

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.020

边跨非对称悬臂施工对矮塔斜拉桥 合理施工状态影响研究

郭维强¹, Bruno BRISEGHIELLA^{1,2,3}, 陈权⁴, 薛俊青^{1,2,3}, Camillo NUTI^{1,5}

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 滨海与海洋基础设施及材料劣化和控制国际联合实验室, 福建 福州 350108; 3. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350108; 4. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 5. 罗马第三大学 建筑学院, 拉齐奥大区 罗马 00154)

摘要:矮塔斜拉桥通常采用对称悬臂法施工, 客观条件可能导致该方法无法采用, 需要研究非对称悬臂施工的可行性。文章针对双塔双索面预应力混凝土矮塔斜拉桥开展实桥监测, 建立有限元模型, 分析合理成桥状态和合理施工状态。考虑背景工程无法采用对称悬臂法的实际情况, 基于合理施工状态提出边跨现浇段非对称悬臂施工的2种方案, 对比采用2种方案完成边跨现浇段施工后对合理施工状态下主梁的挠度、应力及斜拉索索力的影响。结果表明:采用应力平衡法计算成桥恒载弯矩可行域, 并以此为约束条件利用基于影响矩阵法原理的未知荷载系数法可计算合理成桥索力; 利用考虑施工阶段的未知荷载系数法计算合理初张拉索力及二次张拉索力, 可得到合理施工状态; 与方案1相比, 采用方案2的主梁最大挠度更小且分布更合理, 边跨无索区主梁上缘拉应力更小, 斜拉索索力分布更均匀; 方案2对矮塔斜拉桥的合理施工状态影响较小, 最终可达到合理成桥状态。

关键词:桥梁工程; 矮塔斜拉桥; 有限元分析; 未知荷载系数法; 非对称悬臂施工

中图分类号: U24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)01-0136-09

Influence of asymmetric cantilever construction at side spans on reasonable construction state of extradosed cable-stayed bridge

GUO Weiqiang¹, Bruno BRISEGHIELLA^{1,2,3}, CHEN Quan⁴, XUE Junqing^{1,2,3}, Camillo NUTI^{1,5}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Joint International Research Laboratory of Deterioration and Control of Coastal and Marine Infrastructures and Materials, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350108, China; 4. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 5. Department of Architecture, Roma Tre University, Rome 00154, Italy)

Abstract: Symmetric cantilever construction is commonly used for extradosed cable-stayed bridges, however, it will be limited in some cases due to objective conditions. Therefore, the feasibility of the asymmetric cantilever construction should be investigated. In this paper, the field monitoring on a prestressed concrete extradosed cable-stayed bridge with twin pylons and double-cable planes was conducted. The finite element model was built to analyze the reasonable finished state and reasonable construction state of the bridge. Because the symmetric cantilever construction cannot be used in this case study, two asymmetric cantilever construction schemes for the cast-in-situ sections of side spans were

收稿日期: 2024-03-06; **修回日期:** 2024-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778148); 可持续与创新桥梁福建省高校工程研究中心开放课题资助项目(SIBERC202203)和福建省土木工程多灾害防治重点实验室开放课题资助项目(MPMC-2022-4)

作者简介: 郭维强(1987—), 男, 甘肃漳县人, 福州大学博士生;

Bruno BRISEGHIELLA(1971—), 男, 意大利帕多瓦人, 博士, 福州大学教授, 博士生导师;

薛俊青(1985—), 男, 福建平潭人, 博士, 福州大学副研究员, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: junqing.xue@fzu.edu.cn;

Camillo NUTI(1953—), 男, 意大利罗马人, 罗马第三大学教授, 博士生导师。

proposed based on the reasonable construction state. The influences of two schemes on the deflections and stresses of the girder and the cable forces of the stay cables in the reasonable construction state were compared. The results demonstrate that the stress equilibrium method can be used to calculate the bending moment feasible region of the girder under the dead load in the reasonable finished state. The bending moment feasible region of the girder can be used as the constraint condition to calculate the cable forces in the reasonable finished state by using the unknown load coefficient method based on the influence matrix method. The unknown load coefficient method considering the construction stages was selected to calculate the reasonable initial tensioning cable forces and the secondary tensioning cable forces and to obtain the reasonable construction state. Compared with the mechanical performance of the bridge by using scheme 1, the maximum deflection of the girder by using scheme 2 is less and the distribution is more reasonable, the tensile stress on the upper surface of the girder in the segments of the side spans without stay cables is less and the distribution of the cable forces is more uniform. Consequently, the influence of the asymmetric cantilever construction scheme by using scheme 2 on the reasonable construction state of the extradosed cable-stayed bridge is less than that by using scheme 1, and the reasonable finished state can be obtained by using scheme 2.

Key words: bridge engineering; extradosed cable-stayed bridge; finite element analysis; unknown load coefficient method; asymmetric cantilever construction

矮塔斜拉桥是一种介于连续梁(刚构)桥与斜拉桥之间的组合体系桥型^[1-3],其结构刚度大、跨越能力大、施工方便、经济性好且造型美观^[4-6]。与斜拉桥相比,矮塔斜拉桥的桥塔高度低,有利于控制塔顶水平位移及主梁变形^[7-8];矮塔斜拉桥的体系刚度弱,主梁刚度在体系刚度中贡献更大^[9]。铁路矮塔斜拉桥活载大,结构整体刚度要求高,尤其对主梁刚度要求更高^[10],其斜拉索倾角小,在同样的恒载和活载作用下,斜拉索产生的水平分力更大,主梁受力也更大。随着高速铁路不断发展,铁路桥梁向大跨、高速、重载方向迈进^[11-12],铁路矮塔斜拉桥得到广泛应用^[13-14]。

