

魁北克大桥垮塌全过程分析

叶华文, 张澜, 秦健淇, 赵琦, 陈醉 编译

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 魁北克大桥是当时世界上最长悬臂桥, 施工过程中两次垮塌。事故调查发现: 第一次垮塌主要是受压弦杆组合截面设计不当, 采用的容许应力过大; 第二次是起重设备构件断裂引起中跨落水。该文基于垮塌发生的全过程, 从工程技术和工程管理两个方面分析垮塌原因, 总结宝贵教训。

关键词: 垮塌; 桥梁事故; 魁北克大桥; 悬臂梁桥; 压杆失稳

1 工程背景

加拿大魁北克大桥由三跨钢桁架梁组成, 主跨 549 m(图 1), 建造历经 30 年, 施工期间两次发生垮塌事故: 第一次在 1907 年 8 月 29 日压杆失稳, 75 人丧生; 第二次是中跨合龙时起吊设备局部构件断裂, 13 人丧生。大桥最终于 1917 年竣工运营。

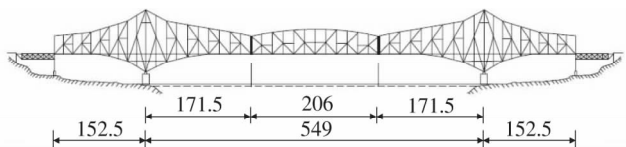


图 1 魁北克桥基本结构示意图(单位: m)

圣劳伦斯河是魁北克贸易的主要航道, 但冬季因结冰完全中断, 因此需要修建跨越圣劳伦斯河的桥梁。作为竞争对手的蒙特利尔已经有了西至多伦多的铁路干线和竣工于 1854 年的跨圣劳伦斯河的维多利亚桥, 迅速确立蒙特利尔作为加拿大东部主要港口的地位。

这些使得魁北克在圣劳伦斯河上建桥的需求更加迫切, 但架桥工作并不容易, 因为圣劳伦斯河最窄处也有 3.2 km, 水深 58 m, 流速达 14 km/h, 浪高可达 5 m, 冬季冰棱高达 15 m。

1850 年就有人提议修建魁北克大桥, 到 1887 年才成立魁北克大桥委员会, 后来加拿大国会通过一项法案, 重组该委员会形成魁北克大桥公司, 拥有资本 100 万美元并有权发行债券。尽管如此, 公司仍面临很大的资金压力, 需要更多政府拨款。初步勘察工作完成后, 魁北克政府又给予了经济资助。经过多年争论后, 1898 年桥址选定为首迪埃尔, 并开始进行桥梁方案设计。

1897 年 6 月 16 日, 魁北克大桥公司总工程师爱德华·霍尔向他的朋友——凤凰桥梁公司总裁大卫·里夫斯发出邀请。1897 年在魁北克召开的美国土木工程师协会(ASCE)会议上凤凰公司总工程师约翰·迪斯与爱德华·霍尔见面, 并提议: 凤凰公司免费提供桥梁方案, 但施工必须由凤凰公司承担。在此次会议

5 结语

预应力桥梁跨中挠度对 6 个因素的敏感性分析中, 理论计算结果和数值模拟结果达到一致, 即张拉控制应力 σ_{cm} 这一因素占据了绝对的主导地位, 敏感因子达到 0.64, 其次是预应力损失 σ_L , 弹性模量的灵敏系数接近且略大于截面惯性矩; 集中荷载和均布荷载是

所有因素中灵敏系数最小的, 即集中荷载和均布荷载是对挠度影响最小的因素。

参考文献:

- [1] 李准华. 大跨度预应力混凝土梁桥预应力损失及敏感性分析[J]. 世界桥梁, 2009(1).
- [2] 张治成. 桥梁施工控制中的结构设计参数敏感性分析[J]. 武汉理工大学学报, 2006(10).

