

Yuyingli Hunningtu Xiezhangqiao

预应力混凝土斜张桥

周念先 等编
杨共树

人民交通出版社

第六章由上海城建学院金成棣与交通部重庆公路科学研究所丁香芸、柴清福编写。

第七章由同济大学周念先编写。

第八章由交通部重庆公路科学研究所编写。

第九章由同济大学周念先编写。

参 考 文 献

- 〔0—1〕 预应力混凝土斜张桥设计构思——周念先，中南地区公路科技情报网，1979年6月出版。
- 〔0—2〕 斜拉桥设计与施工——小沃尔特·波尔多奈等著，李延直等译校，中国建筑工业出版社，1980年2月出版。
- 〔0—3〕 斜拉桥理论与设计——M.S.特罗伊茨基著，王学俊、程庆国、顾发祥等译，中国铁道出版社，1980年6月出版。

内 容 提 要

本书介绍预应力混凝土斜张桥在国内外取得的成就,斜张桥总体设计构思以及塔、梁、索等各部构造及施工方法。在力学方面除作了静力与动力分析外,还对斜张桥的空气动力稳定性和风洞试验作了必要的介绍。最后,对斜张桥在我国的发展方向提出了作者的见解。并列出了某桥完整的计算过程以供读者参考。

本书可供斜张桥的设计、施工人员以及高等院校师生参考。

预应力混凝土斜张桥

周念先 等编
杨共树

人民交通出版社出版发行
(北京和平里东街10号)

各地新华书店经销
朝阳区展望印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 - \frac{1}{16}$ 印张: 19.75 字数: 457千

1989年4月 第1版

1989年4月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2,600册 定价: 11.90元

ISBN 7-114-00193-2

U·0113

前 言

鉴于斜张桥的设计、施工与科研在我国都有迅速的发展，而国内的参考书籍到目前为止仅有1979年出版的“预应力混凝土桥设计构思”〔0—1〕和1980年出版的两本中译本《斜拉桥设计与施工》〔0—2〕与《斜拉桥理论与设计》〔0—3〕，而且两本译文中均侧重于钢斜张桥，故希望能有反映国情的较新著作问世。

自1975年以来，我国已建成斜张桥13座，施工中的还有8座，其中除一座铁路桥外其余均属公路桥，并且除第一座钢斜张桥外，均为混凝土的。所以，我们就以公路混凝土斜张桥为对象，以深入浅出为原则编写此书。

书中第一章介绍了国内外斜张桥的发展简史与适用场合，使得读者先有一般性了解。然后通过第二章“设计构思”提供综合考虑斜张桥的设计与施工的思路、步骤与方法，并强调了必须及早注意斜张桥的动力分析问题，才能较好地拟定出塔、梁与索的各部形状与尺寸，使其能符合静力与动力的双重要求。

接着用三、四、五三章分别介绍了塔、梁、索的构造与施工以及它们之间的联系。在所举实例中除国外一些典型桥梁外，多半结合国内的实践予以介绍，以便读者能根据国内的材料与施工条件对照选用，并可向有关单位进行更详细的了解。

第六章静力分析按照交通部1985年的规范介绍一般计算原理，并特别强调了混凝土斜张桥中的一个关键问题——混凝土的徐变，并对材料的、形状的非线性问题提供了考虑途径与具体减小非线性影响的措施。

