

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.08.014

斜拉体系加固大跨径箱梁桥关键技术 研究与应用

王来永¹, 张劲泉¹, 武俊彦¹, 徐刚年²

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357)

摘要: 针对传统加固方法在解决大跨径预应力混凝土箱梁桥的开裂和跨中下挠病害不足的问题, 提出了斜拉体系加固方法。采用理论计算、模型试验等方法对加固结构体系、关键构造局部受力性能开展了研究, 提出了施工过程监控方法及施工质量控制要点等关键技术。结果表明: 在不改变原桥荷载的情况下, 拉索根数对桥梁结构受力性能影响较大, 根数越多, 主梁的最大主拉应力会越小, 拉索索力越均匀平缓, 布索位置显示锚固点均集中在 $1/3 \sim 1/4$ 跨处; 拉索静力允许应力值可采用公路矮塔斜拉桥拉索允许应力值的下限值, 可通过积累运营期新增拉索在活载作用下的应力幅值数据, 进一步确定合理的拉索允许应力值; 斜拉索提供的弹性支撑大大改善了主梁受力过程, 同时提高了主梁的弹性变形能力和承载能力; 张拉过程及破坏试验加载过程中, 托架连接位置未出现明显病害, 托梁无明显变形情况, 说明该传力方式较为合理可靠; 发明的斜拉索滑动索鞍和托梁托架等关键构造, 可使新增索力可靠地传递到原有箱梁上, 并尽量减小不利附加力和局部应力; 提出的施工过程监控方法, 可将成桥后应力和线形控制在预期目标范围内, 保证了施工过程中的安全; 制定的专用施工技术规范及专项工程质量检验评定标准, 可有效控制工程质量。研究成果已成功应用于东明黄河公路大桥 ($75+7 \times 120+75$) m 改造工程中, 取得了较好的加固效果, 可为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: 桥梁工程; 斜拉体系; 理论分析; 大跨径箱梁桥; 试验研究; 桥梁加固

中图分类号: TU997

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 08-0101-08

Study and Application of Key Technology of Long-span Box Girder Bridge Strengthened by Cable-stayed System

WANG Lai-yong¹, ZHANG Jin-quan¹, WU Jun-yan¹, XU Gang-nian²

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong 250357, China)

Abstract: In view of the deficiency of traditional strengthening methods in solving the crack and mid-span deflection disease of long-span PC box girder bridges, the cable-stayed system strengthening method is proposed. The local stress performance of the reinforced structure system and key structures is studied by theoretical calculation and model test. The key technologies such as construction process monitoring method and construction quality control points are proposed. The result shows that (1) without changing the load of the original bridge, the number of cables has great influence on the mechanical performance of the bridge structure, the more the number of cables, the smaller the maximum principal tensile stress of the main beam, the more uniform and gentle the cable force, and the anchor points shown by the cable layout are concentrated at $1/3-1/4$ span; (2) the allowable static stress value of the cables can be the lower limit of

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目 (2011 318 223 940)

作者简介: 王来永 (1977-), 男, 山东单县人, 硕士, 副研究员. (laiy.wang@rioh.cn)

the allowable stress value of the cables of highway low-pylon cable-stayed bridge, the reasonable allowable stress value of the cables can be further determined by accumulating the stress amplitude data under the live load of the newly added cables during the operation period; (3) the elastic support provided by the stay cables greatly improved the stress process of the main beam, and also improved the elastic deformation capacity and bearing capacity of the main beam; (4) during the tension process and the loading process of the failure test, there is no obvious disease at the bracket connection position and no obvious deformation of the joist, which indicates that the force transmission mode is reasonable and reliable; (5) the invention of key structures such as the sliding cable saddle of the stay cable, the bracket and the joist can reliably transmit the new cable force to the original box girder and minimize the adverse additional force and local stress; (6) the proposed construction process monitoring method can control the stress and geometric shape of the completed bridge within the expected target range and ensure the safety in the construction process; (7) the formulated special construction technical specifications and special project quality inspection and evaluation standards can effectively control the project quality. The research result has been successfully applied to the (75+7×120+75) m reconstruction project of Dongming Yellow River Highway Bridge, good strengthening effect has been achieved, which can provide reference for similar projects.

