

文章编号: 1002-0268 (2008) 04-0094-05

自锚式悬索桥力学特性挠度理论研究

沈锐利¹, 王志诚²

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010)

摘要: 在简要介绍自锚式悬索桥特点以后, 着重从挠度理论出发研究其力学特性。首先详细推导了自锚式悬索桥挠度理论基本微分方程, 然后在此基础上介绍了各内力影响线的求解思路, 基于此, 采用动态规划法加载原理编制了自锚式悬索桥挠度理论计算程序, 通过实际的桥跨结构(主跨 328 m, 自锚式悬索桥)根据挠度理论程序计算边、中跨各截面的弯矩、挠度影响线并与有限元计算结果相比较, 反映程序计算精度较高, 从而验证了公式和程序的正确性, 为进一步对自锚式悬索桥的相关力学参数影响分析奠定了基础。

关键词: 桥梁工程; 自锚式悬索桥; 挠度理论; 有限元分析

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

Study on Mechanical Property of Self-anchored Suspension Bridge Based upon Deflection Theory

SHEN Rui-li¹, WANG Zhi-cheng²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. China Highway Planning and Design Institute Consultants, Inc., Beijing 100010, China)

Abstract: Characters of self-anchored suspension bridge were introduced briefly. Then based on deflection theory, research was focused on its mechanical property. The basic differential equation of self-anchored suspension bridge was deduced, and the solution of internal force influence lines was given. According to the above deduced formula, by using the dynamic program to simulate loads, the calculation program of self-anchored suspension bridge was worked out. Taking a practical bridge (self-anchored suspension bridge with 328 m mid-span) as an example, moment and deflection influence lines of each cross-section of mid/side span were calculated both by the calculation program and FEM method. Comparison of results verified the accuracy of program and proved the derived formula and program. Further research of relevant mechanical parameters analysis could be based on this program.

Key words: bridge engineering; self-anchored suspension bridge; deflection theory; finite element analysis

0 概述

自锚式悬索桥是由主缆、加劲梁、索塔、吊索等构件组成的柔性悬吊结构。它与地锚式悬索桥不同的是, 它的主缆直接锚固在加劲梁的两端, 由加劲梁直接承受主缆的水平力。主缆是结构中的主要受力构件之一, 主要承受拉力作用, 主缆不仅可以通过自身的弹性变形, 而且可以通过其几何形状的改变来影响体系的平衡, 表现出非线性特征。索塔、加劲梁在恒载

作用下以轴向受压为主, 在活载作用下, 受压弯共同作用, 呈梁柱特征。吊索是将加劲梁自重、外荷载等传递到主缆的传力构件, 承受轴向拉力。

自锚式悬索桥与地锚式悬索桥相比有以下几方面的优点^[1]:

(1) 不需修建大体积的锚碇, 所以适用于地质条件较差及不宜修建锚碇的城市地区。

(2) 受地形限制较小, 可结合地形灵活布置, 既可修成双塔三跨悬索桥, 也可修成独塔双跨悬索桥,

收稿日期: 2006-07-16

作者简介: 沈锐利 (1963-), 男, 四川华蓥人, 教授, 博士生导师, 研究方向为大跨度桥梁结构行为. (rlshen@163.com)

还可根据需要增设外伸跨。

(3) 对于钢筋混凝土的加劲梁,由于承受主缆传递的压力,可以节省大量的预应力钢筋,同时克服钢梁在巨大的轴向力作用下容易屈曲的缺点。

(4) 保留了传统悬索桥的外形,以满足人们对桥梁美观性的追求。

自锚式悬索桥还存在以下一些缺点:

