

邓文中 著
赖亚平 邓宇 李岳 译

科罗尔大桥的故事



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

Copyright © 2014 by

International Association for Bridge and Structural Engineering

Original Version by IABSE

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher. And the Chinese version of the books are solely distributed by China Communications Press Co., Ltd. The rights include the rights for all texts, the layout, the English and Chinese translation and the illustrations as marked on illustration credit list.

本书经邓文中先生及国际桥梁及结构工程协会 (International Association for Bridge and Structural Engineering) 正式授权我社在中国出版、发行中文版。

图书在版编目 (CIP) 数据

科罗尔大桥的故事 / 邓文中著 ; 赖亚平, 邓宇, 李岳译. — 北京 : 人民交通出版社股份有限公司, 2019.5

ISBN 978-7-114-15503-1

I. ①科… II. ①邓… ②赖… ③邓… ④李… III.

①跨海峡桥—桥梁工程—介绍—帕劳 IV. ①U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 082036 号

著作权合同登记号: 图字 01-2019-0405

The Story of the Koror Bridge

书 名: 科罗尔大桥的故事

著 者: 邓文中

翻 译: 赖亚平 邓宇 李岳

责任编辑: 韩亚楠 郭红蕊

责任校对: 刘芹

责任印制: 张凯

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.ccpres.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: 北京印匠彩色印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 7

字 数: 116 千

版 次: 2019 年 5 月 第 1 版

印 次: 2019 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15503-1

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

科罗尔大桥(Koror Babeldaob Bridge),又名 Koror Babelthuap Bridge,简称为 Koror Bridge。大桥连接帕劳共和国的 Koror 和 Babeldaob 两个岛屿。科罗尔大桥的设计始于1974年,主要依据当时美国公路协会(AASHO)的公路桥梁规范,同时也参考了美国混凝土学会(ACI)的规范、欧洲混凝土委员会和国际预应力混凝土协会(CEB-FIP)的规范。

1977年4月科罗尔大桥建成时,成为当时世界跨度最大的预应力混凝土梁桥,主跨达240.7m。通车几年后,大桥跨中主梁下挠日益严重并超出预期。业主在1985年和1993年分别邀请了日本和美国的工程咨询公司对大桥进行全面的评估,两家公司评估的结论均认为该桥结构安全,但都无法解释大桥过度下挠的原因。为了改进桥面的行车平顺性,业主还是决定对科罗尔大桥进行整修。整修方案改变了大桥的结构体系并在桥上增设了大量的预应力。不幸的是,整修完成后不到3个月,1996年9月26日下午,大桥垮塌了。由于大桥倒塌后存在赔偿诉讼,所有关于这座大桥的资料被封存起来,大桥的残块也很快被清理了。因此,很长一段时间内,大家无法对大桥倒塌原因进行研究。直到最近,经过一批工程师不懈的努力,大桥倒塌的资料才被允许开放给研究这个问题的学者。

工程不是科学。科学的目的是寻求真理,工程的目的是为人类服务。科学是以已经确认的真理为基础,去推译和发现新的或已存在的事实。工程是以累积的经验为基础,去拓展和改良人类生存的环境。经验永远是不完整的,但工程师不可能等待科学家把所有需要的真理都发现之后再开始设计和建造。中国的万里

长城、埃及的金字塔及许多伟大的古建筑在建造的时候,万有引力定律还没有被发现,材料力学也还不存在。工程师只能依靠当时已经累积的经验去设计和建造。两千年前如是,今天也如是!

