

文章编号: 0451-0712(2003)12-0001-04

中图分类号: U448.27

文献标识码: B

# 世界上最长斜拉桥的简介

## (记希腊列昂—恩的列昂桥的设计与施工)

金增洪

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

**摘 要:** 列昂—恩的列昂桥,是目前世界上最长的斜拉桥,该桥采用 BOT 方式建设,预计 2004 年 12 月建成通车。由于建桥场地属地震频发和地壳潜伏活动地带,地基条件恶劣给桥梁结构工程师带来了难以克服的困难和提出严峻的挑战。设计者采用本文开发的“包裹法”加固地基,在干船坞中预制巨型沉箱,浮运到位后注水下沉;在其上构筑独立的、刚性的塔墩固结体系;为了适应地壳微小运动、地震位移和温度变化等因素,采用连续桥面梁完全悬吊飘浮体系。深水基础施工独辟蹊径,采用提腿船施工和大型预制沉箱组装,加速施工进度。

**关键词:** 多跨斜拉桥; 飘浮体系; 包裹体; 阻尼器; 提腿式平底船; 差异压载体系

100 万年前,希腊最南端的伯罗奔尼撒(Peloponnese)半岛与希腊本土完全连在一起,不存在科林斯(Corinth)海峡,经过随后的地壳运动,伯罗奔尼撒开始向南漂移,创造了科林斯海峡。现在半岛的大部分—奥林匹克城的发祥地与希腊的其余部分被科林斯海峡分隔开了。

今天,通过缓慢的、不可靠的航渡体系运输车辆跨越海峡成为希腊本土北部与伯罗奔尼撒的主要交通方式。目前的航渡体系每天大约能渡运 10 000 辆汽车,而且在大风和不好天气时还得停航。列昂—恩的列昂(Rion-Antirion)桥建成后,不仅节省时间,从原来的 45 min 缩短到 5 min 就能渡过海峡,而且不受天气影响。该桥不仅促进两岸旅游事业的发展还将加强希腊西北部和伯罗奔尼撒之间的交通联系,促进经济繁荣。

1992 年希腊政府决定用 BOT 方式转移最合适的桥梁项目。经过谈判以后,于 1996 年,这一项目授予法国设计和施工的芬西(VINCI)建设公司领导的财团。在希腊,由于这一合同尚属新生事物,所以经历了较长时间。财团花了近 2 年多时间,筹集到必要的资金,于 1997 年 11 月合同生效,预计 2004 年 12 月建成通车。

在 2004 年工程竣工时,列昂—恩的列昂桥将成为世界上最长的斜拉桥。横跨 2 500 m 水域的桥梁,

其中有 2 252 m 长的斜拉主桥和南北两座高架引桥。主桥有 2 个边跨各 280 m 和 3 个中部主跨各 560 m,南引桥长 388 m,北引桥长 248 m,见图 1 所示的桥梁纵剖面 and 计算机所绘制的透视图。主桥将座落在 4 个直径为 90 m 的基础上,这是前所未有的最大桥梁基础,接下来就是海床。桥面梁以飘浮形式通过斜拉索悬吊在塔墩的塔冠上。

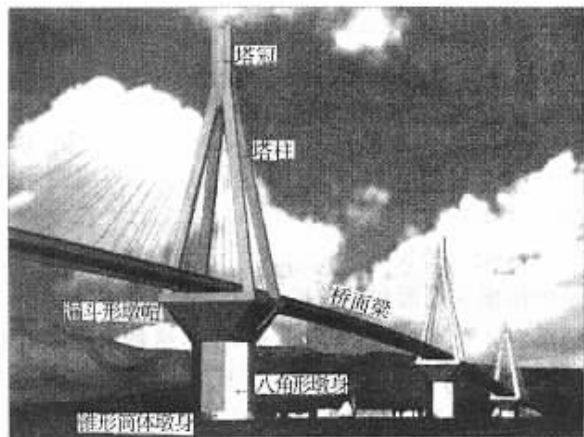
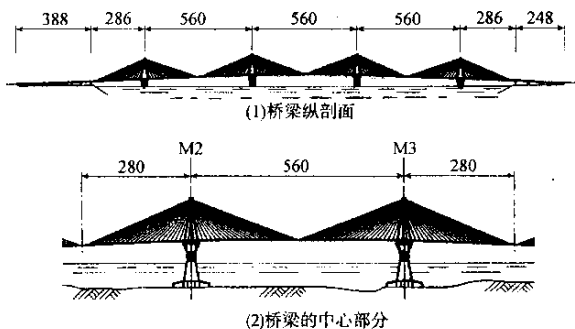
### 1 场地条件和地基加固

