

Rotating Construction Analysis of Single Tower Hybrid Girder Cable-Stayed Bridge

Tianliang Yu¹, Yongwei Fang², Yongxian Wu^{3*}

¹Department of Bridge Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

³Bridge Engineering Design Institute, Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai

Email: *178775715@qq.com

Received: Apr. 25th, 2020; accepted: May 18th, 2020; published: May 25th, 2020

Abstract

The cable-stayed bridge composed of two different materials along the length direction of the girder is called hybrid girder cable-stayed bridge. Generally, the beam of the main span is steel girder, and the side span is concrete girder. The background bridge is a single tower hybrid girder cable-stayed bridge, it is crossed the existing railway lines and is constructed by rotating method to avoid the dangers on the railway. This paper introduces the key technology of structural design and construction process of the bridge, simulates the different construction stages of the whole construction process, analyses and calculates the cable tension, main girder deformation shape and stress checking results of main components in different construction stages. In order to accurately weigh and ensure the stability of the structure, the general method and principle of weighing and weighting are put forward. The results of this paper can provide theoretical basis for the construction control of this project and provide reference for similar projects.

Keywords

Hybrid Girdercable-Stayed Bridge, Rotating Construction Method, Construction Control, Weighing and Weighting, Rotating System

某独塔混合梁斜拉桥施工分析

余天亮¹, 方永伟², 吴用贤^{3*}

¹同济大学土木工程学院桥梁工程系, 上海

²浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州

³同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 桥梁工程设计院, 上海

Email: *178775715@qq.com

*通讯作者。

摘要

主梁沿梁的长度方向由两种不同材料组成的斜拉桥称为混合梁斜拉桥，一般主跨的梁体为钢梁，边跨的梁体为混凝土梁。某跨铁路桥是一座独塔混合梁斜拉桥，跨越既有铁路线，为了避免施工对铁路影响，采用转体法施工。论文介绍了该桥的结构设计要点以及施工流程，模拟整个施工过程的不同施工阶段，分析计算了不同施工阶段的斜拉索拉力，主梁变形形状，主要构件应力验算结果。为了精确配重，保证结构的稳定，提出称重配重的一般方法及原理。论文计算结果可为该项目施工控制提供理论依据，为类似工程提供参考和借鉴。

关键词

混合梁斜拉桥，转体施工，施工控制，称重配重，转体系统

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混合梁斜拉桥的主梁在长度方向上由两种材料组成，全部或部分主跨梁体用钢材，全部或部分边跨梁体用混凝土。混合梁斜拉桥具有诸多优势，因主跨为钢结构自重轻，边跨为混凝土结构自重大，能够避免边跨支点出现负反力，可起到压重和锚固作用，跨越能力比一般斜拉桥更好；又因为有分布较密的后锚拉索，还能提高整座桥的刚度；合理平衡钢材和混凝土的用量，还能在整体上降低工程造价。当斜拉桥跨越山谷、既有铁路或公路时，转体施工法是一种经常使用的方法。转体法施工，是将桥梁结构在非设计轴线位置上进行制造，然后通过转动体系将桥梁结构旋转至设计位置，实现跨越既有线路，相较于预制拼装、悬臂施工，转体法施工具有施工工序简单、施工速度快、节约施工材料、节省施工设备等优点，且施工过程中不影响交通运营，具有明显的经济效益和社会效益。转体斜拉桥是采用转体法施工的斜拉桥，它有着斜拉桥美观造型，能够成为一座城市的标志性建筑，同时兼具转体施工法的优点，所以在跨越既有较宽铁路、公路线路城市桥梁设计中，转体斜拉桥往往成为首选桥型。随着转体斜拉桥往大跨度非对称结构发展，为减小主跨的内力和变形，防止边跨支座出现负反力，需要增大边跨主梁重量和刚度，这时主梁宜采用混合梁。比如吉林四平市东丰路上跨铁路立交桥就是一座采用转体施工的非对称独塔单索面混合梁斜拉桥，跨径布置 $90 + 169$ m，转体重量 25500 t，转体角度 90° ，该桥完工后四平市铁东到铁西车程将由目前的 50 min 缩短到 10 min，极大地提高城市道路整体交通水平[1] [2]。本文以某座拟建的跨铁路线转体施工混合梁斜拉桥为背景，介绍了该混合梁斜拉桥的转体施工过程与相应的施工过程中的力学性能。

