

# 黏结长度对光圆钢筋混凝土单筋拔出性能的影响<sup>\*</sup>

杨奕<sup>1</sup>, 张亚芳<sup>1</sup>, 刘浩<sup>2</sup>, 刘丰<sup>1</sup>

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;  
2. 合乐中国有限公司, 香港)

**摘要:** 为了研究光圆钢筋与混凝土的黏结滑移性能, 针对不同黏结长度的钢筋混凝土试件进行了数值试验, 得到光圆钢筋从混凝土基体中拔出损伤破坏的全过程曲线, 以及对应的声发射结果。同时进行了单筋的中心拔出物理实验并对实验中的声发射现象进行监测, 实验结果较好地证明了数值试验结果的有效性, 并对数值试验分析的参数调整提供了参考。物理实验和数值试验结果分析均表明: 随着黏结长度的增加, 单筋拔出力越来越大。

**关键词:** 黏结长度; 光圆钢筋; 单筋拔出; 界面

**中图分类号:** TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)02-0030-06

## Effect of Bond Length on the Plain Bar of Single Pull-out Test

YANG Yi, ZHANG Yafang, LIU Hao, LIU Feng

(1. Faculty of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Halcrow Ltd. of China, Hong Kong, China)

**Abstract:** A numerical code RFPA<sup>2D</sup> has been adopted to conduct numerical analysis on the impact of bond length on the plain bar. With the numerical mode, the entire damage process of the plain bar as being pulled out from concrete block and the corresponding AE result have been analyzed. To verify the numerical simulation results, a pull-out test has also been carried out and corresponding acoustics emissions have been collected. The physical test has similar results compared with the numerical analysis. Both tests indicate that the peak pull-out force also increased with increased bond length.

**Key words:** bond length; the plain bar; pull out test; interface

钢筋与混凝土界面的黏结是保证钢筋混凝土结构正常工作的前提<sup>[1]</sup>。目前, 表征钢筋与混凝土之间黏结参数的主要是界面黏结应力, 即沿着钢筋与混凝土接触面上的剪应力。黏结滑移常发生在钢筋与混凝土的界面, 因界面尺寸很薄, 研究起来比较困难, 目前文献中多见物理实验研究。常见黏结试验主要有两种, 中心拔出试验和梁式试验<sup>[2-3]</sup>。随着钢筋从混凝土基体中拔出, 会出现声发射现

象。声发射技术可以通过专门的声发射仪器检测出声发射信号<sup>[4]</sup>, 对其发生的信号和参数进行分析来推测材料界面处的变化。

本文开展了中心拔出过程的物理实验, 并采用声发射监测技术, 对光圆钢筋拔出过程进行研究, 重点研究了钢筋不同黏结长度对拔出性能的影响, 同时利用 RFPA<sup>2D</sup> (Realistic Failure Process Analysis) 软件, 将钢筋混凝土考虑为粗骨料、砂浆基

\* 收稿日期: 2014-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278136); 广东省科技计划国际合作资助项目(2011B050300019); 广州市教育局羊城学者资助项目(12A007G)

作者简介: 杨奕(1987年生), 女; 研究方向: 复合材料的断裂机理; 通讯作者: 张亚芳; E-mail: zhangyafang2004@163.com

质、钢筋、钢筋与砂浆间界面的四相复合材料，建立了单筋中心拔出试验数值模型，运用基于 Weibull 分布函数的随机细观模型对各组成相材料的物理性质进行非均匀赋值<sup>[5]</sup>，利用有限元方法进行应力分析，实现了单筋拔出试件自裂纹萌生、扩展直至破坏的全过程。

## 1 物理实验

### 1.1 试件

本物理实验参考单丝拔出试验方法，试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm，埋入钢筋采用 Q235 直径为 6 mm 的光圆钢筋，钢筋埋深（即黏结段长度）分别为 3*d*, 5*d*, 8*d*, 10*d*（其中 *d* 为钢筋直径），非黏结段用塑料胶套管套住，避免两端发生局部破坏影响试验结果，如图 1 所示。混凝土设计强度为 C30。混凝土配合比见表 2，试验中所用原材料如下：① 水泥：P. C32.5R 复合硅酸盐水泥；② 粗骨料：碎石，粒径 5 ~ 10 mm；③ 细骨料：优质河沙，中砂。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Proportioning of concrete kg/m<sup>3</sup>