桥梁所处的环境给施工带来各种各样的挑战,因此使项目变得十分复杂。深水(达 65 m)再加上很深的弱冲积层地基,以及强地震活动的可能性,其中包括潜伏的地层运动。所有这些对桥梁结构工程师都构成难以克服的困难和提出严峻的挑战。

由于地震使伯罗奔尼撒逐渐离开希腊本土。现在伯罗奔尼撒还继续每年以几 mm 的速度远离大陆,结果有几个活动断层在此地域内存在,从而加强了地震活动。在过去的 35 年里有 3 次超过里氏 6.5 级的地震在科林斯海峡发生。

由于这些原因,合同中规定桥梁要能经受 2000 年回归期地震。在这种场合下,海床平面上反应谱的地层加速度峰值达 0.4 g,周期达 1 s 时,最大加速度达 0.48 g。这种谱还比 1999 年土耳其伊兹密特(Izmit)地震所测得的地震震级里氏 7.4 级的谱还

要严格。桥梁还必须适应竖向和水平断层达 2 m 的运动。虽然所设计的桥梁必须经受 16 万 t 油船以 8.8 m/s 速度的撞击,同时还存在高速风和地震条件下的控制设计。



(3) 计算机绘制的透视图

单位: m

图 1 列昂—恩的列昂(Rion-Antirion)桥

海床的地质条件加剧了由地震荷载造成的挑战。对海床下 100 m 深的土壤研究揭示无基岩存在;事实上进一步对地质状态进行研究,即使在海床以下 500 m 深处也没有基岩。这意味着桥梁必须建造在地基土上而非岩石上。大部分地基土是由无粘性的砂和砾石所组成,从淤泥向下扩展 4~7 m 深。从地质剖面上看,在这层以下是不稳定、又不均匀的砂层、粉砂层和粉质粘土。超过 30 m 深度地基便趋于均匀,主要由粉质粘土和粘土组成。对设计组来说,所给地基的性质,不会出现液化问题。但在大陆侧的第一个 20 m 内看出是敏感性地基,这导致工程师们对恩的列昂侧(大陆侧)的高架引桥需要设计很深的桩基,因为那里的地基土层在强烈地震下会发生液化。

在基础方案设计阶段,根据主桥场地所给出的这些地基条件,作出适当的可供选择的方案,如对桩

基、深水沉箱基础和换土等作了系统研究,最终根据造价、技术可行性和成熟性作出决定。这些分析显示浅基础是最满意的方案,只要在地基上层的 20 m 范围以内进行改造,使地基剪切强度在桥梁经受极端地震条件下,足以抵抗桥梁的地震力和动水压力的作用。上层地基土用本项目快速开发的方法加固,称这种被加固的地基土为“包裹体”。这一包裹体是用长为 25~30 m、直径为 2 m 的浅钢管桩打入上层地基,间距为 7~8 m(取决于桥墩)。在每一个桥墩位置打下 150~200 根钢管桩,然后在这一范围内覆盖 3 m 厚的砾石层,就在这一加固层上修筑基础。对最靠近恩的列昂海滩的桥墩不必做包裹体,因为这里已有很厚的砾石层存在。

