

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0015-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.004

# 混凝土强度影响 GFRP 板 - 混凝土组合梁力学性能研究

李文, 武先梅, 徐珍

(东北石油大学土木建筑工程学院, 黑龙江大庆 1633128)

**摘要:** 为研究 GFRP 板 - 混凝土组合梁的力学性能, 利用 ABAQUS 有限元软件建立玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 加固混凝土梁模型, 通过组合梁的荷载 - 跨中挠度曲线和承载力两个方面验证了建立模型方法的合理性。设计了 C25、C30 和 C40 三个不同强度等级混凝土的构件模型, 分析并得出关于 GFRP 板 - 混凝土组合梁的力学性能的结论。结果表明: (1) 在相同荷载下, 组合梁的极限承载力随着混凝土强度等级增大而增大, 延性随着混凝土强度等级增大而减小。(2) 增大混凝土强度等级可以有效增大组合梁的极限承载力。(3) GFRP 板可以提高组合梁的抗弯承载力。(4) GFRP 板 - 混凝土组合梁主要分为弹性阶段和带裂缝工作两个阶段。

**关键词:** GFRP 板 - 混凝土; 组合梁; 极限承载力; 混凝土强度

**中图分类号:** TU398

**文献标识码:** A

## Study on Influence of Concrete Strength on Mechanical Properties of GFRP Plate-concrete Composite Beams

LI Wen, WU Xianmei, XU Zhen

(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of GFRP plate-concrete composite beams, the ABAQUS finite element software was used to establish the concrete beam model reinforced by glass fiber reinforced composites (GFRP). The load-span deflection curve and bearing capacity of composite beams were verified to show the rationality of establishing a model method. The component models of three different strength grades of C25, C30 and C40 were designed, and the conclusions about the mechanical properties of GFRP plate-concrete composite beams were analyzed. Conclusions: (1) The results show that under the same load, the ultimate bearing capacity of the composite beam increases with the increase of concrete strength grade, and the ductility decreases with the increase of concrete strength grade. (2) Increasing the concrete strength grade can effectively increase the ultimate bearing capacity of the composite beam. (3) GFRP panels can improve the flexural capacity of composite beams. (4) GFRP plate-concrete composite beam is mainly divided into two stages: elastic stage and working with crack.

**Key words:** GFRP plate-concrete; composite beam; ultimate bearing capacity; concrete strength

纤维增强复合材料(简称FRP),因其具有耐腐蚀、高强度、高耐久的特点而逐渐被人们所认可<sup>[1-4]</sup>。FRP材料与混凝土结构的组合不仅可以发挥FRP高强、耐腐蚀等优点,而且还可以体现混凝土优良的抗压强度。本文所研究的新型GFRP板-混凝土组合梁是以U型GFRP板为模板,并在其上浇筑混凝土,

界面粘结采用环氧树脂胶结<sup>[5]</sup>,这样不仅可以充分发挥GFRP复合材料的高强抗拉和混凝土的抗压性能,并且结构本身具有自重小、强度大、抗腐蚀等优点,因此这种组合结构在实际工程中将有良好的应用和发展前景<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308028); 黑龙江省教育厅科学技术项目(12543023)

作者简介: 李文(1969-),男,河北唐山人,教授,主要从事组合结构等方面的研究。

### 1 有限元分析

试验梁的尺寸为 150 mm × 250 mm × 2 700 mm, 净跨 2 400 mm, 主筋为 HRB335, 箍筋为 HPB300, GFRP 的厚度为 0.7 mm。具体的试验试件参数见表 1。

