

## 干湿循环作用下水泥改良泥质板岩粗粒土动力特性\*

陈乐求<sup>1,2†</sup>, 陈俊桦<sup>1</sup>, 张家生<sup>1</sup>

(1.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2.湖南理工学院 土木建筑工程学院, 湖南 岳阳 414006)

**摘要:**为研究干湿循环作用对水泥改良泥质板岩粗粒土的动力稳定性影响,以标准养护龄期达 28 d 的水泥改良泥质板岩粗粒土为试样,设计干湿循环条件下的改良土大型动三轴压缩试验.通过试验研究改良土动弹性模量、阻尼比和动应力强度等力学特征参数随干湿循环次数变化的规律,分析围压对干湿循环效应的影响,探讨干湿循环作用的影响机理.研究表明:1)随着干湿循环作用次数增加,最大动弹性模量和动强度均有所衰减,但衰减到一定程度后逐渐趋于稳定;2)最大阻尼比随着干湿循环作用次数增加而增加,但增加到一定程度后逐渐趋于稳定;3)干湿循环作用下,围压越大,最大动弹性模量和动强度的衰减幅度越小,最大阻尼比的增加幅度也越小.

**关键词:**土动力学;粗粒土;动力特性;大型动三轴压缩试验;水泥改良

**中图分类号:**TU41

**文献标志码:**A

## Dynamic Properties of Cement-improved Argillite-slate Coarse-grained Soil under Drying-wetting Cycles

CHEN Leqiu<sup>1,2†</sup>, CHEN Junhua<sup>1</sup>, ZHANG Jiasheng<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2.College of Civil Engineering and Architecture, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

**Abstract:** In order to examine the influences of drying-wetting cycle on stability of cement-improved argillite-slate coarse-grained soil under dynamic loading, large-scale dynamic triaxial compression test on the soil at the standard curing age of 28 days was carried out. The mechanical characteristics parameters of improved soil, such as the change of dynamic elastic modulus, damping ratio and dynamic stress compressive strength with the drying-wetting cycles were studied by the tests. The influences of confining pressure on the dynamic properties under drying-wetting cycles were analyzed, and the influence mechanism of drying-wetting cycle was also discussed. The results indicate that: 1) Both the maximum dynamic elastic modulus and dynamic compressive strength decay with the drying-wetting cycles until they are tending to be stable. 2) The maximum damping ratio increases with the drying-wetting cycles until it reaches stable value. 3) Under the drying-wetting cycles, the attenuations of the dynamic elastic modulus and dynamic compressive strength of the improved soil decrease with the increase of confining pressure, while the increment of the damping ratio decreases with the increase of confining pressure.

**Key words:** soil dynamics; coarse-grained soil; dynamic properties; large-scale dynamic triaxial com-

\* 收稿日期:2017-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308210), National Natural Science Foundation of China(51308210)

作者简介:陈乐求(1981—),男,湖南岳阳人,中南大学博士后,湖南理工学院副教授

† 通讯联系人, E-mail:365148895@qq.com

pression test; cement improvement

雨水降渗和蒸发、地下水位上升和下降等水环境的变化是较为常见的自然现象,因此,路基受到干湿循环作用也较为常见.干湿循环作用下,路基填料土容易产生较大的胀缩变形,从而导致路基病害.特别是富含亲水矿物成分的土料,如红黏土、黄土、风化的泥岩等水稳性差的土料,土的干湿循环作用效应更明显.为确保这些水稳性差的土料满足路基填筑要求,需要对其进行化学改良,如水泥改良或石灰改良.研究干湿循环作用下化学改良土的力学性质,可以为改良土路基设计、路基土水稳性评价以及改良效果评价等提供参考,具有重要的工程实际意义.

