

文章编号:1671-6833(2011)04-0008-05

青岛海湾大桥大沽河航道桥静风稳定性分析

李利军¹,胡兆同¹,曲立清²

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;2. 青岛国信投资股份有限公司,山东 青岛 266000)

摘 要:大沽河航道桥(独塔自锚式钢箱梁悬索桥)是青岛海湾大桥的主通航孔桥,为确保大桥在施工阶段全桥合拢状态和建成运营后的抗风稳定性、安全性和适用性,对其主梁进行了静风稳定性分析.对主梁节段模型进行静力三分力风洞试验,采用 ANSYS 软件求解其动力特性,最后求解主梁静风扭转发散临界风速和横向屈曲临界风速,计算结果均远大于相应的检验风速,因而大沽河航道桥主梁的空气静力稳定性能够得到足够的保证.

关键词:悬索桥;钢箱梁;动力特性;三分力系数;空气静力稳定性

中图分类号:U448.25 **文献标志码:**A

0 引言

青岛海湾大桥是青岛市道路交通网络布局中胶州湾东西岸跨海通道的重要组成部分,主线全长约 26.747 km,包括 3 个主通航孔桥:沧口航道桥、红岛航道桥和大沽河航道桥.大沽河航道桥为独塔自锚式悬索桥,桥梁多孔跨径总长为 610 m,采用四跨连续半漂浮体系(80+190+260+80 m),主梁采用总宽度为 45 m 的中央开槽式双闭口钢箱梁,箱梁节段标准长度为 12 m,主跨和边跨钢箱梁高 3.6 m,80 m 引跨钢箱梁高 3.2 m,主缆在梁上锚固区域钢箱梁采用整体式箱梁,在中间位置梁高加高到 8.0 m,同时两侧钢箱梁完成从 3.2 m 到 3.6 m 梁高的过渡.两个封闭钢箱梁之间用横向连接箱连接,横向连接箱顺桥向间距为 12 m,宽度为 3 m.全桥两根主缆,主跨矢跨比 1:15.5,边跨矢跨比 1:21.6,主缆在塔顶横桥向间距 1.5 m,主缆后锚面中心间距在主跨侧为 7.8 m,边跨侧为 6.5 m,近似于单索面结构.索塔为钢筋混凝土独柱塔,截面采用哑铃形,塔柱总高 152.896 m.图 1 为该桥的总体布置图.

由于一般大跨径悬索桥的动力失稳(主要是颤振)临界风速都低于静力失稳临界风速,大跨径悬索桥的空气静力失稳问题一直未引起各国桥梁界的足够重视.与动力失稳相比,静力失稳发生

前没有任何先兆,突发性强,因而破坏性更大^[1].有关研究表明,悬索桥存在空气静力失稳的可能性,1976 年日本东京大学 Hirai 教授就在悬索桥的全桥模型风洞试验中观察到了静力扭转发散的现象,同济大学风洞实验室在对汕头海湾二桥的风洞试验中,也发现了这一现象^[2-5],这一试验的新发现表明,大跨径缆索承重桥领域内存在空气静力失稳先于动力失稳发生的可能性,它无疑给未来超大跨缆索承重桥结构体系的空气静力稳定性发出了警戒信号^[6].静风荷载引起结构的失稳状态多为横向侧倾失稳或扭转发散失稳^[7].因此,笔者对大沽河航道桥进行了静风稳定分析,以确保大桥在运营后的抗风稳定性、安全性和适用性.

1 设计基本风速与设计基准风速

青岛地区具有显著的海洋性气候特点.桥址处易发生强台风从青岛附近登陆形成灾害性天气.冬半年常出现寒潮大风过程,平均每年约 5 次,最少为 2 次,最多为 13 次,多出现在 11、12 月间,出现偏北向 6~7 级大风,有时出现 8~10 级大风,持续时间一般 2~3 d,最长可达 8 d.按现有设计规范,大沽河航道桥工程区域 10 m 高度处百年一遇的 10 min 平均年最大风速已达到我国东部沿海地区的较大值 $U_{10}=39.6 \text{ m/s}$ ^[8].桥面离水

收稿日期:2010-01-08;修订日期:2011-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808018).

作者简介:李利军(1974-),男,山东聊城人,长安大学博士研究生,研究方向为桥梁结构分析理论及抗震制振.