(1) 由于主梁承受巨大的压力,为此必须加大加劲梁的截面,从而增大了自重,使主缆的用钢量增大,所以限制了自锚式悬索桥的跨径。

(2) 施工顺序和普通悬索桥有很大的不同,采用先架设主梁后架设主缆的施工顺序,此施工方法造成吊索张拉控制难度增大很多。

悬索桥在静力方面理论有弹性理论、挠度理论和有限位移理论。自锚式悬索桥由于其跨度一般比较小,采用挠度理论分析既考虑了悬索桥的非线性主要因素,同时可以在分析时忽略许多次要因素,结果又与有限位移理论较接近,还可以利用比较简单的数值方法加以计算,后面的分析发现影响线仍可利用,因此适用于自锚式悬索桥的设计。另外,挠度理论采用解析的表达式,对于研究自锚式悬索桥结构的力学特性、研究设计参数对内力分布及结构变形的影响特别方便。因此本文采用挠度理论建立自锚式悬索桥的微分方程,推导出内力、挠度计算公式,然后编程序,并用实际桥跨结构验证公式和程序的正确性。

1 自锚式悬索桥挠度理论建立

挠度理论是针对结构的大位移而发展的一种近似理论,它的计算结果与有限位移理论结果较接近。挠度理论是考虑结构变形影响的一种广泛应用的方法,也可用该理论来分析大跨度拱桥及其他桥梁结构。

用挠度理论进行悬索桥结构设计计算时,需要的已知数据少,计算程序较短,用于工程设计单位的方案设计和初步设计比较方便。当然挠度理论假设比较多,且忽略较多的影响因素,因此它的结果有一定的近似性。

1.1 基本假定

用挠度理论对悬索桥结构分析计算时,一般基于以下假定^[2,3]:

(1) 假定恒载为沿跨度均布,在无活载状态下,主缆为抛物线形;

(2) 吊索为竖直,且沿桥跨密布,不考虑在活载作用下的拉伸和倾斜,当作仅在竖向有抗力的薄膜,这个假定即认为主缆的变形形状和加劲梁相同;

(3) 在每一跨内加劲梁为等直截面梁,即截面惯性矩在一跨内为常量;

(4) 忽略加劲梁的剪切变形;

(5) 不考虑主塔刚度的影响。

1.2 自锚式悬索桥挠度理论基本方程的推导

恒载作用下,缆索的形状为抛物线,则中、边跨下垂曲线可表示为:

$$y_i = \frac{4f_i}{l_i^2} x(l_i - x), i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中, l_i 为左边、中、右边跨跨度; f_i 为左边、中、右边跨矢高。

由主缆的微小单元 dx 的荷载 $(\bar{g} + g_c) dx$ 与主缆恒载拉力的竖向平衡得:

$$-H_g \frac{d^2 y}{dx^2} = \bar{g} + g_c, \quad (2)$$

式中, $\bar{g}$ 为恒载吊索力的分布集度; g_c 为主缆自重(近似为沿跨度分布); H_g 为主缆恒载水平拉力。

将(2)代入(1)得:

$$H_g = \frac{(\bar{g} + g_c) l_i^2}{8f_i}. \quad (3)$$

在恒载状态下,设加劲梁竖向曲线为 $c(x)$ (方向以向下为正),加劲梁初始预拱度为 $c_0(x)$,则恒载状态下梁的弹性方程为:

$$EI \frac{d^4 c}{dx^4} - EI \frac{d^4 c_0}{dx^4} + H_g \frac{d^2 c}{dx^2} = g - \bar{g}, \quad (4)$$

式中, g 为加劲梁的恒载集度; EI 为加劲梁竖向抗弯刚度。

将(2)代入公式(4)可得自锚式悬索桥恒载状态方程:

$$EI \frac{d^4 c}{dx^4} + H_g \frac{d^2 c}{dx^2} = g + EI \frac{d^4 c_0}{dx^4} + H_g \frac{d^2 y}{dx^2} + g_c. \quad (5)$$

