

斜拉索临时支撑的非对称单塔斜拉桥无应力索长研究

Research on Stress Free Cable Length of Asymmetric Single Tower Cable-stayed
Bridge with Temporary Support of Cable-stayed Cables

闫 武, 高启战

(中交一公局集团有限公司, 北京 100101)

摘要: 以永定河特大桥为研究对象, 采用 Midas/Civil 软件建立桥梁有限元仿真模型, 对桥体的无支架工艺施工过程完成模拟和计算分析。通过对比有限元法计算结果和监测数据, 研究斜拉索临时支撑施工方法对模型斜拉索的索力、无应力索长以及桥梁线形和内力的影响规律。结果表明: 在多次张拉后, 索力仍然达到了理想效果, 并且桥梁线型和应力的变化均受到索力的影响, 且最终成桥时的实测数据与设计值相符, 保证桥梁的施工和运营过程中能够更加安全高效。

关键词: 斜拉桥; 模拟分析; 无支架安装; 多次张拉

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249(2025)02-0138-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.023

YAN Wu, GAO Qizhan

(China Communications First Engineering Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: Taking the Yongding River Grand Bridge as the research object, establish a finite element simulation model of the bridge using Midas/Civil software, and complete the simulation and calculation analysis of the unsupported construction process of the bridge body. By comparing the results of finite element method calculations and monitoring data, this study investigates the influence of temporary support construction methods on the cable force, unstressed cable length, bridge shape, and internal forces of the model cable. The results showed that after multiple stretches, the cable force still achieved the desired effect, and the changes in bridge shape and stress were affected by the cable force. The measured data at the final completion of the bridge matched the design values, ensuring that the construction and operation of the bridge could be safer and more efficient.

Key words: cable-stayed bridge; simulation analysis; unsupported installation; multiple tensioning

0 引言

非对称单塔斜拉桥是一种新型桥梁形式。在斜拉桥的施工过程中, 索力的精确控制是保证桥梁几何形状和内力状态符合设计要求的关键。无应力索

长的准确计算有助于实现施工过程中的索力控制和调整。

研究人员对索应力展开大量研究。郭新宇等^[1]将成桥连续采集的索应力时程数据作为训练样本, 对索力预测; 徐伟^[2]通过钢管支架原位与低位拼装技术, 研究出了张拉前后主梁受力情况; 桂水荣等^[3]运用基于结构参数敏感性分析的摄动方法, 对矮塔斜拉桥动力特性分析; 付春雨等^[4]将主梁所受的弹性支承载力视为拉索的竖向分力, 通过分析塔的偏移变形, 修正拉索的索力调整量的初始值; 李鹏

作者简介: 闫 武 (1985—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 交通土建。

收稿日期: 2023-08-16

飞等^[5]将成桥设计索力作为拉索的初始张力，确立了调幅与锚头拔出量修正值之间的转换关系，通过调整无应力索长的方式，完成了拉索的二次调整；黄春阳^[6]构建了斜拉桥的施工过程有限元模型，分析斜拉桥关键受力构件的受力状况；占玉林等^[7]分析异形结构的受力特性，采用响应面法，将优化目标函数与成桥索力之间的关系明确化，结合粒子群算法对索力优化；余小勇^[8]运用自适应方法施工监控支架法施工的斜拉桥，分析了斜拉索的索力等关键参数；简伟锋^[9]将弯曲能量作为目标函数，优化分析以钢-混凝土组合梁为主梁的矮塔斜拉桥索力；孙全胜等^[10]对锚式人行悬索桥主塔、主梁、主缆应力施工及变形监测，运用 Midas/Civil 有限元软件分析实时检测数据，使该桥实际内力分布与设计理想状态相吻合；赖嘉洲等^[11]采用基于标准遗传算法的改进多种群遗传算法，在斜拉桥施工过程中对索力进行动态优化；曹鸿猷等^[12]在正常使用极限状态下，以结构安全余量作为评估标准，运用粒子群优化算法进行全局最优施工索力的搜索；黄侨等^[13]提取了桥梁斜拉索的动态位移信息，确定了斜拉索的振动基频，采用振动频率法计算了斜拉索的索力；刘庭凯^[14]利用影响矩阵法在斜拉桥设计和施工阶段的索力优化，优化效果良好；彭渝舒等^[15]将磁通量法用于测量拉索索力，具有长期稳定性和耐久性，并且不会对拉索结构造成损害。