收稿日期: 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51208430); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: 2682014CX076)

上,西奥多·库珀也答应向魁北克大桥公司提供咨询服务。主要参与桥梁施工及与垮塌有关的工作。

魁北克大桥公司总工程师爱德华·霍尔,没有参与跨度超过 90 m 的桥梁设计经验,于是从 6 个杰出工程师中选出了西奥多·库珀作为咨询工程师。库珀是纽约市一名独立咨询师,也是当时美国最出色的桥梁工程师之一。对于库珀来说,这个项目也将是他的职业顶峰,因为魁北克桥跨度将超过英国福斯桥。佩特罗斯基(1995)指出库珀很有资格主持这个项目,因为他是钢桥建设的奠基人,提出的桥梁铁路荷载的计算方法也被广泛采用。

魁北克桥招标从 1898 年 9 月 6 日到 1899 年 3 月 1 日,由库珀审查设计方案,并限定为悬臂梁和悬索桥方案。此前,法国工程师居斯塔夫·埃菲尔认为魁北克的桥址更适合悬臂结构桥梁,而不是悬索桥或拱桥。

悬臂结构基于悬臂梁原理,于 1867 年首次使用,其典型形式是主墩一个方向伸出悬臂跨,由另一方向的锚臂跨平衡。跨中用简支悬跨连接形成整体结构,简支中跨和悬臂跨自重通过锚臂跨和抗拔墩来平衡。

库珀收到 6 份上部结构设计方案,2 份下部结构方案,审查后选择了凤凰公司的悬臂桥方案。整个过程凤凰公司一直都与库珀保持着联系(Holgate et al. 1908),且魁北克大桥公司也倾向于凤凰桥梁公司中标(Tarkov 1986)。这些都让人感觉至少招标过程不公平和不透明,尽管很多人信任库珀(Holgate et al. 1908)。

凤凰桥梁公司得到上部结构施工合同,戴维斯公司得到下部结构施工合同。但因财务原因,凤凰桥梁公司拒绝与魁北克桥梁公司签合同,使魁北克公司面临相当大的风险。1903 年政府资金到位,财务问题解决,当年 6 月 19 日才最终签署了合同,魁北克桥梁公司也更名为魁北克桥梁和铁路公司。

魁北克大桥是当时最长悬臂梁结构,悬臂达 171.5 m,两悬臂间支撑 205.7 m 简支悬跨,梁体离河面 45.7 m,初始设计主跨 487.7 m。1900 年 5 月,库珀将主跨增加到 548.6 m,避免深水墩和冰棱撞击,缩短桥墩施工时间。虽然跨度改变表面上是基于工程技术考虑,但跨度增加(以超过英国福斯桥)使库珀成为建造全世界当时最长悬臂梁桥的工程师也是事实(Petroski 1995; Middleton 2001)。

魁北克桥于 1900 年 10 月 2 日正式开工。桥墩由大块花岗岩与混凝土填料组成,高度在最高水位之上约 8 m。墩顶以下 5.8 m 的墩身用坚硬花岗岩,墩身

设计成坡度为 1/144 的锥形,墩顶截面为 9.1 m×40.5 m,墩身基础为长 45.7 m、宽 14.9 m、高 7.6 m 的混凝土沉箱,重达 1 600 t。

凤凰公司与魁北克桥梁公司签署合同后,1903 年完成引桥施工,但直到 1905 年 7 月 22 日才开始桥梁上部结构施工。凤凰桥梁公司许诺 1908 年底竣工,否则支付给魁北克桥梁公司 5000 美元/月的违约金,直到工程完工。

2 桥梁垮塌全过程

钢桁梁架设过程中,工人发现一些弦杆出现明显挠曲。当试图铆接这些弦杆时,发现钻孔排列并不在直线上,而且最不利受压杆件也出现了明显的弯曲变形,其挠度随时间的推移不断增加,桥梁倒塌前的最后一张照片如图 2 所示。节间编号从悬臂最外端开始到桥墩止,从 1~10,锚臂跨采用符号“A”,例如符号 A9L 弦杆是位于锚臂跨第 9 节间左侧(或西侧)的弦杆。一些关键弦杆实测变形如表 1 所示。

