

冻融循环下粗粒土路基动回弹模量衰变规律研究

冉武平^{*1,2}, 陈慧敏^{1,2}, 黄建军³, 李玲^{1,2}, 艾贤臣^{1,2}

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆土木工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 乌鲁木齐城建设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:为明确冻融循环对粗粒土路基力学特性的影响,借助三轴试验系统,研究了不同含水率、不同应力加载路径和不同冻融循环次数下粗粒土动回弹模量的变化规律,并在此基础上提出粗粒土动回弹模量调整系数及衰变规律的拟合公式.试验结果表明:动回弹模量随着含水率的增加呈现减小的趋势,含水量4%对应的动回弹模量最大,不同含水率之间对应的动回弹模量差值在经过冻融循环作用后不会发生较大的变化;偏应力一定时,围压与动回弹模量呈正相关,围压一定时,偏应力与动回弹模量呈负相关;动回弹模量随着冻融循环次数 N 的增加整体呈衰减趋势,衰变过程可分为快速衰减($N=0\sim3$)、缓慢衰减($N=3\sim5$)及衰减停止($N=5\sim7$)3个阶段.研究成果可为我国季节性冰冻区公路路基强度设计提供参考依据.

关键词:道路工程;粗粒土;动回弹模量;冻融循环;调整系数

中图分类号: TU443

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202102009

0 引言

粗粒土作为一种优良填料常被用于路基的修筑,在我国季节性冰冻区由于气候环境因素致使粗粒土路基出现不同程度的损伤和性能劣化,路基强度衰变引起的道路结构整体性能衰变,导致路面出现局部龟裂和破碎以及纵向不均匀沉降和变形等^[1-3].这些病害直接影响到行车的安全性及舒适性,因此有必要开展冻融循环作用对路基强度衰变规律影响的深入研究.动回弹模量不仅是道路设计的重要指标,同时也是道路结构力学响应解析的关键参数.故本文以动回弹模量为指标研究粗粒土在冻融循环作用下强度衰变规律.

目前关于冻融循环对路基力学特性的影响研究,国内外学者从宏观角度和微观角度展开了分析.胡晓^[4]在粗粒土填料中掺入不同含量的细粒土,进行了冻融和冻胀量试验.张互助^[5]利用室内冻融循环试验和三轴试验研究分析了路基黏土的应力-应变关系、弹性模量、抗剪强度和破坏强度等力学参数在冻融、湿度、围压等因素作用下的演

化规律.宋金华等^[6]对冻融循环后的石灰改良土动力特性进行研究,分析了动应力幅值、冻融循环次数、围压等因素对土体累积塑性变形的影响并建立了相关因素的预估模型.冉武平等^[7]通过室内三轴试验,研究了16种应力路径、3个压实度和4种含水率状态下重塑黄土的动回弹特性.化晋创^[8]通过大量文献和工程现场调研,开展了冻融循环条件下粗粒土填料的静、动力特性研究.刘晖等^[9]对含砂粉土三轴试验结果的影响因素进行显著性分析,得出围压、含水率、压实度、冻融循环次数对试件破坏强度和弹性模量影响. Liu等^[10]探究了不同压实度及不同含水率下红黏土动回弹模量和塑性变形规律.陈忠达等^[11]研究了不同冻融循环次数对不同含水率粗粒土静动回弹模量的影响. Chen等^[12]开展了冻融循环对岩石力学特性影响的室内试验,提出岩石在冻融循环作用下力学特性衰变表达式. Chamberlain等^[13]采用土力学中常用的分析方法,提出冻融循环作用对土力学性质改变的机理.

也有众多学者从微观角度分析冻融循环对路

收稿日期: 2020-05-10; 修回日期: 2021-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768070); 新疆大学自然科学基金资助项目(201809).

作者简介: 冉武平^{*} (1977-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, E-mail: rwp@163.com.

基填料力学特性的损伤机制.王瀚霖^[14]采用单元体试验,在制备6种粗粒土中掺入不同含量细粒土,通过CT扫描试验及静、动三轴试验,研究粗颗粒含量对土体力学参数的影响,提出特征粗颗粒体积分数 $f_{v\text{-cha}}$,并提出 $f_v \leq f_{v\text{-cha}}$ 土体力学性能受细颗粒控制,反之受粗颗粒控制.房建宏等^[15]研究了在不同冻融循环作用下红黏土粒度成分和物理力学性质的变化规律,试验结果表明颗粒在冻融循环次数 $N \leq 10$ 时,粒径向小于0.01 mm及0.01~0.05 mm富集;当 $N > 10$ 时,粒径在0.002~0.005 mm富集.戎虎仁等^[16]研究了单孔砂岩在冻融循环作用下力学性能的弱化机理.李杰林等^[17]利用核磁共振成像了经历不同冻融循环次数后花岗岩孔隙的发育和扩展特性,动态地显示岩石的冻融损伤过程.