廊坊永定河特大桥为超宽钢箱梁单塔斜拉桥，采用塔梁固结自锚式多次超静定结构，主塔采用无支架工艺施工，施工复杂。通过建立有限元模型进行仿真计算，优化临时拉索及张拉力，严格控制施工过程，确保结构安全和工期。

1 工程概况

永定河特大桥跨越永定河北小埝和南前卫埝，桥梁总长 2 047 m，桥梁宽度 47 m。桥梁分为引桥和主桥，全桥共 15 联，第五、十二联为主桥，采用斜拉桥跨越主河槽。主桥一平面位于直线（起始桩号：K0+835，终止桩号：K1+1035）上，桥面横坡为双向 1.5%，纵坡为 0.3%，将主桥一统称为北桥；主桥二平面位于直线（起始桩号：K1+1795，终止桩号：K1+1995）上，桥面横坡为双向 1.5%，纵坡为

-0.4%，将主桥二统称为南桥；墩台径向布置。两座主桥结构体系相同，均采用斜塔斜拉桥形式，塔梁固结、墩梁分离。主塔为钢塔，主梁为钢箱梁。主跨设置 16 对斜拉索，编花布置，下吊点位于主跨检修道外侧；边跨设置 12 对背索，扇形布置，下吊点位于边跨中央分隔带。主塔下墩柱采用矩形空心墩柱，其余桥墩采用柱式墩，基础形式采用钻孔灌注桩。斜拉桥主塔位置处设有异形装饰板。

斜拉桥采用了塔梁固结自锚式多次超静定结构，在施工过程中步骤多且复杂。为了减少工程成本和缩短工期，项目采用了无支架工艺施工。为了保证主塔的承载能力和设计线型，使用有限元法进行了全过程施工模拟分析，并根据计算结果确定了增设临时拉索的方案，控制主塔在施工过程中的受力和位移，确保任何截面都满足承载能力和线型的要求。

2 施工工艺

采用无支架多次张拉施工方案，即在主塔分段吊装施工阶段采用斜拉索代替临时支架进行安装施工，同时为了不受拉索施工制约主塔的施工进度影响，初步间歇性选择 5 对主拉索 Z1、Z6、Z11、Z14、Z16（南桥：Z1、Z6、Z11、Z16）对主塔进行临时拉结，随后张拉背索 B1、B5、B12（南桥：B6、B8、B12），完成临时张拉后按照施工要求间歇性选择剩下的斜拉索进行整体张拉，监测斜拉索索力，对于索力未达到标准的斜拉索进行第三次张拉。

斜拉桥常使用柔性斜拉索，其自重作用会导致斜拉索发生下垂现象。此时斜拉索的线性方程为：

$$z = \frac{H}{q} \left[\cosh k_1 - \cosh \left(\frac{q}{H} x - k_1 \right) \right] \quad (1)$$

$$k_1 = \sinh^{-1} \left\{ \frac{cq/2}{\sinh[ql/(2H)]} \right\} + \frac{ql}{2H} \quad (2)$$

式中： x 为拉索节点到索起始端的水平距离； z 为拉索节点到索起始端的竖向距离； H 为拉索水平方向分力； q 为拉索自重荷载； c 为拉索两索端点高差； l 为拉索两索端点水平距离。

