

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.038

激发剂对钢渣粉水泥石抗压强度影响研究

陈斐¹,王燕春^{2*},杜素军²

(1.山西省交通建设工程质量检测中心,山西太原 030000;2.山西工程科技职业大学,山西晋中 030619)

摘要:为合理解决钢渣带来的环境污染问题,选用钢渣粉改良水泥石,通过室内无侧限抗压强度试验确定最佳配合比,制备钢渣粉水泥石。针对钢渣粉活性低、抗压强度增强效果有限等问题,选择氢氧化钠、硅灰、氯化钙3种激发剂掺入钢渣粉水泥石中,研究其强度变化规律。结果表明:不同钢渣粉掺量掺入水泥石后,其强度均得到提高,土样外掺等比例水泥和钢渣粉时,水泥石抗压强度提升效果较好;10%钢渣粉水泥石单掺不同种类激发剂后,强度变化趋势不同,氢氧化钠掺量为0.5%时,抗压强度达到最大值;硅灰掺量为1.5%时,试样强度改善效果明显;随氯化钙掺量增加,试样抗压强度均降低。

关键词:激发剂;钢渣粉水泥石;无侧限抗压强度;配合比;最佳剂量

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

淤泥质土,属于特殊土,压缩性高、含水率高、强度低、土质不均匀、有机质含量高^[1-3],不满足工程需要。为此,对淤泥质土进行改良,以满足实际工程需要已成为重要的技术问题。目前,公路基层、铁路路基、地基处理等工程中采用较多的改良方式是水泥改良,但工程实践表明:水泥改良淤泥质土存在抗压强度不高、后期变形较大等问题^[4],限制了水泥石技术的发展与应用。研究表明:水泥石中掺入适量外掺剂可有效提高抗压强度。赫文秀等^[5]对掺砂水泥石进行无侧限抗压强度试验发现,水泥石中掺入适量砂可提高抗压强度;刘成才等^[6]研究了粉煤灰剂量对水泥石抗压强度的影响;夏永杰等^[7]研究了水泥石掺废弃钢渣后抗剪强度变化规律;张彬^[8]研究发现尾矿粉对水泥石力学特性有增强作用;陈峰^[9]研究了水泥石掺镍铁渣粉后强度变化规律,指出镍铁渣粉早期活性低,镍铁渣粉改良水泥石抗压强度低于普通水泥石,但长龄期两者试验结果相反;王继成^[10]以水泥改良淤泥土为研究对象,研究硅粉掺量对力学强度的影响,发现无侧限抗压强度随硅粉掺量呈线性

增长。对此,选择经济实惠、改良效果明显的外掺剂对提高水泥石强度具有重要意义。

钢渣是钢厂炼钢后炉渣冷却的工业废渣,产量为粗钢的10%~20%^[7,11-13]。而当前,随着中国钢铁行业的快速发展,产生大量钢渣且利用率为20%左右^[1],对中国生态环境造成了严重破坏。因此,若将钢渣掺入水泥石进行二次利用,具有良好的经济和环保效益。钢渣矿物组成与水泥相近,然而,钢渣粉活性成分低于水泥,水化速率和前期强度发展慢,钢渣粉在使用过程中需选择合适的激发剂激发活性,促进水泥石强度增长。对此,该文以钢渣粉为外掺剂,掺入水泥改良淤泥质土中,研究其掺量对其抗压强度影响关系,确定室内最佳配合比;制定钢渣粉改良水泥石试样,掺入氢氧化钠、硅灰、氯化钙3种激发剂,基于无侧限抗压强度试验,研究不同龄期、激发剂掺量下钢渣粉水泥石强度变化规律,优选激发剂最佳掺量,为大面积推广与应用钢渣粉水泥石提供试验基础和理论支持。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

(1)土样。选自日照淤泥质土,取土深度为5m,

收稿日期:2020-12-23(修改稿)

基金项目:山西省交通运输厅科技项目(编号:16-2-04)

作者简介:陈斐,男,高级工程师。

*通信作者:王燕春,女,讲师.E-mail:zeixincongcong@163.com

呈灰黑色。将试验土样晾晒风干并捣碎,过2 mm圆孔筛备用。测定风干含水率,根据JTGE40—2007《公路土工试验规程》,确定的技术性质见表1。

表1 淤泥质土技术性质

天然含水率/%	孔隙比	塑限/%	液限/%	塑性指数	压缩系数/(MPa ⁻¹)
43.2	1.23	14.9	31.2	16.3	0.63

(2) 水泥。选用普通硅酸盐水泥P.O42.5级,其技术性质见表2,化学成分见表3。

表2 水泥物理力学性质

细度/%	烧失量/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
1.2	2.05	262	335	24.9	52.1	5.4	8.5

