

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.022

引用格式:施公佐,沈凯祺,黄庆业.现浇箱梁二次体外预应力加固及效果分析[J].公路与汽运,2025,41(2):103-106.

Citation:SHI Gongzuo, SHEN Kaiqi, HUANG Qingye. Reinforcement of cast-in-situ box girder by secondary external prestressing and effect analysis[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(2): 103-106.

现浇箱梁二次体外预应力加固及效果分析

施公佐¹, 沈凯祺¹, 黄庆业²

(1.浙江交投高速公路运营管理有限公司, 浙江 杭州 310002;

2.浙江交工集团股份有限公司 设计院分公司, 浙江 杭州 310051)

摘要:某高速公路枢纽互通于 2007 年完工, 后续检查中发现其主线及匝道桥均存在结构性裂缝。其中一条匝道的三联桥于 2009 年采用箱内中跨布置 4 束 $7\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束、边跨布置 2 束 $7\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束进行加固; 2020 年检测发现该联桥出现较多结构性裂缝, 采用中跨底板布置 2 股 $5\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束进行加固。文中分析该联桥病害演化历程及两次加固效果, 结果表明加固后桥梁应力状态得到较好改善, 且箱内体外预应力损失对箱梁应力的影响小于梁底体外预应力损失的影响, 可将第二次加固体外预应力束的监测及维护作为后续养护加固重点。

关键词:桥梁; 互通立交; 体外预应力; 桥梁加固; 现浇箱梁

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)02-0103-04

对既有桥梁上部结构的加固, 一般都不得不在原结构混凝土的外部进行, 体外预应力技术成为一种主要也是最积极的加固方法^[1-4], 在工程中得到较广泛的应用。国内外学者也对体外预应力技术进行了大量理论研究, 如张继文等对梁体进行下截面抗弯加固及抗剪加固, 分析了体外预应力加固钢筋混凝土简支梁的受力性能^[5]; 毛德均等分析了体外预应力加固钢束用量、转向器位置、钢束转向角度对构件承载能力的影响^[6]; 周建民等分析了体外预应力加固后桥梁的受力特性^[7]; 曾滨等研究了体外预应力筋极限应力与高跨比或转向块间距的关系, 分析了二次效应对计算承载力的影响^[8]; 张恒等对某特大桥梁主桥体外预应力加固及长期运营后的状态进行验算, 验证了加固措施的有效性^[9]; 杨杰平针对多跨现浇连续梁的腹板与梗斜连接处纵向开裂问题, 提出了在腹板内外侧对称粘贴加劲钢板、箱梁底板粘贴碳纤维布等加固方案^[10]; 谢金龙等结合施工实例, 介绍了体外预应力加固施工技术的实际应用^[11]; 焦子旋等采用体外预应力技术对某连续刚构桥进行加固, 并通过仿真分析验证了其有效性^[11]。但这些研究集中在未加固的桥梁上, 对已加固桥梁进行二次加固的研究很少。本文依托某高速公路枢纽互通, 对比分析二次加固前后桥梁工作性能的变化

及二次体外预应力加固对第一次加固体外预应力束预应力损失的影响, 为桥梁二次加固提供参考。

1 工程概况

某高速公路枢纽互通于 2007 年完工, 后续检查中发现其主线及匝道桥均存在结构性裂缝。本文选取其中一条匝道的三联桥进行分析。该桥上部结构为现浇预应力混凝土箱梁, 跨径为 (31.200+31.282+31.200) m, 梁高 1.6 m, 顶板厚 22 cm, 腹板厚由支座附近 60 cm 渐变至 40 cm, 底板厚由支座附近 45 cm 渐变至 25 cm, 采用 C50 混凝土。桥面总宽 9.3 m, 平面处于曲线段, 曲线半径为 996 m。下部结构采用矩形墩、灌注桩基础(见图 1)。

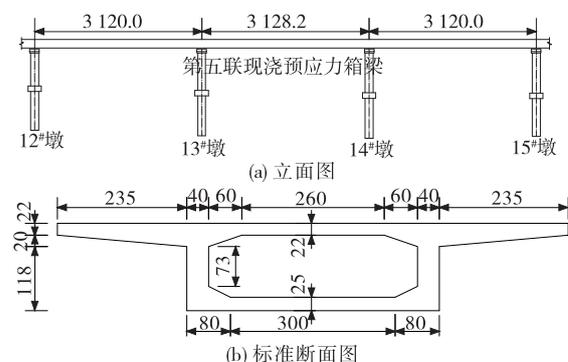


图 1 桥梁总体布置(单位: cm)

