

纤维网格增强混凝土复合材力学性能

胡克旭, 蓝 玥, 李 晓

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 纤维网格增强混凝土(TRC)是以纤维编织网格为增强材料,以聚合物砂浆为基体的新型复合材料,其力学性能受到不同纤维网格股数和层数的明显影响。为研究这种新型复合材料的力学性能和与其所加固混凝土间的黏结滑移性能,进行了不同股数和不同层数的纤维网格拉伸试验和 TRC 复合材拉伸试验,以及不同网格层数的 TRC-混凝土界面黏结滑移试验,建立了随层数和股数变化的纤维网格拉伸本构模型、TRC 复合材拉伸本构模型、TRC-混凝土界面黏结滑移本构模型,为后续研究和工程应用提供理论依据。

关键词: 纤维网格增强混凝土;纤维网格;拉伸试验;黏结滑移试验;本构模型

中图分类号: TU528.57

文献标志码: A

Mechanical Properties of Textile Reinforced Concrete Composite Materials

HU Kexu, LAN Yue, LI Yao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Textile reinforced concrete (TRC) is a new type of composite material with fiber woven grid as the reinforcing material and polymer mortar as the matrix. Its mechanical properties are obviously affected by the different number of strands and layers of the fiber grids. In order to study the mechanical properties of this new composite material and the bond-slip performance between TRC and the reinforced concrete, tensile tests of fiber mesh and TRC with different strands and layers were carried out, and also TRC-concrete interface bond-slip test with different reinforcement layers. The tensile constitutive model of fiber mesh and TRC that varies with the number of layers and strands, the TRC-concrete interface bond-slip constitutive model is established, which provides the theoretical basis for subsequent

research and engineering applications.

Key words: textile reinforced concrete composite (TRC); fiber mesh; tensile test; bond-slip test; constitutive model

纤维编织网增强混凝土(textile reinforced concrete, TRC)是一种纤维网格增强水泥基复合材料,作为一种新型加固材料用于混凝土结构加固,对原结构自重和截面尺寸影响较小,具有施工简便、适用面广、耐久性好等特点^[1]。由于用于加固结构中的 TRC 复合材往往处于受拉状态,对其力学性能的研究因而主要集中于抗拉性能研究。

目前针对 TRC 复合材的力学性能的研究主要是对纤维网格中单股纤维的拉伸性能和对单层纤维网格增强的混凝土复合材试件的拉伸性能研究^[2-7],缺乏系统性地考虑其中纤维股数、网格层数对纤维网格和 TRC 复合材受力性能的影响,以及对 TRC 与被加固结构的混凝土间黏结性能的影响。而实际工程中,纤维网格在 TRC 复合材中均为多股甚至多层,因此,只针对单股纤维、单层网格的 TRC 的试验,忽视了不同股数纤维和不同层数网格间的工作不协调性,从而高估了实际网格的承载能力。由于 TRC 复合材中的网格在基体混凝土中不同纤维股间共同工作性能相对纯网格好,致使纯纤维网格的拉伸性能和 TRC 中网格的拉伸性能明显不同。另外,国内外目前针对 TRC 复合材和混凝土间黏结滑移性能的研究发现^[8-11],TRC 复合材中的纤维网格层数对其与混凝土间的黏结滑移有明显影响,但缺乏针对工程中常用加固层数进行系统、完整的试验研究。因此,研究不同股数、不同层数纤维网格和 TRC 的受拉性能,以及 TRC 与被加固的混凝土间的黏结性能非常必要。

收稿日期: 2021-11-21

第一作者: 胡克旭(1964—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为工程结构抗火性能及抗震加固方法。

E-mail: kexuhu@163.com

通信作者: 李晓(1995—),男,工学硕士,主要研究方向为工程结构加固和抗火。E-mail: 13808715167@163.com



论文
拓展
介绍

为此,本文结合实际工程中的应用情况,进行了不同纤维股数(1、3、5、8、10股,受试验条件限制未能进行更多股数的试验)和不同网格层数(1、2、3、4层)的纯纤维网格和TRC复合材的拉伸性能试验研究,以及不同网格层数(1、2、3、4层)TRC与混凝土间的黏结滑移性能试验研究,建立了随纤维股数和网格层数变化的纯纤维网格拉伸本构模型、TRC复合材拉伸本构模型和TRC-混凝土界面黏结滑移本构模型,为后续研究和工程应用提供理论依据。

1 纤维网格拉伸性能试验研究

1.1 试验试件

试验采用的纤维网格是目前工程中常用的天津卡本复合材料有限公司生产的CFN 200/200双向碳纤维网格,网格间距双向20 mm,每股纤维理论截面积 0.88 mm^2 ,弹性模量240 GPa(厂家提供数据)。网格在生产过程中在其表面通过了浸胶处理以提高碳纤维丝间的共同工作性能。

参考碳纤维复丝的试验方法^[13]和国内外有关研究文献,试验纤维网格试件的试验段标距长度为100 mm。为便于试验时对试件的夹持,在纤维网格两端浇筑相应宽度的TRC薄板(试验时夹持长度为200 mm)。网格两端的TRC薄板厚度根据网格层数不同,网格层间距和保护层厚度均为5 mm。试验试件尺寸如图1所示。宽度有60 mm、100 mm、160 mm和200 mm 4种,长度均为800 mm。试件制作如图2所示,共8组,每组3个,分别进行单股单层、3股单层、5股单层、8股单层、10股单层和5股2、3、4层的拉伸试验。

1.2 试验装置与加载测试

试验装置如图3所示。试验专门设计了两套钢板夹具以夹持不同尺寸的试件,采用额定拉力为10 t的液压式拉压千斤顶进行加载。试验过程分别通过安装在千斤顶加载端的电子压力传感器和测点位于标段端头的位移计对所加荷载和试件的伸长变形进行采集。电子压力传感器的采集精度为0.069 kN,位移计采集的精度为0.000 5 mm。

1.3 试验结果及分析

网格试件的典型破坏形态如图4所示,断裂位置基本位于测试段中部。拉伸过程中随着荷载不断增大,部分纤维丝先被拉断,随后更多纤维丝被陆续拉断,纤维股伸长,直至完全被拉断。