目前,针对干湿循环作用下化学改良土的力学性质研究主要是针对静力性质,针对动力性质的研究较少<sup>[1-6]</sup>.例如安爱军<sup>[1]</sup>、李冬立等<sup>[2]</sup>和薄煜琳等<sup>[4]</sup>研究干湿循环条件下水泥改良土的无侧限抗压强度变化特性.王建华等<sup>[3]</sup>研究干湿循环过程中水泥改良土静三轴抗压强度的衰减机理.杨和平等<sup>[5]</sup>研究干湿循环条件下改良膨胀土的抗剪强度.虽然目前我国相关的路基设计规范对路基稳定性的评价主要考虑静力性质的影响<sup>[7]</sup>,但是现有研究表明<sup>[8]</sup>,土的动力变形与破坏对路基稳定性的影响更大.此外,既有研究主要针对改良细粒土<sup>[3-5]</sup>,很少针对改良粗粒土.而对承载性能要求较高的路基通常用粗粒土作为主要填料.总的来说,干湿循环作用下化学改良粗粒土动力学性质的研究具有积极意义.

直剪试验<sup>[9-10]</sup>、离心机试验<sup>[11]</sup>、共振柱试验<sup>[12]</sup>和振动三轴试验等是研究土动力性质的主要方法.其中,由于设备经济实用,试验结果方便工程应用,振动三轴试验是最常用的研究方法.通常利用振动三轴试验研究干湿循环条件下土的动强度、动弹性模量、阻尼比等力学参数的变化规律<sup>[6]</sup>.

泥质板岩在我国分布较广.不少公路和铁路路基的建设项目经过泥质板岩区.如武广客运专线途经的湖南岳阳市就是典型的泥质板岩区域.在干燥条件下,泥质板岩粗粒土具有良好的承载性,但是由于土中高岭石和绿泥石等含量较高,泥质板岩土被水浸泡易软化、崩解,水稳性较差.因此,为应用于填筑路基,需对泥质板岩土进行水泥或者石灰化学改良.为此,针对水泥改良泥质板岩粗粒土,本文设计了干湿循环条件下的振动三轴试验.通过试验研

究改良土的动弹性模量、阻尼比和动强度等随干湿循环次数的变化规律,分析围压及其对干湿循环作用的影响,以期研究成果能为干湿循环作用下泥质板岩改良粗粒土路基的动力稳定性评估等提供参考.

## 1 干湿循环作用下改良土动三轴试验方案

### 1.1 土样及其物理参数

试验所取土样为褐黄色泥质板岩土.土中主要矿物成分为石英、白云母、绿泥石和高岭石等,其中,白云母、绿泥石和高岭石等亲水矿物的含量较高.土吸水能力强,遇水易软化、崩解.饱水状态下土强度低.土样的天然含水率为5%~20%,密度为1.04~1.70 g/cm<sup>3</sup>.土样的颗粒不大于60 mm,土中砾粒组含量最多,约为58.8%;其次为砂粒组,含量约为33.6%;细粒土含量约为8%.土的不均匀系数为133.6,曲率系数为0.28.级配曲线如图1所示.根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007),土样为含细粒土砾.

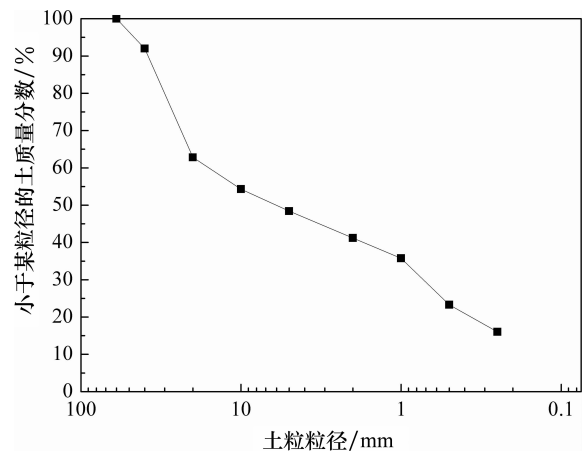


图1 泥质板岩粗粒土的级配曲线  
Fig.1 Gradation curve of argillite-slate coarse-grained soil

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 试验仪器及制样

考虑到泥质板岩粗粒土颗粒的尺寸效应,采用大型三轴仪进行试验.试验设备为TAJ-2000大型静动三轴仪.改良加固剂为普通硅酸盐水泥P.O.32.5.根据现有研究成果<sup>[13-16]</sup>,当土中水泥含量 $\geq 4\%$ 时,改良土力学性质可满足路基填筑要求.本文试验在

土样中掺入质量分数为5%的水泥,以95%的压实度、15%的含水率和 $2.0\text{ g/cm}^3$ 的干密度制作试样.试样为直径300 mm,高600 mm的圆柱体.

