

独塔斜拉桥拉索更换方案及其受力分析研究

刘 鹏^{1,2}, 葛志永³, 刘亚强^{1,2}

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司天津分公司, 天津市 300042; 3. 唐山市曹妃甸区市政园林工程有限公司, 河北 唐山 063200]

摘 要: 以河北省唐山市某跨海独塔单索面斜拉桥为研究背景, 通过对其实际情况的分析, 针对不同的换索顺序和交通组织方案进行论证。设计了4种不同换索工况, 并计算了不同换索工况下的索力变化值、主梁应力变化值、主梁挠度变化值、主塔内力变化值。分析结果表明, 单根索释放的索力主要由邻近范围内的拉索承担, 不同位置的索对全桥的受力影响有较大差异性。分析结果可为换索方案的优化和换索全过程提供指导。

关键词: 斜拉桥; 独塔; 换索; 施工顺序

中图分类号: U443.38

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0124-05

Research on Cable Replacement Scheme and Force Analysis of Single-pylon Cable-stayed Bridge

LIU Peng^{1,2}, GE Zhiyong³, LIU Yaqiang^{1,2}

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. SMEDI Tianjin Branch, Tianjin 300042, China; 3. Tangshan Caofeidian District Municipal Landscape Engineering Co., Ltd., Tangshan 063200, China]

Abstract: Taking a cross-sea single-pylon single-plane cable-stayed bridge in Tanshan City of Hebei Province as the research background, through the analysis of its actual situation, the different cable replacement sequences and the traffic organization schemes are discussed. Four different cable replacement conditions are designed. And the changes in cable force, main girder stress, main girder deflection and main pylon internal force under the different cable replacement conditions are calculated. The analysis results show that the cable force released from a single cable is mainly borne by the cables within the adjacent range, and the influence of cables at different positions on the force of the entire bridge is significantly different. The analysis results can provide the guidance for the optimization of cable replacement schemes and the whole process of cable replacement.

Keywords: cable-stayed bridge; single pylon; cable replacement; construction sequence

0 引 言

斜拉桥是由塔、梁、索组合而成的空间结构, 其结构体系是决定斜拉桥受力的主要因素, 影响了上下部的传力途径和内力分配, 并决定了桥梁的整体规模^[1-2]。拉索作为斜拉桥重要的传力构件, 其安全使用将直接影响斜拉桥的正常使用寿命^[3-4]。

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定斜拉索等可更换受力构件的设计使用年限不低于20 a。目前国内斜拉索使用寿命大约为20~30 a^[5]。斜拉索经过一段时间的运营后, 通常会出现一系列

问题, 诸如斜拉索索体腐蚀、索体疲劳损坏、锚具锈蚀、斜拉索套管老化等^[6-7]。随着时间的推移和使用频率的增加, 拉索的老化和损伤不可避免, 因此研究拉索更换方案及其受力分析具有重要的现实意义。

跨海斜拉桥完全处于海洋环境下, 拉索容易受到腐蚀、疲劳等因素的影响, 从而降低桥梁的安全性和耐久性^[8-10]。为了保障桥梁的正常运行, 及时更换受损拉索至关重要。

1 工程概况

河北省唐山市曹妃甸区某斜拉桥为独塔单索面组合箱形梁斜拉桥, 跨径布置为138 m+138 m。塔梁墩分离体系, 塔总高约120.4 m。斜拉桥主梁采用单箱3室钢混组合梁, 其中钢梁部分高3.55 m, 混凝土

收稿日期: 2024-12-09

作者简介: 刘鹏(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路桥梁设计工作。

通信作者: 刘亚强(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路桥梁设计工作。电子信箱: liuyaqiang@smedi.com

板厚 0.45 m。横隔板间距为 3.5 m。标准段内腹板与外腹板之间的横隔板采用空腹式,内设圆管钢桁杆件;塔处及边墩处梁段横隔板采用实腹式^[11]。组合梁两侧的挑臂为混凝土板,板长 4 m,板厚为 0.26 m。组合梁桥面板采用纵、横向预应力体系。钢主梁与混凝土桥面板之间采用焊钉连接。组合钢箱梁标准横断面图见图 1。