本文利用 ABAQUS 有限元软件 [7-8] 建立 GFRP 板-混凝土组合梁的有限元模型。为了使有限元数值模型更符合实际, GFRP 板采用具有抗弯刚度的四节点曲面壳单元 S4R, 与混凝土之间用 tie 命令进行绑定, 不考虑 GFRP 板与混凝土梁之间的滑移。混凝土采用 8 节点三维实体减缩积分单元 C3D8R 进行模拟, 每个节点均有 3 个平动自由度 U1、U2、U3。钢筋骨架选用 T3D2 三维桁架单元模拟, 桁架单元是只能承受拉荷载的杆, 在土木工程中经常利用桁架单元来模拟钢筋。此外, 为避免发生加载部位应力集中从而导致组合结构的局部破坏, 在梁端、梁跨中加载处设置刚性垫块, 刚性垫块也采用 8 节点六面体线性减缩积分单元 C3D8R。

本文利用位移加载的方式对组合梁施加荷载, 在梁三分点处施加竖向荷载, 为了结算结果的准确性在两个垫块上方分别建立参考点, 并将参考点与垫块的上表面用 Coupling 命令进行耦合, 组合梁边

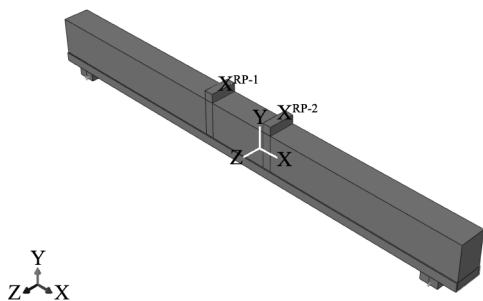


图 1 组合梁边界条件与荷载施加示意图  
Fig.1 Combination beam boundary conditions and load application diagram

界条件与荷载施加示意图见图 1。

### 2 有限元模拟结果验证

本文从组合梁极限承载力和跨中的荷载-挠度曲线两个方面来验证有限元建模方法的合理性, 见表 2 和图 2、图 3。

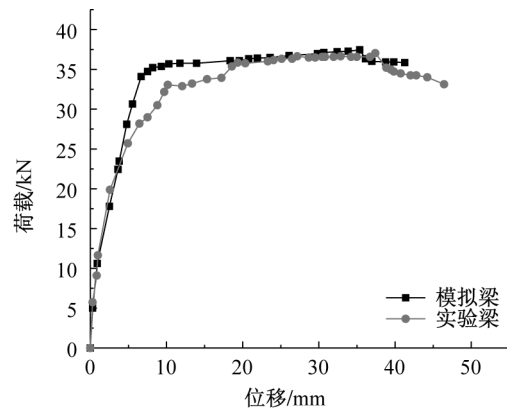


图 2 CL20 荷载-位移曲线对比  
Fig.2 CL20 load-displacement curve comparison

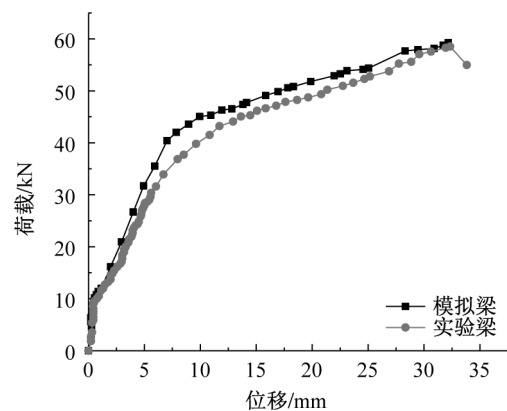


图 3 BL20-1A 荷载-位移曲线对比  
Fig.3 BL20-1A load-displacement curve comparison

表 1 试验梁试件参数

Tab.1 Test beam parameters

试件编号	混凝土等级	加固量	GFRP 尺寸 (mm × mm)	剪跨 /mm	粘结长度	配筋率 /%
CL20	C20	无	/	1 000	/	2 φ 12, 0.7
BL20-1A	C20	一层	2 300 × 100	1 000	950	2 φ 12, 0.7

表 2 极限位移和极限承载力

Tab.2 Ultimate displacement and ultimate bearing capacity

试件编号	试验极限位移 /mm	模拟极限位移 /mm	误差 /%	试验极限承载力 /kN	模拟极限承载力 /kN	误差 /%
CL20	42.20	41.78	9.57	37	37.4	1.08
BL20-1A	31.46	33.20	5.53	57	59.2	3.86

