

# 铁尾矿砂水泥土强度特性及固化机理研究

胡建林<sup>1,2</sup>, 高鹏飞<sup>1</sup>, 崔宏环<sup>1,2</sup>, 崔志远<sup>1</sup>, 吕星辰<sup>1</sup>

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 为了提高铁尾矿砂的综合利用率、改善水泥土的力学性能, 在水泥土中加入一定量铁尾矿砂, 通过无侧限抗压强度试验, 探究水泥掺量、铁尾矿砂掺量对水泥复合土强度的影响, 并采用比强度的方法分析二者对水泥复合土的强度贡献。试验结果表明: 水泥掺量对水泥复合土的强度影响显著, 在水泥掺量 8%~20% 范围内, 随着水泥掺量的增加, 水泥复合土的抗压强度呈线性增加, 但水泥水化效应对水泥复合土的强度贡献逐渐减小; 水泥复合土的抗压强度随铁尾矿砂的增加呈先增大后减小的趋势, 在掺量 20% 时强度达到峰值; 铁尾矿砂填充效应对水泥复合土的强度贡献主要体现在高水泥掺量下。

**关键词:** 水泥土; 力学特性; 铁尾矿砂; 增强效应

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)03-0338-07

## Study on strength characteristics and solidification mechanism of cement-soil of iron tailing sand

HU Jianlin<sup>1,2</sup>, GAO Pengfei<sup>1</sup>, CUI Honghuan<sup>1,2</sup>, CUI Zhiyuan<sup>1</sup>, LÜ Xingchen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Hebei Zhangjiakou 075000, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance of Hebei Province, Hebei Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** In order to improve the comprehensive utilization rate of iron tailings and improve the mechanical properties of cement soil. A certain amount of iron tailings is added to cement soil. Through the unconfined compressive strength test, the influence of cement content and iron tailings content on the strength characteristics of cement composite soil is explored, and the specific strength method is used to analyze the strength contribution of the two to cement composite soil. The test results show that the cement content has a significant influence on the strength of cement composite soil. In the range of 8%~20% cement content, the compressive strength of cement composite soil increases linearly with the increase of cement content, but the contribution of cement hydration effect to the strength of cement composite soil decreases gradually. The compressive strength of cement composite soil increases first and then decreases with the increase of iron tailings, and reaches the peak when the content is 20%. The contribution of iron tailings filling effect to the strength of cement composite soil is mainly reflected in the high cement content.

**Key words:** cement-soil; mechanical properties; iron tailings sand; enhancement effect

水泥土作为一种成熟的建筑材料被广泛应用于地基处理、基坑支护等工程中, 且取得了良好的工程经济效益<sup>[1]</sup>。但其强度较低, 后期变形较大等缺点制约着它的使用范围。为此, 国内外许多学者进行了大量的试验研究, 以求能提高水泥土的力学性能, 比较有效的方法为在水泥土中加入各种掺合料, 通过一系列物理或化学反应来提高水泥土的强度。KONG 等<sup>[2]</sup>对 SiO<sub>2</sub> 固化黄土进行

了抗压强度试验, 得出掺入少量 SiO<sub>2</sub> 可以提高固化土的抗压强度。DUAN X L 等<sup>[3]</sup>对粉煤灰水泥土进行了抗压强度试验, 结果表明: 存在一个最优粉煤灰掺量 6% 使水泥土的抗压强度最大。R BO 等<sup>[4]</sup>指出纤维对水泥土的力学性能有改善效果, 适量纤维的加入能显著提高水泥土的塑性和侧向约束能力。Omid Amini 等<sup>[5]</sup>通过对镁渣水泥土的力学试验和微观试验得出镁渣可以改善土体

收稿日期: 2021-07-09

修改稿日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51878242); 河北省高校基本科研业务费项目(2021QNJS02); 张家口市科技计划财政基金资助项目(1911035A)

