DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.021 文章编号:1671-2579(2025)02-0187-07

预应力连续箱梁体内体外组合预应力加固技术研究

宋重阳,付星燃,高洪波,胡承泽
(中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430072)

摘要:为解决某预应力混凝土现浇连续箱梁桥第2跨底板横向开裂及整体刚度下降的病害问题,该文通过病害成因分析,建立了考虑截面刚度折减与预应力损失的有限元损伤模型,结合包络设计的原则,合理确定了加固新增预应力度,提出了"整联腹板外包新增体内长束、第2跨底板新增局部体外短束"的体内体外组合预应力加固方案。施工监控和加固前、后荷载试验结果表明:该加固方式恢复了预压应力储备,提高了整体刚度,加固效果良好。体内体外组合预应力加固技术具有有效改善应力状况、提高结构整体刚度、适应性广等优点,可为其他同类工程的加固提供参考。

关键词:预应力连续箱梁;底板裂缝;刚度折减;体内体外预应力加固;损伤模型;荷载试验
中图分类号:U445.72 **文献标志码:**A

Internal and External Prestress Reinforcement Technology for Prestressed Continuous Box Girder

SONG Chongyang, FU Xingran, GAO Hongbo, HU Chengze
(CCCC Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: A prestressed concrete cast-in-situ continuous box girder bridge faces transverse cracking of the bottom plate of the second span and the overall stiffness decline. To address this issue, this paper analyzed the causes of the damage. A finite element damage model considering the reduction of section stiffness and prestress loss was established, and the new prestress reinforcement degree was reasonably determined according to the principle of envelope design. An internal and external prestress reinforcement scheme was proposed, which included adding a long internal bundle to the outer web and adding a partial short external bundle to the bottom plate of the second span. Through construction monitoring and comparison of load tests before and after reinforcement, the precompression stress reserve was restored; the overall stiffness was improved, and the reinforcement effect was good. The internal and external prestress reinforcement technology has the advantages of effectively improving the stress condition and increasing the overall stiffness of the structure. It has wide adaptability and can be used as a reference for reinforcement of other similar projects.

Keywords: prestressed continuous box girder; bottom plate crack; stiffness reduction; internal and external prestress reinforcement; damage model; load test

0 引言

随着中国公路交通的迅猛发展,预应力连续箱梁桥凭借其结构刚度大、变形平顺且有利于高速行车的特性,得到了广泛应用。然而,在运营过程中,由于设计考虑不周全、施工不当以及汽车超载等因素影响,常导致箱梁出现不同程度的结构性病害,如腹板斜裂、底板横裂等,严重影响结构安全,因此需要进行结构性补强加固处理[1-11]。

目前,较为有效的主动加固方法主要有体外预应力加固、腹板外包体内预应力加固等。其中,体外预应力加固主要用于提高预压应力水平,腹板外包

收稿日期:2024-06-19(修改稿)
基金项目:中交第二公路勘察设计研究院有限公司科技项目(编号:KJFZ-2019-036)
作者简介:宋重阳,男,硕士,高级工程师. E-mail:258587556@qq.com

体内预应力加固主要用于提高结构刚度[12-20]。而对于体内体外组合预应力加固方法的研究相对较少。本文以某预应力连续箱梁桥为例，针对其典型的底板横向裂缝进行分析，并开展体内体外组合预应力加固的研究。

1 工程概况

某大桥跨越九龙江，2013年建成通车。主桥采用(38+3×60+38) m预应力混凝土变截面连续箱梁(图1)，满堂支架现浇施工。桥梁全宽31 m，双向六车道，左、右幅分离布置，半幅桥宽15 m，半幅行车道净宽11.5 m，人行道净宽2 m。箱梁采用单箱单室截面，梁高2.0～3.8 m，顶板宽15 m，底板宽6.888 m，悬臂长4.056 m(图2)。箱梁采用C50混凝土，按A类部分预应力混凝土构件设计，腹板、顶底板纵向预应力分别采用19ϕ^s15.2、12ϕ^s15.2钢束，顶板横向预应力采用3ϕ^s15.2钢束。设计汽车荷载等级为公路-Ⅰ级，人群荷载3.5 kN/m^2。

