

斜拉桥内置式钢锚箱索塔锚固区受力分析

俞明德

(上海城市交通设计院有限公司, 上海市 200092)

摘要: 斜拉桥内置式钢锚箱索塔锚固区结构复杂, 传统的三维实体+板壳单元模型虽然精度高, 但建模复杂且难以直接提取塔壁断面内力用于配筋设计。以某独塔斜拉桥为工程背景, 提出了一种梁+板壳单元的二维简化计算模型。通过与三维精细模型对比, 验证了该简化模型在计算塔壁内力方面的可靠性, 并系统分析了连接方式、构造参数、混凝土开裂、混凝土收缩和徐变对索塔锚固区受力的影响。研究表明: 采用弹性连接模拟焊钉刚度比完全固结模型更能真实反映结构受力, 简化模型与精细模型的内力误差控制在15%以内; 索塔锚固区纵横向尺寸比值越大, 混凝土塔壁承担的水平索力比例越高; 混凝土开裂、收缩和徐变对塔壁受力具有显著影响。

关键词: 斜拉桥; 索塔锚固区; 内置式钢锚箱; 简化模型; 受力分析

中图分类号: U443.38

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0213-05

Force Analysis of Anchorage Zone of Built-in Steel Anchor Box Pylon in Cable-stayed Bridges

YU Mingde

(Shanghai Urban Transportation Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The structures in anchorage zone of built-in steel anchor box pylon in cable-stayed bridges is complex. Although the traditional 3D solid + shell element model offers high precision, the modeling is complex and it is difficult to directly extract the internal forces of the pylon wall cross-section for reinforcement design. Taking a single-ylon cable-stayed bridge as the engineering background, a simplified 2D calculation model with beam + shell elements is proposed. By comparing with a refined 3D model, the reliability of the simplified model in calculating internal forces of the pylon wall is verified. A systematic analysis is conducted on the influences of connection methods, structural parameters, concrete cracking, and concrete shrinkage and creep on the force of the anchorage zone. The research result indicates that using elastic connections to simulate the stiffness of welding studs more realistically reflects the structural force compared to the fully fixed model. The internal force error between the simplified and refined models is controlled within 15%. The larger the ratio of the longitudinal and transverse dimensions of the anchorage zone of pylon, the higher the proportion of the horizontal cable force borne by the concrete pylon wall. The concrete cracking, shrinkage and creep have a significant impact on the force of the pylon wall.

Keywords: cable-stayed bridge; anchorage zone of pylon; built-in steel anchor box; simplified model; force analysis

0 引言

斜拉桥常见的索塔锚固形式大体可分为混凝土塔壁锚固、钢锚箱锚固、钢锚梁锚固、鞍座式锚固和回转式锚固这5类。其中, 钢锚箱锚固方案虽然构造复杂、用钢量多、造价贵, 但由于其力学性能有保证、定位简单、施工方便而得到了广泛应用^[1-2]。混凝土桥塔中的钢锚箱主要有内置式和外露式2种形

式, 分别以苏通长江大桥和法国诺曼底大桥^[3]为代表。

内置式钢锚箱为箱型结构, 由侧板、端板、横隔板、锚垫板、承压板、支承板等焊接而成(见图1)。其主要传力途径: 斜拉索拉力→锚垫板→支承板→侧板; 次要传力途径: 斜拉索拉力→锚垫板→端板→混凝土塔壁^[4]。

戴捷等^[5]、曾明根等^[6]分别对苏通长江大桥和上海长江大桥索塔锚固区进行了数值模拟分析, 采用三维有限元模型建立索区模型, 混凝土塔壁采用实体单元, 钢锚箱采用板壳单元, 利用弹簧单元模拟塔

