

基于 ANSYS 的扁平箱梁桥粘贴钢板 加固方案优化研究

张宪堂¹, 黄锦梅¹, 邹 鹏², 周红敏¹

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 威海建设集团股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘 要:结合青岛市某主干道立交桥扁平箱梁桥加固工程,用有限元分析软件 ANSYS 对扁平箱梁的主梁粘贴钢板加固技术进行了数值模拟分析。通过比较不同加固方案加固前后的应力、位移等分布变化规律,评价各方案的加固效果,并最终得出最优加固方案。结果表明:三种粘贴钢板加固方案都能够显著增强桥梁的承载能力,其中 C 型方案加固效果最好。并将模拟结果与理论计算值进行了比较,分析了误差原因。

关键词:桥梁工程;扁平箱梁;粘贴钢板;加固;方案优化

中图分类号:TV139.2

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)04-0058-07

Scheme Optimization of Reinforcement of Flat Box Girder Bridge with Bonding Steel Plate Based on ANSYS

Zhang Xiantang¹, Huang Jinmei¹, Zou Peng², Zhou Hongmin¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Weihai Construction Group Co. Ltd, Weihai, Shandong 264200, China)

Abstract:Based on the strengthening engineering of a main road overpass of flat box girder in Qingdao, a numerical simulation was carried out on the main girder reinforced with steel plate. With comparing the distribution law of stress and displacement in different reinforcement schemes, the reinforcement effect of each scheme was evaluated, and the best reinforcement scheme was determined. The results shows that all the three bonding steel reinforcement schemes can significantly enhance the bearing capacity of the bridge, and scheme C has the best reinforcement effect. Finally, the simulation results were compared with the calculation results and the causes of error were analyzed.

Key words:bridge engineering; flat box girder bridge; bonding steel plate; reinforce; scheme optimization

粘贴钢板加固技术是目前广泛应用的桥梁加固技术,试验分析和工程应用表明该技术可有效改善被加固桥梁的结构性能,提高桥梁承载能力和通行能力。与增加梁截面加固、体外预应力加固、增加辅助构件加固等方法相比,该方法具有不破坏被加固桥梁的原有结构、不增加被加固桥梁的空间尺寸、施工工艺简便易行、加固效果显著、施工周期短且工艺成熟等优点^[1-5]。对于粘贴钢板加固的研究已取得了一定的成果。李树青^[6]总结出了粘贴钢板的应用环境有:混凝土的标号不满足要求时,需要加大结构的强度;路面荷载的集

收稿日期:2013-11-03

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM023);山东省泰山学者建设工程专项资金项目(tshw20130956);中国博士后科学基金项目(2013T60681,2012M521364);青岛市建设科技计划项目(JK2012-24);山东省高等学校科技计划项目(J14LG06)

作者简介:张宪堂(1973—),男,河北井陘人,副教授,博士后,主要从事桥梁结构抗风浪与抗爆方面的研究。

E-mail: zzxhtm@163.com

中部位加固;减震加固等。万墨林等^[7]分析了钢筋混凝土加固结构的受力特性及破损机理,提出了针对不同粘贴钢板加固方法的不同原则、设计构造措施以及施工要点。Swamy 等^[5]针对不同粘结层厚度、粘贴钢板厚度及粘贴钢板的层数进行了对比加固试验,对受荷载作用而损毁的混凝土梁进行了加固试验,重点对卸载与加载两种粘贴钢板加固方法做出了对比研究。贺栓海^[8]不仅推导出钢筋混凝土梁的粘贴钢板加固的容许应力及极限状态设计计算方法,而且运用钢板单元静力平衡条件研究了粘贴钢板与梁底之间的粘结剪应力,给出了设计计算方法的应用条件。上述研究成果充分肯定了将连续水平钢板粘结到梁的腹板上是一种提高钢筋混凝土抗弯强度的方便且有效方法。

在充分了解粘贴钢板的作用机理、受力特点、正截面承载力加固理论、适用范围、构造要求等基础上,以有限元分析软件 ANSYS 为工具,拟结合实际工程模拟扁平箱梁的粘贴钢板加固方案,并进行结果对比分析。通过比较三种不同加固方案加固前后的位移、应力等变化情况来判断其加固效果的优劣,并将其与理论值进行比较,分析其二者之间出现误差的原因,以寻求增强桥梁承载能力的最有效粘贴钢板加固方案。

