

基于片材加固技术的当涂路景观桥 牛腿裂缝加固三维有限元分析

王晓睿^{1,2}, 贾晓凤², 万云东¹

(1 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074 2 南阳理工学院 土木工程系, 河南 南阳 473004)

摘要: 采用适当的加固措施对在役混凝土桥梁进行加固是解决桥梁结构通行能力不断下降与通行需求持续增长之间矛盾的有效途径. 片材加固技术, 由于其材料的杰出力学性能及施工简便等特点, 在我国已被广泛应用于危旧桥梁的加固改造, 也迅速成为国内外加固研究领域的热点. 通过对合肥市当涂路桥牛腿裂缝诊断分析, 提出外贴钢片的加固方案, 并基于非线性有限元法基本理论, 对加固方案进行三维数值分析, 给出了片材加固后的牛腿裂纹尖端应力的效果分析. 数值算例验证了片材加固方案的可行性.

关键词: 桥梁; 片材加固; 有限元分析; 牛腿

中图分类号: TU 375. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 855X (2008) 06- 0061- 05

Three Dimensional Finite Element Analysis of Crack in Corbel of Bridge of Dangtu Road in Hefei Based on Sheet Materials Reinforcement Technology

WANG Xiao-rui^{1,2}, JIA Xiao-feng², WANG Yun-dong¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Department of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang Henan 473004, China)

Abstract To rehabilitate or strengthen bridges in service is a feasible way to deal with the contradiction between the decreasing bearing capacity and the increasing demand. Sheet materials reinforcement technology, which is widely applied to reinforce dangerous bridges, becomes the focus of strengthening the research field both at home and abroad rapidly due to its outstanding mechanical property and handy construction. Through examining and analyzing the crack in corbel of bridge of Dangtu road in Hefei, a strengthening scheme to paste the steel plate is put forward. The theory of non-linear finite is adopted to analyze the scheme with three dimensional finite element. The result of stress at the crack point which has been reinforced is also made clear. Finally, the feasibility of this scheme is proved through numerical examples.

Key words bridge; sheet materials reinforcement; finite element analysis; corbel

0 引言

随着我国进入基础设施建设高峰期和经济发展的黄金期, 对一些已建桥梁的承载能力提出了更高的要求^[1-2]. 部分桥梁需拆毁重建, 但采用适当的加固措施对在役混凝土桥梁进行加固是解决桥梁结构通行能力不断下降与通行需求持续增长之间矛盾的有效途径, 更符合我国公路交通的发展战略. 20 世纪 70 年代起, 我国开始对旧桥加固技术进行研究, 总的看来, 混凝土桥梁上部结构加固方法从加固原理和适用特点上可分为五类: 一是改变结构受力体系; 二是承重构件减载; 三是增大构件的截面; 四是外加预应力体系; 五是增补加劲材料^[3].

收稿日期: 2008- 04- 09. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (项目编号: 50609028).

第一作者简介: 王晓睿 (1975-), 男, 博士研究生. 主要研究方向: 深埋长隧道围岩变形. E-mail: wxru203@163.com

片材加固技术(粘贴钢板或纤维),由于其材料的杰出力学性能及施工简便等特点,迅速成为国内外加固研究领域的热点,在我国已被广泛应用于危旧桥梁的加固改造中^[4].但迄今为止,在我国的危旧桥加固改造的设计、施工中,还没有针对桥梁结构的规范标准可以依据.由于受到试验规模及资料共享问题的制约,目前所取得的研究成果,特别是试验成果还带有较大的片面性^[5-7].其理论分析和数值模拟尚在不断深入研究中.本文通过对待加固桥梁进行实际诊断,提出外贴钢片的修复方案,并使用非线性有限元 ANSYS 为工具,应用混凝土单元、单元接触分析等功能,对加固过程进行模拟,给出一种有效模拟片材加固钢筋混凝土梁的数值分析方法.通过与试验对比表明,本文所提方案合理有效、经济实用,并为钢筋混凝土 T 梁桥的片材加固提出了一个较为全面的应用指导.

