

文章编号: 1002-0268 (2009) 12-0078-05

大跨拱桥吊装施工线形控制计算方法研究

邹中权¹, 贺国京², 吴再新¹, 李媛媛²

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075;

2. 中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对大跨度拱桥缆索吊装施工线形控制计算中有关模型建立、确定目标控制线形和吊装过程模拟计算等问题进行了研究。分别考虑吊装系统中各构件之间相互作用的复杂关系及其对结构的影响程度, 根据最终成桥线形, 采用倒拆法确定目标控制线形; 根据设计线形和所有恒载、活载变形, 确定预制时的无应力长度。针对拱圈预制节段的两种不同安装方法, 提出分别采用正装迭代法和刚性支承-弹性索法计算拱肋安装坐标及扣索索力。通过工程实例分析表明, 两种方法计算的扣索索力很接近, 但安装坐标相差很大。施工控制结果表明, 采用本文方法进行控制的拱肋线形与设计线形吻合良好。

关键词: 桥梁工程; 拱桥吊装; 刚性支承-弹性索法; 拱轴线控制; 正装迭代法; 目标线形

中图分类号: U445.4; U448.22 **文献标识码:** A

Study on Computation Method of Geometric Configuration Control for Long-span Arch Bridges Constructed by Cable-hoisting

ZOU Zhongquan¹, HE Guojing², WU zaixin¹, LI Yuanyuan²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Central South University
of Forestry and Technology, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: Some problems involved in the geometric configuration controlling calculation of long-span arch bridges erected by cable-hoisting method were studied, such as computational modeling, objective geometric configuration for control and simulating computation of the lifting and installing process. According to the final geometric configuration, with consideration of the complexity of the interaction of each part of the cable-installing system and their influences on the structure, the objective geometric configuration was determined by inversely-disassembling method. According to the preliminary designed geometric configuration and all deflections induced by permanent loads and live loads, the length of each unstressed precast segment was determined. In light of the two installing methods of precast arch segments in construction, the method of iterative forward analysis and the method of rigid support and elastic cable were submitted respectively for the computation of installing coordinates and buckling-cable forces. The analysis result of a practical case indicates that the buckling-cable forces are very close by using the two approaches, while the installing coordinates differ much from each other. The obtained geometric configuration by the proposed method agrees quite well with the designed one.

Key words: bridge engineering; lifting and assembling of arch bridge; method of rigid support and elastic cable; arch axis control; method of iterative forward analysis; objective geometric configuration

收稿日期: 2008-12-16

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (05JJ30083)

作者简介: 邹中权 (1972-), 男, 湖南隆回人, 讲师, 博士研究生, 从事桥梁结构理论研究. (zouzhiq72@126.com)

0 引言

目前, 大跨度拱桥一般采用缆索吊装、扣索斜拉扣挂的方法进行施工^[1], 施工难度大, 且在施工过程中存在多次体系转换, 其受力结构、受力状态不断发生变化。因此, 有必要对其进行施工监控^[2-4], 确保拱圈线形, 并使每个施工阶段中结构的应力和变形状态都在安全范围之内。为了确保拱圈成桥线形符合设计要求, 吊装过程中扣索索力和各拱肋节段标高预抬量的计算是施工控制计算的重要任务。

在进行吊装过程分析时, 需要解决以下几个问题: (1) 建立符合安装时实际结构状的结构计算模型; (2) 确定合龙时的目标线形及拱圈无应力长度, 以便进行安装标高计算和节段预制加工; (3) 对安装过程进行正确的模拟计算。