收稿日期: 2026-03-30

作者简介: 俞明德(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

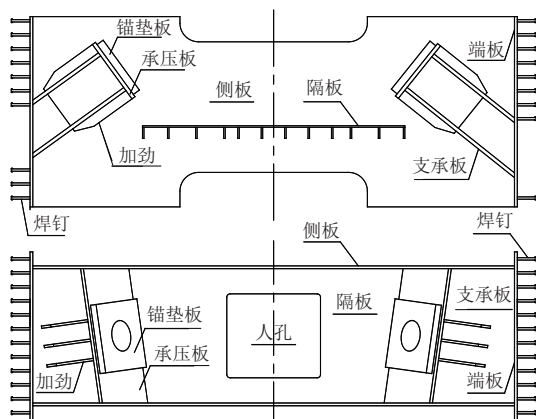


图1 内置式钢锚箱结构示意图

壁与钢锚箱之间的焊钉。

钢锚箱索塔锚固区涉及到不同材料、不同结构形式,索力巨大且力方向复杂。采用三维实体+板壳单元来精细模拟钢锚箱各个板件以及周围混凝土结构,能够准确捕捉钢锚箱复杂几何形状下的应力分布,特别是对于应力集中区域的模拟非常有效。它可以直观地展示斜拉索力如何通过锚箱的承压板、支撑板等构件传递到侧板或混凝土塔壁上的完整路径。但其建模复杂,模型自由度数大,导致计算时间长,如需局部调整模型则工作量巨大。因此,在实际工程设计中,难以使用三维模型来直接提取塔壁断面内力用于配筋设计。

杨允表等^[7]介绍了采用二维模型来简化分析混凝土塔壁横向受力的方法。简化模型采用梁单元模拟塔壁,钢锚箱仍采用板壳单元模拟,焊钉位置则采用刚臂与剪力连接单元相连接。此建模方法可较为容易地提取设计所需的塔壁断面内力,但所得钢锚箱应力结果不能反映真实受力情况,而钢锚箱完全采用板壳单元又会增加建模难度。

针对混凝土塔壁断面内力分析,本文提供了一种更为高效的建模方案,可以在短时间内完成模型调整,进行多种工况分析。同时,该模型可判断钢锚箱板件受力情况,在确定索塔锚固区构造参数后辅以三维实体+板壳单元模型进行钢锚箱受力的验证。同时,本文还分析了连接方式、构造参数、混凝土开裂、混凝土收缩和徐变对索塔锚固区受力的影响。

1 简化计算模型

1.1 简化模型

简化模型是将三维钢锚箱板壳模型简化为纯二维模型。侧板、端板、承压板由板壳单元简化为梁单元,同时忽略锚垫板的厚度影响,只计入其对索力扩

散的影响,仅保留支撑板为板壳单元,2层支撑板简化为等效厚度的单层板壳;塔壁采用梁单元,焊钉位置采用弹性连接与钢锚箱相连。

1.2 算例

某独塔钢箱梁空间索面斜拉桥为2跨(160 m+140 m)连续半漂浮结构体系,空间密索型布置。主梁采用半封闭钢箱梁,双箱单室断面。主塔采用C55钢筋混凝土结构,索塔采用异型索塔,横桥向呈人字形,索塔总高约102 m。索塔锚固区采用内置式钢锚箱结构。桥塔钢锚箱共17对,分为A、B、C共3个种类。锚箱顺桥向长度为5.2 m,横向宽度为1.5 m;A类钢锚箱高度为2.3 m,共1对;B类钢锚箱高度为2.05~3.9 m,共15对;C类钢锚箱高度为0.75 m,共1对。选择B类钢锚箱作为典型锚固区(锚箱高度2.1 m)作为算例进行分析。钢锚箱承受恒载索力6 513 kN,分析时忽略横向角度影响,等效水平索力为5 523 kN。典型锚固区横断面布置图见图2。

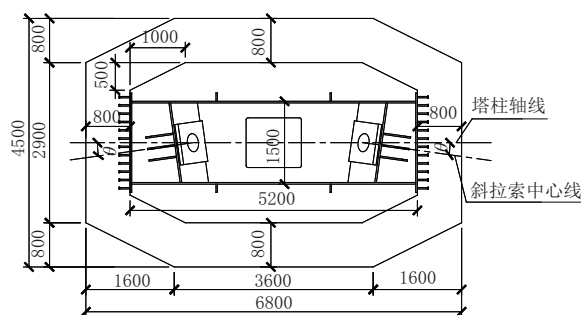


图2 典型锚固区横断面布置图(单位:mm)

