

冻融循环作用对固化改良铁尾矿抗压强度的影响试验研究

刘晶磊^{1,2,3}, 仇健^{1,2}, 温孟瑶^{1,2}, 赵敏^{1,2}

(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;
3. 青海省交通科学研究院)

摘要:为了研究冻融循环作用下固化剂改良铁尾矿的强度特性,对水泥、土凝岩改良铁尾矿在不同冻融循环次数、固化剂掺量、压实度情况下进行无侧限抗压强度试验,得到冻融循环作用下不同条件对改良铁尾矿强度的影响,进行均匀设计试验,回归分析各因素对强度的影响显著性及影响次序。结果表明:改良铁尾矿强度随冻融循环次数增加而衰减,经历6次循环后,强度逐渐趋于稳定,试样表面无脱落情况,土凝岩改良铁尾矿抗冻融特性优于水泥改良铁尾矿。增加固化剂掺量或提升压实度对改良铁尾矿的强度有明显提升效果,对土凝岩改良铁尾矿提升效果较优。固化剂掺量、压实度、冻融循环次数均对水泥或土凝岩改良铁尾矿强度有显著影响,其影响大小顺序依次为固化剂掺量、压实度、冻融循环次数。

关键词:固化剂;铁尾矿;冻融循环;无侧限抗压强度;均匀设计

1 前言

随着中国经济的快速发展,对矿产资源开发需求量逐年增加,导致工业固体废弃物排放量急剧增加,铁尾矿是一种排放量巨大的工业固体废弃物,近年来对铁尾矿的综合利用水平不断提高,但相比其他工业固体废弃物,铁尾矿的利用率依旧很低。公路工程中需要大量砂石等建筑材料,用铁尾矿代替砂石可大量消耗铁尾矿,减少铁尾矿堆积造成的占用土地、环境污染以及尾矿维护成本高、风险大等问题。在季节性冻土区,土体经历冻融循环作用会影响其抗压强度,因此研究冻融循环对改良铁尾矿抗压性能的影响,对季节性冻土区公路工程中应用铁尾矿具有重要意义。

针对铁尾矿在公路工程中的应用,最早在20世纪50年代美国明尼苏达州将铁尾矿应用于城市路面底基层及路基的铺筑,之后逐渐将铁尾矿应用于公路填料、沥青路面层的铺筑。中国最早在20世纪90年代由马鞍山矿山研究所和东北大学对铁尾矿作为路面材料进行了研究,将铁尾矿与河砂、粉煤灰、固化剂等配

料混合搭配,铺设满足中国路面建设相关规范要求的路面工程。针对冻融循环作用下土体力学性能,近年来也有大量学者进行了研究。R. J. Jamshidi等研究了冻融作用下含水率对固化土抗压性能的影响,发现含水率的增加使固化土强度降低;T. Shibi等发现固化土的抗压强度在冻融前2次时降低幅度较大,之后降幅减小;王天亮等通过动静三轴试验研究了水泥改良土的物理性状、力学特性与冻融次数、冷冻温度的关系,发现经历3次冻融循环后,临界动应力随冻融次数下降趋势变缓;宋爱苹等对冻融条件下水泥土、粉煤灰水泥土的强度特性进行了研究,发现冻融循环对其强度影响明显;杨胜波对改良西藏地区粉土进行冻胀融沉率试验,认为可以以冻融循环5次后的强度作为水泥改良土的设计参考强度;杨林等研究了冻融条件下TG固化剂石灰土的强度特性,发现经历1次循环后强度损失最大;常丹等对冻融循环作用下粉砂土的力学性能进行了室内试验研究,结果发现冻融循环对粉砂土的力学性质影响较大,经历7~9次循环后达到最小值;潘宝峰等通过室内冻融循环试验研究了水泥、石灰、石灰水泥改良铁尾矿的抗冻融耐久性,发现水泥改

收稿日期:2020-04-18(修改稿)

基金项目:河北省青年拔尖人才计划项目(编号:BJ2016018);河北省研究生创新基金项目(编号:CXZZSS2020140);张家口市科学技术研究与发展计划项目(编号:1811009B-13);河北建筑工程学院研究生创新基金项目(编号:XY020013)