关于吊装过程的扣索索力和拱肋节段标高预抬量的计算, 研究者提出了许多方法, 主要有零弯矩法、正装法(前进分析法)、正装迭代法、倒退分析法、正装法与倒退法联合使用、动态控制法、基于优化理论的方法等, 详见文献[5-8]。然而上述文献未对拱桥吊装过程分析中所需要解决的问题进行系统的论述。此外, 在拱圈预制节段进行安装时, 其就位过程存在两种不同的方法: 第1种方法即传统的方法, 当预制节段到达安装位置时, 通过循环放松吊索和张紧扣索使其就位, 直至扣索完全受力、吊索全部放松为止; 第2种方法是当预制节段吊至安装位置并就位时, 直接安装扣索, 逐步放松吊索, 但在放松吊索过程中不张拉扣索。显然, 这两种安装方法对预制节段标高预抬量的要求完全不相同。因此, 在进行吊装模拟计算时, 需要根据拱桥的实际施工过程进行正确的模拟, 以便得出科学的结果用于指导施工, 减少调索工作量^[9]。

1 结构计算模型

吊装过程中的整体结构是一个临时结构, 包括吊装系统、扣挂系统、稳定系统和主体结构(即拱圈预制节段)等几部分, 所涉及构件包括主拱圈、扣索、缆风索、吊装塔、扣塔(有些将吊装塔和扣塔合在一起)、背索、主缆等。这些构件之间的相互作用十分复杂, 如果要建立精确的计算模型, 是十分困难的。因此, 需要分别考虑各个系统在体系中的作用进行建模。对于吊装系统, 其主要作用是将预制节段起吊并运至预定位置进行安装, 当吊装塔和扣塔分离布置时, 其与其他部分完全分离, 因此在进行吊装过程分

析时, 完全可以将其忽略不计; 但当吊装塔和扣塔合二为一时, 行车在主缆上运行, 随着行车距两扣塔距离的变化, 扣塔水平位移发生变化, 进而影响已安装节段的标高和扣索索力。一般说来, 行车空载运行时影响很小, 可以忽略不计; 若吊有安装节段, 则影响比较大, 但在完全松钩、节段安装就位后基本上可以恢复, 因而也可予以忽略。对于扣挂系统, 其在合龙并拆除扣索前始终与主拱圈联接在一起, 与主拱圈一起受力, 因而必须在模型中加以考虑。对于侧揽风索, 由于刚度很小, 对标高预抬量和扣索索力影响很小, 因而建模时可以不考虑。

关于拱脚和墩台的联接方式, 大跨径拱桥为了减小拱脚弯矩, 一般在吊装过程中均保持为铰接, 在合龙后才封铰形成无铰拱, 因此必须按照实际情况建模。而吊装过程中节段之间的联接情况则较为复杂。对于当前吊装节段与已安装节段之间的联结, 一般来说, 当前节段自重完全作用于结构之前, 该节段要能绕前一节段前端自由转动, 以便进行标高调整, 在完全就位后再进行焊接, 而此时该节段自重已完全作用于结构上。因此, 在施加当前节段的自重时可以将其与已安装节段之间的联接处理为临时铰接点, 在安装完成后进行后续施工阶段计算时则处理成固结点。

2 合龙目标线形的确定

大跨度拱桥采用缆索吊装法进行施工时, 会涉及到几种不同的线形概念, 即设计线形、成桥线形、安装线形、制造线形等。设计线形即设计拱轴线, 为根据设计时所选定的几何参数计算所得的拱轴线。成桥线形则是施工完成时设置完预拱度后的线形。一般情况下设计线形与成桥线形不重合, 而是在经过一定时期的运营并考虑一定活载(一般为设计活载的一半)作用后两者才重合。安装线形(或称施工线形)是指在施工各阶段, 已施工节段各点之间连接而成的几何形状, 是一个动态线形, 其最终目标是使拱圈在施工完成时达到成桥线形。制造线形则是指无应力状态下结构的工厂预制线形。这几种线形是桥梁结构在不同阶段、不同受力状态下的几何表现形式。它们之间是相互关联的, 即制造线形经过一定的安装线形达到合龙后, 再经历拱上建筑施工、桥面系施工等阶段后达到成桥线形。因此, 拱桥的合龙阶段并不是最后的施工阶段, 其合龙时的线形并不是成桥线形。相反, 应当根据预定的最终成桥线形确定合龙时的目标线形。为了得到合龙目标线形, 可以采用倒拆法, 从成桥线形开始逐步拆除桥面系和拱上建筑, 得到拱圈合龙后