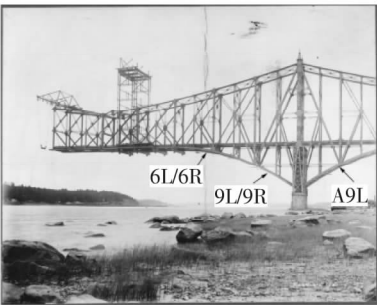


图 2 桥梁垮塌前

表 1 桥梁构件变形(1907 年)

观测时间	杆件编号	挠度/mm
6 月 15 日	A3R 和 A4R	1.5~6.5
	A7R 和 A8R	1.5~6.5
	A8R 和 A9R	1.5~6.5
	A8L 和 A9L	19
8 月 6 日	7L 和 8L	19
8 月	8L 和 9L	8
8 月 20 日	8R	弯曲
8 月 23 日	5R 和 6R	13
8 月 27 日	A9L	57

1907 年 6 月中旬就发现杆件挠度,并报告给库珀。因为压杆有预拱度,大部分杆件经强行被铆接在

一起了,仍然有一些杆件无法铆接。库珀等人都认为相对小的挠度问题不大。8月,变形的弦杆越来越多,于是库珀就弦杆 7L 和 8L 变形问题,询问凤凰公司总工程师,没有得到满意的回复。

凤凰公司总设计师彼得·兹拉普卡(Peter Szlapka)认为弦杆弯曲产生于制造工厂,他后来承认从没看到这些变形的弦杆。马可鲁尔(Norman McLure)认为弦杆是受压后弯曲。关于弦杆 7L 和 8L 弯曲的争论还没结束,马可鲁尔又向库珀报告弦杆 8L 和 9L 也发生了类似的弯曲变形。这些变形杆件都是桥墩附近负弯矩区的下弦杆件,压力荷载很大。

情况不断恶化,受压构件弯曲变形不断增加。这些杆件都是采用缀条连接腹板的组合杆件。当腹板应力增加后,缀条及铆钉的受力也不断增大。

库珀认为弦杆在架设过程中产生了弯曲,但现场没有证据支持这一点。现场的工程师则认为情况不严重。杆件制造商坚称杆件出厂前都是符合要求的。1905 年施工期间 A9L 架设前发现变形,经修复后架设到桥上,但后来调查发现正是 A9L 引发了全桥垮塌。

库珀虽然很有经验,但似乎也对面临的问题很困惑。他 60 岁接受了魁北克大桥工程咨询工程师的工作,也接受了钢构件制造和安装的监理工作。因健康原因,无法到现场工作,只能基于其他人报告的信息来做决定。库珀依赖在施工现场的年轻工程师马可鲁尔,很难准确及时做出决策(Petroski 1995; Middleton 2001)。

马可鲁尔坚持认为,杆件弯曲变形是架设后受力过大造成的。一些工人也观察到弦杆变形,但没报告。然而,当马可鲁尔和库珀对变形原因的看法不一致时,马可鲁尔没有足够信心去质疑库珀,施工继续进行。期间出现罢工,一些工人不满工作条件辞职了,工人数量大幅度减少。有人担心暂时停工会有更多工人离开,导致工期延误,因此不敢停工。

经过常规检查后,弦杆 A9L 的挠度在两周内由 19 mm 增至 57 mm。相应的弦杆 A9R 也在同一方向上发生弯曲变形,挠度问题日益严重。一个工头决定暂停工作,直到问题解决。1907 年 8 月 27 日,当天施工被叫停。马可鲁尔告诉库珀,请他复核此事,然后才能重新开工。第 2 天马可鲁尔还到纽约向库珀征求意见。

