

## 不同连接程度 GFRP-混凝土桥面板 力学性能试验研究

佟兆杰,黄侨<sup>†</sup>,高达文,宋晓东  
(东南大学 交通学院,江苏 南京 211189)

**摘要:**提出了一种简便的改进 GFRP-混凝土组合板连接程度并进一步改进组合板延性的方法,即通过砾石覆盖率来改变 GFRP-混凝土界面的黏结强度,并利用界面黏结失效前后组合板连接机理的变化来改变组合板的弯曲刚度,进一步改变组合板的延性.通过 5 片足尺 T 形 GFRP-混凝土组合板四点弯曲试验研究了不同连接程度下组合板受力性能的差异.试验中,重点关注了变形、板端滑移、应变分布、破坏模式等力学参量.试验结果表明,尽管无黏结 T 形 GFRP 板与混凝土的界面光滑,但 GFRP 板与混凝土间已表现出部分组合作用.砾石覆盖率的变化可以改变组合板的连接程度、破坏模式、极限荷载及其延性.合理的砾石覆盖率可以使组合板在板端出现滑移前具有很好的抗弯刚度,在出现板端滑移后仍具有较好的变形能力,并且不会显著降低组合板的极限荷载.最后,通过理论方法对组合板的开裂荷载和抗剪承载力进行了计算分析.研究表明,理论值与试验值吻合较好.

**关键词:**GFRP-混凝土组合板;连接程度;延性;覆盖率;开裂荷载;抗剪承载力

**中图分类号:**U443.3;TU311

**文献标志码:**A

## Experimental Study on GFRP-concrete Bridge Decks with Different Connection Degree

TONG Zhaojie, HUANG Qiao<sup>†</sup>, GAO Dawen, SONG Xiaodong  
(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** This paper presented a simple method to improve the connection degree of GFRP-concrete composite decks and further improved the ductility of the composite decks. The connection strength of GFRP-concrete interface was changed by using different gravel coverage. The bending stiffness was significantly changed due to the connection mechanism change after the GFRP-concrete interface failed, and the ductility was also further improved. Five full-size T-shape GFRP-concrete composite decks were tested to explore the difference of the mechanical properties of composite decks with different connection degree. In the experiment results, deformation, slip at the end of decks, strain distribution and failure modes were mainly examined. The experimental results show that although the GFRP-concrete interface of the specimen with unbonded interface is smooth, partial composite action between

\* 收稿日期:2018-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278119), National Natural Science Foundation of China(51278119); 中国交通建设股份有限公司资助项目(271400140114), Fiscal Support Provided by China Communications Construction Company Ltd. (271400140114)

作者简介:佟兆杰(1988—),男,河北廊坊人,东南大学博士研究生

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: qhuanghit@126.com

GFRP plate and concrete can be observed. A variable gravel coverage changed the failure mode, ultimate load, connection degree and ductility. A reasonable gravel coverage can provide an effective composite action before slip at the end of decks occurs, offer a large deformation after slip occurs, and not significantly reduce the ultimate load. At last, the consistency of theoretical results with experimental results demonstrates that the cracking load and shear capacity can be predicted by using the methods in the paper.

**Key words:** GFRP-concrete decks; connection degree; ductility; coverage; cracking load; shear capacity

截至 2017 年,我国公路桥梁已超过 80 万座。但是由于超重、氯离子侵蚀、混凝土碳化等问题<sup>[1-2]</sup>,已建桥梁面临着严峻的养护压力。混凝土桥面板是桥梁构件中易损的构件之一,提高桥面板的耐久性将会提高整个桥梁结构的使用寿命。GFRP-混凝土组合桥面板具有承载力高、抗氯离子侵蚀能力强、抗疲劳性能好等特点,将其应用于桥梁中将会明显提高桥面板的使用寿命,进而提高整体桥梁结构的使用寿命。目前,国外已有一些不同截面形式的 GFRP-混凝土组合桥面板应用实例,我国第一座采用 T 形肋截面的 GFRP-混凝土组合板的钢-混凝土组合连续梁桥也将用于合肥郎溪路高架桥的工程建设中,并称之为 GFRP-混凝土-钢组合连续梁桥。GFRP 板与混凝土的连接方式直接影响到 GFRP-混凝土板的组合作用。良好的界面连接可使组合板呈现出完全组合作用,但也降低了组合板的极限变形,并将破坏过程变为脆性破坏。无黏结的界面形式可使组合板直接发生界面剥离破坏,或者极大地降低组合板的刚度。将 GFRP 板与混凝土的连接方式设置为部分连接,在 GFRP-混凝土界面失效前,通过 GFRP-混凝土界面连接使组合板具有良好的抗弯刚度;在界面破坏后,仍可依靠特定截面形式的 GFRP 板机械锚固力以及 GFRP-混凝土界面摩擦力承担荷载。通过连接机理的改变可以实现组合板的延性破坏。对不同连接程度 GFRP-混凝土组合板的试验研究将有益于了解不同连接程度下 GFRP-混凝土组合板受力性能的差异,有益于组合板的延性改进,并为组合板在桥梁中的应用奠定基础。