“前事不忘,后事之师!”前面说过,工程的基础是累积的经验,有成功的经验和失败的教训。尤其是失败的教训对我们更重要。从失败中可以学到很多应该和不应该做的事情。但要使“前事”能作为“后事之师”,我们必须细心和坦诚地研究和探讨失败的原因。这就是我写这本书的缘起。

邓文中



目录

第一章 大桥的历史	1
帕劳共和国	1
投标过程	3
第二章 原来的设计	5
设计构思	5
预应力体系	9
大桥的安全度	9
收缩和徐变	18
预应力损失	20
倾覆安全系数	20
徐变挠度的预测	20
第三章 施工过程	23
现场变化	31
第四章 大桥实况	33
实测数据	37
第五章 大桥的维修	41
维修方案	41
第六章 大桥的垮塌	45
法庭资料	45
破坏机理	54
大桥垮塌后要讨论的问题	56

第七章 假如没有维修的情况	57
第八章 大桥过度下挠的原因	59
收缩和徐变的计算	59
根据现行 AASHTO/LRFD 规范计算	59
1990 CEB-FIP 模式	60
徐变计算的讨论	61
FIB 2010 规范(2014 版)	62
时间系数	62
FIB 2010 模式	64
拉应力下的徐变	64
徐变模式的校准	65
B3 模型	65
ACI, AASHTO 和 CEB-FIP	66
加载龄期的问题	67
其他因素对下挠的影响	70
差异收缩的影响	71
主墩沉降的影响	71
预应力损失的影响	72
裂缝对挠度的影响	74
测试结果解释	76
加州松谷溪桥的经验	78
世界范围的调查	81
第九章 垮塌的引发点	83
第十章 其他垮塌原因的假设	87
第十一章 讨论	91
本书的目的	91
科罗尔大桥在结构上是安全的	91
长期挠度	91
最有可能的罪魁祸首——预应力损失	92
总结	95
致谢	97
计量单位	99
参考文献	101

第一章

大桥的历史

帕劳共和国

科罗尔大桥(Koror Bridge),也称 Koror Babeldaob 大桥,或 Koror Babelthuap 大桥(图1),其所在地帕劳共和国(Republic of Palau)是由南太平洋300多个小岛组合而成的群岛国家,属加罗林群岛(Caroline Islands)。1898年,西班牙把这些岛屿卖给德国。1914年,德国又将这些岛屿出让给日本。第二次世界大战时,美国和日本在此有过十分激烈的争夺战,两方阵亡总共12000多人。战后由联合国交由美国托管,在1947年成为美国托管太平洋群岛(U. S. Trust Territory of the Pacific Islands)。1969年,帕劳开始就未来政治地位同美国谈判。1982年,帕劳与美签订《自由联系条约》,该条约在帕劳1993年举行的公民投票中获得通过。根据该条约,帕劳于1994年结束其托管地位,成为独立的主权国家。

在1947年美国开始托管之后,美国在这里设有一个海军基地。科罗尔大桥的建造,大部分也是由美国政府资助的。



图1 科罗尔大桥

科罗尔大桥连接科罗尔 (Koror) 和巴伯特奥 (Babeldaob, 或称 Babelthuap) 这两个比较大的岛屿。目前,大桥还是这两个岛屿间唯一的通道。帕劳共和国中大部分人口集中在科罗尔岛上,而唯一的飞机场则建在巴伯特奥岛上。在大桥建造之前,两岛由渡船联系(图 2)。

帕劳共和国离最近的菲律宾也有大约 800km,全年温度在 23 ~ 32℃ 之间,平均温度是 28℃,平均湿度是 82%。每年日照时间超过 2300h。年降雨量大约 3670mm。