### 1.2.2 试验条件和试验方法

#### 1) 干湿循环试验条件

土的1次干湿循环包括吸水 and 失水两个过程.理想状态下,1次干湿循环应达到完全饱和和完全失水.对于工程实际,干湿循环过程中土的饱水率和失水率通常都不是100%,与理想状态有较大差别.干湿循环过程中不同的饱水率和失水率对土的力学性质影响较大.因此,对于土的干湿循环,目前尚未有统一的试验标准.学者们提出了不同的干湿循环试验标准<sup>[2-5,17-18]</sup>.例如,文献[3]按照30%的失水率对土样进行自然失水处理,然后采用抽真空饱和法和法对土样进行饱和处理.将这样的一个失水与饱和过程看作1次干湿循环.该方法操作较为复杂.文献[2]则按照美国ASTM D559-44和AASHTO T136-45“压实水泥土干湿试验标准方法”的规定,先让试样泡水2 d,再在室内放置2 d,让其自然风干.4 d时间为1次干湿循环.该方法以天数为单位去衡量干湿吸水和失水时间,方便实际工程应用和参考.由于土中孔隙较大,泥质板岩粗粒土易于排水,而土中亲水矿物含量较高,泥质板岩粗粒土又易于吸水,所以泥质板岩粗粒土干湿循环过程时间一般较短.为此,文献[17]在文献[2]的基础上对干湿循环试验控制条件进行了简化,将泡水天数设为1 d,把自然风干天数设为1 d.2 d时间完成1次干湿循环.

本文试验采用文献[17]提出的干湿循环方法.试验中,干湿循环次数 $M=0,3,5,7,10,14$ .考虑到当标准养护龄期达到28 d以上水泥强度增长放缓,同时水泥对土的加固作用也不会发生较大变化,本文对标准养护龄期达到28 d的试样进行干湿循环下的动强度试验以及动弹性模量与阻尼比试验.

#### 2) 动弹性模量与阻尼比、动强度试验

在不同围压水平下,对不同干湿循环次数的试样进行等向固结,然后在试样轴向施加正弦波荷载.试验过程排水.

对动弹性模量与阻尼比试验,采用等效线性模型,按照文献[19]的方法进行具体计算.采用逐级提高动应力幅值的方式进行加载.正弦波荷载以及动应力幅值计算公式见式(1)式(2).

$$\sigma_d = \bar{\sigma}_d \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_d = kS \quad (2)$$

式中: $\sigma_d$ 为试样轴向动应力; $\bar{\sigma}_d$ 为动应力幅值; $S$ 为围压; $k$ 为动静应力比, $0 < k < 1$ ; $f$ 为加载频率; $t = N/f$ ,为加载作用时间, $N$ 为循环振动次数.

动弹性模量与阻尼比试验以及动强度试验均设计3个围压水平: $S=200\text{ kPa}, 300\text{ kPa}, 500\text{ kPa}$ .加载频率 $f=1\text{ Hz}$ .对于动强度试验,设轴向应变达到5%为土发生破坏的标准.将轴向应变达到5%所需的振次称为破坏振次,记为 $N=N_f$ .与破坏振次对应的动应力幅值为该振次下改良土的动应力强度.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 动弹性模量与阻尼比试验结果及分析

动弹性模量和阻尼比随动应变幅值变化的典型关系曲线分别如图2和图3所示.

从图2和图3看出,随着动应变幅值增加,动弹性模量近似呈反比例关系衰减,而阻尼比近似呈双曲线函数关系增大.因此,干湿循环作用下,泥质板岩改良粗粒土的动弹性模量、阻尼比随动应变幅值变化的关系可采用Hardin等提出的等效线性黏弹性模型进行分析.根据文献[19],可拟合得到最大动弹性模量和最大阻尼比,它们是等效线性黏弹性模型中的两个特征参数.

从图2和图3还可看出,其他条件相同时,干湿循环次数发生改变,改良土动弹性模量和阻尼比也发生改变.即干湿循环作用对动弹性模量和阻尼比有影响.

