

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.02.013

独塔混合梁斜拉桥总体设计及关键技术研究

黄永福¹,冯杨斌²,刘斌¹,白洪涛¹,矣志勇¹

(1.云南省交通规划设计研究院有限公司,云南昆明650041;2.云南建设基础设施投资股份有限公司,云南昆明650501)

摘要:以一座独塔柱混合梁斜拉桥为工程背景,大桥具有结构不对称度高、钢混结合段受力复杂、斜拉索锚固方式多样、抗震烈度高等设计特点和难点,通过采用UHPC混凝土、PSB930高强螺纹钢筋、低回缩锚具新型材料,采用综合调索方法、有限元分析方法、抗震措施等技术手段,采用预应力二次张拉施工工艺,科学地解决了独塔混合梁斜拉桥的多项关键技术难题,达到结构受力合理、安全可靠的目的,为同类型桥梁设计与研究提供了思路。

关键词:总体设计,高度不对称,钢混结合段,斜拉索锚固方式,抗震性能

中图分类号:U448.27

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)02-0052-04

1 工程概况

元江县跨江大桥位于云南省玉溪市元江哈尼族彝族自治县城区北部,跨越国际河流—元江(下游称红河),连接西岸的元江县新城区和东岸的江东镇,为市政桥梁,见图1。结合受控因素以及地形、地貌、地质、水文等情况,主桥采用70 m+130 m独塔斜拉桥;西岸引桥采用3×30 m预制小箱梁+45 m钢箱梁+30 m预制小箱梁,东岸引桥采用3×30 m预制小箱梁,两岸桥台均采用重力式桥台,桥梁全长463 m。



图1 元江县跨江大桥实景效果图

2 主桥总体设计

元江县跨江大桥主桥为跨径70 m+130 m的不对称独塔斜拉桥^[1],见图2。约束体系采用塔墩梁固结体系,主梁采用边跨混凝土箱梁、主跨钢箱梁的钢混结合形式;斜拉索为平行双索面,采用1 770 MPa的平行钢丝成品束;索塔采用独塔柱形式,由等截面空心塔柱和花瓶形空心主墩组成;基础为群桩基

础,承台下设16颗直径2.2 m的钻孔灌注桩。

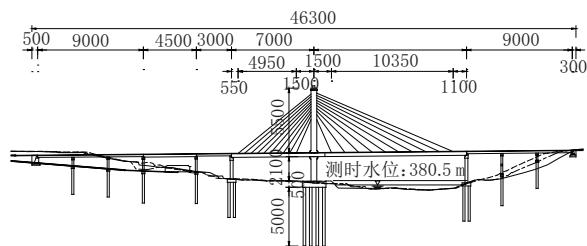


图2 桥型布置图(单位:cm)

2.1 主要设计标准

(1)道路等级:城市次干道。

(2)桥面横向布置:桥宽38 m,由6条机动车道+2条非机动车道+2条人行道+1条中央分隔带组成。

(3)设计汽车荷载:城—A级。

(4)设计寿命:100 a。

(5)抗震设防基本烈度:Ⅶ度,设计地震动峰值加速度为 $0.170 1g^{[2]}$ 。

(6)设计基本风速:设计重现期100 a, $V_{10}=25.8 \text{ m/s}^{[3]}$ 。

(7)通航标准:内河V级航道通航净空。

2.2 钢箱梁设计

由于本桥索面位于中央分隔带,为了提高主梁的整体抗扭刚度,边跨和主跨的主梁均采用箱形结构。钢箱梁中线处梁高3.2 m,顶面设2%的双向横坡,顶宽38 m,底宽25 m。梁段划分为A、B、C共3种类型,共11个梁段。其中A梁段为连接段,梁段长8 m,重为275.6 t;B梁段为钢箱梁标准段,梁段长11.5 m,重为228.5 t;C梁段为合拢段,梁段长9.5 m,重为225.6 t。主跨钢箱梁采用顶推方法施工。钢箱梁标准断面见图3。

收稿日期:2021-12-25

作者简介:黄永福(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

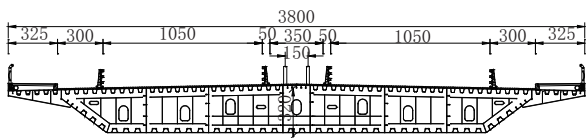


图3 钢箱梁标准断面图(单位:cm)

