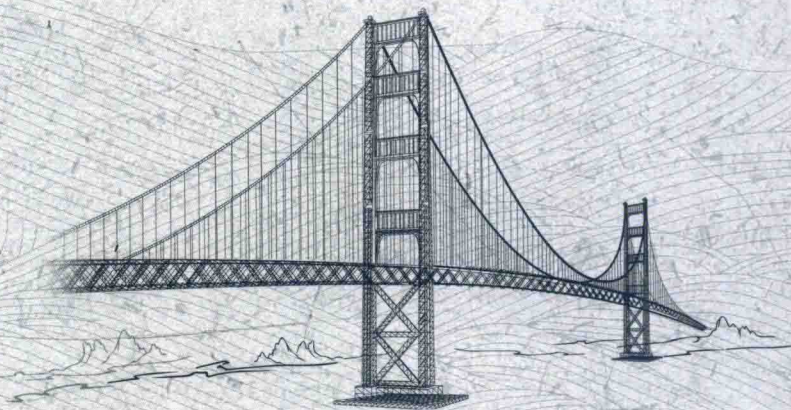


悬索桥 百年探索与实践

The Exploration and Practice of the Hundred Years of the Suspension Bridge

中交公路规划设计院有限公司 肖恩源◎编著
李靖森◎主审



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

悬索桥百年探索与实践

中交公路规划设计院有限公司 肖恩源 编著
李靖森 主审



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

内 容 提 要

本书在回顾百年来悬索桥工程实践史的基础上,简评了设计计算理论发展的各阶段;探索、论证了随着跨度的不断增大,索结构功能转换,传统理论与计算方法已不适应。书中以不同结构加劲梁为例,推介并论证“等效轴向刚度法”新概念的可行性和可靠性,并以我国四座知名大跨悬索桥试验作为演算示范,说明该法简明、适用、符合客观规律。

书中依据 50 多座悬索桥的设计资料分析,揭示了百年来悬索桥发展规律,获得具有实用价值的“百年吊桥发展轨迹曲线”,可为新桥设计和老桥设计评估提供理论参考。

全书共分五章,提供了国内外主要悬索桥的有关资料,并附有计算实例,可供从事桥梁结构、吊索结构设计、科研人员,以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

悬索桥百年探索与实践 / 肖恩源编著. — 北京 :
人民交通出版社股份有限公司, 2016. 6
ISBN 978-7-114-12188-3

I. ①悬… II. ①肖… III. ①悬索桥—研究 IV.
①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 076851 号

书 名: 悬索桥百年探索与实践

著 作 者: 肖恩源

责任编辑: 张征宇 赵瑞琴

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: 17.25

字 数: 391 千

版 次: 2016 年 6 月 第 1 版

印 次: 2016 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12188-3

定 价: 68.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



序 言

肖老是我院技术上的老领导,从事桥梁建设事业 60 余载。2000 年退休后,本应安度晚年的他,凭着对事业的热爱与执着,在没有助手的情况下,以老迈之躯,广泛地收集国内外资料,编写、绘图以及大量地推导计算和分析比较,兢兢业业,悉心探索悬索桥的理论和实践,精神难能可贵。十年磨一剑,通过不懈努力,在悬索桥的经典理论研究的基础上,经过深入探讨,取得了不少成果。

1997 年,肖老连续发表了两篇《索的特性》论文,对索的刚度特性以及索和桥面梁加载后的状况作了深入研究,用索的集成刚度原理,探讨了“等效轴向刚度法”。利用此法解算了多座悬索桥荷载试验的受力和变形,结果是理论计算值与试验实测值两者高度吻合,说明“等效轴向刚度法”是一简便、实用且符合客观规律的方法。更可喜的是,肖老还利用百年来(1903~2013 年),世界所建的 50 多座大跨悬索桥所记载的主缆高强度钢丝用量、材料性能等相关资料,建立了“发展轨迹曲线”,即 $L-W_s/W_c$ 曲线。该曲线既可为设计悬索桥提供理论参照,也可为已建成的悬索桥提供评估的参考,还可预测今后修建悬索桥的发展方向。肖老在书中运用该曲线对意大利拟建的墨西拿海峡大桥作了评估,与计划中的情况非常吻合。