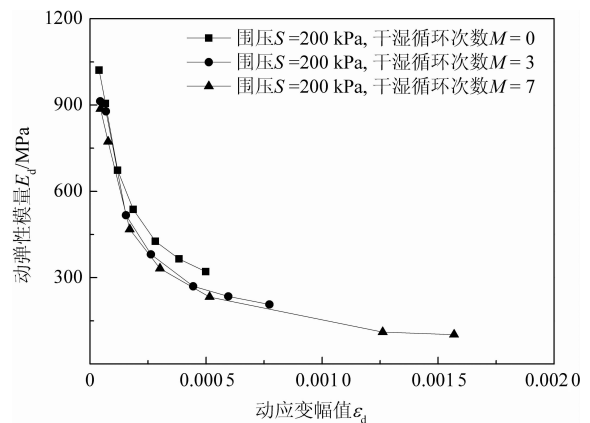


图2 动弹性模量与动应变幅值的关系  
Fig.2 Relations between the dynamic elastic modulus and the amplitude of dynamic strain

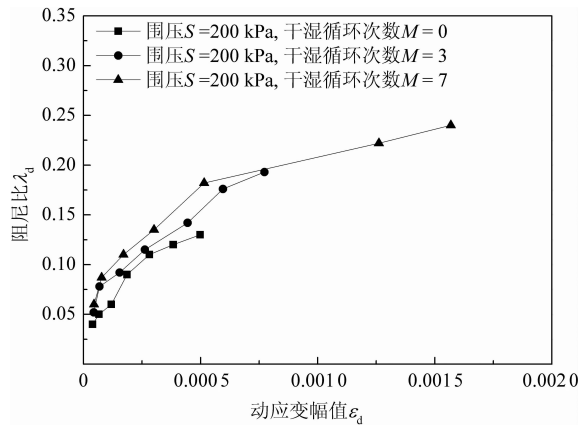


图3 阻尼比与动应变幅值的关系

Fig.3 Relations between the damping ratio and the amplitude of dynamic strain

2.1.1 动弹性模量变化规律

从图2看出,其他条件相同时,随着干湿循环作用次数增加,改良土动弹性模量减小.本文重点分析干湿循环作用对最大动弹性模量的影响.图4给出了不同围压下最大动弹性模量和干湿循环作用次数的关系.从图4看出,当干湿循环作用次数较小时( $M < 5$ ),最大动弹性模量随干湿循环作用次数增加而减小.当干湿循环作用次数增加到一定程度时( $M > 5$ ),最大动弹性模量基本趋于稳定.这表明,干湿循环作用会导致改良土最大弹性模量衰减,但这种衰减影响是有限的.

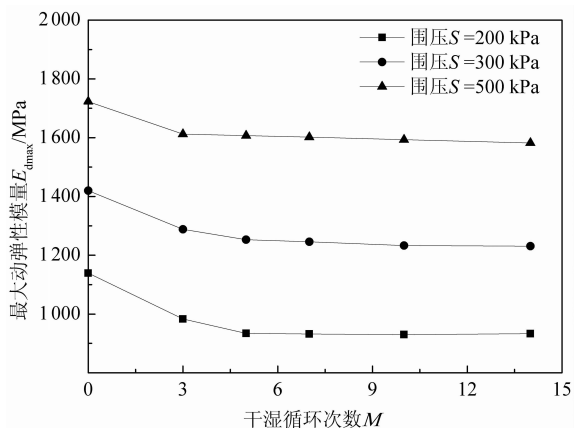


图4 不同围压下最大动弹性模量与干湿循环次数的关系

Fig.4 Relations between the maximum dynamic elastic modulus and the drying-wetting cycles under different confining pressures

根据图4,当干湿循环次数从0增加到14时,对应围压为200 kPa,300 kPa和500 kPa的最大动弹性模量分别从1 139 MPa减小至933 MPa,从1 420 MPa减小至1 231 MPa和从1 723 MPa减小

至1 582 MPa,分别减小206 MPa,189 MPa和141 MPa,相对减小幅度分别为18.1%、13.3%和8.1%.可见随着围压增加,干湿循环对最大弹性模量的衰减作用减小.即围压越大,最大动弹性模量的干湿循环衰减效应越不显著.

