

**D**esigning and Construction of Suspension Bridge  
Main Cable Anchor Transferring Load Distributively

# 悬索桥主缆分布传力 锚固系统设计与施工

娄学全 武焕陵 崔冰 赵灿晖 著



人民交通出版社  
China Communications Press

# 悬索桥主缆分布传力 锚固系统设计与施工

娄学全 武焕陵 崔 冰 赵灿晖 著

人民交通出版社



# 前言

随着悬索桥跨度的增大,主缆拉力不断攀升。主缆锚固系统是将主缆拉力传递到锚碇的重要传力结构,其工作性能的好坏决定了主缆能否正常工作、结构整体是否安全,是悬索桥的关键结构之一。强大的主缆拉力对锚固结构可靠性、耐久性提出了挑战。

传统的悬索桥主缆锚固系统主要有钢框架后锚梁锚固系统和预应力锚固系统,二者均将主缆拉力传递至后锚面。在南京长江四桥的设计中,作者提出了悬索桥主缆锚固的分布传力锚固系统,该锚固系统以传剪器作为主要传力元件,变刚性承载为柔性承载,变集中传力为分布传力,减小了锚体混凝土的应力集中,扩大了索力在锚体中的传递区域。该锚固系统已在南京长江四桥主桥工程中得到成功应用,并取得了良好的经济效益和社会效益。

由于分布传力锚固系统结构新颖,无论是设计还是施工均无先例可循。在本书中,针对分布传力锚固系统,作者从构造设计、计算分析方法、锚固结构制造与安装、锚体混凝土施工等方面进行了较为详细的探讨,并提出了相应的方法,基本形成了设计、施工成套技术。第1章简要介绍了传统的钢框架后锚梁锚固系统和预应力锚固系统构造特点、施工及应用情况,提出了分布传力锚固系统的初步构想。第2章系统地介绍了分布传力锚固系统的构造设计方法和原则,并介绍了南京长江四桥分布传力锚固系统的设计。第3章通过模型试验探明了分布传力锚固结构的传力机理和基本力学性能。第4章介绍了锚固结构设计计算方法,其中简化有限元和基于荷载—滑移变形协调的计算方法均为在南京长江四桥设计中研发的新方法。第5章和第6章为施工技术部分,以南京长江四桥为例介绍了分布传力锚固系统施工技术,其中第5章介绍了锚固结构的制造与安装,提出了锚固结构安装的叠层空间定位法等新技术;第6章介绍了锚体和传剪器的施工。上述设计、施工方法可供工程技术人员及研究者参考。

作者自2003年对钢筋混凝土榀传剪器进行了深入研究,并首次将其应用于南京长江三桥钢塔钢—混凝土结合段中。在南京长江四桥的设计中,基



于钢筋混凝土棒传剪器,开发了悬索桥主缆分布传力锚固系统。书中对钢筋混凝土棒传剪器力学性能的研究虽然多是在南京长江四桥的设计中完成的,但其研究结果具有普适性,可供设计人员和研究人员参考。

本书中的研究成果已通过有关部门组织的鉴定,具有原创性,大部分研究成果未公开发表过,内容新颖。

科学技术是不断发展的,对科学技术问题的认识也在不断深入。本书中的观点仅代表作者当前对这些问题的认识,随着研究的深入,某些观点可能会有改进。限于作者的认识水平和分析能力,书中难免有不足和不当之处,敬请读者批评指正。

诚挚感谢所有为本书的出版作出贡献的朋友,感谢江苏省交通运输厅科学研究计划项目“大跨度悬索桥新型主缆锚固系统设计施工关键技术研究”课题组的全体同仁,同时感谢中央对高校基本科研业务费的资助。

