

# 土耳其伊兹米特海湾大桥设计施工关键技术

周翰斌

(中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510310)

**摘要:**土耳其伊兹米特海湾大桥为一座大跨度悬索桥,跨越马尔马拉海,由于桥址区地震活动频繁又强烈,并且地质条件复杂恶劣,给桥梁的建设安全和质量带来了巨大的难度。该桥从计划建设到2016年建成通车,时间跨度近50年。基于收集积累的资料,该文主要阐述该桥主要的设计研究情况和先进而稳健的设计解决方案,以及有挑战性的施工技术。

**关键词:**悬索桥; 钢塔; 混凝土沉箱; 钢箱梁; 跨海桥梁

## 1 工程概况

伊兹米特海湾大桥位于土耳其西北部伊兹米特海湾的湾口,跨越马尔马拉海,是新建盖布泽(Gebze)—奥尔汉加济(Orhangazi)—伊兹密尔(Izmir)的420 km高速公路BOT项目的关键工程。2010年4月,BOT项目的承包商将该桥进行EPC总承包全球招标。2011年7月,日本IHI基础设施系统公司和ITO-CHU组成的联合体获得该桥EPC合同,中标承建该桥,造价12亿美元。

IHI公司将设计委托给丹麦COWI公司,英国Halcrow公司提供IDC咨询。桥梁的详细设计始于2011年9月,于2013年2月底基本完成。2013年1月1日,BOT项目承包商发布该桥的正式动工令,施工工期为37个月。建设这座巨大桥梁,EPC承包商面临着许多挑战,除了技术难题的挑战外,影响最大的是只有37个月的施工期限。

2016年6月底该桥建成通车,官方命名为Osman Gazi大桥。大桥全长2 682 m,主跨1 550 m,通航净高64.3 m,是土耳其目前最大的悬索桥,建成时是世界第四大跨径悬索桥。该桥与同年8月通车的博斯普鲁斯海峡三桥一起将土耳其首都安卡拉、第一大城市伊斯坦布尔以及第三大城市伊兹密尔的交通线路连接起来,形成一条经济大动脉,促进了三地及沿线地区的整体发展。

## 2 主要建桥条件及技术难题

马尔马拉海冬季温暖多雨,夏季炎热干燥,水温较

高,导致蒸发相当旺盛。桥址处海域宽度约4 km,有大型商业船只和军舰通行,要求能满足净高64 m及净宽1 000 m的通航要求。大部分水深为25~45 m,最大水深65 m。南侧水深较浅,一般为5~7 m。场地覆盖层主要为第四纪海积地层,主要为黏性土,含砂砾和粉土。南侧的硬质岩层在水下200 m左右的位置,北侧的硬质岩层较浅。深海大型基础是该桥建设必须解决的关键技术难题。

桥址所在地区处在欧亚板块、阿拉伯板块和非洲板块碰撞形成的北安纳托利亚断层的西端,此大型走滑断层被国际地震学界认定为世界上最活跃的地震活动区之一。1939年以来,沿该断裂曾发生 $M \geq 7.0$ 级强震7次。1999年8月17日03:00,伊兹米特市发生了7.4级强烈地震,发生在该断裂带西段的北支,震中位于该市西南约11 km处的海湾内,地震造成的地表破裂总长约180 km,最大宽度51 m,最大水平位错达3.8 m,附近垂直变位2 m。地面损坏非常严重,大量建(构)筑物破坏,人员伤亡很大。桥址处场地地面震动峰值加速度(回归周期2 475年)北岸为 $0.8g$ ,南岸为 $0.9g$ 。需要适应极高的地震荷载是该桥建设必须解决的另一关键技术难题。

## 3 桥梁总体设计

该桥自1970年开始就由国际财团负责设计研究,直至2000年共提出过10多个方案。最终主桥采用3跨连续悬索桥方案,主跨和边跨分别为1 550和566 m,加劲梁全长2 682 m。南、北边跨墩与散索鞍之间

锚跨分别为 67.25 和 92.05 m,南、北过渡跨分别为 105 和 120 m。主桥平面线形为直线,南、北引桥采用不同平面曲线形。桥梁立面变坡点设于主跨跨中,两