肖老在耄耋之年出版《悬索桥百年探索与实践》一书实属罕见。这是肖老为纪念中交公路规划设计院有限公司建院 60 周年的献礼,也是为他老人家自己圆了一个“中国梦”,为我国桥梁建设事业做出了出色的贡献。

这本收集了百年来国内外悬索桥资料的编著,不仅对桥梁工作者大有裨益,对桥梁专业的教师、科研工作者以及在校的学生也有很大的帮助。

是为序。

金埴洪

2015.9

前 言

本人从事公路桥梁建设 60 余年,工作条件的优势(任职交通部公路设计院),有幸参与了全国各地区不同自然条件下,不同类型的公路大型桥梁的勘察设计,经历不少;也参加过国外大型公路桥梁的修建,有所见闻。说实在的,并不精通,往往也是人云亦云,一知半解,有些甚至是误解。有成功的喜悦,也有失误的伤痛。回想起来,感慨无限。

2000 年,退出工作后,有闲对过去不甚懂的吊桥理论,作了些回顾和探索,多看了几本外文经典原著和反映时代特点的技术文献,多思考,多做例题,相互对照,加深理解,时间长了,就有所感悟。

例如,按吊桥的构造特点、结构的特性,回顾各历史时期设计理论的原理,计算方法的假设和推导,以及为理论建立而制定的规则,论证吊桥只要成桥后线形与设计的线形相符合,在全部恒载作用下,桥面梁是不受力的。

其次,为探索梁、索在活载(车辆荷载)作用下内部运作机理和规律,以国内 20 世纪 90 年代后建成的 4 座不同类型大跨悬索桥的荷载试验报告为依据,应用集成刚度原理,探讨“等效轴向刚度法”的应用,用以解算各桥荷载试验实测值,结果是:理论计算值与试验实测值均高度吻合。论证了桥面梁在车辆荷载作用下产生的挠度主要赖于索,梁的弯曲刚度(EI)作用消失,突破了大跨吊桥设计理论以梁为本的传统思维,简化了计算程序和计算方法。应用新概念计算,简捷易行,高效实用。

此外,应用百年(1903~2013 年)间所建大跨悬索桥相关资料建立的“发展轨迹曲线”,即 $L-W_s/W_c$ 曲线,可为设计大跨悬索桥,评估已建的大跨悬索桥,以及今后修建更大跨的同类桥,提供有用的参考。例如举世瞩目的意大利 Messina 海峡大桥,主跨 3 300m 悬索桥,经过 30 多年(1977~2005 年)的探索和研究,最终设计方案的关键数据,梁、索单位长重比,与“发展轨迹曲线”所推断的数据,基本一致,即为一例。

随着世界桥梁事业的发展,个人认识与体会也与时俱进,对书稿的内容陆续补充和精简,包括书名在内,几经修改。学海无涯,学无止境,温故知新,抛砖引玉。尚祈海内外同行专家给予鉴核,不胜感谢。

从出书理念到定稿,历时15载。在此过程中,得到了中交公路规划设计院有限公司金增洪、钱慧娟、李江海,人民交通出版社王应荣等同行、同事们的审阅,鼓励和关怀;还有,在《桥梁》杂志工作的北京建筑大学退休教授李靖森,在他编辑我发表在该刊的论文“集成刚度应用于悬索桥计算”(《桥梁》2013·3期),给予肯定和关注。因他在20世纪80年代和90年代,就对集成刚度在结构和桩基础的应用,有深厚的造诣,并有专著。志同道合,他发现我书稿长期搁置,甚是遗憾。为此,在他百忙中,对书稿给予全面审核和梳理,对书稿名称和内容提出中肯的建议,还提供我国早期悬索桥的资料,填补了我国悬索桥发展史的空白;还联系他在公路所和其他设计所工作的学生宋春霞、马洪波、张子辛等工程师,挤出时间,为书稿绘制了大量精美插图,在此一并表示感谢。