已有的研究结果表明,在冻融循环条件下,含水率、冻融循环次数、动应力幅值、应力加载路径等都会对路基土力学性能的衰变产生影响.不同土质的路基填料在微观试验分析下其力学特性的衰变机理各不相同.通过大量的文献及现场调研发现广泛使用的粗粒土路基填料目前缺乏在冻融循环条件下动回弹模量衰变规律的研究,基于此本文以新疆典型级配组成的粗粒土为研究对象,通过室内冻融循环试验和动三轴试验,分析3种含水率、8种应力加载路径及5种冻融循环次数下粗粒土路基动回弹模量,深入研究粗粒土动回弹模量衰变规律及机理,并对典型路基应力状况下的动回弹模量衰变规律进行拟合,得到拟合度较高的模量衰变方程及不同影响条件下动回弹模量的调整系数,从而为粗粒土路基设计提供理论依据和经验参数.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样取自乌鲁木齐市新医路西延典型路基填料,按照《公路土工试验规程》(JTG E 40—2007)试验方法得到土样的颗粒筛分曲线,如图1所示.并根据击实试验得到土样的最佳含水率为5%,最大干密度为 2.4 g/cm^3 .通过计算得到不均匀系数 $C_u = 17.5$,大于5, $C_c = 1.39$,大于1且小于3,为级配良好的粗粒土.

1.2 试验方案

为得到不同含水率的粗粒土在不同冻融循环次数下的动回弹模量衰变规律,考虑了应力状况、

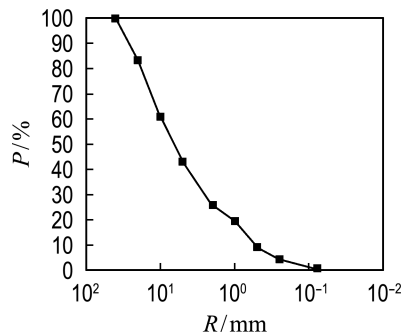


图1 试验土样级配筛分曲线

Fig. 1 Grading and screening curve of the test soil

含水率和冻融循环次数对动回弹模量的影响,分别开展了冻融循环试验和动三轴试验.含水率选取原则根据粗粒土试验路段路基湿度监测数据并结合粗粒土成型试探试验可知含水率3%时试件难以成型及含水率7%的试件出现脱模困难和汲泥现象,故最终取4%、5%和6%(质量分数)3种含水率,其中含水率5%为最佳含水率.压实度以实际道路路基施工控制为原则设置为96%.冻融循环试验次数 N 分别为0、1、3、5、7.温度借鉴季节性冰冻区公路路基工作区在冻融循环期内温度变化范围^[18]及新疆地区路基温度监测数据,最终确定冻融循环温度为 $-20 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.每种工况制作4个平行试件.

1.3 试验过程

(1) 击实样的制备

按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)击实法制备三轴试样,试样直径100 mm,高度为200 mm.试件按含水率4%、5%、6%制备,根据压实度96%,称取所需不同含水率粗粒土的质量,将土样分6层装入三瓣饱和器中分层击实.各层土料质量相等,每层击实至要求高度后,将表面刨毛,然后再加第2层土料,如此进行直至最后一层,控制各组试样的密度差值小于 0.02 g/cm^3 .将制好的试件密封保存并进行冻融循环试验.试件一次冻融循环时间为24 h,其中冻12 h,融12 h.

(2) 荷载加载

粗粒土动回弹模量采用2~10 Hz动三轴试验系统(DYNTTS)进行测试,如图2所示.

试验参数及应力加载序列如表1所示,参考陈声凯等^[19]和罗志刚^[20]相关研究取值.采用半正弦波荷载波形,动载频率为1 Hz,荷载间歇时间取0.8 s,持载时间为2 s,试验围压为气压加载.为了消除试件在重复加载初期产生的较大永久应



图 2 试件制作及加载系统

Fig. 2 Sample making and loading system

表 1 应力加载序列

Tab. 1 Stress-loading sequence

加载序列号 r	围压 σ_3/kPa	循环偏应力 σ_d/kPa	最大轴向应力 $\sigma_{\max}/\text{kPa}$	荷载作用次数
0-预载	30	60	66	1 000
1	15	8	11	100
2	30	15	21	100
3	45	23	32	100
4	15	15	18	100
5	30	30	36	100
6	45	45	54	100
7	15	30	33	100
8	30	60	66	100

变,在正式测试模量前,需采用较大的轴向应力对试件进行多次重复加载预处理,当竖向永久应变达到 5%,预压停止.预载循环加载次数为 1 000,其他加载序列循环次数均为 100,待轴向应变稳定后,取最后 5 次回弹应变的平均值,计算动回弹模量.

