

多塔下拉索斜拉桥静力荷载试验和计算分析

肖明葵^{a,b}, 王肖巍^a, 刘 纲^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 针对加有下拉索的多塔斜拉桥这种新型的桥梁结构体系, 参考某长江大桥实际工程建模, 通过缩尺静力实验和有限元计算分析对比加劲索加下拉索多塔斜拉桥与常规无加劲索多塔斜拉桥的静力力学性能。试验和分析表明, 加下拉索多塔斜拉桥结构体系可以有效提高结构刚度, 减少塔墩根部以及主梁跨中的弯距。对比试验结果, 提出了最佳的下拉索设置方案。

关键词: 斜拉桥; 下拉索; 静力试验; 有限元分析; 力学性能

中图分类号: TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)01-0043-07

Static Load Test and Calculation on Multi-tower Cable-Stayed Bridge with Tie-down Cables

XIAO Ming-kui^{a,b}, WANG Xiao-wei^a, LIU Gang^{a,b}

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Consttuction of Cities in Mountain Ared, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The static load test and the finite element analysis of the multi-tower cable-stayed bridge with tie-down cables are carried out. The test and analysis model of the bridge is created by referencing to the actual structure of a Changjiang River bridge. The static mechanical behaviors of such bridge with tie-down cables and the normal multi-tower cable-stayed bridge are comparatively analyzed by the static load test and the finite element analysis. It is shown that the structural system of the cable-stayed bridge with tie-down cables can effectively improve the structural rigidity and reduce the bending moment of the main beams, pylons and piers. According to the results, the best scheme about the location and number of tie-down cables is proposed.

Key words: cable-stayed bridge, tie-down cable, static testing, finite element analysis, mechanical properties

斜拉桥的特点是桥面轻型化、多塔化和塔结构多样化、拉索新型化。目前单、双斜拉塔桥建造较多, 设计分析理论也较为成熟。而对于大跨区域, 则需要增大桥梁的跨径, 或者采用多塔斜拉桥的形式, 增大桥的跨径直接影响桥的刚度, 因此, 多塔斜拉桥的应用越加广泛, 尤其是对于无通航要求的大跨峡谷地带, 多塔斜拉桥更为适用。

多塔斜拉桥的中间塔没有边锚索固定, 在中间跨加载时, 塔顶水平位移加大, 导致整个结构变形过大, 因此结构刚度的控制成为多塔斜拉桥设计的关键^[1-2], 解决这一问题可通过在合理的位置设置加劲拉索来达到增加全桥刚度的目的^[3]。设置加劲索的方法主要有以下几种: 设置水平加劲索、全长倾斜加劲索、中间梁段倾斜加劲索、中间梁段重叠索及设置

收稿日期: 2010-03-06

基金项目: 强震下高墩大跨桥梁破坏机制及基于性能的减震控制研究(50908245); 抗震结构位移和滞回耗能性能评估的量化指标研究(50578167); 交通部科技教育司西部交通建设科技项目(2007 319 740 110)

作者简介: 肖明葵(1952-), 女, 教授, 博士, 主要从事工程力学和工程结构抗震动力分析研究, (E-mail) xmkxy@yahoo.com.cn。

全长重叠索等方法^[4-7]。这几种方法,均可以在一定程度上改善结构的受力性能。但是对于跨度较大的桥梁设置水平加劲索,则由于水平加劲索较长,垂度效应比较明显,影响加劲效果,外观也让人难以接受;全长设置斜向加劲索,在垂度效应方面没有水平加劲索明显,加劲效果稍差;其次,这两种加劲索方法都因索长度较长,在多风的峡谷地带或大跨地区风振响应、移动荷载抖振响应^[8-9]都十分明显,而且索力很大^[10],对全桥的整体刚度有一定的影响。在中间梁段设置倾斜加劲索,要求中间梁段跨度较小,对于中间有通航要求的水域,不太适合;在中间梁段设置重叠索,提高结构整体刚度的效果不明显,施工有一定的难度,细部构造比较麻烦^[11-12]。

