



交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

郑 罡 王 鹏 唐光武 著

桥梁索结构

Bridge Cable Structures



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

郑 罡 王 鹏 唐光武 著

桥梁索结构

Bridge Cable Structures



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书主要包含了桥梁索结构的历史与现状,索结构静力学和动力学理论、线形计算、弯曲刚度、索力测试、振动控制、耐久性、换索工程及新型索结构等应用技术,为读者呈现一个相对完整的索结构力学理论及其在桥梁结构中的应用技术体系。

本书主要适用于桥梁设计和检测工程师,书中部分内容也适合桥梁业主、施工、管养单位,高等院校和科研院所等对索结构感兴趣的人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁索结构 / 郑昱, 王鹏, 唐光武著. — 北京 : 人民交通出版社股份有限公司, 2015. 6

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

ISBN 978-7-114-12196-8

I. ①桥… II. ①郑… ②王… ③唐… III. ①桥梁结构—缆索 IV. ①U443.38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 079648 号

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

书 名: 桥梁索结构

著 者: 郑 昱 王 鹏 唐光武

责任编辑: 卢俊丽 周 宇

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 12.75

字 数: 280 千

版 次: 2015 年 6 月 第 1 版

印 次: 2015 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12196-8

定 价: 43.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系
编审委员会

主任：杨传堂

副主任：戴东昌 周海涛 徐 光 王金付
陈瑞生(常务)

委员：李良生 李作敏 韩 敏 王先进
石宝林 关昌余 沙爱民 吴 澎
杨万枫 张劲泉 张喜刚 郑健龙
唐伯明 蒋树屏 潘新祥 魏庆朝
孙 海

书系前言

Prefacet of Series

进入 21 世纪以来,党中央、国务院高度重视人才工作,提出人才资源是第一资源的战略思想,先后两次召开全国人才工作会议,围绕人才强国战略实施做出一系列重大决策部署。党的十八大着眼于全面建成小康社会的奋斗目标,提出要进一步深入实践人才强国战略,加快推动我国由人才大国迈向人才强国,将人才工作作为“全面提高党的建设科学化水平”八项任务之一。十八届三中全会强调指出,全面深化改革,需要有力的组织保证和人才支撑。要建立集聚人才体制机制,择天下英才而用之。这些都充分体现了党中央、国务院对人才工作的高度重视,为人才成长发展进一步营造良好的政策和舆论环境,极大地激发了人才干事创业的积极性。

国以才立,业以才兴。面对风云变幻的国际形势,综合国力竞争日趋激烈,我国在全面建成小康社会的历史进程中机遇和挑战并存,人才作为第一资源的特征和作用日益凸显。只有深入实施人才强国战略,确立国家人才竞争优势,充分发挥人才对国民经济和社会发展的重要支撑作用,才能在国际形势、国内条件深刻变化中赢得主动、赢得优势、赢得未来。

近年来,交通运输行业深入贯彻落实人才强交战略,围绕建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的战略部署和中心任务,加大人才发展体制机制改革与政策创新力度,行业人才工作不断取得新进展,逐步形成了一支专业结构日趋合理、整体素质基本适应的人才队伍,为交通运输事业全面、协调、可持续发展提供了有力的人才保障与智力支持。

“交通青年科技英才”是交通运输行业优秀青年科技人才的代表群体,培养选拔“交通青年科技英才”是交通运输行业实施人才强交战略的“品牌工程”之一,1999 年至今已培养选拔 283 人。他们活跃在科研、生产、教学一线,奋发有为、锐意进取,取得了突出业绩,创造了显著效益,形成了一系列较高水平的科研成果。为加大行业高层次人才培养力度,“十二五”期间,交通运输部设立人才培养专项经费,重点资助包含“交通青年科技英才”在内的高层次人才。

