



高等学校土木建筑工程类系列教材

土木工程事故案例

- 主 编 陆小华
- 副主编 李广信 杨光华 黄宏伟



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



高等学校土木建筑工程类系列教材

土木工程事故案例

- 主 编 陆小华
- 副主编 李广信 杨光华 黄宏伟
- 参 编 陶能付 杨蕴萍



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程事故案例/陆小华主编;李广信,杨光华,黄宏伟副主编. —武汉:
武汉大学出版社,2009. 10

高等学校土木建筑工程类系列教材

ISBN 978-7-307-07304-3

I. 土… II. ①陆… ②李… ③杨… ④黄… III. 土木工程—工程
事故—高等学校—教材 IV. TU712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 156624 号

责任编辑:李汉保 责任校对:黄添生 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉中远印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:289千字 插页:1

版次:2009年10月第1版 2009年10月第1次印刷

ISBN 978-7-307-07304-3/TU·79 定价:20.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木建筑工程类系列教材

编 委 会

- | | | |
|-------|-----------|---------------------------|
| 主 任 | 何亚伯 | 武汉大学土木建筑工程学院, 教授、博士生导师 |
| 副 主 任 | 吴贤国 | 华中科技大学土木工程与力学学院, 教授、博士生导师 |
| | 吴 瑾 | 南京航空航天大学土木系, 教授, 副系主任 |
| | 夏广政 | 湖北工业大学土木建筑工程学院, 教授 |
| | 陆小华 | 汕头大学工学院, 副教授, 副处长 |
| 编 委 | (按姓氏笔画为序) | |
| | 王海霞 | 南通大学建筑工程学院, 讲师 |
| | 刘红梅 | 南通大学建筑工程学院, 副教授, 副院长 |
| | 杜国锋 | 长江大学城市建设学院, 副教授, 副院长 |
| | 肖胜文 | 江西理工大学建筑工程系, 讲师 |
| | 张海涛 | 江汉大学建筑工程学院, 讲师 |
| | 张国栋 | 三峡大学土木建筑工程学院, 副教授 |
| | 陈友华 | 孝感学院教务处, 讲师 |
| | 姚金星 | 长江大学城市建设学院, 副教授 |
| | 程赫明 | 昆明理工大学土木建筑工程学院, 教授, 院长 |
| 执行编委 | 李汉保 | 武汉大学出版社, 副编审 |

内 容 简 介

本书介绍国内外土木工程实践中实际发生的典型失败案例,以事故调查结果为依据,介绍事故发生、发展的过程,并对事故的原因、经验和教训进行分析和评论。全书分为6章,第1章介绍国外著名案例,这些案例的调查处理后来都对土木工程的理论、实践和法规产生了深远影响;第2章介绍地基基础事故案例;第3章介绍几个大型隧道工程事故案例;第4章介绍水利工程事故案例;第5章介绍脚手架、模板支撑和地下开挖临时地下连续墙等施工临时结构的事故案例;第6章介绍两个地震震害及其教训。

案例后面附上了相关思考题,要求学生在进一步检索阅读相关文献资料的基础上进行讨论,希望学生以这些案例为出发点进行深入的思考,从这些实践中吸取经验和教训,成长为成熟的有社会责任感的土木建筑工程工程师。本书可以作为高等院校土木建筑工程类本科生、硕士生的教材,也可以供高等院校教师、相关工程技术人员参考。

序

建筑业是国民经济的支柱产业,就业容量大,产业关联度高,全社会 50% 以上固定资产投资要通过建筑业才能形成新的生产能力或使用价值,建筑业增加值占国内生产总值较高比率。土木建筑工程专业人才的培养质量直接影响建筑业的可持续发展,乃至影响国民经济的发展。高等学校是培养高新科学技术人才的摇篮,同时也是培养土木建筑工程专业高级人才的重要基地,土木建筑工程类教材建设始终应是一项不容忽视的重要工作。

为了提高高等学校土木建筑工程类课程教材建设水平,由武汉大学土木建筑工程学院与武汉大学出版社联合倡议、策划,组建高等学校土木建筑工程类课程系列教材编委会,在一定范围内,联合多所高校合作编写土木建筑工程类课程系列教材,为高等学校从事土木建筑工程类教学和科研的教师,特别是长期从事土木建筑工程专业教学且具有丰富教学经验的广大教师搭建一个交流和编写土木建筑工程类教材的平台。通过该平台,联合编写教材,交流教学经验,确保教材的编写质量,同时提高教材的编写与出版速度,有利于教材的不断更新,极力打造精品教材。