水泥	水	砂子	石子	水灰比
461	175	512	1 252	0.38

### 1.2 实验装置

本拉拔实验装置如图 1 所示。采用 SANS 微机控制电液伺服万能试验机进行加载，加载速率为 1 mm/min，得到拔出力 - 拔出位移的数据。试件表面设置两个 AE 传感器来采集 AE 信号，得到实验过程中的 AE 相关数据。声发射实验采用美国物理声学公司（PAC）的 μSAMOS 系统。根据文献[6]并进行测试后，最终设置本次混凝土拔出试验阈值设置为 40 dB，时间参数 PDT（峰值鉴别时间）为 150 μs，HDT（撞击鉴别时间）为 300 μs，HLT（撞击闭锁时间）为 500 μs。

### 1.3 实验结果与分析

1.3.1 破坏结果 物理实验过程中，光圆钢筋拔出试件均表现为一种破坏形式：钢筋从混凝土中直接拔出，发生拔出破坏。全部黏结长度为 3*d*, 5*d*, 8*d*, 10*d* 的光圆钢筋从混凝土基体中拔出，混凝土基体未裂开，光圆钢筋也没有被拉断，直到实验结束，最后由于光圆钢筋从混凝土中被拔出而破坏。整个破坏过程大约持续 10 s 左右，拔出力在 2 kN 以下。

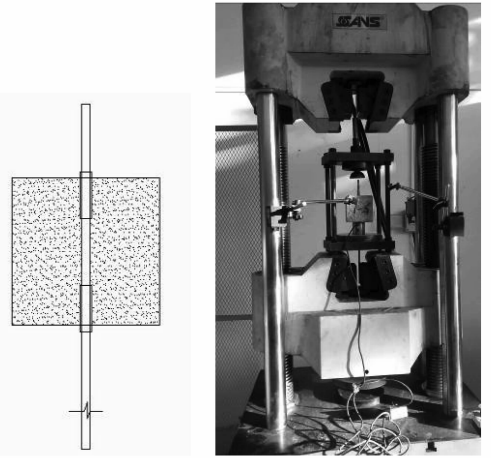


图 1 试件示意图及实验装置图

Fig. 1 Specimen and testing apparatus

1.3.2 声发射结果分析 拔出实验的声发射结果可以反应出光圆钢筋拔出的全过程。本实验所用的声发射参数包括计数、计数累计、能量、能量累计随时间的变化<sup>[7]</sup>。声发射计数（振铃计数）是声发射信号超过某一设定门限阈值的次数。拔出实验的声发射结果可以反映光圆钢筋拔出的全过程。声发射能量则反映事件的相对能量或强度。