2.1.2 阻尼比变化规律

从图2看出,其他条件相同时,随着干湿循环作用次数增加,改良土阻尼比增大.与利用最大动弹性模量分析动弹性模量的干湿循环变化规律类似,本文采用最大阻尼比分析干湿循环对改良土阻尼比的影响.图5给出了不同围压下的最大阻尼比与干湿循环次数的关系曲线.

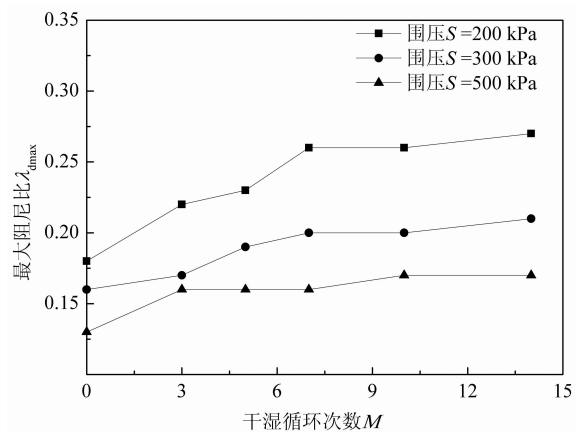


图5 不同围压下最大阻尼比与干湿循环次数的关系

Fig.5 Relations between the maximum damping ratio and the drying-wetting cycles under different confining pressures

从图5看出,同一围压下,改良土最大阻尼比随着干湿循环次数增加而增大.当干湿循环次数增大到一定程度后,最大阻尼比基本不再变化.例如对于围压 $S = 200$  kPa的曲线,当干湿循环次数 $M < 7$ 时,随着干湿循环次数增加,最大阻尼比由0.18增加到0.26,随后曲线变得平缓( $M > 7$ ).这表明,干湿循环作用会导致改良土最大阻尼比增大,但增大幅度是有限的.

从图5还看出,当干湿循环次数从0增加到14时,对应围压为200 kPa,300 kPa和500 kPa的最大阻尼比分别从0.18增加至0.27、从0.16增加至0.21和从0.13增加至0.16,分别增加0.09,0.05和0.03,相对增加幅度分别为50.0%、31.3%和23.1%.可见随着围压增加,干湿循环对最大阻尼比的影响减小.

2.2 动强度试验结果及分析

图6给出了当围压 $S = 300$  kPa、不同循环动应

力幅值作用下,破坏振次  $N_f$  (轴向应变累积达到 5% 对应的循环振次) 与干湿循环次数  $M$  的关系曲线。从图 6 看出,围压和动应力一定时,当干湿循环作用次数较小时 ( $M < 7$ ),破坏振次随干湿循环作用次数增加而减小。当干湿循环作用次数增加到一定程度时 ( $M > 7$ ),破坏振次基本趋于稳定。由于相同循环动应力幅值作用下,破坏振次越大表示改良土抵抗破坏变形的能力越弱,即动强度越小,因此,干湿循环使得改良土的动强度劣化,但这种劣化影响是有限的。

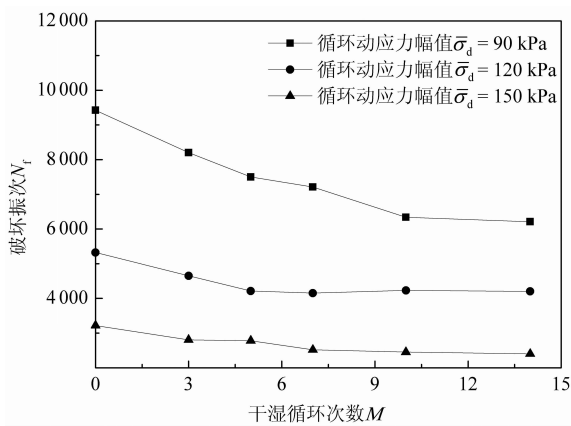


图 6 不同循环动应力幅值作用下破坏振次与干湿循环次数的关系

Fig.6 Relations between the failure cycles of dynamic loading and the drying-wetting cycles under different dynamic stress pressures of cycle

