

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901065

嵌贴CFRP筋抗剪加固RC深T梁优化方法*

骆英, 经正男

(江苏大学国家级高端装备结构健康管理国际联合研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 深T梁因其极限承载力主要受剪力控制, 易发生脆性剪切破坏进而造成结构破坏。因此, 如何掌握梁内力流分布, 并采用相应的加固措施提高现役梁的抗剪承载力以减少结构垮塌就成为当前研究的热点。表层嵌贴CFRP筋加固技术因其包裹性好、整体粘结性能优、施工效率高且不增加结构自重等优势正在兴起。借鉴‘拉-压杆’模型, 数值分析研究深T梁的内力流分布规律, 并据此制定出简单及优化等2种加固方案, 构建相对应的2组实验深T梁并实施验证性实验。比对有关深T梁在加固前后的理论分析、数值模拟及验证性实验成果中的抗剪承载力及裂缝宽度等关键参数, 最终获证所选用的2种加固方案分别使得深T梁的抗剪承载力提高了45%、65%, 充分说明了本文所依据的原理及制定的加固方案有效、可行, 能够指导工程实际。

关键词: 深T梁; 力流分布; 嵌贴CFRP筋; 抗剪承载力; 优化加固

中图分类号: TU746.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0363-06

Optimized Schemes on Shear Strengthening of Deep T-Cross-sectional RC Beams with Surface Embedded CFRP Bars

LUO Ying, JING Zhengnan

(National Center for International Research on Structural Health Management of Critical Components,
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Due to its ultimate bearing capacity mainly controlled by the shear force, the deep T beam is prone to brittle shear failure and cause structural disaster. How to scientifically figure out the distribution of internal force flow in beams and adopt corresponding reinforcement measures to improve the shear capacity of active beams and reduce structural disasters has become a hot research topic. Surface embedded CFRP reinforcement technology is emerging as a result of its advantages of good encapsulation, excellent overall bonding performance, high construction efficiency and no increase in the weight of the structure. Based on the model of "tension and compression bar", the distribution law of internal force flow in deep T beam was studied numerically, and two reinforcement schemes, namely simple and optimized, were developed accordingly. Two groups of corresponding deep T beams were constructed and verified experiments were carried out. By comparing the key parameters such as shear capacity and crack width in the theoretical calculation, numerical simulation and confirmative experimental results before and after the reinforcement of deep T beam, the results show that the two presented

* 收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作项目(11520101001)资助

作者简介: 骆英(1960—), 男, 教授, 博士, 博导。主要从事结构健康监测及抗震加固改造研究。

E-mail: 775376182@qq.com

reinforcement schemes increases the shear capacity of deep T beam by 45% and 65%, which fully demonstrates the feasibility of the proposed reinforcement schemes and their principle. Based on the above research results, an invention patent has been applied to complete the corresponding reinforcement theory and technology and to guide the engineering practice.

Keywords: deep T-beams; distribution of internal force flow; NSM-CFRP bars; shear capacity; optimized schemes

引言

深 T 梁结构因其承载力高、自重轻而被广泛应用于高层结构的转化层、海工建筑的承重构件及大型浅仓侧壁^[1]。其极限承载力主要由剪力控制,易发生脆性的剪切破坏进而影响结构安全性。因此,如何科学的掌握梁内力流分布规律,进而制定相应的加固方案并予以实施,提高在役深梁的抗剪承载力是当前工程界的研究热点。现行的对工程结构加固的方法中,表层嵌贴 CFRP 法因其包裹性好、粘结及防火性优且节约材料等优势而正在兴起^[2-4]。

针对深 T 梁的特殊结构形式和受力特性,选用图 1(a)所示的‘拉-压杆’模型来表征深 T 梁的力学计算模型^[5-7];通过数值模拟^[8]及 DIC 测试技术^[9],提取出深 T 梁的内力流分布并绘制主应力迹线,并据此确定 CFRP 筋的嵌置位置。研究制定深 T 梁的简单及优化加固方案;比对模拟及实验梁在加固前后表面应变分布、CFRP 筋受力、跨中挠度、裂缝宽度、抗剪承载力等关键性参数,考察加固方案的可行性及有效性,以期对实际工程有指导意义。