为解决设置加劲索提高全桥整体刚度的难题,西部交通建设科技项目首次提出下拉索方案,该方案提出在主塔上下同时加斜向拉索的结构体系^[13-14]。下拉索的一端锚固于主梁上,另一端锚固于下索塔上,连同上拉索对中塔塔顶的锚固,使整个结构形成一个稳定体系。下拉索多塔斜拉桥与两塔斜拉桥一样,在恒载状况下属于自平衡体系,并可以通过调节上下拉索索力,使其仅对主梁和塔增加很小的轴力,而不改变恒载状况下墩和基础的受力状况,并且由于下拉索相对于水平和全长加加劲索长

度要短很多倍,对于风振响应以及加劲索索力有很好的控制。

多塔下拉索体系对于全桥刚度的提高程度取决于下拉索的数量和布置方案。为了验证不同下拉索数量和布置方案变化对全桥刚度提高程度的影响,项目组通过改变实际在建工程结构的加劲索方式建模,进行缩尺静力试验对 3 种不同下拉索方案进行对比分析,以找出最优的下拉索布置方案,并采用实桥模型有限元分析进行了验证。

1 实验模型及参数

试验模型参考在建的中国重庆忠县长江大桥,以该桥跨径尺寸、边中索及梁、塔的尺寸为基础,仅将原设计的两塔斜拉桥增加 1 塔变为 3 塔斜拉桥,并在每座塔上设置本项目提出的下拉索,以便适用于更大的跨度。通过相似分析,设计了 3 种不同下拉索数量和布置方案的 3 塔斜拉桥试验缩尺模型^[15]。

模型缩尺比例 1:200,结构跨径布置为 $1.025\text{ m} + 2.3\text{ m} + 2.3\text{ m} + 1.025\text{ m} = 6.65\text{ m}$,模型全长 6.65 m ,主跨 2.3 m ,边跨 1.025 m ,主塔高 1.24 m 。模型基本形式如图 1 所示。

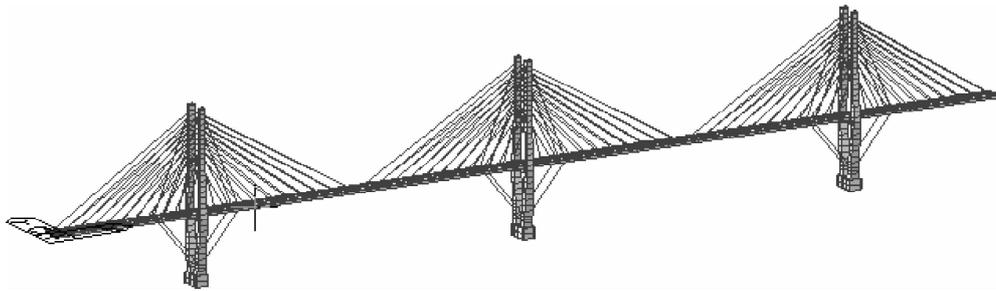


图 1 桥梁模型

考虑各种不同下拉索布置方案的试验模型体系如图 2、3、4、5 所示。

体系 1:多塔斜拉桥带下拉索形式(模型 1,模型

2,模型 3)