作 者

2012 年 3 月



# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第1章 悬索桥锚固系统概述</b> .....     | 1  |
| 1.1 悬索桥的锚固系统 .....             | 1  |
| 1.2 钢框架后锚梁锚固系统 .....           | 3  |
| 1.2.1 钢框架后锚梁锚固系统的构造 .....      | 3  |
| 1.2.2 钢框架后锚梁锚固系统的应用 .....      | 5  |
| 1.2.3 施工方法 .....               | 8  |
| 1.3 预应力锚固系统 .....              | 9  |
| 1.3.1 预应力锚固系统构造 .....          | 9  |
| 1.3.2 预应力锚固系统的应用.....          | 13 |
| 1.3.3 施工方法.....                | 16 |
| 1.4 分布传力锚固系统的构思.....           | 18 |
| 1.4.1 两种传统锚固系统比较.....          | 18 |
| 1.4.2 分布传力锚固系统的初步构想.....       | 20 |
| 本章参考文献 .....                   | 21 |
| <b>第2章 分布传力锚固系统的构造设计</b> ..... | 23 |
| 2.1 分布传力原理及实现途径.....           | 23 |
| 2.1.1 分布传力原理.....              | 23 |
| 2.1.2 分布传力锚固系统基本构造及优点.....     | 25 |
| 2.2 传剪器性能的试验研究及选配.....         | 25 |
| 2.2.1 试验方法.....                | 26 |
| 2.2.2 加载全过程力学行为.....           | 28 |
| 2.2.3 破坏形态.....                | 30 |
| 2.2.4 承载机理.....                | 32 |
| 2.2.5 传剪器的选配.....              | 33 |
| 2.3 钢筋混凝土棒传剪器设计指标的确定.....      | 34 |
| 2.3.1 传剪器工作状态的确定及容许滑移量.....    | 34 |
| 2.3.2 容许承载力的计算.....            | 35 |



|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| 2.4 传剪器数量的确定          | 36        |
| 2.5 传剪器布置原则及钢板厚度的选择   | 38        |
| 2.5.1 传剪器布置原则         | 38        |
| 2.5.2 钢板厚度的选择         | 38        |
| 2.6 应用实例——南京长江四桥      | 39        |
| 2.6.1 总体设计            | 39        |
| 2.6.2 锚固板设计           | 40        |
| 2.6.3 钢拉杆及索股锚固结构      | 42        |
| 2.6.4 末端承压板           | 42        |
| 2.6.5 锚体设计            | 43        |
| 2.6.6 结构分析验证          | 44        |
| 本章参考文献                | 46        |
| <b>第3章 传力机理与承载力试验</b> | <b>48</b> |
| 3.1 试验模型的设计           | 48        |
| 3.1.1 总体构思            | 48        |
| 3.1.2 模型设计            | 50        |
| 3.1.3 加载及测试           | 52        |
| 3.2 传力机理及承载力          | 54        |
| 3.2.1 传力机理            | 54        |
| 3.2.2 承载力验证           | 59        |
| 3.3 加载全过程滑移分析         | 59        |
| 3.4 索股锚固构造的应力         | 65        |
| 本章参考文献                | 66        |
| <b>第4章 锚固结构计算方法</b>   | <b>68</b> |
| 4.1 三维实体有限元分析         | 68        |
| 4.1.1 单元的选择           | 68        |
| 4.1.2 本构关系            | 69        |
| 4.1.3 加载方式            | 72        |
| 4.1.4 应用实例            | 72        |
| 4.1.5 三维实体有限元的局限性     | 74        |
| 4.2 简化有限元分析法          | 75        |
| 4.2.1 计算原理            | 76        |
| 4.2.2 传剪器弹簧刚度的计算      | 76        |



|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 4.2.3 应用实例——南京长江四桥锚固结构分析·····   | 80         |
| 4.3 基于荷载—滑移变形协调的计算方法·····       | 83         |
| 4.3.1 荷载—滑移变形协调理论模型的建立·····     | 83         |
| 4.3.2 方程的求解·····                | 86         |
| 4.3.3 应用实例·····                 | 87         |
| 本章参考文献·····                     | 89         |
| <b>第5章 锚固结构制造与安装</b> ·····      | <b>91</b>  |
| 5.1 工程概述·····                   | 92         |
| 5.2 锚固结构制造·····                 | 94         |
| 5.2.1 总体方案·····                 | 94         |
| 5.2.2 锚固结构钢筋混凝土樁穿孔加工技术·····     | 94         |
| 5.2.3 锚固结构单元变形控制及现场吊装工装·····    | 96         |
| 5.2.4 锚固结构预拼装及匹配工艺·····         | 98         |
| 5.2.5 南京长江四桥锚固结构制造效果·····       | 106        |
| 5.3 锚固结构安装及精确定位·····            | 106        |
| 5.3.1 空间叠层定位的原理·····            | 107        |
| 5.3.2 南京长江四桥锚固结构吊装及定位方案·····    | 108        |
| 5.3.3 锚固板吊装定位的实施·····           | 113        |
| 5.4 定位测量与控制·····                | 120        |
| 5.4.1 测量与控制方法概述·····            | 120        |
| 5.4.2 锚固钢板测点布置及理论坐标计算·····      | 122        |
| 5.4.3 底层锚固板的定位与测量·····          | 125        |
| 5.4.4 安装定位测量成果及分析·····          | 128        |
| 本章参考文献·····                     | 129        |
| <b>第6章 锚体及钢筋混凝土樁传剪器施工</b> ····· | <b>130</b> |
| 6.1 配合比及施工工艺基本要求·····           | 130        |
| 6.1.1 原材料·····                  | 130        |
| 6.1.2 配合比·····                  | 131        |
| 6.1.3 温度控制指标·····               | 132        |
| 6.1.4 混凝土浇筑工艺·····              | 132        |
| 6.1.5 混凝土的养护·····               | 133        |
| 6.2 锚体混凝土配合比设计·····             | 133        |
| 6.2.1 原材料的选择·····               | 134        |



