

复合材料加固混凝土桥梁结构有限元模拟

徐庆林, 曾竟成, 邬志华, 吴彬瑞

国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙 410073

摘要 复合材料胶接修复加固技术具有修复速度快、结构增重少、高效可靠等诸多优点, 已成为加固修补混凝土结构的新型技术。采用有限元方法, 对比分析了复合材料加固钢筋混凝土桥梁结构前后的力学性能, 并研究了复合材料粘贴面积、纤维铺层角度, 以及铺层材料及顺序对钢筋混凝土桥梁加固效果的影响。结果表明: 与加固前相比, 加固后混凝土桥梁内部的应力、应变及最大变形有明显降低, 最少可分别降低 60%, 56% 和 11%。且复合材料粘贴面积和纤维铺层角度对桥梁的加固效果有显著的影响, 而铺层材料及顺序对其加固效果则无明显影响。实验结果显示, 最佳加固方案为: 全部采用碳纤维复合材料、预浸料带数量为 5、纤维铺层角度为 $[0]_4$ 。该方案加固后桥梁内部的最大应力为 81.7 MPa, 最大应变为 0.27%, 最大变形为 15.96 mm。

关键词 复合材料; 加固; 钢筋混凝土桥梁; 有限元方法; 机械性能

由于自然灾害、车辆超载等因素的影响, 前期修建的混凝土桥梁已经出现不同程度的损坏, 导致承载能力下降等问题。如果将这些桥梁全部拆除新建, 不仅耗资巨大而且影响交通。为了让这些桥梁继续使用, 就需要进行加固, 从而延长桥梁的使用年限。

关于钢筋混凝土桥梁的加固, 传统方法主要有以下 3 种^[1]: 1) 改变结构体系类, 减小结构内力; 2) 增大结构横截面类, 提高结构承载力; 3) 增设受力构件类。由于碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有高强度、高比模量等十分优异的力学性能, 近几年 CFRP 修复加固技术已成为加固修补混凝土结构的新型技术^[2]。实施方法是用环氧树脂黏结剂将碳纤维布沿受拉方向或垂直裂缝方向粘贴在待补强的混凝土桥梁表面上, 形成新的复合体, 当在外力作用时, 增强贴片与原有钢筋混凝土结构共同受力, 使得原来的钢筋混凝土结构内部的应力因复合材料分担部分负荷而大为降低, 提高混凝土结构的承载能力, 从而达到对结构构件进行加固、补强的目的^[3-5]。与传统的混凝土结构加固技术相比, 复合材料修复加固技术具有高效高强、施工便捷、耐腐蚀性好及基本不改变尺寸和重量等优势, 近几年已经出现了很多利用该技术加固混凝土桥梁的实例^[6-8]。

国内外学者针对复合材料加固混凝土桥梁技术进行了大量的研究, 文献[9]和[10]结合工程实例介绍了 FRP 复合材料加固混凝土桥梁结构的可行性, 并分析了加固工艺的机

理; 文献[11]和[12]利用有限元分析软件 MIDAS, 建立有限元分析模型, 对桥梁进行了粘贴碳纤维布加固设计模拟分析, 提出了加固设计方案。文献[13]~[16]进行了大量的 FRP 复合材料加固混凝土结构的实验研究, 结果表明, 粘贴 FRP 复合材料后的混凝土结构的力学性能得到大幅度地提升, 并研究了结合界面, 给出了加固工艺机理的合理解释。综上所述, 前期研究工作基本都是关于复合材料加固混凝土桥梁结构的实验研究, 且仅局限于某一种加固方案的实验研究, 缺乏对加固影响因素的系统研究, 及从理论上分析指导加固方案的选择。本文针对前期研究存在的不足, 利用有限元分析方法, 研究复合材料粘贴面积、纤维铺层角度、纤维种类及铺层顺序对桥梁加固效果的影响, 以得到最佳加固效果的加固方案。

1 仿真模型

1.1 材料性能

桥梁主要由钢筋混凝土构成(钢筋体积分数为 5%), 加固材料为碳纤维复合材料和玻璃纤维复合材料, 具体性能参数如表 1 所示。表 1 中, E 为弹性模量, G 为剪切弹性模量, ν 为泊松比, ρ 为密度。

