

文章编号: 1674-599X(2021)02-0036-05

组合加固法在钢筋混凝土 T 型梁桥中的应用

肖勇刚, 熊晨

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对服役期 T 型梁桥的 T 梁抗弯承载能力的不足, 提出了采用增大截面和体外预应力相结合的一种新的组合加固方法。应用有限元方法进行仿真分析, 该组合加固方法与传统方法相比, 安全系数更高, 增强了桥梁横向联系, 解决了早期 T 型梁桥采用体外预应力加固时在承载能力极限状态下可能出现受压区高度偏大的问题。

关键词: 桥梁加固; 粘贴钢板加固法; 体外预应力加固法; 组合梁加固

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.006

Application of combination reinforcement method in reinforced concrete T-beam bridge

XIAO Yong-gang, XIONG Chen

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient flexural bearing capacity of T-beam of T-beam bridge in service, a new combined reinforcement method combining enlarging section with external prestressing was proposed. The finite element method was used for simulation analysis. Compared with the traditional method, the composite reinforcement method has satisfactory safety reserve coefficient, and the transverse connection of bridges is strengthened. It solves the problem that the high-pressure area may be too large when the T-beam bridge is strengthened by external prestressing.

Key words: bridge reinforcement; sticking steel plate reinforcement; external prestressing reinforcement; composite beam reinforcement

在中国早期修建的钢筋混凝土桥梁中, 许多桥梁由于服役时间较长, 出现严重病害, 需要进行加固。桥梁加固一直被国内外众多学者所关注。王晓东^[1]等人研究了预应力混凝土 T 形钢构桥加固。牛斌^[2]等人通过体外预应力混凝土梁的弯曲试验, 研究分析了体外预应力梁的弯曲性能。柯敏勇^[3]等人基于粘贴钢板加固混凝土梁的试验, 研究了粘贴钢板对混凝土梁的加固效应。张宇^[4]等人研究分析了粘贴钢板加固钢筋混凝土 T 梁的可靠性。Yu^[5]等人通过对预应力碳纤维布加固的混凝土 T 梁进行抗弯试验研究, 得出了加固梁弯曲性能。李源^[6]等人提出了碳纤维布加固混凝土梁的受弯承载力的计算方法。李传习^[7]等人研究了高温对 CFRP 板/钢界面

力学性能的影响。聂建国^[8]等人提出了一种新的钢板-混凝土组合加固桥梁的方法。危春根^[9]等人研究了不同配筋形式对混凝土梁受弯性能的影响。作者依托实际工程对比早期桥梁加固, 拟提出一种新的组合加固方法, 并通过有限元方法进行仿真计算, 验证该方法的可行性。

1 组合加固原理

早期钢筋混凝土 T 型梁桥因翼缘板比较薄, 所以会出现桥梁承载能力储备不足的问题。出现该问题若没有较好方法进行及时加固, 若拆掉重建, 会消耗大量的资源, 施工期间会影响通行。因此, 作

收稿日期: 2019-12-25

作者简介: 肖勇刚(1964-), 男, 长沙理工大学教授。

者提出在梁底施加预应力碳纤维板(carbon fibre reinforced plastics, 简称为 CFRP)进行加固, 梁顶浇筑一层混凝土, 增加原 T 梁翼板厚度, 使新浇筑的混凝土层与原桥混凝土紧密结合, 增强桥梁横向联系, 并且在极限承载力状态下原梁仍为第一类截面, 提高加固效率和原梁承载力。组合梁正截面抗弯承载力计算的基本假定: ①加固梁极限状态下, 变形符合平截面假定; ②新旧混凝土结合面粘接牢靠, 无相对滑移; ③体外预应力与 T 梁粘接牢靠, 无相对滑移。