矮塔斜拉桥通常采用对称悬臂浇筑施工方法,施工过程中需进行多次结构体系转换^[15-16],结构变形和内力复杂^[17-18],因此准确把握其施工过程中的变形和内力是保证施工状态合理并最终达到合理成桥状态的关键因素^[19-20]。针对采用对称悬臂施工方法的矮塔斜拉桥,研究发现,拉索初张力、主梁容重和刚度、边跨长度对矮塔斜拉桥的结构变形和内力影响较为明显^[21-22]。其中拉索初张力和主梁容重对结构变形影响较大^[21];主梁刚度和边跨长度对结构内力影响较大,且主梁刚度是影响荷载作用下索力的主要因素^[22]。

非对称悬臂施工对于对称桥梁结构的变形、应力和斜拉索索力影响的研究较少。学者们针对大跨度连续刚构桥开展非对称悬臂施工的影响研究^[23-24]。文献[23]研究挂篮两边前移的方式非

对称施工边跨现浇段,文献[24]研究边墩设置支架的方式施工边跨现浇段,两者均发现非对称悬臂施工产生的主梁变形及应力均大于对称悬臂施工;文献[23]还发现边跨现浇段采用挂篮前移悬臂施工所产生的主梁变形和最大压应力均大于支架悬臂施工。

与刚构桥相比,大跨度铁路矮塔斜拉桥的承载能力要求高。目前,关于矮塔斜拉桥采用非对称悬臂施工方法的研究很少。本文以中国第一座跨度超过 200 m 的铁路双塔双索面预应力混凝土矮塔斜拉桥(成昆铁路扩能改造的控制性工程之一)为研究对象,采用实桥监测结合有限元分析手段,计算合理成桥索力并确定合理施工状态。针对本桥因客观原因导致边跨现浇段必须采用非对称悬臂施工的状况,提出 2 种非对称悬臂施工方法;通过分析不同方法对矮塔斜拉桥合理施工状态的影响,提出可确保非对称悬臂施工时受力安全并最终达到合理成桥状态的优选方法。

1 现场监测

1.1 背景工程

本文选取成昆铁路扩能改造工程的攀枝花金沙江大桥为背景工程。该桥为双塔双索面预应力混凝土矮塔斜拉桥,采用塔梁固结、墩梁分离的结构体系,是目前国内跨度最大的双线铁路矮塔斜拉桥,全长为 473.5 m,桥跨布置为 120 m + 208 m + 120 m,如图 1 所示。斜拉索采用扇形双

索面形式,设置 7 对共 28 组斜拉索,在桥塔和主梁上的锚固间距分别为 1、8 m。主梁横截面采用单箱双室变高度直腹板截面,梁高为 6.8~11.3 m,箱梁顶宽 13.10 m,底宽 10.75 m。

主梁、桥塔截面及测点布置如图 2 所示。其中,边跨平直段主梁截面,如图 2a 所示。主梁为全预应力结构,设置纵桥向和竖向预应力筋。

H 型桥塔的塔高(自梁顶面起算)为 28 m,如图 2b 所示。塔柱及连接横梁均采用矩形截面,塔柱截面顺桥向、横桥向的尺寸分别为 4.6、2.4 m,连接横梁截面顺桥向、竖桥向的尺寸分别为 2.8、2.0 m。主梁和桥塔均采用 C55 混凝土。纵桥向预应力筋和斜拉索均采用直径 15.2 mm 钢绞线,竖向预应力筋采用普通螺纹钢。

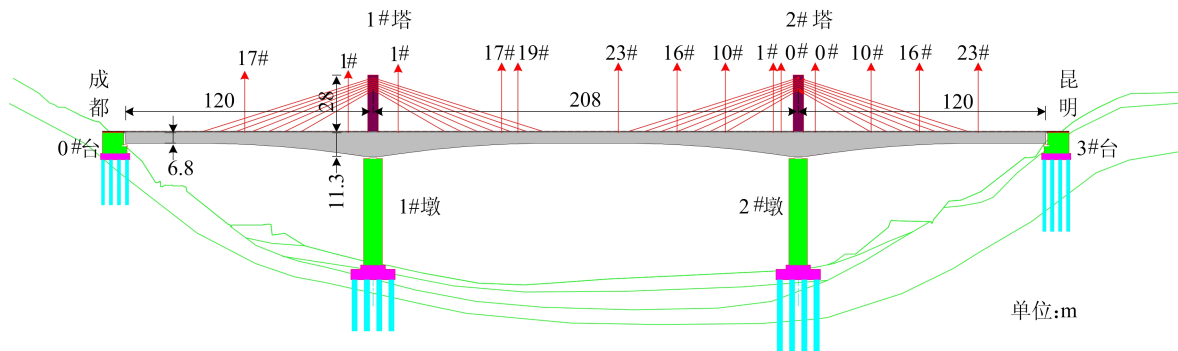
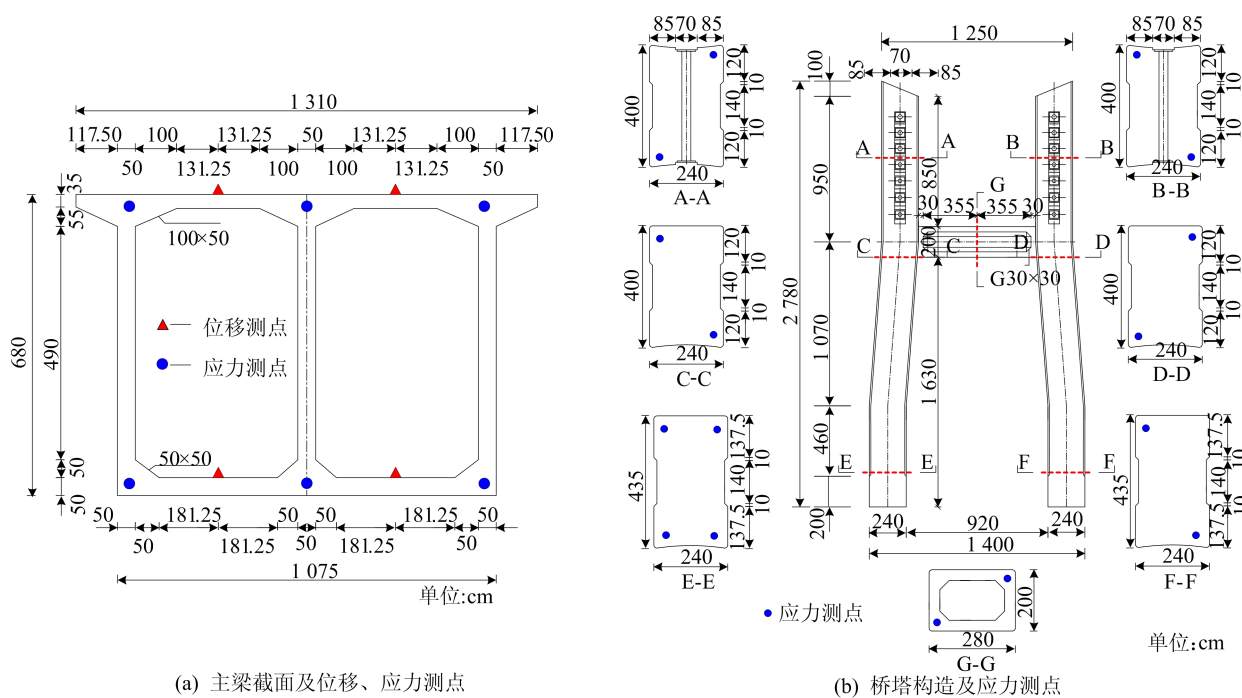