本着上述指导思想,我们组织编撰出版了这套高等学校土木建筑工程类课程系列教材,旨在提高高等学校土木建筑工程类课程的教育质量和教材建设水平。

参加高等学校土木建筑工程类系列教材编委会的高校有:武汉大学、华中科技大学、南京航空航天大学、湖北工业大学、汕头大学、南通大学、江汉大学、三峡大学、孝感学院、长江大学、昆明理工大学、江西理工大学 12 所院校。

高等学校土木建筑工程类系列教材涵盖土木工程专业的力学、建筑、结构、施工组织与管理等相关领域。本系列教材的定位,编委会全体成员在充分讨论、商榷的基础上,一致认为在遵循高等学校土木建筑工程类人才培养规律,满足国家教育部关于土木建筑工程类本科人才培养方案的前提下,突出以实用为主,切实达到培养和提高学生的实际工作能力的目标。本教材编委会明确了近 30 门专业主干课程作为今后一个时期的编撰,出版工作计划。我们深切期望这套系列教材能对我国土木建筑事业的发展和人才培养有所贡献。

武汉大学出版社是中共中央宣传部与国家新闻出版署联合授予的全国优秀出版社之一,在国内有较高的知名度和社会影响力。武汉大学出版社愿尽其所能为国内高校的教学与科研服务。我们愿与各位朋友真诚合作,力争使该系列教材打造成为国内同类教材中的精品教材,为高等教育的发展贡献力量!

高等学校土木建筑工程类系列教材编委会

2008 年 8 月

前言

1980年,哥伦比亚大学教授、著名建筑和结构工程教育家马里奥·萨瓦多里很高兴地告诉母亲,他出版了一本名为《建筑物如何站起来》(Why Buildings Stand Up)的著作,他母亲回答“嗯,不错!但我更关心建筑物是怎样倒塌的”。1992年萨瓦多里又同马蒂斯·李维合著了一本《建筑物是如何倒塌的》(Why Buildings Fall Down)。如今这两本书都是颇受读者欢迎的经典著作。随着科学技术的进步与发展,人类的建造手段与能力不断加强,每年都有无数大小工程成功建设,为人类的福祉服务。然而,我们时常也耳闻目睹各种工程事故的发生,给社会带来灾难和损失。那么这些事故是如何发生的?我们能够避免事故的发生吗?我们能从这些事故中学到些什么?

对已发生的事故统计分析表明,很大比例的工程事故是由于人为的失误,而不是不可抗拒的原因造成的。瑞士苏黎世联邦理工学院的一项研究,对世界上800个结构工程事故案例进行了分析,这些事故造成了504人死亡、592人受伤和数以亿元计的经济损失。相关研究发现,事故产生的原因包括:理解不足36%;低估了某些因素的影响,16%;无知、粗心、忽视,14%;遗漏、错误,13%;依赖不能控制的因素,9%;未知因素,7%;责任不明,1%;质量问题,1%;其他,3%。同一研究显示,这些事故中的 $\frac{3}{4}$ 是人为错误造成的,如果采取适当的管理措施,85%的事故是可以避免的。

在另一项研究中,海因里希调查了75 000件工伤事故,结果发现不可抗拒的因素只占2%,而人的因素占88%,物的不安全原因占10%。对我国近7年的地铁工程事故分析也可以发现,发生在晚7时到早7时的事故占90%;发生在周五、周六、周日三天的事故占80%,其中周六、周日两天的事故占近70%;所有事故中发生在附属工程中的占 $\frac{2}{3}$ 。可见,事故的发生主要是源于麻痹大意,放松警惕。

所谓工程,是指人类为了改善生活条件而进行的物化劳动的过程。所以工程不仅仅只是科学技术知识的运用,工程也包括管理、人文和道德层面的因素。是一项复杂综合的社会实践的过程。人类的工程实践早于系统的科学的形成,工程实践也就是科学技术诞生的源泉。早期的工程实践主要靠经验的判断。直至今日,在一些工程领域,例如岩土工程领域,经验判断仍然占重要的地位,这主要是源于客观对象的复杂性和人类认识的局限性。面对无垠的客观世界,人类要穷尽宇宙的奥妙几乎是不可能的,“天意从来高难问”,因而工程实践就不可避免有其盲目性和失败的风险。

