

文章编号: 0451-0712(2005)12-0166-04

中图分类号: U414.101

文献标识码: A

# 异型粗合成纤维与砂浆基体界面的 粘结性能及其微观增强机理

李建辉<sup>1</sup>, 邓宗才<sup>1</sup>, 唐 劼<sup>2</sup>, 谭 潇<sup>1</sup>, 李 娜<sup>1</sup>, 冯 森<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院 北京市 100022; 2. 中咨工程建设监理公司 北京市 100044)

**摘 要:** 通过自行研制的拉拔试验装置, 试验研究了异型粗合成纤维与砂浆基体界面的粘结力及其影响因素。试验表明: 在 M30 砂浆中, 纤维不同埋置长度的界面粘结强度基本为一常数 3.70 MPa, 在 M20、M40 砂浆中, 界面粘结强度随纤维埋置长度的增大而减少; 对于同一纤维埋置长度, 随砂浆强度增加, 界面粘结强度不是一直在增加, 有时在降低; 同时, 在作者以前提出的异型粗合成纤维拉拔理论模型的基础上, 建立了一个与试验结果更吻合的新理论模型, 该新模型对异型粗合成纤维与基体界面粘结性能的进一步深入研究具有较高的实用价值和理论意义。

**关键词:** 异型粗合成纤维; 砂浆; 界面粘结强度; 拉拔曲线; 拉拔理论模型

纤维增强混凝土作为一种典型的复合材料, 具有鲜明的结构特征, 其力学性能和损伤破坏规律不仅取决于其成分性能, 也取决于细观结构特征, 如纤维的体积掺率、分布规律、形状以及界面性质等。而纤维与基体界面的粘结性能是研究纤维混凝土增强、增韧与阻裂机理的基础, 它对纤维混凝土各项宏观力学性能都有重要影响。它吸引了国内外众多学者从事有关问题的研究<sup>[1~7]</sup>, 但目前的大部分研究工作仍以宏观试验和定性分析为主, 缺乏比较成熟的细观力学模型, 而关于异型粗合成纤维混凝土细观增强增韧机理和宏观力学行为的联系方面的研究更少。加强异型粗合成纤维混凝土细观增强增韧机理和宏观特性之间联系的研究是当前摆在材料工作者面前的首要任务。

直径细的合成纤维对阻止混凝土的早期塑性开裂十分有效, 但由于细纤维的掺量一般较小, 对于硬化混凝土韧性和抗裂性的改善很小。以往用钢纤维阻止硬化混凝土的开裂, 提高混凝土韧性和抗冲击性能。但钢纤维存在锈蚀的问题, 且量重、造价高, 施工中有结团现象。粗合成纤维(直径大于 0.1 mm 称为粗合成纤维<sup>[4]</sup>)是一种新型增强增韧材料, 与钢纤维相比, 粗合成纤维不仅能有效阻止硬化混凝土的

开裂, 且易于分散、轻质、耐腐蚀性好; 另一特点是可以显著改善混凝土的弯拉强度、韧性、抗冲击、抗疲劳和耐火性能。粗合成纤维在美国和日本等国家已有多年的使用历史, 其显著的效果已经为大量工程实践所证明, 它已成为纤维材料的未来发展方向。

本文采用自行研制的拉拔试验装置, 对异型粗合成纤维与砂浆基体界面的粘结性能及其影响因素进行了系统研究。过去普遍认为: 随着基体强度的增加, 纤维与基体的界面粘结强度将随之增加<sup>[5]</sup>。但试验结果表明: 对于同一纤维埋置长度, 随砂浆强度增加, 界面粘结强度不是一直在增加, 有时在减小。同时, 在作者以前提出的异型粗合成纤维拉拔理论模型的基础上, 建立了一个新理论模型。试验结果表明: 新模型较好地修正了原模型与实际结果的偏差, 且新模型简单, 它的提出对异型粗合成纤维与基体界面粘结性能的进一步深入研究具有较高的实用价值和理论意义。