Key words: bridge engineering; cable-stayed system; theory analysis; long-span box girder bridge; experimental study; bridge strengthening

0 引言

大跨径预应力混凝土 (Prestressed Concrete, PC) 箱梁桥是我国应用最为广泛的桥型之一, 受限于 20 世纪末期国民经济条件和未能充分预计其后交通量暴发式增长, 以及受当时的设计理念和建设经验影响, 我国早期建造的此类桥梁较为普遍地出现了开裂和跨中下挠等病害^[1-4]。目前, 部分桥梁采取增设体外预应力、加厚腹板、粘贴钢板和粘贴复合纤维等措施进行加固后, 仍没有彻底控制住其开裂和下挠的发展, 在稳定一段时间后又不同程度地出现了新的下挠和开裂^[5-9]。为解决大跨径 PC 箱梁桥目前存在的问题, 本研究对斜拉体系加固方法进行了系统的理论分析和试验研究, 最后将研究成果进行了实体工程应用。

1 斜拉体系加固大跨径箱梁桥设计理论与计算方法

斜拉体系加固大跨径 PC 箱梁桥是通过新增桥塔、斜拉索、索梁传力装置托梁、托架等对原主梁提供弹性支撑, 来减小控制断面弯矩和剪力荷载效应。该加固方法中, 不仅新老结构协同受力模式复杂, 而且新增斜拉索在很大程度上改变了原超静定结构体系的内力和应力分布, 因此与大跨径桥梁的设计理论与计算方法存在很大不同。新增桥塔与原桥墩及主梁间的连接方式对结构受力影响很大, 主要连接方式有塔墩梁固接、塔墩固接、塔梁固接和

塔梁分离等方式。通过对各连接方式受力分析认为, 宜尽量避免塔与主梁间的固接。对于新增桩基生根的索塔, 可采用与连续梁桥墩固接, 但应与刚构桥墩分离。总体而言, 分离式的连接方式受力更明确清晰但造价高, 采用固接方式受力较复杂但造价低^[10]。

1.1 斜拉加固布索方式优化

斜拉加固的拉索布置需综合考虑拉索根数、索力大小、拉索锚固位置及桥塔高度等因素^[11]。布索一般通过试算方式确定, 但需耗费大量的时间和人力。因此, 本研究基于多岛遗传算法 (Multi-island Genetic Algorithm, MIGA) 开发了专用的优化软件, 优化目标以主梁主拉应力最小为原则, 首先确定拉索根数、索力大小、锚固区域和塔高, 再通过局部调整确定布索方式^[12-13]。研究表明, 在不改变原桥荷载的情况下, 拉索根数对桥梁结构受力性能影响较大, 根数越多, 主梁最大主拉应力会越小, 拉索索力越均匀平缓; 布索位置显示锚固点均集中在 1/3~1/4 跨处; 3 根拉索与 4 根拉索计算结果几乎一致, 与 2 根拉索差别不大, 因此就工程而言宜设 2~3 根。

1.2 主梁超限应力分布及拉索张拉应力控制

受诸多因素影响, 准确模拟桥梁的实际受力状态及应力分布情况非常困难。组合工况下, 将截面正应力及主应力与控制值进行对比, 以确定实际的应力重点控制区域, 并对该区域的应力进行重点调控, 分析拉索张拉对重点控制区域的应力影响。研

究表明,加固后墩顶截面上缘压应力和主压应力等增加比较多,应进行控制;墩顶与跨中截面顶板中孔道面积及压浆质量对截面有一定削弱。拉索静力允许应力值可以采用公路矮塔斜拉桥拉索允许应力值下限 $[R] = 0.5R_b$;可通过积累运营期新增拉索活载作用下的应力幅值数据,进一步确定合理的拉索允许应力值。

1.3 斜拉体系加固 PC 箱梁桥缩尺模型试验研究

为验证上述理论研究成果,本研究采用 1:10 缩尺模型对其进行验证。测试内容主要有:①拉索张拉过程模拟试验;②使用阶段模型试验及极限承载力试验。

试验结果表明:(1)模型拉索张拉阶段实测数据与理论数据相比,二者应力变化分布规律基本相同,实测值较理论值小,在往复张拉过程中,后张索对先张索最终应力有一定影响;(2)在拉索张拉过程中,模型可较好地反映原桥结构的受力变化,其变化规律可作为实桥施工监控的参考;(3)斜拉索提供的弹性支撑大大改善了主梁受力过程,同时提高了主梁的弹性变形能力和承载能力;(4)张拉过程及破坏试验加载过程中,托架连接位置未出现明显病害,托梁无明显变形情况,说明该传力方式较为合理可靠;(5)托梁未出现扭转、大的面外变形;(6)斜拉加固后 1/4 截面的剪力极限破坏荷载有所增大,跨中和墩顶弯矩控制主梁破坏。

