

表层嵌贴 CFRP 板加固梁有限元分析

吴鹏

(广东能达高等级公路维护有限公司, 广东 广州 510030)

摘要: 利用 ANSYS 有限元软件模拟加固梁, 考虑砼材料的非线性行为, 利用生死单元实现不同损伤下的碳纤维增强复合材料(CFRP)加固作用, 通过 Combin39 单元模拟 CFRP 板与砼之间的胶层, 研究不同参数下加固梁模型开裂、屈服、极限荷载值及跨中挠度, 分析 RC 梁损伤程度、砼强度、粘结长度、槽边距离对加固梁抗弯性能的影响。结果表明, 在钢筋屈服之前 CFRP 加固梁的刚度几乎不受这 4 个参数的影响, 但在钢筋屈服之后 CFRP 加固梁的刚度随着粘结长度及砼强度的增加而增大, 随着损伤程度的增加而降低, 满足最小槽边距时对加固梁的刚度影响不大; 损伤程度从预加极限荷载值的 0 提高到 70%, 加固梁的极限荷载值降低 19.7%; CFRP 板粘结长度增加 38%, 加固梁的极限荷载值提高 23.7%; 砼强度从 C30 提高到 C50, 极限荷载值提高 28.1%; 槽边距从 20 mm 增加至 40 mm, 极限荷载值提高 16.9%。

关键词: 桥梁; 碳纤维增强复合材料(CFRP)加固; 抗弯性能; 有限元分析(IDA)

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0137-04

利用纤维复合材料(FRP)加固砼结构技术主要包括外贴 FRP 布和表层内嵌 FRP 板, 其中表层内嵌 FRP 是在砼表面开槽后嵌入结构内部, 具有材料利用率高、耐久性好、防火防冻等优势, 应用前景十分广阔。皮锐、余江滔等通过钢筋砼梁静载试验, 从钢筋砼梁开裂、屈服、破坏荷载及刚度、破坏模式等方面分析了碳纤维增强复合材料(CFRP)加固量、嵌贴方式、粘结长度等参数对钢筋砼梁抗弯性能的影响。谢建和通过对 19 片钢筋砼梁进行单调静载试验, 分析了剪跨比、CFRP 板材厚度、损伤程度等参数对加固梁抗弯性能的影响, 同时提出了预测加固梁中部剥离破坏时承载力的计算模型。该文通过 ANSYS 有限元对 CFRP 加固梁受弯试验进行模拟, 分析 RC 梁损伤程度、CFRP 板粘结长度、砼强度及槽边距离对加固梁受弯性能的影响。

1 试验加固梁

如图 1 所示, CFRP 内嵌加固梁尺寸为 3 500 mm×150 mm×350 mm, 净跨度为 3 300 mm; 主筋

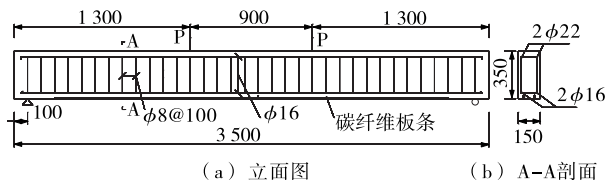


图 1 加固梁尺寸及配筋示意图(单位:mm)

采用 HRB335, 箍筋为 HPB235; 采用双槽, 槽尺寸(长×宽×高)为 3 500 mm×10 mm×20 mm。由于在加载过程中支座附近容易提前发生破坏, 采用 U 形箍对端部进行加固。采用 1/3 净跨处加载的方式。CFRP 板的性能见表 1。