魁北克大桥公司总工程师爱德华·霍尔说服工头重新开工。霍尔给库珀的解释是:“停工对各个方面影

响很坏,可能导致人手不够而施工完全停止。两天后,此事传到凤凰公司高层,经讨论决定重新开工,因为他们已经在某种程度上默认弦杆在架设前已经发生弯曲变形,且凤凰公司总工程师曾表示,弦杆安全系数很高。

与此同时,马可鲁尔正在纽约与库珀会晤,两人都不知道已经重新开工。1907 年 8 月 29 日两人简短讨论后,库珀打电话给位于凤凰城的凤凰公司办公室,要求暂时不要加载,等马可鲁尔到现场处理。库珀认为这样做比直接通知施工现场更迅速。马可鲁尔向库珀保证,他在去凤凰城的路上将指令传给施工现场,而实际上赶路途中他并没有发送指令。

1907 年 8 月 29 日下午 13:15,库珀的指令到达凤凰公司办公室,因总工程师不在场,指令被耽搁了。下午 15:00,凤凰公司总工程师回到办公室,看到消息后,等马可鲁尔到达后他就安排了一个小组会议。下午 17:15 左右马可鲁尔到达,他简要讨论了情况,决定等第 2 天早上再采取措施。

在工程师们研究对策时,下午 17:30,魁北克大桥倒塌了,声音传到 10 km 外的魁北克。整个南跨约 19 000 t 钢材 15 s 内全落到河里,当时 86 个施工工人,仅 11 人幸存。

已经弯曲的下弦杆 A9L,在桥梁荷载不断增加的情况下屈曲了,荷载马上转移到对面的 A9R 杆件, A9R 也随之屈曲,然后全桥垮塌,只有桥墩完好无损(图 3)。



图 3 桥梁垮塌

3 事故调查结论

加拿大组成了皇家委员会,调查事故原因,委员包括蒙特利尔的亨利·霍尔盖特,贝尔福德的约翰·克里和多伦多的约翰乔治·盖尔克里。调查发现:垮塌直接原因是弦杆 A9L 和 A9R 屈曲,主要原因简述如下:

(1) 魁北克大桥坍塌是因为主桥墩锚臂附近的下弦杆设计不合理,发生失稳。

(2) 杆件采用的容许应力水平太高。

(3) 严重低估了自重,且未能及时修正错误。

(4) 魁北克桥梁和铁路公司与凤凰桥梁公司的权责不明。

(5) 魁北克大桥和铁路公司过于依赖个别有名气和有经验的桥梁工程师,导致了桥梁施工过程中基本上没有监督。

(6) 凤凰桥梁公司的规划和设计,制造和架设工作都没有问题,钢材的质量也很好。不合理的设计是根本性错误。

(7) 当时的工程师不了解钢压杆的专业知识,没能力设计如魁北克桥那样的大跨结构。

4 桥梁垮塌原因分析

4.1 工程技术

(1) 一般悬臂梁桥上下弦杆都设计成直杆,这样容易制造。魁北克桥下弦杆出于美观考虑,设计成微弯(图 2),增加了制造难度,也增大了杆件次应力,降低了屈曲强度。

(2) 架设过程中连接节点设计不当。所有杆件端部设计,是基于杆件在最大荷载作用下产生小挠度。弦杆的拼接板采用栓接,可以产生较大变形。开始时这些接头只有一端紧密接触,除非变形足够大,否则拼接板无法传递荷载。从这一点上看,拼接板应该永久铆接,形成刚性接头,承担轴向荷载。因此在拼接板铆接前,必须特别关注这些节点。

(3) 除了设计问题,库珀提高了桥梁容许应力,正常加载的容许应力为 145 MPa,极限荷载作用下为 165 MPa。这些值太高,因此被桥梁工程师质疑。但由于库珀的声誉,这个容许应力值被接受。库珀根据杆件长细比(L/r),提出了一个容许应力 σ 公式:

$$\sigma = 165 - 0.69(L/r) \quad (1)$$

式中: L 为压杆长度; $r = \sqrt{I/A}$; I 为惯性矩; A 为杆件面积。

图 4 为库珀公式与现代 AISC 规范中 A36 和 A33 钢材的容许应力值比较。对于所有长细比为 10~100 的杆件,库珀的容许应力值超过今天常用值的 3.3%~8.7%。考虑到当时钢材质量和压杆认识水平,库珀的公式偏于不安全。

