

类矩形双肢钝体涡致振动和气动抑振机理

陆方夏, 赵 林, 郭增伟, 葛耀君

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对具有类矩形双肢钝体断面拱肋的大跨度拱桥在风洞试验过程易出现大幅涡激振动问题, 沿拱肋模型表面进行动态风压同步测量及基于 POD 算法的本征气动力荷载分布模式分解, 获得了涡振发生时对于周期性涡激力具有最大贡献的气动力荷载作用位置, 初步揭示出此类断面涡激动发生时的局部气动力荷载作用机制。以上海卢浦大桥和肇庆西江特大桥此类具有双肢钝体断面拱桥为工程实例, 结合涡激气动力沿拱肋周向时空气分布特征, 提出并以二维悬吊节段模型风洞试验验证了拱肋断面多种有针对性的气动控制措施; 结合实际桥梁拱肋的三维空间效应, 利用全桥气弹模型风洞试验再现了涡振发生效果的气动力特征、阻尼比效应、三维尺寸渐变效应和质量分布效应的综合影响, 结果表明: 对于类矩形钝体拱肋断面的上下悬板方案和全盖板方案能大幅度降低涡振振幅并使锁定风速区间向高风速段迁移, 但实际涡振抑制效果仍需结合三维模型气弹试验最终判断。

关键词: 类矩形双肢钝体; 大跨度拱桥; 钢箱拱肋; 涡激振动; 气动抑振措施

中图分类号: U441+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)04-0010-06

0 引言

双肢类矩形断面拱肋受力性能合理、结构稳定可靠、线型优美, 世界上已建成的同类桥梁中跨度排名第二的上海卢浦大桥即采用此类拱肋断面。这种断面通常伴随着一些气动不稳定性, 如在其两侧及尾流中产生周期性交替脱落的旋涡, 引起的桥梁拱肋涡激共振现象。涡激振动是产生结构疲劳的重要因素, 结构周期性的振动亦会引发使用舒适性的负面效果, 因此引起了桥梁工程界的广泛重视^[1-2]。

大跨度拱桥涡振的控制应该考虑结构、稳定性及经济适用性等因素。气动措施以其稳定、简单、廉价等优点成为涡振控制的首选。目前拱桥涡激振动试验研究主要集中于特大跨度拱桥, 采用多种气动抑振措施风洞试验效果比选方案作为手段进行了较系统的研究, 提出了具有实用性的涡振气动控制措施。然而对于特殊钝体断面结构涡振发生和抑制机理等基本问题远未得到深入探讨和回答, 这些都是试图解决的问题。

1 控制方案探讨

针对双肢类矩形断面拱肋形式在较低风速区间产生涡激振动现象, 多次风洞试验尝试表明加顶盖板方案可以有效控制涡振振幅^[3-4]。

根据目前的研究^[56], 近似的认为, 两肢拱肋附近共有 3 个大涡, 如图 1(a)。当 1 漩涡向下运动时, 2 漩涡受到 1 漩涡的挤压也向下运动, 当挤压到一定程度时, 被拱肋下部流体带动, 向下游运动, 经过下游拱肋的下表面, 然后脱离拱肋, 在尾流区域发展壮大, 然后消散。

目前针对钢箱拱的试验较少, 2002 年进行的卢浦大桥全桥气弹试验表明^[3], 在拱肋顶部增加全盖板可以减小涡振振幅、提高锁定风速的效果。如图 1(b)所示, 当增加全盖板后, 可以阻断两拱肋中间区域与上部的连通, 可以认为此时两拱肋之间只有一个 1 漩涡。1 漩涡仍然受到上游来流影响, 周期性的脱离,

收稿日期: 2010-09-15

作者简介: 陆方夏 男 1984 年出生 硕士研究生

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (90715039; 50978203); 科技部国家重点实验室基础研究项目 (SLDRCE08-C-02)