最后,我要衷心地感谢中交公路规划设计院有限公司的大力支持。

肖恩源

2016.3 于北京



说 明

悬索桥一词源自英语 Suspension Bridge。按 Oxford University Press 出版的《现代高级英汉双解词典》(1970 年版),英文解是 Bridge suspended on or by means of steel cables,中文解是吊桥。

我国引进后,1960 年前一直称为吊桥。1965 年、1978 年,人民交通出版社出版的《英汉道路工程词汇》一版、二版均译为悬桥、悬索桥、吊桥。1977 年,商务印书馆出版的《简明英汉词典》译为吊桥;1984 年,该馆出版的《英华大词典》(二版)又译为悬桥、吊桥。1985 年,清华大学主编出版的《英汉技术词典》译为悬(索)桥、吊桥。如何正名,留待有关专家评议。为尊重现实,国内仍称悬索桥,境外则通称吊桥。

工程计量,例如车辆设计荷载,有的版本按 kN/m 计,有的版本则按 t/m 计,由于规范不一,业内都理解,只作了必要的修改。

目 录

第1章 悬索桥建桥简史	1
1.1 早期的悬索桥(铁索桥)	1
1.2 现代悬索桥	4
1.3 英国 1816 ~ 1864 年修建的吊桥	5
1.4 法国 1823 ~ 1850 年修建的吊桥	9
1.5 美国 1849 ~ 1940 年修建的吊桥	16
1.6 美国 1950 ~ 1969 年修建的吊桥	32
1.7 欧洲吊桥复兴(1959 ~ 2013)	37
1.8 后来居上的日本吊桥	54
1.9 中国香港青马大桥	63
1.10 中国悬索桥 70 年	64
第2章 理论发展	89
2.1 兰金理论	89
2.2 弹性理论	92
2.3 挠度理论	99
2.4 有限元法	139
第3章 传统理论的变革	144
3.1 概念的变革	144
3.2 传统荷载索挠度计算	145
3.3 有限元数字计算程序——迭代法	149
3.4 悬索桥挠度简化计算	157
3.5 等效轴向刚度法	166
第4章 荷载试验解算	195
4.1 厦门海沧大桥	195
4.2 虎门大桥	208
4.3 舟山西堠门大桥	217

4.4 贵州坝陵河大桥 230

第5章 展望 236

5.1 悬索桥百年发展轨迹 236

5.2 调整活、恒比消除梁、索变形不协调 253

5.3 多跨或单跨双悬索桥探索 254

5.4 预应力悬索桥解读 259

第1章 悬索桥建桥简史

1.1 早期的悬索桥(铁索桥)

1.1.1 中国泸定大渡河铁索桥

以悬挂索作为过河或跨山谷的交通工具,自古有之,如藤索桥、竹索桥等。传说很多。在机制高强钢丝问世前,以铁制件(如铁链、铁眼杆、铁丝)造吊桥,世界公认是中国。早在1706年(清康熙四十五年)就建成四川泸定大渡河铁索桥,如图1-1所示。

泸定桥全长123.42m,跨径100m,宽3.8m,距河面约10m。悬索由13根铁链组成。底索9根,两侧各设2根作扶手,扁环长19cm,外径9cm,内径3cm。今仍健在。

1.1.2 英国 Winch 铁索桥(1741)

