钢筋布设对 GFRP-混凝土组合板弯曲性能影响的研究

佟兆杰[1]，陈宜言[1]，黄　侨[2]，许　翔[2]

（1. 深圳市市政设计研究院有限公司，深圳　518029；2. 东南大学交通学院，南京　211189）

摘要：钢筋的布设可以提高 GFRP-混凝土组合桥面板的弯曲刚度，改善组合板的延性，降低组合板的造价。此外，配筋组合板具有优于钢筋混凝土板的耐久性。本文基于截面分析法对配筋组合板的弯曲性能进行研究。首先基于平截面假定推导配筋组合板的截面分析模型，并通过 2 片试验板进行验证。然后采用截面分析法对钢筋布设与组合板刚度及延性的关系进行分析。分析表明：钢筋面积、GFRP 底板厚度都可以提高组合板的弯曲刚度；钢筋面积越大组合板延性越差，GFRP 底板越厚组合板延性越差；可以通过增加钢筋面积、减少 GFRP 底板厚度的方法提高组合板的刚度，并使组合板具有一定延性；当钢筋面积和 GFRP 板尺寸不变时，可以使钢筋尽量靠近桥面板底面布置，从而获得较好的弯曲刚度及延性。

关键词：桥梁；GFRP-混凝土；截面分析法；钢筋；弯曲刚度；延性

中图分类号：TB332　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-8000(2020)06-0051-06

1　前　言

环境中的氯离子会与桥面板中的钢筋发生反应，从而造成钢筋锈蚀、结构承载能力降低。当桥梁经常受超载车辆影响时，疲劳锈蚀的耦合作用会加剧桥梁病害，降低桥梁使用寿命。GFRP（玻璃纤维增强复合材料）-混凝土组合桥面板由于 GFRP 优异的材料特性增强了桥面板抗环境侵蚀的能力，提高了桥面板的使用寿命，成为高耐久性桥面板发展的一个方向。国内首座采用配筋 GFRP-混凝土组合板的钢-混组合连续梁桥已在合肥市建成，如图 1 所示。

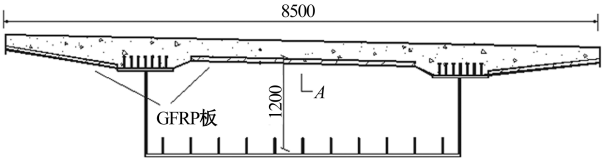


图 1　GFRP-混凝土-钢组合梁桥

Fig. 1　GFRP-concrete-steel composite beam bridges

GFRP 弹性模量低，在满足变形要求条件下，组合板的极限承载力远高于设计荷载，弯曲刚度为设计控制因素[1]。此外，由于 GFRP 线弹性的材料特性，GFRP-混凝土组合板破坏时缺少延性。将钢筋加入 GFRP 板中，可以增强组合板的延性，提高组合板的弯曲刚度，减少 GFRP 的材料用量，降低组合板的造价。并且由于 GFRP 板阻挡来自于桥面底部的环境侵蚀，增强了受拉钢筋的耐久性防护，提高了桥面板的使用寿命。对配筋 GFRP-混凝土板力学性能的研究将有利于该种结构的工程应用。

迄今为止，国内外学者依据不同的工程需求设计了不同截面形式的 GFRP-混凝土组合板并进行了相应的力学性能研究。组合板的种类有波折板[2,3]、槽形板[4]、箱形肋板[5]、箱室形板[6]等，力学性能研究包括静力性能[7]、疲劳性能[8]、界面性能[9]及组合板对组合梁的影响[10]等。王文炜等[11]对箱室形 GFRP-混凝土组合板进行了静力试验研究，并依据塑性理论建立了组合板冲剪破坏计算方法。Zuo 等[12]对承受负弯矩的 T 形肋 GFRP-混凝土组合板进行了试验研究，并建立了简化计算公式来计算试验板的弯曲及剪切承载力。配筋 GFRP-混凝土板由于钢筋的高弹模、弹塑性特性，增强了组合板的弯曲刚度，改善了极限状态的延性，其弯曲性能与 GFRP-混凝土组合板存在差异。目前有关配筋 GFRP-混凝土组合板弯曲性能的研究较少。