2008 年 11 月对该桥进行检测评估,发现中跨存在结构性裂缝。2009 年,在箱内中跨布置 4 束 $7\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束、边跨布置 2 束 $7\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束进行加固,张拉控制应力为 1 209 MPa(见图 2)。

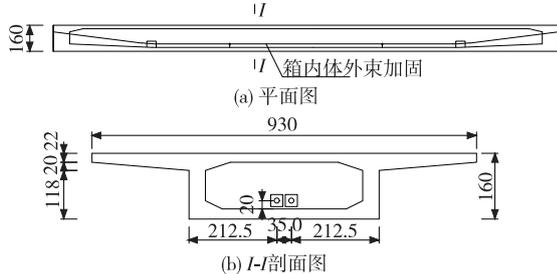


图 2 第一次加固构造图(单位:cm)

2009 年 12 月对该桥进行检测评估,发现边跨出现结构性裂缝。2011—2020 年持续对该桥进行检测,发现中跨新增了结构性裂缝,主要问题如下:桥梁表观质量不满足规范要求;混凝土芯样存在大量气孔;桥梁断面尺寸与设计值偏差较大;底板钢筋保护层厚度过薄;纵向束接近墩顶负弯矩区位置较低且弯起段相对误差较大(见图 3)。

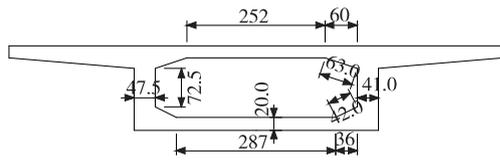


图 3 箱梁实际断面尺寸(单位:cm)

2020 年,对中跨底板布置 2 股 $5\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束进行加固(见图 4、图 5),张拉控制应力为 1 209 MPa。该桥历年检测加固情况见表 1。

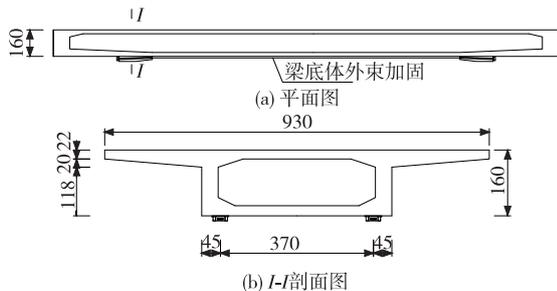


图 4 第二次加固构造图(单位:cm)

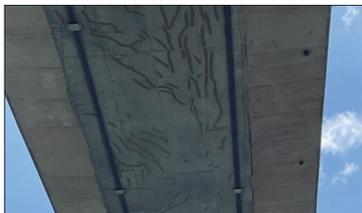


图 5 第二次加固现场

表 1 桥梁历年检测加固情况

年份	桥梁状况
2008	中跨存在结构性裂缝
2009	在箱内中跨布置 4 束 $7\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束、边跨布置 2 束 $7\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束进行加固;裂缝修补
2011	中跨存在结构性裂缝
2013	中跨存在结构性裂缝
2014	修补中跨结构性裂缝
2018	中跨存在结构性裂缝
2020	中跨存在结构性裂缝;新增底板横向裂缝 5 条,累计长度 8.13 m,最大缝宽 0.10 mm;新增腹板竖向裂缝 5 条,长度 5.08 m,缝宽 0.12 mm。在中跨梁底布置 2 股 $5\phi 15.2$ mm 无黏结体外预应力钢束进行加固
2021	边跨新增非结构性裂缝
2022	边跨裂缝修补,此后未出现结构性裂缝

2 病害演化分析

2.1 原结构复算

根据竣工后工程鉴定报告,该桥箱梁底板直线段厚度为 20 cm,以此作为结构尺寸并结合实测预应力束位置进行复算。图 6 为有限元计算模型。



图 6 有限元计算模型

各控制截面正截面抗弯承载能力/抗弯设计值见表 2。承载能力极限状态正截面抗弯强度均大于组合 I、II、III 包络弯矩值,满足规范要求。

表 2 控制截面正截面抗弯承载能力/抗弯设计值

位置	抗弯设计值/ (kN·m)	抗弯承载能力/ (kN·m)	安全系数
边跨跨中	31 368.62	33 831.04	1.078
中跨跨中	23 365.43	27 064.46	1.158
支点	-30 525.04	-50 926.41	1.668

正常使用极限状态下,各组合梁体下缘最大法向拉应力为 2.679 MPa,大于 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中

