

文章编号:1673-9469(2024)05-0036-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.05.005

## 干湿循环对自密实水泥土力学特性影响研究

王迪<sup>1</sup>,王响<sup>1</sup>,肖亮<sup>2</sup>,万愉快<sup>3\*</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024;2. 陆军勤务学院财务审计系,重庆 401331;  
3. 宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 225008)

**摘要:** 为了探究干湿循环对自密实水泥土力学性能的影响规律,通过试验对比分析了不同水泥掺量下的自密实水泥土在不同干湿循环次数下的无侧限抗压强度,探讨了自密实水泥土的外观破损程度和强度劣化规律,并根据强度衰减规律,建立循环次数与劣化后强度的经验公式。研究发现干湿循环作用下自密实水泥土第 $j$ 次循环后的强度衰减率是第1次强度衰减率的 $j^{0.3}$ 倍;自密实水泥土应力-应变曲线峰值强度会随着循环次数的增加逐渐降低,试样的破坏类型由脆性破坏变成塑性破坏。

**关键词:** 自密实水泥土;干湿循环;水泥掺量;无侧限抗压强度

**中图分类号:** TU528.53

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Mechanical Properties of Self-compacting Cemented Soil Under Wet-Dry Cycles

WANG Di<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, XIAO Liang<sup>2</sup>, WAN Yukuai<sup>3\*</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;  
2. Department of Finance and Audit, Army Logistics Academy, Chongqing 401331, China;  
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 225008, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of dry-wet cycles on the mechanical properties of self-compacting soil-cement, the unconfined compressive strength of self-compacting cemented soil under different dry-wet cycles was compared and analyzed through experiments, and the appearance damage degree and strength deterioration law of self-compacting cemented soil were discussed. According to the strength decay law, an empirical formula between the dry-wet cycle number and strength deterioration was established. It is found that the strength decay rate of self-compacting cemented soil after the  $j_{th}$  dry-wet cycles is  $j^{0.3}$  times that of the first cycle. The peak strength of the stress-strain curve of self-compacting cemented soil gradually decreases with the increase of the number of dry-wet cycles, and the failure type of sample changes from brittle failure to plastic failure.

**Key words:** self-compacting cemented soil; wet-dry cycle; cement content; unconfined compressive strength

近年来,随着我国建设开发量的快速增长,工程废弃物如废弃土产出增多,伴随而来的岩土工程问题也随之增多。以建筑工程项目为例,土方开挖和回填是施工过程中的重要组成,在土方回填时,影响回填质量的因素较多,且压实度不易保

证。如回填土方的质量不达标,会出现沉降、变形、开裂等问题<sup>[1]</sup>。传统的回填材料有很多,如灰土、砂土、泡沫混凝土、素混凝土等,这些传统回填材料在工程中得到广泛应用,但在施工成本、工艺、维护及环保等方面存在一定的缺点和不足。

收稿日期:2023-10-12

基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(2023AAC03036)

作者简介:王迪(1992-),女,安徽淮南人,硕士,实验师,从事地基处理方面的研究。

\* 通信作者:万愉快(1990-),男,河南永城人,博士,讲师,从事边坡工程、地基处理方面的研究。

自密实水泥土是一种新型建筑填料<sup>[2-6]</sup>,解决了传统回填材料存在的问题,利用开挖出的废弃土,加入固化剂和水搅拌均匀,形成可泵送、自密实的加固材料。其最大特点就是能够依靠自重流动达到密实。而且,以工程废弃土为原料土,可以减少土方的外运量、节约运输成本,符合绿色环保要求<sup>[7-8]</sup>。

针对自密实水泥土的力学特性,国内外学者已开展了一系列研究。贾坚<sup>[9]</sup>通过室内试验发现,综合含水量和水泥掺量是影响水泥土强度的关键因素;曹智国等<sup>[10]</sup>通过水泥土无侧限抗压强度试验,分析了水泥土的孔隙率、饱和度及强度的变化规律;储诚富等<sup>[11]</sup>分析了含水量、水泥用量和龄期对水泥土强度的影响,提出了似水灰比的概念用于水泥土强度预测;赫文秀等<sup>[12]</sup>通过室内试验,探讨了不同掺砂量下水泥土的无侧限抗压强度;王军等<sup>[13]</sup>通过不排水三轴压缩试验对水泥土的力学特征进行研究,分析了水泥掺入对水泥土强度的影响;Ramzi 等<sup>[14]</sup>以黏土粉砂为原料土,分别掺入 8.5%和 12.5%的水泥,测得试样无侧限抗压强度分别为 2 和 2.8 MPa。