作者简介:刘晶磊,男,博士,副教授。E-mail: kingbest_1118@163.com

良铁尾矿抗冻融性能较优,经历5次冻融循环后趋于稳定,残留强度比为80%左右。

以上研究成果表明,改良铁尾矿可以应用于公路工程作为路基或路面材料使用,对于抗冻融循环特性的研究,目前多针对粉质黏土、粉砂土和固化土等。

因此,该文以前期试验为基础,针对水泥、土凝岩两种固化剂改良铁尾矿,研究其抗冻融耐久性,分析经历多次冻融循环后其无侧限抗压强度的衰减规律以及固化剂掺量、压实度对其抗压强度的影响规律,通过均匀设计试验回归分析冻融循环次数、固化剂掺量及压实度对抗压强度的影响显著性及影响次序。

2 试验概况

2.1 试验材料

(1) 铁尾矿:试验采用河北张家口宣化地区铁矿产生的铁尾矿,主要矿物成分为石英、长石,化合物成分主要为SiO₂、Al₂O₃、TFe、MgO、CaO等,其中TFe含量为11.21%,其颗粒组成见表1。

表1 铁尾矿颗粒组成

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
4.75	100	0.3	55.53
2.38	98.80	0.15	33.42
1.18	95.83	0.075	18.20
0.6	80.16		

(2) 水泥:采用普通硅酸盐水泥(P. O. 32.5级),SO₃含量为3.24%,MgO含量为2.20%,初凝时间为180 min,终凝时间为600 min,抗压强度为32.5 MPa,抗折强度为7.0 MPa。

(3) 土凝岩:一种新型绿色材料,利用赤泥、粉煤灰和煤矸石等工业废弃物研制而成,初凝时间为480 min,终凝时间为720 min,抗压强度为54 MPa,抗折强度为9.4 MPa。

2.2 试样制备

铁尾矿为细粒土,依据相关规范,采用静压法制备尺寸为50 mm(直径)×50 mm(高度)的圆柱形试样。制样前将铁尾矿过2.5mm筛去除较大颗粒,采用前期击实试验得到的最优含水率制备试样,首先将铁尾矿中加入相应量的水拌和均匀浸润2 h,然后加入水泥或土凝岩搅拌均匀后开始制件。将搅拌均匀的土样

分3次装入钢质模具,每次装入后用捣土棒插实,将土样完全装入后用压力机静压成型,维持压力2 min,2 h后脱模,试样制备完成,每组做6个平行试样。将制备完成的试件用塑料薄膜包裹后放入温度为(20±2)℃、湿度≥95%的标准养护室养护28 d,养护结束前一天将试件浸水24 h,养护完成后取出进行冻融循环试验,冻融循环后测其无侧限抗压强度。

2.3 试验设计

选取水泥或土凝岩掺量为8%、10%、12%,压实度为93%、95%、97%,冻融循环次数为0、1、3、6、9、12次,试验前进行冻融循环温度标定,冻结温度为-18℃,冻结时间为10 h,融化温度为20℃,融化时间为14 h,即一天进行一次冻融循环。达到设计的冻融循环周期后取出试件进行无侧限抗压强度试验,无侧限抗压强度试验采用路面强度测试仪进行,加载速率为1 mm/min。

该文研究水泥或土凝岩掺量为10%、压实度为95%时改良铁尾矿的抗冻性;压实度为95%、冻融循环6次时研究固化剂掺量对改良铁尾矿强度的影响;固化剂掺量为10%、冻融循环为6次时研究压实度对改良铁尾矿强度的影响。均匀设计试验方案参照均匀设计表2确定,均匀度偏差D=0.136 1。

表2 均匀设计试验方案

试验序号	水泥或土凝岩掺量/%	压实度/%	冻融循环次数/次
1	8	93	12
2	8	95	9
3	8	97	6
4	8	93	3
5	8	95	1
6	10	97	12
7	10	93	9
8	10	95	6
9	10	97	3
10	10	93	1
11	12	95	12
12	12	97	9
13	12	93	6
14	12	95	3
15	12	97	1

3 试验结果与分析

3.1 抗冻性评价

抗冻性评价以经历冻融循环后的抗压强度损失与质量损失作为评价指标,采用冻融循环抗压强度残留比 BDR 和质量损失 W_n 表示,分别按式(1)、(2)计算:

$$BDR = \frac{R_{DC}}{R_c} \times 100\% \tag{1}$$

式中: R_c 、 R_{DC} 分别为冻融循环前、后试件的抗压强度(MPa)。

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中: m_0 、 m_n 分别为冻融循环前、 n 次冻融循环后试件的质量(g)。

