

文章编号: 1004-2954(2026)01-0001-08

G341线轳辘坝至白银段公路靖远东湾黄河特大桥结构设计和关键技术

徐升桥^{1,2}, 黄太平³, 尹春燕^{1,2}, 王福聪³, 邹永伟^{1,2}, 常亚辉^{1,2}

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 中国中铁桥梁专业研发中心桥梁标准化设计研究分中心, 北京 100055; 3. 中铁城市发展投资集团有限公司, 成都 610218)

摘要: G341线轳辘白公路靖远东湾黄河特大桥主桥采用(85+2×148+85)m钢桁加劲连续梁, 钢桁架设计为支点高、跨中低曲线形式。针对桥位低温大温差、高烈度震区且强风复杂环境, 明确结构合理形式、设计参数及内力控制技术, 解决桥梁抗震、抗风及抗裂下挠核心问题。通过有限元建模、风洞试验等多种分析方法, 进行静动力计算、抗震与抗风性能分析、结构选型及关键技术攻关。研究结果表明: 设置钢桁加劲后, 主梁在恒载作用下弯矩显著降低, 中支点弯矩减少超过46%, 中跨挠度降低约33%, 结构刚度提高明显; 通过对钢桁架施加对拉力, 可进一步优化主梁内力分布, 改善其受力状态。钢桁架屈曲稳定系数为9.5, 表现出良好稳定性。动力分析显示结构具有良好抗震性能, E2地震作用下桥墩强度与剪力均满足规范要求。风洞试验证实, 单榀钢桁架具有较高颤振临界风速和抗疲劳性能, 满足抗风设计要求。与常规连续梁方案相比, 钢桁加劲连续梁在技术性能、经济性和全寿命维护方面均表现出显著优势, 特别适用于高烈度震区、大跨径及重载交通场景。研究形成结构设计方法与内力控制技术, 为复杂环境下公路桥梁设计提供技术参考, 推动钢桁加劲组合结构在公路工程领域应用与发展。

关键词: 公路桥; 钢桁加劲连续梁; 高烈度震区; 强风环境; 钢桁架内力调整与控制技术; 结构设计; 关键技术
中图分类号: U442.54; U448.27 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.202509250001

Structural Design and Key Technologies of Jingyuan Dongwan Yellow River Super Large Bridge on G341 Highway Luluba-Baiyin Section

XU Shengqiao^{1,2}, HUANG Taiping³, YIN Chunyan^{1,2},
WANG Fucong³, ZOU Yongwei^{1,2}, CHANG Yahui^{1,2}

(1. China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China; 2. CREC Bridge Professional Research and Development Center-Bridge Standard Design Sub Center, Beijing 100055, China; 3. China Railway City Development and Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610218, China)

Abstract: The main bridge of the Jingyuan Dongwan Yellow River Super Large Bridge on the G341 Highway Luluba-Baiyin Section is an (85+2×148+85) m steel truss-stiffened continuous girder. The steel truss was designed in a curved shape with a higher depth at the supports and a lower depth at the mid-span. To address the complex environmental conditions at the bridge site, including low temperatures with large temperature variations, high seismic intensity, and strong winds, this study aims to determine the reasonable structural form, design parameters, and internal force control techniques, thereby

resolving the core issues of seismic resistance, wind resistance, and crack-resistant deflection control. Using multiple analytical methods, including finite element modeling and wind tunnel tests, static and dynamic calculations, seismic and wind resistance performance analyses, structural selection, and investigations of key technologies were conducted. The results showed

收稿日期: 2025-09-25; 修回日期: 2025-10-31; 网络首发日期: 2025-11-20

基金项目: 中铁工程设计咨询集团有限公司科研重点课题(KY2024A012); 中铁城市发展投资集团有限公司科技创新项目(中铁城投研合2025-02)

作者简介: 徐升桥(1966—), 男, 正高级工程师, 全国工程勘察设计大师, 1991年毕业于长沙铁道学院桥梁工程专业, 工学硕士, 主要从事桥梁前沿技术研究工作, E-mail: cecq_lxsq@qq.com。