图 1 桥跨布置及主梁应力控制截面



(a) 主梁截面及位移、应力测点

(b) 桥塔构造及应力测点

图 2 主梁、桥塔截面及测点布置

1.2 实桥监测

实桥监测包括主梁位移及应力、桥塔应力和斜拉索索力。在每个主梁梁段端部的顶底板分别布置 2 个位移测点(图 2a),并采用 NTS-362R15U 型全站仪测量主梁沿竖桥向位移。主梁应力控制截面位于 0#、1#、10#、16#、17#、19# 和 23# 梁段,并按冗余互补的方式在每个截面顶底板各布置 3 个应力测点(图 2a)。桥塔应

力控制截面位于桥塔根部、无索区顶部、有索区中部和横撑中部(图 2b)。主梁采集顺桥向的应力分量,桥塔采集竖桥向的应力分量。应力测试采用振弦式传感器。传感器沿主梁顺桥向和桥塔竖桥向布置,采用绑扎丝定位在钢筋上。主梁和桥塔应力传感器的布置情况如图 3 所示。

施工过程中,定期通过振弦测试仪读取传感器的微应变。当混凝土应变较小时,通过胡克定

律计算得到相应测点的混凝土应力值。采用索力动测仪测试斜拉索的索力。

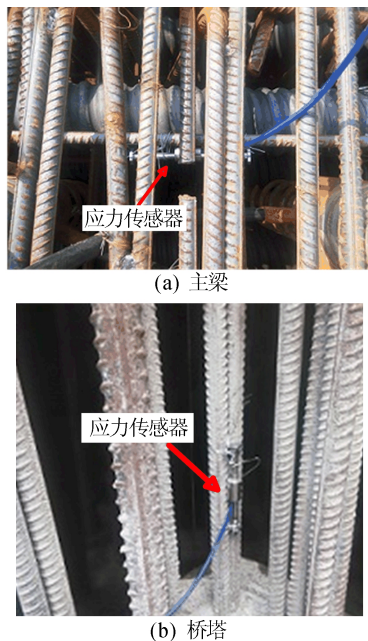


图 3 应力传感器布置情况

2 有限元模型

采用 Midas/Civil 软件建立背景工程上部结构的有限元模型,如图 4 所示,包括主梁、桥塔和斜拉

索。主梁和桥塔采用一般/变截面梁单元模拟,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟。全桥模型共划分 289 个节点和 298 个单元,其中包括主梁 170 个单元、桥塔 72 个单元和斜拉索 56 个单元。主梁和桥塔的混凝土考虑收缩徐变效应,采用弹塑性模型。斜拉索和预应力钢束均采用直径 15.2 mm 钢绞线。混凝土和钢绞线材料特性见表 1 所列。

外露式混凝土锚块、施工挂篮和竖向预应力筋采用竖向集中力模拟。索梁锚固和塔梁固结采用刚性连接模拟。背景工程的 1#墩顶布置固定铰支座,2 个桥台与 2#墩顶均布置活动铰支座,悬臂施工时在墩顶支座两侧布置临时固结和在边跨现浇段布置临时支架。为模拟边界条件的约束作用,采用一般支承模拟固定铰支座,限制 1#墩顶节点的所有平动自由度及绕顺桥向轴的转动自由度;采用一般支承模拟活动铰支座,限制 2 个桥台与 2#墩顶节点处的横桥向和竖桥向的平动自由度及绕顺桥向轴的转动自由度;采用一般支承模拟悬臂施工时墩顶支座两侧的临时固结,限制墩顶支座节点处全部平动及转动自由度;采用节点弹性支撑模拟临时支架。通过计算发现桥墩竖向变形量较小(4.7 mm),可以忽略,因此将桥墩视为刚性支撑。

