

世界首座双层交通预应力斜拉桥—澳凼三桥

张强^{1,2} 卫军¹ 文武松³

(1. 华中科技大学土木工程学院 武汉 430074 2. 中铁大桥勘设院 武汉 430050

3. 中铁大桥局集团有限公司 武汉 430050)

摘要: 澳凼三桥是世界上首座双层交通预应力斜拉桥, 上层为双向6车道, 下层近期为双向4车道, 远期为双线轻轨。

主桥主跨为180m竖琴式稀索斜拉桥, “m”形主塔, 引桥为60m等高预应力混凝土箱梁。

关键词: 部分斜拉桥 预应力混凝土结构 箱形梁 双层交通 桥梁设计

1. 建桥条件

澳门由澳门半岛、凼仔岛和路环岛所组成。

澳门半岛与凼仔岛之间现有嘉乐比、友谊两座大桥, 在交通高峰时期, 这两座桥已有阻塞现象, 澳凼三桥的建成将使两岛之间交通更为顺畅。澳门现仅有2条主要通道与大陆相连: 北端的关闸与莲花大桥, 莲花大桥连接京珠高速公路和105国道。它们满足不了澳门经济发展的需要, 制约着澳门经济的发展。国家准备投资修建轨道交通系统将珠江三角洲主要城市连接起来, 并考虑衔接港澳。轨道交通将通过澳凼三桥连接澳门与深圳, 开通澳门与大陆的第3条通道。

澳凼三桥位于雷达水道西侧紧靠十字形航道的十字道口, 东侧距嘉乐比大桥1200 m, 十字道口疏浚后, 桥位处航道中心将南移250 m, 桥中线与航道斜交约5°, 要求本桥主通航孔跨径大于150m。根据澳门《海港水文规范》, 本桥通航净空为28m, 设计高潮位为300年一遇+4.85 m。

在区域构造上, 桥址区位于珠江三角洲断陷区。50年超越概率10%水准下, 地震动峰值加速度为0.10g, 场地反应谱特征周期0.35 s, 场区基本地震烈度为7度。

桥位区的地层由第四系冲淤积覆盖层及燕山期侵入的花岗体构成。第四系覆盖层厚19.1~59m, 下伏花岗岩, 岩面高程-22.3~-61.3 m, 由

北向南渐低。

2. 技术标准

(1) 设计车道: 上层车道为双向6车道, 下层近期为双向4车道, 远期为双线轻轨。在大于8级风的条件下, 上层交通及下层轻轨交通关闭, 下层通行2车道。

(2) 行车速度: 轻轨70 km/h。

(3) 设计荷载: 汽车荷载按澳门规范执行; 轻轨列车共4节, 节长16米, 节重20t。

(4) 通航水位: +1.71 m (M·S·L)。

(5) 通航航道和净空: 桥梁主跨承台顶部的保护梁间的净距为150m, 高潮时竖向净空为28m。

(6) 设计风速: $V_{10} = 45.1 \text{ m/s}$ 。

(7) 地震: 按7度地震设防。

3. 总体设计

3.1 总体布置

根据通航净空及澳门侧立交净空5.2 m的控制条件, 澳凼三桥布置为: 主桥位于 $R = 3500 \text{ m}$ 的竖曲线上, 两主塔处的路冠高程分别为35.809, 36.028 m, 满足通航净高28m的要求。南侧以5%下坡一段后, 平坡延至凼仔岛路堤, 北侧以5%下坡, 一段平坡, 延至澳凼半岛。各变坡点均设凹或凸形曲线。澳门侧以7%坡后与主桥相连, 见图1。

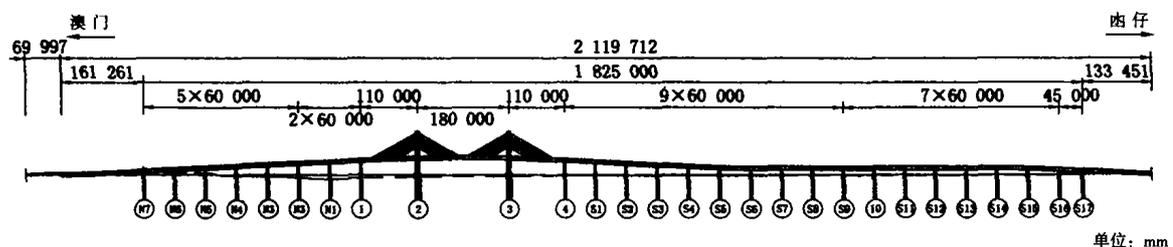


图1 澳凼三桥总体布置

3.2 桥式布置

主桥布置为： $(5 \times 60)m + (2 \times 60)m + (110+180+110)m + (9 \times 60)m + (7 \times 60+45)m = 1825m$ ，其中 $(110+180+110)m$ 为预应力双层交通斜拉桥，其余均为等高预应力混凝土箱梁。 $2 \times 60m$ 为匝道与主桥连接异型段。

