

# 界面增强 GFRP-砼组合板刚度分析与计算

曾学, 郭诗惠, 戴理朝

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 提出了一种使用砂粒和两种环氧粘结剂处理玻璃纤维增强聚合物材料(GFRP)-砼组合板界面的方法,通过静力破坏试验研究了其受力状态,分析了砼强度和厚度对组合板截面抗弯刚度的影响,进而提出了 GFRP-砼组合板抗弯刚度模型,并通过试验进行了验证。结果表明,经过含砂粘法处理界面后,组合板砼与 GFRP 处于完全共同作用的状态,组合板的刚度得到明显提高;在静载作用下,GFRP-砼组合板的变形基本保持线弹性变化,达到极限承载力后发生脆性破坏;提高砼强度对组合板截面抗弯刚度的影响较小,增大砼厚度能增强组合板截面抗弯刚度。

**关键词:** 桥梁;GFRP-砼组合桥面板;界面处理;抗弯刚度

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)04-0124-06

抗弯刚度是反映结构抗弯性能的重要指标,国内外学者对纤维增强聚合物材料(FRP)-砼组合板刚度计算提出了不同方法:Deskovic N.通过对一种新型截面形式的 FRP-砼组合梁短期性能和长期性能的理论分析与试验研究,提出了该种截面形式下 FRP-砼组合梁刚度计算方法;Harik I.等对一种由玻璃纤维增强聚合物材料(GFRP)拉挤板和砼组合形成的桥面板的静态性能进行评定,提出了相应刚度计算式;郭涛基于三箱式 GFRP-砼组合板试件的静力试验,提出了换算截面法的刚度计算式;徐博林针对 FRP 空心板-砼组合桥面板,提出了等效刚度法的刚度计算式。现有研究由于处理砼与 FRP 界面的方法不同,导致界面发生相对滑移,计算刚度时未考虑砼与 FRP 形成一个整体共同受力。该文通过对 GFRP-砼组合板试件的静力试验,研究在不同砼强度等级和厚度下经过界面处理后的组合板试件抗弯刚度变化规律,提出一种考虑 GFRP 与砼共同作用的组合板抗弯刚度计算式。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

设计制作 5 块 GFRP-砼组合板试件,编号为 FCP1~FCP5。FRP 桥面板结构形式中,正方形桥面板的材料利用率比三角形高,其单位 FRP 用量较少,经济性能较好;其有效宽度比三角 FRP 桥面板大且变形小,同时桥面质量轻,可大大降低桥梁恒载,提高有效承载力。因此,试件长度设计为 3 600 mm,截面形式为箱形(见图 1)。

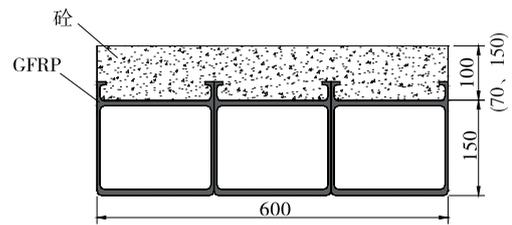


图 1 GFRP-砼组合板试件的横截面尺寸(单位:mm)

试件由上部砼和下部 GFRP 箱形板组成,且有 40 mm 厚的砼嵌在下部 GFRP 板的凹槽内。试件上部砼设计不同强度等级和厚度(见表 1);下部 GFRP 板的尺寸和材料完全相同,其由 3 个相同的单箱式 GFRP 构件通过环氧树脂粘结而成,GFRP 板的材料特性见表 2,单箱式 GFRP 构件的尺寸见图 2。

表 1 试件的砼强度等级及厚度

试件编号	砼等级	砼厚度/mm	试件整体尺寸/mm
FCP1	C30	100	3 600×600×250
FCP2	C40	70	3 600×600×220
FCP3	C40	100	3 600×600×250
FCP4	C40	150	3 600×600×300
FCP5	C50	100	3 600×600×250

