

第十八届
全国桥梁学术会议
论文集

下册
2008.天津

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

第十八届全国桥梁学术会议 论文集

(下册)

2008. 天津

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

图书在版编目(CIP)数据

第十八届全国桥梁学术会议论文集/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, 2008. 4

ISBN 978-7-114-07093-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 049789 号

Dishibajie Quanguo Qiaoliang Xueshu Huiyi Lunwenji(Xiace)

书 名:第十八届全国桥梁学术会议论文集(下册)

著 者:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会

责任编辑:刘 涛 栗光华

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.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285656, 85285838, 85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

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:53.75

字 数:1371 千

版 次:2008 年 4 月第 1 版

印 次:2008 年 4 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07093-8

印 数:0001~1500 册

定 价:180.00 元(上、下册)

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

第十八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
委员 周世忠 陈明宪 孟凡超 秦顺全 牛斌
赵基达 陈艾荣 邵长宇 葛耀君 韩振勇

组织委员会

名誉主任 熊建平
主任 李全喜
副主任 肖汝诚 张连选 窦华港 王周喜 孙增印
孟庆旺 李凯建 李爱国 王江 陈福明
委员 王文贵 刘瑞光 魏宏云 从月宾 李国民 郑力 刘旭锴
李春津 韩利民 孙树礼 邱照宝 金正桥 张振学 郝学华
王起 吴秉军 魏连雨 刘景樑 黄大健 韩冠华 李忠献
孙斌 华彦常 朱劲松

主办单位

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会
天津市建设管理委员会

承办单位

天津市土木工程学会
天津市城市基础设施建设投资集团有限公司
天津市市政公路管理局
天津城建集团有限公司
天津市政建设集团有限公司

协办单位

天津市市政工程研究院
天津城建设计院有限公司
中铁十八局集团有限公司
天津市公路管理处
市政华北设计院
天津城建滨海路桥有限公司
天津大学建筑工程学院

天津市市政工程设计研究院
铁道第三勘察设计院集团有限公司
天津市滨海市政建设发展有限公司
天津市天正基础设施建设有限公司
天津市道桥管理处
天津市环境建设投资有限公司
河北工业大学

目 录(下册)

三、抗风、抗震与结构分析

103. 拱桥刚性吊杆风振问题及其对策..... 陈政清 刘慕广(699)
104. 考虑脉动风作用的钢和 CFRP 索在支点激励下非线性振动
..... 谢 旭 张治成 中村一史 前田研一(708)
105. 桥梁结构抗风设计中的涡激振动问题
..... 刘志文 杨 阳 陈政清 张著名 辛亚兵(713)
106. 轴向流对斜拉索气动稳定性影响的试验研究..... 刘庆宽 乔富贵(724)
107. 抗风缆、中央扣、格栅式桥面对桥梁抗风能力影响的研究
..... 赵 楠 张煜敏 赵国辉 刘健新(729)
108. 矮寨大桥悬索桥抗风设计研究..... 陈政清 张志田 廖建宏(734)
109. 新疆维吾尔自治区赛吾迭格尔大桥抗风性能试验研究
..... 刘健新 胡庆安 白 桦 乔云强(743)
110. 昂船洲大桥的颤振分析..... 邱文珊 许志豪(750)
111. 横风对高墩桥梁车桥耦合振动影响机理分析..... 凌知民 高碧波 项海帆(757)
112. 宽幅系杆拱桥抗震设计..... 孙书亭 关长吉(765)
113. 基于 ANN-MC-IDA 的桥梁随机地震易损性分析方法研究..... 冯清海 袁万城(773)
114. 大跨度复式提篮拱桥抗震性能研究..... 钟轶峰 邓朝荣 许宏兵(781)
115. 客运专线桥梁的抗震性能试验研究..... 丁明波 陈兴冲(787)
116. 隔震梁桥结构模型振动台试验研究..... 韩 强 杜修力 刘晶波 刘文光(793)
117. 轴力对钢筋混凝土桥墩抗震性能的影响..... 白植舟 崔 宏 甄东晓(800)
118. 轻质混凝土大跨连续刚构抗震性能分析..... 赵国辉 姜秀娟 张煜敏 刘健新(806)
119. 考虑行波效应大型高架桥梁地震破坏的仿真分析..... 陆新征 张炎圣 江见鲸(812)

