

界面强度对混凝土双丝拉拔性能的影响*

高照, 张亚芳, 刘浩

(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 从微观角度考虑界面、骨料、钢丝、混凝土基体四相材料物理力学参数的非均匀分布, 利用有限元软件建立双丝拉拔数值模拟模型, 研究界面强度变化对双丝拉拔试件破坏模式和力学性能的影响, 给出双丝-混凝土基试件在位移加载下的荷载-位移曲线、声发射计数曲线和剪应力分布。研究表明: 界面强度变化会改变拉拔试件的破坏模式和声发射现象。界面强度较低时, 双丝拉拔试件峰值荷载和韧性随界面强度增加而增加; 而界面强度较高时, 界面强度的提高对峰值荷载和韧性影响不明显。

关键词: 双丝拉拔; 界面强度; 声发射(AE); 峰值荷载; 韧度

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2016)06-0109-06

Influence of interface strength on twin fiber pull-out test of concrete matrix

GAO Zhao, ZHANG Yafang, LIU Hao

(Faculty of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Meso-level heterogeneous distribution of interface mechanical parameters has been investigated. Numerical models for twin fibers pull-out test have been created by using finite element method. Influence of interface strength on damage pattern and mechanical properties have been studied on twin fibers pull-out test specimens. By applying load with displacement control, load-displacement curves, AE accumulative curves and interface shear stress distribution curves of twin fibers and concrete matrix test specimen have been plotted. The damage pattern and AE pattern of pull-out test specimen changed along with the interface strength. As interface strength is low, both peak load and toughness increase with interface strength, and both peak load and toughness don't change obviously with high interface strength.

Key words: double fiber pull-out test; interface strength; acoustic emission; peak load; toughness

复合材料具有优异的物理力学性能, 这源于它综合了增强材料和基体的优点^[1]。纤维增强混凝土作为一种典型的复合材料, 它的纵向强度不是简单的取决于纤维的强度和含量, 还和界面粘结强度有关^[2]。在受力条件下纤维增强混凝土基体中的大量微裂缝不发生显著扩展, 是缘于掺合在基体中的侨联纤维对这一过程起到了阻滞作用, 而阻滞作用大小最终取决于纤维-基体界面的粘结强度^[3]。

因此, 界面粘结强度是影响应力传递和复合材料的宏观力学性能的主要因素^[4-5]。有专家和学者通过物理实验研究了单丝拉拔混凝土的界面力学性能^[6-10], 得到了一批有价值的研究成果, 但由于界面尺度小, 难以直接观测其内部损伤演化过程, 数值模拟作为补充手段弥补了物理试验的不足^[11-13]。

到目前为止, 基于界面的研究大多采用理想界面模式进行描述, 与实际界面情况差异很大。本文

* 收稿日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278136, 51678170); 广州市科技创新平台资助项目(15180005)

作者简介: 高照(1992年生), 男; 研究方向: 纤维增强混凝土; 通讯作者: 张亚芳; E-mail: zhangyafang2004@163.com

利用有限元软件 RFPA (Realistic Failure Process Analysis) 将混凝土材料视为由界面、骨料、钢丝以及混凝土基体的四相材料组成, 运用 Weibull 分布函数表征试件各相材料物理力学参数的非均匀性^[14], 建立了双丝拉拔试件数值模型, 在此基础上, 实现了双丝拉拔试件由裂纹萌生、扩展直至破坏的全过程, 并利用声发射与材料内部损伤有直接的一致对应关系这一特性评估和研究界面强度改变对试件宏观力学性质的影响^[15]。

1 数值模型建立

图 1 为双丝拉拔混凝土数值模型, 基体尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 埋入标号为 1、2 的两根钢丝, 两根钢丝直径均为 4 mm , 双丝中心距为 24 mm , 埋深为 50 mm , 界面厚度为 0.33 mm 。模型试件共划分 300×300 个单元。采用位移加载方式, 加载步长为 0.0001 mm/步 , 共加载 200 步。各组分材料力学性能见表 1, 表中参数依照文献 [16] 取值。为研究界面强度变化对双丝拉拔混凝土的力学性能影响, 共设计 9 组不同界面强度 (Interface Strength, IS) 的试件进行模拟, 界面强度分别为 5、10、30、50、70、90、120、155 和 180 MPa, 为方便后文讨论, 依次标号为 IS-05、IS-10、IS-30、IS-50、IS-70、IS-90、IS-120、IS-155、IS-180。