表3 水泥和钢渣粉化学组成 %

外掺剂	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	其他
水泥	65.32	23.14	5.04	0.50	4.31	1.69
钢渣粉	44.69	14.22	2.47	24.61	6.47	7.54

(3) 钢渣粉。选用日照某公司生产的钢渣,经粉磨机磨碎后形成钢渣粉。钢渣粉化学成分和技术性质分别见表3、4。

表4 钢渣粉技术性质

密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	活性级别	活性指数/%		安定性
			7 d	28 d	
3.4	412	S75	63	84	合格

(4) 激发剂。选用氢氧化钠、硅灰、氯化钙作为激发剂。

1.2 试验方案

(1) 配合比设计

控制水泥剂量,研究钢渣粉掺量对水泥土抗压强度的影响。结合现场施工设计,拟定水泥剂量为6%、10%,水泥与钢渣粉掺量比例为2:1、1:1、1:1.5、1:2和1:2.5,养生龄期分别为7 d、14 d、28 d和60 d。

(2) 激发剂优选

针对室内最佳配合比,制备钢渣粉水泥土,掺入不同组合及剂量的激发剂,研究不同龄期掺激发剂钢渣粉水泥土强度变化规律。改变钢渣粉水泥土中钢渣粉掺量,拟采用氢氧化钠、硅灰及氯化钙掺量均为0、0.5%、1.0%、1.5%等效代替,养生龄期为7 d、28 d、60 d和90 d。具体试验方案见表5。

表5 试验方案

水泥剂量/%	钢渣粉掺量/%	氢氧化钠掺量/%	硅灰掺量/%	氯化钙掺量/%
10	10.0	0.0	0.0	0.0
	9.5	0.5	0.5	0.5
	9.0	1.0	1.0	1.0
	8.5	1.5	1.5	1.5

2 试验方法

2.1 试件制备及养护

测定土样风干含水率,参照JTGE51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》重型击实试验方法,确定不同配合比的钢渣粉水泥土室内最大干密度和最佳含水率,按室内最佳含水率、压实度95%的要求采用静压法制备钢渣粉水泥土试件,尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。水泥和钢渣粉采用外掺法。为减少试验误差,每组分别制作6个平行试件。试件制作完成后,用保鲜膜进行密封处理,放入温度为(20±1)℃、相对湿度为95%的养护室中养生至规定龄期。

2.2 无侧限抗压强度试验

采用WDW-100微机控制电子万能试验机测定试样无侧限抗压强度。养生龄期最后1 d,将试样浸泡于(20±2)℃水中。浸水1 d后,用柔软湿布擦拭试样表面多余水分,尽快进行试验。试验加载中保持加载速率为1 mm/min。每组平行试验采用3倍均方差方法剔除异常值。采用 $R_{c(0.95)}$ 表示试样无侧限抗压强度:

$$R_{c(0.95)} = \bar{R} - 1.645 \times \sigma \quad (1)$$

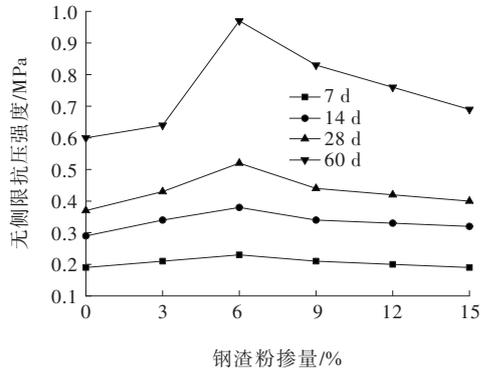
式中: $R_{c(0.95)}$ 为95%保证率下试样无侧限抗压强度代表值(MPa); \bar{R} 为无侧限抗压强度平均值(MPa); σ 为样本标准差。