为了提高钢箱梁桥面板刚度和抗疲劳性能,减少桥面铺装病害,桥面板采用正交异性钢桥面板^[4]。顶板采用16 mm厚钢板,顶板设置U形加劲肋,上口宽300 mm,下口宽170 mm,厚8 mm,间距为550 mm和600 mm。底板采用14 mm厚钢板,底板采用U形加劲肋加劲,上口宽250 mm,下口宽400 mm,厚6 mm。底板加劲肋工地连接采用对接焊。纵向设置6道腹板,采用实腹式。腹板保持连续,横隔板焊接于腹板上。腹板设置5道板式加劲肋。B梁段横隔板标准间距为2.875 m,A梁段及C梁段部分横隔板采用特殊间距布置。索梁锚固构造采用锚拉板形式,根据斜拉索索力的不同,锚拉板采用两种板厚。为确保在正常运营荷载下支座不出现上拔力,在钢箱梁端部施加了永久压重荷载。

2.3 混凝土箱梁设计

混凝土箱梁按A类预应力构件设计。混凝土箱梁外轮廓与钢箱梁一致,采用单箱七室截面,边腹板为斜腹板,中腹板为直腹板。箱梁顶面两侧翼缘长3.5 m,边室顶宽5.6 m,底宽2.6 m,次边室宽4.1 m,斜拉索锚固箱室宽3.4 m。箱梁斜腹板及直腹板厚均为0.3 m,见图4。顶板厚为0.32 m,底板厚0.3 m,横隔板厚0.45 m。横隔板间距为5.5 m。边跨混凝土箱梁靠过渡墩处横梁厚2 m,箱梁塔、墩、梁固结处横梁厚7 m。为确保在正常运营荷载下支座不出现负反力,在混凝土箱梁端部也施加了永久压重荷载。边跨混凝土箱梁采用支架现浇的方法施工。

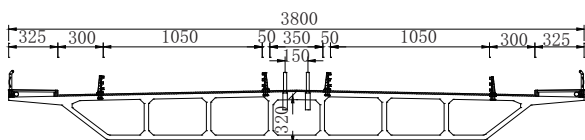


图4 混凝土箱梁标准断面图(单位:cm)

2.4 钢混结合段设计

为减小钢混结合段受力,将连接部设置在主跨侧距桥塔中心线9 m处^[5-6]。钢混结合段由结合部、钢梁加强段和混凝土梁加强段组成。

结合部(见图5)设置了上、下钢格室,钢格室的顶、底板及承压板厚均为25 mm,腹板厚为24 mm,钢格室内填充抗压强度为120 MPa的超高性能混凝土(UHPC);钢格室顶、底板设置 $\phi 22 \times 150$ 焊钉,其腹板上开有 $\phi 60$ mm圆孔,并穿过225 mm长的

$\phi 25$ mm HRB400 钢筋,与进入该圆孔的混凝土包裹在一起,形成PBL钢筋混凝土剪力键。

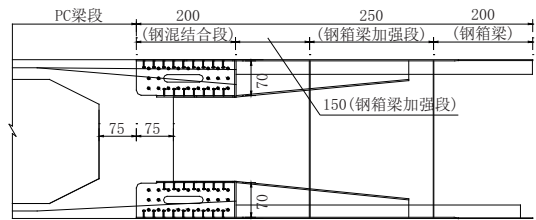


图5 钢混结合段设计图(单位:cm)

钢箱梁加强段长4 m,是结合部向标准钢箱梁段转换的过渡段,其顶、底、腹板加厚至25 mm,其中顶底板增设25 mm厚的变高度T型加劲肋。

混凝土梁加强段设置0.75 m厚的混凝土横梁,该横梁伸入结合部0.75 m以提高接缝部位的抗剪性能。

为保证钢箱梁与混凝土箱梁紧密结合,在结合部还设置有纵向预应力钢束;在钢格室顶板及腹板上设置浇注孔及连通孔,使得混凝土在浇筑时有较好的流动性,确保浇筑密实度。

2.5 斜拉索设计

斜拉索采用平行双索面,按扇形布置,索面位于桥梁中线附近,横桥向索面间距1.5 m,钢箱梁侧标准索距为11.5 m,混凝土箱梁侧标准索距为5.5 m,塔上竖向理论索距为2.0 m。斜拉索采用1 770 MPa平行钢丝,全桥共 $10 \times 4 = 40$ 根。根据索力不同,需要4种规格:PES7-109, PES7-151, PES7-199, PES7-241。

