

预应力混凝土 T 梁足尺模型抗弯加固后效果试验

邓旭东¹, 董谷远航², 林帆², 冉志红², 宋泽冈¹

(1. 云南省公路科学技术研究院, 昆明 650051; 2. 云南大学建筑与规划学院, 昆明 650500)

摘要: 为研究常见加固方式对预应力混凝土 T 梁足尺模型的加固效果, 依托换梁工程, 以更换下来的病害 T 梁作为试验研究对象, 使用常用加固方法中的预应力碳纤维板加固、粘贴钢板加固、封缝加固以及体外预应力钢束加固并验证加固效果, 对挠度、钢筋应变、裂缝发展情况进行分析。试验结果表明, 相较于未加固梁, 体外预应力钢束加固效果最突出, 开裂荷载提升 136%, 屈服荷载提升 84%, 极限荷载提升 37%, 并且原裂缝基本闭合。由此表明, 预应力碳纤维板加固、粘贴钢板加固、体外预应力钢束加固对梁体刚度提升、延缓原裂缝发展、抑制新裂缝产生、承载能力提升等都有较好的效果, 而体外预应力钢束加固各方面提升效果最明显。

关键词: 桥梁加固; 静载试验; 足尺模型; 加固效果; 抗弯性能

中图分类号: U442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0176-08

随着新桥的不断建设, 数量越来越多的同时, 旧桥的处置也显得尤为重要。随着时间的推移, 旧桥可能因为自然环境的影响导致材料老化变质、承载能力降低, 早期的设计考虑不足导致的人为过失造成桥梁功能的缺陷, 同时长期的运营会使桥梁出现各种损伤, 此外还有火灾、地震等自然灾害。这些情况使桥梁存在潜在的安全隐患。

王国林等^[1]对超高性能混凝土预制板加固足尺钢筋混凝土梁的抗剪性能的研究表明, 试验梁均发生受剪破坏, 但加固梁的承载力、刚度和延性均明显提高; 王敏容^[2]针对粘贴钢板加固钢筋混凝土受弯构件建立了正截面极限承载力计算公式; 王鹏等^[3]对钢筋混凝土简支 T 梁采用梁底粘贴钢板、梁顶增设铺装层加固措施后桥梁的承载性能进行了试验分析; 付治强^[4]基于现场静力荷载试验, 研究了通过粘贴钢板加固的普通公路桥梁上部混凝土空心板梁在加载过程中梁底挠度、裂缝和承载力的变化, 并利用有限元数值分析方法进行了数值模拟; 接金亮^[5]等通过两种粘贴钢板法对预应力混凝土 T 梁进行了试验研究并简化了规范中的计算公式; 赵彤等^[6]对碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪承载力的影响和作用做了试验分析; 张继文和吕志涛^[7]通

过对 10 片简支梁进行体外预应力加固试验, 研究梁的正截面抗弯、斜截面抗剪的加固效果; 王永宝等^[8]为研究体外预应力加固对预应力混凝土梁抗弯刚度和中性轴变化规律的影响, 设计并制作了 2 片预应力混凝土静载试验梁, 分析了其中性轴和刚度变化规律, 并与规范公式进行对比, 最后提出了刚度计算公式; 苗建宝等^[9]制作了 6 片长 4.4 m 的预应力混凝土简支梁进行荷载试验, 研究不同加固方式和体外预应力钢束有效高度对延性的影响; 颜鹏飞^[10]针对 50 m 预应力混凝土 T 梁桥腹板出现大量竖向、斜向结构性受力裂缝, 提出采用折线型体外预应力加固方法, 对桥梁加固前后进行加载试验对比分析; 田园^[11]对体外预应力加固进行综合分析, 研究加固后桥梁承载能力的提升来验证加固效果; 李兆熊^[12]发现现有的加固主要是聚焦于梁体的受拉一侧, 在此发现的基础上提出双侧加固的方法并进行抗弯承载力研究; 袁博等^[13]对足尺预应力混凝土 T 梁桥的体外预应力加固效果进行了试验分析, 试验结果显示体外预应力加固效果良好; 李阳^[14]针对碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymers/plastics, CFRP)预应力板加固的桥梁验证加固效果, 为桥梁加固方案和静载试验提

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 云南省交通运输厅科技创新示范项目(2022-48)

作者简介: 邓旭东(1977—), 男, 云南镇雄人, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为桥梁检测、设计、监控、承载能力评定; 通信作者董谷远航(1999—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为桥梁工程; 林帆(1984—), 男, 云南昆明人, 博士, 讲师, 研究方向为桥梁加固; 冉志红(1978—), 男, 四川营山人, 博士, 副教授, 研究方向为桥梁工程监测与评估; 宋泽冈(1982—), 男, 安徽宿松人, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为桥梁结构监测及智慧养护。