历史记载英国以铁链修吊桥,是1741年建成的 Winch 桥,跨越 Tees 河,如图1-2所示。比我国泸定河铁索桥晚35年。

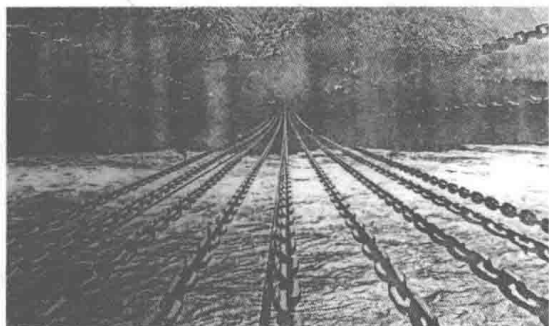


图1-1 泸定大渡河桥

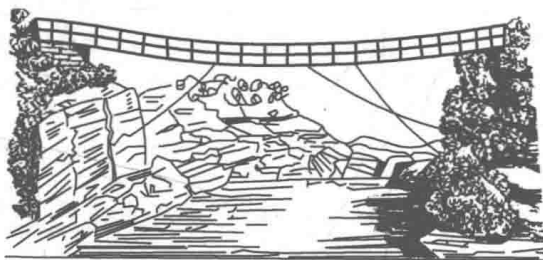


图1-2 Winch 铁索桥

Winch 桥长70英尺^①(21m),宽仅2英尺(60cm),距河面60英尺(18m)。一边设有扶手,供行人过桥。但摇晃厉害,有如走跳板,提心吊胆,视为畏途。1802年倒塌,使用近60年。

1.1.3 索力和索形

用铁链修吊桥,虽较藤、竹等可延长寿命,但不能称现代吊桥,只适用于人畜,不能过车。桥面铺在索上,或悬挂在索下,索是承重主体。索在自重和荷载作用下的索形和索力,成为当时关注和探讨的课题。

1586年,Stevin 建立索在竖向荷载作用下的多边形受力模式(Force Polygon)。

^① 1英尺=0.3048m,余同。

1615 年, Beeck 建立索在跨长均布荷载作用下的线形为抛物线(Parabola)。

1690 年, Leibnitz 和 Huygens 用积分法, Bernoulli 兄弟用几何法, 同时建立索在自重作用下的线形为悬链线(Catenary)。

索多边形受力如图 1-3。

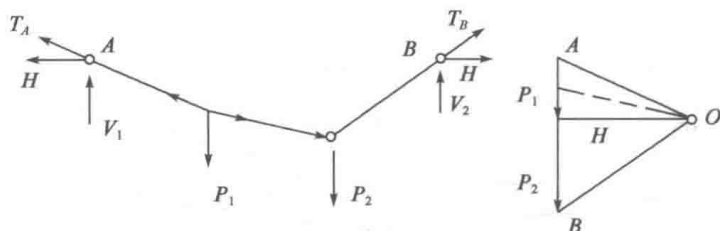


图 1-3 索多边形受力图

悬链线(图 1-4)表达式:

$$y = c \cdot ch \frac{x}{c} \quad (1-1)$$

式中 $c = \frac{H}{w}$

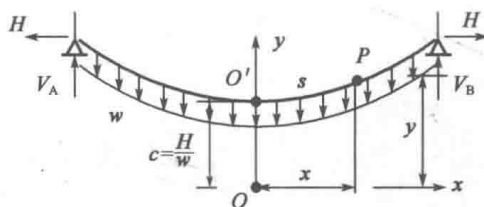


图 1-4 悬链线

索曲线坐标原点为 O , 位于索曲线最低点 O' 的下方, $c = H/w$ 处。 c 为一常数; H 为索力水平拉力; w 为索自重(按索长分布)。作用点 P 位置为 x, y (以 O 为原点), $O'P$ 为索长。

索长

$$s = c \cdot sh \frac{x}{c}$$

水平拉力

$$H = c \cdot w$$

垂直拉力

$$V = s \cdot w$$

拉力

$$T = y \cdot w$$

抛物线(图 1-5)表达式:

$$y = \frac{w}{2H} x^2 \quad (1-2)$$

索曲线坐标原点为曲线最低点 O , w 为索重力(按跨长分布), H 为索水平拉力, 其表达式为:

$$H = \frac{wL^2}{8f}$$

式中 L ——跨长
 f ——矢高

索长

$$S = L \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right] \quad (1-3)$$

索最大拉力(支点)

$$T_{\max} = H \left[1 + 16 \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1-4)$$