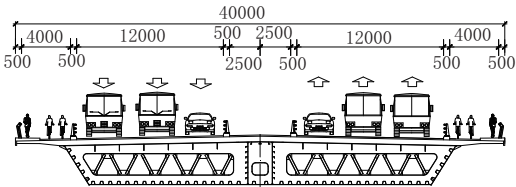


图 1 组合钢箱梁标准横断面图(单位:mm)

拉索采用扇形单索面布置,主桥桥塔两侧各布置 16 对,全桥共 64 根斜拉索。斜拉索梁端顺桥向间距 7 m,塔端竖向间距 2 m,横桥向成对布置,间距 1.1 m^[11]。斜拉索护套采用双层高密度聚乙烯防护。该桥索体采用平行钢丝斜拉索,整索张拉,张拉端设置在塔内。最长斜拉索为 145 m,单根最大质量约 10.8 t。斜拉桥立面图及拉索编号见图 2。

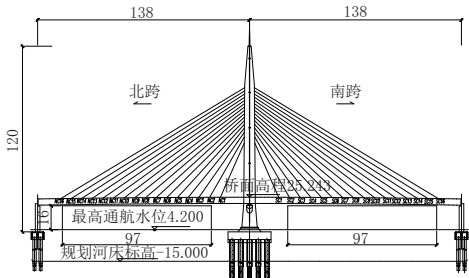


图 2 斜拉桥立面图及拉索编号(单位:m)

该桥上跨纳潮河,100 a 一遇高潮水位 4.47 m,设计最高通航水位 4.2 m,通航孔净高 15.5 m,双孔双向通航净空宽度各 97 m。

由最近几次斜拉桥检测结果可知,部分长索和短索索力检测值与设计值差距较大,且拉索索头锚具等锈蚀严重,斜拉索 PE 护套有开裂现象,因此对全桥斜拉索及配件进行更换。该桥主梁为组合梁,混凝土板经过多年的收缩徐变,对拉索索力造成了一定影响。另外,该桥在建成以后,施工和成桥资料遗失,研究过程中缺少施工成桥索力,这也是导致检测索力与设计索力偏差较大的原因。原斜拉索设计抗拉强度为 1 670 MPa,由于该桥为当地主要的货运通道,重载车辆占比很大,为提高拉索的承载能力,本次换索将斜拉索抗拉强度提高至 1 770 MPa,拉索疲劳应力幅提高至 250 MPa。

2 换索方案设计

斜拉索经过一段时间的运营,受外界各种不利因素的影响,拉索通常会出现不同程度的病害。尤其在海洋性气候等腐蚀环境下,拉索的病害更加严重,会影响拉索的安全和使用,此时需要对病害拉索进行拆除和更换^[12-13]。

2.1 换索顺序

斜拉桥的拉索分为长索和短索。短索位于近塔端,长度短,索力小;越往外,索长逐渐增长,索力逐渐加大^[14]。换索顺序可以分为从远塔到近塔(长索到短索)、近塔到远塔(短索到长索)2 种顺序。由于在更换长索时,旧索拆卸和新索吊装都会对下侧短索造成一定影响,而短索更换对长索影响较小^[15-16],为了防止换索施工时破坏已换新索,斜拉索的更换顺序应从上到下^[17-18]。因此,该项目设计的换索顺序是从远塔到近塔(长索到短索)。

2.2 交通组织方案

换索期间要封锁或限制交通,以保证客运安全(包括交通车辆、行人及施工人员本身的安全),也要保证斜拉桥换索期间结构和施工安全。因此换索施工有以下几种施工和交通组织方案。

方案一为封闭上下行内侧各 2 条车道(共 4 条车道)作为施工区域,上下行最外侧机动车道采取限行措施(禁止 5 t 以上货车通行)。为保护通行车辆和行人安全,在换索作业区段内设置防护网。

封闭部分车道换索断面图见图 3。

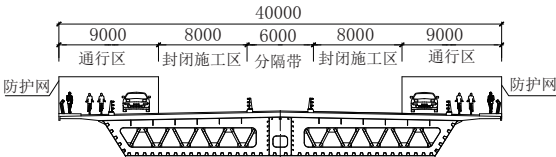


图 3 封闭部分车道换索断面图(单位:mm)

