

# 变形钢筋与铁尾矿砂混凝土粘结性能试验研究

王秋维<sup>1</sup>, 张月坤<sup>1</sup>, 康洪震<sup>2</sup>, 董磊<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 唐山学院土木工程系, 河北 唐山 063000;  
3. 中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)

**摘要:** 以铁尾矿砂代替天然河砂拌制混凝土, 通过拔出试验研究变形钢筋与铁尾矿砂混凝土之间的粘结性能. 制作12组铁尾矿砂混凝土拔出试件, 分析其不同混凝土强度等级(C20、C30、C40)和不同钢筋直径(12 mm、16 mm、20 mm、25 mm)下的平均粘结应力( $\tau$ )-滑移( $s$ )曲线, 在此基础上研究变形钢筋与铁尾矿砂混凝土的粘结性能, 并与普通混凝土相对应的性能进行比较. 试验结果表明, 钢筋与铁尾矿砂混凝土的粘结性能略优于普通混凝土, 铁尾矿砂可以替代普通河砂制作混凝土, 所得结论为铁尾矿砂的工程应用提供理论参考.

**关键词:** 铁尾矿砂混凝土; 变形钢筋; 拔出试验; 滑移曲线; 粘结性能

**中图分类号:** TU317+9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)06-0830-04

## Experimental research on bond behavior between deformed bars and ferrous mill tailing concrete

WANG Qiuwei<sup>1</sup>, ZHANG Yuekun<sup>1</sup>, KANG Hongzhen<sup>2</sup>, DONG Lei<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Department of Civil Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, China;

3. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The ferrous mill tailing has been used to replace river sand to mix concrete, and the bond behavior between deformed bars and ferrous mill tailing concrete was studied by a series of pulling-out test in the paper. Twelve groups of the ferrous mill tailing concrete specimens with different strength grades (C20, C30 and C40) and diameters (12 mm, 16 mm, 20 mm and 25 mm) were made, and the average bond stress ( $\tau$ ) - slip ( $s$ ) curves were obtained according to data collected in the experiment. Based on this, the bond behavior of deformed bars and ferrous mill tailing concrete are analyzed, which has also been compared with the corresponding behavior of ordinary concrete. The experimental research indicates that the bond capability of deformed bars and ferrous mill tailing concrete is slightly better than that of the ordinary concrete. Therefore, ferrous mill tailing could fully replace river sand to make concrete, which can provide a theoretical reference for engineering applications.

**Key words:** ferrous mill tailing concrete; deformed bars; pulling-out test; the slip curve; bond behavior

随着我国经济建设的快速发展, 工业与民用建筑的数量越来越多, 因此大量工程导致对混凝土的需求量迅猛增长, 目前全国建筑用砂年均已达到20亿吨<sup>[1]</sup>. 建筑用砂常为河砂, 河砂的大量开采导致生态环境恶化, 多个城市已禁止开采河砂. 而同时, 我国各地矿山产生了大量的尾矿, 废弃的尾矿不仅占用大量耕地, 还污染环境. 若用铁尾矿砂代替天然河砂配制混凝土, 则既能够解决天然河砂短缺的问题, 又可以解决尾矿的危害.

钢筋与混凝土的粘结强度直接影响钢筋混凝土结构的安全性和耐久性. 目前, 国内外对普通河砂混凝土的材料性能和其与钢筋的粘结性能进行了较多研究<sup>[2-4]</sup>, 而对铁尾矿砂混凝土的研究还停留在材料性能方面<sup>[5-6]</sup>, 有关钢筋与铁尾矿砂混凝土粘结性能的研究报道较少.

在此背景下, 本文采用铁尾矿砂代替天然河砂拌制混凝土, 通过拔出试验研究变形钢筋与铁尾矿砂混凝土的粘结性能, 并与普通混凝土相对应的性能进行比较, 以便为铁尾矿砂的工程应用提供理论依据.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

拔出试验包括铁尾矿砂混凝土和普通混凝土两种类型. 设计试件的变化因素包括混凝土强度等级(C20、C30和C40)和钢筋直径 $d$  (12 mm、16 mm、20 mm和25 mm), 钢筋植入长度为 $5d$ , 立方体试件边长为 $10d$ . 每组试件6个, 共24组试件. 试件的设计参数如表1所示, 试件的尺寸及现场制作如图1所示.