钢锚箱主要板件均采用Q345qC钢材。焊钉材质采用ML15,焊钉尺寸为 $\phi 22 \times 200$ mm,横、竖向布置间距均为150 mm,与上海长江大桥索塔锚固区钢锚箱焊钉规格一致^[8]。根据上海长江大桥索塔锚固区模型试验的分析研究,此类尺寸焊钉抗剪刚度为220~255 kN/mm^[6,8-10],轴向刚度为382 kN/mm。本文焊钉抗剪刚度取220 kN/mm。

1.3 计算结果分析

建立三维实体+板壳单元模型作为对照,以验证二维简化模型的可靠性。根据三维实体+板壳单元模型的分析结果,钢锚箱横隔板对塔壁的受力影响很小,为此简化模型分别对钢锚箱有无横隔板进行了比较分析。对于边界条件,分别对钢锚箱与塔壁固结和通过焊钉连接进行了比较分析。分析时,简化模型焊钉横向数量和位置与实体板壳一致,竖向将所有1列焊钉等效成1个弹性连接。由于模型主要关心混凝土塔壁水平向受力,因此忽略重力的影

响,两侧索力对称,外部边界条件沿横桥向中心线对称,不限制索塔锚固区纵向和横向变形。采用 MIDAS FEA 建立三维实体+板壳单元模型,MIDAS Civil 建立梁单元+板壳模型(二维简化模型),对比模型共 5 个(见表 1);三维实体单元+板壳单元模型、二维简化模型见图 3、图 4。

表 1 对比模型统计表

序号	单元类型	钢锚箱与塔壁连接
模型一	三维实体单元+板壳单元	固结
模型二	梁单元+板壳(有隔板)	固结
模型三	三维实体单元+板壳单元	焊钉弹性连接
模型四	梁单元+板壳(有隔板)	焊钉弹性连接
模型五	梁单元+板壳(无隔板)	焊钉弹性连接

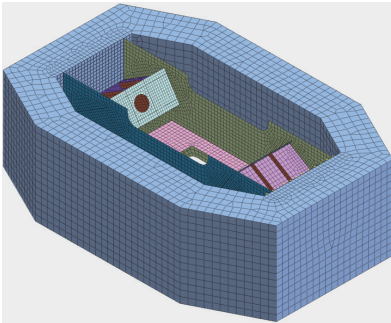


图 3 三维实体单元+板壳单元模型

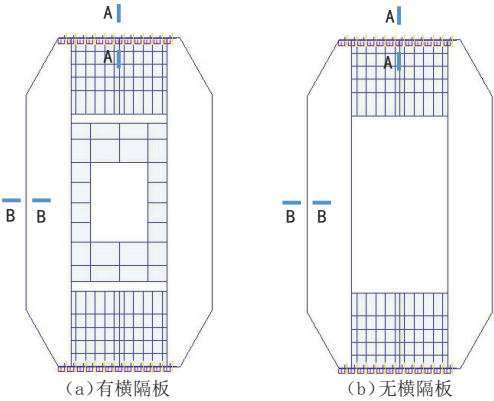


图 4 二维简化模型

模型四成桥时水平向轴力和弯矩见图 5、图 6。图 4 所示 A-A、B-B 断面均为塔壁受力控制性断面,5 个对比模型控制性断面的内力结果对比表见表 2。表 2 中, N_A 、 M_A 及 N_B 、 M_B 分别为 A-A 断面及 B-B 断面的轴力、弯矩;其中轴力以拉力为正,弯矩以塔壁外侧受拉为正。

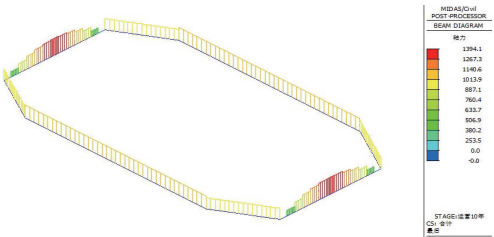


图 5 模型四成桥时塔壁水平向轴力图(单位:kN)

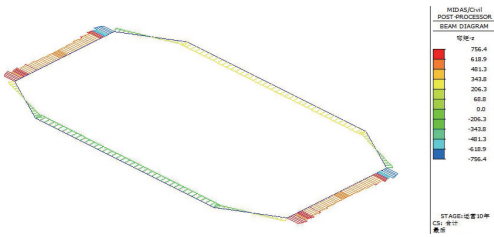


图 6 模型四成桥时塔壁水平向弯矩图(单位:kN·m)