GFRP-混凝土组合板截面形式<sup>[3-5]</sup>以及可靠的 GFRP-混凝土连接方式<sup>[6-9]</sup>一直是 GFRP-混凝土组合板研究的热点。早在 20 世纪末, Hall 等<sup>[10]</sup>较早地开展了 GFRP-混凝土组合板静力试验,研究了 GFRP-混凝土界面的黏结性能以及组合板的静力

特性。此后,国内外学者对不同截面形式组合板的力学性能进行了试验研究,如波折形 GFRP-混凝土组合板<sup>[11]</sup>、箱室形 GFRP-混凝土组合板<sup>[12]</sup>、T 形 GFRP-混凝土组合板<sup>[13]</sup>等。在静力试验中,不同的界面类型常常作为试验变量,以此寻找可为该种 GFRP-混凝土组合板提供可靠连接的界面形式。开孔板剪力件<sup>[14]</sup>、粗砂界面<sup>[15]</sup>、湿胶黏结界面<sup>[16]</sup>等界面形式均被应用于组合板的静载试验中。

但上述不同界面类型的组合板试验研究主要集中于无黏结或可靠黏结状态下组合板受力性能的探索,尚缺少不同连接程度下组合板受力性能的系统研究。本文提出了一种改变 GFRP-混凝土连接程度的方法,即:改变砾石界面中砾石的覆盖率来改变连接程度。砾石覆盖率的改变可以改变 GFRP-混凝土砾石界面的黏结强度,在界面失效前利用砾石界面剪切刚度高的特点来保障较好的组合作用;在界面失效后,通过机械锚固力好的 T 形肋以及 GFRP 板与混凝土间的摩擦力提供部分组合作用。通过对界面类型和 GFRP 板截面形式的合理选择实现部分连接。本文对 5 片足尺的 GFRP-混凝土组合板进行了四点弯曲试验,通过变形、滑移、延性、极限荷载的对比研究了不同连接程度的 GFRP-混凝土组合板的静力性能。最后建立了组合板的开裂荷载及抗剪承载力理论计算方法。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计及材料参数

本次试验共设计了 5 片足尺简支 T 形 GFRP-混凝土组合板。简支板的计算跨径为 1 600 mm,板宽为 600 mm,板高 150 mm;组合板由 GFRP 板与混凝土组成,单个 GFRP 板采用文献[17]中的截面形式。试件构造形式如图 1 所示。板与板之间通过肋板侧壁的环氧树脂连接成一个整体。

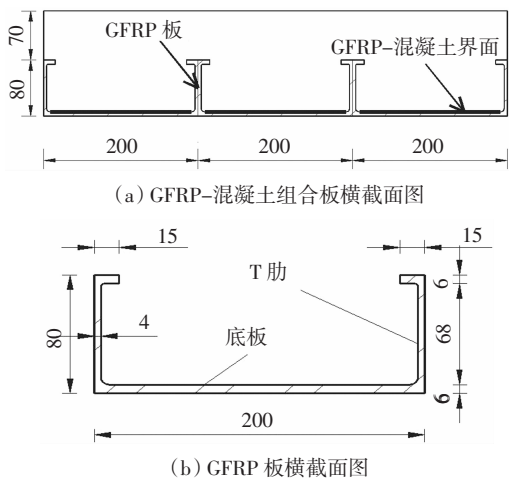


图 1 试件(单位:mm)

Fig.1 Specimens (unit: mm)

试验中采用了 3 种 GFRP-混凝土界面形式. 试件 D1 采用无黏结界面形式, 以此模拟无连接状态下 GFRP-混凝土组合板的受力性能; 试件 D2、D3 和 D4 采用砾石界面形式, 通过变换砾石的覆盖率来改变 GFRP-混凝土组合板的连接程度; 试件 D5 采用湿胶黏结形式, 以此模拟完全连接状态下 GFRP-混凝土组合板的界面形式. 连接程度的定义见式(1).

$$n = \frac{\tau_s}{\tau_f} \quad (1)$$

式中: $n$  为连接程度; $\tau_s$  为不同覆盖率下砾石界面的剪切强度; $\tau_f$  为湿胶黏结界面的剪切强度.

### 1.2 试验材料

混凝土的设计强度等级为 C35, 各试验板的实测混凝土立方体抗压强度平均值见表 1. GFRP 板纤维方向弹性模量为  $3.25 \times 10^4$  MPa, 纤维方向拉伸强度为 555 MPa, 纤维方向压缩强度为 273 MPa; GFRP 板垂直纤维方向模量为  $1.08 \times 10^4$  MPa, 拉伸强度为 103.5 MPa, 压缩强度为 80.9 MPa. GFRP 板的重量为  $19 \text{ kN/m}^3$ .

表 1 试件参数

Tab.1 Parameter of the specimens

试件名称	界面形式	砾石覆盖率/%	混凝土立方体抗压强度/MPa
D1	无黏结	—	42.0
D2	砾石界面	15.6	35.8
D3	砾石界面	20.2	32.6
D4	砾石界面	50.5	32.9
D5	湿胶界面	—	37.9

### 1.3 试件制作

依据 GFRP-混凝土界面形式的差别, 组合板的制作可以分为 3 种.