第一作者: 胡建林(1986—), 男, 硕士, 副教授。主要从事地基处理方面的研究。E-mail: hjl185@126.com

通信作者: 高鹏飞(1997—), 男, 硕士生。主要从事地基处理方面的研究。E-mail: 819211266@qq.com

内部结构, 从而增强水泥土的抗压强度. 王立峰等<sup>[6]</sup>对纳米硅水泥土进行了三轴压缩试验, 得出把纳米硅粉作为水泥土掺合料可以改善水泥土的强度, 并且得出了影响水泥土强度显著性的因素依次为: 水泥加入量、围压以及纳米硅加入量. 王凤池等<sup>[7]</sup>通过在水泥土中加入部分橡胶粉进行了无侧限抗压强度试验, 结果表明: 加入一定量橡胶粉可以改变水泥土在塑性阶段的变形, 但随着橡胶粉的增加, 水泥土的强度会持续降低. 夏永杰等<sup>[8]</sup>通过对掺废弃钢渣水泥土抗剪强度的研究, 得出废弃钢渣水泥土的应力应变曲线有明显的弹塑性, 其破坏模式为脆性破坏, 并指出钢渣在 10% 掺量时水泥复合土的抗剪强度达到最大值; 韩鹏举等<sup>[9]</sup>对掺硫酸钠水泥土进行了抗压强度试验, 得出用硫酸钠溶液制作水泥土试件可以改善水泥土的强度, 水泥土的强度随硫酸钠浓度的增加呈先增加后减小的趋势. 赫文秀等<sup>[10-13]</sup>对掺砂水泥土做了一系列试验研究, 结果表明: 在水泥土中掺入一定量河砂可以有效提高水泥土的抗压强度及压缩特性, 掺砂后水泥土的抗压强度比素水泥土强度提高 20% 左右, 并指出素土中含砂量的大小对水泥土强度的影响较大. 以上研究表明, 在水泥土中加入一些掺合料可以有效改善水泥土的力学性能, 但上述掺合料因造价较高或施工不便难以应用于实际工程中, 因此, 寻找一种易施工且经济性较高的掺合料是水泥土材料目前亟待解决的问题.

铁尾矿是冶金工业选矿之后残留的固体废弃物, 是目前工艺废弃物的重要组成部分之一<sup>[14]</sup>. 铁尾矿的堆砌, 不仅会占用大量的土地资源, 而且会产生一系列环境污染问题. 此外, 铁尾矿的大量堆弃势必产生大量的尾矿坝库, 这些尾矿坝库的维护、运行也会需要大量的费用<sup>[15]</sup>. 因此, 对于尾矿的二次利用是今后发展绿色环保生态的一大重要课题. 为此, 本文尝试在水泥土中掺入部分铁尾矿砂, 通过无侧限抗压强度试验, 探究水泥掺量、铁尾矿砂掺量对水泥复合土早期强度特性的影响, 并采用比强度及强度贡献率的方式来表征铁尾矿砂对水泥复合土的增强效应, 为后续试验及实际工程做一些有益的探索.

1 试验

1.1 试验材料

本次试验用土取自张家口市某施工现场粉质黏土, 土样的基本物理性质及颗粒级配如表 1、图 1 所示. 铁尾矿砂取自河北张家口某钢厂筛选后的颗粒废弃物, 其主要化学成分分析及颗粒级配如表 2、图 2 所示. 水泥采用金隅牌 P · S 32.5 矿渣

硅酸盐水泥, 水采用自来水.

表 1 土样的基本物理性质  
Tab. 1 Basic physical properties of soil samples

塑限/%	液限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g · cm <sup>-3</sup> )
13	29	16	13	1.81

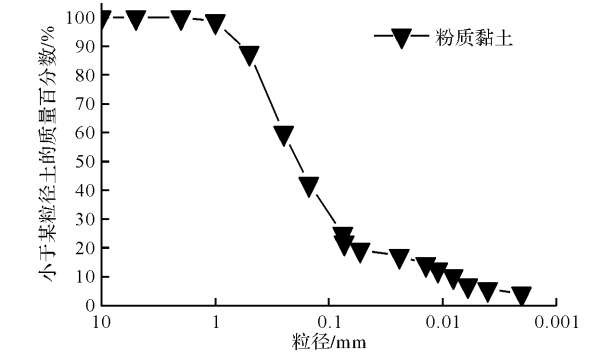


图 1 粉质黏土的颗粒级配曲线  
Fig. 1 Particle distribution curve of silty clay

表 2 铁尾矿砂的化学成分  
Tab. 2 Chemical composition of iron tailing sand

成分	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
含量/%	63.32	3.21	11.21	15.02	4.25	2.18	0.81