本文基于截面分析法对弯曲组合作用下钢筋与组合板弯曲刚度、曲率延性的关系进行了研究。首先推导了考虑材料非线性的配筋 GFRP-混凝土组合板截面分析模型，之后通过组合板的弯曲试验对分析模型进行了验证，最后采用计算模型对钢筋面积、钢筋位置与组合板的弯曲刚度、曲率延性的关系进行了分析。

2　配筋 GFRP-混凝土组合板截面分析方法

2.1　本构模型

GFRP-混凝土桥面板由 GFRP、混凝土、钢筋三种材料组成，各材料参数本构如下：

收稿日期：2019-11-05

基金项目：中国博士后科学基金资助项目（2019M653085）；中国交通建设股份有限公司资助项目（271400140114）

作者简介：佟兆杰（1988-），男，博士，博士后，主要从事新型桥梁组合结构方面的研究，zongshi2006@163.com。

(1)混凝土受压应力-应变关系[13]为:

$$\begin{cases}\sigma_c=f_c\left[2\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}-\left(\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2\right] & (0\leqslant\varepsilon_c\leqslant\varepsilon_0)\\ \sigma_c=f_c & (\varepsilon_c>\varepsilon_0)\end{cases} \tag{1}$$

式中:σ_c 为混凝土应力;ε_c 为混凝土应变;f_c 为混凝土轴心抗压强度;ε_0 为 0.002。

(2)钢筋应力-应变关系为:

$$\begin{cases}\sigma_s=E_s\varepsilon_s & \varepsilon_s\leqslant\varepsilon_{s,y}\\ \sigma_s=f_s & \varepsilon_s>\varepsilon_{s,y}\end{cases} \tag{2}$$

式中:σ_s 为钢筋应力;ε_s 为钢筋应变;f_s 为钢筋屈服强度;$\varepsilon_{s,y}$ 为钢筋屈服应变。

(3)GFRP 应力-应变关系为:

$$\begin{cases}\sigma_f=E_f\varepsilon_f & (\varepsilon_f<f_f/E_f)\\ \sigma_f=f_f & (\varepsilon_f=f_f/E_f)\end{cases} \tag{3}$$

式中:σ_f 为 GFRP 应力;ε_f 为 GFRP 应变;E_f 为 GFRP 板在纤维方向的弹性模量;f_f 为 GFRP 板在纤维方向的拉伸强度。

2.2 截面分析计算

这里采用如下假定进行开裂后截面应变分析:①组合板基本符合平截面假定;②忽略受拉区混凝土的贡献。依据平截面假定建立截面各处应变的相关关系,并用受压区高度 x 和混凝土顶面应变 ε_{cc} 表示截面各点应变,如式(4)所示。之后依据内力平衡条件求解出不同弯矩下对应的截面应变分布。配筋组合板截面分析模型如图 2 所示。

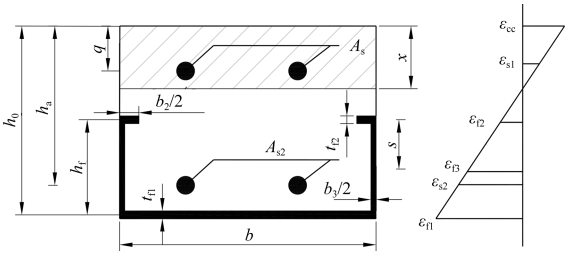


图 2 GFRP-混凝土桥面板的受弯分析模型

Fig. 2 Bending analysis model of GFRP-concrete bridge decks

$$\begin{cases}\varepsilon_{f3}=\dfrac{\varepsilon_{f1}-\varepsilon_{f2}}{h_f}s+\varepsilon_{f2}\\ \varepsilon_{f2}=\dfrac{h_0-x-h_f}{x}\varepsilon_{cc}\\ \varepsilon_{f1}=\dfrac{h_0-x}{x}\varepsilon_{cc}\\ \varepsilon_{s1}=\dfrac{x-q}{x}\varepsilon_{cc}\\ \varepsilon_{s2}=\dfrac{h_a-x}{x}\varepsilon_{cc}\end{cases} \tag{4}$$