考虑下拉索在主梁上锚固位置的变化,分 275 mm、385 mm 2 种情况。

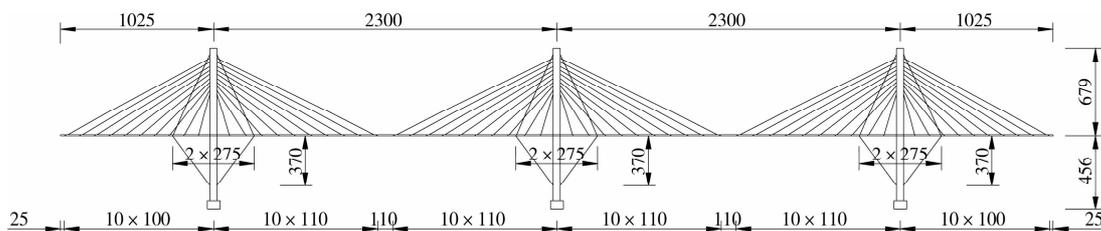


图 2 模型 1:下拉索在主梁 275 mm 处/mm

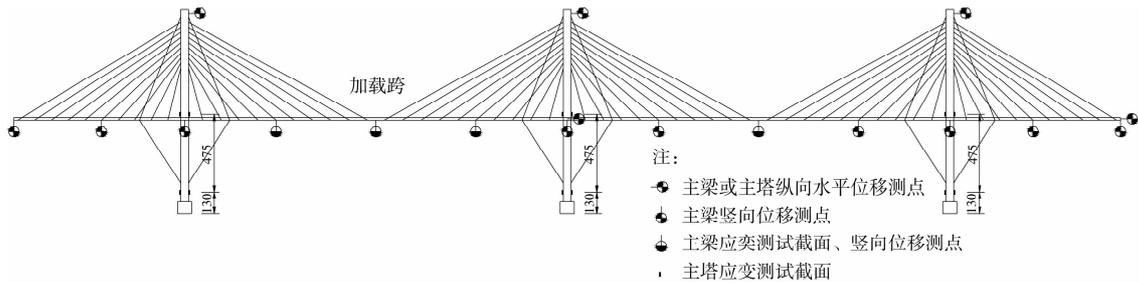


图 6 测点布置

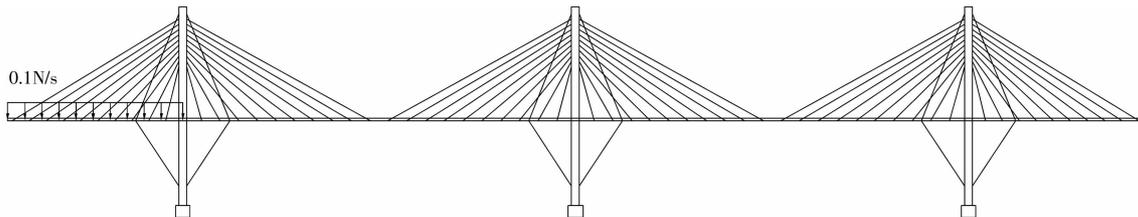


图 7 多塔斜拉桥边跨加载

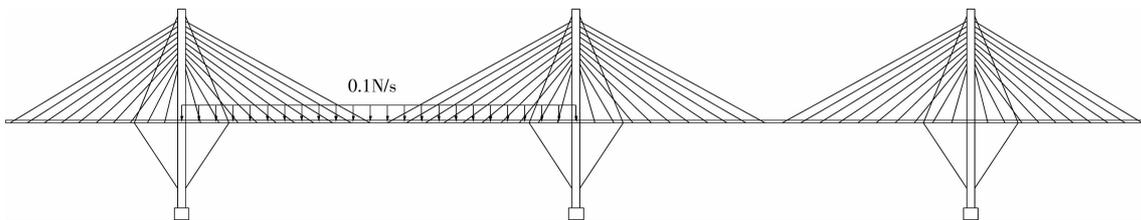


图 8 多塔斜拉桥一中跨加载

3 实验结果分析

3.1 不同加劲索方案对斜拉桥整体刚度的影响

选取模型 1 至模型 4,分析比较在静载作用下

结构的跨中挠度、塔顶水平位移的变化情况。表 2 所示为各模型的几个重要点位的位移,图 9 分别示出了各模型的挠度曲线变化情况。

表 2(a) 中跨加载工况下各重要点位的位移情况

/mm

	中跨跨中最大挠度		边跨跨中最大挠度		中塔最大水平位移	边塔最大水平位移	
模型 1	3.8	-5.78	2.03	-0.391	2.62	0.46	-2.17
模型 2	2.95	-4.75	1.383	-0.255	2.51	0.05	-1.62
模型 3	2.24	-4.18	1.12	-0.158	1.99	0.01	-1.48
模型 4	6.44	-7.82	3.219	-0.891	4.49	1.08	-2.72