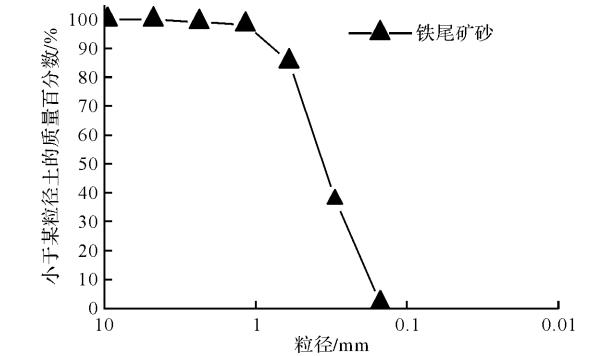


图 2 铁尾矿砂的颗粒级配曲线  
Fig. 2 Grain gradation curve of iron tailing sand

1.2 试验步骤

将铁尾矿砂过 2.36 mm 砂石筛, 去除铁尾矿中较大的颗粒杂质. 将粉质黏土过 2 mm 土壤筛并烘干备用. 试验过程包括试件制作、养护以及无侧限抗压强度试验. 参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)<sup>[16]</sup>的相关规定, 选用  $\phi 100 \times 100$  的钢型模具. 具体步骤如下:

- (1)通过击实试验确定不同水泥掺量下铁尾矿砂水泥复合土最优含水率以及最大干密度, 试件采用最优含水率制备;
- (2)将土料及铁尾矿砂混合, 喷水至最优含水率的 97%, 均匀搅拌后放入塑料袋中密封, 以保证含水率均匀, 24 h 后加入水泥和剩余 3% 含水率, 配置成铁尾矿砂水泥土混合料;
- (3)将混合料分三次装入钢型模具中, 通过静

压法制成  $\varphi 100 \times 100$  圆柱形试样, 之后进行脱模, 养护。每个掺量制做 6 个平行试件, 测试结果取其平均值;

(4) 将试件在养护前一天浸水 24 h, 之后在万能试验机上进行无侧限抗压强度试验, 加载速率为 1 mm/min.

1.3 试验方案及试验结果

采用内掺法, 选取水泥掺量为 8%、12%、16%、20%, 铁尾矿砂掺量为 0%、10%、20%、30%、40%, 各掺量计算公式如式(1)、式(2)所

示, 同时计算出水泥及铁尾矿砂质量占铁尾矿砂水泥复合土的质量百分比, 如表 3 所示. 压实度及龄期参考《公路路面基层施工技术细则》<sup>[17]</sup> (JTG/TF20-2015) 选取压实度为 95%, 龄期为 7 d, 试验方案及试验结果如表 4 所示.

$$\alpha_T = m_T / m_S \tag{1}$$

$$\alpha_C = m_C / m_S \tag{2}$$

式中:  $\alpha_T$  为铁尾矿砂掺量, %;  $\alpha_C$  为水泥掺量, %;  $m_C$ 、 $m_T$ 、 $m_S$  分别为水泥质量, kg、铁尾矿砂质量, kg、素土质量, kg.

表 3 各掺合料质量占水泥复合土质量百分比

Tab. 3 The mass percentage of each admixture in cement composite soil mass

水泥:铁尾矿:土	土/%	水泥/%	铁尾矿/%	水泥:铁尾矿:土	土/%	水泥/%	铁尾矿/%
8:0:100	92.6	7.4	0.0	16:0:100	86.2	13.8	0.0
8:10:100	84.7	6.8	8.5	16:10:100	79.4	12.7	7.9
8:20:100	78.1	6.3	15.6	16:20:100	73.5	11.8	14.7
8:30:100	72.5	5.8	21.7	16:30:100	68.5	11.0	20.5
8:40:100	67.6	5.4	27.0	16:40:100	64.1	10.3	25.6
12:0:100	89.3	10.7	0.0	20:0:100	83.3	16.7	0.0
12:10:100	82.0	9.8	8.2	20:10:100	76.9	15.4	7.7
12:20:100	75.8	9.1	15.2	20:20:100	71.4	14.3	14.3
12:30:100	70.4	8.5	21.1	20:30:100	66.7	13.3	20.0
12:40:100	65.8	7.9	26.3	20:40:100	62.5	12.5	25.0

表 4 铁尾矿砂水泥土试验方案及试验结果

Tab. 4 Cement soil test scheme and test results of iron tailing sand

水泥:铁尾矿:土	抗压强度/MPa	水泥:铁尾矿:土	抗压强度/MPa
8:0:100	1.89	16:0:100	2.42
8:10:100	2.1	16:10:100	2.78
8:20:100	2.29	16:20:100	3.42
8:30:100	1.39	16:30:100	2.08
8:40:100	1.06	16:40:100	1.83
12:0:100	2.2	20:0:100	2.57
12:10:100	2.43	20:10:100	3.06
12:20:100	2.89	20:20:100	3.89
12:30:100	1.76	20:30:100	2.49
12:40:100	1.45	20:40:100	2.18

度呈直线趋势上升时, 水泥掺量即处于反应区, 由此可以看出, 在水泥掺量 8%~20% 时, 其对铁尾矿砂水泥土的抗压强度影响显著.