的线形(可称为裸拱线形),此即合龙目标线形。此外,为了达到预期目标,正确确定拱圈预制节段的制造线形也是一个关键问题。制造线形是拱圈在制造过程中无应力状态下的线形,由设计线形加上考虑了结构所有恒载挠度和活载挠度后的预拱度得到。桥梁结构的变形包括纵向变形和竖向变形两部分,但一般加工时均不考虑结构在桥轴纵向(X 方向)的变形。这对于跨度较小的桥梁是合适的,但是对于大跨度拱桥,节段在安装过程纵向产生的变形往往不可忽略。如果不在预制过程中预留变形量,也会导致线形误差。跨度越大,结构在纵向的变形量也越大。因此,计算中尚应给出水平坐标变化量,在加工制作时也应预先考虑桥轴向上的变形量,以保证合龙线形达到控制目标,并便于吊装过程的监控。

3 吊装过程模拟计算

目前,各种文献中对大跨度拱桥的缆索吊装过程进行理论分析时,一般只考虑了直接安装吊装节段和扣索、一次性放松吊索(下文均称为安装方法1)的情况,计算出拱圈在节段自重作用下所产生的挠度,然后据此确定各个吊装节段的预抬标高。然而,实际上大多数大跨度拱桥进行吊装施工时常常是通过循环张拉扣索和放松吊索使吊装节段安装就位的(下文均称为方法2)。显然两者对安装标高的要求是不相同的。方法1中当前吊装节段的自重直接作用于扣索-拱扣塔系统,结构在其自重作用下自由变形,预抬标高需考虑当前节段自重作用下的变形;方法2中在松完吊钩(即主缆真正不起作用)时已经实现了扣索的张拉和拱圈节段标高的调整,预抬标高只需考虑后续节段施工的影响。如果不考虑两者的差别进行计算,所设置的预抬量必定与实际不符,最后只能通过繁琐的调索程序来达到预定线形。因此,必须考虑实际的施工情况进行吊装过程计算。本文根据上述两种不同的安装方法,分别提出不同的模拟方法对吊装过程进行分析,以确定其扣索索力和预抬标高。

3.1 安装方法1的模拟计算

当采用一次性放松吊索(不张拉扣索)使拱肋节段就位时,当前节段和已施工节段均将在当前吊装节段自重的作用下产生位移。一般来说,由于拱桥吊装所采用的扣索截面积较小,长度较大,扣索刚度很小。因此,各节段的前端位移均较大,所引起的几何非线性影响较明显,需要采取迭代法进行计算。采用正装迭代法进行吊装过程计算的程序框图如图1所示。

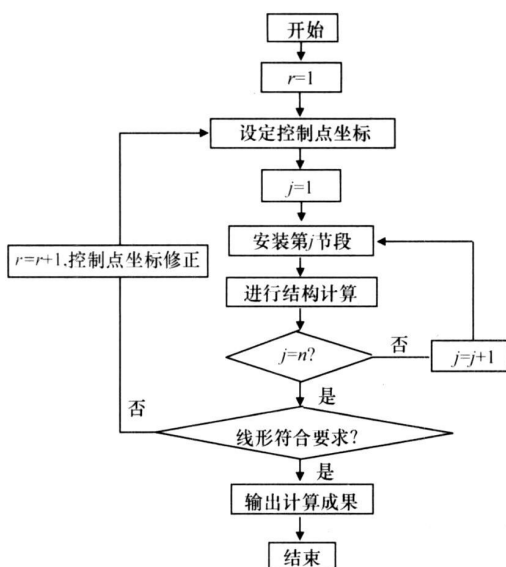


图1 正装迭代计算程序框图

Fig. 1 The flow chart of method of iterative forward analysis

首先假定各控制点的坐标变化量,并修正结构计算模型,然后按照拟定的节段安装过程进行正装计算,直至合龙并拆除扣索。比较所得到的合龙拱轴线和目标拱轴线,如果两者的差值在控制误差范围之内,则假定值即为所求,否则重新修正安装标高并按照上述过程进行计算,直至最后所得合龙线形与控制线形相符。迭代计算格式为:

$$\{x_r\} = \{x\} + \{\Delta x_r\},$$

$$\{\delta_r\} = \{x\} - \{x_r\}',$$

$$\{\Delta x_{r+1}\} = \{\Delta x_r\} + \{\delta_r\},$$

$$\text{收敛条件: } \{\delta_r\} \leq [\{\delta\}],$$

式中, $\{x\}$ 为拱轴线目标控制坐标; $\{\Delta x_r\}$ 为第 r 轮迭代计算所采用的预设坐标变化量; $\{x_r\}$ 为第 r 轮计算所采用的计算坐标; $\{x_r\}'$ 为第 r 轮正装计算后所得到的各点实际坐标; $\{\delta_r\}$ 为第 r 轮计算后实际坐标与目标坐标的差值; $[\{\delta\}]$ 为各坐标容许偏差。

计算时,可考虑由于大位移、初应力和拉索垂度效应等引起的几何非线性影响,只需将相应的程序段加入即可。

3.2 安装方法2的模拟计算

文献[10-11]提出采用刚性-弹性支承法进行吊装过程计算,即将当前吊装节段的扣索模拟为刚性支承,而将已施工节段的扣索模拟为弹性支承,但该方法存在无法考虑扣塔和扣索垂度影响、程序通用性不强等缺点。因此,对该方法进行适当修正,使其所考虑的因素更全面,并且只需要对现有施工控制分析

程序稍加修改即可应用。

由于拱圈节段就位时, 是通过循环放松吊索和张拉扣索使节段前端逐渐到达预定位置的, 而扣索张拉端所张拉出的长度已位于锚头之外, 不再参与结构作用, 因而当前节段自重不会使其前端发生位移, 即该位移已被所张拉出的扣索变形抵消。因此, 可以将其前端按照安装位置施加一沿扣索方向的刚性支承, 待安装完成后再将其拆除并恢复为实际索。该方法可称之为刚性支承-弹性索法。

需要注意的是, 由于当前吊装节段前端所加支座并非真实支座, 其支座反力将叠加至真实的扣索中, 与一般结构分析中拆除支座的算法有所不同, 不需要将支座反力反号施加到结构上, 因此需要对施工控制分析程序略加修改。

4 工程实例

南寨溪大桥是三板溪水电站库区复建公路上的一座大桥。该桥采用等截面钢筋混凝土箱形拱, $L_0=150\text{ m}$, $f_0=25.0\text{ m}$, 矢跨比为 $1/6$ 。拱轴线为悬链线, 拱轴系数 $m=1.347$ 。主拱圈横向由 5 个箱体组成, 通过纵、横联结构造形成闭合箱形拱圈, 总宽为 8 m 。每个箱体预制宽度 1.56 m (边箱 1.58 m), 预制箱高 1.95 m 。全桥立面布置如图 2 所示。该桥采用缆索吊装、斜拉扣挂法施工, 将每个拱箱纵向分成 5 大段, 从两岸向跨中逐段吊装并用扣索扣挂, 直至合龙。

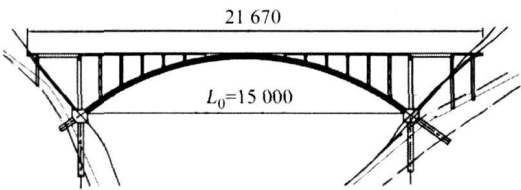


图 2 南寨溪大桥立面布置图 (单位: cm)

Fig 2 Elevation of Nanzhaixi Bridge (unit: cm)

图 3 是该桥缆索吊装系统布置示意图, 其主缆跨度 430 m , 采用吊装塔与扣塔一体化布置, 塔高 35.45 m 。各种构件计算参数见表 1。

表 1 结构计算参数表

Tab. 1 Structural parameters for computation

构件	材料	弹性模量/MPa	截面积/ m^2	抗弯惯性矩/ m^4
主拱圈	C40	3.5×10^4	0.806 8	0.429 4
扣塔	16Mn 钢	2.1×10^5	0.087 84	0.141 2
扣索	钢丝绳	75 600	0.001 7	0
扣塔背索	钢丝绳	75 600	0.002 1	0