网格拉伸试验所得抗拉强度、弹性模量和极限应变结果如表1所示。实测不同股数的单层网格试

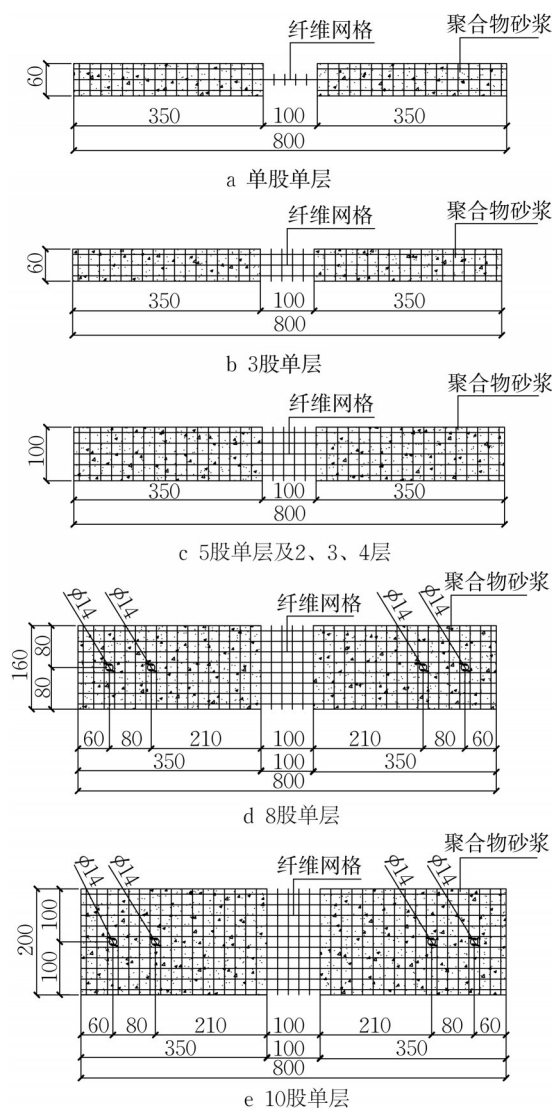


图1 纤维网格拉伸试验试件

Fig.1 Fiber mesh tensile test specimen

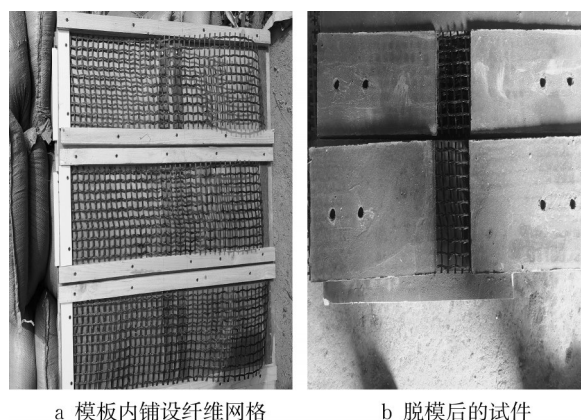


图2 纤维网格试件制作

Fig.2 Pouring of fiber mesh specimens

件应力应变曲线如图5所示,不同层数的5股网格试件应力应变曲线如图6所示。图5和图6均显

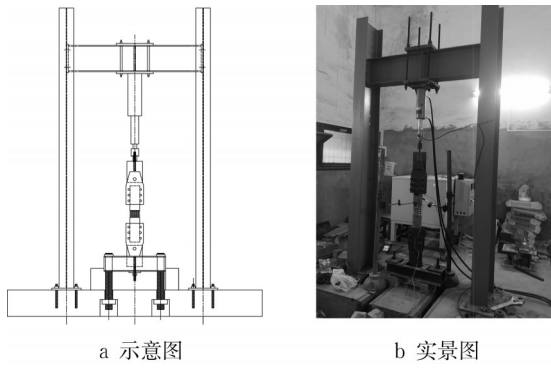


图3 试验装置
Fig.3 The test device

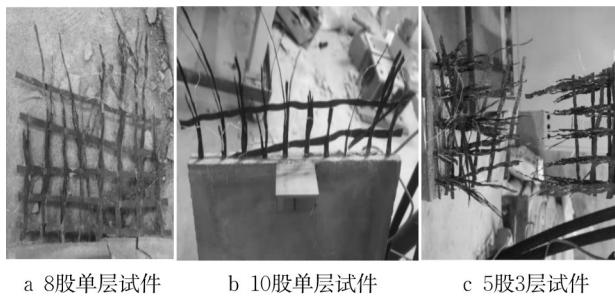


图4 网格试件破坏形态
Fig.4 Failure mode of TRC specimen

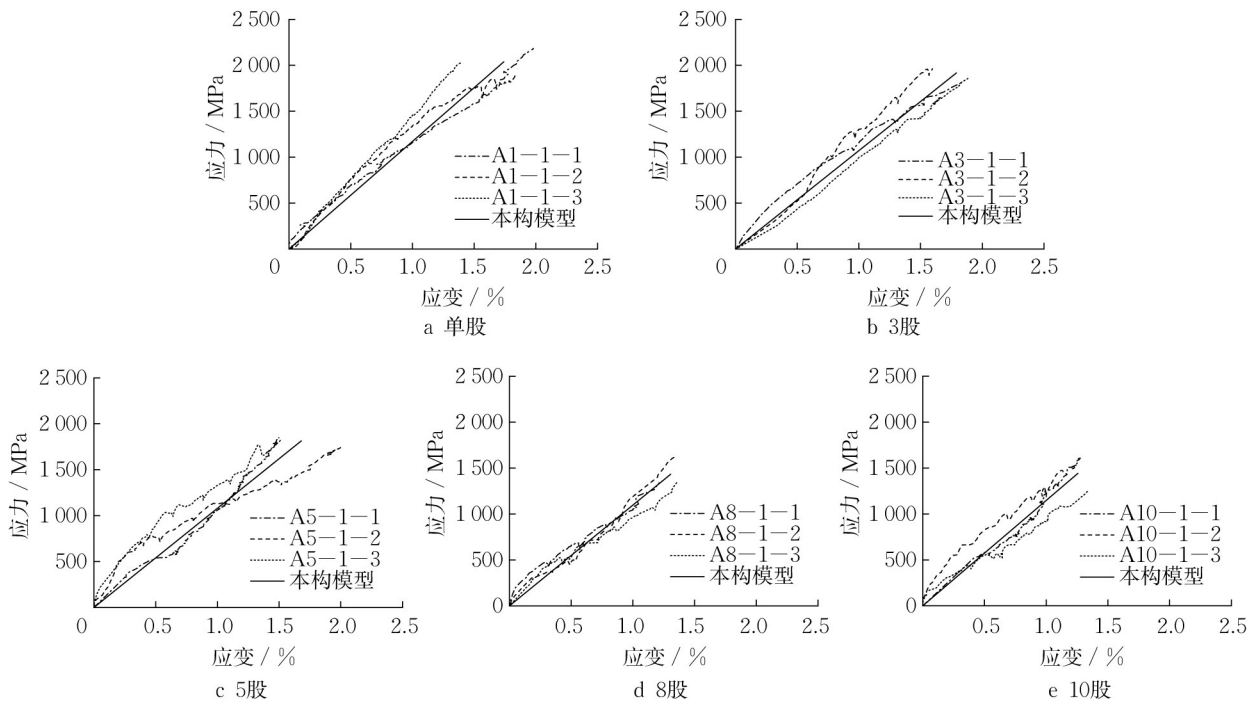


图5 不同股数纤维网格应力应变曲线
Fig.5 Stress-strain curve of fiber mesh with different strands

图 8 为纤维网格抗拉强度和极限应变随层数变化情况。随着层数的增多,网络的抗拉强度也呈现持续下降的趋势,4层网格较单层网格最大下降约

示:应力和应变间基本呈线性关系。

表 1 纤维网拉伸结果一览表

Tab.1 List of tensile results of fiber mesh

试验工况	极限荷载平均值/kN	抗拉强度平均值/MPa	弹性模量平均值/GPa	极限应变平均值/%
单股单层	1.79	2 037.88	119.48	1.74
3股单层	5.07	1 916.67	108.04	1.79
5股单层	7.98	1 814.39	110.20	1.68
5股2层	14.46	1 642.80	104.41	1.58
5股3层	20.63	1 562.63	93.61	1.68
5股4层	26.08	1 482.01	94.49	1.57
8股单层	10.09	1 433.71	109.78	1.31
10股单层	12.69	1 442.05	115.62	1.26

图 7 为纤维网格抗拉强度和极限应变随股数变化的情况。随着股数的增多,网络的抗拉强度和极限应变均呈持续下降的趋势;当网格股数为 10 股时,其抗拉强度和极限应变分别降低了 29.6 % 和 27.6 %。这主要是因为试件制作时不能保证不同纤维股的张紧程度完全一致,以及纤维网格生产时也不能确保不同纤维股内的纤维丝状态完全一致,随着网格股数增多,其受力均匀性变差,纤维股之间的共同工作状态也变差所致,这也正是本文研究的主要目的。