试件 D1(无黏结界面): 在工厂通过拉挤工艺生产 GFRP 板(如图 2(a)所示), 并将各个 GFRP 板通过侧壁上的环氧树脂连接成一体(如图 2(b)所示). 再在 GFRP 板侧面设立木模板并浇筑混凝土形成 GFRP-混凝土组合板. 混凝土浇筑前的 GFRP-混凝土界面如图 2(c)所示.

试件 D2~D4(砾石界面): 按照设计图纸生产 GFRP 板, 采用与试件 D1 相同的制作步骤. 但在 GFRP 底板顶面涂抹一层胶体并在胶体凝固前撒一层砾石形成砾石界面, 如图 2(d)和(e)所示. 待胶体完全凝固后架立木模板浇筑混凝土.

试件 D5(湿胶界面): GFRP 板的制作过程与前相同. 在 GFRP 板侧面架立木模板, 仅在 GFRP 底板顶面涂抹一层胶体, 不撒砾石层, 并在胶体凝固前浇筑混凝土. 其界面形式如图 2(f)所示.

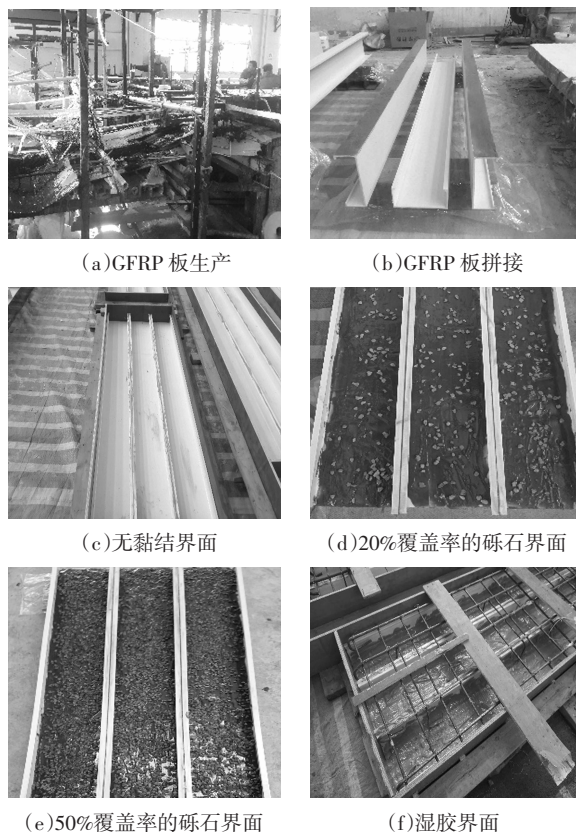


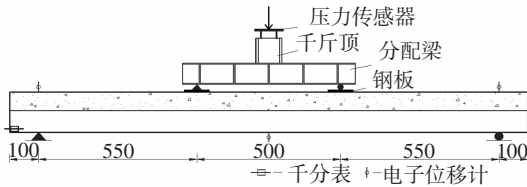
图 2 GFRP-混凝土组合板制作

Fig.2 Fabrication of GFRP-concrete decks

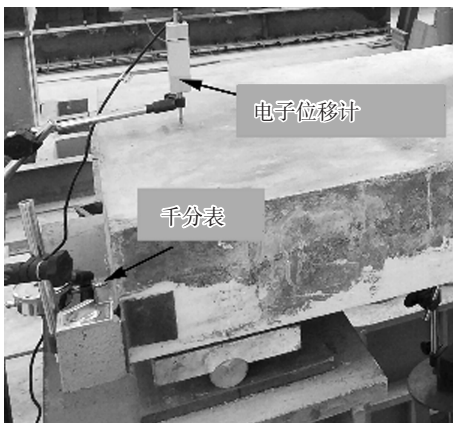
### 1.4 加载与测量装置

试验中通过一个 500 kN 的千斤顶进行加载. 在跨中、支撑点处布设电子位移计测取组合板的竖向

位移;在跨中的GFRP板和混凝土侧面和顶面布设应变片,测取跨中的应变分布;为了对比不同砾石覆盖率对板端滑移的影响,在试件D2~D4的板端布设千分表测取GFRP板与混凝土的滑移.位移和应变的数据采用东华3816N型静态应变仪测取.试件的加载及测点布置如图3所示.



(a) 简支板加载图



(b) 千分表布置

图3 加载详图(单位:mm)

Fig.3 Details of test setup (unit: mm)

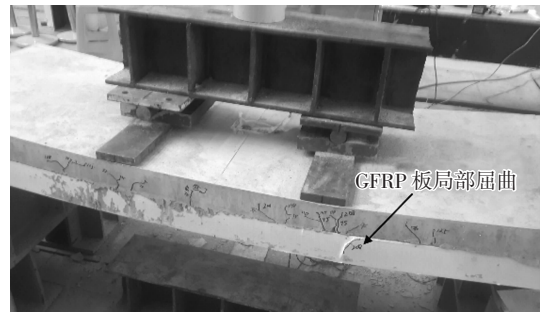
## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏模式

根据GFRP板与混凝土连接程度的不同,组合板的破坏模式可以分为3种,分别为GFRP板局部屈曲破坏(D1)、GFRP板与混凝土剥离破坏(D2和D3)、混凝土斜拉破坏(D4和D5).