拉索的下垂程度与张力呈非相关线性。斜拉索

道桥技术

无应力索长与斜拉索弹性伸长值共同组成了斜拉索有应力索长, 表达式为:

$$S = \sqrt{c^2 + 4s(H/q)^2 [ql/(2H)]} \quad (3)$$

在索段任取一长度为 ds 的微元, 微元对应的无应力长为 ds_0 , 由胡克定律可得:

$$ds_0 = ds / [1 + T/(EA)] \quad s \in S \quad (4)$$

$$ds = \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx \quad (5)$$

$$s_0(x) = \frac{b}{\varepsilon} \left\{ \left[\ln \frac{1 + \varepsilon h(x/b + a)}{1 + \varepsilon ha} \right] + \frac{2x}{b} - \ln \left[\frac{\alpha^2(x) - \beta^2}{\alpha^2(0) - \beta^2} \right] - \frac{1}{\beta} \ln \frac{[\alpha(x) - \beta][\alpha(0) + \beta]}{[\alpha(x) + \beta][\alpha(0) - \beta]} \right\} \quad (7)$$

3 有限元模型的建立

采用 Midas/Civil 建立桥梁模型, 对二期恒载、桥梁的应力、弯矩与拉索索力进行分析。有限元模型的精度直接影响计算结果与实际结果的一致性, 为此, 需要对桥梁结构进行离散化处理, 使模型达到理想精度。

建立模型时, 主梁和主塔采用梁单元进行建模, 拉索采用桁架单元进行建模。按照施工顺序, 对主梁和主塔进行划分, 建立悬索桥的合理成桥状态模型。有限元结构模型共有 1 306 个单元, 832 个节点。

4 施工模拟计算与分析

4.1 拉索索力

因桥梁斜拉索采用无支架施工法, 所以需要进行临时张拉, 以保证主塔的正常施工。将实测索力值与设计索力值进行对比, 如图 1 所示。拉索的张拉都到达了预期效果, 与设计索力基本一致, 满足无支架施工法的要求。

在斜拉桥的建设过程中, 整体张拉是关键步骤之一。将整体张拉时测得的斜拉索索力数据与 Midas/Civil 模型计算出的斜拉索索力数据进行对比, 如图 2 所示。

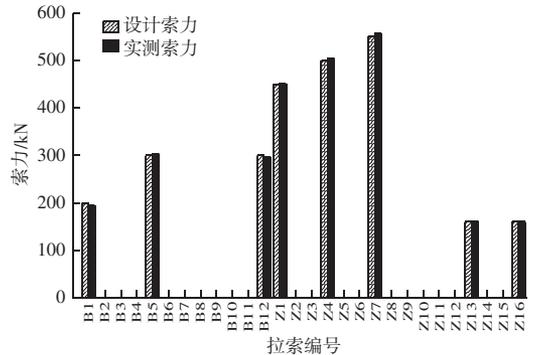
北桥拉索索力以主塔为中心向两侧整体呈下降变化趋势, 在 B5 位置索力出现较大下降。整体趋势符合设计索力变化规律。施工过程中, 南北桥最大索力均出现在 Z11 号斜拉索, 北桥最大索力为 1 512 kN, 南桥最大索力为 1 505 kN; 北桥最小索力出现在 Z13 号斜拉索上, 为 291 kN; 南桥最小索力为 246 kN,

$$T = H\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \quad (6)$$

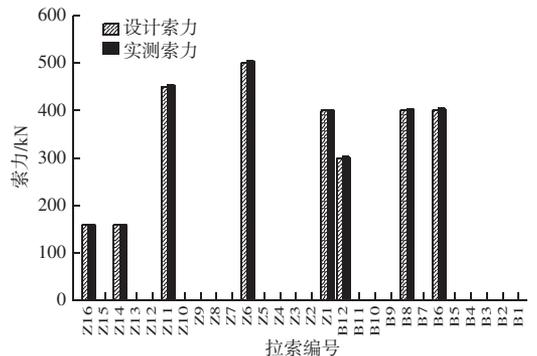
式中: E 为斜拉索弹性模量; A 为截面面积。

用 a 表示主塔高度, b 表示斜拉索的截面面积, α 表示斜拉索夹角, β 表示斜拉索的张力, ε 表示斜拉索的弹性模量, 得到无应力索长的精确公式:

为 Z14 号斜拉索。



(a) 北桥



(b) 南桥

图 1 北桥和南桥临时张拉索力图

Fig. 1 Temporary tensor cable map of North bridge and South bridge

将整体张拉时测得的恒载索力数据与 Midas/Civil 模型计算出的恒载索力数据进行对比, 如图 3 所示。

在二期恒载时, 南北桥索力均以主塔为中心向两侧整体呈上升趋势, 但位于边缘的斜拉索 Z13 ~ Z16 索力出现了明显下降。经调索, 斜拉索的实测索力值与理论值较为接近, 误差均小于 5%。

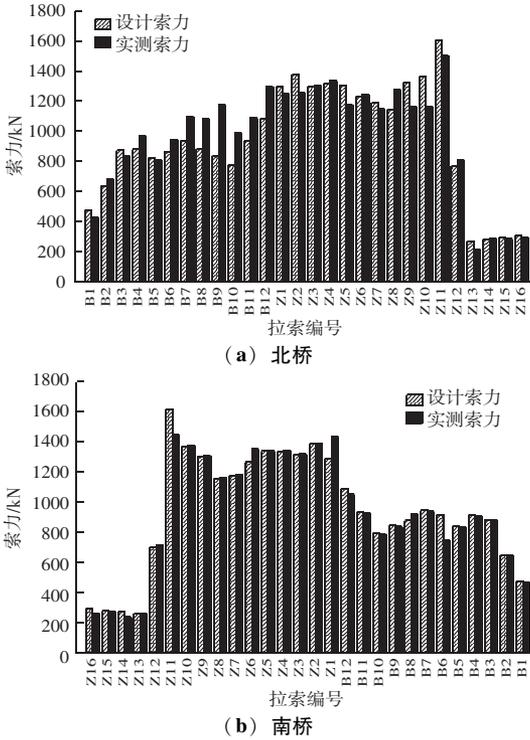


图2 北桥和南桥整体张拉索力图

Fig. 2 Overall tension drawing map of North bridge and South bridge

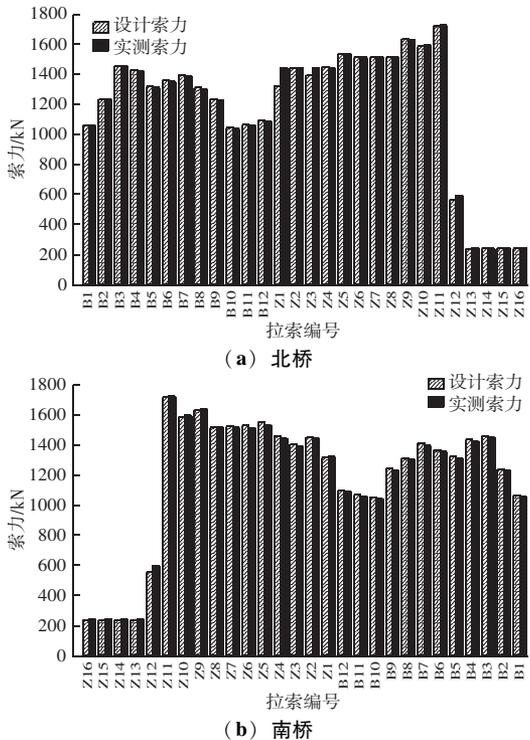


图3 北桥和南桥二期恒载索力图

Fig. 3 Horizontal load cable diagram of North bridge and South bridge phase II

4.2 无应力索长

确定斜拉桥的无应力索长是设计过程中的关键

步骤。该步骤包括斜拉索的几何形状确定、考虑拉索材料的特性、分析桥梁的荷载情况以及建立应力平衡方程。通过式(7)计算出南北桥的斜拉无应力索长,并与理论无应力索长进行对比,如图4所示。