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 6.2.2 混凝土配合比 .....           | 134 |
| 6.3 钢筋混凝土樁传剪器施工 .....        | 136 |
| 6.3.1 钢筋施工 .....             | 136 |
| 6.3.2 混凝土施工——单侧、分层浇筑工艺 ..... | 137 |
| 6.4 锚体大体积混凝土温度控制 .....       | 139 |
| 6.4.1 温度控制总体方案 .....         | 139 |
| 6.4.2 锚体混凝土的分层 .....         | 140 |
| 6.4.3 温度控制方案的计算验证 .....      | 141 |
| 6.5 温度控制方案的实施 .....          | 146 |
| 6.5.1 混凝土浇筑温度控制 .....        | 146 |
| 6.5.2 冷却水管的布设及流量控制 .....     | 148 |
| 6.5.3 温度控制监测及效果 .....        | 149 |
| 6.6 混凝土的养护 .....             | 157 |
| 本章参考文献 .....                 | 157 |



# 第1章 悬索桥锚固系统概述

悬索桥是以悬索作为主要承重结构的桥梁,长期以来,因其受力性能好,跨越能力强,结构轻盈美观,而成为跨越大江大河、海峡港湾、高沟深谷的主要桥型之一。迄今为止,对于跨度在1 500m 以上的特大跨桥梁,悬索桥仍是唯一的选择。

悬索桥的主要构造包括主缆、桥塔、索鞍、吊杆、加劲梁、锚固结构、锚碇等,构造简单,受力明确。因主缆承受拉力,材料利用率高,现代悬索桥多采用高强钢丝作为主缆的材料。高强主缆的采用为悬索桥成为大跨度桥梁提供了重要的物质基础。

悬索桥是较为典型的分阶段施工桥梁,施工阶段加劲梁的自重荷载完全由主缆承受,二期恒载则由主缆和加劲梁分担,其中主缆分担大部分荷载。运营阶段的荷载则由主梁传递至吊杆,再由吊杆传递至主缆,主缆拉力则由锚固系统传递给锚碇。可见主缆是悬索桥的主要承重结构,也是全桥结构的生命线。

随着悬索桥跨度的增加,主缆拉力不断增大,跨度1 300m 左右的悬索桥,单根主缆拉力可达250MN 以上,例如在建的我国南京长江四桥(跨度166m + 409m + 1 418m + 364m + 119m),单根主缆拉力达280MN,而日本明石海峡大桥仅恒载作用下的单根主缆拉力就达537.64MN,最大拉力更达644.9MN。

锚固系统是将主缆拉力传递到锚碇的重要传力结构,是悬索桥的关键结构之一,主缆锚固系统工作性能决定了主缆能否正常工作、结构整体是否安全。强大的主缆拉力对锚固结构安全性、可靠性、耐久性提出了挑战。在南京长江四桥的建设中,工程师提出了主缆分布传力锚固系统这一新型锚固结构体系,由于结构新颖,无先例可循,必须解决新结构的工程设计理论和工程施工成套技术等诸多难题。

## 1.1 悬索桥的锚固系统

悬索桥主缆的锚固方式分为自锚和地锚两种。锚碇是锚固地锚式悬索桥主缆的重要结构物。根据传力机理的不同,锚碇可以分为重力锚和隧道锚两种。



重力锚主要以锚碇块自重来抵抗主缆张力在竖直方向的分量,并在基础层面形成足够的压力,以保证索力水平分量的传递,因此重力锚的锚碇块一般都由尺寸巨大的混凝土块体构成,如图 1-1 所示。在丹麦大贝尔特东桥中,为了在景观上与悬索桥主缆、桥塔、主梁等的细长构件相协调,采用了三角形空腹构架式重力锚,如图 1-2 所示。