侧为 2.0%人字形对称纵坡,主跨通航净空为 64.3 m $\times$ 1 000 m(图 1)。

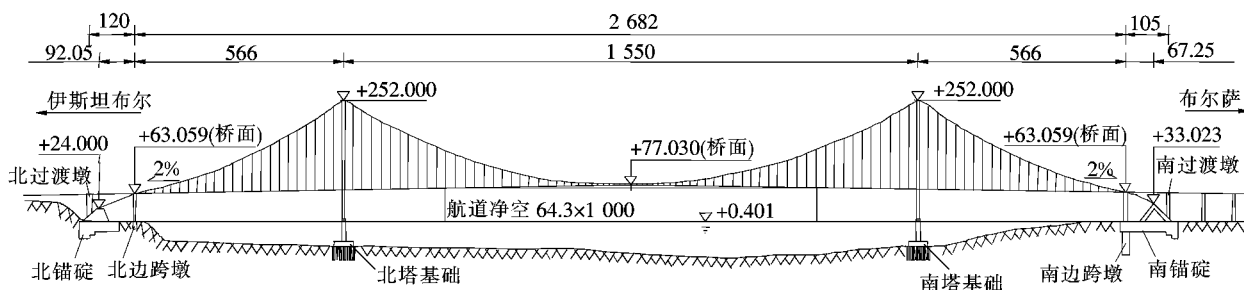


图 1 桥梁立面示意(单位:m)

桥梁按高速公路双向六车道设计,各车道宽 3.65 m,中间路肩 0.5 m,各方向边侧 1.0 m,两侧预留 2.915 m 宽的悬臂式检测通道,主桥横断面总宽 35.93 m,桥面设 2%双向横坡(图 2)。桥面板中心及边缘设置拉力绳式交通屏障。为避免风对行驶在桥上车辆压力的突变,仅在桥塔部位设置风屏。全桥钢塔及钢箱梁内部,包括索鞍及锚碇内的主缆均安装除湿系统,以起到防腐保护作用。

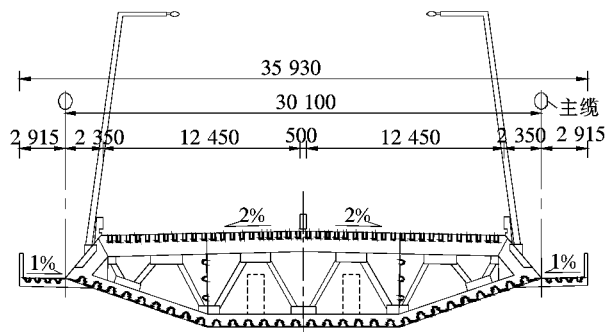


图 2 主桥横断面示意(单位:mm)

两根主缆中心间距 30.1 m,矢高 171.67 m,矢跨比为 1/9.029。按满足回归期 2 475 年的超强地震反应的控制要求,桥梁设计安装了特制的球形支座和阻尼系统等抗震设施。加劲梁在桥塔处仅设置横向限位支座,在梁端设置竖向支座、横向限位支座和纵向阻尼系统。安装在桥台处的多向活动球形支座,沿桥梁纵向位移可达 $\pm 1.9$  m。阻尼系统为 7 个特制的液体黏滞阻尼器,3 个安装在过渡跨处,可以容许主梁产生 $\pm 2$  m 的位移;4 个安装在边跨墩处,在正常使用状况下,保证主梁与桥墩的刚性连接,地震时可以耗散地震能量。采用这些措施后,加劲梁可纵向平稳移动,但不会因交通、风及地震造成快速移动,在强地震下,桥面

