

某钢筋混凝土箱涵套箱加固仿真分析

唐 杨¹, 王国伟², 王大为³, 林锦霞⁴, 谭红梅⁵

(1. 五峰土族自治县农村公路管理所, 湖北 宜昌 443413;

2. 济南金衢公路勘察设计研究有限公司, 山东 济南 250101;

3. 温州市交通规划设计研究院, 浙江 温州 325000;

4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

5. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:以某箱涵加固项目为工程背景,采用 Midas FEA 建立箱涵套箱加固的三维有限元模型,考虑混凝土的材料非线性以及箱涵、土之间的接触非线性,对比分析了箱涵采用套箱加固前后的受力性能。计算分析表明,套箱加固法可以较为显著地降低旧箱涵的结构变形、应力和裂缝宽度,加固效果较为明显。

关键词:桥涵工程;钢筋混凝土箱涵;套箱加固法;有限元分析;材料非线性

中图分类号: U449.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)01-0013-06

涵洞是指单跨跨径小于 5 m 的桥梁结构,在公路工程、水利工程中具有广泛的应用。由于涵洞跨径小、结构构造较为简单,工程建设人员在涵洞的设计和施工上不够重视,较多的涵洞出现了严重的病害,涵洞在运营不久甚至在施工过程中就需要进行加固处理。

通过调查研究发现,箱涵主要出现混凝土剥落、裂缝、钢筋锈蚀、变形缝渗水等病害,其中裂缝病害尤为突出。在钢筋混凝土箱涵的加固方面已经有不少工程实践研究,彭敏^[1]对某水库箱涵进行病害调查发现箱涵的顶板跨中位置附近出现纵向贯通裂缝,采用 2 箱改 4 箱(增设 30 cm 厚中墙)、在中墙负弯矩区增设钢板的加固方法,这种增设中墙的加固方法在乐滩水库引水灌区的二期工程^[2]中也得到了运用。林元铮等^[3]对某在役箱涵进行病害检测发现,腹板有 19 处竖向裂缝,顶板有 5 处纵向裂缝和 32 处横向裂缝,通过加固方案的对比,最终选用粘贴碳纤维布对该箱涵进行加固补强。王志福^[4]对某高速公路的钢筋混凝土箱涵进行病害检查后发现,在箱涵的顶板和底板出现 4 条纵向贯通裂缝,且裂缝深度和宽度较大,最终采用顶升后粘贴 A3 钢板加固。李斌等^[5]针对车辆荷载增大导致箱涵承载能力不足的现状,采用钢管支撑法对箱涵进行加固,保证了工程的安全性和可靠性。邹早银^[6]针对某箱涵的溶蚀破坏,采用挂网喷射混凝土进行加固补强。综合以上加固方法来看,箱涵采用套箱加固法(在箱涵内部增设新的箱涵,与旧箱涵协同受力)的尚不多见,而这种增大截面的加固思想在隧道加固^[7-9]、管涵加固^[10-11]上较为常见,即套拱加固法和套管加固法。

现以某箱涵为例,考虑混凝土的材料非线性,采用套箱加固法对某箱涵加固前后的力学性能做对比分析,从数值计算上研究套箱加固法在箱涵加固方面的有效性。

1 工程概况

某旧箱涵外轮廓截面尺寸为 2 440 mm×2 000 mm,内轮廓截面尺寸为 2 000 mm×1 500 mm,内、外轮廓在角隅位置均有 50 mm 的倒直角,顶、底板厚度为 250 mm,腹板厚度为 220 mm。旧箱涵的结构形

收稿日期:2021-12-15 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210267

基金项目:国家自然科学基金(51478071);山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地开放基金(CQSLBF-Y16-10)

作者简介:唐杨(1992—),男,助理工程师,研究方向为桥梁结构理论。E-mail:2312083669@qq.com

唐杨,王国伟,王大为,等.某钢筋混凝土箱涵套箱加固仿真分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1):13-18.