对于无黏结界面的试件D1,在加载的初始阶段便出现了明显的滑移;135 kN时,加载点附近的GFRP板开始出现屈曲;165 kN时,GFRP腹板屈曲明显,组合板不能继续承担荷载,试件破坏,如图4(a)所示.对于有砾石界面但砾石覆盖率不高的试件D2和D3,在加载的初始阶段GFRP板与混凝土表现出良好的组合作用;之后随着荷载的增大,组合作用逐渐减弱;破坏时,GFRP板发生了明显的侧向变形,GFRP板与混凝土剥离,试件破坏,破坏形态如图4(b)所示.对于有砾石界面且砾石覆盖率很高

的试件D4和具有湿胶黏结界面的试件D5,大约 $0.77P_u$ 时,在GFRP肋板顶面与混凝土的交界面处出现斜裂缝;随着荷载的增长,斜裂缝逐渐向加载点延伸;当斜裂缝延伸到混凝土顶面时组合板发生了混凝土斜拉破坏,如图4(c)和(d)所示.各试件的极限荷载和破坏形态见表2.



(a) 试件D1发生GFRP板局部屈曲破坏



(b) 试件D3发生GFRP板与混凝土分离破坏



(c) 试件D4发生混凝土斜拉破坏



(d) 试件D5发生混凝土斜拉破坏

图4 典型的试件破坏模式

Fig.4 Failure modes of the typical specimens

表 2 破坏模式及极限承载力

Tab.2 Failure modes and ultimate loads

试件	$P_{r,t}/kN$	$P_{r,p}/kN$	$P_{r,p}/P_{r,t}$	$P_{u,t}/kN$	$w_{u,t}/mm$	$P_{u,p}/kN$	$P_{u,p}/P_{u,t}$	破坏模式
D1	—	—	—	165	36.44	—	—	GFRP 板局部屈曲
D2	25	24.5	0.98	240	42.92	—	—	GFRP 板与混凝土分离
D3	30	23.0	0.77	235	35.21	—	—	GFRP 板与混凝土分离
D4	25	23.2	0.93	295	23.05	250.6	0.85	混凝土斜拉破坏
D5	25	25.4	1.02	300	18.96	271.9	0.91	混凝土斜拉破坏
平均值			0.92					
标准差			0.11					

注: $P_{r,t}$ 为实测的开裂荷载; $P_{r,p}$ 为预测的开裂荷载; $P_{u,t}$ 为实测的极限荷载; $w_{u,t}$ 为破坏时的跨中挠度; $P_{u,p}$ 为预测的极限荷载。

2.2 荷载-挠度曲线与板端滑移

图 5 给出了各试件的荷载-跨中挠度曲线. 从图中可看出, 无黏结试件 D1 的弯曲刚度最低, 25 kN 后, 跨中的荷载-挠度曲线基本呈一条直线. 尽管 GFRP 板与混凝土的界面没有进行特别处理, 但是由于 T 肋的机械咬合力以及 GFRP-混凝土界面的摩擦力, 无黏结的 GFRP-混凝土组合板依然可以承受较高的荷载. 在板端滑移前, 试件 D2 和 D3 (约 20% 砾石覆盖率) 的荷载-挠度曲线相近; 在板端滑移后 (约  $0.5P_u$ ), 随着荷载的增强, 弯曲刚度逐渐降低; 在达到极限荷载时, 试件 D2 和 D3 的极限位移远高于试件 D4 和 D5. 试件 D4 和 D5 的荷载-挠度曲线与试件 D2 和 D3 相近, 但是直到  $0.83P_u$  以后, 试件的弯曲刚度才明显降低.

对比 5 个试件的荷载-挠度曲线可以看出, 砾石覆盖率可以改变组合板荷载-挠度曲线中弯曲刚度明显变化的点和组合板的极限位移, 并使得组合板在界面明显滑移前拥有较好的刚度, 在滑移后拥有较大的变形.

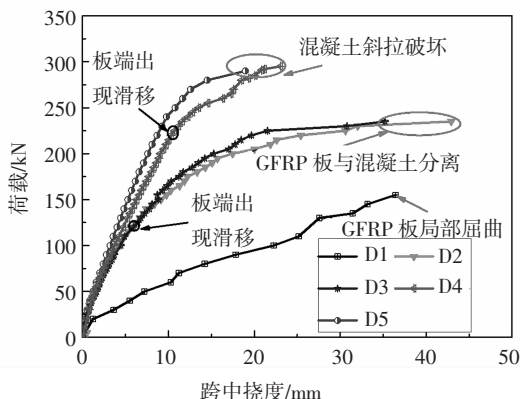


图 5 荷载-跨中挠度曲线  
Fig.5 Load-deflection curves

图 6 给出了 D2~D4 的荷载-板端滑移曲线. 从图中可以看出, 试件 D2 和 D3 (约 20% 砾石覆盖率) 在约  $0.5P_u$  时出现板端滑移, 之后滑移逐渐增大, 破坏时板端滑移值达到 2.5 mm 以上. 试件 D4 (约 50% 砾石覆盖率) 在大约  $0.76P_u$  时出现滑移, 之后逐渐增大, 破坏时板端滑移值达到 1.5 mm 以上. 随着砾石覆盖率的提高, 每个砾石承担的剪力降低, 界面的剪切强度增高, 因而试件 D4 出现滑移的荷载明显高于试件 D2 和 D3.