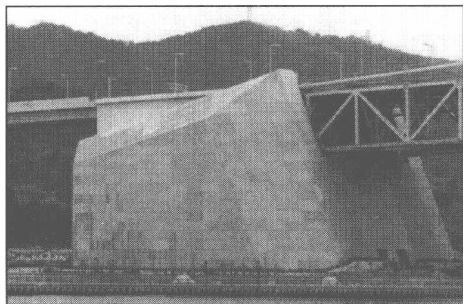


图 1-1 重力锚锚碇块



图 1-2 大贝尔特东桥三角形空腹构架重力锚

在隧道锚中,主缆的巨大拉力通过索股拉杆传入隧道锚室填充的混凝土中,经锚碇与围岩的接触传递到围岩体。这种锚固体系一般要求有坚固的山体岩壁可资利用,但在软弱破碎地质环境中,则可以采用带有预应力岩锚的隧道式复合锚碇系统,如图 1-3 所示。

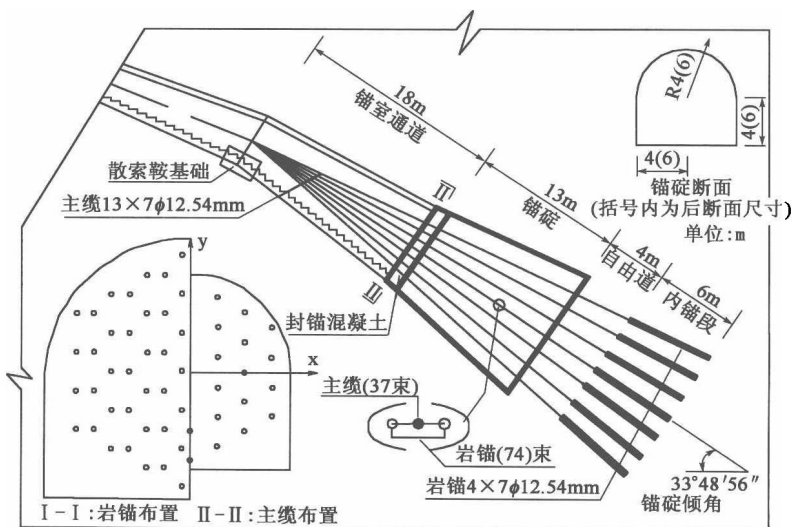


图 1-3 带有预应力岩锚的隧道式复合锚碇系统示意图



迄今为止,由于隧道锚对地质条件的要求较高,因而大部分情况下都因地质条件所限而采用重力锚。本书所讨论的主缆锚固系统主要针对重力式锚碇。

主缆锚固系统是主缆索股向锚体传力的连接及过渡部分,包括埋置于混凝土锚体内的锚固结构和与主缆索股相连的连接结构。按结构构造,传统的悬索桥主缆锚固系统分为钢框架后锚梁锚固系统和预应力锚固系统两种基本类型。

## 1.2 钢框架后锚梁锚固系统

### 1.2.1 钢框架后锚梁锚固系统的构造

钢框架后锚梁锚固系统由钢拉杆和后锚梁(或称背梁)及施工用支承桁架组成(图 1-4),三者形成钢框架,其中钢拉杆和后锚梁是主要的锚固结构。施工时首先将钢拉杆预埋于锚体混凝土中,通过钢拉杆前端的索股连接构造完成锚固。索股锚杯下通常设有垫片,通过变化垫片的累积厚度来调节索股的长度和松紧(图 1-5)。

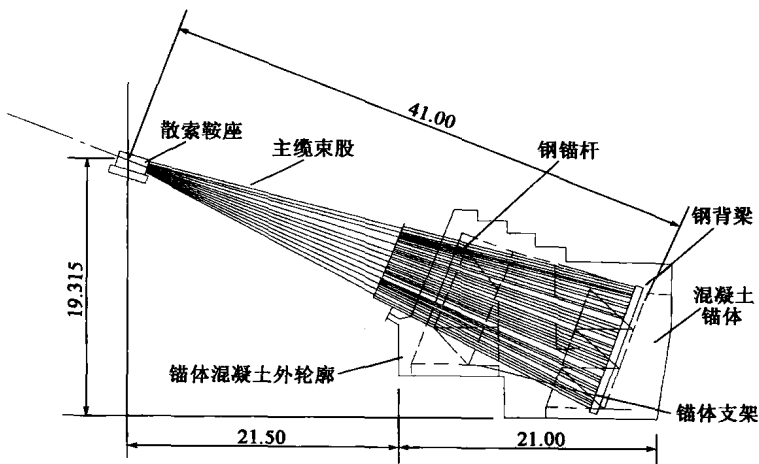


图 1-4 钢框架后锚梁锚固系统(支承桁架未示)(尺寸单位:m)

