

外贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁试验研究

柯敏勇¹, 金初阳², 陈红卫³, 刘海祥²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210029; 3. 上海中钱联合基础工程有限公司, 上海 201515)

摘要 采用试验和有限元分析相结合的方法, 分析了外贴 CFRP 布加固梁的承载能力、变形特性、破坏形式和 CFRP 布加固承载机理。研究表明: 外贴 CFRP 布加固能有效地提高钢筋混凝土梁的承载能力; CFRP 布加固梁的刚度随 CFRP 布粘贴层数的增加而增加; CFRP 布的高强特性在受拉钢筋应力水平较高时发挥得较充分; CFRP 布加固不仅可以提高钢筋混凝土梁的承载能力, 而且可以大幅度地提高其安全储备。

关键词 钢筋混凝土梁; CFRP 布加固; 结构承载力

中图分类号: TU375.1 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2005)02-0029-04

Experimental study on strengthening RC beams with externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheets // KE Min-yong¹, JIN Chu-yang², CHEN Hong-wei³, LIU Hai-xiang² (1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China; 2. Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Shanghai Zhongqian Uni-based Engineering Co. LTD., Shanghai 201515, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets are being successfully used for strengthening of existing reinforced concrete (RC) structures. The bearing capacity, deflection characteristic, failure mode of strengthened RC beams and mechanism of CFRP sheets in strengthening of RC structures were analyzed by use of beam test and FEM. The results indicate that the adoption of CFRP sheets can effectively improve the bearing capacity of beams, and that the stiffness of strengthened beams increases with the number of layers of CFRP sheets. Besides, the high strength of CFRP sheets can be fully played at high stress stage of steel bars and can greatly improve the safety margin of RC beams.

Key words: RC beam; strengthening with carbon fiber reinforced polymer sheet; bearing capacity of structure

碳纤维材料(CFRP)布加固混凝土结构是近年来新兴的加固方法, 利用树脂类黏结材料将 CFRP 布粘贴于混凝土表面, 利用 CFRP 良好的抗拉强度以增强构件承载能力及刚度, 从而实现结构及构件加固补强的目的^[1]。经 CFRP 布加固的钢筋混凝土梁成为了钢筋混凝土、黏结材料和 CFRP 布组成的杂交结构, 承载力、变形特性和破坏形式均与普通钢筋混凝土梁有所差别。作者开展了外贴 CFRP 布加固钢筋混凝土梁试验, 结果表明 CFRP 布的层数对加固梁的承载能力、变形特性和破坏形式影响较大; 采用有限单元法开展加固承载机理的数值分析表明, CFRP 布的加固效应在钢筋应力水平较高时体现得更明显。

构试验方法标准》, 共制作了钢筋混凝土梁 16 根, 混凝土设计强度等级 C30。梁长为 1 850 mm, 截面尺寸为 120 mm × 200 mm, 支撑宽度为 50 mm, 实际净跨为 1 750 mm。梁配筋情况见图 1。成型养护到 28 d 龄期后, 测得混凝土平均强度为 47.8 MPa。

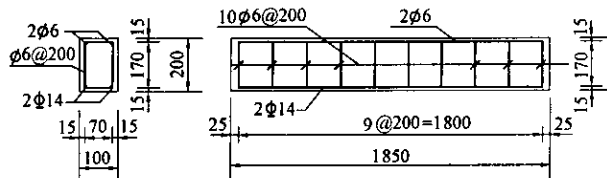


图 1 钢筋混凝土梁配筋情况示意图(单位: mm)

1 加固试验

1.1 试验用材料

a. 钢筋混凝土梁. 参照 GB50152-92《混凝土结

b. 结构胶. 采用 LX II 型环氧基结构胶, 物理力学性能指标见文献[2]. 该结构胶系列以环氧树脂为主, 并配以不同的添加剂, 使之具有不同的黏结特性和渗透特性. 结构胶系列的高抗剪强度可防止沿修补面发生剪切破坏。