斜拉索设计寿命为大于25 a,采用包括钢丝镀锌、高密度聚乙烯内外防护层、外缠专用缠包带的三防腐体系,以保证斜拉桥在其设计寿命周期内免遭腐蚀。

2.6 索塔设计

索塔结构包括塔柱主墩,与混凝土箱梁连接形成塔墩梁固结体系,索塔全高79.2 m,见图6。

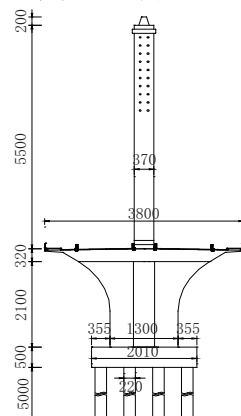


图6 索塔一般构造图(单位:cm)

塔柱为独柱式箱型钢筋混凝土结构。塔柱高 55 m, 顺桥向宽为 5 m, 横桥向宽为 3.7 m, 顺桥向壁厚为 1 m, 横桥向壁厚为 0.6 m。两侧斜拉索锚固于塔柱内壁的齿块上, 塔柱设置井字形预应力进行加强。预应力为抗拉强度为 930 MPa 的高强螺纹钢筋, 采用低回缩锚具及二次张拉工艺^[7], 以减少预应力损失。

主墩外形呈花瓶形, 为单箱三室矩形截面的钢筋混凝土结构。主墩高度 21 m, 底部 8.872 m 为等截面, 顺桥向 5 m, 横桥向宽 13 m, 壁厚为 1 m; 顶部 12.128 m 为弧形变截面。

基础采用群桩基础, 承台下设 16 根 $\phi 2.2$ m 钻孔灌注桩。考虑到本桥位于高地震烈度区, 为提高桩基础的抗震性能, 桩基顶部设置了 8 m 高钢护筒, 钢护筒壁厚为 20 mm。

3 关键技术研究

根据桥梁总体设计情况, 大桥具有结构不对称度高、钢混结合段受力复杂、斜拉索锚固方式多样、抗震烈度高等设计特点和难点, 因此设计上采取了相应的对策以解决这些关键技术问题。在材料上, 钢混结合段采用 UHPC 混凝土, 拉索锚固区的预应力采用 PSB930 高强螺纹钢筋和低回缩锚具; 在技术手段上, 结构分析采用综合调索方法、有限元分析方法, 加强桥梁抗震措施; 在施工工艺上, 高强螺纹钢筋采用二次张拉施工工艺。

3.1 斜拉索调索

主桥为独塔斜拉桥, 采用塔墩梁固结体系, 边跨为 70 m 混凝土箱梁, 主跨为 130 m 钢箱梁, 具有极高的不对称度, 使得两侧主梁重量、斜拉索角度差异非常大; 同时受混凝土收缩徐变的影响, 选择合理的索力成为设计的难点和关键点, 关乎着大桥在施工阶段和运营阶段的结构安全。主桥有限元计算模型见图 7。

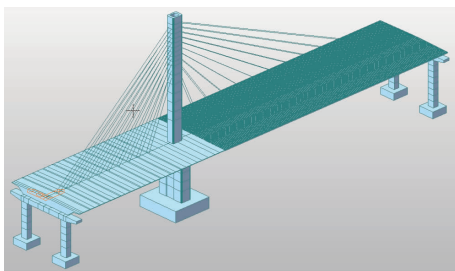


图 7 主桥有限元计算模型

在计算成桥索力时采用综合调索的方法。根据主跨钢箱梁节段自重, 获得主跨斜拉索索力; 通过主跨及边跨斜拉索水平力平衡的方法 (保证索塔垂直

线型), 得到边跨索力, 根据此索力下主梁内力对边跨混凝土箱梁进行钢束配置; 最后再综合索塔内力、主梁线型, 采用影响矩阵法进行索力微调。根据此方法, 结构具有较好的成桥状态, 在运营过程中结构各项指标也均可满足规范要求。