人民交通出版社以服务交通运输行业改革创新、促进交通科技成果推广应用、支持交通行业高端人才发展为目的,配合人才强交战略设立“交通运输行业



高层次人才培养项目著作书系”(以下简称“著作书系”)。该书系面向包括“交通青年科技英才”在内的交通运输行业高层次人才,旨在为行业人才培养搭建一个学术交流、成果展示和技术积累的平台,是推动加强交通运输人才队伍建设的重要载体,在推动科技创新、技术交流、加强高层次人才培养力度等方面均将起到积极作用。凡在“交通青年科技英才培养项目”和“交通运输部新世纪十百千人才培养项目”申请中获得资助的出版项目,均可列入“著作书系”。对于虽然未列入培养项目,但同样能代表行业水平的著作,经申请、评审后,也可酌情纳入“著作书系”。

高层次人才是创新驱动的核心要素,创新驱动是推动科学发展的不懈动力。希望“著作书系”能够充分发挥服务行业、服务社会、服务国家的积极作用,助力科技创新步伐,促进行业高层次人才特别是中青年人才健康快速成长,为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通做出不懈努力和突出贡献。

交通运输行业高层次人才培养项目
著作书系编审委员会
2014年3月



作者简介

Author Introduction



郑罡,博士、研究员,重庆交通大学土木建筑学院桥梁工程系教师。长期致力于桥梁索结构理论与应用技术、桥梁设计、咨询、试验、检测、振动控制和抗震理论与应用技术等方面的研究和生产实践工作。主持国家自然科学基金3项,国家科技部国际合作计划项目1项、重庆市杰出青年科技基金1项,主持和联合主持10余项重大研究课题。2012年获国家交通运输部授予2010—2011年度“交通青年科技英才”荣誉称号,公开发表科技论文50余篇。

序

Foreword

近二十年来,我国建成了许多大跨径悬索桥、斜拉桥和系杆拱桥,未来还将建设更多、更有挑战性的缆索支撑桥梁。因此,在缆索支撑桥梁领域,迫切需要本书这类科技专著,以满足桥梁工程进一步发展的需要。

六年前,我曾指导本书作者之一的王鹏博士研究体外预应力桥梁索结构的相关理论,我也曾指导学生研究 CPRP 缆索斜拉桥、悬索桥的相关理论,对于桥梁索结构有一定的认识,同时,也感到该领域缺乏一部系统性较强的专著。本书作者郑罡、王鹏和唐光武三位同志长期从事桥梁工程的科学研究工作,特别是在桥梁索结构方面的研究尤为深入。在长期的工作中,三位作者带领研究团队不断探索和总结桥梁拉索的相关理论和工程技术。通过近十年来的筹备和努力,三位作者将他们长期的工作经验和研究成果结合相关领域的基础知识,在系统整理和汇集的基础上撰写成书,为关注桥梁索结构理论和工程技术的读者提供便利。我认为这是一件值得肯定和鼓励的好事情。

应作者邀请,考虑为这本书写几句话。毛泽东在《七律·长征》中感叹“金沙水拍云崖暖,大渡桥横铁索寒”,反映了历史名桥泸定桥的雄姿。如今,以西堽门大桥、苏通长江公路大桥、朝天门长江大桥等现代名桥为代表的众多缆索支撑桥梁已屹立于我国广袤的土地上。索结构是斜拉桥、悬索桥和系杆拱桥等大跨径桥梁最重要的承力和传力构件,值得予以重视和研究。本书涵盖了桥梁索结构的理论和工程技术两方面内容。在理论方面,本书对静力学和动力学两部分内容进行了介绍,阐明了相关的基本概念和基础理论,并为其后的工程技术内容做好了铺垫,可以帮助研究者、工程师系统且迅速地掌握桥梁索结构的基础理论知识;在工程技术方面,本书介绍了索结构振动控制、弯曲刚度、索力测试、耐久性和新型索结构等内容,其中,包括详细的试验测试、研究和工程案例数据,这些内容有利于研究者和工程师顺畅和具体地掌握桥梁索结构的若干应用技术。

书籍是人类进步的阶梯。在此,我也对倾注心血和年华来建设阶梯的作者们,表达一点鼓励。他们的书不仅是专业人士的需要,更是桥梁索结构科技进步的需要。不积跬步,无以至千里,不积小流,无以成江海。撰写科技专著是一项