2 组合加固法在 T 梁桥中的应用

2.1 有限元模型建立

K99+850 平改立公跨铁立交桥于 1997 年 9 月 20 日开工, 于 1998 年 12 月 23 日竣工投入使用。该桥上部结构为 1×20 m 钢筋混凝土现浇 T 梁。T 梁梁高 1.5 m, 宽 1.6 m, 桥下界限按预留京九复线一股道, 电力牵引区段的桥梁建筑设计界限。全桥宽 6.4 m, 桥面横向布置 0.25 m(护栏)+0.7 m(人行道)+4.5 m(行车道)+0.7 m(人行道)+0.25 m(护栏)。桥梁下部结构采用浆砌片石重力式桥台, 该桥结构简图如图 1 所示, 桥梁横断面如图 2 所示。

经检测, 该桥跨中处腹板存在多处竖裂、斜裂,

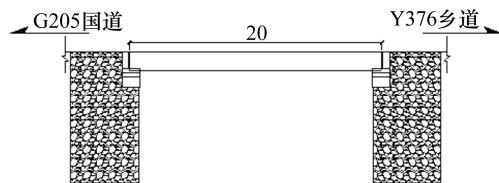


图 1 平改立公跨铁立交桥结构简图(单位: m)

Fig. 1 Structural diagram of horizontal to vertical highway overpass (unit: m)

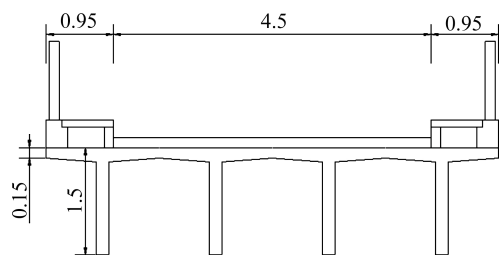


图 2 平改立公跨铁立交桥横断面(单位: m)

Fig. 2 Cross section of horizontal to vertical highway overpass (unit: m)

缝长 0.9~1.2 m, 缝宽 0.16~0.22 mm, 最大缝宽已经超过规范限值 0.20 mm。本次检算桥梁结构的跨径、主梁混凝土强度、钢筋直径与间距、主梁横截面结构尺寸等计算参数, 主要依据《公路桥梁承载能力检测评定规程(JTG T21—2011)》, 并结合现场检测结果进行取值, 即计算跨径取 $L=19.5$ m, 主梁混凝土强度等级为 250 号(偏安全考虑), 主筋直径为 32 mm。利用 Midas 有限元软件和梁格法, 建立该桥单梁计算模型, 单梁纵向划分 20 个单元, 其计算模型如图 3 所示。

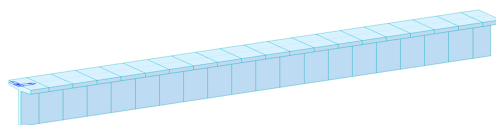


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Finite element calculation model

2.2 加固方法分析

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程(JTG/T J21—2011)》的规定, 在汽车-15 级车道荷载作用下, 考虑检算系数及承载力恶化系数, 经过计算得到抗力值为 $2\ 201.6\ \text{kN} \cdot \text{m}$, 而中梁的跨中极限弯矩效应组合值 $\gamma_0 M_u = 2\ 204.4\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 。表明: 跨中抗弯极限承载力不满足要求, 而主梁斜截面抗剪承载力符合要求, 满足安全储备。

由计算结果可知, 该桥的抗弯承载力不满足使用要求, 需对该桥进行加固设计。对于简支梁桥抗弯能力不足的问题, 宜优先采用体外预应力加固和增大截面加固桥梁。本试验分别采用粘贴钢板加固、体外预应力加固的 2 种早期加固方法和新的组合加固方法进行加固。