1 工程概况

所加固桥梁为青岛市主干道立交桥,该桥自 2001 年 12 月竣工投入运营。桥梁为双向四车道,一级汽车专用公路,设计汽车荷载等级为汽—超 20 级,挂—120,主要结构型式为预应力混凝土连续刚构、钢筋混凝土连续梁等,下部结构型式为柱式桥墩、桩基础。

根据全面检查结果,由于大型车辆长期碾压,该桥上部结构在施工缝所在桥跨出现较为严重的横向裂缝,上部结构总体刚度与承载力均有不同程度的降低,不能满足设计要求,对结构的正常安全使用造成不利影响,必须进行加固维修。除上述严重病害,该桥还存在一般裂缝、混凝土局部缺陷、支座偏移等病害。

对病害严重的桥跨进行了特殊检查,主要存在以下病害:①主梁板底存在多处局部钢筋锈胀、混凝土剥离或剥落现象;②部分桥跨出现预应力钢筋波纹管外露现象;③每联两阶段施工缝桥跨主梁底板出现较多的横向裂缝,部分裂缝贯通底板,裂缝宽度较大,且部分较宽的裂缝在汽车荷载作用下呈现出一定的活动性,裂缝宽度变化幅度较大;④部分区段钢筋混凝土保护层厚度较小,钢筋失去碱性保护,发生锈蚀^[9]。

对于混凝土表面局部缺陷和宽度小于 0.2 mm 的静止独立裂缝,按照常规加固处理措施进行维修处理,本文主要针对裂缝宽度较大、病害严重的桥跨采取粘贴钢板加固的技术方案开展研究。

2 粘贴钢板加固设计方案

根据引起混凝土损害的原因及损害特征,通过对比方案的安全性、合理性、经济性、养护及施工难易等各方面,确定了本次主梁底板加固方案为粘贴钢板加固方案。根据梁板裂缝的开展形态、分布特征及活载作用下的活动性等特点,分别确定了 A、B、C 型三种不同粘贴钢板加固方案。

2.1 A 型加固方案

只在箱梁底板的板底面布置粘贴钢带,要求钢带宽 10 cm,厚度 6 cm,相邻钢带间隔 30 cm;在单跨径内钢带分为两种,一种为长度 23.3 m 的钢带布置 10 条,另一种为长度 18.1 m 的钢带布置 9 条,同时横桥方向需间隔布置,顺桥方向沿桥跨中心线的对称位置布置;用 M12 螺栓进行锚固,在梁底板内螺栓的锚固深度设为 6 cm,相邻螺栓间距大于 40 cm,相邻钢带螺栓进行交错布置,粘贴钢板完成后需在梁底板的底面刮平涂抹乳丙砂浆两次进行防护设置,第一防护层厚度 2 cm,第二防护层 1 cm,防护层总厚度达到 3 cm(至原箱梁底板梁底的混凝土表面)。如图 1(a)所示。

适用裂缝病害特征:箱梁底板现出横向裂缝,可能个别裂缝贯通,同时裂缝宽度必须不大于 0.2 mm,并且还未延伸至腹板。

2.2 B 型加固方案

只在箱梁底板的板底面布置粘贴钢带,要求钢带宽 10 cm,厚度 6 cm,相邻钢带间隔 20 cm,在单跨径内钢带分为三种,第一种为长度 23.3 m 的钢带布置 10 条,第二种为长度 18.1 m 的钢带布置 8 条,第三种为长度 12.1 m 的钢带布置 10 条,同时横桥方向需间隔布置,顺桥方向沿桥跨中心线的对称位置布置。如图 1