3.3 主孔跨径确定

澳幽三桥通航等级为4000 DWT，速度为15节，主孔通航净空不小于150 m，为防止失控船撞击桥墩，确保大桥安全，航道两侧的主塔墩需采取有效的防撞措施，考虑基础宽度及防撞设施宽度，主跨跨度确定为180 m，通航中心线作为主跨中心线。

3.4 桥梁横断面布置

本桥为双层桥型，上层为双向6车道，中间有栏杆，两边有人行道和护栏，下层为双向4车道，另有2根 $\phi 800mm$ 的水管及7层电缆槽，还有通风系统、照明电力系统、消防安全及交通监控系统。

为了使横桥向受力合理、施工简便，主桥横向设2个分离的单箱单室截面，每箱具体布置如下。

上层： $0.2m$ (护栏)+ $1.0m$ (人行道)+ $0.5m$ (路缘带)+ $3 \times 3.5m$ (行车道)+ $0.5m$ (路缘带)+ $0.25m$ (防撞栏) = $12.95m$ 。

下层： $0.5m$ (路缘带)+ $3.5m$ (行车道)+ $4.0m$ (轻轨车道) = $8m$ ；或 $0.5m$ (路缘带)+ $2 \times 3.5m$ (行车道)+ $0.5m$ (路缘带) = $8m$ 。

为设置主跨斜拉桥塔柱，两箱之间间隙为3.1m，异型段后两箱梁之间间隙为0.1m。斜拉桥桥面宽为15.95m，主要是增加了斜拉索的锚固区。引桥箱梁及正桥斜拉桥的横断面具体布置见图2。

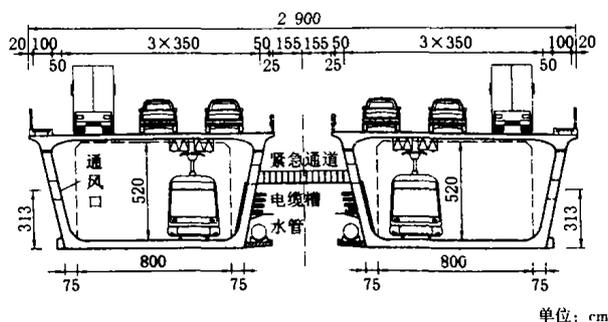


图2 引桥箱梁及正桥斜拉桥的横断面布置

4. 桥梁结构

4.1 正桥

4.1.1 上部结构

4.1.1.1 总体布置

主桥采用竖琴式平行索面混凝土斜拉桥，跨径组成为 $(110+180+110)m$ ，全长400 m，两边跨纵坡为5%，中间以 $R=3500m$ 竖曲线相连。边主跨比为0.611，梁高6.13m，梁上索距为10m。

4.1.1.2 支承体系

斜拉桥边墩设竖向活动支座，塔梁交叉处设横向、竖向支座，斜拉桥的纵向位移约束采用全纵漂体系，采用该种布置的主要因素如下：主跨跨度不大，地震作用下纵向水平位移最大值为150 mm，梁端伸缩缝的位移量能够满足要求；采用全纵漂体系；能使两塔墩共同承担地震水平力，避免单塔承受过大水平地震力；采用全纵漂体系能降低温度效应；因该箱梁底不能设隔板，无法设置在其他斜拉桥上经常采用的弹性索。

4.1.1.3 主梁

(1) 结构型式

箱梁为薄壁箱形截面，梁高6.13m，桥面设1%横坡，为改善箱梁整体受力性能，在各支点底板加厚至1.4 m，相应在两侧腹板内侧加竖向隔板，顶板底加一横肋以减小箱梁的翘曲及畸变应力。为了使斜拉索的索力能有效地传递至全截面，斜拉索锚固点截面内侧需同支点截面一样加强。

本桥主梁采用三向预应力结构。在箱梁腹板与底板结合区，同时集中了底板横向预应力锚固区、竖向预应力筋锚固区、纵向预应力锯齿块，为了尽可能减小张拉槽对截面的削弱，在箱梁底、腹板外侧设置马蹄形梁檐，将底板横向预应力锚固于其中。斜拉索梁上锚块设置于主梁翼板之下。

箱梁内下层通行车辆，需要在箱内安装排风、防火、消防等设备，在竖向净空受限制的条件下，应尽量利用横向空间。箱梁底板宽度对箱梁受力十分敏感，在满足通车净空的条件下，应减小底板的横桥向受力跨度以改善箱梁的受力状况。因此，箱梁采用斜腹板式，该种截面布置能缩短斜拉索的传力途径，有效传递斜拉索索