帕劳共和国的陆地总面积约 459km²,人口约 2 万人。旅游是主要的经济来源。

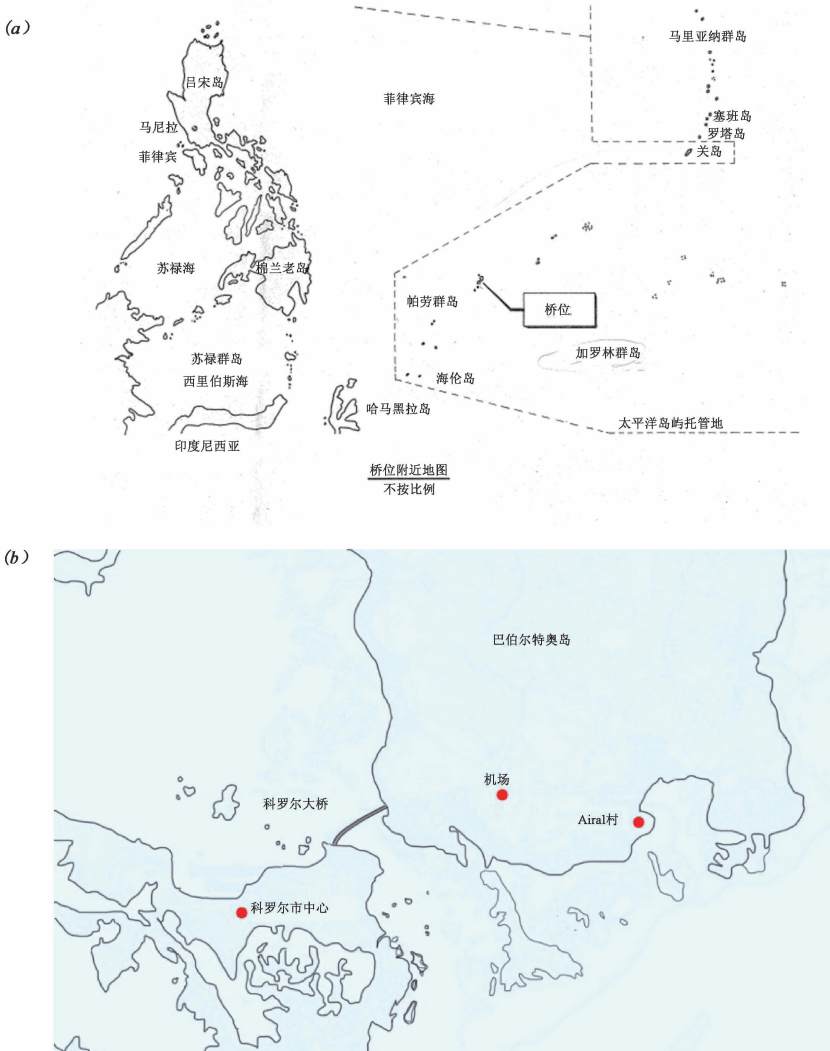


图 2 桥位地图

投标过程

科罗尔大桥最初的设计由美国夏威夷州的工程咨询公司 Alfred Yee and Associates (AYAA) 完成^[1-3], 根据此设计完成施工招标。当时, 科罗尔大桥设计为一座三跨预应力混凝土桥, 主跨 560ft (170.68m)。桥面布置为双向两车道及单侧人行道。施工招标文件中明确中标方可以对设计方案进行调整, 允许将主跨增加到 760ft (231.65m), 一跨跨过桥下水域, 避免在深水中设置桥墩。最终韩国的 Ajoo Construction Company 中标, 中标价格为 450 万美元。

然而, 数月过后, Ajoo 公司一直未开始动工。因此, 业主把这个工程转交给关岛一家由韩国人开的名称为苏斯奥的工程公司 (Socio Construction Company)。由于标价过低, 业主增加 80 万美元工程费用, 整个合同金额为 530 万美元^[4]。

苏斯奥工程公司认为原设计方案的两个主墩建设费用过高, 因为桥墩处不仅水深超过 30m, 而且水流湍急, 桥墩施工必须使用重型设备, 但岛上根本无法满足这些需求。如果向菲律宾或者其他国家租赁并运到现场, 成本太高。因此, 苏斯奥工程公司决定根据标书的建议, 将主跨增加到 760ft (231.65m)。当时, 各方都认为花费 530 万美元建造这样一座主跨 760ft 的大桥基本可行。这样, 科罗尔大桥重新设计时重点关注于工程经济性^[5]。