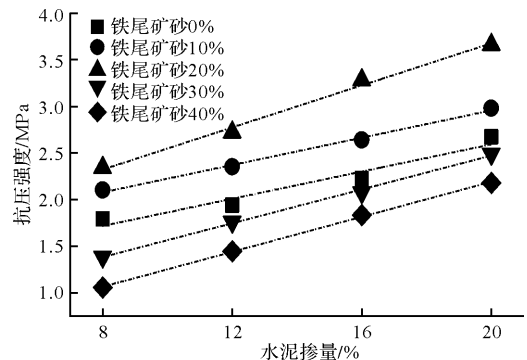


图 3 水泥与水泥复合土强度的关系

Fig. 3 Strength relationship between cement and cement composite soil

表 5 水泥与水泥复合土强度的拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of cement content and compressive strength of cement soil

参数	铁尾矿砂掺量/%				
	0	10	20	30	40
拟合公式	$y = a + bx$				
a	1.133	1.492	1.418	0.657	0.313
b	0.073	0.073	0.113	0.091	0.093
R <sup>2</sup>	0.924	0.992	0.991	0.997	0.999

2 结果与讨论

2.1 水泥及铁尾矿砂对铁尾矿砂水泥土抗压强度的影响

水泥掺量与抗压强度的关系曲线如图 3 所示, 由图 3 可以看出, 随着水泥掺量的增加, 铁尾矿砂水泥土的抗压强度均有所提高, 其强度增长规律均可用线性关系表示, 其拟合公式及相关系数如表 5 所示. K. Uddin<sup>[18]</sup> 等将水泥掺量划分为 3 个区域: 即诱导区、反应区和稳定区, 当水泥土强

图 4 为铁尾矿砂与水泥土抗压强度之间的关系, 由图可以看出, 在不同水泥掺量下, 水泥土的抗压强度随着铁尾矿砂掺量的增加呈先增加后减小的趋势. 因此, 加入适量的铁尾矿砂可以提高水泥土的抗压强度, 但当铁尾矿砂超过一定掺量时, 水泥土的抗压强度呈下降趋势, 这是因为过量的铁尾矿砂会替代部分黏土颗粒, 使颗粒间的粘聚力减小, 从而导致其强度降低. 总的来说, 在本次研究的水泥掺量下, 存在一个最优掺砂量 20%, 使铁尾矿砂水泥土的抗压强度最高.

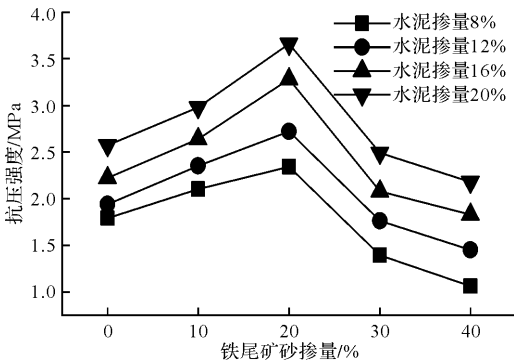


图 4 铁尾矿砂与水泥土强度的关系

Fig. 4 Relationship between iron tailing sand and soil-cement strength

2.2 铁尾矿砂水泥土强度增强效应分析

铁尾矿砂水泥土的强度主要由水泥水化效应产生的强度及铁尾矿砂填充效应产生的强度共同耦合而来. 为分析单一效应对水泥复合土强度的影响, 采用比强度及强度贡献率<sup>[19]</sup>来表征水泥水化效应及填充效应对水泥复合土的强度贡献. 首先, 定义 1% 的单位掺料对水泥土的强度贡献称为水泥土中该掺料的比强度. 其公式如下.

$$K=U/R \tag{3}$$

式中:  $K$  表示水泥土中某掺合料的比强度;  $U$  表示在某掺合料加入后水泥土的实测抗压强度, MPa;  $R$  为该掺合料质量占水泥土的质量, %.