2 试验结果分析

2.1 应力状态对粗粒土动回弹模量 M_r 的影响

围压的施加对土样的侧向变形具有约束作用,故可以提高动回弹模量.偏应力的施加对粗粒土动回弹模量的影响存在两种情况,有些粗粒土动回弹模量不受偏应力的影响,而有些粗粒土动回弹模量随着偏应力的增加有较大减小^[21].图 3 为含水率 ω 分别是 4%、5%、6% 的试件经过 0 次和 7 次冻融循环后 M_r 和偏应力 σ_d 关系图.由图 3 可知:(1)偏应力相同,冻融循环次数为 0 时,围压 σ_3 越大对应的动回弹模量越大,围压从 15 kPa 增加到 30 kPa,含水率 4% 的试件动回弹模量增加了 12.7%~18.2%,含水率 5% 的试件增加了

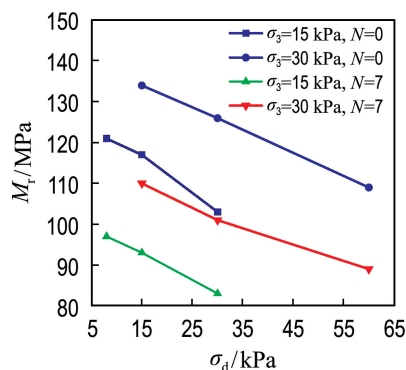
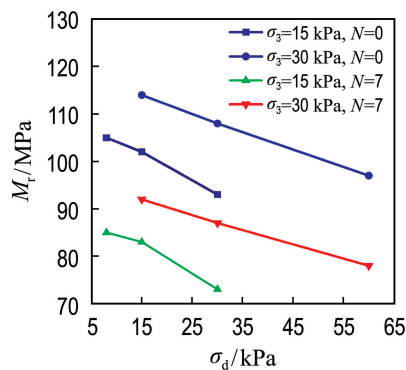
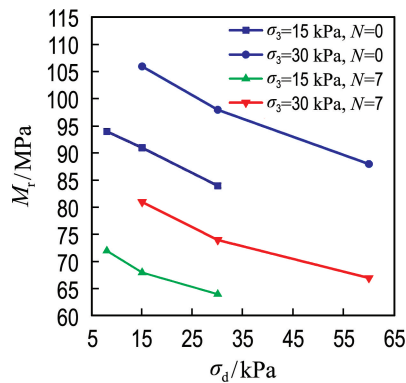
(a) $\omega = 4\%$ (b) $\omega = 5\%$ (c) $\omega = 6\%$

图 3 应力水平与动回弹模量关系

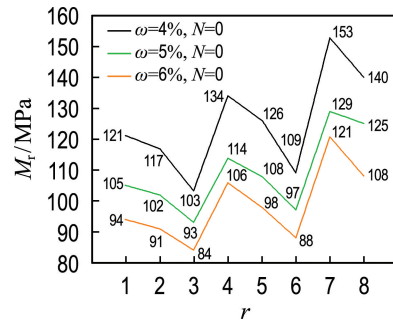
Fig. 3 Relationship of stress level and dynamic resilience modulus

10.5%~13.8%, 含水率 6% 的试件增加了 14.15%~14.28%; 冻融循环次数 $N=7$ 时, 围压 σ_3 与动回弹模量也呈正相关, 围压从 15 kPa 增加到 30 kPa, 含水率 4% 的试件动回弹模量增加了 15.4%~16.1%, 含水率 5% 的试件增加了 15.4%~16.1%, 含水率 6% 的试件增加了 16.5%~13.51%。(2) 围压相同时, 偏应力 σ_d 越大对应的动回弹模量越小。当 $\sigma_3=15$ kPa 时, 冻融循环次数 $N=0$ 时, σ_d 从 8 kPa 增加到 30 kPa, 含水率 4% 的试件动回弹模量降低了 14.9%, 含水率 5% 的试件降低了 11.4%, 含水率 6% 的试件降低了 10.6%; 冻融循环次数 $N=7$ 时含水率 4% 的试件动回弹模量降低了 14.4%, 含水率 5% 的试件降低了 15.2%, 含水率 6% 的试件降低了 11.1%。当 $\sigma_3=30$ kPa 时, σ_d 从 15 kPa 增加到 60 kPa, 冻融循环次数 $N=0$, 对应含水率 4% 的试件动回弹模量降低了 18.65%, 含水率 5% 的试件降低了 15.1%, 含水率 6% 的降低了 16.9%; 冻融循环次数 $N=7$ 时, 含水率 4% 的试件降低了 19.1%, 含水率 5% 的降低了 15.2%, 含水率 6% 的降低了 13.5%。通过分析以上数据结果可知冻融循环次数 $N=0$ 和 $N=7$ 对应的动回弹模量不同, 但围压和偏应力对动回弹模量的影响仍然遵从着相同的变化规律, 不会产生较大波动。