2 斜拉体系加固关键构造设计及研究

斜拉体系加固大跨径箱梁桥在理论上是有效方法,为达到预期理论效果需要可靠的构造措施来保证力的传递和受力过程合理,本加固方法采取较多的新构造措施^[14]。

2.1 托梁、托架构造方式

托梁可以采用变截面钢托梁或箱形截面混凝土托梁两种形式,二者各有优缺点。钢托梁具有自重轻、效率高等优点,但与混凝土主梁的结合处理较困难,同时要考虑稳定性、焊接工艺是否可行及疲劳等问题;混凝土托梁自重大、效率较低,但与原梁结合及共同受力较易处理。因此综合比选后优先采用钢托梁。

混凝土主梁和钢托梁通过钢托架连接。根据主梁锚固角不同,钢托架分为长、短索托架,全焊结构。钢托梁与混凝土主梁间采用增加钢垫板连接,长、短索钢托架垫板尺寸分别为 120 cm×510 cm×2 cm, 120 cm×460 cm×2 cm。托架和钢托梁间设置

BLY100 软钢衬板协调托架和钢托梁间的变形差异。主梁和托架通过钢垫板用高强螺栓连接。同时,在托架承压板开孔,通过连接角钢、高强螺栓与托梁形成构造连接,其中长、短索钢托架位置处托架与主梁连接螺栓的数目分别为 105 根和 95 根^[15-18]。主梁锚固区连接构造如图 1 所示。钢托梁与主梁间传力装置托架可采用混凝土整体锚固块与调平块组合和钢托架两种构造方式。采用混凝土整体锚固块与调平块组合的方式,箱梁受力明确,托梁作用力通过支座传递到垫块,再由垫块传递到箱梁腹板。在施工方面,需植筋浇注垫块混凝土,新混凝土与原箱梁混凝土之间的浇注质量问题不易保证,钢托梁与混凝土调平块间稳固性不易处理。采用钢托架传力的方式可以有效分散对原主梁的局部应力,索力分布较均匀,但局部应力分散构造极为复杂;施工时,可以先施工钢垫板、托架,最后将托梁固定在托架卡槽内,整体施工质量较易保证。因此综合比选后优先采用钢托架。

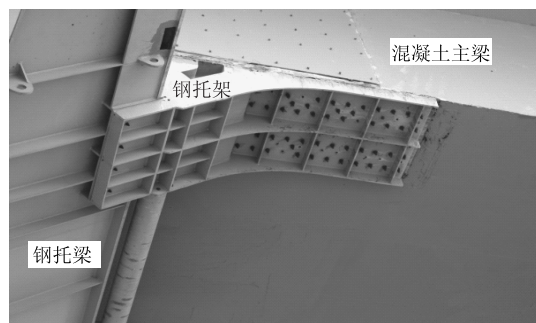


图 1 主梁锚固区连接构造

Fig. 1 Connection structure of main girder anchor zone

2.2 钢托梁托架模型试验研究

为验证托梁托架构造方式的合理性和测试其受力性能,进行了相应的 1:3 大比例尺模型试验。利用室内试验剪力墙作为加载反力架,将预制梁段固定在剪力墙上,拼装托梁托架和张拉斜拉索。

试验结果表明:(1)混凝土箱梁在对应拉索设计索力 P (下同)下受力良好;混凝土箱梁在 1.5 倍拉索成桥设计索力持荷期间,在左侧出现一条 1.5 m 长的斜裂缝。(2)0.75 P 之前,托梁应变较小;达到成桥设计索力 P 时,测点悬臂根部应变最大,此时托梁仍处于弹性变形阶段;1.5 P ~1.75 P 时,托梁下翼缘变截面处最先发生塑性变形,超过屈服应变;2 P 后,下翼缘测点均超过屈服应变;2.5 P 时,下翼缘测点、上翼缘测点超过屈服应变,表明屈服区域进一步扩大。(3)0.75 P 之前,托架应变普遍较小;

加载到成桥索力 $2.5P$ 时,测点应变值均未达到屈服应变,说明托架具有很大的承载潜力,可满足要求。(4)不平衡力加载试验工况下,在右侧单侧超过成桥设计索力 10% 的不平衡张拉力的情况下,结构能够保持良好的受力状态;荷载由 P 至 $1.1P$ 时,托梁、托架各测点应力和位移均未出现异常。(5)托架、定位钢板与混凝土箱梁之间无明显错动,托架锚固性能良好。