表 2 GFRP 箱形板的材料特性

项目	测试值
泊松比	0.405
弹性模量/GPa	37.3
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 050
纵向拉伸强度/MPa	561

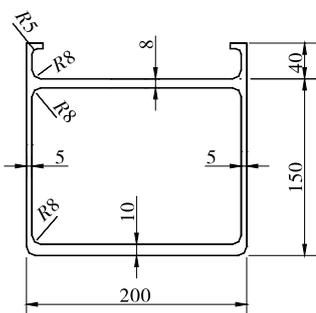


图 2 单箱式 GFRP 构件的横截面(单位:mm)

为使试件上部砼和下部 GFRP 形成一个整体共同受力,采用含砂粘结法处理组合板的界面。步骤为:1)对 GFRP 与砼接触的交界面进行打磨处理,并用酒精擦拭去除灰尘;2)在 GFRP 的交界面上涂刷一层 Sikafloor156 胶;3)在 Sikafloor156 胶未干结状态下,在其上表面涂刷一层环氧粘结剂胶层 Sikadur31CFN,胶层厚度为 4 mm;4)在胶层上均匀铺一层细砂粒,砂粒粒径为 5~8 mm,砂粒和胶层的面积比为 45%~50%(见图 3)。

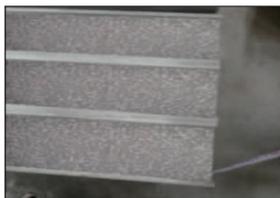


图 3 含砂粘结法处理砼与 GFRP 界面

界面处理完成后浇筑砼,制作砼立方体标准试块。在适宜外界环境下养护 28 d 后对砼试块进行抗压强度测试,结果见表 3。

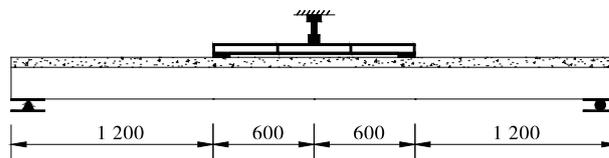
表 3 砼试块抗压强度测试结果

砼强度等级	抗压强度平均值/MPa
C30	38.5
C40	48.2
C50	58.9

### 1.2 试验加载

使用 1 000 N 电液伺服加载试验系统,采用两点对称集中加载方式。2 个加载板的中心位置相距 1 100 mm,剪跨比为 0.44。加载布置见图 4。

试件和加载装置布置完成后,布设挠度测点和应变测点。挠度测点共 6 个,编号 D1~D6,分别布置在跨中、加载点和两端支座处(见图 5)。在组合板试件跨中位置的侧面布置 5 个应变测点,编号 S1



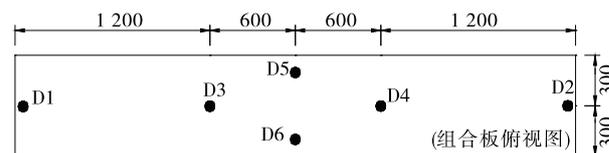
(a) 加载布置示意图(单位:mm)



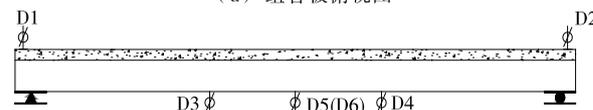
(b) 加载布置实图

图 4 试验加载布置

~S5,分别布置在砼的上下缘、GFRP 的上下缘和 GFRP 的中点(见图 6)。



(a) 组合板俯视图



(b) 组合板侧面图

图 5 挠度测点布置(单位:mm)

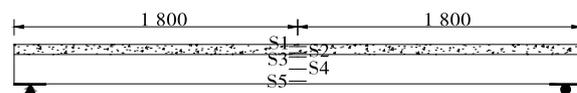


图 6 应变测点布置(组合板侧面,单位:mm)