18.3 %。原因也是因为不同网格层的张紧程度不完全一致,随层数增多,不同网格层间共同工作性能变差所致。而不同层数网格的极限应变随网格层数

增多略有波动,总体变化趋势并不明显。

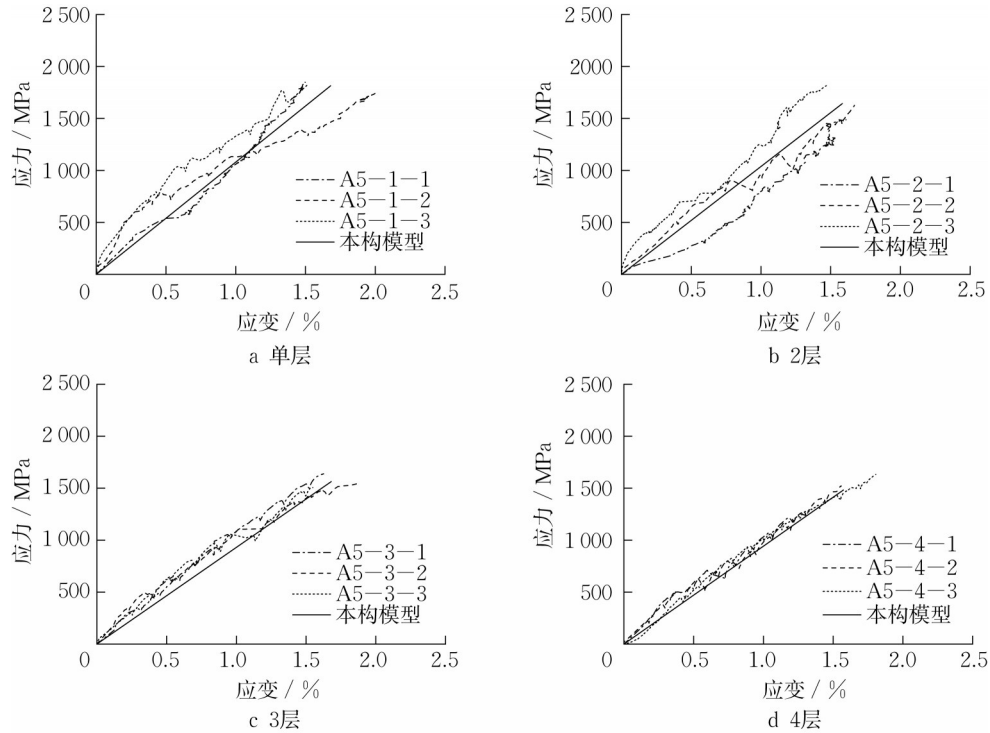


图6 五股试件不同层数纤维网格应力应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of 5-strands fiber mesh with different layers

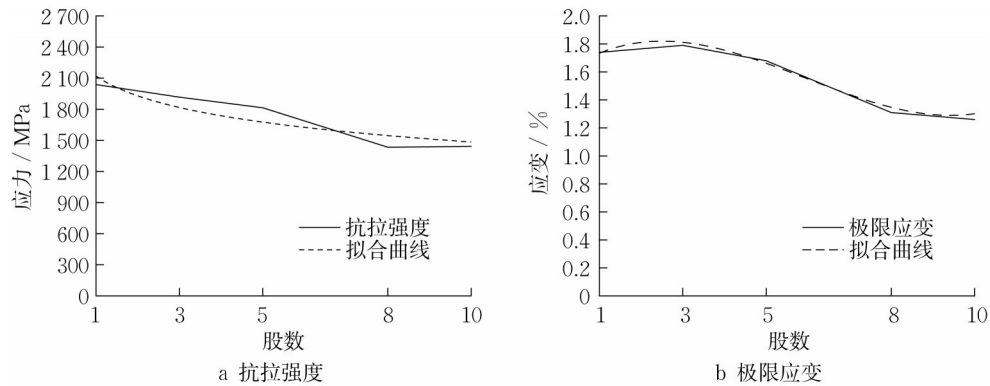


图7 纤维网格力学参数随股数变化关系

Fig.7 The relationship between the mechanical parameters of the fiber mesh and the number of strands

1.4 纤维网拉伸性能本构模型

根据不同股数和不同层数纤维网拉伸试验所得应力应变曲线,令 m 为股数、 n 为层数,以单股单层网络的抗拉强度 σ_{f01} 、极限应变 ϵ_{f01} 为基准,考虑到纤维股数间和网格层数间共同工作性能对抗拉强度和极限应变的影响,引入抗拉强度、极限应变受股数影响系数 α_1 、 α_2 ,以及受层数影响系数 β_1 、 β_2 ,经拟合整理后得^[16]

$$\alpha_1 = -0.13 \times \ln(m) + 1.04 \quad (1)$$

$$\alpha_2 = 0.0018 m^3 - 0.0328 m^2 + 0.13 m + 0.9 \quad (2)$$

$$\beta_1 = -0.13 \ln(n) + 1 \quad (3)$$

$$\beta_2 = -0.0138 n + 1 \quad (4)$$

$$\sigma_f = \epsilon_f \times \frac{\alpha_1 \beta_1 \sigma_{f01}}{\alpha_2 \beta_2 \epsilon_{f01}} \quad (5)$$

式(5)即为纤维网拉伸本构模型,其中 σ_f 和 ϵ_f 分别为纤维网拉伸应力和拉伸应变。使用该模型对不同股数和不同层数纤维网试验结果的拟合直线分别示于图5和图6中,可见,拟合效果良好,基本符合试验情况。

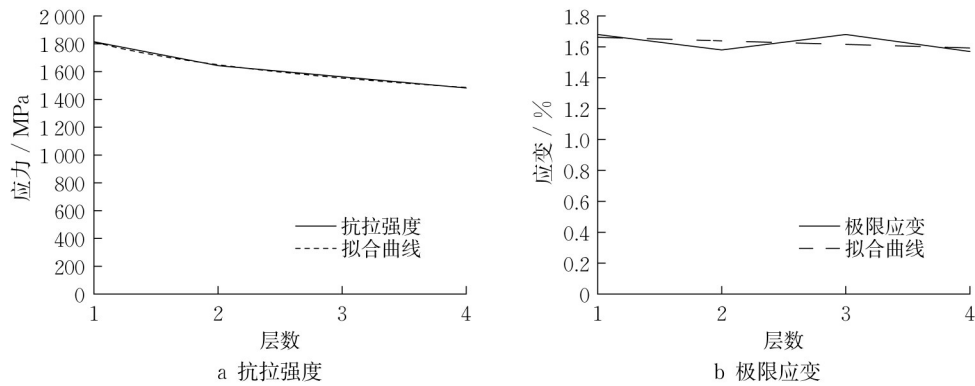


图 8 纤维网格力学参数随层数变化关系

Fig.8 The relationship between the mechanical parameters of the fiber mesh and the number of layers

2 TRC 复合材拉伸性能试验研究

2.1 试验试件

本试验采用的基体混凝土材料为上海环宇建筑工程材料有限公司生产的秀朴-PM40F 聚合物砂浆, 实测在自然环境下养护 28 d 的立方体抗压强度平均值为 34.1 MPa, TRC 复合材拉伸试验时(龄期 98 d)的立方体抗压强度平均值为 38.4 MPa^[14]。

TRC 复合材拉伸试验试件如图 9 所示, 试件长均为 800 mm, 中间试验段长 400 mm(两端为夹持端), 试件宽度和厚度随纤维网格股数和层数而变化。网格层间距和保护层厚度均为 5 mm, 故单层试件总厚 10 mm, 2 层、3 层、4 层试件总厚分别为 15 mm、20 mm、25 mm。试件制作如图 10, 共 8 组, 每组 3 个, 分别进行单股单层、3 股单层、5 股单层、8 股单层、10 股单层和 5 股 2、3、4 层的拉伸试验。

2.2 试验装置与加载测试

试验装置与加载制度同前文。试验过程中采用位移计测试 TRC 试件应变随荷载的变化, 测试段长 200 mm, 位移计布置如图 11a、11b。

2.3 试验结果

图 11 为 TRC 薄板试件不同受力阶段的破坏形态。初裂裂缝一般发生在试件中段(图 11a), 随着荷载继续增大, 试件进入多裂缝开展阶段(图 11b); 继续加载, 裂缝宽度不断增大, 裂缝处伴随出现基体剥离现象(图 11c); 随后, 基体剥离范围沿长度方向不断发展, 最后网格被拉断(图 11d)。

表 2 为 TRC 薄板试件拉伸试验所得开裂应力、抗拉强度和极限应变结果汇总。其中“开裂应力”和“TRC 抗拉强度”为相应荷载除以 TRC 薄板截面积所得, 是 TRC 复合材的名义应力和抗拉强度; 而“网格抗拉强度”为极限荷载除以网格截面积所得, 由于

