

第二十届 全国桥梁学术会议 论文集 (下册)

2012 · 武汉

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会 编



人民交通出版社
China Communications Press

第二十届 全国桥梁学术会议 论文集

Diershijie
Quanguo Qiaoliang Xueshu Huiyi Lunwenji

○ 下册

2012 · 武汉

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会 编



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书为第二十届全国桥梁学术会议论文集,由中国土木工程学会桥梁及结构工程分会精选的 170 余篇优秀论文汇编而成。本论文集包括大会报告,设计与分析,施工与控制,抗震、抗风与动力分析,检测、加固、船撞及其他五个部分,全面、系统地展示了近一时期我国桥梁工程建设的新动态、新理念、新成果和新经验。

本书可供从事桥梁工程设计、施工、检测、管理等相关工作的技术人员参考使用,也可供大中专院校相关专业师生阅读学习。

图书在版编目(CIP)数据

第二十届全国桥梁学术会议论文集·下册/中国土木工程学会桥梁及结构工程分会编. —北京:人民交通出版社, 2012. 5

ISBN 978-7-114-09779-9

I. 第… II. 中… III. 桥梁工程—学术会议—文集 IV. ①U44-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 077870 号

Diershijie Quanguo Qiaoliang Xueshu Huiyi Lunwenji

书 名:第二十届全国桥梁学术会议论文集(下册)

著 作 者:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会

责任编辑:张征宇 郭红蕊

出版发行:人民交通出版社

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)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:28.75

字 数:723 千

版 次:2012 年 5 月 第 1 版

印 次:2012 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09779-9

印 数:0001-1500 册

定 价:200.00 元(上、下册)

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

第二十届全国桥梁学术会议

学术委员会

名誉主任 范立础
主任 项海帆
副主任 葛耀君
委员 (以姓氏笔画为序)
牛 斌 吉 林 孙利民 肖汝诚
邵长宇 孟凡超 赵基达 秦顺全

组织委员会

主任 尤习贵
副主任 肖汝诚
委员 (以姓氏笔画为序)
王国锋 冯鹏程 华彦常 张 鸿 杨志刚 杨少稀
罗世东 姜友生 胡志坚 高宗余 黄 雍 詹建辉
潘东发

主办单位

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会

支持单位

湖北省交通运输厅
武汉市城乡建设委员会

协办单位（排序不分先后）

中铁大桥局集团有限公司
中交第二航务工程局有限公司
湖北省交通规划设计院
中交第二公路勘察设计院有限公司
中铁大桥勘测设计院有限公司
武船重型工程股份有限公司
武桥重工集团股份有限公司
中铁第四勘察设计院集团有限公司
中国公路工程咨询集团有限公司
华中科技大学
武汉理工大学
武汉大学测绘学院

承办单位

《桥梁》杂志

目 录(下册)

四、抗震、抗风与动力分析

109. 大跨度钢箱梁悬索桥的高阶模态涡激共振问题研究..... 陈政清(757)
110. 城市桥梁抗震设计对策研究..... 徐秀丽 李枝军 李雪红 许 祥(764)
111. 索的局部振动对缆索承重桥梁固有模态的影响..... 杨德灿 葛耀君 项海帆(771)
112. 组合创新策略在桥梁抗震研究中的实践..... 袁万城 魏 凯(778)
113. 兰州西固黄河大桥主跨 480m 斜拉桥减隔振体系研究 韩友续 武维宏 舒春生(786)
114. 横撑布置方式对钢管混凝土拱桥抗震性能的影响研究..... 李自林 刘明艳(792)
115. 大跨三塔斜拉桥减振黏滞阻尼器参数优化分析..... 卫 星 强士中 肖 林(799)
116. 195m 超高墩连续刚构桥地震动响应分析 徐 军 周水兴 李银斌(805)
117. 曲线桥支座类型及布置方式对其抗震性能的影响..... 董凌峰 罗 韧(812)
118. 高速铁路大跨度钢桁梁斜拉桥地震响应及减振分析..... 何旭辉 秦红禧(818)
119. 一种新型桥梁三维隔震支座设计..... 贾俊峰 欧进萍(827)
120. 海南省某连续梁延性抗震设计研究..... 田 卿 刘 丹 戴公连(834)
121. 非线性行为对大跨度斜拉桥地震反应影响研究..... 李海波 梅 宇(843)
122. 波纹钢腹板矮塔斜拉桥地震响应特性研究..... 李建凤 朱劲松(849)
123. 加州新一代桥梁的抗震设计标准研究..... 方建桥 胡志坚(855)
124. 刘家峡大桥气动稳定措施研究..... 韩友续 武维宏 舒春生(862)
125. 一种新型抗风水下阻尼系统风洞试验研究..... 李有为 卿前志 张志田(871)
126. 典型桥梁截面的风阻系数差异分析..... 陈 斌 戴天帅 孙中洋(878)
127. 基于纤维模型的高墩静风稳定分析..... 张 行 赵晓华 朱 黎(884)
128. 32m 双线简支箱梁在对开列车作用下梁体竖向动力响应规律研究