在活载 $p(x)$ 作用下,加劲梁和主缆都发生竖向挠度 $\eta(x)$,主缆的水平力 $H = H_g + H_p$ (H_p 为主缆活载水平拉力),同时吊杆力设为 $s(x)$,则分配于加劲梁本身的竖向荷载 $q(x)$ 为:

$$q(x) = g + p(x) - s(x), \quad (6)$$

梁在恒载与活载作用下的弹性方程为:

$$EI \frac{d^4}{dx^4} (\eta + c - c_0) + H \frac{d^2}{dx^2} (c + \eta) = g + p(x) - s(x), \quad (7)$$

式中, $p(x)$ 为作用在加劲梁上的活载集度。

有活载作用时主缆的平衡方程为:

$$-H \left[\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{d^2 \eta}{dx^2} \right] = s(x) + g_c, \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)后,用式(7)减去式(5),得活载引起的加劲梁弹性方程:

$$EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} = p(x) + H_p \frac{d^2 y}{dx^2} - H_p \frac{d^2 c}{dx^2}, \quad (9)$$

对(9)式两边积分得:

$$M = M_0 - H_p y + H_p c, \quad (10)$$

与普通悬索桥^[3]相比,方程右边少了 H 在 η 上引起的非线性项。

一般悬索桥的竖曲线是向上的,即 c 取负值,因此竖曲线可减小结构的活载受力。

式(9)为自锚式悬索桥挠度理论的微分方程,有两个未知数 H_p 和 η ,必须增加一个方程才能求解。根据变形相容条件,这样一个方程不难找到:缆索锚固点之间的水平投影缩短量应为加劲梁的压缩量即是一个相容条件。经过推导,可得到以下变形相容方程^[1]:

$$\frac{H_p}{E_c A_c} L_s \pm \alpha_t \cdot t \cdot L_t + \int \frac{d^2 y}{dx^2} \eta dx = - \left[\frac{H_p \left(\sum_{i=1}^3 l_i \right)}{E_s A_s} \pm \sum_{i=1}^3 l_i \alpha_{si} t_{si} \right], \quad (11)$$

式中, A_c 、 E_c 分别为主缆的面积及弹性模量; α_c 、 t_c 分别为主缆温度线膨胀系数及温度变化值; α_s 、 t_s 分别为加劲梁的温度线膨胀系数及温度变化值; ϕ 为主缆水平倾角; L 为泛指两锚固点之间水平投影长度; l_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为左边、中、右边跨跨度; E_s 、 A_s 分别为加劲梁的弹性模量和面积; $L_s = \int \frac{dx}{\cos^2 \phi}$; $L_t = \int \frac{dx}{\cos^2 \phi}$ 。

上面的公式(9)、(11)为自锚式悬索桥挠度理论的基本微分方程,联立求解就可得任意活载作用下加劲梁的挠度、弯矩、剪力及主缆的水平分力。

自锚式悬索桥锚固于加劲梁上,主缆的水平分力不失一般性可假定其作用于加劲梁的形心,忽略竖曲线的影响,从式(9)、(11)可见,该方程实际为线性方程,叠加原理仍然适用。为方便挠度理论方法的计算,本文采用过去结构力学、材料力学的常规求解方法,将荷载分为两组,一组为作用于梁上的活载 $p(x)$,另一组为活载下吊索力引起的 $H_p \frac{d^2 y}{dx^2}$ 。

1.3 自锚式悬索桥挠度理论基本方程的求解

考虑微分方程式(9),对于 $p(x)$ 作用于梁上,利用力法放松支座处弯矩(如图1所示),使之成为静定结构,可以方便的求出支座处的静不定弯矩通式^[4]。

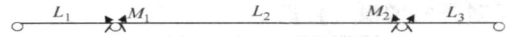


图1 三跨悬吊内支点弯矩示意图

Fig. 1 Sketch of moment at internal support of tri-span suspended structure

对于自锚式悬索桥,方程(11)中的 $\int \frac{d^2 y}{dx^2} \eta dx$ 项由两部分引起的,一部分为全跨吊索分布力作用,另一部分为活载作用。故由方程(11)可求得 H_p 公式如下:

$$H_p = \frac{y_b + \alpha_t L_t + \sum_{i=1}^3 l_i \alpha_{si} t_{si} \rho}{y_c + \rho \frac{1}{E_c A_c} L_s + \frac{\sum_{i=1}^3 l_i}{E_s A_s} \rho}, \quad (12)$$