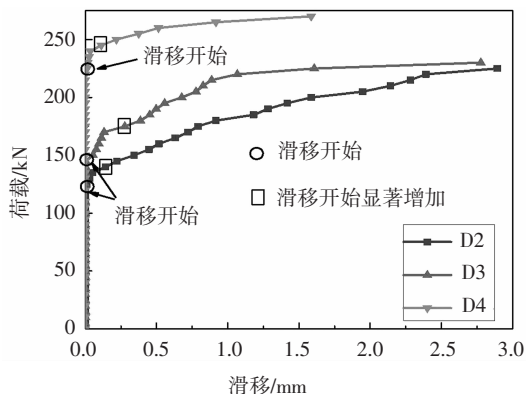


图 6 荷载-板端滑移曲线  
Fig.6 Load-slip curves at the end of decks

2.3 应变分布

图 7 给出了各试件的跨中截面的应变分布. 从图中可看出, 加载初期, 试件 D1 就表现出了明显的滑移, 正、负应变出现在 GFRP 肋板上; 之后随着荷载的增强, 滑移应变逐渐增大;  $0.88P_u$  时肋板的受压应变已超过  $4.500 \times 10^{-6}$ . 对于试件 D2 和 D3, 在加载初期, 跨中截面的 GFRP 与混凝土应变基本呈一条直线; 之后随着荷载的增加, 滑移应变逐渐增大; 破坏时 GFRP 肋板出现正、负应变. 对于试件 D4 和

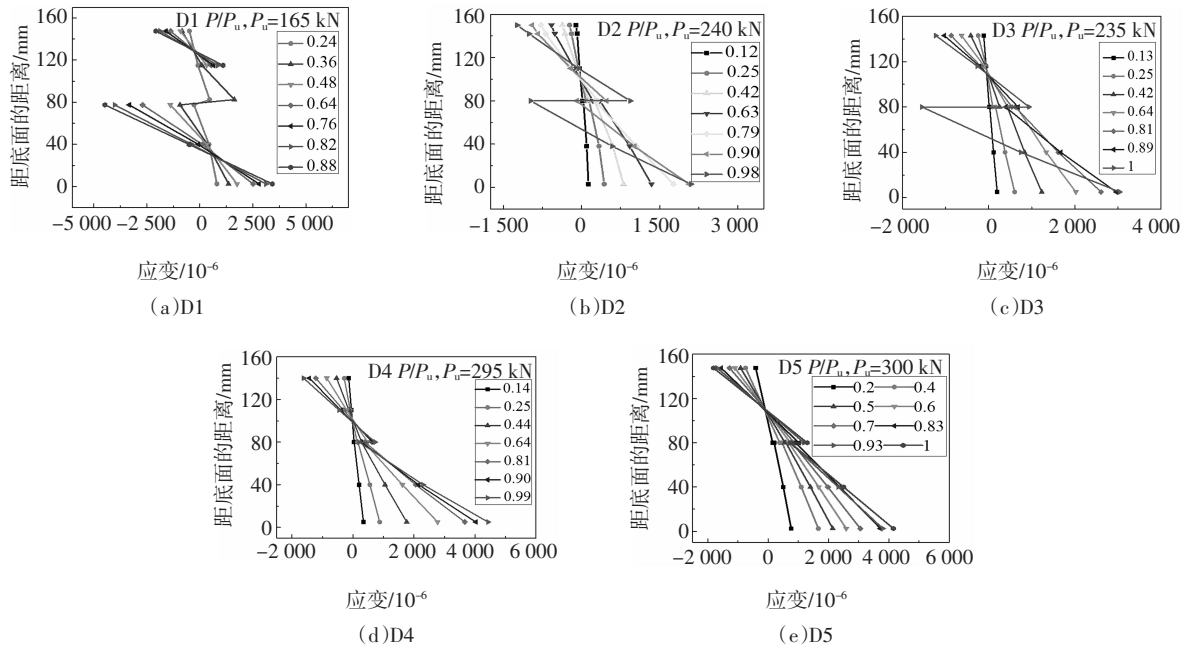


图7 应变分布  
Fig.7 Strain distribution

D5,在大约  $0.6P_u$  时,在 GFRP 肋板与混凝土的界面处出现滑移应变;之后随着荷载的增强,滑移应变缓慢地增长;破坏时,滑移应变远小于 D2 和 D3 的滑移应变。

