

体外预应力 CFRP 混凝土薄壁箱梁抗弯性能分析

祝明桥,潘华,孙康杰,赵振中

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:利用有限元分析软件 ANSYS 对试验箱梁抗弯性能试验进行了全过程数值模拟,分析结果与试验结果吻合较好,验证了 ANSYS 分析此类箱梁的可行性.并针对箱梁抗弯性能的影响因素进行了参数分析,重点分析了各项因素对箱梁的挠度、CFRP 应力增量的影响情况,为此类箱梁的工程推广提供了可靠的理论分析依据.

关键词:体外预应力;薄壁箱梁;ANSYS;抗弯性能

中图分类号:U448.213

文献标识码:A

文章编号:1672-9102(2013)03-0041-06

混凝土薄壁箱梁具有抗弯刚度大,弯曲应力分布合理等特点,体外预应力 CFRP 混凝土薄壁箱梁结合了体外预应力技术的优越性以及 CFRP 材料优良性能,在今后的薄壁箱型梁桥的工程实践中具有很好的推广应用价值^[1-2].本文利用有限元分析软件 ANSYS 对体外预应力 CFRP 混凝土薄壁箱梁抗弯性能试验进行了全过程数值模拟,并针对影响其抗弯性能的因素进行了参数分析.

1 试验概况

本次试验模型采用常用的宽顶板、窄底板、长悬臂、斜腹板的梯形截面^[3-6].混凝土采用自制 C60 自密实高强混凝土,表 1,表 2,表 3 分别为试验测得的混凝土、钢筋及 CFRP 材料的力学性能.试验箱梁截面尺寸及配筋如图 1 所示.为了对试验箱梁剪力滞效应进行全面研究,设有 A-A, B-B, C-C 3 个控制截面,具体位置如图 1 所示.试验梁采用二级分配梁对称四点集中力加载,试验加载装置如图 2 所示.

试验严格参照《混凝土结构试验方法标准》(GB50152—92)^[7]进行分级加载.

2 ANSYS 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

分析模型采用试验箱梁实测的几何尺寸和配筋情况;混凝土选用 Solid65 单元,普通钢筋选用 Link8 单元,CFRP 筋选用 Link10 单元.混凝土采用 willam-warnke5 强度准则,关闭压碎开关,裂缝张开和闭合的剪力传递系数分别取 0.5 和 1^[8],本文选用多线性随动强化模型(MISO),混凝土单轴应力应变关系上升段采用规范《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[9]规定的公式,下降段则采用 Hongnestad 的处理方法^[10];普通钢筋采用弹-塑性强化模型;CFRP 筋采用理想弹性材料的本构关系.各材料应力-应变曲线详见图 3.

根据试件实际尺寸,建立的试验箱梁有限元模型如图 4 所示.建模过程如下所述:1)建立箱梁几何截

收稿日期:2013-04-01

基金项目:湖南省教育厅基金资助重点项目(10A029);湖南省自然科学基金资助项目(09JJ3089)

通信作者:祝明桥(1968-),男,安徽太湖人,博士后,教授,主要从事混凝土结构理论及其新材料应用研究. E-mail:1531290279@qq.com

面,利用 Plane42 单元对截面进行网格划分,将面单元 Plane42 拉伸成混凝土 Solid65 单元;2)根据实际尺寸和位置,建立普通钢筋几何线,利用杆单元 Link8 划分钢筋单元,采用约束方程法将钢筋节点与邻近混凝土

土数个节点联系起来;3)建立体外预应力 CFRP 筋几何模型,利用杆单元 Link10 划分 CFRP 筋单元,采用节点耦合法将 CFRP 筋与箱梁接触部位节点进行耦合;4)体外预应力采用初应变法模拟预应力的施加。