在水泥土的实际工程应用中,雨水的冲刷和太阳的暴晒会让土体长期处于干湿循环交替变化状态,导致水泥土内部含水量变化,引起土料的膨胀或收缩,产生干湿应力,破坏水泥土的内部结构,从而影响其强度和尺寸,对工程的安全和使用寿命产生潜在威胁<sup>[15]</sup>。然而,目前鲜有针对自密实水泥土在干湿循环作用下物理力学特性劣化方面的研究。

因此,本文通过分析不同水泥掺量下的自密实水泥土在不同干湿循环次数下的无侧限抗压强度,预测水泥土强度劣化规律,寻找该材料在干湿循环作用下的物理和力学特性变化规律,以便更好地为自密实水泥土在实际工程应用提供理论支撑。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

本文试验材料为南通某工程现场土、固化剂(水泥)、水(自来水)。

表 1 试验所用水泥化学成分及基本性质

Tab.1 Chemical composition and basic property of cement used in the test

初凝时间 /min	终凝时间 /min	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> · kg <sup>-1</sup> )	成分含量/%				
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
>160	<240	2.9	300	19.31	5.09	2.49	3.39	63.26

经测定试验所用自来水 pH 值为 7.25,呈弱碱性;试验时水温约 20 ℃。

按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[16]</sup>测试试验用土的基本物理性质指标。试验用土为黏土,土的比重为 2.59,土的液限为 31.22%,塑限为 19.52%,塑性指数为 11.7,液性指数为 0.041,颗粒级配如图 1 所示。

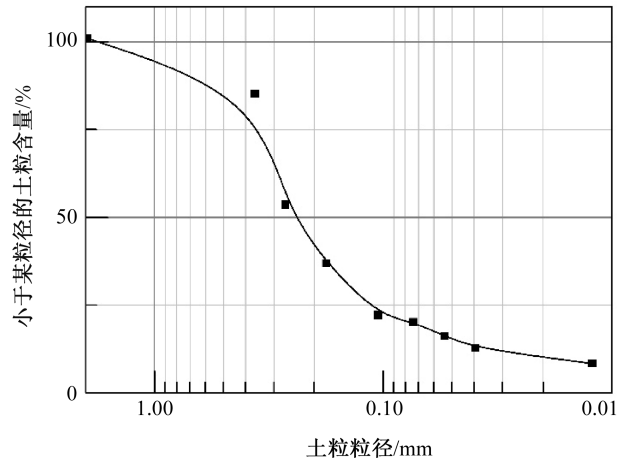


图 1 颗粒大小级配曲线

Fig.1 Particle size grading curve

固化剂采用诸城市杨春水泥公司生产的硅酸盐水泥,其化学成分及基本性质见表 1。依照《通用水泥质量等级》(JC/T 452—2009)<sup>[17]</sup>,该水泥为 PO42.5 普通硅酸盐水泥。

### 1.2 试样制备及试验步骤

自密实水泥土的制备流程如下:先将原料土、水泥、水按比例称好质量备用,再将水泥和水混合制备成水泥砂浆溶液,迅速与原料土充分搅拌 5 min,搅拌完成后测其流动度,并将其装入模具,放置在温度设置为 20 ℃、相对湿度设置为 98%的养护箱中,进行 28 d 的养护。在养护期结束后,进行各类测试。无侧限抗压强度试验参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[18]</sup>和《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[19]</sup>。

在干湿循环作用下,自密实水泥土不但物理性质会发生变化,还会发生强度的劣化,耐久性的降低等现象。表 2 总结了文献[20-27]中关于膨胀

表2 文献中干湿循环试验方案

Tab. 2 Test scheme of dry-wet cycle in the literature

文献	干燥时间	浸泡时间	循环周期
Estabragh 等 <sup>[20]</sup>	80 °C 烘至无变形	水中浸泡 3 d	约 6 d
Ahmed 和 Ugai <sup>[21]</sup>	70 °C 烘 24 h	22 °C 水中浸泡 24 h	2 d
Yague 等 <sup>[22]</sup>	空气中干燥 3 d	水中浸泡 5 d	8 d
高润东等 <sup>[23]</sup>	空气中干燥 15 d	硫酸溶液浸泡 15 d	30 d
王琴和杨鼎宜 <sup>[24]</sup>	50 °C 烘 12 h	硫酸溶液浸泡 4 d	约 5 d
张伟勤等 <sup>[25]</sup>	80 °C 烘 2 h	水中浸泡 46 h	2 d
朱永顺 <sup>[26]</sup>	烘 12 h 冷却 1 h	氯化钠溶液泡 11 h	1 d
黄维蓉等 <sup>[27]</sup>	60 °C 烘 8 h	硫酸溶液浸泡 14 h	1 d

表3 干湿循环对自密实水泥土力学特性影响研究方案

Tab. 3 Research scheme of influence of dry-wet cycle on mechanical properties of self-compacting cemented soil

