

独特的伦敦千年桥及其加固方案和全桥结构仿真分析研究

郑凯锋

(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 介绍英国伦敦千年桥开通和随后临时关闭的主要背景和结构特色, 提出“矮梁固定桥墩”加固方法, 运用全桥结构仿真分析方法计算研究其加固效果。

关键词: 千年桥; 桥梁加固; 全桥结构仿真分析

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

文章编号: 1003-4714(2001)01-0001-05

1 引言

2000年6月10日开通、12日临时关闭的千年桥(The Millennium Bridge)是英国伦敦泰晤士河上新建的一座人行桥。该桥从规划、设计以来之所以倍受关注, 其主要原因有如下几个方面:

(1) 千年桥是1894年伦敦建造塔桥约100年以来泰晤士河上第一座新建的桥梁。

(2) 该桥连接两岸的圣保罗大教堂和泰特现代艺术馆, 位置重要。该桥梁设计者试图为公众在两处宗教及艺术胜地之间提供没有汽车和火车从身边飞驰而过、安静而从容的步行过桥环境。

(3) 结构新颖、装饰华丽。该桥采用扁平悬索桥结构形式, 中跨144 m, 垂度2.3 m, 垂跨比约1:63, 全桥纤细、轻省。设计者试图把桥梁设计成结构新颖、灯光色彩美丽、极具装饰效果的佳作, 使桥梁夜晚时在灯光的照射下光彩夺目——“桥梁在灯光照射下会像跨越泰晤士河的一道‘光的锋芒’”。桥梁的夜色如图1所示。

(4) 试图开创以建筑师为主导的桥梁工程设计群体

模式。该桥设计群体由建筑师福斯特爵士、雕塑家卡罗和土木工程师组成; 在该桥设计竞赛的评比小组中, 结构工程专家也只占一人。

(5) 高额的工程造价。工程造价超过原预算造价约20%, 达到1800万英镑(约合人民币2.4亿元)。

(6) 2000年5月9日, 英王出席该桥的开通仪式, 而此时桥面的铺设尚未全部完成, 因此, 有媒体戏称“女王开通一座尚不能通行的桥梁”。

(7) 2000年6月10日正式对公众开放, 当日的过桥人数在10万以上, 是预测值的10倍以上。桥梁开放当日即发生过量的横向摇摆, 在减少上桥人数仍发生过量横向摇摆的情况下, 6月12日临时关闭该桥梁。由此舆论哗然, 部分媒体甚至怀疑桥梁的安全问题。这是英国继“千年穹顶”、“伦敦之眼”两项工程出现经营和技术问题之后, 又一起千年工程问题。

2 桥梁概况

千年桥全长320 m, 中跨144 m, 桥面宽度4 m, 桥梁



图1 千年桥夜色效果图

收稿日期: 2000-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(59878045)

作者简介: 郑凯锋(1963-), 男, 博士, 教授, 博导, 1983年毕业于西南交通大学桥梁工程专业。2000年春夏作为英国南安普敦大学的访问教授开展千年桥的相关研究工作, 其中得到该大学的得力支持。