式中:ε_{f3} 为到 GFRP 翼板中心线距离为 s 处的 GFRP 肋板应变;ε_{f2} 为 GFRP 翼板中心线处的应变;ε_{f1} 为 GFRP 底板中心线处的应变;ε_{s1}、ε_{s2} 分别为受压、受拉区钢筋应变;h_f 为 GFRP 翼板中心与 GFRP 底板中心的距离;h_0 为 GFRP 底板中心线到混凝土顶面的距离;h_a 为受拉钢筋到混凝土顶面的距离;x 为混凝土受压区高度;q 为钢筋形心到混凝土顶面的距离。

根据截面的内力平衡条件,得到方程(5)和方程(6):

$$M=\int_0^x\sigma(\varepsilon)by\mathrm{d}y+N_s(x-q)+N_{s2}(h_a-x)+T_{f1}(h_0-x)+T_{f2}(h_0-x-h_f)+\int_0^{h_f}(h_0-h_f-x+s)E_f\varepsilon_{f3}b_3\mathrm{d}s \tag{5}$$

$$C+N_s=T_{f1}+T_{f2}+T_{f3}+N_{s2} \tag{6}$$

其中:

$$\begin{cases}C=\int_0^x\sigma(\varepsilon)b\mathrm{d}y\\ N_s=\sigma(\varepsilon_{s1})A_s\\ N_{s2}=\sigma(\varepsilon_{s2})A_{s2}\\ T_{f1}=E_f\varepsilon_{f1}t_{f1}b\\ T_{f2}=E_f\varepsilon_{f2}t_{f2}b_2\\ T_{f3}=0.5E_f(\varepsilon_{f1}+\varepsilon_{f2})b_3h_f\end{cases} \tag{7}$$

式中:N_s 和 N_{s2} 分别为受压、受拉钢筋合力;T_{f3} 为 GFRP 竖肋的合力;T_{f2} 为 GFRP 翼板的合力;T_{f1} 为 GFRP 底板的合力;C 为受压区混凝土的合力;$\sigma(\varepsilon)$ 为混凝土应变为 ε 时的应力;b 为组合板的宽度;y 为受压区任意点到中性轴的距离;$\sigma(\varepsilon_{s1})$、$\sigma(\varepsilon_{s2})$ 分别为钢筋应变为 ε_{s1}、ε_{s2} 时的应力;A_s、A_{s2} 分别为受压、受拉钢筋面积;t_{f2} 为 GFRP 翼板的厚度;b_2 为 GFRP 翼板的宽度;t_{f1} 为 GFRP 底板的厚度;b_3 为 GFRP 肋板的宽度。

当给定截面弯矩 M 时,将方程(5)和方程(6)联立,求解出截面的应变分布。之后代入式(8)求解出截面曲率,并可依据经典梁理论计算出组合板变形。当假定混凝土极限压应变为 0.0033 时,可以将 $\varepsilon_{cc}=0.0033$ 代入方程(5)和方程(6),求解出极限弯矩。

$$\frac{1}{\rho}=\frac{\varepsilon_{cc}+\varepsilon_{f1}}{h_0} \tag{8}$$

3　试验验证

截面分析法在 GFRP-混凝土组合板的截面分析中已经有了一定应用[14,15]。本节通过两片 GFRP-混凝土组合板在完全组合时的试验结果对本文所建模型的准确性进行验证。

试件 A-1 的计算跨径为 1.6 m,试件 A-2 的计算跨径为 1.4 m。两个试件的板宽均为 0.6 m。采用 4 点加载方式进行加载,组合板的截面尺寸及加载如图 3 所示。实测的材料参数:试件 A-1、试件 A-2 混凝土立方体抗压强度分别为 37.9 MPa、36.1 MPa,弹性模量分别为 32.1 GPa、31.6 GPa;HPB300 钢筋的屈服强度为 428 MPa,弹性模量为 210 GPa;GFRP 板纤维方向的拉伸强度为 555.6 MPa,弹性模量为 32.5 GPa。