试验	水泥掺量 $a_c$ /%	掺水率 $w$ /%	干燥时间	浸泡时间	干湿循环次数 $j$ /次
无侧限抗压强度试验	15	52、55、58	65 °C 烘 18 h	水中浸泡 5 h	0、1、3、6、9
	18	52、55、58			
	20	52、55、58			

土和混凝土干湿循环试验方案,可以看出国内外学者在试验方案的设计上存在较大的差异,对于干燥时间、浸泡时间以及循环周期没有统一的标准。因此,综合考虑各方面因素,本文试验方案如表3所示。

干湿循环试验步骤如下:

(1) 制备自密实水泥土试样,试样尺寸为直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体,将制备好的试样在养护箱中养护到规定龄期(28 d),养护箱设置为标准养护环境:温度为(20±2)°C,湿度为95%以上,将试样编号,分别进行0、1、3、6、9次干湿循环试验;

(2) 每次循环时,先将试样放入温度为65 °C的电子鼓风干燥箱中烘18 h取出;

(3) 将取出的试块冷却20 min至室温;

(4) 再将试样放入20 °C的纯水中浸泡5 h,注意水面高度至少比试样顶部高3 cm,取出试样测其质量和尺寸大小,第一次干湿循环试验结束;

(5) 根据试验干湿循环次数要求,重复进行(2)~(4)步骤。

## 2 试验结果

### 2.1 干湿循环作用下自密实水泥土外观破损规律

干湿循环试验是评价自密实水泥土耐久性的极重要指标之一,直接关系到工程的安全和使用寿命。根据不同配合比的自密实水泥土试块随干湿循环次数的增加,表现出的表面裂纹的

大小、土体剥落程度以及整个结构的完整性,将自密实水泥土的外观破损程度分为以下四类,并在表4中对这四类的损伤情况进行汇总记录。

从表4和图2中可以看出,当水泥掺量小于15%时,试样的外观破坏非常严重,整体一分为二甚至完全碎裂;当水泥掺量大于等于15%时,试样能保持一个整体,表面有轻微土体剥落,可能有明显裂纹。总体而言,水泥掺量越大,自密实水泥土的外观保持越完整,自身结构越不容易变形和膨胀,说明水泥的掺入可以提高材料抗干湿能力。从水泥的固化机理分析,当水泥掺量较小时,水化反应生成的结晶较少,不能充分填充材料中的孔隙,起不到胶结作用,导致材料的结构疏松,不能很好地抵抗干湿循环作用;当水泥掺量足够大时,水化反应生成的结晶一部分填充孔隙,使结构更加密实,另一部分和粘粒发生离子交换,使各个颗粒间作用力更强,因此可以有效地抵抗干湿循环作用。

### 2.2 强度劣化规律

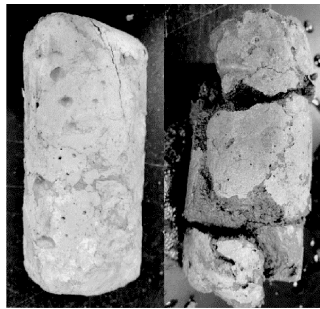
图3(a)为掺水率为52%时,试样第0、1、3、6、9次循环后无侧限抗压强度随水泥掺量的变化规律图。从图中可以看出,当水泥掺量为15%时,试样强度在第1次循环后下降幅度最大,强度降低幅度随干湿循环次数增加逐渐递减,当循环次数大于等于6次时,试样强度趋于稳定;当水泥掺量为18%时,第3次循环后的强度下降幅度明显大于第1次干湿循环后下降幅度,并且低于第6次干湿循

表 4 干湿循环作用下自密实水泥土外观破坏规律

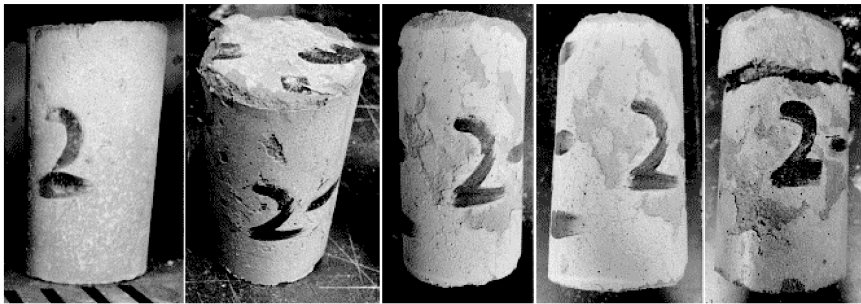
Tab. 4 Appearance damage law of self-compacting cemented soil under wet-dry cycles