供工程参考;许锋等^[15]发现通过体外预应力 CFRP 筋加固对混凝土梁受弯承载力、整体刚度和极限变形能力,限制裂缝发展有较大提升并建立了体外预应力 CFRP 筋加固 T 形截面混凝土梁受弯承载力计算公式;胡承泽和宋重阳^[16]结合有限元计算与静载试验,证实采取体外预应力主动加固后可提高结构强度、刚度和抗裂性;郑永瑞等^[17]对在役 40 m 预制 T 梁进行破坏性试验,研究 T 梁体外预应力钢束加固效果,为体外预应力加固方法的 T 梁承载能力评估及使用过程中病害控制提供了借鉴。

通过以上研究发现,桥梁加固后承载能力方向的研究通常有两个方向的试验对象:第 1 类试验对象是在实验室中制作缩尺试验梁,此类试验梁健康情况是处于相对理想的状态,而现实中服役的桥梁,经过长时间的运营,会出现诸如预应力损失、混凝土开裂等情况,这类试验梁与实际服役桥梁健康状况存在着不小的差距。同时,尺寸效应对试验效果也会产生影响^[18],缩尺模型与实际加固工程可能存在不小的误差。第 2 类试验对象是足尺试验梁,大多数以实际服役或退役桥梁作为试验对象,此类足尺试验梁更加贴近实际情况,减小了尺寸效应引起的误差,但是此类足尺试验梁非常难得,故以此类足尺试验梁作为试验对象的研究相对较少,有较大的研究空间。

本文以换梁工程中拆卸下来的病害预应力混凝土 20 m T 梁足尺模型为研究对象,更加贴合实际桥梁加固工程情况,减小尺寸效应产生的误差,使用常见主动与被动加固方式加固梁与未加固梁进行静载破坏对比试验,分析各加固方式的加固效果,为实际桥梁加固工程提供参考。

1 试验梁简介

试验梁为云南省某公路在服役期间产生竖向裂缝的 20 m 装配式预应力混凝土 T 梁,因换梁工程,将其切割下来作为试验对象。试验梁总宽为 2.5 m,梁高 1.4 m。试验梁材料为 C45 混凝土;普通钢筋为 HRB335 和 HPB235;共配 3 束钢绞线,1 束 N1,2 束 N2,其中 N1 束采用 5 ϕ 15.2 的钢绞线、N2 采用 3 ϕ 15.2 的钢绞线,控制应力为 1 395 MPa。预应力钢筋布置情况如表 1 和图 1 所示,普通钢筋布置如图 2 所示,材料特性见表 2、表 3。所选用的梁均为连续梁中跨的中梁。各梁在试验之前因为长期服役的各种原因已经出现了裂缝,各梁初始裂缝分布如图 3 所示。