虽然包裹体类似于桩基,但其性质并非相同,包裹体和桩基之间没有联结,因为基层可以向上移动,也可相对地基土侧向滑移。为了证实这一加固地基土的可靠性,在法国屈西斯(Chaussées)桥梁实验室作了广泛的数值计算和离心模型试验,设备是由法国政府为土木工程、运输和环境工程研究而装备起来的。通过试验建立了基础设计的可靠性。

## 2 基础和塔墩设计

各个设置在已加固地基土上的基础,由直径为 90 m 的钢筋混凝土沉箱组成。由于尺寸巨大,沉箱用 32 根径向梁加固,每一根梁厚为 1 m,径向梁的高度从中心处的 13.5 m 向外递减到边缘处为 9.0 m,梁长为 26 m,见图 2 所示。在沉箱的基底以上为圆锥形混凝土筒体,其外径从底部的 38 m 向上逐渐缩减到顶上的 27 m,形成水下基础的上部。其高度是变化的,从 38~53 m 不等,这取决于各桥墩位置的水深。在海平面以上,构筑八面体墩身,2 个中心墩高出水面 28 m,两边墩高出水平面 6 m。墩身上加一 16 m 高的漏斗形的墩帽形成边长为 40 m 的正方形的基座,在正方形基座上口做成高 3.5 m、宽 6 m 的正方形边梁,各边梁有 21 根预应力索横穿过四角进行强加固。然后在正方形基座四角上做 4 根 4 m×4 m 正方形截面的高强混凝土塔柱,4 根塔柱角度各自向对方倾斜,以便在塔柱相交后形成巨大的刚度,以承受非对称的使用荷载和地震力。塔柱浇注的高程达 135 m 后,提升一“十”字形板件,四角留口让 4 棵斜塔柱插入,约重 200 t,作为塔冠的底板。在 4 根塔柱交汇点以上刚性埋设高 35 m 的塔冠并由钢质的核心(由 11 个长 7.5 m、宽

2.5 m、高2.5 m的钢箱,一个落在另一个的上面堆焊起来作为拉索的锚固体),与 2 个壁厚为 2.5 m 的竖向混凝土壁板联结。各个桥墩形成一个整体的结构,从海底到塔冠顶,总高度为 230 m,海平面以上约有 160 m。

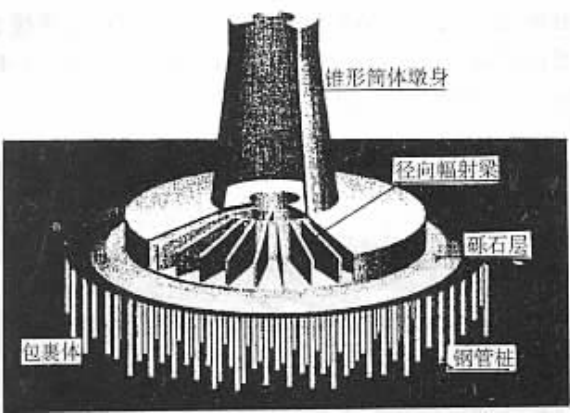


图 2 沉箱基础、包裹体和锥形筒体墩身

当塔开始从桥面梁的水准向上修筑时,在桥墩中作为压载物的海水将被泵出,因为预期桥墩沉降的绝大部分已经完成。桥梁上部结构的最终重量将与从沉箱中抽出的压载海水重量相似。

桥墩的基础非常巨大而且十分昂贵,但只需要少数几个,因为它们能够支承大跨径斜拉桥。

3 桥面梁设计

原先曾考虑采用跨径约为 1 500 m 的悬索桥,也作了必要的研究,但发现多跨斜拉桥的方案更经济。然而,为了有可能适应 2 m 的地壳构造运动,两相邻墩之间存在困难和挑战。最终,设计组发现最好的方案还是采用 2 252 m 长的连续桥面梁并完全悬吊于塔冠上。这就创造了一隔离的飘浮体系,将足以有效地减轻地震力在桥面梁上的作用,并给予足够的柔度以适应桥墩之间的相对运动。

