

提高纤维编织网与砂浆粘结性能的实用方法

李庆华, 徐世烺*, 李赫

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 纤维编织网增强混凝土结构(简称 TRC)的力学性能与纤维编织网和基体之间的粘结状况密切相关. 采用环氧树脂浸渍纤维编织网并在其表面粘砂的方法来提高粘结强度, 控制砂浆基体的开裂. 通过四点弯曲试验和拉拔试验考察了不同粘砂粒径对 TRC 粘结性能的影响. 试验结果表明, 采用环氧树脂浸渍纤维编织网并在其表面粘砂的方法能够提高纤维编织网与基体之间的摩擦力, 甚至产生咬合效应. 因此可明显提高 TRC 的弯曲开裂荷载, 增加裂缝数量, 改善纤维编织网与砂浆之间的粘结性能. 其中粘砂粒径为 0.15~0.30 mm 改善效果最为显著.

关键词: 碳纤维编织网; 粘砂; 粘结性能; 裂缝

中图分类号: TU383 **文献标志码:** A

0 引言

1991 年在法国召开的第二届混凝土耐久性会议上, Mehta 指出:“当前世界混凝土破坏的主要原因为钢筋锈蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境下的物理化学作用.”^[1] 钢筋腐蚀被认为是混凝土结构破坏的第一因素. 1975 年, 美国标准局(NBS)的调查表明, 美国全年因混凝土钢筋锈蚀造成的损失为近 300 亿美元^[2], 每年因腐蚀而支出的维修费用高达 1 260 亿美元^[3]. 1980 年, 前东德柏林会议大厦由于钢筋锈蚀造成建筑西南角坍塌, 该建筑仅使用了 23 年^[4,5]. 因钢筋锈蚀而导致的经济损失是非常巨大的. 一些国家的腐蚀损失, 平均可占国民经济总产值的 2%~4%; 其中, 被认为与钢筋腐蚀有关者可占 40%.

为避免钢筋腐蚀, 混凝土要具有一定的保护层厚度, 这样不仅浪费材料而且导致结构笨重. 为节省材料并减轻自重, 一些不腐蚀的短切纤维材料发挥了优势, 如高抗拉强度的碳纤维、玻璃纤维、芳族聚酰胺纤维以及高韧性的聚乙烯醇纤维和聚乙烯纤维^[6,7]. 尽管短切纤维能够提高基体的抗拉强度同时抑制裂缝的扩展, 但因其其在混凝土中乱向分布, 增强效率大为降低. 后来发现如果将纤维粗纱沿混凝土结构的应力主向连续布置, 那么增强效果就会大大提高^[8,9]. 而后, 人们就将

连续纤维粗纱编织成了平面或立体的网状织物, 即纤维编织网. 常用的纤维编织网有碳纤维编织网、玻璃纤维编织网和 Aramid 纤维编织网. 利用纤维编织网代替钢筋来增强混凝土则可以限制混凝土的开裂, 使混凝土的裂缝变得更小、更密, 可以获得高承载力、优良韧性、不腐蚀、防止器械磁化的建筑结构. 通过组合许多简单的预制轻质 TRC 构件, 还可以构成大跨度拱、壳等复杂结构. 纤维编织网增强混凝土结构性能的发挥依赖于它们能否形成良好的粘结^[10,11]. 因此, 提高纤维编织网和混凝土的粘结就成为至关重要的问题.

已有研究表明^[12,13], 用环氧树脂浸渍纤维编织网可有效改善纤维编织网和基体之间的粘结性能. 本文采用环氧树脂浸渍纤维编织网并在其表面粘不同粒径的砂以增大纤维编织网和砂浆基体的摩擦粘结, 提高粘结强度, 控制基体的开裂; 并考察不同粘砂粒径对 TRC 力学性能的影响.

1 试验材料及试件制备

1.1 试验材料

本试验采用 PI 42.5R 水泥、I 级粉煤灰、硅粉、石英砂、水、超塑化剂. 基体 28 d 抗压强度 88 MPa, 弯曲强度 13.2 MPa.

试验所用的碳纤维编织网采用经纬碳纤维束

平织结构,网格尺寸 20 mm×20 mm,经向粗纱特性如表 1 所示.其中纤维型号 12k 表示每根纤维束包括 12 000 根纤维原丝,拉伸强度、弹性模量和断裂伸长率都是指纤维原丝的性能.本次试验所制备试件为单向板,故极限承载力主要由经向碳纤维束承担.参考国内规范 GB/T 3354—1999《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》和日本的相关试验方法,并根据纤维编织网材料的实际宽度和厚度,确定了本次试验所用纤维编织网力学性能测试方法及试件形式,具体见文献[14].纤维编织网力学性能测试结果如表 2 所示.