第七章动力分析除阐明其必要性及其机理外，主要针对斜张桥的空气动力稳定性与抗震问题作了较详细的分析，并提供了抗风与抗震的具体措施。

在第八章中列出了一座混凝土公路斜张桥算例以供读者参考，由于它是我国的实例之一，故有实用价值。

在结束语中根据近几年国内外最新发展情况，一方面回顾总结了以往的成就，另一方面展望了未来。还提出了我国斜张桥的发展方向及在设计、施工与科研三方面尚待探讨的问题。

此书由交通部重庆公路科学研究所与同济大学的部分同志合写而成，限于水平，不妥之处在所难免，尚祈读者予以批评指正。

本书编写分工如下：

前言由同济大学周念先编写。

第一章由同济大学周念先与交通部重庆公路科学研究所杨共树合编。

第二章由同济大学周念先编写。

第三章由交通部重庆公路科学研究所郭宝强编写。

第四章由交通部重庆公路科学研究所柴清福编写。

第五章由交通部重庆公路科学研究所宁世伟编写。

目 录

第一章 预应力混凝土公路斜张桥的发展与适用场合	1
1.1 预应力混凝土公路斜张桥的发展简史	1
1.1.1 国外预应力混凝土公路斜张桥的发展简史	1
1.1.2 国内斜张桥的发展	8
1.2 斜张桥的特点简介与适用场合	13
1.2.1 特点简介	13
1.2.1.1 梁矮而跨越能力大	14
1.2.1.2 比悬索桥优越	14
1.2.1.3 设计特点	15
1.2.1.4 造型美观	15
1.2.2 适用场合	16
第二章 斜张桥的总体构思	18
2.1 总体布置、体系比较与选择	18
2.1.1 总体布置	18
2.1.1.1 立面布置	18
2.1.1.2 平面布置	20
2.1.1.3 侧面布置	21
2.1.2 体系比较	23
2.1.2.1 从梁方面看	23
2.1.2.2 从索方面看	24
2.1.2.3 从塔方面看	24
2.1.2.4 从支承条件看	24
2.1.3 体系选择	25
2.1.4 辅助墩	26
2.1.5 协作体系	27
2.1.5.1 用简支梁或半悬臂梁做协作体系	27
2.1.5.2 用连续梁做协作体系	27
2.1.5.3 用小斜张桥做协作体系	28
2.2 主梁外形及其轮廓尺寸设计	28
2.2.1 主梁跨度 L 与宽度 B 之比 L/B	29
2.2.2 主梁的宽高比 B/h	29
2.2.3 主梁的跨高比 L/h	30
2.3 各种索型的适用场合及其选择	30

2.3.1	三种主要索型及其适用场合	30
2.3.2	疏索与密索	31
2.3.3	单索面与双索面	31
2.3.4	竖索面与斜索面	32
2.4	塔如何配合索与主梁进行设计	33
2.5	施工方案	34
2.5.1	施工方法与工序简介	34
2.5.1.1	悬臂施工法	34
2.5.1.2	平转法	34
2.5.1.3	顶推法	35
2.5.1.4	横移法	36
2.5.2	进度与经济	36
2.5.3	误差与安全度	37
2.6	设计要领	37
第三章	塔墩构造与施工	41
3.1	塔墩类型和塔梁墩之间的连接	41
3.1.1	塔的类型、优缺点及适用场合	41
3.1.2	墩的类型、优缺点及适用场合	43
3.1.3	塔、梁、墩之间的连接	44
3.2	塔、墩的构造	46
3.2.1	塔的横截面及配筋	46
3.2.2	索、塔锚固区构造	49
3.2.3	墩的构造及配筋	52
3.2.4	辅助墩的构造及竖向与水平向活动条件	55
3.3	墩、塔的施工	55
3.3.1	墩的施工	55
3.3.2	塔的施工	58
第四章	主梁构造与施工	62
4.1	几种典型主梁的构造	62
4.1.1	主梁立面构造	62
4.1.2	主梁截面形式	64
4.1.2.1	全封闭式整体箱形截面	64
4.1.2.2	半封闭式分离箱形截面	65
4.2	锚固区的构造与受力特征	66
4.2.1	锚固梁段及横梁构造	66
4.2.1.1	顶板设置锚固块形式	66
4.2.1.2	箱梁边肋锚固形式	66
4.2.1.3	边箱中部锚固形式	67
4.2.1.4	锚固横梁	68