1 相关理论及材料测试

1.1 深 T 梁‘拉-压杆’计算模型

根据规范[1],确保钢筋混凝土深 T 梁不出现斜裂缝时应满足下列条件:

$$V_k \leq 0.5f_{tk}bh_0 \quad (1)$$

且深 T 梁的抗剪截面应满足下列要求:

$$\gamma_0 V_d \leq 0.33 \times 10^{-4} (l/h + 10.3) bh_0 \sqrt{f_{ck}bh_0} \quad (2)$$

深 T 梁的抗剪承载力计算公式如下:

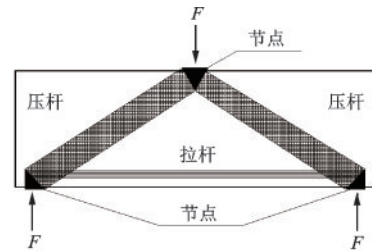
$$\gamma_0 V_d \leq 0.5 \times 10^{-4} \alpha_1 (14 - l/h) \cdot bh_0 \sqrt{(2 + 0.6p) \sqrt{f_{ck} \rho_s f_{sv}}} \quad (3)$$

式中, f_{tk} 、 $\sqrt{f_{ck}}$ 、 $\sqrt{f_{sv}}$ 分别为混凝土轴心抗拉/压强度标准值和钢筋极限强度值; b 、 h_0 、 l 分别为梁截面宽度、梁

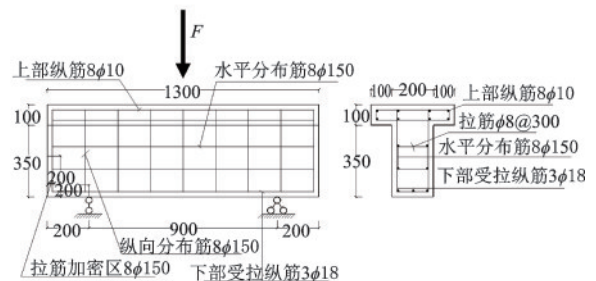
截面有效高度及梁跨度; γ_0 、 α 分别为结构重要性及折减系数。

1.2 实验用深 T 梁的材料参数测定

如图 1(b)所示的深 T 梁,长 1 300 mm,高 450 mm,保护层厚 25 mm,腹板厚 200 mm,翼缘宽 400 mm、厚 100 mm,选用 C30 混凝土和 HRB335 级钢筋;实测 C30 混凝土抗压强度为 38.6 MPa,HRB335 钢筋屈服强度为 412.45 MPa;经标准拉伸试验甄选含 32 股 CFRP 单丝制作的 CFRP 筋作为加固用筋,其抗拉强度为 1 485.3 MPa^[10];环氧胶粘结强度为 10 MPa;用双剪拉拔实验研究了 CFRP 筋-混凝土界面的粘结破坏机理,并依此确定 CFRP 筋的有效嵌贴长度,嵌贴加固的最佳胶层厚度为 1.5 mm^[11-12]。