面高度按设计最低水位计算为 60.2 m,则成桥状态桥面高度设计基准风速为 $U_d = 49.1 \text{ m/s}$,施工阶段桥面高度设计基准风速为 $U_d^s = 43.2 \text{ m/s}$. 根据规范^[9],成桥状态空气静力失稳的检验风速取设计基准风速的 2 倍,即 $[U_{\text{ber}}] = 98.2 \text{ m/s}$ 和 $[U_{\text{ber}}^s] = 86.4 \text{ m/s}$.

2 静力三分力试验

大跨度悬索桥的主要构件为主梁、主塔、主缆及吊杆. 在计算主塔、主缆及吊杆的静风荷载时,通常只计及其中的阻力作用. 而在计算主梁上的空气静力时,必须考虑静风荷载在其 3 个方向产生的分力即阻力、升力和升力矩. 随着风速的增

加,主梁发生扭转,从而改变静力三分力系数,最终会导致作用其上的空气静力三分力发生变化. 因而应将主梁上的静风荷载描述为结构变形的函数,将作用在主梁单位长度上的静风荷载按风轴坐标系分解成 3 个分力. 静力三分力系数的数学表达式如下:

$$\text{阻力系数 } C_D(\alpha) = F_D / \frac{1}{2} \rho V^2 H \tag{1}$$

$$\text{升力系数 } C_L(\alpha) = F_L / \frac{1}{2} \rho V^2 B \tag{2}$$

$$\text{力矩系数 } C_M(\alpha) = M_L / \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 \tag{3}$$

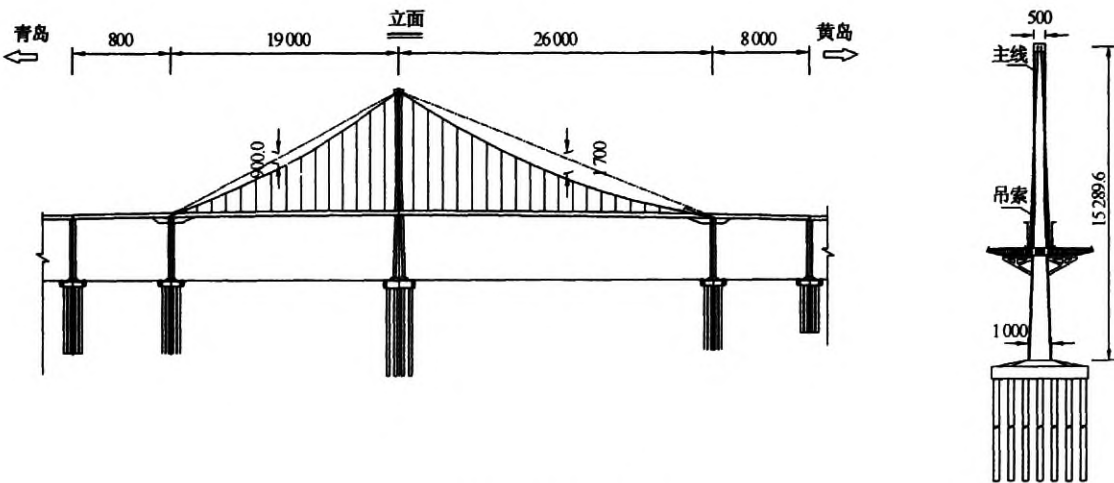


图 1 总体布置 (cm)
Fig. 1 General layout (cm)

式中: $C_D(\alpha)$ 、 $C_L(\alpha)$ 、 $C_M(\alpha)$ 为有效攻角下主梁沿风轴坐标下各方向的阻力、升力、升力矩系数; 风载的有效攻角 $\alpha = \theta_0 + \theta$, 其中 θ_0 为静风初始攻角, θ 为静风作用引起的主梁扭转角; F_D 、 F_L 、 M_L 分别表示单位长度桥面的力、升力和升力矩; H 为梁高; B 为梁宽; ρ 为空气密度; V 为来流风速.