为验证试件变形后的弹性恢复程度,在试件加载至破坏前将试验力卸载至零,记录试件的残余变形,再重新加载直至试件破坏。采用分级加载方式,每级荷载控制力为 20 kN,从零开始逐级加载,直至 400 kN;达到 400 kN 后开始逐级卸载,每级卸载控制力为 20 kN,直至卸载至零;卸载至零后,稳定 10 min,再重新逐级加载直至试件破坏。在开始加载前将挠度和应变测量设备的数据归零,每级加载或卸载完成后稳定 5 min,然后量测各测点挠度和应变值,完全卸载 10 min 后测量试件的残余变形。

## 2 试验结果

对挠度测量值和应变测量值进行处理,得到荷

载—挠度曲线和应变变化曲线(见图7、图8)。

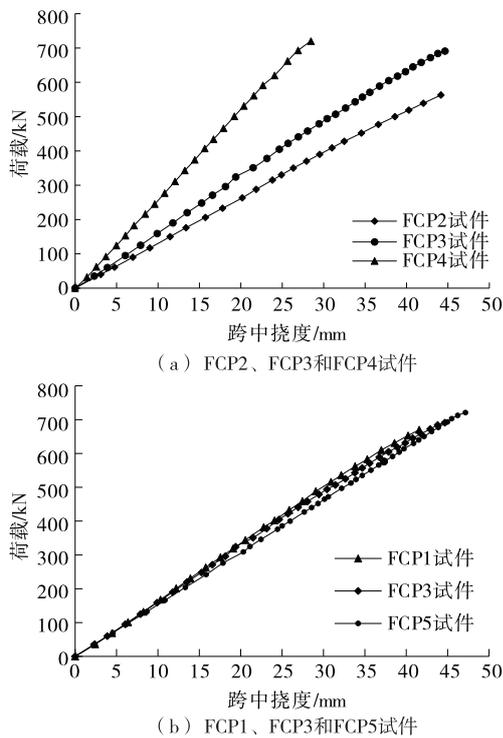


图7 试件的荷载—挠度曲线

从图7可看出:在试件未破坏前,所有试件的荷载—挠度曲线基本为直线,试件处于线性变形中,加载到极限荷载时,试件发生脆性破坏。砼厚度不同而砼强度等级相同时,试件FCP2、FCP3和FCP4荷载—挠度曲线的斜率差异明显,在承受相同荷载的情况下,砼厚度越小的试件其跨中挠度越大,表明厚度越小,试件的刚度也越小。砼厚度相同而砼强度等级不同时,试件FCP1、FCP3和FCP5的荷载—挠度曲线非常接近,近似为一条直线。在承受相同荷载的情况下,砼强度等级不同的试件其跨中挠度无明显改变,表明提高砼强度等级,试件的刚度无明显变化。荷载—挠度曲线表明试件在破坏之前的变形是线性变形,且加载到400 kN再卸载至零后试件跨中挠度的残余值在0.7 mm以内,可认为变形完全恢复,试件的变形为线弹性变形。在计算组合板试件刚度时,可将试件视为均质弹性材料。

从图8可看出:同一个组合板试件的应变曲线是一条直线,说明经过含砂粘结法处理后,各试件的跨中截面符合平截面假定,组合板的GFRP与砼通过粘结组成了一个整体共同受力,界面无相对滑移。