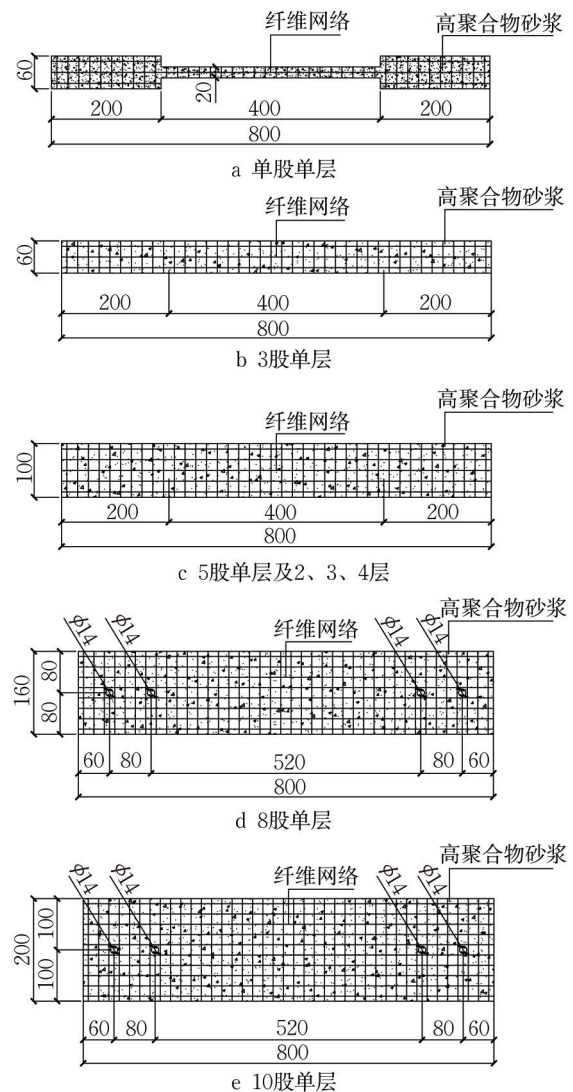


图 9 TRC 复合材拉伸试件

Fig.9 TRC composite tensile test specimen

达到极限承载力时基体材料早已开裂并退出工作, TRC 复合材的抗拉强度实际上就是网格的抗拉强度。对比表 2 和表 1 可以看出, TRC 中的网格抗拉

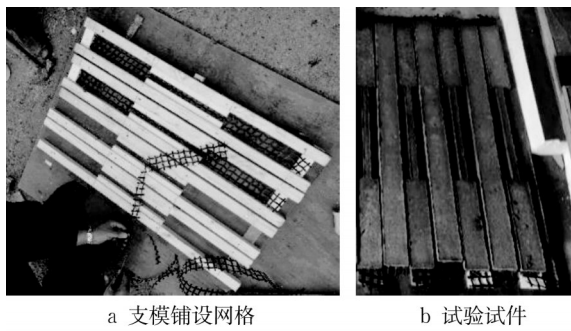


图10 TRC试件制作过程
Fig.10 The pouring process of TRC specimen

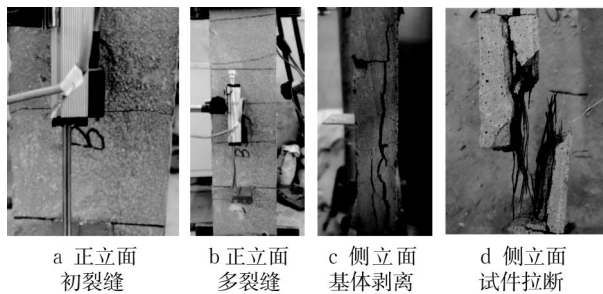


图11 TRC试件拉伸破坏过程
Fig.11 Tensile failure process of TRC specimen

强度明显高于相同条件下(股数、层数)纯网络的抗拉强度,这主要是由于TRC中的砂浆基体为网格提供了较好的共同工作基础,使TRC中的不同纤维股之间能更好地协调受力。

表2 TRC试件拉伸结果一览表

Tab.2 List of tensile results of TRC specimens

试验工况	开裂应力平均值/MPa	TRC抗拉强度平均值/MPa	网格抗拉强度平均值/MPa	极限应变平均值/%
单股单层	2.50	10.07	2287.88	1.36
3股单层	1.77	8.85	2012.63	1.25
5股单层	2.04	8.50	1931.82	1.43
5股2层	1.57	10.31	1757.58	1.14
5股3层	2.61	10.40	1576.26	1.00
5股4层	2.89	11.08	1574.05	1.14
8股单层	1.26	7.71	1752.37	1.35
10股单层	1.75	8.08	1835.61	1.35

试验所得单层不同网格股数的TRC试件应力应变曲线见图12,5股不同网格层数的TRC试件应力应变曲线见图13。如图12~图13所示,随着应力增加,应变不断增大,二者之间不再呈线性关系。

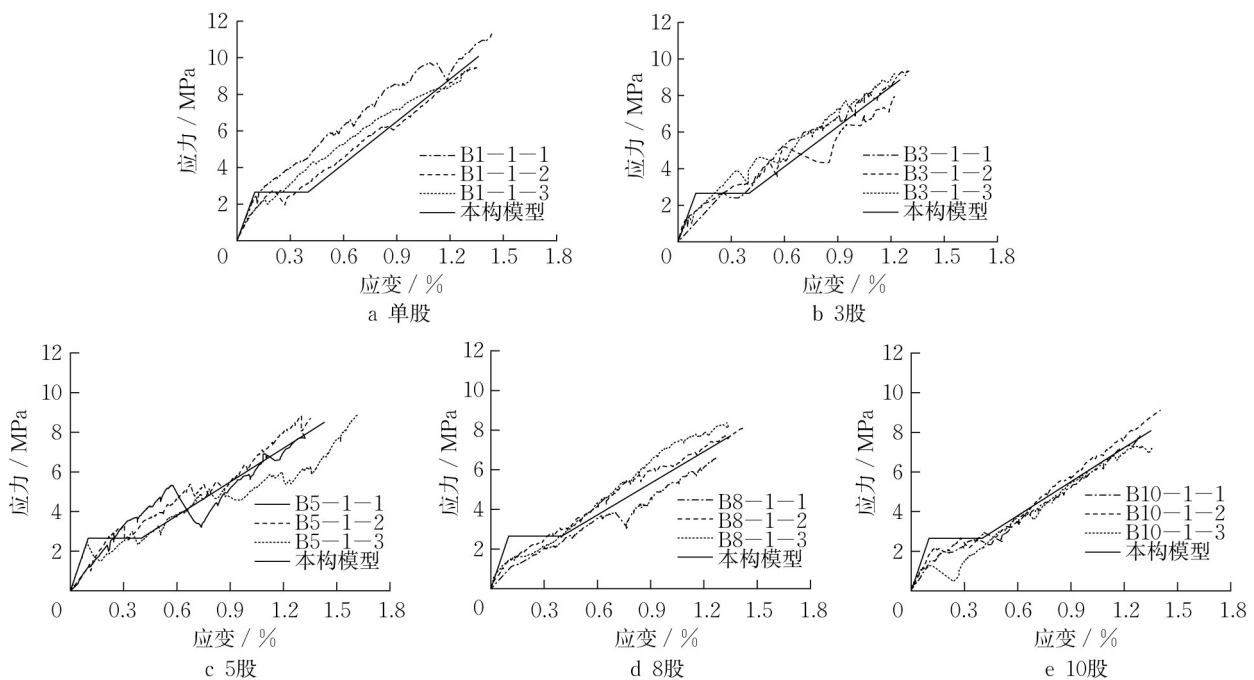


图12 不同股数TRC应力应变曲线

Fig.12 Stress-strain curve of TRC with different strands

图14为TRC抗拉强度和极限应变随纤维股数变化的情况。随着股数的增多,TRC抗拉强度呈下降趋势;当网格股数为8股时,其抗拉强度较单股时下降了19.77%;但与图7a相比,下降幅度明显减小。前者是因为随着股数增多,其受力均匀性变差,