图 7 给出了当循环动应力幅值  $\bar{\sigma}_d = 120$  kPa、不同围压作用下的破坏振次与干湿循环次数的关系曲线。从图 7 看出,当干湿循环次数从 0 增加到 14 时,对应围压为 200 kPa, 300 kPa 和 500 kPa 的破

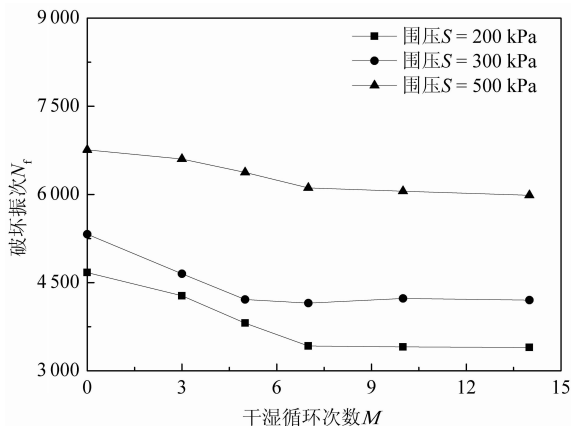


图 7 不同围压作用下破坏振次与干湿循环次数的关系

Fig.7 Relations between the failure cycles of dynamic loading and the drying-wetting cycles under different confining pressures

坏振次分别从 4 672 减小至 3 498、从 5 324 减小至 4 201 和从 6 759 减小至 5 987, 分别减小 1 274, 1 123 和 772, 相对减小幅度分别为 27.3%, 21.1% 和 11.4%。可见随着围压增大,改良土的破坏振次随干湿循环次数增加而减小的幅度逐渐减小,即随着围压增大,干湿循环对动强度的影响减小。

### 3 干湿循环作用影响机理探讨

土的干湿循环过程实际上是水环境下土内部矿物晶体、颗粒发生复杂物理化学变化的过程。首先,土中亲水矿物成分越多,土颗粒表面吸附水的能力越强,土中越容易发生水物理化学反应。吸水过程中,水分子进入层状的黏土矿物颗粒之间形成极化的水分子层,这些水分子层又可以不断吸水扩层,同时水分子进入黏土矿物晶胞层间,形成矿物内部层间水层,造成了黏土矿物的膨胀<sup>[20]</sup>。失水过程中,黏土矿物收缩。亲水矿物中的黏土矿物具有很强的亲水性和膨胀性,而黏土矿物中的蒙脱石亲水性和膨胀性最强,伊利石次之,绿泥石和高岭石等较弱。因而含蒙脱石较高的黏性土易产生显著的体积膨胀和收缩,如膨胀土等。其次,土的内部孔隙率越高,土的吸水和失水越容易,土颗粒间、矿物晶体间的结合水膜越难形成,结合水膜变化也越小,土体越不容易发生体积膨胀和收缩,例如粗粒土等。本文试验的土样为泥质板岩粗粒土,土中主要含白云母、绿泥石和高岭石等亲水矿物,其中绿泥石和高岭石是黏土矿物,因此,干湿循环作用下,泥质板岩粗粒土的体积变化虽然不如膨胀土显著,但这种变化不可忽略。

根据文献[13],理想状态下,水泥改良土中土颗粒通常被水泥凝胶吸附包裹,同时土颗粒的孔隙中填充了大量纤维状结晶,起到了一定的网络格架作用,形成了水泥石骨架体,这能有效抑制土中矿物颗粒的膨胀体积变形和崩解软化。根据文献[3],实际工程中,水泥改良土中水泥质量分数一般不会超过 10%,较少的水泥含量使得水泥胶结体很难完全均匀地分布在土体内,特别是含粗颗粒的水泥改良土,容易出现一些部位水泥凝胶厚度较大,另一些部位水泥凝胶厚度较薄的现象,甚至有的颗粒(团)未被水泥凝胶包裹。考虑到水泥石承载力主要由水泥骨架和水泥凝胶包裹的颗粒团的强度确定,因此,水泥改良泥质板岩粗粒土总会或多或少发生崩解、水软化、干缩与湿胀变形等。而土颗粒(团)的

崩解、干缩与膨胀引起的变形必然受到水泥骨架结构强度的限制.当变形产生的应力超过水泥骨架结构强度时,将在胶结部位形成微裂缝,并且随干湿循环次数的不断增加,崩解、干缩与湿胀引起的不可逆变形也将进一步增大,这使得微裂缝继续不断萌生和扩展,造成水泥改良土自身结构的破坏,从而导致改良土的力学性质劣化<sup>[2-3,6]</sup>.由于水泥骨架具备一定的稳定性,且土中发生水物理化学反应的矿物颗粒含量也是一定的,因而干湿循环作用下改良土整体骨架变形达到一定程度时就很难继续发展.即干湿循环的劣化效应也是有限的.