通信作者: 尹春燕(1982—), 男, 高级工程师, 2006年毕业于华中科技大学结构工程专业, 工学硕士, 主要从事桥梁设计研究工作, E-mail: 5632209@qq.com。

that after applying steel truss stiffening, the bending moment in the main girder under dead load significantly decreased: the bending moment at the intermediate support was reduced by over 46%, and the mid-span deflection was reduced by approximately 33%, indicating a notable improvement in structural stiffness. Applying tensile forces to the steel truss further optimized the internal force distribution of the main girder and improved its stress condition. The buckling stability coefficient of the steel truss was 9.5, demonstrating good stability. Dynamic analysis showed that the structure exhibited good seismic performance, and the pier strength and shear capacity under the E2 earthquake satisfied the code requirements. Wind tunnel tests confirmed that the single steel truss plane had a high flutter-critical wind speed and good fatigue resistance, meeting the wind-resistance design requirements. Compared with conventional continuous girder schemes, the steel truss-stiffened continuous girder exhibited significant advantages in technical performance, economic efficiency, and life-cycle maintenance, and was particularly suitable for application in high seismic intensity zones, long-span scenarios, and under heavy traffic loads. The structural design method and internal force control technique developed in this study provide a technical reference for highway bridge design in complex environments and promote the application and development of steel truss-stiffened composite structures in highway engineering.

Key words: highway bridge; steel truss-stiffened continuous girder; high seismic intensity zone; strong wind environment; technique for adjustment and control of internal forces in steel trusses; structural design; key technologies

引言

钢桁加劲混凝土连续梁桥是在预应力混凝土主梁上,增设加劲钢桁架形成的一种组合结构桥梁。钢桁通常布置在两点之间,提高主梁刚度,如银西高铁莫谷河 2 号特大桥^[1]、郑阜高铁界临特大桥^[2]等。这种组合结构桥梁,采用先梁后桁的施工顺序,加劲桁只承担部分二期恒载及活载,钢桁杆件均为被动受力,杆件内力较小。钢桁加劲连续梁桥自应用以来,国内对其进行广泛研究,这些研究主要围绕铁路钢桁加劲连续梁钢桁构造^[3]、受力特点^[4]、钢桁加劲位置^[5]、钢-混节点构造、长期变形^[6]和施工方法^[7-8]等方面开展。

为提升结构承载能力,对主梁采用钢桁加劲,钢桁设计为支点高、跨中低的曲线布置形式,其整体受力体系与矮塔斜拉桥相同^[9-16]。其中,钢桁上弦受拉,中支点上方腹杆为压杆,其余腹杆均为拉杆和压杆交替布置,钢架受力示意图 1。为使钢桁主动参与受力,通过拱顶处设置临时对拉装置,调整钢桁内力^[17]。

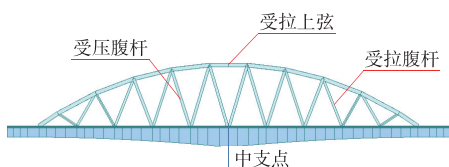


图 1 钢桁架受力示意

Fig. 1 Force diagram of steel truss

综上所述,钢桁加劲混凝土连续梁作为一种新型

高效组合结构形式,目前对其研究较少,依托 G341 线 轳白公路靖远东湾黄河特大桥开展研究,研究提出钢桁加劲混凝土连续梁桥的合理结构形式和设计参数,揭示钢桁架承载力、刚度及稳定性控制因素,形成调整钢桁架内力控制技术,以期同类桥梁设计提供参考。

1 工程概况

G341 线轳白公路项目起点位于白银市平川区黄峽镇轳轳坝,终点位于白银市白银区王岷镇观音崖,主线全长 101.635 km。

靖远东湾黄河特大桥(简称:黄河桥)位于甘肃省白银市靖远县东湾镇,桥址区地貌单元属于河床河漫滩及阶地,黄河河床河漫滩和一级阶地发育,桥址区地形起伏较小,两岸岸坡平缓,坡度 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。黄河桥与河道夹角约 7° ,桥区河道基本顺直,河道主流居中靠右,左岸滩地发育,桥位处河段为不对称“U”形河槽,现状河宽约 380 m,两岸建有滨河路,有不连续格宾石笼护岸。300 年一遇流量 $7\,790\text{ m}^3/\text{s}$,黄河桥平面布置见图 2。

桥位航道为规划 V-(3) 级,通航净宽和净高为 $126\text{ m} \times 8\text{ m}$,位于 VIII 度震区,地震动峰值加速度为 $0.251g$,桥位气温见表 1。

本桥为目前国内公路领域首次采用支点高、跨中低曲线布置钢桁加劲连续梁组合结构桥梁。桥位位于高烈度地震、低温大温差和强风环境,桥梁抗震和抗风

为 19.818 m。主桁采用三角桁式,每榀主桁顺桥向为 10 个节间,标准节间长为 12.5 m。

主桁上弦杆采用箱形截面。上弦杆内高 1 200 mm,内宽 1 000 mm,板厚 16~36 mm,弦杆水平板和竖板设置纵向加劲肋。腹杆根据结构受力需要分别采用箱形和 H 形截面;箱形截面腹杆内宽 1 000 mm,内高 800 mm,板厚 16~28 mm;H 形截面外宽 1 000 mm,高 700 mm,板厚 16~32 mm;腹杆根据需要在水平板上设置纵向加劲肋。