式为 C30 钢筋混凝土结构,纵向钢筋和箍筋均为 HRB335 级,纵向钢筋截面直径为 16 mm,箍筋为 12 mm,箱涵的截面尺寸如图 1 所示。内部套箱的板厚取 200 mm,其混凝土强度等级与旧箱涵相同。

2 分析思路

计算分析采用 Midas FEA 3.7.0 有限元软件。箱涵取 1.0 m 长度建立其几何模型,根据圣维南原理,在箱涵四周取 2.5 m 厚度的土体建立土体的几何模型。划分有限元网格时,箱涵和土体采用四面体实体单元,钢筋采用程序内置的植入式钢筋单元。由于旧箱涵的顶、底板内侧存在一定裂缝和混凝土剥落,在旧箱涵的建模过程中将顶、底板的截面进行削弱,顶、底板跨中的最大削弱深度为 4 cm,削弱截面一直延伸到倒角位置(削弱深度为 0),跨中到倒角之间的截面削弱深度以圆弧线过渡,圆弧半径约为 11.3 m,在套箱施工前采用与旧箱涵相同强度等级的小石子混凝土进行修补。计算分析中旧箱涵与削弱部分混凝土、套箱混凝土之间采用共节点连接,在土体与钢筋混凝土箱涵之间采用接触对进行模拟,刚度比例因子设置为 1,静态摩擦系数设置为 0.4,有限元模型如图 2 所示。

C30 混凝土的本构模型设置为总应变裂缝模型,弹性模量为 30 000 MPa,容重为 25 kN/m³,泊松比为 0.2,抗拉强度设计值为 1.39 MPa,抗压强度设计值为 13.8 MPa,受拉函数设置为常数函数,受压函数设置为 Thorenfeldt 函数。混凝土的拉、压应力-应变关系如图 3 所示,图 3 中, f_t 为混凝土的抗拉强度标准值, f_p 为混凝土的抗压强度标准值。钢筋的本构模型设置为弹性模型,弹性模量为 210 GPa,容重为 78.5 kN/m³,泊松比为 0.3。土体的本构模型设置为摩尔-库伦模型,弹性模量为 81 MPa,容重为 20 kN/m³,泊松比为 0.25,黏聚力为 118 kPa,摩擦角为 22°,剪膨胀角为 0°。

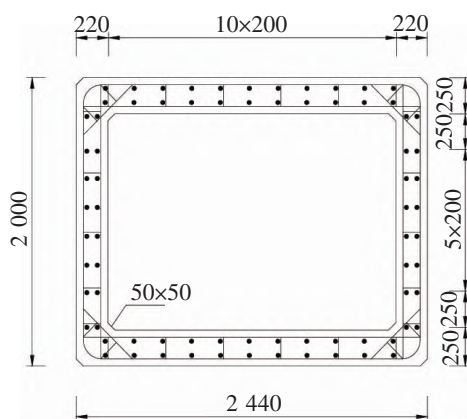


图 1 箱涵截面尺寸(单位:mm)