纤维股的共同工作状态也变差所致,后者则是因为TRC中的砂浆基体为网格提供了一定的共同工作基础,使TRC中的不同纤维股之间较纯网格能更好地协调受力。根据图14b,随着股数的增多,TRC的极限应变基本保持在1.2%~1.5%之间,无明显

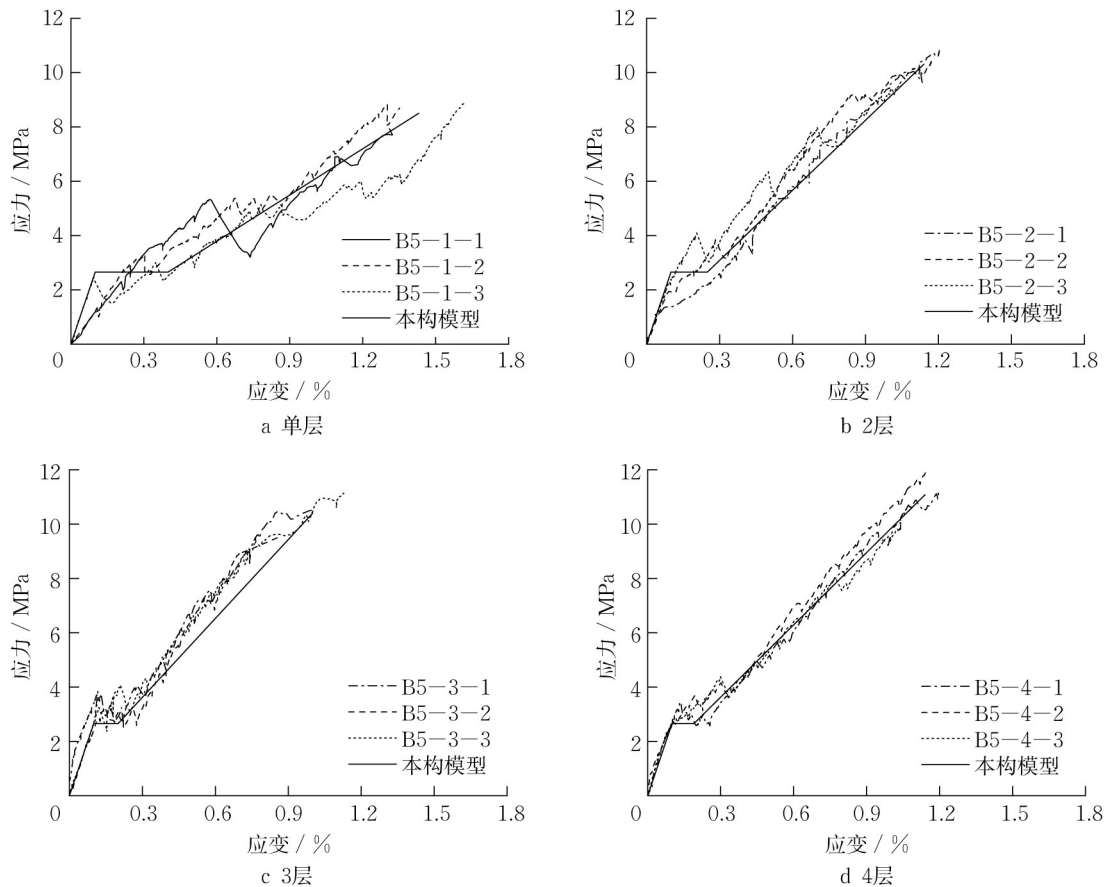


图13 5股试件不同层数纤维网格应力应变曲线

Fig.13 Stress-strain curve of 5- strands TRC with different layers

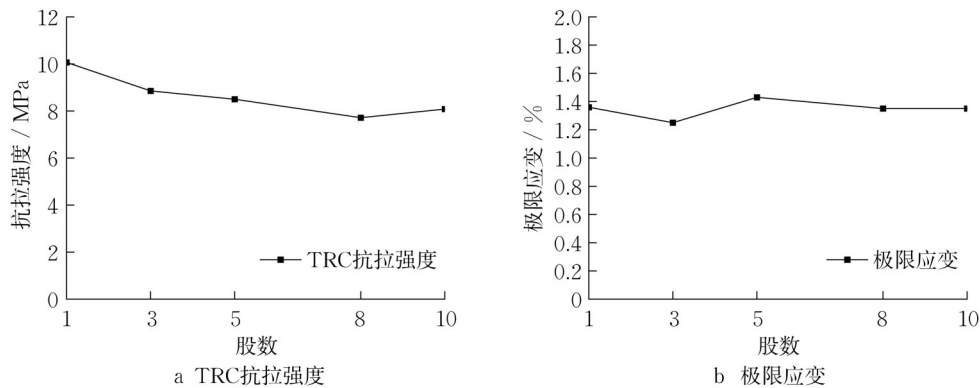


图14 TRC拉伸力学参数随股数变化关系

Fig.14 TRC tensile mechanical parameters change with the number of strands

变化趋势。

图15为TRC抗拉强度、TRC中纤维网格抗拉强度和TRC极限应变随网格层数的变化情况。随着层数不断增多,TRC抗拉强度呈上升趋势,4层网格的TRC较单层时约增大23.29%;TRC中网格的抗拉强度呈下降趋势,4层网格较单层时约下降18.52%。前者是因为随着网格增多,增大了TRC的含筋率,使其抗拉强度提高;后者则是因为网格层数越多,网格层间的共

同工作性能越差,导致其抗拉强度越低。但相比于图8a的纯网格情况,网格层数对抗拉强度的影响幅度基本相同,说明TRC中的基体砂浆对不同网格层间提供的共同工作性能不明显。

根据图15c,随着网格层数的增多,TRC的极限应变先是下降,超过3层后则是增大。极限应变反映了TRC达到极限承载力时的变形大小,随着网格层数增多,TRC的含筋率增大,TRC受拉时网格的

贡献也增大,而由于纤维网络的受拉弹性模型明显高于基体砂浆材料,因此,其极限应变也随之下降;至于大于3层后TRC极限应变反而增大,主要是由

于随着网格层数增多,网格间共同工作性能更差,导致受力时网格纤维拉断过程变长,应变增大。

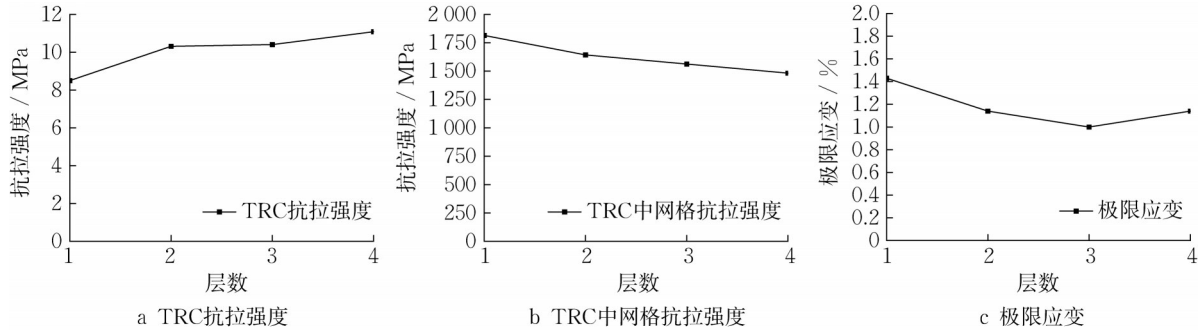


图15 TRC拉伸力学参数随层数变化关系

Fig.15 TRC tensile mechanical parameters change with the number of layers

2.4 TRC拉伸本构模型

基于ACK理论(Aveston-Cooper-Kelly)模拟脆性复合材料的多裂缝特征已经相当成熟^[6],本文使用ACK理论推导TRC拉伸本构模型,并做以下假定:①拉伸过程中TRC截面满足平截面假定;②基体与纤维束之间的平均黏结应力为常数;③纤维束仅受外荷载方向的力,不考虑其横向收缩变形。基于此,ACK理论可将TRC单轴拉伸应力—应变曲线简化为三段直线,如图16所示。