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-1 边界层风洞中进行. 大沽河航道桥主梁节段模型采用 1:80 的几何缩尺比分别模拟了成桥状态和施工阶段两种断面形式, 模型长 1.7 m, 宽 0.562 5 m, 高 0.045 m, 长宽比 $3.02 > 2.5$, 符合文献^[9]的规定. 测力风洞试验共完成了 2 个加劲梁模型的 50 个试验工况, 其中包括每个模型由 -12° 至 $+12^\circ$ 共 25 个整数度风攻角等试验工况. 图 2 为主梁静力三分力试验的模型及装置. 成桥状态和施工阶段节段模型静力三分力系数风洞

试验实测结果如图 3 所示. -3° 、 0° 和 $+3^\circ$ 攻角下的主要静力三分力系数及其导数的风洞试验结果汇总如表 1 所示.

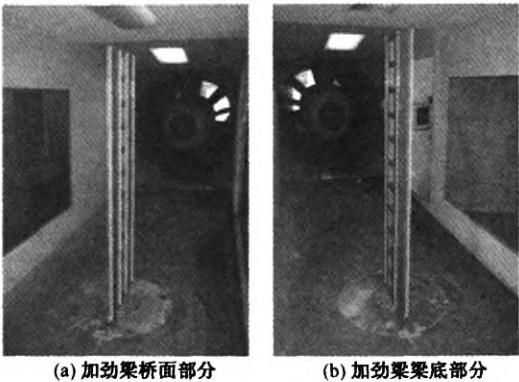


图 2 主梁静力三分力试验的模型及装置
Fig. 2 Model and test equipment of coefficient of the static tri-component force

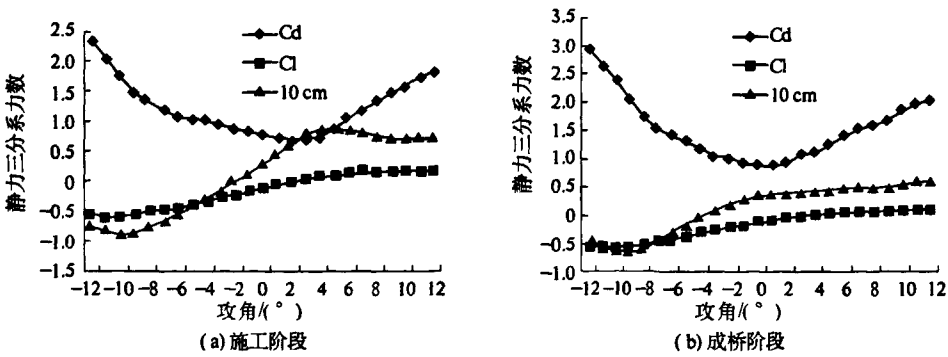


图 3 静力三分力系数变化曲线
Fig.3 Curve of coefficient of the static tri-component force change

表 1 静力三分力系数主要试验结果

Tab.1 The main test consequence of coefficient of the static tri-component force

断面形式	攻角/(°)	阻力系数		升力系数		升力矩系数	
		C_D	$dC_D/d\alpha$	C_L	$dC_L/d\alpha$	C_M	$dC_M/d\alpha$
成桥状态	-3	1.042	-4.498	-0.257	2.675	0.010	0.652
	0	0.903	-1.492	-0.119	2.467	0.035	0.252
	+3	1.077	5.371	-0.006	1.657	0.043	0.087
施工阶段	-3	0.947	-3.495	-0.214	2.779	-0.014	0.796
	0	0.775	-2.464	-0.125	2.911	0.029	0.865
	+3	0.708	1.375	0.034	2.893	0.078	0.753

3 动力特性计算

采用 ANSYS 有限元分析软件对全桥成桥状态和施工阶段全桥合拢状态进行有限元结构动力特性分析计算,根据悬索桥加劲梁的结构特点,选取双主梁形心计算模型以保证计算的合理性和正确性.加劲梁、桥塔和桥墩结构离散为空间梁单元,主缆、吊杆采用空间杆单元模拟,二期恒载采用三维质量单元施加.加劲梁质量特性及截面几何特性分别见表 2、表 3.施工阶段全桥合拢状态和成桥状态计算模型主要自振频率和等效质量如表 4 和表 5 所示,从表中可见主梁的一阶扭转频

率比大于 2,且主梁断面采用中央开槽式双闭口钢箱梁,增加了结构的抗扭刚度,表明该桥具有良好的抗风性能.