在计算施工张拉力时采用无应力长度法^[8]。根据合理的成桥索力求得斜拉索单元的无应力长度, 用无应力长度作为索力输入的方式; 采用倒退分析法即可获得每个施工阶段下斜拉索张拉力; 采用此索力进行正装分析, 并在主梁合龙前校核主梁的无应力曲率, 进行适当的临时压重。经过结果对比, 采用此施工张拉力得到的成桥状态与一次成桥的成桥状态基本一致, 在施工过程中结构各项指标也均可满足规范要求。

因此, 以上调索方法可较好地适用于独塔非对称斜拉桥成桥索力及施工张拉力的求取。

3.2 钢-混结合段受力分析

斜拉索索面位于中央分隔带, 对主梁横向抗扭刚度的贡献不明显; 同时, 桥梁宽度较大, 横向不均匀的汽车荷载、非机动车荷载、人群荷载使主梁产生较大的扭矩。特别是索塔附近的主梁钢混结合段, 压弯剪扭耦合效应显著, 是受力最为复杂的构件^[9]。在受力最不利工况下, 对钢混结合段开展了局部受力分析, 包括钢混结合段的钢格室强度、焊钉抗剪能力、开孔板抗剪能力、混凝土强度等验算。实体模型及部分计算结果见图 8、图 9。

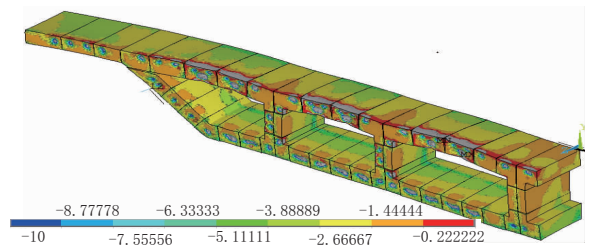


图 8 钢格式内混凝土纵向应力分布 (单位: MPa)

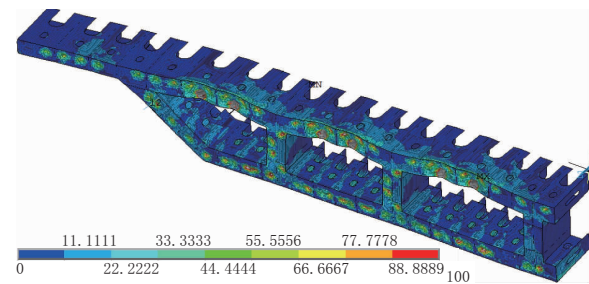


图 9 钢箱梁应力分布 (单位: MPa)

由图 8 可知, 除预应力钢束锚固格室承压板上部局部区域外, 钢格式内混凝土纵向拉应力较小, UH-PC 混凝土可满足受拉要求。由图 9 可知, 钢格室承

压板、T肋端部存在一定的应力集中,峰值应力约为250 MPa,其余区域应力均在50 MPa以下,钢结构有足够的富余应力。

3.3 塔柱拉索锚固区受力分析

斜拉索锚固于塔柱内壁的齿块上,塔柱内壁受到了较大的向外水平力,需要通过一些措施予以平衡。目前使用较多的塔梁锚固方法有:交叉锚、预应力、钢锚梁和钢锚箱。交叉锚用于实心塔柱,钢锚梁及钢锚箱用于空腔尺寸较大的塔柱,在大跨斜拉桥中应用较多^[10],这三种方法在本桥中均不适用;预应力一般分为钢绞线和高强螺纹钢,本桥索塔尺寸较小,采用预应力钢绞线将带来很大的应力松弛损失;高强螺纹钢在实际运用中同样有较大预应力损失,主要是锚具回缩引起,但低回缩锚具已经得到大量推广,可将回缩量控制在1~1.5 mm甚至更低的范围内。通过计算,采用低回缩锚具后,高强螺纹钢预应力可降低至25%以内,采用二次张拉工艺后,进一步降低了预应力损失。为减少预应力筋用量,锚固区采用PSB930 高强螺纹钢筋。首先根据斜拉索水平分力对高强螺纹钢筋用量进行估算,再通过有限元方法建立实体模型以分析与验证局部受力。

从计算结果看出,塔壁在顺桥向和横桥向基本均匀受压状态(见图10、图11),仅在锚垫板下、塔壁内倒角处、塔壁横向表面局部位置出现了应力集中。这些位置增设了局部加强钢筋,通过验算,局部承压承载力、裂缝均可满足要求。