(b) 所示。

适用裂缝病害特征:箱梁底板现出横向贯通裂缝,同时裂缝宽度不大于 1 mm,其中个别裂缝延伸至腹板,但是延伸高度较小,并且裂缝活动性较小。

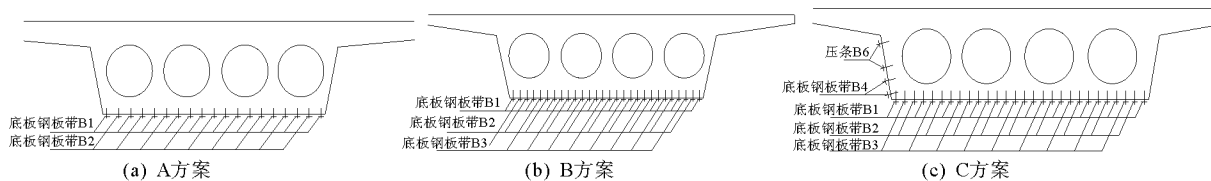


图 1 各方案箱梁粘贴钢板布置图

Fig. 1 The arrangement form of the box girder by pasting steel plate

2.3 C 型加固方案

在箱梁梁底和腹板粘贴钢带,要求梁底板纵向钢带宽为 10 cm,厚度为 6 mm,相邻钢带间隔为 20 cm;腹板纵向钢带宽 10 cm,厚度 10 mm;在单跨径内底板的粘贴钢板分为三种,第一种为长度 23.3 m 的钢带布置 10 条,第二种为长度 18.1 的钢带布置 8 条,第三种为长度 12.1 m 的钢带布置 10 条,同时横桥方向需间隔布置,顺桥方向沿桥跨中心线的对称位置布置;并且单跨径内腹板的钢带长度设为 8.1 m,其主要用途为对腹板进行加固及对 U 型箍进行锚固,一共布置 6 条,且在腹板两侧对称布置;U 型箍设置于靠近施工连接缝的附近位置,长度为 7.53 m,单跨径需布置 5 条钢带。如图 1(c) 所示。

适用裂缝病害特征:箱梁底板现出多条横向贯通裂缝,同时裂缝宽度不小于 1 mm,裂缝依次延伸至腹板的较高位置处,且根据检测,裂缝位置与大小具有较大的随机活动性^[10]。

3 三种加固方案数值模拟分析

对桥梁的三种加固方案运用有限元软件 ANSYS 进行验证性分析,验算桥梁加固前后相同荷载工况下的桥梁变形、挠度分析加固效果。建立有限元模型时采用下列假设:扁平箱梁的变形需符合平截面假定;混凝土与钢筋之间无相对的滑动位移;由于混凝土的徐变、收缩、温度和湿度变化而引起的应力和变形忽略不计;将预应力的作用模拟等效为初始应变^[11]。

3.1 数值模型建立

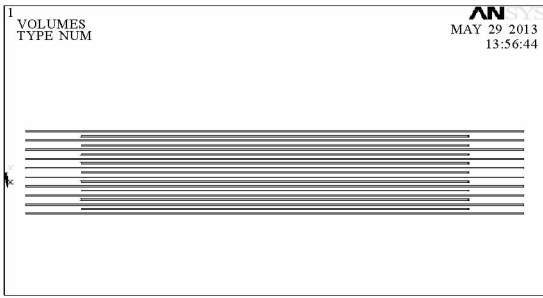
采用 Solid65 单元模拟混凝土,划分箱型梁的顶板、腹板和底板。Solid65 是基于三维八节点等参单元 Solid45,增加了组合式钢筋和混凝土的性能参数,是专门用于求解混凝土、岩石等抗压力学性能远大于抗拉性能的非匀质材料的单元类型,其配筋模式加固材料单元可模拟混凝土中的普通钢筋、分布钢筋及箍筋等,可用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。该单元材料假定为各向同性,包含一种实体材料和三种钢筋材料。同时,Solid65 单元是八节点的六面体单元,每个节点就是六面体的一个顶点,每个节点均具有三个自由度,可实现 X,Y,Z 三个方向的平移,单元能够发生塑性变形,可以在三个正交方向开裂和压溃^[12]。

该单元模拟时采用以下假设:①开裂只允许发生于每个积分点正交方向;②开裂是通过材料属性的调整来模拟,处理方式分布模型,不采用离散模型;③初始混凝土材料为各向同性;④塑性行为应力应变关系通过 Drucker-Prager 屈服面模型模拟。