4.2.2	拉索锚固区的受力特征	68
4.2.3	锚固类型的选择	72
4.3	支座与伸缩缝	73
4.3.1	支座类型与构造	73
4.3.1.1	橡胶支座	73
4.3.1.2	滚轴支座	74
4.3.1.3	链杆支座	74
4.3.1.4	滑板钢盆橡胶支座	74
4.3.1.5	设阻尼器盆式橡胶支座	76
4.3.2	伸缩缝形式与构造	77
4.3.2.1	梳齿型伸缩缝	77
4.3.2.2	预应力橡胶弹性伸缩缝	78
4.3.2.3	戴玛克式伸缩缝	79
4.4	主梁施工的主要方法	79
4.4.1	悬臂拼装法	79
4.4.2	悬臂浇注法	83
4.4.3	顶推法	89
4.4.4	平转法与支架法	92
第五章	索的构造与施工	97
5.1	索的构成与防锈	97
5.1.1	索用材料	97
5.1.2	斜索锚具	98
5.1.2.1	环销锚具	98
5.1.2.2	镦头锚具	98
5.1.2.3	冷铸锚具	99
5.1.2.4	槽销组合锚具	101
5.1.2.5	迪维达克式平行粗钢筋束锚具	101
5.1.3	斜索防锈	103
5.2	索与塔梁的连接	107
5.2.1	索鞍	107
5.2.2	索与梁的连接及索座	108
5.2.3	索端密封结构	109
5.3	索的施工	110
5.3.1	拉索的制作与临时防锈	110
5.3.2	索的运输及安装	116
5.3.2.1	索的运输	116
5.3.2.2	索的安装	116
5.3.3	索套制作	120
5.3.4	PE热挤索套的施工	121

5.4 索力的测定与调整	124
5.4.1 索力测定方法及仪器	124
5.4.1.1 电测法	124
5.4.1.2 钢索测力仪	127
5.4.1.3 数字直读式测力仪	128
5.4.2 索力调整	129
5.4.2.1 能够引起索力变化的一些因素	129
5.4.2.2 索力调整量的计算	130
5.4.2.3 索力调整时垫板插入量的计算	130
5.4.2.4 索力记调整张拉	131
5.4.3 换索措施	131
第六章 结构静力分析	133
6.1 斜张桥结构静力分析特点	133
6.1.1 引言	133
6.1.2 斜张桥的各种受力体系与特点	133
6.1.3 结构计算方法概述	134
6.2 采用规范与设计荷载	135
6.2.1 采用规范	135
6.2.2 计算荷载	136
6.3 斜索的结构特性	141
6.3.1 柔性索	141
6.3.2 半刚性索	143
6.3.3 刚性索	144
6.4 恒载内力与徐变内力重分布	145
6.4.1 刚性支承连续梁方案	145
6.4.2 指定应力法	146
6.4.3 考虑混凝土徐变影响的恒载内力重分布计算	146
6.5 斜张桥活载及其他影响的内力计算	161
6.5.1 按力法计算斜张桥平面结构在活载及其他因素影响下的内力	161
6.5.2 按直接刚度法计算平面结构在各种因素影响下的内力及变形	166
6.5.3 预应力引起的寄生内力计算	170
6.5.4 结构几何非线性问题的近似计算	171
6.5.5 斜张桥空间分析	174
6.6 斜张桥的稳定性及局部应力	189
6.6.1 塔、墩的稳定性	189
6.6.2 主梁及塔柱、索锚固区的局部应力	199
6.7 施工验算	199
6.7.1 悬臂施工法	200
6.7.1.1 悬臂拼装法	200

6.7.1.2 悬臂浇筑法	202
6.7.1.3 混合法	203
6.7.2 纵向顶推法	204
6.7.2.1 纵向顶推法简介	204
6.7.2.2 顶推法施工验算	204
6.7.3 平转法	206
6.7.3.1 方法简介	206
6.7.3.2 转动力矩和倾覆稳定安全度的验算	206
6.7.3.3 摩擦系数的测定和试转	207
6.7.3.4 上转盘受力的验算	207
第七章 斜张桥动力分析与设防措施	209
7.1 概述	209
7.2 风振问题	209
7.2.1 等效静力作用	209
7.2.2 风的动力作用	212
7.2.2.1 共振—涡流激振	212
7.2.2.1.1 对于固定的障碍物	212
7.2.2.1.2 对于弹性的障碍物	213
7.2.2.2 自激振动	214
7.3 减小风振的措施	216
7.3.1 梁的风振现象	216
7.3.2 梁的抗风措施	217
7.3.2.1 主孔的宽跨比 B/L	217
7.3.2.2 主梁的宽高比 B/h	218
7.3.2.3 设角钢导流器	220
7.3.2.4 设横向 π 形人行道板	222
7.3.2.5 加风嘴	222
7.3.2.6 腹板穿孔	222
7.3.2.7 其它方法	222
7.3.3 索的风振现象与减振措施	223
7.3.4 塔的风振现象与减振措施	224
7.4 风振试验	224
7.4.1 二维空间与三维空间的差别	224
7.4.2 小型烟风洞试验	225
7.4.3 风洞静力节段模型试验	225
7.4.4 风洞动力节段模型试验	226
7.4.4.1 节段模型设计与缩比选择	226
7.4.4.2 模型的材料与制作	228
7.4.4.3 总质量的调整	228