破坏类型	配合比	土体剥落形式及裂缝大小	随干湿循环次数损伤情况
完全崩解	2-55	呈团状散落	试样第一次干湿循环后,土体呈团状脱落,用手接触后,直接散体
严重破坏	5-55、12-55	呈颗粒状散落,裂缝沿整个横截面断开	试样顶部边缘土体剥落严重,在多次循环结束后,会沿着裂缝断开
严重损伤	15-55、15-58	顶部剥落严重,侧面有较大裂纹	试样随着干湿循环次数的增加,顶部土体脱落严重,侧面有较大裂纹
轻度损伤	15-52、18-52、20-52、18-55、20-55、18-58、20-58	表面土体轻微剥落	随着第九次干湿循环结束,试样表面土体轻微剥落

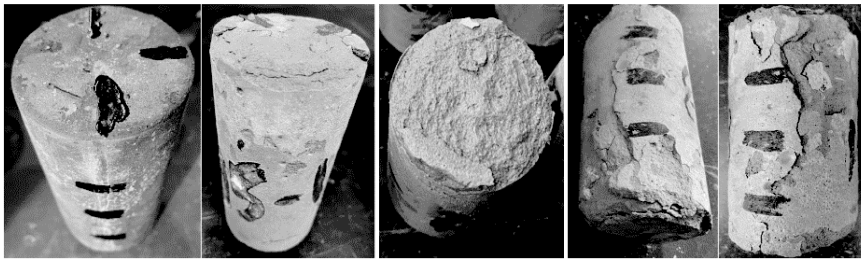
注:配合比指水泥掺量-掺水率,例如 2-55 表示该配合比的水泥掺量为 2%,掺水率为 55%。



(a) 安全崩解(从左到右分别为第0、1次循环)



(b) 严重破坏(从左到右分别为第0、1、3、6、9次循环)



(c) 严重损伤(从左到右分别为第0、1、3、6、9次循环)



(d) 轻度损伤(从左到右分别为第0、1、3、6、9次循环)

图 2 干湿循环后自密实水泥土破坏类型图

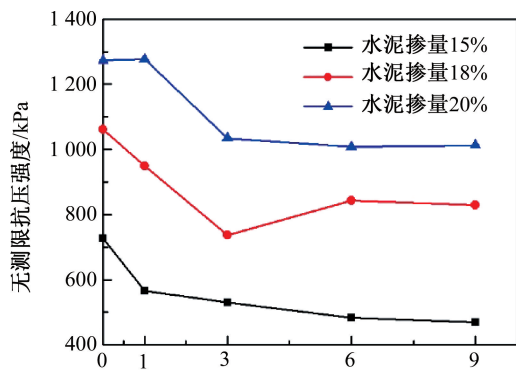
Fig. 2 Failure types of self-compacting cemented soil after wet-dry cycles

环后的强度值,与理论不符,应当舍去,分析其强度在第0、1、6、9次干湿循环劣化规律发现,和水泥掺量15%一致,都是随干湿循环次数的增加先快速下降后逐渐平稳;当水泥掺量为20%时,试样在第一次干湿循环后强度不但没有降低,反而略微上升,这是因为试样干湿循环前的强度为1 262 kPa,拥有足够的自身强度,在进行浸水饱和时,还会进一步地促进水化反应,一部分抵消干湿循环对强度的劣化作用,一部分增加试样的强度,但随着循环的次数增加,试样的结构在薄弱处产生损伤,强

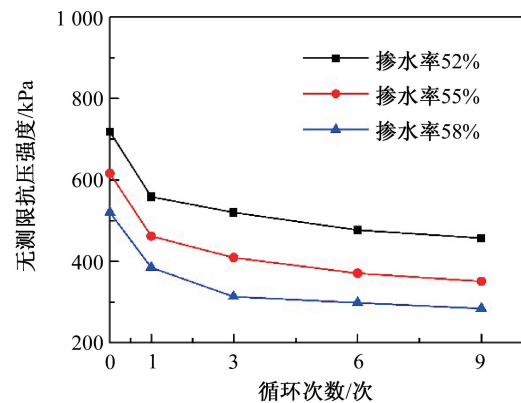
度就会快速下降,第6~9次干湿循环后,强度几乎不变,趋于稳定。

图3(b)(c)表示三组不同水泥掺量的试样,在掺水率分别为55%、58%时,干湿循环0、1、3、6、9次后的强度变化图。舍去水泥掺量为18%、掺水率为55%时的异常值,总体而言,强度劣化规律一致,都是前一次干湿劣化后的强度大于后一次干湿劣化后的强度,强度劣化规律为下降幅度越来越小。