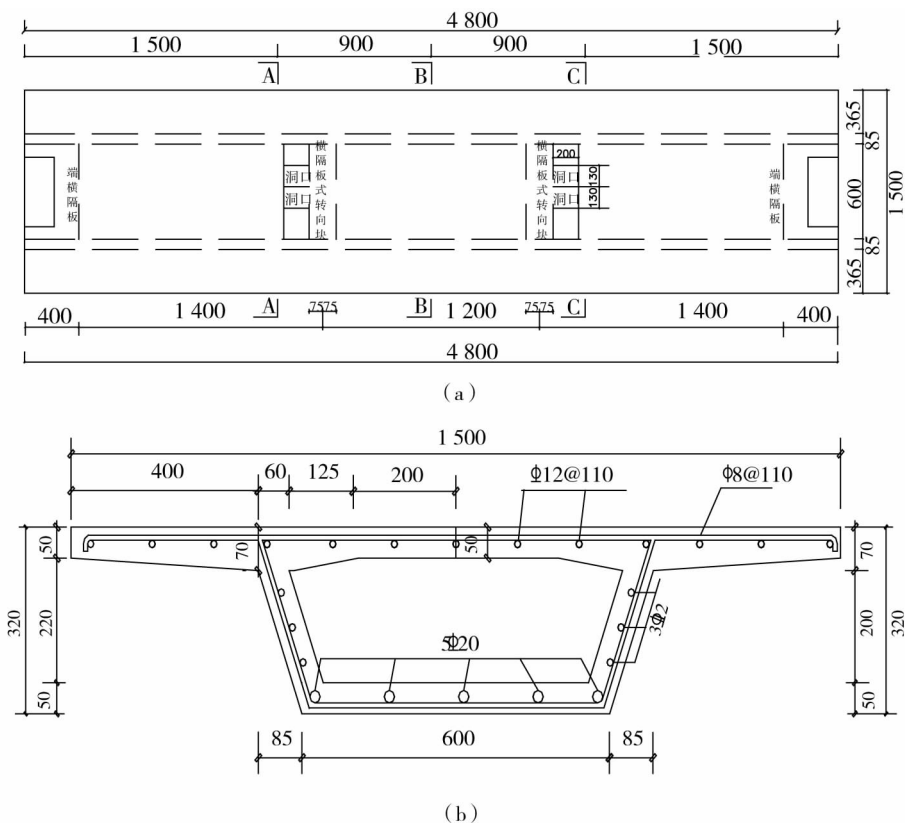


图 1 箱梁截面尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Box girder model section size and reinforcement(Unit:mm)

表 1 混凝土的力学性能

Tab. 1 Properties of self-compacting concrete

立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa	轴心抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
71.2	45.637	6.12	29 900

表 2 钢筋的力学性能

Tab. 2 Properties of steel bars

规格	钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/MPa
Φ8	8.1	325.0	463.0	21.1	214 000
Φ12	12.2	420.3	530.2	24.5	203 000
Φ20	20.2	411.9	541.6	22.5	201 000

表 3 碳纤维布 UT 70-30 的力学性能

Tab. 3 Properties of CFRP sheets UT 70-30

纤维重量 g/m ²	设计宽度/mm	设计厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%
300	50	0.167	3 400	230 000	1.5