苏斯奥委托德国地伟达公司 (Dyckerhoff & Widmann, Inc, 简称 Dywidag) 的美国分公司完成新的桥梁设计。按照 760ft (231.65m) 主跨进行的设计即将完成时, 苏斯奥公司发现两个主墩仍然布置在两岸的斜坡上和水中。因此, 大桥主跨又增加到 790ft (240.792m) (图 3), 以完全避免水中施工。新桥的设计成果由原设计单位 AYAA 进行审核确认。这期间, AYAA 并入了美国的 Leo Daly 公司, 施工期间是 Leo Daly 公司代为监管。

除了砂、石, 帕劳共和国其余建筑材料全部都只能进口。预应力钢材由美国进口, 水泥和钢筋从日本进口, 悬臂施工用的挂篮从美国进口^[5], 是利用原来用于美国加州松谷溪大桥 (Pine Valley Creek Bridge) 的挂篮改装的。工人主要是来自韩国。

松谷溪大桥是美国第一座大跨度预应力混凝土节段桥梁, 主跨 450ft (137.16m), 1972 年开始建造, 1975 年完工。设计规范基本遵循美国 AASHTO (AASHTO 后来改名为

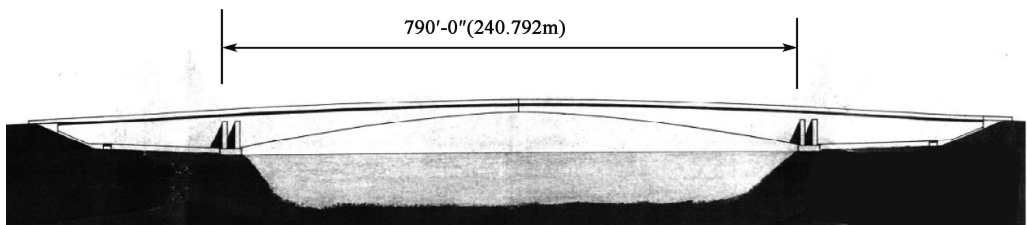


图 3 科罗尔大桥主跨

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials 的简写^[6]) 桥梁规范。当时美国的大跨度预应力混凝土大桥的建造才刚刚开始,设计规范还在发展初期,并不完善,不足之处参考了美国混凝土学会 ACI^[7]、德国的 DIN 和欧洲的 CEB-FIP^[8] 规范。

科罗尔大桥重新设计时,日本 236m 跨度的 Hikoshima 大桥和 240m 的 Hamana 大桥刚好建成。790ft (240.792m) 的科罗尔大桥的主跨只长了不足 1m,很意外地成为世界上最大的跨度(图 1、图 3)。

第二章

原来的设计

设计构思

科罗尔大桥的结构体系是由当地建设条件所决定的。

帕劳共和国是一个位置偏远的岛国,距离最近的邻国菲律宾都超过 800km。当时的运输条件和通信条件都非常差,绝大多数的建筑材料都依靠进口。岛上人口稀少,基础设施条件差,大桥建成后的维护工作自然很难到位。当地空气湿度大,盐分含量也高,科罗尔大桥最初采用易于维护的预应力混凝土桥是合理的,后续重新设计时也慎重考虑了这些条件。

在初步设计阶段,对多种可行的结构体系进行了论证,最终比选的三个方案为:

1. 连续梁结构方案,四个桥墩上均设置滑动支座,其中一个主墩的支座约束纵向位移。
2. 主梁与主墩固结,边跨桥墩设置滑动支座,同时主跨跨中设置可纵向移动的铰。
3. 与第二方案基本一致,但主墩上增设混凝土铰以减小由于基础变位引起的弯矩。

科罗尔大桥位于太平洋中部,空气中盐分很重,虽然大桥主跨已达 790ft (240.79m),但两个主墩还是非常靠近水面,海水常会溅到桥身上。在这种环境下,若主墩设置滑动支座,很难解决支座腐蚀的问题。并且,在 20 世纪 70 年代,这种跨径规模桥梁的主墩支座制造难度非常高。所以第一方案并不合适。