2.3 滑动索鞍模型试验研究

对于联长较长的连续结构箱梁,在温度作用下桥梁轴向变形量很大,在斜拉索力作用下,塔根部附加弯矩非常大,为克服这一不利荷载效应,特设计滑动索鞍释放一部分位移,来减小根部附加弯矩。滑动索鞍借鉴悬索桥的索鞍原理,结合斜拉桥的特点进行设计。为验证滑动索鞍的力学性能和长期可靠性进行了模型试验,对索鞍的静力性能(对称加载工况和偏载工况)、滑动临界阻力和 30 a 循环长期可靠性能等进行了试验研究。滑动索鞍的主要构造如图 2 所示。

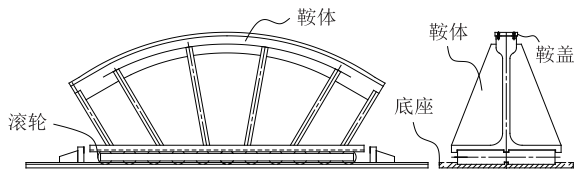


图 2 滑动索鞍构造 (单位: cm)

Fig. 2 Structure of sliding cable saddle (unit: cm)

试验结果表明:(1)对称加载工况下,鞍体危险截面最大应力不超过材料(ZG270-480H)的屈服强度 σ_s ,鞍体未被破坏和发生塑性变形,鞍体性能符合设计要求。(2)索鞍的滑动性能测试(不平衡趋势)工况下,试验结果符合设计要求,索鞍的滑动趋势可以实现两端索力的调节,验证了滑动索鞍的构造设计是合理的;滚动过程中,滚轴的滚动协调,没有发生滚轴脱空及滚动不协调现象。(3)索鞍的滑动临界阻力测试,通过测试得到不同工况下的临界阻力数据,通过计算得到摩擦系数为 0.012 左右,表明索鞍的滑动副(滑动底板、滚轴、索鞍体)具有良好的滑动性能,满足设计要求。(4)索鞍的循环耐久试验,索鞍在进行 7 200 次循环耐久试验后,其滑动副仍具有良好的滑动性能,滑动副的摩擦系数没有发生明显变化,符合设计要求。滚轴的横向直径和竖向直径无变化,表面没有明显磨痕,滑动副具有良好的耐磨性。各构件在整个循环耐久试验过程中运行正常,具有良好的可靠性。

2.4 斜拉体系加固箱梁桥新旧基础连接研究

新增桥塔与原桥墩的基础连接方式可分为分离和固结两种,承台混凝土的浇注顺序也会对桩基受力产生影响,通过对两种连接方式建立空间模型来分析其受力特点和适用性。计算分析结果表明,新旧基础的连接方式宜为固结,可有效减少工程量和增加结构的稳定性与整体性,但连接的时机应在斜拉索张拉完成后再浇注成整体,这样对老桩的额外增加力较小,新桩的承载能力可得到最大程度的发挥。

3 斜拉体系加固施工过程监测与控制研究

斜拉体系加固大跨径箱梁桥由于改变了原结构体系,会产生较大的附加应力与次应力,因此施工过程的监控应以安全监测为重点,线形监控为次要位置,即首先保证施工过程中不产生新结构损伤。在加固成桥和施工过程中,均要确保应力的最不利值在设计和相关规范的允许范围之内。

施工监控方法可采用自适应施工控制法。在计算时如何修正计算模型是关键,应尽量模拟出结构的真实受力状态和应力分布,通过系统识别或参数估计模块,不断修正计算参数,使计算输出与实测数据相吻合,然后提出预测与控制指标。

误差调整理论及方法包括:(1)不断修正因涉及结构参数误差引起的各个控制项目(如截面应力、变形等)的失真,对设计影响参数进行识别确定。(2)测量数据是施工监控的基本依据,应选择合理的数据处理方法。(3)应根据斜拉索分级张拉和体外预应力张拉得到的测量数据进行分析处理后,结合理论计算进行参数识别工作。(4)对未来施工阶段的设计参数误差进行预测。根据已识别的参数误差,分析其产生的原因、影响规律及程度,对后续施工阶段可能将出现的误差进行预测估计。

4 斜拉体系加固施工专用技术规范及专项工程质量检验评定标准

斜拉体系加固大跨径箱梁桥依托工程中包括较多新施工项目与工艺:原有基础旁新增桩基础、新旧基础连接、托梁托架施工、不锈钢平行丝索、斜拉索张拉、滑动索鞍等,为保证施工质量,编制了专用的施工技术规范。

同时制订了专项工程质量检验评定标准,并报省交通运输主管部门批准。批准后的标准应用于实体工程的质量控制与管理,适用于所依托改造工程的施工单位、监理单位、建设单位对工程质量的管