1.2 有限元模型

采用通用有限元分析软件 ANSYS 建立复合材料加固钢筋混凝土桥梁结构有限元模型, 其中, 桥梁结构尺寸为

收稿日期: 2016-03-25; 修回日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51303208, 51403235, 11202231)

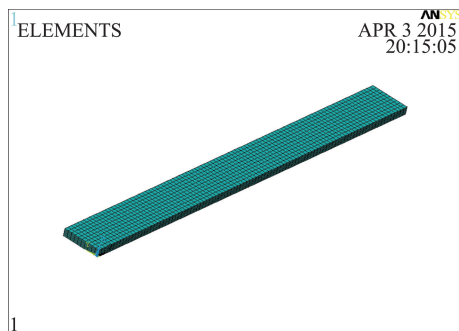
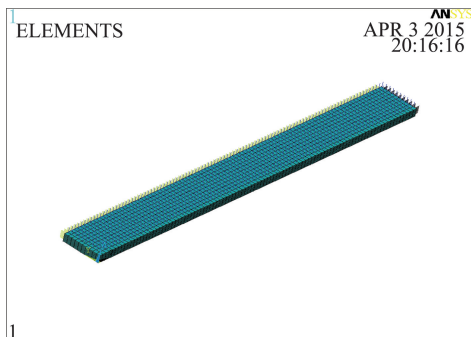
作者简介: 徐庆林, 硕士研究生, 研究方向为高分子复合材料, 电子信箱: csuxql@163.com; 曾竟成(通信作者), 研究员, 研究方向为聚合物基复合材料, 电子信箱: 283174621@qq.com

引用格式: 徐庆林, 曾竟成, 邬志华, 等. 复合材料加固混凝土桥梁结构有限元模拟[J]. 科技导报, 2016, 34(8): 84-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.08.014

表 1 材料性能
 Table 1 Material properties

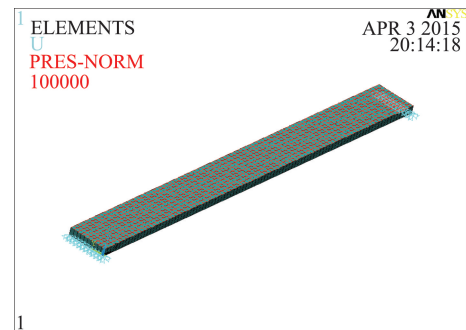
材料	E_1/GPa	$E_2(E_3)/\text{GPa}$	$G_{xy}(G_{xz})/\text{GPa}$	G_{yz}/GPa	$\nu_{xy}(\nu_{xz})$	ν_{yz}	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3})$
混凝土	30	—	—	—	0.2	—	2500
钢	210	—	—	—	0.3	—	7800
碳纤维复合材料	138	8.3	6.9	3.6	0.33	0.37	1600
玻璃纤维复合材料	47.5	16	3	2.5	0.29	0.29	1900

1000 mm×100 mm×20 mm(长×宽×厚);加固用复合材料预浸料带尺寸为1000 mm×20 mm×1 mm,粘贴在混凝土桥梁的下表面,远离桥梁下表面的为纤维铺层的第一层,通过改变预浸料带的使用数量改变复合材料的粘贴面积,使用的预浸料带数量越多,说明粘贴复合材料的面积越大。对建立的几何模型进行网格划分,并全部采用三维实体单元,其中桥梁结构选用软件特定混凝土单元 SOLID65;复合材料结构则选用正交各向异性单元 SOLID46。网格划分过程中,设置实体单元长、宽方向尺寸为10 mm,桥梁单元厚度方向为2 mm,复合材料单元厚度方向为1 mm,划分得到的有限元模型如图1所示,该模型节点总数为13332个,单元总数为11000个。另外,对复合材料单元坐标系进行调整,设置桥梁长度方向为单元坐标系 X 轴,即复合材料纤维方向;厚度方向为 Z 轴,即复合材料铺层方向(图2)。