- 蔡超勋 胡所亭 牛 斌 柯在田 班新林(890)
129. 大跨度 3 塔悬索桥动力性能分析..... 张新军 傅国宁(898)
130. 拉索在三维空间非线性振动特性初步研究..... 王 涛 沈锐利(906)
131. 考虑车轮转动轨迹的桥头跳车冲击系数分析..... 丁 勇 谢 旭 黄剑源(913)

五、检测、加固、船撞及其他

132. 船桥相撞时撞击力和能量转换的冲击动力学分析 王礼立 杨黎明 陈国虞 陆宗林(921)
- 王礼立 杨黎明 陈国虞 陆宗林(921)
133. 混凝土收缩预测模型修正方法研究及验证..... 黄 侨 胡世翔 陈晓强(936)
134. 试论几座大桥在防御船舶撞击方面值得提高的地方..... 陈国虞(943)
135. 桥梁抗船撞柔性防护方法及实船撞击实验
- 杨黎明 吕忠达 王礼立 陈国虞 陆宗林(948)
136. 大风、干旱、大温差地区高性能混凝土养护工艺..... 黄 峰(955)
137. 高速铁路桥梁支座概述..... 臧晓秋 石秋君 佟嘉明 李学斌(960)
138. 客货共线铁路 32m 简支 T 梁腹板纵向裂缝的影响分析
- 李学斌 邢明照 杨富民 李东昇 牛 斌(966)
139. 桥梁结构风险分析及结构可靠度..... 李铁夫(974)
140. 一种高性能、多用途的新型钢——38SiMnVBE 合金结构钢的应用
- 韩建中 朱海涛 王伟英 陶鸿安 张 波 詹继群(983)
141. 混凝土内部锈蚀钢筋局部应力集中特性研究..... 石晓猛 朱劲松(990)
142. 基于连通性可靠度的桥梁网络维护策略优化..... 杨 云 朱劲松(996)
143. 九堡大桥运营期间风险评估和管理对策 阮 欣 钮建伟 吴宏强 闫振国(1002)
144. 考虑横梁剪切失效成铰的钢筋混凝土简支 T 梁格架桥系统可靠度分析
- 张 毅 孙 智(1009)
145. 基于传递熵的混凝土材料退化超声信号识别 陈小佳 周庆华(1015)
146. 客运专线有砟轨道 32m 双线预制简支箱梁预埋支座板空腹声研究
- 汪永庆(1020)
147. CRTS II 型板式无砟轨道滑动层及隔离层磨耗性能试验研究
- 葛 凯 闫红亮 杨启兵 牛 斌 胡所亭 班新林(1027)
148. 斜拉桥桥塔振动台试验研究 段昕智 徐 艳 李建中(1034)
149. 单向纵坡斜拉桥纵向阻尼器设置研究 吴庆雄 王文平(1040)
150. 正交异性钢板—薄层 RPC 组合桥面结构理论与试验研究
- 曹君辉 邵旭东 张 哲 易笃韬 陈 斌 黄政宇(1047)
151. 折腹型内衬混凝土组合梁抗剪性能研究 蔺钊飞 刘玉擎 贺 君 韩 斌(1053)
152. 钢管混凝土结构板管焊接节点疲劳性能试验研究
- 王 丽 张玉玲 赵欣欣 田 越(1058)
153. LZDJ500T 全液压步履式缆载吊机型式试验研究
- 邓年春 罗 珊 伍柳毅 刘显晖 陈 立 韦富伦(1063)