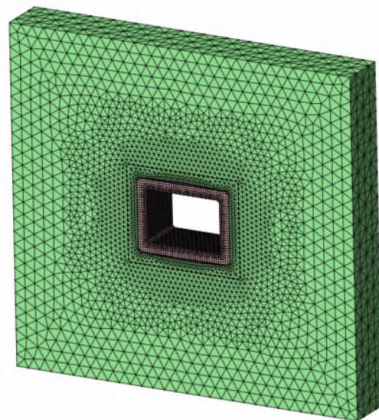


图 2 有限元模型

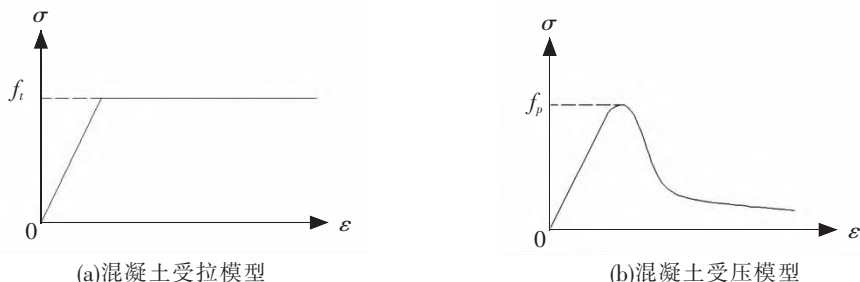


图 3 混凝土非线性本构关系

荷载上,考虑顶部土压力、卸载土压力和混凝土湿重。顶部土压力考虑为 10 m 厚度的填土,土压力以面压力的形式施加于顶部土单元的表面,大小为 0.2 MPa。卸载土压力,即在内箱施工前挖除部分顶部土体,将挖除厚度设置为 5 m,卸载土压力为 0.1 MPa。在内箱混凝土达到强度之前,混凝土的湿重施加于外箱的底板内侧,根据竖向投影的混凝土体积计算混凝土的湿重,同样以面压力的形式施加。边界上,固结底部土体表面,两侧土体约束水平位移。

采用施工阶段分析模拟钢筋混凝土箱涵的整个加固过程,主要分为 5 个施工阶段模拟。第 1 个施工阶段模拟旧箱涵加固前的受力状态;第 2 个施工阶段钝化顶部土压力,激活卸载土压力,模拟内箱施工前

挖除顶部 5 m 填土后钢筋混凝土箱涵的受力状态;第 3 个施工阶段修补顶、底板削弱部分的剥落混凝土,直接激活修补混凝土;第 4 个施工阶段浇筑内箱,激活混凝土的湿重;第 5 个施工阶段为加固后钢筋混凝土箱涵的受力状态,钝化混凝土的湿重和卸载土压力,激活内箱混凝土结构和顶部土压力。分析控制中将计算方法设置为 Newton Raphson 迭代法,勾选材料非线性、自动荷载步,最大荷载步设置为 100,初始荷载因子设置为 0.1,最小荷载因子设置为 $1e-5$ 。