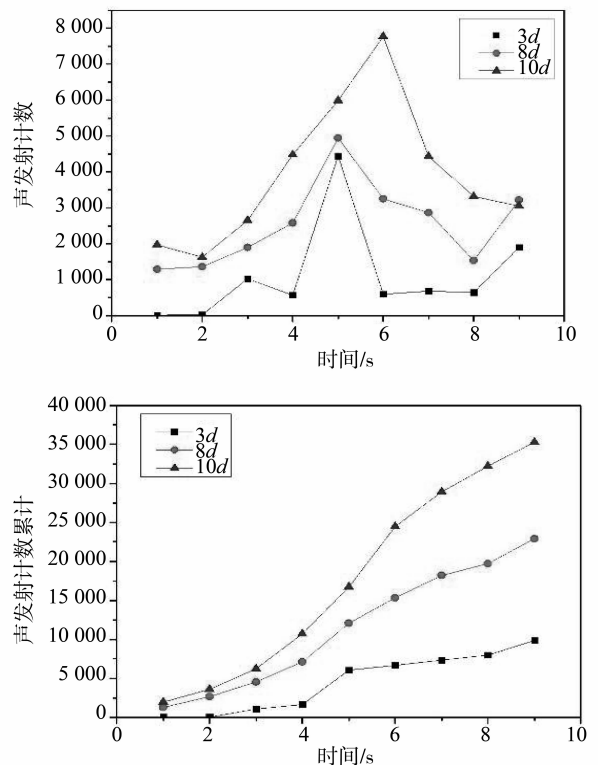


图 2 黏结长度为 3*d*, 8*d*, 10*d* 试件的声发射计数累计 - 时间曲线

Fig. 2 Curves of AE count-time of specimens with 3 *d*, 8 *d*, 10 *d*

声发射计数累计 - 时间曲线图如图 2 所示。对于声发射计数 - 时间曲线图, 在加载初期, 声发射信号释放不明显; 当达到极限拔出强度, 声发射计数都达到最大值, 试件因钢筋的拔出而破坏, 继续加载后, 声发射信号出现突降现象。从图 2 的结果可以看出, 在试件破坏时, 有明显的声发射数量的突然增加; 黏结长度越大, 声发射信号越明显, 声发射的计数越多。声发射过程中能量的释放与声发射计数呈正相关, 因此, 图 2 也反映了声发射能量的变化趋势。

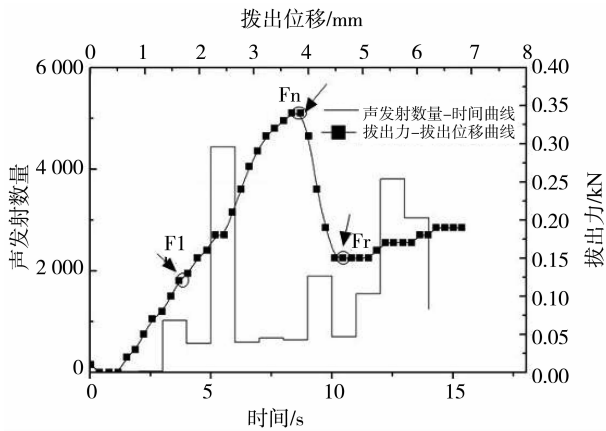


图 3 黏结长度  $3d$  光圆钢筋声发射数量与拔出力关系  
Fig. 3 Relationship between AE account and pull-put load

对黏结长度为  $3d$  试件的物理实验结果进行分析, 如图 3 所示。黏结长度为  $3d$  的光圆钢筋试块的拔出力 - 拔出位移曲线与声发射数量的对应关系, 其中水平折线为声发射随时间的变化曲线, 而对应的拔出力 - 拔出位移曲线是同时测得的数据, 与文献 [8] 得到试验结果类似。从拔出力 - 拔出位移曲线可以看出, 光圆钢筋拔出的过程大致可以分为四个阶段<sup>[8]</sup>: ① 线性阶段。从起点到  $F_l$ , 此阶段拔出力和拔出位移呈明显的线性关系, 钢筋与混凝土完全黏结, 也称完全黏结阶段。声发射信号主要来自于加载初期的干扰信号以及混凝土的微损伤; ② 非线性上升段。从  $F_l$  到  $F_n$ , 此阶段随着荷载的增加, 开始出现钢筋局部脱黏, 出现大量声发射信号, 拔出力达到最大, 同时, 声发射数量也最多。黏结长度越长, 光圆钢筋拔出力越大, 声发射信号越多; ③ 下降段。此阶段从  $F_n$  到  $F_r$ , 继续加载, 拔出力迅速下降, 声发射信号迅速衰减。此时, 钢筋与混凝土之间已经接近完全脱黏。④ 残余黏结阶段。在拔出力迅速下降以后, 钢筋与混凝土完全脱黏。此阶段钢筋与混凝土之间的摩擦力接

近稳定, 甚至稍微有些上升, 由于内部的拥塞效应, 产生较多的声发射数量, 但信号比较弱。由以上分析可知, 对于整个拔出试验过程中, 声发射数量 - 时间曲线同拔出力 - 拔出位移曲线有着相对良好的对应关系, 并且通过声发射信号可以对拔出试验的破坏做出有效的监测和预警。

## 2 单筋拉拔的数值模拟

到目前为止, 也有学者尝试用数值模拟的方法进行光圆钢筋拔出的研究<sup>[9-12]</sup>, 取得一些成果。但从细观角度出发, 综合考虑材料的非均匀性和骨料对拔出过程的影响, 尤其将钢筋与混凝土间的界面作为单独材料相的研究成果还不多见。本文从细观角度实现了单筋拔出试验的整个数值模拟过程, 数值模型中考虑了钢筋与砂浆之间的界面, 为了更符合实际情况, 各项材料参数根据 Weibull 分布进行非均匀赋值。