154. 新型轻轨 U 型梁支座疲劳性能试验研究 严 猛 杨永清 郑小刚 赵 虎(1068)
155. 智能缆索疲劳试验研究 ... 刘礼华 赵 霞 李 盛 周祝兵 薛花娟 吉俊兵(1074)
156. 适用钢箱—混凝土组合结构的新型剪力联结构造研究 范 亮 周志祥(1083)
157. 不同断面形式下钢筋混凝土梁抗爆性能研究 刘 超 孟宪利(1087)
158. 独塔斜拉桥结构检测与安全评估 宗志荣 贾丽君(1094)
159. 基于弯矩控制兼顾应力控制的变截面连续梁桥静载试验布载方法分析
..... 车晓军(1100)
160. 大跨长联连续箱梁桥静载试验研究 马淑芬 张谢东(1104)
161. 红水河斜拉桥状态评定 邓 蓉 荆龙江(1111)
162. 钢箱梁桥面铺装层温度场及钢箱梁顶板应力实测研究
..... 严 琨 章登精 沈锐利 唐茂林(1121)
163. 人工巡检系统综合养护管理方法的研究
..... 甄东晓 郭立明 任美龙 张其浪 韩 强 梁 鹏(1128)
164. 基于优选法的桥梁评估标准确定方法 黄志伟 任 远 黄 侨(1134)
165. 结构损伤及材料退化的计算方法在某桥梁加固中的应用
..... 赵进锋 李 剑 苗家武 王维红(1139)
166. 预应力 CFRP 板加固钢板断裂力学分析
..... 叶华文 强士中 Thomas Ummenhofer(1146)
167. 关于现浇箱梁裂缝的检测、维修与加固施工工艺方案研究
..... 孟新奇 魏伦华 汤凤凯 吕家昱(1153)
168. 部分预应力低高度箱梁的病害分析及加固研究 王统宁 胡 锋 唐国斌(1160)
169. 一种高性能, 高性价比, 标本兼治的 CCCW 材料—XYPEX
..... 朱海涛 孔凡坤(1165)
170. 对武汉长江大桥被船撞 76 次事故的反思..... 朱海涛(1170)
171. 加速度法测量实船与柔性防护装置碰撞的撞击力
..... 唐长刚 吕忠达 徐爱敏 王永刚 杨黎明(1176)
172. 桥梁柔性防船撞装置设计的关键技术研究
..... 刘 军 吕忠达 徐爱敏 周刚毅 杨黎明(1181)
173. 桥墩柔性防撞装置实船撞击过程的实验研究——装置及撞击力的测量与分析
..... 董新龙 周凤华 郑维钰 李来则 段 忠 周刚毅 杨黎明(1188)
174. 实船与有防护装置桥墩碰撞实验的数值模拟
..... 秦 焜 刘慈军 杨黎明 王永刚(1193)
175. 用普通钢筋混凝土球铰修建转体桥
..... 肖硕刚 梅志军 郭小平 黄贤增 张 贤 程懋芳(1197)

四、抗震、抗风与动力分析

109. 大跨度钢箱梁悬索桥的高阶模态涡激共振问题研究

陈政清

(湖南大学风工程试验研究中心)

摘 要:大跨度钢箱梁悬索桥存在高阶模态涡激共振的可能性,其主要影响因素有斯托罗哈数 S_t ,模态质量,模态阻尼比和风场相关性。本文分析了各个影响因素的作用,用节段模型风洞试验验证了 S_t 数不随模态频率变化。针对悬索桥模态在频域上密集分布的特点,提出了一种多点弹性支撑连续梁的新型气弹模型,可以准确模拟更多阶的竖弯模态,从而可用于研究风场相关性对涡振的影响。文末讨论了高阶模态阻尼比的取值问题。我国应尽快开展大跨度桥梁现场稳态激振试验,它可以获取高阶模态阻尼比的准确值,指导今后超大跨度桥梁的抗风设计。

关键词:悬索桥 风致振动 涡激共振 高阶模态 大跨度

1 引言

大跨度悬索桥模态密集,0.6Hz 以下可能有多阶模态存在。已发现有跨度在 1500m 以上的钢箱梁悬索桥有多阶竖向模态涡激共振现象^[1,2],发振模态的频率范围在 0.2~0.4Hz 之间。悬索桥的钢箱加劲梁属于扁平长条杆件,梁高 4m 左右, S_t 数一般不会小于 0.1,频率在 0.6Hz 以下模态的涡振起振风速都会低于桥上允许行车通行风速(25m/s),其涡振振幅必须小于规范允许值。另一方面,涡振振幅容许值实际是由行人车辆所能承受的加速度限值换算的,它随模态频率升高而降低,这意味着高阶模态的振幅限值更为严格,必须给以更多关注。