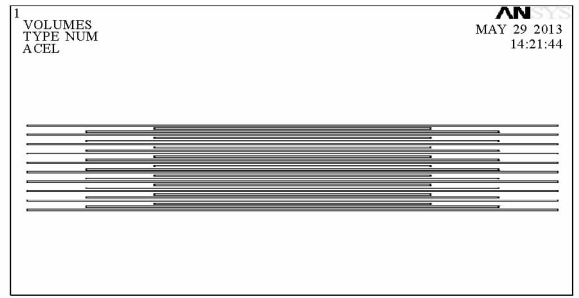
3.2 加固方案数值模拟对比分析

A,B,C 三个方案在钢板的布置位置及用量上都各不相同,其布置形式如图 2~3 所示。

通过模拟分析对比加固前后位移、应力变化来说明三种方案的加固效果,其位移和应力图分别见图 4 和图 5。



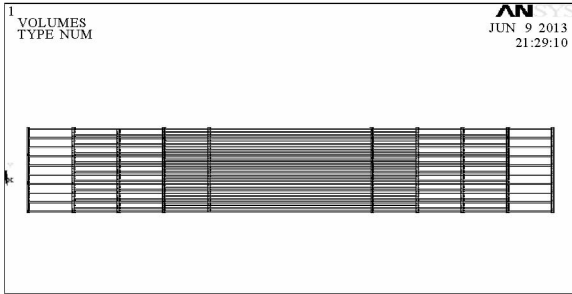
(a) A方案钢板布置形式



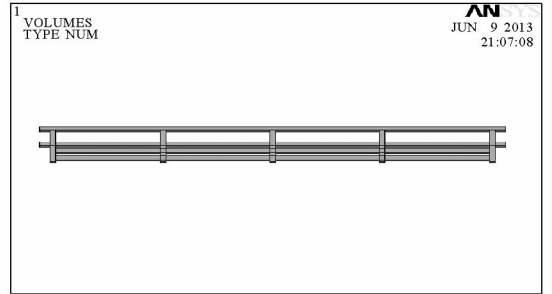
(b) B方案钢板布置形式

图2 A方案和B方案的钢板布置形式

Fig. 2 The arrangement form of steel plate of scheme A and B



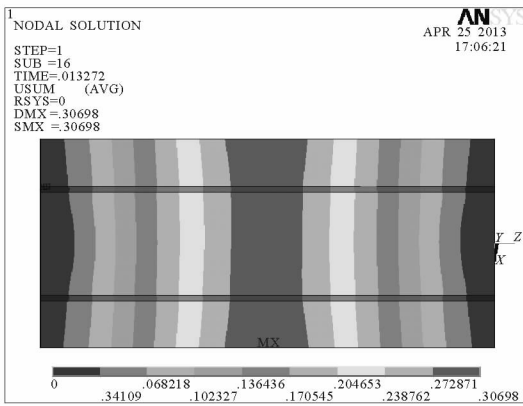
(a) C方案底部钢板布置形式



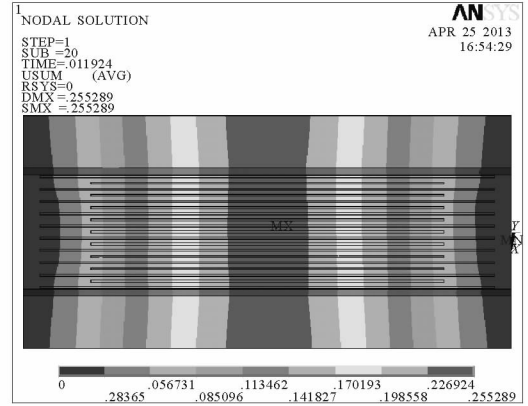
(b) C方案腹部钢板布置形式

图3 C方案钢板布置形式

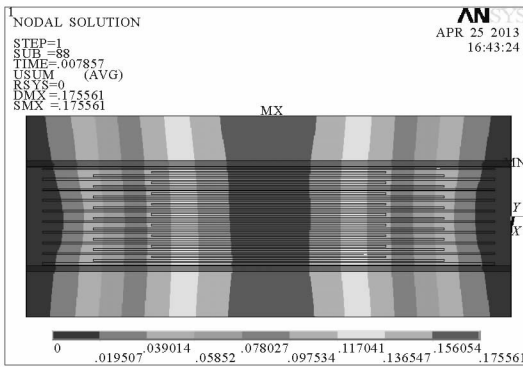
Fig. 3 The arrangement form of the steel plate of scheme C