在加载过程中,随着试验力的增大,组合板试件的弯曲挠度不断增大,但未出现裂缝,GFRP和砼的

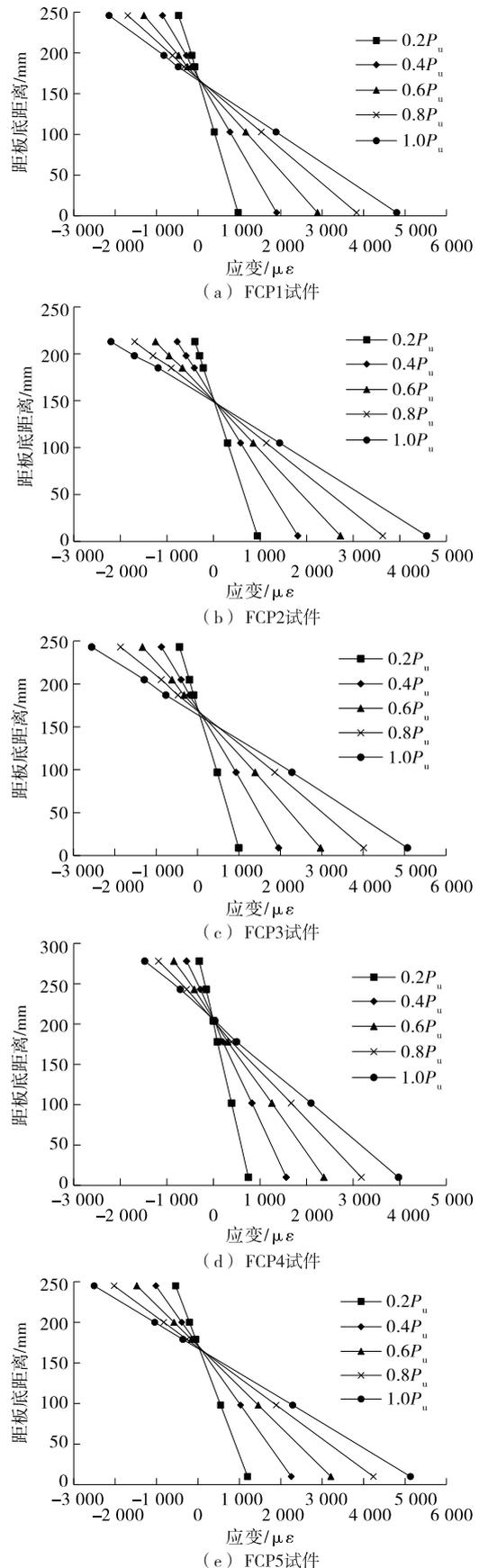


图8 试件的应变变化曲线

交界面处也未出现明显滑移;在试验力增大到极限承载力时,加载点处砼区出现裂缝,组合板试件迅速发生破坏。图 9 为两个有代表性的加载点处砼区裂缝。组合板试件的破坏形式为脆性破坏。



(a) FCP1试件



(b) FCP2试件

图 9 加载点处砼区裂缝实图

### 3 GFRP-砼组合板刚度计算模型

#### 3.1 理论模型的建立

考虑到含砂粘结法处理组合板试件界面的方法与现有研究不同,在建立模型之前先明确组合板试件界面的粘结状态。参考钢-砼组合结构对界面粘结的分类,砼与 GFRP 的组合效应可分为完全共同作用和部分共同作用两种状态。完全共同作用为砼与 GFRP 存在完整的协同工作,两者的相对滑移为零,界面完全粘结,截面符合平截面假定。部分共同作用为砼与 GFRP 存在一定的协同工作,砼与 GFRP 的相对滑移不可避免,但受到部分阻止。根据试验所得跨中截面应变变化曲线,组合板试件跨中截面处于完全共同作用的状态。

组合板跨中截面抗弯刚度由不考虑界面粘结效应时的抗弯刚度和界面粘结效应产生的抗弯刚度相加得到。

(1) 不考虑界面粘结效应时的抗弯刚度。根据 GB 50608-2010《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》,FRP-砼组合板试件跨中截面抗弯刚度按弹性方法计算。根据试验结果,GFRP-砼组合

板试件在整个加载过程中的变形都处于线弹性变形范围,因此,不考虑界面粘结效应的组合板试件的截面抗弯刚度为:

$$B_e = E_c A_c x_c^2 + E_f A_f x_f^2 \quad (1)$$

$$x_0 = \frac{E_c A_c x_{c0} + E_f A_f x_{f0}}{E_c A_c + E_f A_f} \quad (2)$$

式中: $B_e$ 为不考虑界面粘结效应的抗弯刚度; $E_c$ 和  $E_f$ 分别为砼、GFRP 的弹性模量; $A_c$ 和  $A_f$ 分别为砼、GFRP 的截面面积; $x_c$ 和  $x_f$ 分别为砼截面形心轴、GFRP 截面形心轴至板顶面的距离; $x_0$ 为组合板试件的截面形心轴至板顶端的距离; $x_{c0}$ 和  $x_{f0}$ 分别为砼、GFRP 的截面形心轴至组合板试件截面形心轴的距离。