2 桥梁涡激共振的现有基本理论

1898 年,Strouhal 研究了风竖琴的振动现象,他通过实验发现当流体绕过圆柱体后,在尾流中将出现交替脱落的漩涡,并且漩涡脱落频率、风速及圆柱体直径之间存在以下关系:

$$S_t = \frac{fD}{U} \quad (1)$$

式中, f 为漩涡脱落频率; D 为圆柱体直径; U 为风速, S_t 为 Strouhal 数,对于圆柱体, S_t 约为 0.2。后来研究发现,式(1)也可应用于桥梁等棱柱体,其中 D 为桥梁迎风面的高度,即梁

高。对于接近流线型的钢箱梁, S_i 数在 0.08~0.15 之间。

从涡激共振的表现形式来看,它是长棱柱体的一种带有自激性质的强迫振动。涡激共振主要有五个方面的特征:

- (1)在较低风速下发生的有限振幅振动;
- (2)只在某一风速区间内发生,称为锁定(Locking in)现象;
- (3)最大振幅对阻尼有很大的依赖性;
- (4)涡激响应对断面形状的微小变化很敏感;
- (5)涡激振动可以激起弯曲振动,也可以激起扭转振动。

除了解有关涡激共振的性质外,抗风设计需要检算涡振振幅是否超过容许值。但是,准确估计桥梁涡激共振时的振幅,是一个非常困难的问题,即使是采取风洞试验与理论分析相结合的研究方式,也还很不尽如人意。这里介绍现有的涡振振幅估计理论与实用方法,供下文进一步的讨论分析用。

2.1 涡激振子理论

这一理论的数学模型是一个无限长的直棱柱体,具有自振频率 f 和阻尼比 ζ ,在均匀流场中发生竖向涡激共振。如果只计入漩涡脱落产生的涡激力,单位长度棱柱体振动方程是一个单自由度的强迫振动微分方程:

$$m(\ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2y) = \frac{1}{2}\rho U^2 DC_L(S_i)\sin(\omega_n t + \varphi) \quad (2)$$

式中, $\omega_n = 2\pi f$; C_L 为涡激力系数,它由棱柱体的外形决定,从而是 S_i 的函数,且是以棱柱体迎风面的高度为特征长度。由结构动力学的简谐振动理论,达到涡激共振时的幅值为:

$$Y = \frac{\frac{1}{2}\rho U^2 DC_L}{\omega_n^2 m} \cdot \frac{1}{2\zeta} \quad (3)$$

再引入以下符号:

$$\eta = \frac{Y}{D}, S_c = \frac{4\pi m \zeta}{\rho D^2} \quad (4)$$

其中, η 是涡激共振的无量纲振幅,按梁高 D 无量纲化; S_i 是斯托罗哈数, S_c 是斯卡顿(Scruton)数。式(3)可化为以下形式:

$$\eta = \frac{C_L}{4\pi S_c S_i^2} \quad (5)$$

这表明无量纲振幅与涡振力系数成正比,与 S_i 数的平方成反比,与 S_c 数成反比。在风洞中进行的弹性悬挂的刚性节段模型试验基本与上述数学模型相对应。为了进一步考虑气动自激力的影响和描述锁定现象,很多学者提出了改进的涡激振子理论^[3]。

涡激振子理论式(5)以及相对应的节段模型风洞试验都没有考虑实际桥梁振动时的模态振型影响和沿桥跨方向的涡激力相关性。针对这一情况开展的研究目前只见到 Ruscheweyh^[4]的相关长度理论,他将式(5)修改为:

$$\eta = K \cdot K_w \cdot \frac{C_L}{S_c S_i^2} \quad (6)$$

式中: K ——振型修正系数;

K_w ——相关长度系数。

式(6)目前已被欧洲规范 Eurocode 采用,作为梁柱结构涡振振幅的估计公式^[5]。

2.2 多阶模态涡振的预测方法

目前预测多阶模态涡振的风速区间和最大振幅的方法基本上以式(6)为依据,由某一阶模态的节段模型风洞试验的结果推算其余模态的结果。具体步骤是:

(1)选取某一低阶模态进行节段模型弹性悬挂风洞实验,测定断面的 S_i 数、发生涡激共振的锁定风速区间以及最大涡振振幅。

(2)按 S_i 数保持不变的假定推算发生高阶模态涡振的锁定风速区间:

$$V_Q = V_P \cdot \frac{f_Q}{f_P} \quad (7)$$

式中, V_P 是风洞试验得到的 P 阶模态的涡振风速,如起振风速、锁定风速区间以及最大振幅风速, V_Q 是 Q 阶模态的相应的推算涡振风速。

(3)低速流场中棱柱体的 S_i 数只与棱柱体的单位长度模态质量 m 和模态阻尼比 ζ 有关。设计中假定各阶模态的阻尼比相等,于是由式(6)导出涡振振幅与 m 成反比。如果 P 阶模态风洞试验的无量纲振幅为 η_P ,那么 Q 阶模态的对应值 η_Q 为:

$$\eta_Q = \eta_P \cdot \frac{m_P}{m_Q} \quad (8)$$

(4)按式(7)计算修正系数 K 与 K_w ,得到 η_Q 的预测值。

Ruscheweyh 的相关长度理论主要是以直立的圆形烟囱为对象。烟囱一般只有一、二阶弯曲模态有可能发生涡振,与水平状态桥梁的高阶弯曲模态振动有很大差别。考虑桥梁高阶模态振型与桥跨方向涡激力相关性的研究成果尚未见到,因此桥梁结构涡振振幅按文献[4]计算修正系数 K_w 缺乏依据,目前我国桥梁抗风设计规范没有考虑桥跨方向涡激力相关性的修正问题。

3 大跨度钢箱梁悬索桥的高阶涡振问题

悬索桥的结构动力特性有两个显著特点:模态密集和模态质量基本不变且等于加劲梁和主缆的总质量。表1列出了一个800m跨度的悬索桥的前4阶对称与反对称共计8个竖弯模态的主要参数。由表1可见,8个模态密集分布在0.12~0.69Hz的频率区间内,平均间距只有0.07Hz;其密集程度不仅高于各阶模态频率按平方级数增加的简支梁,也高于按自然数增加的张紧弦。假定加劲梁为钢箱梁,梁高 $D=3.5\text{m}$, $S_i=0.12$,各阶模态对应的涡振起振风速 U 可由公式 $U=fD/S_i$ 计算,列于表1。8个竖弯模态的起振风速范围在3.44~20.1m/s之间。据已有的大跨度悬索桥现场实测涡振数据^[2],起振风速在6~14m/s区间的二、三阶模态比起振风速低于6m/s的一阶模态更容易发生涡激共振。另一方面,除第三阶反对称模态外,其余模态的等效质量几乎保持不变,都接近于梁缆合计的总质量。由于式(8)表明涡振振幅与模态质量成反比,因此悬索桥的竖弯高阶模态涡振振幅有可能保持不变。但是,在振幅相同的情况下,高阶模态涡振产生的加速度会按频率的平方急剧增加。

一个主跨800m的悬索桥^①的加劲梁竖弯模态参数

表1

序号	频率 $f(\text{Hz})$	振型特征	模态等效质量 (t/m)	涡振起振风速 ^② (m/s)
2	0.1181	1阶反对称竖弯	37.1	3.44
3	0.1710	1阶对称竖弯	33.8	4.98
5	0.2354	2阶对称竖弯	33.9	6.85
6	0.2645	2阶反对称竖弯	35.4	7.72
13	0.3588	3阶对称竖弯	33.8	10.5

续上表

序号	频率 f (Hz)	振 型 特 征	模态等效质量(t/m)	涡振起振风速 ^② (m/s)
18	0.464 8	3 阶反对称竖弯	46.0	13.6
26	0.562 1	4 阶对称竖弯	33.8	16.3
34	0.690 0	4 阶反对称竖弯	34.1	20.1

注:1. 悬索桥加劲梁质量为 27.7t/m,两根主缆的质量共计 5.9t/m,梁缆质量合计为 33.6t/m。模态质量除 18 号模态外,其余模态质量与梁缆总重很接近,几乎保持不变。

2. 假定梁高 $D=3.5\text{m}$, $S_i=0.12$, 涡振起振风速由公式 $U=fD/S_i$ 计算。

上述分析表明,由于模态密集,悬索桥高阶模态的起振风速仍在常遇风速范围内,且高阶模态涡振加速度大,对桥梁的危害比低阶模态涡振更大。可以理解,对于跨度大于 1500m 的超大跨度悬索桥,高阶模态涡振问题会更加突出,因此我们应高度重视这一问题。为了准确预测和控制大跨度悬索桥的高阶模态涡激共振,急需对下列问题展开研究:

- (1) S_i 数是否随模态频率变化而改变?
- (2) 各阶模态阻尼比相等的假定是否合理?
- (3) 涡激力沿桥跨方向分布的相关性是否与模态振型有关?
- (4) 高阶模态涡激共振的容许振幅应如何确定?