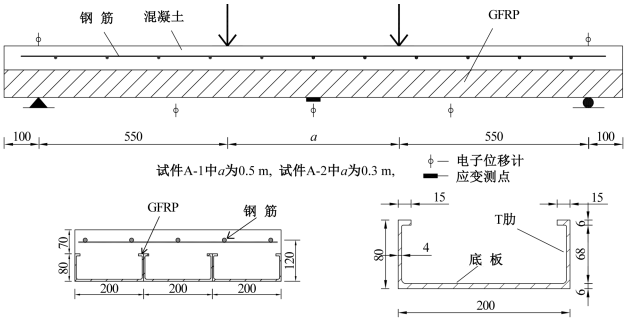
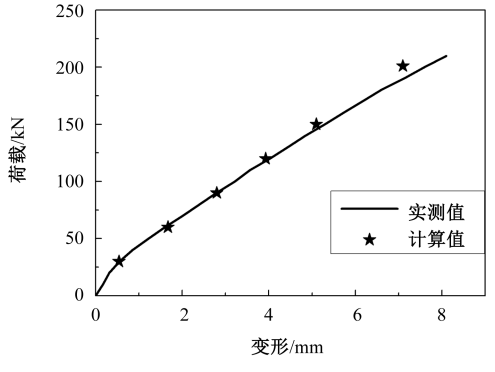


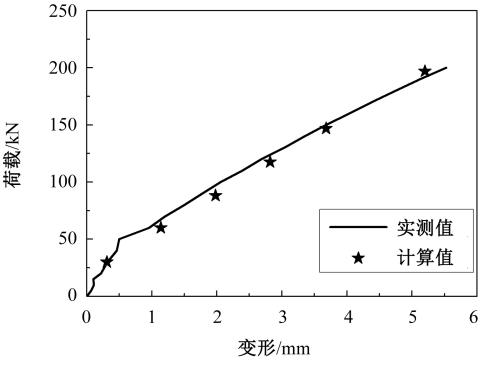
图 3　截面尺寸及测点布设/mm

Fig. 3　Details of specimens and arrangement of measurement points

为了消除试验板界面滑移的影响,对低于 0.7 倍极限荷载的实测结果进行比较。图 4 给出了采用上述分析方法计算的跨中变形值与实测值的对比。从图中可以看出实测值与计算值吻合较好,可以采用上述分析模型分析 GFRP-混凝土组合板。



(a) A-1



(b) A-2

图 4　跨中荷载-变形曲线对比

Fig. 4　Comparison of load-deflection curves at mid-span

4　弯曲性能与配筋的关系

钢筋的加入会增强 GFRP-混凝土组合板的刚度,提高组合板的延性。通过前述截面分析法建立配筋组合板非线性计算程序,对钢筋面积、钢筋位置与组合板的刚度及延性的关系进行研究。这里以试件 A-1 为例进行分析,其中受拉钢筋布置于距混凝土顶面 120 mm 处,90 kN 的集中荷载(相当于单个车轮并考虑了冲击力)作用于跨中。

图 5 为弯曲刚度与钢筋面积、GFRP 底板厚度的关系。图中,A_s为受拉钢筋面积;d 为 GFRP 底板厚度;EI 为组合板的弯曲刚度。从图 5 中可以看出,受拉钢筋、GFRP 底板都可以有效提高组合板的弯曲刚度,但综合考虑 GFRP 与钢筋的造价,可以适当地布设一定量的钢筋代替 GFRP 板,从而降低 GFRP-混凝土组合板的造价。此外,对等弯曲刚度下钢筋面积与底板厚度的关系进行了研究,如图 6 所示。随着底板厚度的增加,钢筋面积逐渐降低。等弯曲刚度下,钢筋面积与 GFRP 底板厚度成反比。