第三方案不被接受有两个原因:第一,如此大跨度的桥梁,混凝土铰太大,并且施工难度大;第二,混凝土铰结构要在表层混凝土开裂后才能开始工作,在科罗尔大桥桥位环境下,这些裂缝对结构耐久性的影响是非常严重的。因此,第三方案也不能被接受。所以,最后选择了第二方案。主梁与主墩固结(图 4),同时,在跨中设置仅传递剪力并且在温度、收缩和徐变作用下可纵向滑动的铰。这样,主跨就是一对长悬臂梁。对于大跨度桥梁而言,结构自重是设计过程中需要重点考虑的因素。由于采用悬臂结

构,主梁跨中的弯矩和剪力都非常小,其梁高可显著地降低到 3.66m,这也将有效减少悬臂梁弯矩^[9]。

当时曾考虑过两种不同长度边跨的方案:410ft(125m)的边跨和 237ft(72.24m)的边跨(图4)。最后决定选择较短的边跨,短的边跨比较经济,更好看。从桥梁美学上,因为主跨很大、很窈窕,比较短而粗壮的边跨使大桥看起来更稳重。

主梁很窄,桥面宽度仅 9.63m,无须特别考虑剪力滞影响,可认为全截面受力。

AYAA 最初设计的主跨跨度 560ft(170.68m),箱梁很窄。当主跨跨度增加到 790ft(240.79m)后,原有的主箱宽度在重新设计中就显得更窄,因此主梁宽度也增加到了 24ft(7.32m)。主梁截面采用两侧带短悬臂的箱形截面。箱室宽度和跨度的比例大约是 1/33,较为合理。

跨中截面梁高 3.66m,墩顶处梁高 14.02m,从跨中到墩顶处梁高按照抛物线渐变。常规的变截面混凝土连续梁桥的墩顶处梁高一般约为跨径的 1/20,即约等于 $241/20 = 12.05$ (m)。科罗尔大桥在设计时适当加大了墩顶处梁高以增加主梁刚度,达到降低主梁应力和变形的目的。尤其是在主墩附近,这里的刚度对大桥的挠度影响最大。主梁在跨中看起来很轻薄,在桥墩处很厚重,这样的造型更美观。

主梁混凝土的设计圆柱体抗压设计强度为 $f'_c = 5.0\text{ksi} = 35\text{MPa}$,相当于立方体抗压强度 45MPa。AASHTO 规范中混凝土结构在恒载和活载作用下的允许拉应力为 1.5MPa。但科罗尔大桥设计比较保守,不允许出现拉应力。依照 AASHTO 规范,允许

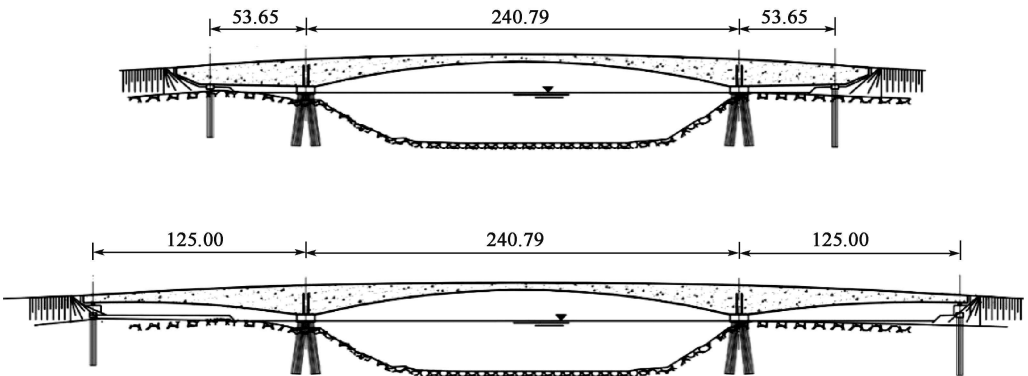


图4 两种长度边跨方案(尺寸单位:m)

压应力为 $0.4f'_c = 14.0\text{MPa}$ 。在施工期间和完成徐变之前,主梁混凝土的允许应力范围在 1.5MPa 拉应力和 -15.75MPa 压应力之间。