(2) 界面粘结效应产生的抗弯刚度。为方便分析计算,将组合板简化成图 10(a),组合板上部为矩形砼,下部为箱形 GFRP。此时组合板中和轴  $bb'$  在砼中和轴之下、GFRP 中和轴之上。如图 10(b)所示,组合板应变由一条直线  $ac$  组成,上部砼区受压,下部 GFRP 受拉, $b$  处应变为零。砼截面压力  $F_N$  和 GFRP 截面拉力  $F_S$  分别按式(3)、式(4)计算:

$$F_N = KE_c A_c \left( D - \frac{S}{2} \right) \quad (3)$$

$$F_S = KE_f A_f \left( S + \frac{L}{2} - D \right) \quad (4)$$

式中: $K$ 为跨中截面曲率; $D$ 为整个截面中和轴与砼上表面的距离; $S$ 为砼高度; $L$ 为 GFRP 的高度。

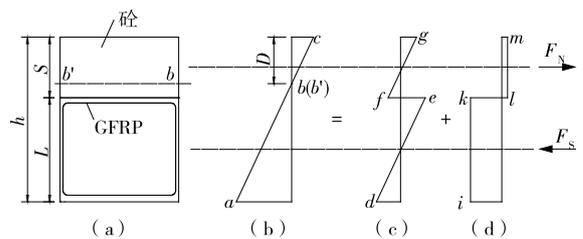


图 10 组合板截面应变分析示意图

由于组合板处于平衡状态,砼压力等于 GFRP 拉力,即  $F_N = F_S$ 。由此可求得中和轴高度  $D$ :

$$D = \frac{1}{2}S + \frac{E_f A_f (S + L)}{2(E_c A_c + E_f A_f)} \quad (5)$$

将跨中截面应变分解成不考虑界面粘结效应时的应变和界面粘结效应产生的应变[见图 10(c)和 (d)]。图 10(c)中,线段  $fg$  为砼区的应变,由于没有考虑界面粘结效应,下部 GFRP 对砼不存在摩擦力和粘结力,砼区自身保持平衡,其跨中截面符合平截面假定,中和轴在组合板中和轴之上;线段  $de$  为

GFRP 区的应变,其跨中截面符合平截面假定,中和轴在组合板的中和轴之下。图 10(d)中,线段  $ml$  为砼区压应变, $ki$  为 GFRP 区拉应变,其应变大小为线段  $ac$  的应变值分别与线段  $fg$ 、 $de$  的应变值之差。此时全截面抵抗弯矩为:

$$M = KB_c + F_N \left( \frac{S+L}{2} \right) \quad (6)$$

由式(3)~(6)得到弯矩—曲率关系式:

$$\frac{M}{K} = B_c + \left( \frac{S+L}{2} \right)^2 \left( \frac{E_c A_c \cdot E_f A_f}{E_c A_c + E_f A_f} \right) \quad (7)$$

由式(7)可得到界面完全粘结产生的抗弯刚度:

$$B_k = \left( \frac{h}{2} \right)^2 \cdot \frac{E_c A_c \cdot E_f A_f}{E_c A_c + E_f A_f} \quad (8)$$

式中: $h$  为组合板截面的整体高度。

组合板跨中截面抗弯刚度为:

$$B_s = E_c A_c x_c^2 + E_f A_f x_f^2 + \left( \frac{h}{2} \right)^2 \cdot \frac{E_c A_c + E_f A_f}{E_c A_c \cdot E_f A_f} \quad (9)$$

### 3.2 刚度试验值的确定

根据 GB 50608—2010《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》,组合板试件的挠度按照弹性方法的结构力学公式计算。图 11 为其计算简图。