2. 工程概况

某跨铁路桥梁工程主桥是一座跨径布置为 $(163 + 51 + 40)$ m 的独塔单索面转体施工混合梁斜拉桥。中跨主梁采用钢箱梁，边跨采用预应力混凝土梁，结构采用塔梁墩固结，边跨设置辅助墩。钢混结合段在

边跨侧, 距离桥塔中心 13 m。桥型布置如图 1 所示。

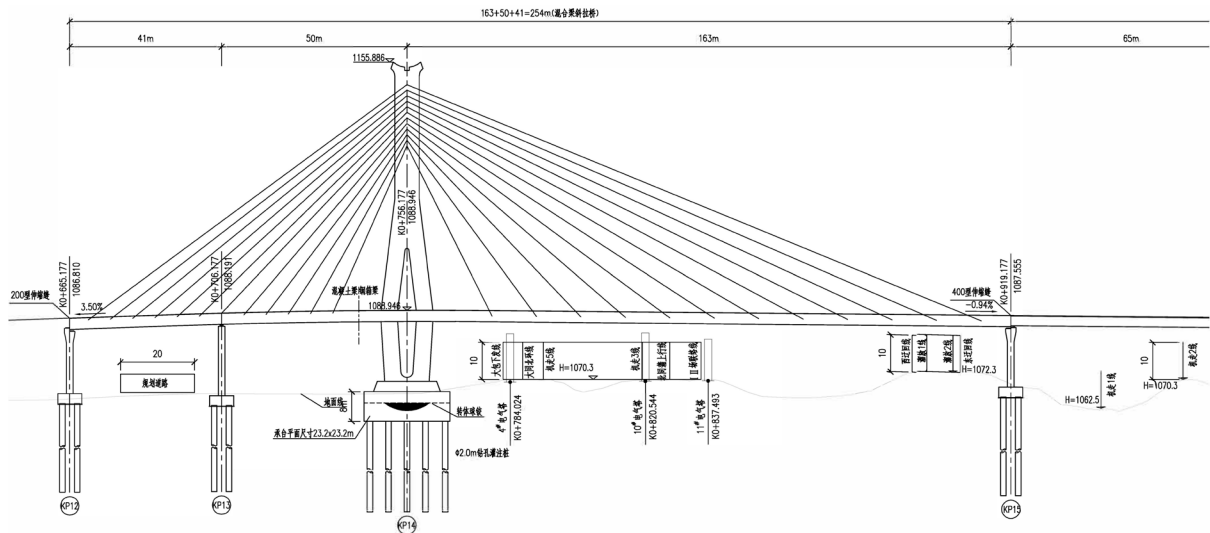


Figure 1. General layout of main bridge

图 1. 主桥总体布置图

主梁采用混合梁, 设计中心线处梁高 3 m, 梁顶设 2% 的双向横坡, 梁底水平。主跨钢箱梁采用正交异性板扁平流线形封闭钢箱梁, 钢箱梁总长度 176 m, 其中, 伸入边跨部分长度 13 m, 主跨直线段长度 67.7 m, 曲线段长度 95.3 m, 曲线段主梁中心线不再是直线, 所以主跨兼具弯桥的特征。直线段的钢箱梁宽 26.5 m, 主跨端部连接匝道, 近匝道处梁宽 40.1 m, 中间设置渐变段。边跨预应力混凝土梁采用等截面单箱五室箱梁, 中心线处梁高 3 m, 混凝土梁总长度 78 m。主塔采用钢—混凝土组合结构, 塔高 88.9 m, 自塔底至塔顶依次为: 2.8 m 嵌入承台塔柱+11.07 m 钢—混结合段+75.03 m 钢塔柱, 钢—混结合段处钢塔内壁浇筑微膨胀混凝土, 并采用剪力连接件与钢塔连接, 桥塔处横断面布置如图 2 所示。斜拉索采用中央索面, 双索并列, 横向间距 1.0 m, 锚固于中央箱室, 钢箱梁上索距为 12 m, 混凝土梁上索距为 6 m, 桥塔上索距为 1.5 m, 全桥共有斜拉索 24 对, 共 48 根。