当水泥土中仅有水泥掺合料时, 其强度由水泥水化效应提供, 此时可以通过式(4)计算出水泥复合土中水泥水化效应比强度; 当水泥复合土中存在水泥及铁尾矿砂两种掺合料时, 水泥复合土的强度主要由水泥水化效应产生的强度和铁尾矿砂填充效应产生的强度共同构成. 此时, 可以通过式(5)、(6)、(7)计算出铁尾矿砂填充效应比强度及铁尾矿砂填充效应占复合效应的强度贡献百分比, 其公式如下.

$$K_{\Delta i}=\frac{U_{\Delta i}}{R_{\Delta i}} \tag{4}$$

$$K_{(i,j)}=\frac{U_{(i,j)}-K_{\Delta i}R_i}{R_j} \tag{5}$$

$$\omega_{(i,j)}=\frac{K_{(i,j)}R_j}{U_{(i,j)}} \tag{6}$$

$$T_{(i,j)}=\omega_{(i,j)}U_{(i,j)} \tag{7}$$

式中:  $K_{\Delta i}$  表示  $i$  水泥掺量下水泥水化效应比强度, MPa;  $K_{(i,j)}$  表示  $i$  水泥掺量,  $j$  铁尾矿砂掺量下, 铁尾矿砂填充效应比强度, MPa,  $i=8、12、16、20$ ,  $j=10、20、30、40$ ;  $U_{\Delta i}$  表示水化效应作用时, 水泥土的实测抗压强度, MPa;  $U_{(i,j)}$  表示复合效应作用时, 水泥复合土的实测抗压强度, MPa;  $R_i$  表示  $i$  水泥掺量时, 水泥质量占水泥土的总质量, %;  $R_j$  表示  $j$  铁尾矿砂掺量下, 铁尾矿砂质量占水泥复合土的质量, %; 其值列于表 3;  $\omega_{(i,j)}$  为铁尾矿砂填充效应强度贡献率, %;  $T_{(i,j)}$  为铁尾矿砂填充效应的强度贡献值;

以 8% 水泥掺量, 10% 铁尾矿砂掺量为例, 其计算示例如表 6 所示, 其余计算结果见表 7 及表 8.

表 6 铁尾矿砂水泥复合土各指标计算示例

Tab. 6 Calculation examples of indexes of iron tailing sand cement composite soil

指标名称	计算示例
水泥水化效应比强度/MPa	$k_8=\frac{U_8}{R_8}=\frac{1.89}{7.4}=0.255$
铁尾矿砂填充效应比强度/MPa	$k_{(8,10)}=\frac{U_{(8,10)}-K_{\Delta 8}\times R_8}{R_{10}}=\frac{2.1-0.255\times 6.8}{8.5}=0.044$
铁尾矿砂强度贡献率/%	$\omega_{(8,10)}=\frac{K_{(8,10)}\times R_{10}}{U_{(8,10)}}=\frac{0.044\times 8.5}{2.1}=17.6$
铁尾矿砂强度贡献值/MPa	$T_{(8,10)}=\omega_{(8,10)}\times U_{(8,10)}=0.178\times 2.1=0.374$

表 7 水泥复合土中水化效应及填充效应比强度

Tab. 7 Hydration effect and filling effect ratio strength in cement composite soil

水泥掺量/%	水泥水化效应比强度 $K_i$ /MPa	铁尾矿砂填充效应比强度 $K_j$ /MPa			
	$K_i$	$K_{10}$	$K_{20}$	$K_{30}$	$K_{40}$
8	0.255	0.044	0.045	-0.004	-0.012
12	0.205	0.050	0.068	0.001	-0.007
16	0.175	0.070	0.092	0.008	0.001
20	0.154	0.089	0.118	0.022	0.010

由图 5 和表 7 可以看出, 随着水泥掺量的增加, 水泥水化效应比强度呈不断减小趋势, 这

说明在本次研究的水泥掺量范围内,单位水泥水化效应对水泥土的强度贡献正在减小,同时也可以看出当水泥掺量达到一定程度时,继续增加水泥掺量,其强度虽然有所提高,但其单位强度的增长却在减小,水泥的经济效益大大被削弱。

图6、图7为铁尾矿砂填充效应比强度及强度贡献率。从图中可以看出,铁尾矿砂在10%到20%时,对水泥复合土的强度贡献呈正相关,且有增大的趋势。而铁尾矿砂在30%到40%时,只有在高水泥掺量(16%~20%)下,其强度贡献率为正相关,而在低水泥掺量(8%~12%)时,其强度贡献率为负相关。究其原因,可能与水泥复合

土内部的结构形成有关,当水泥掺量较低时,水泥的水化作用较低,此时加入适量铁尾矿砂可以有效填充复合土颗粒之间的孔隙,从而提高水泥土的强度,但当铁尾矿砂过多时,过量的铁尾矿砂处于游离松散状态,反而会使水泥复合土的强度降低。当水泥掺量较高时,一部分水化产物与土颗粒形成胶结混合体,多余的水化产物则会与硬度很大的铁尾矿砂胶结,形成一系列胶结体,同时,水泥水化产物还会形成水泥石硬凝骨架,这种骨架需要大量的铁尾矿砂来填充。此时,即使在高铁尾矿砂掺量下,其对水泥复合土的贡献仍为正值。