需要不断积累、探索和富有挑战性的工作,没有毅力与努力,难以持续地取得进步。希望三位作者及其团队和所有为此努力的同仁们,再接再厉,争取更大的进步。

中国工程院院士: 

2014年5月

自序

Author's Foreword

本书的目的是为读者提供桥梁索结构相关理论和工程技术的系统材料。尽管索结构在理论和技术上的许多问题已基本得到解决,但将它们汇集在一起进行分析,揭示其内在联系,系统阐释其在桥梁结构理论和应用技术体系中的位置和相互关系还是第一次。

书中有相当部分内容或其表达方式是全新的,其余内容则主要通过对相关图书、会议和期刊论文、研究报告及工程资料等进行收集、整理、归纳和精心撰写而成。只有在本书中,这些内容才作为桥梁索结构理论和技术体系的一个有机组成部分出现,而不是零散地分布于众多的文献中,服务于其他主题。总的说来,国内外关于桥梁索结构的专著还很少,而随着索结构在桥梁中的大量应用,相关领域迫切需要这方面的专著,本书试图满足这个需求。

本书主要包含了桥梁索结构的历史与现状,索结构静力学和动力学理论、线形计算、弯曲刚度、索力测试、振动控制、耐久性、换索工程及新型索结构等应用技术,为读者呈现一个相对完整的索结构力学理论及其在桥梁工程中的应用技术体系。静力学方面,首先阐述了经典的理想柔性索理论及其应用技术,之后介绍了考虑弯曲刚度的索梁结构理论和应用案例;动力学方面,首先讨论了最基础的弦振动理论,然后分析了垂度、倾角和弯曲刚度等因素对索振动的影响,随后简述了非线性振动的特点,最后着重分析了桥梁索结构的振动控制问题;耐久性方面,则主要介绍了防护和疲劳两个内容。本书系统阐述了相关理论,对悬索桥主缆线形、斜拉索减振、索力测试等应用技术进行案例式剖析,有助于读者对桥梁索结构理论和工程技术形成深入的认识和理解。

闻道有先后。过去的一些比较困难的桥索问题,现在已被大多数相关技术人员解决。一方面,是由于计算机和互联网提供了强大的工具,可以帮助许多科技人员高效率地自学,利用强大的软件工具“傻瓜”式地解决问题;另一方面,则是得益于工程师们更长的教育经历,使得他们在解决复杂问题方面比过去做得更为出色。例如,在过去,静力学方面确定斜拉索和悬索桥主缆长度就是比较困难的问题,但现在则受益于计算软件的强大支持而变得相对容易多了;动力学方面,通过振动频率来测定长索张力已成为比较普遍的做法。对于这些技术性较

强的工作,其工作质量和效率有赖于工程师们的理论水平。

本书尽可能为一线的桥梁工程技术人员提供帮助,但限于作者的学识水平,书中难免有一些不足甚至错误,希望读者不吝指出,作者将在新版本中做出补充和更正。

目 录

CONTENTS

作者

2015年1月

目 录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 索支撑桥梁的起源	1
1.2 悬索桥及其索结构	8
1.3 斜拉桥及其索结构	14
1.4 中下承式拱桥及其索结构	19
1.5 体外预应力梁桥及其索结构	22
1.6 小结	24
本章参考文献	25
第2章 静力学基础理论与工程应用	26
2.1 索的几何刚度——张紧弦的静力学模型	26
2.2 索的线形	29
2.3 索的无应力长度和轴向刚度	36
2.4 悬索桥主缆的成桥线形和空缆线形	40
2.5 斜拉索的下料长度	50
2.6 小结	53
本章参考文献	53
第3章 动力学基础理论与工程应用	54
3.1 索结构的自由振动	54
3.2 索结构的受迫振动	66
3.3 索结构振动控制的基础理论	71
3.4 振动控制技术的工程应用	86
3.5 小结	92
本章参考文献	93
第4章 桥梁索结构的弯曲刚度	95
4.1 考虑均匀弯曲刚度的索结构静力学	95
4.2 工程应用	97
4.3 索结构抗弯刚度的非线性	101
4.4 小结	108