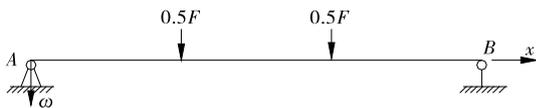


图 11 试件刚度计算简图

计算挠度时,采用积分法求梁的挠曲线方程:

$$\omega B_q = \iint M(x) dx dx + Cx + D \quad (10)$$

式中: $\omega$  为挠度; $B_q$  为抗弯刚度; $M(x)$  为截面弯矩; $C$ 、 $D$  为积分常数,其值由支承约束条件和位移连续性条件确定。

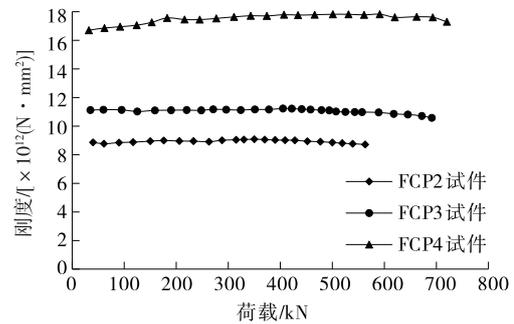
按照最小刚度原则,取跨中截面抗弯刚度作为研究对象。跨中截面抗弯刚度为:

$$B_q = \frac{227FL^3}{12 \ 800\omega} \quad (11)$$

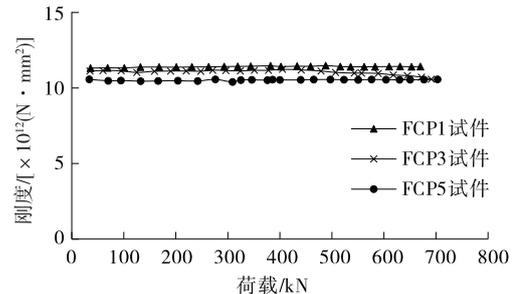
式中: $F$  为静力试验施加的荷载; $L$  为组合板试件的跨度。

将处理后的试验数据代入式(11),得到组合板试件的刚度变化曲线(见图 12)。

从图 12 可看出:1) 5 个试件的荷载—刚度曲线在试验加载过程中基本为一条平行于横轴的线段,没有明显的上升和下降段,说明组合板试件的刚度



(a) FCP2、FCP3和FCP4试件



(b) FCP1、FCP3和FCP5试件

图 12 各试件抗弯刚度变化曲线

在加载过程中基本保持不变,试件内部未出现明显损伤,试件最后的破坏形式为脆性破坏。2) 砼强度等级相同而试件厚度不同时,3 个试件的荷载—刚度曲线的高度出现明显差异,增加砼厚度从而使组合板试件厚度增加后,组合板试件的刚度得到很大提高。这主要是由于试件厚度增加使截面惯性矩增加,从而提高了试件刚度。3) 试件厚度相同而砼强度等级不同时,3 个试件的荷载—刚度曲线的高度差异较小,增加砼强度等级后,组合板试件的刚度增大很小,可认为基本保持不变。这主要是由于砼强度等级提高后,试件的弹性模量改变较小,因而试件刚度基本保持不变。

### 3.3 试验值与理论值对比

为验证上述刚度计算模型的正确性,将模型计算得到的刚度理论值  $B_s$  与未考虑粘结对应的刚度理论值  $B_c$ 、刚度试验值  $B_q$  进行对比。由于在加载过程中组合板试件跨中挠度和荷载的变化基本呈线性,刚度在整个加载过程中基本保持不变,可将各荷载下组合板试件跨中截面抗弯刚度平均值认为是  $B_q$ (见表 4)。

从表 4 可以看出:刚度计算模型得出的理论值  $B_s$  和试验值  $B_q$  的误差较小,平均为 8.24%,两者较吻合;而理论值  $B_c$  比试验值  $B_q$  减小 48.80%。相对于界面未粘结的组合板,经过含砂粘结法界面处理的组合板的抗弯刚度得到很大提升,该界面处理方法可行。