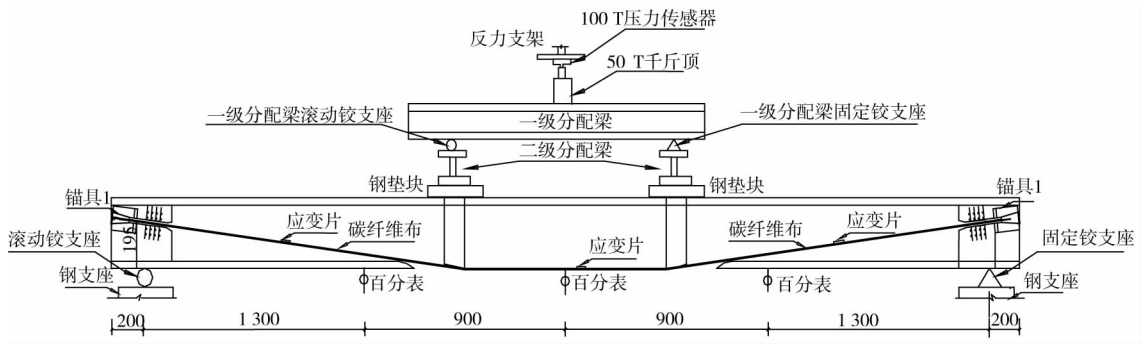


图2 箱梁试验加载装置图
Fig. 2 Box girder test loading device

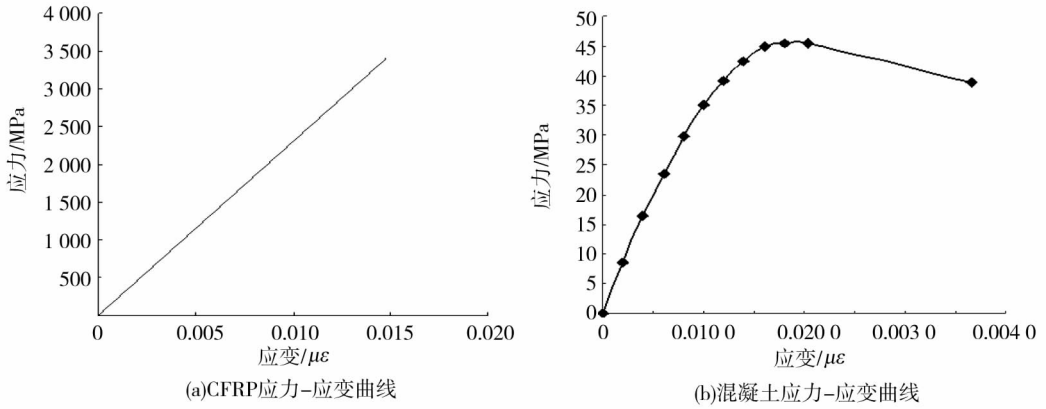


图3 材料应力 - 应变曲线
Fig. 3 Stress - strain curve of materials

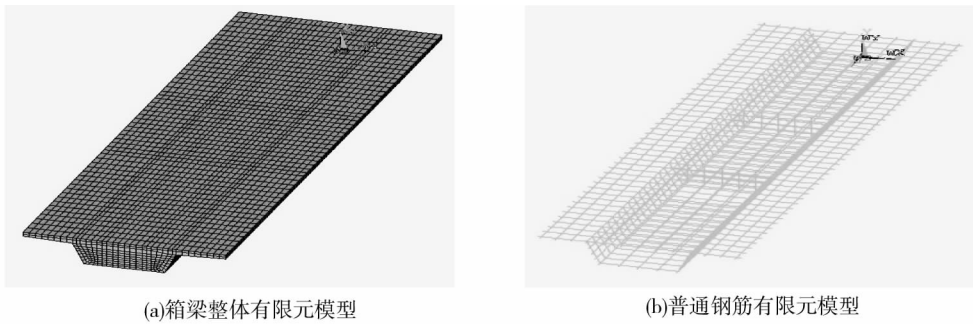


图4 试件有限元模型
Fig. 4 Finite Element models of Specimen

2.2 结果比较与分析

由图5、图6可知:从弹性阶段到混凝土开裂,直到受拉钢筋屈服,ANSYS分析得到的荷载 - 挠度曲线的斜率和拐点都和实测值比较接近;分析得到的荷载 - CFRP应力增量曲线发展趋势同实测曲线也较为接近,但相对实测值稍有偏大,分析原因主要是由于试验过程中CFRP筋锚具随着加载级数增大而导致锚具夹紧装置略有松弛,从而导致实测值偏

小。另外,由于试验仅加载至380 kN,箱梁并未达到极限状态,因此本次模拟分析在此前模拟合理的基础上对试验模型继续进行加载,直到箱梁破坏为止,计算求得最终破坏荷载为430 kN。以上分析结果验证了利用ANSYS软件,选择合适的单元模型和材料本构关系可以较准确地模拟试验箱梁的受力 - 变形全过程。