表 2 加劲梁质量特性

Tab.2 Stiffening girder quality characteristics

主梁	每米质量/kg	每米质量惯矩/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
	25 040	4 680 000

表 3 加劲梁截面几何特性

Tab.3 Section geometrical feature of stiffening girder

竖向惯矩/ m^4	横向惯矩/ m^4	扭转惯矩/ m^4
2.516	31.430	5.717

表 4 施工阶段全桥合拢状态结构动力特性计算结果

Tab.4 Folded state of the construction phase full-bridge structure dynamic characteristics calculation

振型描述	自振频率/Hz	每米等效质量 或 每米质量惯矩	振型描述	自振频率/Hz	每米等效质量 或 每米质量惯矩
一阶竖弯	0.299	32 047 kg	二阶竖弯	0.527	32 082 kg
一阶侧弯	0.423	48 136 kg	二阶侧弯	0.672	52 040 kg
一阶扭转	0.998	5 640 000 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	二阶扭转	1.010	5 896 100 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

表5 全桥成桥状态结构动力特性计算结果

Tab.5 Full-bridge into a bridge state structure dynamic characteristics calculation

振型描述	自振频率/Hz	每米等效质量 或 每米质量惯矩	振型描述	自振频率/Hz	每米等效质量 或 每米质量惯矩
一阶竖弯	0.273	38 701 kg	二阶竖弯	0.478	38 854 kg
一阶侧弯	0.435	53 591 kg	二阶侧弯	0.659	58 884 kg
一阶扭转	0.915	6 425 200 kg·m ²	二阶扭转	0.963	7 014 200 kg·m ²

4 主梁扭转发散临界风速计算

根据规范^[9],悬索桥主梁扭转发散临界风速可表示为

$$V_{td} = K_{td} \cdot f_t \cdot B \quad (4)$$

$$K_{td} = \sqrt{\frac{\pi^3}{2} \mu \left(\frac{r}{b} \right)^2 \cdot \frac{1}{C'_M}} \quad (5)$$

式中: f_t 为主梁对称扭转基频; B 为主梁全宽; $\mu = \frac{m}{\pi \rho b^2}$; $b = \frac{B}{2}$; ρ 为空气密度; $r = \sqrt{\frac{I_m}{m}}$, I_m 为相应振型等效质量惯矩; C'_M 为0°攻角下力矩系数的斜率.根据上述符号含意,式(5)可简化为如下表达式:

$$K_{td} = \sqrt{\frac{8I_m}{\rho C'_M}} \cdot \frac{\pi}{B^2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)可得到如下表达式:

$$V_{td} = \sqrt{\frac{8I_m}{\rho C'_M}} \cdot \frac{\pi}{B} \cdot f_t \quad (7)$$

根据表4和表5得出的第一扭转频率和扭转等效质量,计算得出的整体抗扭刚度和主梁扭转发散临界风速见表6.

表6 主梁静力扭转发散临界风速

Tab.6 Critical wind velocity of the structure static torsional divergence

位置	f_t / Hz	I_m / (kg·m ² /m)	C'_M
成桥状态	0.915	6 425 200	0.252
施工阶段	0.998	5 640 000	0.865
位置	B /m	临界风速/ (m·s ⁻¹)	检验值/ (m·s ⁻¹)
成桥状态	45	802.8	98.2
施工阶段	45	442.8	86.4

可见施工阶段全桥合拢状态和成桥状态主梁结构静力扭转发散临界风速远远大于其相应的检验风速86.4 m/s和98.2 m/s,因而大沽河航道桥具有很高的静风稳定性安全储备,主梁不会发生扭转发散失稳.