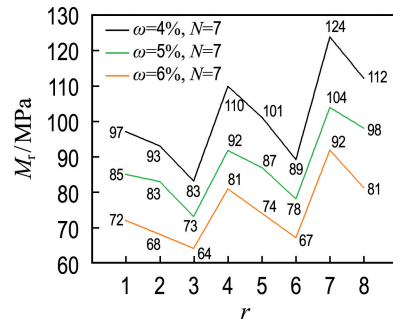
2.2 含水率对动回弹模量的影响

土中的水分可以分为矿物结合水和孔隙水, 土中孔隙水按其所呈现状态和性质及其对土的影响, 分为结合水和非结合水两种类型。结合水又可以分为强结合水和弱结合水, 在粗粒土中细粒土含量极少, 故结合水对粗粒土的影响可以忽略不计。非结合水是指土粒孔隙中超出土粒表面静电引力作用范围的普通液态水。主要受重力作用控制, 能传压导电, 溶解盐分, 在 0℃ 结冰, 其典型代表是重力水。介于重力水和结合水之间的过渡类型水为毛细水。毛细水主要存在于直径为 0.002~0.500 mm 的毛细孔隙中。故毛细水主要存在于粉细砂、粉土和粉质黏土中。粗大的孔隙, 毛细力极弱, 难以形成毛细水^[22]。通过击实试验以及筛分试验可知不同含水率的粗粒土试件水分主要以重力水的形式存在。

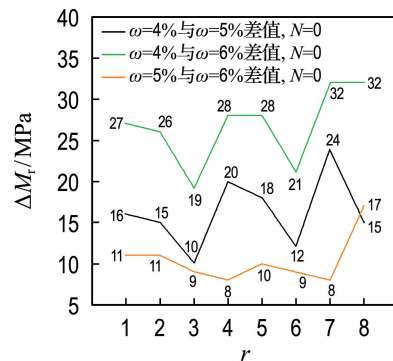
图 4 分别为冻融循环次数 $N=0$ 和 $N=7$ 的条件下, 不同含水率粗粒土 M_r 与应力加载路径的关系图, 由图可知: 相同压实度条件下, 含水率



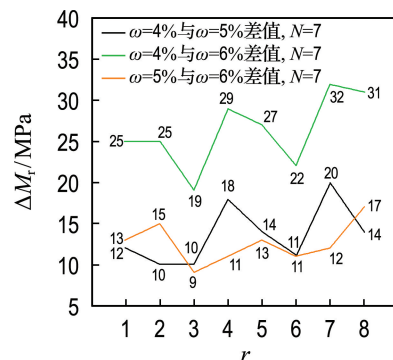
(a) $N=0, M_r$



(b) $N=7, M_r$



(c) $N=0, \Delta M_r$



(d) $N=7, \Delta M_r$

图 4 不同含水率条件下 M_r 和应力路径关系图

Fig. 4 Diagram of M_r and stress path under different moisture content conditions

为 4% 的试件动回弹模量整体上高于含水率为 5% 和 6% 的试件, 主要是由于含水率的增大导致

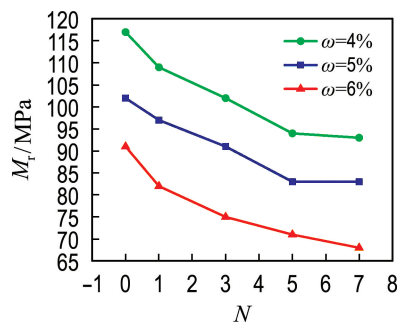
水膜的润滑作用增强,土颗粒之间的摩阻力减小,试件在加载过程中应变增大,因此 M_r 减小;对比图 4(a)和图 4(b)可以看出冻融循环作用导致粗粒土试件的动回弹模量整体降低,说明土体在经历冻融循环后,土的密实度、空隙率、颗粒分布等都会发生不同程度的变化,物理性质的变化引起土体力学性质的变化,造成土体在冻融循环后强度的衰减;对比图 4(c)和图 4(d)可得不同含水率之间的 M_r 差值在冻融循环作用前后不会发生较大的波动。