由图 2 和图 3 可以直观地看出有限元模拟和试验结果这两条荷载 - 位移曲线吻合较好, 从表 2 可以更精确地看到模拟和实验得到的极限位移和极限承载力相差不大, 说明了本文建模方法的合理性。

### 3 组合梁力学性能

#### 3.1 模型构件设计参数

本文设计了 12 根不同工况下的 GFRP 板 - 混凝土组合梁, 如表 3 所示。组合梁的跨度为 2 700 mm, 净跨为 2 400 mm, 梁的截面尺寸均为 250 mm × 150 mm, 混凝土保护层厚度取为 35 mm, 纵筋受力钢筋采用 HRB335, 箍筋采用 HPB300, 直径为 6.5 mm, 间距为 100 mm, 受压区配置 2 根  $\phi 8$  的架立钢筋, 混凝土强度等级分别选取 C25、C30 和 C40。材料的各力学性能指标见表 4 和表 5。

#### 3.2 组合梁的力学性能分析

##### 3.2.1 应力分析

表 4 材料力学性能指标

Tab.4 Material mechanical properties

材料	材料类型	弹性模量 (N·mm <sup>-2</sup> )	强度标准值 (N·mm <sup>-2</sup> )
纵筋	HRB335	$2.0 \times 10^5$	335
箍筋	HPB300	$2.1 \times 10^5$	300
	C25	$2.8 \times 10^4$	16.7
混凝土	C30	$3.0 \times 10^4$	20.1
	C40	$3.25 \times 10^4$	26.8

表 3 试件参数及分组情况

Tab.3 Test piece parameters and grouping situation

试件 分组	试件 编号	截面尺寸 (mm × mm)	混凝土 强度等级	GFRP 板厚度 /mm	U 型截面高度 /mm	受拉区配筋率 /%
D 组	B-1-1	150 × 250	C25	6	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-2-1	150 × 250	C30	6	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-3-1	150 × 250	C40	6	0	2 $\phi$ 12, 0.7
E 组	B-1-2	150 × 250	C25	8	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-2-2	150 × 250	C30	8	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-3-2	150 × 250	C40	8	0	2 $\phi$ 12, 0.7
F 组	B-1-3	150 × 250	C25	10	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-2-3	150 × 250	C30	10	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-3-3	150 × 250	C40	10	0	2 $\phi$ 12, 0.7
G 组	B-1-4	150 × 250	C25	12	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-2-4	150 × 250	C30	12	0	2 $\phi$ 12, 0.7
	B-3-4	150 × 250	C40	12	0	2 $\phi$ 12, 0.7

表 5 GFRP 板力学性能表

Tab.5 Mechanical properties of GFRP sheets

GFRP 板种类	极限抗拉 强度 /MPa	抗拉强度设计 值 /MPa	断后延伸 率 /%	弹性模量 /GPa
GFRP	606	424	2.15	40

采用控制变量法确定 U 型截面高度、配筋率保持不变, 设计混凝土强度等级分别为 C25、C30 和 C40, 并通过增大 GFRP 板厚进行横向对比, 同组保持 GFRP 板厚度不变, GFRP 板厚度分别取为 6 mm、8 mm、10 mm 和 12 mm, 试件设计参数如表 3 所示。分别提取混凝土梁、钢筋笼、GFRP 板的应力和变形云图, 并进行对比, 分析不同混凝土强度下组合梁的受力及变形趋势, 以 D 组试件 B-2-1 和 B-3-1 为例, 其应力及变形云图分别如图 4 和图 5 所示。