3 试验结果分析

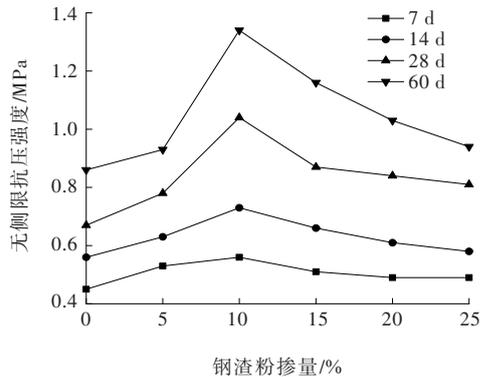
3.1 配合比设计

钢渣粉水泥土养生至规定龄期进行无侧限抗压强度试验,其钢渣粉掺量对抗压强度影响结果见图1。

由图1可知:①水泥土中掺入不同剂量的钢渣粉后,养生至7 d、14 d、28 d和60 d后水泥土强度至少分



(a) 6%水泥剂量



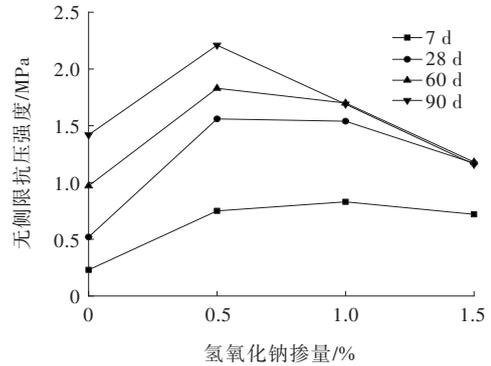
(b) 10%水泥剂量

图1 钢渣粉掺量-钢渣粉水泥土无侧限抗压强度

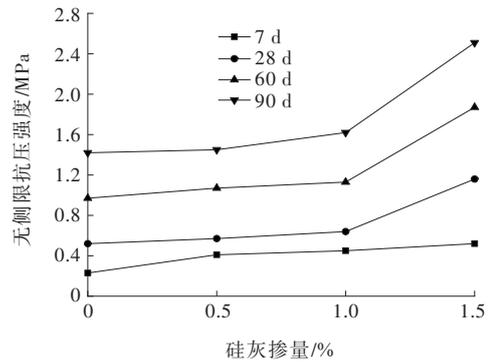
别提高8.9%、3.6%、20.9%和9.3%；②相同水泥剂量和龄期下，随钢渣粉掺量增加，水泥土抗压强度变化规律一致，先增大后减少。水泥：钢渣粉掺量为1:1时，水泥土抗压强度达到最大，6%水泥土掺钢渣粉后7 d、14 d、28 d和60 d强度分别提高21.1%、31.0%、40.5%和61.7%，10%水泥土掺钢渣粉后7 d、14 d、28 d和60 d强度分别提高24.4%、30.4%、55.2%和55.8%。说明土样外掺等比例水泥和钢渣粉对水泥土抗压强度提升效果明显，另外养生龄期越长，水泥土强度增减速率与钢渣粉掺量变化越明显。这是因为钢渣粉早期活性低，早期强度主要来源于水泥水化反应生成的钙矾石、氢氧化钙等产物及其与土粒发生的胶结作用；试样养生至28 d后，钢渣粉活性激发，生成较多水化产物填充水泥土孔隙，从而促进强度增长；③钢渣粉掺量超过水泥剂量后，水泥占混合料比重相对减少，对土的胶结固化作用减弱，所以当钢渣粉掺量逐渐增加，水泥土强度出现递减规律。由此可知，土样外掺等比例水泥和钢渣粉时，水泥土抗压强度提升效果较好。

3.2 激发剂优选

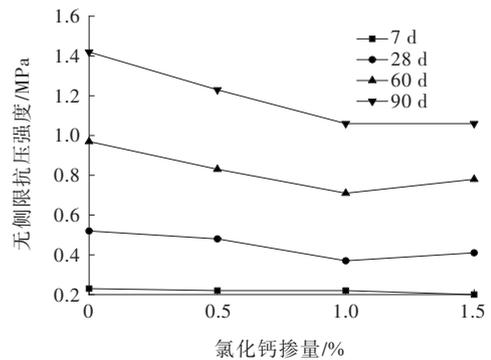
钢渣粉水泥土单掺激发剂后无侧限抗压强度试验结果见图2。



(a) 氢氧化钠



(b) 硅灰



(c) 氯化钙

图2 激发剂掺量-钢渣粉水泥土无侧限抗压强度

由图2可知：

(1) 相同龄期下，随氢氧化钠掺量增加，试样抗压强度变化规律一致，先增大后减少；氢氧化钠掺量大约为0.5%时，抗压强度达到最大值，相对钢渣粉水泥土试样7 d、28 d、60 d和90 d强度分别提高226%、200%、89%、56%。另外，氢氧化钠掺量为1.0%和1.5%时，试样强度随龄期增长速率变缓甚至负增长，且试样90 d龄期抗压强度低于28 d强度。这是因为适量氢氧化钠的掺入刺激了钢渣粉中的矿物成分活性，使其发生水化反应；当氢氧化钠含量过高致使钢渣粉化学成分发生化学反应产生裂解，出现新的孔隙结构，导致试样强度降低。因此，考虑氢氧化钠激发钢渣粉

活性和侵蚀作用,建议氢氧化钠最佳掺量为0.5%。

(2) 相同龄期下,随硅灰掺量增加,试样抗压强度增速变大,且硅灰掺量不变时,试样强度随龄期增长逐渐提高;硅灰掺量为0.5%时,相对钢渣粉水泥土试样7 d、28 d、60 d和90 d强度分别提高78.3%、9.6%、10.3%、2.1%;硅灰掺量为1.5%时,试样强度改善效果明显,分别提高了126.1%、80.8%、74.2%、76.8%。这说明试样掺入硅灰后,激发了钢渣粉活性,促进水化反应进行;随龄期增长、掺量增加,硅灰与水化产物氢氧化钙发生火山灰反应,生成的硅酸钙凝胶构成水泥土骨架,另外硅灰黏结作用使土粒间黏聚力增强,从而强度得到提高。因此,建议硅灰最佳掺量为1.5%。