### 2.4 延性

延性是避免结构脆性破坏的重要指标.由于 GFRP 线弹性的特性,完全连接的 GFRP-混凝土组合板只有在接近破坏时弯曲刚度才明显变化.整个破坏过程,组合板的位移延性较低,破坏前缺少足够的预警.试件 D2~D4 在板端出现滑移前均表现出良好的组合作用,在板端滑移后弯曲刚度发生了明显变化.在整个试件的加载过程中,不同砾石覆盖率的组合板极限变形不同.参考文献[18]的延性指标,使用位移延性系数来评价 GFRP-混凝土组合板的延性.位移延性系数的计算公式见式(2).

$$\mu_{\Delta} = \frac{w_u}{w_y} \quad (2)$$

式中:  $\mu_{\Delta}$  为位移延性系数;  $w_u$  为试件破坏时的跨中挠度;  $w_y$  为板端出现滑移时的跨中挠度。

对于未加固的高强混凝土构件,3~5 被认为是合理的位移延性系数范围<sup>[9]</sup>.这里取 3 作为位移延性系数的下限值.表 3 给出了试件 D2~D4 的延性系数.从表中可以看出砾石覆盖率越高,位移延性系数越低.试件 D4 的位移延性系数低于 3,延性略有不足.试件 D2 和 D3 的位移延性系数均高于 5,拥

有良好的延性。

表 3 延性对比

Tab.3 Comparison of ductility

试件	$P_{s,i}/kN$	$w_{s,i}/mm$	$w_{u,i}/mm$	$w_{u,i}/w_{s,i}$	砾石覆盖率/%
D2	120	5.64	42.92	7.61	15.6
D3	125	6.45	35.21	5.46	20.2
D4	220	10.32	23.05	2.23	50.5

注:表中  $P_{s,i}$  为板端出现滑移时的荷载;  $w_{s,i}$  为板端出现滑移时的跨中挠度。

### 2.5 极限荷载的讨论

由于试件 D1~D5 的界面连接程度不同,各试件的破坏模式和极限承载力不同.图 8 对各试件的极限荷载、破坏模式进行了比较.图中纵坐标为试件的极限荷载/试件 D5 的极限荷载.试件 D5 为湿胶黏结界面,表征具有良好组合作用的组合板的极限承载力.结合图 8 及表 3 的试验结果可知,随着砾石覆盖率的增高,组合板的极限承载力逐渐增高,破坏模式也由 GFRP 板局部屈曲变为混凝土斜拉破坏.当砾石覆盖率约为 20%左右时,相对于试件 D5 而言组合板的极限荷载降低了 20%左右,但是其位移延性系数提高了 2 倍以上.由于 GFRP 线弹性的材料特性,GFRP-混凝土组合桥面板不能像钢筋混凝土板那样在破坏时产生较大的变形.砾石覆盖率

的改变可以极大地改善组合板的延性并且不会显著降低极限承载力. 由于变形控制设计, GFRP-混凝土组合板往往拥有较富余的极限承载力. 在一定范围内通过组合板极限承载力的降低换取位移延性, 将可以有效地改善 GFRP-混凝土组合板的延性.

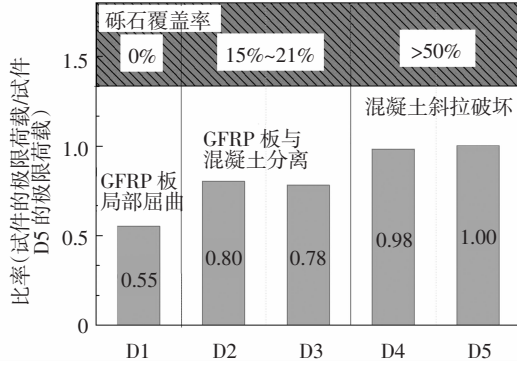


图 8 极限荷载及破坏模式比较

Fig.8 Comparison of ultimate loads and failure modes

图 9 给出了极限荷载与砾石覆盖率的关系. 图中纵坐标为试件的极限荷载与试件 D4(50%砾石覆盖率)极限荷载的比值, 横坐标为试件的砾石覆盖率与试件 D4 砾石覆盖率的比值. 由于已有文献中缺少砾石覆盖率与界面剪切强度的定量公式, 这里使用砾石覆盖率来表征界面强度并进一步表征组合板的连接程度. 从图中可以看出, 极限荷载的比值与砾石覆盖率的比值存在线性关系. 使用线性公式对试验数据进行拟合得到组合板极限承载力与砾石覆盖率关系的表达式, 如式(3)所示.

$$y = 0.41x + 0.62. \quad (3)$$

式中:  $y$  为试件的极限荷载与拥有 50%砾石覆盖率试件的极限荷载的比值;  $x$  为试件的砾石覆盖率与 50%的比值.