但是同风速下脱落的频率会减低, 达到提高涡振锁定风速、减小振幅, 抑制涡振发生的效果。此研究方案带有较多猜想成分, 并没有结合力的作用机制分析并抑制涡振发生。

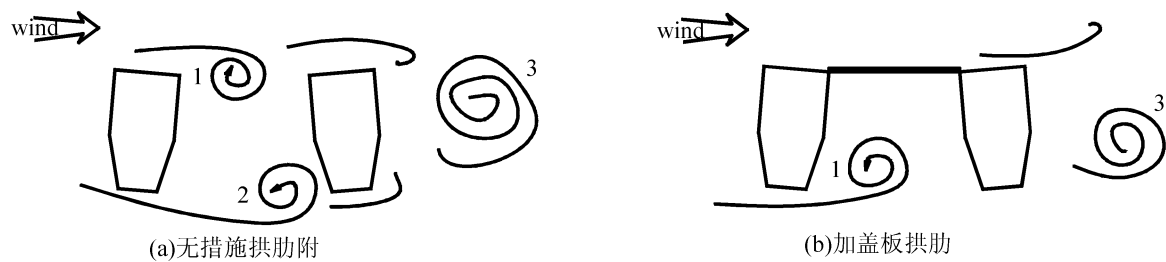


图 1 拱肋附近区域流场示意图

杨立坤对引起涡振的敏感区域做了较深入的研究。通过涡振时 POD 分解, 文献 [5] 指出下游拱肋断面上下表面的压力波动在总升力波动中占了绝大多数 (如图 2 所示), 超过 70%, 这部分是引起拱肋结构涡振的主要部分。因此本文考虑改变拱肋断面上下表面的流动特性, 如增加悬板, 使上下表面形成空气高速流动通道, 产生射流作用, 可以有效控制涡振 (如图 3)。

结合以上两方面考虑, 进行了包括全盖板、上下悬板等 20 多种涡振控制气动措施的比选。

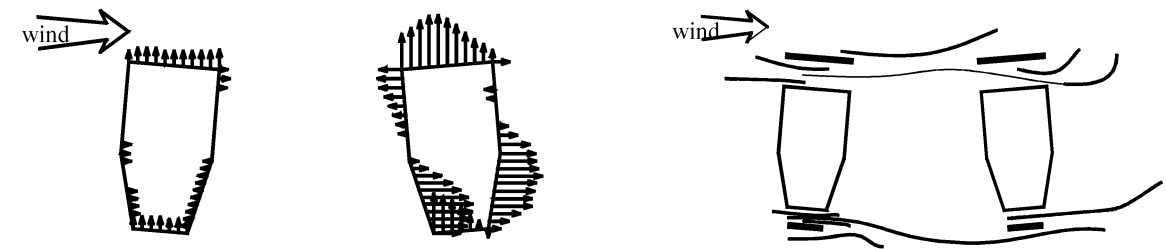


图 2 涡振时 POD 分解第三阶模态示意图

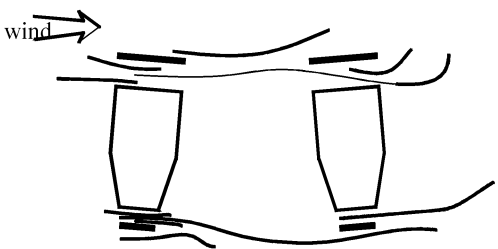


图 3 加悬板拱肋周围流场示意图

2 试验条件与模型准备

2.1 试验条件

拱肋节段模型试验和全桥气弹模型试验分别在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 T J-1、T J-3 大气边界层风洞中进行。位移测量系统: 压电式加速度传感器: No 3331, No 3339 和 No 3372。光学位移计: M E W - M atsuch ita M L S-LM 1Q。Y E 5866 电荷放大器: 六通道测振放大器。H P 35670A 信号分析仪: 四通道动态信号分析仪。计算机采样系统: 模拟式信号采样板, 微机以及相应软件。