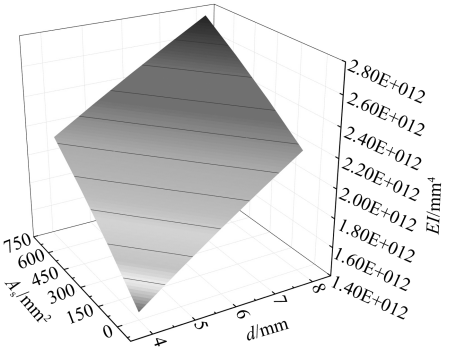


图 5　弯曲刚度与钢筋面积、GFRP 底板厚度的关系

Fig. 5　The relationship between rebar area, thickness of GFRP bottom plates and flexural stiffness

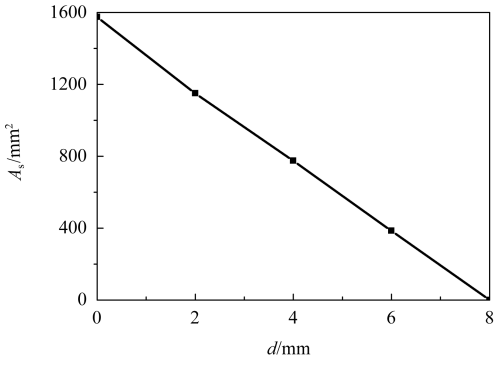


图 6 等弯曲刚度下钢筋面积与 GFRP 底板厚度的关系

Fig. 6 The relationship between rebar area and thickness of GFRP bottom plates under a fixed flexural stiffness

在组合板中加入钢筋,将使原 GFRP-混凝土组合板的破坏模式由脆性转为延性。这里采用式(9)对配筋 GFRP-混凝土组合板的延性进行评价。式中 $1/\rho_u$ 为采用截面分析法计算的混凝土达到极限压应变时的曲率,$1/\rho_y$ 为采用截面分析法计算的受拉钢筋屈服时的曲率。图 7 给出了曲率延性与 GFRP 底板厚度、钢筋面积的关系。从图中可以看出,在相同的 GFRP 底板厚度条件下,曲率延性随着钢筋面积的增大而减小;在相同钢筋面积条件下,曲率延性随着 GFRP 底板厚度的增加而减小。当综合考虑组合板的弯曲刚度及组合板的延性时,可以通过增加受拉钢筋面积、减小 GFRP 板厚度来实现具有良好弯曲刚度并拥有一定延性的 GFRP-混凝土组合板。

$$\mu = \frac{1/\rho_u}{1/\rho_y} \tag{9}$$

式中:μ 为曲率延性系数;$1/\rho_u$ 为极限弯矩时的曲率;$1/\rho_y$ 为受拉钢筋屈服时的曲率。

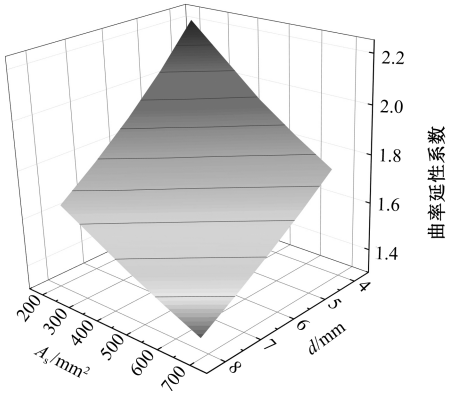


图 7 曲率延性与钢筋面积、GFRP 底板厚度的关系

Fig. 7 The relationship between rebar area, thickness of GFRP bottom plates and curvature ductility

