限值 3‰ rad; 竖向位移107.9mm, 小于规范限值L/600。

考虑后期铺轨的平顺性, 在铺轨前、中跨合龙后通过二次调整斜拉索索力, 调整主梁内力和变形。工后徐变值为二期恒载加载后的残余徐变竖向变形值, 边跨最大徐变变形值为2.5 mm, 中跨最大徐变变形值为30.2 mm, 均控制在规范限值L/5000^[4]之内, 梁部后期的收缩徐变得到了很好的控制。

2. 主梁受力计算

拦路港部分斜拉桥主梁纵向节段共划分22个, 斜拉索安装8个阶段, 设计时需要对接连续梁各个施工阶段进行准确模拟, 经计算施工阶段主梁最大正应力19.1MPa, 最小正应力-0.9MPa, 运营阶段计算结果见表3。

表3 运营阶段主梁受力汇总表

计算指标	运营阶段	
	主力工况	主+附工况
上缘最大正应力/MPa	14.20	20.00
上缘最小正应力/MPa	4.00	0.60
下缘最大正应力/MPa	12.40	14.10
下缘最小正应力/MPa	3.80	1.40
最大主拉应力/MPa	-0.60	-0.70
最大主压应力/MPa	14.60	20.00

由表3可知, 主力工况^[5]下主梁最大压应力14.2MPa, 最小压应力4.0 MPa, 最大主拉应力-0.6MPa; 主+附工况下主梁最大压应力20.0MPa, 最小压应力0.6 MPa, 最大主拉应力-0.7MPa; 计算结果表明, 施工阶段和运营阶段主梁结构的正应力结果均满足规范要求。

3. 索塔、桥墩受力计算

索塔、桥墩为钢筋混凝土构件, 按照容许应力法计算, 主要计算结果见表4。

表4 索塔、桥墩受力计算结果

计算指标	索塔	桥墩
混凝土最大正应力/MPa	6.8	4.4
钢筋拉应力/MPa	25.1	10.2
裂缝宽度/mm	0.01	0.00

由表4结果可知, 桥塔和桥墩各阶段均处于受压状态, 应力及裂缝计算结果均满足规范要求。

4. 斜拉索受力计算

在最不利荷载组合作用下, 斜拉索最小安全系数为2.67, 疲劳应力幅为51.9 MPa, 为中跨边索, 均满足规范要求, 计算结果见表5。

表5 斜拉索受力计算结果

计算指标	主力	主+附
拉索最大应力/MPa	694.2	738.0
强度安全系数	2.67	2.52
应力幅/MPa	51.9	

七、结语

本文分析介绍了上海轨道交通拦路港部分斜拉桥的设计要点和设计思路。针对轨道交通领域大跨度桥梁, 对塔梁固结体系的部分斜拉桥进行分析, 结论如下:

(1) 部分斜拉桥受力性能介于梁式桥和斜拉桥之间, 以主梁受力为主, 拉索、索塔为辅。

(2) 斜拉索多点弹性支承作用, 可以提高结构的整体竖向刚度, 有利于增强行车稳定性和安全性。

(3) 通过部分斜拉桥与连续梁桥徐变分析, 设置斜拉索后, 可以有效控制主梁工后徐变值。

(4) 文中提及的结论与设计要点可供今后类似工程设计有所参考和帮助。

参考文献:

- [1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [2] 铁路斜拉桥设计规范: TB 10095-2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.
- [3] 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092-2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [4] 城市轨道交通桥梁设计规范: GB/T 51234-2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [5] 铁路桥涵设计规范: TB 10002-2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.