桥面梁宽 27 m 将承担双向四车道交通量。这一组合钢结构两边各具一根高为 2.82 m 的纵向钢板梁,横向板梁高为 2.2 m,在纵向每隔 4 m 有一档横梁与纵梁联结。在这个钢结构上覆盖厚为 0.25 m 的混凝土板,加劲梁的截面见图 3 所示。

4 缆索体系

斜拉索以双排锚固于塔冠上,并以扇形体系展开斜向桥面梁的 2 个对应边缘上,梁上索距为 12 m。所使用的拉索是由芬西公司的附属傅氏国际公司供货。缆索体系中的每一根涂锌索股由其在自

身表面挤压的聚乙烯外套保护。最粗的拉索由 70 根索股组成,而每根索股的直径为 15 mm。

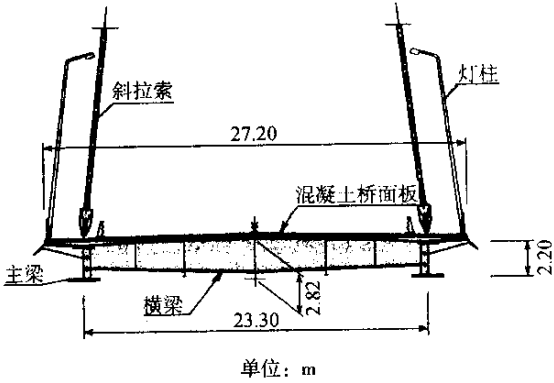


图 3 加劲梁截面

5 塔梁的联结装置和梁端联结装置

由于斜拉索的悬吊,桥面梁将完全自由地适应温度和地壳构造在纵向引起的运动。在横向,桥面梁象摆一样工作,在大地震发生时其运动将被 4 个联结在各塔基上的液压阻尼器所缓冲,见图 4 所示。每一个阻尼器的容量,无论是处于受拉或处于受压状态,约为 3 500 kN,最大速度为 1.0 m/s。在极端地震情况下,桥面梁和塔之间的动力相对运动产生的位移,在速度为 1.6 m/s 时将有 3.5 m。在强风情况下,必须设计一种附加体系以保持桥面梁在合适的位置上。因此,设计 1 根负载量为 10 000 kN 水平撑杆将桥面梁与各塔基联结起来;当强地震发生时撑杆折断,并激活阻尼器。对于这种阻尼器的样机试验,现在正利用加利福尼亚运输部的一座试验设备,由美国加州大学圣迭哥分校实施之中,用试验来证明上述提出的概念。

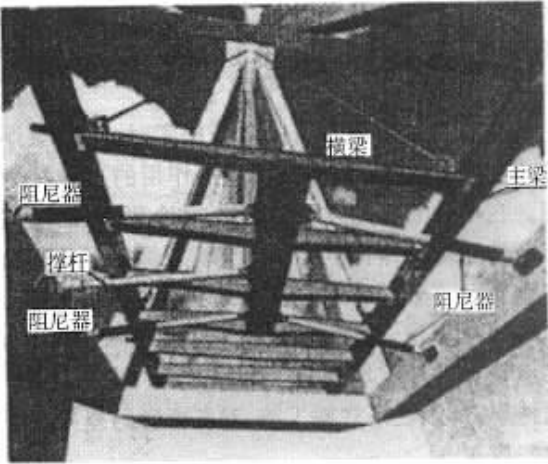


图 4 塔梁联结装置



在主桥两端与引桥的联结处,必须适应斜拉桥桥面由于温度、地壳构造和地震力引起的大运动量,在使用状态下,纵向运动可以达到 2.5 m,但横向运动将忽略不计。在极端状态下,在任意方向运动高达 5 m,为此,斜拉桥桥面梁由 14 m 高的钢框架支承以适应上拨负载和纵向桥面运动。桥面梁和框架的联结类似于桥面梁和塔基的联结,使用 2 个阻尼器和 1 根撑杆装置。