主桁节点均采用整体节点形式。下弦节点板埋入混凝土主梁中,节点板上设置 PBL 剪力键,混凝土主梁中腹板箍筋牢靠焊接于节点板内侧。为保证钢-混凝土结合处耐久性,在主梁顶板预埋钢板,钢板尺寸超出节点板范围约 200 mm。上弦杆采用四面螺栓拼接形式,H 形腹杆采用插入式拼接,箱形腹杆与主桁节点板四面螺栓拼接。主桁拼接采用 M30 高强度螺栓。下弦节点钢-混连接构造见图 7。

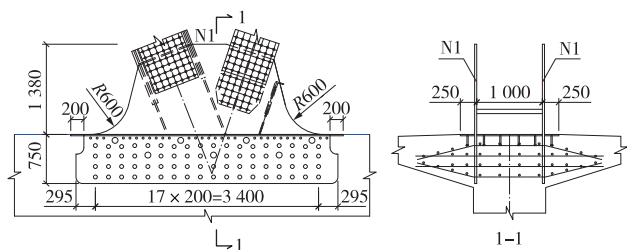


图 7 下弦节点钢-混连接构造(单位:mm)

Fig. 7 Steel-concrete connection detail at lower chord joint (unit: mm)

3.3 临时对拉装置

为配合钢主桁对拉施工需要,在各主桁 A9-A11、A9'-A11'节点间设置对拉装置和上弦合龙口临时连接措施。临时对拉装置由焊接在节点两侧锚箱结构和拉索组成,拉索采用 2 000 MPa 级钢绞线,每侧设置 2 束,上下布置,其规格为 61-7 ϕ 5 mm。钢桁临时对拉装置构造见图 8。

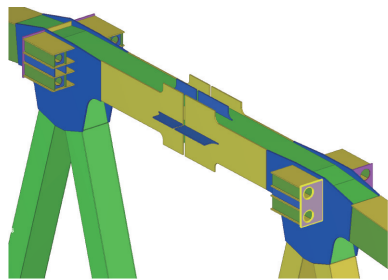


图 8 钢桁临时对拉装置构造

Fig. 8 Configuration of temporary tensioning device for steel truss

上弦合龙口临时连接措施包括上弦杆临时拼接预留部分、临时纵肋和两组临时拼接板,第一组临时拼接板两侧均设置圆孔,用于悬拼阶段上弦杆连接;第二组临时拼接板一侧设置圆孔,另一侧设置长圆孔,用于对拉完成后、永久拼接板安装前的上弦杆锁定。

上弦杆永久拼接板工厂单侧设置螺栓孔,内侧永久拼接板与上弦杆一同吊装就位。利用临时连接拼接板 LP1、LP2 完成上弦杆临时连接,主梁悬浇、主桁拼装施工。对拉施工准备工作完成后,首先拆除临时连接拼接板 LP1、LP2,对拉后安装临时拼接板 LP1'、LP2'并锁定;然后拆除临时对拉装置,通过现场测量确定永久拼接板钻孔位置,桥上、桥下分别完成内侧和外侧永久拼接板另一侧钻孔,完成永久拼接板安装;最后拆除临时连接,修复涂装。

3.4 钢桁架防腐涂装

为减少后期养护工作量,钢桁架采用长效涂装体系,钢主桁外露表面及非封闭内表面采用 C06 配套涂层体系;底层为无机硅酸锌车间底漆 1 道(25 μ m/道)+石墨烯富锌涂料 1 道(70 μ m/道),中间层为环氧(云铁)漆 2 道(95 μ m/道),面层为氟碳面漆 2 道(35 μ m/道),总干膜最小厚度 330 μ m。钢主桁杆件封闭内表面涂层为无机硅酸锌车间底漆 1 道(25 μ m/道);下弦节点埋入混凝土内部节点板及与混凝土接触水平板下表面,在出厂前应喷涂车间底漆进行防腐处理。

主桁安装完成后,应采用弹性防水密封胶对上弦杆、箱形腹杆节段间拼接缝隙进行密封。

3.5 下部结构

主桥 8~10 号主墩采用矩形截面实体墩,墩高分别为 10.5 m、15.5 m 和 10.0 m,8 号和 10 号墩墩身平面纵横向尺寸 3 m $\times$ 9 m,9 号墩墩身平面纵横向尺寸 3.2 m $\times$ 9 m;8 号和 10 号墩采用 15- ϕ 1.8 m 钻孔灌注桩;9 号墩采用 17- ϕ 1.8 m 钻孔灌注桩。