本章参考文献	108
第5章 索力测试	110
5.1 基于传统频率法的索力测试:基本方法	110
5.2 基于改进频率法的索力测试:垂度、弯曲刚度和边界条件	113
5.3 基于多参数的频率法及其试验验证	116
5.4 工程应用实例	121
5.5 动力学以外的其他方法	125
5.6 小结	127
本章参考文献	128
第6章 桥梁索结构耐久性	130
6.1 索结构病害	130
6.2 索结构防护	136
6.3 索结构疲劳耐久性	144
6.4 桥梁换索工程	157
6.5 小结	162
本章参考文献	162
第7章 桥梁新型索结构	164
7.1 超高强度钢丝绳	164
7.2 不锈钢索	165
7.3 CFRP 索	166
7.4 小结	178
本章参考文献	178
附表	181
致谢	186
索引	187

第1章 绪 论

为跨越江河沟壑,人类在几千年前就发明了桥梁。在历史进程中,桥梁不断提升的跨越能力主要来源于材料、施工(制造)工艺和力学计算三方面的科技进步。其中,力学计算是设计师最关心的内容,同时,也在很大程度上反映桥梁的技术水平。在相同材料下,力学合理性意味着更大的跨度;在相同材料和跨径下,力学合理性意味着承受更大的荷载。从力学体系看,桥梁总体上可分为悬索桥、斜拉桥、拱桥和梁桥四大类。本章主要介绍以索结构作为主要承载构件的悬索桥、斜拉桥、系杆拱桥、和体外预应力梁桥的一些总体概念和部分实例。桥梁索结构就是指在这些类型的桥梁中利用索的受力特性以索作为主要承重或传力构件的结构部分。

在四大类桥梁中,悬索桥以缆索为主要承重结构,由于缆索在理论上只承受拉力,受力形式最为理想,因此,悬索桥的跨越能力最强;斜拉桥以拉索和主梁为主要承重结构,斜拉索对梁跨形成弹性支承,减小了梁的受力,其跨越能力仅次于悬索桥,但受力较为复杂;拱结构可看作上下颠倒过来的悬索结构,以拱为主要承重结构,由于拱结构主要承受压力,而受压结构往往受到稳定性的制约,因此,拱桥的力学合理性不如悬索桥;梁桥给人的感觉似乎最简单,但是从力学上看,其同时承受弯矩和剪力,有时还承受轴力,这就比单纯的受拉或受压都要复杂,其力学合理性不如其他三类桥梁,因此,梁桥的跨越能力在四大类桥梁中最低。当然,力学合理性还包括动力学(主要是抗风和抗震)内容,此处不作讨论。

由于梁桥受力比悬索桥和拱桥都要复杂得多,这导致其跨越能力发展极其缓慢,直到20世纪末期,其单孔跨径才突破300m;拱桥在历史上的出现可能远远晚于梁桥,这种桥型与索结构结合为组合体系(中下承式拱桥)后,其跨径才得到了长足的发展;斜拉桥是介于梁桥和悬索桥之间的一种桥型,在历史上出现得最晚,其跨越能力仅次于悬索桥;悬索桥的历史可能和梁式桥同样悠久,由于其天然的、并且几乎是压倒性的力学优势,使得这种桥型不断刷新桥梁跨径的世界纪录。目前,悬索桥、斜拉桥、拱桥和梁桥四大类桥梁跨径的世界纪录分别是明石海峡大桥(Akashi Kaikyo Bridge,1991m,1998年,日本)、海参崴俄罗斯岛跨海大桥(Rusky Island Bridge,1104m,2012年,俄罗斯)、重庆朝天门长江大桥(552m,2009年,中国)和重庆长江大桥复线桥(330m,2006年,中国)。