1 工程背景

合肥当涂路桥位于合肥市外环线主干道,跨越南淝河,竣工于 1997 年 6 月.桥梁全长 230m,宽 43m,为 5 孔对称布置的箱形钢筋混凝土拱桥:第 1 第 5 跨为 30m 的上承式拱,第 2 第 4 跨为 50m 的中承式拱,第 3 跨为 70m 的中承式拱,每跨横向均为 3 片拱肋;该桥下部结构均为钻孔灌注桩基础、轻型墩台.

设计荷载:快车道为汽车 - 20 级、挂 - 100 级,慢车道为汽车 - 10 级,人群荷载为 4kN/m^2 ;抗震基本烈度为 7 度.

通过对该桥所有横梁检测,发现桥梁的主要病害如下:

1) 部分横梁底面存在顺梁长方向的水平裂缝,裂缝长度为 1.0~3.5m,裂缝宽度为 0.05~0.25mm,产生原因为预应力横梁外侧封锚混凝土存在斜裂缝(桥面板挤压横梁挡块混凝土所致),雨水通过该裂缝渗入梁体内部,锈蚀预应力管道从而胀裂混凝土,严重者裂缝处存在钟乳现象.由于该构件为预应力结构,因此建议对存在该类裂缝的横梁进行封闭并加固补强,对所有横梁外侧封锚混凝土重新浇筑.另中孔西半幅 1# 横梁的底面有严重的混凝土蜂窝空洞和脱落情况,为施工过程中振捣不实所致,需予以修补.部分横梁翼缘和腹板交界处发现存在长 0.2~1.5m 的顺梁长方向的水平裂缝,裂缝宽度为 0.08~0.25mm,最大深度为 6mm,该裂缝为横梁浇筑后混凝土凝固时造成的沉缩裂缝,对该裂缝只需予以封闭即可.

2) 大多数横梁端部的上牛腿腋部有斜裂缝,裂缝方向与水平方向夹角为 $30^\circ\sim 70^\circ$,裂缝长度为 5~22cm,裂缝宽度为 0.1~0.3mm,部分横梁斜裂缝在其两侧面对称存在;在对横梁的加载试验过程中该裂缝宽度扩展,卸载后基本恢复;综上所述,可判断该类裂缝为受力裂缝,必须对该裂缝进行加固补强.

2 加固方案

根据《合肥市当涂路桥维修加固设计》通过对病害分析对牛腿采取钢板加固,加固方案如下:

方案(1):采用 U 形钢板对产生裂缝的牛腿局部进行加固,钢板加固的具体尺寸和位置见图 1,左右牛腿加固钢板见图 2 和图 3

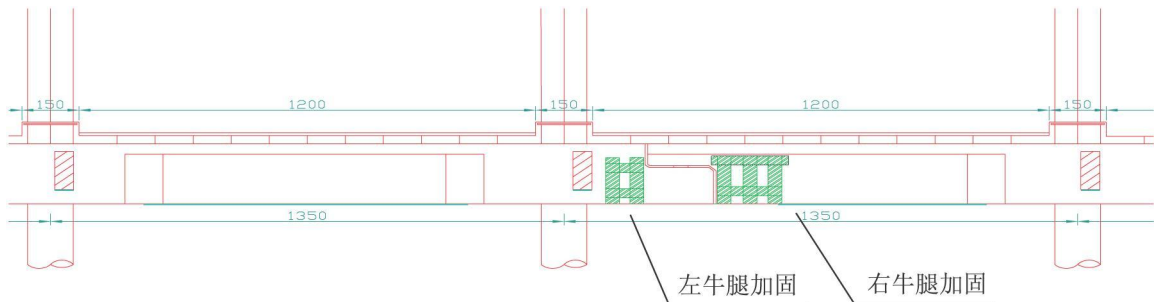


图1 桥梁加固位置示意图

Fig.1 Place of bridge reinforcement

方案(2):将方案一中的 U 形钢板除出底部的钢板,钢板尺寸和位置与方案(1)相同.