钢筋混凝土重度假设为 $0.150\text{kip}/\text{ft}^3$ ($24\text{kN}/\text{m}^3$)。工地上实验得出净混凝土的重量是 $0.1396\text{kip}/\text{ft}^3$ ($22.4\text{kN}/\text{m}^3$),加上普通钢筋和预应力钢筋大概是 $0.150\text{kip}/\text{ft}^3$ ($24\text{kN}/\text{m}^3$)。

在设计松谷溪和科罗尔大桥的时候,美国规范中混凝土箱梁剪力的设计主要对象是小跨度桥梁,不适用于大跨度的混凝土桥梁^[10]。应用这些规范设计大跨度桥梁,腹板的承载力会偏低。所以,科罗尔大桥的剪力设计没有应用 AASHO 的规范,而是依照“桁架理念”设计。

科罗尔大桥主梁腹板厚度为 356mm ,边跨末端梁段腹板厚度为 584mm 。在大跨度混凝土桥设计过程中,尤为重要地是尽可能地减小腹板厚度以降低自重。科罗尔大桥设计时,结合腹板厚度取值,做了大量的分析以确保结构安全。

科罗尔大桥主梁抗剪按照桁架理论进行设计(图 5),类似于如今的“撑杆—系杆”理论。按照美国设计规范,主要考虑极限状态。AASHO 规范中,截面最大的极限剪力计算公式为:

$$V = 1.5V_{DL} + 2.5V_{LL}$$

计算剪力采用的荷载系数大于计算弯矩采用的荷载系数。

在设计时,假定竖直面内的剪力都由箍筋及竖向预应力钢筋承担,压力则由混凝土承受。除了强度计算外,还考虑了腹板的稳定分析。实际上,虽然科罗尔大桥跨度非常大,但桥面很窄,实际的剪应力并不高。

基于简化的 45° 斜角桁架结构,主梁的底板等效为桁架下弦杆。那么,腹板的设计剪力就是:

$$V^* = D\sin 45^\circ = V + T\sin\alpha - B\sin\beta$$

顶板的坡度 α 大约等于路面的纵坡,最大 6% 。为了简化,我们可以假定 $T = B$,那么腹板的剪力可以简单地写成:

$$V^* = V - B(\sin\beta - \sin\alpha)$$

或者,腹板的剪应力是:

$$v^* = \frac{V^*}{2ht}$$

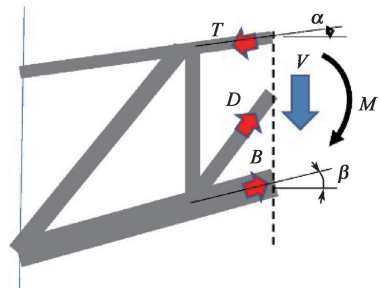


图 5 桁架比拟

式中, V 是整个横截面的剪力; B 是底板的总压力, 取组合荷载中的最小值; h 是底板重心与上缘预应力束的重心的距离; β 是底板的倾角; t 是每片腹板的厚度, $2t$ 代表两片腹板。

这里, 底板应力的总和 B , 对腹板的应力有很大的影响。底板的应力越大, 腹板的应力越小。在极限状态下, B 大约等于 M/h , 这里 M 是弯矩。或者:

腹板的剪力为:

$$V^* = V - (M/h)(\sin\beta - \sin\alpha)$$

腹板的剪应力为:

$$v^* = \frac{V - (M/h)(\sin\beta - \sin\alpha)}{2ht}$$

根据原设计记录, 主墩旁的主梁横截面的最大剪力为:

$$V^* = 5930\text{kips} (= 26.58\text{MN})$$

这样的话,

$$\begin{aligned} v^* &= 59\text{kfsf} (= 2.83\text{MPa}) \\ &= 5.5\sqrt{f'_c} = 0.082f'_c \end{aligned}$$