表 1 碳纤维编织网参数
Tab.1 Properties of carbon fiber textile

参数	参数值
纤维类型	T700S(碳纤维)
纤维型号	12k
拉伸强度/MPa	4 900
拉伸模量/GPa	230
断裂伸长/%	2.1
单位长度质量/Tex	800
密度/(g·cm ⁻³)	1.80

表 2 经向碳纤维束力学性能
Tab.2 Mechanical properties of warp carbon yarn

参数	参数值
纤维类型	T700S(碳纤维)
纤维型号	12k
抗拉强度/MPa	3 518
弹性模量/GPa	231.5
极限应变	0.015 2
理论面积/mm ²	0.44
单位长度质量/Tex	800
密度/(g·cm ⁻³)	1.80

文献[12、13]指出:由于构成纤维网的经、纬向纤维束包含大量纤维单丝,混凝土不能完全浸

入纤维束内部,只有最外面的纤维粗纱能与混凝土形成较好粘结并通过摩擦传力于里面的粗纱,这就使得纤维束内部纤维丝与混凝土的黏结状况远比外部纤维丝差,减弱了纤维编织网和混凝土的粘结能力.为转变这种状况,纤维编织网埋入混凝土前用环氧树脂浸渍,它能够渗透到纤维束内部粗纱之间,凝固以后将把粗纱结成一体,明显改善纤维束和混凝土之间的粘结.本次试验为了提高纤维编织网与基体之间的粘结性能,在环氧树脂凝固之前将不同粒径的细砂分别均匀撒于其上.所用砂粒径分别为 0.15~0.30 mm、0.30~0.60 mm、0.60~1.20 mm,待环氧树脂凝固后细砂就粘结于纤维编织网表面(如图 1 所示),共同受力.

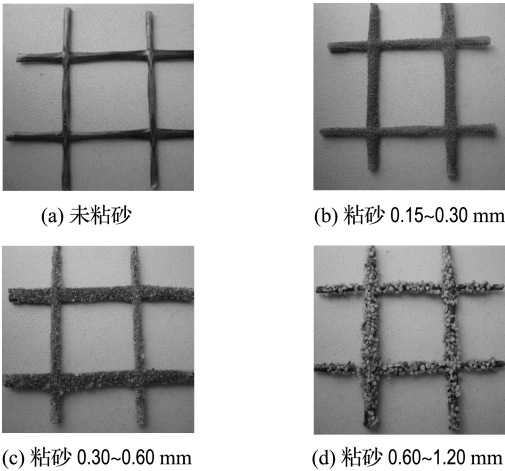


图 1 纤维网表面粘砂示意图
Fig.1 Sketches of textiles coated with sands of different grain sizes

1.2 试验方案

本次试验主要考察了粘砂粒径对纤维编织网增强砂浆粘结性能的影响,试验方案如表 3 所示.

表 3 试验方案
Tab.3 Testing program

基体类型	编号	提高粘结方式	水胶比	基体抗压强度/MPa	基体抗弯强度/MPa	基体弹性模量/GPa
砂浆	1-T1MS0	环氧树脂浸渍	0.38	88	13.2	37.2
砂浆	2-T1MS30	环氧树脂+0.15~0.30 mm 砂	0.38	88	13.2	37.2
砂浆	3-T1MS60	环氧树脂+0.30~0.60 mm 砂	0.38	88	13.2	37.2
砂浆	4-T1MS120	环氧树脂+0.60~1.20 mm 砂	0.38	88	13.2	37.2

1.3 试件制备

制作试件之前要先对纤维编织网进行环氧树脂浸渍处理,在环氧树脂未干之前洒上不同粒径的细砂,待环氧树脂彻底干透且砂与纤维网凝结成一体后方可使用.先按设计好的配比在搅拌机内放入水泥、粉煤灰、砂、硅粉,搅拌 3~5 min,然

后加水、减水剂继续搅拌.将厚度为 5 mm 的砂浆层置于模具中,抹平,然后将经表面处理的纤维织物放于其上,最后浇筑 5 mm 厚的砂浆层并用专门的振捣器轻微振捣.24 h 拆模,养护 27 d 后锯出试验所用试件(如图 2).弯曲试验试件尺寸为 400 mm×100 mm×10 mm,拉拔试验试件尺寸

为 140 mm×60 mm×10 mm. 切割时注意尽量保证经向纤维束与试件边缘平行, 且经向纤维束不受损坏. 拉拔试件颈部要保留一根完整的纤维束,

不能受到破坏, 而且该纤维束要处于试件的正中间; 纤维埋长部分也要保留一根纬向纤维束, 尽量使其处于埋长部分的中部.