(a) 实验梁所用‘拉-压杆’模型



(b) 实验梁的尺寸及布筋

图 1 实验梁的尺寸、布筋及计算模型

Fig.1 The parameters of the experimental beams

2 仿真及嵌贴 CFRP 加固方案

基于 ANSYS 仿真平台模拟出如图 2(a~c)所示的未经加固的深 T 梁在三点弯载荷作用下梁的

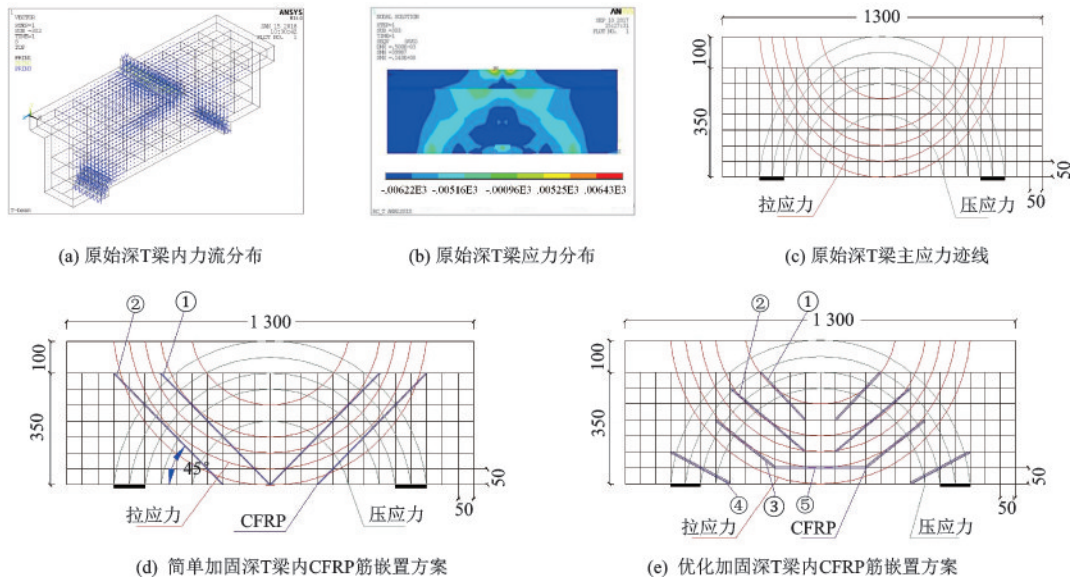


图2 原始深T梁内力流分布及各加固工况CFRP布置

Fig.2 The force flow distribution of original T-beam and the shear strengthening methods with CFRP bars

内力流分布、应力分布和主应力迹线图。据此拟定出图 2(d)所示的简单加固深 T 梁的加固方案:将①、②号 CFRP 筋相切于梁主应力迹线且与梁成 45°,满嵌至梁腹上、下两端;同时拟定另一个如图 2(e)所示的优化加固深 T 梁的加固方案:将①、②、③、④号 CFRP 筋中心点与拉应力迹线上的 σ_{\max} 重合,依据‘拉-压杆’模型,在梁下腹水平拉杆处嵌置⑤号 CFRP 筋,各点的嵌贴长度及角度见表 1。

表 1 优化加固方案中 CFRP 筋布置角度及长度参数
Table 1 The parameters of CFRP bars in optimized strengthening schemes

序号	片材中心点位 置/mm	最大拉应 力/MPa	最大长 度/mm	角度/(°)
1	(525,275)	3.85	212	45.0
2	(475,200)	5.61	320	38.7
3	(400,125)	4.79	250	36.9
4	(250,12)	4.25	224	26.6
5	(653,55)	5.24	300	0

注:坐标位置以梁的轴向向右为 X 正轴,垂直轴向向上为 Y 正轴,坐标原点为梁左下端端点

3 仿真与验证性实验成果对比分析

3.1 概述

依据仿真成果研制出图 3(a)、(c)、(e)所示的各工况下 3 组三点弯实验梁(左右支座距梁底左右

边各 200 mm, $\lambda < 1$, 每组 3 根);分别在梁及 CFRP 筋表面关键监测点布置应变片监测其应变;应用 DIC 技术^[9]监测梁在各级荷载下的全场应变。加载过程^[13]如图 4 所示,主要测量:梁表面应变、CFRP 筋受力、梁跨中挠度、裂缝宽度及三级荷载等。

3.2 梁表面应变分析

观察图 3(b)、(d)、(f)所示 ANSYS 模拟与 DIC 实测的三种工况梁表面全场应变分布云可知:深 T 梁在加载点与支座连线之间的应力扰动区域内应变最为集中,且剪切斜裂缝正萌发此域,验证了剪切应变集中区域易产生斜裂缝而导致梁破坏;梁上嵌贴有 CFRP 筋周边应变区域的大小与颜色深浅较原始梁均有所减弱,说明 2 种加固方案均使得 CFRP 筋有效发挥了抗拉作用,阻止应变的扩散并降低应变峰值;加载至 270 kN 时,未加固原始梁发生破坏,梁表面所圈点处应变为 1 011 $\mu\epsilon$,简单及优化加固梁表面所圈点处的应变值分别为 721 $\mu\epsilon$ 和 630 $\mu\epsilon$,仅为原始固梁的 59% 和 41%,说明 CFRP 筋能有效抑制应变增长,提高梁的承载力且强度储备富裕。

3.3 CFRP 筋受力分析

由图 5(a)、(b)可以看出,作用于筋材上的载荷在受力点附近通过界面层传递给混凝土且由中心点向两端递减扩展。考察梁中 1 号 CFRP 筋,其抗拉强度及与界面的粘结强度,简单加固后其分别有