坐标原点位于左支点(A)的线形表达式:

$$y = \frac{4f}{L^2} x(1-x) \quad (1-5)$$

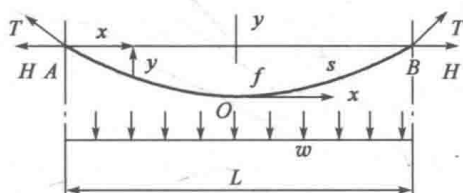


图 1-5 抛物线

另一说:瑞士人 Leonhard Euler(1707 ~ 1783)按 $\int wds$ 积分,求得索在自重力作用下的线形为悬链线。当年年仅 20 岁的 Euler 受聘于俄罗斯任教,他邀请 Nicalas Fuss(1755 ~ 1823)同去。当时俄正计划修一座跨 Neva 河的吊桥,经 Fuss 论证,索在均布荷载作用下的线形为一抛物线。

附录 悬链线、抛物线线形公式推导

(1) 悬链 $y = c \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{c}$ 公式推导(图 1-4)

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{w}{H} \cdot \frac{ds}{dx}$$

$$\text{令 } c = \frac{H}{w},$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{c} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\text{设 } \dot{y} = p, \quad \ddot{y} = \frac{dp}{dx}$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{c} [1 + \dot{y}^2]^{1/2}$$

于是

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{c} (1 + p^2)^{1/2} \quad \text{或} \quad \frac{dp}{(1 + p^2)^{1/2}} = \frac{1}{c} dx$$

积分

$$\int \frac{dp}{(1+p^2)^{1/2}} = \frac{1}{c} \int dx$$

上式有两解: (I) $\int \frac{dp}{(1+p^2)^{1/2}} = \operatorname{arsh} p$ (II) $\int \frac{dp}{(1+p^2)^{1/2}} = \operatorname{Lg}_e[p + (p)^{1/2}]$

按(I)求解

$$\operatorname{arsh} p = \frac{1}{c} x + c_1$$

应用边界条件 $x=0, y=0; p=0, c_1=0$

所以

$$p = \operatorname{sh} \frac{x}{c} \quad \text{或} \quad \frac{dy}{dx} = \operatorname{sh} \frac{x}{c}$$

积分

$$y = c \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{c} + c_2$$

当 $x=0, c_2=0$

所以

$$y = c \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{c}$$

(2) 抛物线 $y = \frac{w}{2H} x^2$ 公式推导(图 1-5)

设跨径为 L , 矢高为 f , 沿跨长索重 w 为已知, 以跨中最低点为原点, 索曲线

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{w}{H}$$

两次积分:

$$y = \frac{w}{2H} x^2 + c_1 x + c_2$$

按边界条件 $x=0, \frac{dy}{dx}=0 \quad c_1=0; \quad x=L, y=0 \quad c_2=0$

所以

$$y = \frac{w}{2H} x^2$$

如令 $x = \frac{L}{2} \quad y = f$

得:

$$H = \frac{wL^2}{8f}$$

如以左支点 A 为原点

$$y = \frac{M}{H} \quad M = \frac{1}{2} wLx - \frac{1}{2} wx^2 = \frac{w}{2} x(L-x)$$

所以

$$y = \frac{\frac{1}{2} wx(L-x)}{\frac{wL^2}{8f}} = \frac{4f}{L^2} x(L-x)$$

1.2 现代悬索桥

1.2.1 Tacob's Creek 桥(1801)

现代悬索桥(吊桥)19 世纪初在美国出现(图 1-6)。



图 1-6 Tacob's Creek 桥

为适应行车(马拉车)需要而修建的 Tacob's Creek 吊桥。跨径 70 英尺(21m),桥面宽 12 英尺(3.8m),主缆为铁链,木质桥面。位于美国 Pennsylvania,1801 年建成。设计构思是:

- ①设置锚和索塔;
- ②主缆与桥面分开,设置垂直吊杆;
- ③主缆从索塔顶按同一倾角向跨中设置。

从此奠定了现代悬索桥设计的模式。

设计人 James Finley(1762—1828),出生于爱尔兰,后移民美国,就读于宾夕法尼亚大学,初从业法官,后立志修桥。1801~1823 年期间,修建不少同类型的吊桥,遍及北美。

1.2.2 Newbury Port 桥(1829)

大桥位于 Massachussts,跨 Merimac 河,主跨 72m,双车道,中间设人行道分隔,强大的石砌索塔显得非常壮观(图 1-7)。设计人 James Finly 从而得到很大荣誉,受到称赞。

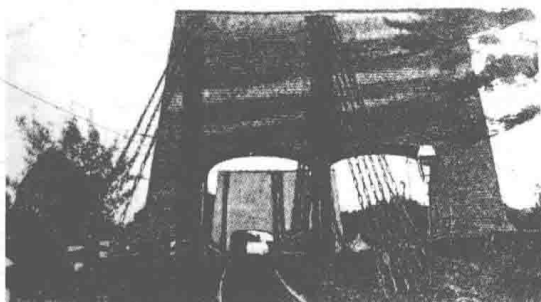


图 1-7 早期吊桥的庞大圬工索塔(Newbury Port 桥透视)

遗憾的是,大桥建成后不久,在 James Finley 去世前 3 年,即 1825 年,桥被 6 匹马拉车压塌,比他预计周期 50 年减少了一半,成为其终身憾事。

不过大桥很快按原样修复。主缆铁链由 6 根增加到 12 根,索力增加一倍。修复工程于 1829 年完工。该桥使用 80 年后,于 1909 年退役。庞大的圬工索塔,成为早期吊桥的特征。

从此以后,美国再也没有采用铁链修建吊桥的纪录了。而美式吊桥模式,随后就传到了欧洲。

1.3 英国 1816~1864 年修建的吊桥

1.3.1 Dryburgh 桥

英国自 1741 年建成第一座铁索桥(Winch bridge)后,就再没有新的纪录。直到 1816 年

才建了一座宽仅 1.2m, 跨长 33.6m 的人行桥。1817 年, 又按同样的桥型修建了两座, 一座跨径 33.5m, 一座跨径 79.2m, 桥面宽 1.2m。

为防止摇晃, 采用斜拉索来加强, 有似现今的斜拉桥, 如图 1-8 所示。

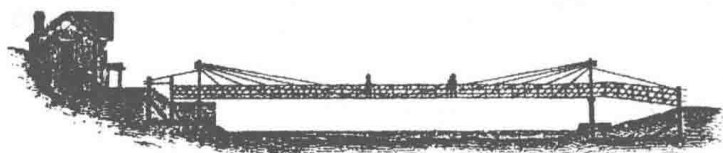


图 1-8 Dryburgh 桥(1817)