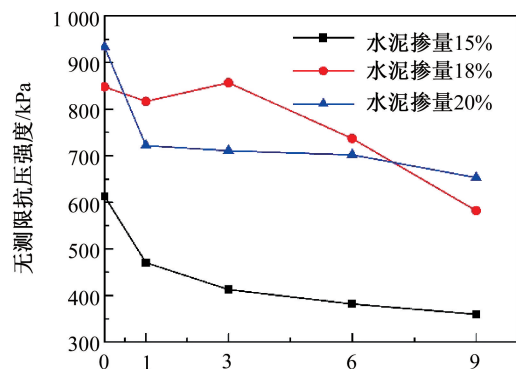
图4表示三组不同掺水率的试样,在水泥掺量分别为15%、18%、20%时,干湿循环0、1、3、6、9次



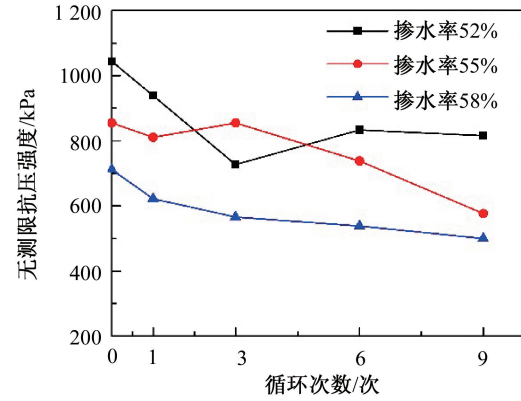
(a) 52%掺水率



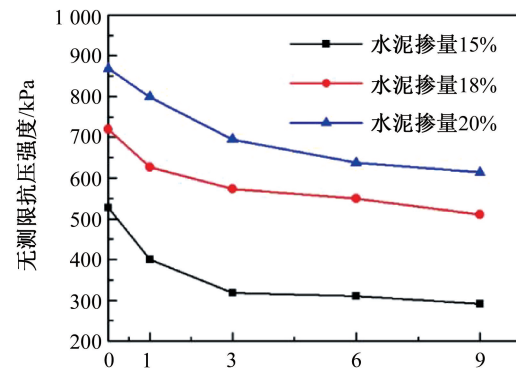
(a) 15%水泥掺量



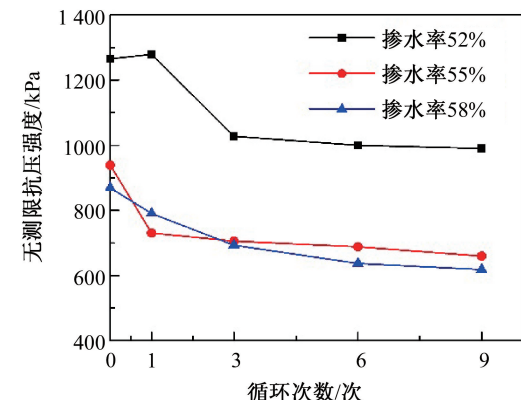
(b) 55%掺水率



(b) 18%水泥掺量



(c) 58%掺水率



(c) 20%水泥掺量

图3 不同水泥掺量试样的强度劣化图

Fig. 3 Strength degradation diagram of samples with different cement contents

图4 不同掺水率试样的强度劣化图

Fig. 4 Strength degradation diagram of samples with different water contents

后的强度变化图。图4(a)这三组数据中前一次劣化后的强度都大于后一次劣化后的强度,经过第3次干湿循环后,强度趋于稳定;图4(b)中,当掺水率为52%、55%时,无侧限抗压强度出现先增大再减小和先减小再增大的变化规律,造成这一现象的原因是测量时的误差。强度劣化规律没有严格遵守随着干湿循环次数的增加而减小,存在一些异常值。当掺水率为58%时,自密实水泥土的强度在第1次干湿循环后明显下降,第3~9次干湿循环后强度变化不大,趋于稳定;图4(c)中,当掺水率为52%时,第1次循环后,强度稍微增加,第3次循环后强度明显下降,并趋于稳定;当掺水率为55%时,第1次循环后,强度明显下降,然后趋于稳定;当掺水率为58%时,强度随着干湿循环次数的增加逐渐减小。

根据上述强度劣化结果分析可知,对于抗干湿循环能力强的自密实水泥土试样,强度劣化规律和初始强度有关,当初始强度足够高时,强度损失就少。单独考虑水泥掺量或掺水率对强度劣化规律的影响,由于不能控制试样的其他因素不变,结果不具有说服力。