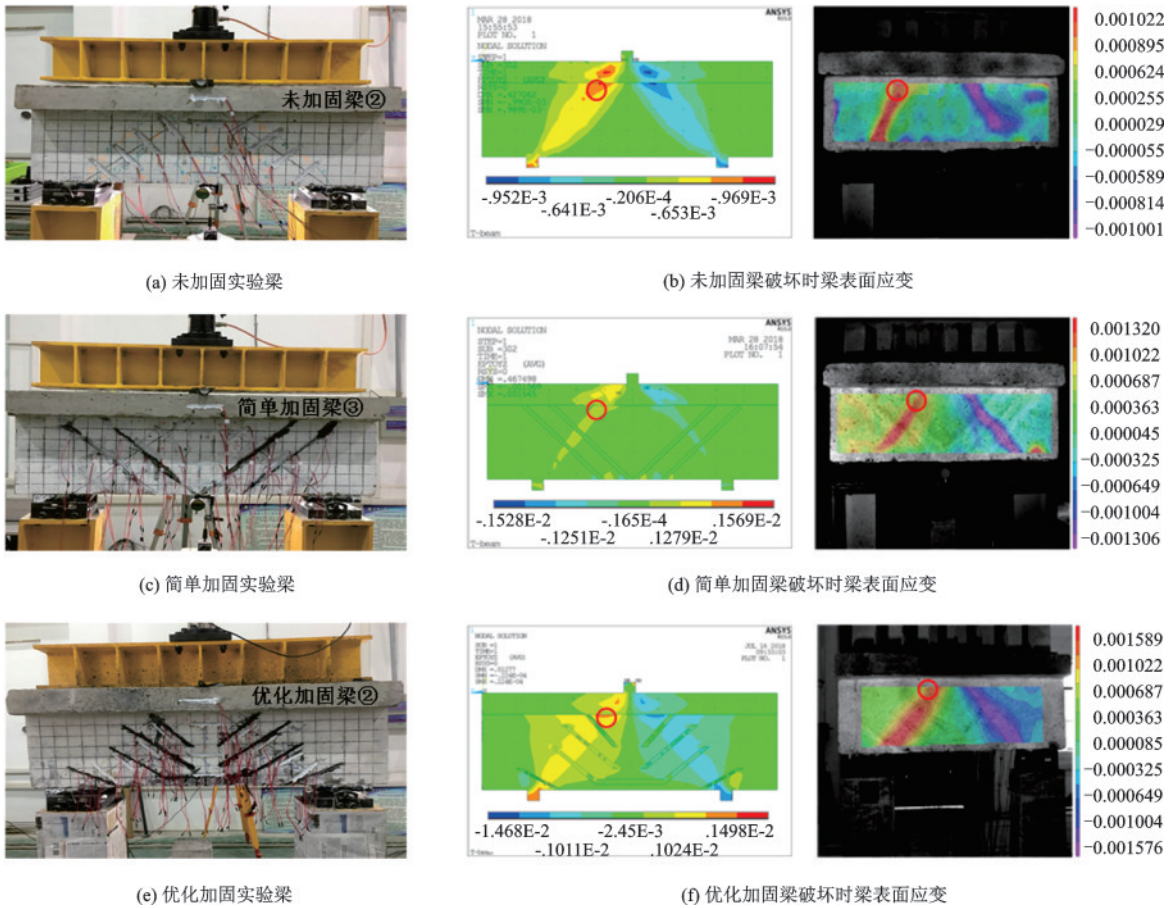


图3 各工况下 ANSYS 及 DIC 监测梁表面应变

Fig.3 The strain distribution by ANSYS and DIC of three working conditions

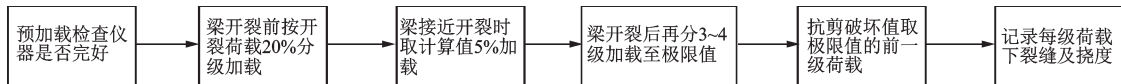


图4 实验梁加载程序图

Fig.4 The loading program of experimental beams

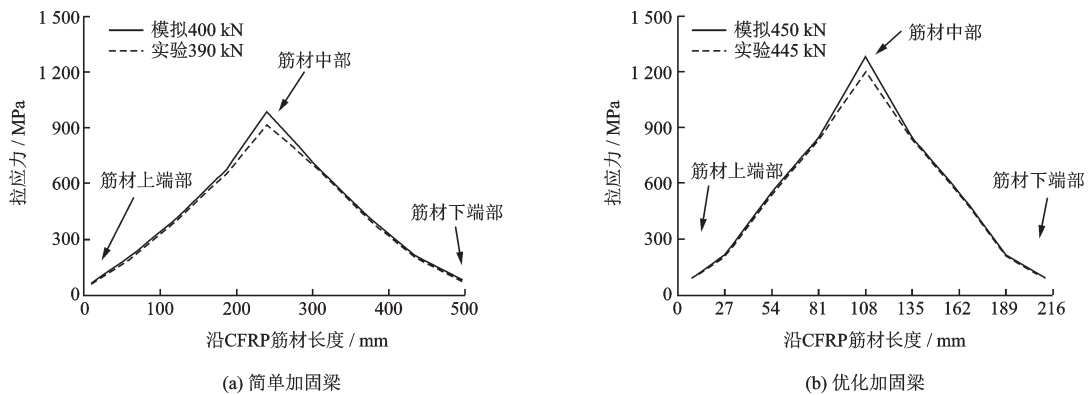


图5 简单及优化加固梁内1号CFRP筋拉应力沿长度分布

Fig.5 The No.1 CFRP bars' force analysis of simple and optimized reinforcement conditions

近 58%、42% 的富裕;而优化加固后筋材抗拉强度的富余量降为 18%、界面粘结强度下降到 19%。以上成果说明本文所拟定的简单加固方案尚未能使

CFRP 筋材较好地发挥出其抗拉功能;而优化加固方案已较好地挖掘了 CFRP 材料的抗拉特性,有效提升了深 T 梁的抗剪承载力。