总结经验,吸取教训,加深对自然规律的认识,从而也就推动了科学技术的发展。美国对塔科马大桥倒塌(见§1.1)的反思首次引入了风洞试验,并使人类对结构的空气动力性能有了崭新的认识;加拿大魁北克大桥的倒塌(见§1.2)被认为是工程师永远的耻辱,而套

在工程师手指上的铁指环时刻提醒他们记住这一耻辱;英国罗兰坊的局部倒塌(见 § 1.3)导致了结构规范和法规对连锁倒塌和结构鲁棒性(robustness)的一系列要求;新加坡对联合大厦倒塌(见 § 1.4)的调查催生了所有建筑必须接受周期性检查的法规;“9·11”事件(见 § 1.5)的调查发现,在救援过程中需要一些必要的程序规范。比如,要有一个比较完整、统一的标准和指引、指导对建筑物损害程度和可用性的评估;重大事故现场往往也是犯罪现场,志愿者参与救援和勘测行动的协调、身份认证和法律责任问题都需要有相应的预案的指引。而事故的全面调查就能发现这些需求并帮助制定符合现场要求的指引。魁北克大桥的倒塌和新加坡尼诰大道地铁站地下连续墙的倒塌(见 § 5.3)事件均表明,施工现场需要有人能在必要的时候下令停工,并撤出人员以避免事故的发生和人员伤亡,并且这样的人也必须具有这样的判断力、权威和责任。这些程序、规范和指引不能单靠理论分析和模拟得到,它们是以工程事故的惨痛付出为代价的。所以,对事故的发生进行深入的投资总结、吸取经验是非常重要的。

失败的案例是宝贵的财富,因为我们在其中常常会发现尚没有认识的东西。人们都是在失败中总结经验,增长才干,成为专家的。“九折臂而成医兮,吾至今而知其信然。”古往今来,真正的常胜将军其实是没有的,即使是天才,如果自傲轻敌,犯了错误又自欺欺人,那么在过五关、斩六将的辉煌之后,也可能落到走麦城的悲惨结局。

工程的风险是可以监控的,事故一般是可以避免的,是有预兆的,可以反映在监测数据中,事故萌芽到险情发生一般有一段时间。事故的发生往往是多种不负责任的因素叠加,失去了报警和补救的时机。这里就涉及一个重要的问题,即工程师的伦理(engineering ethics)教育问题。伦理就是“什么应当做,什么不应当做”,也就是一种行为准则。美国工程师协会有专门的“伦理规范”(Code of Ethics);在一些大学开设工程伦理课程。工程师应当是求真务实,一丝不苟,兢兢业业,对历史负责的,也就是职业的道德,是诚信和负责。我国目前进行史无前例的大规模工程建设,与科学技术的不适应相比较,工程技术人员的伦理观念方面的差距更为显著,是亟需加强的。

工程事故是惨痛的,生命和财产的损失应当换回一些经验和教训,所以事故的案例也是十分珍贵的财富,是工程伦理教育的最好教材。土力学的奠基人太沙基讲过:“A well documented case history should be given as much weight as ten ingenious theories.”(一个记录完善的工程实录等价于十个有创造性的理论)。失败的案例往往比成功的案例更加宝贵,因为我们在其中常常会发现尚没有认识的东西,或者值得吸取的教训。

2007年初,广东水电科学研究所总工程师杨光华教授到汕头大学讲学,讲座中介绍了他所处理过的一系列触目惊心的工程事故。他指出:“当我们发现哪里出现了问题,我们就应该在这里插上一个标签,警示后人不要再犯同样的错误”。所以,所有土木建筑工程(所有工程类)专业的学生都应该将“工程事故分析”作为一门必修课程,从前人的错误中学习,总结经验,避免类似事故的发生,并促进人类工程实践与管理的进步。

2007年7月武汉大学出版社组织出版高等学校土木建筑工程系列教材,并组织成立了以武汉大学何亚伯教授为主任委员的编委会。汕头大学陆小华即建议将土木工程事故案例列入计划,得到了编委会的认同,当即通过杨光华教授联系到清华大学李广信教授、同济大学黄宏伟教授讨论编书事宜,得到了三位教授的热情参与和鼎力支持。在进一步得到新加坡理工学院陶能付博士和汕头大学杨蕴萍老师的加盟后形成了一个实力雄厚、覆盖广泛的