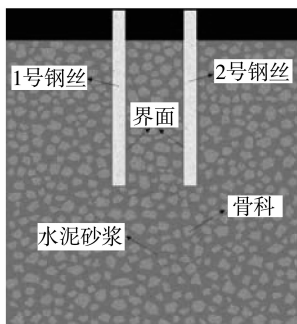


图 1 数值模拟模型

Fig. 1 Numerical model

2 数值模拟结果与分析

2.1 不同界面强度下试件的破坏模式

不同界面强度下试件的破坏模式有所不同, 通过大量数值模拟算例可以发现, 随着界面强度的增强, 在沿纤维轴向拉拔荷载作用下试件的破坏模式大致可分为两种: 钢丝-基体-钢丝拔出破坏、基体横断破坏。图 2 给出了 IS-10、IS-155 拔出破坏过程图。其中 Step09-01 是指有限元计算中第 9 加

载步的第一子步, 其后依此类推。

表 1 材料各组分力学参数¹⁾

组分	弹性模量 /MPa	极限抗拉强度 /MPa	泊松比
水泥砂浆	20 400(3)	155(3)	0.25(100)
骨料	70 000(6)	500(6)	0.3(100)
界面	4 000(1.5)	--(1.5)	0.25(100)
钢丝	210 000(20)	1 000(20)	0.3(100)

1) 括号内数字为材料的均质度

图 2 (a) 所示为低界面强度试件 IS-10 破坏过程图。加载初期, 试件界面层首先出现微小裂纹, 裂纹主要集中在试件两根钢丝的埋入端 (外露钢丝与基体交界处附近) 与埋置端 (钢丝植入基体端), 这是由于钢丝两端 (即埋入端与埋置端) 附近的材料尺寸及刚度突变引起的应力集中导致的。随着荷载增大, 两端裂纹沿界面层向中心发展, 在此过程中, 单根钢丝两侧裂纹发展逐渐由对称趋向非对称, 这与齐雷等^[17]在界面脱粘过程数值模拟研究中所观察到的现象一致。继续加载, 钢丝两侧界面完全脱粘, 转而由钢丝-基体间的摩擦作用传递应力, 基体内部开始出现损伤, 2 号钢丝埋置端应力集中处裂纹迅速向 1 号钢丝方向扩展延伸直至到达 1 号钢丝埋置端空腔部, 如图 2 (a) Step120-01 所示。完成加载过程后, 可以看到, 底部裂纹贯通 1、2 号钢丝间的混凝土, 双丝及其间基体出现整体滑移破坏。这种破坏形式可认为是钢丝-基体-钢丝拔出破坏。

图 2 (b) 所示为高界面强度试件 IS-155 的破坏过程图。加载进行至 Step166-01 前后, 埋入端界面、埋置端界面和基体薄弱单元先后出现少量损伤, 随后钢丝底端脱粘出现细小空腔。继续加载, 两根钢丝埋置端均出现了垂直于钢丝的横向裂纹并不断地向两侧发育, 至加载结束, 主裂纹 (造成基体失稳破坏的裂纹) 横跨大部分基体且贯通双丝底端界面层, 而埋入端附近界面单元仅出现了少量损伤, 余下的未损伤界面层仍能继续传递应力至基体, 这种破坏形式可认为是基体横断破坏。与低界面强度试件 IS-10 破坏过程比较发现, 高界面强度试件更容易发生基体损伤破坏, 这与文献 [18] 中所得到的研究结论是一致的。