120. 曲钢箱梁桥冲击系数的实用计算方法..... 黄东洲(819)
121. 车辆—路面—桥梁耦合系统振动分析..... 方志 殷新锋(826)
122. 不同车辆模型对 T 型刚构桥冲击系数的对比研究 桂水荣 陈水生(833)
123. TMD 对高速列车通过独塔斜拉连续刚构组合桥时的振动控制研究
..... 路萍 郭文华(840)
124. 公路桥梁与车辆耦合振动理论与分析模型..... 李小珍 张黎明 童登国 强士中(847)
125. 多跨 PC 简支板梁桥行车动力响应测试研究
..... 钟明全 阳光 施尚伟 王旭军(856)
126. 装配式简支梁桥车桥耦合振动及冲击系数研究..... 潘登 桂水荣 陈水生(862)
127. 拉索桥面耦合振动及相邻索耦合振动分析..... 谭长建 祝兵(870)
128. 桥梁用液体黏滞阻尼器的减振设计..... 陈永祁 马良喆(877)
129. 斜拉桥结构电磁驱动 AMD 系统的在线控制研究 何敏 王建国(886)
130. 基于可靠度理论的桥梁船撞力分析..... 刘晓奎(891)
131. 大跨径三塔悬索桥的动力特性分析..... 陈策 冯兆祥 吉林(895)
132. 超大跨度 CFRP 索斜拉桥的动力性能研究 张新军(901)
133. 大跨度双曲拱桥的动力特性分析..... 夏樟华 林传金 林友勤 宗周红(907)
134. 基于数理统计的环境温湿度对两跨连续梁动力特性影响研究
..... 余印根 宗周红 夏樟华(914)
135. 空间缆索悬索桥的动力特性分析..... 王晓明 段瑞芳(922)
136. 斜拉桥基频近似公式的改进..... 苗家武 肖汝诚(927)
137. 空间三维新型钢结构拱桥——奉化桥抗震性能研究..... 李自林 栾小兵(931)
138. 西安咸阳国际机场专用高速公路桥梁减、隔震系统的设计
..... 陈长海 李震 赵国辉 刘健新(937)
139. 建立桥梁船撞动力设计理论与方法的建议..... 王君杰 范立础(943)
140. 昂船洲大桥——船舶撞击分析及测试..... 郭志辉 李德明(950)
141. 分阶段施工桥梁的无应力状态控制法..... 秦顺全(957)
142. 系杆拱桥吊杆多次张拉的计算方法..... 林刘赞 贾丽君(969)
143. 利用折形钢腹板先行架设组合箱梁桥施工过程分析
..... 贺君 刘玉擎 陈艾荣 武建敏(974)
144. 桥梁上下部共同作用研究初探..... 姜海西(980)
145. 不同桥面形式组合梁斜拉桥收缩徐变效应分析..... 聂建国 李法雄 樊健生(985)
146. 预应力混凝土弯桥开裂前后的弹塑性行为分析
..... 项贻强 唐苍松 林泉 汪劲丰 姜旭东(993)
147. 施工误差对大跨径斜拉桥在施工过程中极限承载力影响的研究
..... 陈德伟 张磊 周雄伟 李欣然(999)
148. 主跨 460m 混凝土梁斜拉桥总体刚度比较研究 邓青儿(1008)
149. 体外预应力波形钢腹板组合箱梁抗弯分析 刘志才 李立峰(1015)
150. 多箱室波形钢腹板桥梁的结构空间受力特性分析
..... 朱鹏志 史鹏程 谢旭 张治成(1023)

151. 桁腹式组合梁桥节点构造研究 王倩 刘玉擎 黄生富(1030)
152. 波形钢腹板 PC 组合箱梁的力学特性 邢晓辉 尧云涛(1035)
153. 波形钢腹板体外预应力组合梁极限状态分析 唐亮 聂建国(1039)
154. 钢管初应力对钢管混凝土拱桥承载力影响研究
..... 周水兴 喻国华 张敏 刘琪(1049)
155. 基于 ANSYS 实体元的混凝土独塔斜拉桥三维仿真分析
..... 熊文 金剑 肖汝诚(1056)
156. 公路空腹式预应力型钢混凝土梁的构造与承载力分析研究 邓良强 孙建渊(1063)
157. 高墩连续刚构桥 T 构悬臂施工稳定性分析
..... 袁爱民 戴航 吉伯海 聂利英(1070)
158. 铝合金人行天桥的结构稳定性分析 程晓东 张洽成 谢旭 傅翼(1076)
159. 三角桅杆钢箱桥塔的整体稳定分析 吴斌暄 程斌 沈旭东 肖汝诚(1082)
160. 钢管混凝土拱的稳定系数曲线研究 韦建刚 陈宝春 吴庆雄(1088)
161. 钢箱桥塔设计中的局部稳定问题 程斌 肖汝诚(1093)
162. 钢拱塔预应力混凝土斜拉桥——空间分析及拉索张拉方法研究
..... 柳磊 徐栋(1103)
163. 大宽跨比连续钢箱梁桥的剪力滞效应研究 蔺鹏臻 刘世忠(1110)
164. 独塔单索面斜拉桥主梁扭转性能研究 陈智俊 金文成(1117)
165. 自锚式悬索桥主缆钢混锚固区受力分析 邢昕 刘玉擎 赵晨 卢永成(1123)
166. 高强混凝土桥墩实心段水化热温度状况研究 陈斌 杨涛(1130)
167. 桩基桥墩的静力 pushover 分析 张永亮 陈兴冲(1135)
168. 梁桥钢/FRP 束与混凝土相互作用分析方法研究 何雄君 朱春东 胡志坚(1140)
169. 不同连接方式及混凝土板厚对下承式板桁桥的受力影响
..... 肖杰 吴定俊 冯克岩(1146)
170. 基于动力的石拱桥套拱加固静力性能分析 方德铭 宗周红(1152)
171. 钢筋混凝土简支梁桥抗剪能力的时变分析及其运用 ... 林阳子 黄侨 荣学亮(1160)
172. 混凝土桥梁结构的多单元协作分析方法 孙永明 黄侨 荣学亮(1167)
173. 预应力混凝土斜拉桥主梁横向应力分布研究 马海英 石雪飞(1173)
174. 超大跨度斜拉桥施工全过程变形的非线性效应分析 ... 杨兴旺 李乔 卜一之(1179)
175. 锚拉板式索梁锚固结构静力性能的比较分析 卫星 李俊 强士中(1185)
176. FRP 体外预应力筋极限应力计算方法研究 ... 杜进生 Francis TK Au 刘士林(1190)
177. 结合梁斜拉桥施工过程中的精细化分析 李欣然 陈文伟 陈德伟(1197)
178. 天津海河蚌埠桥整体结构计算分析与设计 ... 井润胜 汤洪雁 周凤先 郭会国(1204)
179. 天津海河赤峰桥整体结构计算分析与设计 崔志刚 洪全 郭会国 井润胜(1208)
180. 天津海河奉化桥整体结构计算分析与设计 洪全 周凤先 崔志刚 井润胜(1212)
181. 太原市南中环桥主桥设计与结构分析 唐虎翔 李映 孙旭霞(1217)
182. 宁波长丰桥结构设计与分析 冯向宇 李映 郭忆(1223)
183. 朝天门大桥索塔底部节点受力分析 李博 石雪飞 阮欣 田周松(1229)
184. 天津保定桥索塔锚固区钢锚箱空间分析 熊刚 谢斌 黄思勇 戴少雄(1233)
185. 上海长江大桥湿接头混凝土浇筑温度应力仿真分析 ... 陈浩宇 李俊毅 李美丹(1238)