## 1 试验研究

### 1.1 纤维材性

粗合成纤维由宁波大成新材料股份有限公司提供, 密度为 0.95 g/cm<sup>3</sup>, 抗拉强度 530 MPa, 弹性模



的界面粘结强度基本为一常数 3.70 MPa, 这一结果与文献[8]的结果一致。在 SM、HM 中, 界面粘结强度随纤维埋置长度的增大而减少。

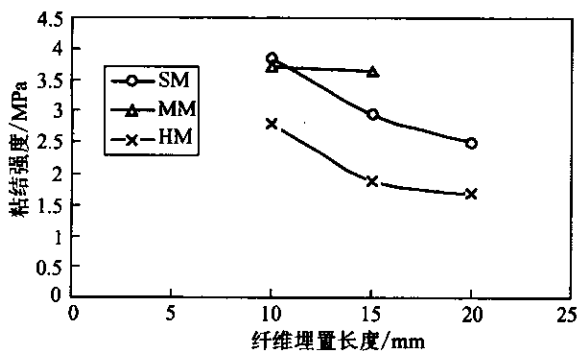


图3 界面粘结强度与纤维埋置长度关系曲线

### 2.1.2 养护龄期

作者研究过养护龄期对异型粗合成纤维与砂浆基体界面粘结强度的影响, 由文献[1]可知: 在 MM 中, 界面粘结强度在开始阶段随养护时间的增长而快速提高, 埋置长度为 10 mm、15 mm 的粘结强度在养护 5 d 后分别达到粘结强度的 88.2%、91.18%, 在养护 6 d 后基本达到最大, 继续养护对界面粘结强度几乎无效果, 如图 4 所示。异型粗合成纤维与砂浆基体界面粘结强度 ( $\tau_d$ ) 与龄期 ( $T$ ) 有如下关系式:

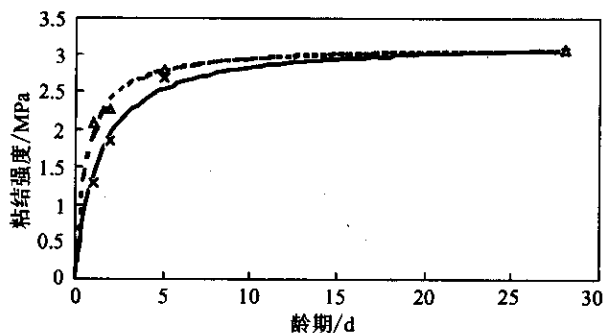


图4 界面粘结强度与龄期关系曲线

$$\tau_d = \frac{T}{AT+B} \quad (2)$$

式中:  $A$  和  $B$  为系数。

### 2.1.3 砂浆强度

过去普遍认为: 随基体强度的增加, 纤维与基体的界面粘结强度将随之增加。但试验结果表明: 对于同一纤维埋置长度, 随砂浆强度增加, 界面粘结强度不是一直在增加, 有时在减小。如图 5 所示。原因可能是以下 2 点。

(1) 低强度砂浆其水灰比大, 和易性良好, 在已

振捣好的砂浆中插入波浪异型柔性纤维后再振捣时, 砂浆能够较充分地填充纤维波浪凹槽中, 纤维与砂浆充分粘结, 提高了界面密实性。但水灰比高时, 自由水离子增加, 界面上晶体取向性增加, 减弱了基体与纤维的粘结强度。增强与减弱两种效应叠加, 形成低强度砂浆界面粘结强度。本试验中的低强度砂浆的纤维界面强度较高。

(2) 高强度砂浆其水灰比低, 一方面有利于界面粘结强度的提高; 另外水化需要的水量增加, 和易性降低, 水化反应时, 产生的气体增加, 界面上微孔增加, 从而界面上产生脱粘、应力集中的概率增大, 导致界面粘结强度的降低。增强与减弱两种效应叠加, 形成高强度砂浆界面粘结强度。由图 5 可知: M30 砂浆中, 异型粗合成纤维与砂浆基体界面的粘结性能优越, 表明以上影响因素相互作用达到优化。