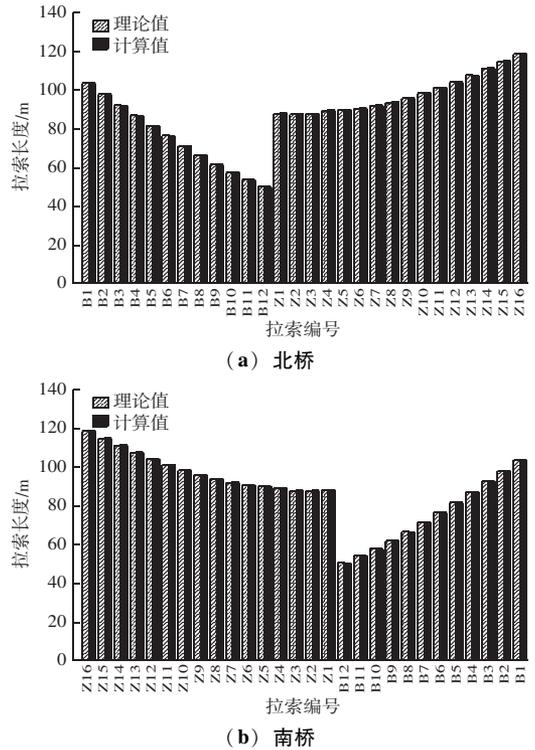


图4 北桥和南桥无应力索长

Fig. 4 North bridge and South bridge have no stress cable length

两座主桥的无应力索长变化趋势相同,主索与背索越靠近主塔,无应力索长越短。由于斜拉索在主塔处承受较大的拉力,随着向桥面延伸,拉力逐渐减小,使斜拉索长度缩短,导致离主塔较近的斜拉索的无应力索长相对较短。且北桥无应力索长的计算值与理论值的误差最大值为0.165 mm,南桥误差最大值为0.153 mm,误差值都较小,可以认为两座主桥的成桥状态达到了理想状态。

4.3 主桥线型

分别将调索前、第二次调索与第三次调索时各位置的相对高程与理论值相比较,如图5所示。

在调索前,北桥桥梁的线型在914号桩之前与理论线型比较吻合,但在这之后与理论线型偏差越来越大,并在1002号桩时实测相对高程曲线达到峰值0.723 m。而南桥实测数据趋势与北桥相反,南桥实测相对高程在1798号桩时到达峰值0.802 m;第二

道桥技术

次调索时, 实测值与理论值的误差相较调索前有明显的改善, 北桥实测相对高程最大值出现在 1020 号桩的位置, 数值为 0.614 m。南桥实测相对高程最大值出现在 1822 号桩的位置, 数值为 0.891 m; 第三次调索, 桥梁的线型与设计线型已经十分吻合, 北桥实测相对高程最大值出现在 1026 号桩的位置, 数值为 0.600 m。南桥实测相对高程最大值出现在 1789 号桩的位置, 数值为 0.803 m。

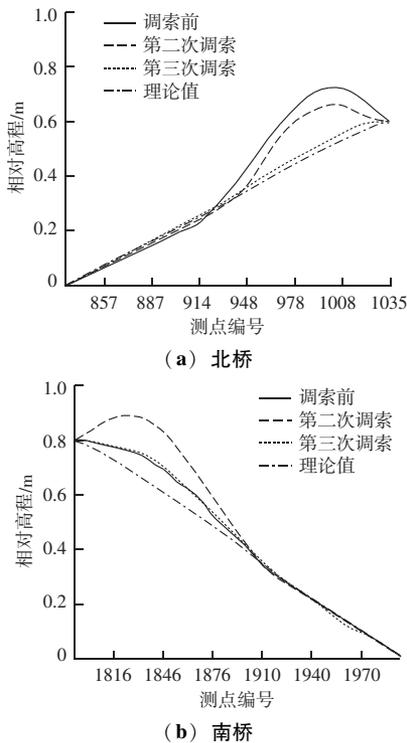


图5 北桥和南桥相对高程

Fig. 5 Relative elevation of the North bridge and South bridge

将两座主桥各阶段的线型变化情况与拉索索力的变化进行对比, 可知在临时张拉时, 实测索力大于设计索力, 导致桥梁线型要高于设计线型。经过两次张拉对索力的调整之后, 拉索索力不断优化, 桥梁线型也逐渐靠近设计线型。在成桥状态, 桥梁的实测线型与设计线型的误差也控制在了合理范围内, 无支架多次张拉的施工方案效果良好。