由 B-2-1 及 B-3-1 的应力及变形云图可以看出, 组合梁的应力及变形主要分布在跨中及支座附近, 在极限荷载作用下, 有限元模型破坏时, 组合梁 B-2-1 与 B-3-1 受力及变形趋势相差不大, 在纯弯区内钢筋和 GFRP 板受力较大, 图中明显呈红色。通过 B-2-1 的应力及变形图与 B-3-1 的应力及变形图对比发现, 增大混凝土强度, 组合梁能承受较大的变形。

##### 3.2.2 不同混凝土强度下构件的荷载 - 跨中挠度

为了研究不同混凝土强度对组合梁试件跨中挠度的影响, 绘制 D、E、F、G 组荷载 - 跨中位移曲线如图 6 所示。

从图中可以看出: D、E、F、G 组三条荷载 - 位移曲线的变化规律基本一致, 在加载的初级阶段,

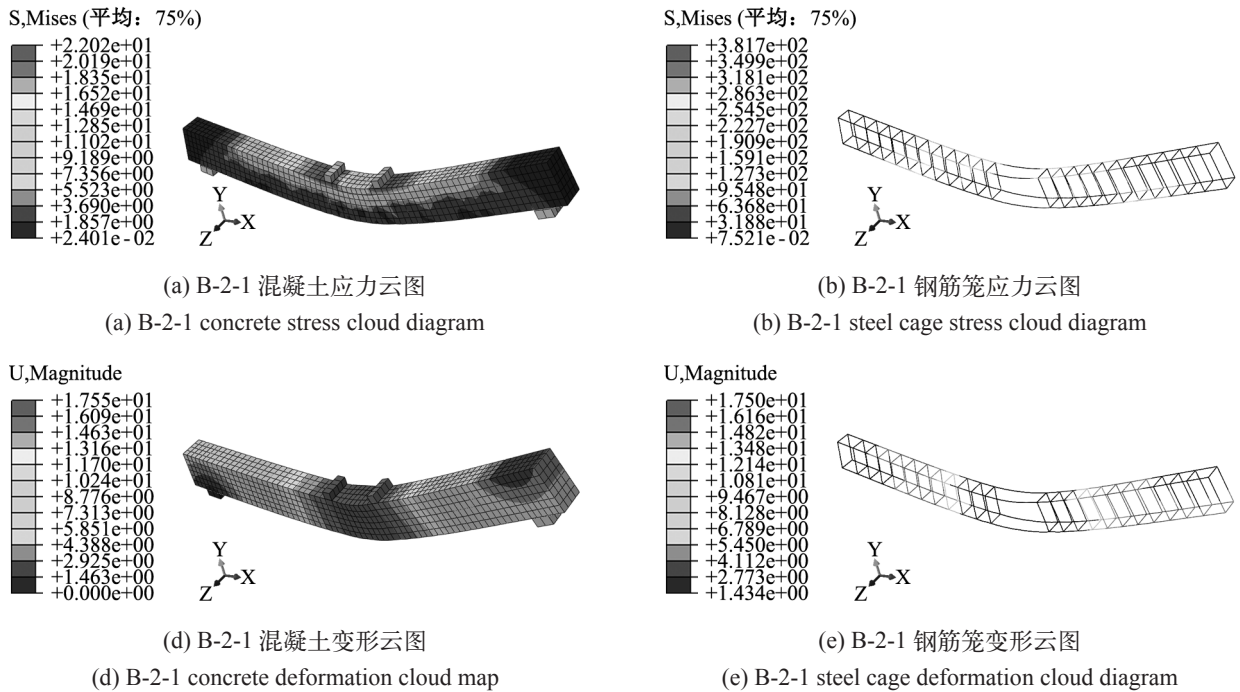


图 4 B-1 应力及变形云图  