该斜拉桥跨越既有铁路, 不能采用满堂支架法施工, 线路繁忙, 如果采用悬臂拼装或浇筑法施工时存在施工过程危及铁路运营的重大安全隐患, 同时考虑到桥址处桥梁转动半径范围内基本无建筑物, 因此, 转体施工法成为最佳选择。

3. 混合梁斜拉桥转体施工方案

3.1. 施工流程

主桥采用转体法施工, 先沿着既有铁路线搭设支架现浇或拼装预应力混凝土梁和钢箱梁, 再一次性将桥体平转 72° 至设计位置, 具体施工流程为:

- (1) 施工主墩、边墩、辅助墩及转体系统;
- (2) 安装主塔施工用塔吊, 搭设钢箱梁和混凝土梁施工用临时支架, 使用塔吊施工主塔, 如图 3 所示;
- (3) 拼装钢箱梁, 浇筑混凝土梁, 安装好一个主梁节段即挂设该节段的斜拉索, 待边跨混凝土箱梁强度达到设计强度的 90% 时, 张拉预应力, 主梁施工时, 应同时进行边防撞护栏及其上防抛网的安装, 如图 4 所示;

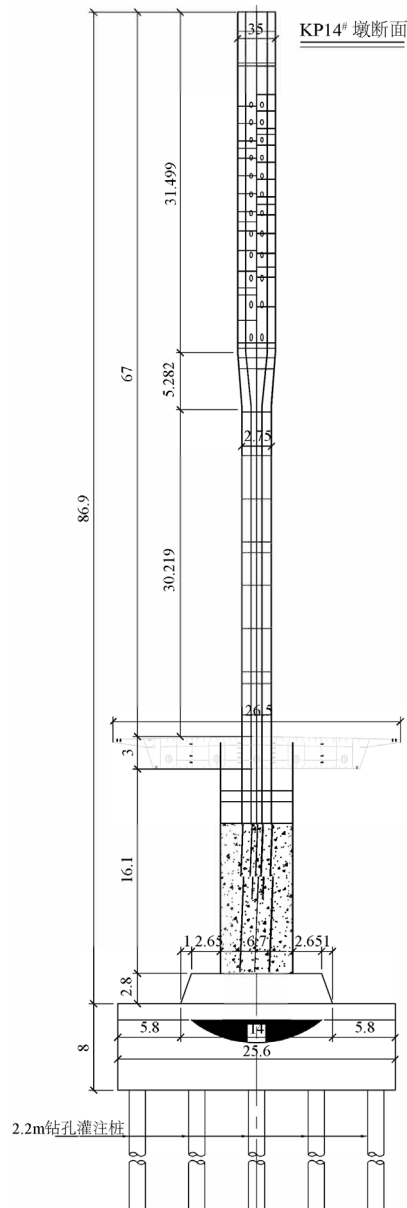


Figure 2. Cross-section of pylon position
图 2. 桥塔处横断面图

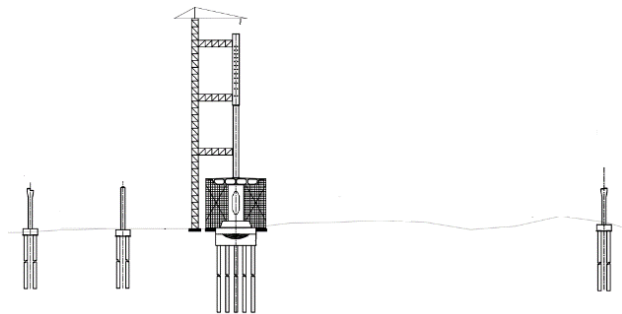


Figure 3. Construction of temporary brackets and bridge tower
图 3. 施工临时支架和桥塔

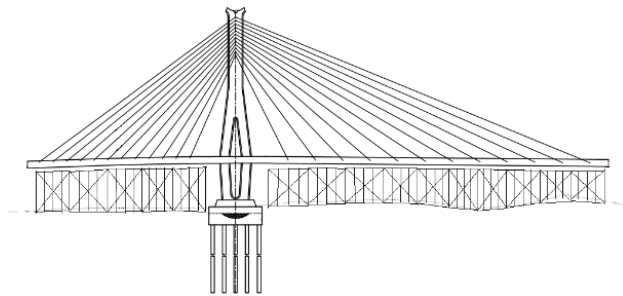


Figure 4. Construction of main girder and installation of cables
图 4. 施工主梁并安装斜拉索

(4) 通过计算进行合理配重，张拉斜拉索，拆除支架，如图 5 所示；

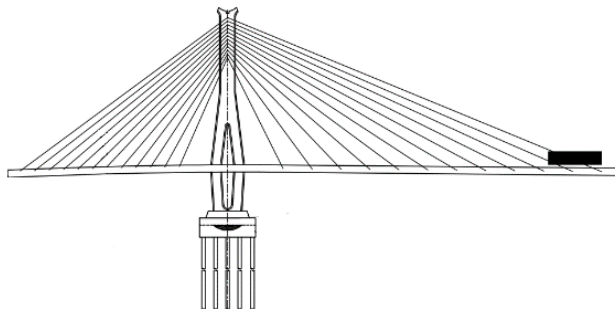


Figure 5. Weighting and tensioning cables