钢拉杆是将巨大的主缆索股拉力传递到后锚梁的构造,钢拉杆前端伸出前锚面,通过索股连接构造与索股直接连接,是锚固锚头的重要部分。索股连接构造通过锚头承压面将索股拉力传递至焊于拉杆腹板上的承压板和加劲板,实现索力在索股和拉杆间的传递(图 1-5)。为了将索股拉力直接传递到后锚梁,对于钢拉杆,需采取措施设置无黏结层,防止钢拉杆与混凝土黏结。在早期,钢拉



杆常采用眼杆链形式(图 1-6);目前通常采用直线形的长钢杆(图 1-7),如我国的虎门大桥、西陵长江大桥均采用了宽翼缘工字形截面的钢拉杆。

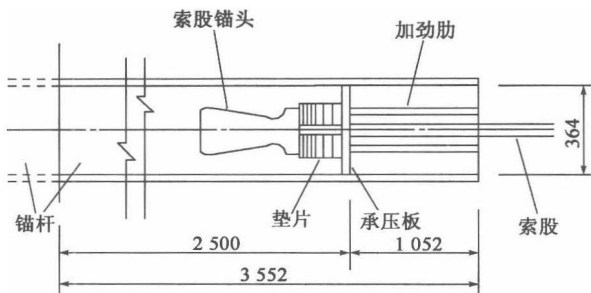


图 1-5 索股锚固连接构造示意(锚固箱式)(尺寸单位:mm)

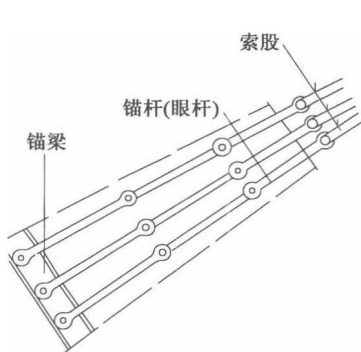


图 1-6 钢拉杆—眼杆链

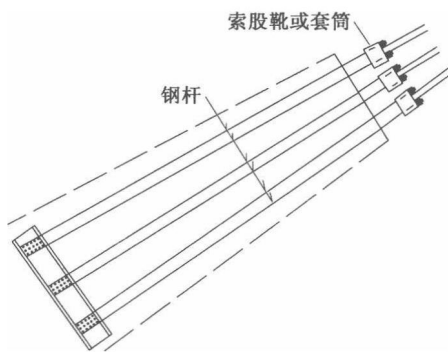


图 1-7 钢拉杆—长钢杆

后锚梁的作用是将拉杆力转换成锚体混凝土承受的压力,并广泛地扩散到整个锚体。后锚梁通常采用钢板焊接而成,与钢拉杆的连接可采用螺栓或焊接的方式。

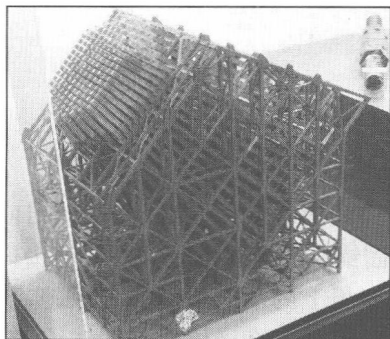


图 1-8 后锚梁锚固系统支承桁架示意

以上翼板作为承压面,翼板宽度的确定以传递至混凝土的压应力小于混凝土的容许应力为原则,当然,翼板自身的强度也需满足要求。腹板的高度则主要由后锚梁与钢拉杆连接构造的尺寸决定。

支承桁架(图 1-8)是施工期安装钢拉杆、后锚梁时的施工辅助设施,其作用是在浇筑锚体混凝土之前为钢拉杆、后锚梁提供临时支承,虽不是主缆的传力构造,作用却十分重要。支承桁架的安装精度、刚度很大程度上



决定了锚固结构的安装精度,通常根据索股的散射线形、锚固结构的构造来确定其构造的空间布置及尺寸。

### 1.2.2 钢框架后锚梁锚固系统的应用

钢框架后锚梁锚固系统的应用范围十分广泛,应用历史也十分悠久,国外的悬索桥尤其是早期的悬索桥基本均采用钢框架后锚梁锚固系统,20 世纪 90 年代修建的世界跨度最大的悬索桥——日本明石海峡大桥也采用了该锚固系统。

