

预应力钢丝绳加固后的RC简支T梁承载能力退化研究

马 奔

(中交路建交通科技有限公司,北京市 101399)

摘 要: 预应力钢丝绳加固方法在国内桥梁加固中应用已超过10 a,但部分最早采用该方法加固的桥梁出现了承载能力不足的问题。为深入分析这一现象,通过对比两片运营10余年的预应力钢丝绳加固简支T梁的静载破坏试验,重点研究T梁跨中挠度、裂缝及应变随外荷载变化的情况。结果表明,抗弯承载能力的退化主要源于加固时所增加的刚度随着时间的推移逐渐减弱。经过进一步分析,刚度降低的主要原因是预应力钢丝绳的应力松弛。这一结论为今后预应力钢丝绳加固技术的应用与改进提供了重要的参考依据,有助于提高桥梁的长期安全性与可靠性。

关键词: 预应力钢丝绳加固;单梁静载破坏试验;抗弯承载能力;刚度;应力松弛

中图分类号: U445.7⁺²

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0308-05

Study on Load-bearing Capacity Degradation of RC Simple-supported T-Beams Reinforced with Prestressed Steel Strands

MA Ben

(China Communications Road Construction Traffic Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: The prestressed steel strand reinforcement method has been used in bridge reinforcement in China for over 10 years. However, some of the earliest bridges reinforced by this method have experienced issues with insufficient load-bearing capacity. To analyze this phenomenon in depth, the key research focuses on the situation of mid-span deflection, cracks and strain of T-beams with the change of external loads by comparing the static load failure tests of two prestressed steel wire rope reinforced simple-supported T-beams that have been in operation for more than 10 years. The results indicate that the degradation of anti-bending load-bearing capacity is mainly due to the fact that the increased stiffness during reinforcement gradually weakens over time. Further analysis reveals that the main reason of the stiffness reduction is the stress relaxation of the prestressed steel strands. This conclusion provides the important references for the future application and improvement of prestressed steel strand reinforcement technology, which helps to improve the long-term safety and reliability of bridges.

Keywords: prestressed steel strand reinforcement; static load failure test of single beam; anti-bending load-bearing capacity; stiffness; stress relaxation

0 引 言

随着我国经济的快速发展,过去30年间国内修建了大量桥梁。然而,随着道路等级的提升和新规范的实施,加之耐久性问题,部分桥梁的承载能力不足,亟需进行加固。目前国内常用的加固方法有粘贴碳纤维复合材料、粘贴钢板、体外预应力加固、增大截面和改变结构体系加固等方法^[1-5]。

由于桥梁结构本身要承受较大的自重荷载,因此轻质高强材料通常在加固中作为首选,其次才考虑加固方法。体外预应力加固技术就是将轻质高强材料附着于结构外侧,通过施加体外预应力提供安全储备,从而达到加固的目的^[6-24]。

预应力钢丝绳抗弯加固对结构自重增加较少,对桥下净空影响较小,能显著提高结构的刚度和极限承载力,同时不易发生粘结破坏,施工相对方便,成本不高,是一种较好的抗弯加固方法^[25-28]。预应力钢丝绳加固方法在国内已应用10 a有余,最早使用该方法加固的一批桥梁部分已出现承载能力不足

收稿日期: 2024-12-22

作者简介: 马奔(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁检测、监测、加固设计工作。

的问题。本文通过从旧桥上拆除下来的 2 片预应力钢丝绳加固过的旧梁,研究该加固方法失效后梁体剩余的抗弯承载能力,并分析承载能力退化的原因。

1 桥梁概况

某单跨小桥建于 1989 年,横向布置 6 片 T 梁,桥梁标准跨径为 12.0 m,桥梁设计荷载为汽车—15 级。2003 年对该桥进行了拓宽改造,横向增加 5 片新 T 梁。2009 年该桥荷载试验结果表明已不满足汽车—15 级承载能力要求,同时由于道路等级提高,需要对该桥进行提级加固,设计荷载为汽车—20 级。