2.2.1 粘贴钢板加固法

主梁跨中底各 8 m 范围内, 粘贴厚 4 mm、宽 16 cm 的 Q345qE 级钢板条进行抗弯加固。粘贴钢板加固后, 桥梁的受力效应在计算时可以分 2 个阶段考虑: 钢板与主梁结合前, 在恒载作用下使受力主筋产生应变 ε_{c1} ; 钢板与主梁有效结合后, 结构的受力达到承载能力极限状态。按照平截面假定确定钢板的拉应变 ε_{sp} , 钢板应力 σ_{sp} 等于拉应变 ε_{sp} 与弹性模量 E_{sp} 的乘积。其中, ε_{c1} 计算式为:

$$\varepsilon_{c1} = \frac{M_{d1} x_1}{E_c J_{cr}} \quad (1)$$

式中: M_{d1} 为第一阶段弯矩设计值; x_1 为加固前换算截面的混凝土受压区高度; E_c 为原构件的弹性模量; I_{cr} 为加固前原构件的截面惯性矩。

拉应变 ε_{sp} 的计算式为:

$$\varepsilon_{sp} = \frac{\varepsilon_{cu}(\beta h - x)}{x} - \frac{\varepsilon_{c1}(h - x_1)}{x_1} \quad (2)$$

式中: ε_{cu} 为混凝土极限压应变; β 为截面受压区矩形应力图高度与实际受压区高度的比值; h 为原构件截面高度; x 为混凝土受压区高度。

混凝土受压区高度的计算式为:

$$f_{cd,1}bx = f_{sd}A_s + E_{sp}\varepsilon_{sp}A_{sp} - f'_{sd}A'_s \quad (3)$$

式中: $f_{cd,1}$ 为原构件混凝土强度设计值; A_{sp} 为加固钢板的截面面积; f_{sd} 为原构件纵向钢筋抗拉强度设计值; f'_{sd} 为原构件纵向钢筋抗压强度设计值; A_s 为原构件受拉区纵向钢筋的截面面积; A'_s 为原构件受压区纵向钢筋的截面面积; E_{sp} 为加固钢板的弹性模量; ε_{sp} 为加固钢板达到极限承载能力状态时的拉应变; b 为截面宽度。

加固构件正截面承载力的计算式为:

$$M_{u1} = f_{cd,1}bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) + E_{sp}\varepsilon_{sp}A_{sp}a_s \quad (4)$$

式中: b 为截面宽度; h_0 为截面有效高度; a_s 为受拉区普通钢筋至受拉区边缘的距离; a'_s 为受压区普通钢筋至受压区边缘的距离。

从该桥梁荷载试验结果可知, 检算系数评定标度为 2.7, 桥梁检算系数 Z_1 取 1.03, 偏安全考虑 Z_1 取为 1.0。再由计算可得到粘贴钢板后梁的正截面承载力 $2\,937.9\text{ kN}\cdot\text{m} > \gamma_0 M_{u1}$ 。表明: 该方法加固桥梁后, 主梁的抗弯承载力满足检算要求。

2.2.2 体外预应力加固法

体外预应力加固 T 梁, 采用 2 束 $2\phi^{s15.2}$ 钢绞线对 20 m 长度的简支 T 梁进行加固。截面面积 A_p 为 556 mm^2 , 抗拉强度标准值为 $1\,860\text{ MPa}$, 抗拉强度设计值为 $1\,260\text{ MPa}$, 弹性模量为 $1.95 \times 10^5\text{ MPa}$, 体外索永存预应力 σ_{pe} 为 $1\,089\text{ MPa}$ 。

使用体外预应力索加固梁桥时, 加固梁的设计弯矩按原梁设计弯矩考虑。体外索的极限应力为:

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + 0.03E_p \frac{h_p - c}{\gamma_p l_e} \quad (5)$$