钢筋布设位置的不同也会造成组合板弯曲刚度及延性改善的差异。这里对钢筋布设位置与弯曲刚度、曲率延性的关系进行研究。采用试件 A-1 的截面尺寸及材料参数,受拉区钢筋的面积为 775 mm^2。图 8 给出了钢筋位置与弯曲刚度的关系,从图中可以看出,钢筋越靠近组合板底面,组合板的弯曲刚度越高,组合板弯曲刚度与钢筋距混凝土顶面的距离成正比。图 9 给出了曲率延性与钢筋位置的关系,与弯曲刚度-钢筋位置关系相似,随着钢筋距混凝土顶面距离的增加,曲率延性线性增加,组合板曲率延性系数与钢筋距混凝土顶面的距离成正比。因此,在钢筋布设中可以尽可能地将钢筋布设于靠近组合板底面的位置来获取较好的弯曲刚度和延性。

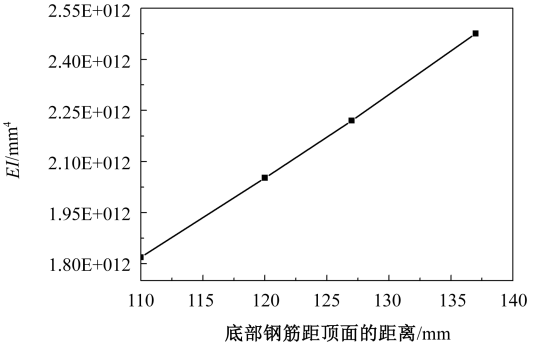


图 8 钢筋位置与弯曲刚度的关系

Fig. 8 The relationship between the position of steel bars and the flexural stiffness

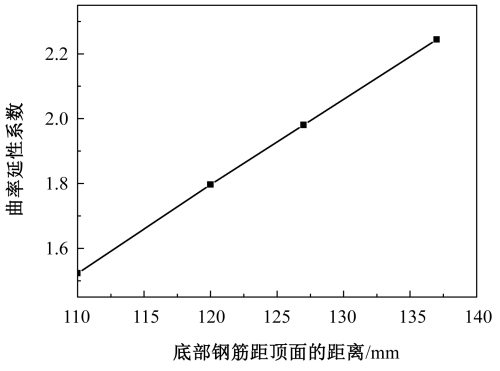


图 9 钢筋位置与曲率延性的关系

Fig. 9 The relationship between the position of steel bars and the curvature ductility

5 结 论

GFRP-混凝土组合板是一种新型的桥面板结构形式。在 GFRP-混凝土组合板受拉区布设钢筋可以有效地提高组合板的弯曲刚度,改善组合板的延性,并且由于 GFRP 板对钢筋的保护,可以使钢筋免受来自桥面板底部的环境侵蚀。本文对配筋 GFRP-混凝土组合板的弯曲性能展开了研究,得到如下结论:

(1)基于截面分析法预测的 GFRP-混凝土组合板变形与试验值吻合较好,截面分析法可以用于分析考虑材料非线性的 GFRP-混凝土组合板弯曲行为;

(2)在受拉区布设钢筋可以有效改善组合板的弯曲刚度及延性;在等弯曲刚度下,钢筋面积与 GFRP 底板厚度成反比;可以通过增加钢筋的面积、减少 GFRP 板的厚度满足桥面板的变形及延性要求,并降低组合板的造价;

(3)受拉钢筋距混凝土顶面的距离与弯曲刚度、曲率延性系数成正比,受拉钢筋可以尽可能布设于靠近 GFRP 底板的位置。

参考文献

[1] 佟兆杰, 黄侨, 鲍卫刚, 等. GFRP-混凝土组合连续板的静力性能试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 31-40.

[2] He J, Liu Y Q, Chen A, et al. Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 49-64.

[3] Fam A, Nelson M. New bridge deck cast onto corrugated GFRP stay-in-place structural forms with interlocking connections[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(1): 110-117.

[4] 佟兆杰, 黄侨, 高达文, 等. 不同连接程度 GFRP-混凝土桥面板力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 21-29.

[5] Dieter D A, Dietsche J S, Bank L C, et al. Concrete bridge decks constructed with fiber-reinforced polymer stay-in-place forms and grid reinforcing[J]. Transportation Research Record, 2002, 1814(1): 219-226.