分别计算了按照方法 1 和方法 2 进行安装时的控

制参数。其中方法 1 结构计算简图略, 方法 2 各阶段计算模型如图 4 所示。此外, 为了比较一次正装法和正装迭代法的差别, 在两种安装方法下分别进行了一次正装法和正装迭代法计算。计算结果见表 2。由于左右岸扣挂系统对称, 因而取结构的一半建立模型。同时, 为了简化分析, 假定拱上扣点与节段前 endpoint 重合。

表 2 南寨溪大桥吊装过程分析结果

Tab. 2 Analysis result of Nanzhaixi Bridge during lifting and assembling

项目		方法 1		方法 2	
		一次正装法	正装迭代法	一次正装法	正装迭代法
节段前端	I 段	45.2	44.9	11.3	10.8
预抬量/cm	II 段	105.7	98.7	1.2	1.0
节段前端水	I 段	-24.5	-25.1	-5.8	-5.6
平位移/cm	II 段	-32.7	-33.4	-2.5	-2.6
扣索索力/kN	I 号索	561	570	553	536
	II 号索	632	611	663	665

计算结果表明:

(1) 方法 1 的节段前端预抬量与水平坐标变化量比方法 2 大得多;

(2) 方法 2 的一次正装法和正装迭代法计算所得预抬量和水平坐标变化量相差比较大, 表明几何非线性影响比较明显; 方法 2 的一次正装法与正装迭代法的计算结果相差较小, 均在规范所规定的容许范围之内;

(3) 不管采用哪种安装方法, 对扣索索力的影响均不大。这是因为各扣索索力的主要来源是该扣索所扣挂节段的自重, 而进行安装时当前节段与上一节段之间一般为铰接, 即本节段可绕上一节段前 endpoint 产生刚体转动, 因此扣索张拉对扣索内力影响很小, 其差值主要来源于节段安装标高不同所导致的力矩变化。

南寨溪大桥最后采用方法 2 进行安装, 控制结果表明, 拱桥合龙线形达到预期目标, 各控制点的偏差均在规范容许范围之内^[12]。

5 结论

(1) 对于采用缆索吊装法施工的大跨度拱桥, 进行吊装过程计算时应根据实际情况建立模型, 确定目标线形, 对安装过程进行正确的模拟, 以确保拱轴线线形达到设计要求。

(2) 针对大跨度拱桥预制节段的一次放松吊索安装法和循环放松吊索并张拉扣索进行安装的方法, 分别提出正装迭代法和刚性-弹性索法对拱肋安装过程进行计算模拟。

(3) 对某拱桥吊装过程的分析结果表明, 采用一

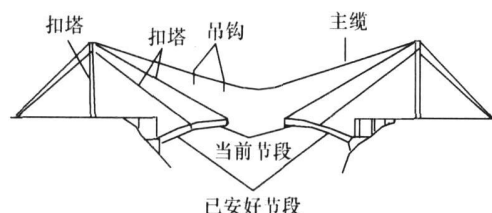


图3 吊装系统布置示意图

Fig. 3 Layout of the lifting and assembling system

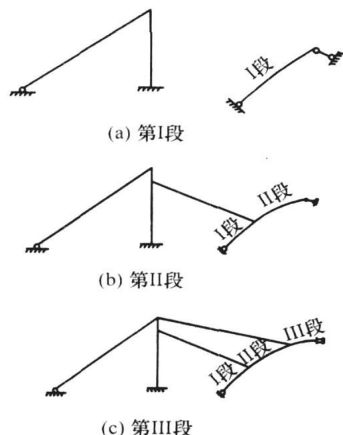


图4 各节段安装时的计算模型

Fig. 4 Computation model for each installation stage

次放松吊装法进行安装与采用循环放松吊索并张拉扣索进行安装相比,两者扣索索力相差不大,但前者所需要的拱肋标高预抬量比后者要大得多,因此应根据实际采用的安装方法选择合适的计算方法进行分析。