(3) 相同龄期下,随氯化钙掺量增加,试样抗压强度均降低且变化趋势略有不同;试样掺0.5%氯化钙后,养生至7 d、28 d、60 d和90 d强度达到最大值,分别为0.26 MPa、0.48 MPa、0.83 MPa、1.23 MPa,相对未掺氯化钙试样,强度分别降低了4.3%、5.9%、14.4%、13.4%;掺量为1.5%时,其强度分别降低了13.0%、21.2%、19.6%和25.4%。这主要是因为钙矾石晶体具有膨胀性,氯化钙的掺入致使水化反应产生的氢氧化钙处于饱和状态,生成的过量钙矾石破坏结构,造成试样强度降低。对此,不建议氯化钙作为钢渣粉激发剂使用。

3.3 掺激发剂钢渣粉水泥土强度对比

基于无侧限抗压强度试验优选出的激发剂及其掺量,制备钢渣粉水泥土试样,养生至规定龄期,进行无侧限抗压强度试验,试验结果与未掺激发剂的试样进行比较,结果见表6。

表6 激发剂对钢渣粉水泥土抗压强度的影响

激发剂 种类	下列龄期(d)对应掺激发剂前后试样 无侧限抗压强度比值			
	7	28	60	90
氢氧化钠	3.26	3.00	1.89	1.56
硅灰	2.26	2.23	1.93	1.77

由表6可知:掺激发剂后试样抗压强度得到明显提高,同一龄期下试样掺氢氧化钠和硅灰后,试样强度至少分别提高156%、177%。另外,试样养生至60 d时,掺氢氧化钠试样与掺硅灰试样强度相当。

4 结论

(1) 研究了钢渣粉掺量对水泥土无侧限抗压强

度的影响关系,并确定了钢渣粉水泥土最佳配合比。水泥土中掺入钢渣粉后,强度得到提高,同一龄期下水泥土抗压强度变化规律一致,随钢渣粉掺量先增大后减少;土样外掺等比例水泥和钢渣粉时,水泥土抗压强度提升效果较好,相比于不掺钢渣粉的水泥土7 d、14 d、28 d和60 d强度至少提高21.1%、30.4%、40.5%和55.8%。

(2) 钢渣粉水泥土掺不同种类激发剂后,强度变化趋势不同。相同龄期下,随氢氧化钠掺量增加,试样抗压强度先增大后减少,氢氧化钠掺量为0.5%时,抗压强度达到最大值;随硅灰掺量增加,试样抗压强度增速变大,硅灰掺量为1.5%时,试样强度改善效果明显;随氯化钙掺量增加,试样抗压强度均降低。

(3) 通过无侧限抗压强度试验得到不同剂量激发剂对钢渣粉水泥土强度改善效果,建议氢氧化钠最佳掺量为0.5%或硅灰最佳掺量为1.5%。

参考文献:

- [1] 吴燕开,于佳丽,韩天,等. 硅灰改良钢渣-水泥土强度特性及固化机理[J]. 科学技术与工程,2018,18(21):88-94.
- [2] 刘娅. 改良淤泥类软土强度的试验研究[J]. 交通世界,2018(22):68-69.
- [3] 陈一新,王保田,张永奇,等. 石灰改良淤泥质土的试验研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(34):273-277.
- [4] 吴燕开,胡锐,赵位莹,等. 钢渣粉固化淤泥质水泥土强度特性试验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(15):306-311.
- [5] 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.
- [6] 刘成才,郭艳坤,郭乐工. 粉煤灰掺量对水泥砾质土力学效应影响[J]. 公路工程,2017,42(6):148-151,198.
- [7] 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,2016,36(5):243-246.
- [8] 张彬,宫照伟. 铁尾矿粉改良水泥土的强度与动力特性试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(11):3607-3612.
- [9] 陈峰. 镍铁渣粉对水泥土的强度影响试验研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(10):3113-3118.
- [10] 王继成. 硅粉对淤泥水泥土性能改善的试验研究[J]. 水利科技,2018(2):48-50,54.
- [11] 解国梁,陶传迁,申向东. 硅粉对中低掺量水泥土早期强度的影响[J]. 混凝土,2012(5):88-90.
- [12] 沈建生. 新型固化剂的研制及在软土加固中的试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [13] 王丽艳,高鹏,陈香香. 掺合废弃钢渣的新型混合轻质砂土的强度特性试验研究[J]. 公路,2013,58(11):204-209.