式中: l_e 为体外索的有效长度; γ_p 为体外预应力钢

材的安全系数; h_p 为体外预应力筋合力点到截面顶点的距离; c 为截面中性轴到混凝土受压区顶面的距离; E_p 为体外预应力筋的弹性模量。

经计算 $\sigma_{pu} = 1\,208.4\text{ MPa} \leq f_{pd} = 1\,260\text{ MPa}$ 。根据公式, 判断加固后 T 梁的截面类型:

$$a = \frac{\sigma_{pu}A_p a_{pe} + f_{sd}A_s a_s}{\sigma_{pu}A_p + f_{sd}A_s} \quad (6)$$

$$h_s = h - a_s \quad (7)$$

$$h_0 = h - a \quad (8)$$

$$f_{cd}bx + f_{cd}(b'_f - b)h'_f = \sigma_{pu}A_p + f_{sd}A_s \quad (9)$$

式中: A_p 为体外预应力筋的截面面积; a 为受拉区体外预应力筋和普通钢筋的合力作用点到受拉区边缘的距离; h_s 为原梁中普通钢筋合力作用点至梁顶面的距离; h_0 为体外预应力筋和原梁普通钢筋的合力作用点至梁顶面的距离。

计算得到加固后梁的受压区高度 $x = 534.38\text{ mm}$, 小于相对受压高度 $\xi_b h_0 = 746.48\text{ mm}$, 大于翼板厚度 175 mm 。表明: 该截面为第二类 T 型截面。

加固后梁的抗弯承载力为:

$$M_{u2} = f_{cd}(b'_f - b)h'_f\left(h_0 - \frac{h'}{2}\right) + f_{cd}bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) \quad (10)$$

由式(10)计算得, M_{u2} 为 $3\,152.8\text{ kN}\cdot\text{m} > 2\,304.4\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。表明: 使用体外预应力加固后, 承载力满足检算要求。

2.2.3 组合加固法

本桥使用体外预应力加固方案中, 存在使原 T 梁变为第二类截面的问题。当体外预应力筋加固效果增大时, 可能会出现受压区高度偏大的问题。为解决该问题, 提出在梁底施加 CFRP 加固, 梁顶新浇筑一层混凝土, 使新浇筑的混凝土层与原桥混凝土紧密结合, 提高原桥承载力, 同时增强桥梁横向联系。凿除表面旧混凝土层, 浇筑 5 cm 厚的 C50 混凝土, 在距离梁端各 0.5 m 处的梁底, 布置 3 条 $18\,000\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的碳纤维板, 施加有效预应力 $1\,200\text{ MPa}$, 加固后梁的截面特性发生了变化。加固梁的横截面如图 4 所示。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG 3362—2018)》的规定, 组合梁的弯矩设计值按式(11)进行计算:

$$M_d = M_{1,Gd} + M_{2,Gd} + M_{2,Qd} \circ \tag{11}$$

式中： $M_{1,Gd}$ 为现浇混凝土达到标准强度前构件和现浇混凝土层产生的弯矩设计值； $M_{2,Gd}$ 为现浇混凝土达到标准强度后构件自重产生的弯矩设计值； $M_{2,Qd}$ 为现浇混凝土达到标准强度后荷载产生的弯矩组合设计值。

由式(11)的计算结果可知，边梁跨中截面为荷载效应的最大组合值， $M_d=25\ 09.2\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。加固梁的承载力按式(12)进行计算：

$$\begin{cases} f_{cd,2}bx = f_{sd}A_s + \sigma_f A_f; \\ \gamma_0 M_d \leq f_{cd,2}bx \left(h_0 - \frac{1}{2}x \right). \end{cases} \tag{12}$$

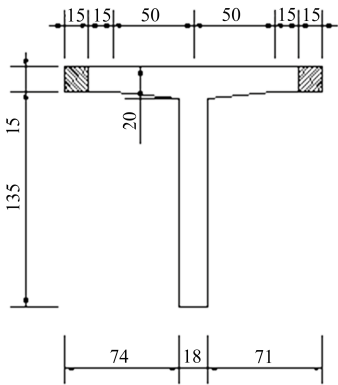


图 4 加固后梁横截面(单位: cm)
Fig. 4 Cross section of reinforced middle beam (unit: cm)