图 5. 配重并张拉斜拉索

(5) 拆除塔吊及部分影响转体的支架，称重配重，进行转体，如图 6 所示；

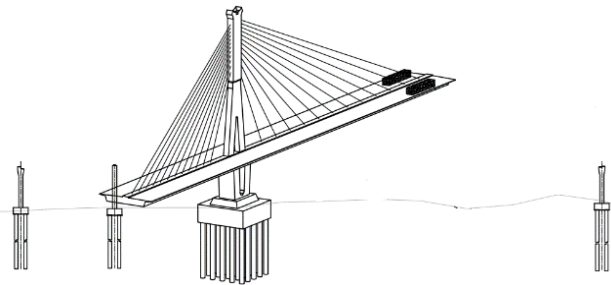


Figure 6. Rotating stage
图 6. 进行转体

(6) 主桥转体就位后，绑扎承台剩余部分钢筋，并进行封铰及主桥支座安装，调整斜拉索索力，并逐步卸除配重，如图 7 所示；

(7) 施工全桥桥面铺装，中央防撞护栏，伸缩缝等附属设施，最后一次调整索力，全桥施工完成。

3.2. 转体施工要点

3.2.1. 理论配重与称重配重

该桥为非对称独塔斜拉桥，主边跨总重量不相等，需要在主跨加临时配重使转动体的重心与转动中心轴线相重合，根据该原则计算的临时配重为理论配重。实际施工中，球铰的设计和施工存在误差，同

时材料的偏差、几何尺寸的偏差等会使主梁质量分布与设计存在差异。为了消除这种差异，使实际桥体的重心接近转动中心轴线，保证桥体的安全稳定和转体的顺利进行，需要在转体前进行转动体称重试验，测试转动体不平衡力矩和摩阻力矩，并据此进行配重。

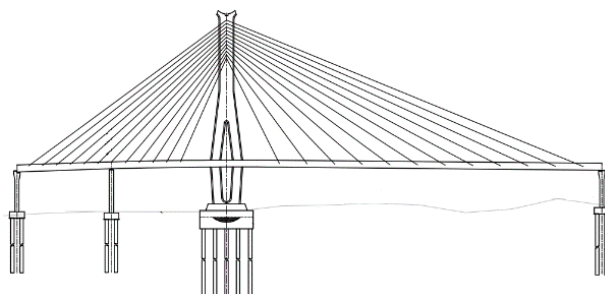


Figure 7. Remove counterweight and adjust cable force after completing rotating

图 7. 转体就位后卸除配重调整索力

称重配重采用测试刚体位移突变的方法求得不平衡力矩和摩阻力矩，受力明确，且只考虑刚体作用，不涉及挠度等影响因素，计算结果较准确。在球铰的主边跨两侧分别设置千斤顶，在每个千斤顶上设置压力传感器用以实时读取千斤顶的压力，同时在球铰上转盘四周布置四个百分表用以判断转动体在称重试验过程中是否发生转动。转体结构的称重试验包括测试不平衡力矩、偏心距、摩阻力矩及摩阻系数，称重试验结束后将配重结果和理论计算值进行比较，进一步确定是否需要调整配重以保证转体施工的顺利进行[3]。