表 2(b) 边跨加载工况下各重要点位的位移情况

/mm

	中跨跨中最大挠度		边跨跨中最大挠度		中塔最大水平位移	边塔最大水平位移
模型 1	1.48	-0.47	0.091	-1.838	0.28	1.44
模型 2	1.29	-0.47	0.08	-1.48	0.35	1.16
模型 3	0.85	-0.21	0.036	-1.287	0.07	0.89
模型 4	2.35	-1.01	0.262	-3.042	1.01	1.21

(注:跨中上挠为正,下挠为负;塔顶水平右移为正,左移为负)

综合表 2、图 9(a)、(b)可以看出在模型 4(不加加劲索)的情况下,主梁挠度以及主塔的水平位移均为最大,全桥刚度最差;模型 1(下拉索距主塔 275 mm)

对比于模型 4 来看,中塔最大位移减小了 41.6%,主梁中跨最大下挠挠度减小了 26.1%,说明下拉索对于全桥刚度的提高有很好的效果;模型 2(下拉索

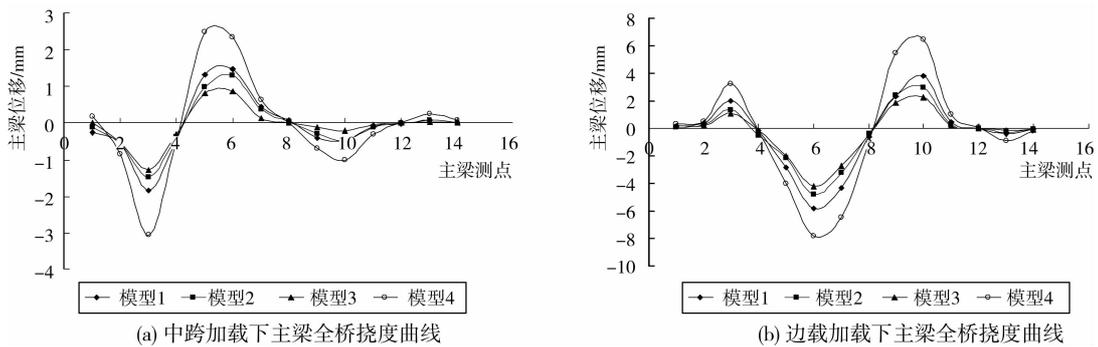


图 9 不同位置加载下主梁全桥挠度曲线

距主塔 385 mm)对比于模型 1 来看,中塔最大位移减小了 4.2%,主梁中跨最大下挠挠度减小 17.8%,可以看出,模型 2 在全桥刚度提高上比模型一有一定的优势,特别是主梁挠度的控制效果很明显,说明下拉索角度适当的增大(下拉索与主梁锚固成 50~60°左右最佳)对全桥刚度的提高有一定的好处;模型 3(双下拉索)相对于模型 2 来看,中塔最大位移减小了 20.7%,主梁中跨最大下挠挠度减小了 12%,可以看出模型 3 的加劲效果最好,其跨中挠度和塔顶水平位移对比前 3 种情况均显著降低。

从以上可以看出,新型的加劲索斜拉桥相对于无加劲索的体系来说全桥刚度有很大的提高。而且下拉索在主梁上距主塔的锚固位置以及下拉索的数

量将对全桥刚度的提高有很大的影响,特别是中跨满载的情况下,影响特别明显。下拉索与主梁锚固成 50~60°角左右(模型 2)对全桥刚度的提高最明显,角度过大或过小均会降低全桥的刚度。双下拉索(模型 3)的情况又比单下拉索的情况要好一些,说明适当的增加下拉索的数量也对全桥刚度有一定的提高。

2.2 不同下拉索方案对斜拉桥内力的影响

选取模型 1 至模型 4,分析比较在静载作用下结构各重要点位的最大弯矩。表 3 中列出了各种最不利工况下桥上各重要点位的最大弯矩值,从中可以看出新型的下拉索方案不但降低了结构的位移,并且结构重要点位的内力也得到了更好的控制。