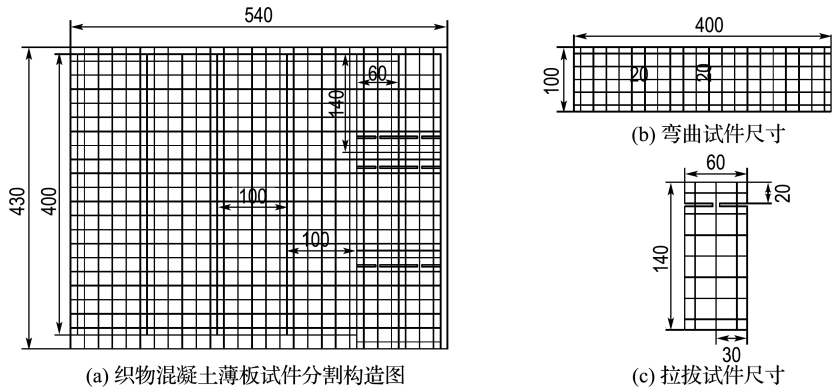


图 2 试件尺寸
Fig. 2 Dimensions of specimens

2 试验装置及过程

2.1 四点弯曲试验

采用 100 t 万能试验机进行加载, 如图 3 所示布置. 荷载 P 由荷载传感器测定, 跨中挠度由 LVDT 测定. 荷载传感器和 LVDT 通过数据采集系统连接在电脑上, 直接输出荷载位移曲线. 加载由位移控制, 速率 2 mm/min.

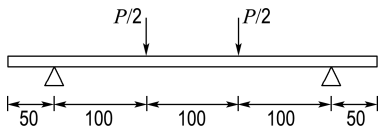


图 3 四点弯曲试验装置

Fig. 3 Schematic test setup for four-point bending test

2.2 拉拔试验

采用 30 t 万能试验机进行加载, 装置如图 4, 加载速率为 1 mm/min.

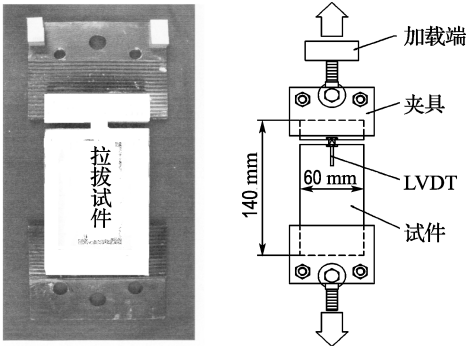


图 4 拉拔试验装置

Fig. 4 Schematic test setup for pull out test

3 试验结果

3.1 四点弯曲试验

这些试件最终破坏大都是因纤维拉断而引起. 试验过程中能够不断听到纤维丝断裂的声音, 可知纤维束并不是同时破坏. 试验结束后从卸下的板的裂缝看去, 有的纤维束彻底拉断, 有的仅有些外部纤维丝断裂, 整个纤维束仍然连通. 由于纤维束破坏不同步, 承载力必然得以弱化.

3.1.1 荷载-跨中位移曲线 各组试件试验结果如图 5 所示, 其中横坐标为所测跨中位移 f ; 左侧纵坐标为荷载 P ; 右侧为纯弯段的等效弹性弯曲应力 σ , 是假定断面未开裂状态, 根据弯曲应力计算公式得出.

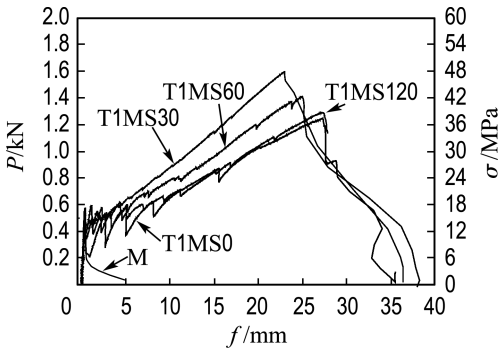


图 5 弯曲试验荷载-跨中位移曲线

Fig. 5 Plots of load vs. mid-span deflection

其中第 4 组弯曲试件 4-T1MS120 由于切割的失误, 一束纤维处于试件边缘, 有所破坏, 使得试件内受力筋减少, 极限承载力必然降低, 不可用

来与其他组值比较.