主桥 7 和 11 号边墩采用双柱式桥墩,墩高分别为 9 m 和 8.5 m,采用 4- ϕ 1.5 m 钻孔灌注桩。

3.6 支座布置

主桥支座均采用摩擦摆球型支座,边墩和主墩均设置 2 个支座,边支座和中支座吨位分别为 9 000 kN 和 90 000 kN。

3.7 建筑材料

桥墩墩身、主墩下部结构采用 C40 混凝土,边墩下部结构采用 C35 混凝土。主梁采用 C55 和 C60 混凝土,纵向钢束为高强低松弛钢绞线,抗拉强度标准值 1 960 MPa。竖向钢束采用 ϕ 16-2 无粘结预应力混凝土用钢棒,抗拉强度标准值 1 420 MPa,竖向无粘结预

应力钢棒采用单支单端张拉,钢棒两端采用 UPSb16-2 锚具锚固。钢主桁材质主要采用 Q420E 钢,部分杆件局部采用 Q500E 钢。

3.8 施工步骤

主桥上部结构采用悬臂浇筑法施工,钢桁架安装滞后一个悬浇节段,指导性施工步骤如下。

搭设钢栈桥、水中施工平台→施工桩基→下沉钢围堰→施工承台、桥墩→墩顶托架现浇 0 号块→挂篮浇筑主梁梁段混凝土(每浇筑 2 个梁段,安装一节钢桁架)→支架现浇主梁边跨现浇段→先合龙边跨,再合龙中跨→在每榀钢桁架上弦杆合龙处纵向施加纵向对拉力,拆除拱顶临时拼接板,安装拱顶永久上拼接板,释放拱顶纵向对拉力→施工桥面系,进行全桥静、动载试验,运营通车。

4 结构分析

4.1 整体计算

采用有限元分析软件建立计算模型,主梁和钢桁架采用梁单元,模型有 235 个节点、250 个单元,计算模型见图 9。

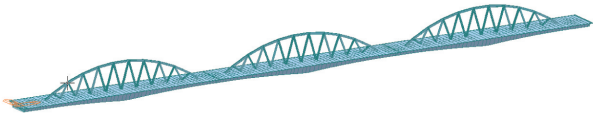


图 9 黄河桥有限元计算模型

Fig. 9 Finite element model of Yellow River Bridge

(1) 主梁变形

汽车荷载作用下,主梁最大竖向变形为 40.1 mm,挠跨比为 1/3 691,小于规范限值 1/600;主梁最大徐变下挠值为 17.6 mm,表明钢桁架能有效抑制主梁徐变下挠。

(2) 主梁检算

施工阶段,主梁最大压应力 14.9 MPa,最大拉应力-0.9 MPa,均满足规范限值要求。运营阶段,主梁最大压应力和最小压应力分别为 16.6 MPa 和 0.3 MPa,未出现拉应力,满足规范限值要求;主梁正截面抗弯和斜截面抗剪承载能力等各项指标满足规范要求^[18-19],分别见图 10 和图 11。

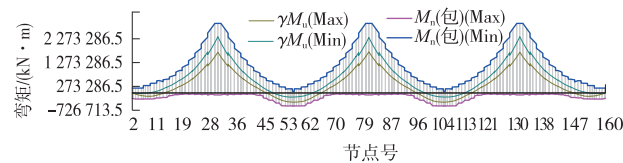


图 10 正截面抗弯承载能力验算结果

Fig. 10 Verification results of flexural capacity for normal section

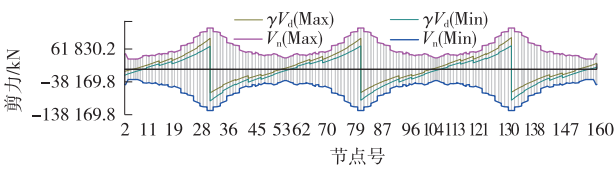


图 11 斜截面抗剪承载能力验算结果

Fig. 11 Verification results of shear capacity for inclined section

(3) 钢桁架检算

施工阶段钢梁最大拉应力和最大压应力分别为 182.1 MPa 和 126.5 MPa,小于 Q420 钢强度设计值 320 MPa,满足规范要求。经检算,运营阶段主桁上弦杆和腹杆强度、稳定性和长细比等均满足规范^[20]。