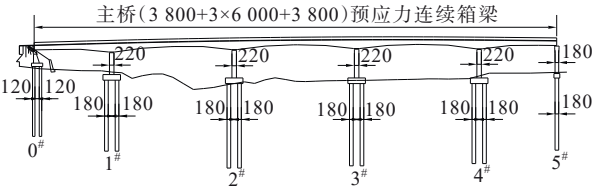


图1 主桥立面布置图(单位：cm)

Figure 1 Elevation layout of main bridge (unit: cm)

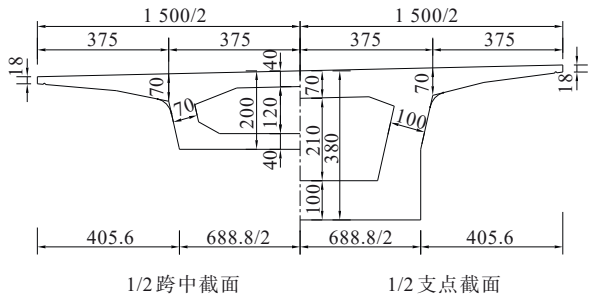


图2 左幅主桥标准横断面图(单位：cm)

Figure 2 Standard cross section of left main bridge (unit: cm)

2 箱梁主要病害及成因分析

根据2020年检测报告，左幅第2跨跨中区域底板裂缝较集中(图3)，共计93条裂缝，其中预应力结构不允许出现的腹板竖向、底板横向、L形及U形裂缝共计64条；第3跨26条裂缝，其中少量横向裂缝；其他跨无裂缝。第2跨U形裂缝最大宽度0.18 mm，底板(厚30 cm)裂缝深度16.5 cm，腹板(厚50 cm)裂缝深度22 cm，已贯穿至钢束位置。在正常通车情况下，裂缝处于活动状态，车辆通过后，裂缝能够闭合至原有宽度。

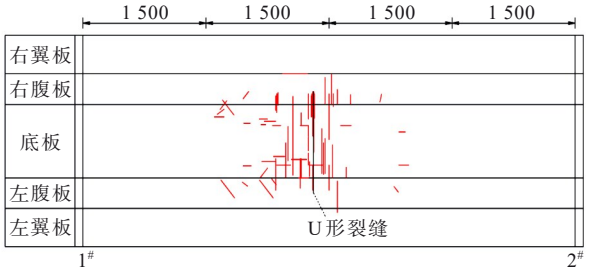


图3 左幅第2跨箱梁裂缝展开图(单位：cm)

Figure 3 Expansion of cracks in the second span box girder on the left (unit: cm)

由于该桥左幅第2跨箱梁横向裂缝较为严重，为了解各桥跨实际工作状况，2020年(加固前)对左幅主桥进行了动、静载试验，同时与2013年桥梁建成时荷载试验结果进行了对比，静载(中载)试验下1～3跨挠度校验系数和应变校验系数对比分别如图4、5所示。

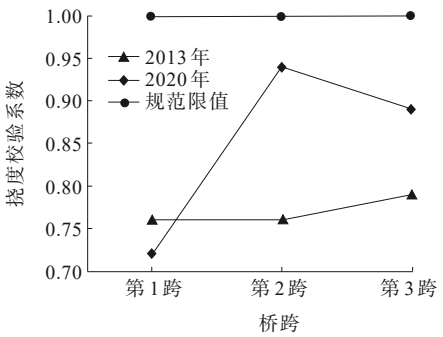


图4 左幅1～3跨跨中挠度校验系数对比图

Figure 4 Comparison of deflection verification coefficients in the middle of spans 1–3 on the left

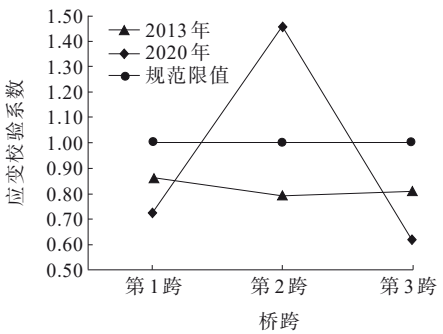


图5 左幅1～3跨跨中底板应变校验系数对比图

Figure 5 Comparison of strain verification coefficients of bottom plate in the middle of spans 1–3 on the left