经计算， $h_0=1\ 163\text{ mm}$ ， $x=80.3\text{ mm}<\zeta_b h_0$ ，梁的正截面承载力为 $3\ 824.5\text{ kN}\cdot\text{m}>M_d$ 。表明：梁的正截面承载力大幅度提高，受压区高度减小，梁仍为第一类截面，安全储备提高。为验证加固效果，采用通用有限元软件 Midas/CIVIL 进行加固梁模拟，将预应力碳纤维板等效换算成体外预应力钢束，再建立单梁模型。加固梁在组合荷载下的内力如图 5 所示。

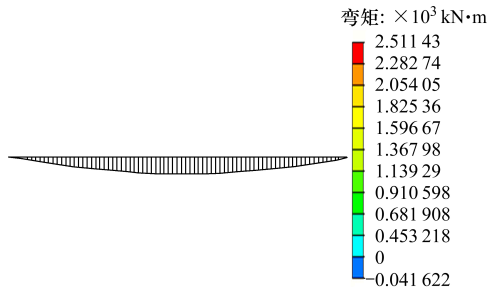


图 5 加固梁在组合荷载作用下的内力(单位: kN·m)
Fig. 5 Internal force diagram of reinforced beam under combined load (unit: kN·m)

从图 5 中可以看出，在组合荷载作用下，加固梁跨中处的最大内力为 $2\ 511.4\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，与计算值接近。经预应力混凝土(prestressed concrete, 简称为PSC)设计，加固梁在使用阶段正截面抗弯承载力为 $3\ 757.2\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，与计算值 $3\ 824.5\text{ kN}\cdot\text{m}$ 接近，验证了该方法是有效的。

3 加固方案综合对比

3.1 施工工艺

3 种加固方案的施工工艺见表 3。由表 1 可知，前 2 种加固方法施工对桥上交通影响小，可以不中断交通或短时间限制交通。粘贴钢板加固法施工比较简单，体外预应力加固法组成系统复杂，与粘贴钢板法相比，虽然施工过程比较繁琐，但是后期维护修补方便，可以随时更换预应力筋。组合加固法施工虽然影响桥上交通，施工周期相对较长，但是预应力碳纤维板的安装与桥面混凝土的铺张可以同时进行，两者相互独立互不影响。

表 1 施工工艺对比表

Table1 Comparison of construction process		
粘贴钢板加固	体外预应力加固	组合加固
①构件表面处理	①开凿锚固孔	①封闭交通
②钢板现场配套打孔与粘贴表面平整处理	②钻孔	②拆除原桥面铺张
③钻孔植埋螺栓	③安装垫板	③锚固块安装
④打磨粘结面的钢板表层	④安装预应力钢筋	④梁底混凝土表面处理
⑤粘接胶的配制	⑤张拉钢筋	⑤碳纤维板安装
⑥钢板粘贴	⑥封锚	⑥桥面新旧混凝土结合面处理
⑦钢板防腐处理	⑦防腐处理	⑦新浇混凝土层

3.2 正截面承载力

3 种加固方法的正截面承载力值见表 2。

表 2 正截面承载力对比

Table 2 Comparison of bearing capacity of section			
加固方法	$M_d/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	安全系数
粘贴钢板加固	2 608.2	2 937.9	1.13
体外预应力加固	2 304.4	3 152.8	1.35
组合加固	2 509.2	3 824.5	1.52

由表 2 可知，3 种加固方法的正截面承载力均满足要求，但组合加固法安全系数更高。

3.3 材料利用率

材料利用率是指加固前、后梁承载力的差值与所用材料质量的比值，见表 3。

由表 3 可知，体外预应力加固法的材料利用率最高，达到了 13.33 kN·m。而组合加固法中使用了较多的混凝土，导致材料利用率偏低。

表 3 材料利用率对比表

Table 3 Comparison of material utilization						
加固方法	体积/m ²	密度/(kg·m ⁻²)	质量/kg	加固前承载力/(kN·m)	加固后承载力/(kN·m)	材料利用率
粘贴钢板	0.014	7 850	109.90	2 201.6	2 937.9	6.69
体外预应力	0.011	7 850	86.35	2 201.6	3 352.8	13.33
组合加固	0.0064+4.500	880+2 500	11 255.00	2 201.6	3 824.5	0.16