编写团队。

本书分为6章,第1章(陆小华编写)介绍国外著名土木工程失败案例,这些案例的调查处理后来都对土木工程的理论、实践和法规产生了深远影响;第2章(杨光华、李广信编写)介绍地基基础事故案例;第3章(黄宏伟编写)介绍几个大型隧道工程事故案例;第4章(李广信编写)介绍水利工程事故案例;第5章(杨蕴萍编写)介绍脚手架、模板支撑和地下开挖临时地下连续墙等施工临时结构的事故案例;第6章(陶能付编写)介绍两个地震震害及其教训。

一个事故的发生往往是众多因素相互作用的结果,从工程理论的进步和经验的积累来说,总结经验教训、避免类似错误的重现的重要性要远高于确定事件的法律责任和经济责任。所以,一个事故的调查应该尽可能的还原事件发生、发展的全过程。研究、理解这个过程就能够更有效地总结经验。因此,只要具备足够的资料,本书中尽量对事件的过程进行一些叙述,这样学生可以比较全面地理解一个具体的工程实践中所涉及的各个方面、各种角色、他们所代表的利益、所采取的立场和对同一事件的不同反应。具备这样的理解,能预测这样的反应可能带来的后果,并知道采取相应的措施避免事故的发生,将有助于学生成长为具有社会责任感和职业道德的工程专业人员。

我们尽可能保持案例编写风格的一致性,然而,由于案例所涉及的方向、规模、调查处理方式和完整资料的可获得性的巨大差异,我们还是不能保证风格的完全统一。此外,国内类似书籍极少,缺少可参考借鉴的资料,加上作者水平有限,难免出现各种错漏,敬请读者批评指正!

作 者

2009年8月

目 录

第 1 章 国外著名土木工程失败事件	1
§ 1.1 塔科马大桥的倒塌	1
§ 1.2 魁北克大桥的建造	7
§ 1.3 罗南坊事故的启示	11
§ 1.4 新世界酒店的倒塌	15
§ 1.5 纽约世贸中心大楼的倒塌与调查	21
§ 1.6 豪晶酒店行人天桥倒塌	48
第 2 章 地基基础事故案例	53
§ 2.1 地基软弱下卧层的问题	53
§ 2.2 施工顺序的影响	57
§ 2.3 地基的变形协调问题	63
§ 2.4 软土地基中的侧向土压力问题	66
§ 2.5 桩基的负摩阻力问题	67
§ 2.6 软土地基中基坑开挖对工程桩的影响	71
§ 2.7 万亨大厦基坑的倒塌	72
§ 2.8 地下结构的浮起	80
§ 2.9 杭州地铁 1 号线湘湖站基坑事故	82
第 3 章 隧道工程事故案例	92
§ 3.1 南岭隧道塌方事故	92
§ 3.2 上海轨道交通 4 号线事故	97
§ 3.3 希思罗机场快线隧道塌方事故	103
§ 3.4 靠椅山隧道塌方事故	108
§ 3.5 猫山隧道塌方事故	111
第 4 章 水利工程事故案例	115
§ 4.1 长江口深水航道治理二期工程中的事故	115
§ 4.2 弟顿坝的溃决事故	119
§ 4.3 沟后水库溃坝事故	126
§ 4.4 柘溪水库的悲剧	133
§ 4.5 弄假成真的现场地质灾害	136

第5章 施工临时结构事故案例	143
§ 5.1 脚手架事故	143
§ 5.2 模板支撑事故案例	149
§ 5.3 地下临时挡土墙倒塌事故	155
第6章 地震震害实例	163
§ 6.1 台湾省台中县石岗坝震害	163
§ 6.2 汶川“5·12”大地震震害	168
参考文献	178

第1章 国外著名土木工程失败事件

§ 1.1 塔科马大桥的倒塌

1.1.1 大桥倒塌

1940年7月1日距美国华盛顿州首府西雅图市西南约50km的塔科马大桥（Tacoma Narrows Bridge）正式建成通车，这座公路桥是通向奥林匹克半岛的经济和军事门户，桥的全长5 939英尺（1 811m），主跨长2 800英尺（853m），桥面为双向二车道39英尺（11.9m）宽。和著名的金门大桥一样，这是一座悬索桥，是当年美国第三大悬索桥，当时被称为人类创造力和毅力的结晶。4个月后，同年11月7日上午约11点，塔科马大桥在剧烈的震动中倒塌，如图1.1.1所示。这件事震动了全世界，被称为“工程界的珍珠港事件”，直到今天，桥梁、结构或物理课程的许多老师都会向他们的学生提到这座桥。由该桥倒塌而引发的一系列调查和研究促进了一系列学科的创新与进步，使桥梁结构和空气动力学得到了极大的发展。