表4 跨中截面抗弯刚度试验值和理论值对比

砼厚度/mm	砼强度等级	跨中截面抗弯刚度/ $[\times 10^{12}(\text{N} \cdot \text{mm}^2)]$			$B_e$ 和 $B_q$ 的	$B_s$ 和 $B_q$ 的
		理论值 $B_e$	理论值 $B_s$	试验值 $B_q$	相对误差/%	相对误差/%
100	C30	6.50	13.50	12.40	47.58	8.15
70	C40	4.68	9.76	10.40	55.00	6.56
100	C40	6.80	14.10	12.90	47.28	8.51
150	C40	10.80	22.30	20.30	46.80	8.97
100	C50	6.90	14.40	13.10	47.33	9.03

分析产生误差的原因,主要为:1) 计算模型误差,如实际受力的简化、计算模型的假设条件等不完全符合实际情况。2) 试件制作误差,如 GFRP 材料特性和砼强度的实际值与设计值存在偏差。3) 数据采集误差,如试验力、挠度和应力采集数据与实际值存在偏差。

#### 4 结论

(1) GFRP-砼组合板在静载作用下的弯曲变形基本为线弹性变形,跨中抗弯刚度基本保持不变。达到极限承载力时,加载点处砼出现裂缝,构件发生脆性破坏。

(2) GFRP-砼组合板的跨中截面抗弯刚度随着砼厚度的增大而显著增大,随着砼强度等级的提高轻微增大。

(3) 经过含砂粘结法处理界面后,组合板中 GFRP 与砼处于完全共同受力状态,计算出的刚度理论值与试验值较为吻合,对比未考虑粘结效应的理论值有了较大提高。

该文采用的试件只选取了 3 种砼强度等级,试件数量也较少,考虑到砼的离散性,以后的研究应扩大砼强度范围、增加试件数量,以得到更具普遍性的研究结论。

#### 参考文献:

- [1] M Shafqat Ali, Chenhui Ji, M Saeed Mirza. Durable design of reinforced concrete elements against corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93.
- [2] R Kalfat, R Al-Mahaidi. Improvement of FRP-to-concrete bond performance using bidirectional fiberpatch anchors combined with FRP spike anchors [J]. Composite Structures, 2016, 155.
- [3] Behrouz Zafari, Jawed Qureshi, J Tobymottram, et al. Static and fatigue performance of resin injected bolts for a slip and fatigue resistant connection in FRP

bridge engineering [J]. Structures, 2016, 7.

- [4] Yihua Zeng, Robby Caspele, Stijn Matthys, et al. Compressive membrane action in FRP strengthened RC members [J]. Construction and Building Materials, 2016, 216.
- [5] Valbona Mara, Reza Haghani, Peter Harryson. Bridge decks of fiber reinforced polymer (FRP): a sustainable solution [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50.
- [6] Valbona Mara, Robert Kliger. An approach to the development of connections between fibre reinforced polymer bridge decks [J]. Case Studies in Structural Engineering, 2016, 5.
- [7] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(3).
- [8] Deskovic N, Triantafillou T C. Innovative design of FRP composite members combined with concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(7).
- [9] Harik I, Alagusundaramoorthy P, Siddiqui R, et al. Testing of concrete-FRP composite deck panels [A]. Proceedings of 5th Construction Materials Congress. ASCE Materials Engineering Division [C]. 1999.
- [10] 郭涛. GFRP-混凝土组合桥面板受力性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [11] 徐博林. FRP 空心板-混凝土组合桥面板静力设计方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [12] 黄利勇. 常用桥型 FRP 桥面板设计研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [13] 张培信. 钢-混凝土组合结构设计 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- [14] GB 50608-2010. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范 [S].
- [15] 柯红军, 马伟. RPC-正交异性组合桥面板荷载横向分布系数研究 [J]. 公路与汽运, 2016(4).
- [16] 郭涛. GFRP-混凝土组合桥面板受力性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.