材料各相参数如表 2 所示<sup>[13]</sup>。

表 2 数值模型材料各相参数<sup>1)</sup>

Table 2 Mechanical parameters of the numerical model

组分	弹性模量/MPa	极限抗拉强度/MPa	泊松比
砂浆	27 300 (2)	155 (2)	0.25
骨料	80 000 (6)	500 (6)	0.3
界面	4 500 (1.5)	37 (1.5)	0.3
钢筋	210 000 (10)	400 (10)	0.3

1) 括号内的数值是材料均质度, 定义了 Weibull 分布密度函数的形状, 该值越大表明相应的材料越均匀

二维模型尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 共划分为 99 000 个单元, 保持其它参数不变, 将钢筋黏结长度分别取值为  $3d, 5d, 8d$  和  $10d$  (其中  $d$  为钢筋直径,  $d = 6 \text{ mm}$ ), 分析其对材料试件的影响。

### 2.1 损伤破坏过程

本文中数值模拟了四组不同黏结长度的试件, 由于篇幅所限, 只列出黏结长度为  $10d$  光圆钢筋拔出试件破坏的过程 (见图 4)。由图可知, 加载初期首先在基体薄弱环节 (即钢筋与混凝土界面处) 出现微损伤。逐渐加载下, 损伤单元不断增加, 最终连接聚焦, 在钢筋的埋入端 (即上端) 最先出现裂纹。继续加载, 裂纹沿着钢筋与混凝土的界面不断发展, 同时钢筋埋置端也开始出现裂纹。当两端裂纹连接之后, 形成沿界面方向的贯通裂纹。随着荷载的进一步增加, 裂纹向砂浆基体中薄弱的单元发展, 在基体中形成裂缝, 埋入端出现空腔, 试

件破坏。对比四种不同黏结长度的试件发现，试件破坏都是钢筋从基体中拔出破坏，这与物理实验结果相一致。黏结长度只影响试件的破坏时间，对破坏现象并没有太大影响<sup>[14]</sup>。从损伤破坏现象还可以看出，界面左右两侧的破坏形态并不完全相同，这体现了材料的非均匀特性，也更加真实反映了材料的实际情况。

### 2.2 模拟结果与讨论

在本数值模拟中，用损伤单元数来表征声发射次数，模拟非均匀混凝土材料受力后的声发射规律<sup>[15]</sup>。图 5 为不同黏结长度试件声发射次数 - 加载步 - 荷载图，从中可以看出光圆钢筋试件的四个

发展过程。加载初期，声发射次数随着加载步长的增加而增加，当混凝土试件破坏，达到峰值荷载，声发射数也达到最大，钢筋脱黏以后，声发射信号逐渐减弱，直到试件完全破坏，试验结束。随着黏结长度的增加，声发射数量 - 加载步曲线的峰值向横轴右侧移动，即峰值越来越大。说明黏结长度越大，钢筋脱黏的声发射信号越强，对应的峰值荷载（即拔出力）越大。但峰值荷载和声发射次数的最大值并不是完全对应的，声发射信号稍微有一些滞后。这主要是由于钢筋在拔出过程中，并不是达到峰值荷载就很快脱黏，而是相对有一个延迟的过程。

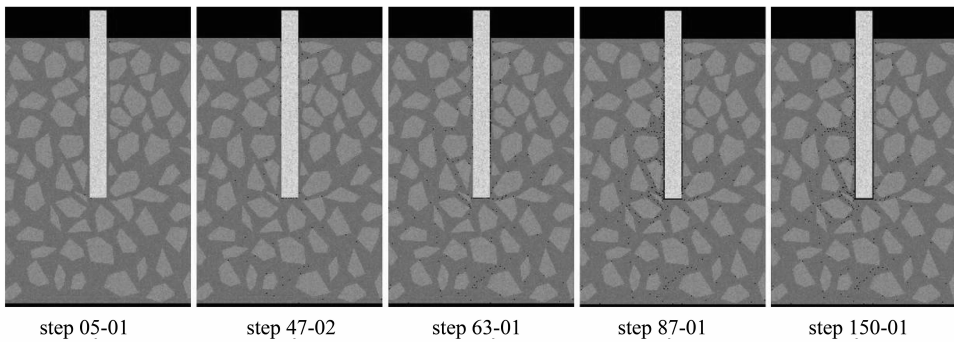


图 4 黏结长度为 10d 光圆钢筋单筋拔出试件破坏过程  
Fig. 4 Damage processes of pull-out test with 10d bond length