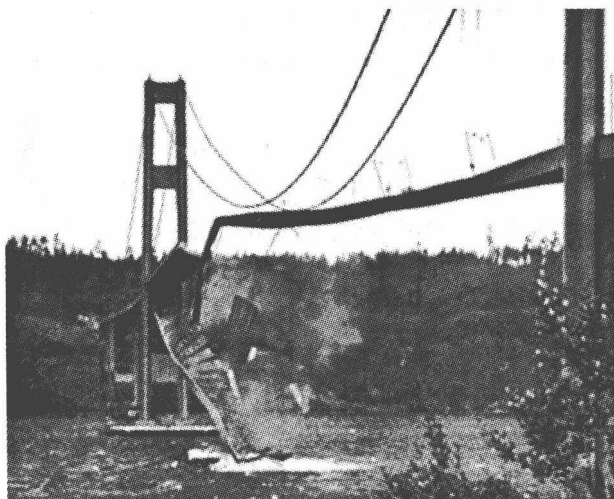


图 1.1.1 倒塌中的塔科马大桥

1.1.2 事件的经过

20 世纪上半叶, 美国奥林匹克半岛尚未开发, 看到其资源的经济潜力, 越来越多的人希望在该处建桥。1923 年即有一个委员会在作建桥的可行性研究。1927 年塔科马商路桥委员会确认了建桥的可行性并组成了一个集资委员会负责为前期勘测筹款。1928 年塔科马商会正式宣布筹建该桥, 并授予伊文思 (Evans)、海奇 (Hickey) 和刘易斯 (Lewis) 特许筹款权为建桥筹款。然而此后的五年中并没有筹到足够的款项。

1937 年华盛顿州通过了一项法案成立州收费桥管理局, 建桥的工程就被转到了华盛顿州收费桥管理局, 由华盛顿州公路局长莫洛 (L. V. Murrow) 负责。桥梁采用当时流行的悬索结构, 华盛顿州的工程师克拉克·艾尔德里奇 (Clark Eldridge) 早先提出了一个初步设计, 采用 25 英尺高 (7.6m) 的钢桁架梁, 预计造价为 1 100 万美元。其设计交给多个桥梁专家审核, 来自纽约的工程师莱昂·莫伊塞夫 (Leon Moisseiff) 认为他可以花更少的钱建桥, 他将梁高减为 8 英尺 (2.4m) 高的钢板梁, 由于梁高变矮使大桥更优雅, 更具观赏性, 同时也降低了建造成本, 预计造价 600 万美元。莫伊塞夫是纽约曼哈顿大桥的设计者、旧金山金门大桥的主要设计者, 在桥梁设计上享有盛誉, 因此, 他的设计被接受, 而艾尔德里奇仍被任命为项目总工程师。

1938 年 6 月华盛顿州收费桥管理局向公共事业局 (PWA) 和重建融资公司 (RFC) 申请建设款。然而由于建设投标金额超过了 600 万美元的申请款额, 该局只好重新申请。1938 年 9 月 30 日美国联邦政府宣布给予 288 万美元的公共事业拨款和 352 万美元的重建融资贷款 (从过桥费中返还) 用于兴建塔科马大桥。同年 9 月 27 日建设标书发给了旧金山的太平洋桥梁公司 (Pacific Bridge Company)、西雅图的通用建设公司 (General Construction Company) 和俄勒冈的波利维尔哥伦比亚建设公司 (Columbia Construction Company of Bonneville)。这三个公司联合成立了太平洋通用哥伦比亚公司 (Pacific-General-Columbia Company) 负责该桥的建设, 作为该公司的负责运行公司, 太平洋桥梁公司从 1938 年 11 月 23 日正式开始上部结构的施工。