3 加固前后对比分析

3.1 位移分析

通过计算,提取第 1、第 5 施工阶段钢筋混凝土箱涵的位移结果如图 4、图 5 所示。

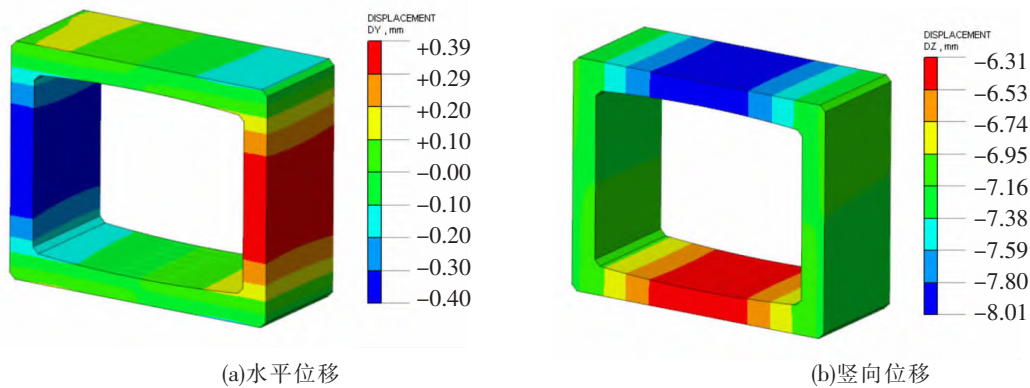


图 4 加固前的位移

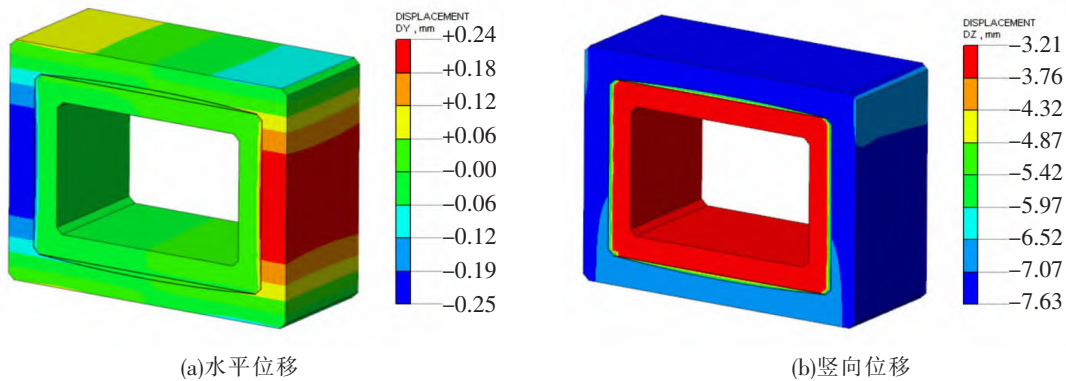


图 5 加固后的位移

由图 4 可以看出,加固前钢筋混凝土箱涵的水平位移最大值出现在腹板位置,左侧腹板的水平位移最大值约 0.40 mm,右侧腹板的水平位移最大值约 0.39 mm,腹板均表现为向外侧的位移,计算得到钢筋混凝土箱涵的水平变形为 0.79 mm;加固前钢筋混凝土箱涵的竖向位移最大值出现在顶板,约 8.01 mm,竖向位移最小值出现在底板,约 6.31 mm,计算得到钢筋混凝土箱涵的竖向变形约为 1.70 mm。

由图 5 可以看出,加固后钢筋混凝土箱涵的水平位移最大值同样出现在腹板,左侧腹板的水平位移最大值约 0.25 mm,右侧腹板的水平位移最大值约 0.24 mm,腹板均表现为向外侧的位移,计算得到钢筋混凝土箱涵的水平变形约为 0.49 mm,相比于加固前钢筋混凝土箱涵的水平变形下降 0.30 mm,降低幅度为 37.97%;加固后钢筋混凝土箱涵的竖向位移最大值出现在顶板,约 7.63 mm,外箱的竖向位移最小值出现在底板,约 6.56 mm,计算得到钢筋混凝土箱涵的竖向变形约为 1.07 mm,相比于加固前钢筋混凝土箱涵的竖向变形下降 0.63 mm,降低幅度为 37.06%。