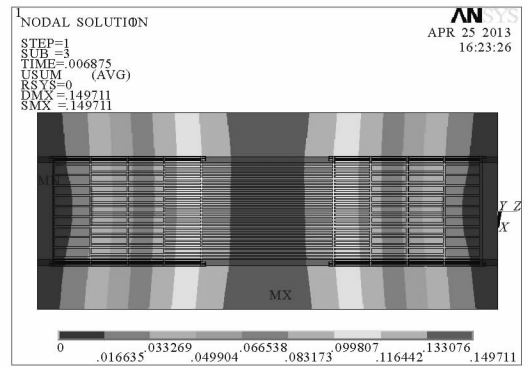
(a) 未加固位移图



(b) A方案位移图



(c) B方案位移图



(d) C方案位移图

图4 各方案位移图

Fig. 4 The displacement diagram of schemes

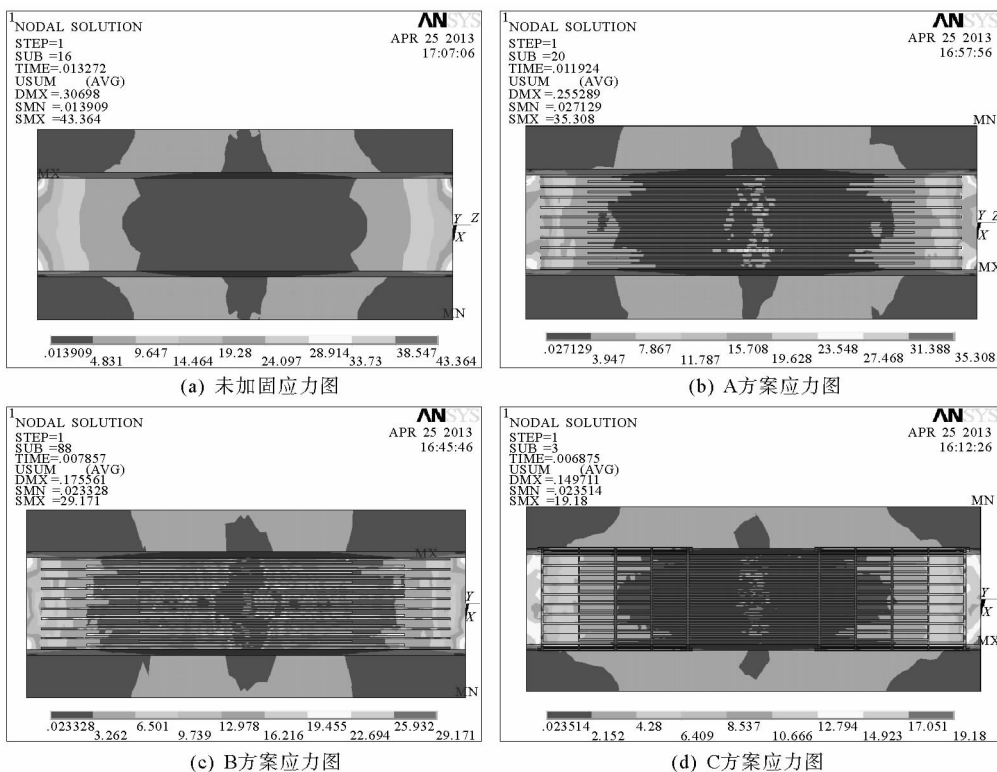


图 5 各方案应力图

Fig. 5 Stress diagram of schemes

模拟分析结果显示,位移变化由两端向中间逐渐增大,在桥梁跨中区域达到最大值,且加固前后比较得出未采取加固措施时位移较大,采取加固方案后均减小。

经 ANSYS 数值计算得到桥梁加固前后的最大应力和最大位移,同时获得桥梁主梁 $L/4$ 和 $L/2$ 截面处的应力和位移。参考《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-89)^[13]和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-85)^[14],可以得到桥梁对应截面的应力和位移理论计算值。将不同方案的应力和位移放在同一坐标系下以便进行比较,如图 6 和图 7 所示。