理、监控和检验评定,并可为质量监督部门提供参考。

5 斜拉体系加固大跨径箱梁工程应用

山东省东明黄河公路大桥主桥跨径(75+7×120+75)m,为变截面PC连续梁-连续刚构结构体系,梁高由支点的6.5m渐变到跨中的2.6m,底板

宽度为9m,采用50#混凝土。其中58#,59#,64#,65#墩为空心墩,墩顶设置球型支座,其余墩为双墙薄壁墩身,墩顶与箱梁固结。主桥跨径布置见图3。2009年全面检测和2013年补充检测的结果表明,主桥在加固处理后,开裂和下挠总体上得到了较好的控制,但腹板开裂和跨中下挠没有得到根治。

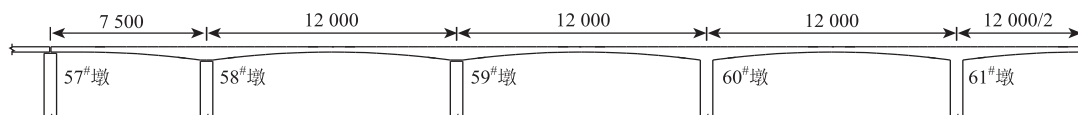


图3 主桥总体布置示意图(单位:cm)

Fig.3 Schematic diagram of general layout of main bridge (unit: cm)

5.1 工程设计要点

(1) 桩基础与承台设计

本次加固改造通过在原桩基外侧对称增设钻孔灌注桩以承担桥塔荷载;桩径上部为2.4m,下部为2.0m,桩长84m;桩基采用C30混凝土。新增承台通过植筋,在旧承台下部浇注2.5m厚混凝土,并采用设置环向预应力钢束的方式,保证新旧承台的有效连接和共同受力。新承台总厚度为5m。新旧承台之间可分次浇注,新增桩基以上的新承台先浇注,混凝土浇注截面设置台阶,预留钢筋接头,桥塔及上部结构改造完成后,绑扎连接钢筋与外包混凝土钢筋,最后浇注新旧承台结合段及旧承台上下面外包混凝土,以减小新旧桩的沉降差及优化桩基受力。

(2) 桥塔与钢锚箱设计

新增的独柱式桥塔总高度为43.5~45.8m,与上部结构无联系,以桥纵轴线对称布置。所有中塔拉索锚固区均为钢锚箱形式,边塔、次边塔均采用多层滑动鞍座形式。钢锚箱断面尺寸为3.48m(顺桥向)×1.58m(横桥向),共分3节,分别为1#,2#,3#锚箱,1#锚箱为备用锚箱,本次不设拉索;锚箱高度因斜拉索角度不同而不同,1#锚箱高1.85m,2#锚箱高1.50m,3#锚箱高1.80m,钢锚箱阶段内各板件采用焊接连接,钢锚箱节段之间采用高强螺栓连接。

(3) 斜拉索设计

斜拉索采用不锈钢斜拉索,拉索为187根和139根直径7mm的不锈钢钢丝。拉索张拉控制力为2700kN,2100kN。中塔采用单端张拉,在托梁处张拉,在塔顶锚箱内锚固;边塔、次边塔,拉索采用两端张拉,在托梁处进行张拉锚固。

(4) 钢托梁和托架设计

钢托梁全长23.5m,采用变高箱形断面,由梁中部的2m梁高直线过渡到索锚端的1.2m,根据索锚孔位置的不同分为A型和B型两种类型。顶板与底板厚度均为45mm,宽度为900mm,上下底板对称设计。设2道腹板,厚度均为40mm,腹板净高1.11m(位于距梁左端0~3.5m处),腹板净高1.91m(位于距梁左端6.7~11.75m处),腹板净高1:4坡度变截面(距梁左端3.5~6.7m之间);锚索处及托梁与支承处加劲肋选用2-160mm×50mm,索孔处两侧加强加劲肋选用500mm×30mm,其他位置腹板加劲肋选用2-135mm×20mm,对称布置。钢托梁与主梁采用托架连接,根据锚索处主梁底板与斜拉索倾角的不同,分为短索托架与长索托架两种类型。托梁托架为钢结构,全焊结构,在主梁与托梁连接处设置一层钢垫板,短索托架钢垫板尺寸为900mm×4400mm×20mm,长索托架钢垫板尺寸为900mm×4700mm×20mm。主梁和托架通过钢垫板用高强螺栓连接。同时在托架承压板开孔,通过连接角钢、高强螺栓与托梁形成构造连接。为协调托架和托梁间的变形差异,在托架和托梁间设置一层5cm厚的橡胶垫板,尺寸为90cm×90cm×5cm。