四、监控、试验、养护及其他

186. 大跨 PC 连续刚构桥合龙段施工时预顶力的优化计算
..... 颜东煌 袁 明 吴关良(1247)
187. 吊索结构的索力施工技术优化方法在奉化桥中的应用 韩振勇(1254)
188. 异型桥塔无背索斜拉桥施工仿真分析及施工控制研究
..... 石雪飞 李小祥 阮 欣 李 欣(1262)
189. 天津市通南桥施工仿真分析及应力监控
..... 姜忻良 任 洪 谢 剑 刘 杰 郭 跃 高 星 季孟通(1268)
190. 河耳沟特大桥施工控制技术 单荣相 易世德(1274)
191. 大跨度连续刚构桥施工线形控制 何天涛 颜东煌 袁 明(1278)
192. 珠江黄埔大桥南汉悬索桥钢箱梁架设施工监控浅析
..... 胡玉珠 袁帅华 谭红梅 张扬永 肖汝诚(1284)
193. 混凝土自锚式悬索桥施工控制研究 张连振(1289)
194. 短线法施工全过程控制系统 单德山 李 乔 付春雨(1296)
195. 城闸大桥施工过程的监测与控制 叶 新 李欣然 陈德伟(1303)
196. 同步顶升解决跨线桥净空问题关键技术探讨 程海根 邹常进(1311)
197. 淳安千岛湖大桥施工及监控要点探讨 许 俊 徐建富(1317)
198. 新型拱桥吊杆张拉工艺及其控制方法 朱劲松 王成博 李忠献(1322)
199. 磁通量传感器及其在桥梁工程中的应用 邓年春 龙 跃 孙利民 夏丹丹(1330)
200. 格构式钢管混凝土拱承载能力稳定试验研究 向中富 杨虎根(1336)
201. 连续箱梁桥拼宽纵向接缝模型试验研究 宗周红 许有胜 陈宜言 郭岩昕(1344)
202. 斜拉桥索塔拉索锚固区足尺模型试验 吕 波 黄智强(1351)
203. 桥面铺装复合纤维混凝土的试验研究 张海辉 刘永亮 齐怀展(1356)
204. 公轨两用斜拉桥钢锚箱式索梁锚固区足尺模型疲劳试验研究 何武超(1362)
205. 通南桥工程节点拉压试验 张树彬 张建利 唐建军(1369)
206. 舟山金塘大桥主通航孔桥索塔锚固区足尺模型试验研究
..... 白光亮 王昌将 蒲黔辉 杨永清(1375)
207. 琴桥静力性能模型实验研究 黄海新 周建宾 檀永刚 许福友(1383)
208. CFRP 筋体外预应力混凝土梁正截面承载力试验研究
..... 王新定 戴 航 叶见曙 丁汉山(1388)
209. 大跨度桥梁养护管理系统的若干问题研究 ... 黄 侨 任 远 刘绍云 吴红林(1396)
210. 基于应力解除法的在役混凝土结构有效预应力确定研究
..... 姜增国 贾巧燕 刘丹娜(1403)
211. 大跨桥梁新型安全监测评价体系研究
..... 张新越 李 娜 梁 柱 马 骏 郑 春 王仁贵(1407)
212. 机敏膜技术及其在桥梁健康监测工程中的应用
..... 张奔牛 周志祥 李星星 张开洪(1414)

213. 基于 BP 网络与模糊积分的结构损伤识别	张育智	李 乔	单德山(1421)
214. 天津市桥梁管理系统研究与开发	邓 鸣	郑连生	何立忠
215. 基于三维裂纹扩展模拟的钢桁架桥健康监测方案研究	谭金华		陈惟珍(1433)
216. 基于神经网络的混凝土梁桥技术状态评估	胡志坚	王守斌	周海斌(1438)
217. 基于曲率模态和小波变换方法的连续刚构桥损伤识别研究	张谢东		蔡正东(1444)
218. 重庆渝澳轻轨桥健康监测系统设计	刘永棵	张雪松	李富财(1450)
219. 新滩綦江大桥中长期监测系统设计	张雪松	罗 维	刘永棵(1456)
220. 钢管混凝土拱桥全寿命监控系统研究	康小兵		滕小竹(1461)
221. 不同尺度上桥梁损伤识别的信息分布特征研究			郭 健(1468)
222. 意外事故对 PC 连续梁桥的损伤及工程对策	郭 瑞		贾丽君(1475)
223. 泰州长江公路大桥风险评估	李燎菁	阮 欣	陈艾荣(1480)
224. 钢筋混凝土桥梁的耐久性无损检测	闻宝联	王 欣	王新刚
225. 天津地区简支板梁桥典型病害分析与对策	何立忠	季玉华	张广寅(1494)
226. 基于剪滞理论的钢纤维混凝土桥面铺装层破坏分析	刘永光		李忠献(1499)
227. 混凝土桥梁碱蚀探究	韩宗泽	刘治国	习会峰(1506)
228. 大跨径连续刚构桥加固技术研究与实践	向中富	黄海东	许宏元(1512)
229. 钢筋混凝土桥梁病害的主要成因及修补加固范例			朱海涛(1518)
230. 连续刚构桥箱梁底板预应力张拉崩裂行为分析	王 磊	周志祥	吴海军(1523)
231. 支架现浇预应力混凝土箱梁开裂原因分析	沈旭东	吴斌暄	叶 新(1528)
232. 粘贴纤维片材加固计算方法对比分析	马 琳	贺拴海	王艳宁(1534)
233. 拱桥的加固改造方法研究	张 阳	邵旭东	李立峰(1540)