C50 混凝土抗拉强度为 2.65 MPa 的限值^[13],小于 JTJ 023—85《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》对 A 类预应力构件 $0.9R_t^b = 2.70 \text{ MPa}$ (R_t^b 为混凝土抗拉标准强度)的限值^[14]。

原结构复算结果表明:1) 在各不利组合下,主梁承载能力满足要求,中跨跨中正截面强度与弯矩效应组合值的比值为 1.158,安全储备较小;2) 正常使用极限状态下原设计正应力满足 JTJ 023—85 对预应力 A 类构件的要求,中跨跨中截面正截面最大拉应力超过 JTJ 3362—2018 的限值。

2.2 加固后模拟演化分析

为分析开裂成因,根据新增裂缝的位置及范围,进行有限元分析计算。试算结果表明:中跨腹板预应力束的预应力折减为 90% 时,中跨梁底的拉应力最大为 2.985 MPa,超过 JTJ 023—85 的限值,与中跨出现新增裂缝的现象较吻合。2009 年对该联桥进行体外预应力加固,理论计算的中跨跨中正截面下缘拉应力减小至 2.005 MPa,增加了 0.695 MPa 应力储备。

2011—2020 年,中跨跨中持续新增结构性裂缝。根据该桥体外预应力索力监测结果,最大预应力损失 27.35%,其余测点损失 6.04% 及 15.56%。考虑到持续开裂对主梁刚度的影响,采用换算截面计算主梁刚度,并在计算模型中按照监测结果折减体外预应力,进行体外预应力损失后正常使用极限状态复算。计算结果表明:现状跨中拉应力最不利组合拉应力为 2.588 MPa,比加固后减少 0.583 MPa 左右的压应力储备。

2.3 开裂病害演化分析

原设计及历年检测的主梁断面拉应力见表 3。

表 3 原设计及历年检测的主梁断面拉应力

阶段	法向应力/MPa	应力储备/%
竣工	2.679	0.78
2008 年检测	2.985	超限
2009 年加固	2.005	25.74
后续年份检测	2.588	4.15

由表 3 可知:竣工时中跨跨中主梁下缘拉应力为 2.679 MPa,已十分接近规范限值,边跨跨中为受压状态;考虑预应力损失,2008 年中跨跨中主梁下缘拉应力 2.985 MPa 已不满足规范要求,与主梁中跨跨中截面出现结构性裂缝的情况相吻合;2009 年

在箱内增设体外预应力束后,由于主梁开裂,其刚度受到损伤,且施加的体外预应力存在损失,中跨跨中下缘最大拉应力为 2.588 MPa。

根据 2020 年体外预应力监测结果,预应力平均损失率为 11.5%,最小损失率为 7.9%,最大损失率为 17.1%,当新增体外预应力累计损失达到 40% 时,中跨跨中下缘最大拉应力为 2.755 MPa,超过规范限值,与检测结果相吻合。

综上,推断中跨持续出现结构性裂缝的原因,一是该跨主梁刚度受损;二是施加体外预应力后中跨实际拉应力仍较大且体外预应力持续存在损失。

3 第二次加固分析

3.1 加固效果分析

第二次加固于梁底布置 2 股 $5\phi 15.2 \text{ mm}$ 无黏结体外预应力钢束。根据计算结果,原结构中跨跨中下缘正截面拉应力降低至 1.71 MPa,结构有 0.99 MPa 应力储备。

3.2 第二次体外预应力对第一次体外预应力索力的影响

第二次体外预应力施加前后第一次体外预应力束的索力见表 4。施加第二次体外预应力后,第一次加固体外预应力束的索力损失很小。

表 4 第二次体外预应力施加前后第一次体外预应力束的索力

预应力 编号	索力/MPa		第二次体外预应力施 加后第一次体外预应 力束的索力损失/%
	第二次体外预 应力施加前	第二次体外预 应力施加后	
N2-1	659.61	654.82	0.73
N2-2	659.59	654.79	0.73
N2-3	659.47	654.88	0.70
N2-4	659.45	654.86	0.70

3.3 第二次体外预应力加固后应力储备

进行两次体外预应力加固对箱梁应力状态的敏感性分析,预测后续箱梁的应力储备变化,为后续养护提供侧重点。分析工况如下:工况一为第一次加固体外预应力束的预应力持续损失,第二次加固体外预应力束的预应力无损失(及时补张拉);工况二为第一次加固体外预应力束的预应力不继续损失(稳定),第二次加固体外预应力束的预应力持续损失。两工况下体外预应力损失时梁底拉应力的变