收稿日期: 2015-07-13

修改稿日期: 2015-12-01

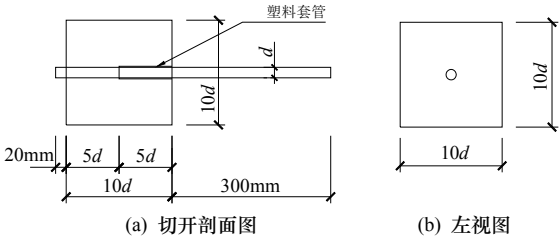
基金项目: 国家自然科学基金项目(51378331); 陕西省教育厅专项科研基金项目(2013JK0984)

作者简介: 王秋维(1982-), 女, 博士, 副教授, 从事钢与混凝土组合结构方面的研究. E-mail: wqw0815@126.com

表1 试件类型及尺寸  
Tab.1 Type and size of the specimens

试件编号	截面尺寸/mm <sup>3</sup>	钢筋植入长度/mm	数量/个
C2012P	120×120×120	60	6
C3012P	120×120×120	60	6
C4012P	120×120×120	60	6
C2016P	160×160×160	80	6
C3016P	160×160×160	80	6
C4016P	160×160×160	80	6
C2020P	200×200×200	100	6
C3020P	200×200×200	100	6
C4020P	200×200×200	100	6
C2025P	250×250×250	125	6
C3025P	250×250×250	125	6
C4025P	250×250×250	125	6
C2012W	120×120×120	60	6
C3012W	120×120×120	60	6
C4012W	120×120×120	60	6
C2016W	160×160×160	80	6
C3016W	160×160×160	80	6
C4016W	160×160×160	80	6
C2020W	200×200×200	100	6
C3020W	200×200×200	100	6
C4020W	200×200×200	100	6
C2025W	250×250×250	125	6
C3025W	250×250×250	125	6
C4025W	250×250×250	125	6

注: 试件编号中, C20、C30、C40表示混凝土强度等级, 12、16、20和25表示钢筋直径, P和W分别表示普通混凝土和铁尾矿砂混凝土。



(a) 切开剖面图 (b) 左视图



(c) 试件现场制作

图1 试件尺寸及现场制作  
Fig.1 Specimen size and field production

1.2 铁尾矿砂混凝土原材料及配合比

铁尾矿砂混凝土由42.5R普通硅酸盐水泥、迁安铁尾矿砂(细度模数为2.20~2.80)、粒径为5~18 mm的花岗岩碎石、矿粉、I号粉煤灰和高效减水剂配制而成。

由于铁尾矿砂本身强度较低,根据JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[7]</sup>及GB 50119-2013《混凝土外加剂应用技术规范》<sup>[8]</sup>规定,适当地加入粉煤灰、外加剂及矿粉进行相应调整,其配合比详见表2。

表2 铁尾矿砂混凝土配合比/kg·m<sup>-3</sup>  
Tab.2 Mixture ratio of ferrous mill tailing concrete /kg·m<sup>-3</sup>

等级	水	水泥	铁尾矿砂	石	粉煤灰	矿粉	外加剂
C20	183	210	833	1 087	60	60	9.9
C30	180	255	788	1 089	80	65	12.4
C40	171	310	695	1 117	90	80	15.3

1.3 材料力学性能

钢材的材性依据国家标准GB/T 2975-1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》<sup>[9]</sup>进行取样及加工制作,对HRB400级钢筋进行拉伸试验,得到其力学性能指标如表3所示。采用商品混凝土,所有试件为同一批浇筑,自然养护。试验前对各种混凝土强度预留的6个边长为150 mm的标准立方体试块进行强度测试,测得普通混凝土和铁尾矿砂混凝土立方体抗压强度平均值如表4所示。

表3 钢材的力学性能  
Tab.3 Mechanical properties of steel

钢材种类	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E$ /MPa
HRB400	446.5	610.7	$2.1 \times 10^5$