表 1 试验梁钢束配置详情

T 梁类型	钢束编号	钢束规格	钢束数量/束
20 m 试验梁	N1	5 ϕ 15.2	1
	N2	3 ϕ 15.2	2

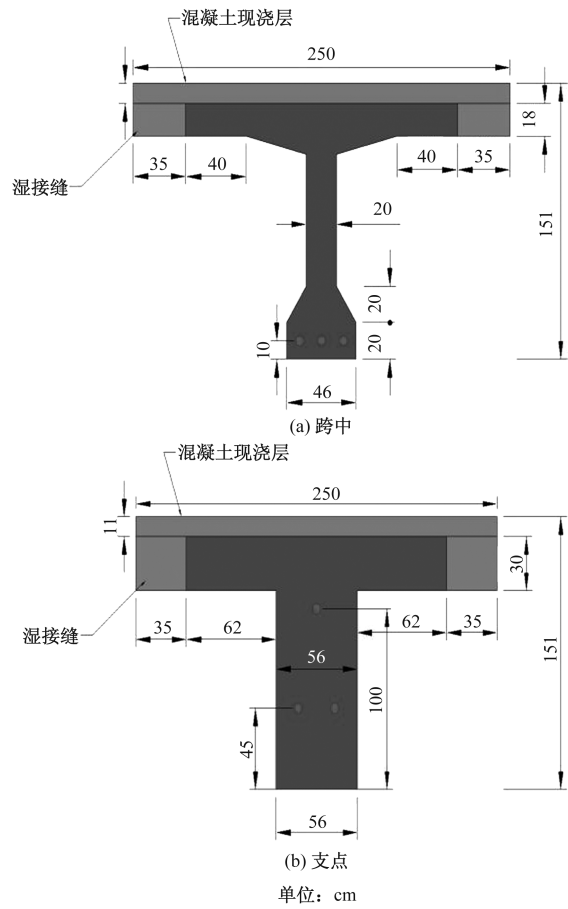


图 1 跨中、支点截面预应力钢束布置

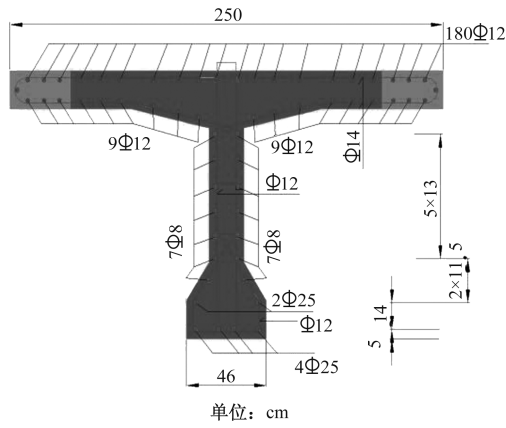
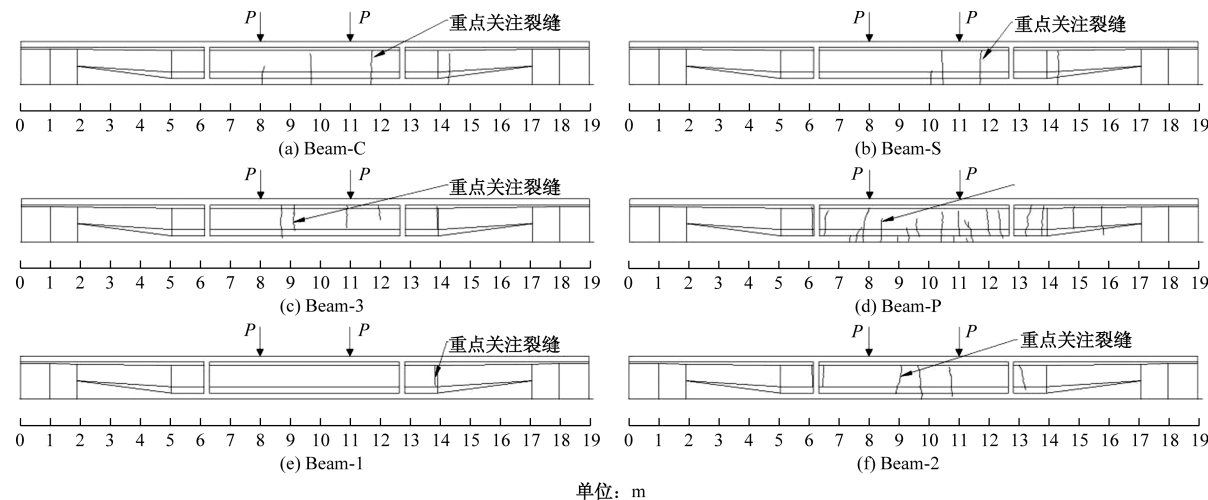


图 2 跨中截面普通钢筋布置

表 2 试验梁混凝土材料特性

混凝土材料	轴心抗压强度设计值/MPa	轴心抗压强度标准值/MPa	轴心抗拉强度设计值/MPa	轴心抗拉强度标准值/MPa	弹性模量/MPa
C45	20.5	29.6	1.74	2.51	3.35×10^4



P 为荷载; Beam-C、Beam-S、Beam-3、Beam-P、Beam-1、Beam-2 为梁的编号

图 3 各试验梁初始裂缝分布

表 3 试验梁钢筋材料特性

材料	抗拉强度标准值/MPa	抗拉强度设计值/MPa	弹性模量/MPa
预应力钢绞线	1 860	1 260	1.95×10^5
HRB335 钢筋	335	280	2.0×10^5

2 试验简介

2.1 加载方法

如图 4 所示,本次破坏性静载试验方法为四点弯曲试验,采用千斤顶结合反力架进行原位加载。加载的分级方法以现行规范中不同极限状态为依据,并结合梁的特征荷载进行分级,加载分级见表 4,共分为 8 级。



图 4 单梁加载现场

2.2 测点布设

所有投入的仪器设备按照规定已定期进行检定校验,以保证测试数据的准确性。主要投入试验仪器见表 5。

应变测试截面为 T 梁一端腹板厚度变化截面、 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ (L 为两个支点之间的距离)截面;挠度测试截面为 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 截面及两个支点截面。

表 4 加载分级

T 梁种类	加载水平	荷载分级	每个千斤顶力值/kN
20 m 中跨中梁	消压弯矩	1	30.0
	长期效应组合	2	53.3
	短期效应组合	3	75.6
	常规静载试验	4	88.3
	开裂弯矩	5	104.9
	基本组合	6	208.5
	计算抗力	7	281.9
	破坏弯矩	8	413.5

表 5 试验仪器

设备名称	设备型号
无线静态应变采集器	DH3819
无线动态应变采集器	DH5908
LVDT 位移传感器	SDVB20
表面智能数码弦式应变计	JMZX-212HAT
百分表	107-SWA
气温计	WS-2000
电阻应变片	BX120-100AA
钢钢尺	普通钢钢尺

每个截面上的测点布置及编号如图 5 和图 6 所示。其中,1#、2# 测点为钢筋测点,其余为混凝土测点。因为篇幅有限,本文后述试验结果仅对 $L/2$ 截面进行考察。

加载过程会伴有裂缝的新增与裂缝宽度的增长,T 梁腹板裂缝总体沿纵向分散布置,远离加载点的分散裂缝缝宽增加相对趋势较缓,而加载点附近应力集中,该处典型裂缝长度与宽度会随着试验荷载的增大而快速增长。对分散裂缝,每级荷载稳定后,采用裂缝综合测试仪进行测量;对加载点附近典型较宽或过程中缝宽发展剧烈的裂缝,采用