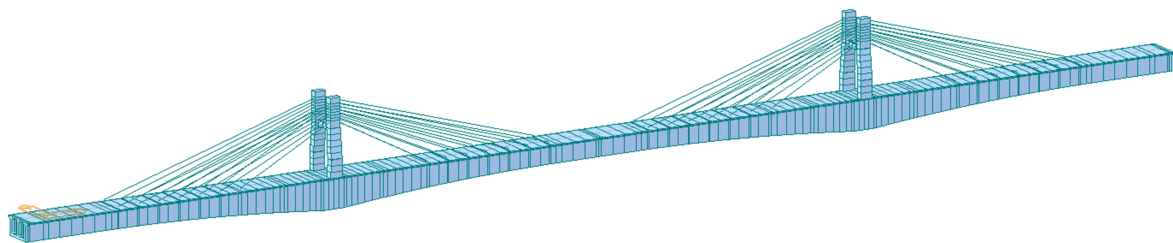


图 4 有限元模型

表 1 材料特性

类型	容重/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
C55 混凝土	26.5	3.60×10^4	0.2	2.97	18.5
钢绞线	78.5	1.95×10^5	0.3	1 860	1 860

本模型共定义 102 个施工步骤开展施工阶段分析。其中桥塔和 0#梁段同时激活,不考虑桥塔的施工过程。1#和 2#墩以桥塔为中心轴分别向两边对称施工各梁段。14#梁段浇筑后张拉第 1 根斜拉索(C1),之后每隔 2 个梁段张拉 1 根斜拉索;待 26#梁段浇筑后,张拉完成最后 1 根斜拉索(C7)并进行中跨合龙段的施工,完成全桥第 1 次体系转换。然后依次进行边跨不平衡段

(27#梁段)、2#墩边跨现浇段(28#和 29#梁段)、1#墩边跨现浇段的施工,使体系达到成桥阶段。最后开展二期恒载和斜拉索 2 次张拉施工。

3 合理成桥状态和合理施工状态

3.1 合理成桥状态确定

合理成桥状态指施工完成最终成桥后,在所有恒载作用下,结构受力满足某种理想状态^[25]。

确定合理施工状态前,需预先确定出合理成桥状态作为目标状态,使施工完成后,最终成桥结构受力达到该状态。矮塔斜拉桥的索力具有可调性,通过调整索力可确定出一组合理索力,在其作用下结构的受力达到合理成桥状态,故确定合理成桥状态的实质是确定合理成桥索力^[26]。

确定合理成桥状态时,首先采用应力平衡法求解出背景工程的主梁成桥恒载弯矩可行域^[27],如图 5 所示;以此为约束条件,利用基于影响矩阵法原理的未知荷载系数法^[28-29]求解出合理成桥索力,进而确定出合理成桥状态。合理成桥索力如图 6 所示,图 6 中:拉索编号从左到右依次为 1#墩边跨侧 C7~C1、中跨侧 C1~C7;2#墩中跨侧 C7~C1、边跨侧 C1~C7。

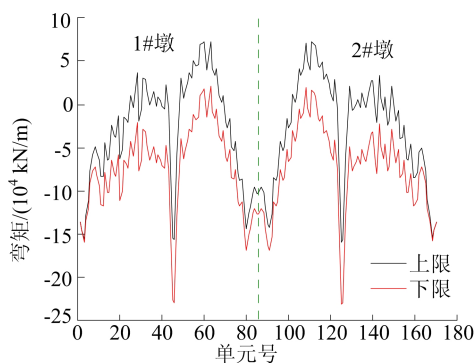


图 5 主梁成桥恒载弯矩可行域

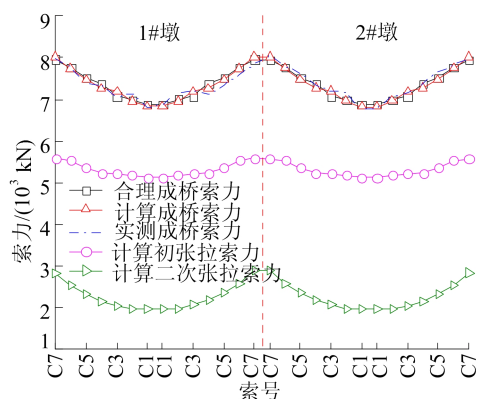


图 6 成桥索力与施工索力

3.2 合理施工状态确定

合理施工状态指施工过程中,结构受力安全,成桥后的索力为合理成桥索力^[30]。斜拉索张拉分两步(初张拉和二次张拉)完成。26#梁段浇筑后(中跨合龙前),完成斜拉索初张拉;二期恒载施工完成后,开展斜拉索二次张拉。确定合理施工状态的实质是确定斜拉索的计算初张拉索力和计算二次张拉索力。

使用未知荷载系数法求解斜拉索的计算初张拉索力和二次张拉索力。将有限元模型计算的初张拉索力与二次张拉索力带入模型中进行正装模拟分析,得到计算成桥索力(图 6)。求解初张拉索力时,以初张拉完成后索梁锚固点处的理论抬升量为约束条件^[28];求解二次张拉索力时,以二次张拉完成后,当前阶段索梁锚固点处的理论抬升量为约束条件^[28],精确计算未知荷载系数。

由图 6 可知,对比计算成桥索力与合理成桥索力发现两者吻合较好,最大误差仅为 1.16%。通过未知荷载系数法求解斜拉索的初张拉索力和二次张拉索力的结果精度高,可用于本研究中计算初张拉索力和二次张拉索力,所对应的施工状态可作为本桥合理施工状态。