本文介绍对上述问题的初步研究与思考。

4 不同悬挂频率的矩形节段模型风洞试验

作为悬索桥多阶竖向涡振研究的第一步,本文将钢箱梁简化为一根矩形截面的长条。首先研究它的涡振性能。矩形截面的宽高比取为 6,制作了高 12cm、宽 72cm、长 154cm 节段模型,在湖南大学 HD-2 风洞的 3m(W)×2.5m(H)×17m(L)试验段中进行了 5 组不同悬挂频率下的涡激振动试验,相当于模拟同一无限长矩形截面柱体的五个模态的涡振性能,试验参数见表 2。在每个模态频率下都得到了两个竖向涡振锁定区和两个扭转涡振锁定区。由试验折算的 S_i 数基本保持不变,并且两个锁定区 S_i 数都近似满足 2:1 的关系,竖向涡振的试验结果列于表 3。为验证式(5),试验中保持系统阻尼比 0.25% 不变,系统质量因弹簧不同有细微变化,但除第四组外可视为基本不变。涡振振幅与模态频率之间的关系尚未观察到明显规律,需要进行更多的试验。

长宽比 6:1 的矩形模型风洞试验基本参数

表 2

试验组	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
竖弯频率(Hz)	2.441 4	3.418 0	5.127 0	6.103 5	7.324 2
竖弯阻尼比(%)	0.249	0.250	0.247	0.249	0.250
系统质量 M(kg)	16.352	16.172	17.305	20.388	17.595
扭转频率(Hz)	4.882 8	6.347 7	9.033 2	10.253 9	11.718 8
扭转阻尼比(%)	0.242	0.242	0.237	0.238	0.233

节段模型弹性悬挂试验竖向涡振主要结果

表 3

试验组		第一涡振区		第二涡振区	
序号	频率	风速范围(m/s)	S_i 数	风速范围(m/s)	S_i 数
1	2.4414	1.32~1.99	0.229 3	2.92~3.63	0.103 7

续上表

试验组		第一涡振区		第二涡振区	
序号	频率	风速范围(m/s)	S_i 数	风速范围(m/s)	S_i 数
2	3.418 0	1.72~3.39	0.246 4	4.14~5.53	0.102 4
3	5.127 0	2.70~3.55	0.235 5	5.46~7.15	0.116 4
4	6.103 5	3.30~5.34	0.229 3	6.41~8.56	0.118 1
5	7.324 2	3.90~6.48	0.232 9	8.09~9.62	0.112 3

5 多点弹性支承矩形梁的气弹模型风洞试验

为了通过风洞试验研究涡激力沿桥跨方向分布的相关性是否与模态振型有关的问题,必须制作一个可以模拟多个模态密集分布的气弹模型。一个完整的悬索桥气弹模型从理论上来说是应该具备这一性质,但实际上因缩尺比太小干扰因素太多而无法做到。拉条模型忽略了塔和缆索系统,制作比较容易。它可以模拟悬索桥的一对竖弯和扭转模态,从而可用于悬索桥抗颤振能力的检验。由于拉条模型的刚度由两条平行的张紧的钢丝提供,它的高阶频率分布按自然数增加,即 n 阶模态的频率是 1 阶模态频率的 n 倍,因此,拉条模型不能模拟悬索桥的多模态密集分布特性。为了避开塔和缆索系统干扰,单纯研究加劲梁的涡激力跨向相关性与高阶模态振型变化之间的关系,本文提出了一种新型气弹模型——多点弹性支承梁的气弹模型,建立了一套相应的设计方法,其关键步骤是通过假定振型法计算出合适的支撑弹簧刚度和支撑数量,从而模拟所希望的多个模态的频率和振型。按这一方法,设计制造了一个长 8m、高 2cm、宽 12cm 的矩形长条气弹模型,用来进一步研究高阶模态下涡振振幅的变化规律。这一气弹模型的设计参数接近一座 1 600m 跨度悬索桥的满足弗劳德数相似的 1/200 缩尺模型。模型刚度由一条薄钢板提供,外形用泡沫塑料板制作。采用激振法测定气弹模型各阶竖弯模态的频率和振型,与有限元模型比较后可研究板条的剪切刚度对高阶模态的影响。调试好后模型将在 HD-2 风洞的 8.5m(W)×2m(H)×15m(L) 的开口试验段进行均匀流场和紊流场下的涡振试验,直接测定各阶模态振幅与风场及模型结构参数之间的关系。目前模型已制作完成,预计在 2012 年 5 月前可完成全部试验工作。