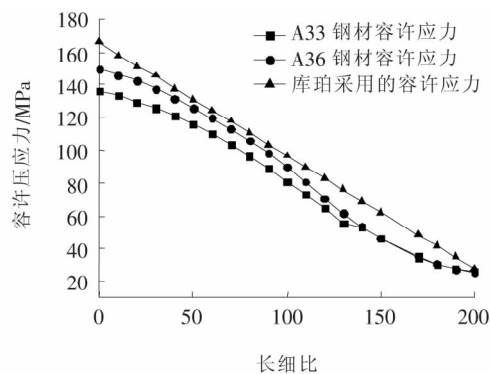


图 4 魁北克桥的容许压应力与 AISC 规范中 A36、A33 钢材的比较

魁北克桥是大跨结构,当时对其力学行为知之甚少,且魁北克桥梁公司缺乏资金进行充分试验。库珀曾要求对眼杆(主要的受拉上弦杆)进行大量试验,而没要求对压杆进行试验。

跨度从 487.7 m 增加到 548.6 m,荷载却没有重新计算,应力计算仍是基于 487.7 m 的跨度。库珀发现这个错误后立即做了估算,发现应力增加了约 7%。重新计算自重,发现应力增加超过 10%。这座桥初始设计自重是 276 MN(2 760 t),实桥为 325 MN(3 250 t),增加了 18%(Tarkov 1986)。凤凰公司和魁北克公司的工程师都忽视了修正自重的必要性,结果架设后杆件受力过大。

根据皇家委员会报告,表 2 比较了自重的计算值与实际值,说明了桥梁计算中存在基本错误。正确的桥梁计算结果应与实际情况很接近。当发现自重计算错误时,结构的很大部分制造和架设工作已经完成。除了提高桥梁容许应力外,库珀没有其他选择。

表 2 自重计算值与实际值比较

构件	计算值/kN	实际值/kN	误差/%
跨中半跨悬臂梁	21 538	25 328	17.6
悬臂跨	58 740	70 300	19.7
锚臂跨	59 240	77 034	30.0

4.2 工程管理

库珀不在现场,却坚持要完全控制施工。当时施雷伯建议铁路和运河管理局聘请第三方咨询工程师复核库珀的工作,并拥有最终决定权,而库珀、魁北克大桥公司和凤凰公司都表示反对。库珀还亲自说服了施雷伯,于是魁北克大桥公司未能明确库珀的权限。

由于没有明确的管理体系,库珀拥有了最终决定权。尽管生病无法到施工现场,仍决定所有关键问题。

于是施工现场没有人监督和做决定,特别是当结构不安全需要停工时。一旦有需要,现场管理人员应彼此商量,然后做出决定,这样很少会出现决定延迟执行的情况。皇家委员会调查报告中写道:很明显,这座世界上最宏伟桥梁的建造过程中,竟然没有一个有足够经验、专业知识和能力的人应对可能出现的危机。

调查委员会怀疑压杆 A9L 由于其格构设计不合理而屈曲,于是在 1907 年 11 月到 1908 年 1 月进行了压杆(1/3 比例)模型试验。魁北克桥压杆由 4 块钢板和缀条组成,形成组合截面(图 5)。由于铆钉受剪破坏,试验中格构体系迅速破坏,接着弦杆便屈曲了,结果证实了调查委员会的猜想:弦杆强度不够。4 个独立钢板彼此连接强度不够,无法形成一个整体受力单元。