3.2 混凝土应力分析

通过计算,提取第 1、第 5 施工阶段钢筋混凝土箱涵的应力结果如图 6、图 7 所示。

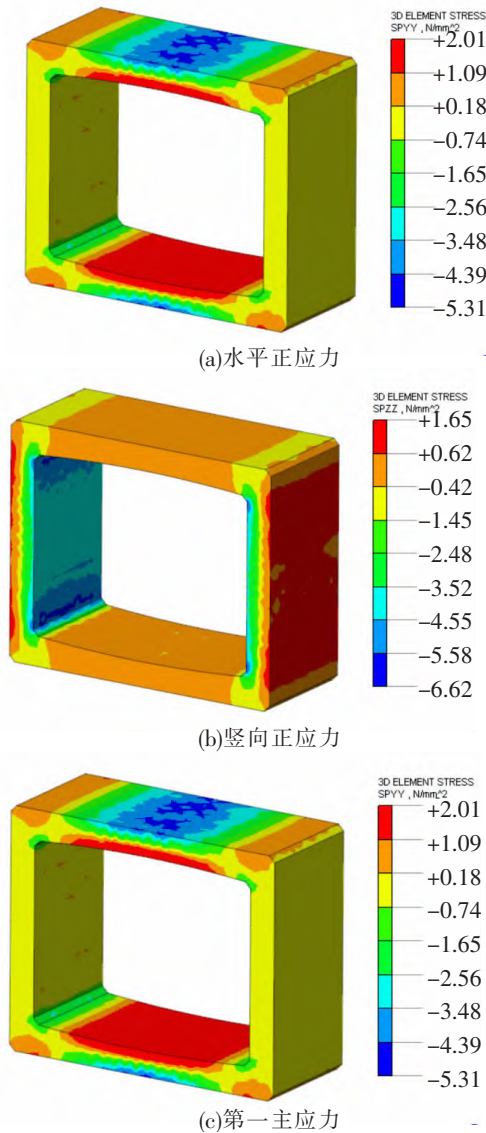


图 6 加固前的应力

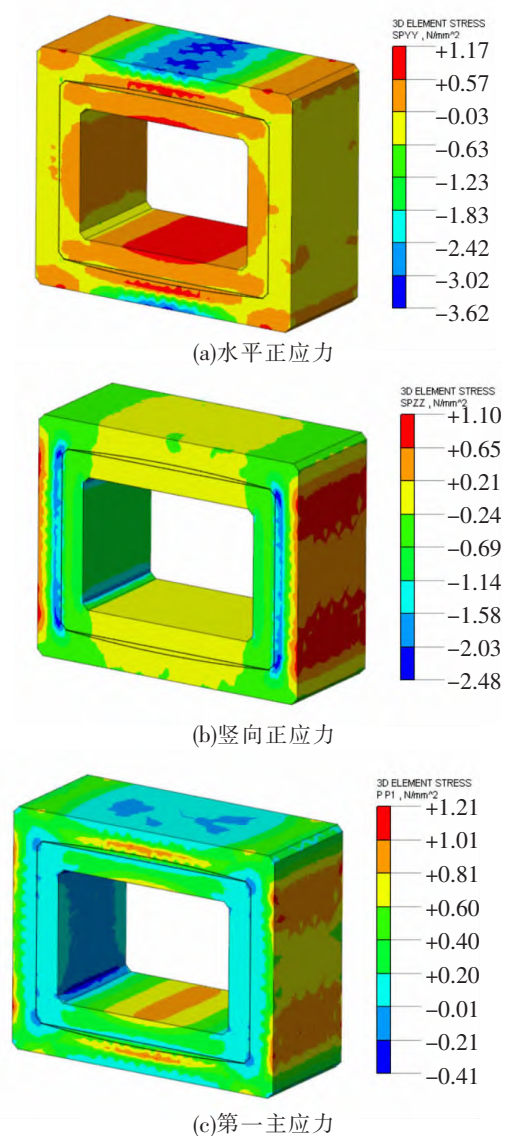


图 7 加固后的应力

由图 6(a)可以看出,加固前钢筋混凝土箱涵的水平拉应力和水平压应力最大值均出现在底板跨中附近,底板的内缘有水平拉应力最大值,约 2.01 MPa,底板的外缘有水平压应力最大值,约 5.31 MPa。由图 6(b)可以看出,加固前钢筋混凝土箱涵的竖向拉应力最大值出现在顶板与腹板角隅位置的外缘,约 1.65 MPa,竖向压应力最大值出现在底板与腹板角隅位置的内缘,约 6.62 MPa。由图 6(c)可以看出,加固前钢筋混凝土箱涵的主拉应力最大值出现在底板的内缘,约 2.01 MPa,达到 C30 混凝土抗拉强度标准值,主压应力最大值出现在底板与腹板角隅位置的内缘,约 0.93 MPa。

由图 7(a)可以看出,加固后钢筋混凝土箱涵的水平拉应力和水平压应力最大值均出现在外箱底板跨中附近,底板的内缘有水平拉应力最大值,约 1.17 MPa,相比于加固前钢筋混凝土箱涵的水平拉应力最大值下降 0.84 MPa,降低幅度为 41.79%;底板的外缘有水平压应力最大值,约 3.62 MPa,相比于加固前钢筋混凝土箱涵的水平压应力最大值下降 1.69 MPa,降低幅度为 31.83%。

由图 7(b)可以看出,加固后钢筋混凝土箱涵的竖向拉应力最大值出现在外箱腹板与底板角隅位置的外缘附近,约 1.10 MPa,相比于加固前钢筋混凝土箱涵的竖向拉应力最大值下降 0.55 MPa,降低幅度为

33.33%; 竖向压应力最大值出现在外箱腹板与顶板角隅位置的内缘附近, 约 2.48 MPa, 相比于加固前钢筋混凝土箱涵的竖向压应力最大值下降 4.14 MPa, 降低幅度为 62.54%。

由图 7(c) 可以看出, 加固后钢筋混凝土箱涵的主拉应力最大值出现在外箱底板的内缘附近, 约 1.21 MPa, 相比于加固前钢筋混凝土箱涵的主拉应力最大值下降 0.80 MPa, 降低幅度为 39.80%; 主压应力最大值出现在内箱底板与腹板角隅位置的内缘, 约 0.41 MPa, 相比于加固前钢筋混凝土箱涵的主压应力最大值下降 0.52 MPa, 降低幅度为 55.91%。