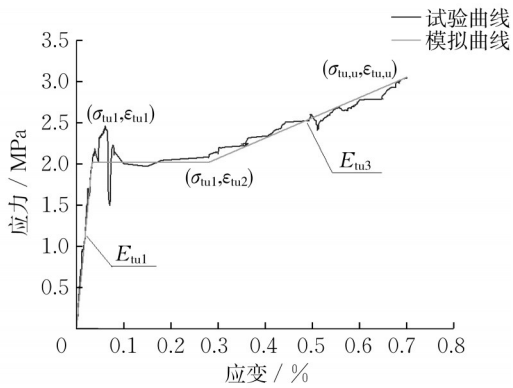


图16 基于ACK理论的TRC受拉应力应变曲线

Fig.16 TRC tensile stress-strain curve based on ACK theory

图16中 σ_{tu1} 和 ϵ_{tu1} 分别为第一折点应力和应变,即开裂应力和开裂应变; E_{tu1} 为TRC薄板试件第一阶段的弹性模量; ϵ_{tu2} 为第二阶段结束时的应变,这一阶段假定为水平段,试件的应力无变化; $\sigma_{tu,u}$ 为极限应力, $\epsilon_{tu,u}$ 为极限应变, E_{tu3} 为TRC薄板试件第三阶段的弹性模量,即稳定裂缝阶段的弹性模量。

根据ACK理论,TRC复合材料拉伸试件第一阶

段符合复合材料混合定律,此时复合材料的刚度与纤维和基体的弹性模量及体积率有关^[16],即

$$E_{tu1} = E_f V_f + E_m V_m \quad (6)$$

式中: E_{tu1} 为TRC复合材料的弹性模量, E_m 和 V_m 分别是基体材料的弹性模量和体积率, E_f 和 V_f 分别为纤维网络的弹性模量和体积率。

第一阶段结束后,试件会达到开裂应力 σ_{tu1} ,其主要受基材的极限抗拉强度 σ_{mu} 控制:

$$\sigma_{tu1} = \frac{E_{tu1} \sigma_{mu}}{E_m} \quad (7)$$

当基体混凝土开裂后,未开裂部分通过纤维网格与基体材料间的黏结力将荷载由纤维网格传递给基体材料,其有效黏结长度 δ 可根据应力平衡得到,即

$$\delta = \frac{A_m \sigma_{mu}}{n C_f \tau} \quad (8)$$

式中: A_m 为基体体积; C_f 为单股径向纤维周长; n 为纤维总股数; τ 为纤维束和基体混凝土之间的平均黏结应力。在多裂缝阶段,裂缝的间距在 δ 和 2δ 之间。根据文献^[7],裂缝间距的平均值可取为1.337倍的 δ ,因此,第二阶段结束时的应变 ϵ_{tu2} 为

$$\epsilon_{tu2} = \frac{\sigma_{mu}}{E_m} + 1.337 \frac{A_m \sigma_{mu}}{n E_f C_f} \quad (9)$$

当试件应变达到 ϵ_{tu2} 时,多裂缝阶段结束,试件开始进入第三阶段即稳定裂缝阶段,在此阶段主要由纤维束承担应力,试件的刚度计算如下:

$$E_{tu3} = E_f V_f \quad (10)$$

当纤维网格完全断裂时,TRC复合材的极限应变取决于纤维网格材料力学性能,其表达式如下:

$$\epsilon_{tu,u} = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (11)$$

所以,TRC复合材拉伸本构模型表达式如下:

$$\sigma_{tu} = \begin{cases} E_{tu1}\epsilon & (0 < \epsilon < \epsilon_{tu1}) \\ E_{tu1}\epsilon_{tu1} & (\epsilon_{tu1} < \epsilon < \epsilon_{tu2}) \\ E_{tu1}\epsilon_{tu1} + E_f V_f (\epsilon - \epsilon_{tu2}) & (\epsilon_{tu2} < \epsilon < \epsilon_{tu,u}) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)的模型中,纤维网格相关力学参数按纤维网格拉伸试验中结果采用,基体混凝土弹性模量 E_m 参考课题组先前试验结果^[12]取25.3 GPa,基体混凝土抗拉强度 σ_{mu} 根据文献^[15],可通过抗压立方体抗压强度进行换算,取

$$\sigma_{mu} = 0.407 f_{cu}^{0.51} = 2.62 \text{ MPa} \quad (13)$$

式(12)对不同股数试件和不同层数试件进行拟合的结果见图12和图13,各工况下拟合情况基本良好。

3 TRC-混凝土黏结滑移性能试验研究

3.1 试验试件

试验采用的基体材料和碳纤维网格同前述试验。

为研究TRC复合材与被加固的混凝土构件表面间的黏结滑移性能,本文采用图17a所示中心穿有同一根 $\Phi 20$ 钢筋的成对混凝土试块(整体浇筑后再切开)进行拉伸剪切试验。混凝土试块尺寸 $300 \times 150 \times 150 \text{ mm}$,实测28 d标准立方体试块的抗压强度平均值为36.5 MPa,黏结滑移试验时(龄期440 d)立方体试块抗压强度平均值为41.1 MPa。TRC施工前先对混凝土试块表面进行凿毛处理(图17c),实测平均凿毛深度为3.68 mm,经对试块周边进行保护处理,有效黏结范围为 $126 \times 128 \text{ mm}$ (图17d)。为确保试验时发生黏结面破坏(而不是网格被拉断),试验前经切割后预留的每侧有效黏结长度为30 mm。TRC内网格层间距和保护层厚度均为5 mm,试件制作情况如图18所示,为防止TRC层产生收缩裂缝,基体砂浆中掺加了一定量的膨胀剂和一定比例的短纤维。试验试件共4组,每组3个,分别进行单层、2层、3层、4层网格的TRC与混凝土黏结滑移试验。

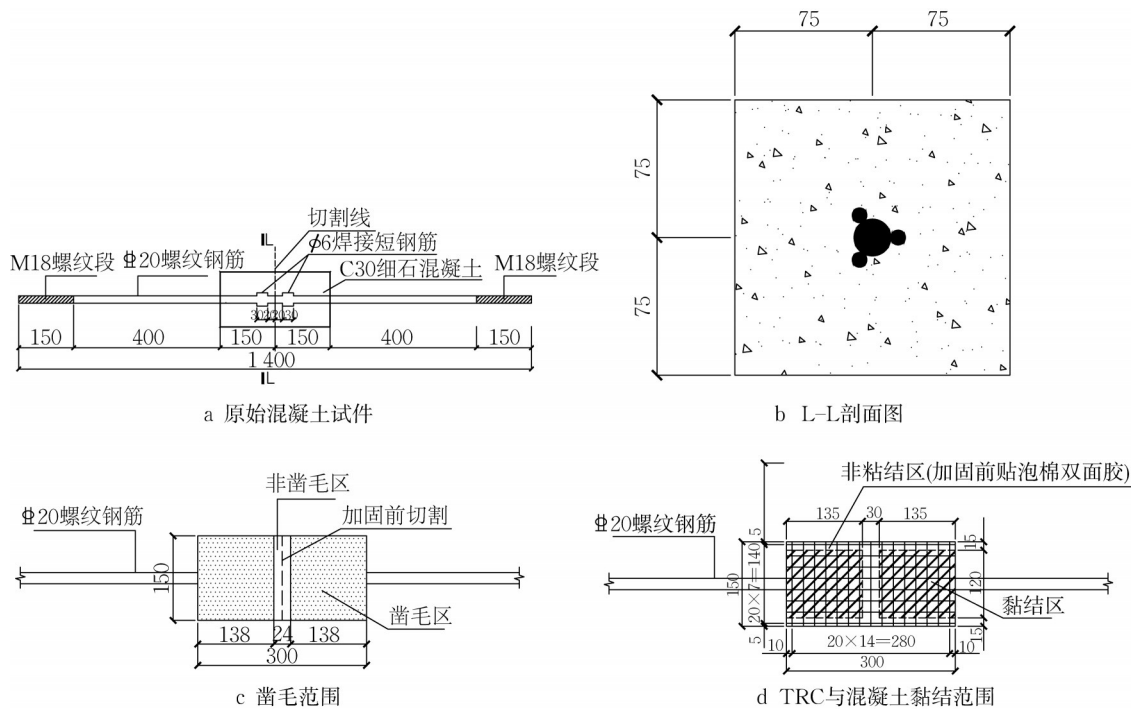


图17 TRC-混凝土黏结滑移试件(单位:mm)