为深入研究拉拔荷载作用下不同界面强度试件的应力分布情况, 对 IS-10 和 IS-155 沿图 3 所示路径分别取多单元信息。沿图 3 中直线 1、2 自上向

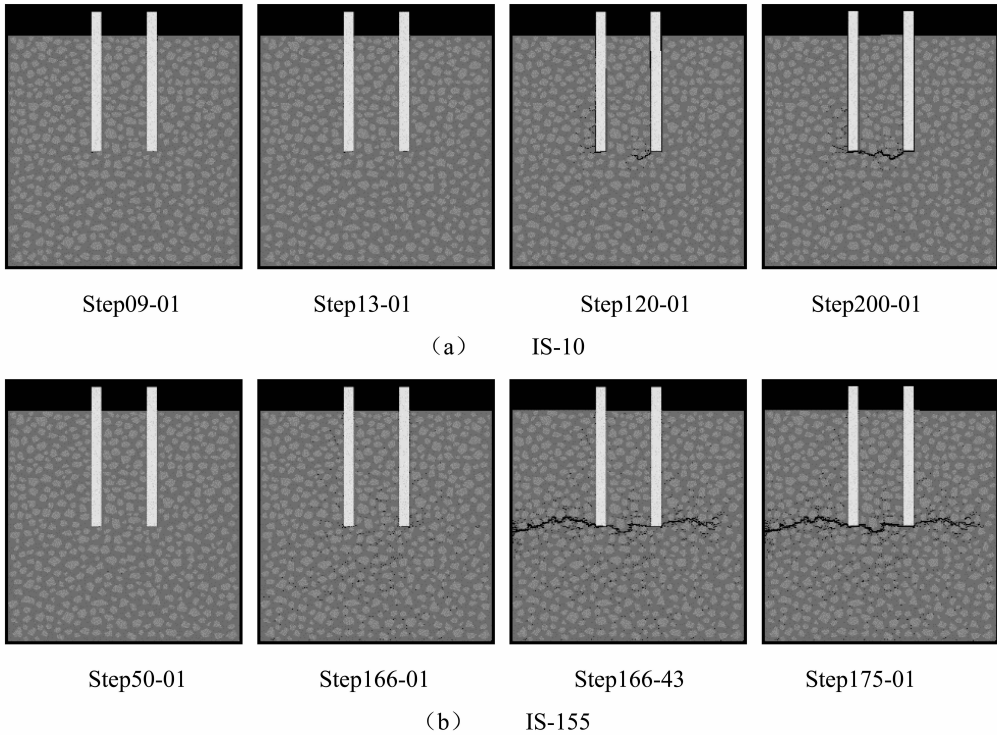


图 2 两种典型破坏模式的拔出破坏过程图

Fig. 2 Picture of failure process of two typical failure modes

下取多单元信息处理后得到 1 号钢丝左右两侧界面剪应力曲线 (如图 4 所示), 沿直线 3 自左向右取多单元信息处理后得到双丝底部基体拉应力曲线 (如图 5 所示)。为方便对比, 图 4 中 1 号钢丝的右侧剪应力曲线和图 5 中 IS-155 的拉应力曲线人为置于水平轴下方。

观察图 4 可得到 IS-10 和 IS-155 的剪应力分布情况: ① 两组试件的界面剪应力分布均为钢丝两端的界面剪应力较钢丝中段更大, 这和以往的数值模拟结果是一致的^[19-21]; ② IS-10 的钢丝两侧界面剪应力呈非对称分布, 而 IS-155 的钢丝两侧界面剪应力分布较为对称。根据以上图 4 的观察结果和图 2 中两组试件的破坏过程图可知, IS-10 的破坏模式为: 荷载作用下, 钢丝两端剪应力集中超过了此区域内界面单元强度极限, 界面发生局部脱粘破坏, 这部分极限强度被释放, 界面脱粘的部位转移, 随着荷载继续增大, 界面的另一部位发生新的局部破坏和新破坏部位处的极限强度被释放, 如此循环发展, 界面不断损伤脱粘。由于低界面强度试件 IS-10 的钢丝两侧剪应力不对称, 钢丝左右两侧脱粘程度亦不对称, 即钢丝外侧脱粘程度高于钢丝内侧, 正因如此, IS-10 的双丝和其间基体粘结良好, 最终发生钢丝 - 基体 - 钢丝拔出破坏。而 IS-