表 2 5 个对比模型控制性断面内力结果对比表

作用	内力	模型一	模型二	模型三	模型四	模型五
恒载	N_A /kN	1 581.1	1 588.1	692.7	688.7	705.9
	M_A /(kN·m)	656.6	602.5	718.9	743.9	768.7
	N_B /kN	1 160.6	1 142.9	1 017.3	967.9	1 002.5
	M_B /(kN·m)	-392.5	-346.9	-378.6	-346.8	-359.0
整体升温 30 ℃	N_A /kN	956.2	892.3	410.7	419.3	416.5
	M_A /(kN·m)	25.1	53.3	63.3	133.2	128.9
	N_B /kN	397.1	419.1	268.8	310.2	304.2
	M_B /(kN·m)	-93.1	-85.4	-86.7	-91.9	-89.8

由表 2 可知,钢锚箱与塔壁的连接方式对计算结果影响很大,完全固结会使计算结果大大失真,采用这种模型获得的内力进行塔壁配筋设计会造成材料使用的浪费,同时过量密布的钢筋会加剧混凝土振捣困难。所以,建模时模拟钢锚箱与塔壁通过焊钉连接更符合实际。

通过结果对比可知,恒载作用下,模型四与模型三内力差值为-8.4%~3.5%,模型五与模型三内力差值为-5.2%~6.9%。由此可见,对于荷载这种直接作用,简化模型模拟精度很高。对于整体升温这种间接作用,简化模型除 A-A 断面弯矩与实体板壳模型差别较大外,其他内力的差别均控制在 15% 以内,且比实体板壳模型计算结果大。对于 A-A 断面的弯矩,简化模型虽然大于实体板壳模型,但其绝对值较小。另外,模型四与模型五塔壁内力结果仅差-3%~4%,表明简化模型钢锚箱有无横隔板对塔壁内力计算结果影响也较小。

2 种建模方式所获结果有所差异的主要原因是简化模型梁单元满足平截面假定,与实际混凝土塔壁上的应力分布存在差异。索塔锚固区是由 2 种材料构成的组合结构,材料特性差异和焊钉连接方式造成的应力分布不均也是结果有所差异的原因之一。

根据结果对比,简化模型与三维实体+板壳单元模型内力差别较小,建模工作却大大简化,可以在短时间内完成模型调整,进行多种工况分析,所获内力可以直接进行配筋设计。对于塔壁内力结果,是否

考虑钢锚箱横隔板对结果影响较小。

2 塔横断面构造参数对结构受力影响

索塔锚固区横断面纵向最小尺寸应能满足钢锚箱内斜拉索张拉所需空间,其横向最小尺寸应满足钢锚箱的受力需要、操作空间和塔内爬梯等设施的布置。同时索塔锚固区纵横向最小尺寸应能匹配桥塔承载能力。在满足以上条件的基础上,可根据桥塔的景观要求来调整索塔锚固区尺寸。

算例横向塔壁较窄,在单独恒载水平索力作用下,塔壁与钢锚箱水平力分配如表 3 所示。

表 3 算例钢锚箱与塔壁承担恒载水平力结果对比表

模型	承担水平力/kN		承担比例/%	
	钢锚箱	塔壁	钢锚箱	塔壁
模型二	3 425.4	2 097.6	62	38
模型四	3 587.2	1 935.8	65	35

由表 3 可见,塔壁承担斜拉索水平分力的 35%~38%,明显大于上海长江大桥的该类比例(15%~20%)^[8]。

上海长江大桥索塔锚固区纵横向比例为 1.16,小于本桥的 1.51。调整模型四,将本塔横桥向尺寸向两侧各扩展 0.8 m,使索塔锚固区纵横向比例接近上海长江大桥,则混凝土塔壁承担斜拉索水平力比例由 35%下降至 17%;将本塔横桥向尺寸保持不变,纵桥向尺寸向两侧各扩展 0.5 m,则混凝土塔壁承担斜拉索水平力比例由 35%上升至 39%。