4 结论

通过对单跨简支 T 梁桥组合加固与传统 2 种桥梁加固方法进行对比分析，得到结论：

1) 粘贴钢板加固法是一种被动加固方法，在结构正常使用阶段作用小，粘贴钢板被动参与工作，虽然在一定程度上提高了梁的承载力，同时也增加了自重，材料利用率不高，承载力储备较低，但是其施工工艺简单，工期短。

2) 体外预应力加固法是一种主动加固方法，对原梁承载力提升比较明显，而且自重较小，材料利用率高，但会使原梁出现受压区偏大问题，使 T 梁处于第二类截面。

3) 组合加固法解决了体外预应力加固在承载能力极限状态下受压区高度偏大的问题，同时也增强了 T 梁间的横向联系，安全储备也相对更高。

参考文献(References):

[1] 王晓东,李广毅.预应力混凝土 T 型刚构桥的病害分析及加固设计[J].公路交通科技(应用技术版),2009,5(5): 169-171. (WANG Xiao-dong, LI Guang-yi. Disease analysis and reinforcement design of prestressed concrete T-frame bridge[J]. Highway Transportation Technology (Application Technology Edition),2009,5(5):169-171.(in Chinese))

[2] 牛斌.体外预应力混凝土梁弯曲性能分析[J].土木工程学报,1999,32(4):37-44.(NIU Bin. The analysis of flexural behavior of externally prestressed concrete beams[J].China Civil Engineering Journal,1999,32(4): 37-44.(in Chinese))

[3] 柯敏勇,金初阳,洪晓林.粘贴钢板加固钢筋混凝土梁的试验研究[J].水利水运工程学报,2001(4):27-32.(KE Min-yong, JIN Chu-yang, HONG Xiao-lin. Experimental

study of reinforced concrete beam strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(4):27-32.(in Chinese))

[4] 张宇,李思明.粘钢加固钢筋混凝土梁可靠性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2005,32(6):11-14.(ZHANG Yu, LI Si-ming. Reliability analysis of reinforced concrete beams strengthened with steel plates[J]. Journal of Hunan University (Natural Science),2005,32(6):11-14. (in Chinese))

[5] Yu P,Silva P F,Nanni A.. Flexural strength of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber-reinforced polymer sheets-part II[J].ACI Structural Journal,2008,105(1):11-20.doi:10.14359/19064.

[6] 李源,张保印,刘匀,等.碳素纤维布加固混凝土梁的受弯承载力计算[J].建筑结构,2001,31(7):66-69.(LI Yuan, ZHANG Bao-yin, LIU Yun, et al. Calculation on bending strength of concrete beams strengthened with CFRP[J]. Building Structure, 2001, 31(7): 66-69. (in Chinese))

[7] 李传习,罗南海.高温对 CFRP 板/钢界面力学性能的影响[J].交通科学与工程,2019,35(4):34-39.(LI Chuan-xi, LUO Nan-hai. Effect of high temperature on mechanical properties of the interface between CFRP laminate and steel[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019,35(4):34-39.(in Chinese))

[8] 聂建国,赵洁,唐亮.钢板-混凝土组合在钢筋混凝土梁加固中的应用[J].桥梁建设,2007,37(3):76-79.(NIE Jian-guo, ZHAO Jie, TANG Liang. Application of steel plate and concrete composite to strengthening of reinforced concrete girder[J]. Bridge Construction, 2007, 37(3):76-79.(in Chinese))

[9] 危春根,刘欢,邱明红,等.不同配筋形式超高性能混凝土梁受弯性能试验研究[J].公路工程,2019,44(6):196-202. (WEI Chun-gen, LIU Huan, QIU Ming-hong, et al. Experimental study on flexural behavior of ultra-high performance concrete beams with different reinforcement forms[J].Highway Engineering,2019,44(6):196-202.(in Chinese))