1.1 索支撑桥梁的起源

悬索桥和斜拉桥是典型的索支撑桥梁(或者称为缆索承重桥,以下简称“索桥”)。最早的索桥可能由藤索、竹索制成,古书上称为绳桥、笮桥、绳桥,现代谓之悬索桥。作为术语,悬索桥对应的英文是 Suspension Bridge,当中没有“索(Cable)”这个词。因此,Suspension Bridge的准确翻译应该是吊桥或者悬桥。“吊桥”正是民间对悬索桥的俗称,比其学术称谓更能与国际接轨。本节略述索支撑桥梁简史,但并不是考证翔实的技术史,只是展现作者尽

力收集到的一些历史片段,以助于读者形成一点感性认识。为此,本书采用了一些历史名桥的资料,特别是一些照片或图片,以增加读者的兴趣。

我国可能是建造索桥最早的国家,这一点已得到国外同行认可,甚至最开始就是由国外同行提出的。《中国科学技术史》作者李约瑟(Joseph Terence Montgomery Needham, 1900—1995年)写到,南美的古索桥是由中国人在公元前7世纪的前哥伦布时代传播到那里的,而现存于世的中国四川都江堰的竹索桥——安澜桥最早建于公元前3世纪。剑桥大学伊尔文教授(H. M. Irvine)在其索结构专著 *Cable Structures* 中写道,目前还存世的最早铁索桥是由15世纪中国西藏僧人唐东杰布(Thangthong Gyalpo, 1385—1464年)建造。

根据传说,公元前50年,四川已建成长达百米的铁索桥。杨衒之在《洛阳伽蓝记》中记载的公元519年北魏时期新疆的铁索桥,则是世界上最早有文字记载的铁索桥。徐霞客(1587—1641年)在《铁索桥记》中详细记载了1629年建于贵州的一座铁索桥。这篇游记曾被意大利传教士卫匡国(Maritin Martini, 1614—1661年)介绍到西方。1667年,法国传教士基歇尔(Athanasius Kircher, 1602—1680年)在其《中国图说》著作中记有公元65年建成的云南兰津渡桥,该桥于1675年改建为铁索桥,即云南彩虹桥。由这些史实,基本可以确定我国是索桥的起源地。

1.1.1 溜索与竹索桥

最原始的索桥可能是溜索,用绳索系于河流两岸或峡谷两面的树木或岩石上即可形成溜索。溜索常以竹藤编织,下悬吊盛具或持座,靠惯性和人力牵引来达到“溜人”或“溜物”的目的。据资料介绍,秘鲁安第斯山的印第安人也用溜索作为渡河工具。如果说索桥起源于我国,那么,我国的溜索以及之后发展出来的索桥,则起源于羌族。明朝曹学佺(1574—1646年)所著《蜀中名胜记·成都府》记载“李膺《笮桥赞》云:复引一索,飞迳(gēng)杙(yì)阁,其名曰笮(zuō),人悬半空,度彼绝壑”,这笮桥应该就是溜索。

竹笮是竹编的绳,《辞源》对其释义是“引舟的竹索”。我国西南众民族之一的羌族,在汉代有一个部落称为“荏都”,聚居于蜀郡西南大山,善造溜索,可能最先将溜索发展成竹索桥。由此看来,笮桥的称法或许来自其主要材料构件竹绳,即笮;或许来自于其创始人羌族荏都部落名号的首字,即荏(通“笮”)。

图1.1.1是中国电影先驱孙明经先生在1939年川康科考中拍摄的溜索照片。照片中将溜索渡河的人即是孙先生的助手。直到现在,溜索这种最原始的索桥在我国藏区仍然存在。《西藏日报》2010年3月20日刊登题为“自治区溜索改桥协调工作领导小组第一次会议召开”的报道,报道称,西藏现存溜索84处,分布于昌都、林芝、那曲和日喀则四个地区。



图 1.1.1 四川康定郊外雅拉沟溜索(孙明经,摄于1939年)