3.2.2. 转体施工控制

为了使各施工过程结构内力和线形合理，需要多次调整斜拉索索力。主梁施工完毕后进行斜拉索首次张拉，同时主跨端部施加配重。考虑到如果张拉斜拉索之前配重，支架的安全性大大降低，所以先张拉斜拉索至第一次设计索力的 50%后再上 100%配重，配重上完后，再调整索力至设计值的 100% [4]。转体至设计位置后，进行第二次索力调整，同时卸除配重，采用同样的方法，先卸除 50%的配重，再调整 50%的索力，卸除全部配重，索力调整至第二次设计值。施工完附属设施后最后一次调整索力。

由于该桥没有设置合龙段，为了使两侧主梁同时上墩，线形控制是关键。转体前，为了方便转体时梁体能顺利转到桥墩上就位，边墩和辅助墩上的支座垫石都不提前浇筑，转体时只将支座放置墩顶，不安装就位支座，转体到位后再浇筑垫石和就位支座。

在整个施工过程中要随时观测主梁、桥塔应力变化，防止应力超过限值。同时还要观测拉索的应力，控制其安全系数满足最低要求。

正式转体前要进行试转，全面检查牵引动力系统是否正常。观察每分钟转速，即每分钟转动主桥的角度和悬臂端所转动的水平弧线距离，将转速控制在合理范围内；控制采取点动方式操作，测量每点动一次悬臂端所转动水平弧线距离，在转体初步到位后，为其精确定位提供一定的依据；检查其结构是否平衡、稳定，是否存在故障，关键受力部位是否有裂纹。

3.3. 施工阶段模拟

在不同的施工阶段，斜拉桥的结构体系是不同的，结构体系的变化将导致施工阶段与成桥阶段相比，结构可能会面临更加不稳定的状态。所以设计斜拉桥时，需要对各施工阶段进行分析，研究结构的内力和线形变化，保证结构满足强度和稳定性的要求。使用 Midascivil 2015 对施工过程进行模拟计算，全桥

施工过程可划分为以下 7 个阶段，如表 1 所示。

Table 1. Construction stage division

表 1. 施工阶段划分

施工阶段	施工内容	主要边界条件	主要荷载条件
1	施工主墩	激活主墩底固结	激活自重
2	搭设支架施工主梁，张拉混凝土梁预应力束	激活梁底弹性连接	激活混凝土梁和钢箱梁横隔板重、预应力、边跨压重
3	利用塔吊施工主塔	激活桥塔刚臂	
4	张拉斜拉索并进行配重		激活施工索力 1 和中跨配重
5	拆除塔吊和支架，进行转体	钝化梁底弹性连接	
6	安装支座，卸除配重，调整索力	激活支座边界条件	钝化施工索力 1 和中跨配重，激活施工索力 2
7	施工附属设施，调整索力，全桥施工完成		钝化施工索力 2，激活施工索力 3 和二期恒载