103. 拱桥刚性吊杆风振问题及其对策

陈政清 刘慕广

(湖南大学风工程试验研究中心)

摘要:本文通过理论和风洞试验,研究了主跨 300m 左右拱桥常用的 H 形和箱形吊杆的风致振动特性。H 形吊杆由于刚度小,实桥吊杆最低频率在 2Hz 左右,小风攻角在 8~10m/s 风速下即可发生涡激共振现象;在 20°大攻角附近,吊杆在 20m/s 左右风速下还出现了随风速增加振幅不断增大的扭转颤振现象。进一步的试验发现,H 形吊杆腹板开孔虽可提高弯曲驰振风速,但开孔大小也明显影响发生扭转颤振失稳的风攻角区间,腹板开孔越大,发生扭转颤振的攻角区间越大。箱形吊杆刚度比 H 形吊杆有明显提高,实桥箱形吊杆最低频率也达 4.5Hz 左右,可有效抑制扭转颤振和驰振,但是试验发现,箱形吊杆在小攻角 40m/s 至 70m/s 风速区间下可发生严重的弯曲涡激共振,最大振幅可达 25cm。由于箱形截面的 Strouhal 数在 0.1 左右,提高吊杆的自振频率是提高起振风速的主要途径。研究发现,通过增大板厚及内部设置单枝加劲肋的方式,由于同时增加了吊杆刚度与质量,往往不能有效提高箱形吊杆自振频率。依据以上研究,提出了吊杆抗风设计的若干建议。

关键词:H 形吊杆 箱形吊杆 风振特性 涡激共振 颤振失稳 驰振失稳

1 引言

我国近几年大跨度的钢拱桥发展很快,由于制造和养护方便,拱桥刚性吊杆,特别是 H 形与箱形吊杆,应用比较普遍。然而,对于这种具有典型钝体断面细长结构风振的可能性和严重性,工程界认识不足。由于长细比大,钢构件阻尼比小等因素,导致构件的风致稳定性极差,极易发生多种有害振动^[1]。表 1 中为 20 世纪国外此类结构发生风振病害一览^[2]。我国九江长江大桥 H 形吊杆在主拱肋合龙后出现大幅涡激振动^[3~5],最大扭转角达到±8°,最终采用 TMD 来抑制吊杆振动。2006 年 7 月在强台风袭击下,又有一即将完工的钢拱桥 H 形吊杆发生了更为严重的大幅扭转振动,导致吊杆两端出现了穿透裂缝。据实际观察,该桥吊杆扭转振幅可能大于 30°,且在风速增加的过程中振幅不断增大,没有涡激共振锁定区间,因此我们初步判断为扭转颤振,并进行了一系列风洞试验研究来认识和验证这一推断。

以往对 H 形吊杆的风致病害认识中,认为吊杆是一种大长细比结构,往往仅考虑其涡激

年 代	桥 名	桥 址	结 构 形 式	风 振 构 件
1960	Askerodfjord	瑞典	上承式拱桥	圆形立柱
1960s	—	捷克斯洛伐克	上承式拱桥	圆形立柱
1967	Peace River	加拿大	系杆拱桥	圆形吊杆
1929	Tacony Palmyra	美国	系杆拱桥	H 形吊杆
1930s	Storeström	丹麦	系杆拱桥	H 形吊杆
1964	Fire Island	美国	系杆拱桥	H 形吊杆
1967	—	日本	系杆拱桥	圆形吊杆
1973	Commodore Barry	美国	钢桁架桥	H 形杆件
1974	Brasd'Or	加拿大	—	I 形吊杆

振动和驰振,没有意识到细长 H 形吊杆也存在扭转颤振的可能性。并且垂直安装的吊杆与水平放置的桥梁主梁存在极大不同。对于吊杆来说,在 0° (风垂直桥轴线,即横桥向) $\sim 360^\circ$ 之间变化的风向角恰好相当于吊杆的风攻角,相比之下,桥梁主梁风攻角一般不超过 $\pm 10^\circ$ 。因此,对于双轴对称的吊杆,其风振问题应在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的大范围来考察研究。对于箱形吊杆,由于其扭转刚度相对于 H 形吊杆有大幅提高,可能存在高风速下弯曲涡激共振问题。

本文以某拱桥 H 形吊杆为原型,针对吊杆截面宽高比 $B/H=2.4$,分别就 4 种不同的腹板开孔率,通过风洞试验研究了 H 形吊杆的气动特性;然后以另一拱桥箱形吊杆为原型,对箱形吊杆的主要风致振动形式进行了风洞试验研究。研究发现,H 形吊杆大攻角下可发生扭转颤振失稳,且腹板开孔大小可明显影响颤振失稳的攻角区间;箱形吊杆在小攻角下的弯曲涡激共振特性极为显著,涡振最大振幅可达吊杆截面特征长度的 $1/5 \sim 1/4$ 。

2 试验模型及参数

2.1 H 形吊杆模型

节段模型采用有机塑料制作,与原型缩尺比为 $1:4$ 。模型长 1.4m ,宽为 0.3m ,宽高比为 2.4 ,模型腹板开有两个长圆孔,模拟了实桥吊杆两个孔洞,长 5.6m 的区段。风洞试验中进行了 4 种腹板开孔率 (0% 、 14% 、 27% 、 38%) 的模型试验,开孔率定义为腹板孔洞面积与腹板总面积之比。模型两端均设置有端板,吊杆模型尺寸如图 1 所示。腹板全封闭为 0% 开孔率模型,腹板开孔模型中,开孔数量均为 2 个,且均为长圆孔,仅尺寸不一致。