由于结构对称,选取 1#墩主梁边跨侧 1/4 跨(7#梁段)、跨中(14#梁段)、3/4 跨(21#梁段)和最大双悬臂阶段(26#梁段)作为控制截面,对比合理施工状态下不同施工阶段的有限元计算与实测主梁挠度值,如图 7 所示。规定挠度向上为正,向下为负。对比可知,各控制截面的有限元计算与实测主梁挠度变化趋势基本一致,数值吻合较好,大部分误差小于 10 mm。

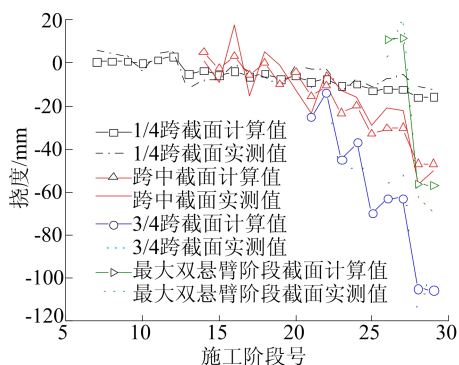


图 7 1#墩主梁控制截面挠度

限于篇幅,选取 2#墩中跨侧 16#梁段、2#墩边跨侧 0#梁段和 1#墩边跨侧 1#梁段为控制截面,对比合理施工状态下不同施工阶段的有限元计算值和实测主梁应力值,如图 8 所示。从图 8 可以看出,各控制截面的有限元计算与实测主梁应力变化趋势总体上保持一致,数值相差较小。最大拉应力的计算值(0.31 MPa)和实测值(0.84 MPa)、最大压应力的计算值(8.94 MPa)和实测值(10.80 MPa)均出现在 1#墩边跨侧 1#梁段底板,小于 C55 混凝土抗拉强度设计值(2.97 MPa)和抗压强度设计值(18.50 MPa)。

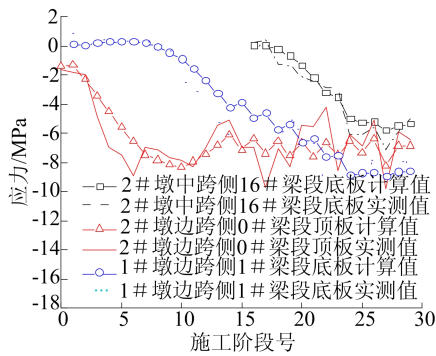


图 8 主梁控制截面应力

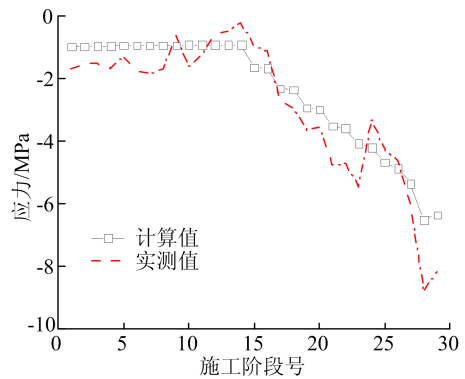


图 9 1#墩塔根截面应力

分析有限元模型计算结果,可知桥塔在各施工阶段塔根截面的压应力均最大。由于结构对称,仅展示 1#墩塔根截面在合理施工状态下不同施工阶段的桥塔压应力值,如图 9 所示。分析发现塔根截面的有限元计算与实测桥塔压应力变化趋势总体保持一致,数值未出现过大大偏差。实测最大压应力为 8.82 MPa,小于 C55 混凝土抗压强度设计值(18.50 MPa)。

对比第 3.2 节计算成桥索力(图 6)和成桥索力的实测值^[31]发现两者吻合较好,最大误差为 2.99%出现在 2#墩中跨侧 C2 斜拉索,未超过规范规定的容许误差±5%^[32]。

综上所述,采用基于影响矩阵法原理的未知荷载系数法确定的合理施工状态下主梁挠度及应力、桥塔应力、斜拉索索力的计算值与实测值吻合良好,说明本文所建立的有限元模型可较好地模拟大跨度矮塔斜拉桥的合理施工状态。

4 非对称悬臂方法对施工状态的影响

4.1 非对称悬臂施工方案

由于背景工程 1#墩边跨现浇段下方为既有铁路线,春运期间为保证既有客货运输安全,暂停 1#墩边跨现浇段施工,导致只能先施工 2#墩边跨现浇段,然后再施工 1#墩边跨现浇段,从而造成 1#和 2#墩边跨现浇段采用两边非对称悬臂施工方案。对于大跨度矮塔斜拉桥,若边跨非对称悬臂施工阶段所采用的施工方法不当,除了施工完成后难以达到合理成桥状态之外,还可能给施工带来极大安全隐患。鉴于此,本文提出 2 种易于实现的非对称悬臂施工方案,见表 2 所列。通过有限元法对比分析 2 种方案主梁的挠度、应力和斜拉索索力,选择影响最小的方案用以指导施工。

表 2 非对称悬臂施工方案

方案	内容	优点	缺点
方案 1	采用挂篮逐步前移依次施工边跨现浇段,即挂篮先移至 28#梁段,待其施工完成后再将挂篮移至 29#梁段(此时挂篮底模前端搭接在桥台上)进行施工	无需在边跨现浇段下方搭设支架,可缩短工期、节约成本、避免支架搭设占用道路使用空间	边跨现浇段自重较大,施工完成后无索区主梁上缘拉应力会有所增大并可能造成拉应力超限
方案 2	1#和 2#墩边跨现浇段下方均搭设支架,具体为,先在支架上进行 2#墩边跨现浇段施工,完成后不拆除支架;采用同样方式施工 1#墩边跨现浇段;待 2 个边跨现浇段施工完成后,同时拆除支架	1#和 2#墩边跨现浇段均在支架上施工,先施工的 2#墩边跨现浇段浇筑完成后,其自重通过支架传递给基础,对已形成的结构仅产生收缩徐变影响,保证结构受力安全	由于地质原因需先进行桩基础施工,然后在桩基础上搭设支架,延长工期、增加成本、占用桥下道路使用空间