主要施工模型图如图 8~11 所示。由于没有模拟边墩和辅助墩，只用边界条件模拟它们对主梁的约束作用，所以阶段 4 至阶段 7 在模型图上体现不出变化。

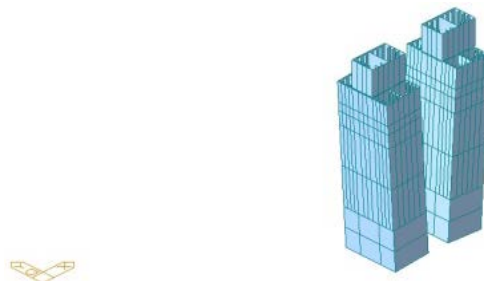


Figure 8. Stage 1: construction of main pier

图 8. 阶段 1: 施工主墩

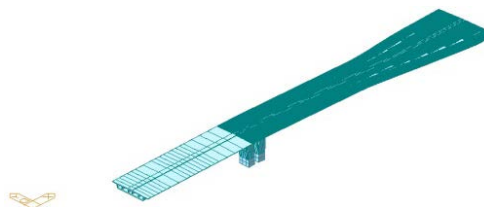


Figure 9. Stage 2: construction of main girder

图 9. 阶段 2: 施工主梁

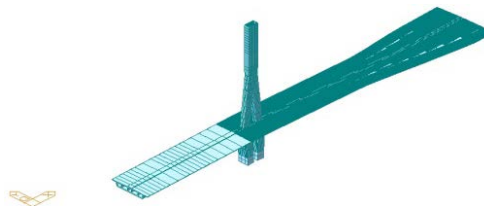


Figure 10. Stage 3: Construction of tower

图 10. 阶段 3: 施工桥塔

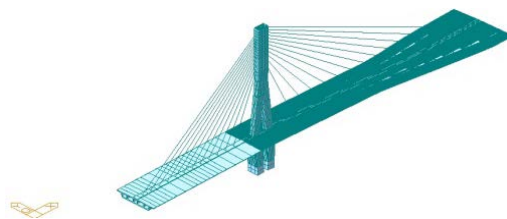


Figure 11. Stage 4 to 7: Completion of whole bridge
图 11. 阶段 4 到 7: 全桥施工完成

4. 施工中的受力特点

4.1. 索力施工力学分析

在整个施工阶段,为了适应施工荷载的变化和结构体系的转换,满足线形要求,需要多次调整索力。考虑到既能准确模拟结构变化,又能简化计算,施工中需要调整三次索力,分别是:

- (1) 施加配重并脱架后初始张拉力: 施工索力 1;
- (2) 转体到位安装支座卸除配重后的索力: 施工索力 2;
- (3) 以及施工完附属设施后成桥索力: 施工索力 3。

边跨由塔根处到边墩拉索编号依次从 S1 到 S12,中跨由塔根处到边墩拉索编号依次从 M1 到 M12。各施工阶段索力列于表 2,为了便于比较,同时列出了设计成桥索力。边跨和中跨索力变化见图 12 和图 13,横轴对应梁上索距,混凝土梁上为 6 m,钢梁上为 12 m。中跨三个施工阶段索力变化总体来说比较均匀,由塔根到边墩索力逐渐增大,这与斜拉桥力学特性是相符的。斜拉桥主梁可看作为弹性支撑连续梁,假设各拉索竖向分力基本相等,由塔根处到边墩,拉索倾角变小,索力增大。且施工阶段 1 的 M12、M11、M10 的索力非常大,是因为转体时配重主要加在这三根拉索处。与中跨相比,边跨的索力变化似乎无规律可循,然而,由于边跨有辅助墩,辅助墩处箱梁内有压重,该处的索力为一峰值。

Table 2. Cable force for each construction stage (unit: kN)
表 2. 各施工阶段索力(单位: kN)

拉索编号	施工索力 1	施工索力 2	施工索力 3	设计成桥索力	误差(%)
S1	3094.6	2317.7	2987.0	2990.5	0.1
S2	3170.2	2397.1	3099.4	3104.3	0.2
S3	3522.5	2520.3	3273.2	3279.1	0.2
S4	3974.5	2788.4	3637.1	3643.6	0.2
S5	4532.5	3202.5	4188.9	4196.1	0.2
S6	4359.6	2539.5	3329.4	3336.3	0.2
S7	4333.8	3246.1	4218.8	4225.3	0.2
S8	4304.7	3233.2	4181.0	4187.5	0.2
S9	4202.7	3652.8	4710.4	4717.5	0.2
S10	4378.0	3685.0	4753.2	4760.5	0.2
S11	6278.3	4716.3	6097.6	6108.3	0.2
S12	6366.4	4526.4	5877.2	5888.3	0.2
M1	1165.0	1151.4	1502.1	1505.7	0.2