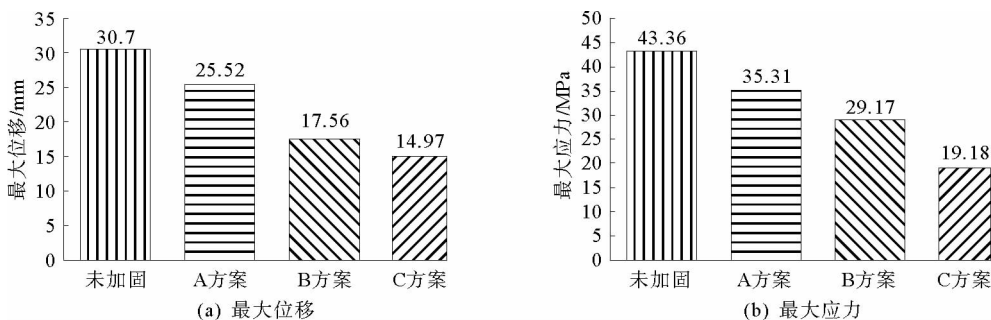


图 6 最大位移与最大应力变化情况柱状图

Fig. 6 The change histogram of the maximum displacement and maximum stress

由图 6 可知,随着 A,B,C 三种加固方案在用钢量上的增加及布置形式的改变,其最大位移和最大应力依次呈减小趋势,其中 C 方案的减小幅度最大,相比于未加固时的主梁,最大位移减小了 15.73 mm,最大应力减小了 24.18 MPa。从方案比较可以看出,粘贴钢板用量增加的幅度与加固效果提高幅度不成线性比例

关系。其中 B 方案在钢板用量上比 A 方案增加 10.29 m^2 , 其最大位移和最大应力比 A 方案分别减小了 7.06 mm 和 6.14 MPa ; C 方案钢板用量上比 A 方案增加了 18.92 m^2 , 相对于 A 方案, 其最大位移减小了 10.55 mm , 最大应力减小 16.13 MPa 。

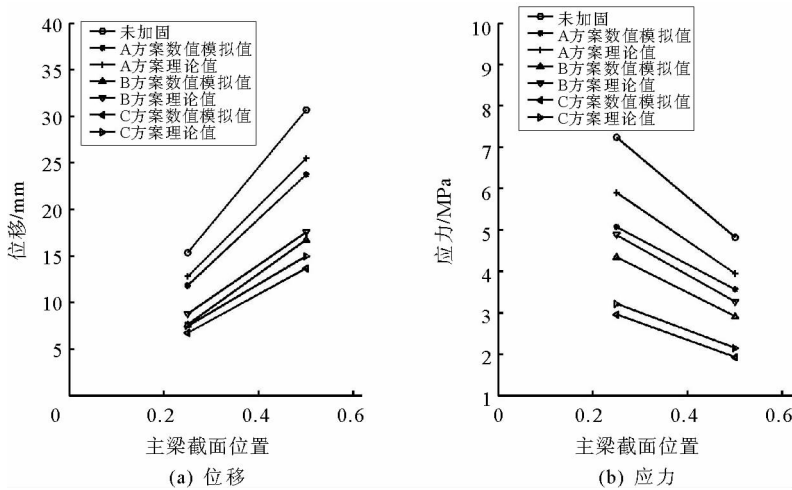


图 7 主梁典型截面位移与应力变化规律

Fig. 7 The change rules of displacements and stresses of typical cross section of girder

由图 7 可知,随着 A,B,C 三种加固方案在用钢量上的增加及布置形式的改变,其在 $L/4$ 和 $L/2$ 截面处的位移和应力同样呈减小趋势。与 A,B 方案相比,C 方案的减小幅度最大。在 $L/4$ 截面处相对于未加固时的主梁位移减小了 7.87 mm ,应力减小了 4.02 MPa 。同样,钢板用量增加的幅度与加固效果提高幅度也非线性关系。无论是最大值还是单个截面对比,A,B,C 三种粘贴钢板方案都对桥梁起到了加固作用,提高了主梁承载能力。而且对于位移和应力的改善效果以 C 方案改善幅度最大。因此扁平箱梁桥 C 型粘贴钢板加固方案是最好的,B 型方案次之,A 型方案最差。