4.2 非对称悬臂施工阶段合理施工方案

4.2.1 施工方案对主梁挠度的影响

采用表 2 的 2 种方案完成边跨现浇段浇筑后的主梁挠度如图 10 所示。采用方案 1 的 2 个桥墩从边跨无索区第 1 个梁段到边跨现浇段(28#和 29#梁段)之间的挠度增幅较大,最大下挠达 185 mm。其原因是方案 1 采用挂篮逐步前移悬

臂浇筑边跨现浇段,边跨质量增加,导致边跨无索区主梁向下挠度增幅较大。采用方案 2 的 2 个桥墩从边跨无索区第 1 个梁段到边跨现浇段之间的挠度增幅(最大下挠 114 mm)远小于方案 1。主要是由于方案 2 边跨现浇段在支架上进行施工,其浇筑完成后对已形成结构仅产生收缩徐变影响。采用方案 2 的主梁挠度分布更为均匀,更有

利于结构受力。

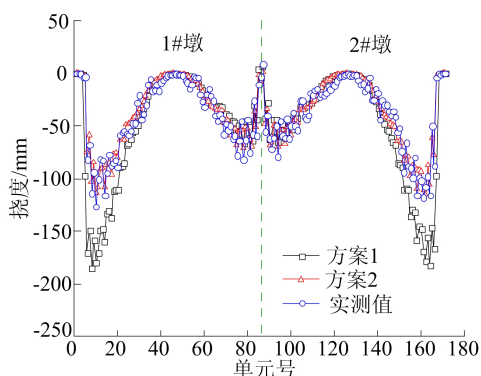


图 10 边跨现浇段浇筑完成后的主梁挠度

4.2.2 施工方案对主梁应力的影响

采用表 2 的 2 种方案完成边跨现浇段施工后,主梁的上、下缘应力如图 11 所示。

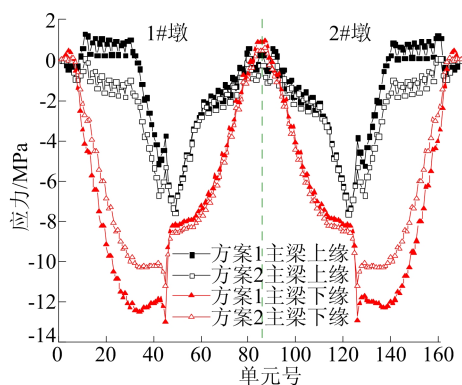


图 11 边跨现浇段浇筑完成后的主梁应力

从图 11 可以看出:方案 1 的主梁上缘最大拉应力(1.32 MPa)和最大压应力(7.57 MPa)分别出现在 1#墩边跨无索区 23#梁段和 2#墩塔根附近主梁截面;方案 2 主梁上缘最大拉应力(0.06 MPa)和最大压应力(7.62 MPa)分别出现在 2#墩边跨侧无索区 23#梁段和 2#墩塔根附近主梁截面。方案 1 的最大拉应力大于方案 2,差值达 1.26 MPa。方案 1 的最大拉应力虽未超过 C55 混凝土抗拉强度设计值,但其压应力储备不足,考虑施工过程中存在各种不确定因素,采用该方案施工,存在一定风险。方案 2 虽然在边跨也存在拉应力,但是仅为 0.06 MPa,因此其压应力储备高于方案 1。从上缘应力的整体分布来看,无论是边跨或中跨侧,方案 1 拉应力均较为明显。方案 1 主梁下缘最大拉应力(0.93 MPa)和最大压应力(12.90 MPa)分别出现在 2#墩跨中位置和塔根附近主梁截面;方案 2 主梁下缘最大

拉应力(0.57 MPa)和最大压应力(11.21 MPa)分别出现在 1#墩跨中位置和塔根附近主梁截面。方案 1 主梁下缘拉应力接近 1 MPa,大于方案 2。因此,采用方案 2 进行边跨非对称悬臂施工对主梁受力更有利。

4.2.3 施工方案对斜拉索索力的影响

采用表 2 的 2 种方案施工完成边跨现浇段后,斜拉索索力如图 12 所示。由图 12 可知:方案 1 的各斜拉索索力均大于方案 2;方案 1 的 1#墩边跨侧 C7 索的索力比方案 2 大 354 kN,达到了 6.13%;方案 2 的各斜拉索索力分布更均匀。

综上所述,分析主梁挠度及应力、斜拉索索力结果发现,方案 2 为优选方案。因此,最终选用方案 2 进行边跨现浇段非对称悬臂施工,相关施工示意图及现场情况如图 13 所示。