桥的跨高比高达 350, 跨宽比达 72, 桥梁没有足够的刚度, 从而经不住风的侵袭。桥在施工时就发生摆动, 一个工程师曾报告说“刚开始桥面支模时就感到了晃动, 晃动随桥面板的完成而变得越来越强, 并且随风力的变化而变化”。同样是莫伊塞夫设计的纽约白石桥 (Whitestone Bridge) 也遇到了类似的晃动。桥面完成后, 摇摆愈来愈烈, 莫伊塞夫向负责工地施工的设计人员保证说他已研究出了减震阻尼器可以解决桥摇晃的问题, 然而装上阻尼器后问题仍然没有解决。轻度至中度的风就可以导致大桥来回摇摆, 因此大桥被当地居民起绰号叫“舞动的格蒂” (Galloping Gertie)。塔科马大桥竣工通车后, 摇摆得更加厉害。该桥吸引了不少远方的客人驾车到此一游, 为的是寻求刺激, 尝尝汽车驶过摇摇晃晃的大桥时的滋味。在某些日子里, 桥身上下振动的幅度竟达 1.5 英尺, 使得驾驶员看不见在自己前面行驶的汽车。如图 1.1.2、图 1.1.3 所示。

尽管工程师们认为桥梁结构本身是安全的, 从 1940 年 7 月底起华盛顿大学的法库哈逊 (F. B. Farquharson) 教授开始用摄影机记录桥的振动并设法研究减振装置。法库哈逊教授在工程系的地下室作了一个桥的模型来研究减振的方法, 他发现在副跨跨中向地面设一锚缆可以减小桥的振动, 然而实际装在桥上后锚缆被拉断了。进一步试验发现在梁的腹



图 1.1.2 大桥开通当日

板上开孔有助于减低风对桥梁的作用力。另一个方案是在梁的侧面装上半圆球状的导风罩以减低风力。安装导风罩的方案得到了华盛顿州收费桥管理局的批准，然而，未等方案实施，塔科马大桥就在风中倒塌了。

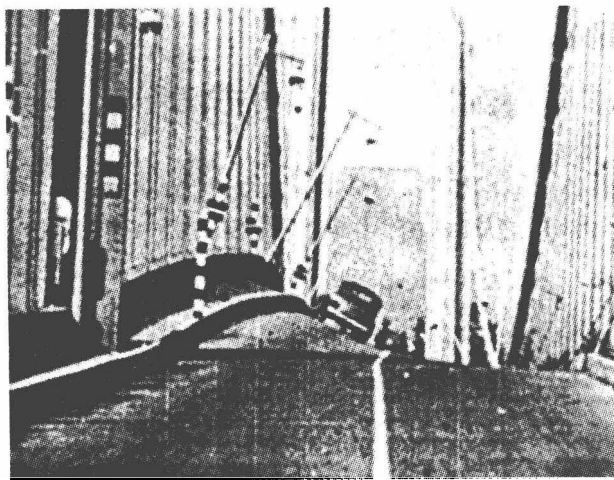


图 1.1.3 破坏前桥面的跳动

1940年11月7日早晨，桥跨中在时速35~46英里（56~74km）的风中振幅高达3~5英尺，早上10点管理当局关闭了大桥。不久之后，大桥从平常的波浪型振动转换为双波扭转振动。随着每次振动的增强，跨中的振动由振幅为5~28英尺的波形振动变为路面侧倾到同水平面呈45°角的扭转振动。过了约30分钟到10:30左右，跨中的一块路面板坠入水中，接着有200m长的路面断开，然后振动停止了几分钟，最后又发生新的振动，将残留的桥面全部掀到水里。出事的当时法库哈逊教授正在桥上观察如何安装导风罩，他

亲眼目睹了这一切的发生，桥梁倒塌的最后几分钟也被摄影机记录下来成为后世学习和教育的珍贵资料。

由于当局及时关闭了大桥，大桥的倒塌竟奇迹般地只损失了“一座桥、一辆车、一条狗”（当时某报纸的标题）。然而，桥梁的倒塌让我们更清楚地认识到我们对自然界认识的有限，打击人们日益膨胀的自信心。

1.1.3 事故原因

事后，在该项目工作的一些工程师说他们早知道这座桥不可靠，他们认为桥的倒塌完全是由于桥的形体不合理而不是材料强度不足。项目总工程师艾尔德里奇指责美国联邦融资机构坚持采用莫伊塞夫的设计直接导致了桥的倒塌，他指出华盛顿州公路局的工程师曾提出实腹的钢板梁不能像传统的桁架体系能让风吹过而像船帆一样受风力。莫伊塞夫则将桥的倒塌归根于工程师对空气动力性能认识不足，外加缺少资金而不得不将桥建得太窄。