作者简介: 柯敏勇(1970—), 男, 浙江台州人, 博士研究生, 工程师. 现在南京水利科学研究院材料结构研究所工作, 从事结构安全检测、评估和加固技术研究。

c. CFRP 布. CFRP 布采用日本 TONEN 公司进口

的 12KCFRP 编织而成,其标称厚度为 0.111 mm,面密度为 200 g/cm²,主要性能指标如下:抗拉强度为 3000 MPa,弹性模量为 230 GPa,延伸率为 2.1%,密度为 1.8 g/cm³,耐腐蚀性优,浸透性良好,均匀度良好。

d. 试件制作.将钢筋混凝土梁养护至结构试验龄期,按照外贴 CFRP 布的施工工艺,在梁底部粘贴 CFRP 布,等完全硬化 3~5 d 后进行结构静载试验。

1.2 试验装置及方法

a. 试验装置.钢筋混凝土梁的静载试验装置见图 2^[2].荷载由经过率定的 80 kN(对未经加固的钢筋混凝土梁)和 200 kN(对加固后的钢筋混凝土梁)的油压千斤顶通过分配梁实现两点对称同步加载.构件变形由百分表测读,由 HP3852A 数据采集系统处理碳纤维布和钢筋混凝土梁的应变,用 20 倍的读数显微镜测读裂缝,用钢卷尺测量裂缝长度及间距。

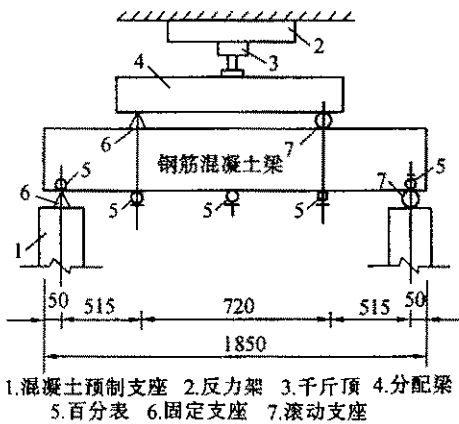


图 2 钢筋混凝土梁试验装置示意图(单位:mm)

b. 试验方法.试验每组次 1~2 根梁,先进行 6 根空白对照组试验. CFRP 布尺寸统一为 120 mm × 1750 mm(支座支撑宽度范围不粘贴).为确保端部不发生剥离破坏,试件端部采取不同的锚固形式.进行 2 组对比试验:①粘贴层数对加固效果影响,分别粘贴 1 层、2 层和 3 层;②受拉区混凝土开裂梁粘贴 2 层 CFRP 布,试件编号 CB7~CB10。

1.3 试验成果与分析

a. 静载试验分析.静载试验结果见表 1(其中 CB0 试件作为空白对照),荷载挠度曲线见图 3.试验表明,外贴 CFRP 布加固梁的极限承载力提高了 50%~130%,其中粘贴 1 层 CFRP 布的试件承载能力提高了 55%左右,粘贴 2 层的提高了 90%~110%,粘贴 3 层的提高了近 130%.表明外贴 CFRP 布提高钢筋混凝土梁的承载能力方法是可行的,且粘贴层数越多,承载能力提高得越多,但提高幅度随着粘贴层数的增加而减少。

表 1 静载试验结果

试件编号	粘贴层数	锚固形式	承载力/kN	增长率/%	破坏形式
CB0			69.6	0	
CB1	2	□	148	112.6	CFRP 布拉断
CB2	2	□	138	98.3	斜截面抗剪破坏
CB3	1	U	107	53.7	CFRP 布拉断
CB4	1	U	108	55.2	CFRP 布拉断
CB5	3	□	160	129.9	斜截面抗剪破坏
CB6	1	□	126	81.0	CFRP 布拉断、受压混凝土区破坏
CB7	2	U	145	108.3	CFRP 布拉断
CB8	2	U	130	86.8	CFRP 布拉断
CB9	2	U	142	104.0	CFRP 布拉断
CB10	2	U	140	101.1	CFRP 布拉断