该桥使用不到半年, 就被强风吹倒。在修复 79.2m 跨径桥时, 引进了美国建桥经验, 增加了悬挂索(塔至塔)和垂直吊杆仍保留斜索, 如图 1-9 所示。



图 1-9 Dryburgh 桥重建图

这一新概念, 英国从来没有过, 受到英格兰权威工程师 Robert Stevenson 的赞誉, 认为是今后吊桥设计的范例。

在重建过程中, 采用了 4mm 圆眼杆(Eyebars)代替原来的环链, 改善了环链受力缺陷, 并增加垂直吊杆装置, 如图 1-10 所示。

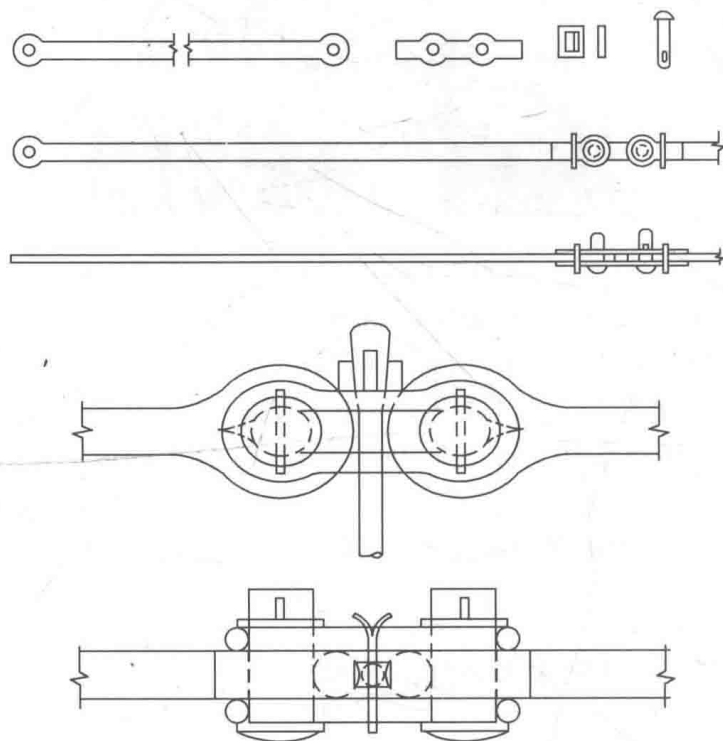


图 1-10 Brown 式扁平眼链

1.3.2 Union 桥

Union 桥亦称 Chain 桥,为一悬挂木桥面的吊桥,跨 Tweed 河,联结英格兰和苏格兰,称之为联盟桥(Union Bridge)。主跨 137m(449 英尺),桥面宽 5.5m(18 英尺),具有行车(兽力车)过人的功能。采用了 Brown 式扁平眼杆链作主缆,这一新技术,成为英国第一座能通行车辆的现代化吊桥,1820 年建成,创世界纪录。

大桥设计人为一皇家海军退役军官 Samuel Brown。1817 年开始设计,经著名工程师 John Rennie 审核,建议采用石砌桥台和索塔。初始设计,按两侧各三根链支承桥面,垂度 9.15m,矢跨比 1:15,按现今观点,竖向刚度比较大。1902 年,又增加一对钢丝绳,予以加强。木质桥面,通过车辆时,站在桥上的人就好像有在船上的感觉。因此,限制车辆过桥,每次一辆,不超过 2 吨。

大桥于 1819 年 8 月 2 日开工,1920 年 6 月 26 日建成通车。Robert Stephenson 还有其他著名人士参加典礼。通车前,以双马二轮车拖 12 辆二轮小车作过桥试验,然后 700 观众通过。

大桥 1974 年又经一次翻修,加强了链。2007 年因一吊杆断裂,关闭数月,后以螺丝拉杆替换,恢复通车。2008 年 12 月因岸坡滑移,而封闭交通停止使用。大桥设计图,如图 1-11 所示。

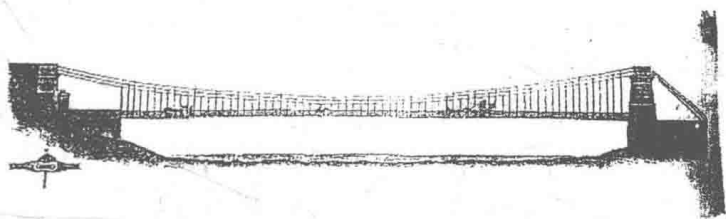


图 1-11 Union 桥(1821)

大桥设计人 Samuel Brown(1779~1852),原服役于海军,从事船锚制造。1808 年,发明双眼圆形扁平杆链,并取得专利,成为英国名人,授予桥梁工程师称号。由于眼杆链比环链强度大,安全度高,因此,当年欧洲修建吊桥,得到广泛应用。

1.3.3 Menai 桥(1826)

大桥跨越英国 Menai 海峡,是世界第一座容许通过海轮的大跨吊桥。主跨(索塔中心距)176.6m(580 英尺),桥宽 4.88m(16 英尺),中设 1.22m(4 英尺)的人行道,作为分隔带。主缆 2 根,由双眼拉杆(Eye-bar)组成,木质桥面;石砌索塔,高 46.4m(152.8 英尺)。以 3~4 孔石砌拱桥作为两岸引桥,雄伟壮观。设计建成后的大桥,如图 1-12 所示。