表8 水泥复合土中填充效应强度贡献率及强度贡献值

Tab. 8 Strength contribution rate and strength contribution value of filling effect in cement composite soil

水泥掺量/%	铁尾矿砂强度贡献率 $\omega_k$ /%				铁尾矿砂强度贡献值 $T_k$ /MPa			
	$\omega_{10}$	$\omega_{20}$	$\omega_{30}$	$\omega_{40}$	$T_{10}$	$T_{20}$	$T_{30}$	$T_{40}$
8	17.6	30.4	-6.4	-30.1	0.370	0.695	-0.089	-0.319
12	16.9	35.4	1.4	-11.8	0.410	1.023	0.025	-0.171
16	19.9	39.6	7.6	1.7	0.552	1.356	0.157	0.031
20	22.5	43.4	17.4	11.6	0.688	1.687	0.434	0.253

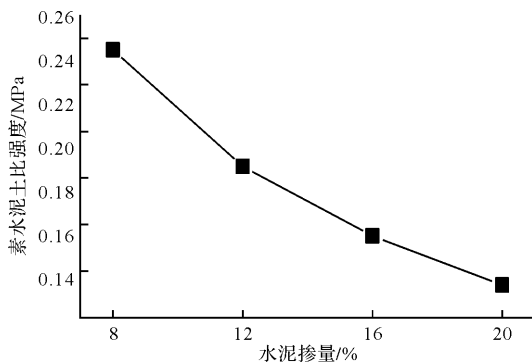


图5 水泥掺量与水化效应比强度关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between cement ratio and hydration effect specific strength

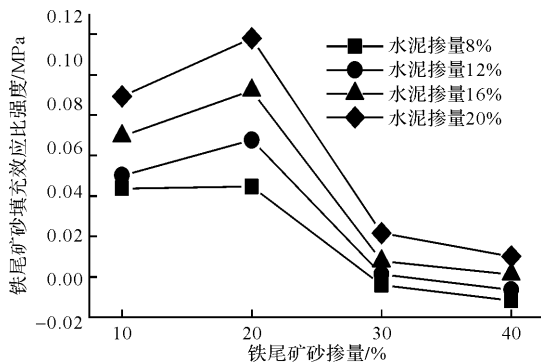


图6 铁尾矿砂掺量与填充效应比强度关系

Fig. 6 Relationship between iron tailing sand ratio and filling effect ratio strength

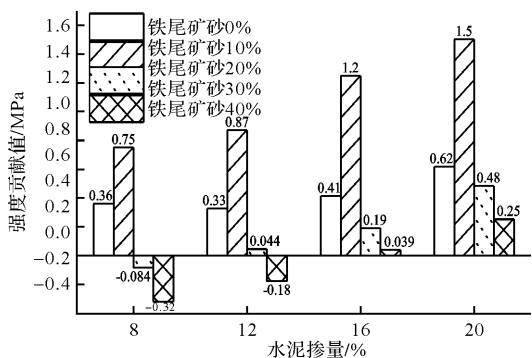
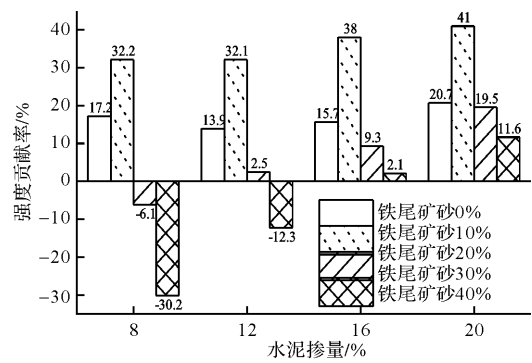


图7 铁尾矿砂对水泥复合土的强度贡献率以及强度贡献值

Fig. 7 Strength contribution rate and strength contribution value of iron tailing sand to cement composite soil

综上所述,可以把铁尾矿砂水泥土的强度贡献分为以下几个阶段:水泥水化效应主要贡献阶段、铁尾矿砂和水泥共同贡献阶段以及铁尾矿砂填充效应主要贡献阶段。具体表现为:当水泥掺

量处于8%到12%时,水泥复合土的强度主要是由水泥水化效应所提供,此时,加入少量铁尾矿砂有益于其强度提升,过多的铁尾矿砂会抑制其强度提升,铁尾矿砂对水泥复合土的强度贡献受其掺量影响;当水泥掺量处于12%到16%时,水泥复合土的强度主要来源于水泥与铁尾矿砂的共同作用,此时铁尾矿砂对水泥复合土的强度贡献基本为正值;当水泥掺量处于16%到20%时,任意掺量下的铁尾矿砂对水泥复合土的强度贡献都为正值.这种相对强度贡献可以解释为:在水泥复合土中,水泥水化效应产生的强度贡献会随着水泥掺量的增加呈下降趋势,此时水泥复合土的强度贡献主要为铁尾矿砂的填充作用.