155 仅钢丝埋入端界面受剪严重, 且界面本身强度大, 抗剪切破坏能力强, 因此 IS-155 与 IS-10 的破坏模式有所区别。

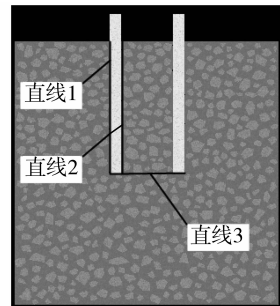


图 3 取多单元信息路径示意图

Fig. 3 Path diagram of obtaining multiunit message

为了进一步分析 IS-155 的破坏模式, 图 6 给出了 IS-155 试件的拉应力云图, 可以看到, 图中双丝底部附近基体条纹相对更加明亮和密集, 表明此区域内基体受拉应力作用明显。图 5 给出了 IS-10 和 IS-155 的拉应力曲线, 整体来看, IS-155 拉应力要大于 IS-10 的拉应力, 其中 IS-155 拉应力峰值相较 IS-10 提升了 61%, 拉应力平均值也提升了 150%。由此可知, 界面单元强度提升后剪应力集

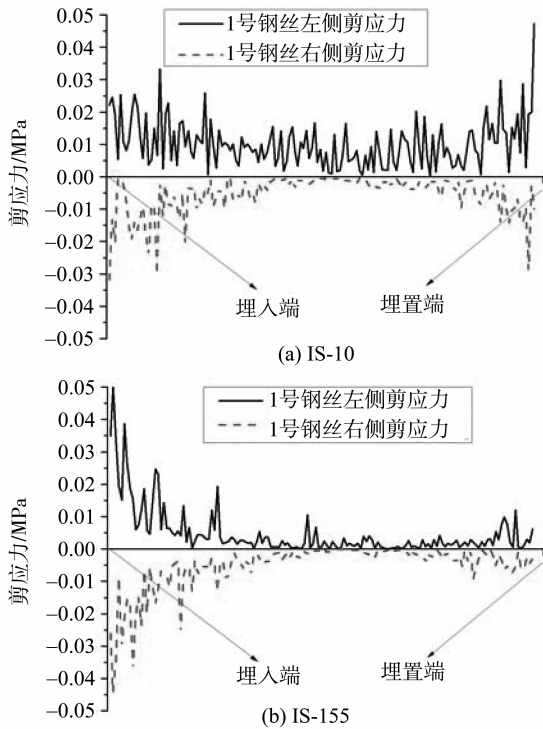


图 4 两组不同界面强度试件的界面剪应力
Fig. 4 Interfacial shear stress of two different interfacial strength

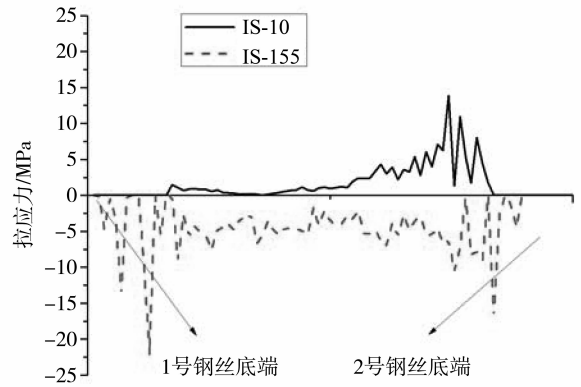


图 5 最大拉应力
Fig. 5 Maximum tension stress of test specimen

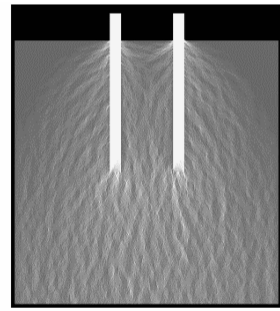


图 6 IS-155 拉应力云图
Fig. 6 Tension stress nephogram of IS-155

中区域只有少量脆弱单元（界面单元力学参数服从 Weibull 分布）受剪屈服破坏，而双丝底部基体单元由于所受拉应力值超过给定的阈值，基体产生裂纹并最终导致试件失稳破坏。