## 6 施工

现在所有的基础已经就位,4 座索塔正在施工中。海床的开挖、构筑包裹体、铺设和刮平砾石层是在水下 65 m 深处进行,主要工作属海上操作,并需要一种专门设备和方法。设计一种定制的提腿式的平底船,沿着同一直线,当固定提腿平台时和石油工业所使用的海上平台一样,最大的差别是平底船可以从一处移动到另一处。恒载传至海床并拉紧竖向锚线,为平底船提供稳定性,该船配置了打桩机和砾石摊铺装置。一旦海上作业在一处完成以后,上提压重块,平底船就可移向下一工点作业。构筑基础所使用的施工方法就是通常建设海上混凝土平台所使用的施工方法。每一个基础在干船坞施工到 15 m 高后,拖到湿船坞中停泊。在这里进一步完成基础以上的锥形筒体墩身的施工,而后拖运到海湾的最终位置下沉就位。

这些基础的施工过程呈现非常卓越的特点。干船坞建立在工地附近,长 200 m 宽 100 m 和深 14 m,并能适应 2 个基础同时施工。一旦 2 个基础中的第一个完成拖到湿船坞中后,已经局部施工的第二个基础浮运到第一个所占位置,并对干船坞作一封闭。这就允许将船坞内部的水泵出,所以可以完成第二个基础施工,而且第三个基础的施工也能够开始。

在湿船坞中锥形筒体墩身施工时,基础漂浮和锚泊在水中,这时它受风和流水作用的平衡最为敏感。在基础上由径向梁创造的 32 个隔仓,通过差异压载体系用计算机 24 小时控制,来保持基础完全处于垂直状态。一旦基础浮运到其最终位置,在其中充水加速下沉,箱基的沉降量较大(0.2~0.3 m)。在墩身和漏斗状墩帽施工期间,这种预加压载一直维持着,所以在塔柱施工前,对各桥墩的差异沉降能作好校正。

大浮吊提升就位。钢桥面梁结构在英国的克利夫兰(Cleveland)桥梁工程公司的达令顿(Darlington)基地预制。梁的节段长为 12 m,宽为 27 m,包括混凝土桥面板等将在工地装配,详见图 5。桥面梁将用悬臂平衡技术安装,每一节段用浮吊运输和提升,然后用螺栓连接到已吊装就位的梁段上,而后再连接 2 根新的斜拉索。吊装节段总共有 186 个,其中 174 个节段是用螺栓联结的。

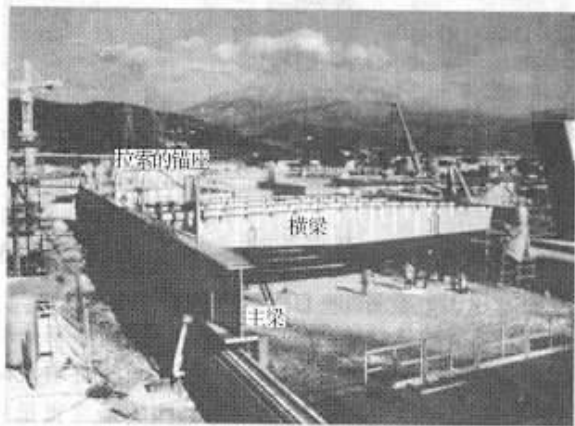


图 5 加劲梁的组装

## 7 结论

列昂—恩的列昂桥昭示其在设计和施工方面有许多突出的创新特色,这些创新成果值得参考和借鉴:

(1) 对软土地基采用钢管桩加固,并在其上堆 3 m 厚的砾石层形成“包裹体”,赋予其具有足够的抗剪强度能抵抗地震力和动水压力,这种包裹体类似于我国独创的 CFG 桩,这种地基处理方法对我国深水弱地基的桥梁工程有参考借鉴价值;

(2) 超大跨径斜拉桥,尤其是多跨斜拉桥,为了抗震、抗风,必须增大结构的刚度和增大结构阻尼,用这两种方法控制位移是十分有效的;

(3) 在本桥设计中充分利用隔震体系,如本桥采用飘浮体系和塔梁依靠阻尼器和撑杆的联结,桥面梁的两端也采用阻尼器和撑杆与柔性框架联结,保证梁能自由伸缩;

(4) 施工中大力采用大型预制沉箱减少水下作业,对保证施工质量和加快施工进度具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Jean-Paul Teyssandier. Corinthian Crossroads. Civil Engineering, 2002, 72(10).