力。此外,斜腹板的景观效果较直腹板佳。

本桥高跨比为1/29.4,梁高相对较高,为了不致给人以沉重感,在箱梁外侧设檐板,以增加梁体的层次感,同时在箱梁腹板中部开设圆形窗户,纵向按一定规律排列,以增加桥梁的虚实统一性,开设圆形窗户也有利于箱体内的排风及排烟。内外侧腹板窗户交错排列。沿桥纵向,在梁内侧沿底板每隔4 m伸出牛腿,以支撑过桥水管。

(2) 索距的确定

相对刚度较大的主梁而言,主塔刚度较柔,从结构受力上分析,该桥属部分斜拉桥,斜拉索的力只是将主梁部分荷载通过索力传递到主塔。经过比较,6, 7, 8, 10, 12m五种索距均能满足受力要求。最后决定采用10 m索距,主要有如下几个因素:索距加大,①能减少施工节段,减少工期,加快施工进度;②视野开阔,景观效果好;③透空率高,抗风性能好;④能充分发挥每根索的强度,提高斜拉索的使用效率。但过分加大索距,会造成施工节段过长,重量过大,增加施工难度,提高施工成本。

4.1.1.4 斜拉索

斜拉索采用竖琴式平行索面布置,每片箱梁2个索面横向间距为15.1m。全桥横桥向共4个索面,中间两索面之间距离为0.9 m,共同锚固于主塔中塔柱,全桥共有96根斜拉索。

4.1.1.5 主塔

主塔采用B50混凝土,自承台以上塔高85.183 m,桥面以上48m。主塔横桥向呈“m”造型,共有3个塔柱,两边塔柱位于主梁外侧,中塔柱位于两主梁之间。在塔梁交叉处梁底及塔顶设横梁连接,使之成为框架结构,见图3。塔柱按其部位分为3个区域:下塔柱区、中塔柱区、斜拉索锚固区。

主塔柱顺桥向自上而下等宽,宽度为5.5 m,横桥向均为3m。塔柱截面采用单箱单室。

下横梁为单箱单室截面,高4.0m,宽4.0 m,为了适应横梁端部受力需要,在横梁与塔柱交接处对横梁截面进行了局部加强。上横梁为单箱单室截面,横桥向梁底设椭圆线形。上、下横梁均

为全预应力构件。

斜拉索直接锚固于塔柱内壁的锯齿块上,为了平衡斜索在塔柱截面产生拉力,在塔柱四周均布置有后张预应力筋。

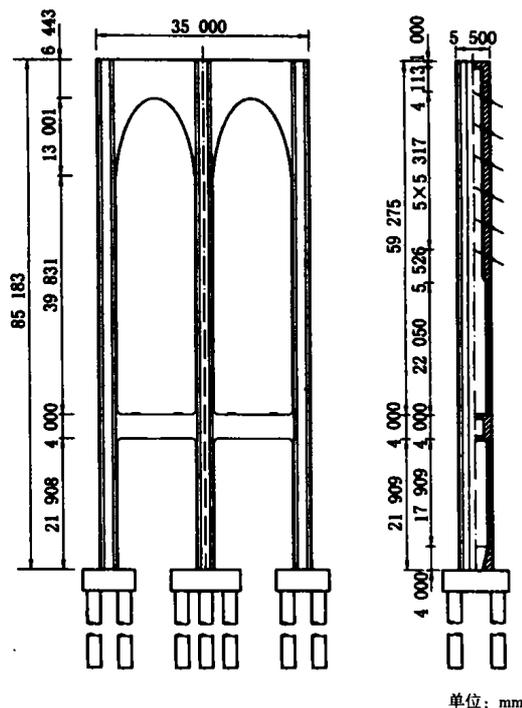


图3 主塔布置

4.1.2 下部结构

主塔基础采用3个分离式承台,承台顶高程-20.0m(M·S·L),承台底高程-23 m(M·S·L),上下游侧塔柱承台横桥向宽8.6 m,顺桥向长10.6 m,每承台底设4根直径2.2 m的钻孔桩。中间塔柱承台横桥向宽度11.6 m,顺桥向长12.6 m,设7根 ϕ 2.2 m钻孔桩,呈梅花形布置。所有桩按柱桩设计,嵌入微风化岩层。

4.2 引桥

在引桥设计中,分别对50, 60, 70 m三种跨径的混凝土连续梁作了全面比较,见表1。换算每延米工程材料用量进行比较并考虑施工难易程度,60m梁跨比较合适,因此本桥引桥跨径确定为60m。