根据以上关于不同界面强度试件的应力分布情况分析可得出结论，低界面强度的试件破坏主要原因是由于界面单元所受最大剪应力达到给定阈值导致的界面脱粘破坏，而高界面强度试件破坏的主要原因则是由于基体单元所受最大拉应力达到给定阈值导致基体开裂破坏。

2.2 界面强度变化对试件承载能力的影响

为了研究界面强度变化对试件承载能力的影响，下文将从韧度和峰值荷载两个方面来分析讨论。

图 7 给出了三组双丝 - 混凝土基试件在单向拉位移加载下的声发射 - 位移 - 荷载关系图。如图 7 所示，试件荷载 - 位移曲线突降处往往伴随着大量声发射现象，这表示试件大量单元遭到破坏，承担荷载能力迅速丧失。一般定义荷载位移曲线与坐标轴围成的面积为韧度，取试件 IS-05 的韧度为 1，计算其余试件的相对韧度，所得结果如表 2 所示。图 8 则直观的展示了试件韧度随界面强度变化的趋势，可以看到，界面强度低于 90 MPa 时界面强度

的改变对双丝拉拔试件的韧度影响显著，随界面强度增加而显著增加，IS-90 试件的韧度为 IS-05 试件的 4.71 倍；当界面强度高于 90 MPa 时，试件的韧度不再随界面强度增加而单调增加了。由图 7 (c) 可知，试件 IS-155 的声发射聚集在一个极小的时间段内发生，荷载位移曲线也表明试件的承载力在 Step166-01 ~ Step166-43 一个加载步间损失了 72%，相较于图 7 (b) 中低界面强度试件 IS-50 曲线所表现出的“阶梯降”而言，高界面强度试件 IS-155 拉拔试验的破坏过程具有明显的突发性，呈现了显著的脆性破坏特征。图 2 (b) 也说明了同样的现象，在 Step166-01 ~ Step166-43 一个加载步间，IS-155 试件便完成了裂纹萌生、扩张和试件失稳破坏的整个过程，且破坏前无明显的预兆，试件的这种脆性特点难以保证实际工程应用中的安全性。

图 9 给出了不同界面强度拔出试验峰值荷载曲线，图中曲线变化趋势与图 8 中试件韧度变化趋势相似，均在 5 ~ 90 MPa 区间段内单调增加，90 MPa 时曲线出现了一个极大值，随后曲线变化不大。