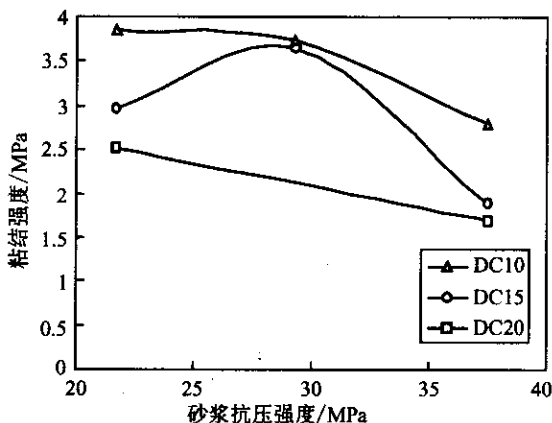


图5 砂浆抗压强度与界面粘结强度关系曲线

### 2.2 异型粗合成纤维拉拔理论模型

异型粗合成纤维拉拔过程分为: 完全约束、局部脱粘、动态拔出 3 阶段。而拉拔阻抗由 3 部分提供: (1) 界面粘结阻抗; (2) 塑性变形阻抗; (3) 界面摩擦阻抗。界面粘结阻抗在拉拔开始时最大, 在界面脱粘后粘结阻抗急剧下降; 塑性变形阻抗随纤维弯曲变形而变化, 当纤维被完全拉直后, 塑性变形阻抗降为零; 相对于界面粘结及塑性功阻抗, 界面摩擦阻抗是拉拔阻抗的主要来源。作者提出过一个异型粗合成纤维拉拔理论模型[8], 把拉拔阻抗单归结为一个变量  $\tau_i$  的变化, 如式(3)所示。该理论模拟曲线与试验曲线上升段、初始下降段吻合良好, 但下降段后部分吻合较差。由于在动态拔出过程后期, 界面损伤严重, 界面摩擦阻抗急剧下降, 导致纤维突然被拔出。通过大量试验发现: 该现象通常发生在拉拔位移最

后 1 mm 阶段。针对以上问题,作者对原理论模型进行了修正,提出了一个新理论模型,如式(4)所示。它把拉拔荷载~位移曲线分为三部分。在拉拔位移最后 1 mm 阶段,由于拉拔荷载呈线性急剧下降,采用线性进行拟合。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_t}{\tau} &= 1 - \left( 1 - \frac{\delta_t}{\delta_f} \right) \dots\dots\dots \delta_t < \delta_f \\ \frac{\tau_t}{\tau} &= \beta \exp \left[ \alpha \frac{\left( 1 - \frac{\delta_t}{\delta_f} \right)}{\beta} \right] + \gamma \dots\dots\dots \delta_t > \delta_f \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_t}{\tau} &= 1 - \left( 1 - \frac{\delta_t}{\delta_f} \right)^2 \dots\dots\dots \delta_t \leq \delta_f \\ \frac{\tau_t}{\tau} &= \beta \exp \left[ \alpha \frac{\left( 1 - \frac{\delta_t}{\delta_f} \right)}{\beta} \right] + \gamma \dots\dots\dots \delta_f < \delta_t \leq \delta_{\max} - 1 \\ \frac{\tau_t}{\tau} &= P_{\delta_{\max}-1} (\delta_{\max} - \delta_t) \dots\dots\dots \delta_{\max} - 1 < \delta_t \leq \delta_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\tau$ 表示粘结强度,为常数; $\delta_f$ 、 $\delta_{\max}$ 分别为拉拔峰值荷载位移、最大拉拔位移; $P_{\delta_{\max}-1}$ 为拉拔位移为 $\delta_{\max}-1$ 时的理论计算拉拔荷载; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 为系数,分别取为 1.2、0.9、0.1,  $\beta + \gamma = 1$ 。

通过模拟得到的拉拔荷载~位移全曲线与试验曲线比较见如图 6 和图 7 所示。

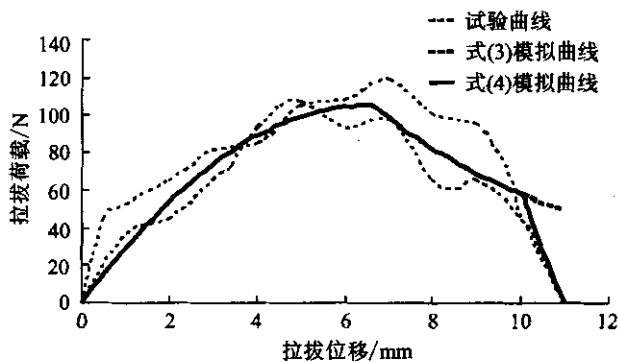


图 6 在 MM 中 DC10 理论拉拔荷载~位移曲线拟合

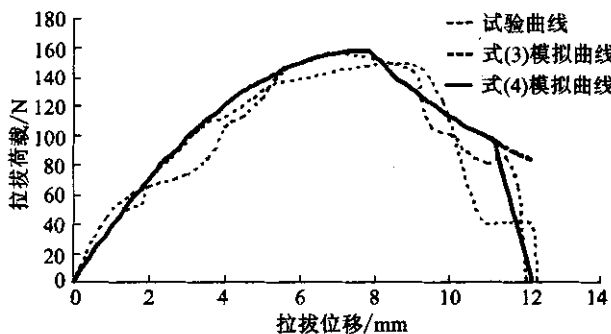


图 7 在 MM 中 DC15 理论拉拔荷载~位移曲线拟合

由图 6 和图 7 可知,修正后的异型粗合成纤维拉拔理论模拟曲线与试验曲线整体吻合良好,相比较原拉拔理论模型,它较好地修正了原拉拔理论模拟曲线在下降段与实际结果的偏差,且该模型简单,它的提出对异型粗合成纤维与基体界面粘结性能的进一步深入研究具有较高的实用价值和理论意义。