由以上分析可知,干湿循环使得改良土内部结构发生一定程度的破坏,从而使得改良土的刚度和强度均产生一定程度的衰减.由于本文的循环动力试验是在干湿循环基础上进行的,因而这种衰减规律表现为动弹性模量和动强度随干湿循环次数增加而减小.如图4中最大动弹性模量的变化规律和图6中动强度的变化规律所示.土的内部结构发生破坏会影响土中颗粒的振动和应力、变形的传播,宏观上表现为土的黏滞性增加,即随着干湿循环次数增加,改良土的内部结构逐渐发生破坏,土的黏滞性逐渐增加.而土的黏滞性越大,阻尼比越大.由于干湿循环作用对土内部结构破坏是有限的,因此,干湿循环作用下土的黏滞性增加是有限的,从而阻尼比的增加也是有限的.这种变化规律如图3和图5所示.

无论是干湿循环作用还是循环动力作用,当围压较大时,土的变形发展都比较困难,导致水泥胶结部位较难产生裂纹或者产生的裂纹较难扩展,从而使得改良土的内部结构也较难破坏.因此,干湿循环作用下,围压越大,土的刚度和强度的衰减幅度越低,土的黏滞性的增加幅度也会减小,即动弹性模量和动强度的衰减幅度降低,阻尼比的增加幅度减小,表现出的规律如图4、图5和图7所示.

#### 4 结论

为研究干湿循环作用下水泥改良泥质板岩粗粒土的动力稳定性,本文设计了方便实际工程参考的干湿循环试验条件,并在该条件下对改良土进行大型动三轴压缩试验.通过试验研究干湿循环作用对土的动弹性模量、阻尼比以及动强度等的影响,分析和探讨干湿循环作用的影响机理.得到以下主要结论:

1) 干湿循环对改良土动力性质起到一定的劣化作用.随着干湿循环作用次数增加,改良土动弹性模量和动强度等均有所衰减,但衰减到一定程度后均逐渐趋于稳定,而阻尼比则有所增加,但增加到一定程度后也逐渐趋于稳定.因此,干湿循环作用下,水泥改良泥质板岩土的动力稳定性良好.

2) 围压对改良土动力性质的干湿循环效应有重要影响.提高围压有助于减小干湿循环作用对土的动力性质影响.干湿循环作用下,围压越大,改良土的最大动弹性模量和动强度的衰减幅度越小,最大阻尼比的增加幅度也越小.

#### 参考文献

- [1] 安爱军.全风化泥质板岩作为铁路客运专线路基填料化学改良方法试验研究[J].公路,2008(6): 116-118.  
AN Aijun. The chemical improvement method test of fully-intensely weathered argillite-slate soil applied in subgrade of railway passenger special line[J]. Highway, 2008(6): 116-118. (In Chinese)
- [2] 李冬立,聂志红.全风化泥质板岩填料改良的室内试验研究[J].铁道建筑,2010(1): 122-124.  
LI Dongli, NIE Zhihong. Test of fully weathered argillite-slate soil improved[J]. Railway Engineering, 2010(1): 122-124. (In Chinese)
- [3] 王建华,高玉琴.干湿循环过程导致水泥改良土强度衰减机理的研究[J].中国铁道科学,2006,27(5): 23-25.  
WANG Jianhua, GAO Yuqin. Study on the strength degradation mechanism of cement-soils resulting from dry-wet cycles[J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 23-25. (In Chinese)
- [4] 薄煜琳,杜延军,魏明俐,等.干湿循环对 GGBS+MgO 改良黏土强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(S1): 134-139.  
BO Yulin, DU Yanjun, WEI Mingli, et al. Effect of wetting-drying cycles on strength properties of ground granulated blast-furnace slag and magnesium oxide-stabilized soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 134-139. (In Chinese)
- [5] 杨和平,张锐,郑健龙.有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J].岩土工程学报,2006,28(11): 1936-1941.  
YANG Heping, ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1936-1941. (In Chinese)
- [6] 李星,程谦恭,张金存,等.干湿循环下高速铁路水泥改良膨胀土动力特性试验研究[J].铁道建筑,2016(6): 99-103.  
LI Xing, CHENG Qiangong, ZHANG Jincun, et al. Experimental study on dynamic performance of cement-improved ex-