由图 4、5 可知：左幅主桥挠度校验系数均小于 1，满足规范要求，但第 2 跨跨中挠度校验系数达到 0.94；左幅主桥第 2 跨跨中应变校验系数达到 1.46，不满足规范要求。2020 年（加固前）左幅第 2 跨工作状况明显比其他跨差，且第 2 跨挠度和应变校验系数与 2013 年交工验收相比均有明显增长。

实测桥梁结构竖向振动频率值大于理论计算值（图 6），但与 2013 年交工验收相比，实测频率也存在明显下降，表明桥梁整体刚度满足规范要求，但存在明显下降。

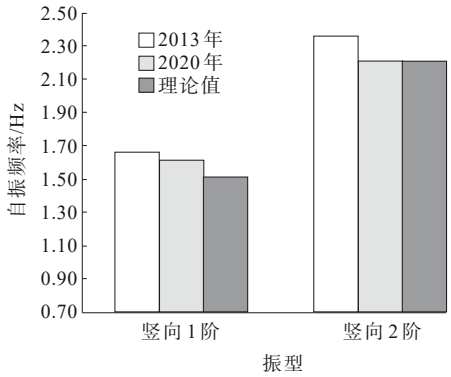


图 6　左幅主梁实测竖向振动频率对比图

Figure 6　Comparison of measured vertical vibration frequencies of left main girder

结合原设计复核验算，在正常使用极限状态频遇组合下，第 2 跨底板均处于受压状态，跨中底板压应力为 −1.36 MPa，原设计压应力储备较大。根据病害表征，第 2 跨预应力损失过大是导致箱梁底板产生横向裂缝的主要原因。左幅主桥箱梁实际受力状况较差，特别是左幅第 2 跨裂缝较集中，导致截面刚度下降明显，挠度值增大；裂缝处于活动状态，表明第 2 跨预应力损失较大。以上病害严重影响桥梁结构安全和耐久性，需要进行结构性加固。

3　箱梁加固设计

根据桥梁实际病害建立损伤模型，分析桥梁实际损伤状况，拟定加固目标，再针对性地进行加固设计。

3.1　实际损伤状况分析

实际损伤模拟可为加固设计提供依据，是加固设计的基础。

3.1.1　截面刚度折减

左幅主桥第 2 跨跨中底板存在较多 U 形、L 形及横向裂缝，裂缝深度最大 22 cm，根据裂缝深度及开裂范围，将左幅第 2 跨跨中附近 18 m 范围内截面刚度折减 20%。

3.1.2　预应力损失

虽然既有桥梁预应力钢束的有效预应力难以准确测量，但是根据第 2 跨底板横向裂缝深度贯穿至钢束位置的裂缝形态，可以推断左幅第 2 跨底板钢束（12 根 12ϕ^s15.2 钢束）、腹板最下层钢束（2 根 19ϕ^s15.2 钢束）存在较大预应力损失。

因此，采用 Midas 软件建立左幅主桥的损伤模型（图 7），经计算，当以上钢束预应力损失 45% 时：在恒载作用下，第 2 跨跨中压应力为 −3.9 MPa（图 8），相比未损伤模型压应力损失 2.5 MPa；在汽车正常通行工况（恒载＋车道荷载＋温度），第 2 跨跨中底板出现 2.65 MPa 拉应力（图 9），与实际开裂情况较相符。

图 7　左幅主桥 Midas 计算模型

Figure 7　Midas calculation model of left main bridge

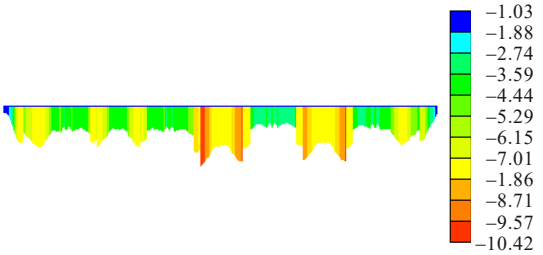


图 8　损伤模型 恒载作用下主梁底板应力图（单位：MPa）

Figure 8　Stress diagram of bottom plate of main girder under constant load of damage model (unit: MPa)