(4) 鉴于大多数缆索吊装施工的大跨度拱桥均是采用循环放松吊索并张拉扣索的方法安装预制拱肋,因此刚性-弹性索法在大跨度拱桥的吊装施工线形控制计算中适应性更强。

参考文献:

References:

- [1] 都昌林, 马学峰, 龚志刚. 大跨径无支架缆索吊吊装系统设计与施工 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (9): 74-77.
DU Changlin, MA Xuefeng, GONG Zhigang. Design and Construction of Long Span System with Non-standing Cable Hoists [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (9): 74-77.
- [2] 姚昌荣, 李亚东. 钢管混凝土拱桥线形控制技术研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (10): 67-73.
YAO Changrong, LI Yadong. Study of Alignment Control for Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (10): 67-73.
- [3] 邹中权, 贺国京. 大跨钢管混凝土拱桥施工监控研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27 (4): 71-75.
ZOU Zhongquan, HE Guojing. Research on the Construction Monitoring of Long-span CFST Arch Bridges [J]. Journal of Central South Forestry University, 2007, 27 (4): 71-75.
- [4] 涂光亚, 颜东煌, 袁明, 等. 多段悬臂拼装 RC 箱形拱桥施工控制研究 [J]. 中南公路工程, 2006, 31 (4): 89-92.
TU Guangya, YAN Donghuang, YUAN Ming, et al. Construction Control Research of RC Box Arch Bridge with Precast Segmental Cantilever Method [J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31 (4): 89-92.
- [5] 梅盖伟, 张敏, 周水兴. 用倒拆修正法计算拱桥施工扣索索力与预抬量 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28 (4): 199-202.
MEI Gaiwei, ZHANG Min, ZHOU Shuixing. Solution on Cable Force and Segmental Camber in Arch Bridge Construction by Modified Inverted Method [J]. Journal of Chongqing Jiao Tong University: Natural Science, 2009, 28 (4): 199-202.
- [6] 戴鹏, 谢功元, 郝宪武, 等. 大跨径钢管混凝土拱桥缆索吊装非线性分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29 (2): 114-117.
DAI Peng, XIE Gongyuan, HAO Xianwu, et al. Nonlinear Analysis of Cable-hoisting Construction of Long-span Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29 (2): 114-117.
- [7] 袁海庆, 范小春, 范剑锋, 等. 大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装预测的迭代前进算法 [J]. 中国公路学报, 2003, 16 (3): 48-57.
YUAN Haiqing, FAN Xiaochun, FAN Jianfeng, et al. Iterative Go-ahead Method of Rib-assembling Predicting for Long-span Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003 (3): 48-57.
- [8] 李传夫, 李术才, 魏建军, 等. 迭代优化算法在大跨拱桥线形控制中的应用 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38 (3): 23-27.
LI Chuanfu, LI Shucai, WEI Jianjun, et al. Application of the Iterative Optimum Method in Alignment Control of Long-span Arch Bridge [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2008, 38 (3): 23-27.
- [9] 元路宽, 陈占力, 宋建永, 等. 拱桥悬浇扣挂施工中最大悬臂状态下的索力调整 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (7): 82-85.
QI Lukuan, CHEN Zhanli, SONG Jianyong, et al. Optimization of Cable Forces before Joining during Cantilever Construction for Arch Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (7): 82-85.