Fig.4-2-1 stress and deformation cloud map

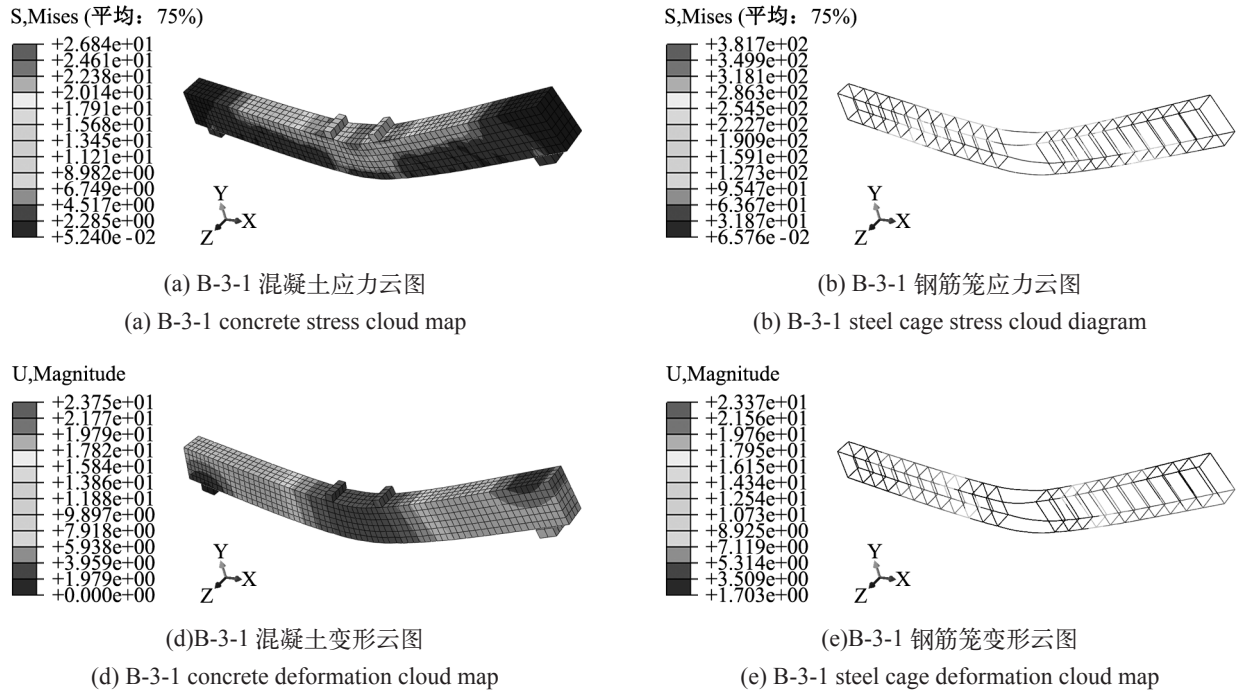


图 5 B-3-1 应力及变形云图  
Fig.5 B-3-1 stress and deformation cloud map

施加的荷载较小, 组合梁处于弹性工作阶段, 曲线的切线斜率相对较大, 荷载 - 位移曲线呈直线, 三条曲线基本重合, 此阶段曲线斜率与梁的刚度成正比。随着荷载的逐渐变大, 组合梁的荷载 - 位移曲线出现了一个明显的拐点, 此时组合梁进入带裂缝

工作阶段, 荷载 - 位移曲线切线的斜率都在逐渐变小, 荷载 - 位移曲线逐渐变缓直至下降。在相同荷载下的 GFRP 混凝土组合梁构件, 混凝土强度等级越高, 构件的位移就越小, 同时随着混凝土强度等级的增大, 组合梁的极限承载力也增大, 说明增大