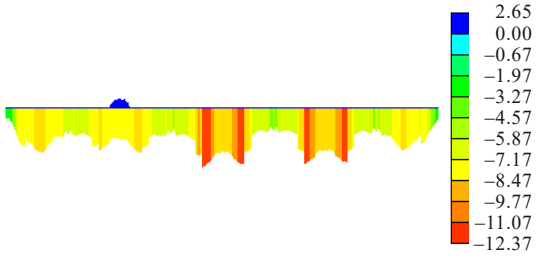


图 9　损伤模型 正常通车时主梁底板应力图（单位：MPa）

Figure 9　Stress diagram of bottom plate of main girder under normal traffic of damage model (unit: MPa)

3.2　加固目标

预应力损失过大导致箱梁底板开裂，最有效的加固方法就是恢复损失的预压应力。针对第 2 跨箱梁底板严重开裂、预应力损失大、整体刚度下降明显

的病害，本次以“恢复开裂截面的刚度、补充损失的预压应力”为加固目标，采取“整联腹板外包新增体内长束＋第2跨底板新增局部体外短束”组合方式新增预应力对左幅主桥进行主动加固，提高刚度，改善应力状态。

3.3 新增预应力度原则

由于反映桥梁损伤现状的损伤模型难以准确建立，以预应力损失为推测值，若加固新增预应力不足则加固效果不佳；若加固新增预应力过多则可能导致混凝土压溃。因此，在加固设计中，控制新增预应力度使加固后桥梁结构处于合理的受力状态是十分关键的。本次加固新增预应力度采用包络设计原则：

（1）包络设计上限：假设没有预应力损失，按原桥设计模型新增预应力，防止预应力施加过多产生反作用。

（2）包络设计下限：按合理推测的预应力损失，即按损伤模型新增预应力，使第2跨跨中截面下缘频遇组合下压应力为1～2 MPa。

3.4 加固措施

3.4.1 箱内底板局部体外短束

体外预应力加固能显著提高桥梁预压应力，为了提高第2跨底板压应力储备、封闭裂缝，对底板横向开裂严重的第2跨箱内底板新增体外预应力短束，采用7束10ϕ^s15.2环氧涂覆无黏结成品索，f_{pk}=1 860 MPa，分3批锚固，控制应力0.5f_{pk}，第2跨箱内底板局部体外短束布置见图10。

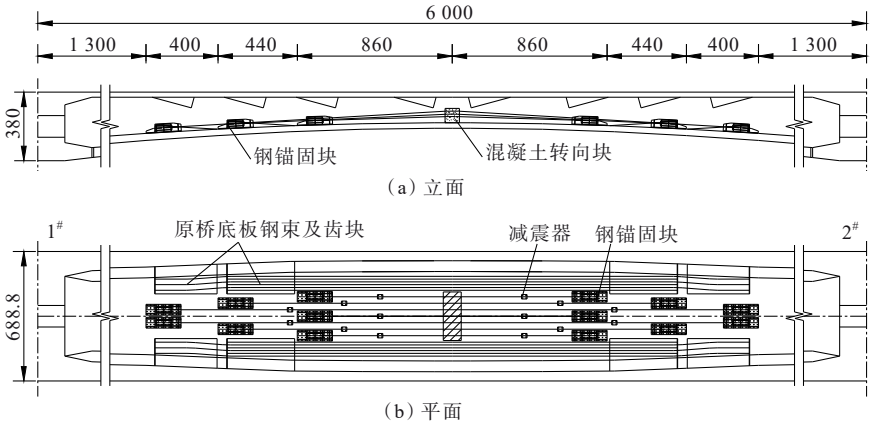


图10 第2跨箱内底板局部体外短束布置图（单位：cm）

Figure 10 Partial external short bundle layout of bottom plate of the second span box (unit: cm)