(4) 钢桁架稳定性分析

计算模型中将恒、活载等荷载定义为可变荷载,一阶屈曲稳定系数为 9.5,满足不小于规范限值 4 的要求,表明钢桁架有足够整体稳定性。屈曲模式 1 为钢桁架面外弯曲,见图 12。

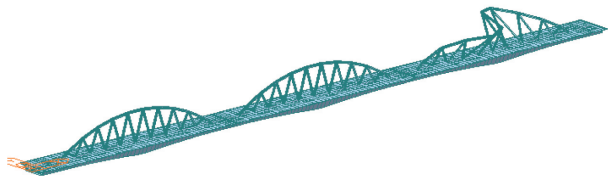


图 12 屈曲模式 1 变形

Fig. 12 Deformation of buckling mode 1

4.2 动力分析

(1) 自振特性

黄河桥前 6 阶振型、频率和周期见表 2。

表 2 黄河桥动力特性

Tab. 2 Dynamic characteristics of Yellow River Bridge

项目	振型特点	频率/Hz	周期/s
1	主桥纵飘	0.433	2.310
2	主梁竖向反对称弯曲	0.605	1.654
3	钢桁架横向对称弯曲	0.832	1.203
4	钢桁架横向反对称弯曲	0.895	1.117
5	钢桁架、主梁横向弯曲	1.000	1.000
6	主梁竖向对称弯曲	1.005	0.995

黄河桥一阶纵向自振频率和一阶竖向自振频率分别为 0.433 Hz 和 0.605 Hz,表明黄河桥有较好动力性能。

(2) 抗震分析

采用三维有限元模型对 E1、E2 地震作用下桥梁结构进行分析。E2 地震作用下,摩擦摆支座进入隔震状态,采用非线性时程分析计算得到桥墩地震力,对墩底截面进行抗弯和抗剪验算,计算结果分别见表 3 和表 4。

表 3 E2 地震作用下控制截面强度 $\text{kN} \cdot \text{m}$

Tab. 3 Strength of control sections under E2 earthquake

项目	控制截面	纵向弯矩		横向弯矩		是否通过
		计算	能力	计算	能力	
E2	8 号墩	1.8×10^5	2.6×10^5	2.3×10^5	6.3×10^6	是
	9 号墩	2.6×10^5	3.7×10^5	3.3×10^5	7.9×10^6	是
	10 号墩	1.8×10^5	2.6×10^5	2.2×10^5	6.3×10^5	是
	7 号墩	1.3×10^4	1.6×10^4	1.5×10^3	1.6×10^4	是
	11 号墩	1.3×10^4	1.5×10^4	2.0×10^3	1.4×10^4	是

表 4 E2 地震作用下控制截面剪力 kN

Tab. 4 Shear forces in control sections under E2 earthquake

项目	控制截面	纵向剪力		横向剪力		是否通过
		计算	能力	计算	能力	
E2	8 号墩	1.9×10^4	3.6×10^4	1.8×10^4	3.9×10^4	是
	9 号墩	1.9×10^4	3.6×10^4	2.0×10^4	3.9×10^4	是
	10 号墩	1.9×10^4	3.6×10^4	1.8×10^4	3.9×10^4	是
	7 号墩	1.7×10^3	4.6×10^3	2.1×10^3	4.6×10^4	是
	11 号墩	1.7×10^3	4.6×10^3	2.1×10^3	4.6×10^4	是

从表 3、表 4 可知:墩底截面抗弯能力和抗剪能力满足 E2 地震下抗震需求。主桥各项指标满足抗震要求^[21]。

5 主桥桥型选择

5.1 选型原则

本桥位于甘肃省白银市靖远县,桥位地处高烈度地震、强风、低温大温差环境,桥式选型要满足抗震、抗风和抗裂下挠三方面要求^[22-24]。

5.2 桥式比选

据既有桥梁工程经验,主跨约 150 m 一般采用连

续梁、连续刚构、拱加劲组合结构、斜拉加劲组合结构和钢桁加劲组合结构等。

主桥桥墩较矮,不具备设计连续刚构的条件;拱加劲和斜拉加劲在全寿命周期内需更换吊杆和拉索,对运营影响大,故对连续梁和钢桁加劲连续梁两种桥式方案进行比选。

连续梁方案全桥孔跨布置:(19.5+30+19.5) m 简支变连续小箱梁+(3×30) m 简支变连续小箱梁+(4×30) m 简支变连续小箱梁+(85+2×148+85) m 连续梁+(4×30) m 简支变连续小箱梁+(19.5+2×30+19.5) m 简支变连续小箱梁+(4×30) m 简支变连续小箱梁,桥长 1 091 m。

