

# 泰州大桥中间塔鞍座抗滑安全评估

阮欣<sup>1</sup>, 阮静<sup>2</sup>, 陈艾荣<sup>1</sup>, 郭济<sup>1</sup>

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092; 2. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 泰州 225321)

**[摘要]** 在分析鞍座抗滑机理的基础上, 建立了基于最大静摩擦系数的三塔悬索桥中间塔鞍座抗滑基本评估模型, 并发展了多种鞍座抗滑评估方法。包括基于目前使用的设计规范评估鞍座抗滑安全的确定性方法; 基于静态车辆数据合成随机车流, 并利用 Rice 公式外推其荷载效应极值, 进而研究鞍座抗滑安全性能的评估方法; 以及基于车辆荷载效应和抗力概率模型的鞍座抗滑概率评估方法。用上述三种方法分别对泰州大桥鞍座抗滑安全性进行全面评估, 表明泰州大桥中塔鞍座抗滑安全可靠。

**[关键词]** 三塔两跨悬索桥; 中间塔鞍座; 确定性评估; 概率评估

**[中图分类号]** TU 311.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0071-04

## 1 前言

泰州大桥为主跨  $2 \times 1\,080\text{ m}$  的三塔两跨悬索桥, 两个主跨在运营过程中的不平衡加载工况是影响此类桥梁结构安全的关键。车辆荷载以不对称形式作用于两相邻主跨时, 中间塔将有向较大加载侧变形的趋势, 使得桥塔两侧主缆力和几何形状发生变化, 引起体系内力重分配, 影响整体结构性能; 而在局部构件层面, 不对称的车辆荷载将使中间塔鞍座(见图 1) 两侧受到不平衡的主缆拉力作用, 这部分不平衡拉力需由鞍座与主缆之间的静摩擦力平衡。随着主跨跨径的增加, 两侧不平衡力将快速增大, 如何评估中塔鞍座与主缆之间的安全性及其储备, 成为了泰州大桥这样超大跨径多塔悬索桥设计中的关键问题之一。

现有设计规范中, 鞍座抗滑安全性主要通过限定摩擦系数的安全储备保证<sup>[1]</sup>, 计算过程一般采用规范统一的车辆荷载标准和加载模式。这种方法能够满足两塔悬索桥的安全验算的要求, 但在泰州大桥这样的超大跨径多塔悬索桥中的适用性仍需探讨。

以下将尝试泰州大桥分别基于现有设计规范、预测车辆荷载极值以及概率评估等多种方法, 对泰

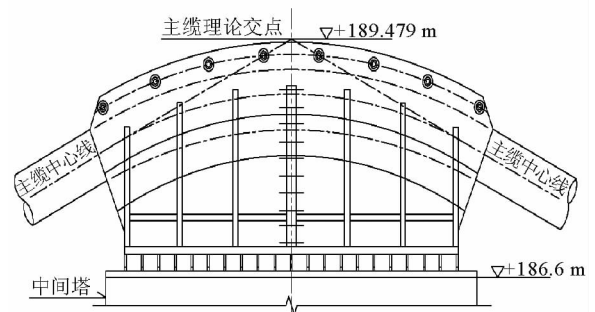


图 1 中间塔鞍座立面示意图

Fig. 1 Scheme of the saddle on middle pylon

州大桥中间塔鞍座的抗滑安全性进行研究。

## 2 中间塔鞍座与主缆的相互作用机理

泰州大桥是主跨对称布置的三塔悬索桥, 其中间塔鞍座与主缆的基本力学模型如图 2 所示。在恒载、温度等作用下, 中间塔两侧主缆力的水平分量相等、主缆切线方向相同, 其鞍座与主缆间没有相对滑移趋势; 但当两个主跨作用不对称荷载时, 中间塔鞍座两侧主缆水平分力不同, 出现相对滑移趋势, 当不平衡水平力超过鞍座与主缆间的静摩擦力时, 主缆

**[收稿日期]** 2012-03-15

**[基金项目]** 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B02); 交通运输部 2008 年度省部联合攻关项目(2008-353-332-170); 国家自然科学基金资助项目(51108338)