式中, $\rho = -1/y'' = l_2^2/8f_2$, y_c 是由全跨悬吊荷载 $y H_p$ ($H_p = 1$) 引起的加劲梁挠度曲线面积, y_b 为活载作用下加劲梁挠度曲线面积^[4]。

对于 $p(x)$ 作用于不同的位置分别求得 $p(x)$ 和 $H_p y$ 作用下挠度、弯矩、剪力,然后叠加,即可根据 $M_x = -E\eta$ 及 $Q_x = M'_x$ 求其内力。

2 程序开发和算例验证

在前面的推导过程中,假定 P_i 为作用于各跨的單位力,移动 P_i 即可得到指定截面(位置)的内力和变形曲线,按结构力学的定义,该类曲线则为指定截面(位置)的内力或变形影响线,因此对自锚式悬索桥可采用影响线的方法进行计算。程序采用动态规划法的思想进行纵向影响线加载,计算活载影响量的最值。

2.1 程序设计

本文以前述理论推导为基础,采用 Fortran 语言开发编制了程序,程序包含三个子程序 READD、HPINL2、ADLD。子程序 READD 用来读取输入数据;子程序 HPINL2 用来计算主缆活载水平拉力、加劲梁弯矩、剪力、挠度影响线;子程序 ADLD 用来实现动态规划法加载,活载有人群荷载、汽-20、汽超-20、挂-120、公路 I 级、公路 II 级等类型。程序可计算三跨悬吊、三跨悬吊加两外伸跨、两跨悬吊、两跨悬吊加两外伸跨等多种桥跨情况。

2.2 程序验证

算例:某跨度为 70 m(左外伸跨) + 132 m(左边跨) + 328 m(中跨) + 132 m(右边跨) + 70 m(右外伸跨)的自锚式悬索桥,如图2所示,中跨矢跨比 1/5,加劲梁的竖向惯性矩 3.87 m^4 , 2 根主缆的面积和为 0.19198 m^2 ,加劲梁的面积为 1.65 m^2 ,加劲梁的弹性模量为 $2.10 \times 10^5 \text{ MPa}$,主缆的弹性模量为 $1.96 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

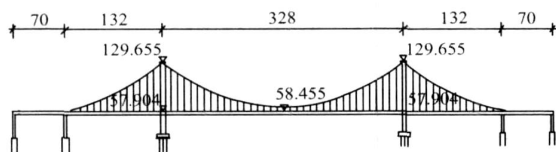


图2 算例桥跨布置图

Fig. 2 General plan of the example

挠度理论影响线及包络图与有限元计算结果比较

如图3~图13及表1所示。

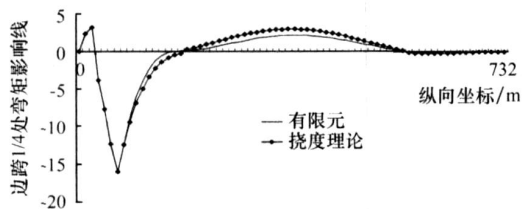


图3 挠度理论和有限元边跨1/4处弯矩影响线比较

Fig. 3 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (moment influence line at 1/4 point of side span)

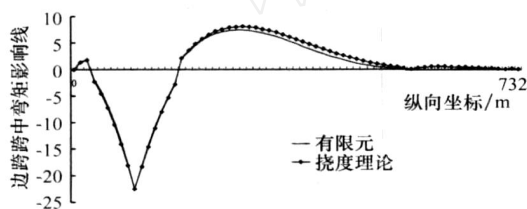


图4 挠度理论和有限元边跨跨中弯矩影响线比较

Fig. 4 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (moment influence line at mid point of side span)