主桥全长 466.0 m,计算跨度为(85+2×148+85) m。主梁采用单箱单室截面,箱梁顶宽 12.55 m,底宽 6.9 m,顶板悬臂长度 2.825 m,为双幅桥布置,全桥宽 25.5 m。中支点和中跨跨中梁高分别为 9.0 m 和 4.5 m,梁体下缘线形按抛物线变化。本方案采用悬浇施工方法。方案比选见表 5。

综上所述,桥位温差较大、气候干燥,且有重车通行,大跨预应力混凝土连续梁主梁开裂下挠风险极高,且经济性一般,不作为推荐方案。钢桁加劲连续梁为组合结构,加劲钢桁可有效限制梁体混凝土压缩和弯曲变形,将其用钢量计入混凝土含钢量中,混凝土广义配筋量达 290 kg/m³,结构韧性更好,可避免大跨度混凝土连续梁易开裂下挠问题,具有更好技术性能,且经济性较好,作为推荐方案。

表 5 方案比选

Tab. 5 Comparison of design schemes

项目	方案一	方案二
桥式	钢桁加劲连续梁	连续梁
孔跨布置/m	3×30+4×30+(85+2×148+85)+4×30+(19.5+2×30+19.5)+4×30	(19.5+30+19.5)+3×30+4×30+(85+2×148+85)+4×30+(19.5+2×30+19.5)+4×30
桥长	全桥总长 1 022 m,主桥长 466 m	全桥总长 1 091 m,主桥长 466 m
主桥面积/m ²	11 883.0	11 696.6
建安费	低	高
安全性能	钢桁加劲连续梁组合结构,结构承载能力冗余度大,能够有效控制主梁开裂下挠病害发生	大跨连续梁结构,因收缩徐变影响,主梁跨中下挠较大,易引起主梁开裂
抗震性能	结构整体自重较小,有利于桥梁抗震	结构整体自重较大,对抗震设计不利
施工难度	主梁采用钢桁加劲,边悬浇边安装钢桁架,可采用大节段悬浇施工,工艺成熟	主梁采用挂篮悬浇,施工工艺成熟,因有两幅主桥,施工时有 12 个挂篮,施工界面多
工期/d	550	560
养护维修	钢桁架采用长效涂装体系,可减少养护工作量	桥位温差较大、气候干燥,且有较多重车通行,混凝土梁开裂下挠风险极高
推荐意见	推 荐	比 较

6 关键技术

6.1 钢主桁对主梁受力影响

对有无钢桁架加劲连续梁分别进行计算,恒载和

活载作用下,主梁纵向弯矩、刚度和徐变分别见表 6 和表 7。

从表 6 可知:恒载作用下主梁弯矩大幅减小,减少 46%以上;活载作用下主梁弯矩减少 22%以上。结果

表明,设置钢桁加劲后结合效果明显,具有较好的力学性能。

表 6 主梁纵向弯矩比较 $\text{kN} \cdot \text{m}$

Tab. 6 Comparison of longitudinal bending moments in main girder

项目	中支点弯矩		中跨跨中弯矩	
	恒载	活载	恒载	活载
①有加劲	-387 248	-96 683	-35 534	56 232
②无加劲	-718 070	-138 348	-22 326	72 149
(②-①)/②	46.1%	30.1%	59.2%	22.1%

表 7 主梁刚度和徐变比较

Tab. 7 Comparison of stiffness and creep behavior of main girder

项目	活载最大挠度/mm	刚度	徐变/mm
①有加劲	40	1/3 691	-18.5
②无加劲	60	1/2 467	-29.8
(②-①)/②	33.2%	—	37.9%

从表 7 可知:活载作用下中跨跨中挠度减小 33.2%,徐变减小 37.9%,表明设置钢桁加劲后,主梁刚度有大幅提高,能有效抑制主梁徐变下挠。

6.2 钢主桁对拉力对主梁受力影响

根据计算需要,边桁对拉力 19500 kN,中桁对拉力 14500 kN。对钢桁架有无对拉分别进行计算。在恒载和活载作用下,主梁纵向弯矩见表 8。

表 8 钢桁架有无对拉时主梁纵向弯矩 $\text{kN} \cdot \text{m}$

Tab. 8 Longitudinal bending moments in main girder with and without truss tensioning

项目	主梁中支点弯矩		主梁中跨跨中弯矩	
	恒载	活载	恒载	活载
①钢梁对拉	-387 248	-96 683	-35 534	56 232
②钢梁不对拉	-643 771	-96 683	8 583	56 232
(②-①)/②	39.8%	0.0%	514.0%	0.0%