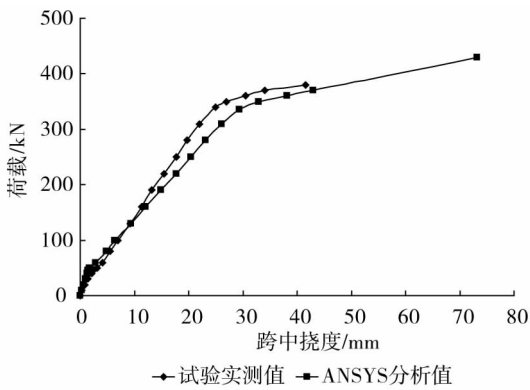


图5 荷载-挠度曲线
Fig.5 Load - Deflection curves

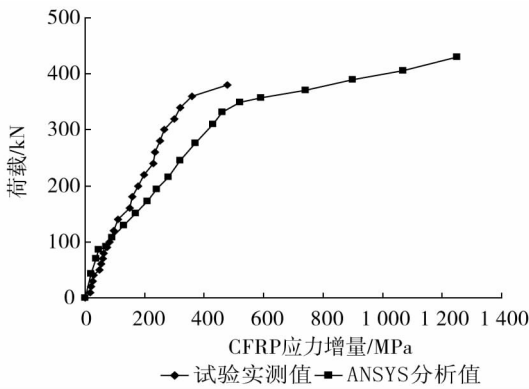


图6 荷载-CFRP应力增量曲线
Fig.6 Load - stress increment curve

由图7可知:CFRP筋初始张拉预应力的提高可以大幅度提高箱梁的开裂荷载,开裂荷载从0.3 fptk时的47.5 kN增大至0.65 fptk时的93.3 kN,提高幅度达96.4%,而极限荷载从430 kN提高到458.7 kN,仅提高了6.1%,相差不大,且随着初始张拉预应力提高,箱梁延性变形能力降低.

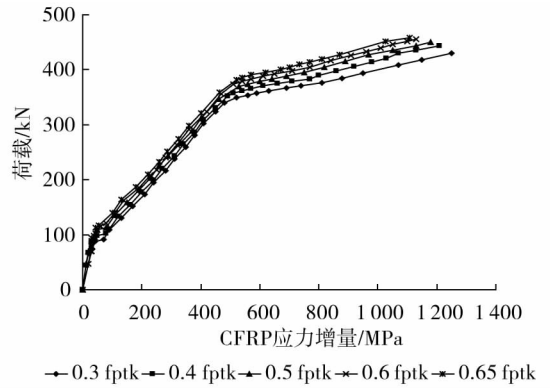


图8 荷载-CFRP应力增量曲线
Fig.8 Load - stress increment curves

由图8可知:随着初始张拉预应力增加,CFRP筋极限应力总量分别为2 210 MPa(960 + 1 250), 2 560 MPa(1 350 + 1 210), 2 870 MPa(1 690 + 1 180), 3 150 MPa(2 020 + 1 130)和3 318 MPa(2 210 + 1 108),虽然极限状态下CFRP筋的应力增量有所降低,但由于CFRP筋的初始应力大幅度提高,使得最终使用率从0.3 fptk时的65%提高到0.6 fptk时的92.6%,即CFRP得到了充分的利用.

3 箱梁抗弯性能影响因素分析

3.1 初始张拉预应力的影响

分别分析了CFRP筋的初始张拉预应力为0.4 fptk,0.5 fptk,0.6 fptk和0.65 fptk(fptk:CFRP筋极限抗拉强度)4种情况对箱梁抗弯性能的影响.

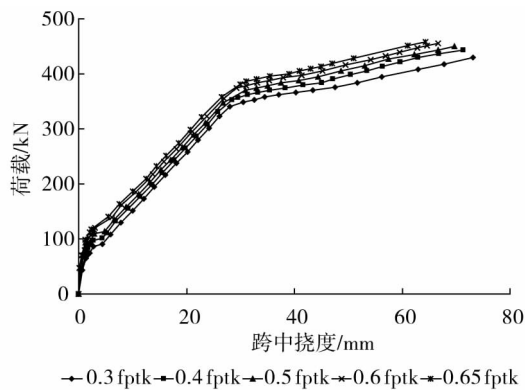


图7 荷载-挠度曲线
Fig.7 Load - deflection curves

3.2 受拉钢筋配筋率的影响

分别选用底板受拉钢筋直径为16 mm,18 mm和20.2 mm(试验实测值)的钢筋进行参数分析,配筋率分别为2.78%,3.52%和4.34%.