 图 1 有限元模型
 Fig. 1 Finite element model

 图 2 单元坐标系
 Fig. 2 Element coordinate system

1.3 边界条件

考虑到实际生活中,桥梁两端被固定在地面上,故论文中对模型两端施加固支约束条件,即将有限元模型中复合材料底面两端节点 X 、 Y 、 Z 3 个方向的位移都设置为零;另外,在钢筋混凝土桥梁顶面施加 0.1 MPa 的均布载荷(图3)。

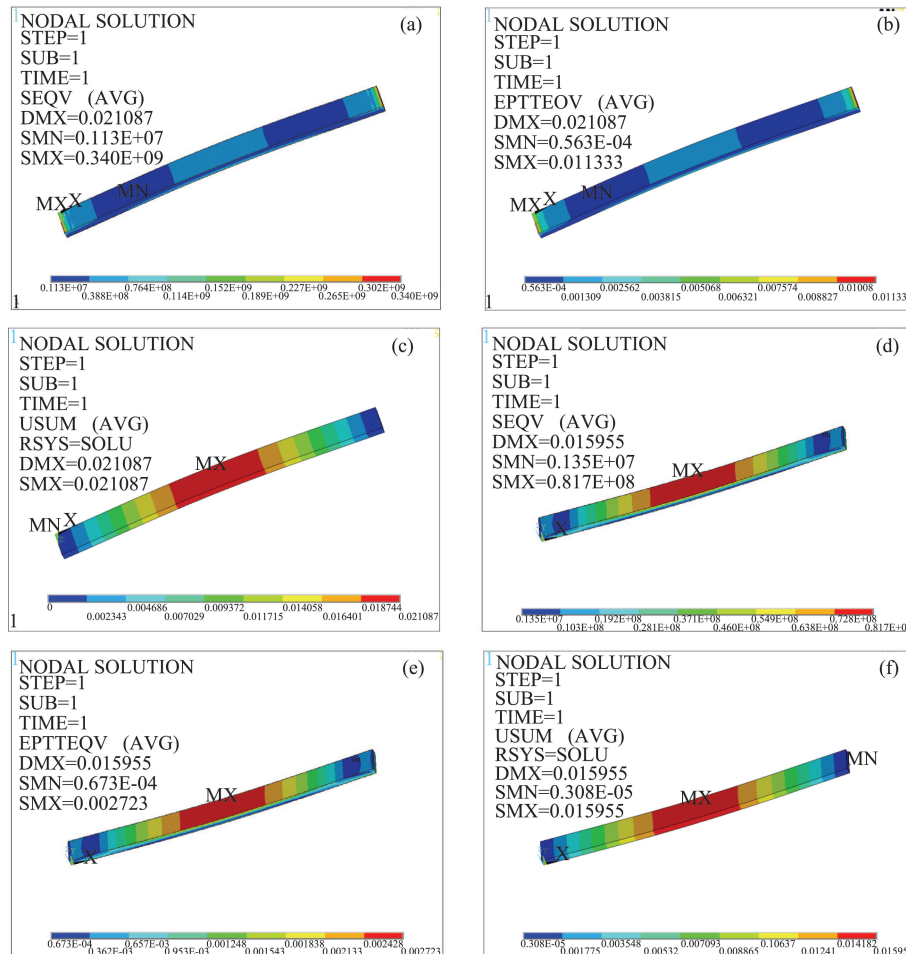

 图 3 边界条件
 Fig. 3 Boundary conditions

2 结果与分析

通过计算求解,得到混凝土桥梁加固前后在均布载荷工况和两端固支约束条件下的应力、应变及变形分布等值线图,如图4所示。由图4可知,桥梁内部应力、应变及变形沿其长度方向均呈对称分布,且加固对桥梁内部最大应力、最大应变及最大变形都有明显影响。加固前,最大应力和最大应变均出现在桥梁下表面的支点处;而加固后,最大应力和最大应变则出现在桥梁上表面沿长度方向的中间区域,且最大应力和最大应变值明显降低。加固对最大变形的的位置无影响,但加固后的最大变形明显减小。因此,复合材料能够降低桥梁内部的应力应变水平,从而提高桥梁的承载能力,起到加固作用。