[6] 郭诗惠, 蔡春声, 张建仁, 等. 界面优化下的 GFRP-混凝土组合桥面板静力性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 19-27.

[7] Cho K, Park S Y, Kim S T, et al. Behavioral characteristics of pre-cast FRP-concrete composite deck subjected to combined axial and flexural loads[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44(1): 679-685.

[8] Cheng L. Flexural fatigue analysis of a CFRP form reinforced concrete bridge deck[J]. Composite Structures, 2011, 93(11): 2895-2902.

[9] Goyal R, Mukherjee A, Goyal S. An investigation on bond between FRP stay-in-place formwork and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 741-751.

[10] Tong Z J, Song X D, Huang Q. Deflection calculation method on GFRP-concrete-steel composite beam[J]. Steel and Composite Structures, 2018, 26(5): 595-606.

[11] 黄辉, 王文炜, 戴建国. 双跨连续 GFRP-混凝土组合板的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 139-144.

[12] Zuo Y, Liu Y, He J. Experimental investigation on hybrid GFRP-concrete decks with T-shaped perforated ribs subjected to negative moment[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 728-741.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[14] Hall J E, Mottram J T. Combined FRP reinforcement and permanent formwork for concrete members[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(2): 78-86.

[15] Nelson M, Fam A. Modeling of flexural behavior and punching shear of concrete bridge decks with FRP stay-in-place forms using the theory of plates[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(12): 04014095.

STUDY ON THE INFLUENCE OF REINFORCEMENT ARRANGEMENT ON THE FLEXURAL PERFORMANCE OF GFRP-CONCRETE COMPOSITE DECKS

TONG Zhao-jie[1], CHEN Yi-yan[1], HUANG Qiao[2], XU Xiang[2]

(1. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China;
2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The steel bars could increase the flexural stiffness of GFRP-concrete composite bridge decks, improve its ductility and reduce the cost. Moreover, the durability of composite decks with steel bars was better than that of reinforced concrete decks. The flexural performance of composite decks was investigated based on the sectional analysis method. Firstly, the analysis model of composite decks with steel bars was established based on the plane

section assumption, and verified through experimental tests of two test decks. Then, the relationship between flexural stiffness, ductility and reinforcement arrangement was studied using the sectional analysis method. The analysis indicates that the area of steel bars and the thickness of GFRP bottom plates could increase the flexural stiffness of composite decks. A larger area of steel bars results in a lower ductility, and a thicker GFRP bottom plate result in a lower ductility. The method of increasing reinforcement area and reducing GFRP bottom plate thickness could improve the flexural stiffness and the ductility. When the size of GFRP plate and the reinforcement area are constant, the steel bar could be placed as close as possible to the bottom surface of bridge decks to obtain better flexural stiffness and ductility.

Key words: bridge; GFRP-concrete; sectional analysis method; steel bar; flexural stiffness; ductility

---

(上接第 24 页)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DYNAMIC RESPONSE OF CARBON FIBER LAMINATES IMPACTED BY SPHERICAL PROJECTILE

PENG jie, ZHANG Wei-qi, TIAN Rui, DENG Yun-fei*

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to study the impact resistance of carbon fiber composite laminates to spherical projectiles, the high-speed impact experimental tests of the laminates to projectile were carried out by using the one stage gas gun, and the impact process of the projectile target was recorded by high-speed camera. The damage area of laminated plates was detected by C-scan imaging and microscopy, and also the energy absorption rate, damage mode and energy absorption mechanism of the laminated plates were analyzed under different impact velocities. The results show that the residual velocity decreases firstly and then increases with the increase of the initial velocity of projectile, while the change rate of the residual velocity increases firstly and then decreases. When the initial velocity of the projectile is relatively low, the laminated plate mainly absorbs the kinetic energy of the projectile through its stratification. With the increase of the initial velocity of the projectile, the impact response time and delamination area of the laminate decrease. Fiber fracture becomes the main mode of energy absorption, and the energy absorption of the laminate decreases rapidly.

Key words: high speed impact; composite laminate; ballistic limit; energy absorption; failure mode