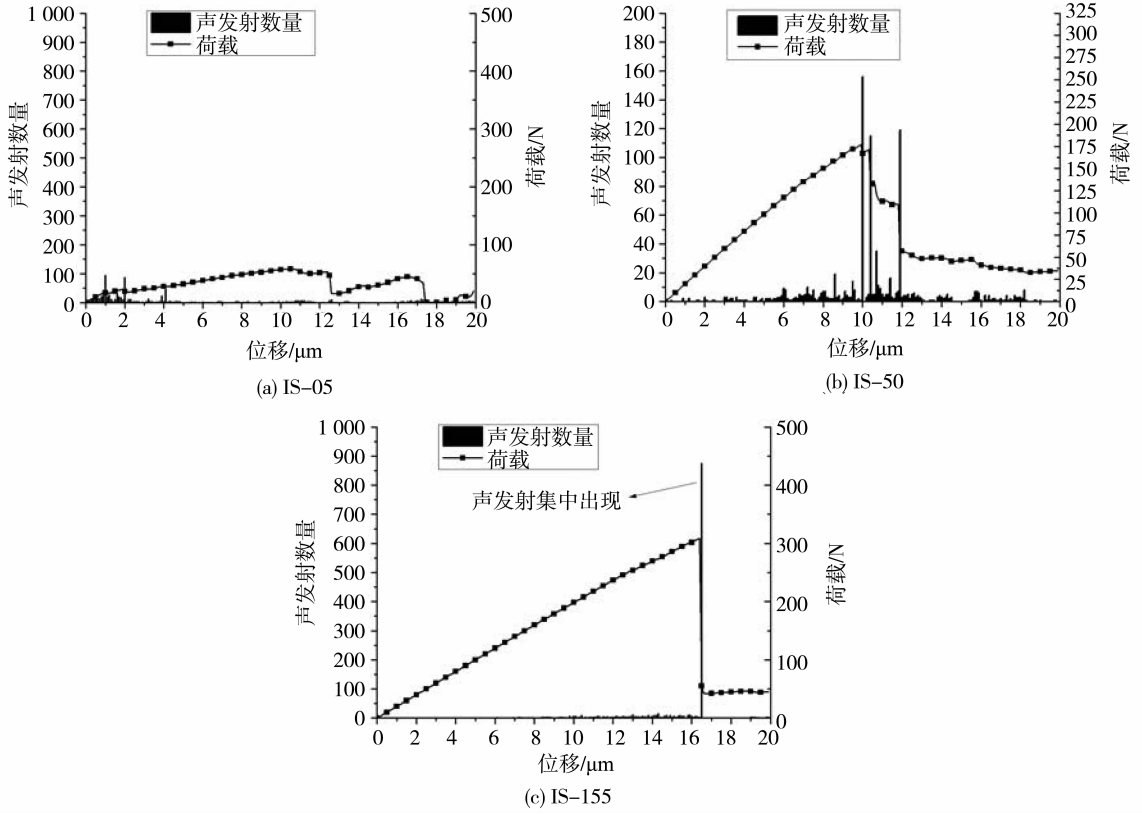


图 7 声发射 - 位移 - 荷载关系图

Fig. 7 AE count and displacement and load curves

表 2 不同界面强度试件相对韧度及峰值荷载

Table 2 Relative toughness and peak load of specimens with different interfacial strength

项目	IS-05	IS-10	IS-30	IS-50	IS-70	IS-90	IS-120	IS-155	IS-180
相对韧度	1	1.09	1.5	2.44	3.54	4.71	4.2	4.47	5.03
峰值荷载/N	58.1	59.8	105.2	177.2	238.5	301.5	287.4	308.8	331.3