7.4.4.4 阻尼对数衰减率 δ 的考虑	229
7.4.4.5 模型装置与测试	229
7.4.5 全桥模型试验	229
7.4.6 真桥试验	231
7.5 行人不适之感的问题	232
7.6 地震问题	234
7.6.1 抗震原则	235
7.6.2 体系选择与抗震措施	235
7.6.3 抗震措施细节	236
7.6.4 模型试验特点	237
7.6.5 斜张桥在地震分析中的非线性问题与阻尼问题	237
第八章 预应力混凝土斜张桥计算实例	240
8.1 设计说明	240
8.2 基本设计资料	240
8.3 截面几何特性计算	249
8.4 纵向预应力钢束的估算及斜张索初拉力的确定	250
8.5 结构计算及箱梁内力	255
8.6 纵向钢束预应力损失计算	267
8.7 正常使用极限状态下的截面应力验算	273
8.8 承载能力极限状态下的斜拉索强度及箱梁强度计算	277
8.9 安装阶段箱梁截面应力验算	283
8.10 箱梁挠度、预拱度及斜拉索长度计算	285
8.11 塔架计算	288
第九章 结束语	295

第一章 预应力混凝土公路斜张桥的发展与适用场合

1.1 预应力混凝土公路斜张桥的发展简史

国外斜张桥的发展史在不少参考书与刊物中均有所介绍，故本书不拟多占篇幅作重复介绍，而仅略举特例说明几个发展阶段的特点，对国内的斜张桥则作较详细的介绍。

1.1.1 国外预应力混凝土公路斜张桥的发展简史

除在初期有过用钢筋混凝土试建的小型斜张桥之外，真正的预应力混凝土斜张桥是从委内瑞拉在1962年建成的马拉凯波桥开始的。

这座5孔235m的悬臂体系斜张桥是由独塔双悬臂梁带35m挂孔作为一个单元的5次重复，如图1-1。该桥是由意大利毛朗底（Morandi）〔1-1〕工程师设计施工而成的，是第一代预应力混凝土斜张桥的先锋，并为近年来越来越多地采用独塔斜张桥提供了范例。（其构造细节见第3章）

当时认为该桥结构形式简洁、受力明确、斜索养护集中都是它的优点，并且立刻就显示出预应力混凝土斜张桥具有较大的跨越能力，使得后人敢于追随前进。随后又陆续建造了几座疏索（索少而索距大）体系斜张桥，发现疏索体系的索距 λ （索与塔或索与索之间的水平距离）太大，主梁必须很高、强度很大才能承受得住这中间的荷载，导致主梁很重，配筋也多。于是，便从疏索（即 λ 大的）体系转向密索（即 λ 小到5~10m）体系（密索体系的优越性很多，将在第2章中介绍），从而发展到第二代的密索体系斜张桥。

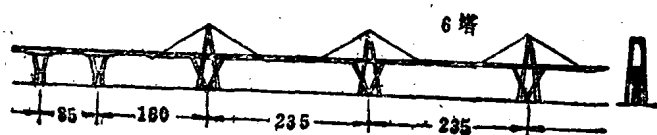


图1-1 马拉凯波桥 尺寸单位: m

密索体系的代表作有：

① 法国1977年建成的伯劳东纳（Brotonne）桥，〔1-2〕，主跨220m、独柱式双塔单索面、索距 $\lambda = 6\text{m}$ 。由于单索面不能提供抗扭刚度，故主梁采用高3.80m的梯形箱梁，为其桥宽19.20m的1/5，为其桥跨的1/84，如图1-2所示。