表 1 CFRP 板的力学性能

项目	测试结果
抗拉强度/(N·mm ⁻²)	2 800
拉伸模量/(N·mm ⁻²)	1.60×10 ⁵
伸长率/%	1.49

2 有限元模型

考虑到加固梁模型的对称性, 采用 1/4 模型进行模拟。CFRP 板条利用 Shell63 单元模拟, 该单元可承受平面内和法向荷载, 可解决应力刚化和大变形问题。胶层由具有非线性功能的 Combin39 单元模拟, 该单元可输入界面的本构关系, 还可通过单元自由度选项确定弹簧模拟的界面滑移方向。这里采用试验获得的粘结滑移数据作为 Combin39 单元来模拟, 由粘结滑移曲线转化后的弹簧力一位移关系曲线见图 2, 由于不同胶层位置节点处的面积不同, 弹簧分为中间点弹簧、边线点弹簧、角点弹簧。砼采用 Solid65 单元模拟, 该单元可模拟砼材料的压溃和受拉开裂等特性, 单元属性见表 2。在模型运行中, 由于力与力矩大于收敛值, 会导致结构分析不收

敛,通过参数调节使其满足收敛要求。梁的主筋和箍筋采用 Link8 杆单元模拟,钢筋与砼之间的连接方式为共用节点。

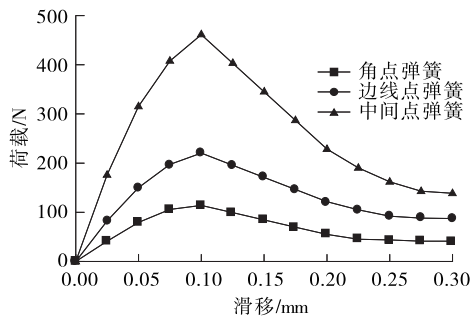


图2 不同节点处的弹簧力一位移关系曲线

表2 砼单元属性

项目	取值
弹性模量/GPa	3.0
抗压强度/MPa	30;40;50
抗拉强度/MPa	1.43
闭合裂缝剪力传递系数	0.3
张开裂缝剪力传递系数	0.8
泊松比	0.2

3 荷载工况

该文主要研究 RC 梁损伤程度、CFRP 板粘结长度、砼强度及槽边距离对加固梁开裂、屈服、极限荷载及跨中挠度的影响。如表3所示,损伤程度分别设为钢筋砼梁(对比梁模型)极限荷载值的30%、

表3 加固梁模型的基本参数

加固梁 编号	预加荷载/ kN	砼强度/ MPa	粘结长度/ mm	槽边距离/ mm
TC40L2900—1	26.7	C40	2 900	40
TC40L2900—2	44.5	C40	2 900	40
TC40L2900—3	62.3	C40	2 900	40
TC40L2100	0.0	C40	2 100	40
TC40L2500	0.0	C40	2 500	40
TC40L2900	0.0	C40	2 900	40
TC30L2900	0.0	C30	2 900	40
TC40L2900	0.0	C40	2 900	40
TC50L2900	0.0	C50	2 900	40
TC40GD20	0.0	C40	2 900	20
TC40GD30	0.0	C40	2 900	30
TC40GD40	0.0	C40	2 900	40

注:加固梁模型编号中,T为Test测试模型,Cxx为砼等级,Lxx为粘结长度,1~3为损伤等级,GDxx为槽边距离。下同。

50%、70%,粘结长度分别为2 100、2 500、2 900 mm,砼强度分别为C30、C40、C50,槽边距离分别为20、30、40 mm。

4 试验结果与模型计算结果对比分析

4.1 结果对比

以钢筋砼梁为例,CFRP加固梁各项基本指标的模型计算结果与试验结果见表4,荷载—挠度关系曲线见图3。

表4 模型计算结果与试验结果对比分析

试件	开裂荷载		屈服荷载		极限荷载	
	荷载/ kN	误差/ %	荷载/ kN	误差/ %	荷载/ kN	误差/ %
试验	19		72		86	
模型	20	5.2	77	6.9	89	3.4

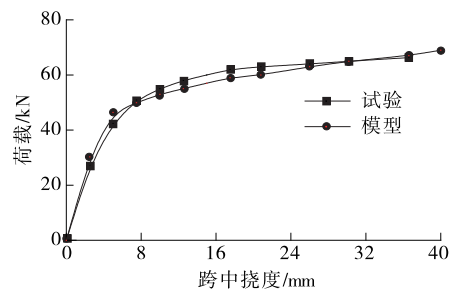


图3 加固梁跨中挠度—荷载曲线

从表4可看出:模型梁和试验梁的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载误差分别为5.2%、6.9%、3.4%,满足精度要求,模型结果与试验结果较吻合。