风速测量系统: 试验流场的参考风速是用皮托管和微压计来测量和监控的。大气边界层模拟风场的调试和测定是用丹麦 DANTEC 公司的 Stream line 热线 热膜风速仪、A / D 板、PC 机和专用软件组成的系统来测量。热膜探头事先已在空风洞中仔细标定。该系统用来测量风洞流场的平均风速、风速剖面、湍流度以及脉动风功率谱等数据。

2.2 拱肋节段模型

结合肇庆西江特大桥风洞测振 1: 50 节段模型, 根据测振节段模型设计相似性要求, 可以确定测振节段模型各物理量的缩尺比, 由此可以进一步确定出实桥结构主要参数与节段模型主要参数之间的一一对应关系。试验工况包括拱肋断面增加各种气动措施在不同风攻角下的涡振风速和涡振响应。所有试验工况都在均匀流场中进行。

2.3 全桥气弹模型

肇庆西江特大桥气弹模型采用 1: 70 几何缩尺比, 为使风速在发生涡振的区间稳定, 需要较高风速比, 所以需要采用大刚度芯梁设计。试验风速比为 1: 8 235。模型如图 4 所示^[7]。

3 风洞试验验证

3.1 二维节段模型

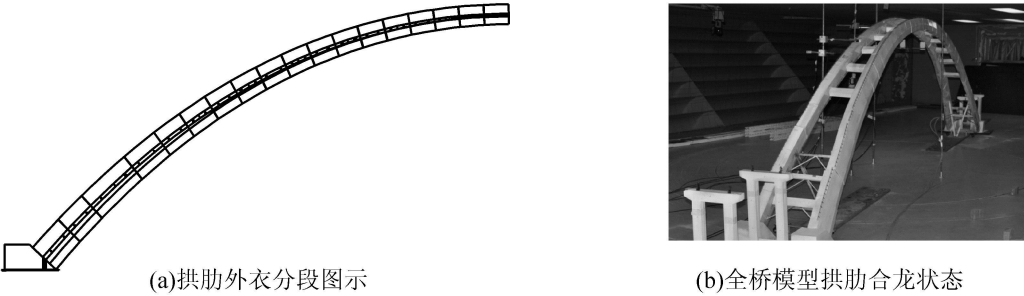


图 4 全桥气弹模型

在节段模型测振试验过程中,根据前文的分析,进行了一系列方案比选工作。主要分为两类,第一:拱肋中部开槽加盖板;第二:改变拱肋断面上下表面流动特性。证实开槽全盖板和一定悬高的拱肋上下悬板是有效的控制方案。

3 1 1 气动措施比选

在不加任何气动措施的情况下,主拱存在低风速段(8~17 m/s)和高风速段(28~36 m/s)两个明显涡振锁定区间,其中低风速区间涡振最大幅值 25.6 cm,高风速区间涡振最大幅值 54.9 cm,均超出最大许用振幅值;而采用某些气动措施后,可以有效地将涡振振幅控制在许用范围内。具体气动措施方案及控制效果如图 5 所示。