② 美国的柏次柯—坎纳威克（Pasco—kenne—wick）简称P—K桥，〔1-3〕，主跨299m，门式双塔、双索面，索距 $\lambda = 8.10\text{m}$ ，主梁高2.13m，为其桥宽24m的1/11，为其桥跨的1/140，如图1-3所示。

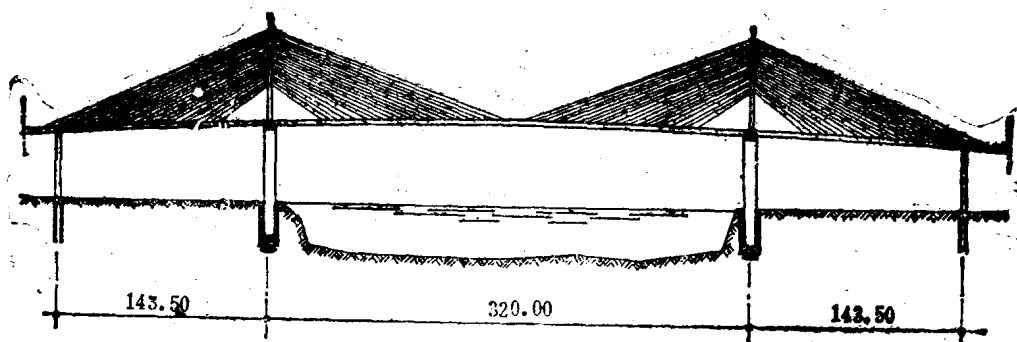


图 1-2 伯劳东纳桥 尺寸单位: m

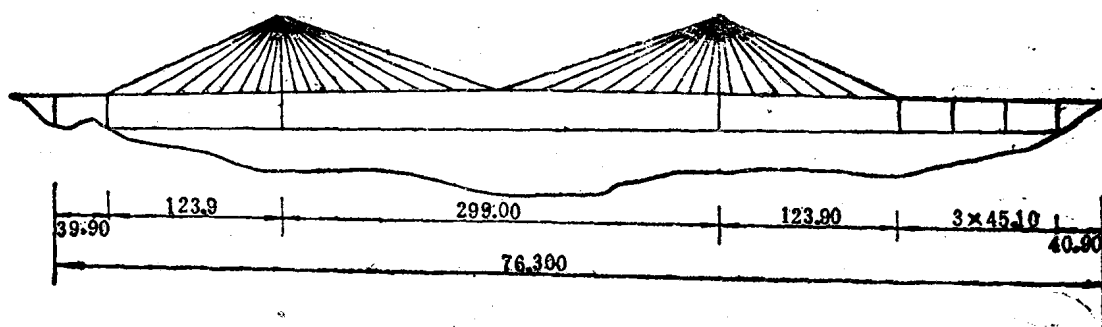


图 1-3 柏茨柯一坎纳威克桥 尺寸单位: m

③ 美国的东亨亨顿 (EastHuntington) 桥〔1-4〕, 主跨274.5m, A形独塔、双斜面索, 索距 $\lambda = 12\text{m}$ 。主梁高1.52m, 为其桥宽12.19m的1/8, 为其桥跨的1/180, 如图1-4所示。