溜索在历史长河中逐渐向两个方向发展:其一是桥梁,侧重于发展承载功能,便于人行和车行;其二是索道,侧重于发展滑行功能,即“溜”,便于递送人或物品。本书主要关注溜索在桥梁方向的演进和发展。索道方向的发展则不是本书的重点,仅提供下面的资料(摘编自福建农林大学网站)供读者参考:现代客运索道最早于1894年出现在意大利。目前,全球有四万多条索道。我国自20世纪50年代引进客运索道以来,现已有各类索道近三千条。我国自主设计、制造的第一条大型双线往复式客运索道(重庆嘉陵江索道,图1.1.2)于1981年建成,标志着我国客运索道发展的开始。

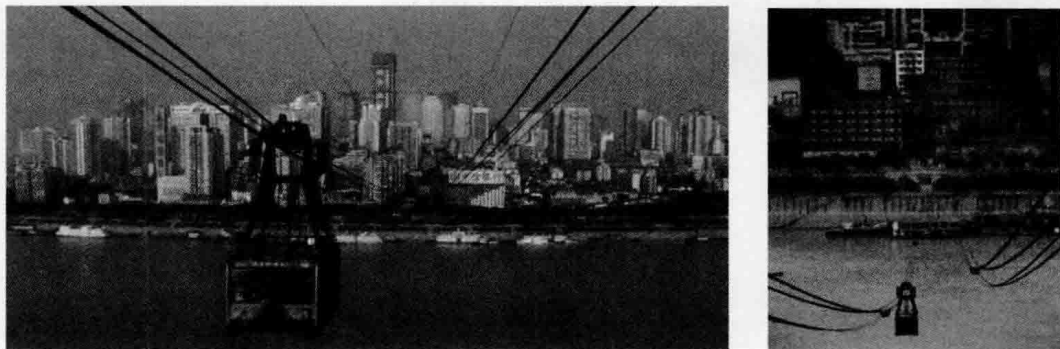


图 1.1.2 重庆嘉陵江索道

溜索向桥梁方面发展,首先出现的是竹索桥。与溜索晃晃悠悠的“溜”不同,竹索桥可以供人比较稳当地行走。为此,竹索桥不仅将几根溜索简单并排在一起,还在其上铺设桥面板,而且桥面之上两侧至少还各设有一根索,既帮助承重,又作为扶手,比较容易行走。

行走能够比较稳当的最简单的索桥应该是“V”形索桥。我国历史上比较有名的“V”形索桥应该是成都的笮桥。西汉王褒在《益州记》中记载,笮桥在司马相如宅院南一百步,建造时用三个大铁锥来系紧(锚固)竹索。新中国成立初期,在考察司马相如的抚琴台时,曾在今天成都南门大桥西面的锦江河上,发掘出古桥基下的两个大铁锥,虽然比历史记载少了一个大铁锥,但已足证该处是笮桥故址。用三个大铁锥锚固三根竹索的笮桥,其主缆(竹索)的最佳布置应该是V字形,也就是两根索在上,一根索在下,以使得三根索形成“V”形通道[图1.1.3a)]。

人行走于“V”形索桥时,脚踩一根索,手扶两根索,手脚并用,晃晃悠悠过桥,这实际上可能会比“溜”索还危险。因为“溜”索时,重心在索下,在力学上是稳定的;“V”形索桥则不同,人踩在下面一根索上,易向侧边倾斜。倘若上下索连接不够牢靠和密实,则容易失足。更危险的则是上下各一根索的双索桥[图1.1.3b)]。过桥时,脚踩一索,手扶一索,万分惊险。从文献记载可以推断,李冰建的索桥,即使有多根索,也只是改进的溜索,或双索,或三索,最初则可能是羌族建造的溜索。

最迟在秦汉时期,汉族就学会了羌族的笮桥技术。春秋战国时期,秦昭王三十年至秦孝文王年间(公元前277—公元前251年),李冰任蜀守时,率众大搞基础设施建设。这些基础设施除了都江堰这一卓绝古今的水利工程外,还有许多重要的交通基础设施工程,其中就有竹索桥。据《华阳国志·蜀志》记载,“西上曰夷里桥,亦曰笮桥”,是李冰建造的七座桥梁之一。《晋书·桓温传》记载,东汉顺帝永和三年(公元347年),桓温伐蜀战于此桥。此时,距

