

文章编号:1673-9469(2025)06-0001-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.001

# BFRP 网格-ECC 加固 T 形钢筋混凝土梁抗剪性能研究

于洋,刘宇涛,宋康佳

(东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

**摘要:** 为研究玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)网格-工程水泥基复合材料(ECC)加固 T 形钢筋混凝土梁的抗剪性能,采用有限元软件 ABAQUS 研究了 BFRP 网格的单支截面面积和 ECC 厚度对 BFRP 网格-ECC 加固 T 形钢筋混凝土梁抗剪性能的影响。结果表明:增大 BFRP 网格截面面积可以有效提高梁的抗剪承载力,在实际工程中建议使用单支截面面积为  $30\text{ mm}^2$  的 BFRP 网格,可使结构具有良好承载力,同时更加节省材料;增加 ECC 厚度可显著提升梁的抗剪承载力。基于桁架-拱模型推导了 BFRP 网格-ECC 加固 T 形梁抗剪承载力计算公式,模拟值与计算值偏差小于 8%,计算结果与模拟值吻合较好。

**关键词:** BFRP 网格;ECC;T 形梁;抗剪加固;桁架-拱模型

**中图分类号:** TU398<sup>+</sup>.9

**文献标识码:** A

## Study on Shear Performance of BFRP Grid-ECC Reinforced T-Shaped RC Beams

YU Yang, LIU Yutao, SONG Kangjia

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

**Abstract:** In order to study the shear performance of T-shaped reinforced concrete (RC) beams reinforced by Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) grid-Engineered Cementitious Composite (ECC) (hereinafter referred to as BFRP grid-ECC reinforced T-shaped RC beams), the influence of single branch cross-sectional area and ECC thickness on the shear performance of BFRP grid-ECC reinforced T-shaped RC beams was studied by using the finite element analysis software ABAQUS. The results showed that increasing the cross-sectional area of BFRP grid could effectively improve the shear capacity of beams. In practical engineering, it is recommended to use the BFRP grid with a single branch cross-sectional area of  $30\text{ mm}^2$ , which can make the structure have good bearing capacity and save more materials. Increasing the thickness of ECC could also significantly improve the shear capacity of beams. Finally, based on the truss-arch model, a formula for calculating the shear capacity of BFRP grid-ECC reinforced T-shaped RC beams was established. The deviation between the experimental and calculated values is less than 8%, and the calculated results are in good agreement with the simulated values.

**Key words:** BFRP grid; ECC; T-shaped beam; shear strengthening; truss-arch model

对耐久性下降的既有建筑进行加固,延长其使用寿命,成为当前可持续发展的重要议题。目前,工程加固时普遍采用外贴钢板、纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)板/布等方法,但这些方法存在钢板耐火性差、施工环境要求

高和耐久性差等问题<sup>[1-3]</sup>。为解决以上问题,优化加固方法,学者提出了一种 FRP 网格和工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)结合的加固方法。FRP 网格和 ECC 结合,不仅能发挥 FRP 网格轻质、高强、高耐久性的特

收稿日期:2024-08-29

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

第一作者:于洋(1977—),男,黑龙江大庆人,博士,副教授,主要从事组合结构的研究。

点,还能充分利用 ECC 材料的高延性、自愈和均匀开裂的特性,从而显著提升整体的延性、抵抗变形能力和承载能力<sup>[4-7]</sup>。

目前,国内外学者针对 FRP 网格-ECC 加固方法的研究已取得一些卓有成效的成果。朱忠锋等<sup>[8]</sup>开展了 FRP 网格-ECC 复合增强的钢筋混凝土圆柱静力轴向受压试验,发现随着网格层数的增加,加固柱的极限荷载和变形性能均显著提高。Al-Gemeel 等<sup>[9]</sup>采用 3 种方式对方形混凝土柱进行约束,结果显示,与 FRP 网格增强砂浆组合加固相比,玄武岩纤维增强复合材料(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)网格和 ECC 加固系统的轴向抗压强度增加更为显著。王学奎<sup>[10]</sup>发现,BFRP 网格-ECC 加固的现浇梁比预制梁的抗剪承载力提升效果更明显。苏会晓等<sup>[11-12]</sup>通过数值模拟发现,ECC 厚度的增加会导致组合加固柱的承载力呈线性增长,而 FRP 网格的减小则会降低加固柱延性破坏程度。Li 等<sup>[13]</sup>采用 FRP 与 ECC 复合约束,对受损柱进行了加固研究,结果表明,即使预损伤水平较严重的试件仍能实现满意的加固效果。

前人在 FRP 网格-ECC 加固构件方面的研究多以柱为主,对于 T 形钢筋混凝土梁(以下简称组合梁)的研究较少<sup>[14]</sup>。因此,本文通过有限元软件 ABAQUS,对 BFRP 网格-ECC 加固的组合梁进行抗剪性能研究,分析了 BFRP 网格截面面积和 ECC 厚度对加固组合梁抗剪性能的影响,并采用桁架-拱模型计算 BFRP 网格-ECC 加固组合梁抗剪承载力,给出了相应的抗剪承载力计算公式,以期工程实践提供参考。

## 1 有限元模型设计

本研究构建的 BFRP 网格-ECC 加固组合梁的截面示意图如图 1 所示。

为研究组合梁的抗剪性能,本文以 BFRP 网格

的单支截面面积( $S_{\text{bfrp}}$ )、ECC 厚度( $t_{\text{ecc}}$ )、BFRP 网格预应力程度( $P_{\text{bfrp}}$ )和网格布置角度( $\theta$ )为主要控制参数,设计了 18 个组合梁试件。组合梁总长度、计算跨度和混凝土保护层厚度分别为 3 300、3 000 和 25 mm,截面尺寸为 200 mm×400 mm,翼缘高度为 100 mm,翼缘宽度为 600 mm,混凝土强度为 C30,剪跨比为 2.9,具体参数及分组情况见表 1。

表 1 各试件参数及分组情况

Tab. 1 Parameters and grouping of each specimen

试件 分组	试件 编号	单支 截面面积 $S_{\text{bfrp}}/\text{mm}^2$	ECC 厚度 $t_{\text{ecc}}/\text{cm}$	预应 力程度 $P_{\text{bfrp}}/\%$	网格 布置角度 $\theta/(\circ)$
A 组	BEYJ-1	10	20	0	0
	BEYJ-2	30	20	0	0
	BEYJ-3	50	20	0	0
B 组	BEYJ-4	10	40	0	0
	BEYJ-5	30	40	0	0
	BEYJ-6	50	40	0	0
C 组	BEYJ-7	10	20	30	0
	BEYJ-8	30	20	30	0
	BEYJ-9	50	20	30	0
D 组	BEYJ-10	10	20	0	45
	BEYJ-11	30	20	0	45
	BEYJ-12	50	20	0	45
E 组	BEYJ-2	30	20	0	0
	BEYJ-13	30	30	0	0
	BEYJ-5	30	40	0	0
F 组	BEYJ-3	50	20	0	0
	BEYJ-14	50	30	0	0
	BEYJ-6	50	40	0	0
G 组	BEYJ-8	30	20	30	0
	BEYJ-15	30	30	30	0
	BEYJ-16	30	40	30	0
H 组	BEYJ-11	30	20	0	45
	BEYJ-17	30	30	0	45
	BEYJ-18	30	40	0	45