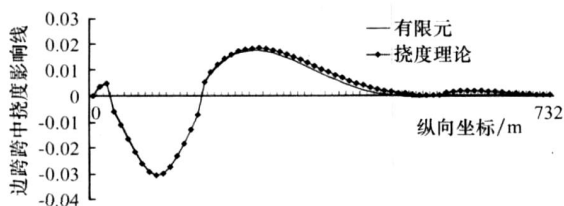


图5 挠度理论和有限元边跨跨中挠度影响线比较

Fig. 5 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (deflection influence line at mid point of side span)

从上述算例计算结果可以看出: 挠度理论计算的精度是很高的, 可以用于初步设计。

3 小结

本文首先详细地推导了自锚式悬索桥挠度理论恒载、恒载+活载、活载基本微分方程, 方程为线性方

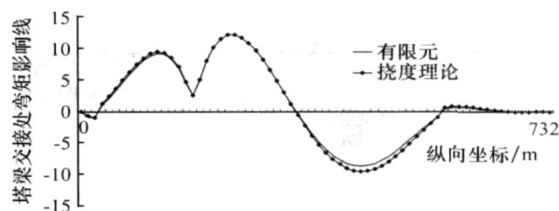


图6 挠度理论和有限元塔梁交接处弯矩影响线比较

Fig. 6 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (moment influence line at point of intersection of tower and beam)

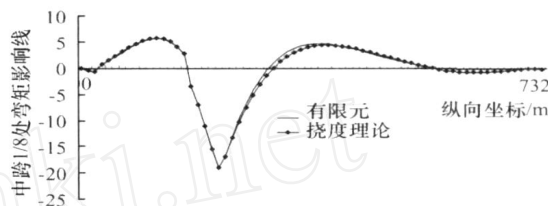


图7 挠度理论和有限元中跨1/8处弯矩影响线比较

Fig. 7 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (moment influence line at 1/8 point of mid-span)

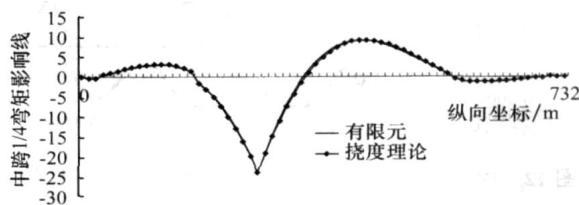


图8 挠度理论和有限元中跨1/4处弯矩影响线比较

Fig. 8 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (moment influence line at 1/4 point of mid-span)

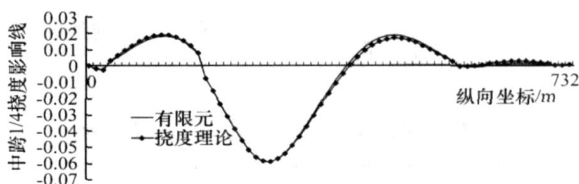


图9 挠度理论和有限元中跨1/4处挠度影响线比较

Fig. 9 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (deflection influence line at 1/4 point of mid-span)

程, 叠加原理仍然适用。在上述基础上, 给出了求解主缆活载水平拉力、主梁挠度、内力的影响线公式的思路。

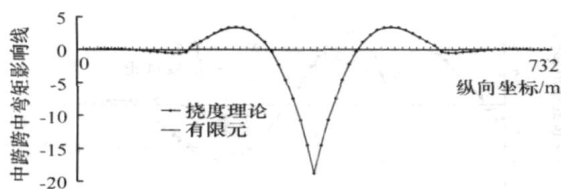


图 10 挠度理论和有限元中跨跨中弯矩影响线比较

Fig. 10 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (moment influence line at mid point of mid-span)

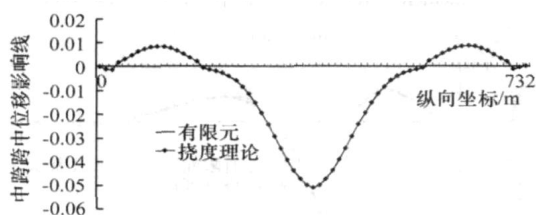


图 11 挠度理论和有限元中跨跨中挠度影响线比较

Fig. 11 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (deflection influence line at mid point of mid-span)