- (3): 256– 261.
- LI Yanzhao, WANG Xiaojun, GUO Xiaohui, et al. Experimental Study on Anti-impact Properties of a Partially Prestressed Concrete Beam [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26 (3): 256– 261.
- [10] KISHIN, MIKAMI H, MATSUOKA K G, et al. Impact Behavior of Shear-failure-type RC Beams without Shear Rebar [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 955– 968.
- [11] ZINEDDIN M, KRAUTHAMMER T. Dynamic Response and Behavior of Reinforced Concrete Slabs under Impact Loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34: 1517– 1534.
- [12] 朱斌. 结构简化弹塑性撞击分析模型及新型防撞吸能器初步试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (2): 13– 17.
- ZHU Bin. Elasto-plastic Impact Model and Experimental Study of New Absorber for Structural Collision Protection [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (2): 13– 17.
- [13] 王蕊, 李珠, 任够平, 等. 钢管混凝土梁在侧向冲击荷载下动力响应的试验研究和数值模拟 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (10): 34– 40.
- WANG Rui, LI Zhu, REN Goupeng, et al. Experimental Study and Numerical Simulation of the Dynamic Response of Concrete Filled Steel Tubes under Lateral Impact Load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (10): 34– 40.
- [14] 刘建成, 顾永宁, 胡志强. 桥墩在船舶碰撞中的响应及损伤分析 [J]. 公路, 2002, (10): 33– 41.
- LIU Jiandeng, GU Yongning, HU Zhiqiang. Response and Damage of Bridge Pier during Ship-bridge Collision [J]. Highway, 2002 (10): 33– 41.
- [15] 陆新征, 张炎圣, 宁静, 等. 超高车辆与立交桥梁碰撞的高精度非线性有限元仿真 [J]. 石家庄铁道学院学报, 2007, 20 (1): 29– 34.
- LU Xinzheng, ZHANG Yansheng, NING Jing, et al. Simulation of Impact between Over-high Truck and Viaduct Based on High Precision Nonlinear Finite Element Analysis [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2007, 20 (1): 29– 34.
- [16] 叶贵如, 张治成, 黄翔, 等. 桥墩防船撞消能器动力性能的数值仿真分析 [J]. 中国公路学报, 2004, 17 (3): 68– 73.
- YE Guiru, ZHANG Zhicheng, HUANG Xiang, et al. Numerical Simulation Analysis of Dynamical Performance of Equipment Protecting from Ship-bridge Collision [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (3): 68– 73.
- [17] 于兴泉, 孙国强. 杭州湾跨海大桥北航道桥防船撞结构方案研究 [J]. 桥梁建设, 2006 (3): 8– 11.
- YU Xingquan, SUN Guoqiang. Study of Ship Collision Protection Structure Scheme for North Channel Bridge of Hangzhou Bay Sea-crossing Bridge [J]. Bridge Construction, 2006 (3): 8– 11.
- [18] 张伟东, 孙韶峰, 朱德功. 立交桥梁防冲撞装置的设计与使用 [J]. 铁道建筑, 2003 (1): 21– 22.
- ZHANG Weidong, SUN Shaofeng, ZHU Degong. Design and Use of Anti-collision Device Installed in the Grade Separation Bridge [J]. Railway Engineering, 2003 (1): 21– 22.

(上接第 82 页)

- [10] 田仲初, 陈得良, 颜东煌, 等. 大跨度拱桥拱圈拼装过程中扣索索力和标高预抬量的确定 [J]. 铁道学报, 2004, 26 (3): 81– 87.
- TIAN Zhongchu, CHEN Deliang, YAN Donghuang, et al. Determination of the Buckling Cable-force and Precamber in the Process of Assembling Arch Ring Segments of A Long-span Arch Bridge [J], Journal of China Railway Society, 2004 (3): 81– 87.
- [11] 陈得良, 缪莉, 田仲初, 等. 大跨度桥梁拱肋悬拼时扣索索力和预抬量计算 [J]. 工程力学, 2007, 24 (5): 132– 137.
- CHEN Deliang, MIAO Li, TIAN Zhongchu, et al. Calculation of the Cable-stayed Force and Precamber in the Process of Assembling Arch Bridge Segments [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (5): 132– 137.
- [12] 中华人民共和国交通部. JTG F80/1-2004 公路工程质量检验评定标准 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- P. R. China. Ministry of Communications. JTG F80/1-2004 Standards of Quality Inspection and Evaluation for Highway Engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.