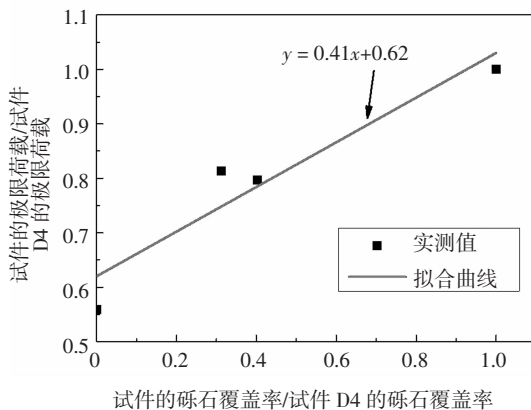


图 9 极限荷载与砾石覆盖率的关系

Fig.9 Relationship between ultimate loads and gravel coverage

## 2.6 开裂荷载计算

GFRP-混凝土组合板在混凝土开裂前后会发生明显的弯曲刚度突变, 可以 GFRP 底板荷载-应变曲线的突变点确定组合板的开裂荷载, 本文采用 ACI440. 1R-2015<sup>[20]</sup>中开裂弯矩的计算方法对 GFRP-混凝土组合板的开裂弯矩进行计算. 计算方法见式(4)~(7). 表 2 给出了试件 D2~D5 的开裂弯矩计算值与实测值的对比. 计算值与实测值比值的平均值为 0.92, 标准差为 0.11, 因此可以采用上述方法对 GFRP-混凝土组合板的开裂弯矩进行估算. 对最大弯矩截面建立平衡方程:

$$0.5P_{cr}a + M_q + M_g = M_{cr}. \quad (4)$$

式中:  $P_{cr}$  为开裂荷载;  $a$  为加载点到支撑点的距离;  $M_q$  为加载装置产生的弯矩, 约  $1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ;  $M_g$  为组合板自重产生的弯矩;  $M_{cr}$  为开裂弯矩.

组合板开裂弯矩计算:

$$M_{cr} = \frac{f_t I_g}{y_t}. \quad (5)$$

式中:  $f_t$  为混凝土的弯拉强度;  $I_g$  为混凝土毛截面惯性矩;  $y_t$  为重心轴距受拉边缘的距离.

弯拉强度计算:

$$f_t = 0.62\sqrt{f'_c}. \quad (6)$$

式中:  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度.

使用文献[21]中混凝土圆柱体-立方体强度的换算公式进行混凝土强度换算:

$$\begin{cases} f'_c/f_{cu,k} = 0.8, & f_{cu} \leq 25 \text{ MPa}; \\ f'_c/f_{cu,k} = 0.00368f_{cu,k} + 0.71, & 25 \text{ MPa} < f_{cu} \leq 80 \text{ MPa}. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $f_{cu,k}$  为混凝土立方体抗压强度.

## 2.7 抗剪承载力计算

GFRP 的弹性模量远低于钢材的弹性模量, 由于 GFRP 低弹模的特性, 组合板的抗剪承载力计算公式不能直接套用钢筋混凝土构件的抗剪承载力计算公式<sup>[22]</sup>. 除此以外, 板式构件的抗剪承载力通常高于梁式构件, 在组合板抗剪计算中需考虑这种影响. 在此使用反映 FRP 筋混凝土构件抗剪承载力平均值的 Razaqpur 公式<sup>[23]</sup>进行组合板的抗剪承载力计算, 并参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)<sup>[24]</sup>中关于板的影响的规定, 采用 1.25 的提高系数来考虑板式构件的抗剪承载力, 最终的组合板计算公式如式(8)~(14)所示.

发生剪切破坏的试件 D4 和 D5 的抗剪承载力理论值与实测值的比值见表 2, 2 个试件的比值均在 0.85 以上, 可使用式(8)对 GFRP-混凝土组合板的抗剪承载力进行估算。

抗剪承载力计算公式:

$$V_c = 1.25 \times 0.0449 k_m k_a k_s (1 + k_r) \sqrt{f'_c} b d. \quad (8)$$

式中:  $V_c$  为组合板的抗剪承载力;  $k_m$  表示剪跨比影响系数;  $k_r$  表示配筋刚度影响系数;  $k_a$  和  $k_s$  分别表示拱和梁的效应;  $b$  为截面的宽度;  $d$  为截面的有效高度, 对于 GFRP-混凝土组合板取混凝土顶面到 GFRP 板形心的距离。

剪跨比影响系数:

$$k_m = \left( \frac{V_f d}{M_f} \right)^{2/3}. \quad (9)$$

式中:  $V_f$  表示承担的剪力;  $M_f$  表示承担的弯矩。

配筋刚度影响系数:

$$k_r = (E_f \rho_f)^{1/3}. \quad (10)$$

式中:  $\rho_f$  为配筋率;  $E_f$  为 FRP 的弹性模量。

拱的效应影响系数:

$$k_a = 1, \quad \frac{M_f}{V_f d} \geq 2.5; \quad (11)$$

$$k_a = \frac{2.5}{(M_f/V_f d)}, \quad \frac{M_f}{V_f d} < 2.5. \quad (12)$$

梁的效应影响系数:

$$k_s = 1, \quad d \leq 300 \text{ mm}; \quad (13)$$

$$k_s = \frac{750}{450 + d}, \quad d > 300 \text{ mm}. \quad (14)$$

为避免组合板发生斜拉破坏, 应使设计剪力低于式(8)的计算值, 并在实际工程中布设竖向钢筋改变组合板剪切破坏模式, 竖向钢筋与布设于组合板顶、底层的构造钢筋相连。