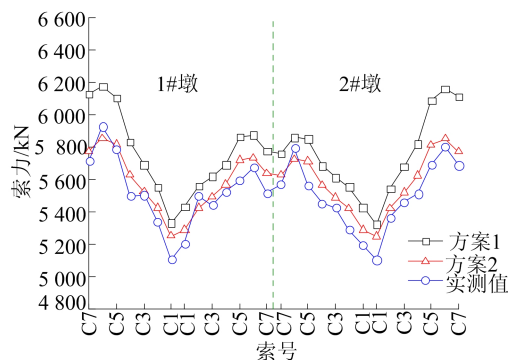


图 12 边跨现浇段浇筑完成后的斜拉索索力

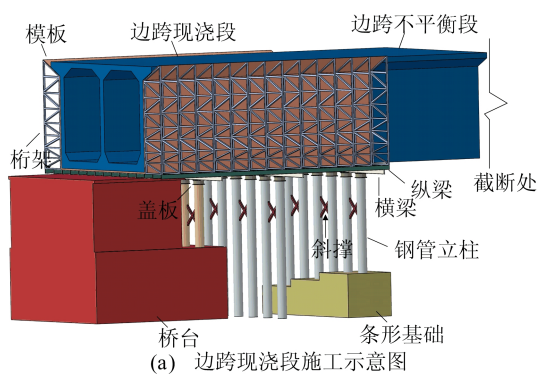


图 13 边跨现浇段非对称悬臂施工

4.3 非对称悬臂施工阶段对合理施工状态影响

4.3.1 主梁挠度

采用方案 2 浇筑完边跨现浇段后,主梁挠度实测值与合理施工状态下的有限元计算值对比见图 10 所示。分析发现,主梁挠度实测值与计算值的变化趋势总体保持一致,除 2#墩边跨侧有索区中部位置(差值 13.2 mm)和 1#墩边跨侧 3/4 跨截面位置(差值 12.5 mm)外,其余测点差值小于 10 mm。

4.3.2 主梁应力

采用方案 2 浇筑完边跨现浇段后,主梁控制截面应力实测值与合理施工状态下的有限元计算值对比如图 14 所示。图 14 中:A、B 分别为 1#墩边跨侧 1#、17#;C~J 分别为 1#墩中跨侧 1#、17#、19#,2#墩中跨侧 0#、1#、10#、16#、23#;K~N 分别为 2#墩边跨侧 0#、10#、16#、23#。

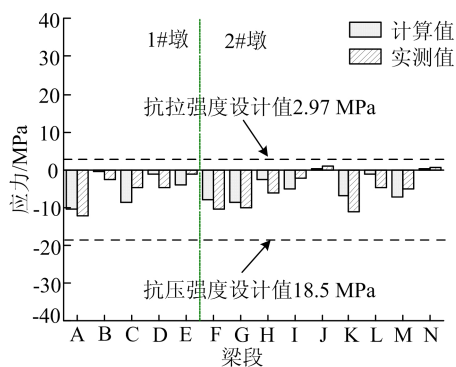


图 14 边跨现浇段浇筑完成后主梁应力

由图 14 可知:所有应力控制截面的主梁应力实测值与计算值偏差均小于 4.12 MPa,该偏差对大跨度矮塔斜拉桥而言属于合理范围;主梁的最大拉应力计算值(0.39 MPa)和实测值(0.82 MPa)均出现在 2#墩中跨侧 23#梁段,均未超过 C55 混凝土抗拉强度设计值(2.97 MPa);主梁的最大压应力计算值(10.29 MPa)和实测值(12.06 MPa)均出现在 1#墩边跨侧 1#梁段,均未超过 C55 混凝土抗压强度设计值(18.5 MPa)。因此,按照方案 2 完成边跨现浇段非对称悬臂施工后,对合理施工状态下的主梁应力影响较小,可确保施工完成后主梁受力的合理性。

4.3.3 斜拉索索力

采用方案 2 浇筑完边跨现浇段后,斜拉索索力实测值与合理施工状态下的有限元计算值对比如图 12 所示。分析发现,斜拉索索力计算值与实

测值吻合较好,最大偏差出现在 1#墩边跨侧 C6 斜拉索,仅为 3.69%。说明方案 2 对合理施工状态下的斜拉索索力影响较小。

综上所述,虽然边跨现浇段采用了非对称悬臂施工,但采用本文所提出的方案 2 施工,对合理施工状态影响较小。同类桥型可借鉴该方案开展边跨现浇段非对称悬臂施工。

5 结 论

本文采用实桥监测结合有限元分析的手段,确定矮塔斜拉桥的合理成桥与合理施工状态。在此基础上对比不同的非对称悬臂施工方案,可得出以下结论。

1) 利用基于影响矩阵法原理的未知荷载系数法求解出桥梁合理成桥索力,对应的成桥状态可作为矮塔斜拉桥的合理成桥状态。使用未知荷载系数法求解得到斜拉索初张拉索力及二次张拉索力,所对应的施工状态可作为矮塔斜拉桥的合理施工状态。

2) 对比 2 种非对称悬臂施工方案,在浇筑完边跨现浇段后,与方案 1 相比,方案 2 的主梁最大挠度更小且分布更合理,边跨无索区主梁上缘拉应力较小,斜拉索索力分布更均匀,对结构受力更有利。

3) 对比采用方案 2 施工完成后的主梁挠度、上下缘应力和斜拉索索力的实测值与合理施工状态下的计算值发现两者差值较小,证明方案 2 对矮塔斜拉桥的合理施工状态影响较小。采用方案 2 完成边跨现浇段施工后,最终可达到合理成桥状态。

4) 本文以三跨矮塔斜拉桥为背景,基于对称结构采用非对称悬臂施工方法对合理施工状态的影响进行研究,后续将开展不同跨数、不同结构形式等参数的影响研究。

[参 考 文 献]

- [1] ALI K, KATSUCHI H, YAMADA H. Comparative study on structural redundancy of cable-stayed and extradosed bridges through safety assessment of their stay cables[J]. Engineering, 2021, 7(1): 111-123.
- [2] LOZANO-GALANT J A, PAYA-ZAFORTEZA I. Analysis of Eduardo Torroja's Tempul Aqueduct an important precursor of modern cable-stayed bridges, extradosed bridges and prestressed concrete[J]. Engineering Structures, 2017, 150: 955-968.