考虑到 H 形吊杆节段模型中仅模拟了实际吊杆两个孔洞,这与实际吊杆沿高度方向均匀分布有 14 个孔洞存在一定差距,风洞试验中又以该拱桥的 1 号吊杆为原型制作了气弹试验模型。吊杆气弹模型采用 $1:16$ 的缩尺率由镀锌铁皮焊接制作,开孔率为 27% 。风洞试验中采用特制夹具将吊杆气弹模型的翼缘板固定于风

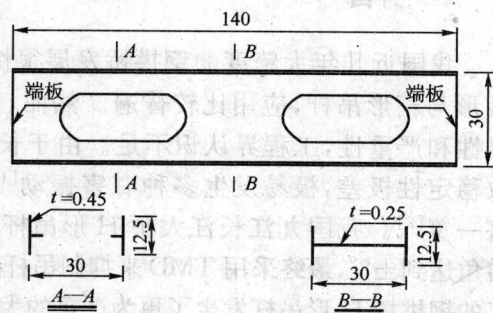


图 1 H 形吊杆节段模型(尺寸单位:cm)

洞顶部与底部,保证了与实桥吊杆约束条件的一致。试验中在气弹模型 1/2 跨及 1/4 跨处分别布置了 3 个加速度传感器,测量其振动信号。图 2 为试验中的吊杆气弹模型。

2.2 箱形吊杆模型

为了保证模型刚度,箱形吊杆节段模型采用 8mm 厚的有机玻璃制作,与原型缩尺比为 1 : 5。模型长 1.4m,宽 20.7cm,高 16.7cm。模型两端分别设置了直径为 40cm 的圆形端板,图 3 为试验中的节段模型。

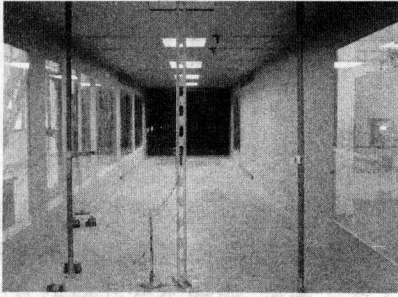


图 2 试验中的 H 形吊杆气弹模型

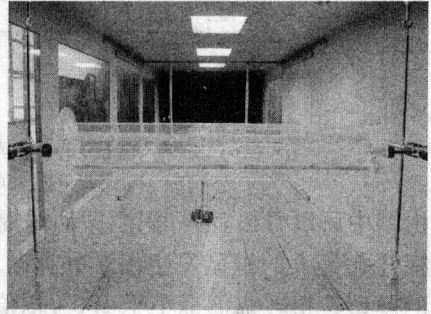


图 3 箱形吊杆节段模型

2.3 试验装置及风攻角定义

吊杆模型试验在湖南大学风工程试验研究中心 HD-2 风洞高速试验段进行。试验仅在均匀流场中进行,紊流度小于 5%。吊杆节段模型固定在两自由度弹簧支架系统上,通过 8 个力传感器获得振动信号。试验模型参数采用有限元软件 ANSYS10.0 建模分析,对于四种不同腹板开孔率的 H 形吊杆模型,有限元模型均采用一致的约束条件及张力大小,保证各 H 形吊杆模型试验结果的可比性;对于箱形吊杆,采用壳单元进行有限元建模,分析其动力特性及质量特性。表 2 中列出试验各吊杆原型的频率特性。

吊杆基本参数

表 2

模 型	腹板开孔率	缩 尺 比	吊杆原型频率(Hz)			
			弱轴弯	强轴弯	扭转	
H 形 吊 杆	节段 1	0%	1 : 4	1.901	6.057	2.175
	节段 2	14%	1 : 4	1.952	6.112	2.173
	节段 3	27%	1 : 4	2.001	5.936	2.251
	节段 4	38%	1 : 4	2.042	5.469	2.409
	气弹	27%	1 : 16	2.001	5.936	2.251
	箱形吊杆		1 : 5	4.549	5.333	37.972

由于 H 形与箱形吊杆均为竖向安装的双轴对称截面,试验中以 5°步长研究了 0~90°风攻角下吊杆模型的气动变化,试验风攻角定义如图 4 所示,来流风为横桥向,定义为 0°风攻角。

3 H 形吊杆风振特性

3.1 节段模型涡激共振

图 5 为试验中不同开孔率模型在 0°~90°风偏角区间的涡激共振情况,图中仅绘出了发生

涡激共振后的试验数据。图中空心标志(例如□)代表扭转涡激振动,实心标志(例如■)代表弯曲涡激共振。图中横坐标为换算后的实桥风速,对于扭转涡激共振,图中纵坐标为角位移 α ,而竖弯涡振纵坐标为无量纲位移 D/B , D 为振动幅值, B 为吊杆模型宽(图4)。

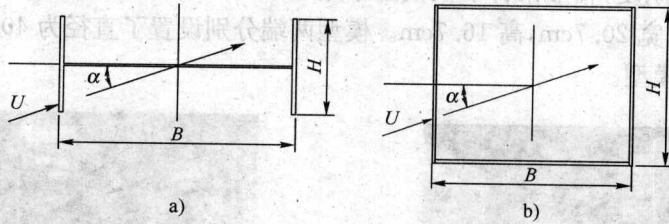


图4 试验风攻角 α 定义示意图
a)H形吊杆($B>H$);b)□形吊杆($B>H$)