自密实水泥土在干湿循环后会发​​生体积变形、质量损失和结构损伤等现象,引起强度劣化,因此,为了定量分析每一次循环后的强度劣化程度,引入强度比 $\xi_j$ 参数,表示第 $j$ 次循环后强度与初始强度的比值,强度比的值越小表示强度劣化越严重,当强度比等于1时,表示强度无变化。按式(1)计算:

$$\xi_j = \frac{q_{wj}}{q_{u0}} \quad (1)$$

式中: $q_{u0}$ 表示自密实水泥土第0次干湿循环时的初始强度,单位为kPa; $q_{wj}$ 表示自密实水泥土第 $j$ 次干湿循环后无侧限抗压强度,单位为kPa。

图5表示不同配合比在第0、1、3、6、9次循环后强度比,可以看出,对于水泥掺量大于等于15%的试块,经历3次循环后,强度比变化幅度较小,趋于稳定,干湿循环对试样结构的损伤破坏主要集中于干湿循环前3次。

综上,干湿循环作用对自密实水泥土强度的影响主要包括两方面:一方面,当水泥掺量为20%时,强度比较大,有的配比试样在浸水饱和时还会继续水化反应,造成强度继续增大;另一方面,干湿循环作用造成试样反复膨胀收缩产生裂纹,会导致结构损伤,从而随着干湿循环次数的增加不

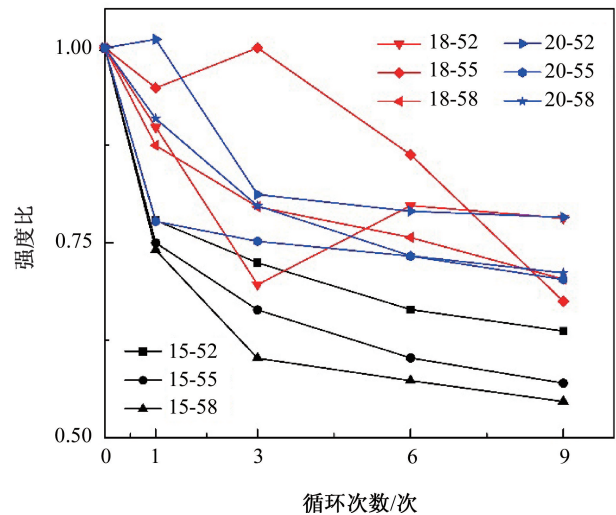


图5 各配合比下强度比随干湿循环次数变化  
Fig. 5 Variation of strength ratio with the number of wet-dry cycles under different mix ratios

断减小,最后趋于稳定。

### 2.3 强度劣化范围

为了确定强度随水泥掺量变化的劣化范围,引入强度衰减率 $R_j$ ,强度衰减率越大,表示劣化越严重,按式(2)计算:

$$R_j = \left(1 - \frac{q_{wj}}{q_{u0}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

通过计算得到,当水泥掺量为15%时,强度劣化范围为35%~44%;当水泥掺量为18%时,强度劣化范围为21%~30%;当水泥掺量为20%时,强度劣化范围为20%~30%;由此可知,随着水泥掺量的增加,自密实水泥土强度劣化范围在减小。

### 2.4 干湿循环劣化后强度预测

由于水泥掺量大于等于15%的自密实水泥土在干湿循环作用下强度下降趋势相似,都是前期下降幅度大,后期下降幅度小,逐渐趋于稳定,因此可以先根据每组配合比第1次循环后的强度下降幅度(强度衰减率)预测第 $j$ 次循环后的强度下降幅度(强度衰减率),计算公式见式(3),再根据初始强度,按式(4)计算第 $j$ 次循环劣化后的强度。

$$R_j = R_1^{j^{0.3}} \quad (3)$$

式中: $R_j$ 表示 $j$ 次循环后预测的强度衰减率; $R_1$ 表示第1次循环后强度衰减率; $j$ 表示循环次数。

$$q_{wj} = (1 - R_j)q_{u0} \quad (4)$$

劣化后无侧限抗压强度真实值和预测值关系见图6,从图中可以看出预测曲线和大多数的试验结果一致,但是配合比20-58的预测误差较大,说

当水泥掺量为 20% 时, 预测的结果要大于真实值, 这个预测公式并不是适用于每种配合比, 在 15%~18% 水泥掺量范围内的预测效果较好。

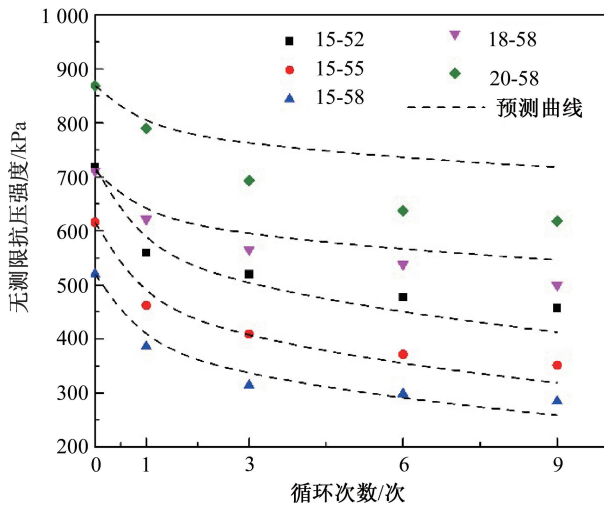


图 6 干湿循环中强度变化真实值和预测曲线

Fig. 6 Real values and predicted curves of strength changes during wet-dry cycles