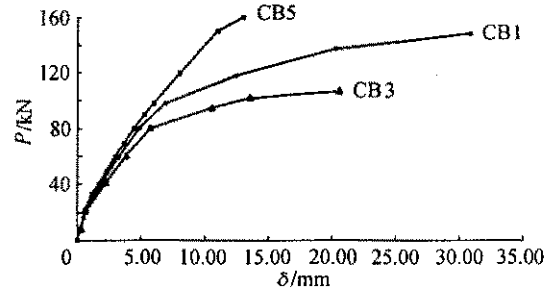


图 3 CFRP 布不同粘贴层数典型加固梁的荷载-挠度曲线

b. 裂缝形态.与普通钢筋混凝土梁相比,外贴 CFRP 布约束了受拉区混凝土的变形,在纯弯段裂缝部分细而密,数量多,宽度远小于未加固梁,且扩展也较为缓慢.但 CFRP 布对开裂荷载影响较小,两者均在 20 kN 左右出现初裂纹。

c. 破坏形式分析.试验得到外贴 CFRP 布加固梁有 3 种不同的破坏形式:①斜截面抗剪破坏;②CFRP 布拉断,受压区混凝土压碎;③CFRP 布拉断.破坏形式①对应于普通钢筋混凝土梁的抗剪破坏,破坏原因是加固梁抗剪能力不足,在剪跨间产生斜向剪裂缝,导致承载能力丧失.因此,承载能力取决于梁的抗剪能力,但没有充分发挥 CFRP 布的强度,属脆性破坏,在抗弯加固中应予以避免.破坏形式②对应于普通钢筋混凝土梁的适筋破坏,CFRP 布与梁共同受力,在极限状态下,CFRP 布与钢筋的应力水平均较高,破坏过程为钢筋先屈服,随之 CFRP 布拉断和受压区混凝土破坏.破坏形式③是在钢筋屈服后,CFRP 布承担荷载增量,最后因 CFRP 布断裂而破坏,但没有充分发挥混凝土抗压强度,承载力由受拉钢筋和 CFRP 布共同控制。

d. 挠度及延性. CFRP 加固钢筋混凝土梁荷载-挠度曲线如图 3.外贴 CFRP 布提高了梁的刚度,且其刚度随着 CFRP 布层数的增加而增加.根据荷载大小不同,CFRP 布对提高梁刚度的贡献可分 3 个阶段^[3]:第一阶段,受拉区混凝土开裂前,CFRP 布对提高梁刚

度作用微乎其微,第二阶段,受拉区混凝土开裂后至钢筋屈服前,CFRP布对梁刚度提高幅度大约为3%~7%。第三阶段,属极限状态,梁的曲率增加,CFRP布的应力值很大,CFRP布拉断可能先于混凝土压碎,也可能仅出现混凝土压碎破坏。而对于普通钢筋混凝土梁,在此阶段随着裂缝迅速扩展,中和轴高度上升,混凝土受压区面积和刚度均大幅度降低。

e. 受拉区混凝土开裂,钢筋混凝土梁外贴CFRP布加固。先使适筋钢筋混凝土梁受拉区混凝土开裂,卸载后在梁底面粘贴2层CFRP布,养护至规定时间开展结构性能试验,结果见表2。试验表明CFRP布提高了梁的承载能力达100%以上。这种CFRP布加固和完整梁的极限承载力差别不大,原因在于梁截面和钢筋截面无损失,但前者与后者的荷载挠度曲线存在明显差异。完整梁在20kN时受拉区混凝土开裂,导致梁刚度降低,荷载挠度曲线存在明显的拐点(图3);受拉区混凝土开裂的梁在加固前混凝土已经开裂,梁刚度已经削弱,不存在初裂点,在荷载挠度曲线上也不存在拐点(图4)。

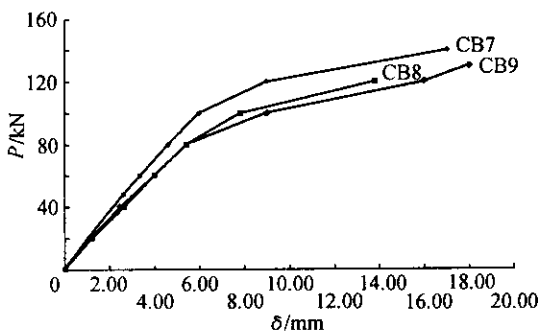


图4 开裂后加固梁的荷载-挠度曲线

f. 锚固措施。不同的端部锚固措施对正截面抗弯破坏荷载没有明显影响。U型、□型(全封闭)锚固方式均能有效地防止CFRP布发生早期剥离破坏。由于在剪跨段沿梁高两侧粘贴抗剪CFRP布片不够, CB2和CB3试件在剪跨段出现斜截面抗剪破坏。因此在抗弯加固中,须遵循“强剪弱弯”的原则,确保加固后构件的抗剪能满足设计和正常使用要求。