5 主梁横向屈曲临界风速计算

根据规范^[9],悬索桥成桥状态主梁横向屈曲临界风速可以表示为

$$V_{lb} = K_{lb} \cdot f_l \cdot B =$$

$$\sqrt{\frac{\pi^3 \frac{B}{H} \mu \frac{r}{b}}{1.88 C_H \varepsilon \sqrt{4.54 + \frac{C'_l B_c}{C_H H}}} \cdot f_l \cdot B} \quad (8)$$

由上式得:

$$V_{lb} = \sqrt{\frac{\pi^3 \frac{45}{3.6} \times 19.8637 \times 0.57267}{1.88 \times 0 \times 903 \times 3.35165 \sqrt{4.54 + \frac{2.467}{0.903} \times \frac{7.8}{3.6}}}} \times 0.915 \times 45$$

$$= 637.3 \text{ m/s} > 98.2 \text{ m/s}$$

由式(8)可得施工阶段全桥合拢状态主梁横向屈曲临界风速为:

$$V_{lb} = \sqrt{\frac{\pi^3 \frac{45}{3.6} \cdot 16.44888 \times 0.5896}{1.88 \times 0.775 \times 3.3378 \sqrt{4.54 + \frac{2.911}{0.775} \times \frac{7.8}{3.6}}}} \times 0.998 \times 45$$

$$= 661.7 \text{ m/s} > 86.4 \text{ m/s}$$

上述计算结果表明施工阶段全桥合拢状态和成桥状态主梁结构横向屈曲临界风速远远大于其相应的检验风速86.4 m/s和98.2 m/s,因而大沽河航道桥具有很高的静风稳定性安全储备,主梁不会发生横向屈曲失稳.

6 结论

(1)动力特性计算结果表明:大沽河航道桥施工阶段全桥合拢状态和成桥状态主梁的一阶扭转频率比大于2,且主梁断面采用中央开槽式双闭口钢箱梁,增加了结构的抗扭刚度,具有良好的抗风性能.

(2)计算结果表明施工阶段全桥合拢状态和成桥状态主梁结构静力扭转发散临界风速和横向

屈曲临界风速均远远大于其相应的检验风速86.4 m/s 和 98.2 m/s,因而大沽河航道桥具有很高的静风稳定性安全储备,不会发生静风失稳。

参考文献:

- [1] 周颖,禹奇才,曹映泓.大跨度桥梁非线性静力抗风研究[J].广州大学学报:自然科学版,2002,1(4): 63-67.
- [2] 程进,肖汝诚,项海帆.大跨径悬索桥静风稳定性的参数研究[J].公路交通科技,2001,18(2):29-32.
- [3] BOONYAPINYOV, YAMADA H, MIYATA T. Wind-induced nonlinear lateral-torsion buckling of cable-stayed bridges [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(2): 486-506.
- [4] NAGAI M, XIE X, YAMAGUCHI H, et al. Static and Dynamic instability analysis of 1400-meter long-span cable-stayed bridges[C]//Proceeding of IABSE Symposium Kobe, Japan: IABSE, 1998, 79: 281-286.
- [5] 程进,江见鲸,肖汝诚.悬索桥空气静力稳定性的随机分析[J].土木工程学报,2004,37(4):41-45.
- [6] 方明山,项海帆,肖汝诚.大跨径缆索承重桥梁非线性空气静力稳定理论[J].土木工程学报,2000,33(2):73-78.
- [7] 黄平明,王达,周可夫.无塔非对称人行悬索桥静风稳定性研究[J].公路交通科技,2008,25(4):99-102.
- [8] 中交公路规划设计院,华杰工程咨询有限公司.青岛海湾大桥(北桥位)工程可行性研究报告[R].青岛海湾大桥工程项目建设办公室.2005.
- [9] 中华人民共和国交通部. JTG/TD60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004. 12.

Aerostatic Stability Analysis of Qingdao Gulf Bridge-Daguhe Channel Bridge

LI Li-jun¹, HU Zhao-tong¹, QU Li-qing²

(1. Highway Institute, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Tsingtao International Trust & Investment Co. Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: Daguhe Channel Bridge is the main navigation of Qingdao Gulf Bridge, and it is a single tower self-anchored steel box girder suspension bridge. The paper aims at steel box girder's aerostatic stability analysis to ensure the stability of the wind-resistance, safety and applicability in the state of the construction phase full-bridge close up and operation of the bridge, using ANSYS for the analysis of dynamic behavior, the coefficient of tri-component force of segmental model of the girder is measured by wind tunnel test, and then to solve its critical wind velocity of static torsional divergence and transverse buckling critical wind speed, calculate results were much larger than the corresponding wind speed tests, which guarantee steel box girder's aerostatics stability in Daguhe Channel Bridge.

Key words: suspension bridge; steel box girder; dynamic behavior; coefficient of tri-component force; aerostatics stability