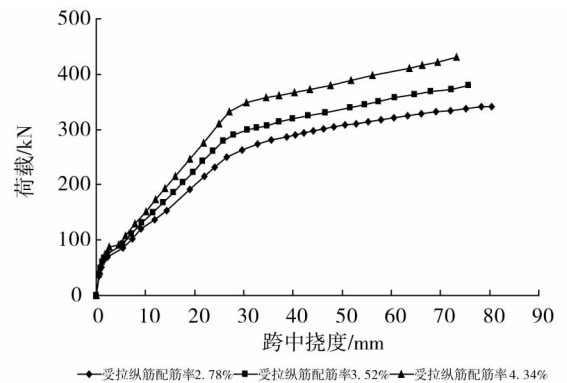


图9 荷载-挠度曲线
Fig.9 Load - deflection curves

由图 9 可知:增大受拉钢筋的配筋率对箱梁的开裂荷载影响不大,而极限承载力则有较大幅度提高,但由于刚性增大导致其延性变形能力呈下降趋势。

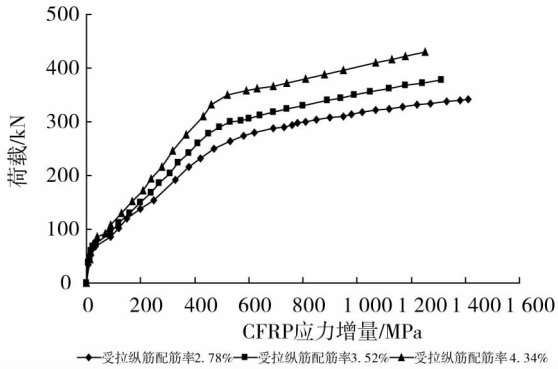


图 10 荷载 - CFRP 应力增量曲线

Fig. 10 Load - stress increment curves

由图 10 可知:体外预应力 CFRP 筋的极限应力增量随着配筋率的增大而降低,极限状态下应力值分别为 2 370 MPa(960 + 1 410), 2 270 MPa(960 + 1 310)和 2 210 MPa(960 + 1 250),有效利用率分别为 69.7%, 66.8% 和 65.0%,从中可以发现,虽然配筋率降低可以提高 CFRP 筋的有效利用率,但也导致其极限承载力下降。

3.3 CFRP 筋使用量的影响

分别对 CFRP 粘贴层数为 5 层、6 层、7 层 8 层的箱梁进行参数分析,用配筋率表示分别为 1.38%, 1.66%, 1.94% 和 2.21%。

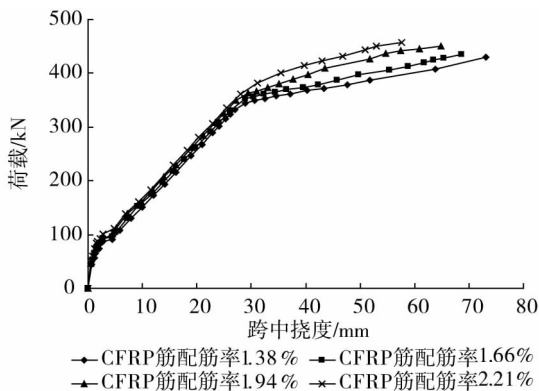


图 11 荷载 - 挠度曲线

Fig. 11 Load - deflection curves

图 11 为不同 CFRP 配筋率情况下的荷载 - 挠度曲线。由图可知:随着 CFRP 筋的使用量(配筋率)的增加,箱梁的开裂荷载均有提高,开裂荷载由 5 层时的 47.5 kN 提高到 8 层时的 69.4 kN,但相比较初始张拉预应力的影响则要小,而开裂前不同的

CFRP 配筋率的箱梁跨中截面的最大挠度相差也不是很大;随着 CFRP 筋使用量的增大,箱梁的极限承载力也有所提高,而其延性变形能力略有下降。

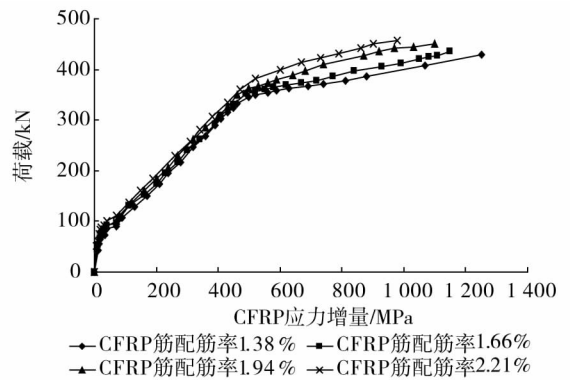


图 12 荷载 - CFRP 应力增量曲线

Fig. 12 Load - stress increment curves

由图 12 可知:体外预应力 CFRP 筋的极限应力增量由使用量为 5 层时的 1 250 MPa 降低到使用量为 8 层时的 980 MPa,即最终应力值由 2 210 MPa(960 + 1 250)下降到 1 940 MPa(960 + 980),使得 CFRP 筋有效利用率从 65% 下降到 57.1%。因此可以知道,对于本试验模型来说,当箱梁的初始张拉预应力不变时,增加 CFRP 筋的使用量虽然可以提高箱梁极限承载力,但 CFRP 筋的应力得不到充分发挥,并不利于其充分利用。