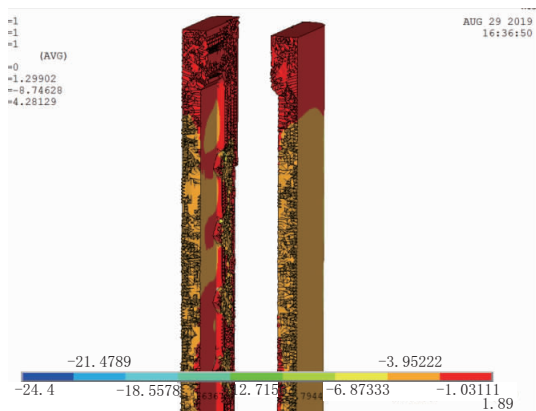


图10 顺桥向塔壁正应力整体分布(单位:MPa)

3.4 锚拉板受力分析

锚拉板是连接斜拉索和钢箱梁的关键构件,承受了巨大的索力,受力模式极为复杂^[11],对受力最大的10号斜拉索进行了局部受力分析。从图12可知,除锚拉板与套管、锚垫板连接处有局部应力集中外,其余部位 Von Mises 应力均在强度设计值305 MPa 范围内。

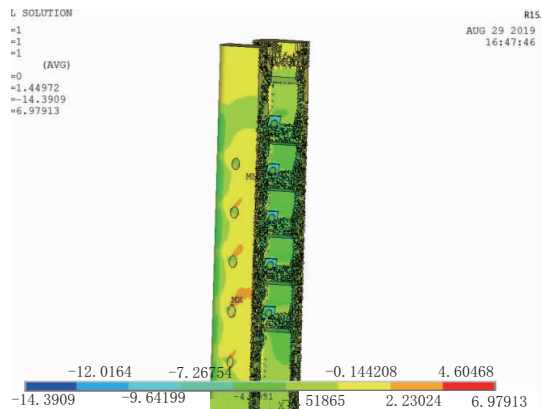


图11 横桥向塔壁正应力整体分布(单位:MPa)

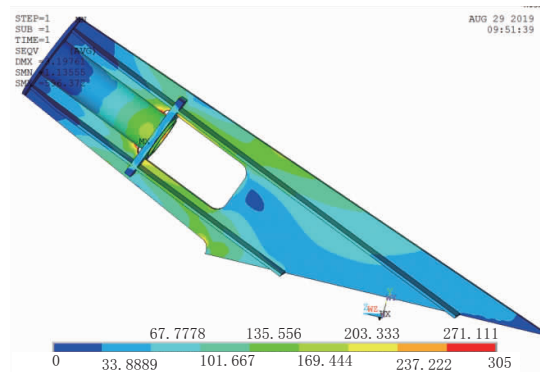


图12 斜拉索锚拉板 Von Mises 应力(单位:MPa)

3.5 抗震性能研究

主桥采用塔墩梁固结体系,避免设置大吨位支座,节省后期支座养护与更换的成本。桥位地区抗震设防烈度较高,桥梁刚度较大,抗震问题突出。大桥为甲类桥梁,抗震设防目标为:当桥梁遭受 E1 地震作用时,结构总体反应在弹性范围,基本无损伤^[12];当桥梁遭受 E2 地震作用时,可发生局部轻微损伤。

通过特征值分析、反应谱分析,对结构动力特性进行了分析,对索塔、过渡墩、桩基等构件的关键截面、支座抗剪承载力、伸缩缝纵向地震位移进行了验算,均可满足受力要求。同时大桥采取了相应抗震措施,如索塔箍筋设置闭合套箍、设置箍筋加密区、索塔主筋采用 HRB500 抗震钢筋、桩基设置钢护筒等措施,保证在罕遇地震下桥梁结构的安全性。

4 结语

通过有针对性地采用特殊材料、技术手段、施工工艺,科学地解决了独塔混合梁斜拉桥的多项关键技术难题,达到结构受力合理、安全可靠的目的,为同类型桥梁设计与研究提供了思路。

参考文献:

- [1] 云南省交通规划设计研究院有限公司.元江县跨江大桥施工图设计图纸[Z].2020.
- [2] 昆明科海地震工程有限公司.元江县跨江大桥工程场地地震动参数

(下转第58页)