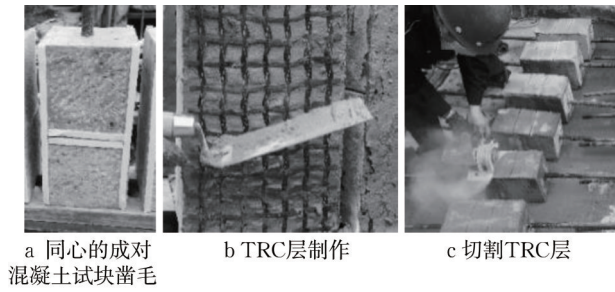
Fig.17 TRC-concrete bond-slip specimen(unit: mm)

3.2 试验装置与加载测试

试验装置与加载同前文,位移测量采数字图像相关法(digital image correlation,简称DIC技术),通过定时拍照并处理照片中同一个点相对位置的变化来计算位移变化,如图19所示。同时,还在试件上、下两端安装了位移计以测量试件总变形量。

3.3 试验结果

TRC与混凝土间的黏结滑移试件在外荷载作用下主要产生了3种破坏形态:基体与纤维网格之间的剥离破坏(I型)、TRC与混凝土间黏结面破坏(II_a 型)和黏结面处混凝土破坏(II_b 型),如图20所示。表3为TRC-混凝土黏结滑移试验结果汇总,试验所得不同加



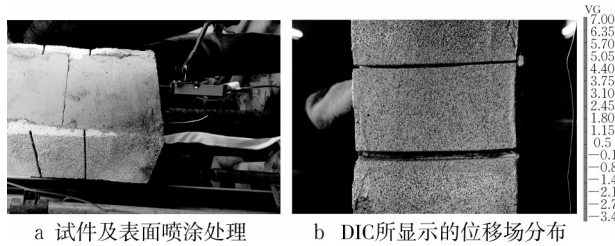
a 同心的成对混凝土试块凿毛

b TRC层制作

c 切割TRC层

图18 TRC-混凝土黏结滑移试件制作过程

Fig.18 The process of making TRC-concrete bond-slip specimens



a 试件及表面喷涂处理

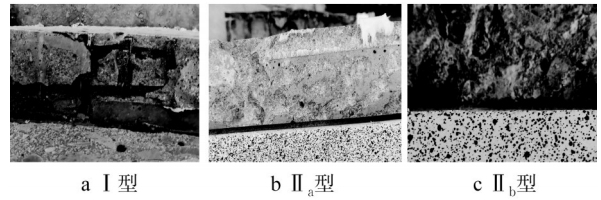
b DIC所显示的位移场分布

图19 TRC-混凝土黏结滑移试件位移测试

Fig.19 Displacement measurement of TRC-concrete bond-slip specimens

固层数的各试件黏结滑移曲线如图 21 所示,二者基本呈线性关系。单层和2层网格时,破坏形态以I型为主,3层及以上时则主要发生II_a和II_b型破坏,说明随着网

格层数增加,TRC本身抗拉强度提高,相对而言TRC与混凝土间的黏结面变弱。



a I型

b II_a型

c II_b型

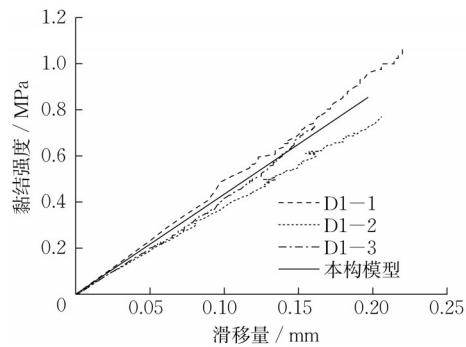
图20 TRC-混凝土黏结滑移破坏形态

Fig.20 TRC-Concrete bond-slip failure mode

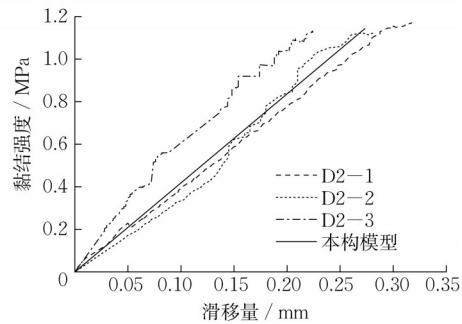
表3 TRC-混凝土黏结滑移试验结果一览表

Tab.3 List of TRC-concrete bond-slip test results

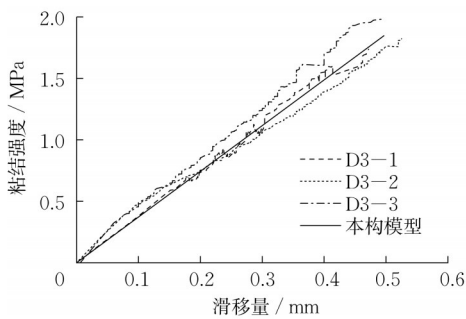
网格层数	黏结长度/mm	黏结强度/MPa	极限滑移量/mm	破坏形态
单层	26	1.06	0.22	I型
	26	0.77	0.21	II _a 型
	27	0.73	0.16	I型
2层	27	1.17	0.32	II _a 型
	28	1.13	0.28	I型
3层	26	1.13	0.22	I型
	27	1.74	0.47	II _b 型
	27	1.82	0.52	II _a 型
4层	27	1.98	0.50	II _b 型
	27	2.18	0.58	II _a 型
	26	2.35	0.76	II _b 型
	27	2.44	0.71	II _b 型



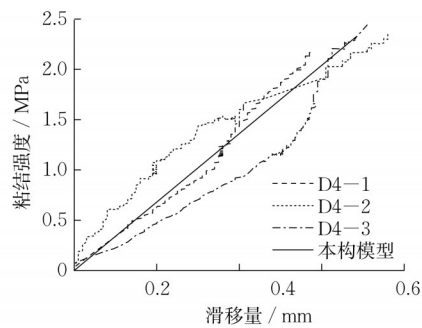
a 单层



b 2层



c 3层



d 4层

图21 不同加固层数TRC-混凝土黏结滑移曲线

Fig.21 TRC-concrete bond-slip curve for different reinforcement layers

图 22 为 TRC-混凝土黏结强度和极限滑移量随网格层数的变化情况。随着网格层数增多,黏结强度和极限滑移量均呈上升趋势,4层网格时的黏结强度相较于单层网格增长了 63%,极限滑移量增长了 71%。TRC-混凝土间的黏结滑移包括两部分:一是 TRC 内部纤维网格与基体材料间的黏结滑移;二是 TRC 与混凝土界面间的黏结滑移。其中黏结强度受二者中较弱者控制,随着网格层数增多,TRC 抗拉强度不断提高,TRC 中网格与基体间的抗剥离能力也相应提高,界面行为则表现为由 I 型向 II 型转化。理论上,TRC 与混

凝土界面的黏结强度主要与基体材料和混凝土材料强度及界面粗糙度有关,因此可以预测,网格层数达到一定值后,界面黏结强度应该趋于稳定,但本文试验工况有限,未获得这一网格层数值,有待后续进一步研究。而 TRC-混凝土间的极限滑移量是由纤维网格与基体材料间的滑移量和 TRC 与混凝土间的滑移量两部分组成的,其中前者的贡献更大,因此,随着网格层数增多,网格与基体材料间的滑移量增大,表现为图 22b 所示的 TRC-混凝土间的极限滑移量也不断增大。