由图中可以看出,吊杆涡激振动的幅值受腹板开孔的变化影响明显。腹板不开孔的模型与腹板开孔最大的模型发生涡激共振时,其最大扭转幅值均接近 5° ,而腹板开孔分别14%与27%的模型其扭转幅值都小于 1.5° ,幅值减小了将近 3.5° 。另外,腹板不开孔模型发生涡激共振的起振风速一般较高,仅 0° 风偏角下涡振起振风速在 15m/s 左右,其他两个涡激共振的起振风速均高于 30m/s 。而腹板开孔后的三个模型,其涡激振动起振风速整体降低,基本在 $5\sim 10\text{m/s}$ 的常见风速下既出现了涡激振动现象。试验中观测到的H形吊杆涡激振动主要以扭转为主,仅在个别模型试验中观测到了竖弯涡激振动,且竖弯涡激振动的锁定区间要小于扭转涡激振动时的锁定区间。这可能与试验中的模型竖弯阻尼比较大有一定关系(弯曲阻尼比为扭转阻尼比的 $2\sim 3$ 倍)。

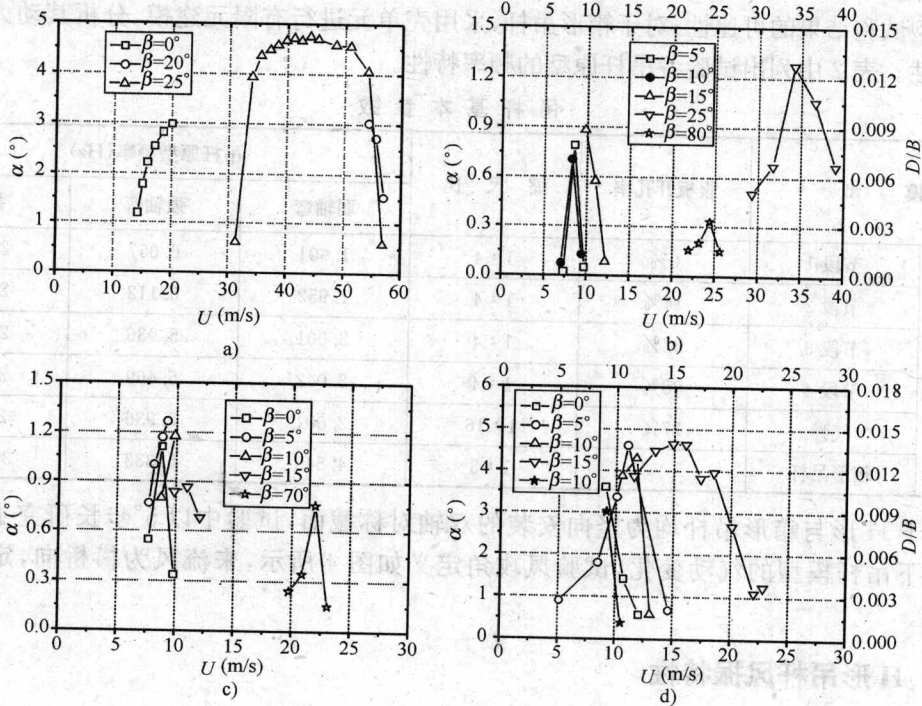


图5 不同开孔率下涡激振动响应
a)腹板不开孔;b)腹板开孔率14%;c)腹板开孔率27%;d)腹板开孔率38%

结构在风的作用下,截面背后会产生周期性的旋涡脱落,当这一旋涡脱落频率与结构固有频率一致时,就会发生涡激共振现象,涡激共振起振风速与 Strouhal 数的关系如下式:

$$U_{\text{vortex}} = \frac{fD}{St} \quad (1)$$

式中: U_{vortex} ——涡激共振起振风速;

f ——吊杆弯曲振动基频;

D ——截面投影到与来流垂直平面上的特征长度,一般取迎风面高度;

St ——Strouhal 数,对于固定的截面形式,Strouhal 数为一定值。

对于以上 4 种不同腹板开孔率的 H 形吊杆,通过式(1)可计算对应的 Strouhal 数。表 3 中为吊杆在最低涡振起振风速下对应的 Strouhal 数。具有类似断面形式的 H 形吊杆,可认为其 Strouhal 数相差不大,进而可通过式(1)推算吊杆的涡振起振风速。

不同腹板开孔率下 H 形吊杆 Strouhal 数

表 3

吊杆截面尺寸(m)		开孔率 (%)	涡振最低起振风速 对应风攻角(°)	Strouhal 数
宽 B	高 H			
1.2	0.5	0	0	0.076
		14	10	0.139
		27	0	0.146
		38	5	0.203

3.2 节段模型弯曲驰振

4 种不同腹板开孔率吊杆模型试验中,仅腹板全封闭与开孔最大的两种吊杆观测到了横风向驰振现象。表 4 中为吊杆发生驰振的工况及其临界风速。由表中可见,腹板不开孔时驰振稳定性极差;虽然开孔最大吊杆也发生了驰振,但其起振风速很高,可满足抗风安全性要求。由以上可以看出,适当的腹板开孔可有效改善 H 形吊杆驰振特性,但开孔过大会导致其驰振稳定性降低。驰振临界风速可通过下式估算:

$$U_{\text{cg}} = -\frac{4m\omega\zeta}{\rho H} \cdot \frac{1}{C'_L + C_H} \quad (2)$$

式中: ω ——结构一阶弯曲圆频率;

ζ ——阻尼比;

H ——断面迎风宽度;

$C'_L + C_H$ ——驰振力系数。

对于腹板不开孔的 H 形吊杆,其 0° 攻角下驰振力系数:

$$C'_L + C_H = -\frac{4m\omega\zeta}{\rho H} \cdot \frac{1}{U_{\text{cg}}} = -\frac{4 \times 235.55 \times 2 \times 3.14 \times 1.901 \times 0.0039}{1.225 \times 0.5} \cdot \frac{1}{26.2} = 2.73 \quad (3)$$