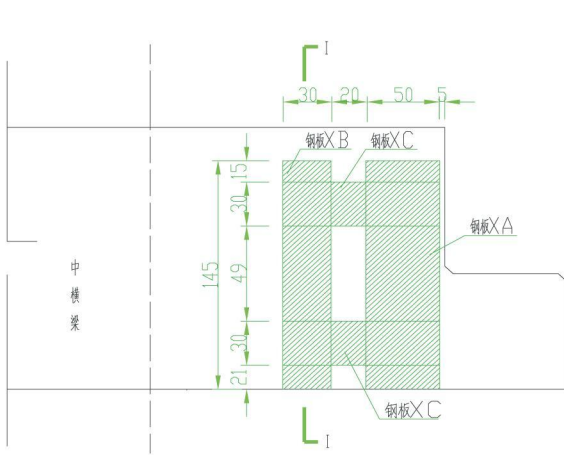


图2 左牛腿加固
Fig.2 Reinforcement of left corbel

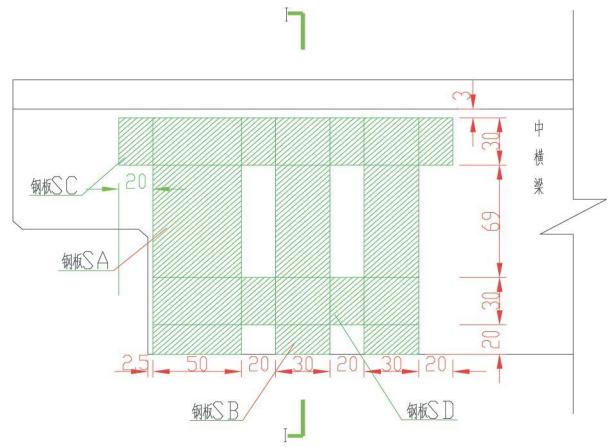


图3 右牛腿加固
Fig.3 Reinforcement of right corbel

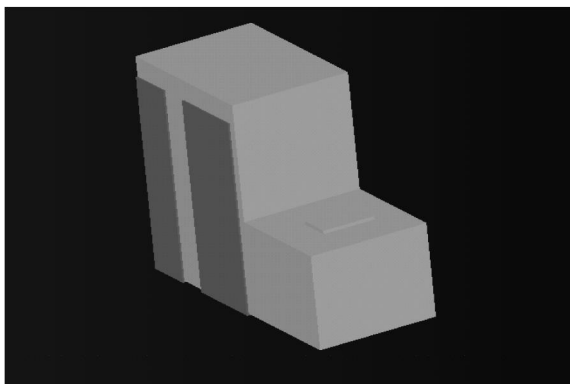
3 有限元计算模型

钢筋混凝土结构有限元分析模型通常有三种形式: 分离式模型、组合式模型和整体式模型. 本文主要分析加固前后梁的整体性能及牛腿的局部力学性能, 钢筋混凝土选用整体模型能满足计算要求. 在整体式有限元模型分析中, 钢筋弥散于整个单元中, 单元被视为连续均匀材料^[9]. 本文采用大型有限元通用程序 ANSYS 对于钢筋混凝土模型, 采用的是钢筋与混凝土分离式模型. 钢筋采用的是 link8 单元, 为三维杆单元; 混凝土选用的是 solid65 单元模拟, 该单元是 ANSYS 中三维钢筋混凝土实体单元; 而钢板是 solid45 单元, 是一种八节点三维结构实体单元, 每个节点有三个自由度, 即沿节点坐标系 x , y , z 方向的平动.

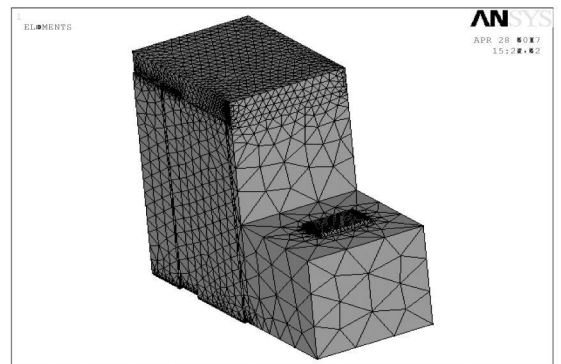
有限元分析中材料常数根据试验并参考相关规范取值. 50号混凝土的弹性模量 E_c 和抗拉强度 f_t 根据混凝土设计规范中规定分别取值为 $3.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 和 3.0 N/mm^2 . 混凝土开裂裂缝剪力传递系数和闭合裂缝剪力传递系数分别取为 0.1 和 0.5 开裂后刚度折减系数取程序默认值 0.6 由于所用受力钢筋绝大部分为 II 级钢筋, 取其弹性模量为 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$.