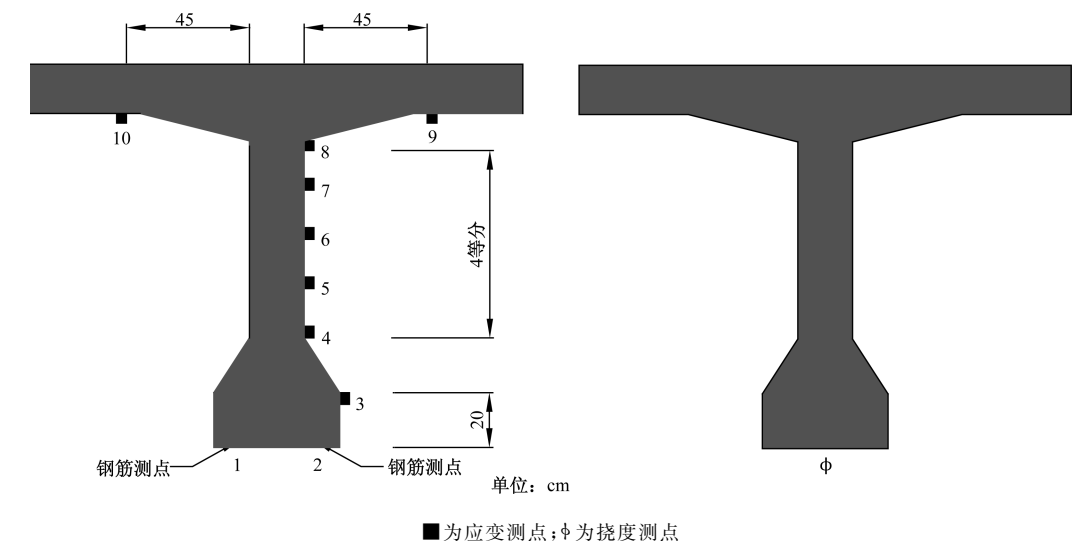


图 5 应变测点布置图以及数字图像位移传感器测点布置

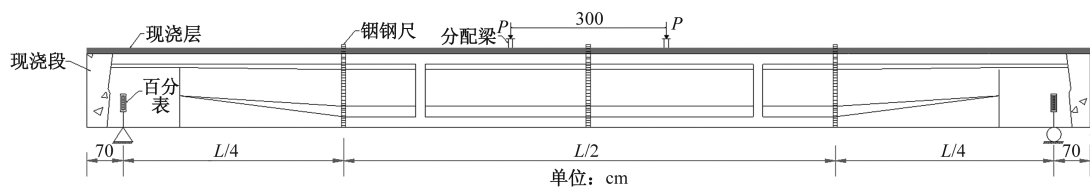


图 6 纵向布置

LVDT 位移传感器实时观测缝宽变化,该设备分辨率达 $0.01\text{ }\mu\text{m}$,可满足试验需要。传感器监测布设如图 7 所示。

2.3 试验梁加固方案

试验共选取 6 片主梁作为试验对象,梁的编号及对应加固方式见表 6,其中 Beam-1 和 Beam-2 为 2 片未加固对照梁。

加固材料参数见表 7。其中,此次研究针对的是梁抗弯性能,表中所示加固范围均以梁 $L/2$ 作为基准,两端对称布置加固。Beam-C 梁使用 A 级胶粘贴预应力碳纤维板,共粘贴 5 块,分别是腹板 2 块、马蹄 2 块、梁底 1 块,采用单端进行张拉,张拉控制应力取 $0.37f_{pk}$ (f_{pk} 为预应力钢筋的强度标准值);Beam-S 梁使用 A 级胶粘贴钢板,共粘贴 7 块,分别是腹板 4 块、马蹄 2 块、梁底 1 块,使其紧贴主梁,在相应的位置钻直径为 11 mm 的螺栓孔,从孔底开始注射高强环氧锚固胶,之后安装种植螺栓;Beam-3 梁通过封闭注胶加固;Beam-P 梁体外预应力钢束 2 根,在梁端腹板左右侧植筋浇筑混凝土锚块,在设计位置增设钢制转向块及减震器,体外预应力钢绞线在梁端竖向弯起,钢束采取两端同时张拉,张拉控制应力取 $0.46f_{pk}$ 。加固现场如图 8 所示。

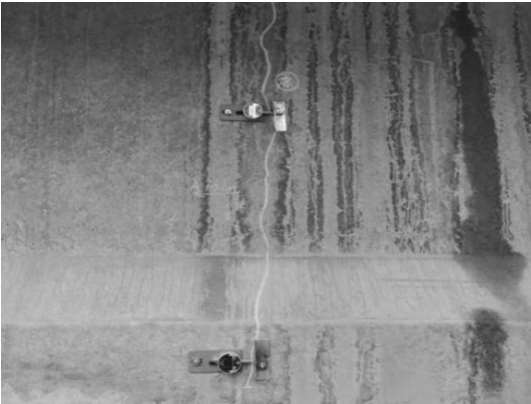


图 7 裂缝监测传感器布设现场

表 6 试验梁加固方式

梁	加固方式
Beam-C	预应力碳板加固
Beam-S	钢板加固
Beam-3	封缝加固
Beam-P	体外预应力钢束加固(弯拉)
Beam-1	未加固
Beam-2	未加固