化见图 7、图 8。

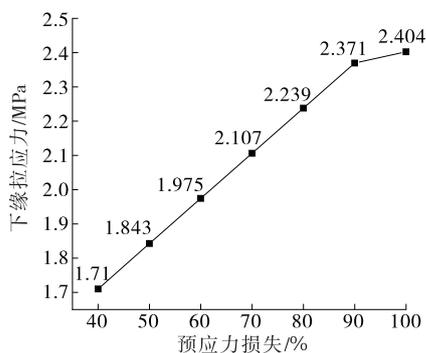


图 7 工况一下体外预应力损失时梁底拉应力的变化

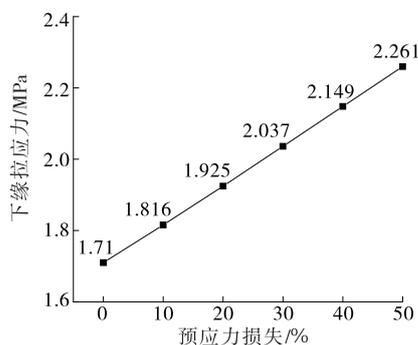


图 8 工况二下体外预应力损失时梁底拉应力的变化

由图 7、图 8 可知:箱内体外预应力(28 根钢绞线)损失时,单根钢绞线引起的梁底拉应力变化为 0.004 75 MPa;梁底体外预应力(10 根钢绞线)损失时,单根钢绞线引起的应力变化为 0.010 60 MPa。箱梁梁底拉应力变化对第二次加固体外预应力束更敏感。第一次加固体外束完全失效时,梁底拉应力为 2.404 MPa,应力储备为 10.96%。鉴于对箱内体外预应力监测和维护的难度较大,可将第二次加固体外预应力束的监测及维护作为后续养护加固重点。

4 结论

根据该桥的历史检测和维修加固资料,通过病害演化模拟分析,得出如下结论:

(1) 通过施加体外预应力对混凝土桥梁进行加固能有效改善桥梁应力状态。

(2) 梁底板施加二次体外预应力后,箱梁内施加的第一次体外预应力束的索力损失很小。

(3) 箱内体外预应力损失对箱梁应力的影响小于梁底体外预应力损失的影响,条件允许的情况下推荐优先于底板进行体外预应力加固。

(4) 该桥经过两次体外预应力束加固后应力状态得到有效改善,应力储备得到有效提升。建议对该桥第二次加固的体外预应力束应力进行长期监测,并及时进行补张拉。

参考文献:

- [1] 王学军,李亚雷,汪晶,等.大跨径预应力箱梁体外预应力加固技术研究[J].公路,2022,67(5):132-138.
- [2] 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.
- [3] 李双,吴熠哲,朱慈祥.预应力混凝土连续梁桥二次加固及效果分析[J].桥梁建设,2019,49(5):113-118.
- [4] 张春安,田智鹏.桥梁加固施工中体外预应力技术的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2019(9):169-170.
- [5] 张继文,吕志涛.预应力加固钢筋混凝土简支梁的受力性能与分析计算[J].建筑结构,1995,25(9):18-23.
- [6] 毛德均,许鹏,陈旭,等.体外预应力加固钢筋混凝土简支梁的设计参数研究[J].公路工程,2021,46(2):8-14.
- [7] 周建民,何余良,吴旭东,等.体外预应力索加固预应力混凝土连续箱梁桥方案比较[J].工业建筑,2017,47(3):182-187.
- [8] 曾滨,尚仁杰,许庆.体外预应力加固结构的二次效应分析[J].工业建筑,2019,49(12):96-99+104.
- [9] 张恒,罗雷.某连续刚构桥体外预应力加固后承载能力评估[J].公路与汽运,2022(6):122-126.
- [10] 杨杰平.某现浇连续箱梁桥裂缝原因及加固技术分析[J].公路与汽运,2020(1):118-120.
- [11] 谢金龙,贺才松.桥梁体外预应力加固施工技术探讨[J].公路与汽运,2015(4):238-240.
- [12] 焦子旋,刘建,曾天养,等.体外预应力加固连续刚构桥仿真分析[J].交通科学与工程,2018,34(2):52-57.
- [13] 中交公路规划设计院有限公司.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.
- [14] 交通部公路规划设计院.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTJ 023—85[S].北京:人民交通出版社,1985.

收稿日期:2023-11-02