方案二为完全封闭交通,只允许施工车辆上下桥梁。将原斜拉桥上交通车辆疏导至周边路网。

方案三为夜晚断交施工,白天保证交通运行。

3 种方案各有优缺点。方案一能保证施工期间必要的车辆通行,但施工周期较长,施工期间需要安排专人进行安全引导,并需要做好安全防护措施,保证施工安全,对施工单位现场管理要求高^[19]。方案二工期短,施工空间大,但施工过程需要完全封闭交通,对当地的交通压力影响较大。方案三能够保证施工期间安全,也能满足白天的交通需求,但是施工周期最长。

当地以货运重载交通为主,白天和夜间车流量均较大。方案一的限行和方案三的夜间施工均不能很好地解决施工期间的交通堵塞和货车通行问题。考虑当地实际情况,并与交通管理部门沟通,最终采用方案二,即在施工期间完全中断交通,以保障施工进度和施工安全,同时将原道路交通车辆疏引至东侧中山路。

3 换索过程分析

3.1 计算模型

本文桥梁模型采用MIDAS CIVIL软件进行分析计算,其中下部结构采用梁单元,主梁采用联合截面梁单元,拉索采用仅受拉的桁架单元^[20]。全桥模型单元共计223个,其中梁单元159个,桁架单元64个;节点共计266个。

主桥为塔梁墩分离体系,主塔与主梁连接处采用活动支座和横向抗风支座,边墩采用活动支座和横向限位^[21]。

斜拉桥成桥阶段全桥结构计算模型见图4。

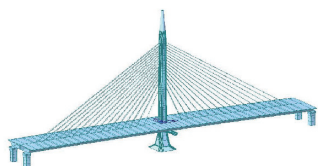


图4 斜拉桥成桥阶段全桥结构计算模型

3.2 计算工况

该项目中拉索采用扇形单索面布置,主桥桥塔两侧各布置16对,横桥向成对布置,全桥共64根斜拉索。主塔两侧拉索对称布置,且塔单侧并排2根拉索相同。基于最不利原则,选取4对具有代表性的斜拉索进行换索计算,并分析这4种换索工况对全桥受力的影响。

(1)工况1:拆除NC16/NS16拉索。该对索为全桥最长的拉索,也是索力最大的拉索。

(2)工况2:拆除NC12/NS12拉索。该对索位于1/4跨处,索力较大。

(3)工况3:拆除NC9/NS9拉索。该对索位于主跨跨中,索力也较大。

(4)工况4:拆除NC1/NS1拉索。该对索紧邻主塔,塔侧无索区约19 m^[22]。

单根平行钢丝索更换时间一般为1 d。该项目换索期间中断全部交通,所以不考虑活载的影响,仅考虑恒载、温度、风载和施工荷载。换索施工组合=恒载+温度+风荷载+换索施工荷载(桥上支撑、塔吊