板允许移动,损伤可修复。

## 4 主要结构设计及关键施工技术

### 4.1 桥塔基础

两个桥塔基础均位于海平面以下 40 m 处,不采用常用的沉井基础,而是采用直接放置于 3 m 厚砂砾石床上的设置基础,两者之间不连接,强震时允许有大的移动,可以随着土层进行相应移动,减少巨大的地震力向桥梁体系传递,以极大地提高桥梁的抗震性能。桥塔基础由混凝土沉箱、立柱和横梁构成(图 3)。沉箱平面尺寸为 67 m $\times$ 54 m,高 15 m,内部分成 54 个隔舱,顶部设置密封顶板。立柱为薄壁圆环形的钢壳混凝土结构,高 26.5 m,用来支撑塔柱,立柱顶设置混凝土横梁连接。立柱外径 14 m、壁厚 1.5 m,环形壁板上布设剪力钉。稀疏的圆形立柱有利于减少波浪冲击力和保持基础整体稳定性。每个基础下的土层采用

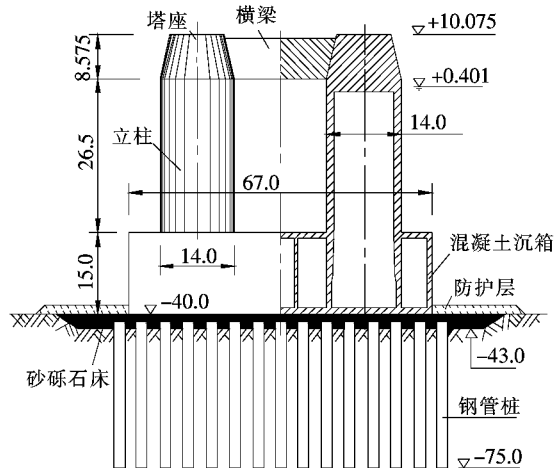


图 3 桥塔基础示意(单位:m)

195根钢管桩加固,以满足承载力要求和消除地震时潜在的液化风险。钢管桩直径2 m、壁厚20~25 mm、长34.25 m、间距5 m,桩顶在砂砾石床表面下0.75 m。桥塔基础设计充分吸收了类似跨海桥梁基础设计的先进理论和经验,并根据该桥特点,对基础上部结构的形式和施工方案进行了改进。

海底的软弱土层利用5 000 t级驳船甲板上设置250 t履带吊机,配大型抓斗来挖除,采用分层开挖法,开挖边坡以自然稳坡为准,找平开挖底面时采用重量相对小、容积较大的平铲抓斗。挖掘结束由多波束测深系统检查基底的挖掘精度,并用无人潜水机水下录像拍照,确认挖掘状况。

钢管桩插打和砂砾石床铺筑整平这两项海上作业,考虑到受水深、风浪、海流的影响大,采用了1艘拉脚的驳船作为施工工作平台,平台上配备1台250 t履带吊机。该驳船由垂直钢链与海底的混凝土锚块拉紧系在一起,通过调整钢链受力来平衡波浪力及船载起重设备的工作荷载,保持驳船稳定。钢管桩顶部涂刷防腐涂层,250 t履带吊机起吊夹住钢管桩的水下液压打桩锤,将桩垂直插入预先设置好的导向筒。液压锤与桩一起进入导向筒,将桩震动下沉到位。

钢管桩插打完成后铺设砂砾石床。采用履带吊机配合抓斗或者挖掘机铲料到料斗,输送到下料管进行铺设。下料管与工作驳船侧边相连,可水平移动,刮平管与下料管下端相连,采用铺放材料同时刮平管完成刮平整平技术,提高工效。顶面的碎石层铺设采用平行连续的“之”字形,形成带有垄沟碎石垫层,以便沉箱着床时垫层有一定的流动调平能力。碎石层的平整度要求为 $\pm 50$  mm以内。铺设完成后,同样采用多波束测深系统进行测深检查。砂砾石基床没有进行夯实,实际上是利用桥梁体系的自重和注入沉箱基础内的水荷载超载压实沉实。

两个混凝土沉箱在南引桥的海岸边进行堤坝式填土形成的干坞内一次预制完成,干坞施打钢板桩作支护。沉箱在外墙浇筑完成15 m到顶部,内部隔墙浇筑到距离顶部3~4 m时,坞内灌水,沉箱起浮拖出坞停放至附近相对平静的水域,在悬浮和系泊状态下完成隔墙剩余部分和顶板混凝土浇筑,然后采用吊重1 800 t的Taklift7号浮吊从码头起吊立柱钢壳,逐一安装固定到沉箱顶部的预定位置,最后完成立柱钢壳混凝土的灌注。基础区域的地基加固处理完成后,选取合适系泊时机,由4艘拖轮将沉箱拖到永久墩位注水下沉,定位采用8个重力式混凝土锚块。沉箱下沉