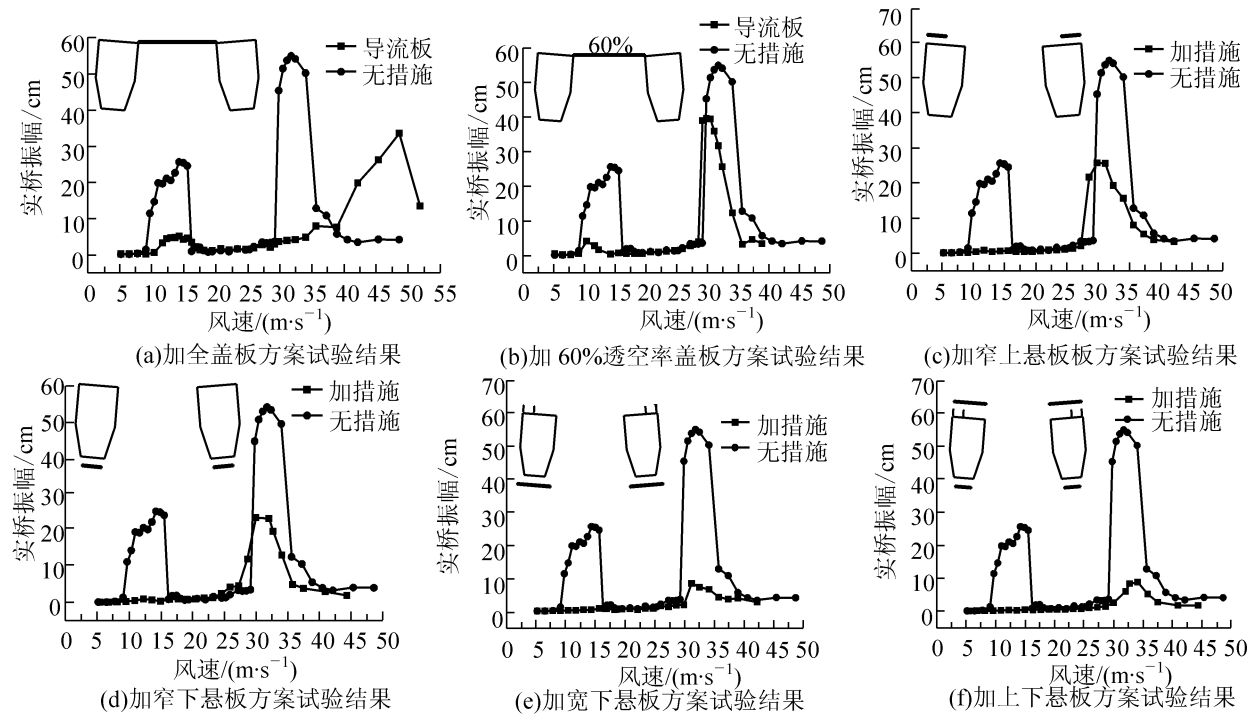


图 5 涡振气动抑制措施比选结果

3 1 2 推荐气动措施

根据阶段测振试验结果,上下悬板方案在控制效果、复杂程度和美观几个方面都有比较好的适用性。全盖板方案同意有较好的控制效果,但影响视觉通透性,不够美观。该方案可以采用帆布材料,用作临时控制措施,简单易行且有很好的控制效果。节段试验表面,通过隔断 1 漩涡和 2 漩涡的连通、或改变拱肋上下表面的流动特性可以达到抑制涡振的目的。因为,在不考虑三维效应影响的前提下,两种方案均有较好的效果。但实际结构的拱肋间距是空间变化的,三维效应不可忽视。因为需要考虑三维空间效应,进行全桥气弹模型试验对方案进行进一步的验证。

3 2 三维效应影响

根据节段模型试验得到的结果, 在肇庆西江特大桥全桥气弹模型上进行涡振气动控制措施试验, 以考虑三维效应对涡振振幅以及控制措施效果的影响。重点考虑节段模型试验得到最有效的加全盖板、加上下悬板两种措施。

3 2 1 正常质量不同阻尼比下涡振响应

肇庆西江特大桥全桥气弹模型拱肋出现涡振现象, 完成 3 1‰低阻尼比和 5 5‰正常阻尼比涡振对比试验。3 1‰低阻尼比条件, 存在低风速段和高风速段两个明显涡振锁定区间; 5 5‰正常阻尼比条件, 仅存在低风速段明显涡振锁定区间, 且振幅低于最大许用振幅值 (10 cm)。节段模型风洞试验推荐的最优气动控制措施可以有效地抑制全桥成桥状态高、低风速段涡振振幅。表 1 为全桥成桥状态肇庆西江特大桥特征位置风致位移结果, 图 6 为不同风速作用下特征位置风致位移极值结果。

