

基于综合优化法的宽幅 PC 独塔斜拉桥合理成桥与施工状态研究

陈来成¹ 张卓欣¹ 褚松寒² 朱利明^{2*}

1 中国铁路北京局集团有限公司

2 南京工业大学交通运输工程学院

DOI:10.32629/etd.v7i2.18970

[摘要] 针对宽幅PC独塔单索面斜拉桥受力复杂、单一索力优化方法难以兼顾“梁平、塔直、索力均匀”多重目标的问题,本文以某上跨铁路立交桥为工程背景,提出了一种分步计算的综合优化法。该方法首先利用最小弯曲能量法确定初索力,以解决未知系数法(零位移法)对初值敏感的问题;进而引入主梁恒载弯矩可行域概念,结合影响矩阵法对索力进行多目标精细化微调。研究表明:与原设计方案相比,采用综合优化法确定的成桥状态,其主梁恒载弯矩更贴可行域中值;在运营阶段最不利荷载组合下,主梁上缘最大压应力降低了16.76%,下缘最大压应力降低了0.34%,显著提升了结构的安全储备。基于该合理成桥状态,运用差值正装迭代法倒推确定的施工索力,使得施工全过程中主梁最大拉应力仅为0.47MPa,最大压应力为12.01MPa,均满足规范要求。该方法逻辑清晰、收敛速度快,可为同类宽幅斜拉桥的施工控制提供有效依据。

[关键词] 独塔斜拉桥; 宽幅主梁; 合理成桥状态; 综合优化法; 弯矩可行域; 差值正装迭代法

中图分类号: K928.78 文献标识码: A

Research on Reasonable Finished and Construction State of Wide PC Single-Tower Cable-Stayed Bridge Based on Comprehensive Optimization Method

Laicheng Chen¹ Zhuoxin Zhang¹ Songhan Chu² Liming Zhu^{2*}

1 China Railway Beijing Group Co., Ltd

2 School of Transportation Engineering, Nanjing University of Technology

[Abstract] To address the complex mechanical behavior of wide prestressed concrete (PC) cable-stayed bridges with a single tower and a single cable plane, and the difficulty of balancing multiple objectives—namely "flat girder, straight tower, and uniform cable forces"—using a single optimization method, this paper proposes a multi-step comprehensive optimization approach based on an over-railway flyover project. Firstly, the minimum bending energy method is employed to determine the initial cable forces, overcoming the sensitivity of the unknown coefficient method (zero-displacement method) to initial values. Subsequently, the concept of the "feasible region of the main girder dead load moment" is introduced, combined with the influence matrix method for multi-objective fine-tuning of cable forces. The results indicate that, compared with the original design, the dead load bending moment of the main girder determined by the comprehensive optimization method is closer to the median of the feasible region. In the service stage under the most unfavorable load combinations, the maximum compressive stress on the upper and lower flanges of the main girder is reduced by 16.76% and 0.34%, respectively, significantly enhancing the structural safety reserve. Based on this reasonable finished bridge state, the construction cable forces are derived using the difference forward iteration method. During the entire construction process, the maximum tensile stress and compressive stress of the main girder are 0.47 MPa and 12.01 MPa, respectively, both satisfying code requirements. This method features clear logic and fast convergence, providing an effective basis for the construction control of similar wide cable-stayed bridges.

[Key words] Single-tower cable-stayed bridge, Wide main girder, Reasonable finished state, Comprehensive optimization method, Feasible domain of bending moment, Difference forward iteration method

引言

独塔斜拉桥因其优越的受力性能和独特的景观效果,在跨越既有复杂交通线路(如铁路、高速公路)时被广泛应用。作为一种典型的高次超静定组合结构,斜拉桥的受力行为极其复杂,其成桥状态的内力分布与线形主要取决于成桥索力的配置。在给定的结构体系与恒载分布下,通过优化成桥索力来实现主梁弯矩合理、塔身偏位最小以及索力分布均匀的“理想成桥状态”,是斜拉桥设计与施工控制的核心任务^{[1][2]}。对于采用宽幅预应力混凝土(PC)主梁的独塔斜拉桥而言,由于主梁自重巨大且截面宽阔,其对索力调整的敏感性更高,如何确定一组既满足受力安全又兼顾线形美观的合理索力,具有重要的工程意义。