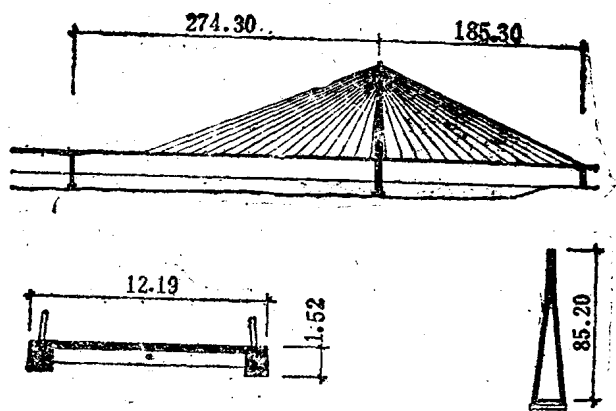
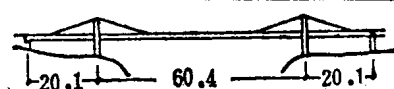
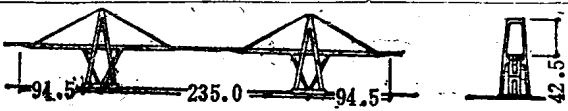
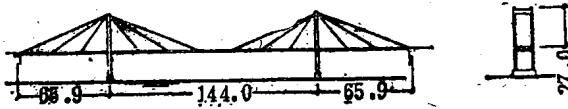
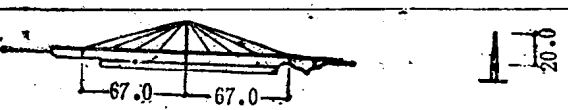
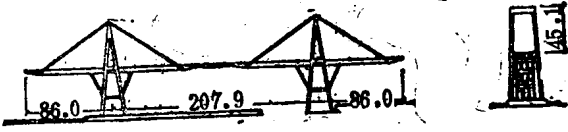
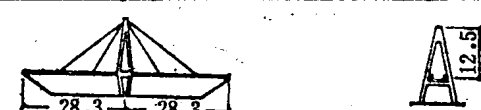
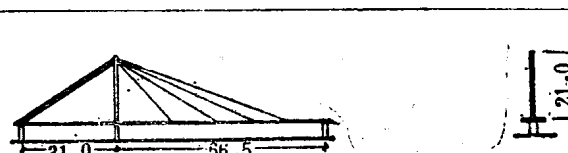


图 1-4 东亨亨顿桥 尺寸单位: m

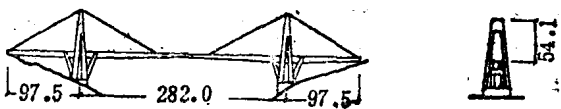
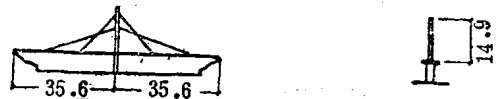
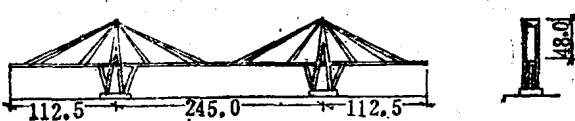
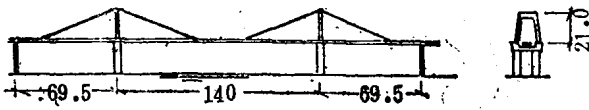
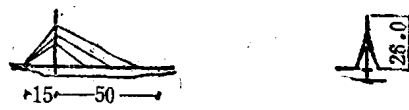
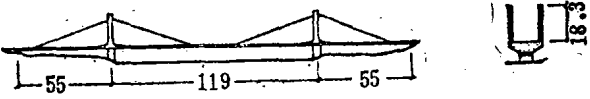
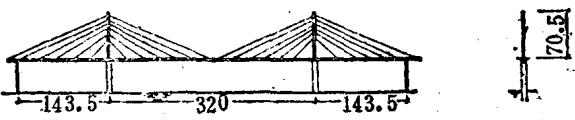
④ 西班牙的鲁娜 (Barrios de Luna) 桥〔1-5〕, 主跨440m, H形门式塔, 双平面索。主梁虽是闭合箱梁, 但梁高仅2.50m, 为其桥宽22.50m的1/9, 为其跨度的1/176, 如图1-5所示。

国外混凝土斜索桥一览表

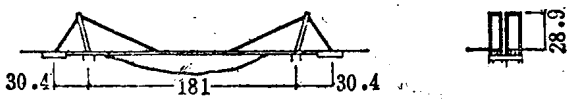
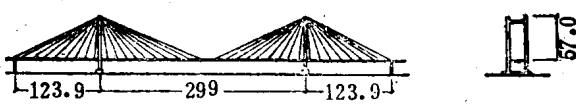
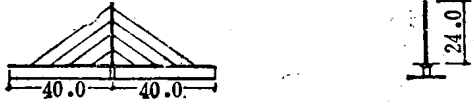
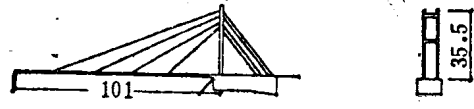
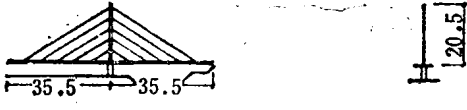
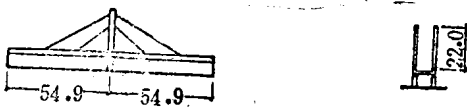
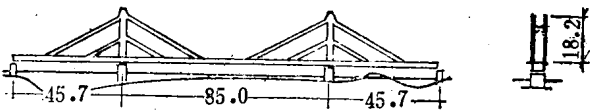
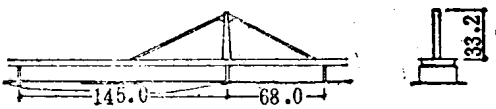
表1-1