基体中加入纤维网,在开裂后承载力仍持续上升,极限承载力与砂浆基体相比成倍增长.粘上不同粒径的砂后,与仅经环氧树脂浸渍的试件相比,开裂荷载仅第 3 组有略微的提高,其余两组试件均有所下降.相同跨中挠度情况下,各组粘砂试件的承载力均高于未粘砂试件.

对于极限承载力,与未粘砂试件相比,T1MS30 和 T1MS60 的试件提高非常显著,分别提高了 28%和 13%;而 T1MS120 虽有一束纤维受损,其极限承载力仍高于未粘砂的试件.在经环氧树脂浸渍的纤维网表面粘不同粒径的砂均有效

控制了试件的极限变形量,尤其是 T1MS30 变形量比 T1MS0 减小了 4.4 mm.

仅经环氧树脂浸渍的试件在开裂的瞬间,荷载位移曲线振动幅度非常大,对应的承载力下降较多,试件表面裂缝较宽.粘上不同粒径的细砂后,有效地控制了基体的开裂,其中 T1MS30 效果最为显著,试验曲线振幅小,对应承载力下降较小,试验过程中试件出现的裂缝较为细密.

3.1.2 开裂和极限状态 开裂和极限状态荷载、挠度值均可直接从荷载-位移曲线上获得,表 4 中均为各组试件的平均值.

表 4 开裂与极限状态荷载、挠度值
Tab. 4 Load and deflection in cracking and ultimate states

编号	开裂荷载/kN	开裂强度/MPa	开裂挠度/mm	极限荷载/kN	极限强度/MPa	极限挠度/mm
1-T1MS0	0.565	16.95	0.364	1.250	37.50	27.30
2-T1MS30	0.470	14.1	0.460	1.596	47.88	22.95
3-T1MS60	0.575	17.25	0.430	1.410	42.30	24.94
4-T1MS120	0.490	14.70	0.390	1.290	38.70	27.30

3.1.3 多重开裂 纤维网增强砂浆在荷载作用下出现多条细密裂缝,荷载-位移曲线上每一个突降对应一条裂缝,每组试件裂缝数量及宽度又有很大不同.由试验过程中拍摄的照片可比较出裂缝的宽度(如图 6 所示),其中 T1MS30 裂缝最为细密,其荷载-跨中位移曲线振动幅度最小,对应的承载力下降也小.

平均裂缝数量及平均裂缝间距.可以明显看出,T1MS30 整体裂缝数量最多,约为 T1MS0 试件的 2 倍,并且弯剪区也出现类似纯弯段内的裂缝,纤维网的增强能力得到较充分的发挥;其跨中纯弯段平均裂缝间距约为 7.2 mm,与 T1MS0 相比降低了 42%.T1MS60 和 T1MS120 裂缝数量和跨中平均裂缝间距也都得到不同程度的改善.

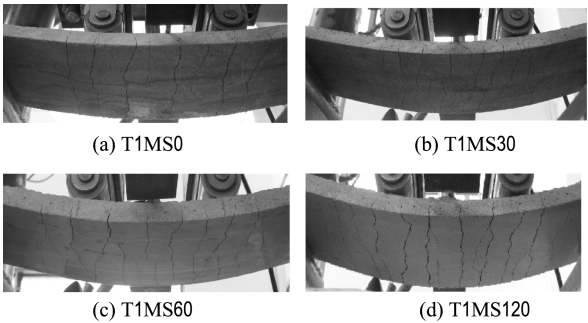


图 6 试验过程中试件开裂状态
Fig. 6 Cracks during test procedure

试验完成后,立即取下试件,用铅笔描出试件下表面的裂缝,分别数出加载点间以及整个试件裂缝数量.由于一些试件的裂缝极其细微,取下后要立即对开裂面进行表面处理,以便更加清楚地观测到微裂缝.表 5 中所列出的均为每组试件的

表 5 裂缝数量及裂缝平均间距
Tab. 5 The amount and average space of cracks

编号	纯弯段裂缝 平均数量	试件整体 平均裂缝数量	纯弯段平均 裂缝间距/mm
1-T1MS0	8.33	12.67	12.267
2-T1MS30	14.00	25.00	7.161
3-T1MS60	8.50	13.50	11.974
4-T1MS120	9.30	16.30	10.733

3.2 拉拔试验

拉拔试验前,应将试件颈部残留的砂浆层轻轻敲碎,但为避免破坏中间的纤维束,本次试验并未将其完全敲碎,因此,当残留的砂浆层被拉断时,在一些拉拔试验曲线上可以看到拉拔力峰值前有突降.