#### (1) 美国乔治·华盛顿桥

美国乔治·华盛顿桥建于 1927 年,采用钢框架后锚梁锚固系统(图 1-9)。该桥共 4 根主缆,水平力合计达 980MN,向上的竖向分力达 508MN,钢拉杆采用图 1-6 所示的眼杆链形式,在一缆的 122 根眼杆上为钻有测距孔眼的手持应变仪,并布置有测力计,索股通过靴根与眼杆链相连,在眼杆链的后端布置有长度为 21m 的后锚梁。

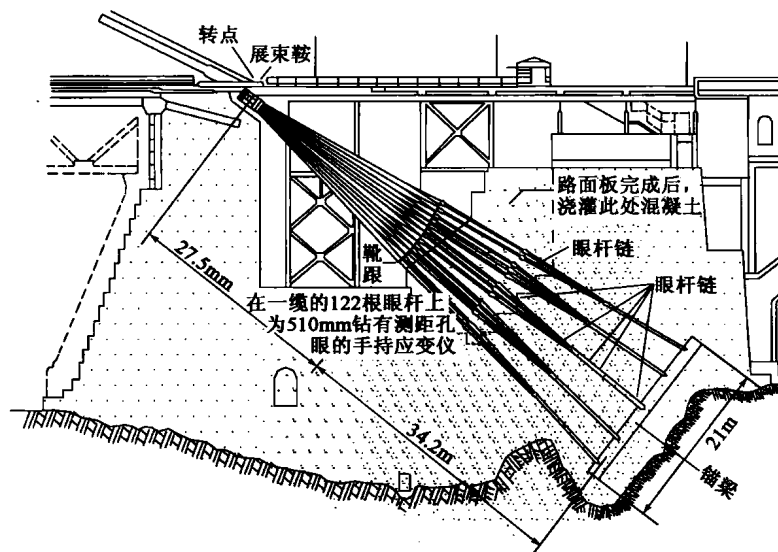


图 1-9 乔治·华盛顿桥纽约岸锚碇

#### (2) 美国金门大桥

金门大桥建于 1933 年,也采用钢框架后锚梁锚固系统(图 1-10)。主缆索股通过索靴以套结的方式与钢拉杆相连,钢拉杆也采用眼杆链的方式,眼杆的数量根据主缆索股数决定,眼杆链进入锚体混凝土的数量一般为 3~4 节,最后一节连接于后锚梁上。索股与靴套连接后,可通过靴套内的垫片来调节索股的长



度和松紧。由于眼杆与混凝土的黏结力不易掌握,计算时假定全部主缆拉力均传递至后锚面。为使计算与实际结构一致,在眼杆上采用了无黏结涂层,以破坏眼杆与混凝土的黏结力。

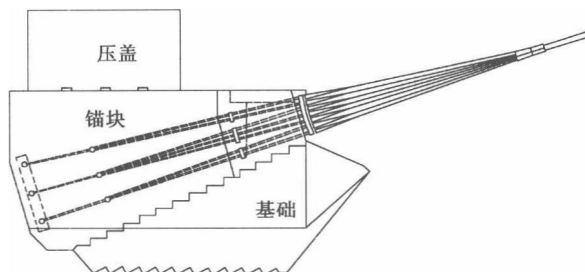


图 1-10 金门大桥主缆锚固系统

由于眼杆施工较为繁杂,后来日本和英国的悬索桥采用图 1-7 所示的长钢杆代替眼杆,我国的西陵长江大桥、虎门大桥、汕头海湾大桥也采用了这一形式。

### (3) 虎门大桥

图 1-11 为虎门大桥的钢框架后锚梁锚固系统。该桥采用宽翼缘工字形钢拉杆,索股与预埋在锚体内的钢拉杆在锚前进行连接。该桥的主缆由 110 根索股组成,为使各索股锚固点位置与其在散索鞍内的布置均成轴对称,钢拉杆在设计时采用了单束锚杆和双束锚杆的布置方式(图 1-12)。钢拉杆的空间布置与索股的散射线形完全一致,索股拉力可顺畅地传递到钢拉杆、后锚梁。钢拉杆采用外涂沥青作为无黏结隔离层,防止钢拉杆与锚体混凝土的黏结干扰力流的传递。受运输能力的限制,钢拉杆分为三段制造、安装,各段间采用普通螺栓连接。