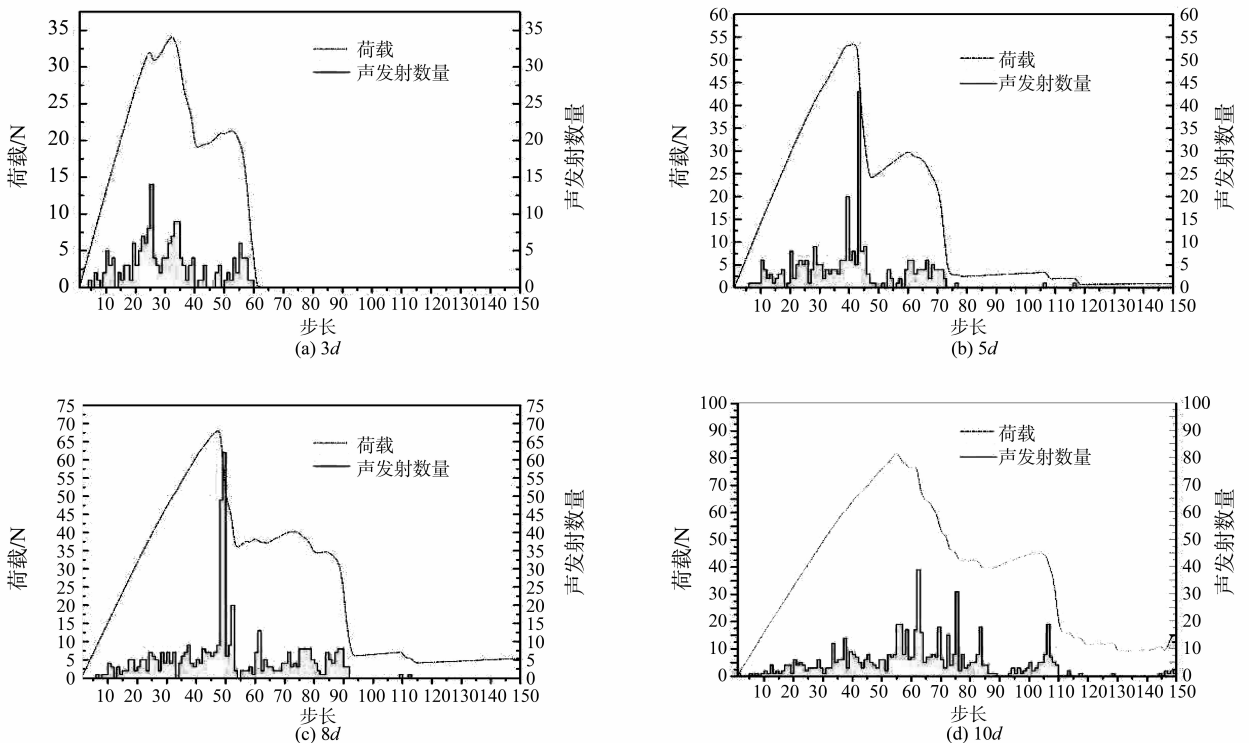


图 5 试件声发射次数 - 加载步 - 荷载曲线图

Fig. 5 AE-Load relationship for all specimens

实际物理实验很难直接获得钢筋与混凝土界面的应力传递和失效过程,而数值模拟却可以实现。通常认为界面应力传递是通过界面剪应力完成,界面脱黏往往出现在最大剪应力或强度最弱单元处,当钢筋的拔出力大于钢筋与混凝土界面的黏结力时,界面开始脱黏,在整个脱黏过程中,界面剪应力发生变化<sup>[16]</sup>。提取钢筋与混凝土两侧界面单元信息,通过计算可以得到钢筋左右两侧界面各加载步的平均剪应力。为了能清晰观察到剪应力的分布规律,在达到峰值荷载时,取钢筋两侧界面并沿钢筋深度分布的剪应力,横轴左边为埋入端,横轴右边为埋置端(见图6)。可以看出,左右两侧的平均剪应力并不完全对称,说明材料的不均匀性对材料力学性能的影响<sup>[17]</sup>。由前文可知,裂纹最先出现在埋入端,拔出力需要克服界面黏结力和摩擦力。界面完全脱黏后,钢筋与混凝土界面的剪应力减小,钢筋的拔出只克服界面摩擦力。越接近埋置端,剪应力越大,剪应力最大值出现在界面左侧接近埋置端的位置,埋入端及埋置端剪应力大于中间的剪应力,当长径比 $l/d > 5$ 时(见图6)大致呈凹形分布。这与Farhad Aslani等<sup>[18-19]</sup>对钢纤维单丝拔出试验及数值试验得到的界面剪应力沿界面分布有类似的趋势。