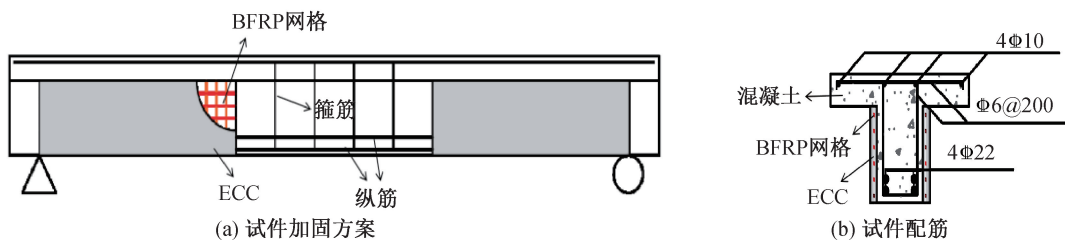


图 1 组合梁截面示意图

Fig. 1 Sectional diagram of composite beam

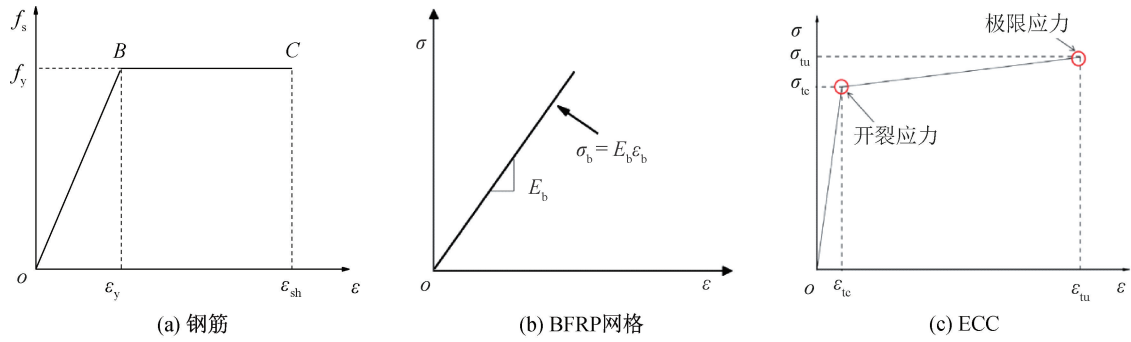


图 2 本构模型选择

Fig. 2 choice of constitutive model

## 2 模型建立与验证

### 2.1 材料本构模型的选取

混凝土采用《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)中给出的本构模型;钢筋采用双直线模型描述其本构行为;BFRP 网格由纵横交错 BFRP 筋材排列组成,在受拉过程中表现出明显的线弹性特性,本文采用胡克定律描述 BFRP 网格材料的应力-应变关系;关于 ECC 材料的受拉本构模型,本研究采用 Li 提出的单轴受拉本构模型<sup>[15]</sup>,表达式见式(1),本构模型见图 2。图中,  $f_s$  为抗拉强度,  $\varepsilon$  为应变,  $f_y, \varepsilon_y$  为钢筋弹性阶段屈服下限对应的应力和应变,  $\varepsilon_{sh}$  为钢筋塑性阶段应力强化对应的应变,  $E_b$  为弹性模量,  $\sigma_b$  和  $\varepsilon_b$  为 BFRP 网格的应力和应变。

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{lc}}{\varepsilon_{lc}} \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{lc} \\ \sigma_{lc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{lc}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{lc}} (\varepsilon - \varepsilon_{lc}), & \varepsilon_{lc} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为应力, Pa;  $\sigma_{lc}$  为开裂应力, Pa;  $\varepsilon_{lc}$  为开裂应变;  $\sigma_{tu}$  为极限应力, Pa;  $\varepsilon_{tu}$  为极限应变。

### 2.2 有限元模型的建立与边界条件的设置

本文采用 ABAQUS 软件对组合梁进行数值

模拟。由于分析的组合梁为简支梁,在支座边界条件设置中,支座 1 限制了各向平动及两个方向的转动,支座 2 限制了两个方向的平动和转动。模型采用位移加载。本文选用 C3D8R 单元模拟混凝土和 ECC, T3D2 单元模拟钢筋和 BFRP 网格。将钢筋笼嵌入到组合梁中, BFRP 网格嵌入到 ECC 中, BFRP 网格-ECC 加固层通过 Tie 连接固定于梁体。不考虑界面剥离,参考点与垫板表面之间设置点对面约束,这样可以减少应力集中,垫板通过 Tie 与梁体连接。建模过程如图 3 所示。

BFRP 网格、ECC 加固层和钢筋笼的网格设置为 30 mm,垫块、混凝土梁的网格设置为 60 mm,有限元模型的网格划分如图 4 所示。

### 2.3 有限元模型验证

为验证有限元模型的准确性,本文选取文献[16]的 3 个试件、文献[17]的 2 个试件和文献[18]的 1 个试件进行验证,结果如图 5 和表 2 所示。结果表明,模拟得到的荷载-位移曲线与试验得到的曲线吻合效果较好,极限承载力模拟值与试验值的最大相对误差在 10% 以内,说明本文构建的有限元模型的准确性较好,可用于下一步的模拟研究。