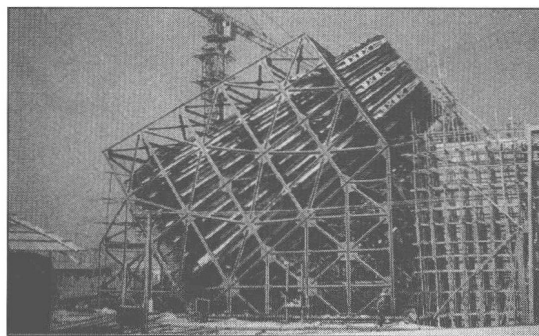


图 1-11 虎门大桥主缆锚固系统

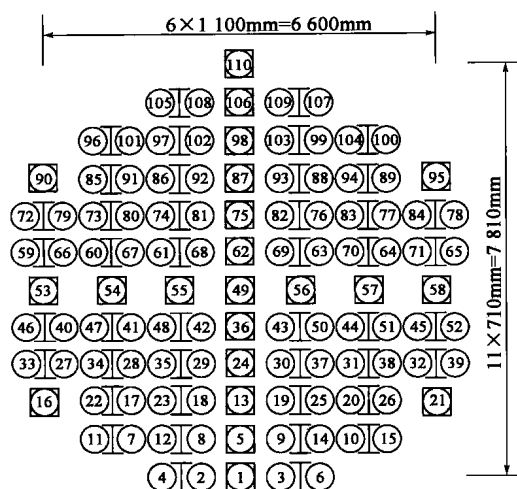


图 1-12 虎门大桥锚固面索股布置

#### (4) 西陵长江大桥

西陵长江大桥也采用宽翼缘工字形钢拉杆,索股与预埋在锚体内的钢拉杆在锚前进行连接,锚杆也分为单束和双束两种。钢拉杆采用 A3 号钢板焊接而成,设计上未从节省钢材用量方面考虑,采用强度较高的低合金钢,其目的在于使杆件具有厚实的截面,万一因腐蚀导致截面削弱时,不至于过于敏感。

表 1-1 中列出了部分采用钢框架后锚梁锚固系统的大跨度悬索桥。

部分采用钢框架后锚梁锚固系统的大跨度悬索桥

表 1-1

| 桥 名      | 国家  | 修建年份 | 跨度(m)                               | 拉杆形式 |
|----------|-----|------|-------------------------------------|------|
| 布鲁克林桥    | 美国  | 1883 | 286 + 485 + 287                     | 眼杆链  |
| 乔治·华盛顿桥  | 美国  | 1927 | 181 + 1 067 + 198                   | 眼杆链  |
| 金门大桥     | 美国  | 1933 | 343 + 1 281 + 343                   | 眼杆链  |
| 维拉扎诺海峡大桥 | 美国  | 1959 | 370.3 + 1 298.4 + 370.3             | 眼杆链  |
| 新港桥      | 美国  | 1965 | 209.6 + 487 + 209.6                 | 长钢杆  |
| 萨拉扎桥     | 葡萄牙 | 1966 | 483.4 + 1 012.9 + 483.4             | —    |
| 东京港联络桥   | 日本  | 1987 | 114 + 570 + 114                     | 长钢杆  |
| 南、北备赞大桥  | 日本  | 1988 | 274 + 1 100 + 274 + 174 + 990 + 274 | 长钢杆  |
| 明石海峡大桥   | 日本  | 1998 | 960 + 1 991 + 960                   | 长钢杆  |
| 下津井大桥    | 日本  | 1988 | 230 + 940 + 230                     | 长钢杆  |



续上表

| 桥 名    | 国家 | 修建年份 | 跨度(m)             | 拉杆形式 |
|--------|----|------|-------------------|------|
| 虎门大桥   | 中国 | 1997 | 302 + 888 + 348.5 | 长钢杆  |
| 汕头海湾大桥 | 中国 | 1995 | 154 + 452 + 154   | 长钢杆  |
| 西陵长江大桥 | 中国 | 1996 | 225 + 900 + 225   | 长钢杆  |

### 1.2.3 施工方法

后锚梁锚固系统的安装一般均需搭设专门的支架作为锚固结构的定位装置。

虎门大桥锚固结构采用了整体桁架式支架(图 1-11),这是后锚梁锚固系统常用的支架形式。在后锚梁和钢拉杆安装之前先精确安装支撑桁架,通过桁架定位精度控制后锚梁和钢拉杆的安装精度。支撑桁架采用型钢制作,后锚梁与钢拉杆的设计与支架设计同步考虑,并设计可靠的支承点,即将支承体系作为锚固结构的一部分。支架分块制作,并进行整体预拼装,检验其制作精度及其与钢拉杆的匹配精度。施工现场先精确定位支承体系,然后安装锚固结构,安装过程中需测量锚固结构的空間位置,并作适当调整。