加固用的钢板为低碳钢板, 加固钢板的厚度为 12 mm, 材料弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比为 0.28

左牛腿局部加固后的有限元模型及应力云图见图 4 和图 5

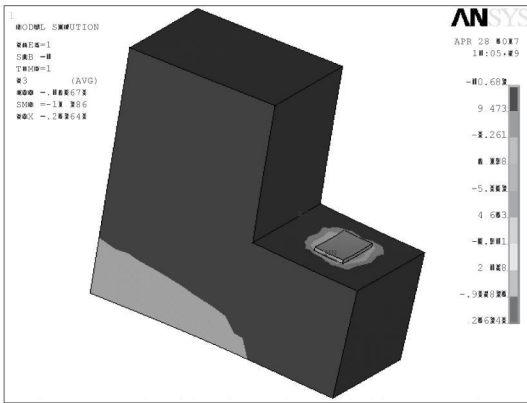


(a)左牛腿加固有限元模型图

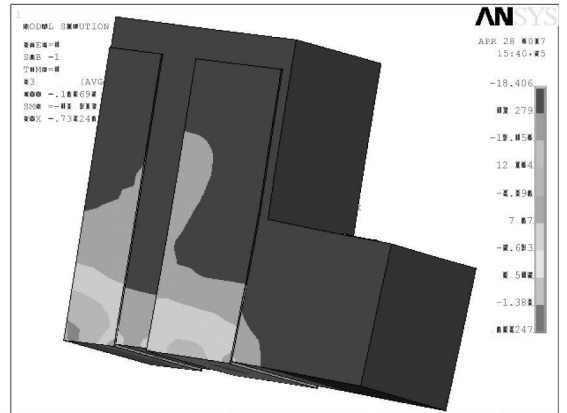


(b)左牛腿加固有限元网格划分图

图4 左牛腿加固有限元模型
Fig.4 Finite element model of reinforced left corbel



(a)左牛腿加固前应力云图



(b)左牛腿加固后应力云图

图5 左牛腿加固前后应力云图

Fig.5 Stress diagram of reinforced left corbel

4 结果分析

在活荷载作用下左牛腿的应力集中处节点主应力分布见表 1 从表 1 中可以看出,该桥在左牛腿部位应力集中较严重,部分区域已经超过混凝土的抗拉强度,加固前的最大拉应力为已经超过 3 MPa(出现在转角处),一些节点应力超过了所能承受的极限主拉应力,证明已经被拉裂了,同时裂纹继续沿 45°方向扩展,与实际情况相同.表 2 所示的右牛腿的拉应力更大,说明其裂缝出现的更多,这也与实际的观察结果相同.利用钢板加固后,可以显著降低钢筋混凝土在原 45°方向应力,使其在抗拉强度之内.但是也有的节点应力有所增加(例如 42号节点),这是由于钢板使原来高应力区应力重新分布的结果.但钢板的存在阻止了裂纹的进一步扩展,钢板承受了原来的高应力载荷,显著改善结构的节点受力状况.