3 试验结果

3.1 破坏形态

3.1.1 开裂荷载与屈服荷载

如图 9 所示,各梁荷载-挠度曲线出现了 2 个拐点,第 1 个拐点对应的是开裂荷载,第 2 个拐点对应

表 7 加固材料参数

梁	加固材料	数量/(块·根 ⁻¹)	总横截面积/mm ²	加固范围/m	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa
Beam-C	腹板预应力碳纤维板	2	200×2	14.71×2	1.60×10 ⁵	2.40×10 ³
	马蹄预应力碳纤维板	2	100×2	14.71×2		
	梁底预应力碳纤维板	1	200	16.11		
Beam-S	梁底钢板	1	1 200	16.32	2.06×10 ⁵	2.80×10 ²
	马蹄钢板	2	800×2	16.32		
	腹板钢板	4	600×4	6.30		
Beam-P	预应力钢束	2	420×2	18.94	1.95×10 ⁵	1.86×10 ³

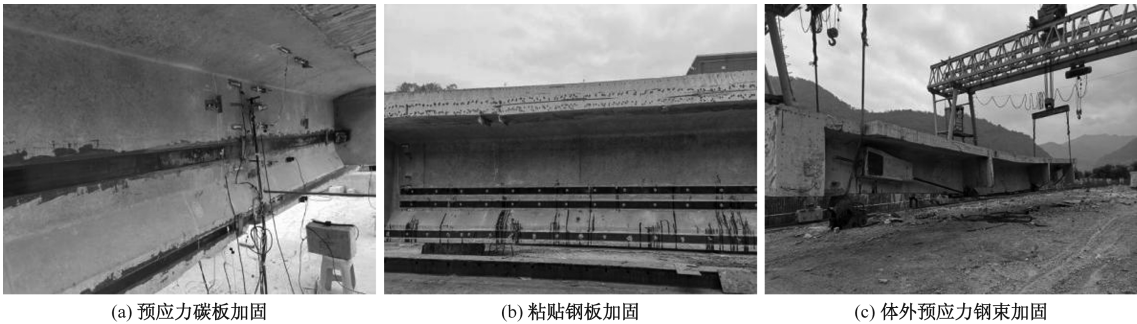


图 8 加固现场

的是屈服荷载。随着裂缝的出现以及钢筋的屈服，各梁荷载-挠度曲线斜率增加，梁体挠度增大。

图 10 中显示了梁底钢筋应变与荷载的关系，图 10 中钢筋达到屈服时的荷载与图 9 中第 2 个拐点对应荷载基本一致。

基于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018) 第 6.5.2 条^[19] 以及《预应力碳纤维布加固混凝土结构技术》^[20] 推导各梁开裂荷载以及屈服荷载理论值并与试验值对比见表 8、表 9。由表 8、表 9 可知，试验得到的开裂荷载比理论值偏小，而屈服荷载比理论值略偏大。表 10 列出了试验得到的开裂荷载和屈服荷载与未加固梁的比较。从表 10 中可以看到，各种加固方法均能有效地提高梁的开裂荷载，而对于提高梁的屈服荷

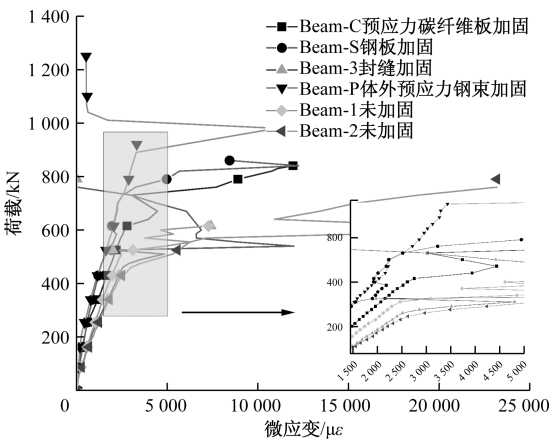


图 10 加固后梁底钢筋荷载-微应变曲线

表 8 开裂荷载试验与理论值对比

梁	试验开裂荷载/kN	理论开裂荷载(标准值)/kN	理论开裂荷载/试验开裂荷载
Beam-C	225	230	1.02
Beam-S	148	165	1.11
Beam-3	135	151	1.12
Beam-P	192	217	1.13

表 9 屈服荷载试验与理论值对比

梁	试验屈服荷载/kN	理论屈服荷载(标准值)/kN	理论屈服荷载/试验屈服荷载
Beam-C	600	588	0.98
Beam-S	780	767	0.98
Beam-3	460	480	1.04
Beam-P	950	900	0.95