汕头海湾大桥因锚碇规模较虎门大桥要小,采用了前后临时支撑的桁架形式(图 1-13)。支架底部预埋于基础,安装由下到上,按后支架和前支架的顺序进行,每拼装一个单元体,随即安装连接系杆件,保证支架结构的稳定性。安装完支架后,按由中间向两侧的顺序安装后锚梁。由于后锚梁安装位置与基坑平

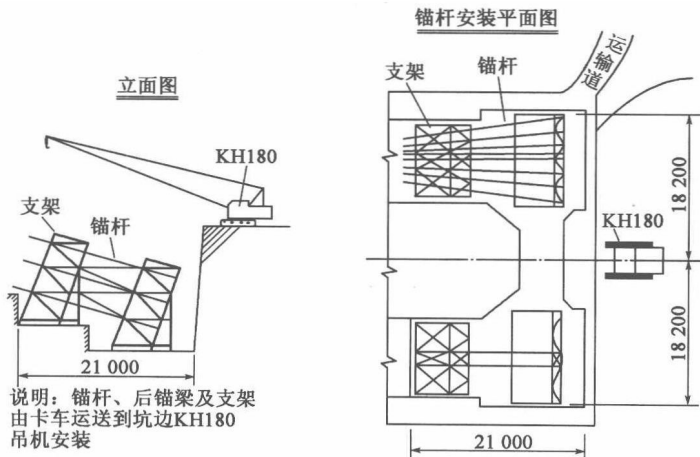


图 1-13 汕头海湾大桥后锚梁锚固结构安装(尺寸单位:mm)



面成仰角,安装时需特别注意找准重心位置,以便安装对位和精确定位。大致定位后用导链拴挂,通过紧松导链,控制后背梁的俯仰角度来达到定位要求。待精确定位后,点焊底座和各层横杆相关部位。

钢拉杆采取分段安装的方式,即先安装拉杆与后背梁连接部分,然后安装拉杆最前端部分。以泡沫塑料和油毛毡衬垫包裹锚杆,并作为无黏结层,并使之与杆件密贴。

## 1.3 预应力锚固系统

### 1.3.1 预应力锚固系统构造

预应力锚固系统包括锚固预应力体系(主要有钢绞线和高强预应力钢拉杆两种),索股锚固连接构造,前、后锚锚具,预应力管道定位系统(图 1-14)。锚固预应力体系,索股锚固连接构造,前、后锚锚具是主要的锚固结构。传力途径为:主缆通过索股锚固连接构造与锚固预应力钢绞线相连,并将主缆拉力传递至预应力体系,通过预应力锚具分散到锚体混凝土中。由于预应力钢绞线强度高,通常可采用 2 索股或 4 索股的大吨位钢绞线锚固。

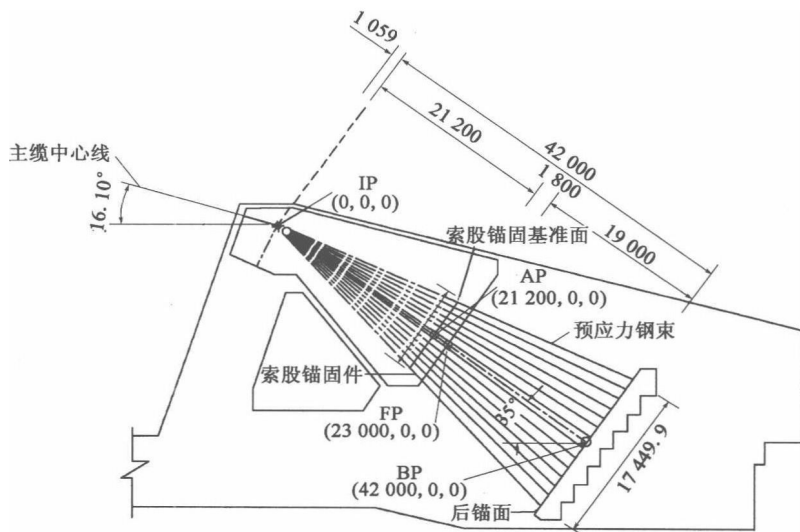


图 1-14 预应力锚固系统(临时支撑架未示)(尺寸单位:mm)

预应力锚固系统的张拉锚固方式分为两种,其一可称为后锚张拉式,常用于