时由自动监控系统调配好各个隔舱的水位,使沉箱保持垂直状态缓慢均匀下沉。

沉箱沉放到位后,由浮吊先将连接塔柱的钢结构预埋件吊装到位,然后将立柱顶已预制1/3高度的混凝土横梁安装到位,最后分次立模浇筑塔座及立柱横梁,将基础的两根圆柱连接起来。

#### 4.2 锚碇基础

北锚碇为明挖重力式基础,锚体为实腹式三角结构,混凝土底板在后部设置高3 m的台阶状剪力键,埋于岩层中。基坑开挖之前,采取喷射灌浆处理来止水。过渡墩置于锚碇后方混凝土板上,边跨墩置于锚碇前方分离的桩基础上。北锚碇底板完成后,进行过渡墩的墩身施工。

南锚碇与南过渡墩设计成124 m长的整体重力式结构,在强震情况下,散索鞍与锚碇一起移动,不会对主缆产生较大的力。锚体采用空腹式三角框架结构。由于覆盖层厚,采用双圆形组合的“ $\infty$ ”形并与矩形相接的地下连续墙为支护防渗墙,以实现止水干开挖。首先填土筑岛围堰形成干施工场地,再施工地下连续墙,然后逐层支撑并开挖到基底,进行地基换填加固,浇筑锚碇基础的底部设置有剪力键的混凝土底板、三角锚体结构,以及南边跨墩和过渡墩的墩身。

#### 4.3 桥塔

桥塔采用单室箱钢塔,以减小桥塔自重降低地震响应,并可采用节段吊装施工。桥塔由双支塔柱及两道横梁组成,塔底高程为+10.075 m,塔顶高程为+252.0 m,塔高为241.925 m,塔柱底部断面尺寸为7 m $\times$ 8 m,顶部尺寸为7 m $\times$ 7 m,竖向呈锥形。

每支塔柱分为22个节段在附近工场制作及进行匹配预拼装,节段高度最小7 m、最大13 m。在桥塔的下半部,塔柱节段及下横梁构件,采用两艘大型浮吊直接从码头起吊构件并运到现场安装。下横梁顶部的两个塔柱节段安装后,在下横梁顶面设置1台46 t塔吊。塔柱上部的节段在竖向分成4个块件,由46 t塔吊逐一提升就位。上横梁的块件同样由46 t塔吊起吊安装。塔柱节段间及块件的现场拼装是壁板采用焊接连接,内部加劲肋及塔柱相邻节段间采用高强度螺栓连接,以加快节段吊装的连接定位速度。

#### 4.4 加劲梁及缆索系统

加劲梁采用正交异性桥面板,经风洞试验测试,加劲梁采用4.75 m高度,总宽35.93 m,分为113个节段,标准节段长25 m,重290 t;组合节段长50 m,重580 t。加劲梁在吊索位置采用实腹式横隔板,其他位

置为桁架式横隔板(图 2)。

主缆采用平行钢丝索股 PPWS 法架设,每根主缆在锚碇间设置 110 束预制平行钢丝索(PPWS),在桥塔及两边锚碇的边跨间附加两个 PPWS,每束由 127 根直径为 5.91 mm 的高强钢丝组成,钢丝抗拉强度为 1 760 MPa。吊索采用平行钢丝束(PWS),外加 HDPE 护套,并与索夹及锚板销接连接。

主、散索鞍均为铸焊结合结构,分别采用塔吊、履带吊机配门架、卷扬机起吊系统进行安装。施工猫道采用不设置抗风缆的 3 跨连续式结构,宽 4.5 m,猫道面层距主缆轴线 1.5 m。