传统的零位移法(或未知系数法)主要以控制主梁和锚点位移为目标。虽然该方法能较好地控制成桥线形,但往往忽略了内力的合理分布。例如,邢海君等^[20]在对某双塔单索面斜拉桥的研究中发现,零位移法虽然实现了位移的精确控制,但导致了索力与主梁弯矩分布的不均匀,难以满足结构受力的安全性要求。许多基于迭代的优化算法(如零位移法)对初索力的取值高度敏感。刘军^[9]的研究表明,若初值选取不当,不仅会降低计算效率,还可能导致迭代无法收敛或结果偏离最优解。随着斜拉桥跨径和宽度的增加,设计目标已从单一的“线形平顺”转变为“内力、线形、索力均匀度”的多目标协同。张谢东等^[21]指出,针对大跨度或混合梁等复杂结构,单独使用一种传统方法已难以求解出兼顾各方要求的合理成桥状态,亟需采用多种方法结合的综合优化策略。

针对上述问题,本文以某上跨铁路斜拉桥为工程背景,提出一种分步计算的综合优化法^[11]。

该方法的核心逻辑在于“优势互补”与“多级调控”:首先,利用最小弯曲能量法求解出的索力作为未知系数法的初值,以解决初值敏感性问题并提高计算效率;其次,引入主梁恒载弯矩可行域概念,通过影响矩阵法对索力进行微调,确保主梁内力始终处于安全储备范围内,并同时满足索力均匀度的要求。最后,基于确定的合理成桥状态,运用差值正装迭代法倒推施工阶段的张拉索力,并对施工全过程的安全性进行验算,以期为同类宽幅独塔斜拉桥的施工控制提供理论参考与技术支撑。

1 工程概况与计算模型构建

1.1 工程概况

以某上跨铁路转体斜拉桥为工程背景,该桥为预应力混凝土(PC)独塔单索面转体斜拉桥。桥跨布置为155m+155m,全长310m(如图1所示)。主梁结构采用单箱五室混凝土箱形截面,梁顶全宽31.48m,梁高3.37m(中心线处)(如图2所示)。顶板设2%双向横坡,标准段顶板厚度0.28~0.58m,底板厚度0.25~0.55m。由于主梁宽度远超常规桥梁(>30m),属于典型的宽幅主梁结构,其剪力滞效应及横向受力特征显著^[16]。桥塔采用塔墩梁固结体系,桥塔在桥面以上高度为72m。全桥共设80根斜拉索。

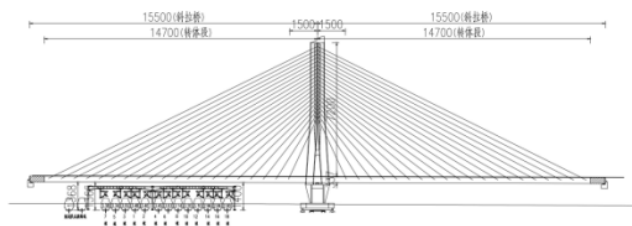


图1 斜拉桥立面图(单位:m)

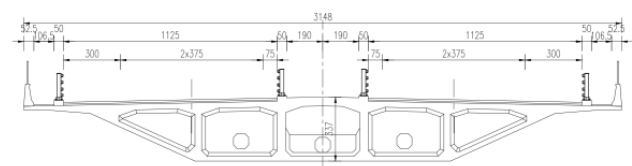


图2 主梁标准横断面图

1.2 有限元模型建立

采用Midas/Civil软件建立全桥空间杆系有限元模型^[14]。

(1) 单元离散: 主梁、桥塔及主墩均采用空间梁单元(Beam Element)模拟;斜拉索采用只受拉的桁架单元(Truss Element)模拟。全桥模型共离散为511个节点,433个单元。

(2) 边界条件: 根据设计图纸,主塔、主墩与主梁连接处模拟为刚性固结;边墩支座模拟为仅约束竖向及横向位移的弹性连接;塔底与承台连接处固结。

(3) 材料参数: 主梁、主塔及主墩均采用C50混凝土,容重取25kN/m³;预应力钢绞线采用Strand1860钢绞线^[19]。

为验证杆系模型的准确性,利用ANSYS建立实体模型(如图3所示)进行了对比分析,结果表明两者在频率、索力及线形上的误差均在工程允许范围内(最大挠度误差仅2.84cm),验证了Midas/Civil模型的可靠性。