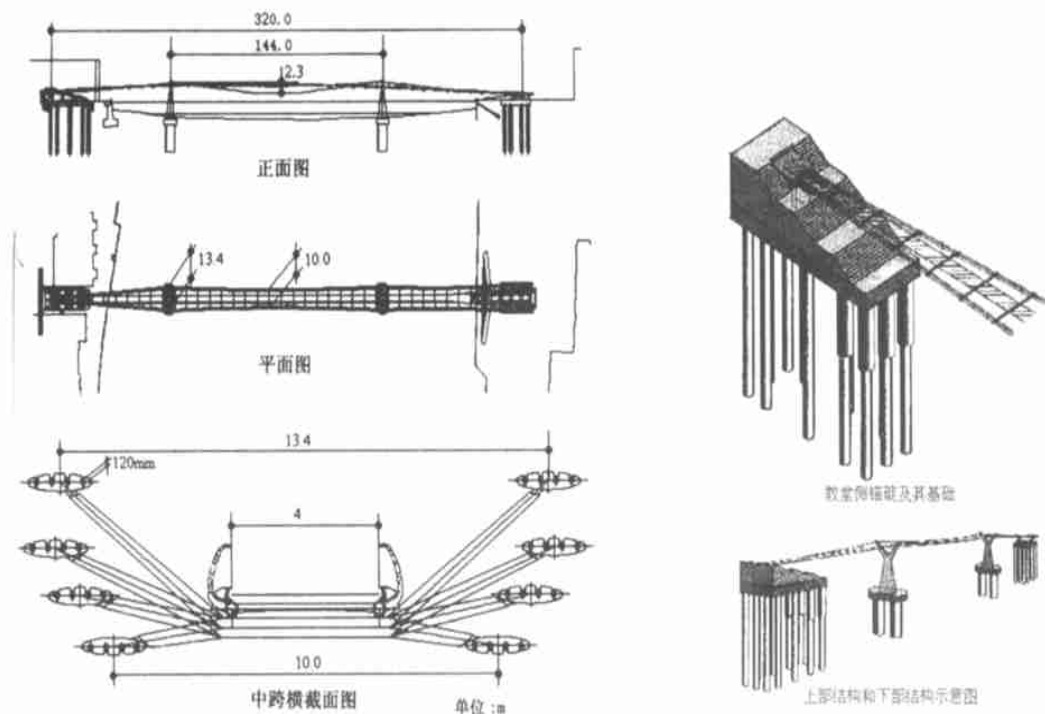


图2 千年桥总体布置图

总体布置如图2所示。

主缆为每侧4根直径120 mm的封闭钢丝绳,外表面涂防腐油漆。封闭钢丝绳的横截面如图3所示。每侧4根封闭钢丝绳同高度平行布置,如图4所示。两侧主缆之间的中心距不为常数,因此,主缆呈空间索形,中跨的主缆中心距在10~13.4 m之间变化。根据设计提供的数据,主缆承受恒载内力19.2 MN,恒载与降温内力22.2 MN,恒载与升温内力17.0 MN,中跨活载内力23.0 MN,南岸边跨活载内力21.2 MN,船撞北侧桥墩内力19.6 MN。主缆桥墩和锚碇及其基础均采用钢筋混凝土结构,如图2所示,墩上的V形主缆托架(相当于桥塔)为钢结构。主缆在锚碇处采用的连接采用锚筒一卡槽一夹板结构。

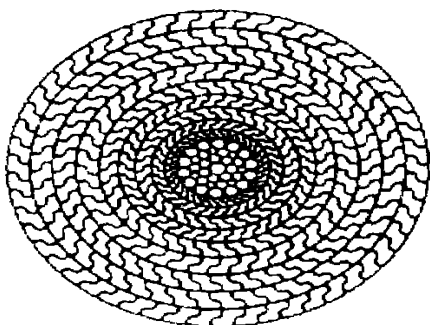


图3 主缆封闭钢丝绳横截面



图4 主缆、横梁和桥塔

主梁由横梁、纵梁和桥面板构成。横梁为焊接空心箱形截面,横梁与索夹直接连成整体,直接与主缆连接(如图4所示),横梁间距8 m;纵梁为两根钢管,钢管焊接在横梁上,纵梁根据施工要求分段,纵梁段之间采用销钉连接,如图5所示;桥面板采用蜂窝状轻型铝板,桥面板和纵梁采用轻型螺栓连接,如图5所示。如图6所示,桥面板两侧设置半椭圆形空心风嘴,内部安放照明与装饰灯具;桥面栏杆扶手和立柱采用不锈钢构件,中间沿全桥纵向设置直径6 mm的钢丝绳,因此,桥面栏杆也显得轻巧、单薄。

3 “矮梁固定桥墩”加固方案的提出

千年桥开通、出现过量横向摇摆、临时关闭之后,根



图5 横梁、纵梁和桥面板连接



图6 桥面、风嘴和栏杆

据细致的研究和全桥结构仿真分析,作者指出导致桥梁过量横向摇摆的主要原因是:

(1) 桥面结构刚度很弱。桥面结构的横梁与主缆直接连接(没有经过吊杆),作为桥面纵梁的钢管本身刚度就不大,加上钢管纵向分段连接采用销接,因此由桥面结构(包括纵梁、横梁和轻型铝材桥面板)提供的刚度远小于高应力状态下的主缆刚度。

(2) 桥面结构缺少足够的支承。桥面结构除了通过横梁索夹与主缆连接和与桥梁两端的锚碇结构连接之外,与桥墩及其V形托架之间没有任何连接,桥面结构在桥墩及其V形托架处犹如处于“漂浮”状态。

针对上述问题,作者提出“矮梁固定桥墩”的加固方案。如图7和图8所示,“矮梁固定桥墩”加固方案的主要结构要点如下:

(1) 在每个桥墩及其V形托架处增设两片低高度

工形梁,低高度工形梁采用变高度,其高度从1 400 mm至500 mm,每片工形梁长度56 m,即从桥墩两侧各外伸28 m。

(2) 工形梁位于横梁下面,与横梁连接;此外,工形梁固定在桥墩的V形托架上,与桥墩的V形托架连成整体。

(3) 两片工形梁之间在其下平面设置轻型交叉联结系,同时在横梁处设置轻型交叉的横向联结系,以提高工形梁以及桥面的横向抗弯能力和抗扭能力。

“矮梁固定桥墩”的加固方案除了提高桥梁的结构性能(见下一节)、效果稳定且耐久、实施相对简单等之外,还具有如下特点:

(1) 外加的工形梁和联结系在桥面板的下面,而且在桥面板的宽度以内,因此桥上行人看不到这些外加的构件。

(2) 外加的构件自重主要直接由桥墩承受,不会额外增加桥面结构和主缆的受力,反而能够承受部分桥面活载。

(3) 外加工形梁增加了桥面结构的厚度,对桥梁的轻薄效果有所“损害”,但从总体上看,这一“损害”程度并不严重,如图8所示。

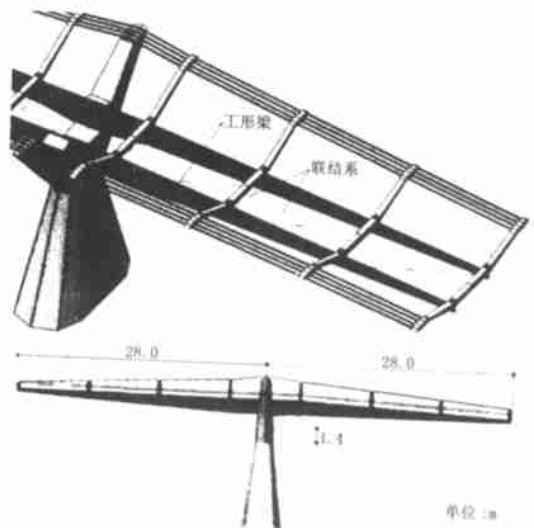


图7 “矮梁固定桥墩”加固方案示意图



图8 “矮梁固定桥墩”加固方案全桥正面示意图

4 原桥和加固方案的全桥结构仿真分析研究

由作者提出的“全桥结构仿真分析”方法的技术实质是采用组合有限单元方法分析全桥结构,其中,组合有限单元通常是杆单元、梁单元、板单元、壳单元、索单元、实体单元等的组合,全桥结构包括梁、索、塔、锚碇、墩台、基础和地基土层等全部受力部分。一方面,全桥结构仿真分析根据桥梁不同构件的几何形状和受力特性,分别采用不同的有限单元进行模拟;另一方面,该方法强调把桥梁的上部结构、下部结构、基础和地基土层作用一个整体进行大规模的结构分析计算,直接、有效地考虑不同部分之间的联系和相互作用,减少相关简化带来的误差。在研究千年桥中,作者采用全桥结构仿真分析方法计算研究原有桥梁、几种不同加固方案和最终确定的“矮梁固定桥墩”加固方案,由此把握原有桥梁和不同加固方案的结构性能。

如图9~图11所示,原有桥梁的横梁、纵梁采用板壳单元模拟,其它构件采用三维实体单元模拟。如图12所示,外加工形梁采用板壳单元模拟,联结系杆件采用梁单元模拟。由此,全桥结构的组合单元模型如图13所示,原有桥梁的全桥模型共计43 686个单元,加固方案桥梁的全桥模型共计44 834个单元。