主缆索股采用拽拉器自南向北沿猫道牵引,每隔约 250 m 设 1 个小型鱼雷夹具,并由专人跟踪辅助牵引。在桥塔、锚碇门架处布置卷扬机与滑车组,利用握索器夹持索股上提、横移。索股整形及入鞍采取特殊夹具按“先主索鞍再散索鞍”顺序进行。索股垂度调整分成基准索股、相对基准索股及一般索股采取不同方法进行。主缆索股为钢板锚固形式,采用拉杆式系统张拉将索股锚头锚固于锚固箱内。主缆的紧缆机上有直接显示主缆直径的功能,使紧缆施工更准确、便捷。紧缆施工先主跨再边跨,主跨从跨中到塔顶、边跨从锚碇到塔顶方向。紧缆后,每隔 1 m 捆扎两道镀锌钢带。

钢箱梁以“南北岸对称、主边跨对称”为原则,按照主跨由跨中往桥塔方向对称架设,边跨由边跨墩往桥塔方向架设的顺序。共有 4 个合龙段,分别为两个桥塔附近的主跨侧合龙段及边跨侧合龙段。先合龙边跨侧合龙段,再合龙主跨侧合龙段。主跨南、北段各配置两台 400 t 液压跨缆吊机,两个边跨各配置 1 台 400 t 液压跨缆吊机用于钢箱梁吊装。

箱梁节段在码头滑移上运梁船运到安装现场,过渡跨箱梁在猫道安装完成时,由过渡墩往边跨墩方向安装,采用 Taklift7 号浮吊从运梁船起吊箱梁节段放置于钢支架支撑的滑移轨道上,然后滑移到位、组焊安装。过渡跨箱梁滑移节段采用 1/2 标准节段长,重 145 t。

靠近桥塔塔区的 3 个节段,直接由大型浮吊吊装到位,其中塔柱横梁正下方的无吊索节段,先由设置于下横梁顶的外伸支架临时吊住,待与相邻有吊索的两个节段焊接连接后,转为由永久吊索承载。主跨跨中

的 4 个标准节段由浮吊吊装到位后,浮吊将跨缆吊机安装到位,然后由两台跨缆吊机自运梁船上垂直抬吊长 50 m、重 580 t 的组合节段进行安装。边跨靠边跨墩的两个标准节段,由浮吊起吊安装,其他标准节段则由跨缆吊机垂直起吊安装。合龙段采用标准节段。

钢箱梁合龙后,进行吊索张拉,将主缆下拉至设计、监控线形。主缆的 S 形缠丝按照先主跨再边跨顺序进行,主跨由塔顶往跨中,边跨由锚碇往塔顶。

## 5 结语

该桥为大跨度悬索桥,建于地震活动强烈又频繁的断层带、覆盖层厚的深海海湾中,面临着技术难题大和工期紧的多重压力,建设团队从类似工程中吸取经验,采用先进而稳健的设计,以及经过充分证明而又颇具匠心的一系列施工技术方案,减少了技术和时间风险,使该工程技术和经济上都获得成功。该桥的设计施工理念,特别是深水厚覆盖层桥塔基础及锚碇基础建造方案,值得深入研究和借鉴。

## 参考文献:

- [1] 刘宗华.土耳其 Izmit 海湾大桥主塔基础设计与施工构思[J].施工技术,2012(18).
- [2] 伊藤学,川田忠树,等,著.超长桥梁建设的序幕——技术者的挑战[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [3] 张妮.土耳其新伊兹米特海湾大桥上的抗震措施[J].世界桥梁,2018(3).
- [4] Lyngs J. H., Kasper T., Bertelsen K. S. Modelling of Soil-Structure Interaction for Seismic Analyses of the Izmit Bay Bridge[C]. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013.
- [5] 张国宁,编译.从大贝尔特海峡大桥、厄勒海峡大桥到费马恩海峡大桥的跨越[J].中外公路,2016(1).
- [6] 土耳其最长的悬索桥 Osman Gazi 悬索桥[EB/OL]. <http://www.bilibili.com/video/av14564862?from=search&seid=9332560199230003408>.
- [7] 叶觉明.土耳其伊兹米特湾跨海大桥通车进入倒计时[J].世界桥梁,2016(4).
- [8] 朱小金,武尚伟,王博,等.虎门二桥悬索桥浅滩区钢箱梁吊装施工关键技术[J].中外公路,2019(2).