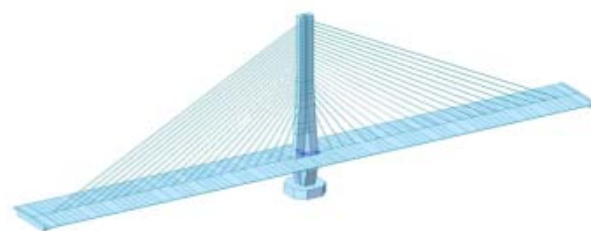


图3 全桥空间杆系有限元模型

1.3 斜拉索非线性与施工阶段模拟

(1) 斜拉索非线性修正: 考虑到长细比较大的斜拉索在自重作用下存在垂度效应,模型中采用Ernst公式对斜拉索的弹性模量进行修正,以计入几何非线性的影响。修正公式如下:

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{r^2 l^2 E}{12 \sigma^3}}$$

式中: E_{eq} 为等效弹性模量; γ 为拉索容重; l 为拉索水平投影长度; σ 为拉索应力。模型中根据不同索长,修正系数 α 取值在0.960~1.000之间。

(2)施工阶段模拟: 为精确反映成桥状态的内力累积效应, 模型定义了24个施工阶段, 完整模拟了从基础施工、满堂支架现浇主梁(分3个节段)、斜拉索初张拉、转体就位、合龙段施工到二期恒载铺装及二次调索的全过程。同时, 在模型中激活了混凝土收缩徐变的时间效应分析功能(CEB-FIP规范), 计算时长取至成桥后10年。

2 合理成桥状态的确定与优化

2.1 常用索力优化方法对比分析

为探究不同算法对宽幅独塔斜拉桥的适用性, 分别采用弹性支承连续梁法^[10]、刚性支承连续梁法^[3]、零位移法(未知系数法)及最小弯曲能量法^[4]对成桥索力进行初步求解。计算结果表明, 单一方法难以直接获得理想的成桥状态:

(1)误差较大: 刚性支承法与弹性支承法在边跨及塔根处的索力计算值与设计值偏差较大, 部分索力(如E1、W19)误差超过30%, 且索力分布均匀性较差。

(2)初值敏感: 零位移法虽然能较好地控制线形, 但其计算结果对初索力的取值高度敏感。当以单位力(1kN)作为初值时, 迭代结果极不合理; 仅当以接近真实解的数值为初值时, 才能快速收敛。

四种方法所得结果与设计索力的对比如图4所示。

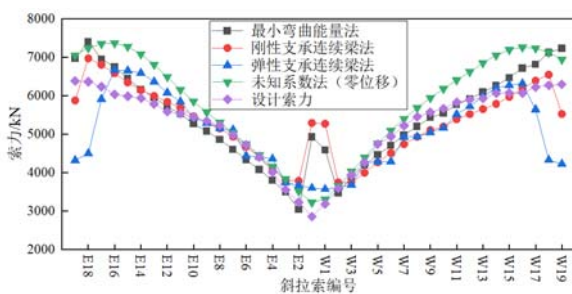


图4 不同优化方法所得成桥索力对比

2.2 综合优化法的提出与实施

基于2.1的对比分析可知, 仅依靠单一的传统优化方法难以同时满足宽幅独塔斜拉桥复杂的受力要求。为了克服单一方法的局限性, 本文提出一种将“最小弯曲能量法”、“未知系数法(零位移法)”与“可行域-影响矩阵法”有机结合的综合优化策略。结合的必要性主要体现在以下三个方面:

(1)解决未知系数法的“初值敏感性”问题: 未知系数法(零位移法)^[9]本质上是一个迭代求解过程, 其收敛速度和结果的合理性高度依赖于初索力的选取。研究表明, 若初值选取不当(如取单位力), 计算结果将产生较大偏差甚至无法收敛。因此, 引入最小弯曲能量法^[4]先行计算, 利用其“全桥应变能最小”的特性为未知系数法提供一组符合物理规律的、高质量的初索力, 从而确保迭代计算的快速收敛与结果的精确性。

(2)弥补几何控制与受力安全的脱节: 传统的零位移法仅以“梁平”为单一控制目标, 忽略了主梁内部的应力分布状态。对于宽幅主梁而言, 即便线形平顺, 其截面弯矩也可能超出安全限值。因此, 引入主梁恒载弯矩可行域概念, 将单纯的几何控制转