计算得到抗压强度残留比、质量损失率随冻融循环次数的变化规律分别见图 1、2。

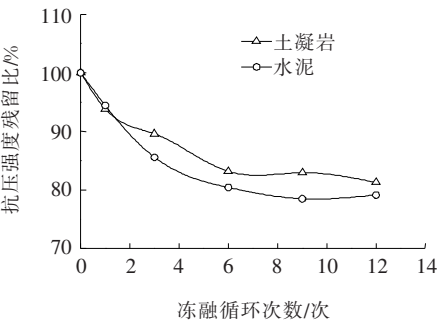


图 1 抗压强度残留比随冻融循环次数的变化规律

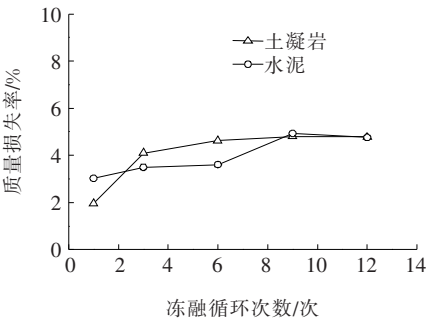


图 2 质量损失率随冻融循环次数的变化规律

由图 1 可以看出:经历冻融循环使水泥、土凝岩改良铁尾矿强度均有所下降。随着冻融循环次数的增加,两种固化剂改良铁尾矿抗压强度残留比不断减少,且减少幅度逐渐降低。经历 6 次冻融循环后,两种固化剂改良铁尾矿强度逐渐趋于稳定,水泥改良铁尾矿

强度残留比为 80.4%,土凝岩改良铁尾矿强度残留比为 83.2%,之后继续经历冻融循环,两种改良铁尾矿强度只有微弱衰减。

分析出现上述现象的主要原因为:温度降低时,试样中孔隙内部水分逐渐由外向内冻结,试样体积增大,受周围约束而产生冻胀力,冻胀力超过一定限度时会破坏颗粒间的联结作用;温度升高时,水分融化,水分迁移造成土颗粒排布位置变化,破坏了相对稳定的结构体系,导致其强度衰减;经历多次冻融循环后,孔隙内部水分有了充分运动的空间,其内部结构变化逐渐趋于动态平衡,因此其强度逐渐趋于稳定。强度稳定后,土凝岩改良铁尾矿强度残留比大于水泥改良铁尾矿,说明土凝岩改良铁尾矿抗冻融特性优于水泥改良铁尾矿。这是由于土凝岩中活性二氧化硅和三氧化二铝在养护前期水化反应提供的碱性环境下发生火山灰反应产生水化硅酸钙和铝酸钙胶凝比水泥水化反应产生的胶凝有更好的抗冻融特性。

由图 2 可以看出:两种固化剂改良铁尾矿质量损失率均为 2%~5%,随着冻融循环次数的增加,水泥改良铁尾矿质量损失有小幅度增加,质量损失最大时为 4.9%;土凝岩改良铁尾矿经历 3 次冻融循环后质量损失稳定为 4.7%左右。冻融循环作用下,试件表面完好无明显脱落情况,质量损失应为冻融循环过程中水分损失造成,说明水泥、土凝岩改良铁尾矿胶结作用效果较好。

3.2 掺量、压实度对强度的影响

图 3、4 分别为固化剂掺量、压实度对两种固化剂改良铁尾矿的无侧限抗压强度的影响规律。

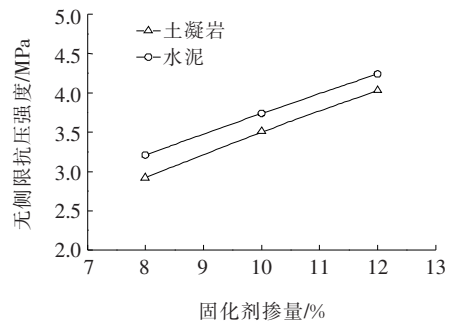


图 3 强度随固化剂掺量的变化规律

由图 3 可知:经历 6 次冻融循环后,在相同压实度下,水泥改良铁尾矿强度残留比虽然略低于土凝岩改良铁尾矿,但其强度仍高于土凝岩改良铁尾矿。随着固化剂掺量的增加,两种固化剂改良铁尾矿的强度明显提升,且呈线性增长趋势。固化剂掺量由 8% 增加

为12%时,土凝岩改良铁尾矿强度增幅超出水泥改良铁尾矿强度增幅6%左右。

铁尾矿是无黏性的颗粒,添加水泥、土凝岩发生水化反应及火山灰反应产生胶结作用,使铁尾矿颗粒黏结,从而提升铁尾矿的无侧限抗压强度(图4)。随着固化剂掺量的增加,即发生反应的原材料增加,产生更多的胶凝,使颗粒间胶结力更强,因此强度逐渐提升。冻融循环条件下,增加固化剂掺量可有效提高改良铁尾矿的强度。