2 加固机理和黏结应力分析

2.1 数学模型选择

为分析加固承载和黏结机理,采用有限单元法分析外贴CFRP布加固钢筋混凝土梁。由于钢筋混凝土、黏结层和CFRP布在材料和几何尺寸等方面相差较大,因此宜采用不同的单元形式。钢筋混凝土选用整体式模型,钢筋弥散于整个单元中,单元被视为连续均匀材料。单元形式选用等参四边形四结点单元。混凝土单向受力上升段采用Saenz提出的应力应变关系公式,混凝土双向受力下应力-应变关系

采用Darwin和Pecknold模型^[5],反复加载下混凝土的下降段应力-应变关系曲线用分段直线来描述。钢筋采用线性强化弹塑性模型,钢筋屈服后进入塑性状态,考虑应变强化,取强化弹性模量为1/100的初始弹性模量。加固用CFRP布较薄,采用一维杆单元模拟。胶结层采用有厚度四结点线性节理单元模拟,取切向应力与切向劲度系数关系式为

$$\lambda_s = \lambda_0 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_m}\right)^2 \quad \lambda_0 = \frac{G}{e}$$

式中 λ_s 为切向劲度系数; λ_0 为节理单元初始切向劲度系数; τ 为切向应力; τ_m 为抗剪强度; λ_m 为法向劲度系数; G 为胶结层初始剪切模量; e 为胶结层厚度。

2.2 加固承载和黏结机理分析

a. CFRP布加固承载机理。CFRP布与受拉区钢筋共同受力情况见图5。在钢筋屈服前,CFRP布与钢筋上的应力水平相近。在受拉钢筋屈服后,钢筋不再承担荷载增量,此时荷载增量全部由CFRP布承担,其应力增幅明显加快。结合试验分析表明,CFRP布的高强特性是在受拉钢筋屈服后得以发挥的,因此外贴CFRP布加固不仅可以提高钢筋混凝土梁的承载能力,而且可以大幅度地提高其安全储备。

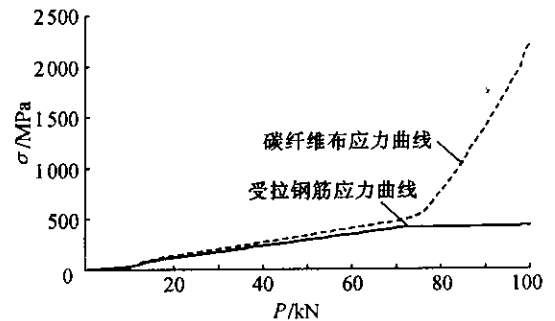


图5 CFRP布与钢筋应力分布

b. 黏结应力。胶结层厚度对剪应力分布有一定影响,当厚度较小时,CFRP布端部剪应力相对较大;当厚度较大时,该处剪应力相对较小,但该处的剪应力均比其他部位的大得多。因此,无法完全靠增加胶结层厚度的方法来降低剪应力水平。虽有研究表明^[3,5]端部浸渍胶外溢有利于改善端部应力集中,但改善范围有限。为确保加固结构的可靠性,在端部采取合适的锚固措施,避免早期剥离破坏是完全必要的。

3 韩庄闸公路桥T形梁加固

3.1 计算条件与参数

韩庄闸公路桥位于山东省微山县境内104国道主干道上,设计标准为汽-20、挂-100,该桥钢筋混凝土T形梁上曾出现大量裂缝,采用外贴CFRP布加

固,布置见文献[1]。根据检测结果,T形梁混凝土强度按C30取其力学性能指标,混凝土碳化深度按20mm计,钢筋锈蚀率按5%计,钢筋按I级钢取其力学性能指标,胶层剪切模量为1.75 GPa,初始弹性模量为4200 MPa,极限抗剪强度为5 GPa^[1]。