序号	桥名	所在地	年份	用途	梁高(m)	图式 (m)
1	Tempul Spanien	西班牙	1925	水道	2.1	
2	Maracalbo Venezuela	委内瑞拉	1982	公路	5.0	
3	Kiew UDSSR	苏联	1963	公路	1.8	
4	Obourg Belgien	比利时	1966	人行	0.6	
5	Polcevera Italien	意大利	1967	公路	4.6	
6	Magliana Italien	意大利	1967	公路	3.0+ 4.0	
7	Pretoria Sud Afrika	南非	1968	水道	0.9	
8	Barwon Australien	澳大利亚	1969	人行	2.0+ 2.3	
9	World Exposition Japan	日本	1969	人行	14	
10	Bickensteg BRO	联邦德国	1972	人行	0.6	
11	Hochst BRO	联邦德国	1972	公、铁	2.7	

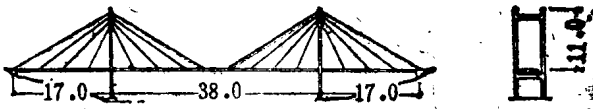
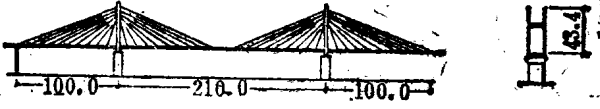
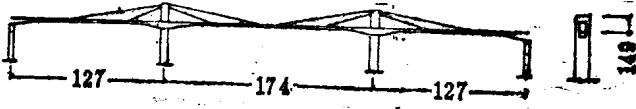
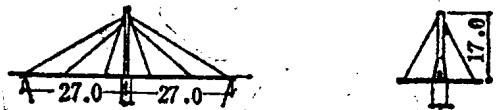
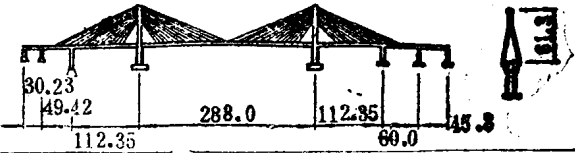
续上表

序号	桥 名	所在地	年份	用 途	梁高 (m)	图 式 (m)
12	Wadi kuf Libyen	利比亚	1972	公 路	4.0 ÷ 5.9	
13	Mountstreet Australien	澳大利亚	1972	人 行	0.6	
14	Tiel Holland	荷兰	1973	公 路	3.5	
15	Chaco Cor- rientes Argentinien	阿根廷	1973	公 路	3.5	
16	Kenzan Central Japan	日 本	1974	人 行	0.95	
17	Neckarcentar BRD	联邦德国	1974	人 行	0.6	
18	Magdalena Kolumbien	哥伦比亚	1974	公 路	2.8	
19	Diekirch Luxemburg	卢森堡	1974	人 行	0.6	
20	Donaukanal osterreich	奥地利	1974	公 路	2.3	
21	Brotonne Frankreich	法 国	1977	公 路	3.8	