化为“几何+受力”的双重约束, 确保索力调整后的主梁内力始终处于由材料强度决定的安全“绿区”内^{[6][7]}。

(3)实现索力分布的均匀化微调: 在满足线形和受力安全的基础上, 利用“可行域-影响矩阵法”对局部索力进行微调。这是因为前述方法计算出的索力虽然能满足整体受力要求, 但在局部(特别是塔根及梁端)可能出现索力突变或不均匀现象。通过影响矩阵进行多目标(梁平、塔直、索力均匀)的人工干预与精细化调整, 最终实现合理的成桥状态^[8]。

针对单一方法的局限性, 本文提出一种“多阶段综合优化法”, 其计算流程如下, 如图5所示:

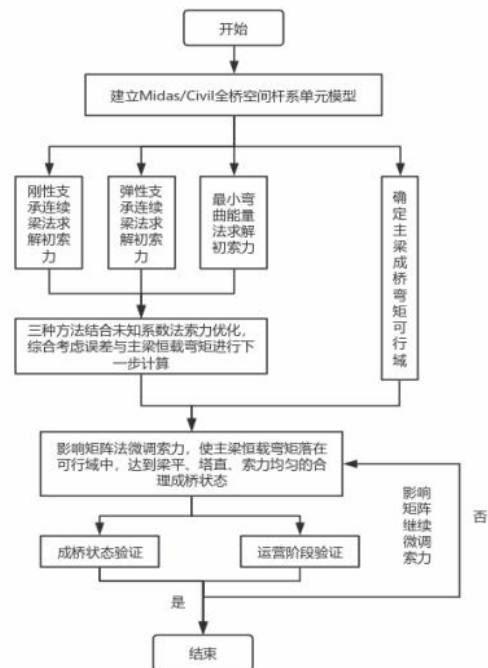


图5 综合优化法计算流程图

2.2.1 初始状态确定

利用最小弯曲能量法求解出一组使结构应变能最小的索力, 将其作为零位移法的初始输入值, 以解决初值敏感性问题并提高计算效率。

2.2.2 可行域构建与索力微调

可行域构建: 根据规范对主梁上下缘混凝土的应力限值($[\sigma_c]=0MPa, [\sigma_{ca}]=16.2MPa$)反推在恒载作用下主梁各截面的允许弯矩范围, 即恒载弯矩可行域(如图6所示)。计算公式如下:

$$M_{d2} \leq M_d \leq M_{d1}$$

式中, M_d 为目标恒载弯矩, M_{d1} 、 M_{d2} 分别为由应力限值确定的弯矩上下限^[18]。

影响矩阵微调: 以前述计算结果为基础, 建立索力调整量与主梁控制截面弯矩的影响矩阵。以“主梁恒载弯矩曲线落入可行域中部”及“索力分布均匀”为双重目标, 对局部索力进行精细化调整^[15]。

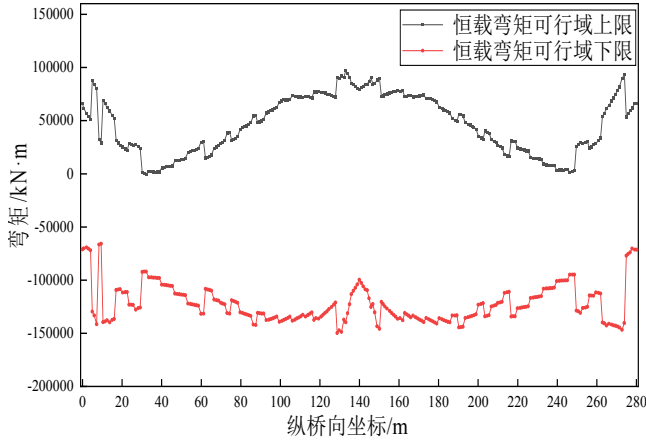


图6 主梁恒载弯矩可行域示意图

2.3 合理成桥状态结果分析

利用上述综合优化法确定的最终成桥状态, 并与原设计方案进行对比验证:

(1) 索力分布: 优化后的成桥索力沿跨径分布均匀, 整体呈递增趋势, 无突变现象, 且左右幅索力基本对称, 满足设计要求。

(2) 受力安全储备: 优化后的主梁恒载弯矩全线均落入可行域内, 且更贴近可行域中值(如图7所示)。与原设计相比, 运营阶段最不利荷载组合下, 主梁上缘最大压应力由12.29MPa降至10.23MPa, 降幅达16.76%; 下缘最大压应力降低了0.34%。这表明综合优化法显著提高了主梁的应力安全储备。

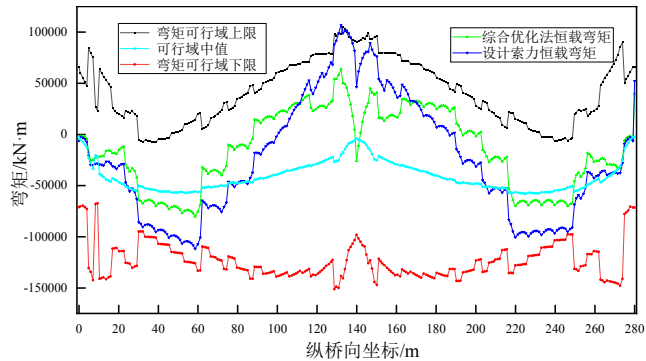


图7 索力微调后主梁恒载弯矩

(3) 线形与塔偏: 成桥状态下, 主梁竖向位移控制在-0.03m~0m之间, 线形平顺; 塔顶最大纵向偏位仅为2.68 cm, 满足“梁平塔直”的控制目标(如图8所示)。

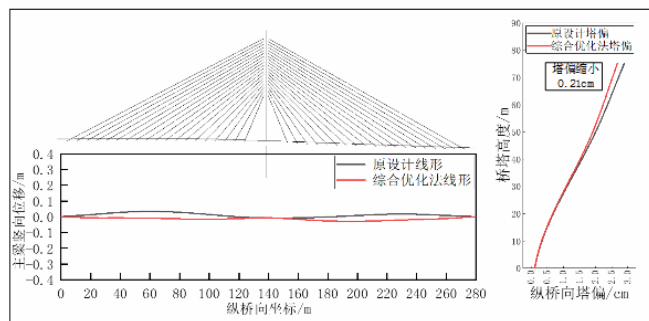


图8 成梁运营阶段主梁挠度与塔偏

3 合理施工状态的确定与验算

3.1 施工索力确定方法

3.1.1 目标状态与计算原理

斜拉桥的施工控制核心在于确定合理的初张拉力, 以确保成桥后的内力与线形符合设计预期。本文以第2章通过综合优化法确定的合理成桥状态作为施工控制的最终目标状态。具体而言, 将第2章求得的优化后成桥索力向量 $\{F_r\}$ 设定为本次正装迭代计算的目标索力向量。

考虑到混凝土收缩徐变及结构刚度随施工过程变化的非线性特征, 采用差值正装迭代法进行求解^[13]。该方法利用“目标索力”作为“初始张拉力”的近似值, 通过循环迭代消除非线性误差。

3.1.2 迭代计算流程

具体计算步骤如下:

(1) 设定初值: 为加快迭代收敛速度, 直接选取第3章确定的合理成桥索力 $\{F_r\}$ 作为第一轮迭代的施工初张拉力 $\{T_0\}$, 即令 $\{T_0\}=\{F_r\}$ 。

(2) 正装计算: 将 $\{T_0\}$ 代入Midas/Civil模型, 按照实际施工工序(包括收缩徐变累积)进行正装分析, 得到成桥时刻的计算索力向量 $\{F_0\}$ 。

(3) 差值修正: 计算目标索力 $\{F_r\}$ 与计算索力 $\{F_0\}$ 之间的差值向量 $\{\Delta F_0\}$:

$$\{\Delta F_0\} = \{F_r\} - \{F_0\}$$

将该差值叠加到上一轮的初张拉力中, 得到修正后的施工张拉力 $\{T_1\}$ 。

$$\{T_1\} = \{T_0\} + \{\Delta F_0\}$$

(4) 收敛判定: 重复上述过程, 直至成桥计算索力与目标索力 $\{F_r\}$ 的相对误差满足精度要求($\delta < 5\%$)。

3.2 施工阶段主梁安全性验算

依据实际施工工序(主梁分节段现浇、挂索、转体、合龙、二期铺装), 提取施工全过程中主梁各截面的应力极值, 绘制应力包络图(如图9所示)。

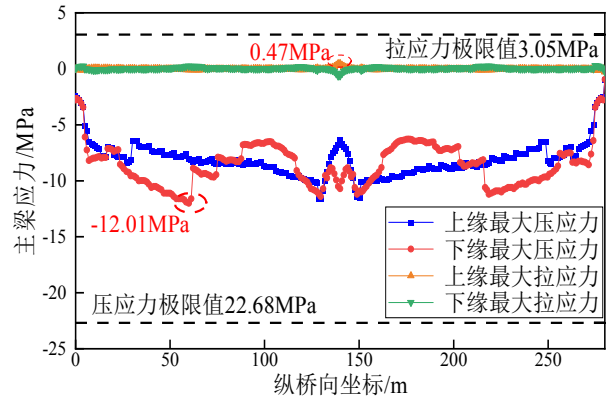


图9 施工阶段主梁上下缘应力包络

(1) 应力限值: 依据规范, 施工阶段主梁混凝土抗压强度标

准值 $f'_{ck} = 32.4MPa$, 抗拉强度标准值 $f'_{tk} = 2.65MPa$ 。允许压应力为22.68MPa, 允许拉应力为3.05MPa^[18]。

(2) 验算结果: 由图9可知, 在整个施工过程中, 主梁上、下缘应力始终处于安全范围内。

①最大压应力: 出现在二次调索阶段的E11索锚固点附近(主梁下缘), 数值为12.01MPa, 远小于允许值22.68MPa, 安全储备充足。

②最大拉应力: 出现在浇筑主梁节段1时的墩底位置, 数值仅为0.47MPa, 未出现有害裂缝风险。

3.3 桥塔与斜拉索安全性验算

(1) 桥塔受力: 施工过程中桥塔始终以受压为主。最大压应力出现在二次调索阶段的塔身竖向23m处(斜拉索张拉区下方), 大小为11.66MPa, 满足材料强度要求(如图10所示)。

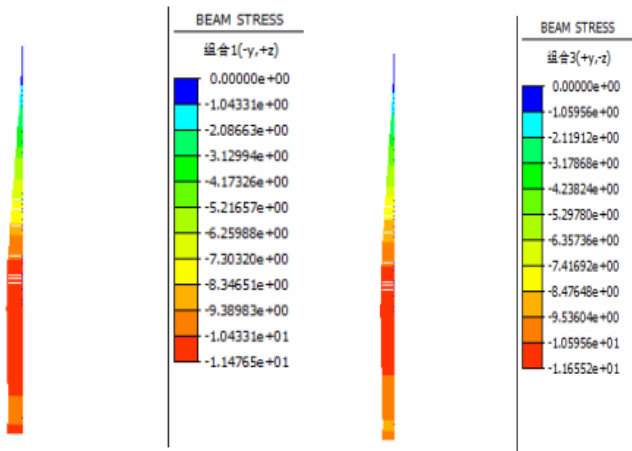


图10 施工阶段主塔两侧应力包络

(2) 斜拉索受力: 施工阶段斜拉索的安全系数取2.0, 即应力上限为885MPa^[17]。计算结果显示, 各斜拉索在张拉自身及二次调索阶段应力较大, 全桥最大索力出现在W10索, 对应应力为663.25MPa, 未超过限值, 处于安全状态(如图11所示)。

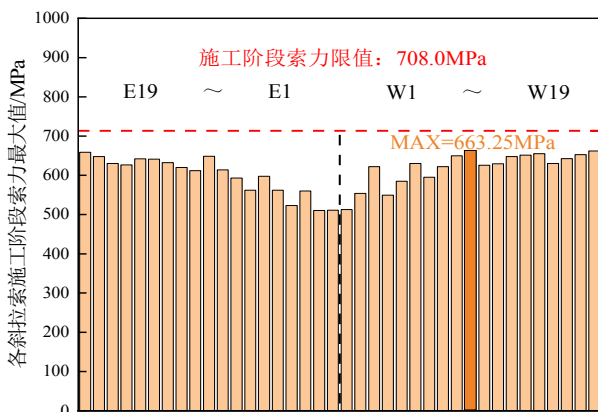


图11 施工阶段斜拉索索力最大值

4 结论

本文以某上跨铁路宽幅PC独塔转体斜拉桥为背景, 针对单

一索力优化方法的局限性, 提出了一种结合最小弯曲能量法、零位移法及可行域-影响矩阵法的综合优化策略, 并对施工全过程进行了模拟验算。主要结论如下:

(1) 提出了分步计算的综合优化法: 该方法利用最小弯曲能量法确定初值, 有效解决了未知系数法对初值敏感的问题; 引入恒载弯矩可行域与影响矩阵法进行精细化微调, 实现了“梁平、塔直、索力均匀”及“受力安全”的多重目标控制。

(2) 显著提升了成桥状态的受力性能: 与原设计方案相比, 优化后的成桥状态主梁恒载弯矩更贴近可行域中值, 分布更为合理。在运营阶段最不利荷载组合下, 主梁上缘最大压应力降低了16.76%, 下缘最大压应力降低了0.34%, 显著增加了主梁的应力安全储备^[5]。同时, 成桥线形平顺, 塔顶最大纵向偏位仅为2.68cm, 满足设计要求。

(3) 验证了施工过程的安全性与方法适用性: 基于差值正装迭代法确定的施工索力, 在施工全过程中, 主梁最大压应力为12.01MPa (<22.68MPa), 最大拉应力仅为0.47MPa (<3.05MPa), 桥塔及斜拉索应力均处于安全范围内^{[12][18]}。研究表明, 该方法能够有效指导宽幅独塔斜拉桥的施工控制, 确保结构安全。

【参考文献】

[1] 中国公路学报编辑部. 中国桥梁工程学术研究报告·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.

[2] 杨海鹏, 徐松, 朱利明, 等. 我国转体斜拉桥发展综述[J]. 现代交通技术, 2017, 14(6): 34-39.

[3] 陈德伟, 范立础. 确定预应力混凝土斜拉桥恒载初始索力的方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, (2): 120-124.

[4] 周银, 张雪松. 基于最小弯曲能的结合梁斜拉桥恒载索力优化计算方法[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 177-180.

[5] Wang Z, Zhang N, Cheng Q. Multi-Objective Optimization-Based Reasonable Finished State in Long-Span Cable-Stayed Bridge Considering Counterweights[J]. Structures, 2023, 51: 1497-1506.

[6] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.

[7] 姜涛, 陈亮, 张哲, 等. 基于应力可行域法的斜拉桥合理成桥状态确定[J]. 世界桥梁, 2014, (3): 76-79.

[8] 郑一峰, 毛健, 尹笑, 等. 基于影响矩阵的双塔斜拉桥合理成桥状态研究[J]. 公路, 2017, 62(2): 82-85.

[9] 刘军. 基于未知荷载系数法的斜拉桥索力优化[J]. 交通科技, 2020, (4): 6-9.

[10] 付春雨, 高振锋, 严鹏, 等. 基于弹性支承连续梁法的混凝土斜拉桥合理成桥索力计算方法[J]. 桥梁建设, 2022, 52(6): 124-130.

[11] 朱利明, 陈沁宇, 刘大帅. 基于综合优化法的矮塔斜拉桥成桥索力优化[J]. 世界桥梁, 2024, 52(2): 88-93.

[12] 颜东煌, 刘光栋. 确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J]. 中国公路学报, 1999, (2): 61-66.

[13]李介立,夏永豪,张啸文,等.叠合梁斜拉桥合理施工状态确定的正装差值迭代法[J].中外公路,2023,43(6):218-223.

[14]李悦,吴国雄,谢远勇.基于MIDASCIVIL的双塔双索面斜拉桥关键施工阶段受力性能分析[J].公路工程,2020,45(04):141-146.

[15]蒲洁,李江,王天琪,等.斜拉桥索力张拉优化方法研究[J].交通科技,2023,(5):57-61.

[16]李艳凤.单索面PC斜拉桥主梁剪力滞效应分析研究[D].沈阳:东北大学,2014.

[17]JTG/T3365-01-2020.公路斜拉桥设计规范[S].

[18]JTG3362-2018.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵

设计规范[S].

[19]CJJ11-2011.城市桥梁设计规范(2019版)[S].

[20]邢海君.斜拉桥合理成桥状态和施工控制研究[D].济南:山东大学,2018.

[21]张谢东,王金枝,郭俊峰.混合梁斜拉桥合理成桥状态确定方法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015(5):920-924.

作者简介:

陈来成(1971--),男,汉族,河北省石家庄市人,本科,中国铁路北京局集团有限公司,高工,铁路运输调动工作。