3.4 梁跨中挠度、裂缝宽度、抗剪承载力分析

分析图6(a)、(b)可以看出,当未加固梁加载至270 kN破坏时(实验值),未加固、简单及优化加固梁的挠度分别为2.89、1.16、0.83 mm,简单及优化加固梁挠度较未加固梁分别降低1.49倍、2.48倍;当各工况梁均加载至斜向裂缝宽度超过0.2 mm临界裂缝宽度限值时,未加固、简单及优化加固梁达到抗剪破坏荷载分别为270、390、445 kN,说明选定的

加固中,CFRP筋均发挥了强化作用,提高梁的刚度进而有效抑制梁跨中挠度及裂缝宽度的发展。

表2为各加固工况梁在三种裂缝评判标准下的极限荷载模拟与试验值对比。可知,经简单及优化加固后梁的抗剪破坏荷载较未加固梁分别提高45%、65%,优化加固梁的抗剪破坏荷载较简单加固梁亦提高15%,两种加固方案均提高了梁的抗剪承载力,且优化加固方案较简单加固方案更优。

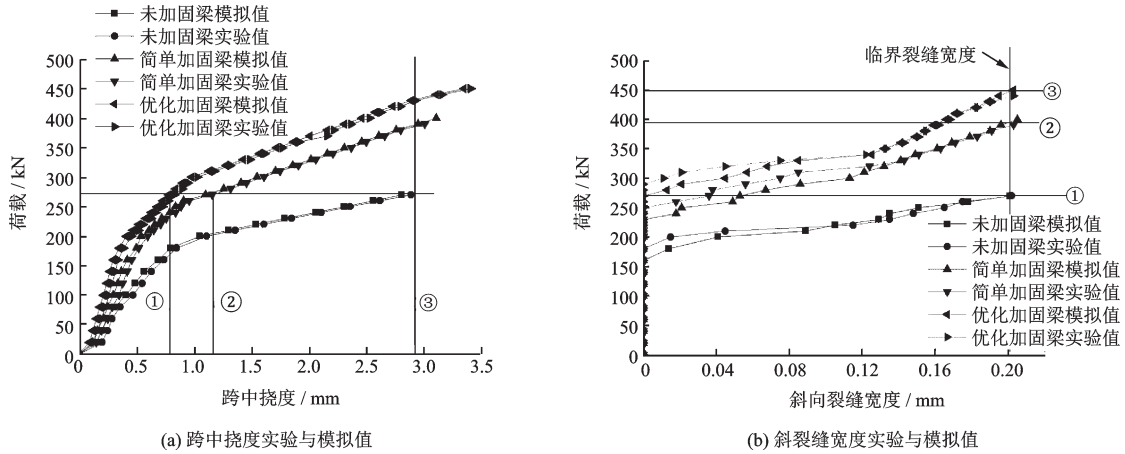


图6 三种工况梁模拟与实验的挠度及斜向裂缝宽度对比发展

Fig.6 The comparison of middle span deflection and incline crack width under three conditions