从图3可看出:模型梁和试验梁的跨中挠度—荷载曲线基本重合,在加载中期模型梁的刚度略大于试验梁。

4.2 损伤程度的影响

对钢筋砼梁模型进行不同程度的预加载,利用生死单元实现预加载后CFRP板加固作用,得到加固梁开裂、屈服、极限荷载值及荷载—挠度曲线(见表5、图4、图5)。

表5 CFRP不同损伤程度加固梁的性能

加固梁模型	预加荷 载/kN	开裂荷 载/kN	屈服荷 载/kN	极限荷 载/kN
TC40L2900	0.0	43.1	110.5	146.5
TC40L2900—1	26.7	38.2	102.7	135.7
TC40L2900—2	44.5	39.1	96.9	128.4
TC40L2900—3	62.3	37.6	92.2	117.6

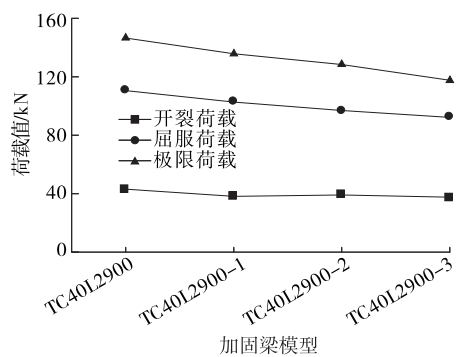


图 4 不同损伤程度加固梁模型的荷载值

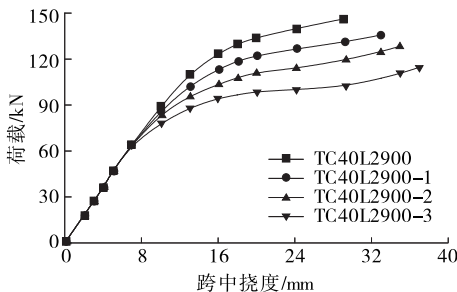


图 5 不同损伤程度加固梁模型的挠度-荷载曲线

损伤加固梁的受力可分为以下 3 个过程:1) 预加荷载。在不同预加荷载作用下加固梁产生轻微变形和微裂缝,在此作用下砼与钢筋具有一定的应力应变值,此时不同损伤下加固梁的受力性能与普通 RC 梁较为相似。2) 二次加载至钢筋屈服。在预加荷载作用下对试验梁进行加固,由于不同预加载的存在,初始跨中挠度不同,损伤程度较大时 CFRP 板上应力明显滞后于砼与钢筋的应变,钢筋屈服之前 CFRP 板与钢筋砼共同受力,其受力特性与直接加固梁(TC40L2900)较为相同。3) 塑性发展。损伤加固梁在钢筋屈服之后,由于不同预加载作用下产生裂缝,损伤程度越大极限荷载值越低,但不同损伤程度加固梁在钢筋屈服后的变形特性及受力性能基本相同。

从表 5、图 4 和图 5 可看出:1) 在钢筋屈服之前,不同损伤程度 CFRP 加固梁的刚度并没有随着损伤程度的增加而增大;但在钢筋屈服之后,损伤程度越大,加固梁刚度越低。2) 随着预加荷载值的增大,损伤 CFRP 加固梁的最终变形明显增加,表明延性较好;但极限荷载明显降低,损伤程度从预加极限荷载值的 0 提高到 70%,CFRP 加固梁的屈服荷载值降低 16.6%,极限荷载值降低 19.7%。