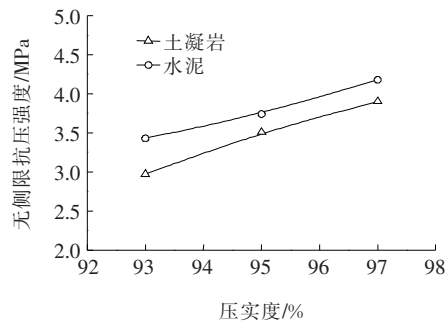


图4 强度随压实度的变化规律

由图4可知:在相同冻融循环次数及固化剂掺量情况下,随着压实度的提升,两种固化剂改良铁尾矿强度均呈增长态势。相比压实度为93%的试样,压实度为97%时,土凝岩改良铁尾矿强度增幅比水泥改良铁尾矿强度增幅大10%左右。

压实度的增加使铁尾矿颗粒间距减小,试样结构相对紧密,试样干密度变大,使发生反应的原料也有所增加,因此,在冻融循环条件下,增加压实度有利于改良铁尾矿强度的提高,且对土凝岩改良铁尾矿强度提升效果相对明显。

3.3 均匀设计试验结果分析

均匀设计试验结果见表3。
由表3可以看出:在试验范围内,水泥、土凝岩改良铁尾矿强度在试验1中为最小值,分别为2.37、

表3 均匀设计试验结果

试验 序号	无侧限抗压强度/MPa		试验 序号	无侧限抗压强度/MPa	
	水泥改良 铁尾矿	土凝岩改 良铁尾矿		水泥改良 铁尾矿	土凝岩改 良铁尾矿
1	2.37	2.30	9	4.64	4.33
2	3.08	2.88	10	3.99	3.59
3	3.59	3.34	11	4.11	3.81
4	3.02	2.77	12	4.78	4.24
5	3.65	3.33	13	3.57	3.40
6	4.05	3.81	14	4.75	4.32
7	3.31	2.82	15	5.53	5.12
8	3.74	3.51			

2.30 MPa,此时固化剂掺量为8%、压实度为93%、冻融循环次数为12次,固化剂掺量、压实度均为试验范围内最小值,冻融循环次数为试验范围内最大值;在试验15中两种改良铁尾矿强度达到最大值,分别为5.53、5.12 MPa,此时固化剂掺量为12%、压实度为97%、冻融循环次数为1次,固化剂掺量、压实度均为试验范围内最大值,冻融循环次数为最小值,符合固化剂掺量、压实度、冻融循环次数对强度的影响规律。

依据均匀设计试验结果,经过多次不同形式拟合进行回归分析,得到水泥、土凝岩改良铁尾矿无侧限抗压强度与固化剂掺量、压实度、冻融循环次数的关系,见式(1)、(2),其回归分析结果见表4。

$$Y_1 = -23.014 + 0.3X_1 + 0.256X_2 - 0.076X_3 \quad (R_1 = 0.980) \tag{3}$$

$$Y_2 = -21.943 + 0.264X_1 + 0.245X_2 - 0.067X_3 \quad (R_2 = 0.984) \tag{4}$$

式中: Y_1 、 Y_2 分别为水泥、土凝岩改良铁尾矿的无侧限抗压强度; X_1 为固化剂掺量; X_2 为试件压实度; X_3 为试件冻融循环次数。

表4 回归分析结果

影响 因素	Y_1			Y_2		
	回归系数	t 值	P 值	回归系数	t 值	P 值
常量	-23.014	-8.473	3.8×10^{-6}	-21.943	-8.473	3.8×10^{-6}
X_1	0.300	10.342	5.3×10^{-7}	0.264	10.342	5.3×10^{-7}
X_2	0.256	8.834	2.5×10^{-6}	0.245	8.834	2.5×10^{-6}
X_3	-0.076	-6.517	4.3×10^{-5}	-0.067	-6.517	4.3×10^{-5}

注: t 表示的是对回归参数的显著性检验值; P 为一个统计学指标。

方程(3)的相关系数为0.980,决定系数为0.961,方差分析结果 Significance $F < 0.01$;方程(4)的相关系数为0.984,决定系数为0.968,Significance $F < 0.01$,因此上述两个回归方程均非常显著,且与试验结