表2 未加固、简单及优化加固梁的三级荷载模拟与实验值对比

Table 2 The summary of experimental and simulation three level loads on three working conditions

单位:kN

工况	竖向开裂荷载			斜裂缝开裂荷载			抗剪破坏荷载			较未加固梁提高/%
	理论值	模拟值	试验值	理论值	模拟值	试验值	理论值	模拟值	试验值	
未加固梁	70	60	80	160	180	200	260	275	270	—
简单加固梁	—	140	160	—	240	260	—	400	390	45
优化加固梁	—	200	190	—	280	300	—	450	445	65

4 结论

以简支深T梁为例,借鉴‘拉-压杆’计算模型,通过理论分析、数值仿真提取出未加固梁内力流、应变分布,从而制定有效的简单及优化加固方式,最后通过实验验证,结果表明选用模型合理,加固方式可行,最终能够有效增加梁的承载力,具有实际工程意义。具体结论如下:

(1)模拟并绘制出未经加固原始深T梁受载后的力流分布、主应力迹线图,据此拟定出2种加固方案;模拟及实验研究表明‘拉压-杆’模型较为符合深T梁的受力特性。同时,深T梁的 $\lambda < 1$,梁发生斜

压破坏,符合深T梁的破坏形式。

(2)实验分析三种工况作用下深T梁的表面应变、CFRP筋受力、跨中挠度、斜向裂缝宽度及抗剪承载力等指标,两种选定的加固方案均能强化梁的刚度、提升梁的抗剪承载力,较未加固梁的抗剪承载力分别提高了45%、65%。

(3)2种加固方案中,优化加固方案中将CFRP筋材中心点布置于最大拉应力点处,使得筋材受力较简单加固更为合理,加固更优。

参考文献:

[1] 钢筋混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北

- 京:中国建筑工业出版社,2010.
Design specification for reinforced concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [2] Dias S J E, Barros J A O. Shear strengthening of RC beams with NSM CFRP laminates : Experimental research and analytical formulation[J]. Composite Structures, 2013, 99:477-490.
- [3] Tetta Z C, Bournas D A. TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures [J]. Composites Part B, 2016, 106: 190-205.
- [4] 白玉磊,韩强.FRP约束钢筋混凝土柱中钢筋屈曲行为研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(1):14-20.
Bai Y L, Han Q. FRP constraints reinforcement in the reinforced concrete column buckling behavior research [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1): 14-20.(in Chinese)
- [5] Mihaylow B I, Hunt B, Bentz E C, et al. Three-parameter kinematic theory for shear behaviour of continuous deep beams[J]. ACI Structural Journal, 2015, 112(1):47-58.
- [6] Hanoon A N, Jaafar M S, Hejazi F, et al. Strut effectiveness factor for reinforced concrete deep beams under dynamic loading conditions [J]. Case Studies in Structural Engineering, 2016, 6:84-102.
- [7] Tuchscherer R G, Birrcher D B, Williams C S, et al. Evaluation of existing strut and tie methods and recommended improvement [J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(6): 1451-1460.
- [8] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
Wang X M. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese)
- [9] 赵明珠,王志勇.基于三维数字图像相关法的面部表情变形测量研究[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(2):152-162.
Zhao M Zh, Wang Zh Y. On the facial expression deformation measurement based on 3dimensional digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(2):152-162.(in Chinese)
- [10] 定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法:GB/T3354—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
Test method for tensile properties of directional fiber reinforced plastics: GB/T3354—2014[S]. Beijing: China standard press, 2014.(in Chinese)
- [11] 邓江东.CFL增强RC梁界面力学行为研究[D]. 广东:华南理工大学, 2008.
Deng J D. Study on interface mechanical behavior of CFL reinforced RC beams [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2008.(in Chinese)
- [12] 王苏岩.恶劣环境与荷载共同作用下FRP-高强混凝土的粘结耐久性[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 128-133.
Wang S Y. The FRP under severe environment and load-bonding durability of high-strength concrete [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 128-133.(in Chinese)
- [13] 混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Standard for test methods for concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.(in Chinese)

(本文责编:赵霞)