3.3 钢筋应力分析

通过计算, 提取第 1、第 5 施工阶段钢筋的应力结果如图 8 所示。

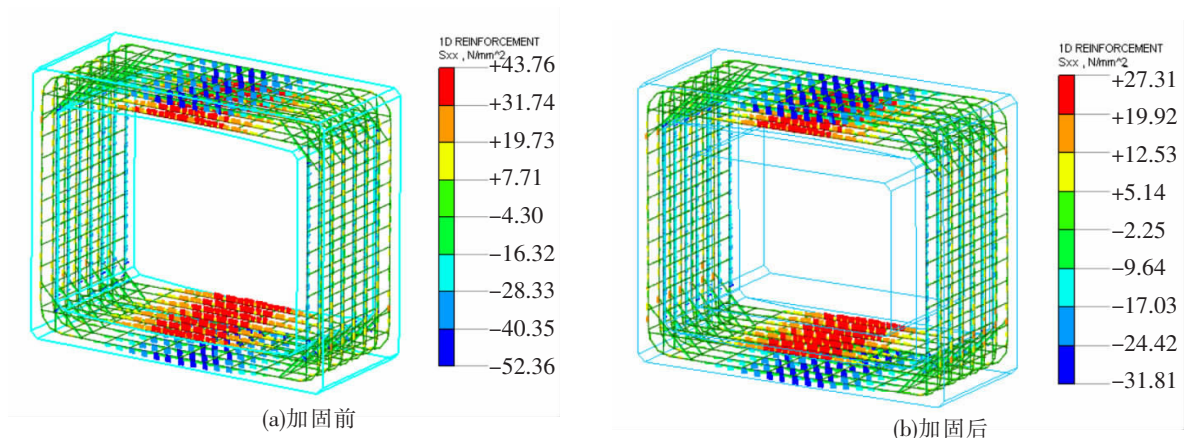


图 8 钢筋应力

由图 8 可以看出, 加固前后钢筋混凝土箱涵的顶、底板内侧钢筋有较大的拉应力, 顶、底板外侧的钢筋有较大压应力, 腹板的钢筋应力相比于顶、底板较小。加固前的钢筋拉应力最大值为 43.76 MPa, 钢筋的压应力最大值为 52.36 MPa; 加固后钢筋拉应力最大值为 27.31 MPa, 钢筋压应力最大值为 31.81 MPa。相比于加固前钢筋的最大拉应力下降 16.45 MPa, 降低幅度为 37.59%; 相比于加固前钢筋的压应力最大值下降 20.55 MPa, 降低幅度为 39.25%。