混凝土强度等级可以有效增大组合梁的极限承载力。

### 3.2.3 不同混凝土强度下构件的极限承载力

由荷载 - 位移曲线可知，混凝土强度等级对组合梁的力学性能具有重要影响，现提取有限元模型中的极限承载力和极限位移进行分析，具体数值如表 6 所示。

通过 D 组模型有限元模型计算结果可以得出：模型 D2 与 D1 相比，承载力提高了 5.73%，挠度增大了 2.87%；D3 与 D1 相比，承载力提高了 16.08%，挠度增大了 4.57%。通过 E 组模型有限元模型计算结果可以得出：模型 E2 与 E1 相比，承载力提高了 7.75%，挠度增大了 6.52%；E3 与 E1 相比，承载力提高了 13.09%，挠度增大了 1.40%。通过 F 组模型有限元模型计算结果可以得出：模型 F2 与 F1 相比，承载力提高了 6.33%，挠度减小了 2.55%；F3 与 F1 相比，承载力提高了 11.90%，挠度减小了 2.75%。通过 G 组模型有限元模型计算结果可以得出：模型 G2 与 G1 相比，承载力提高了 8.18%，挠度减小了 1.45%；G3 与 G1 相比，承载力提高了 12.20%，挠度减小了 2.96%。

由以上数据分析结果可以得出，随着混凝土

强度的增大，组合梁试件极限承载力大幅增加，当 GFRP 板厚度较小时，取为 6 mm 和 8 mm 时，组合梁的极限位移随着混凝土强度的增大而增大，而当 GFRP 的厚度较大时，即取为 10 mm 和 12 mm 时，组合梁的极限位移随着混凝土强度的增大而减小。这是由于随着 GFRP 厚度的增大，组合梁的刚度增大，当试件混凝土达到极限抗压强度时，底部受拉的 GFRP 板还未出现拉伸破坏，此时随着混凝土强度等级的增大，受压截面的压应力也随之增大，从而提高组合梁的极限承载力，同时随着 GFRP 板厚度的增大，组合梁的延性也会降低，从而降低组合梁的跨中极限位移。因此，为了保证组合梁具有较好的延性，GFRP 厚度不宜太大。