4.3 粘结长度的影响

在加固梁 TC40L2900 模型的基础上,调整

CFRP 与砼之间的粘结长度,得到不同粘结长度加固梁的开裂、屈服、极限荷载值及荷载-挠度曲线(见表 6、图 6、图 7)。

表 6 粘结长度对 CFRP 加固梁性能的影响

加固梁模型	粘结长度/mm	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
TC40L2100	2 100	42.2	71.6	118.4
TC40L2500	2 500	42.7	99.9	134.8
TC40L2900	2 900	43.1	110.5	146.5

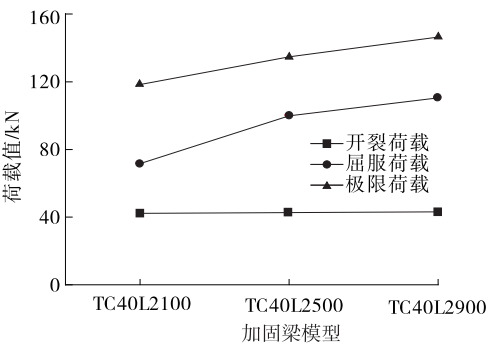


图 6 不同粘结长度加固梁模型的荷载值

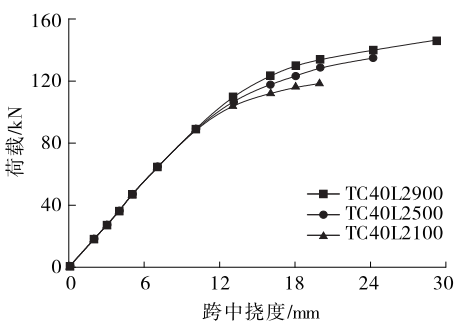


图 7 不同粘结长度加固梁模型的荷载-挠度曲线

从表 6、图 6 和图 7 可以看出:1) 在钢筋屈服之前,不同粘结长度 CFRP 加固梁的荷载-挠度曲线基本重合,即刚度没有变化;在钢筋屈服以后,随着粘结长度的增加,加固梁的刚度增大。2) 随着粘结长度的增加,跨中挠度增大,即 CFRP 加固梁的延性较好;屈服荷载、极限荷载值随着粘结长度的增加而增加,粘结长度从 2 100 mm 增加到 2 900 mm,CFRP 加固梁的屈服荷载和极限荷载分别提高 54.3%、23.7%。

4.4 砼强度的影响

在 TC40L2900 加固梁模型的基础上,对砼强度进行调整,得到不同砼强度加固梁的开裂、屈服、极限荷载值及荷载-挠度曲线(见表 7、图 8、图 9)。

表7 砼强度对加固梁性能的影响

加固梁模型	砼强度	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
TC30L2900	C30	40.7	102.6	132.9
TC40L2900	C40	43.1	110.5	146.5
TC50L2900	C50	46.7	118.0	170.2

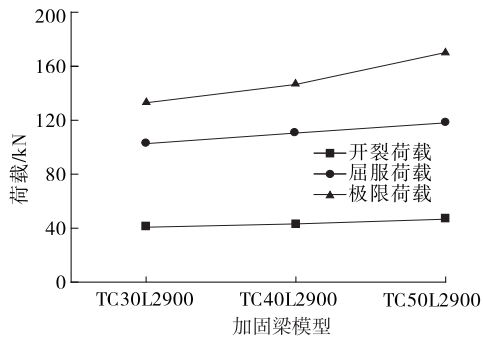


图8 不同砼强度加固梁的荷载值

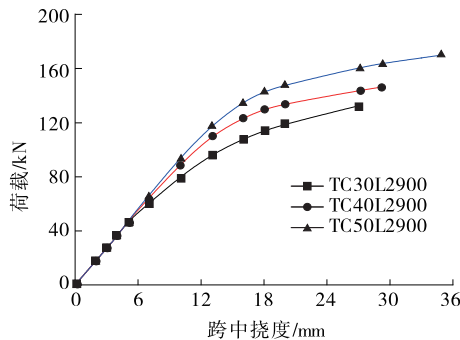


图9 不同砼强度加固梁的荷载—挠度曲线

从表7、图8、图9可看出:1) 在钢筋屈服以前,不同砼强度加固梁模型的荷载—挠度曲线基本重合,CFRP加固梁的刚度几乎不受砼强度的影响;但在钢筋屈服之后,随着砼强度的增加,CFRP加固梁的刚度明显增大。2) 随着砼强度的增加,最终变形明显增大,表明砼强度越大,CFRP加固梁的延性越好;砼强度从C30提高到C50,CFRP加固梁的屈服、极限荷载分别提高15.0%、28.1%。