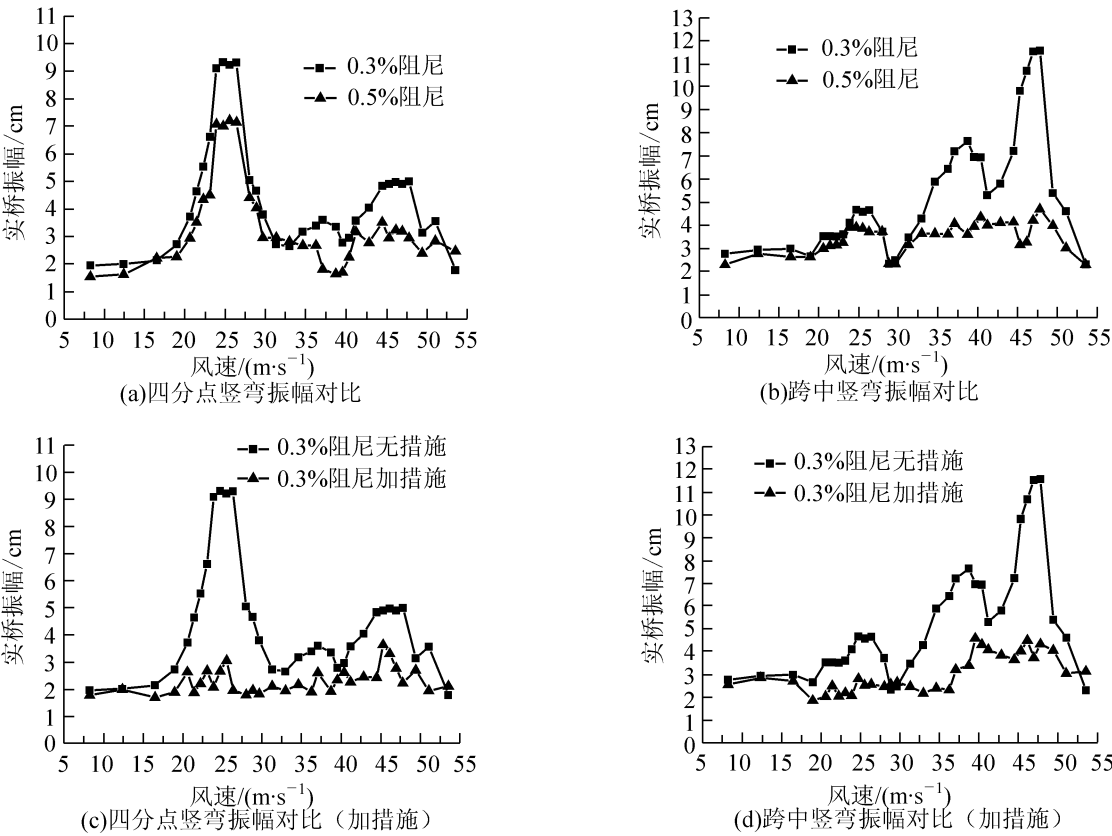


图 6 成桥 0°攻角涡振抑制措施试验结果

表 1 成桥状态 0°攻角竖向位移极值

工况	测量位置	阻尼比 /‰	极值 /cm
成桥低阻尼比	主拱跨中竖向	3 1	11. 58
成桥低阻尼比	主拱四分点竖向	3 3	9. 30
成桥正常阻尼比	主梁跨中竖向	5 5	4. 70
成桥正常阻尼比	主梁四分点竖向	5 5	7. 21
成桥低阻尼比加措施	主拱跨中竖向	3 1	4. 59
成桥低阻尼比加措施	主拱四分点竖向	3 3	3. 63