**[作者简介]** 阮欣(1977—), 男, 浙江上虞市人, 同济大学讲师, 博士, 主要从事桥梁工程研究; E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn

和鞍座将出现相对滑动,引起整体失衡。在运营过程中车辆荷载是引起主缆不平衡力的主要原因,是可能导致鞍座滑移的最主要因素。

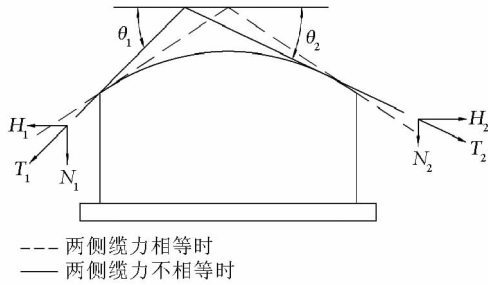


图2 鞍座与主缆的力学模型

Fig.2 Mechanical model of saddle and main cable

现有规范中给出了主缆与鞍座间名义摩擦系数  $\mu$  的计算公式,并将其与塔顶主缆抗滑安全程度的衡量指标——主缆抗滑安全系数  $K$  分别表示为

$$\mu = \ln(T_1/T_2)/\theta \quad (1)$$

$$K = f/\mu = f\theta/\ln(T_2/T_1) \quad (2)$$

式(1)、(2)中,  $T_1$  为主缆的紧边缆力;  $T_2$  为主缆的松边缆力;  $\theta$  为主缆与鞍座的包角;  $\mu$  为保持内力平衡所需的摩擦系数,其值应小于主缆和鞍座材料间的最大静摩擦系数  $f$ 。

这一模型已在众多传统两塔三跨悬索桥的设计中得到了应用,这类悬索桥鞍座两侧不平衡水平力范围有限,鞍座滑移一般不是设计的控制性问题。因此规范通过规定偏保守的摩擦系数及相应的安全系数来保证鞍座与主缆间的抗滑能力,一般取主缆与鞍槽间最大摩擦系数  $f$  为 0.15,主缆抗滑安全系数  $K$  为 2。考虑到鞍座抗滑问题对于泰州大桥的重要性,大桥设计过程中通过试验实际验证了鞍座与主缆间最大静摩擦系数平均值为 0.53<sup>[2]</sup>,可作为后续研究和评估过程的参考。基于以上试验数据,泰州大桥设计过程中规定主缆与鞍座间的最大摩擦系数  $f$  取 0.2,相应的抗滑安全系数  $K$  不小于 2<sup>[2]</sup>。

### 3 基于现有规范的确定性评估

首先考虑在现有设计规范的基础上进行鞍座抗滑性的评估。选取 D60 规范<sup>[3]</sup>、AASHTO 规范<sup>[4]</sup>、BS 规范<sup>[5]</sup>、Eurocode<sup>[6]</sup>等目前使用的规范,结合泰州大桥的结构特点,选取响应的设计车辆荷载取值、加载模式及各种组合和折减系数。

计算结果如表 1 所示。D60 规范荷载作用下的

中间塔鞍座抗滑安全系数最小值为 3.29,满足规范中  $K \geq 2$  的相关规定;对于其他规范,除按 Eurocode 荷载计算得到的抗滑安全系数(1.32)较低外,AASHTO、BS5400 荷载作用下的抗滑安全程度也较高,分别为 2.64 和 2.80。Eurocode 中特别说明其车辆荷载适用于加载长度不大于 200 m 的公路桥梁设计,对于加载长度大于 200 m 的设计,该荷载模式是安全的,泰州大桥的加载长度远远大于这一要求。

表 1 基于规范荷载模型的抗滑安全评估

Table 1 Design code-based safety assessment

规范	$\mu$	$K$
D60	0.060 8	3.29
AASHTO	0.075 7	2.64
BS5400	0.071 4	2.80
Eurocode	0.151 8	1.32

上述比较也说明,依据各国规范荷载计算得到的抗滑安全性存在差异。造成差异的主要原因是不同规范的荷载取值标准和组合方法不同。因此,有必要根据桥梁运营期内的实际工作状况,进行深入研究。

### 4 基于预测车辆荷载极值的评估

建立特定地点(site-specific)的车辆荷载模型<sup>[7]</sup>是近年来车辆荷载研究的最近方法。其基本过程是基于动态称重(WIM)系统的实测车流数据开展车流模拟,统计得到荷载及其响应特性<sup>[7,8]</sup>。泰州大桥尚处施工阶段,难以采集实桥车流数据,考虑到附近区域的收费站静态车辆数据以及高速公路的交通流数据相对充足,可以将静态的车辆数据与交通流数据合成为模拟车流(以下简称合成车流)<sup>[2]</sup>。结合荷载效应影响面,进一步计算得到相应的荷载效应时程,再利用 Rice 公式外推合成车流获得的极值特性<sup>[9]</sup>,实现对真实车辆荷载运营水平下中间塔鞍座的抗滑安全评估。