### 3 结论

1) 对于 T 形 GFRP-混凝土组合板, 仅依靠 T 肋的机械锚固以及 GFRP 板与混凝土的摩擦力, 组合板可以产生部分组合作用以承担外荷载, 但其弯曲刚度远低于组合作用良好的 GFRP-混凝土组合板。

2) 通过调整砾石覆盖率可以改变 GFRP-混凝土组合板的连接程度。当砾石覆盖率低于 50% 时, 砾石覆盖率越高, 组合板的连接程度越强, 组合板

的破坏模式亦将由 GFRP 板局部屈曲破坏转变为 GFRP 板与混凝土分离破坏, 甚至转变为混凝土斜拉破坏。

3) 砾石覆盖率的改变可以改变组合板的延性, 具有合理的砾石覆盖率的组合板在发生板端滑移前具有较好的刚度, 在板端滑移后会产生较大的竖向变形; 组合板位移延性良好, 极限承载力可靠。

4) 使用 ACI440.1R-2015 中的开裂荷载计算公式可以预测 GFRP-混凝土组合板的开裂荷载。基于 4 个试件的计算表明, 理论值与实测值的比值平均值为 0.92, 标准差为 0.11。将板的影响系数加入到反映 FRP 筋混凝土构件抗剪承载力平均值的 Raza-qpur 公式中, 使用该公式可较好地预测组合板的抗剪承载力。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 卫军, 张萌, 董荣珍, 等. 钢筋锈蚀对混凝土梁破坏模式影响的试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(10):15-21.  
WEI J, ZHANG M, DONG R Z, *et al.* Experimental research on the failure mode of concrete beam due to steel corrosion [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(10):15-21. (In Chinese)
- [3] ZUO Y, LIU Y Q, 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.
- [4] NELSON M, FAM A. Full bridge testing at scale constructed with novel FRP stay-in-place structural forms for concrete deck [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50(2):368-376.
- [5] 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.  
TONG Z J, HUANG Q, BAO W G, *et al.* Experimental investigation into static behavior of GFRP-concrete continuous deck [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Sciences)*, 2017, 45(11):31-40. (In Chinese)
- [6] ZHANG P, ZHU H, WU G, *et al.* Shear capacity comparison of four different composite interfaces between FRP plates and concrete substrate [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(4):04016006.



- [7] 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.  
GUO S H, CAI C S, ZHANG J R, *et al.* Static experimental study on performance of GFRP-concrete composite bridge deck with an optimized interface [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 19-27. (In Chinese)
- [8] ZOU X X, FENG P, WANG J Q. Perforated FRP ribs for shear connecting of FRP-concrete hybrid beams/decks [J]. Composite Structures, 2016, 152: 267-276.
- [9] ZHANG L, WANG W W, HARRIES K A, *et al.* Bonding behavior of wet-bonded GFRP-concrete interface [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6): 04015001.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] CHO K, PARK S Y, KIM S T, *et al.* Behavioral characteristics of precast FRP-concrete composite deck subjected to combined axial and flexural loads [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44(1): 679-685.
- [13] NELSON M, FAM A. Structural GFRP permanent forms with T-shape ribs for bridge decks supported by precast concrete girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(9): 813-826.
- [14] HE J, LIU Y Q, CHEN A R, *et al.* Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 49-64.
- [15] BANK L C, OLIVA M G, BAE H, *et al.* Pultruded FRP plank as formwork and reinforcement for concrete members [J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(5): 525-535.
- [16] HONICKMAN H, NELSON M, FAM A. Investigation into the bond of glass fiber-reinforced polymer stay-in-place structural forms to concrete for decking applications [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2131(1): 134-144.
- [17] 黄侨, 佟兆杰. 带翼缘槽型 FRP 板材-混凝土组合桥面板: CN104652267B[P]. 2016-08-17.  
HUANG Q, TONG Z J. Flanged groove type FRP (Fiber Reinforce Plastic) plate-concrete combination bridge deck: CN104652267B [P]. 2016-08-17. (In Chinese)
- [18] AKBARZADEH H, MAGHSOUDI A A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer [J]. Materials and design, 2010, 31(3): 1130-1147.
- [19] MAGHSOUDI A A, BENGAR H A. Flexural ductility of HSC members [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2006, 24(2): 195-212.
- [20] ACI 440. 1R-2015 Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015: 23.
- [21] 陈卓昇. 波形钢腹板组合槽型梁桥的力学性能与试验研究 [D]. 南京: 东南大学交通学院, 2014: 58.  
CHEN Z Y. Study and test on mechanical properties of composite trough girder with corrugated steel webs [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2014: 58. (In Chinese)
- [22] 张晓亮, 屈文俊. 无腹筋 GFRP 筋混凝土梁抗剪性能试验 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 51-57.  
ZHANG X L, QU W J. Shear behavior test of GFRP-reinforced concrete beams without stirrups [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 51-57. (In Chinese)
- [23] RAZAQPUR A G. Proposed shear design method for FRP-reinforced concrete members without stirrups [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(1): 93-102.
- [24] JTJ D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 30.  
JTJ D62-2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communication Press, 2004: 30. (In Chinese)