1974 年, AASHTO 还没有关于最大允许剪应力方面的规定, 但这个剪应力值在现在的 AASHTO 看来也是可以接受的。

根据上面的公式, 弯矩越大, 腹板的剪应力就越小。弯矩显著减小, 则腹板的安全性就可能降低。而科罗尔大桥是一对悬臂梁, 弯矩和剪力是相互耦合的, 所以这样的分析是安全的。

回到剪力滞分析, 截面对角线方向的压应力计算公式为:

$$\sigma_D = \frac{V - B(\sin\beta - \sin\alpha)}{2ht}$$

根据这个公式计算, 科罗尔大桥主跨的腹板在极限荷载下的压应力(而非剪应力)大约是 130kfsf (6.0MPa), 只是混凝土圆柱体抗压强度的 17%, 所以腹板设计是安全的。这种分析方法在 20 世纪 70 年代还不是 AASHTO 的一部分, 但 AASHTO 允许工程师使用合理的设计方法来设计大跨度桥梁。

预应力体系

图 6a ~ h 是当时的部分施工图。图 6e ~ h 是大桥的预应力体系。这座桥的变更设计和预应力材料都由地伟达 (Dywidag = Dyckerhoff & Widmann AG) 美国分公司提供。从 1952 年建的第一座节段桥梁开始,直到 1980 年,地伟达公司在预应力桥梁上一直都使用他们拥有专利的预应力螺纹钢筋,直径 32mm,极限强度 150ksi (1050MPa)。这些预应力螺纹钢筋上全长分布的螺纹是和预应力螺纹钢筋一起热轧的,所以它可截断成任何长度,然后用连接器加长。它的定尺长度是 12m,但可在厂内切成预定的长度。

这种预应力螺纹钢筋的直径比较大,不能像钢绞线那样卷成一卷方便运输。在节段施工时通常每两段就用连接器连接起来。预应力螺纹钢筋要在混凝土浇筑前安置好,在整个长度内预应力螺纹钢筋全部连接好之后才能张拉。在设置连接器的位置,要加大波纹管的直径以容纳连接器。这些预应力螺纹钢筋的极限强度比较低,科罗尔大桥在 0 号块处箱梁的顶板一共有 310 根预应力螺纹钢筋,分 4 层排列,根据受力需要在以后的节段逐渐减少。

当时的 AASHO 规范规定预应力螺纹钢筋的张拉允许应力是 $0.8f_u$,张拉锚固后的允许应力是 $0.7f_u$,考虑预应力损失结束后的容许应力是 $0.6f_u$ 。 f_u 是预应力螺纹钢筋的极限强度。预应力螺纹钢筋通常都是直的,摩擦损失很低。根据地伟达公司的资料,应力松弛的损失假设为 3.0%;由于这些预应力螺纹钢筋的允许应力低,可忽略不计。

除上述纵向预应力外,箱梁还设置有桥面板中的横向预应力和在腹板中的竖向预应力。根据车辆荷载作用下桥面板的应力布置横向预应力。

竖向预应力是用来承受大部分由剪力引起的拉应力,剩余的剪力由普通钢筋承受。设计中,假设腹板中 50% 的普通钢筋参与承受剪力。

大桥的安全度

在 1974 年设计这座桥的时候,根据 AASHO 的规范,极限状态荷载组合如下:

$$M_u = (1.30M_{DL} + 2.17M_{LL} + M_{Psec})/0.90$$

式中,0.90 是极限荷载强度系数。

设计文件中列出了极限状态组合弯矩值。

原桥主跨结构体系是一个静定体系,没有预应力引起的二次弯矩。

我们可以通过简单的计算求证大桥的安全度,以距墩顶 14m 处节段为例,这里也被认为是大桥倒塌开始的地方。设计文件中显示,在这里的主梁顶板中有 304 根 Dywidag1.25in (32mm) 直径的预应力钢棒,每根预应力钢棒的横截面面积为 1.25in^2 ,极限拉力是每根 $1.25 \times 150 = 187.5$ (kips) (85.2kN)。钢棒的总面积是