从表 8 可知:钢桁对拉后,恒载作用下主梁中支点弯矩减少 39.8%,主梁中跨跨中弯矩由正弯矩变为负弯矩;活载作用下主梁弯矩无变化。以上结果表明钢桁架采用对拉后,能有效改善主梁恒载工况下受力状态。

6.3 单榀钢桁架抗风性能研究

根据 JTG/T 3360-01—2018《公路桥梁抗风设计规范》中附录 A.2 全国基本风速分布值及分布图和附录 A.3 全国主要地区不同重现期风速值,靖远东湾黄河特大桥桥址所在地基本风速为 27.3 m/s。桥位处风力较大,且钢桁架为单榀结构,在横向风力作用下,疲劳问题突出。

为获取钢主桁三分力系数,开展钢桁架节段模型风洞试验,1:125 缩尺模型见图 13。



图 13 钢桁架风洞试验模型

Fig. 13 Wind tunnel test model of a steel truss

采用理论分析、数值计算、风洞试验等方法,开展黄河桥抗风性能研究^[25-28],主要结论如下。

(1)施工阶段颤振检验风速 36.55 m/s,成桥阶段颤振检验风速 43.50 m/s。

(2)成桥阶段对称组合颤振临界风速 234.52 m/s,成桥阶段反对称组合颤振临界风速 234.30 m/s,大于施工、成桥阶段颤振检验风速,颤振稳定性满足要求。

(3)利用线性疲劳损伤累积理论,针对拱肋单元最不利应力时程,计算拱肋最不利上弦杆单元疲劳寿命为 2.44×10^7 次,腹杆最不利单元疲劳寿命为 2.23×10^6 次,弦杆与腹杆疲劳寿命皆具有较大安全裕度。

7 结论

以 G341 线鞣白公路靖远东湾黄河特大桥为工程依托,针对高烈度地震、低温大温差及强风复杂环境,围绕国内公路领域首次应用的高支点、低跨中曲线布置钢桁加劲连续梁组合结构开展研究,主要结论如下。

(1)通过优化主桥结构,确定变高度混凝土主梁、曲线钢主桁及临时对拉装置合理参数;结构分析结果验证,主梁变形、承载力及钢桁架稳定性均满足规范要求,结构抗震与抗风性能可靠。

(2)桥型比选结果表明,钢桁加劲方案在经济性、抗裂下挠及耐久性上优于连续梁方案;关键技术研究结果揭示,钢桁加劲可大幅降低主梁弯矩与挠度,对拉技术能显著改善主梁受力状态。

(3)提出结构形式与内力控制技术,为同类复杂环境下公路桥梁设计提供重要参考,推动钢桁加劲组合结构在公路工程中应用和发展。

参考文献:

- [1] 罗红枝. 银西高铁大跨连续刚构加劲钢桁组合结构设计[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(11): 37-41.
LUO Hongzhi. Design of Composite Structure of Long-span Continuous Rigid Frame with Steel Truss on Yinchuan-Xi'an High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(11): 37-41.
- [2] 张雷, 张上, 季伟强. 曲弦钢桁加劲连续梁及新型纵向约束体系设计[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 97-102.
ZHANG Lei, ZHANG Shang, JI Weiqiang. Design of Curved-string Stiffened Continuous Girder with Steel Truss and a New Longitudinal