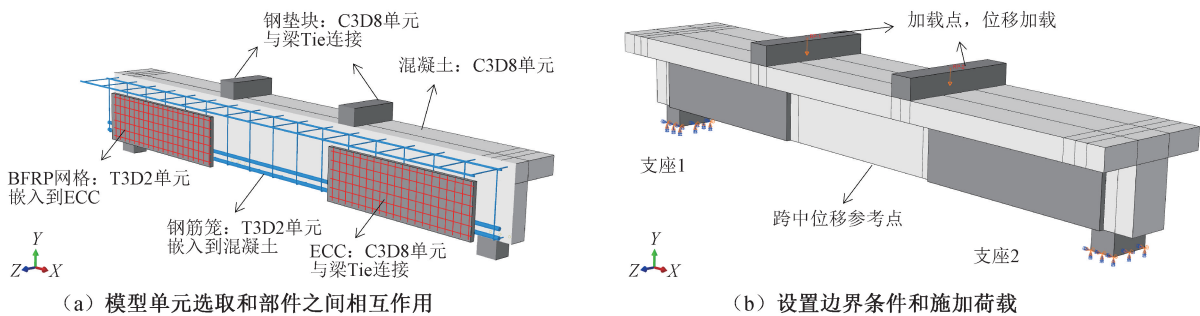


图 3 模型建模过程展示

Fig. 3 Modeling process presentation

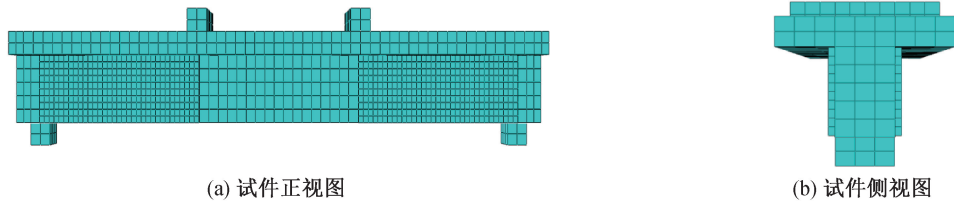


图4 模型网格划分  
Fig. 4 Model meshing

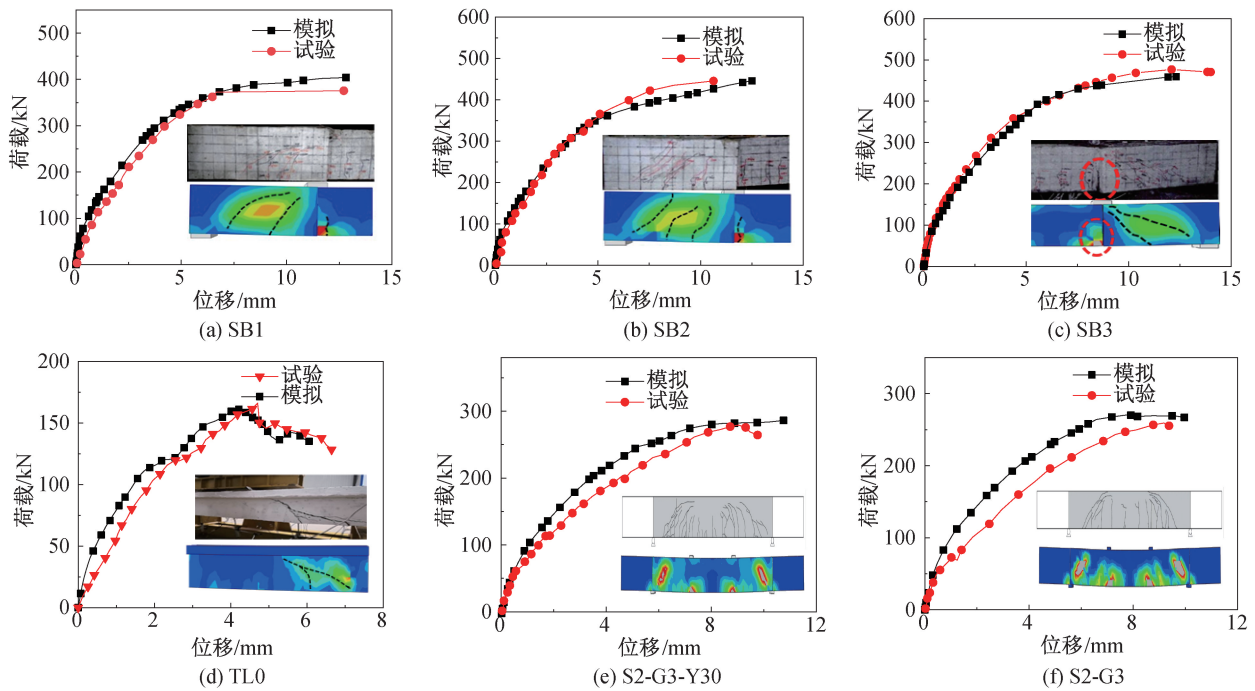


图5 荷载-位移曲线对比及塑性受拉损伤云图

Fig. 5 Load-displacement curve comparison and plastic tensile damage cloud image

表2 极限承载力对比

Tab. 2 Ultimate bearing capacity comparison

试件编号	试验值/kN	模拟值/kN	相对误差/%
SB1 <sup>[16]</sup>	376	404	7.44
SB2 <sup>[16]</sup>	449	445	0.89
SB3 <sup>[16]</sup>	471	460	-2.17
TL-0 <sup>[17]</sup>	167	161	-3.59
S2-G3-Y30 <sup>[17]</sup>	278	286	2.94
S2-G3 <sup>[18]</sup>	257	271	5.44

### 3 网格截面面积对组合梁抗剪性能的影响

本文以A组、B组、C组、D组的试件为研究对象,采用控制单一变量的方法,开展BFRP网格单支截面面积对组合梁抗剪性能的影响研究。组间试件在A组基础上分别改变了ECC厚度、BFRP网格预应力程度和网格布置角度,通过数值模拟试验得出各组合梁的应力分布图、荷载-跨中位移曲线以及抗剪承载力等。

### 3.1 云图分析

为分析试件应力分布及塑性应变分布规律,本文以A组BEYJ-1、BEYJ-2、BEYJ-3试件为例,提取了不同网格单支截面面积下各试件在达到极限承载力时钢筋笼、BFRP网络的等效力云图和混凝土、ECC层的等效塑性应变云图,如图6所示。

从图6分析可得出,BEYJ-1、BEYJ-2和BEYJ-3对应的第一排纵筋应力分别为273、311和350 MPa,与之对应的箍筋均达到了屈服应力。不同BFRP网络的最大集中应力分别为254、187和154 MPa。随着BFRP网格单支截面面积的增加,组合梁的剪跨区混凝土的应变值和高应变区域范围逐渐减小,且ECC层的高应变区域范围呈减小趋势。因此,提高BFRP网络的单支截面面积可有效提升加固层的整体受力性能,显著降低剪跨区混凝土的应力和应变,预防混凝土过早发生剪切破坏,同时可

增加第一排纵筋的拉应力,提高了组合梁的抗剪承载能力。

### 3.2 荷载-跨中位移曲线分析

A、B、C、D 四组试件组内荷载-跨中位移曲线如图 7 所示。由图 7 可知,在各组试件的弹性阶段,曲线基本呈现线性分布,且几乎重合。但组合梁进入塑性阶段后,当 BFRP 网络的单支截面面积从  $10 \text{ mm}^2$  增加到  $30 \text{ mm}^2$  时,曲线的斜率显著增加;当网格截面面积从  $30 \text{ mm}^2$  增加到  $50 \text{ mm}^2$  时,曲线的斜率趋于一致。当组合梁从塑性阶段发展到裂缝扩展阶段时,各组曲线均出现拐点。A 组各试件的拐点对应的荷载约为 390、430 和 440 kN, B 组的荷载约为 445、490 和 500 kN, C 组的荷载约为 425、450 和 460 kN, D 组的荷载约为 480、550 和 595 kN。增加 BFRP 网格单支截面面积可有效提高组合梁的刚度和抗剪性能,延长其使用寿命。