(1) 基础型式

桥址处北岸澳门侧覆盖层较浅,埋深30 m左右,下卧花岗岩,由北向南覆盖层逐渐加深,函仔侧埋深达80 m,由于花岗岩强度较高,为充分发挥桩身材料强度,进一步减少桥墩基础规模,

每个墩设4根直径1.5m柱桩。承台采用高桩承台，利用当天低潮位时段，吊箱围堰施工。

(2) 上部结构

引桥上部结构采用60m预应力混凝土等高箱梁，梁高6.13m，横桥向为两分离式单箱单室截面。每箱顶宽12.95m，底宽9.5m，腹板厚为0.5m，顶、底板厚分别为0.25，0.4m。主梁采用三向预应力体系。

墩顶处主梁采用加强断面，即在桥墩中心线沿顺桥向左右各1m的范围内，将主梁的底板加厚至1.4m，同时在箱内设加劲肋，增加主梁的横向挡块。加强断面底板还设有横向抗震挡块，抵抗地震产生的横向力。

表1 3种跨径的混凝土连续梁的比较

部分	材料名称	50m	60m	70m
主梁	混凝土B50 / m ³	727.1	872.5	1018
	φ15.24钢绞线 / t	10.2	17.5	30.6
	φ32预应力粗钢筋 / t	17.5	21	24.5
	普通钢筋 / t	80	95	112
墩身	混凝土B35 / m ³	166	190	238
	普通钢筋 / t	21	25	31
承台	混凝土B35 / m ³	117	127	185
	普通钢筋 / t	9	10	15
钻孔桩	混凝土B35 / m ³	340	340	484
	普通钢筋 / t	24	27	39
每延米	混凝土 / m ³	27	2.55	27.5
上下部	预应力筋 / t	0.55	0.64	0.79
合计	普通钢筋 / t	2.7	2.6	2.8

5. 结语

澳凼三桥是世界上首座双层交通预应力斜拉桥，该桥所在区域风速大，地震烈度高，景观要求高。设计中显示了预应力结构设计技术的突出创新，重点解决了：

- (1) 双层受载的单室无隔板箱梁的技术关键。
- (2) 新颖别致具有鲜明地域特征的“m”造型的主塔设计技术。

主塔的“m”造型象征MACAU的第1个字母，也寓意澳门的3个半岛紧密相联，同时也象征澳凼第3座大桥，主塔造型别致，为国际首创，促进了现代桥梁技术进步。澳凼三桥必将成为澳门的又一亮点。

(上接第8页)

芦装置，在锚固系后吊杆上分别紧装有传感器和电子称，在锚固系横梁上装有四只螺旋千斤顶，在台车与受力硬木垫块间装有四只扁千斤顶。挂篮利用卷扬机牵引移动。

构件到安装地点后，先用千斤顶将4只台车抬高，台车下垫硬木垫块，并放置扁千斤顶，然后用千斤顶将构件顶至滑车组的所需高度，上眼睛板，拆除拖板，由滑车组前移至吊篮内，换吊点由卷扬机放下至吊篮底板上，再用神仙葫芦、链条牵引拉至所要求部位，再由挂篮上卷相机起吊后准确就位。

2.4.2 挂篮拼装

挂篮拼装是由塔柱为冲天（塔柱第三榀风撑交叉点牵引索），24米杵杆为摇头，在河跨现浇段上，吊车（W1004）配合下拼装就位。拼装步序为：先铺好移动台车道轨及移动台车，然后主桁架中段部分二榀拼装（用2部吊车在塔柱南北二侧分片吊起，然后用24米摇头杵杆将主桁三榀横向联系将桁架连成一体，其上放置横向联系杆），后拼装前吊杆条（可用W1004吊车分别南北二侧吊起拼装，然后用临时杆焊成一体）。将拼装的主桁架和前悬吊系向前推进至要求位置，再拼装后三角桁架（方向同前悬吊系），最后将32号I型钢、15米吊重梁及前悬吊系、拉森板桩拼装成的2根承重梁和6台卷扬机、后锚固系，在2台吊车配合下安装就序。当水上施工平台上船安装好就位后，挂篮拼装完毕。

挂篮结构见图3。

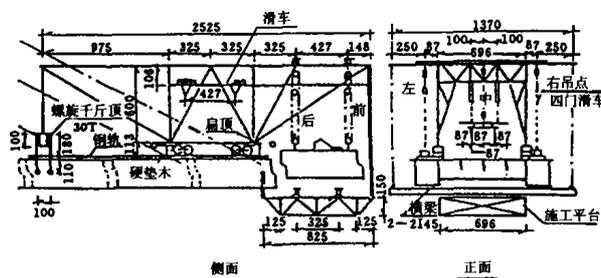


图3 澳港桥挂篮结构图

(未完待续)