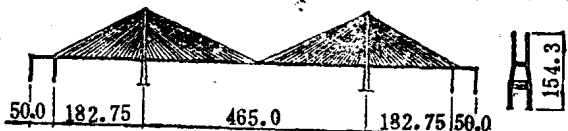
续上表

序号	桥 名	所在地	年份	用 途	梁高 (m)	图 式 (m)
22	Carpineto Italien	意大利	1977	公 路	2.4+ 3.5	
23	Pasco Ken- newick USA	美 国	1978	公 路	2.1	
24	Nomiki Japan	日 本	1978	人 行	0.85	
25	Madrid Spanien	西班牙	1978	人 行	1.2	
26	Matsugayama Japan	日 本	1978	人 行	1.8	
27	Brücke tirl det Linie132 Japan	日 本	1978	人 行	0.7	
28	Lyne England	英 国	1979	铁 路	2.8	
29	Omoto Japan	日 本	1979	铁 路	3.0	
30	Metten BRD	联邦德国	1980	公 路	4.2	
31	Rio Ebro Spanien	西班牙	1980	公 路	2.1	

续上表

序号	桥 名	所在地	年份	用 途	梁高 (m)	图 式 (m)
32	Ube Japan	日 本	1980	人 行	0.5	
33	Kabejima Japan	日 本	1980	公 路	2.6	
34	Meylan Frankreich	法 国	1980	人 行	1.5	
35	Illhot Frankreich	法 国	1980	人 行	1.5	
36	Ganter Schweiz	瑞 士	1981	公 路	2.5	
37	Katsumo'o Japan	日 本	1981	公 路	0.7	
38	Barrios de Luna Spanien	西班牙	1983	公 路	2.5	
39	East Huntington USA	美 国	1985	公 路	1.5	
40	Caotzacoal- cos	墨西哥	施工中	公 路	3.43	
41	Pasadas Encarnacion Argentinien	阿根廷	施工中	公、铁		

续上表

序号	桥 名	所在地	年份	用 途	梁高 (m)	图 式 (m)
42	Sunshine Skyway USA	美 国	施工 中	公 路	4.37	
43	Annacis Island Canada	加 拿 大	施工 中	公 路	2.0	

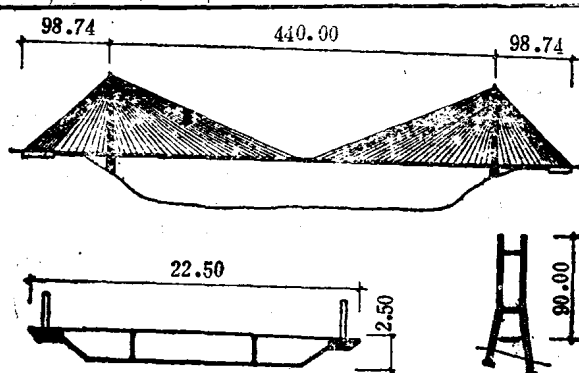


图 1-5 鲁娜桥 尺寸单位: m

从上述这四座大跨桥梁可以看出, 第二代斜张桥的发展趋势首先是:

- ① 梁高 h 在闭合箱梁中从3.80m降到2.50m, 在非闭合箱梁中从2.13m降到1.52m。
- ② 主梁的跨高比 L/h 相应地从84升到176、从140升到180。

这显示出用密索吊住的许多小跨弹性支承连续梁的纵向抗弯刚度越小越有利(当然还要能满足最低要求), 因为主梁中的弯矩是随其刚度同方向变化的, 乃致 h 虽减小而应力并不增大, 相反, 构件轻巧, 施工更为方便。

其次, 当桥宽 B 与梁高 h 之比大于等于8 ($B/h \geq 8$) 时, 便可不要求主梁具有良好的流线型, 这也可简化施工, 允许用实体的边肋(如东亨亨顿桥)作为主要的承重构件, 同时为横向压屈稳定提供了良好的条件。

再者, L 与 B 之比都小于20, 这也符合动力稳定的要求。

鲁娜桥的 B/h 虽然大于8, 但因它的 $L/B = 19.55$ 接近20, 所以, 它须具有较大的抗扭刚度, 于是, 采用了带流线型的闭合箱梁。

还有, 人们敢于在大跨桥梁中采用独塔方案, 使全桥造价得以降低, 且对抗风与抗震均有利(详见第二、七两章)。

最后可以顺便指出许多密索之间的自振频率均有差异, 故能起到相互干扰、产生阻尼的作用, 导致空气动力稳定性的提高。

这里仅先根据事实指出一些在发展中可以看到的趋势与特点, 以后将在有关各章中再加以分析和讨论。