### 2.3 铁尾矿砂水泥复合土强度机理分析

铁尾矿砂水泥复合土的强度主要来源于水泥的水化效应及铁尾矿砂的填充效应.其中,水泥水化效应会生成一系列水化产物,水化产物会以颗粒的形式存在,一定时间后会胶结土颗粒以及铁尾矿砂颗粒,同时,水泥水化物中的钙离子会与素土中的钾离子、钠离子等发生离子交换作用,使土颗粒之间相互靠近,结构更加致密.此外,水泥水化产物还能吸收空气中的二氧化碳生成碳酸钙等较硬的化合物从而提高了水泥复合土的抗压强度.杨滨<sup>[20]</sup>还提出水化产物会产生结晶效应,这种效应构成了复合土体的骨架,起着联结水泥、土、铁尾矿的作用.

铁尾矿砂填充效应会填充水泥复合土中的孔隙,使土颗粒之间的距离靠近,加强复合土体之间的联结作用<sup>[21]</sup>.由于铁尾矿砂表面凹凸不平,颗粒之间的摩擦力也会间接抵抗外力的变形,从而增加了复合土体的抗压强度,又因为铁尾矿砂中存在大量的二氧化硅以及氧化铝等金属矿物,这些金属矿物会在氢氧化钙等碱性条件下发生少量水化反应及火山灰反应,生成水化硅酸钙以及水化铝酸钙等产物,使水泥复合土的强度提高,但是大量的研究表明<sup>[22-24]</sup>,铁尾矿砂中存在的金属矿物为低活性石英矿砂,这些金属矿物活性较低,只有在大量的碱性条件、高温作用以及长龄期下才可能大量发生反应.综上所述:铁尾矿砂对水泥土的增强作用为颗粒填充作用、土体的置换作用、颗粒间的摩擦作用以及少量水化及火山灰反应的综合增强作用.

## 3 结论

(1)在水泥掺量8%~20%范围内,随着水泥掺量的增加,水泥土的抗压强度呈线性增长,水泥掺量对水泥土的强度影响显著;

(2)在铁尾矿砂掺量0%~40%范围内,随着铁尾矿砂掺量的增加,水泥土的抗压强度呈先增加后减小的趋势,掺砂量为20%时,水泥土的抗压强度最大,其最大强度在2.29~3.89 MPa之间;

(3)水泥水化效应对水泥土的强度贡献会随着水泥掺量的增加越来越小;铁尾矿砂填充效应对水泥复合土的强度贡献在高水泥掺量时表现的更为明显;

(4)从不同角度分析了铁尾矿砂水泥土的固化机理,指出其强度主要来源于水泥的水化效应以及铁尾矿砂的填充效应.

### 参考文献 References

- [1] 许森. 水泥土无侧限抗压强度影响因素研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.  
XU Miao. Study on the influencing factors of unconfined compressive strength of soil-cement[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [2] KONG R, YAN B, XU J, et al. Physical homogenization and chemical stability of Nano-SiO<sub>2</sub> treated loess[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2019, 56(5): 336-339.
- [3] DUAN X L, ZHANG J S. Mechanical properties, failure mode, and microstructure of soil-cement modified with fly ash and polypropylene fiber[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 12(2): 1-13.
- [4] BO R, DING H, TENG J, et al. Mechanical properties and microstructure of polypropylene fiber reinforced cement mortar soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 1985-1997.
- [5] AMINI O, GHASEMI M. Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223(10): 409-420.
- [6] 王立峰, 翟惠云. 纳米硅水泥土抗压强度的正交试验和多元线性回归分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 452-457.  
WANG Lifeng, ZHAI Huiyun. Orthogonal test and multiple linear regression analysis of compressive strength of nanosilica soil-cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 452-457.
- [7] 王凤池, 燕晓, 刘涛, 等. 橡胶水泥土强度特性与机理研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 24(2): 46-51.  
WANG Fengchi, YAN Xiao, LIU Tao, et al. Research on strength characteristics and mechanism of rubberized cement-soil[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 24(2): 46-51.