3.4 裂缝分析

通过计算, 提取第 1、第 5 施工阶段钢筋混凝土箱涵的裂缝结果如图 9 所示。

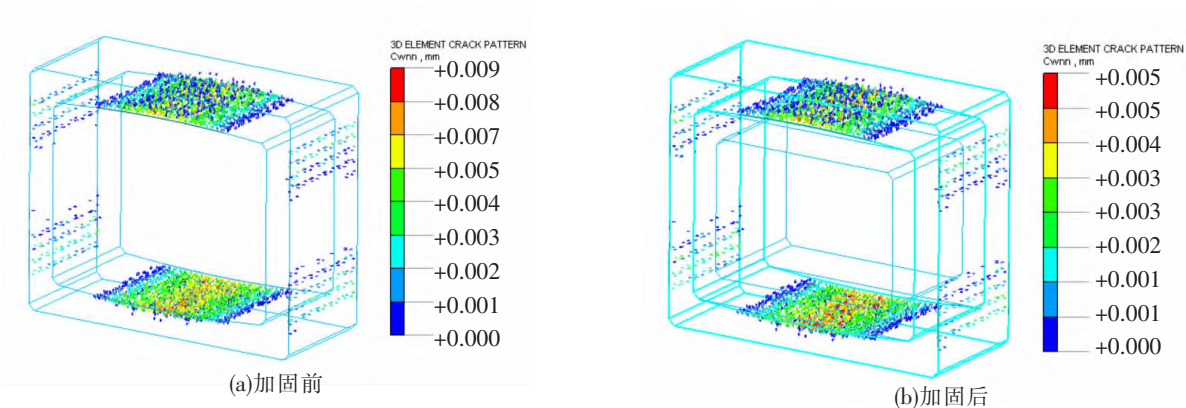


图 9 裂缝分布及宽度

由图 9 可以看出, 加固前后钢筋混凝土箱涵的裂缝主要分布在外箱顶、底板的内缘, 在顶、底板的跨中位置有较大的裂缝宽度, 外箱腹板靠近顶、底板的外缘有少量裂缝。加固前钢筋混凝土箱涵的裂缝宽度最大值为 0.009 mm, 加固后钢筋混凝土箱涵的裂缝宽度最大值为 0.005 mm, 相比于加固前钢筋混凝土箱涵的裂缝宽度最大值下降 0.004 mm, 降低幅度为 44.44%。

4 结论

以某钢筋混凝土箱涵为例,通过对比分析钢筋混凝土箱涵加固前后的变形和应力,得到以下结论。

(1)采用套箱法加固钢筋混凝土箱涵可以有效降低箱涵的结构变形、应力以及裂缝宽度,加固效果较为明显。

(2)加固前钢筋混凝土箱涵的主拉应力最大值出现在底板的内缘,加固后主拉应力最大值的位置变化不大,仍出现在外箱底板的内缘。同时钢筋应力的较大区域、混凝土裂缝较为集中区域都出现在外箱顶、底板的内侧,在实际加固过程中,需要格外关注外箱顶、底板的内侧。

参 考 文 献

- [1]彭敏.箱涵病害原因分析及加固方案[J].山西建筑,2012,38(5):67-68.
- [2]袁刚.增设承重墙及环氧树脂砂浆在箱涵加固中的应用[J].甘肃水利水电技术,2017,53(6):63-65.
- [3]林元铮,田石柱,柴明明,等.钢筋混凝土箱涵裂缝检测及加固性能研究[J].工程抗震与加固改造,2014,36(6):116-123,129.
- [4]王志福.高速公路钢筋砼箱涵病害处治[J].交通科技与经济,2010(3):78-80.
- [5]李斌,周雪丽,吴佐国.大车辆荷载作用下临时施工道路底部箱涵加固措施有限元分析[J].内蒙古水利,2011(2):190-192.
- [6]邹早银.钢筋混凝土喷锚支护施工技术加固涵洞式水闸箱涵结构[J].广东水利水电,2001(5):51-53.
- [7]韩鑫,叶飞,徐长鑫,等.钢筋混凝土套拱加固病害隧道安全评价研究[J].中外公路,2019,39(3):183-189.
- [8]刘燕鹏,简虎平,李祥.既有裂损隧道复合式套拱加固方法的研究[J].公路,2018(9):289-295.
- [9]刘阳,孙洪硕,李文江,等.近接基坑电力隧道开裂原因及整治技术[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(4):32-37.
- [10]汪天辉.浅谈圆管涵套管加固技术在工程施工中的应用[J].福建建材,2013(8):77.
- [11]唐杨,王大为,林锦霞.波纹钢管加固某钢筋混凝土圆管涵有限元分析[J].河南城建学院学报,2020,29(6):48-53.

Simulation Analysis of Reinforced Concrete Box Culvert with Cover Box Reinforcement Method

Tang Yang¹, Wang Guowei², Wang Dawei³, Lin Jinxia⁴, Tan Hongmei⁵

(1. Countryside Highway Administration Bureau of Wufeng Tujia Autonomous County, Yichang 443413, China;

2. Jinan Jinqu Road Survey Design Research Co. Ltd., Jinan 250101, China;

3. Wenzhou Traffic Planning and Design Institute, Wenzhou 325000, China;

4. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;

5. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With a box culvert reinforcement project as the engineering background, Midas FEA was used to establish a three-dimensional finite element model of box culvert with cover box reinforcement method, considering the material nonlinearity of concrete and the contact nonlinearity between box culvert and soil, and the mechanical performance of the box culvert before and after the box reinforcement was compared and analyzed. The calculation analysis shows that the cover box method can significantly reduce the structural deformation, stress and crack width of the old box culvert, and the reinforcement effect is obvious.

Key words: bridge and culvert engineering; reinforced concrete box culvert; cover box method; finite element analysis; material nonlinearity