## 2.5 干湿循环作用对应力-应变曲线的影响

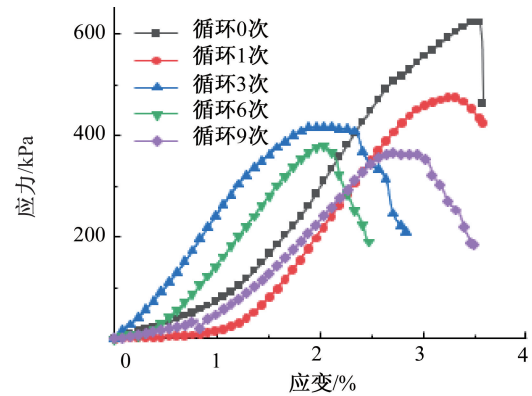
图 7 是不同配合比在第 0、1、3、6、9 次循环后测得的应力-应变曲线, 从图中可以看出, 自密实水泥土试样的应力-应变关系曲线是非线性的, 随着应变的增加, 应力达到峰值后下降。

图 7(a) 表示 15% 水泥掺量、55% 掺水率的自密实水泥土试样在第 0、1、3、6、9 次循环后应力-应变关系。当第 0 次循环时, 峰值强度最大, 随着应变的增加, 应力逐渐增大, 达到峰值后, 应力迅速下降, 试样破坏属于脆性破坏; 当循环 9 次后, 试样的峰值强度变小, 除此之外, 在试样应力达到最大值之前, 应力-应变曲线增长速度变慢, 即斜率变小, 应力达到峰值后, 逐渐下降, 下降速度明显小于第 0 次峰值后下降速度, 下降比较缓慢, 试样破坏属于塑性破坏。

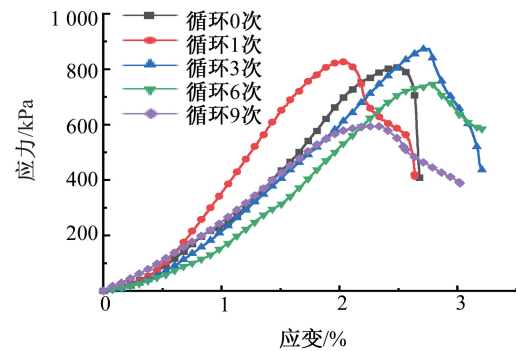
图 7(b) 表示 18% 水泥掺量、55% 掺水率的自密实水泥土试样在第 0、1、3、6、9 次循环后应力-应变关系。从图中可以看出, 前 3 次循环, 试样的应力在达到峰值后, 都会快速下降, 试样破坏属于脆性破坏; 第 6、9 次循环后的应力应变曲线, 峰值强度有所减少, 随着应变的增加, 应力达到峰值后, 缓慢下降, 第 9 次下降速度要小于第 6 次下降速度, 试样破坏属于塑性破坏。

图 7(c) 表示 20% 水泥掺量、55% 掺水率的自密实水泥土试样在第 0、1、3、6、9 次循环后应力-应

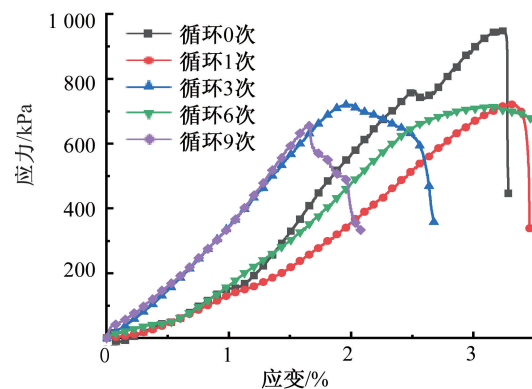
变关系。可以看出第 0 次循环的试样在达到峰值应力的一瞬间, 下降了一半, 下降速度非常快; 第 1、3、6 循环后的应力-应变曲线和第 0 次循环曲线相似, 第 9 次循环应力应变曲线达到峰值后, 下降速度变缓。



(a) 配合比 15-55



(b) 配合比 18-55



(c) 配合比 20-55

图 7 不同循环次数下的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves under different numbers of wet-dry cycles