果基本拟合。

上述回归方程均为线性方程, X_1 、 X_2 的系数为正值, 即增加固化剂掺量或增加压实度均能提高改良铁尾矿强度, X_3 的系数为负值, 即冻融循环次数的增加使改良铁尾矿强度降低。由表 4 显著性检验结果可知, 两式均为 $|t_1| > |t_2| > |t_3|$, 表明对两种固化剂改良铁尾矿强度的影响次序均为固化剂掺量 $>$ 压实度 $>$ 冻融循环次数, P 值均小于 0.01, 表明固化剂掺量、压实度、冻融循环次数对改良铁尾矿强度影响均非常显著。

4 结 论

通过对经历冻融循环后水泥、土凝岩改良铁尾矿进行无侧限抗压强度试验, 得出以下结论:

(1) 冻融循环作用导致水泥、土凝岩改良铁尾矿强度衰减, 且随着冻融循环次数的增加, 其强度衰减幅度不断降低, 经历 6 次冻融循环后, 强度逐渐趋于稳定, 残留强度稳定在 80% 左右, 土凝岩残留强度稍高于水泥。

(2) 冻融循环作用对改良铁尾矿质量损失影响较小, 随冻融循环次数的增加, 水泥、土凝岩改良铁尾矿质量损失均稍有增加, 经历几次冻融循环后稳定在 5% 左右。

(3) 在冻融条件下, 固化剂掺量、压实度的增加对改良铁尾矿强度均有提高, 对土凝岩改良铁尾矿强度提升效果更明显, 固化剂掺量由 8% 增至 12%、压实度由 93% 增至 97%, 土凝岩改良铁尾矿强度增幅比水泥改良铁尾矿强度增幅分别高出 6%、10% 左右。

(4) 固化剂掺量、压实度及冻融循环次数对改良铁尾矿强度均有显著影响, 对水泥、土凝岩改良铁尾矿影响次序均为固化剂掺量 $>$ 压实度 $>$ 冻融循环次数。

参考文献:

- [1] ARASAN S, NASIRPUR O. The Effects of Polymers and Fly Ash on Unconfined Compressive Strength and Freeze-Thaw Behavior of Loose Saturated Sand[J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 8(3): 361—375.
- [2] 李学德. 双灰固化土本构关系及冻融损伤模型研究[D].

西北农林科技大学硕士学位论文, 2013.

- [3] Schroeder R. L. The Use of Recycled Materials in Highway Construction[J]. Public Roads, 1994, 58(2).
- [4] Zanko L. M., Niles H. B., Oreskovich J. A. Mineralogical and Microscopic Evaluation of Coarse Taconite Tailings from Minnesota Taconite Operations[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, 52: S51—S65.
- [5] Ahmari S., Chen R., Zhang L. Y.. Utilization of Mine Tailings as Road Base Material[J]. GeoCongress, 2012: 3 654—3 661.
- [6] 李荣海, 汪建, 周志华, 等. 铁尾矿在公路工程中的应用[J]. 矿业工程, 2007(5).
- [7] 王晶. 铁尾矿在国内外道路工程中的应用[J]. 环境与发展, 2014(7).
- [8] JAMSHIDI R J, LAKE C B. Hydraulic and Strength Properties of Unexposed and Freeze-Thaw Exposed Cement-Stabilized Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 52(3): 283—294.
- [9] SHIBI T, KAMEI T. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Strength and Physical Properties of Cement-Stabilised Soil Containing Recycled Bassanite and Coal Ash[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 106: 36—45.
- [10] 王天亮, 刘建坤, 彭丽云, 等. 冻融循环作用下水泥改良土的力学性质研究[J]. 中国铁道科学, 2010(6).
- [11] 宋爱苹, 张亚飞. 冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性[J]. 中外公路, 2017(3).
- [12] 杨胜波. 冻融循环对改良粉土力学特性影响的试验研究[J]. 中外公路, 2018(5).
- [13] 杨林, 朱金莲. 冻融条件 TG 固化剂石灰土无侧限抗压强度影响因素试验研究[J]. 中外公路, 2016(5).
- [14] 常丹, 刘建坤, 李旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(7).
- [15] 常丹, 刘建坤, 李旭. 冻融循环下粉砂土屈服及强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(8).
- [16] 潘宝峰, 王琰, 张铁志. 无机结合料稳定铁尾矿砂冻融特性的研究[J]. 低温建筑技术, 2010(1).
- [17] 王琰. 无机结合料稳定铁尾矿砂的疲劳及冻融循环特性的试验研究[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2009.
- [18] 马巍, 王秉纲. 多年冻土地区水泥稳定砂砾抗冻融耐久性模拟试验[J]. 冰川冻土, 2006(4).