表4 混凝土试块的强度指标  
Tab.4 Strength index of concrete samples

类别	混凝土强度等级	立方体抗压强度平均值/MPa
普通混凝土	C20	22.34
	C30	31.26
	C40	42.32
铁尾矿砂混凝土	C20	22.54
	C30	28.96
	C40	41.76

1.4 加载装置及量测内容

由液压设备控制拉拔式千斤顶提供试验所需的拉力,加载速度 $V_f=0.03d^2$ ( $d$ 为钢筋直径),加载装置如图2所示。在试件自由端安装千分表以测量钢筋自由端与混凝土的相对位移,采用CM-1L-24型数字静态应变仪采集钢筋的应变。



图2 加载装置  
Fig.2 The loading device

2 试验现象及分析

试件的破坏形态分为钢筋拔出和混凝土劈裂两类,如图3所示。普通河砂混凝土拉拔试件均发

生钢筋拔出破坏, 切开已破坏试件, 混凝土的咬合齿被剪断, 孔内壁形成较光滑的纵向擦痕, 钢筋的凹处完全被混凝土碎屑填满; 对于铁尾矿砂混凝土拉拔试件, 直径为25 mm时出现混凝土劈裂, 破坏时没有任何征兆, 并伴有声响, 其余试件的钢筋被拔出, 现象与普通混凝土试件相同。



(a) 钢筋拔出



(b) 混凝土劈裂

图3 试件破坏形态

Fig.3 The failure pattern of specimens

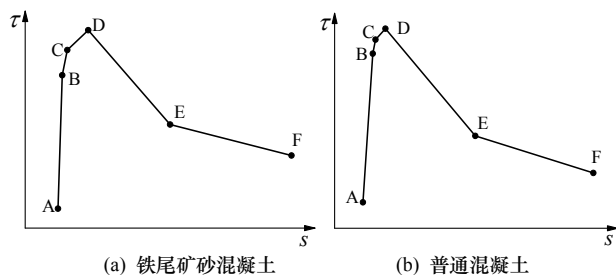
### 3 粘结滑移曲线比较及分析

整理试验数据, 可分别得到变形钢筋与铁尾矿砂混凝土和普通混凝土的平均粘结应力( $\tau$ )-滑移( $s$ )典型曲线, 其中平均粘结应力按照式(1)进行计算。

$$\tau = \frac{F}{\pi d l_a} \quad (1)$$

式中:  $\tau$ 为钢筋和混凝土的粘结应力;  $F$ 为外荷载大小;  $l_a$ 为钢筋埋入长度,  $l_a=5d$ 。

以试件C4016W和C4016P为例, 钢筋和铁尾矿砂混凝土的粘结滑移曲线与普通混凝土的相类似, 大致分为5个阶段: 微滑移段AB、滑移段BC、极值段CD、下降段DE和残余段EF段, 具体如图4所示。