为缩短工期，减少新增恒载，体外束锚固块采用模块化的钢结构，采用Q355NHC钢结构，通过40根特殊倒锥形锚栓与底板连接，钢锚固块构造见图11。为监测体外预应力施加的效果，每批锚固钢束选择一根钢束在锚下安装压力测试环，监测有效预应力，若不足则进行补张拉，因此锚具均采用可调可换型成品锚具。转向块采用现浇钢筋混凝土，配置集束式转向器，减震装置采用集束式减震器。现场施工照片见图12。

3.4.2 整联腹板外包体内长束

连续箱梁为超静定结构，新增短束会对其他跨产生附加内力，另外主桥整体刚度有明显下降，因此需要整联箱外腹板外包加厚新增体内预应力长束，以改善整联应力，提高整体竖向刚度。

整联箱外腹板外包加厚25～50 cm，新增4根15ϕ^s15.2预应力钢束，f_{pk}=1 860 MPa，张拉控制应力0.75f_{pk}。

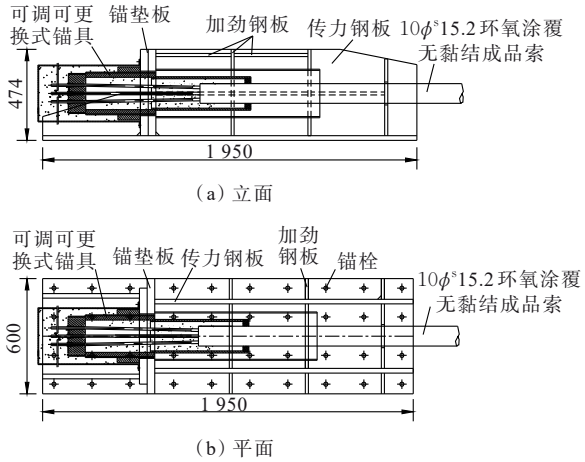


图11 钢锚固块构造图（单位：cm）

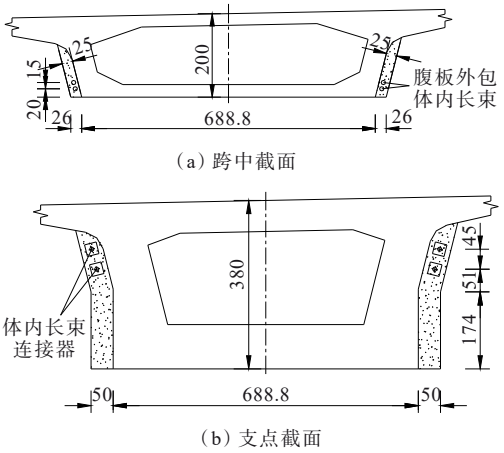
Figure 11 Structure of steel anchor block (unit: cm)

由于联长较长（256 m），整联腹板外包混凝土整体浇筑的收缩次内力大、易开裂，且为了保证浇筑质量，本次腹板外包材料采用C50自密实无收缩混凝土，且采用从中跨向边跨逐跨浇筑、逐跨张拉工艺，