- [8] 夏永杰, 王丽艳, 刘瀚森. 掺废弃钢渣的水泥土强度特性试验研究[J]. 中外公路, 2016, 12(5):243-246.  
XIA Yongjie, WANG Liyan, LIU Hanmiao. Experimental study on strength characteristics of cemented soil mixed with waste steel slag[J]. Chinese and foreign Highways, 2016, 12(5):243-246.
- [9] 韩鹏举, 刘新, 白晓红. 硫酸钠对水泥土的强度及微观孔隙影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9):2555-2561.  
HAN Pengju, LIU Xin, BAI Xiaohong. Effect of sodium sulfate on strength and micropores of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9):2555-2561.
- [10] 赫文秀, 申向东. 掺砂水泥土的力学特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1):392-396.  
HAO Wenxiu, SHEN Xiangdong. Mechanical behavior of soil-sand-cement admixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1):392-396.
- [11] 申莉. 水泥砂浆固化土的工程特性研究[J]. 中外公路, 2014, 34(2):295-302.  
SHEN Li. Research on engineering characteristics of cement mortar-solidified soil[J]. Sino Foreign Highway, 2014, 34(2):295-302.
- [12] 王树娟, 申向东. 掺砂水泥复合土力学性能研究[J]. 人民黄河, 2012(5):131-133.  
WANG Shujuan, SHEN Xiangdong. Study on mechanical properties of composite soil mixed with sand and cement[J]. Yellow River, 2012(5):131-133.
- [13] 廖建春, 曾庆军. 含砂量对水泥土强度的影响[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2005, 4(2):1-3.  
LIAO Jianchun, ZENG Qingjun. Effect of sand content on strength of cement soil[J]. Journal of Guangdong Communications Vocational and Technical College, 2005, 4(2):1-3.
- [14] OSINUBI K J, YOHANNA P, EBEREMU A O. Cement modification of tropical black clay using iron ore tailings as admixture[J]. Transportation Geotechnics, 2015, 5:35-49.
- [15] 王金龙. 保护矿产资源加速我国尾矿的开发利用[J]. 矿山环保, 2003, 14(2):8-14.  
WANG Jinlong. Protection of mineral resources to accelerate the development and utilization of tailings in China[J]. Environmental Protection of Mines, 2003, 14(2):8-14.
- [16] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E5-2009[S]. 北京: 北京人民交通出版社, 2009.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport, Republic of China. Test rules for highway engineering inorganic bonding stabilization materials: JTGE5-2009[S]. Beijing: Beijing People's Communications Press, 2009.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术规范: JTG/TF20-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical code for construction of highway pavement base: JTG/TF20-2015[S]. Beijing: People's Communications Press, 2015.
- [18] UDDINK. Strength and deformation behaviour of cement treated Bangkok clay[D]. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1994.
- [19] 蒲心诚. 应用比强度指标研究活性矿物掺料在水泥与混凝土中的火山灰效应[J]. 混凝土与水泥制品, 1997, 5(3):6-14.  
PU Xincheng. Study on volcanic ash effect of active mineral admixtures in cement and concrete using specific strength index[J]. Concrete and Cement Products, 1997, 5(3):6-14.
- [20] 杨滨. 水泥土强度规律研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.  
YANG Bin. Study on strength law of cement soil[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [21] 杨迎春, 毛宇光. 不同细度铁尾矿粉对水泥基材料性能的影响[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(2):241-247.  
YANG Yingchun, MAO Yuguang. Effect of iron tailing powder with different fineness on properties of cement based materials[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(2):241-247.
- [22] 查进, 陈梦义, 李北星, 等. 蒸压养护对富硅铁尾矿粉活性特性的影响[J]. 混凝土, 2015(8):56-58, 62.  
ZHA Jin, CHEN Mengyi, LI Beixing, et al. Influence of autoclaved curing on the activity characteristics of silicone rich iron tailings powder[J]. Concrete, 2015(8):56-58, 62.
- [23] 李北星, 陈梦义, 王威, 等. 养护制度对富硅铁尾矿粉的活性及其浆体结构的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(8):1-5.  
LI Beixing, CHEN Mengyi, WANG Wei, et al. Effect of curing system on the activity of silicon rich iron tailing powder and its slurry structure[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(8):1-5.
- [24] 陈梦义, 李北星, 王威, 等. 铁尾矿粉的活性及在混凝土中的增强效应[J]. 金属矿山, 2013(5):164-168.  
CHEN Mengyi, LI Beixing, WANG Wei, et al. Activity of iron tailing powder and its strengthening effect in concrete[J]. Metal Mine, 2013(5):164-168.

(编辑 吴海西 沈波)