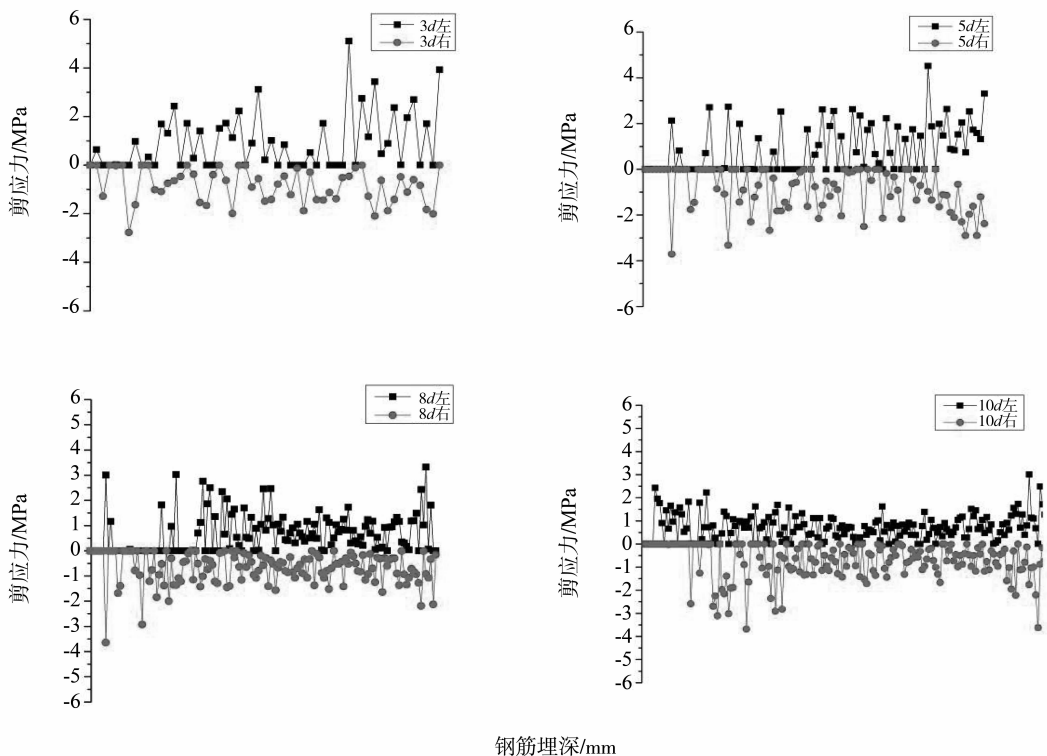


图6 各组试件拔出力最大时界面剪应力分布(正为界面左侧,负为界面右侧)

Fig. 6 Shear stress distribution along interface when peak load is reached

由图7可以得出,拔出力随着 $d/l$ 的增加而增加,即黏结长度越大,拔出力越大。图8说明 $d/l$ 越大界面最大剪应力反而越小, $d/l < 8$ 时, $d/l$ 对界面最大剪应力的影响显著,而当 $d/l > 8$ 时, $d/l$ 对界面最大剪应力的影响趋于平稳。

### 3 结论

通过以上分析,总结物理实验和数值模拟结果,可得到以下结论:

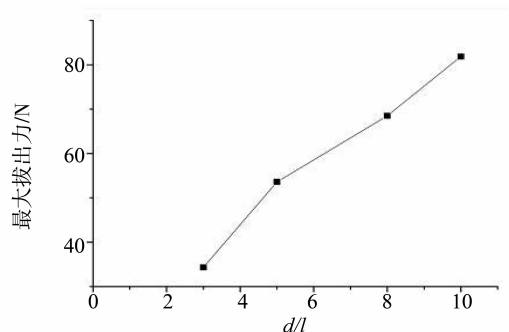
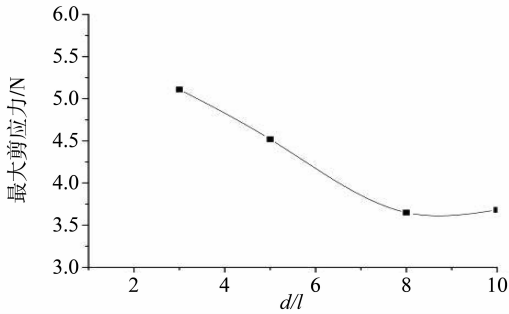