由图 7 可以看出,在采用 ANSYS 进行数值分析时,受网格划分精度、单元类型、迭代与求解选用的方法等影响,其模拟计算结果与理论值往往存在一定差距,A,B,C 方案的 ANSYS 计算值在 $L/4$ 截面处、 $L/2$ 截面处的位移和应力的理论值均比数值模拟值大。比较分析得出,位移的相差范围在 $0.75 \sim 1.95 \text{ mm}$,其误差范围 $4.7\% \sim 10.0\%$,应力相差范围在 $0.22 \sim 0.53 \text{ MPa}$,其误差范围 $8.1\% \sim 11.0\%$ 。出现上述现象主要是由于理论计算值采用的安全系数较大,而 ANSYS 数值模拟未考虑安全系数的因素。

4 结论

以青岛市某主干道立交桥扁平箱梁桥加固工程为例,利用有限元分析软件 ANSYS 对粘贴钢板加固桥梁扁平箱梁主梁进行了数值模拟研究,得出了各方案加固后主梁的应力和位移值。通过对比不同加固方案加固前后的应力和位移等分布变化规律,并将其与理论计算值进行了比较分析,最终得出了最优加固方案,结果表明三种粘贴钢板加固方案都能够显著增强桥梁的承载能力,且以 C 型方案加固效果为最好。同时获得了与各种加固方案相适应的桥梁破损状况,可以为类似桥梁加固工程提供理论参考。

参考文献:

[1]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 Minyong, Jin ChuYang, Hong Xiaolin. Experimental study of reinforced concrete beam strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(4):27-32.

[2]刘来君,赵小星. 桥梁加固设计与施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004:1-30.

[3]周英如. 粘钢加固法在工程中的运用[J]. 福建建筑,1998,59(3):59-60.

- Zhou Yingru. The application of cohere-steel strengthen method to engineering[J]. Fujian Architecture & Construction, 1998, 59(3):50-60.
- [4] 章飞羽. 粘贴钢板法加固钢筋混凝土梁技术浅析[J]. 山西建筑, 2009, 35(5):80-81.
Zhang Feiyu. Analysis on bonding steel plate method for strengthening of RC beam[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(5):80-81.
- [5] Swamy R N, Jones R, Ang T H. Under and over reinforced concrete beams with glued steel plate[J]. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1982, 4(1):19-32.
- [6] 李树青. 桥梁粘贴钢板加固施工技术[J]. 现代物业, 2012, 11(3):62-63.
Li Shuqing. The technology of reinforcement construction of the bridge with bonding steel plate[J]. Modern Property Management, 2012, 11(3):62-63.
- [7] 万墨林, 韩继云. 混凝土结构加固技术的研究[J]. 施工技术, 1994, 21(2):47-49.
Wan Molin, Han Jiyun. Study on the technology of concrete structure strengthening[J]. Construction Technology, 1994, 21(2):47-49.
- [8] 贺栓海. RC梁桥粘结钢板(筋)加固计算方法[J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(1):25-30.
He Shuanhai. Calculating theory in strengthening RC beam bridges by sticking steel plates or reinforcing bars[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(1):25-30.
- [9] 邹鹏. 扁平箱梁桥粘贴钢板加固理论与数值模拟研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2013:33-53.
- [10] 黄绍锋, 王秀芬, 孟涛. 城市高架桥维修加固方案的研究[J]. 公路, 2012(10):98-99.
Huang Shaofeng, Wang Xiufen, Meng Tao. A study on urban viaduct repair and reinforcement[J]. Highway, 2012(10):98-99.
- [11] 王斌, 王解元, 杨冬军, 等. 钢筋混凝土桥梁加固后时变可靠指标分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(10):3-4.
Wang Bin, Wang Jieyuan, Yang Dongjun, et al. Study on the time-dependent reliability index of consolidated reinforced concrete bridges[J]. Industrial Construction, 2010, 40(10):3-4.
- [12] 刘慧敏. 桥梁体外预应力加固的数值模拟[D]. 郑州:郑州大学, 2010:34-35.
- [13] 中华人民共和国行业标准. 公路桥涵设计通用规范. JTJ021-89[S].
- [14] 中华人民共和国行业标准. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范. JTJ023-85[S].

(责任编辑:吕海亮)