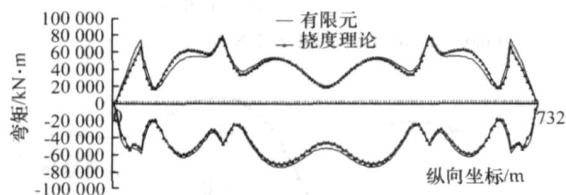


图 12 中间三跨挠度理论和有限元弯矩包络图比较

Fig. 12 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (moment envelope of three mid spans)

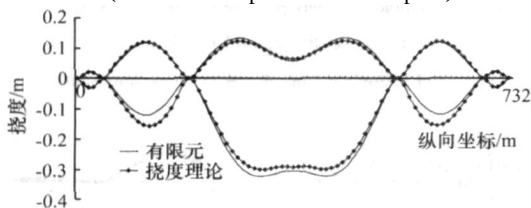


图 13 挠度理论和有限元挠度包络图比较

Fig. 13 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory (deflection envelope of three mid spans)

表 1 挠度理论与有限元计算结果比较

Tab. 1 Comparison between the calculation results by deflection theory and FE theory

	梁上最大正弯矩 / (kN·m)	梁上最大负弯矩 / (kN·m)	梁上最大挠/m
有限元	75 474.8	79 112	0.32
挠度理论/%	71 986.8	75 396	0.30
相对误差	- 4.62 %	- 4.69 %	- 6.09 %

根据推导的公式, 编制了自锚式悬索桥挠度理论计算程序, 用实际的桥跨结构进行了算例计算, 与有限位移理论有限元法的计算结果对比说明, 本文建立的自锚式悬索桥挠度理论公式正确, 程序可用, 计算结果精度高。

参考文献:

References:

- [1] 王志诚. 自锚式悬索桥静动力特性挠度理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
WANG Zhi-cheng. Static And Dynamic Research of Self-anchored Suspension Bridge Based On Deflection Theory [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 雷俊卿, 郑明珠, 徐恭义. 悬索桥设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
LEI Jun-qing, ZHEN Ming-zhu, XU Gong-yi. Design of Suspension Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] 钱冬生, 陈仁福. 大跨度悬索桥的设计与施工 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999.
QIAN Dong-sheng, CHEN Ren-fu. Design And Construction of Long Span Suspension Bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999.
- [4] 王志诚, 沈锐利. 自锚式悬索桥挠度理论解析计算方法 [C] // 西南交通大学土木工程学院研究生学术论文集. 2004: 47 - 54.
WANG Zhi-cheng, SHEN Rui-li. Formula Calculation Method of Self-anchored Suspension Bridge Based on Deflection Theory [C] // Graduate Student Symposium, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University. 2004: 47 - 54.
- [5] 沈锐利. 悬索桥主缆系统设计及架设计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 1996, 29 (2): 3 - 9.
SHEN Rui-li. Calculation Methods for Design And Erection of Cable Curve of Suspension Bridge [J]. Journal of Civil Engineering, 1996, 29 (2): 3 - 9.
- [6] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣. 悬索结构设计 [M]. 北京: 中国建设工业出版社, 1997: 1 - 5.
SHEN Shi-zhao, XU Chong-bao, ZHAO Chen. Design of Cable Structure [J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 1 - 5.
- [7] OCHSENDORF J A, BILLINGTON D P. Self-anchored Suspension Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 1999, 4 (3): 151 - 156.
- [8] KIM H K, LEE M J, CHANG S P. Non-linear Shape-finding Analysis of a Self-anchored Suspension Bridges [J]. Engineering Structures, 2002, 24 (12): 1 547 - 1 559.