钢束采用连接器连接。第 1～2 跨箱外腹板外包体内长束布置图见图 13、14，第 3～5 跨同样布置。现场施工照片见图 15。

图 12　第 2 跨箱内体外束现场照片

Figure 12　Site photo of external bundle in the second span box

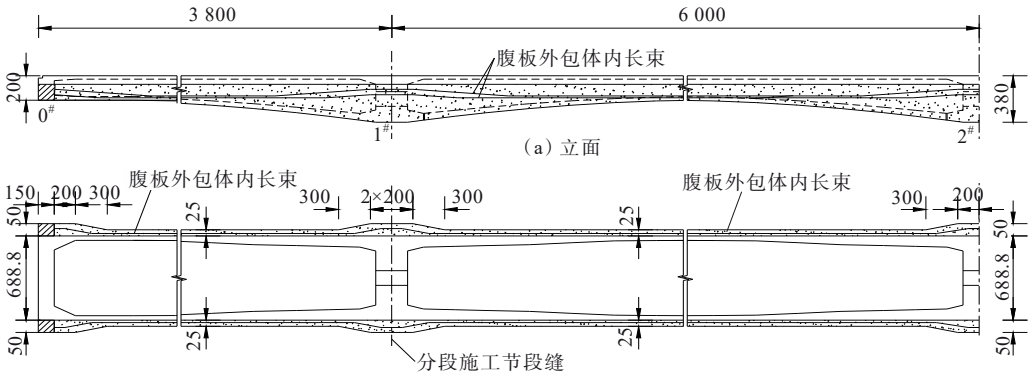


（a）跨中截面

（b）支点截面

图 13　箱外腹板外包横断面图（单位：cm）

Figure 13　Cross section of outer web of box（unit：cm）



（a）立面

（b）平面

图 14　箱外腹板外包体内长束布置图（单位：cm）

Figure 14　Layout of long internal bundle to outer web of box（unit：cm）

图 15　箱外腹板外包体内束张拉现场照片

Figure 15　Site photo of internal bundle tensioning of outer web of box

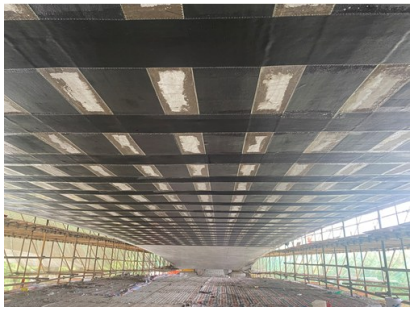


图 16　第 2 跨箱外底板粘贴碳纤维布现场照片

Figure 16　Site photo of carbon fiber cloth pasted on outer bottom plate of the second span box

3.4.3　板底局部补强

左幅第 2 跨跨中底板存在较多纵横向裂缝，第 3 跨也存在少量纵、横向裂缝，考虑到裂缝深度较大，本次拟对底板裂缝封闭处理后，再对第 2 跨、第 3 跨箱梁底板开裂区域粘贴碳纤维布局部补强，提高安全储备。底板纵向粘贴 2 层、横向粘贴 1 层碳纤维布，单条宽度 30 cm。现场施工照片见图 16。

4　加固效果验证

4.1　理论计算分析

本次采取体内体外组合预应力加固后，根据理论计算，包络上限中标准值组合下最大压应力 13.67 MPa，包络下限中频遇组合下第 2 跨跨中底板压应力储备 1.10 MPa，应力状态良好。且新增压应力 2.4

MPa(体外短束新增1.6 MPa+腹板外包长束新增0.8 MPa),能补偿损失的预应力(2.5 MPa),也能基本抵消活载拉应力(3.2 MPa)。

4.2 施工过程监控

在第2跨跨中底板横向设置3个应力测点,测量新增预应力钢束张拉过程中结构的响应。先张拉体内长束,再张拉体外短束,第2跨跨中底板新增压应力实测结果见表1。

表1 左幅第2跨梁底新增压应力实测结果

Table 1 Measured results of new compression stress at girder bottom of the second span on the left

截面	测点编号	实测新增压应力/MPa	
		体内长束张拉	体外短束张拉
第2跨跨中	1(梁底)	0.942	2.514
	2(梁底)	0.921	2.601
	3(梁底)	0.897	2.585
	平均值	0.920	2.567

由表1可知:箱外腹板外包体内长束和第2跨箱内底板局部体外短束预应力张拉完成后,第2跨跨中底板实测新增压应力2.567 MPa>设计值2.400 MPa,恢复了损失的预压应力。

4.3 加固后荷载试验

为了验证加固效果,对左幅主桥进行了加固后荷载试验,原有裂缝闭合,且未发现新增裂缝。并对比了原桥建成时(2013年)、加固前(2020年)荷载试验结果,左幅第2跨加固前后荷载试验结果对比见图17。

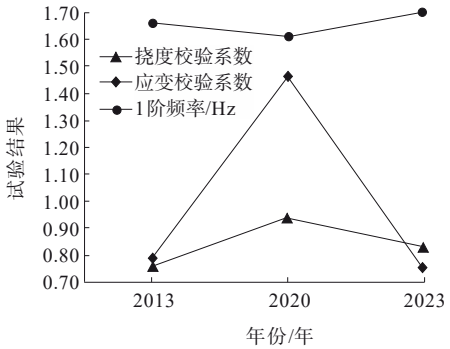


图17 左幅第2跨加固前后荷载试验结果对比图

Figure 17 Comparison of load test results before and after reinforcement of the second span on the left