5.2 工程施工要点

(1) 新增桩基和承台施工

为减少新增桩基施工对原桩周边土基的扰动,采用反循环回旋钻机施工。在施工前需清理原桥位下的建筑垃圾等,为钢护筒插打提供便利条件。在施工过程中应严格控制泥浆对黄河水源的污染,按照规范要求进行桩基施工控制。在桩基施工完成后,采用“U型管”法对桩底压浆。

承台施工时,采用设置整体钢板桩围堰,排水

出堰,满足施工空间要求,完成后再抽砂回填。利用金刚石绳锯切割原有承台圆角,然后植钢筋。施工中,采用临时钢护板作为后浇带模板,即使钢围堰和便桥退出工作,仍能既保证施工安全又降低施工成本;新、旧承台后浇带在新塔张拉斜拉索受力沉降稳定后完成浇注。

(2) 桥塔施工

塔柱采用翻模施工,在箱梁顶用汽车吊配合进行模板及钢筋的安装;翻模为由3节段大块组合模板及支架、内外工作平台组合而成的成套模具。每一节段翻转模主要由内外模板、模板固定架、围带、拉杆等构成。施工时,每次浇注2节模板的高度,即每次翻2层模板,浇注4.5 m高的混凝土。

中塔锚固区采用多层钢锚箱型式,边塔、次边塔柱采用多层滑动索鞍形式。钢锚箱和滑动索鞍均采用工厂制造、现场安装的方式进行施工。

(3) 托梁托架制造与安装

托梁托架在工厂制造中严格按照通过评定的焊缝工艺进行控制,并对焊缝残余应力进行消除。托梁托架现场安装采用自制的液压冲天取芯水钻钻孔,

采用角度微调升降系统临时吊装钢托梁托架,植入锚固螺栓,安装箱内钢支撑等。

(4) 不锈钢斜拉索制造与张拉

不锈钢斜拉索不采用外防护,在工厂内按照设计文件进行制造。斜拉索张拉施工主要包括预埋件的安装、索上桥面、展索、索入鞍槽、吊装挂设、张拉、索力检测、调整、防护措施等工序。张拉时采用分级循环张拉,在张拉过程中严格对主梁、主塔、托梁托架等应力和变形进行监控,以确保施工安全和索力满足设计要求。

5.3 工程验收要点

(1) 交竣工验收荷载试验

加固后,选取3跨(58[#]、59[#]和62[#])进行荷载试验,并与2007年荷载试验结果进行对比分析。从2次荷载试验结果来看,I截面的荷载试验效率均在0.85~1.05范围内,其中本次试验I截面的最大位移为26.30 mm,2007年为47.00 mm;本次试验K截面的最大位移为9.54 mm,2007年为18.0 mm。本次加固后桥梁的刚度明显优于2007年,说明加固后桥梁的刚度得到了较大提升,加固改造效果明显。主梁控制断面如图4所示。

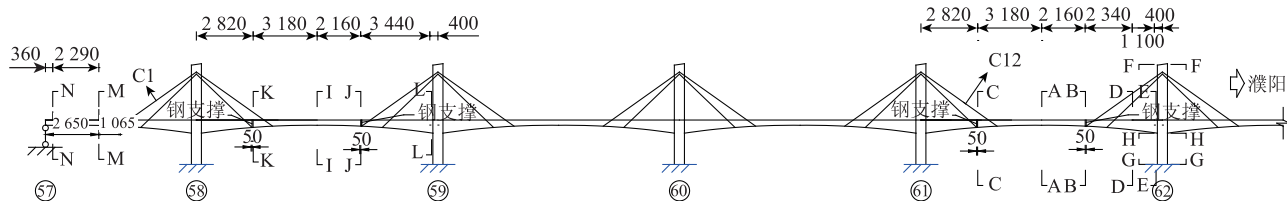


图4 主梁控制断面(单位:cm)

Fig. 4 Main girder control cross-section (unit: cm)

(2) 竣工验收

对东明黄河公路大桥主桥竣工验收进行质量检测,发现该桥主体结构无由结构受力引起的开裂、变位等现象,并按照交竣工验收办法,对部分项目进行了检测。

根据检测结果并结合其他抽查项目在交工验收时的检测结果,主桥桥面系分部工程得分为91.46分,该主桥标段竣工验收评定为优良。

6 结论

通过对斜拉体系加固大跨径箱梁桥开展较为系统的研究及工程应用,得出以下主要成果和结论:

(1) 提出了斜拉体系加固大跨径箱梁桥设计计算方法及斜拉索容许应力取值,并进行了模型试验验证,从实桥应用来看较为合理可靠。

(2) 发明了斜拉索滑动索鞍和托梁托架等关键构造,可以使新增索力可靠地传递到原有箱梁上,并尽量减少不利附加力和局部应力。

(3) 通过对斜拉体系加固大跨径箱梁桥施工过程中受力特点和运营期受力要求,提出了合理的施工过程控制方法,一方面可保证施工过程中的安全,另一方面可将成桥应力和线形控制在预期目标内。

(4) 根据斜拉体系加固方法特点制订了专用施工技术规范 and 专项工程质量检验评定标准,通过工程应用检验可以较好地控制工程质量。

斜拉体系加固大跨径箱梁桥技术的研究和实体工程应用取得了一定成果,加固改造后的工程造型优美,加固效果良好,可供类似桥梁加固以借鉴。本研究采用的维修加固理念基于结构实际,根据使用和规范要求对重大先天缺陷进行较为彻底的改造,

具有良好的推广价值和工程意义。另外,采用的研究和工程应用工作方法在复杂桥梁结构维修加固中较为适用,桥梁加固改造相对新建桥梁来说更为复杂,不可控因素更多,在实施过程中应精细分析,科学管理,切忌生搬硬套,以保证维修加固实施效果和结构安全。

参考文献:

References:

- [1] 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, 24 (1): 47-50.
XIE Jun, WANG Guo-liang, ZHENG Xiao-hua. 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, 24 (1): 47-50.
- [2] PODOLNY W. The Cause of Cracking in Post-tensioned Concrete Box Girder Bridges and Retrofit Procedures [J]. PCI Journal, 1985, 30 (2): 82-139.
- [3] ROBERTSON I N. Prediction of Vertical Deflections for a Long-span Prestressed Concrete Bridge Structure [J]. Engineering Structures, 2005, 27 (12): 1820-1827.
- [4] 樊见维,张峰,高磊,等. 预应力夹片锚钢筋回缩量概率分布模型 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2019, 38 (3): 9-13, 74.
FAN Jian-wei, ZHANG Feng, GAO Lei, et al. Rebar Retraction Probability Distribution Model of Prestressed Clip Anchor [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2019, 38 (3): 9-13, 74.
- [5] 程修龙. 预应力混凝土连续刚构桥加固方法及加固效果分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
CHENG Xiu-long. Analysis on Reinforcement Method and Effect of Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridge [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [6] 湛润水,胡钊芳,帅长斌. 公路旧桥加固技术与实例 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
CHEN Run-shui, HU Zhao-fang, SHUAI Chang-bin. Reinforcement Technology and Examples of Old Highway Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [7] 李宏江,李万恒,程寿山,等. 体外预应力在某连续刚构桥加固中的应用及其效果分析 [J]. 铁道标准设计, 2004 (12): 48-51.
LI Hong-jiang, LI Wan-heng, CHENG Shou-shan, et al. Application of External Prestress to Strengthening of a Continuous Rigid Frame Bridge and Effect Analysis [J]. Railway Standard Design, 2004 (12): 48-51.
- [8] 詹建辉,陈卉. 特大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝成因分析 [J]. 中外公路, 2005, 25 (1): 56-58.
ZHAN Jian-hui, CHEN Hui. Analysis on Causes of Deflection of Super Long-span Continuous Rigid Frame Girder and Box Girder Crack [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25 (1): 56-58.
- [9] 张劲泉,王文涛. 桥梁检测与加固手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
ZHANG Jin-quan, WANG Wen-tao. Manual of Bridge Detection and Reinforcement [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [10] 何新平. 矮塔斜拉桥的设计 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (4): 66-68, 72.
HE Xin-ping. Design of Low Tower Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (4): 66-68, 72.
- [11] 蔺鹏臻,孙红红. 小西湖矮塔斜拉桥拉索初张力优化 [J]. 城市道桥与防洪, 2004 (6): 57-59.
LIN Peng-zhen, SUN Hong-hong. Optimum of Primary Tension of Cables of Xiaoxihu Cable-stayed Bridge with Low Pylon [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2004 (6): 57-59.
- [12] 郑开启,刘钊,张宇峰,等. 腹板斜向开裂混凝土梁桥的剪切刚度评估方法 [J]. 桥梁建设, 2015, 45 (4): 46-51.
ZHENG Kai-qi, LIU Zhao, ZHANG Yu-feng, et al. Shear Stiffness Assessment Method for Concrete Girder Bridges with Web Diagonal Cracks [J]. Bridge Construction, 2015, 45 (4): 46-51.
- [13] 林桢楷. 差值法确定矮塔斜拉桥的初张索力 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (16): 4068-4070, 4079.
LIN Zhen-kai. Determined the Construction Cable Tension Force of the Extradosed Cable-stayed Bridge Based on the Differential Method [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10 (16): 4068-4070, 4079.
- [14] 刘建民,牛进民,崔健. 东明黄河大桥主桥箱梁开裂成因分析与对策 [J]. 山东交通科技, 2005 (1): 46-48.
LIU Jian-min, NIU Jin-min, CUI Jian. Cause Analysis and Countermeasures of Main Bridge Box Girder Cracking of Dongming Yellow River Bridge [J]. Shandong Transport Technology, 2005 (1): 46-48.
- [15] 徐刚年. 斜拉体系加固变截面连续梁桥力学性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
XU Gang-nian. Research on Mechanical Properties of Variable Section Continuous Girder Bridge Strengthened by Stay Cable System [D]. Jinan: Shandong University, 2019.