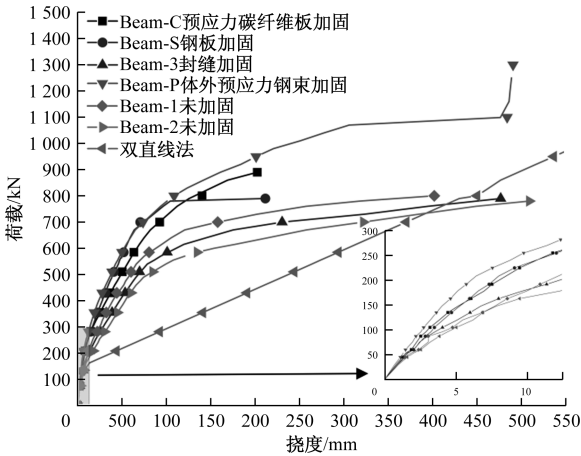


图 9 加固后梁荷载-挠度曲线

表 10 开裂荷载与屈服荷载对比未加固梁提高率

梁	试验开裂荷载相较未加固梁提高率/%	试验屈服荷载相较未加固梁提高率/%
Beam-C	176	17
Beam-S	82	51
Beam-3	66	-11
Beam-P	136	84

载作用相对较小,其中 Beam-3 封闭裂缝加固几乎不能提高梁的屈服荷载。

3.1.2 极限荷载

Beam-C 预应力碳板加固梁加载至 730 kN 时跨中腹板碳板胶在两侧加载横梁下方拉裂,860 kN 时碳板胶与梁体局部脱空、开裂,继续加载过程中(大概 870 kN)梁底碳板率先断裂,随后马蹄右侧碳板断裂,此时以碳板断裂时荷载作为 Beam-C 梁极限荷载。Beam-S 钢板加固梁加载至 585 kN 时马蹄侧面钢板胶从 $L/4$ 及跨中位置焊缝位置开始逐渐向两侧脱空,600 kN 时马蹄左侧钢板焊缝处断裂,随后补焊继续试验,加载至 780~790 kN 过程中马蹄左侧钢板跨中焊缝搭接板局部拉裂,腹板下钢板突然脱裂,腹板钢板破坏状态为锚固膨胀螺栓剪断,加载至 800 kN 卸载后梁底钢板在 $L/2$ 往 B 端 1.3 m 处屈服,此时荷载作为 Beam-S 梁极限荷载。Beam-3 封缝加固梁加载至 460 kN 时梁底钢筋应变突增,钢筋进入塑性阶段,加载至 525 kN 时钢筋应变再次突增,梁底钢筋屈服,加载至 790 kN 时梁体挠度已经达到 48.6 cm,并且加载支架不断传来异响,从安全考虑停止加载,并以此荷载作为 Beam-3 梁极限荷载(实际破坏荷载应大于 790 kN)。Beam-P 体外钢束(弯拉)加固加载至 1 070~1 100 kN 时挠度突然大幅度增加至 48.4 cm,以此作为 Beam-P 梁极限荷载。各梁试验极限荷载及理论计算结果如表 11,并列出了加固梁与未加固梁(Beam-1 及 Beam-2 平均值)的极限荷载比值以及实验值与理论值的比值。由表 11 可知,预应力碳板及体外预应力钢束加固能够提高梁的极限承载能力,同时各试验值与各理论值均能较好吻合。

表 11 极限荷载试验与理论值、未加固梁对比

梁	试验极限荷载/kN	理论极限荷载/kN	试验极限荷载相较未加固梁提高率/%	理论极限荷载/试验极限荷载
Beam-C	870	928	12	1.07
Beam-S	800	836	3	1.05
Beam-3	790	822	1	1.04
Beam-P	1 070	1 124	37	1.05

结合以上分析可以知道,从承载能力极限状态的提升角度来看,除了 Beam-3 封缝加固的梁提升效果微乎其微,其余 3 种加固方式对梁体都有不错的提升效果。其中,Beam-P 体外预应力钢束加固方式相较于其余加固方式来说,对梁体承载能力极限状态提升效果最突出,屈服荷载提高 84%,极限荷载提高了 37%。同时屈服荷载、极限荷载理论值与实验值比值误差最大为 7%,最小为 2%,说明理论计算结果与试验数据吻合良好。

3.2 刚度的加固效果比较

各种加固方式常规静载试验阶段加固前后荷载-挠度曲线如图 11 所示。图 11 中同时列出了按规范公式计算的未开裂及开裂梁的理论计算结果。由于此次试验利用了已开裂的病害桥梁作为试验对象,各梁加固前均已开裂,并在开裂前进行了加载到了此次试验的 4 级荷载。如图 11 所示,除 Beam-3 封缝加固外,其余加固方法均能有效提高梁的刚度。Beam-C、Beam-S 以及 Beam-P 加固前梁的刚度与未加固的对比梁 Beam-1 及 Beam-2 相比刚度偏小,原因应该是试验对象加固梁的开裂程度不一致所导致的。从图 11 中可以看出,除 Beam-3 外,其余梁在加固后均能较有效地提高刚度,起到了降低荷载作用下挠度的加固效果。并且从图中可以看出,理论计算的“开裂后梁”挠度过低地评价了梁的挠度,而加固后梁由于有效限制了裂缝,均能达到“未开裂梁”的理论计算刚度水平。