魁北克桥垮塌事故后,进行了前所未有的大规模压杆及连接的试验和研究,推动了工程领域的重大进步,桥梁规范也得以发展(Shepherd and Frost 1995)。同时也推动了两个组织的成立:1914 年成立了 AASHTO(美国国家公路和运输协会),1921 年成立了 AISC(美国钢结构研究协会),这些组织通过资助(企业无法自行承担的)研究,促进工程领域的发展(Roddis 1993)。

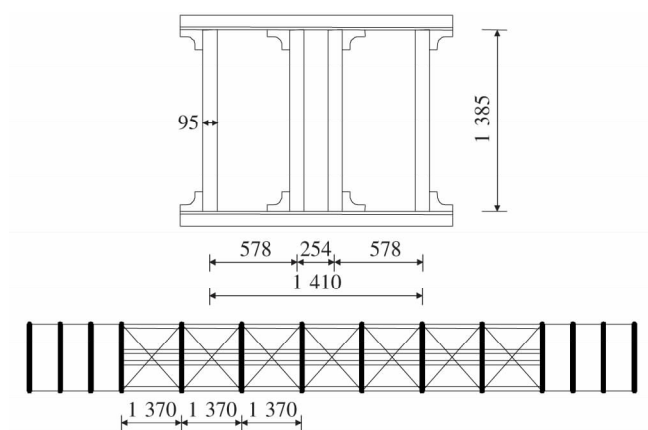


图 5 下弦杆横截面与平面图(单位:mm)

魁北克桥还涉及以下几个工程管理问题。首先最主要的是长时间以来结构变形情况一直被忽视。现场工程师对其原因也争论很久。工人们虽然缺乏专业的技术知识,但似乎是唯一真正知道桥梁结构问题的群体,因此工程师必须虚心听取现场有经验工人的意见。其次是库珀拒绝其他工程师的复核工作。复核后工程

师可能不会允许结构的实际应力如此之高,而其他一些错误,如低估自重等可能在桥梁垮塌前就被发现。结果,库珀的工程专业知识成为了保证桥梁结构安全性的唯一因素(1993 Roddis)。

5 第二次垮塌事故

魁北克桥第一次垮塌后,政府提供资金进行新桥的设计和施工。新桥设计很保守,构件尺寸急剧增加,旧桥的受压控制构件截面积为 $543\,000\text{ mm}^2$,而新桥为 $1\,250\,000\text{ mm}^2$ 。重新施工过程中也遇到了问题,1916 年发生了第二次垮塌。施工中通过驳船来运输及提升悬臂中跨,而非悬臂拼装,因此悬臂长度减少了,杆件受力也减小了。悬臂中跨长 195 m,超过 5 000 t,需提升至水面 46 m 的设计位置。1916 年 9 月合龙跨预制完工后,船运至桥址处,固定驳船后,提升作业开始。首先是合龙跨四角连接于吊杆,随后用液压千斤顶按每步 60 cm 提升,当升至水面 9 m 时,有个角的支点突然断裂,其他支点无法承担全部荷载,产生了扭曲和变形,整跨落进河里,13 名工人死亡,原因归结为连接细节强度不够。新桥终于在 1917 年竣工,自重超过旧桥 2.5 倍。

6 结论

魁北克桥历经磨难,开工即面临着严重的资金问题,工程进度延误。当确定自重的计算错误后,没有采取合理的措施。在整个项目进行过程中,当结构安全性和经济性发生矛盾时,以降低结构安全性来解决矛盾。咨询工程师库珀做了绝大部分错误的工程决策,他因健康问题无法现场工作,导致现场管理混乱。当变形越来越严重时,说明整体结构在逐步失效,现场的工程师可能已经意识到问题的严重性而应该停止施工,但他们缺乏自信和权力去质疑库珀的判断,没有要求停工,导致悲剧发生。

——编译自:Pearson, C., Delatte, N.. Collapse of the Quebec Bridge, 1907[J]. J. Perform Constr. Facil., 2006, 20(1):84—91.