(a) 铁尾矿砂混凝土

(b) 普通混凝土

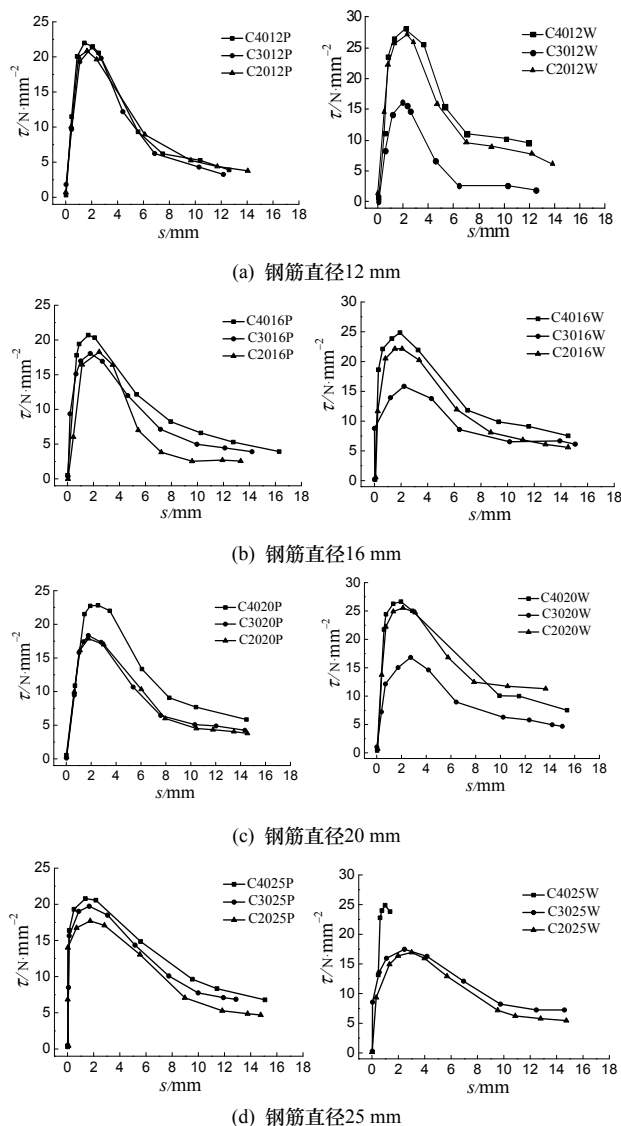
图4 粘结应力-滑移曲线

Fig.4 The bond stress-slippage curves

分析试验数据可知, 混凝土强度和钢筋直径对粘结应力( $\tau$ )-滑移( $s$ )曲线产生一定影响, 分别如图5和图6所示, 图中各试件的粘结应力和滑移值均为本组试件测试数据的平均值。

#### 3.1 混凝土强度

由图5可知, 在相同的钢筋直径下, 随着混凝土强度的提高, 大部分试件的极限粘结应力有所增大; 钢筋直径和混凝土强度相同时, 铁尾矿砂混凝土与钢筋的极限粘结应力比普通混凝土的略微提高。对于普通混凝土和铁尾矿砂混凝土而言, 当钢筋直径为20 mm时, 其在C30时的粘结应力比C20时有所降低, 分析原因可能是这几组试件在试验过程中塑料套管定位出现很大偏差, 导致变形钢筋粘结长度不足 $5d$ 。另外, 试件C4025W的粘结应力-滑移曲线未出现下降段, 这是由于此试件发生脆性破坏, 在极限粘结应力时突然劈裂, 导致加载结束。



(a) 钢筋直径12 mm

(b) 钢筋直径16 mm

(c) 钢筋直径20 mm

(d) 钢筋直径25 mm

图5 混凝土强度的影响

Fig.5 The influence of concrete strength on  $\tau$ - $s$  curves

### 3.2 钢筋直径

由图6可知,混凝土强度相同而钢筋直径变化时,铁尾矿砂和普通混凝土粘结滑移曲线的变化趋势基本相同.在相同的混凝土强度等级下,随着钢筋直径增大,大部分试件的极限粘结应力稍有降低,下降段也趋于平缓,例如钢筋直径为12 mm时,钢筋与混凝土的粘结能力与其他试件相比明显偏弱.钢筋直径和混凝土强度相同时,铁尾矿砂混凝土与钢筋的极限粘结应力比普通混凝土的有所提高.当混凝土强度为C30时,钢筋与铁尾矿砂混凝土的粘结强度比普通混凝土的偏低,分析原因可能是试验过程中出现失误,导致变形钢筋的实际粘结长度不足 $5d$ .