泰州大桥 2030 年的预测实际交通量约为 10 万辆/日,分别对 2 万辆/日~10 万辆/日内 5 种交通流量下的桥上车流进行模拟,计算相应的车辆荷载效应,并利用 Rice 公式外推得到不同流量下、不同重现期内有关中间塔鞍座抗滑的车辆荷载效应极值。图 3 为日均交通流量 2 万辆/日时鞍座抗滑平衡摩擦系数  $\mu$  的外推极值。其中,100 年一遇的车辆荷载分布情况对应的摩擦系数为 0.120 08,500 年一遇为 0.129 51,1 000 年一遇为 0.13346。可以看出,摩擦系数随重现期增长而增大,对结构极为不利的荷载效应出现概率相对较小。

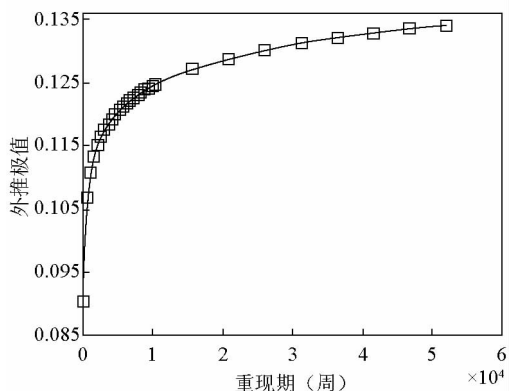


图3 荷载效应极值外推(2万辆/日)

Fig.3 Load extrapolation (20 000 units / d)

用相同方法对交通流量(4、6、8、10)万辆/日下的情况进行外推,所得1 000年一遇的荷载效应极值依次为0.192 28、0.382 1、0.252 28和0.183 58。图4为不同交通流量和重现期下,车辆荷载分布情况对应的平衡静摩擦系数极值,其值均未超过泰州大桥的设计规定0.4,且远小于试验测定的鞍座最大摩擦系数0.53。

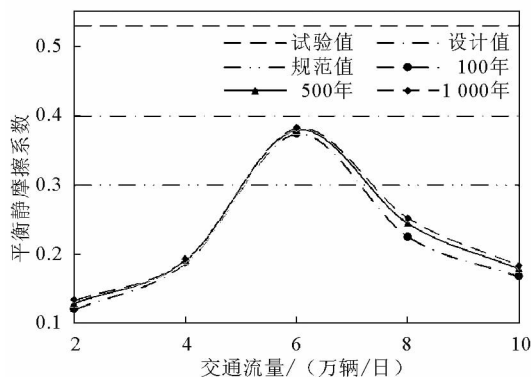


图4 不同交通流量下的荷载效应极值

Fig.4 Friction coefficient with different traffic volume

## 5 基于概率方法的可靠度评估

中间塔鞍座抗滑安全是指通过鞍座提供充足的静摩擦力以平衡两侧主缆的拉力差,来确保鞍座与主缆间不发生相对滑动,即中塔两侧不平衡荷载所导致的平衡静摩擦系数不能大于鞍座与主缆间的最大静摩擦系数。据此可以建立有关中间塔鞍座抗滑性能的极限状态方程:

$$Z(R, S) = R - S = f - \mu = f - \frac{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\theta} = 0 \quad (3)$$

式(3)中, $Z$ 为安全域函数,当 $Z < 0$ 时结构处于失效状态; $R$ 为结构抗力; $S$ 为荷载效应;对于中塔鞍座的抗滑评估,两者分别对应最大静摩擦系数 $f$ 与平衡静摩擦系数 $\mu$ 。

基于前述合成车流模拟方法得到桥跨范围指定时间域内,中间塔鞍座与主缆间平衡静摩擦系数 $\mu$ 的时程,经概率统计分析可建立荷载效应 $S$ 的概率模型。计算表明,2万辆/日、4万辆/日、6万辆/日、8万辆/日、10万辆/日下车辆荷载效应的概率模型分别服从 $\lambda = 170.8、66.4、45.83、33.04、29.1$ 的指数分布。

对于中间塔抗滑安全的可靠度评估,还需计算最大静摩擦系数 $f$ ,以建立结构抗力 $R$ 的概率模型:

$$R = KR_k \quad (4)$$

式(4)中, $R_k$ 表示最大静摩擦系数的标准值,其取值应能体现鞍座真实的极限抗滑移能力,可根据鞍座与主缆间最大静摩擦系数的试验结果取 $R_k = 0.53$ ;  $K$ 综合表达材料性能、环境温度、湿度、其他环境因素以及计算模式不定性的影响,可取为均值0.99、变异系数0.06的正态分布随机变量<sup>[10]</sup>。中间塔鞍座一旦与主缆发生相对滑动,可能造成大桥整体形态的持续改变,严重威胁桥梁安全,甚至导致结构体系失效,是结构体系的关键构件,参考国内外现行不同规范中规定的目标可靠指标<sup>[11]</sup>,取目标失效概率 $P_f$ 为 $1 \times 10^{-6}$ (相应目标可靠指标 $\beta$ 等于4.75)为其设计标准。