- pansive soil in high speed railway subgrade in wettingdrying cycles[J]. *Railway Engineering*, 2016(6): 99—103. (In Chinese)
- [7] 贾厚华. 化学改良土无侧限抗压强度的试验研究[J]. *土工基础*, 2010, 24(3): 84—87.  
JIA Houhua. Experimental research on unconfined compressive strength for chemical-improved soil[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2010, 24(3): 84—87. (In Chinese)
- [8] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(7): 1156—1160.  
YANG Guangqing. Study of dynamic performance of cement-improved soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1156—1160. (In Chinese)
- [9] 陈俊桦, 张家生, 李健. 考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2015, 47(4): 22—30.  
CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Jian. Experimental research on mechanical characteristics of cohesive soil-structure interface by considering its roughness[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2015, 47(4): 22—30. (In Chinese)
- [10] 陈俊桦, 张家生, 李健. 接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学性质的影响[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47(5): 1682—1688.  
CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Jian. Influence of interface roughness on mechanical properties of red clay-concrete interface[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47(5): 1682—1688. (In Chinese)
- [11] 陈正发, 于玉贞. 土工动力离心模型试验研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S2): 4026—4033.  
CHEN Zhengfa, YU Yuzhen. A review on development of geotechnical dynamic centrifugal model test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S2): 4026—4033. (In Chinese)
- [12] 董全杨, 蔡袁强, 徐长节, 等. 干砂饱和砂小应变剪切模量共振柱弯曲元对比试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2283—2289.  
DONG Quanyang, CAI Yuanqiang, XU Changjie, *et al.* Measurement of small-strain shear modulus  $G_{max}$  of dry and saturated sands by bender element and resonant column tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2283—2289. (In Chinese)
- [13] 祝艳波, 余宏明, 杨艳霞, 等. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(2): 425—432.  
ZHU Yanbo, YU Hongming, YANG Yanxia, *et al.* Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 425—432. (In Chinese)
- [14] CHEN Leqiu, ZHANG Jiasheng, CHEN Junhua, *et al.* A study on improving-by-cement the mechanical characteristics of argillaceous slate coarse-grained soil[J]. *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 2016, 17(48): 16.1—16.6.
- [15] CHEN Leqiu, ZHANG Jiasheng, CHEN Junhua, *et al.* Dynamic characteristic test of argillite-slate gravel cement-improved subgrade soil[J]. *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 2016, 17(46): 59.1—59.9
- [16] CHEN Leqiu, CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, *et al.* Research on the characteristics of dynamic strength and cumulative deformation of cement-improved argillaceous-slate coarse-grained soil for filling subgrade[J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2016, 13(9): 57.1—57.8.
- [17] CHEN Leqiu, CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, *et al.* Research on mechanics characteristics of cement-improved argillite-derived coarse-grained soil under drying-wetting cycles [J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2016, 13(9): 6.1—6.12.
- [18] 张立明, 余红发. 干湿循环次数对氯离子扩散系数的影响[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2014, 41(3): 26—30.  
ZHANG Liming, YU Hongfa. Influence of dry-wet cycles on chloride diffusion coefficient [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(3): 26—30. (In Chinese)
- [19] 邓国栋, 张家生, 王启云, 等. 高速铁路粗粒土填料动力参数试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(2): 76—83.  
DENG Guodong, ZHANG Jiasheng, WANG Qiyun, *et al.* Experimental research on dynamic parameters of high-speed railway coarse-grained padding[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(2): 76—83. (In Chinese)
- [20] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(7): 866—870.  
HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(7): 866—870. (In Chinese)