由此可知,索塔锚固区纵横向尺寸比值越小,混凝土塔壁承担斜拉索水平分力越小;该比值越大,塔壁承担斜拉索水平分力越大。这是由于索塔锚固区纵横向尺寸比值越大,塔壁相对于钢锚箱的刚度越大,受力时塔壁承受的索力也越大。设计时,可以根据计算适当调整索塔锚固区尺寸,以改善混凝土塔壁的受力。如果由于景观需求使索塔锚固区纵横向比例较大,则应关注混凝土塔壁受力,确保结构安全和耐久性。

3 塔壁开裂对结构受力影响

上述恒载及整体升温作用下塔壁内力结果未计入混凝土开裂影响。建模时一般采用折减混凝土弹性模量来模拟混凝土开裂的影响。有研究表明,采用混凝土弹性模量折减系数 $a_E=0.67$ ^[11]来考虑混凝土开裂的影响是偏小的^[10]。本文按混凝土弹性模量折减系数 a_E 分别为 0.80 和 0.67 来考虑混凝土塔壁不

同开裂程度对索塔锚固区受力的影响,结果见表 4。

表 4 混凝土开裂对塔壁受力的影响

项目	模型	N_A /kN	M_A /(kN·m)	N_B /kN	M_B /(kN·m)
内力	模型四	688.7	743.9	967.9	-346.8
	模型四($a_E=0.80$)	713.7	631.4	864.9	-303.3
	模型四($a_E=0.67$)	789.4	455.5	718.9	-236.6
	模型二($a_E=0.80$)	687.4	629.3	905.9	-333.6
比值	2/1	1.04	0.85	0.89	0.87
	3/1	1.15	0.61	0.74	0.68
	4/1	1.00	0.85	0.94	0.96

由表 4 可见,混凝土开裂后,塔壁 A-A 断面轴力变化较小,弯矩下降 15%~39%;B-B 断面轴力下降 6%~26%,弯矩下降 4%~32%。折减系数越小,内力下降幅度越大,三维精细模型相比于二维简化模型下降幅度小。因此,设计时采用未开裂的梁单元简化模型所得塔壁内力进行配筋设计,对于结构设计是偏安全的。

混凝土开裂降低了塔壁的刚度,钢锚箱所承担的索力会相应增加,要想数值模拟结果接近钢锚箱实际受力,在确定索塔锚固区构造参数后,三维实体+板壳单元验证模型应考虑混凝土开裂对钢锚箱的不利影响。

4 混凝土收缩和徐变对结构受力影响

采用混凝土塔壁还应考虑混凝土收缩和徐变对索塔锚固区受力的影响。计算基于模型四,分别考虑模型节段试验工况和实际施工工况。

试验工况模拟在塔壁节段模型养护 10 d 后施加索力,再考虑运营 10 年。实际施工工况下,斜拉桥桥塔施工时间很长,第 1 节索塔锚固区施工完毕到挂索可能需要半年以上的时间,因此考虑在施工养护 180 d 后施加索力,再考虑运营 10 年。不同工况下,混凝土收缩和徐变对塔壁受力的影响见表 5。

表 5 不同工况下混凝土收缩和徐变对塔壁受力的影响

工况	内力	施工主塔		运营 10 年		收缩+徐变
		收缩	徐变	收缩	徐变	
试验 工况	N_A /kN	35.0		639.8	65.6	705.4
	M_A /(kN·m)	21.4		375.9	-611.6	-235.7
	N_B /kN	37.8		672.9	-597.3	75.6
	M_B /(kN·m)	-12.2		-217.0	250.5	33.5
实际 工况	N_A /kN	149.6		653.1	51.0	704.1
	M_A /(kN·m)	64.5		383.1	-462.9	-79.8
	N_B /kN	133.6		686.2	-452.5	233.7
	M_B /(kN·m)	-40.8		-221.2	190.4	-30.8

注:以上内力均为阶段累计值。

由表5可知,混凝土收缩对塔壁受力的影响要大于徐变的影响,收缩和徐变对塔壁轴力的影响要大于弯矩的影响,索力施加越早,收缩和徐变对塔壁受力的影响越小。从塔壁总体受力看,混凝土收缩会对塔壁受力产生不利影响,徐变则会部分抵消收缩的影响。

5 结 语

(1)提出的“梁+板壳”二维简化模型能高效反映结构受力,相较于三维精细模型,计算效率显著提升;弹性连接模拟焊钉刚度比完全固结更真实,内力误差控制在15%以内,且结果偏于安全,适用于工程设计。