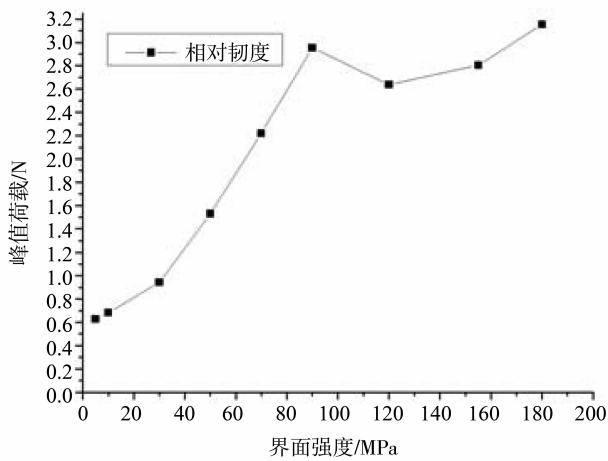


图 8 不同界面强度试件相对韧度

Fig. 8 Relative toughness of different interface strength

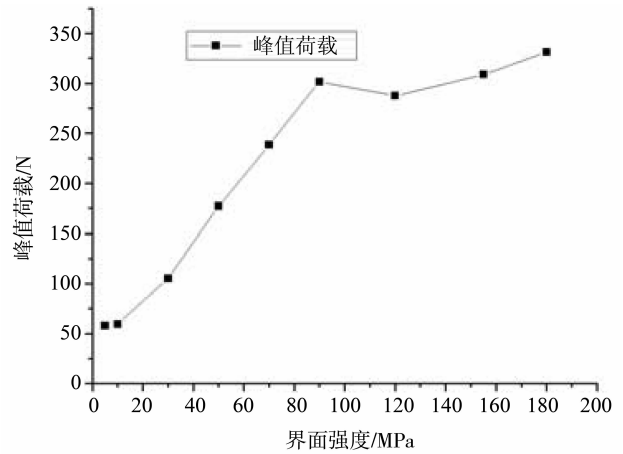


图 9 峰值荷载 - 界面强度曲线

Fig. 9 peak load and interface strength curve

综上所述,低界面强度条件下可以通过提高界面强度来提升试件的韧性和峰值荷载;当界面强度超过某个值时(本文中为90 MPa)试件的峰值荷载和韧度变化不明显。从实际工程中对材料要求的角度考虑,界面强度最小的IS-05试件荷载-位移曲线平缓且峰值低,说明纤维容易在低荷载情况下发生脱粘滑移。IS-155试件荷载-位移曲线和声发射现象均表明高界面强度试件具有脆性破坏特征。界面强度适中的IS-50试件荷载-位移曲线覆盖面积比IS-05更大,峰值荷载也增加显著,同时,曲线在下降段也有明显的阶梯状平台,破坏过程图也表明试件失稳破坏前有明显的预兆(双丝滑移现象),表现出良好的韧性,既能保证工程中的承载力需求也能满足安全性要求。

3 结 论

本文利用有限元软件,基于材料的非均匀性,从细观角度对不同界面强度的双丝拉拔试件进行了数值模拟和分析,并得出以下结论:①不同界面强度的双丝拉拔试件破坏模式有所不同;②对于低界面强度试件,试件的强度和韧性随界面强度提高而提高,而对于高界面强度试件,界面强度的提高对试件强度和韧性并无明显影响。③结合实际工程材料的安全性要求后发现,界面强度存在一个最优区间,界面强度过低或过高的试件均无法满足工程要求。

参考文献:

- [1] 郑安呐,胡福增. 树脂基复合材料界面结合的研究 I: 界面分析及界面剪切强度的研究方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2004, 5: 12-23.
- [2] 张汝光. 单向复合材料的破坏机理-纤维、基体和界面状况对强度的影响[J]. 上海力学, 1986, 4: 67-74.
- [3] 周明杰,袁敬,王晓伟,等. 钢纤维与混凝土的界面粘结有限元分析[J]. 新型建筑材料, 2008, 13: 54-57.
- [4] 张少实. 复合材料纤维与基体界面剪切强度的有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1993, 25(5): 97-100.
- [5] 宗晓东. 纤维增强水泥基材料中钢纤维拉拔特性的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [6] 王安强,万建松,苟文选,等. 单纤维界面强度光弹性实验和理论研究[J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 147-150.
- [7] LARANJEIRA F, MOLINS C, AGUADO A. Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers [J]. Mater Struct, 2010, 43(6): 875-895.
- [8] ROBINS P, AUSTIN S, JONES P. Pull-out behavior of hooked steel fibers [J]. Mater Struct, 2002, 35(7): 434-442.
- [9] 魏国亮,宋玉普. 利用光纤光栅测量技术研究钢筋与混凝土的黏结滑移[J]. 混凝土, 2011, 6: 151-153.
- [10] TAHER A, SAMEER H, WILLIAM H. Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 39-46.
- [11] LI C Y, MOBASHER B. Finite element simulations of fiber pull out toughening in fiber reinforced cement based composites [J]. Advanced Cement Based Materials, 1998, 7(13): 123-132.
- [12] MAROTZKE C, QIAO L. Interfacial crack propagation arising in single-fiber pull-out tests [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(8): 887-897.
- [13] ZHAN Y, MESCHKE G. Analytical model for the pull-out behavior of straight and hooked-end steel fibers [J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 40(12): 1-13.
- [14] SU Z Q, WANG X M, CHENG L, et al. On selection of data fusion schemes for structural damage evaluation [J]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(3): 223-241.
- [15] 张明,李仲奎,杨强,等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501.
- [16] 唐春安,朱万成. 混凝土损伤与断裂-数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] 齐雷,张亚芳,陈树坚. 纤维增强脆性基复合材料界面脱粘过程的数值模拟[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(6): 48-51.
- [18] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [19] 陈沛然,张亚芳,李根. 基体强度对钢纤维单丝拉拔性能的影响[J]. 2013, 52(6): 68-80.
- [20] YANG Q S, QIN Q H, PENG X R. Size effects in the fiber pullout test [J]. Composite Structures, 2003, 61(3): 193-198.
- [21] 曾向荣,张亚芳,刘浩,等. 界面均质度对混凝土单丝拉拔性能影响的数值模拟研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(5): 56-61.