对于宽高比为 2.4 的腹板不开孔 H 形吊杆,其驰振力系数为 2.73,可通过式(2)计算驰振临界风速。

驰振临界风速

表 4

模型腹板开孔率	0%		38%		
	0	5	80	85	90
风攻角(°)					
实桥起振风速(m/s)	26.2	34.7	137.9	122.4	92.2

3.3 节段模型扭转颤振

试验发现,随腹板开孔率的变化,H形吊杆还出现了无明显发散点的扭转颤振形态,其扭转振幅随风速增加而增大,风速恒定后,又保持等幅扭转振动。由于没有明显的发散点,本文中以扭转振幅达到 5° 时对应风速为颤振临界风速。表5中为各吊杆发生颤振时风攻角分布及扭转角为 5° 的颤振判据下各模型对应的最低颤振临界风速。由表中可以看出,各开孔模型在 20° 偏角下对应的颤振临界风速最低。综上可见,宽高比 $B/H=2.4$ 的腹板开孔吊杆在 20° 偏角附近存在一易发生颤振区间,且基本以 20° 偏角为最不利状态。

颤振临界风速

表5

模型腹板开孔率 (%)	发生颤振风攻角 ($^\circ$)	最低颤振临界风速	
		对应风攻角 ($^\circ$)	对应起振风速 (m/s)
0	10,30,35	30	36.9
14	20	20	24.3
27	15,20,25	20	26.9
38	0,15,20,25	20	23.1

为了进一步揭示以上模型特定风攻角出现的大幅扭转振动的振动机理,试验在均匀流下采用约束竖向自由度,激励扭转的自由振动时域分析方法,得到了开孔率为14%与27%模型的颤振导数 A_2^* 随无量纲风速 U/fB 的变化曲线(图6)。由图6可以看出,两种开孔率模型的 A_2^* 曲线大于某一无量纲风速后变为正值。腹板开孔的H形吊杆模型 A_2^* 曲线这一特征与一般钝体桥梁断面发生颤振时的状态一致,由此可以断定,以上风攻角下出现的大幅扭转振动状态为颤振。

由于扭转颤振危害性很大,因此应尽量不用H形吊杆,或仅用在那些颤振起振风速高于设计风速的短吊杆上。H形吊杆扭转颤振的起振风速可以由颤振导数 A_2^* 为零的点估算。由图6中腹板开孔率为27%在 20° 攻角下的 A_2^* 曲线可得:若 $A_2^*=0$,则 $U/fB=6.4$,可得到颤振临界风速 $U_{cr}=6.4 \times 2.251 \times 1.2=17.3\text{m/s}$,比试验所得颤振临界风速偏低,也就是说估算结果偏于安全。同理,对于一系列H形吊杆,由颤振检验风速可推得H形吊杆的最低允许固有频率,即:

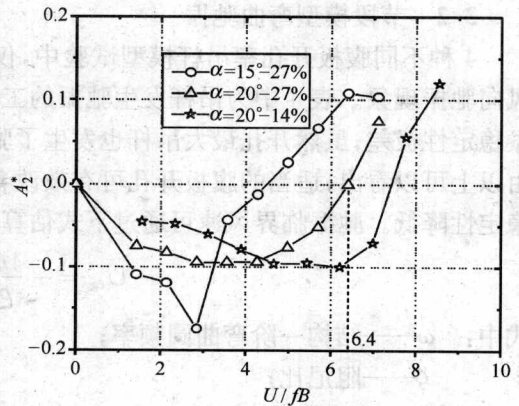


图6 颤振导数 A_2^*

$$f_{cr} = \frac{U_{cr}}{BU|_{A_2^*=0}} \quad (4)$$

若检验风速 $U_{cr}=60\text{m/s}$,则对于腹板开孔为27%的H形吊杆,其临界频率为 $f_{cr}=60/1.2 \times 6.4=7.81\text{Hz}$,即只有频率高于7.81Hz的吊杆才能满足颤振稳定性要求。

3.4 气弹模型试验结果

开孔率为27%的吊杆气弹模型在对风攻角 15° 、 20° 、 25° 下的试验中,得到了与开孔率

27%的节段模型基本一致的结果,图7为气弹模型在这三个风攻角下的跨中扭转位移方差随实桥风速的响应曲线图。在 $\alpha=15^\circ$ 攻角,实桥风速为25m/s时,首先观测到了小幅扭转涡激振动,随风速增加,涡激振动消失;当实桥风速为29m/s时,吊杆跨中扭转振幅突然增大,出现颤振状态,并保持等幅振动,此时吊杆跨中扭转角均方差已接近 7° ,风速少许增加,振幅急剧增大;同样, $\alpha=20^\circ$ 攻角,实桥风速为22m/s时,首先出现了小幅扭转涡激振动,当风速增大到实桥风速为40m/s时,吊杆也出现了剧烈的等幅扭转振动;在风攻角 25° 时,风速达到60m/s后,虽然扭转振幅没有突然增大,但其跨中扭转角均方差也达到 1° 左右。