2.1 复合材料粘贴面积对加固效果的影响

计算了0、2、3、5条预浸料带对桥梁加固效果的影响,其计算结果列于表2中。由表2可知,复合材料粘接面积对加固后桥梁内部的最大应力(σ_{\max})、应变(ϵ_{\max})及变形(d_{\max})有明显影响,且三者均随粘接面积(即复合材料预浸料带数量)的增加而减小。与未加固桥梁相比,采用2条复合材料预浸料带加固后,其最大应力、应变及变形分别降低了60%、56%、11%;采用3条复合材料预浸料带加固后,其最大应力、应变



修复前:(a)应力;(b)应变;(c)变形
修复后:(d)应力;(e)应变;(f)变形

图4 混凝土桥梁加固前后应力、应变及变形分布

Fig. 4 The stress, strain and deformation of the unstrengthened and strengthened bridge

表2 粘贴面积对桥梁加固效果的影响

Table 2 Effect of the quantities of the prepreg tape on the properties of the strengthened bridge

预浸料带数量	σ_{max}/MPa	$\varepsilon_{max}/\%$	d_{max}/mm
0	340	1.13	21.09
2	136	0.50	18.72
3	101	0.37	17.38
5	81.7	0.27	15.96

注:复合材料预浸料为CFRP,铺层角度为0°。

及变形分别降低了70%、67%、18%;采用5条复合材料预浸料带加固后,其最大应力、应变及变形分别降低了76%、76%、24%。从中可以看出,随着复合材料预浸料带使用数量的增加,加固后桥梁内部的最大应力、应变及变形降低的幅度越来越小。因此,在能够满足桥梁加固要求的前提下,可以减

少复合材料预浸料带的使用数量,即减小复合材料粘接面积,从而节省加固费用和成本。

2.2 铺层角度对加固效果的影响

计算了铺层角度为[0]_s、[0/30]_s、[0/45]_s、[0/60]_s、[0/90]_s复合材料对桥梁加固效果的影响,计算结果列于表3中。

表3 铺层角度对桥梁加固效果的影响

Table 3 Effect of the fiber orientation on the properties of the strengthened bridge

铺层角度	σ_{max}/MPa	$\varepsilon_{max}/\%$	d_{max}/mm
[0] _s	81.7	0.27	15.96
[0/30] _s	101	0.34	16.83
[0/45] _s	106	0.35	17.09
[0/60] _s	103	0.34	17.24
[0/90] _s	89.7	0.30	17.37

注:复合材料预浸料为CFRP,预浸料带数量为5。

由表3可知,纤维铺层角度对加固后桥梁内部的最大应力、应变及变形同样具有显著影响,且随着中间两层铺层角度的增大,最大应力、应变先增大后减小,而最大变形随着铺层角度的增大一直增大。这主要是因为:随着铺层角度的增加,复合材料加固桥梁整体结构的刚度不断降低,其抵抗变形的能力也随之减弱,桥梁结构的挠度变大。与加固前桥梁相比,当铺层角度为 $[0]_4$ 时,其最大应力、应变及变形分别降低了76%、76%、24%;当铺层角度为 $[0/30]_4$ 时,其最大应力、应变及变形分别降低了70%、70%、20%;当铺层角度为 $[0/45]_4$ 时,其最大应力、应变及变形分别降低了69%、69%、19%。因此,当确定第1层和第4层铺层角度都为 0° 时,中间两层纤维平行于桥梁长度方向的加固效果最好。

2.3 铺层材料对加固效果的影响

计算了碳纤维复合材料(C)和玻璃纤维复合材料(G)等铺层材料对桥梁加固效果的影响及碳/玻混杂复合材料的铺层顺序对桥梁加固效果的影响,其计算结果列于表4中。由表4可知,铺层材料对桥梁加固效果具有显著的影响,而材料铺层顺序对桥梁加固效果的影响则相对较小。与未加固桥梁相比,全部采用碳纤维复合材料加固后,其最大应力、应变及变形分别降低了76%、76%、24%;而全部采用玻璃纤维复合材料加固后,其最大应力、应变及变形分别降低了74%、74%、12%。从中可以看出,碳纤维复合材料对桥梁的加固效果比玻璃纤维复合材料的加固效果好,且改变铺层材料时,桥梁内部最大应力、应变变化不大,而最大变形则明显改变,这主要是因为CFRP模量比GFRP高。