本次试验的 4 组试件拉拔形态各不相同.在拉拔力达到峰值后,图 7(a) T1MS0 纤维束拔出

的同时纤维丝也不不断地被拔断,试验曲线缓慢平稳下降;图 7(b) T1MS30 纤维束立即被拔断,表现为试验曲线突降至极低水平,说明此组试件纤维束与砂浆基体之间的粘结力太强;图 7(c) T1MS60 纤维束部分被拔断,其余纤维丝继续承

担荷载,然后逐渐被拔断或缓慢拔出. 图 7(d) T1MS120 纤维束部分被拔断,承载力突降,剩余纤维丝继续承担荷载,然后逐渐被拔出,承载力缓慢下降.

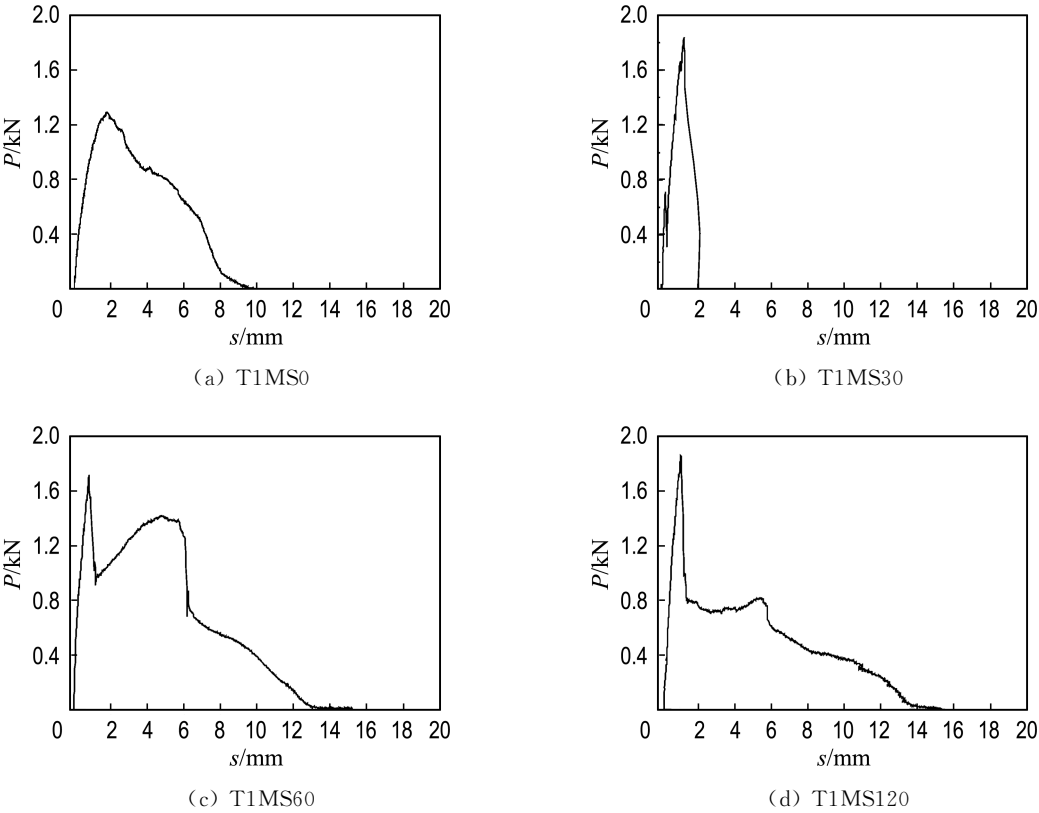


图 7 各组试件拉拔试验结果

Fig. 7 Results of pull out test

通过比较拉拔力峰值可以看到,采用粘砂来增强纤维束与砂浆之间的粘结力效果十分显著,这是因为纤维表面的砂提高了摩擦力,甚至产生了一种咬合效应. 尤其是 T1MS30 粘结力提高最为明显,这与四点弯曲试验结果相符. T1MS120 拉拔试件并未受损,可以观测到,其拉拔力仅略低于 T1MS30,说明环氧树脂浸渍后粘 0.60~1.20 mm 细砂也可明显改善纤维束与基体之间的粘结. 但是峰值拉拔力过后,砂有可能从纤维束表面剥落,并带动那里的粗纱一同剥落,造成纤维束断裂,不能继续承载. 因此峰值过后,这些经过环氧树脂浸渍并粘砂处理的纤维束拉拔力陡降,甚至降到接近 0,说明纤维束内大部分纤维丝已经断裂,以至于不能继续承载. 以上说明,粘结力过大会使纤维束突然破坏,不再能够承受荷载,因此也应当对粘结力有所控制.