6 高阶模态涡激共振的容许振幅

我国公路桥梁抗风规范采用与日本规范相同的涡振振幅容许值规定,容许值与模态频率成反比,竖弯模态的涡振振幅容许值为:

$$[A_b] = \frac{0.04}{f_b} \quad (9)$$

这里 f_b 应是验算模态的频率,随模态不同而不同。显然高阶模态涡振振幅容许值随频率升高迅速减小。就这一规定的理由,本文作者咨询了多位日本学者。日本东京大学 TomomiYAGI 教授给出了如下解释。由桥梁的竖向弯曲振动的频率近似公式 $f=100/L$ 和涡振时桥梁加速度不宜超过 100gal(1m/s^2) 的要求,可得对应的涡振最大容许速度为:

$$V_h = \frac{1}{2\pi f} = \frac{L}{200\pi} \text{ (m/s)} \quad (10)$$

再由振幅与速度的关系得到最大容许振幅公式:

$$A_h = \frac{V_h}{2\pi f} = \frac{L}{400\pi^2 f} \text{ (m)} \quad (11)$$

桥梁抗风规范适用于 200m 跨度以内的桥梁,为偏于安全,取跨度 $L=160\text{m}$ 就得到容许振幅的规定式(9)。由式(9)的制定原理可见,目前抗风设计中将式(9)直接推广应用于千米以上大跨度桥梁的作法是否合适是很值得怀疑的。

7 大跨度桥梁高阶模态的阻尼比

结构阻尼比不能在设计阶段确定,只能在结构建成后实测。常用的环境振动法不能精确测量结构阻尼比,现场稳态激振试验才是精确测量大跨度桥梁多阶模态阻尼比的唯一手段。但是大跨度桥梁的现场稳态激振很难实现,至今只有美、日等国拥有这一技术,图 1 是韩国永宗桥使用的激振器,每台总重量 37t,共用两台。由于我国尚未有大型结构现场激振试验的相关

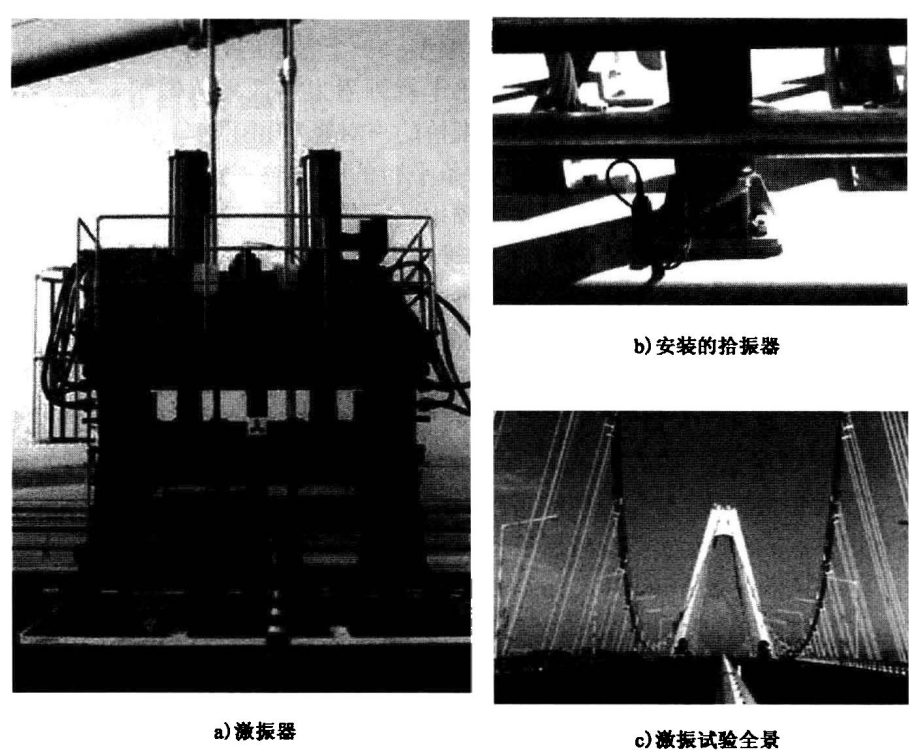


图 1 韩国永宗桥的现场稳态激振试验(激振器上有日本三菱公司标记)