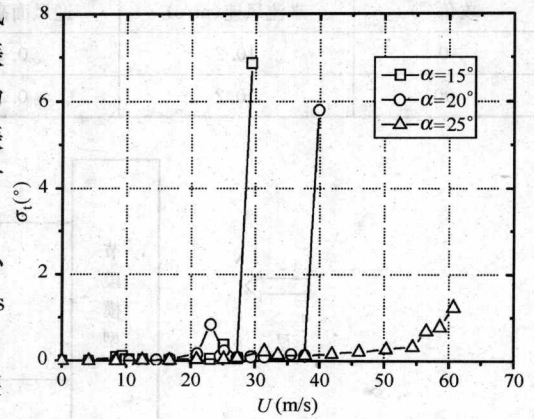


图7 H形吊杆气弹模型跨中扭转位移均方差

4 箱形吊杆风振特性

4.1 节段模型试验结果

箱形吊杆由于弯曲频率及扭转频率比H形吊杆高出很多,在试验中仅观测到了涡激共振现象。图8为箱形吊杆发生涡振的风攻角及振幅与风速的关系。由图8中可见,箱形吊杆在 0° 、 5° 、 10° (弱轴方向,顺桥向振动)、 75° 、 80° 、 85° 、 90° (强轴方向,横桥向振动)攻角下发生了严重的涡激共振现象,最大振幅已达到25cm,远远超过规范的允许值。并且箱形吊杆涡激共振的起振风速仅稍高于40m/s,这一风速在沿海地区及台风区也达不到抗风安全性的要求。

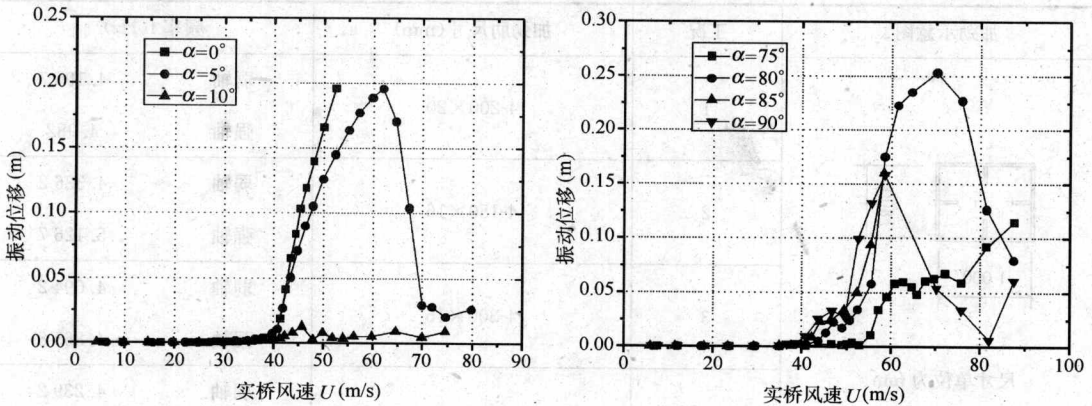


图8 箱形吊杆涡激振动响应

4.2 提高涡振起振风速的措施

4.2.1 箱形吊杆 Strouhal 数测定

试验中采用固定节段模型,在模型尾流区安装两个热线探针测量涡脱频率的方式测定吊杆的 Strouhal 数。探针分别处于模型后端4D与7D处(D为模型迎风面高度),布置方式见图9,试验中风速设定为10.2m/s,箱形吊杆的 Strouhal 数见表6。对于箱形吊杆,其 Strouhal 数在0.1~0.13之间,同样可以通过式(1)计算吊杆的涡振起振风速。

箱形吊杆 Strouhal 数

表 6

攻角(°)	来流风速(m/s)	迎风面高度(m)	涡脱频率(Hz)	Strouhal 数
0	10.2	0.166	12.5427	0.102
90	10.2	0.206	10.1929	0.103

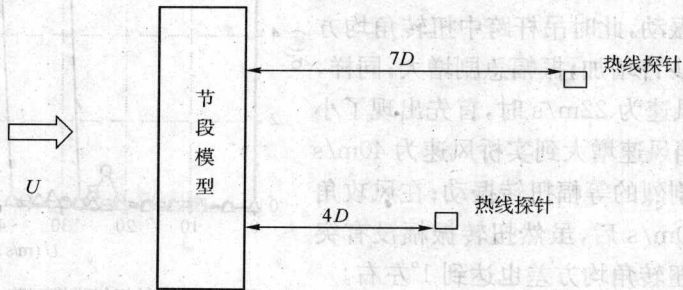


图 9 箱形吊杆旋涡脱落频率测定

由式(1)可见,在外形不变的情况下,只有提高吊杆自振频率方可提高涡激共振的起振风速。对于箱形吊杆来说,若外形不变,提高自振频率的可能方式有两种:设置内部加劲肋或增大吊杆板厚。

4.2.2 箱形吊杆内部设置单枝加劲肋

共采用了四种不同的加劲肋尺寸,分别变化了加劲肋的长度及厚度,具体工况如表 7 所示。有限元分析后发现,在箱形吊杆设置内部加劲肋后,虽然可提高吊杆的刚度,但由于同时增大了吊杆本身的质量,导致吊杆频率没有显著增加,反而有降低的趋势。

吊杆设置加劲方式及加劲肋尺寸

表 7

加劲示意图	工况	加劲肋尺寸(mm)	频率 f(Hz)	
<p>尺寸单位为 mm</p>	1	4-200×20	弱轴	4.1967
			强轴	4.982
	2	4-150×16	弱轴	4.3362
			强轴	5.1267
	3	4-300×16	弱轴	4.0942
			强轴	4.8658
	4	4-300×10	弱轴	4.2392
			强轴	5.0166

4.2.3 增加箱形吊杆板厚

箱形吊杆原板厚为 16mm,采用两种不同的板厚:36mm 与 48mm 分别计算加大板厚后的吊杆动力特性。加大板厚后的有限元分析结果见表 8。由于吊杆内径 1000mm×800mm 在板厚变化时保持不变,所以板厚变化对吊杆外形尺寸存在少许改变,但这种改变对 Strouhal 数的影响不大。由表 8 中可以看出,增加板厚可以稍许提高吊杆的固有频率特性,但提升幅度不大。