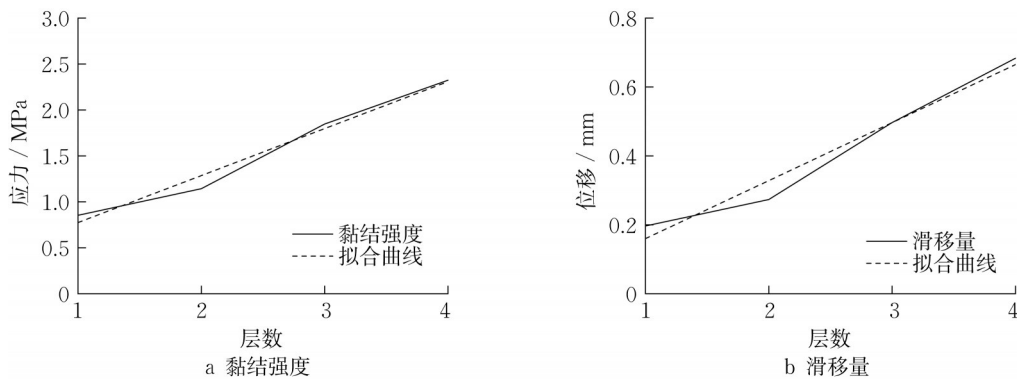


图 22 黏结强度和滑移量随加固层数变化关系

Fig.22 The relationship between bond-slip parameters and the number of reinforcement layers

3.4 TRC-混凝土黏结滑移本构模型

根据不同层数纤维网格试件黏结滑移试验所得黏结应力-相对滑移量曲线(见图 21),令 n 为层数,以单层网格时的黏结强度 τ_{m1} 、极限滑移量 s_{m1} 为基准进行无量纲化,同时考虑到网格层数对黏结强度和极限滑移量的影响,引入黏结强度、极限滑移量受层数影响系数 b_1 、 b_2 可得^[16]

$$b_1 = 0.6n + 0.31 \quad (14)$$

$$b_2 = 0.841n - 0.0042 \quad (15)$$

$$\tau = s \times \frac{b_1 \tau_{m1}}{b_2 s_{m1}} \quad (16)$$

式(16)即为 TRC-混凝土黏结滑移本构模型,用其对不同网格层数的 TRC 进行拟合的结果示于图 21 中,可以看出拟合曲线与试验结果基本吻合。

4 结论

本文通过不同股数和不同层数纤维网格拉伸试验、不同股数和不同层数纤维网络的 TRC 复合材料拉伸试验、不同层数纤维网络的 TRC-混凝土黏结滑移试验,研究了纤维股数和网格层数对抗拉性能和界面黏结性能的影响,主要结论和成果如下:

(1)随着纤维股数和网格层数的增多,纤维网络的抗拉强度均呈持续下降的趋势,主要是因为不同纤维股和不同网格层间不能很好的共同工作所致,而且纤维股数和网格层数越多,共同工作性能越差。同样,随着纤维股数和网格层数的增多,TRC 复合材料的抗拉强度也呈持续下降的趋势,但由于基体砂浆材料的存在,不同纤维股和不同网格层间的共同工作性能得到改善,表现为 TRC 抗拉强度的下降幅度明显低于纤维网格,TRC 中纤维网络的抗拉强度也明显高于纯网格。

(2)随着网格层数增多,TRC-混凝土黏结强度和极限滑移量均呈明显上升趋势,4层网格时黏结强度和极限滑移量相较于单层网格分别增长了 63% 和 71%。TRC-混凝土黏结破坏形态基本有两种:TRC 内部基体与纤维网格之间的剥离破坏(I型)和 TRC 与混凝土间的黏结面破坏(II型),随着网格层数增多,TRC 中网格与基体间的抗剥离能力相应提高,界面行为表现为由 I 型向 II 型转化,极限滑移量也相应增大。

(3)通过试验研究,建立了随纤维股数和网格层数变化的纤维网格拉伸本构模型、TRC 复合材料受拉本构模型和 TRC-混凝土黏结滑移本构模型,为后续研究和工程应用提供了理论依据。

作者贡献声明:

胡克旭:制定研究计划,试验方案设计、参与试验过程和试验结果分析;

蓝玥:参与试验过程,试验结果分析及论文撰写;

李晓:试验试件设计与制作,负责试验和试验数据处理、试验结果分析及理论分析。

参考文献:

- [1] 艾珊霞,尹世平,徐世焯.纤维编织网增强混凝土的研究进展及工程应用[J].土木工程学报,2015,48(1):27.
AI Shanxia, YIN Shiping, XU Shilang. A review on the development of research and application of textile reinforced concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(1):27.
- [2] 尹世平,徐世焯.纤维编织网增强混凝土的拉伸力学模型[J].复合材料学报,2012,29(5):222.
YIN Shiping, XU Shilang. Tensile mechanics model of fiber woven mesh reinforced concrete [J]. Chinese Journal of Composites, 2012,29(5):222.
- [3] 江佳斐,豆香香,隋凯,等.玄武岩纤维网格拉伸性能试验研究[J].结构工程师,2018,34(1):76.
JIANG Jiafei, DOU Xiangxiang, SUI Kai, *et al.* Experimental study on tensile properties of basalt fiber mesh [J]. Structural Engineer, 2018,34(1):76.
- [4] CONTAMINE R, A.S. Larbi, HAMELIN P. Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2011,528(29/30):8589.
- [5] HAUBLER-COMBE U, HARTIG J. Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2007,29(4):279.
- [6] LARRINAGA P, CHASTRE C, BISCAIA H C, *et al.* Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress [J]. Materials & Design, 2014,55(6):66.
- [7] CUYPERS H. A stochastic cracking theory for the introduction of matrix multiple cracking in textile reinforced concrete under tensile loading[C]// ICTRC'2006-1st International RILEM Conference on Textile Reinforced. Nordrhein Westfalen: RILEM Publications SARL, 2006:193-202.
- [8] HARTIG J, HAUBLER C U, SCHICKTANZ K. Influence of bond properties on the tensile behaviour of textile reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2008,30(10):898.
- [9] ORTLEPP R, CURBACH M. Bonding behavior of textile reinforced concrete strengthening[C]// International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. Bagnaux: RILEM Publications SARL, 2003:507-527.
- [10] ORTLEPP R, ORTLEPP S, CURBACH M. Stress transfer in the bond joint of subsequently applied textile reinforced concrete strengthening [C]// Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concretes. Bagnaux: RILEM Publications SARL, 2004: 1483-1494.
- [11] 王斌.高温中及高温后CTRC-混凝土界面性能研究[D].上海:同济大学,2019.
WANG Bin. Researches on the interfacial behavior of CTCR-concrete in elevated temperatures and after elevated temperatures [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [12] 刘清宇.纤维网格增强混凝土(TRC)材料高温性能试验研究[D].上海:同济大学,2020.
LIU Qingyu. Experimental study on high temperature performance of textile reinforced concrete (TRC) [D]. Shanghai: Tongji University, 2020.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.碳纤维复丝拉伸性能试验方法:GB/T 3362-2017 [S].北京:中国标准出版社,2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test method for tensile properties of carbon fiber multifilament:GB/T 3362-2017 [S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [14] 中华人民共和国建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T50081-2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test methods of ordinary concrete mechanical properties: GB/T50081-2002 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2003.
- [15] 陈萌,刘立新,彭少民.预拌混凝土各龄期抗拉和抗压强度换算关系试验研究[J].建筑结构,2010,40(2):109.
CHEN Meng, LIU Lixin, PENG Shaomin. Experimental study on the conversion relationship between tensile and compressive strength of ready-mixed concrete at various ages [J]. Building Structure, 2010, 40(2):109.
- [16] 李晓. TRC复合材力学性能试验研究及TRC加固混凝土梁受力性能分析[D].上海:同济大学,2021.
LI Yao, Experimental study on the mechanical properties of TRC composite materials and analysis of the mechanical properties of TRC reinforced concrete beams [D]. Shanghai: Tongji University, 2021.