等施工机械)。

3.3 索力变化

4种换索工况下,全桥拉索的索力变化见图5至图8。其中索力变化值为拆除1对索后全桥索力与未拆除前全桥索力的差值。

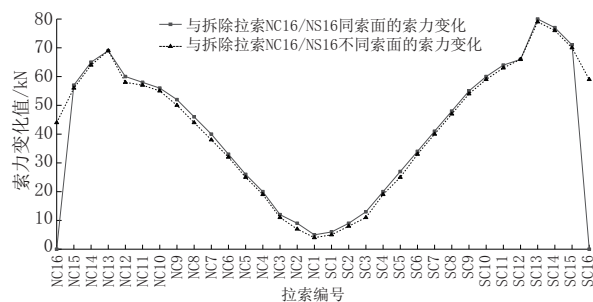


图5 拆除NC16/NS16拉索后全桥索力变化图

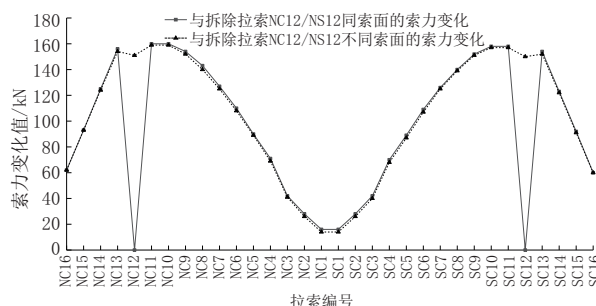


图6 拆除NC12/NS12拉索后全桥索力变化图

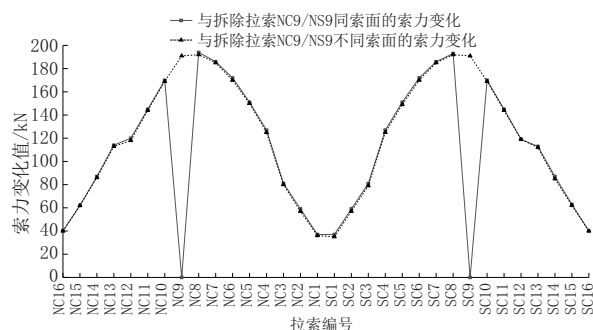


图7 拆除NC9/NS9拉索后全桥索力变化图

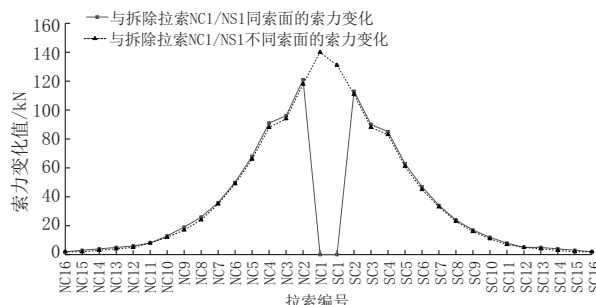


图8 拆除NC1/NS1拉索后全桥索力变化图

拉索更换前与更换过程中全桥恒载索力值见图9、图10。其中图9为与拆除索同一索面的索力值;图10为与拆除索不同索面的索力值。

由图5至图10可知,对于独塔单索面斜拉桥换索过程,可以得出以下结论:

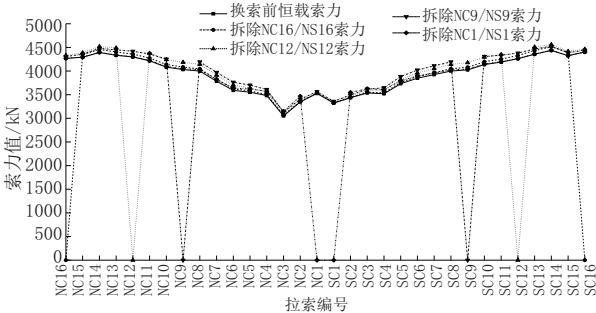


图9 换索前与换索中索力对比图(与拆除索同索面)

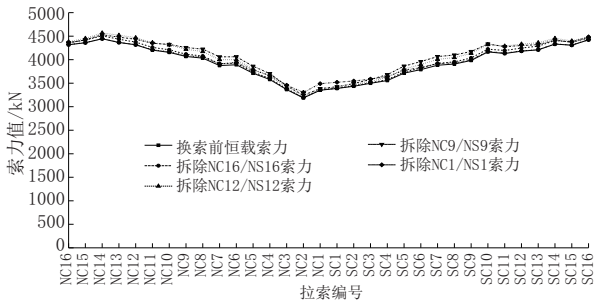


图10 换索前与换索中索力对比图(与拆除索不同索面)

(1) 拆除任何 1 根拉索,均会引起全桥拉索索力的变化,但索力变化均不大,拆除过程中最大索力变化值约为成桥索力的 4.9%;拆除拉索释放的索力,主要由拆除索邻近范围内的拉索承担,分配到每根拉索的索力并不大^[23-24]。

(2) 中间索 NC9/NS9 的成桥索力并非最大,但其拆除对周边索力的影响最大,最大索力变化达到 194 kN;NC12/NS12 拉索影响次之。

(3) 随着拉索与主塔距离缩短,索力逐渐减小,对周围索的索力影响也逐渐降低。拆除 1 对拉索引起的索力变化影响范围约在 1/2 跨范围内^[25-26]。

(4) 索力拆除对同索面的影响略大于不同索面,但是差值很小。由于该桥 2 个索面在同一个索塔锚固,间距仅 1.1 m,可认为桥面偏载对 1 对索受力影响是相同的^[27]。