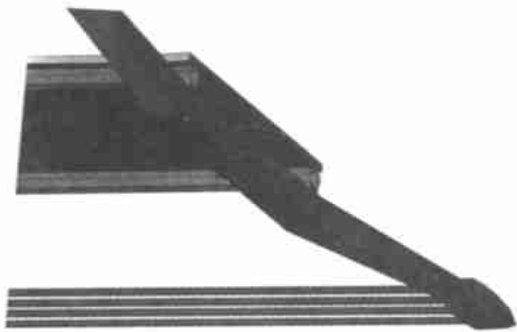


图9 桥面板、纵梁、横梁和主缆模型

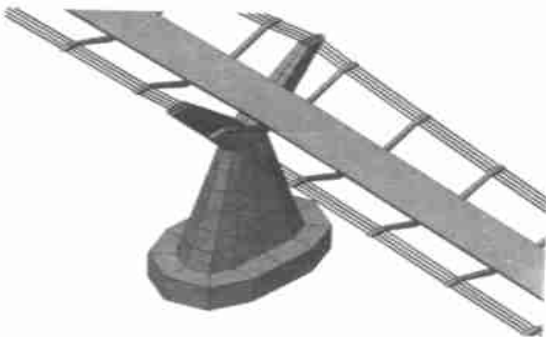


图10 桥墩及其托架附近模型

针对原有桥梁和加固方案桥梁进行全桥结构仿真分析计算,除分别计算其全桥的静力强度之外,重点研

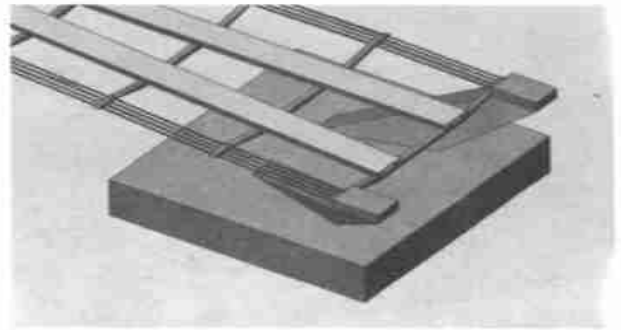


图11 艺术馆侧锚碇附近模型



图12 外加工形梁和联结系等模型

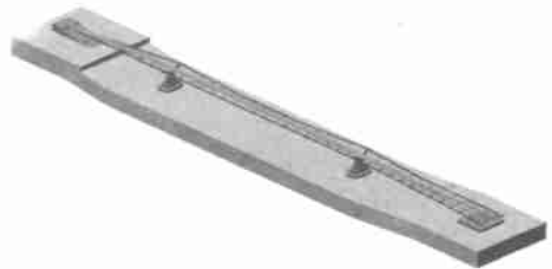


图13 全桥结构组合单元模型

究计算其横向变位和自振特性。计算主要结果如表1和表2所示,原有桥梁和加固方案桥梁的自振振形示意图如图14所示。从计算结果可知,相同横向荷载作用下,加固方案桥梁的横向位移比原有桥梁的横向位移减小36.04%;加固方案桥梁的第1阶自振圆频率比原有桥梁的第1阶自振圆频率增加58.78%,加固方案桥梁

表1 在中跨作用单位横向荷载时桥梁的跨中横向变位

	原有桥梁	加固方案桥梁
跨中横向变位/cm	6.25	4.17

表2 原有桥梁和加固方案桥梁自振圆频率

	自振圆频率/ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	
	原有桥梁	加固方案桥梁
第1阶	2.79	4.43
第2阶	3.94	5.55
第3阶	4.68	6.13
	(中跨横弯+扭转)	(中跨横弯+扭转)
第4阶	5.46	8.07
第5阶	6.19	10.74
第6阶	6.94	11.20

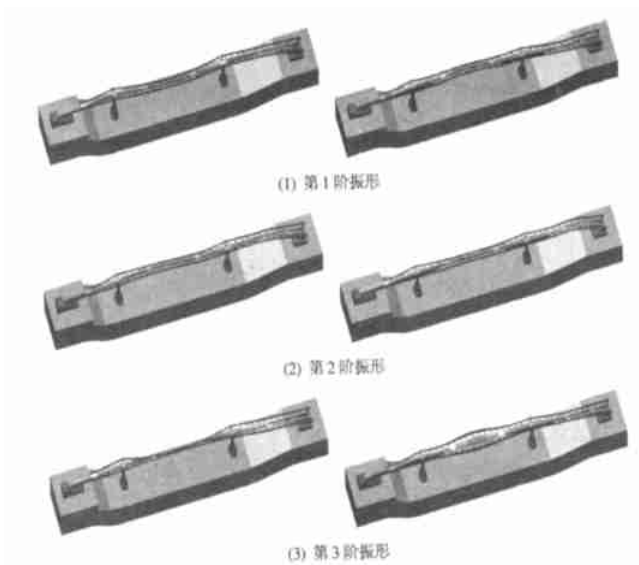


图 14 原有(左)和加固方案(右)桥梁自振振形示意图
 的第 3 阶自振(中跨横向弯曲和扭转组合)圆频率比原有桥梁的第 3 阶自振(也是中跨横向弯曲和扭转组合)圆频率增加 30.98%。由此初步可见,加固方案较好地

提高原有桥梁的结构性能。

5 结 论

无论从结构形式,还是从艺术效果,千年桥试图独树一帜、有所创新。由于结构设计和分析等方面存在一些考虑不周,导致桥梁未能达到设计要求的结构性能。然而,设计者敢于探讨的精神是值得肯定的。千年桥的建造以及出现的问题同样向从事桥梁工作的人员提出一些新的思考,同时,由此所积累的难得经验和教训同样值得总结和借鉴。

参 考 文 献:

- [1] KAIFENG ZHENG. Preliminary Analysis of the Millennium Bridge with Structural Simulation for Entire Bridge [R]. University of Southampton, July 2000.
- [2] KAIFENG ZHENG, Strengthening with Low Plate Girders and Its Structural Simulation for Entire Bridge[R]. University of Southampton, August 2000.
- [3] 郑凯锋. 是桥梁还是艺术品[N]. 科技日报, 2000—8—27.