本次加固主要针对桥梁跨中抗弯承载能力不足以及梁端抗剪能力不足,主要技术要点如下。

(1) 结构裂缝的处理

根据桥梁结构的裂缝宽度不同情况分别采用涂刷封闭胶和压力灌浆处理 2 种方式提高结构的耐久性。

(2) T 梁抗弯能力加固措施

针对该桥抗弯承载能力不足特点,T 梁腹板底部采用预应力钢丝绳进行加固,单根钢丝绳公称直径为 4.0 mm,公称面积为 9.55 mm²,抗拉强度标准值 $f_{pk} = 1\,670\text{ MPa}$,弹性模量 $E_p = 1.3 \times 10^5\text{ MPa}$ 。张拉控制应力 $\sigma_k = 0.5f_{pk} = 835\text{ MPa}$ 。T 梁腹板底面采用 44 根预应力钢丝绳双排张拉,聚合物砂浆厚度为 5 cm。T 梁横断面见图 1。

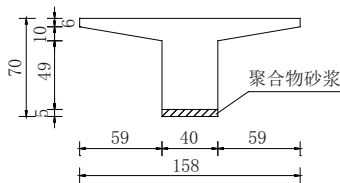


图 1 T 梁横断面尺寸(单位:cm)

(3) 梁端抗剪能力加固

由于支点腹板处有斜向剪切裂缝,对其腹板进行粘贴钢板处理。由于跨中区域采用施加预应力方式加固,预应力锚具需安装在粘贴钢板上,梁端腹板两侧采用 U 形钢板加固。

(4) 预应力高强钢丝绳加固流程^[29-31]

预应力钢丝绳加固流程为:基底打磨处理→开槽粘钢,安装锚具→反力点设置→锚固端制作→涂刷界面剂→对称张拉→高强锚固砂浆处理→聚合物砂浆处理。

2 桥梁加固前后静载试验结果对比

加固完成后对该桥进行了静载试验,试验结果表明,桥梁承载能力满足汽车—20 级要求。加固前后桥梁静载试验中主要受力主梁的实测挠度和钢筋应变对比见表 1。

表 1 加固前后桥梁静载试验结果对比

主要受力梁	测试项目	加固前	加固后	提高程度/%
5#主梁	实测挠度值/mm	10.15	8.88	12.51
6#主梁	实测挠度值/mm	10.84	8.91	17.80
	钢筋应变 $\mu\epsilon$	309	145	53.11
7#主梁	实测挠度值/mm	8.00	6.08	24.00

该桥建成运营至今已有 30 余年,在预应力钢丝绳加固后也已运营 10 余年,在交通荷载和自然条件下,主梁又出现了承载力不足和混凝土耐久性病害,因此对该桥进行了拆除重建。为掌握预应力钢丝绳抗弯加固后的承载能力退化情况,拟对拆除的 2 片旧梁进行单梁静载试验。

3 已拆除梁体状况

该桥 T 梁腹板底部布有 12 Φ 28 主筋,分上下 2 排并排布置,实测主筋净保护层为 30 mm。采用回弹法测得混凝土强度推定值为 20.4 MPa。两片旧中梁尺寸相同,如图 1 所示。本次选择的两片梁外观状况均无明显下挠现象,受弯区均无受力裂缝;由于旧梁拆除及吊装导致两 T 梁翼板边缘局部均有小面积破损、露筋,但是单梁整体状况能够满足单梁抗弯承载能力试验要求(见图 2)。



图 2 T 梁实际状况

4 加载试验方案

4.1 加载方式

本次单梁荷载检测拟采用反力架进行三点式加载方式(见图 3)。单梁静力加载单个千斤顶预估值为 380 kN,考虑加固后主梁承载力的提高,选取 500 kN 千斤顶,行程不小于 20 cm。试验加载分为 9 级,卸载分为 3 级,每级加载或卸载完成后,持荷 10 min,再进

行下一步分级试验步骤。

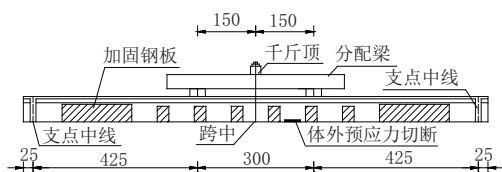


图3 加固梁和未加固梁3点加载示意图(单位:cm)