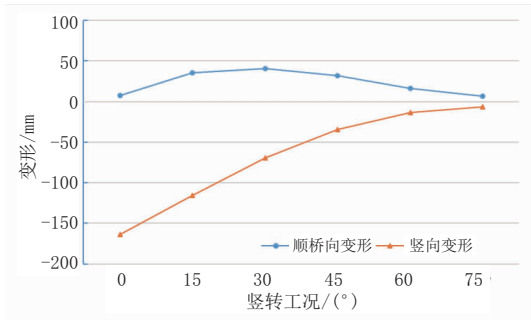


图8 结构特征断面变形趋势图

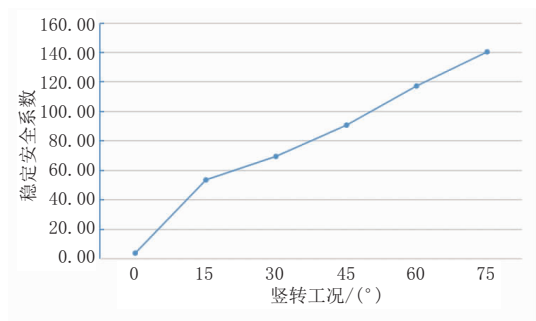


图10 结构稳定安全系数趋势图

算得到的稳定安全系数结果表明,0°工况稳定安全系数最小,为4.10,但大于安全系数4.0^[5],随竖转角度的增大,结构稳定安全系数急剧增大,整体稳定性增强,见图10。

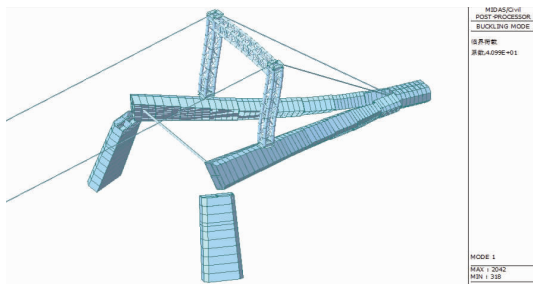


图9 竖转过程结构屈曲分析典型结果

3 结语

(1)“卧拼竖转”工艺能克服传统吊装工艺施工中风险高、拼接精度低、环境影响大等弊端,能够有效保证工程质量及进度。

(2)有限元分析结果表明,对于竖转成塔工艺,

结构体系最不利受力状态为主塔刚脱离胎架阶段,此状态下结构应力、索力及变形均较大,结构稳定安全系数较小,应重视对此阶段的结构监测控制。

(3)对于主要受力构件的主塔转铰,受制于竖转过程中主塔角度及轴向力的不断变化以及销孔附近的应力集中现象,此处的应力分布及预警机制还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 张伟,卢龙.倾斜独塔斜拉桥钢塔竖转施工技术[J].山西建筑,2020,46(12):143-144.
- [2] 司永明,姬子田,胡敏,等.钢箱混凝土索塔竖转过程的受力分析[J].公路,2022,67(8):130-136.
- [3] 徐琛.斜拉桥桥塔竖转工艺拉索受力性能研究[J].城市道桥与防洪,2021(7):88-90.
- [4] 康俊涛,何林,范杰,等.马蹄形独塔斜拉桥钢主塔竖转施工监控关键技术[J].公路,2016,61(1):95-101.
- [5] JTG/T D65-01—2007,公路斜拉桥设计细则[S].

(上接第55页)

专题研究报告[R].2018.

- [3] 湖南大学土木工程学院风工程试验研究中心.元江县跨江大桥抗风性能分析[R].2019.
- [4] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J].中国公路学报,2017,30(3):14-30,39.
- [5] 刘高,唐亮,谭皓,等.混合梁斜拉桥钢混结合部的合理位置[J].公路交通科技,2010,27(6):52-57.
- [6] 张志平,贾伟红.鄂东长江公路大桥主梁钢混结合部位置的选取[J].公路,2017,62(2):118-122.
- [7] 彤辉.二次张拉低回缩预应力锚具及锚下应力分析[D].长沙:湖南大

- 学,2010.
- [8] 秦顺全.斜拉桥安装无应力状态控制法[J].桥梁建设,2003(2):31-34.
- [9] 黄彩萍.混合梁斜拉桥钢混结合段受力性能的试验研究与理论分析[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [10] 叶华文,徐勋,李翠娟,等.大跨斜拉桥混凝土索塔锚固结构形式比较[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(3):11-15.
- [11] 卫星,李小珍,李俊,等.钢箱梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固结构的试验研究[J].工程力学,2007(4):135-141.
- [12] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].