3 2 2 小质量低阻尼比状态涡振响应

主拱合龙状态与成桥状态相比, 在 0°、±3°攻角下均出现明显涡振现象。这与结构质量较轻、阻尼比较低、质量分布等因素有直接关系。节段模型试验推荐的气动措施在一定程度上起到了控制涡振振幅的作用。

拱肋合龙施工状态存在低风速段和高风速段两个明显涡振锁定区间, 其中低风速涡振最大幅值 70. 6

cm, 高风速段涡振最大幅值 37.5 cm。试验结果如图 7 所示。拱肋合龙施工状态并加装上下悬板, 可以有效地抑制除 + 3°来流攻角条件外的涡振振幅, 证明了抑振方案的有效性。+ 3°攻角下, 气动措施无效果与拱肋三维尺寸渐变效应有关。可根据拱肋空间尺度变化, 采用悬挑更高的悬板, 此方案有待进一步研究。

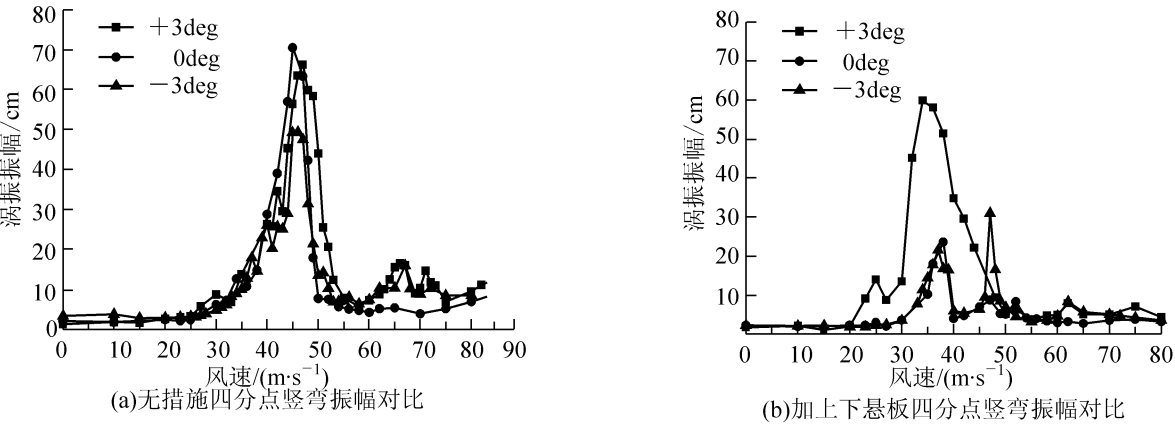


图 7 拱肋合龙状态涡振抑制措施试验结果

4 结语

针对双肢类矩形钝体断面的涡振问题, 通过节段测振以及全桥气弹模型试验进行的气动措施比选, 得到如下几点结论:

- (1) 双肢类矩形断面有比较明显的涡振现象, 在实际应用中应予以足够重视。通过采取气动抑振措施, 可以有效控制涡振振幅, 抑制涡振发生。
- (2) 节段测振模型显示, 全盖板和上下悬板方案是抑制双肢类矩形断面发生涡振最有效的方法。对于拱桥拱肋, 此方案在设计风速以下将涡振完全控制在规范许用范围内。其中上下悬板方案更为美观实用。
- (3) 全桥气弹模型由于双肢间距宽度的变化等三维效应, 所得试验风速区间、最大振幅与二维的节段模型略有出入。同样验证了本文提出的全盖板、上下悬板气动抑制措施的有效性。
- (4) 节段测振试验和全桥气弹模型试验都是验证涡振抑制措施有效的方式。但二者侧重点不同, 节段模型更适合进行气动措施比选; 全桥模型对三维体系的气动稳定性有较好评估。涡振抑制效果仍需结合三维模型气弹试验最终判断。

参 考 文 献

[1] 葛耀君, 赵林, 陆方夏, 等. 肇庆西江特大桥抗风性能风洞试验研究报告 [R]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室技术报告, 2010

[2] 项海帆, 林志兴, 鲍卫刚, 等. 公路桥梁抗风设计指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996

[3] 葛耀君, 项海帆, 凌明. 卢浦大桥风荷载及抗风稳定性研究 [J]. 上海建设科技, 2004(1): 39-41.