4.2 测点布置

试验时,在1/4跨、1/2跨、3/4跨和两支点附近各布置1个挠度测点,在各梁跨中截面腹板左侧面顶部和底部各布置一个应变测点。

由于拆除的2片旧梁均已加固,为了对比加固前后抗弯承载能力变化情况,切断其中1片T梁腹板底面的预应力钢丝绳来模拟旧梁未加固时的状态。由于跨中需要放置百分表,模拟未加固梁钢丝绳切断位置如图3所示。

5 试验结果分析

5.1 跨中挠度对比分析

未加固梁与加固梁荷载-挠度关系曲线对比见图4。

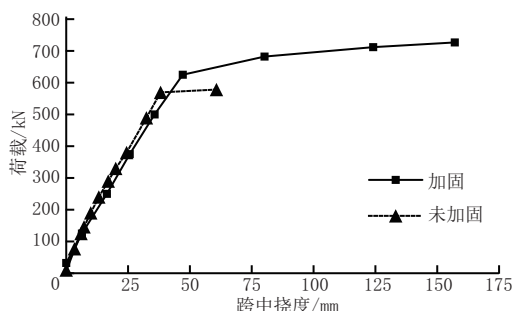


图4 荷载-挠度曲线

由图4分析可知,未加固梁在0~569.4 kN加载过程中,荷载-挠度曲线线性相关性明显,梁体处于弹性变形阶段,实测最大弹性挠度为30.33 mm;加载到569.4 kN时,荷载-挠度曲线出现反弯点,说明梁体进入屈服阶段;加载到578.3 kN时,到达承载能力极限荷载,梁体出现适筋梁破坏特征。

加固梁在0~625.0 kN加载过程中,荷载-挠度曲线线性相关性明显,梁体处于弹性变形阶段,实测最大弹性挠度为43.29 mm;加载到625.0 kN时,荷载-挠度曲线出现反弯点,说明梁体进入屈服阶段;加载到726.7 kN时,到达承载能力极限荷载,梁体出现适筋梁破坏特征,同时能听到明显的劈裂声,钢丝绳与聚合物砂浆脱粘。

未加固梁屈服荷载为569.4 kN,加固梁屈服荷载为625.0 kN,加固梁较未加固梁屈服荷载增大

9.76%;未加固梁极限荷载为578.3 kN,加固梁极限荷载为726.7 kN,加固梁较未加固梁极限荷载增大25.66%。

5.2 跨中裂缝对比分析

未加固梁与加固梁在加载过程中受弯区梁腹板均出现了首条裂缝(定义为1#裂缝),在后续加载过程中选取该裂缝作为监测对象,监测裂缝宽度随荷载的变化情况。未加固梁与加固梁的荷载-裂缝宽度曲线对比见图5。

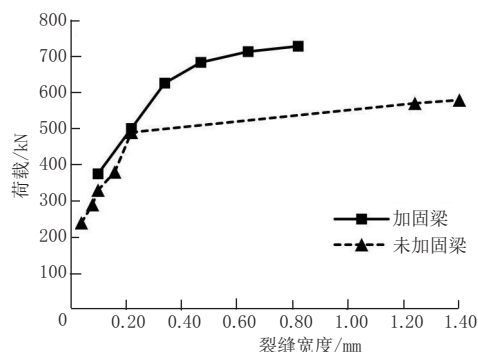


图5 荷载-裂缝宽度曲线

由于未加固梁切断预应力钢丝绳削弱了附近截面,未加固梁在加载到240.0 kN时,T梁腹板切断预应力钢丝绳处附近出现1#裂缝,宽度为0.04 mm;在裂缝出齐之前,荷载-裂缝宽度曲线出现3次小拐点,说明1#裂缝邻近出现新的裂缝或与其邻近的裂缝宽度有所增加,其裂缝宽度可能不随外荷载的增加而增加;后续增加的裂缝主要出现在削弱截面附近,且裂缝宽度较大。由于剪力区增设了U型钢板,抗剪承载能力较大,剪力区仅出现1条斜向裂缝。1#裂缝位置及卸载后裂缝分布情况见图6、图7。