4.5 槽边距离

在TC40L2900加固梁模型的基础上,对砼槽边距离进行调整,得到不同槽边距离加固梁的开裂、屈服、极限荷载值及荷载—挠度曲线(见表8、图10和图11)。

从表8、图10、图11可看出:1) 槽边距离20、30、40 mm加固梁的开裂、屈服荷载几乎相同,槽边距离20 mm加固梁的极限荷载小于槽边距离30、

表8 砼槽边距离对加固梁性能的影响

加固梁模型	槽边距离/mm	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
TC40GD20	20	43.2	110.3	125.3
TC40GD30	30	43.1	109.7	142.1
TC40GD40	40	43.1	110.5	146.5

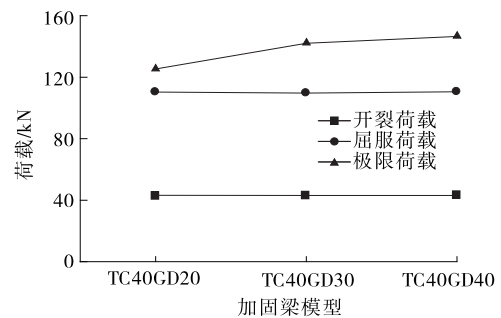


图10 不同槽边距离加固梁的荷载值

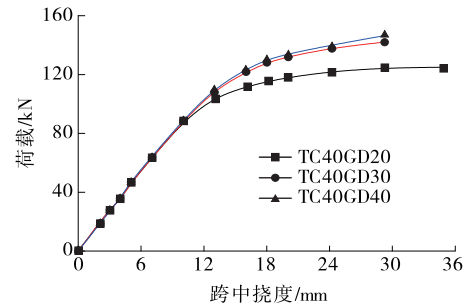


图11 不同槽边距离加固梁的荷载—挠度曲线

40 mm加固梁,表明在钢筋屈服之后,槽边距离过小会引起刚度不足,即砼对板条的约束减弱。2) 槽边距离30、40 mm加固梁的极限荷载值相差不大,表明在最小槽边距离30 mm的前提下,槽边距离大小对加固梁抗弯性能的影响不大;槽边距离从20 mm增大到40 mm,极限荷载值提高16.9%。

5 结论

(1) 采用CFRP加固钢筋砼梁,可提高砼开裂、屈服、极限荷载值及梁刚度,其中极限荷载值提高64.4%。

(2) 梁的损伤程度越大,加固梁刚度越小,变形越大;随着预加荷载值的增加,加固梁的屈服荷载、极限荷载不断减小,表明钢筋砼梁的损伤程度越小,CFRP加固梁的屈服荷载、极限荷载提高幅度越大;损伤程度从预加极限荷载值的0提高到70%,加固

(下转第151页)

切割多余钢筋,严禁撞击锚头。张拉灌浆后及时恢复槽口钢筋并封锚。

2.4 端横梁加长段施工

端横梁加长段施工流程为凿除原结构挡块(部分原结构没有)→施工放样→原结构砼钻孔→原结构基面凿毛、清洗→植筋→布置钢筋→立模板→预埋梁底上支座钢板→浇筑砼→养生。其中植筋、安装模板、砼浇筑和养生与新增盖梁施工工艺一致,不再赘述。