### 3 结论

(1)在 M30 砂浆中,纤维不同埋置长度的界面粘结强度基本为一常数 3.70 MPa,在 M20、M40 砂浆中,界面粘结强度随纤维埋置长度的增大而减少。

(2)对于同一纤维埋置长度,随砂浆强度增加,界面粘结强度不是一直在增大,有时在减小。

(3)新异型粗合成纤维拉拔理论模拟曲线与试验曲线吻合良好,它较好地修正了原理论模拟曲线在下降段与试验结果的偏差,且新模型简单,具有较高的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 李建辉,邓宗才,等.合成纤维与混凝土界面粘结性能研究与发展[J].混凝土,2005,185(3).
- [2] Sehaj, Arun, Richard. Pullout behavior of polypropylene fiber from cementitious matrix [J]. Cement and Concrete Research, 2004, (34).
- [3] 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).
- [4] 邓宗才.高性能合成纤维混凝土[M].北京:科学出版社,2002.
- [5] 王志,胡晓波,等.纤维-水泥基体界面粘结性能研究述评[J].混凝土,2003,168(11).
- [6] Li V C, Wang Y, Backer S. Effect of inkling angle bundling and surface treatment on synthetic fiber pullout, from a cement matrix [J]. Composites, 1990, 21 (2).
- [7] 沈荣熹,崔琪,李清海.新型纤维增强水泥基复合材料[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [8] 李建辉,邓宗才.异型塑钢纤维-砂浆界面粘结性能[D].北京工业大学建筑工程学院试验报告(内部版),2005.

文章编号: 0451-0712(2005)12-0170-05

中图分类号: U414.1

文献标识码: B

# 粤赣高速公路沥青比对试验误差分析及探讨

邱志雄<sup>1</sup>, 姚 岢<sup>2</sup>, 李 智<sup>3</sup>

(1. 广东粤赣高速公路有限公司 广州市 517000; 2. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院 哈尔滨市 150090;  
3. 华南理工大学道路研究所 广州市 510641)

**摘 要:** 通过对粤赣高速公路沥青比对试验结果进行分析, 得出比对试验是判别试验室试验水平高低的有效方法。重点阐述了比对试验的实施方案, 数据处理方法, 以及如何对数据处理结果进行正确的分析; 特别介绍了如何运用 2 个数据一致性统计量( $k$  值和  $h$  值)来判断试验的精密度和准确性, 以及试验室数据的误差水平和可靠性。  
**关键词:** 沥青; 比对试验; 试验室内数据一致性统计量  $k$ ; 试验室间数据一致性统计量  $h$

比对试验是一种检验试验室试验水平的方法, 它是指多家试验室在相同或者相似的条件下来测试分析某一产品的一个或多个项目指标, 通过对试验数据的收集、整理、分析, 来检测和考核试验室的技术能力, 这种试验已为国内同行所接受。无疑, 该方法可以评价试验室的检测能力, 监控试验室可能出现的试验偏差, 识别试验室可能存在的技术问题并制

定相应的补救措施。通过试验室间的比较, 有助于试验技术细节的改善, 提高分析测试能力; 改善试验人员的操作技能, 对各级试验室检测技术的提高起到很好的促进作用。  
为了评价粤赣高速公路沥青混凝土路面各参与单位沥青试验在不同试验设备条件下试验结果的差异性, 统一粤赣高速公路沥青混凝土路面试验误差, 进

收稿日期: 2005-11-07

## Bond Properties and Micro-Mechanism of Interface Between Special-Shaped Synthetic Macro-Fiber and Mortar Matrix

LI Jian-hui<sup>1</sup>, DENG Zong-cai<sup>1</sup>, TANG Jie<sup>2</sup>, TAN Xiao<sup>1</sup>, LI Na<sup>1</sup>, FENG Miao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;  
2. Zhongzi Engineering Construction Project Management Corporation, Beijing 100044, China.)

**Abstract:** With new type pull-out experimental equipment, the bonding force and its effect factors between shaped synthetic macro-fiber and mortar is tested in this paper. The results show that the interfacial bond strength of different embedding lengths in M30 mortar almost is a constant 3.70 MPa. However, in M20 or M40 mortar, it decreases with the fiber embedding length increased, when fiber embedding lengths are same, it doesn't increase and even decreases with the increase in strengths of matrix. Meantime, based on amending the old mechanical model for analysis of shaped synthetic macro-fiber, a new mechanical model is first developed; a good agreement is achieved between the prediction and the experiment results, it has good practical and academic values for the research of interfacial bonding between shaped synthetic macro-fiber and matrix.  
**Key words:** special-shaped synthetic macro-fiber; mortar; interfacial bond strength; pull-out curve; mechanical model for pull-out