3.4 主梁应力、挠度变化

拆索过程会引起钢梁应力、挠度的变化。图 11、图 12 为 4 种换索工况下钢梁应力和挠度变化图。

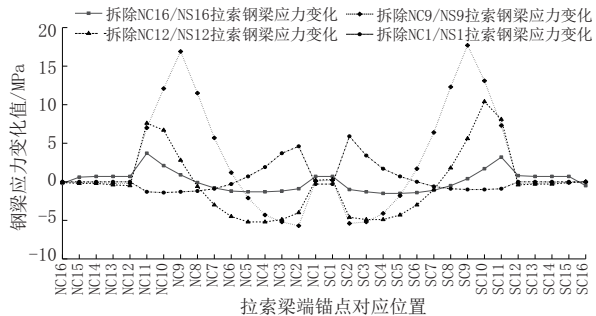


图11 4种换索工况下钢梁应力变化图

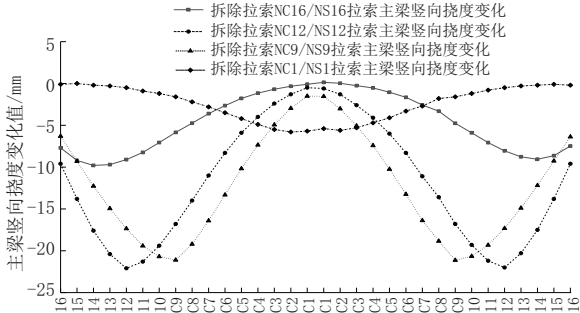


图12 4种换索工况下主梁挠度变化图

由图 11、图 12 可知,拆除 NC9/NS9 拉索对主梁应力和挠度影响最大。NC9/NS9 拉索位于梁中间位置,两侧均有拉索约束。在成桥状态下,该处应力较大。拆除 NC9 拉索后,该处变形增加最多,导致其应力变化最大。主梁应力变形趋势也与拉索索力变化一致。

拆除拉索对钢梁应力主要影响范围集中在 NC12~NC3 之间,该范围在主梁 1/4~3/4 之间,也是成桥状态下主梁应力较大的区域。

3.5 主塔内力变化

拆除拉索过程中,会引起主塔内力的变化。图 13 为不同换索工况下主塔内力变化值。桥面以上主塔总高 103 m。恒载作用下,主塔在拉索锚固区以上的部分所受弯矩很小,本文主要研究桥面以上到拉索锚固区以下部分主塔。

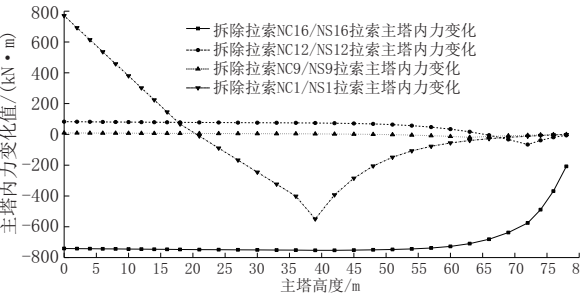


图13 4种换索工况下主塔内力变化图

由图 13 可知,拆除长索 NC16/SC16 和短索 NC1/SC1 对主塔内力影响较大,中间索 NC12/SC12 和 NC9/SC9 对主塔内力影响较小。长索与短索位于主塔的两端,索力的变化能够使主塔产生较大变形,主塔内力进而发生较大变化。中间索的锚固区间隔很近,可以认为多个约束之间距离很近。单组索的拆除,对相邻拉索索力影响远大于对塔底内力的影响。

3.6 换索结果

换索过程中全桥主要构件验算结果见表 1。

由表 1 可知,在换索的不利工况中,拉索最小安全系数为 2.67,大于 2.0,满足原规范(《公路斜拉桥

表1 换索过程中全桥主要构件验算结果

验算项目	拆除 NC16	拆除 NC12	拆除 NC9	拆除 NC1
钢梁应力/MPa	104.9	104.7	105.3	105.6
主塔应力/MPa	11.5	11.4	11.3	11.5
拉索安全系数最小值	2.70	2.67	2.71	2.75

注:主塔应力为压应力。

设计规范》(JTJ 027—96))的设计要求。原规范要求斜拉桥施工状态拉索安全系数不小于2.0。最新斜拉桥设计规范取消了拉索安全系数的描述,但是加强了对拉索强度的要求^[2]。