(1) 采用风镐凿除施工部位存在挡块的原结构,凿除至原结构盖梁或帽梁约 5 cm 时停止使用风镐,改用手持式电镐作业。凿除中注意避免伤及附近梁体结构。

(2) 施工放样。按设计尺寸和位置在原结构梁体(端横梁施工区内)面对植筋位置进行测量放样,并做好标记。

(3) 钻砼孔。采用钢筋探测仪对放样位置进行探测,重新标记所探测钢筋位置,并核对植筋部位,若与帽梁钢筋相冲突,则在原植筋位置旁稍作调整。

(4) 原结构表面凿毛。检查复核施工区内的植筋孔已全部钻孔完成且满足要求后,对原结构与新增部位的结合面采用人工辅以手持式电镐进行凿毛,形成凿毛深度不小于 6 mm 的粗糙面。

(5) 结合面处理及植筋清理。对凿毛表面进行检查,去除表面浮渣和松散物,保证施工基面和植筋孔无松散物、粉尘、油污和积水。为保证新旧砼间的

粘结性,在凿毛砼面上涂抹一层界面剂。

(6) 布设钢筋。按设计要求对各型号钢筋进行下料弯曲并编号。在施工现场逐根安装焊接形成整体,注意控制底层钢筋与底模之间的高度,确保新增盖梁底面保护层厚度。

(7) 注意事项。砼浇筑尽量连续,减少中断,浇筑完后及时养护。拆模时间根据气温和砼强度确定,拆模时砼块强度不低于设计强度的 70%。拆模时不得损坏砼的边、角,应保持模板完好并经常校验模板尺寸(每次使用前均应校验)。

3 结语

采用上述方法对韶赣高速公路独柱墩桥梁的独柱墩进行加固,提高了独柱墩桥梁的抗倾覆性,增强了桥梁的安全性,提高了桥梁的承载能力和通行能力,对提高桥梁的使用寿命也有一定帮助。

参考文献:

- [1] 李令喜.枝城长江大桥公路桥维修加固设计方案研究[J].中外公路,2013,33(5).
- [2] 生墨海.关于桥梁加固施工的一点探讨[J].公路交通科技:应用技术版,2012(7).
- [3] 李玲军.公路工程桥梁加固技术研究[J].交通世界,2012(1).

收稿日期:2017-05-05

(上接第 140 页)

梁的极限荷载值降低 19.7%。

(3) 随着 CFRP 板粘结长度的增加,加固梁的刚度、屈服、极限荷载明显提高;当加固梁达到极限荷载时,CFRP 板的强度被充分利用,强度利用率大大提高;粘结长度从 2 100 mm 提高到 2 900 mm,即粘结长度增加 38%,CFRP 加固梁的屈服荷载、极限荷载分别提高 54.3%、23.7%。

(4) 随着砼强度的增大,加固梁的刚度明显提高,屈服荷载、极限荷载值也明显增大;砼强度从 C30 提高到 C50,CFRP 加固梁的屈服荷载、极限荷载分别提高 15.0%、28.1%。

(5) 槽边距离过小会导致砼对 CFRP 板条的约束减弱,刚度减小;槽边距离从 20 mm 增大至 40 mm,极限荷载值增加 16.9%;在最小槽边距离为 30 mm 的条件下,槽边距离对加固梁抗弯性能的影响

较小。

参考文献:

- [1] 姚谏.FRP 复合材料加固混凝土结构新技术研究进展[J].科技通报,2004,20(3).
- [2] 尚守平.预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件受弯性能研究[J].建筑结构学报,2003,24(5).
- [3] 皮锐.表层嵌贴碳纤维加固混凝土梁的试验研究[D].上海:同济大学,2009.
- [4] 余江滔,刘媛,陆洲导,等.表层嵌贴碳纤维板条加固混凝土梁的抗弯试验研究[J].结构工程师,2011,27(2).
- [5] 谢建和.FRP 加固受损 RC 梁受弯剥离承载力预测模型[J].中国公路学报,2014,27(12).
- [6] 肖红菊,孙玉永.预应力碳纤维布加固损伤混凝土梁非线性有限元分析[J].预应力技术,2011(22).

收稿日期:2017-04-03