- [3] 周雨洁,宋旭明,邹卓,等.混合体系多塔矮塔斜拉桥推倒分析的适用性研究[J].地震工程与工程振动,2022,42(2):181-192.
- [4] 张欣欣.池黄高铁三塔矮塔斜拉桥设计关键技术研究[J].铁道工程学报,2020,37(9):23-28.
- [5] 刘尊稳,陈兴冲,张永亮,等.矮塔斜拉桥分丝管索鞍区受力特征研究[J].桥梁建设,2018,48(5):69-74.
- [6] 马雅林,任万敏,朱敏,等.成昆铁路矮塔斜拉桥减隔震体系研究[J].铁道标准设计,2023,67(5):62-66.
- [7] 蔡小杨,王雷,韩金豹,等.柔梁密索体系矮塔斜拉桥静力分析[J].世界桥梁,2022,50(2):99-104.
- [8] 黄斌,茅兆祥,徐祖恩,等.山区高墩矮塔斜拉桥结构与美学设计[J].世界桥梁,2022,50(1):13-18.
- [9] 方秦汉.芜湖长江大桥的技术创新[J].铁道建筑技术,2002(4):1-6.
- [10] 苏学波.大跨度铁路矮塔斜拉桥钢主梁选型研究[J].世界桥梁,2016,44(4):26-29.
- [11] 高宗余.沪通长江大桥主桥技术特点[J].桥梁建设,2014,44(2):1-5.
- [12] 谢明志,杨永清,张明,等.高速铁路大跨矮塔斜拉桥地震主导振型识别[J].铁道工程学报,2020,37(7):50-56.
- [13] 任万敏,任杰,袁明,等.成昆铁路矮塔斜拉桥设计关键技术[J].桥梁建设,2019,49(1):95-100.
- [14] 王凯.高速铁路单索面矮塔斜拉桥的静动力性能[J].铁道建筑,2022,62(5):82-86.
- [15] 左家强.铁路小半径曲线转体施工矮塔斜拉桥设计研究[J].铁道工程学报,2022,39(2):62-67.
- [16] 文望青,林骋,王斌,等.双幅同步转体矮塔斜拉桥设计[J].桥梁建设,2021,51(2):112-117.
- [17] 卜一之,赵雷,李乔.苏通长江大桥结构非线性稳定性研究[J].土木工程学报,2013,46(1):84-91.
- [18] 黄江,胡成.某矮塔斜拉桥 0 号梁段空间应力分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(8):1097-1100.
- [19] 王艳,魏春明,陈淮.部分斜拉桥施工力学性能分析[J].桥梁建设,2012,42(2):46-52.
- [20] 暨仕瑀,吴海军,王邵锐,等.矮塔斜拉桥合理成桥状态及二次张拉力的确定[J].公路,2022,67(6):122-128.
- [21] 卫康华,罗浩,杨孟刚.塔墩梁固结的三塔四跨矮塔斜拉桥成桥状态力学参数研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(5):988-996.
- [22] 刘榕,伍英,丁延书,等.多塔矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(5):1224-1230.
- [23] 耿仕标,王卫东,李明,等.山区高墩连续刚构桥非对称悬臂浇筑施工[J].公路交通科技,2016,12(3):294-296.
- [24] 宋宝起.非对称悬臂施工大跨度连续刚构桥设计研究[J].铁道标准设计,2017,61(4):70-74.
- [25] 李熠,颜东煌,李学文.混凝土斜拉桥合理成桥状态研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(6):1017-1019,1023.
- [26] 朱颖,李传习.红港大桥合理成桥状态及吊杆索力的确定[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2010,7(3):31-35,84.
- [27] CHEN D W, AU F T K, THAM L G, et al. Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method[J]. Computers & Structures, 2000, 74(1): 1-9.
- [28] 郭维强.大跨度铁路矮塔斜拉桥合理施工状态研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.
- [29] 顾箭峰,曾祥红.混合梁斜拉桥塔梁同步施工可行性分析[J].桥梁建设,2016,46(1):111-116.
- [30] HASSAN M M, NASSEF A O, EL DAMATY A A. Determination of optimum post-tensioning cable forces of cable-stayed bridges[J]. Engineering Structures, 2012, 44: 248-259.
- [31] 姜政博.铁路矮塔斜拉桥二次张拉索力分析研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [32] 重庆交通科研设计院.公路斜拉桥设计细则:JTG/T D65-01—2007[S].北京:人民交通出版社,2007:88-89.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 135 页)

- [14] 中国钢铁工业协会.金属材料的室温拉伸试验:GB/T 228.1—2010[S].北京:中国标准出版社,2010:20-29.
- [15] 中国建筑科学研究院.混凝土强度检验评定标准:GB 50107—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:5-9.
- [16] Applied Technology Council (ATC). Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures:ATC-24[S]. Redwood City: Applied Technology Council, 1992: 1-13.
- [17] 周天华,李文超,管宇,等.基于应力三轴度的钢框架循环加载损伤分析[J].工程力学,2014,31(7):146-155.
- [18] BAO Y, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(1): 81-98.
- [19] 王萌,石永久,王元清,等.循环荷载下钢材本构模型的应用研究[J].工程力学,2013,30(7):212-218.
- [20] 王萌,石永久,王元清.考虑累积损伤退化的钢材等效本构模型研究[J].建筑结构学报,2013,34(10):73-83.
- [21] 聂建国,秦凯,张桂标.方钢管混凝土柱内隔板式节点的抗弯承载力研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):42-54.
- [22] 中国建筑标准设计院有限公司.高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ 99—2015[S].北京:北京出版社,2015:70-76.

(责任编辑 吴亮)