Continued

M2	1336.2	1410.3	1843.3	1851.9	0.5
M3	1354.2	1620.9	2115.6	2126.2	0.5
M4	1474.2	1791.2	2331.3	2343.7	0.5
M5	1614.3	1805.3	2342.0	2353.6	0.5
M6	1967.5	2293.1	2967.1	2979.1	0.4
M7	2496.7	2557.5	3303.2	3311.8	0.3
M8	2860.3	3069.2	3959.8	3966.9	0.2
M9	4913.6	3195.7	4120.3	4123.9	0.1
M10	6476.4	3990.1	5145.8	5146.5	0.0
M11	7174.8	4460.0	5752.2	5749.3	-0.1
M12	7350.8	3675.2	4738.3	4732.4	-0.1

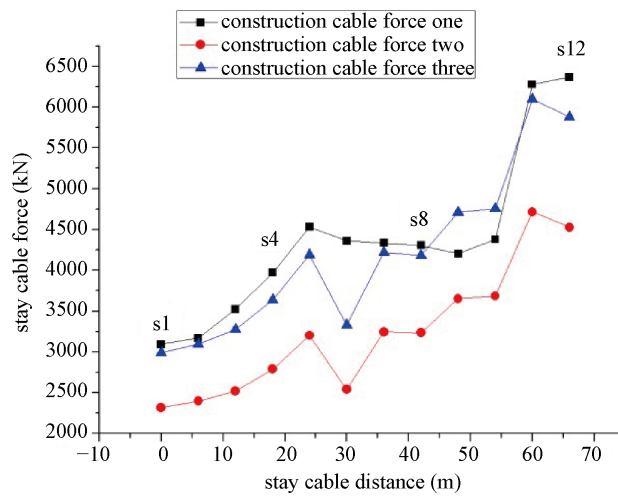


Figure 12. Cable force of side span

图 12. 边跨索力变化

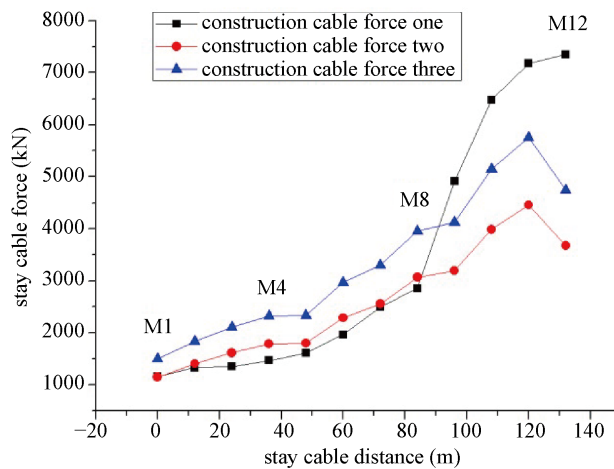


Figure 13. Cable force of middle span

图 13. 中跨索力变化

根据《公路斜拉桥设计细则》的规定，施工阶段斜拉索的安全系数不应小于 2.0。整个施工阶段各斜拉索最大应力值列于表 3。最大应力 763 MPa，出现在 M10 拉索上，安全系数为 $1670/763 = 2.2$ ，满足规范要求。

Table 3. Maximum stress value of each cable in construction (unit: MPa)

表 3. 施工阶段各拉索最大应力值(单位: MPa)

编号	应力	编号	应力
S1	586	M1	462
S2	552	M2	443
S3	614	M3	508
S4	639	M4	509
S5	634	M5	511
S6	610	M6	516
S7	606	M7	575
S8	602	M8	554
S9	588	M9	687
S10	593	M10	763
S11	580	M11	741
S12	588	M12	759

4.2. 线形和应力控制

由于该桥没有设置合龙段，为了使两侧主梁同时上墩，线形控制是关键，尤其是转体时主梁的线形。图 14 为拆除支架加配重进行转体时的主梁变形形状，其中灰色线是变形前形状。边跨边墩处主梁竖向变位为 13 mm，边跨辅助墩处主梁竖向变位为 12 mm，中跨边墩处主梁竖向变位为 9 mm。