华盛顿州收费桥管理委员会委托一个调查组调查现场，查找事故原因并估计重建大桥的费用。1941年6月26日，调查组发表他们的调查结论，调查组认为，大桥倒塌的首要原因是桥梁超大的跨高比和跨宽比以及桥板和梁的形式。此外，钢板梁的实心腹板使桥受风力影响很大，而从前采用桁架设计桥梁时风力并未被认为是一种重要的因素。具体的破坏则始于北面悬索中部连接主缆和吊索的索夹滑移。

另一个由美国联邦公用事业局（FWA）委托的调查组也认为这项工程失败是由于风作用于过于柔性的结构，而该结构不能吸收足够的动能。北中跨索夹的松滑使得桥面产生扭转从而导致整个中跨破坏。

毫无疑问，桥梁刚性太低、变形过大是桥梁的一个严重的问题。然而，大桥倒塌的真正原因长期以来存在争议，至少有三种流行的理论解释大桥的破坏^[1]：1. 随机扰动；2. 周期性脱旋；3. 气动失稳（负阻尼）。

1. 随机扰动理论

早期人们认为由于风压的周期性变化恰好与大桥的自振频率吻合而引起了桥的共振。这一理论的最大问题是共振需要风压频率与大桥自振频率高度一致，而随机风压的频率总是随时间变化的。所以，随机风压不太可能使大桥几乎在所有的风中都产生稳定的振动。因此，这一理论似乎不太适用本案。

2. 周期性脱旋

著名的航空空气动力学专家西奥多·冯·卡门（Theodore von Karman）相信涡旋脱落是导致大桥晃动的主要原因。当风吹向一个非流线型的物体，如大桥的桥面时，其背风面会产生卡门涡街，卡门涡街会对其前方的桥面产生周期性的负压作用而引起振动（涡旋脱落）。如图1.1.4所示。这一理论的问题是计算得到的频率为1Hz，而法库哈逊教授实际观察到的大桥扭转振动频率为0.2Hz。涡街频率是实际振动频率的五倍，所以这一扭转振动也不太可能是卡门涡旋脱落引起的。除了卡门涡街外，风气旋还可能引发颤振，也有可能是颤振引发了大桥的扭转振动。

3. 气动失稳

气动失稳是一种自激振动，在这种情况下维持桥振动的周期性力是由大桥自身变形产生的，当振动消失后振动力也就消失了。这一现象也称为负阻尼，例如一张薄纸或旗帜迎



图 1.1.4 卡门涡旋示意图

风飘舞振动。以下是气动失稳理论对塔科马大桥扭转振动的一个解释。

假如风从桥下斜向吹到大桥底面，这股风会对桥面板产生一个扭矩从而使桥面发生顺时针方向的扭转，桥面由于扭转变形而储存了弹性能，由于桥面的转动致使风对桥面的作用角改变，扭矩减低，在弹性恢复力的作用下桥面开始逆时针方向转动，由于惯性的作用桥面不会停在原平衡点，而会继续按逆时针方向转动直到弹性回复力大于惯性力和风压扭矩的联合作用桥面就会回头向顺时针方向转动，重复前面的过程而维持持续的扭转振动。在这个过程中风压的大小和方向并没有改变，而风压产生的扭矩的大小和方向是随桥面转动的方向呈周期性变化的，因此，是一种自激式的振动。当应力反复次数超过材料的疲劳极限，或自激振动增强到使应力超过材料的屈服极限时结构就破坏了。实际上这两种因素是相互影响的，比如疲劳会降低材料的屈服极限。

1.1.4 事故的经验和教训

大桥倒塌后，工程界进行了大量的事故原因调查和研究，法库哈逊教授领导的华盛顿大学研究组将风洞试验引入桥梁结构，试验证明塔科马大桥由于桥梁变形过大且无足够的耗能机制而破坏倒塌。从此以后，重要的大桥设计后总要经过风洞试验以保证桥的空气动力性能满足相关要求。