- [16] 王雪锋, 关大勇, 冯玉龙. 钢-混组合桥塔结合段承载性能模型试验研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (4): 93-100.
WANG Xue-feng, GUAN Da-yong, FENG Yu-long. Experimental Study on Bearing Capacity of Joint Segment of Steel-concrete Hybrid Pylon [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (4): 93-100.
- [17] 徐刚年, 王有志, 袁泉, 等. 斜拉体系加固东明黄河公路大桥主梁锚固区段模型试验研究 [J]. 世界桥梁, 2018, 46 (3): 80-85.
XU Gang-nian, WANG You-zhi, YUAN Quan, et al. Main Girder Anchor Zone Model Based Experimental Study of Using Cable-stayed System to Strengthen Dongming Huanghe River Highway Bridge [J]. World Bridges, 2018, 46 (3): 80-85.
- [18] 席兴华. 连续刚构桥损伤敏感性分析及改变结构体系加固方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
XI Xing-hua. Analysis on Damage Sensitivity of Continuous Rigid Frame Bridges and Research on Strengthening Methods of Changing Structural Systems [D]. Jinan: Shandong University, 2017.

(上接第 100 页)

- [9] KISHI N, NAKANO O, MATSUOKA K G, et al. Experimental Study on Ultimate Strength of Flexural-failure-type RC Beams under Impact Loading [C]// Transactions of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Washington, D. C.: IASMiRT, 2001: 116-121.
- [10] FUJIKAKE K, LI B, SOEUN S. Impact Response of Reinforced Concrete Beam and Its Analytical Evaluation [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135 (8): 938-950.
- [11] 李砚召, 王肖钧, 郭晓辉, 等. 部分预应力混凝土梁抗冲击性能试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26 (3): 256-261.
LI Yan-zhao, WANG Xiao-jun, GUO Xiao-hui, et al. Experimental Study on Anti-impact Properties of a Partially Prestressed Concrete Beam [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26 (3): 256-261.
- [12] ADHIKARY S D, LI B, FUJIKAKE K. Strength and Behavior in Shear of Reinforced Concrete Deep Beams under Dynamic Loading Conditions [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 259: 14-23.
- [13] FERRER B, IVORRA S, SEGOVIA E, et al. Tridimensional Modelization of the Impact of a Vehicle against a Metallic Parking Column at a Low speed [J]. Engineering Structures, 2010, 32: 1986-1992.
- [14] PHAM T M, HAO H. Effect of the Plastic Hinge and Boundary Conditions on Impact Behavior of Reinforced Concrete Beams [J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 102: 74-85.
- [15] DO T V, PHAM T M, HAO H. Dynamic Responses and Failure Modes of Bridge Columns under Vehicle Collision [J]. Engineering Structures, 2018, 156: 243-259.
- [16] 许斌, 曾翔. 冲击作用下钢筋混凝土深梁动力性能试验研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (4): 6-13.
XU Bin, ZENG Xiang. Tests for Dynamic Behaviors of Deep RC Beams under Impact Loadings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (4): 6-13.
- [17] 许斌, 曾翔. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47 (2): 1-12.
XU Bin, ZENG Xiang. Experimental Study on the Behaviors of Reinforced Concrete Beams under Impact Loadings [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (2): 1-12.
- [18] 曾翔, 许斌. 无腹筋钢筋混凝土梁抗冲击行为试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (9): 63-73.
ZENG Xiang, XU Bin. Experimental Study on the Impact-resistant Behavior of RC Beams without Shear-resistant Rebar [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (9): 63-73.