表 1 左牛腿加固前后应力集中节点的主应力分布

Tab 1 Principal stress distribution of spot with stress concentration at reinforcing left corbel

NODE	加固前			加固后		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
8	2.5624	0.2231	0.1077	1.3326	0.02524	-0.0618
63	3.1571	0.2251	0.1588	0.97895	0.00107	-0.12949
62	3.1013	0.2203	0.1086	0.85017	0.01445	-0.03896
40	2.3449	0.2571	-0.0618	1.0065	0.00741	-0.21548
42	0.9396	0.0701	-0.2946	1.1027	0.00412	-0.13863
41	0.3592	-0.0104	-0.7619	1.0128	0.00994	-0.03806
37	0.1746	-0.0161	-1.3692	1.4223	-0.01864	-0.05384

表 2 左牛腿在有底部钢板情况下应力对比

Tab 3 Comparison of different stresses between with and without steel plate at floor in left corbel

无底部钢板加固				U型钢板加固			
NODE	S1	S2	S3	NODE	S1	S2	S3
1115	3.3712	0.3360	0.0993	1820	3.0562	0.3048	-0.0106
1310	3.9397	0.3311	0.2273	2008	3.4541	0.1830	0.0457
1309	3.7814	0.3551	0.2011	2007	3.5465	0.2495	0.1683
1245	3.0369	0.4012	0.1448	1875	2.9922	0.3612	0.1198
1252	1.3463	-0.0229	-0.3432	1882	1.3249	-0.0092	-0.2668
1251	0.7738	-0.0365	-0.9622	1881	0.7181	-0.0301	-0.9031
1250	0.3831	-0.0469	-1.3958	1880	0.3565	-0.0398	-1.3152

表 2 分别给出左牛腿加底板和不加底板的情况下的各主要点的应力对比情况. 通过对比节点应力可以发现, 在去掉底部钢板前, 总体上应力虽然都有一定的增加, 但应力大小变化不是太大, 去掉底部钢板则可以节省钢材.

在本文尚存在一些地方值得改进: 在实际情况中, 无论是钢筋与混凝土, 还是钢板与混凝土, 它们之间都存在相对滑移的. 而本文一开始就作了钢筋、钢板与混凝土之间在任何情况下都变形协调的假设, 所以, 模型中钢筋单元、钢板单元与混凝土单元只是通过简单地相邻节点的连接来实现的. 如果考虑混凝土和钢筋之间的相对滑移, 考虑到粘结力可能发生破坏, 那么还得引入另一种能反映钢筋与混凝土两者间界面性能的单元, 即联结单元. 根据目前反映两者间界面性能参数的研究工作的进行, 我们会建立更为符合实际情况的模型来指导我们的设计.

5 结 论

(1) 通过 ANSYS 整体分析可以看出, 结构整体受力满足使用要求, 应力位移均在允许范围之内, 而应力最大的部位在牛腿搭接处, 通过对比实际开裂, 加固此桥牛腿搭界处是合理的.

(2) 通过左右牛腿局部分析表明, 采用设计加固方法加固可以阻止原 45° 处裂缝的扩展, 可以明显改善此部位的应力状况. 加固后, 该部位应力均在混凝土抗拉强度之内, 但在牛腿搭接变截面处应力集中问题加剧, 加固后在此处应力均有不同程度的变大, 应采取措施, 防止加固后可能会产生的横梁截面竖向裂缝.

(3) 通过对比有无底板, 无底板时应力有少量增大, 但整体变化不是太大. 而去掉底板可以节省钢材, 施工相对容易, 同时还可以减少造价, 因而建议采用无底部钢板加固方案.

参考文献:

- [1] CECS 25-90 混凝土结构加固技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1991.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50010-2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] Meier U, Dearing M, Meier H, Schwegler G, et al. A. Nanni (Ed.). Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Properties and Applications Elsevier Science, 1993.
- [4] 杨文渊, 徐稗. 桥梁维修与加固 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [5] 杨晓丹. 外粘钢板加固混凝土梁的性能分析 [J]. 低温建筑技术, 2001, (2): 26-21.
- [6] 匡志平, 王皓波. 用碳纤维加固桥梁的现场试验研究 [J]. 同济大学学报, 2002, 30(2): 146-150.
- [7] 张立师, 朱小苏, 荣海北. 碳纤维在三河闭牛腿加匀中的应用 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 81-82.
- [8] 毛瑞祥, 程翔云. 公路桥涵设计手册——基本资料 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [9] Ngo D, Soordelis A C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams [J]. Journal of ACI, 1967, 64(3): 152-163.