[4] 葛耀君, 项海帆. 大跨度桥梁风致振动控制研究 [C] // 2004 全国结构风工程实验技术研讨会论文集. 长沙: [出版者不详], 2004 6-13.

[5] 杨立坤. POD 与 RVM 相结合对桥梁涡振颤振的探讨 [D]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2009

[6] Griffin O M, Ramberg S E. The Vortex street wakes of vibration cylinders [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1974, 66: 553-576

[7] 陈晓冬, 赵林, 葛耀君. 广州新光大桥良态及台风气候抖振试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(4): 74-79

(下转第 94 页)

的相关标准,因此,盾尾密封油脂性能评定标准、油脂材料技术标准以及材料的检验和使用标准等相关文件的制定,将势在必行。

参 考 文 献

[1]朱祖熹. 盾构法隧道的盾尾防水密封与盾尾密封油脂[J]. 中国建筑防水, 2009(7): 2-6
[2]钱建华, 张宏伟. 盾构掘进机钢丝刷型盾尾的密封油脂: 中国, 200510023635. 4[P]. 2005-08-17.
[3]刘延鹏. 一种盾构掘进机的盾尾密封油脂: 中国, 200610126873. 2[P]. 2006-09-08
[4]白传航. 盾尾密封脂的泵送性和抗水密封性[J]. 合成润滑材料, 2007, 34(2): 23-24
[5]全国轻质与装饰装修建筑材料标准委员会. 建筑材料标准汇编(密封材料)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2005

Discussions on Property Evaluation of Shield Tail Grease

Yan Zhenlin, Guo Jingbo

(School of Mechanical Engineering of Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract Based on the current situation, i.e. increasing popularity of shield tunnel and the increasing need for shield tail grease, the article analyses the theory of sealing with shield tail grease, making a summary of the classification and properties of shield tail grease used in tunnel construction, focusing on discussion of the properties trial of water proofing, volatility and transportation of the shield tail grease, which may provide a reference for standardization of the performance evaluation of shield tail grease

Key words shield, shield tail grease, shield tail sealing, property

(上接第 14 页)

Vortex Shedding-induced Vibration and its Mitigation of Two-rib Bluff Body with Rectangular Shape

Lu Fangxia, Zhao Lin, Guo Zengwei, Ge Yaojun

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In wind tunnel test, arch ribs with two-rib rectangular shape of long-span arch bridges are prone to large vortex-induced vibration (VIV). Based on analyzing the distribution of the arch rib surface aerodynamic pressure, the relationship between the pressures distribution and the periodic vortex-induced force is gained by POD method and the mechanism of the local vortex excited aerodynamic loading is initially revealed. Taking Lupu arch bridge and Zhaoqing Xijiang grand arch bridge as technical examples, with the help of aerodynamic characteristics of pressures distribution around rib surface, especially the dominant vortex excited areas determined by surface pressure measurement tests about two-dimensional sectional model, this paper proposed control measures for the rib section significantly reducing amplitude of vortex-induced vibration, and mitigation effects were successfully re-illustrated. Finally, the vortex related aerodynamic vibration characteristics, damping effect, the three-dimensional gradient effect and the effect of the combined effects of mass distribution were further investigated utilizing full aeroelastic bridge model. Some conclusions are reached that the solution of suspension plate just at the place of upper and lower arch rib or fully covering plate can both sharply reduce amplitude of vortex-induced vibration and increase onset wind speed of lock-in region. VIV suppression effects should be re-examined combined with three-dimensional full aero-elastic model.

Key words two-rib rectangular shape bluff body; long span arch bridge; steel box arch rib; vortex-excite resonance; vibration control