图7 最大拔出力与 $d/l$ 关系曲线

Fig. 4 The peak load vs.  $d/l$

图 8 界面最大剪应力与  $d/l$  关系曲线Fig. 8 Shearing strength vs.  $d/l$ 

1) 说明黏结长度对光圆钢筋拔出的整个破坏过程影响不大, 试件的破坏形式均为光圆钢筋从混凝土基体中拔出而破坏; 但黏结长度越大, 拔出力越大。

2) 光圆钢筋拔出的声发射监测大致分为三个阶段: 第一阶段, 加载初期混凝土的微损伤释放的少量声发射信号的数量; 第二阶段, 光圆钢筋拔出, 释放大量的声发射数量; 第三阶段, 释放的少量声发射数量来源于光圆钢筋与混凝土之间的摩擦力。因此, 钢筋拔出过程中声发射信号的释放可以作为试件破坏的依据。同时, 钢筋拔出过程中释放的声发射能量对时间的变化也具有类似的规律。这说明了声发射能量与计数之间具有一致性。

3) 通过对比物理实验和数值试验的结果, 可以发现, RFPA<sup>2D</sup> 软件的模拟结果与物理实验结果趋势吻合良好, RFPA<sup>2D</sup> 模拟的损伤破坏过程的模拟对于认识拔出试验的过程具有较好的有效性。

## 参考文献:

- [1] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [2] ARTHUR H N. Internal measurement of bond-slip [J]. ACI Journal, 1972, 69(7): 439 - 441.
- [3] SAEED M N. Internal measurement of bond stress-slip relationship in reinforced concrete [J]. ACI Journal, 1979, 76(1): 19 - 46.
- [4] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [5] Y L O'DOWD N P, BUSSO E P, WEBSTER G A. Weibull stress solutions for 2 - D cracks in elastic and elastic-plastic materials[J]. International Journal of Fracture, 1998, 89 (3): 245 - 268.
- [6] 欧阳利军, 陆洲导, 赵艳林. 混凝土结构声发射检测参数设置研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(5): 37 - 41.
- [7] 骆英, 于长煦, 顾爱军. 应用声发射技术的钢筋与混凝土黏结滑移特性研究[J]. 实验力学, 2011, 26(8): 343 - 349.
- [8] 牟晓光, 王清湘, 司炳君. 钢筋与混凝土黏结试验及有限元模拟[J]. 计算力学学报, 2007, 24(3): 379 - 384.
- [9] 赵琳, 李建波, 付兵. 光面钢筋拉拔试验细观数值模拟研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 104 - 108.
- [10] 徐育才. 钢筋锈蚀拉拔试验及其黏结性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [11] 刘佩玺, 徐永清, 刘福胜. 钢筋混凝土结构黏结滑移分析在 ANSYS 中的实现[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2007, 38(1): 125 - 130.
- [12] NAAMAN A E, NAJM H. Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete [J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(2): 135 - 145.
- [13] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [14] GAMBARAVA P G, ROSAT G P. Bond and splitting in bar pull-out: Behavioural laws and concrete cover role [J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 49: 99 - 110.
- [15] WANG S H, TANG C N, ZHU W C. Analysis of concrete fracture evolution by simulation and acoustic emission [J]. Key Engineering Materials, 2003, 243/244: 363 - 368.
- [16] 赵燕茹, 邢永明, 黄建永, 等. 数字图像相关方法在纤维混凝土拉拔试验中的应用[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 169 - 175.
- [17] 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]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(6): 69 - 80.
- [18] ASLANI F, NEJADI S. Bond characteristics of steel fiber and deformed reinforcing steel bar embedded in steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFRSCC) [J]. Central European Journal of Engineering, 2012, 2(3): 445 - 470.
- [19] 齐雷, 张亚芳, 陈树坚. 纤维增强脆性基复合材料界面脱黏过程的数值模拟[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(6): 48 - 51.