Figure 14. Displacement shape of main girder in rotating

图 14. 转体时主梁变形形状

在转体过程中，由于球铰的转动、撑脚间隙的变化等原因，导致转体就位时桥梁的状态和脱架后的状态完全不同[5]，所以就位前需要调整桥梁姿态使主梁能够上墩。可利用布置于下承台顶的千斤顶上承台，将主梁的标高初步调整到脱架后的主梁标高状态。在撑脚处安置百分表，利用下承台顶的千斤顶上承台调整撑脚间隙，当撑脚间隙调整到脱架后的撑脚间隙时，主梁高程也应到设计位置。最后，可以通过调整斜拉索索力调整主梁高程，满足其上墩要求。

为了保证结构的安全，满足强度要求，需要控制结构的应力。对于斜拉桥，除了拉索，其它结构均是以受压为主，应力以拉为正，以压为负，所以在此只列出压应力验算结果，即最小应力验算结果，如图 15 所示。最大压应力，也即最小应力值出现在桥塔处，为 -152.1 MPa，远小于强度设计值。

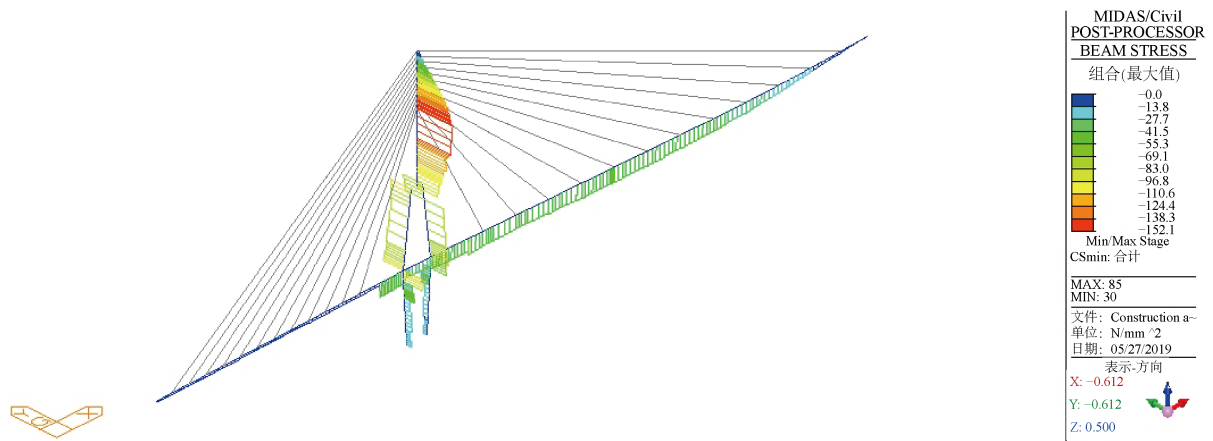


Figure 15. Stress check results
图 15. 应力验算结果

5. 结语

(1) 该桥转体重量和角度大, 该类桥施工控制难度要把握两个方面, 其一是没有设置合龙段, 必须严格控制线形以满足上墩要求, 施工精度要求较高; 其二是由于存在平曲线, 横桥向存在不平衡力矩增加了转体系统的稳定性难度。

(2) 相关施工阶段模拟分析得到了索力能保证桥梁线形平顺, 受力合理, 可保证转体施工过程的安全性和稳定性。

(3) 索力分析和线形结果表明, 远离桥墩索力较大, 但主梁变形规律并不与索力分布一致, 表明主梁刚在远离塔索力分布仍有可优化空间, 从而实现主梁线形更加合理。

(4) 论文模拟了整个施工过程的不同施工阶段, 经验算结构受力合理, 线形平顺, 满足结构在施工时的安全性和稳定性, 能够为后续类似工程提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 王子文. 非对称独塔混合梁斜拉桥转体施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 108-112.
- [2] 杨永伟. 超长悬臂非对称单索面独塔混合梁转体斜拉桥施工技术[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018(28): 134-136.
- [3] 王建省, 涂怀成, 陈晓强. 某混合梁转体斜拉桥称重及配重研究[J]. 北方工业大学学报, 2019, 31(5): 109-113+118.
- [4] 刘志如. 非对称斜拉桥跨越武广高铁水平转体施工技术[J]. 科技与创新, 2015(6): 73-74.
- [5] 王熙. 非对称斜拉桥上跨运营高速铁路夜间水平转体施工技术[J]. 科技与创新, 2017(11): 17-18.