3.2 计算结果分析

由表2、表3可知,在挂-100极限荷载状态下,虽然钢筋的最大应力值变化不大,但位于梁底的碳纤维仍有效地增大了梁的整体抗弯刚度,所以梁的挠度减小明显,达56.3%。此时,碳纤维的应力仅为239 MPa,远低于碳纤维布的设计抗拉强度(3000 MPa),表明碳纤维的强度未得到充分发挥,碳纤维布加固大大提高了结构的安全储备。

表2 钢筋混凝土T形梁跨中挠度

状态	荷载	跨中挠度		
		加固前/mm	加固后/mm	减少/%
正常使用极限状态	汽-20	13.7	13.3	2.9
	挂-100	31.3	30.0	4.2
承载力极限状态	汽-20	19.1	18.4	3.7
	挂-100	98.0	42.8	56.3

表3 受拉钢筋及碳纤维应力 MPa

状态	荷载	加固后		
		加固前 钢筋	钢筋	碳纤维
正常使用极限状态	汽-20	98.7	97.7	97.7
	挂-100	200.0	198.0	215.7
承载力极限状态	汽-20	137.1	133.5	135.0
	挂-100	222.2	221.4	239.0

4 结论

a. 外粘CFRP布加固梁能有效地提高钢筋混凝土的承载能力;CFRP布加固使梁刚度得到提高,且梁刚度的提高程度随CFRP布粘贴层数的增加而增加。

b. CFRP布的高强特性在受拉钢筋应力水平较高时发挥得较充分,外贴CFRP布不仅可以提高钢筋混凝土梁的承载能力,而且可以大幅度地提高其安全储备。

参考文献:

- [1] 柯敏勇,柏文正,孔善能,等.应用CFRP加固韩庄闸公路桥T梁[J].水利水运工程学报,2001(3):54—58.
- [2] 柯敏勇,金初阳,洪晓林.粘贴钢板加固钢筋混凝土梁结构试验研究[J].水利水运工程学报,2001(4):27—32.
- [3] 徐建波.CFRP加固混凝土梁承载力及CFRP布端部应力的分析[D].成都:西南交通大学,2002.
- [4] 刘海祥,洪晓林,陆采荣.外贴钢板加固钢筋混凝土梁的分析模型[J].水利水运工程学报,2003(3):27—31.
- [5] 张继文,吕志涛,滕锦光,等.外部粘贴CFRP或钢板加固梁中粘结界面应力分析[J].工业建筑,2001(6):1—5.

(收稿日期 2004-03-15 编辑:高建群)

(上接第13页)要求较宽,只要观测到3组使 $c'-t$ 曲线达到峰值附近的浓度-时间试验数据,就可以进行数据分析工作,而且计算过程比较简单,既可以将其过程编制程序,在计算机上完成计算工作,也可以利用计算器在试验现场直接进行手算。

4 结语

理论推导与实际算例表明,文中的抛物方程近似拟和法可用于分析瞬时投放示踪剂条件下的一维河流水团示踪试验数据,确定河流纵向弥散系数及其他水质参数。与现有的其他方法相比较,本文方法对野外示踪试验数据的组数要求较低,计算过程比较简单,既可以编程在计算机上完成,也便于在野外现场利用计算器直接进行手算。

参考文献:

- [1] 余常昭.环境水力学[M].北京:清华大学出版社,1992.180—181.
- [2] 郭建青.温季示踪试验确定河流纵向弥散系数的直线图解法[J].环境科学,1990,11(2):24—27.

- [3] 郭建青,王洪胜,李云峰.确定河流离散系数的相关系数极值法[J].水科学进展,2000,11(4):387—391.
- [4] 郭建青.非线性最小二乘法在分析河流水团示踪试验数据中的应用[J].中国给水排水,1991,7(5):13—17.
- [5] 刘毅,陈吉宁,杜鹏飞.环境模型参数优化方法的比较[J].环境科学,2002,23(2):1—6.
- [6] 郭建青,李彦,王洪胜,等.利用改进SA算法估计河流水质参数的仿真实验[J].系统仿真学报,2003,15(12):1750—1752;1762.
- [7] Singh S K. Estimating dispersion coefficient and porosity from soil-column tests[J]. Journal of Environmental Engineering, 2002,128(11):1095—1099.
- [8] 金士博.W.水环境数学模型[M].北京:中国建筑工业出版社,1987.18.

(收稿日期 2004-06-08 编辑:高建群)