4 结 论

环氧树脂浸渍纤维编织网并在其表面粘砂,尤其是粘砂粒径为 0.15~0.30 mm,可明显改善纤维网与砂浆基体之间的粘结性能,提高弯曲状态下 TRC 的极限承载力,控制基体的开裂,增加裂缝数量. 但是粘结力不能过大,否则会使得纤维束突然破坏,构件不能继续承受荷载,因此今后可以考虑采用环氧树脂浸渍后纤维网单面粘砂.

利用在纤维编织网表面粘砂可以增大纤维编织网和基体的摩擦粘结,提高粘结强度,使纤维编织网增强混凝土结构在荷载作用下和自身收缩情况下,裂缝更加细密,除能改善普通房屋、桥梁结构外表裂缝,还能控制大体积水工、港工和海工混凝土的开裂,防止水流渗透,提高这些建筑物的安全系数.

参考文献:

- [1] MEHTA P K. Durability of concrete-fifty years of progress? [C] // **Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Concrete**. SP-126. Detroit: American Concrete International, 1991:1-32
- [2] 罗福午. 建筑结构缺陷事故的分析与防止[M]. 北京:清华大学出版社, 1996
- [3] PREZZI M, GEYSKENS P. Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to marine environment [J]. **ACI Materials Journal**, 1996, **93**(6):544-552
- [4] ISECKE B. Failure analysis of the collapse of the Berlin Congress Hall [J]. **Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction**, 1985(12):36
- [5] CIGNA R, ANDRADE C, NURNBERGER U, *et al.* COST 521 Action: Corrosion of steel in reinforced concrete structures [R] // Final Report. Luxembourg:European Communities, 2003
- [6] 黄承逵. 纤维混凝土结构[M]. 北京:机械工业出版社, 2004
- [7] 董振英, 李庆斌. 纤维增强脆性复合材料细观力学若干进展[J]. 力学进展, 2001, **31**(4):555-582
- [8] XU Guo-dong, HANNANT D J. Flexural behavior of combined polypropylene network and glass fiber reinforced cement [J]. **Cement and Concrete Composites**, 1992, **14**(1):51-61
- [9] XU Guo-dong, HANNANT D J. Synergistic interaction between fibrillated polypropylene networks and glass fibres in a cement-based composite [J]. **Cement and Concrete Composites**, 1991, **13**(2):95-106
- [10] 徐世烺, 李 赫. 碳纤维编织网和高性能细粒混凝土的粘结性能[J]. 建筑材料学报, 2006, **9**(2):211-215
- [11] 徐世烺, 李 赫. 纤维编织网增强混凝土的拉拔计算分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, **2**(3):15-21
- [12] XU Shi-lang, KRÜGER M, REINHARDT H W, *et al.* Bond characteristics of carbon, alkali-resistant glass and aramid textiles in mortar [J]. **Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE**, 2004, **16**(4):356-364
- [13] 徐世烺, REINHARDT H W, KRÜGER M, 等. 高性能精细混凝土与碳纤维织物粘结性能研究[C]//第十一届全国结构工程学术会议. 长沙:[s n], 2002
- [14] 李 赫. 纤维编织网增强混凝土力学性能的实验研究及理论分析[D]. 大连:大连理工大学, 2006

Practical method of improving bonding behavior between fiber textile and mortar

LI Qing-hua, XU Shi-lang*, LI He

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Mechanical behavior of textile reinforced concrete (TRC) is related to the bonding behavior between textile and matrix. Sands of different sizes were used after textiles were impregnated by epoxy resin to increase bond strength and control cracks. Four-point bending and pull-out tests were carried out to investigate the effect of sand size on bonding behavior of TRC. The experimental results show that, sticking sands after epoxy resin impregnating can increase the frictional resistance, even produce interlocking between textile and matrix. Therefore, this method can enhance cracking load of TRC under bending stress, increase the number of cracks, and improve bonding behavior between textile and matrix, especially spreading sands with 0.15-0.30 mm grain size after impregnation of roving with an epoxy resin.

Key words: carbon fiber textile; sticking sand; bonding behavior; cracks