表4 铺层材料及顺序对桥梁加固效果的影响
Table 4 Effect of the material type and the lay-up sequence on the properties of the strengthened bridge

铺层材料顺序	σ_{\max}/MPa	$\varepsilon_{\max}/\%$	d_{\max}/mm
C/C/C/C	81.7	0.2723	15.96
G/G/G/G	88.9	0.2965	18.61
C/C/G/G	85.0	0.2833	16.91
C/G/C/G	84.7	0.2824	16.93
C/G/G/C	84.5	0.2817	16.94
G/C/C/G	84.7	0.2823	16.96
G/C/G/C	85.0	0.2833	16.98
G/G/C/C	85.4	0.2848	17.02

注:预浸料带数量为5,且铺层角度为 0° 。

另外,当碳/玻混杂复合材料2种纤维各占1/2时,改变纤维的铺层顺序,结果发现加固后的桥梁内部最大应力、应变及变形变化不大,说明材料铺层顺序对桥梁加固效果影响不大。但是,加固后桥梁内部最大应力、应变及变形则随着碳纤维的铺层位置表现出一定的规律性,即当碳纤维复合材料与桥梁底面之间的总距离减小时,最大应力和应变呈现出先

降低后增大的变化趋势,而最大变形则一直增加。当铺层顺序为C/C/G/G时,加固后的最大变形值最小,而铺层顺序为G/G/C/C时,加固后的最大变形值最大。因此,碳纤维与桥梁底面的距离越大,其加固效果越好。

3 结论

利用有限元方法(FEM)模拟计算了复合材料加固钢筋混凝土桥梁结构的应力、应变及变形分布情况,并比较了复合材料粘接面积、纤维铺层角度及铺层材料及顺序等因素对加固效果的影响。

1) 加固前,混凝土桥梁内部最大应力为340 MPa、最大应变为1.13%、最大变形为21.09 mm;CFRP加固后,其最大应力、应变及变形最少可分别降低60%、56%、11%。

2) 复合材料粘贴面积和纤维铺层角度对桥梁加固效果具有显著影响,而铺层材料及顺序对加固效果的影响不明显。且随着粘贴面积增加,桥梁内部最大应力、应变及变形逐渐减小,加固效果变好;随着中间纤维铺层角度增大,桥梁内部最大应力、应变先增大后减小,而最大变形一直增大。

3) 最佳加固方案为:全部采用CFRP、预浸料带数量为5、纤维铺层角度为 $[0]_4$,该方案加固的桥梁内部最大应力为81.7 MPa、最大应变为0.27%、最大变形为15.96 mm,比未加固的桥梁分别降低了76%、76%、24%。

参考文献(References)

- [1] 魏洋, 吴刚, 张敏. FRP网格加固桥梁水下结构技术研究与应用[J]. 施工技术, 2014, 43(22): 73-75.
Wei Yang, Wu Gang, Zhang Min. Study and application of technology of FRP grids reinforced underwater bridge structures[J]. Construction Technology, 2014, 43(22): 73-75.
- [2] Kaiser H, Karbhari V M. Identification of potential defects in the rehabilitation of concrete structures with FRP composites[J]. International Journal of Material Produce Technology, 2003, 19(6): 498-502.
- [3] Karbhari V M, Navada R. Investigation of durability and surface preparation associated defect criticality of composites bonded to concrete[J]. Composites A, 2008, 39(6): 997-1006.
- [4] Mirmiran A, Shahawy M, Karbhari V M, et al. Bonded repair and retrofit of concrete structures using FRP composites[J]. Transportation Research Board, 2004(6): 45-48.
- [5] Karbhari V M, Engineer M. Investigation of bond between concrete and composites: use of a peel test[J]. Reinforced Plastic Composites, 1996, 15(2): 20-24.
- [6] 白海斌. 碳纤维新技术在桥梁加固工程中的应用[J]. 山西建筑, 2012, 38(18): 179-180.
Bai Haibin. On application of carbon fiber new technique in bridge consolidation project[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(18): 179-180.
- [7] 吴红林, 黄侨, 王彤. 纤维复合材料在加固混凝土桥梁中的应用研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2004(2): 39-41.
Wu Honglin, Huang Qiao, Wang Tong. Application and study of composites in bridge rehabilitation[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2004(2): 39-41.
- [8] Aidoo J, Harries K A, Petrou M F. Full-scale experimental investiga-