塔冠的钢质核心体用具有高度达到 170 m 的

文章编号: 0451-0712(2003)12-0005-05

中图分类号: U443.33

文献标识码: B

# 关于钢桥面沥青混凝土铺装层 界面抗剪问题的研究

张志宏

(中国路桥集团总公司经营一部 北京市 100011)

**摘 要:** 通过对钢桥面铺装使用条件和目前钢桥面沥青混凝土铺装主要病害原因的分析,提出了钢桥面铺装界面抗剪的观点,进而提出了将特制防水卷材用于钢桥面铺装抗剪和防水的设计思路,并进行了初步的试验对比。

**关键词:** 钢桥面铺装; 界面抗剪; 沥青混凝土; 防水卷材

随着我国交通事业的发展,越来越多的大跨径钢桥相继建成。钢桥面铺装问题的研究也越来越引起工程技术人员的重视。

大跨径钢桥在温度和荷载的作用下其变形量很大。钢箱梁具有良好的温度传导性,易受外界温度变化的影响。在夏天高温季节钢箱梁顶面的钢板实测温度有时可达 70℃。此外,钢箱梁一般均由光钢板焊接制成,其顶面异常光滑。这些都是钢箱梁桥有别于其他桥梁的显著特点。因此,在钢箱梁上进行沥青混凝土桥面铺装是十分困难的,有时甚至被称之为“世界难题”。其主要原因是钢箱梁上的沥青混凝土铺装层的使用条件和受力状态十分恶劣。它要求铺装层不仅要有良好的追随钢桥变形的适应能力,同时还要在高温和汽车荷载作用下不能产生过大的推移变形。另外,还要求铺装结构要具有良好的不透水性,以防止铺装层渗水导致钢箱梁锈蚀。在满足这些要求的同时,它还要求铺装层要有较长的使用寿命和耐疲劳开裂等特性。

以往的研究多集中于对铺装层沥青混凝土特性的考察,试图选配出一种特殊的沥青混凝土能兼顾上述所有的使用要求。当前较流行的双层 SMA 的铺装结构即是这种意图的一种体现。但从某些大桥实际使用情况看,效果不甚理想,铺装层的推移开裂现象十分严重,有的裂缝宽度已超过 20 cm,深度直达钢板表面,而且难以通过简单修复使其稳定。究其原因,是以往的研究偏重于铺装层沥青混凝土自身,对光滑的钢板顶面和高温状态所导致的铺装层的界面抗剪问题认识不足,选用的界面处置方式和材料也不妥。

## 1 对钢桥面铺装开裂原因的分析

过去,钢桥面采用的界面处置方式是在钢板上进行喷砂除锈后喷涂一层富锌底漆,对钢板进行防腐。然后由洒布机在高温状态下喷洒一层高粘度的防水粘结材料和一层预拌碎石颗粒,形成所谓的防水粘结层,用于保障铺装层对钢板的良好粘结和提

收稿日期: 2003-09-10

- [2] Rion rising. Greece's major bridge take shape. Bridge design & engineering 2003 First Quarter Issue No. 30.
- [3] Firm Foundations. Bridge design & engineering 1999 Second Quarter Issue No. 15.
- [4] Paints & Coatings. Bridge design & engineering 2002 Fourth Quarter Issue No. 30.

- [5] 多间径连续斜张桥(その2) Bridges With Multiple Cable-Stayed Spans. プレストレスト コンクリート, Journal of Prestressed Concrete, 2002, (44)5.
- [6] 金增洪. 多跨斜拉桥(上)[J]. 中交公路规划设计院技术论坛 2003, (2).