### 3.3 抗剪承载力分析

表 3 总结了不同 BFRP 网格单支截面面积对极限抗剪承载力的影响。由表 3 可知,在其他参数

不变的情况下,随着 BFRP 网格单支截面面积的增大,组合梁的抗剪承载力逐渐提高,但增幅逐渐减小。这是因为较大的 BFRP 网格单支截面面积可提供更多的强度和刚度,从而有效提高了组合梁的承载能力。然而,随着截面面积的增加,其对整体加固效果的贡献率下降,因此抗剪承载力增长速度减缓。D 组抗剪承载力显著提高,但 BFRP 网格单支截面面积从  $30 \text{ mm}^2$  增长到  $50 \text{ mm}^2$  时,抗剪承载力几乎没有变化。根据纵筋和箍筋的应力可知,荷载作用下构件未发生剪切破坏,发生了受弯破坏。

增大 ECC 厚度、施加预应力和将网格的布置角度调整为  $45^\circ$ , 均能显著提高试件的抗剪承载力。当 BFRP 网格单支截面面积由  $10 \text{ mm}^2$  增加到  $30 \text{ mm}^2$  时, BFRP 网格可能会带来更多有效的横向约束,因此抗剪性能提升较大;当从  $30 \text{ mm}^2$  增加到  $50 \text{ mm}^2$  时,加固效果相差不大。在实际工程中建议使用单支截面面积为  $30 \text{ mm}^2$  的 BFRP 网格,可在保证结构具备良好承载力的同时,更节省材料。

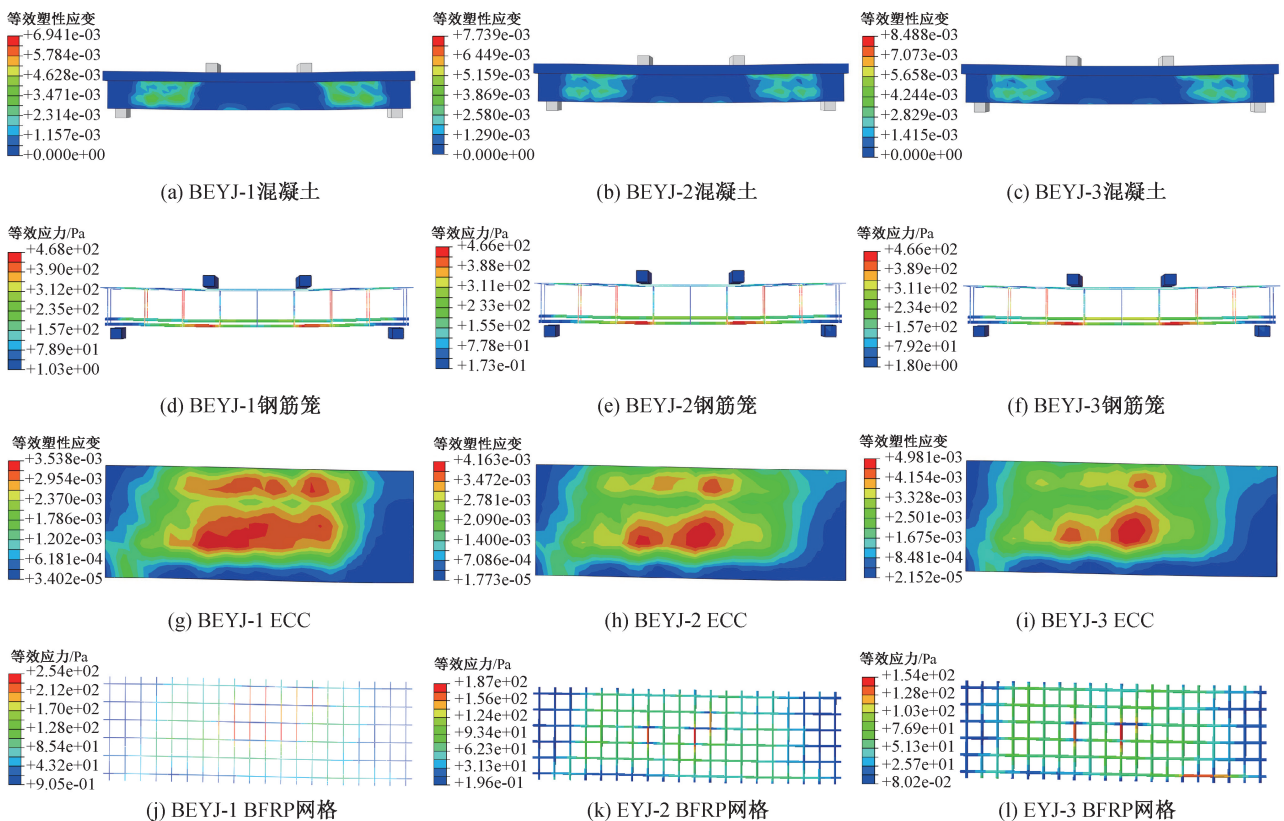


图 6 A 组各部件的云图

Fig. 6 Cloud image of each component of Group A

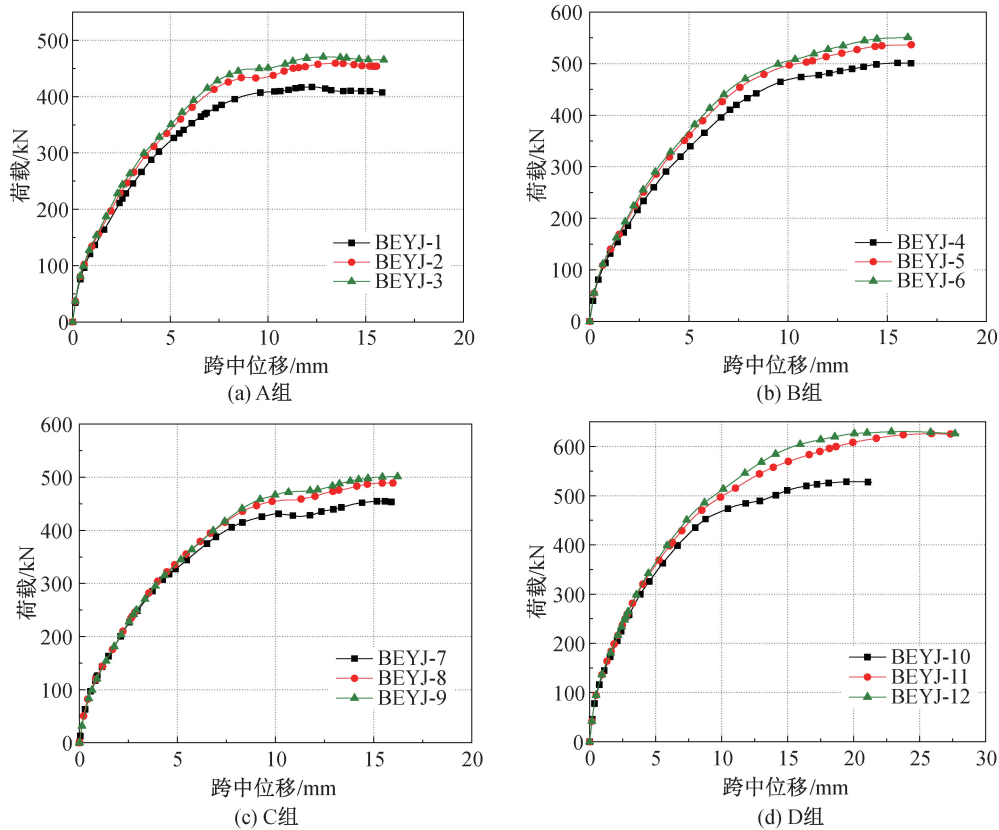


图7 组内荷载-跨中位移曲线

Fig. 7 Load-mid-span displacement curves in a group

表3 不同网格单支截面面积下极限抗剪承载力

Tab. 3 Ultimate shear capacity at different single branch cross-sectional area of grids