表 3(a) 中载情况下各重要点位的最大弯矩位

/(N·m)

	中跨跨中最大弯矩	边跨跨中最大弯矩	中塔塔根最大弯矩	边塔塔根最大弯矩
模型 1	383.8	-514.2	-5 987.5	8 025.2
模型 2	357.2	-490.4	-5 468.4	7304.3
模型 3	318.1	-432.5	-4 002.4	6 336.9
模型 4	563.6	-645	-13 033.8	12 680.7

表 3(b) 边载情况下各重要点位的最大弯矩

/(N·m)

	中跨跨中最大弯矩	边跨跨中最大弯矩	中塔塔根最大弯矩	边塔塔根最大弯矩
模型 1	135.4	630.8	1 402.8	-1 627.3
模型 2	127.3	655.9	1 455.4	-1 795.8
模型 3	122.6	616.6	1 376.8	-1 108.8
模型 4	138.1	668.1	1 388.7	-3 969.9

在最不利荷载情况下,新型的下拉索不但提高了结构的刚度,而且也在很大程度上减小了塔根最大弯矩,在中跨满载情况下对跨中弯矩的控制也起到了很好的效果。从表 3 的数据中可以看出,模型 2(无加劲索)各重要点的弯矩最大;模型 1(下拉索距主塔 275 mm)对比于模型 4 来看,中塔塔根最大弯矩减小了 54.1%,主梁中跨最大弯矩减小了 31.9%,说明下拉索对于全桥各重要点内力控制有

很好的效果;模型 2(下拉索距主塔 385 mm)对比于模型 1 来看,在全桥重要点内力的控制方面差不多;模型 3(双下拉索)相对于模型 1 和模型 2 来看,中塔塔根最大弯矩减小了 33.2%,主梁中跨最大弯矩减小了 16.9%。可以看出下拉索对控制全桥重要点位的弯矩有很大的作用,双下拉索对比单下拉索情况下对于截面弯矩的控制有一定的优势,所以适当调整下拉索数量能很大程度上提高全桥刚度,

控制截面内力。

4 实桥模型计算分析

将使用重庆忠县长江大桥实桥的主塔、跨径、主梁和拉索等实际参数,在仅增加 1 个主塔和下拉索的情况下,用 Ansys 和 Midas 两种有限元分析软件进行建模计算,以使用实际桥梁计算结果与实验数据进行比较分析。

4.1 桥梁实际参数

结构跨径为 203.8 m+460 m+460 m+203.8 m=1 327.6,桥梁全长 1 327.6 m,主跨 460 m,边跨 203.8 m,主塔高 247.5 m。

主塔桥墩墩身采用 C40 混凝土,塔身采用 C50 混凝土,桥面主梁采用 C60 混凝土,拉索采用规格号为 PES7,直径为 7 mm 的镀锌预应力高强钢丝。

4.2 不同加劲索方案对斜拉桥整体刚度和重要截面内力的影响

计算模型加载采用公路一级荷载,加载方式以及桥梁模型的具体构造都遵循实验模型的加载方式和实验模型 1 至模型 4 的结构构造,使计算实桥结果与实验结果有一定的参照性。

实际桥梁计算模型重要点位在最不利荷载下的位移情况如表 4 所示。

表 4(a) 中跨公路一级荷载下各重要点位的位移情况

	中跨跨中最大挠度		边跨跨中最大挠度		中塔最大水平位移	两边塔水平位移	
模型 1	0.153 1	-0.124 2	0.058 7	-0.006 9	0.091 7	-0.005 1	-0.045 2
模型 2	0.133 9	-0.118 9	0.040 8	-0.003 7	0.080 1	-0.003 3	-0.043 3
模型 3	0.100 8	-0.105 5	0.040 6	-0.001 8	0.063 2	-0.001 2	-0.039 9
模型 4	0.406 4	-0.183 3	0.116 7	-0.030 6	0.225 0	-0.059 7	-0.032 1