(下转第 102 页)

(2) 混凝土桥面系较钢桥面系更有利于结构抗风, 增加结构自重, 能有效地增强结构抗风稳定性, 是提高结构失稳风速的有效途径。

(3) 风缆能有效地降低结构在风荷载作用下的横向位移, 但对结构抗扭刚度贡献不大。

(4) 模型3能为结构在风荷载作用下的稳定性提供有利的保障, 最有利于结构抗风。

参考文献:

References:

- [1] 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.
CHENG Jin, XIAO Ru-cheng, XIANG Hai-fan. Parametric Studies on Aerostatic's Stability for Suspension Bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18 (2): 29 - 32.
- [2] BOONYPINYO V, 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.
- [3] NAGAI M, XIE X, YAMAGUCHI H, *et al.* Static and Dynamic Instability Analysis of 1 400-meter Long-span Cable-stayed Bridges [C] // Proceeding of IABSE Symposium Kobe, Japan: IABSE, 1998, 79: 281 - 286.
- [4] 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.
CHENG Jin, JIANG Jian-jing, XIAO Ru-cheng. Stochastic Analysis of Aerostatic Stability of Suspension Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (4): 41 - 45.
- [5] 张新军, 孙炳楠. 大跨度悬索桥的颤振稳定性研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (8): 34 - 37.
ZHANG Xin-jun, SUN Bing-nan. Study on Flutter Stability of Long-span Suspension Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (8):

34 - 37.

- [6] 乐云祥, 常英, 胡晓伦. 武汉阳逻长江大桥施工猫道抗风稳定性分析 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (8): 40 - 43.
YUE Yun-xiang, CHANG Ying, HU Xiao-lun. Analysis of Wind-resistant Stability on the Catwalk of Wuhan Yangluo Yangtze River Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (8): 40 - 43.
- [7] 钱晓如, 谭永高, 王达, 等. 无塔非对称人行悬索桥动力特性影响参数研究 [J]. 公路工程, 2007, 32 (4): 96 - 99.
QIAN Xiao-ru, TAN Yong-gao, WANG Da, *et al.* Influence Parameters Analysis of Dynamic Characteristics for Pedestrian Suspension Bridge without Tower [J]. Highway Engineering, 2007, 32 (4): 96 - 99.
- [8] 胡峰强, 陈艾荣. 全模态颤振分析的实用方法 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (2): 77 - 79.
HU Feng-qiang, CHEN Ai-rong. Full-mode Flutter Analysis with Double Parameters and Its Realization in ANSYS [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (2): 77 - 79.
- [9] 王爱勤, 李龙安. 公路大跨度桥梁抗风性能评价方法 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2006, 26 (5): 58 - 61, 73.
WANG Ai-qin, LI Long-an. Evaluation Method of Wind-resistance Capability of Large-span Bridge on Highway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26 (5): 58 - 61, 73.
- [10] 李加武, 林志兴, 项海帆. 桥梁断面三分力系数的雷诺数效应 [J]. 同济大学大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (10): 1 328 - 1 333.
LI Jia-wu, LIN Zhi-xing, XIANG Hai-fan. Reynolds Number Effect of Mean Force Coefficient of Two Kinds of Typical Bridge Deck Section [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2004, 32 (10): 1 328 - 1 333.

(上接第98页)

- [9] 文曙东, 郑凯锋, 栗怀广. 采用结合梁建造先缆后梁自锚式悬索桥的研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 56 - 59.
WEN Shu-dong, ZHENG Kai-feng, LI Huai-guang. Study on Self-anchored Suspension Bridge Construction with Cable Fitting First Followed by Composite Grder [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23

(3): 56 - 59.

- [10] 檀永刚, 张哲, 黄才良. 一种自锚式悬索桥主缆线形的解析法 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (2): 88 - 90.
TAN Yong-gang, ZHANG Zhe, HUANG Cai-liang. An Analytical Method for Main Cable Configuration of Self-anchored Suspension Bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (2): 88 - 90.