- tion of repair of reinforced concrete interstate bridge using CFRP materials[J]. Bridge Engineering, 2006(11): 350-356.
- [9] 胡菊, 唐翔, 张亚军. FRP 复合材料加固钢筋混凝土桥梁的分析探讨[J]. 山西建筑, 2007, 33(12): 267-268.
Hu Ju, Tang Xiang, Zhang Yajun. Analysis on Fiber Reinforced Polymer (FRP) composite material in reinforcement of RC bridge[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(12): 267-268.
- [10] 曹兴, 魏洋, 李国芬等. 钢筋混凝土桥墩加固与修复技术研究[J]. 施工技术, 2011, 40(346): 60-64.
Cao Xing, Wei Yang, Li Guofen, et al. Research on the reinforcement and the repair techniques for RC bridge piers[J]. Construction Technology, 2011, 40(346): 60-64.
- [11] 奉江, 肖光辉. 采用 MIDAS 软件分析碳纤维加固钢筋混凝土梁[J]. 四川建筑, 2011, 31(5): 181-182.
Feng Jiang, Xiao Guanghui. Analysis on carbon fiber reinforcement of RC beams with MIDAS software[J]. Sichuan Architectural, 2011, 31(5): 181-182.
- [12] 蒋涛, 曹峰铭. 基于 Midas 的桥梁加固模拟分析[J]. 企业技术开发, 2010, 29(9): 15-17.
- Jiang Tao, Cao Fengming. The simulation analysis of the bridge strengthening based on Midas[J]. Technological Development of Enterprise, 2010, 29(9): 15-17.
- [13] Karbhari V M, Ghosh K. Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges[J]. Composites A, 2009(40): 1353-1356.
- [14] Hollaway L C, Zhang L, Photiou N K. Advances in adhesive joining of Carbon Fibre/Polymer composites to steel members for repair and rehabilitation of bridge structures[J]. Advances in Structural Engineering, 2006, 9(6): 791-792.
- [15] Liu X, Silva P R, Nanni A. Rehabilitation of steel bridge members with FRP composite materials[J]. Composites in Construction, 2001, 7(3): 613-617.
- [16] Mertz D, Gillespie J. Rehabilitation of steel bridge girders through the application of advanced composite material[J]. Transportation Research Board, 1996(3): 11-14.

Finite element simulation of the RC bridge structure strengthened with composites

XU Qinglin, ZENG Jingcheng, WU Zhihua, WU Binrui

College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract The composite adhesive repairing and strengthening technology has many advantages such as fast fix speed, less weight gain, high efficiency and reliability et al., which has become a new technology for repairing and strengthening the concrete structure. In this study, the mechanical properties of the unstrengthened and strengthened RC bridge structures were analyzed and compared by using finite element method (FEM). Besides, the effect of the quantities of the prepreg tape, the fiber orientation, the material type and the lay-up sequence on the mechanical properties of the composites strengthened RC bridge structures were studied. The simulation results show that the internal maximum stress, maximum strain and maximum deformation of the strengthened RC bridge structure decreased clearly, which least can decreased by 60%, 56% and 11%, respectively, in comparison to the unstrengthened RC bridge structure. Furthermore, it is found that the mechanical properties are obviously influenced by the quantities of the prepreg tape and the fiber orientation, but slightly influenced by the material type and the lay-up sequence. The best reinforcement scheme is that lay-up material all adopt CFRP, 5 prepreg tapes, $[0]_4$ lay-up angle. For this strengthened RC bridge structure, the maximum stress, maximum strain and maximum deformation of the bridge is 81.7 MPa, 0.27% and 15.96 mm, respectively.

Keywords composite; strengthen; RC bridge; finite element method; mechanical property

(编辑 田恬)