李冰建桥已近 600 年。三国时期,相传诸葛亮曾在这里为出师东吴的费祎饯行。

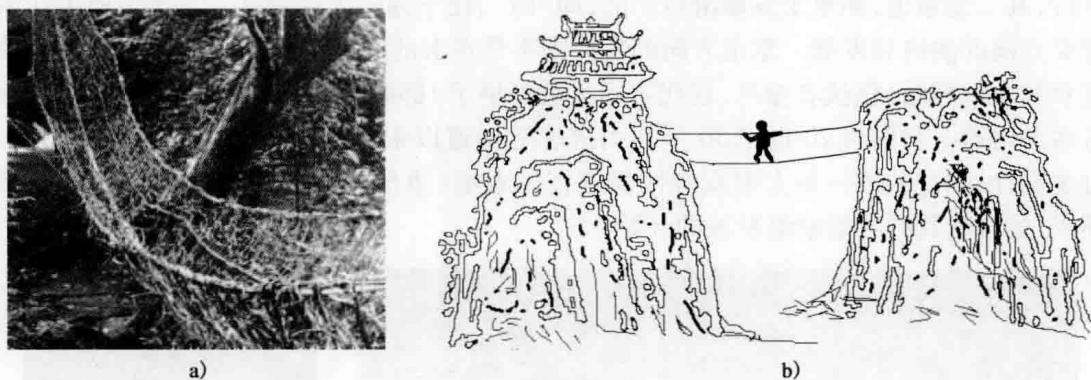


图 1.1.3 溜索向索桥的过渡形式
a)“V”形三索形式;b)双索形式

(1) 都江堰安澜桥

安澜桥是我国最著名的五大古桥之一,横跨都江堰内外江。驪道元(470—527 年)《水经注·江水》记载“涪江有笮桥”。由于驪道元注解的这部《水经》“大体应为汉魏之作不成问题”(百度百科“水经注”词条释义),表明最迟在公元 3 世纪的汉魏时期,涪江就有了笮桥。这座笮桥应该就是安澜桥。安澜桥原址在都江堰鱼嘴处,1974 年改用钢索建造并下移了一百多米,之后多次翻新,最新重修后的安澜桥见图 1.1.4。20 世纪初期,德国建筑师伯施曼(Ernst Boerschmann, 1873—1949 年)及英国植物学家威尔逊(Ernest Henry Wilson, 1876—1930 年)可能拍摄到了该桥最早的照片(图 1.1.5)。



图 1.1.4 重修过的安澜桥(2013 年,王鹏)

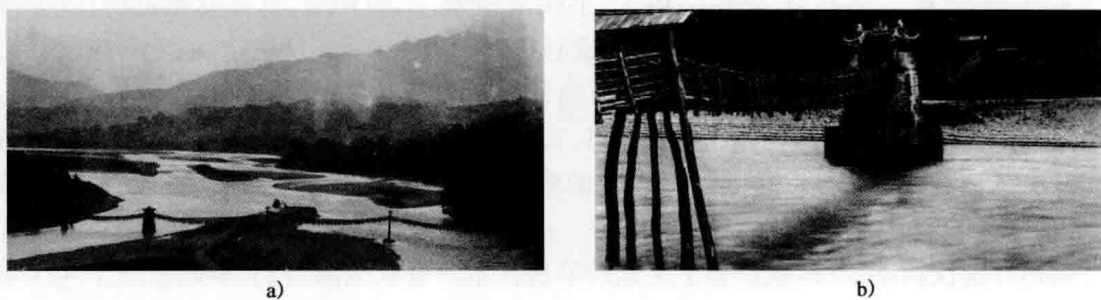


图 1.1.5 1908 年的安澜桥
a)伯施曼拍摄;b)威尔逊拍摄

(2) 威州竹索桥

威州(现汶川)是羌族世代聚居之地,而索桥起源于羌族。要追溯竹索桥的历史风貌,威