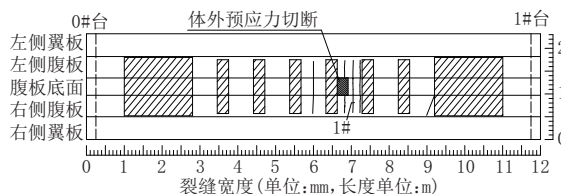


图6 未加固梁破坏后裂缝分布情况



图7 未加固梁受弯区腹板两侧裂缝

在加固梁加载过程中选取1#裂缝作为监测对象,裂缝监测位置及卸载后裂缝分布情况见图8、图9。由于剪力区增设了钢板,抗剪承载能力增加,受

剪区裂缝较少;受弯区裂缝分布表现出适筋梁的破坏特征。

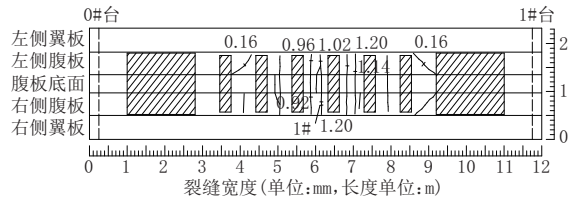


图 8 加固梁破坏后裂缝分布情况



图 9 加固梁受弯区腹板两侧裂缝

加固梁在 0~250.0 kN 加载过程中受弯区未出现受力裂缝;当加载到 375.0 kN 时受弯区出现 1#裂缝,宽度为 0.10 mm;在 375.0~625.0 kN 加载过程中,荷载-裂缝宽度关系曲线基本呈线性关系变化,说明从裂缝出现到增加至 0.34 mm 时,梁体仍处于弹性工作阶段;当加载到 625.0 kN 时,荷载-裂缝宽度关系曲线出现拐点,裂缝宽度迅速增加,而荷载增加缓慢,说明梁体已到达屈服阶段。

5.3 跨中应变对比分析

未加固梁的腹板下侧应变计粘贴在混凝土表面,加固梁的腹板下侧应变计粘贴在聚合物砂浆表面,在加载过程中监测梁截面应变变化,直到应变计读数突变停止监测。图 10、图 11 分别为未加固梁和加固梁的跨中正截面混凝土(聚合物砂浆)应变沿截面高度分布图。

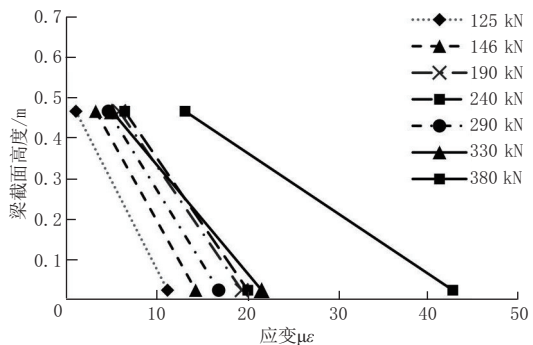


图 10 未加固梁跨中梁截面应变分布图

从图中可以看出,未加固梁在 0~380 kN 加载、加固梁在 0~625 kN 加载过程中梁截面应变表现出明显的线性变化趋势,表明在加载过程中试件基本符合平截面假定。

5.4 试验结果汇总分析

试验结果汇总见表 2,其中 $P_{0.2\text{ mm}}$ 表示首条裂缝

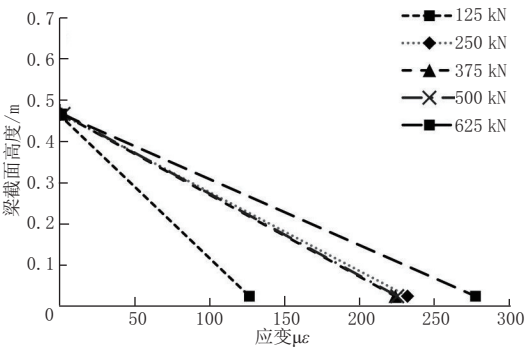


图 11 加固梁跨中梁截面应变分布图

宽度为 0.2 mm 时的承载力值, $P_{l/600}$ 表示跨中挠度为 $l/600$ 时的承载力值,其中 l 为梁支座中心线之间的间距,即 11.5 m。