根据表2的评估结果,不同交通流量下泰州大桥的抗滑失效概率均低于评估中设定的目标失效概率 $P_f = 1 \times 10^{-6}$ ,现有设计能够满足2万辆/日~10万辆/日交通流作用下中间塔鞍座的抗滑安全需求。若将鞍座的失效概率转化为相应的可靠指标 $\beta$ ,可以发现其值随交通流量的增大逐渐降低,但变化速率随交通量的增大逐渐趋缓。这可能是由于当交通流量逐渐增长时,中塔两侧桥跨上出现的不平衡荷载增加,但当交通流量达到一定程度后,桥上车辆趋于密集,较大不平衡荷载的出现概率逐渐降低,于是相应的可靠指标变化也趋于平缓。

表2 中间塔鞍座抗滑安全的可靠度评价

Table 2 Reliability-based safety assessment

交通流量/(辆·日 <sup>-1</sup> )	$P_f$	$\beta$
20 000	$< 1E-15$	$> 8$
40 000	$4.66E-15$	7.748 2
60 000	$7.97E-11$	6.396 1
80 000	$4.24E-08$	5.356 8
100 000	$3.03E-07$	4.989 5

## 6 结语

研究通过基于规范的确定性评估、基于合成车流的极值预测以及概率方法,对泰州大桥运营过程中钟塔抗滑安全进行了全面的评估和分析。结果表明,虽然各种方法得到的评估结果在数值上有一定差异,但均能满足运营期间的抗滑安全性要求。

该研究也说明:车辆荷载对多塔悬索桥结构性能有显著影响,目前的规范中相关规定亟待改进。结合多塔悬索桥的结构特性,深入开展车辆荷载模型的研究是一项非常重要和紧迫的研究工作。

### 参考文献

- [1] 公路悬索桥设计规范(JTJXXX—2002)[S]. 北京:中华人民共和国交通部,2002.
- [2] 阮欣,等. 中间塔索鞍与主缆相互作用机理及其抗滑安全性研究[R]. 同济大学,江苏省长江公路大桥建设指挥部,2011.
- [3] 公路桥涵设计通用规范 JTC D60—2004[S]. 中华人民共和国交通部,2004.

- [4] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2005 Interim Revisions)[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005.
- [5] BS 5400-2: Specification for Loads[S]. British Standards Institution, 2006.
- [6] Eurocode1 Part2: Traffic Loads on Bridges[S]. European Committee for Standardization, 2003.
- [7] Getachew A, O'Brien E J. Simplified site - Specific traffic load models for bridge assessment [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2007, 3(4):303-311.
- [8] O'Connor A, O'Brien E J. Traffic load modeling and factors influencing the accuracy of predicted extremes [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(1):270-278.
- [9] Cremona C. Probabilistic approach for cable residual strength assessment [J]. Engineering Structures, 2003, 25(3):377-384.
- [10] Ruan Xin, Guo Ji, Chen Airong, et al. Middle Pylon Safety Assessment for Three - Pylon Suspension Bridge [C]//IABSE - IASS - 2011 Symposium, London, 2011.
- [11] O'Brien E J, Znidaric A, Brady K C, et al. Procedures for the assessment of highway structures[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2005, 158(1):17-25.

## Anti-sliding safety assessment for main saddle on middle tower of Taizhou Bridge

Ruan Xin<sup>1</sup>, Ruan Jing<sup>2</sup>, Chen Airong<sup>1</sup>, Guo Ji<sup>1</sup>

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China)

**[Abstract]** In this paper, the basic model of main cable slip between saddles is established. Three methods to assess the safety of saddle sliding on middle tower of the Taizhou Bridge are presented based on this model. The first assessment method is deterministic, which is based on live load model of design codes. Several design codes models are used, and assessment results are compared. In the second method, the uncertainty of traffic load is considered in a more accurate way. Random traffic flow simulation model is developed to simulate real traffic situation on the bridge. Extreme value of unbalance force is obtained by extrapolation methods based on Rice formula. The last assessment method is probabilistic based method. The probabilistic model of load effect and structure resistance is established, and reliability index of anti-sliding safety is calculated. All three assessment results indicate that the middle tower saddle of the Taizhou Yangtze River Bridge is safe and reliable.

**[Key words]** three-tower two-span suspension bridge; middle tower saddle; deterministic assessment; probabilistic assessment