大桥设计监造人 Thomas Telford。该桥 1819 年开工,1826 建成,历时 7 年。第一次修建如此大跨吊桥,没有经验,施工前,在附近高地做实体模拟试验,预先拼装 180m 长索链,按成桥设计位置。先安装吊杆 57 对,然后以卷扬机提升到索塔顶,以确定索形和索拉力(从无应力状态过渡到成桥状态)。测得的结果是,主缆每根总重 23.5t,以 395kN(39.5tf)的提升力拉到塔顶。拆除后,陆运到工地桥头,安放在预先设置在桥位河流中的木筏上(长 140m,宽 1.4m),然后提升到索塔顶就位,主缆安装如图 1-13 所示。

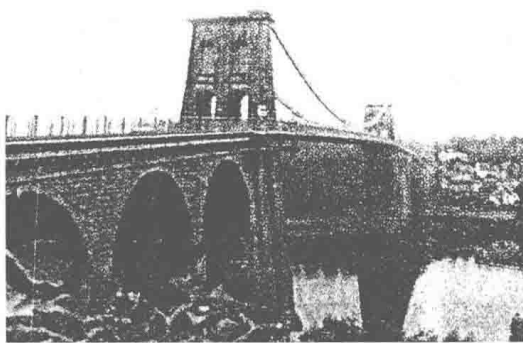


图 1-12 Menai Straits 桥

这一施工试验方案,酷似我国现今采用的架设倒装法。

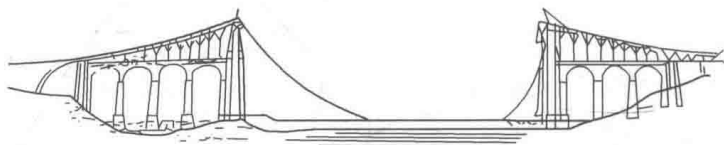


图 1-13 主缆吊装

大桥施工的精心安排,使得工程顺利进行。可未曾想到,桥未建成,即发生颤动(Oscillation),跨中摆动厉害,随即在主缆间增加横向拉杆补强。通车不到一星期,遇大风,桥面横梁失效,吊杆断裂,经抢修才恢复通车。

10年后,1836年,又遇一次强风, $L/4$ 桥跨断面振幅达4.9m,经桥面加强,提高刚度,有所改善。但3年后,遇强风,桥面产生扭转振动,桥左右晃动,导致444根吊杆断裂,仅存中间人行道,好在主缆未遭损毁,桥未倒塌。1892年,以钢结构更换桥面,1931~1939年间,又以钢链杆更换铁链杆,去掉中间两链索,改设在两侧,并以钢桁架作为加劲梁。

大桥建成后。先后经过4次抢修加强,除重力式石砌桥塔和引桥外,其余部分,几乎是全部翻新改建。大桥至今仍在限载使用。大桥可谓是多灾多维,经验教训不少,留待后人反思总结。

1.3.4 Clifton 桥(1864)

该桥位于苏格兰,跨Avon河,1864年建成。主跨194m,主缆采用双眼拉杆链。采用招标投标方式选取设计方案。经1829年和1830年两年投标,最后24岁青年工程师Brunel击败两位著名工程师Brown(Union桥设计人)和Telford(Menai桥设计人)取胜,最终设计草图如图1-14所示。



图 1-14 Clifton 桥

大桥于1831年开工,时值当年社会混乱,经济不景气,一直拖到33年后,即1864年才建成。可惜设计人Brunel于1853年去世,时年53岁,未亲眼见到大桥建成。但他的原始设计图和计算书,现仍保留在Bristol大学图书馆。

设计大桥时,要求跨径不超过200m,并要求对三种索形,普通悬链线(索重按索长计),等