表 2 试验结果汇总对比

类 目	荷载类别	未加固梁	加固梁	提高程度/%
荷载-挠度曲线	屈服荷载/kN	569.4	625.0	9.76
	极限荷载/kN	578.3	726.7	25.66
荷载-裂缝宽度曲线	开裂荷载/kN	240.0	250.0	4.17
	屈服荷载/kN	489.3	625.0	27.73
	极限荷载/kN	578.3	726.7	25.66
	$P_{0.2\text{ mm}}$ /kN	452.8	479.2	5.82
梁截面应变沿梁高度分布	屈服荷载/kN	380.0	625.0	64.47
规范允许的最大挠度荷载	$P_{l/600}$ /kN	309.4	283.6	-8.35

从表 2 可以得出,对于加固梁,在不同的关系曲线中屈服荷载相同,说明梁在这一荷载水平下的挠度、裂缝宽度以及应变分布同时达到临界状态,预应力钢丝绳和原混凝土梁能够保持协调变形,充分发挥了不同材料的优势;对于未加固梁,首先是受弯区混凝土先出现微小裂缝,然后梁截面进入非线性阶段,局部钢筋出现塑性铰,钢筋开始屈服,最后是整个梁进入屈服阶段。

从挠度和裂缝方面对比,加固梁较未加固梁的极限荷载增大 25.66%;加固梁较未加固梁的开裂荷载增加了 4.17%, $P_{0.2\text{ mm}}$ 增加了 5.82%,说明运营 10 a 后,加固梁的抗裂能力已退化至和未加固梁差不多的水平;我国规范允许的最大挠度为 $l/600$ ^[32],在达到该挠度时,加固梁和未加固梁均处于弹性阶段,但加固梁较未加固梁承受的荷载值减少了 8.35%,可能是由于旧梁内部存在不可见的损伤,导致刚度降低。

6 结 语

该桥采用预应力钢丝绳加固是为了提高桥梁承载能力,通过表 1 可知,加固后的梁体刚度提高了 12.51%~24.00%,预应力钢丝绳加固方法设计合理,

充分发挥了不同材料的优势,加固后能明显提高梁体刚度和承载能力,但是加固梁在运营10余年后,梁体的刚度下降至和未加固梁差不多的水平,说明该加固方法提供的刚度已全部失效。

由于该桥已运营30余年,加固后承载能力提高明显,可排除锚具变形和预应力钢丝绳回缩、收缩和徐变引起的预应力损失,而加固施工一般在春、夏季节施工,温差损失通常较小,可忽略不计,因此刚度降低的主要原因为预应力钢丝绳的应力松弛,随着时间的推移,钢丝绳内部的应力会逐渐降低,早期提供的刚度会逐渐消失。钢丝绳的应力松弛是一个复杂的问题,需要在设计、材料选择、施工和维护等多个方面进行综合考虑。通过合理的设计和有效的管理,可以在一定程度上减小预应力钢丝绳的应力松弛现象,确保结构的安全性和耐久性。

参考文献:

- [1] JTG/T J22—2008,公路桥梁加固设计规范[S].
- [2] GB 50367—2013,混凝土结构加固设计规范[S].
- [3] GB 50702—2011,砌体结构加固设计规范[S].
- [4] GB 55021—2021,既有建筑鉴定与加固通用规范[S].
- [5] GB 51367—2019,钢结构加固设计标准[S].
- [6] 程雪原,万胜武.二次受压下预应力钢绞线加固RC梁抗弯性能分析[J].黑龙江工业学院学报,2022,22(6):47-51.
- [7] 张阳,秦筵越,刘颖峰,等.预应力钢丝绳-UHCP复合加固损伤RC梁抗弯性能试验研究[J].公路工程,2023,48(2):1-6.
- [8] 张阳,徐朔,姚学昌.预应力高强软钢丝加聚合物砂浆抗弯加固性能试验与理论分析[J].中国公路学报,2017,30(6):239-248.
- [9] 柳战强,叶勇,郭子雄,等.预应力钢丝绳-聚合物砂浆面层抗弯加固持荷RC梁数值分析及承载力计算[J].华侨大学学报(自然科学版),2021,42(3):281-288.
- [10] 张鹏飞.复合砂浆预应力钢丝绳抗弯加固的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [11] 柳战强,郭子雄,叶勇,等.一种梁受弯加固的钢丝绳预应力张拉控制试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(2):341-348.
- [12] 季长征,田海飞,成勃,等.钢丝绳网片外加聚合物砂浆面层加固RC梁受弯试验研究[J].建筑技术,2024,55(10):1262-1265.
- [13] Obaydullah M, Jumaat M Z, Alengaram U J, et al. Prestressing of NSM steel strands to enhance the structural performance of prestressed concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2016(129): 289-301.
- [14] 廖维张,刘锴鑫,张春磊,等.高强钢丝绳网片-聚合物砂浆加固RC板抗爆性能试验研究[J].振动与冲击,2021,40(2):235-242.
- [15] 黄群贤,郭子雄,姚秋来,等.钢绞线网片-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究及破坏机理分析[J].建筑结构学报,2019,40(12):78-87.
- [16] 汪小鹏,封明明,张国强,等.预张紧钢丝绳网片-聚合物砂浆加固混凝土梁研究[J].公路,2016,61(12):105-114.
- [17] 封明明,汪小鹏.预张紧钢丝绳网片加固混凝土梁钢丝绳应力损失研究[J].山东交通科技,2020(2):13-14;40.
- [18] 危晓丽,宁海永,卢海波.预张紧钢丝绳网片-聚合物砂浆外加固技术在工程中的应用[J].建筑结构,2010,40(增刊2):648-650.
- [19] 阮爱兵.钢丝绳(钢绞线)网片-聚合物砂浆外加固工法应用现状[J].福州大学学报(自然科学版),2013,41(4):463-470.
- [20] 柳战强,黄群贤,郭子雄,等.PHSW-PM加固RC桥梁受弯疲劳性能试验[J].中国公路学报,2018,31(11):102-112.
- [21] YUAN Fang, CHEN Mengcheng, PAN Jinlong. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with high-strength steel wire and engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2020(254): 119284.
- [22] 肖秋羽.新型预应力高强钢丝绳加固RC桥梁抗弯性能试验研究[D].泉州:华侨大学,2018.
- [23] 张可心.聚氨酯水泥预应力钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土T梁研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2018.
- [24] 康瑾,陈顺超,董春彦,等.预应力高强钢丝绳加固桥梁效果分析[J].河南科技,2022,790(20):54-57.
- [25] 聂建国,陶巍,张天申.预应力高强不锈钢绞线网-高性能砂浆抗弯加固试验研究[J].土木工程学报,2007,40(8):1-7.
- [26] 吴刚,蒋剑彪,吴智深,等.预应力高强钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土梁的试验研究[J].土木工程学报,2007,40(12):17-27.
- [27] 吴刚,吴智深,魏洋,等.预应力高强钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土梁的理论分析[J].土木工程学报,2007,40(12):28-37.
- [28] 吴刚,魏洋,吴智深,等.常用加固方法的比较以及预应力高强钢丝绳加固(P-SWR)新技术的优势[J].建筑结构,2007,37(增刊1):305-308.
- [29] 张得意.高强钢丝绳聚合物砂浆加固技术在中山三桥加固工程中的应用[J].工程技术研究,2021,6(11):34-35.
- [30] 罗向荣.高强钢丝绳聚合物砂浆加固桥梁设计施工研究[J].山西建筑,2012,38(9):190-191.
- [31] 崔毅.预应力钢丝绳与外贴FRP布组合加固混凝土结构及其工程应用.交通世界,2020(17):106-109.
- [32] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].