表 4(b) 边跨加载工况下各重要点位的位移情况

	中跨跨中最大挠度		边跨跨中最大挠度		中塔最大水平位移	边塔最大水平位移
模型 1	0.116 6	-0.004 6	0.001 4	-0.077 8	-0.004 3	0.070 1
模型 2	0.097 3	-0.003 5	0.001 1	-0.072 3	-0.002 1	0.060 9
模型 3	0.074 2	-0.001 8	0.000 7	-0.053 4	-0.001 2	0.048 1
模型 4	0.378 2	-0.018 1	0.004 1	-0.225 5	-0.038 8	0.204 1

注:跨中上挠为正,下挠为负;塔顶水平左移为正,右移为负

从表 4 中可以看出,对比无下拉索的常规三塔斜拉桥(模型 4),有下拉索的斜拉桥在最不利荷载下的跨中最大下挠挠度减小值分别为 32%(模型 1)、35.1%(模型 2)、42.4%(模型 3);中塔的最大位

移减小值分别为 59.2%(模型 1)、64.4%(模型 2)、71.9%(模型 3)。

实际桥梁重要点位在最不利荷载下的最大弯矩如表 5 所示:

表 5(a) 中载情况下各重要点位的最大弯矩

	中跨跨中最大弯矩	边跨跨中最大弯矩	中塔塔根最大弯矩	边塔塔根最大弯矩
模型 1	5 721.2	-10 013.1	-162 636.8	138 179.1
模型 2	5 145.5	-9 732.4	-145 642.6	133 760.7
模型 3	4 328.6	-8 644.2	-96 787.1	104 475.6
模型 4	10 628.7	-12 914.7	-277 143.5	280 564.6

表 5(b) 边载情况下各重要点位的最大弯矩

	中跨跨中最大弯矩	边跨跨中最大弯矩	中塔塔根最大弯矩	边塔塔根最大弯矩
模型 1	-4 129.1	7 739.9	44 757.4	-152 228.0
模型 2	-3 760.5	7 199.5	38 906.8	-138 175.7
模型 3	-3 147.4	6 246.1	31 807.2	-100 842.8
模型 4	-8 463.5	14 023.6	86 901.6	-252 956.2

从表 5 中可以看出,对比无下拉索的常规三塔斜拉桥(模型 4),有下拉索的斜拉桥在最不利荷载下的中塔塔根最大弯矩的减小值分别为 41.3%(模型 1)、47.4%(模型 2)、65.1%(模型 3);跨中最大弯矩减小值分别为 46.2%(模型 1)、51.6%(模型 2)、59.3%(模型 3)。

由以上结论可以得出,下拉索在提高结构刚度和减小结构重要截面内力方面都有很好的效果,而且实际桥梁的计算结果与实验模型的实验结果有很好的一致性,证明了实验和计算的结果都有一定的可信性。

5 结论与展望

通过理论分析和实验结果证明,新型下拉索斜拉桥在全桥刚度的提高以及截面内力的控制上对比普通的三塔或多塔斜拉桥有很大的优势。在加单下拉索的情况下,下拉索与主梁锚固成 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 角左右时,对于全桥刚度的提高以及截面内力的控制为最佳。设置双下拉索又可以更好的提高全桥刚度以及降低跨中和桥墩根部的内力。

参考文献:

- [1] 郑春,刘晓东.论多塔斜拉桥的刚度[J].公路,2002(6):98-100.
ZHENG CHUN, LIU XIAO-DONG. Rigidity of multi-tower cable-stayed bridge[J]. Highway, 2002(6):98-100.
- [2] 胡建华,廖建宏,向建军.预应力混凝土.多塔斜拉桥设计构思[J].国外公路,1999,19(5):34-39.
HU JIAN-HUA, LIAO JIAN-HONG, XIANG JIAN-JUN. Design of multi-tower cable-stayed of prestressed concrete[J]. Journal of Foreign Highway, 1999,19(5):34-39.
- [3] 喻梅,李乔.结构布置对多塔斜拉桥力学行为的影响[J].桥梁建设,2004(2):1-4.
YU MEI, LI QIAO. Effect of structural arrangement on mechanical behavior of multispan cable-stayed bridges[J]. Bridge Construction, 2004(2):1-4.
- [4] 李传习,邹桂生.法国米约高架桥-7塔斜拉桥的设计与施工[J].世界桥梁,2005(4):20-22.
LI CHUAN-XI, ZOU GUI-SHENG. Design and construction of Millau Viaduct in France of -7 tower cable-stayed bridge[J]. World Bridges, 2005(4):20-22.
- [5] 陶齐宇,李平,蒋劲松.宜宾长江大桥总体设计[J].世界桥梁,2008(3):111-132.
TAO QI-YU, LI PING, JIANG JING-SONG. Overall design of Yibin Changjiang River Bridge[J]. World Bridges, 2008,(3):11-13.
- [6] 杨进,邵长宇,孙叔禹,等.主跨 348m+348m 三塔单索面 PC 梁斜拉桥[J].桥梁建设,2002(1):63-66.
YANG JIN, SHAO CHANG-YU, SUN SHU-YU, et al. Three pylon and single-cable-plane PC cable-stayed bridge with main spans of 348m+348m[J]. Bridge Construction, 2002(1):63-66.
- [7] LOCKMANN H, MARZAHN G A. Spanning the Rhine River with a new cable-stayed bridge[J]. Structural Engineering International, 2009, 271-276.
- [8] HRELIJA G, RADIC J, SAVOR Z. Analysis of stay-cable vibrations at the Franjo Tudman Bridge in Dubrovnik[J]. Gradevinar, 2009, 61(9):815-825.
- [9] ZHANG Q C, LI W Y, WANG W. Static bifurcation of rain-wind-induced vibration of stay cable[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2):729-734.
- [10] HUA X G, NI YQ, CHEN ZQ, et al. Structural damage detection of Cable-Stayed bridges using changes in cable forces and model updating[J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 2009, 135(9):1093-1106.
- [11] 胡建华,廖建宏.多塔斜拉桥关键技术研究[J].中外公路,2002(6):32-36.
HU JIAN-HUA, LIAO JIAN-HONG. Key technology of multi-tower cable-stayed bridge[J]. Journal of Foreign Highway, 2002(6):32-36.
- [12] HAN SH, PARK J K. Practical valuations on the effect of two type uncertainties for optimum design of cable-stayed bridges[J]. International Journal of Steel Structures, 2009, 9(2):143-152
- [13] 奉龙成,李鹏程,刘小明.下拉索多塔斜拉桥结构体系分析研究[J].世界桥梁,2009(3):29-32.
FENG LONG-CHENG, LI PENG-CHENG, LIU XIAO-MING. Analytical study of structural system of multi-pylon cable-stayed bridge with tie-down cables[J]. World Bridges, 2009,(3):29-32.
- [14] 李鹏程.多塔斜拉桥刚度分析[D].重庆:重庆交通大学,2009.
LI PENG-CHENG. Multi-tower cable-stayed bridge stiffness analysis[J]. Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [15] 余毅,余天庆,乐韩燕.吉林兰旗松花江特大桥施工阶段及成桥静力模型制作[J].世界桥梁,2008(1):73-75.
YU YI, YU YIAN-QING, LE HAN-YAN. Fabrication of static force model for Jilin Lanqi Songhua River Bridge at construction and completion stages[J]. World Bridges, 2008(1):73-75.
- [16] 黄侨,李忠龙,吴红林,等.哈尔滨四方台斜拉桥成桥静动载试验研究[J].桥梁建设,2006(1):16-18.
HUANG QIAO, LI ZHONG-LONG, WU HONG-LIN, et al. Study of static and dynamic load tests for Sifangtai Cable-stayed Bridge, Harbin at completion stage[J]. Bridge Construction, 2006(1):16-18.
- [17] 崔爱民.银滩黄河大桥静动载试验研究[J].桥梁建设,2002(5):23-25.
CUI AI-MIN. Static and dynamic test of Yintan Yellow River Bridge[J]. Bridge Construction, 2002(5):23-25.