本方案中钢梁和主塔的应力也是满足规范要求的。

4 结 语

- (1)对于密索体系的斜拉桥,单独拆除1根拉索均会引起全桥索力的变化,且拆除拉索释放的索力,主要由拆除索邻近范围内的拉索承担,分配到每根拉索的索力并不大。
- (2)拆除中间索对索力、主梁应力、挠度的影响要比拆除长索和短索大。
- (3)索力拆除对同索面的影响略大于不同索面,但是差值很小,可认为桥面偏载对1对索的受力影响是相同的。
- (4)拆除长索和短索对主塔内力的影响要大于拆除中间索。
- (5)斜拉桥换索一般会全面或者部分封锁车道,不管哪种方式都会对当地交通产生不小的影响。封锁车道数量的选择,不仅影响交通,也对换索顺序有较大影响,需要做充分的论证。

参考文献:

[1] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2004.
[2] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].
[3] 顾安邦.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2000.
[4] 周绪红,刘永健.钢桥[M].北京:人民交通出版社,2020.
[5] 王文涛.斜拉索换索工程[M].北京:人民交通出版社,2006.

[6] 张乃乐.大跨度铁路斜拉桥换索方案设计与受力性能分析[J].铁道标准设计,2017(4):79-82.
[7] 徐淑亮.超长服役期钢斜拉桥换索关键技术研究[J].铁道建筑技术,2023(6):21-25.
[8] 朱占良.广东九江大桥换索技术[J].中外公路,2003,23(5):20-24.
[9] 陈庆军,陈锡荣,龙海燕.苏拉马都跨海大桥主桥斜拉索断索与换索状态研究[J].公路,2011(2):193-195.
[10] 周磊.混合梁斜拉桥更换方案及其结构受力分析[D].重庆:重庆交通大学,2021.
[11] 陈亮,卢永成,周伟翔,等.曹妃甸工业区1号桥斜拉桥设计[J].桥梁建设,2011(4):62-65.
[12] 蒋伟平,李亚东,徐俊.斜拉桥换索设计方法探讨[J].结构工程师,2010,26(2):57-62.
[13] 蒋伟平.斜拉桥换索理论及其技术问题的研究[D].成都:西南交通大学,2003.
[14] 沈平,严先荣.天津永和大桥斜拉索换索方法分析[J].公路交通科技,2011(4):47-51.
[15] 陶小委,刘海宽,付志方.基于受力和位移计算分析的独塔斜拉桥换索顺序选择[J].河南科技,2019(1):82-85.
[16] 傅松.铜陵长江公路大桥索体更换关键技术研究[D].南京:东南大学,2018.
[17] 张鸿,翁方文,黄灿.基于敏感性分析与交通荷载控制法的斜拉桥拉索更换顺序研究[J].中外公路,2015(1):187-190.
[18] 袁和旭.混凝土斜拉桥换索设计方法研究[J].工程设计,2024(2):202-204.
[19] 王希岗.超长服役期钢斜拉桥换索技术研究[J].交通世界,2022(32):168-170.
[20] 姬然,郑凯峰,庞竞拓.独塔斜拉桥换索过程计算分析研究[J].广东公路交通,2013(5):13-16.
[21] 孙全胜,李健伟.换索斜拉桥合理受力状态研究[J].公路,2010(4):86-90.
[22] 罗刚林.犍为岷江大桥斜拉桥换索设计与施工[D].成都:西南交通大学,2006.
[23] 纪昌平,何敬波.西樵大桥斜拉索更换的设计与施工[J].公路,2008(6):68-71.
[24] 李劲晖,黄林根,翁思熔.西樵大桥换索工程施工监控技术研究[J].城市道桥与防洪,2010(2):92-94.
[25] 许俊,史家钧.济南黄河公路大桥主桥换索过程的索力监测[J].同济大学学报(自然科学版),1998(4):471-475.
[26] 谢玉英.海印大桥换索工程施工质量的监控[J].中南公路工程,1997(1):22-26.
[27] 陈智俊,金文成.独塔单索面斜拉桥主梁扭转性能研究[J].世界桥梁,2007(4):51-53.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