试件分组	试件编号	跨中位移 $\Delta$ /mm	极限荷载 $P_u$ /kN	极限荷载变化率/%	破坏模式
A组	BEYJ-1	12.25	417.31	—	剪切破坏
	BEYJ-2	13.45	459.24	10.05	剪切破坏
	BEYJ-3	13.13	470.62	12.77	剪切破坏
B组	BEYJ-4	15.52	501.15	—	剪切破坏
	BEYJ-5	16.21	536.51	7.06	剪切破坏
	BEYJ-6	16.23	551.36	10.02	剪切破坏
C组	BEYJ-7	15.41	454.86	—	剪切破坏
	BEYJ-8	15.77	489.27	7.56	剪切破坏
	BEYJ-9	16.22	501.22	10.19	剪切破坏
D组	BEYJ-10	20.00	528.68	—	剪切破坏
	BEYJ-11	25.90	626.14	18.43	受弯破坏
	BEYJ-12	23.81	630.58	19.27	受弯破坏

#### 4 ECC厚度对组合梁抗剪性能的影响

本文以E组、F组、G组、H组为研究对象,研究ECC厚度对组合梁抗剪性能的影响。

##### 4.1 云图分析

本研究以E组的BEYJ-2、BEYJ-13和BEYJ-5试件为例,比较分析试件等效力分布及等效塑性应变分布规律,应力云图如图8所示。

从图8可以看出,BEYJ-2、BEYJ-13和BEYJ-5对应的第一排纵筋的跨中最大应力分别为311、388和427 MPa, ECC对应的最大应变分别为0.003 538、0.003 030和0.002 804。随着ECC厚度的增加,组合梁剪跨区混凝土的应变值和高应变区域范围逐渐减小,因此增加ECC厚度可防止混凝土在剪切区域过早发生剪切破坏,提高加固层的整体受力性能,显著降低剪跨区混凝土的

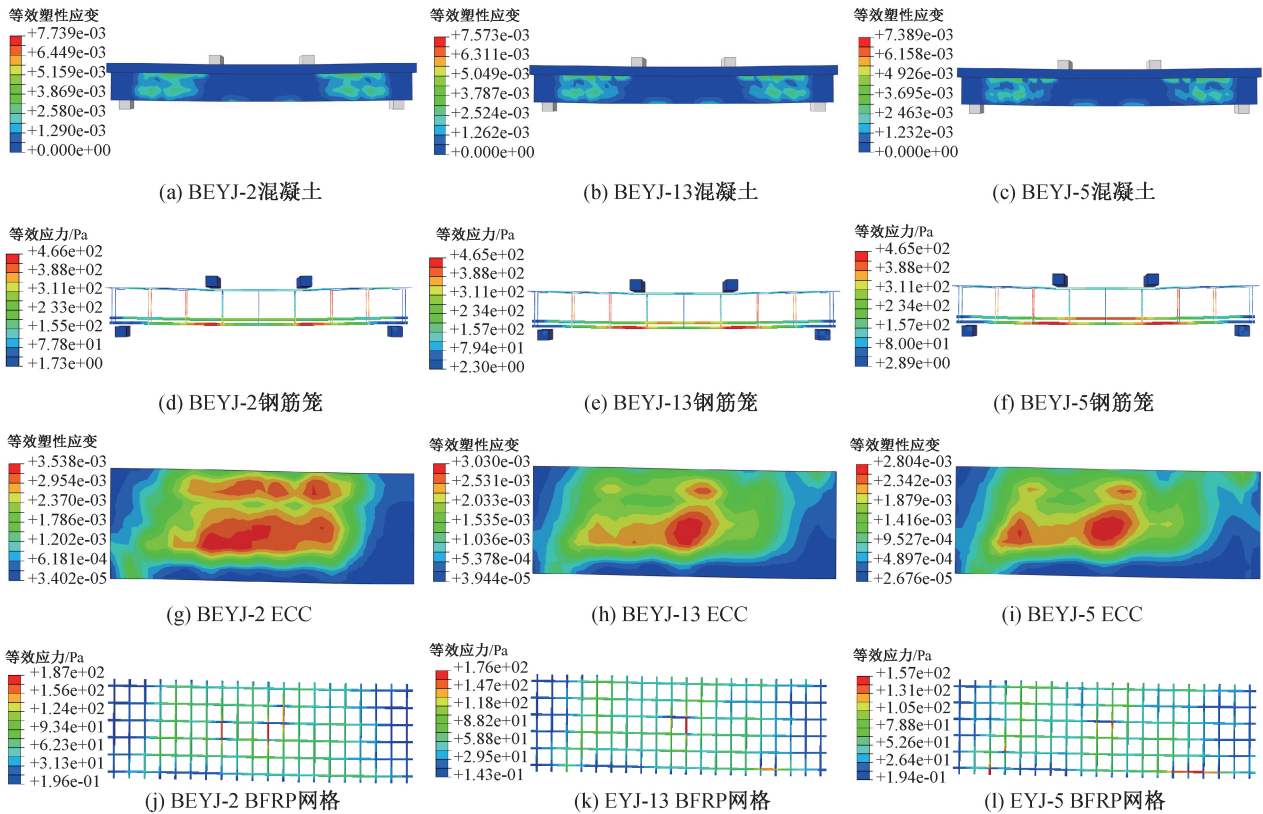


图 8 E 组各部件的应力云图

Fig. 8 Cloud image of each component of Group E

应力和应变,同时可增加第一排纵筋的拉应力,提高组合梁的抗剪承载力。

#### 4.2 荷载-跨中位移曲线分析

E 组、F 组、G 组、H 组试件组内荷载-跨中位移曲线如图 9 所示。由图 9 可知,当组合梁从塑性阶段到裂缝扩展阶段时,各组试件曲线均出现拐点, E 组各试件曲线拐点对应的荷载约为 430、460 和 490 kN, F 组曲线拐点对应的荷载约为 440、480 和 500 kN, G 组曲线拐点对应的荷载约为 450、490 和 500 kN, H 组曲线拐点对应的荷载约为 560、585 和 600 kN。以上拐点对应的荷载随 ECC 厚度的增加而逐渐增大,且增长的幅度几乎相同。这表明在裂缝扩展阶段增加 ECC 厚度可显著提高结构的承载能力。此外, ECC 厚度的增加可以提供更多的外部约束,增加结构的刚度和承载能力。这有助于抵抗剪切荷载并延缓混凝土裂缝的扩展,从而提高结构的抗剪性能。