- Constraint System[J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 97-102.
- [3] 康伟. 大跨 PC 组合结构在高速铁路无砟轨道桥梁中的应用研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(2): 77-83.
- KANG Wei. Application of Long-span Prestressed Concrete Composite Structure in High-speed Railway Bridges with Ballastless Track[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(2): 77-83.
- [4] 文强. 高速铁路连续刚构加劲钢桁组合结构桥梁设计研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 85-90.
- WEN Qiang. On the Design of Composite Structure Bridge of Continuous Rigid Frame with Steel Truss on High-speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 85-90.
- [5] 康伟. 梁桁组合结构在客运专线桥梁中的应用分析[J]. 铁道标准设计, 2013(6): 59-64.
- KANG Wei. Application Analysis of Composite Structure of Girder with Truss in Railway Bridges on Passenger Dedicated Line[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(6): 59-64.
- [6] 占玉林, 林金根, 张程, 等. 高速铁路大跨钢桁加劲连续刚构桥长期变形影响因素研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(11): 87-93.
- ZHAN Yulin, LIN Jingen, ZHANG Cheng, et al. Study on Influencing Factors of Long-term Deformation in Large-span Steel Truss-reinforced Continuous Rigid Frame Bridges in High-speed Railways[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(11): 87-93.
- [7] 文强. 高速铁路无砟轨道大跨组合结构桥梁应用研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 245(2): 54-59.
- WEN Qiang. Application Research on the Long-span Composite Structure Bridge on High-speed Railway Ballastless Track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 245(2): 54-59.
- [8] 季伟强. 大跨铁路曲弦钢桁加劲连续梁预拱度设置研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(2): 19-22.
- JI Weiqiang. Study on Camber-setting of Large-span Railway Curved-string Steel Truss Stiffened Continuous Beam[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 19-22.
- [9] 尹春燕, 刘永锋, 彭岚平, 等. 成达万高铁渠江特大桥主桥结构设计和关键技术研究[J]. 铁道勘察, 2024, 50(6): 88-94, 100.
- YIN Chunyan, LIU Yongfeng, PENG Lanping, et al. Research on Structural Design and Key Technology of the Main Bridge of Qujiang Super Large Bridge for Chengdu-Dazhou-Wanzhou High-speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(6): 88-94, 100.
- [10] 宋子威, 杨利卫, 王德志. 福平铁路乌龙江(144+288+144) m 部分斜拉桥主桥设计[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(11): 42-46.
- SONG Ziwei, YANG Liwei, WANG Dezhi. The Design of Main Bridge of Wulong River on Fuzhou-Pingtian Railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(11): 42-46.
- [11] 高磊. 徐宿淮盐铁路盐城特大桥主桥桥式方案研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 10-14.
- GAO Lei. Research on Type Scheme of Main Bridge of Yancheng Extra-large Bridge on Xu-Su-Huai-Yan Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 10-14.
- [12] 吴鹏. 杭衢铁路(117+240+117) m 三线部分斜拉桥主桥设计[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(11): 134-140.
- WU Peng. Design of Changshan River Main Bridge on Hangzhou-Quzhou Railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(11): 134-140.
- [13] 陈怀智, 张欣欣. 池黄高速铁路大跨度多塔矮塔斜拉桥总体设计[J]. 铁道建筑, 2022, 62(3): 94-98.
- CHEN Huaizhi, ZHANG Xinxin. Overall Design of Multi-tower Extradosed Cable-stayed Bridge on Chizhou-Huangshan High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2022, 62(3): 94-98.
- [14] 张杨, 王冰, 郭波. 新安江特大桥设计关键技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2023, 45(7): 81-84.
- ZHANG Yang, WANG Bing, GUO Bo. Research on Key Technologies for the Design of Xin'an River Bridge[J]. Railway Construction Technology, 2023, 45(7): 81-84.
- [15] 陈平. 遵瓮铁路湘江大桥主桥桥式方案研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(7): 91-94.
- CHEN Ping. Study on Bridge Type of the Main Bridge of Xiangjiang Bridge on Zunyi-Weng'an Railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(7): 91-94.
- [16] 尹春燕, 彭岚平, 张夫健. 成达万高速铁路渠江特大桥主桥桥式方案研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(2): 72-76.
- YIN Chunyan, PENG Lanping, ZHANG Fujian. Study on the Main Bridge Type of Qujiang Super Large Bridge on Chengdu-Dazhou-Wanzhou High-speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(2): 72-76.
- [17] 汪鹏翔, 徐升桥, 邹永伟, 尹春燕, 张崇斌. 陇海外绕线跨京港澳高速公路特大桥主桥方案比选研究[J/OL]. 铁道标准设计, 1-8[2025-09-24]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202405050002>.
- WANG Pengxiang, XU Shengqiao, ZOU Yongwei, YIN Chunyan, ZHANG Chongbin. Scheme Design and Research of the Main Bridge of The Longhai Railway Bypass Line Spanning Beijing-Hongkong and Macao Expressway Railway Bridge[J/OL]. Railway Standard Design, 1-8[2025-09-24]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202405050002>. 2026, 70(2): 1-8.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [22] 伍波, 杨家玉, 石永燕, 等. 大跨径连续刚构桥的常见病害与设计对策[J]. 公路交通技术, 2005(S1): 109-111.
- WU Bo, YANG Jiayu, SHI Yongyan, et al. Common Diseases and Design Countermeasures of Long-span Continuous Rigid Frame Bridges[J]. Technology of Highway and Transport, 2005(S1): 109-111.
- [23] 谢峻, 王国亮, 郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2007(1): 47-50.
- XIE Jun, WANG Guoliang, ZHENG Xiaohua. State of Art of Long-term Deflection for Long Span Prestressed Concrete Box-girder Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007(1): 47-50.