## 4 结论

1) 相同荷载下的 GFRP- 混凝土组合梁构件，混凝土强度等级越高，组合梁的极限承载力越大，增大混凝土强度等级可以有效增大组合梁的极限承载力。

2) 相同荷载下，通过组合梁的应力及变形云图可以发现，试件的混凝土梁、钢筋笼、GFRP 板的

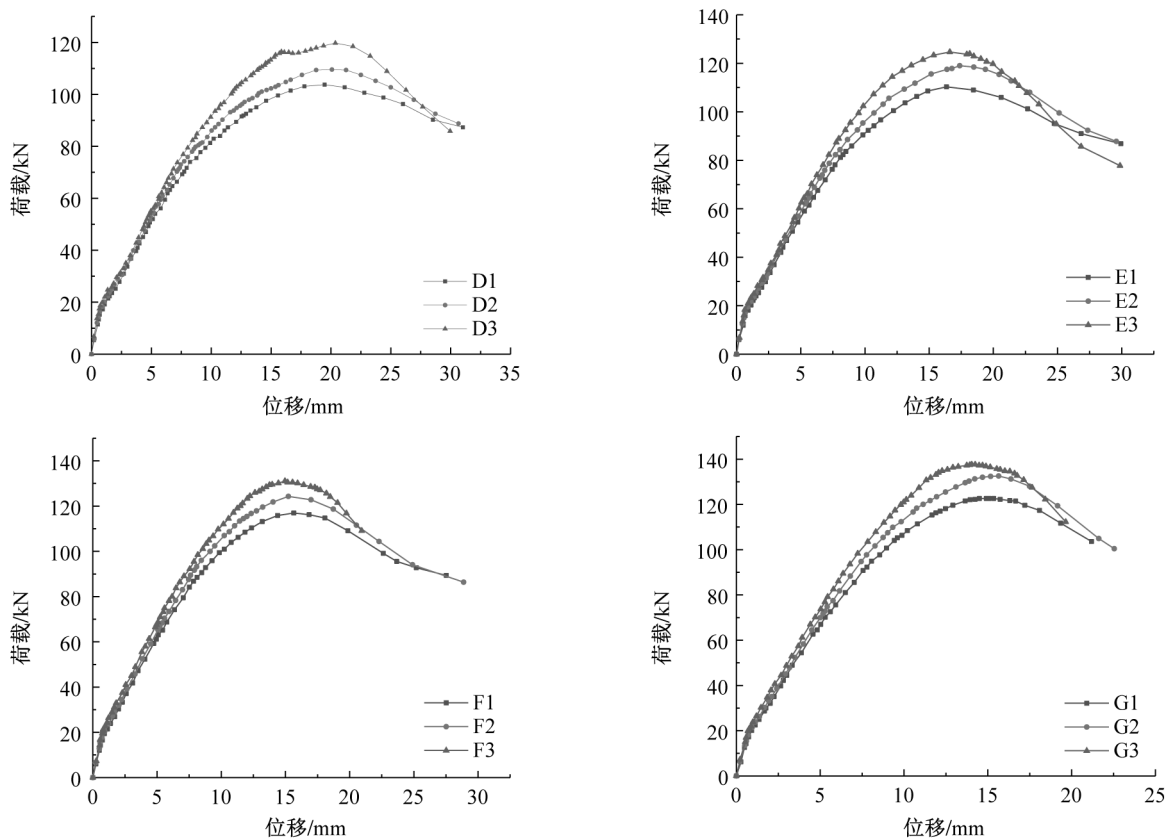


图 6 荷载 - 挠度曲线

Fig.6 Load-deflection curves for groups

表6 极限承载力及极限位移  
Tab.6 Ultimate bearing capacity and ultimate displacement

试件分组	试件编号	混凝土强度等级	GFRP 板厚度 /mm	U 型截面高度 /mm	受拉区配筋率 /%	极限位移 /mm	极限承载力 /kN
D 组	B-1-1	C25	6	0	0.7	30.25	103.38
	B-2-1	C30	6	0	0.7	31.72	109.30
	B-3-1	C40	6	0	0.7	34.27	120.00
E 组	B-1-2	C25	8	0	0.7	29.64	109.97
	B-2-2	C30	8	0	0.7	30.02	118.49
	B-3-2	C40	8	0	0.7	30.18	124.37
F 组	B-1-3	C25	10	0	0.7	29.36	116.62
	B-2-3	C30	10	0	0.7	28.42	124.00
	B-3-3	C40	10	0	0.7	20.68	130.50
G 组	B-1-4	C25	12	0	0.7	21.65	122.71
	B-2-4	C30	12	0	0.7	20.08	132.75
	B-3-4	C40	12	0	0.7	19.88	137.68

应力及变形最大值都集中在跨中及支座附近, 由此得出, 组合梁的破坏位置在跨中及支座附近。同时由于 GFRP 板具有较大的抗拉强度, 可以承受很大的拉应力, 从而增大组合梁的抗弯承载力。

3)GFRP 板 - 混凝土组合梁在承受荷载时, 其破坏过程与普通钢筋混凝土梁类似, 主要分为弹性阶段和带裂缝工作两个阶段。

#### 参考文献:

- [1] 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): 24-36.  
[2] 王言磊, 欧进萍 .FRP- 混凝土组合梁 / 板研究与应用进展 [J]. 公路交通科技, 2007, 24(4): 99-104.

- [3] 王欣诚, 谢忠, 许焰斌 .FRP 复合材料力学性能及其在工程中的应用 [J]. 工程设备与技术 2017, (78): 138-139.  
[4] 廖乐佳 .FRP- 混凝土组合梁受弯性能理论分析及其数值模拟研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
[5] 杨振秦 .FRP 材料在混凝土结构中的研究与应用 [J]. 中国建材科技, 2016, 25(1): 6-8.  
[6] 余向军, 邓宗才, 李建辉 .FRP 混凝土组合结构的研究与发展 [J]. 国防交通工程与技术, 2007, (3): 1-6.  
[7] 石亦平, 周玉蓉 .ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
[8] 王金昌, 陈页开 .ABAQUS 在土木工程中的应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

(责任编辑 李新)