3.3 裂缝封闭效果

各梁在试验之前因为长期服役的各种原因已经出现了裂缝,各梁初始裂缝分布如图 3 所示。裂缝发展以及对各梁梁底最明显的主裂缝在承载能力极限状态基本组合作用(208.5 kN)、结构构件的抗力设计值 R (281.9 kN)荷载作用下马蹄处的缝宽进行分析,结果见表 12、表 13。

因为测量仪器测量精度的原因,裂缝宽度小于 0.02 mm 时无法确定具体数值,故表 12、表 13 中用 <0.02 来表示。因为篇幅所限,表 12、表 13 当中裂缝均取自各梁发展最为明显的一条主裂缝进行分析。

经过预应力碳纤维板加固以及体外预应力钢束加固的 Beam-C、Beam-P 梁在加固后原裂缝均闭合,这说明主动加固方式对病害裂缝 T 梁有极好的修复作用,通过对裂缝的有效修复,使得原本退出工作的受拉区边缘混凝土在预应力的作用下重新变成有效截面。通过表 13 发现,主动加固方式不仅

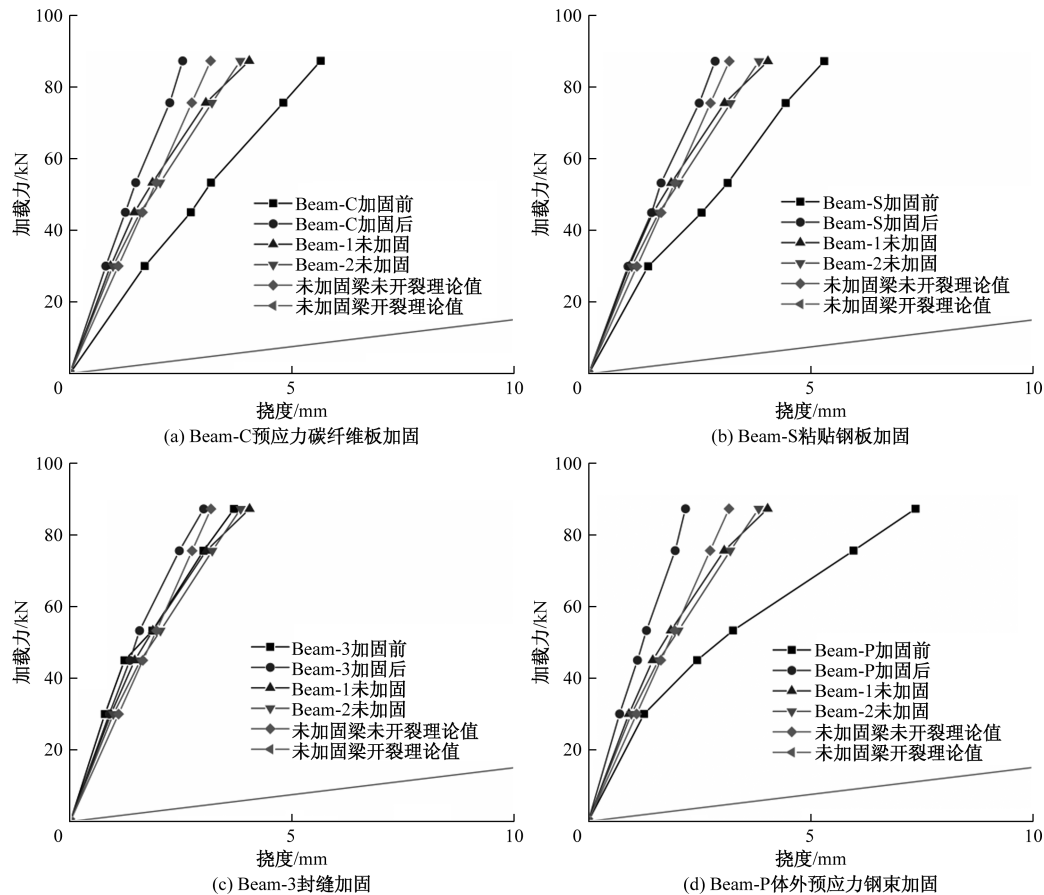


图 11 预加载阶段荷载-挠度曲线

表 12 原裂缝发展情况

梁	原裂缝 发展时 荷载/kN	原裂缝 初始缝 宽/mm	承载能力极限 状态基本组 合缝宽/mm	正截面抗弯 承载力设计 值缝宽/mm
Beam-C	135.0	<0.02	0.12	0.21
Beam-S	104.9	<0.02	0.10	0.15
Beam-3	96.0	0	0.26	0.31
Beam-P	192.0	<0.02	0.03	0.14
Beam-1	45.0	<0.02	0.14	0.19
Beam-2	30.0	<0.02	0.24	0.31