由于美国卷入第二次世界大战，塔科马大桥的重建直到1948年6月才开始，重建期间又经历了地震和火灾，终于在1950年10月14日建成通车。重建的大桥采用了桁架梁增加桥的刚性和减少风阻，采用轻质混凝土路面以减轻桥的自重，桥面加宽为双向四车道，增加了桥的水平刚度，加宽了桥塔以提高大桥的稳定性。大桥首次在校道间的桥面开通缝以减少风压对桥面的影响，首次在校塔与悬索和桥面板与吊索连接处使用液压阻尼减震器，首次在建桥前在校洞中进行空气动力试验。所以，这次事故是人类工程历史上的一次惨痛的失败，同时也促进了工程科学和工程实践的飞跃进步。

莫伊塞夫曾是极负盛名的桥梁专家，对著名的旧金山金门大桥的设计有着不可磨灭的贡献。然而，由于过度的自信而导致塔科马大桥的倒塌，导致他个人身败名裂。假如管理当局没有因为他的盛誉和极低的预算而采用他前所未有的大胆设计，假如他谨慎地对待在建桥过程中出现的异常摇动，这一损失也许是可以避免的。莫伊塞夫是如此相信他的理论，即使在施工过程中出现了极其异常的晃动也没有使他警觉到有可能发生的问题。从短期强度来看，他的柔性设计也许是正确的，单纯风压作用下的应力应该低于材料强度，大

桥毕竟使用了4个月的时间。然而,大桥在风的作用下产生周期性的振动则是他所未预计到的,周期振动所带来的是以前从未意识到的问题,也就不能找到适当的方法制止灾难的发生。

科学和技术的创新能带来人类环境巨大的发展和改善,当在技术上或应用上有大幅度的创新或变革时我们是走在一条前人未走过的路上,我们已经知道如何避免熟悉路上的陷阱和障碍,但在新的路上将如何能够避免尚未知的因素给我们带来灾难是值得人们深思的课题。

思考题

1. 以小组为单位将人员分为三方:政府主管,负责大桥审批和贷款;设计者甲,做了一个符合传统要求的设计,估计造价1100万美元;设计者乙,著名桥梁专家,根据他的新理论做了一个创新设计,新设计能使造价减到600万美元,且基于他的理论的另一座桥已经成功建成,只是这一次的设计比以前更为大胆。

(1) 三方通过辩论确定采用哪个设计。

(2) 假定辩论的结果是采用设计者乙的方案,在施工的过程中发现桥梁产生超出预料的摇动,三方讨论决定如何处理。

2. 以小组为单位将人员分为正方和反方辩论:为了科学和技术的创新付出一些代价是在所难免的。

莱昂·莫伊塞夫 (Leon Moisseiff 1872—1943) 小传^[12]

莱昂·莫伊塞夫1872年出生于拉脱维亚,1891年19岁时移民美国,5年后取得土木工程学位并入美国籍,他加入纽约市桥梁处并成为一名著名的桥梁理论家和设计师,他是纽约市华盛顿大桥的设计师。

1925年工程师约瑟夫·斯特劳斯 (Joseph Strauss) 需要人手帮他设计旧金山金门大桥,他通过著名工程师查尔斯·艾利斯 (Charles Ellis) 找到当时极负盛名的桥梁设计专家莫伊塞夫,双方一拍即合。

莫伊塞夫同艾利斯为金门大桥的设计开展了紧密的合作,莫伊塞夫在风荷载设计上做出了巨大的贡献。他们将莫伊塞夫的柔性设计 (deflection theory of suspension bridges) 理论运用于金门大桥的设计,以柔性的桥身抵抗金门湾常有的阵风。莫伊塞夫相信他可以把桥建得比任何以前的悬索桥都要轻、细、长,他认为一半以上的由风产生的应力是可以通过悬索传递到锚墩上去的。由于莫伊塞夫和艾利斯解决了悬索桥的设计问题,斯特劳斯决定将原设计的悬臂悬索混合结构改为悬索结构,用较少的钢材和较短的施工时间建成金门大桥。这样,莫伊塞夫和艾利斯的技术攻关加上艾温·莫洛 (Irving Morrow) 的设计工作,著名的金门大桥得以建成。

1937年莫伊塞夫应用他的柔性设计理论修改塔科马大桥的设计方案,使得建桥预算从1100万美元降到600万美元并成功获得有关当局的批准建造。然而这一次他走得太远,跨高比高达350倍的柔性桥梁获得了“舞动的格蒂” (Galloping Gertie) 的外号,大桥建成后4个月即在风中倒塌了。