多多罗桥动力特性现场激振试验结果^[6] 表 4

模 态		频率(Hz)	阻尼比 ξ	振幅(cm)
水平	对称一阶	0.097	0.021	9.4
	反对称一阶	0.249	0.034	4.0
	对称二阶	0.470	0.027	1.1
竖直	对称一阶	0.226	0.003 8	30.5
	反对称一阶	0.263	0.002 8	22.6
	对称二阶	0.348	0.001 1	9.5
扭转	对称一阶	0.497	0.002 7	4.8
	反对称一阶	0.831	0.008 1	1.6

设备与技术,从而缺乏大跨度桥梁模态阻尼比的准确数据。从日本多多罗(Tatara)大桥现场稳态激振法实测结果(见表4)来看,竖向高阶模态的阻尼比有可能小于低阶模态,不满足抗风设计采用的各阶模态阻尼比相等的假定,这可能是导致我国有些重大桥梁出现涡激振动病害的原因之一。我国应尽快开展大跨度桥梁现场稳态激振试验,它可以获取高阶模态阻尼比的准确值,用以指导今后超大跨度桥梁的抗风设计。

参 考 文 献

- [1] Larsen A, Esdahl S, et al. Storebalt suspension bridge-vortex shedding excitation and mitigation by guide vanes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88: 283-296.
- [2] Hui Li, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements[J]. Engineering Structures, 2011(3): 1 894-1 907.
- [3] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [4] Ruscheweyh R. Experience with vortex-induced vibration[J]. Chimney Magazine, 2010, 7 (26).
- [5] Eurocode 1: Actions on structures-General actions-Part 1-4: Wind actions, Annex E, prEN 1991-1-4, January 2004.
- [6] Yamaguchi, et al. Field Observation and Vibration Test of the Tatara Bridge, from www.google.com/scholar.

110. 城市桥梁抗震设计对策研究

徐秀丽 李枝军 李雪红 许 祥

(南京工业大学土木工程学院)

摘 要:城市快速路系统中的大型互通式立交、跨线高架桥,桥型大多为 30m 左右跨度的连续梁桥,但受地理条件的限制,高墩桥、矮墩桥、超宽桥、变宽桥、曲线梁桥等特殊桥梁所占比重较多。论文以某市快速化工程为背景,选取几种具有代表性的桥梁结构进行地震反应分析,研究地震作用下各桥梁结构的抗震性能,探讨控制抗震设计的主要结构参数,在此基础上对结构进行优化设计,研究恰当的结构构造对策并对支座和防落梁系统进行统筹设计,提高桥梁的抗震性能;最后提出城市桥梁抗震设计建议,为消除结构薄弱环节、提高结构抗震性能提供技术参考。

关键词:城市桥梁 抗震设计 超宽桥 曲线梁桥

1 引言

随着我国城市化进程的加快,交通拥堵现象日益突出,许多城市纷纷修建城市快速路工程。城市快速路工程中通常含有大量的桥梁工程,如大型互通式立交、跨线高架桥、连续梁桥等,但受地理条件的限制,高墩桥、矮墩桥、超宽桥、变宽桥、曲线梁桥等特殊桥梁所占比重较多。我国是世界上多地震国家之一,近十年来我国地震活动较频繁,因而城市抗震防灾尤为重要。城市桥梁属于生命线工程,对量大、面广的城市桥梁的抗震设计对策进行研究有着重要的工程应用价值和社会意义。目前我国的桥梁抗震设计理论和方法尚不完善,公路桥梁、城市桥梁及铁路桥梁的抗震设计体现不一致,《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/T B02-01—2008)和《城市桥梁抗震设计规范》(征求意见稿,2009.3)的部分规定条文可操作性不强,给桥梁抗震设计工作的开展带来一定的困难。

本文以昆山市中环快速工程为背景,选取几种具有代表性的桥梁结构进行地震反应分析,研究地震作用下各桥梁结构的抗震性能,探讨控制抗震设计的主要结构参数,在此基础上对结构进行优化设计;研究恰当的结构构造对策,确保达到不倒塌的设计目标;以满足结构整体抗震性能为目标,通过精细化有限元分析,对支座和防落梁系统进行统筹设计,提高桥梁的经济性;提出城市桥梁抗震设计建议,为消除结构薄弱环节、提高结构抗震性能提供技术参考。

2 工程背景

昆山快速中环工程(如图 1 所示)包括 G312、黄浦江路、S339 及江浦路所围合的四边道