表 13 新裂缝发展情况

梁	新裂缝 产生时 荷载/kN	新裂缝 产生时 缝宽/mm	承载能力极限 状态基本组 合缝宽/mm	正截面抗弯 承载力设计 值缝宽/mm
Beam-C	225.0	<0.02	<0.02	0.14
Beam-S	148.0	<0.02	<0.02	0.09
Beam-3	135.0	0.03	0.10	0.14
Beam-P	192.0	<0.02	<0.02	<0.02
Beam-1	88.3	<0.02	0.10	0.17
Beam-2	75.6	0.03	0.10	0.26

对裂缝有良好的修复作用,对抑制原裂缝发展有明显的作用,同时也延缓了新裂缝的产生。

作为被动加固方式的粘贴钢板加固并没有很

好地修复原裂缝,但是对抑制原裂缝发展具有明显的作用。

4 结论

(1)预应力碳板加固、粘贴钢板加固、体外预应力钢束加固对开裂荷载、屈服荷载、极限荷载都有不同水平提升。预应力碳板加固对开裂荷载提升最大,体外预应力加固对屈服荷载、极限荷载提升最明显;封缝加固对开裂荷载有小幅提升,对屈服荷载、极限荷载基本没有影响。

(2)预应力碳板加固、粘贴钢板加固、体外预应力钢束加固对桥梁刚度提升都有明显的效果。体外预应力加固方法加固效果最突出;封缝加固对梁体刚度基本没有影响。

(3)主动加固类型的粘贴预应力碳板加固以及体外预应力钢束加固对裂缝的封闭效果明显,被动加固类型的粘贴钢板加固对裂缝的封闭效果较差。

(4)理论计算结果与试验结果吻合良好。

参考文献

- [1] 王国林,张宇轩,杨家林,等.超高性能混凝土板加固足

- 尺钢筋混凝土梁抗剪性能[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2007-2014.
- [2] 王敏容. 考虑分阶段受力的粘贴钢板加固钢筋混凝土梁抗弯承载力计算[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 49-53.
- [3] 王鹏, 袁计红, 胡文华, 等. 钢筋混凝土简支 T 梁桥加固后承载性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 38-42.
- [4] 付治强. 普通公路桥梁混凝土空心板梁粘贴钢板加固效果分析[J]. 河北水利电力学院学报, 2018(2): 9-14.
- [5] 接金亮. 粘钢加固预应力混凝土 T 梁抗剪计算研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [6] 赵彤, 谢剑, 戴自强. 碳纤维布提高钢筋混凝土梁受剪承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2000(7): 21-25.
- [7] 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(9): 18-23, 30.
- [8] 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(S1): 2107-2113.
- [9] 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.
- [10] 颜鹏飞. 预应力混凝土 T 梁桥体外预应力加固与试验分析[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(5): 89-91.
- [11] 田园. T 梁体外预应力加固效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [12] 李兆熊. 混凝土 T 梁双侧加固的试验与理论研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [13] 袁博, 张小强, 张春雨, 等. 基于静载试验的 T 梁桥体外预应力加固效果评价[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2021, 38(3): 4-9, 18.
- [14] 李阳. 预应力 CFRP 板加固混凝土桥梁静力试验研究[J]. 结构工程师, 2023, 39(3): 135-140.
- [15] 许锋, 徐礼华, 丁健, 等. 体外预应力 CFRP 筋加固 T 形截面混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 43-50.
- [16] 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): 113-118.
- [17] 郑永瑞, 武俊彦, 许维炳, 等. 长周期在役 40 m 预制 T 梁体外预应力加固前后承载能力分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(6): 151-158.
- [18] 马立伟, 刘铮, 祝夏. 尺寸效应对碳纤维加固轴心受压柱的影响[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(23): 7218-7221.
- [19] 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] 杨勇新, 李庆伟. 预应力碳纤维布加固混凝土结构技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

Experimental on the Full-scale Model Bending Reinforcement Effect of Prestressed Concrete T-beams

DENG Xudong¹, DONG Guyuanhang², LIN Fan², RAN Zhihong², SONG Zegang¹

(1. Yunnan Science & Technology Research Institute of Highway, Kunming 650051, China;

2. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study the reinforcement effect of common reinforcement methods on full-scale models of prestressed concrete T-beams, relied on beam replacement engineering, and taking the replaced diseased T-beams as experimental research objects, common reinforcement methods including prestressed carbon fiber board reinforcement, steel plate bonding reinforcement, joint sealing reinforcement, and external prestressed steel tendon reinforcement were used to verify the reinforcement effect. The deflection, steel strain, and crack development were analyzed. The experimental results show that compared to unreinforced beams, the external prestressed steel strands have the most prominent reinforcement effect, with a 136% increase in cracking load, an 84% increase in yield load, and a 37% increase in ultimate load, and the original cracks are basically closed. This indicates that prestressed carbon plate reinforcement, bonded steel plate reinforcement, and external prestressed steel tendon reinforcement have good effects on improving the stiffness of the beam, delaying the development of original cracks, suppressing the generation of new cracks, and improving the bearing capacity. However, external prestressed steel tendon reinforcement has the most significant improvement effect in all aspects.

Keywords: bridge reinforcement; static load test; full scale model; reinforcement effect; bending resistance