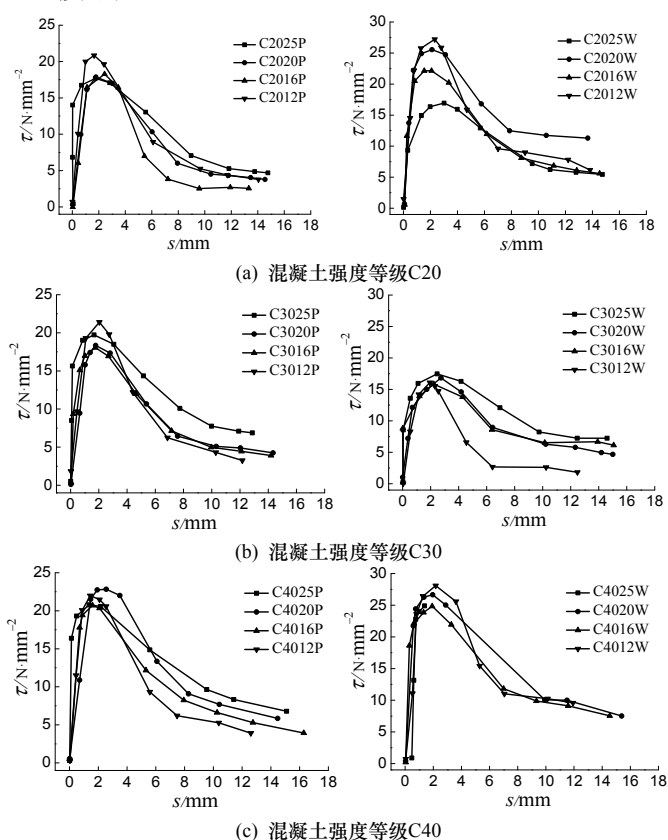


图6 钢筋直径的影响

Fig.6 The influence of bar diameter on  $\tau$ -s curves

总体而言,相同条件下,钢筋与铁尾矿砂混凝土的极限粘结应力比普通混凝土有所提高.可见,铁尾矿砂混凝土与变形钢筋的粘结性能优于普通混凝土,这表明在同等条件下,铁尾矿砂可以替代天然河砂拌制混凝土.

## 4 结论

(1) 普通河砂混凝土拉拔试件均发生钢筋拔出破坏;铁尾矿砂混凝土拉拔试件大部分为钢筋拔出破坏,直径为25 mm的试件则出现混凝土劈裂,破坏时没有征兆,并伴有声响.

(2) 混凝土强度和钢筋直径对钢筋与混凝土的粘结性能产生一定影响:混凝土强度越高,极限粘结应力越高;随着钢筋直径增大,大部分试件的极限粘结应力稍有降低,下降段也趋于平缓.

(3) 相同条件下,钢筋与铁尾矿砂混凝土的极限粘结应力比普通混凝土的有所提高,从工程应用角度来说,铁尾矿砂可以代替普通河砂拌制混凝土.

## 参考文献 References

- [1] 陈家珑,方源兴.我国混凝土骨料的现状与问题[J].建筑技术,2005,36(1):23-25.  
CHEN Jialong, FANG Yuanxing. Present situation and problems of concrete aggregates in China [J]. Architecture Technology, 2005, 36(1): 23-25.
- [2] 徐有邻,沈文都,汪洪.钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J].建筑结构学报,1994,15(3):26-36.  
XU Youlin, SHEN Wendu, WANG Hong. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 26-36.
- [3] 赵羽习,金伟良.钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究[J].建筑结构学报,2002,23(1):32-37.  
ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Test study on bond stress-slip relationship of concrete and steel bar [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 32-37.
- [4] 郑晓燕.锈蚀钢筋与混凝土动态粘结性能研究[D].南京:河海大学,2004.  
ZHENG Xiaoyan. Research on dynamic bond behavior between corroded steel bar and concrete [D]. Nanjing: Hehai University, 2004.
- [5] 杨会娟.铁尾矿砂自密实混凝土耐久性能试验研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.  
YANG Huiju. Experimental Study on durability of iron mine tailings self-compacting concrete [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [6] 王光琦,康洪震,韩建强.铁尾矿砂混凝土强度与配制[J].河北联合大学学报,2015,37(2):107-110.  
WANG Guangqi, KANG Hongzhen, HAN Jianqiang. Strength of concrete with iron tailings and its preparation [J]. Journal of Hebei United University, 2015, 37(2): 107-110.
- [7] JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
JGJ 55-2011. Specification for mix proportion design of ordinary concrete [S]. Beijing: China Architectural and Building Press, 2011.
- [8] GB 50119-2003 混凝土外加剂应用技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.  
GB 50119-2003. Code for concrete admixture application [S]. Beijing: China Architectural and Building Press, 2003.
- [9] GB/T2975-1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S].北京:中国标准出版社,1998.  
GB/T2975-1998. Steel and steel products location and preparation of test pieces for mechanical testing [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.

(编辑 桂智刚)