## 3 结论

1) 干湿循环作用下自密实水泥土可以根据表面裂纹的大小、土体剥落程度以及整个结构是否完整这三个特征将其破坏类型划分为完全崩解、

严重破坏、严重损伤、轻度损伤;当水泥掺量 $\geq 15\%$ 时,严重损伤和轻度损伤自密实水泥土才能具有较强的抗干湿循环性能。

2) 干湿循环作用下,严重损伤和轻度损伤的自密实水泥土强度随循环次数增加逐渐减小,循环3次后趋于稳定;严重损伤和轻度损伤的自密实水泥土强度劣化范围在 $20\% \sim 45\%$ 之间,劣化后依旧具有较高强度,能够抵抗干湿循环侵蚀作用;15%水泥掺量的自密实水泥土,随着干湿循环次数的增加,质量损失率与强度衰减率呈正相关关系,水泥掺量 $> 15\%$ 时,随着干湿循环次数的增加,质量无明显变化,强度由于结构损伤继续劣化;自密实水泥土第 $j$ 次循环后的强度衰减率是第1次强度衰减率的 $j^{0.3}$ 倍,因此,基于初始强度和初始强度衰减率,建立了第 $j$ 次循环后强度预测方程:

$$q_{wj} = (1 - R_j^{0.3}) q_{w0}$$

3) 干湿循环作用下自密实水泥土应力-应变曲线峰值强度会随着循环次数的增加逐渐降低,原来紧密的结构会变得松散,试样的破坏类型由脆性破坏变成塑性破坏。

#### 参考文献:

- [1] 李冰,李焕君,刘金波,等. 某建筑散水开裂原因分析及肥槽回填质量控制[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(11): 131-135.
- [2] 刘成龙. 新型预拌流态固化土性能及回填施工工艺[J]. 山东交通学院学报, 2021, 29(4): 91-98.
- [3] 姜宝景,刘明玮,刘建刚. 用于填筑狭小地下空间的流态水泥土材料室内试验研究[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(2): 226-231.
- [4] 王庆,甘申东,钟奇. 基于RVM的流态水泥土特性智能预测模型研究[J]. 人民长江, 2018, 49(23): 109-113.
- [5] 张焱,严柏杨,亓永帅,等. 自密实水泥土在地下工程回填中应用研究[J]. 河南科学, 2021, 39(1): 98-104.
- [6] 赵晓冬. 流态水泥土施工技术研究[J]. 交通标准化, 2011(16): 122-125.
- [7] 叶至韬,高玉峰,王昕远,等. 自密实水泥土拼宽路堤沉降与稳定性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 52-56+93.
- [8] 邵应峰,周云东,黄安国,等. 自密实固化土的冻融循环力学特性试验研究[J]. 河南科学, 2022, 40(9): 1398-1403.
- [9] 贾坚. 影响水泥土强度的综合含水量研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006(1): 132-136+140.
- [10] 曹智国,章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3446-3454.
- [11] 储诚富,洪振舜,刘松玉,等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学, 2005(4): 645-649.
- [12] 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.
- [13] 王军,丁光亚,潘林有,等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1407-1412.
- [14] DJELLOUL R, MRABENT S A B, HACHICHI A, et al. Effect of cement on the drying-wetting paths and on some engineering properties of a compacted natural clay from oran, algeria[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(2): 995-1010.
- [15] 曹智国,章定文,刘松玉. 固化铅污染土的干湿循环耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3485-3490.
- [16] 水利部水利水电规划设计总院. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019:22-61.
- [17] 全国水泥标准化技术委员会. 通用水泥质量等级: JC/T 452—2009[S]. 北京: 建材工业出版社, 2010: 1-4.
- [18] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 213.
- [19] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土长期性能和耐久性性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 67-68.
- [20] ESTABRAGH A R, PERESHKAFTIB M R S, PARSAEIC B, et al. Stabilised expansive soil behavior during wetting and drying [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(4): 418-427.
- [21] AHMED A, UGAI K. Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011 (66): 84-92.
- [22] YAGUE A, VALLS S, VAZQUEZ E, et al. Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1064-1073.
- [23] 高润东,赵顺波,李庆斌,等. 干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 48-54.
- [24] 王琴,杨鼎宜. 干湿循环对混凝土硫酸盐侵蚀的影响[J]. 混凝土, 2008(3): 22-24.
- [25] 张伟勤,刘连新,代大虎. 混凝土在卤水、淡水中的干湿循环腐蚀试验研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2006(4): 25-29.
- [26] 朱永顺. 碱激发偏高岭土水泥土力学性能及耐久性试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [27] 黄维蓉,杨德斌,周建庭,等. 复掺技术对混凝土抗硫酸盐干湿循环性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 243-246+251.

(责任编辑 王利君)