由图17可知:本次加固后,左幅第2跨应变和挠度校验系数明显下降,实测基频也明显提高,均恢复至2013年状态,结构承载能力和整体刚度有了明显改善,均恢复到原桥建成时状态,达到了设计目标及预期效果。

5 结论

该文以某预应力混凝土现浇连续箱梁桥为例,针对其第2跨底板出现的横向开裂和整体刚度下降等病害进行了深入分析,并提出了基于截面折减和预应力损失的损伤模型以及新增预应力包络设计的理念。加固方案采用了“整联腹板外包新增体内长束、第2跨底板新增局部体外短束”的体内体外组合预应力加固方法。该桥已于2022年底完成加固工作。通过施工监控和加固前后荷载试验结果对比,得到以下结论:

(1)基于截面折减和预应力损失的损伤模型较为真实地反映了桥梁实际状况,为后续加固设计提供了基础。

(2)基于包络设计原则的加固新增预应力度能防止预应力过大或不足,使桥梁结构处于安全范围。

(3)体内体外组合预应力加固方法能有效提高压应力储备和整体刚度,达到了设计目标,确保了桥梁结构的安全性和耐久性。

(4)与单一的主动加固方式相比,体内体外组合预应力加固方案适应性更广,能有效改善应力水平、提高结构整体刚度,可为其他同类工程的加固提供参考。

参考文献:

References:

[1] 胡承泽,宋重阳.体外预应力在某鱼腹式箱梁桥加固中的应用与研究[J].中外公路,2022,42(4):113-117.
HU Chengze,SONG Chongyang.Application and research of external prestress in strengthening of a fish-belly box girder bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(4):113-117.

[2] 张榄,姚磊,杨祖涛.某长江大桥引桥连续箱梁长索体外预应力加固设计[J].世界桥梁,2022,50(4):108-112.
ZHANG Lan, YAO Lei, YANG Zutao. Design of strengthening continuous box girders of approach bridge of a Changjiang River Bridge with long external prestressing tendons[J]. World Bridges, 2022, 50(4): 108-112.

[3] 曾永革,李传习,黄卓新.体外预应力T梁桥设计若干问题探讨[J].中外公路,2009,29(1):126-129.
ZENG Yongge,LI Chuanxi,HUANG Zhuoxin.Discussion on some problems in design of externally prestressed T-beam bridge[J].Journal of China & Foreign Highway,2009, 29(1):126-129.

[4] 娄亮,潘竺兰,赵长军.预应力混凝土连续箱梁裂缝成因分析及加固措施[J].公路,2011,56(8):49-52.
LOU Liang,PAN Zhulan,ZHAO Changjun.Cause analysis and reinforcement measures of cracks in prestressed concrete continuous box girder[J]. Highway, 2011, 56(8): 49-52.

[5] 李明洪,张锐.箱梁腹板加厚体内预应力加固技术实例分析及施工技术要点[J].建筑结构,2018,48(4):96-99.
LI Minghong, ZHANG Rui. Example analysis and construction technical points of internal prestress reinforcement of box-shaped girder with thickening webs [J].Building Structure,2018,48(4):96-99.

[6] 张运清,赵庆云,孟涛.混凝土连续箱梁体外预应力加固技术研究[J].中外公路,2020,40(3):164-167.
ZHANG Yunqing, ZHAO Qingyun, MENG Tao. Study on external prestressed reinforcement technology of prestressed continuous box girder[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(3):164-167.

[7] 蒋伟,崔海.体外预应力加固桥梁的荷载试验评定研究[J].中外公路,2017,37(2):85-88.
JIANG Wei, CUI Hai. Study on load test evaluation of bridges strengthened by external prestressing[J].Journal of China & Foreign Highway,2017,37(2):85-88.