#### 4.3 抗剪承载力分析

不同 ECC 厚度加固梁的极限抗剪承载力汇总表 4。由表 4 可知,随着 ECC 厚度的增加,组合

梁的抗剪承载力逐渐增大。值得注意的是, H 组的组合梁构件已接近受弯破坏,增加 ECC 厚度对抗剪承载力的影响几乎可以忽略不计。

当 ECC 厚度相同时,增大网格的单支截面积、施加预应力以及改变网格的布置角度,都在一定程度上提高了试件的抗剪承载力。ECC 厚度的增加可以显著提升组合梁的抗剪承载力, E 组、F 组和 G 组梁的抗剪承载力的提升趋势基本一致。H 组构件承载能力提高显著,但 ECC 厚度对构件的承载能力没有影响,主要原因是此时构件为弯曲破坏,而构件承载能力取决于组合梁正截面抗弯能力。

### 5 非预应力组合梁抗剪承载力计算

本文以桁架-拱模型为基础<sup>[19]</sup>,组合梁的抗剪承载力  $V$  为桁架承载力  $V_t$  和拱承载力  $V_a$  之和,即

$$V = V_t + V_a \quad (2)$$

#### 5.1 桁架模型的建立

基于图 10(a) 模型,本文通过分析桁架右侧的隔离体得到桁架承载力表达式,见式(3)。

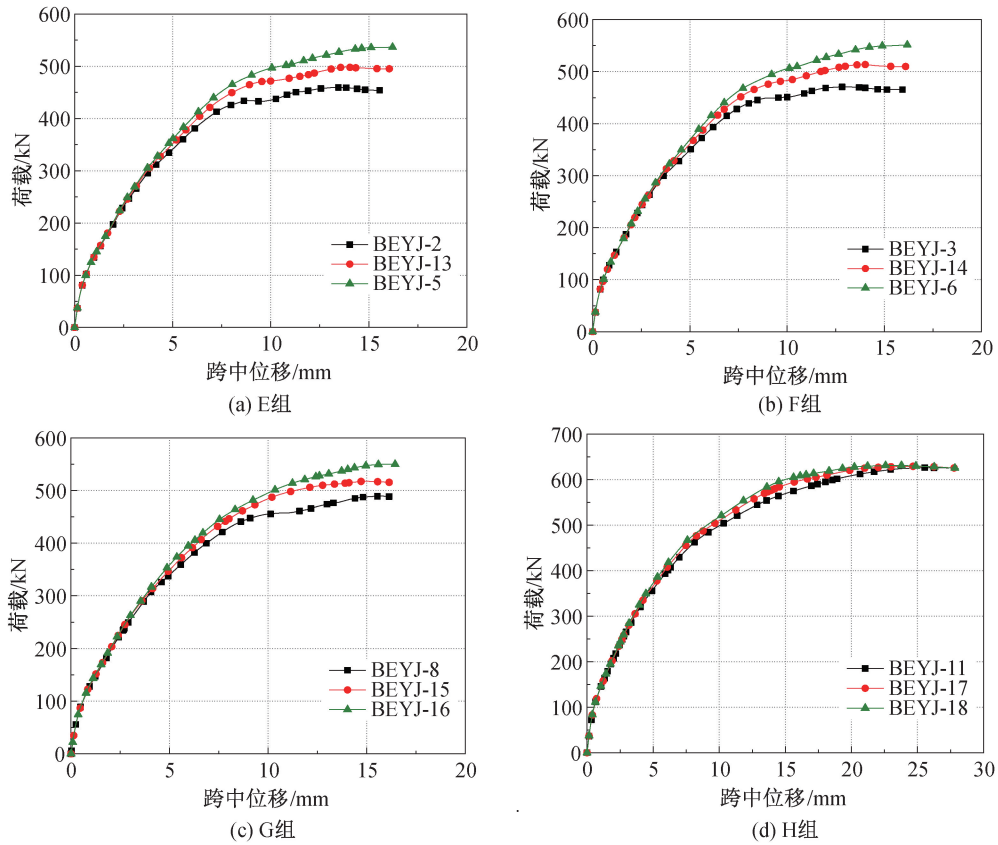


图9 组内荷载-跨中位移曲线

Fig. 9 Load-mid-span displacement curves in a group

表4 不同 ECC 厚度下极限抗剪承载力

Tab. 4 Ultimate shear capacity at different ECC thicknesses

试件分组	试件编号	跨中位移 $\Delta$ /mm	极限荷载 $P_u$ /kN	极限荷载变化率/%	破坏方式
E 组	BEYJ-2	13.45	459.24	—	剪切破坏
	BEYJ-13	13.85	498.33	8.51	剪切破坏
	BEYJ-5	16.21	536.51	16.83	剪切破坏
F 组	BEYJ-3	13.13	470.62	—	剪切破坏
	BEYJ-14	14.02	513.40	9.09	剪切破坏
	BEYJ-6	16.23	551.36	17.16	剪切破坏
G 组	BEYJ-8	15.03	489.27	—	剪切破坏
	BEYJ-15	15.77	517.56	5.78	剪切破坏
	BEYJ-16	15.95	550.03	12.42	剪切破坏+受弯破坏
H 组	BEYJ-11	25.90	626.14	—	受弯破坏
	BEYJ-17	24.86	628.96	0.45	受弯破坏
	BEYJ-18	23.12	630.87	0.76	受弯破坏

$$V_l = \sum \sigma_{sv} A_{sv} + \sum \sigma_{be} A_{be} = (\sigma_{sv} \rho_{sv} b h_e + \sigma_{be} \rho_{be} b_{be} h_{be}) \cot \alpha \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{sv}$  为箍筋的抗拉强度, Pa;  $\sigma_{be}$  为复合层的竖向拉应力, Pa;  $A_{sv}$ 、 $A_{be}$  分别为箍筋和 BFRP 网格-ECC 增强层的截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\rho_{sv}$ 、 $\rho_{be}$  分别为配箍率和加固层竖向 BFRP 的配网率;  $b$ 、 $b_{be}$  分别为对比梁和加固梁的截面宽度, mm;  $h_e$ 、 $h_{be}$  分别

为混凝土梁和加固层的有效高度, mm;  $\alpha$  为倾角, ( $^\circ$ )。

BFRP 网格-ECC 复合层中的竖向拉应力由 BFRP 网格和 ECC 共同提供。为方便计算, 本文采用等效假设, 即将 ECC 复合层的截面面积转化为 BFRP 网格单支截面的面积, 具体公式见式(4)。

$$A_{be} = (\sin \theta + \cos \theta) A_b + (A_e + A_b) \frac{\sigma_e}{\sigma_b} \quad (4)$$