(2)索塔锚固区纵横向尺寸比是控制力流分配的关键,比值越大,混凝土塔壁承担的水平索力比例越高,设计时需合理匹配尺寸以优化受力。

(3)混凝土开裂会降低塔壁刚度,导致内力向钢锚箱重分配,塔壁配筋设计时忽略开裂影响对于塔壁设计是偏安全的,但校核钢锚箱时必须考虑;混凝土收缩会对塔壁受力产生不利影响,徐变则会部分抵消收缩效应。

(4)本文提出的二维简化模型能有效指导斜拉桥内置式钢锚箱索塔锚固区的工程设计和配筋,为

同类桥梁的设计优化提供理论依据和参考。

参考文献:

- [1] 邵长宇. 现代斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2024.
- [2] 魏奇芬. 钢锚箱在斜拉桥索塔锚固区中的应用[J]. 世界桥梁, 2008, 136(2): 27-30.
- [3] 范立础. 世界最大跨径的斜拉桥——法国诺曼弟(Normandy)大桥的设计及施工[J]. 重庆交通学院学报, 1995(3): 1-8.
- [4] 苏庆田,曾明根,吴冲. 上海长江大桥索塔钢锚箱模型试验研究[J]. 工程力学, 2008(10): 126-132.
- [5] 戴捷,张喜刚,周彦锋. 苏通大桥主桥索塔锚固方案研究[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会、江苏省苏通大桥建设指挥部、中交公路规划设计院、江苏省公路学会. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2006 年全国桥梁学术会议论文集[C]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会、江苏省苏通大桥建设指挥部、中交公路规划设计院、江苏省公路学会:中国公路学会, 2006: 5.
- [6] 曾明根,苏庆田,吴冲. 上海长江大桥组合索塔锚固区受力数值计算[J]. 桥梁建设, 2007, 182(5): 34-37.
- [7] 杨允表,兰昌荣. 大跨度斜拉桥索塔钢锚箱锚固体系横向受力分析方法[J]. 世界桥梁, 2011, 149(1): 42-45; 63.
- [8] 蒋彦征. 上海长江大桥主航道斜拉桥索塔钢锚箱设计[J]. 上海公路, 2012, 125(3): 24-26.
- [9] 苏庆田,刘玉擎,曾明根. 苏通大桥索塔栓钉剪力连接件的力学性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(7) 916-920; 941.
- [10] 马旭涛. 上海长江大桥索塔锚固区模型试验与分析研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
- [11] JTG 023—85 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

(上接第 188 页)

- [3] 马磊,颜爱华,邓青儿,等. 上海闵浦大桥设计与构思[J]. 上海建设科技, 2010(5): 1-4.
- [4] 黄毅东. 钢桁梁斜拉桥横向结构体系设计[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(7): 54-57.
- [5] 徐伟,苑仁安,王强,等. 常泰长江大桥主航道桥结构体系及钢梁设计[J]. 桥梁建设, 2021, 51(3): 1-8.
- [6] 葛艳丽,费梁. 单塔双索面双层钢桁梁斜拉桥结构设计[J]. 中国市政工程, 2024(6): 6-9.
- [7] 徐伟,郑清刚,彭振华. 沪通长江大桥主航道桥主梁结构设计[J]. 桥梁建设, 2015, 45(6): 47-52.
- [8] 刘琴,杨钻,王雷. 牛田洋大桥主桥钢桁梁设计[J]. 桥梁建设,

- 2023, 53(2): 98-104.
- [9] 汪剑,刘小红. 山区大跨双层钢桁梁斜拉桥总体方案设计[J]. 城市道桥与防洪, 2021(5): 68-71.
- [10] 黄毅东. 双层斜拉桥主桥钢桁梁方案设计[J]. 市政技术, 2024, 42(12): 167-173.
- [11] CJJ11—2011 城市桥梁设计规范(2019 年版)[S].
- [12] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [13] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [14] 李卓越,刘建,董创文. 基于改进遗传算法的独塔钢桁梁斜拉桥索力优化[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 95-99.
- [15] JTG/T 3365—01—2020 公路斜拉桥设计规范[S].