[8] 付星燃,胡承泽,高洪波.大跨径T梁体外预应力加固锚固块设计研究[J].世界桥梁,2021,49(1):101-106.
FU Xingran, HU Chengze, GAO Hongbo. Research on anchoring external prestressing tendons with wedges in long-span T beam strengthening[J].World Bridges,2021,49 (1):101-106.

[9] 陈涛,江红涛,柯卫峰.某连续箱梁桥体外预应力门槛梁锚固块设计研究[J].世界桥梁,2016,44(1):40-45.
CHEN Tao,JIANG Hongtao,KE Weifeng.Study of design of sill-beam anchor blocks for external prestressing tendons of a continuous box beam bridge[J]. World Bridges,2016,44(1):40-45.

[10] 卢发亮.预应力混凝土箱梁体外索应力损失监测研究[J].中外公路,2021,41(2):115-119.
LU Faliang.Research on stress loss monitoring of external cables in prestressed concrete box girders[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2):115-119.

[11] 殷新锋,王成煜,黄屿,等.体外预应力桥梁转向块的受力性能分析[J].中外公路,2017,37(5):100-103.
YIN Xinfeng, WANG Chengyu, HUANG Yu, et al. Mechanical performance analysis of externally prestressed bridge steering block[J]. Journal of China & Foreign Highway,2017,37(5):100-103.

[12] 吕宏奎.某重载铁路连续刚构桥底板崩裂加固设计[J].桥梁建设,2019,49(1):71-76.
LYU Hongkui. Reinforcement design for bursting cracks in bottom slab of a heavy-duty railway continuous rigid frame bridge[J].Bridge Construction,2019,49(1):71-76.

[13] 褚文涛,关进轩,杨帆,等.轨道交通大跨度预应力混凝土连续梁桥加固设计[J].世界桥梁,2023,51(增刊1):159-166.
CHU Wentao, GUAN Jinxuan, YANG Fan, et al. Retrofit design of long-span prestressed concrete continuous light rail bridge[J].World Bridges,2023,51(sup 1):159-166.

[14] 吴海军,唐海淘,陈涛,等.预应力混凝土梁下挠开裂后顶升过程刚度模拟方法研究[J].中外公路,2022,42(5):88-92.
WU Haijun, TANG Haitao, CHEN Tao, et al. Study on simulation method of stiffness of prestressed concrete girder with down-warping flexural cracking during jacking process[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(5):88-92.

[15] 王磊,杨飞,董水英.基于阶梯刚度模式的PC梁开裂后挠度分析方法[J].公路交通科技,2018,35(10):63-68,81.
WANG Lei, YANG Fei, DONG Shuiying. A method for analysing deflection of PC girder after cracking based on ladder stiffness mode[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(10): 63-68,81.

[16] 余超良.体外预应力加固连续梁桥施工监控研究[J].中外公路,2013,33(6):202-204.
YU Chaoliang. Study on construction monitoring of continuous beam bridge strengthened by external prestress [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(6): 202-204.

[17] 苗建宝,冯威,许冰.体外预应力加固混凝土梁延性分析与试验研究[J].世界桥梁,2019,47(3):76-80.
MIAO Jianbao,FENG Wei,XU Bing.Ductility analysis of concrete beams strengthened with external prestressing and experimental study[J].World Bridges,2019,47(3):76-80.

[18] 李嘉,李有志,江建.增大截面结合预应力加固矩形梁模型对比试验研究[J].中外公路,2021,41(6):134-136.
LI Jia, LI Youzhi, JIANG Jian. Comparative experimental study on bridge reinforcement by enlarging section-prestress method[J].Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(6):134-136.

[19] 肖金军,李传习.小半径曲线箱梁非对称增大截面加固分析与试验研究[J].中外公路,2019,39(2):75-79.
XIAO Jinjun,LI Chuanxi.Experimental study and analysis of reinforcement of small-radius curved box-girders strengthened by asymmetric increasing cross-section method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39 (2):75-79.

[20] 王永宝,毛敏,刘志华,等.体外预应力加固预应力混凝土梁的静力试验[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2107-2113.
WANG Yongbao,MAO Min,LIU Zhihua,et al.Static test of prestressed concrete beams strengthened by external prestressing[J]. Building Structure, 2022, 52(sup 1): 2107-2113.