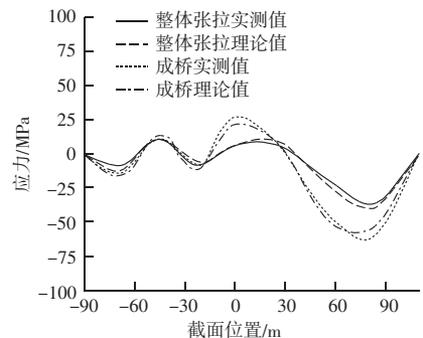
4.4 主桥应力

桥梁上下缘的应力变化通过索力优化进行控制, 合理的索力分配可以使得桥梁各部分受力均衡, 避免出现过大的应力集中, 从而降低了桥梁的疲劳损伤和破坏风险。

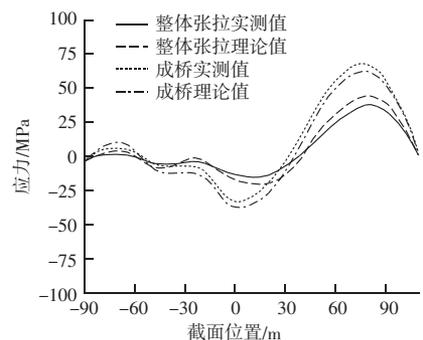
从南北桥的主桥段各选取 9 个截面, 并在整体张

拉与成桥时测取各截面上下表面的应力, 因南北桥应力状态相近, 故只对北桥进行分析。将实测应力曲线与 Midas/Civil 模型导出的理论应力曲线进行对比, 如图 6 所示。

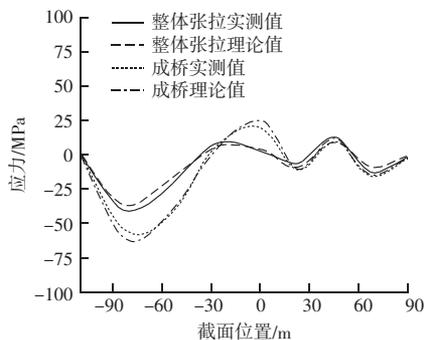
无论是在整体张拉还是在成桥时测量, 两座主桥的上下缘应力均在 172.5 m 处的截面达到了最大值, 北桥上缘应力在整体张拉与成桥时的最大值分别为 -36.1、-60.8 MPa; 南桥下缘应力在整体张拉与成桥时的最大值分别为 37.2、65.1 MPa。可以看出, 各施工阶段主梁应力变化值与理论变化值的规律一致, 通过对索力进行调整, 桥梁应力的理论值与实测值之间的误差控制在合理范围内。



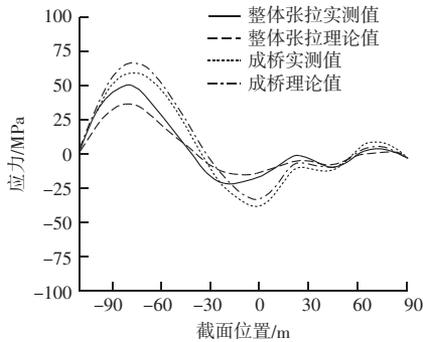
(a) 北桥上缘应力



(b) 北桥下缘应力



(c) 南桥上缘应力



(d) 南桥下缘应力

图 6 北桥和南桥上下缘应力

Fig. 6 Stress on the upper and lower edges of the North bridge and South bridge

5 结论

采用 Midas/Civil 有限元分析方法,对南北对称单塔斜拉桥无应力索长进行了研究,得到以下主要结论:

(1) 通过比较南北桥斜拉索索力,发现临时张拉时实测索力与设计索力吻合,但整体张拉时两者之间的误差值明显增大。经历第三次调索后,成桥时的斜拉索索力值基本达到设计值,且通过成桥时的无应力索长也与设计值一致。

(2) 通过对比桥梁线型发现,调索前、第二次调索与第三次调索这三个阶段的实测数据变化趋势受到索力变化的影响,随着索力的优化,实测值与理论值之间的误差最终被控制在一个合理的范围内。

(3) 无论是在整体张拉还是在成桥时,两座主桥的上下缘应力均在 172.5 m 处的截面,并且实测数据的变化趋势与理论数据的变化趋势一致。这表明了无支架多次张拉施工方案可行,为类似工程施工提供了指导。

参 考 文 献

- [1] 郭新宇,方圣恩.基于门控循环单元神经网络的大跨径斜拉桥索力预测[J].振动工程学报,2023,36(6):1480-1484.
- [2] 徐伟.大跨度连续梁拱肋与吊杆张拉关键技术研究[J].中国设备工程,2023(7):15-17.
- [3] 桂水荣,雷鸣宇,陈水生,等.矮塔斜拉桥动静力特性对结构参数敏感性影响分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(1):79-87.
- [4] 付春雨,劳永升,谢周余,等.考虑梁重误差效应的节段拼装混凝土斜拉桥索力调整[J].中国铁道科学,2023,44(2):66-72.
- [5] 李鹏飞,王石磊,魏思聪,等.大型空间异形钢塔斜拉桥拉索张拉控制[J].公路交通科技,2022,39(10):49-58.
- [6] 黄春阳.基于监测数据的独塔斜拉桥施工过程受力性能分析[J].安徽建筑,2023,30(4):137-138,185.
- [7] 占玉林,侯之瑶,邵俊虎,等.基于响应面法及粒子群算法的异形斜拉桥索力优化[J].桥梁建设,2022,52(3):16-23.
- [8] 余小勇.基于支架法施工的独塔斜拉桥施工监控分析[J].铁道建筑技术,2022(4):113-117.
- [9] 简伟锋.矮塔钢-混凝土组合梁斜拉桥的索力优化[J].内蒙古公路与运输,2020(3):38-41.
- [10] 孙全胜,侯淞译.某地锚式边缆多次张拉人行悬索桥施工控制及分析[J].低温建筑技术,2019,41(11):103-107.
- [11] 赖嘉洲,张子健.考虑施工过程的斜拉桥索力动态优化方法研究[J].工程建设,2022,54(6):42-48.
- [12] 曹鸿猷,李志,黄鑫.考虑施工及运营荷载作用的斜拉桥索力优化研究[J].武汉理工大学学报,2022,44(4):49-56.
- [13] 黄侨,王翼超,任远,等.基于微波干涉雷达的斜拉桥索力测量方法[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):144-151.
- [14] 刘庭凯.基于影响矩阵法的非对称斜拉桥索力优化分析[J].山西建筑,2022,48(3):163-165.
- [15] 彭渝舒,覃华桥,吕柯梁,等.基于磁通量法的斜拉桥索力监测应用研究[J].江西建材,2022(4):39-41.

(上接第 137 页)

- [12] 狄金海.厂拌热再生沥青路面性能研究[J].工程建设与设计,2023(18):154-156.
- [13] 张雄,熊腾飞.回收料掺量对热再生沥青混合料路用性能的影响[J].新型建筑材料,2024,51(4):15-17.
- [14] 肖庆一,宇锦涛,龚芳媛,等.厂拌热再生混合料平衡设计法与马歇尔设计法的对比研究[J].公路交通科技,2022,39(11):26-35.
- [15] 左锋,叶奋,宋卿卿.RAP掺量对再生沥青混合料路用性能影

响[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1403-1410.

- [16] 交通部公路科学研究院.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40-2004[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [17] 中华人民共和国行业标准.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [18] 申爱琴,陈祥,郭寅川,等.基于灰靶决策理论的钢渣沥青混合料路用性能评价[J].硅酸盐通报,2019,38(4):1245-1252.