式中:  $A_b$ 、 $A_e$  为加固层竖向 BFRP 网格单支截面面积和 ECC 的截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\theta$  为竖向网格与梁轴线的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\sigma_b$ 、 $\sigma_e$  分别为 BFRP 网格和 ECC 的极限拉应力,  $\text{Pa}$ 。

倾角  $\alpha$  值越小, 与斜裂缝正交的压应力越大。当倾角  $\leq 26.6^\circ$  时, 斜裂缝区域横截面压应力传递困难<sup>[20-21]</sup>, 故当倾角  $\leq 26.6^\circ$  时, 取  $\alpha = 26.6^\circ$ 。

### 5.2 拱模型的建立

BFRP 网格-ECC 复合加固钢筋混凝土梁拱模型如图 10(b) 所示。图中,  $a$  为长度,  $h$  为高度。根据力的平衡条件, 组合梁拱模型中混凝土承担的剪力  $V_a$  为

$$V_a = \frac{\sigma_a (b_{be} h_e + b_f h_f)}{2} \tan \beta \quad (5)$$

式中:  $\sigma_a$  为组合梁发生剪切破坏时混凝土的极限抗压强度,  $\text{Pa}$ ;  $b_f$ 、 $h_f$  分别为组合梁翼缘宽度、高度,  $\text{mm}$ ;  $\beta$  为拱结构中斜向压杆与水平方向的夹角,  $(^\circ)$ 。

由于加固层采用的是水泥基复合材料, 其截面面积远小于混凝土的截面面积, 因此可以将

加固层等效为混凝土进行计算。文献[22]指出, 剪跨比  $\lambda$  对混凝土斜向压应力的影响较大, 当  $\lambda$  较小时, 混凝土斜向压应力才能发挥显著。因此, 本文在式(5)中加入剪跨比  $\lambda$ 。

组合梁的斜截面抗剪承载力由桁架承载力  $V_t$  和拱承载力  $V_a$  两部分叠加组成。因此, 组合梁的抗剪承载力  $V$  表达式如下:

$$V = \begin{cases} V_t + 0.5 \left( 0.7 - \frac{f_c}{200} \right) (b_{be} h_w + b_f h_f) f_c \tan \beta & (\lambda < 1) \\ V_t + 0.5 (1.4 - 0.4\lambda) \left( 0.7 - \frac{f_c}{200} \right) (b_{be} h_w + b_f h_f) f_c \tan \beta & (1 \leq \lambda \leq 3.5) \\ V_t & (\lambda > 3.5) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f_c$  为混凝土抗压强度,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $h_w$  为组合梁腹板高度,  $\text{mm}$ 。

将式(6)计算的组合梁抗剪承载力  $V_{ca}$  与模拟值  $V_{fe}$  进行对比, 结果见表 5 和图 11。组合梁的极限抗剪承载力计算值与模拟值比值的平均值、标准差和变异系数分别为 1.001、0.05 和 0.05。由图 11 可以看出, 计算值和模拟值的最大偏差为 7.53%,

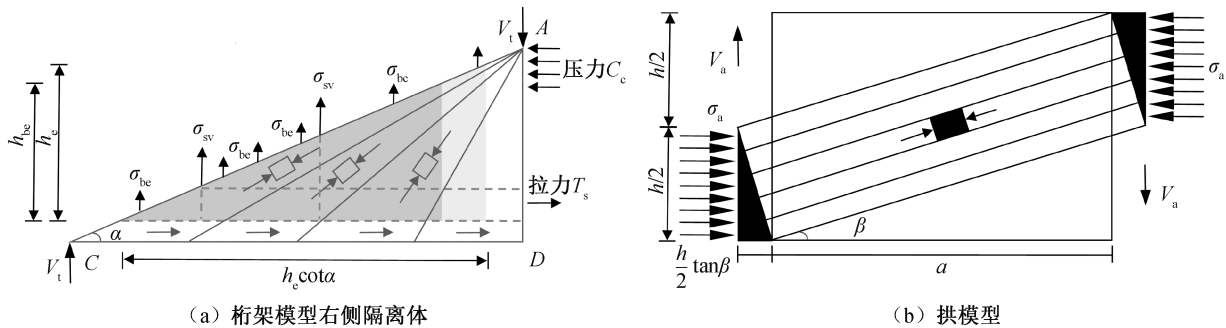


图 10 模型示意图

Fig. 10 Model diagram

表 5 非预应力 BFRP 网格-ECC 加固梁抗剪承载力计算值与模拟值

Tab. 5 Calculated and simulated values of shear capacity of non-prestressed BFRP grid-ECC reinforced beams

编号	模拟值 $V_{fe}/\text{kN}$	桁架承载力 $V_t/\text{kN}$	拱承载力 $V_a/\text{kN}$	计算值 $V_{ca}/\text{kN}$	$V_{ca}/V_{fe}$
BEYJ-1	417.31	381.69	53.79	435.49	1.04
BEYJ-2	459.24	422.60	53.79	476.39	1.04
BEYJ-3	470.62	445.27	53.79	499.07	1.06
BEYJ-4	501.15	419.76	58.68	478.45	0.95
BEYJ-5	536.51	437.43	58.68	496.12	0.92
BEYJ-6	551.36	454.40	58.68	513.08	0.93
BEYJ-10	528.68	495.53	53.79	549.32	1.04
BEYJ-13	498.33	430.01	56.24	486.25	0.98
BEYJ-14	513.40	449.84	56.24	506.07	0.99
BEYJ-18	509.00	484.42	53.79	538.21	1.06

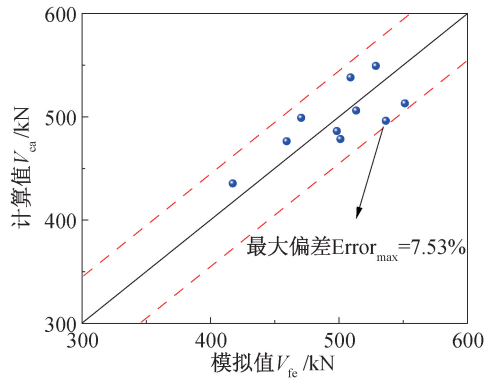


图 11 非预应力加固梁抗剪承载力模拟值与计算值对比

Fig. 11 Comparison of simulated and calculated values of shear capacity of non-prestressed reinforced beams

吻合度良好,数据的离散性相对较小,整体计算精度较高。因此,该理论模型可以有效预测非预应力 BFRP 网格-ECC 加固 T 形梁的抗剪极限承载力。

## 6 结论

本文利用 ABAQUS 软件进行四点弯曲加载模拟,研究 BFRP 网格-ECC 加固 T 形钢筋混凝土梁的加固效果,得到以下结论:

1)增大 BFRP 网格单支截面面积可有效提高梁的抗剪承载力,当单支截面面积由  $10 \text{ mm}^2$  增加到  $30 \text{ mm}^2$  时,抗剪承载力提升了  $7.06\% \sim 18.43\%$ ,提升最为显著。当单支截面面积进一步增加至  $50 \text{ mm}^2$  时,提升效果有限,抗剪承载力提升了  $0.7\% \sim 2.8\%$ 。在实际工程中,选用单支截面面积为  $30 \text{ mm}^2$  的 BFRP 网格可在经济和材料节约方面实现平衡。

2)当 ECC 厚度由  $20 \text{ mm}$  增加到  $40 \text{ mm}$  时,组合梁的抗剪承载力提升了  $12.42\% \sim 16.83\%$ 。ECC 厚度对采用  $45^\circ$  BFRP 网格加固的组合梁影响相对较小,抗剪承载力提升仅在  $0.5\%$  以内。

3)BFRP 网格-ECC 加固 T 形钢筋混凝土梁抗剪承载力计算值与模拟值的偏差小于  $8\%$ ,计算值与模拟值吻合良好,计算精度高。

### 参考文献:

[1] 张敏,邓明科,智奥龙,等. 纤维织物增强高延性混凝土加固受损 RC 梁受剪性能试验[J]. 复合材料学报, 2023,40(3): 1624-1636.  
ZHANG M, DENG M K, ZHI A L, et al. Experimental on the shear behavior of pre-damaged RC beams strengthened by textile reinforced highly ductile concrete[J]. Acta Ma-

teriae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1624-1636.

- [2] 王二丽. CFRP 网格增强 ECC 永久模板-GFRP 钢筋混凝土组合梁抗弯性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.  
WANG E L. Research on flexural performance of CFRP mesh reinforced ECC permanent formwork-GFRP reinforced concrete composite beam[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [3] 周欢庆. 超高性能纤维混凝土在公路桥梁加固中的应用分析[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(8): 137-139.  
ZHOU H Q. Analysis of the application of ultra-high performance fiber reinforced concrete in the reinforcement of highway bridges[J]. Jiaotong Keji Yu Guanli, 2024, 5(8): 137-139.
- [4] DENG L, LEI L, LAI S, et al. Experimental study on the axial tensile properties of FRP grid-reinforced ECC composites[J]. Materials, 2021, 14(14): 3936.
- [5] ZHANG A, LIU Z, LI F, et al. Experimental investigation of corrosion-damaged RC beams strengthened in flexure with FRP grid-reinforced ECC matrix composites[J]. Engineering Structures, 2021, 244: 112779.
- [6] GUO R, REN Y, LI M, et al. Experimental study on flexural shear strengthening effect on low-strength RC beams by using FRP grid and ECC[J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111434.
- [7] 李娜, 夏永阳, 李旺鹏, 等. FRPG-ECC 复合加固钢筋混凝土柱轴压性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(10): 7-12.  
LI N, XIA Y Y, LI W P, et al. Study on axial compression behavior of reinforced concrete columns strengthened by FRPG-ECC[J]. Journal of Huazhong University of science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(10): 7-12.
- [8] 朱忠锋, 王文炜. FRP 编织网/ECC 复合加固钢筋混凝土圆柱力学性能的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1082-1087.  
ZHU Z F, WANG W W. Experimental study on mechanical behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with FRP textile and ECC[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1082-1087.
- [9] AL-GEMEEL A N, ZHUGE Y. Experimental investigation of textile reinforced engineered cementitious composite (ECC) for square concrete column confinement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 594-602.
- [10] 王学奎. 玄武岩纤维网增强 ECC 加固 RC 梁抗剪性能研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2023.  
WANG X K. Study on the shear performance of RC beams reinforced with basalt fiber grid-enhances ECC [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2023.

- [11] 苏会晓. FRP 网格增强 ECC 加固混凝土柱受压性能数值分析[D]. 郑州: 郑州大学,2017.  
SU H X. Numerical analysis of compressive performance of concrete columns strengthened with FRP-grid reinforced ECC[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2017.
- [12] 王新玲,苏会晓,李可,等. FRP 网格增强 ECC 加固素混凝土柱受压性能数值分析[J]. 建筑科学,2018, 34(3): 22-29.  
WANG X L,SU H X,LI K,et al. Numerical analysis of compressive performance of plain concrete columns strengthened with FRP-grid and ECC[J]. Building Science,2018,34(3): 22-29.
- [13] LI S,CHEN X,LIU Z,et al. Axial behavior of pre-damaged RC columns strengthened with CFRP textile grid-reinforced ECC matrix composites [J]. Journal of Building Engineering,2023,73: 106813.
- [14] 江佳斐,隋凯. 纤维网格增强超高韧性水泥复合材料加固混凝土圆柱受压性能试验[J]. 复合材料学报,2019,36(8): 1957-1967.  
JIANG J F,SUI K. Experimental study of compression performance of concrete cylinder strengthened by textile reinforced engineering cement composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica,2019,36(8): 1957-1967.
- [15] LI V C,LEPECH M. General design assumptions for engineered cementitious composites[C]. In: Int Workshop High Performance Fiber Reinforce Cementitious Composites Structural Applications. Hawaii: RILEM,2005.
- [16] 郑宇宙. FRP 格栅增强 ECC 复合加固混凝土梁试验与计算方法研究[D]. 南京: 东南大学,2018.  
ZHENG Y Z. Experiment and calculation method research on reinforced concrete (RC) beams strengthened with the composite of FRP grid and ECC[D]. Nanjing: Southeast University,2018.
- [17] 陶甲. 预应力 FRP 网格加固 RC 梁抗剪性能研究[D]. 南京: 东南大学,2021.  
TAO J. Research on shear behavior of RC beams strengthened with prestressed FRP grids[D]. Nanjing: Southeast University,2021.
- [18] 刘奥. CTRM 加固二次受力钢筋混凝土 T 型梁抗剪性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学,2021.  
LIU A. Study on shear behavior of reinforced concrete T-beams strengthened by CTRM[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology,2021.
- [19] 余自若,夏文敏,安明喆,等. 基于桁架-拱模型的钢筋 UHPC 矩形梁抗剪承载力计算方法[J]. 铁道学报,2023,45(3): 16-29.  
YU Z R,XIA W M,AN M Z,et al. Research on shear capacity of UHPC rectangular beams based on truss-arch model[J]. Journal of the China Railway Society,2023, 45(3): 16-29.
- [20] 贺卫东. BFRP 网格加固混凝土受弯构件静力与疲劳性能研究[D]. 南京: 东南大学,2021.  
HE W D. Static and fatigue behavior of RC flexural members strengthened with BFRP grids[D]. Nanjing: Southeast University,2021.
- [21] WANG T,HSU T T C. Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models[J]. Computers & Structures,2001,79(32): 2781-2791.
- [22] 李国平,沈殷. 体外预应力混凝土简支梁抗剪承载力计算方法[J]. 土木工程学报,2007(2): 64-69.  
LI G P,SHEN Y. Calculation method for the shear bearing capacity of simply-supported externally prestressed concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal,2007(2): 64-69.

(责任编辑 张爱丽)