4 结论

1) 利用 ANSYS 软件,通过选择合适的单元模型和材料本构关系可以较准确地模拟箱梁的受力 - 变形全过程,为采用 ANSYS 对箱梁进行大量参数分析奠定了基础。

2) 分析了不同初始张拉预应力对箱梁抗弯性能的影响:初始张拉预应力的提高可以大幅度提高箱梁的开裂荷载,但其延性变形能力下降;对于本次试验箱梁,初始张拉预应力提高能够提高 CFRP 筋的有效利用率,充分发挥 CFRP 筋的抗拉强度。

3) 分析了不同底板受拉钢筋以及 CFRP 筋配筋率对箱梁抗弯性能的影响:增大手拉钢筋配筋率对箱梁的开裂荷载基本没有影响,但对极限承载力影响较大,且延性变形能力降低;增大 CFRP 筋的配筋率可以适当提高箱梁的开裂能力和极限承载力,但过高的 CFRP 筋配筋率并不利于 CFRP 筋的有效利用,因此,二者之间应的合理取值对充分发挥各自的强度尤为重要。

参考文献:

- [1] 郭金琼. 箱形梁设计理论[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
Guo J Q. The theory of box girder design [M]. Beijing: China Communication Press,1991.
- [2] Naaman A E, Alkhairi F M. Stress at ultimate in un - bonded post - tensioning tendons; part 2 - proposed methodology [J]. ACI Structural Journal,1991 ,88(6) :683 - 692.
- [3] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
Xiang H F. Academic for bridge structure [M]. Beijing: People Communication Press,2001.
- [4] 张士铎,邓小华,王文洲. 箱型薄壁梁剪力滞效应[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
Zhang S D, Deng X H, Wang W Z. The shear lag effect of concrete thin - walled box girder [M]. Beijing: People Communication Press,1998.
- [5] Song O G, Alexander C. Shear - lag analysis of T, I, and box beams [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, 116(5) : 1290 - 1304.
- [6] Alghamdi S A. Static and modal analysis of thin - walled box girder structures[J]. AIAA Journal,2001 ,39(7) :1406 - 1410.
- [7] 中华人民共和国建设部. GB 50152 - 2012 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Construction of the People ' s Republic of China. GB 50152 - 2012 Standard methods for testing of concrete structures [S]. Beijing:China Architecture and Building Press,2012.
- [8] 司炳国,孙治国,艾庆华. Solid65 单元在混凝土结构有限元分析中的应用[J]. 工业建筑,2007,37(1) :87 - 92.
Si B G, Sun Z G, Ai Q H. Application of solid65 element in the finite element analysis of concrete structures[J]. Industrial Construction, 2007,37(1) :87 - 92.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB 50010 - 2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Construction of the People ' s Republic of China. GB 50010 - 2010 The code for concrete structure design[S]. Beijing: China Architecture and Building Press,2010.
- [10] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
Guo Z H, Shi X D. Reinforced concrete theory and analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003.

Flexural performance analysis of external prestressing CFRP concrete thin - wall box girder

ZHU Ming - qiao, PAN Hua, SUN Kang - jie, ZHAO Zhen - zhong

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Using finite element analysis software ANSYS simulate the fully flexural experimental process of the concrete box girder, the analysis results agree well with the experimental results, which confirmed the feasibility that ANSYS was used to analyse such box girder. The parametric analysis was presented for the influencing factors of the box girder flexural performance, the influences on deflection of box girder stress, increment of CFRP were mainly analysed, a reliable theoretical analysis basis was provided for the engineering application of such box girder.

Key words: external prestress; thin - walled box girder; ANSYS; flexural performance