2.3 冻融循环作用对 M_r 的影响

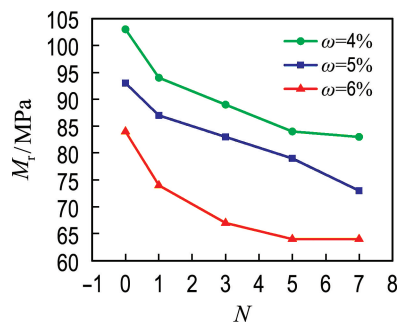
图 5 为不同含水率条件下粗粒土 M_r 与冻融循环次数 N 的关系,由图可知: M_r 随着冻融循环次数的增加整体呈衰减趋势,导致这种现象的本质在于温度的变化引起了内部孔隙水分在固相与液相之间重复转换,并进行迁移和重分布.当温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,孔隙中的自由水冻结呈固态,往往以冰夹层、冰透镜体、细小的冰晶体等形式存在于土中.冰在土中起暂时胶结作用,提高了土的动回弹模量,但解冻后,土体的动回弹模量反而会降低,液态水转为固态水时,体积膨胀,使土中孔隙增大,解冻后土的结构变得松散,内部结构发生了不可逆的变化导致动回弹模量衰减。

由图 5 可知不同含水率试件动回弹模量随着冻融循环次数的增加大致可分为 3 个变化阶段:快速衰减阶段($N=0\sim 3$),缓慢衰减阶段($N=3\sim 5$),衰减停止阶段($N=5\sim 7$).对比不同含水率可知,含水率为 4% 和 5% 的试件在第一和第二阶段的衰变速率小于含水率为 6% 的试件.原因在于当含水率较大时,冻结作用下水变成冰的体积膨胀量大,对土体结构的破坏显著,因此在前期冻融循环作用下高含水率的土体结构的衰减速率较快且衰减幅度大.反复冻融循环后,土体结构不再随着冻融循环次数的增多而发生变化,故动回弹模量趋于稳定.图 5(a)中含水率 6% 和图 5(b)中含水率 5% 的试件衰变曲线未收敛可能是由于土样颗粒间空隙较大,没有细粒土的黏聚力,较小的土颗粒容易在振捣过程移动,使得每次制样都不一样,同时在取料时的不均匀性,增大了三轴试验结果的离散性。

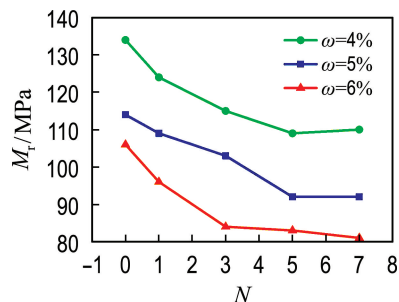
图 6 为不同冻融循环次数下粗粒土 M_r 与偏应力 σ_d 的关系图,通过对比不同折线之间在相同冻融循环次数下的竖向距离可以得到动回弹模量



(a) $\sigma_3 = 15\text{ kPa}, \sigma_d = 15\text{ kPa}$



(b) $\sigma_3 = 15\text{ kPa}, \sigma_d = 30\text{ kPa}$



(c) $\sigma_3 = 30\text{ kPa}, \sigma_d = 15\text{ kPa}$

图 5 不同含水率条件下 M_r 和 N 的关系

Fig. 5 Relationship between M_r and N under the different moisture contents

在不同冻融循环次数下的变化量.折线 $N=0$ 与 $N=1$ 之间的竖向间距最大说明第一次冻融循环作用在多次冻融循环作用中对动回弹模量造成损伤的程度占比最大;折线 $N=5$ 与 $N=7$ 之间的竖向间距最小说明试样在经过多次冻融循环后动回弹模量趋于稳定,不再发生较大幅度的变化。

2.4 典型应力路径下 M_r 衰变规律拟合

根据文献[19]统计的典型应力水平,如图 7 所示,选择 $\sigma_3 = 30\text{ kPa}, \sigma_d = 15\text{ kPa}; \sigma_3 = 30\text{ kPa}, \sigma_d = 30\text{ kPa}; \sigma_3 = 45\text{ kPa}, \sigma_d = 23\text{ kPa}; \sigma_3 = 45\text{ kPa}, \sigma_d = 45\text{ kPa}$ 应力加载序列,针对含水率为 5% 和 6% 的动回弹模量数据,对其衰变规律进行拟合,其中 5% 的含水率拟合曲线代表最佳含水率状况

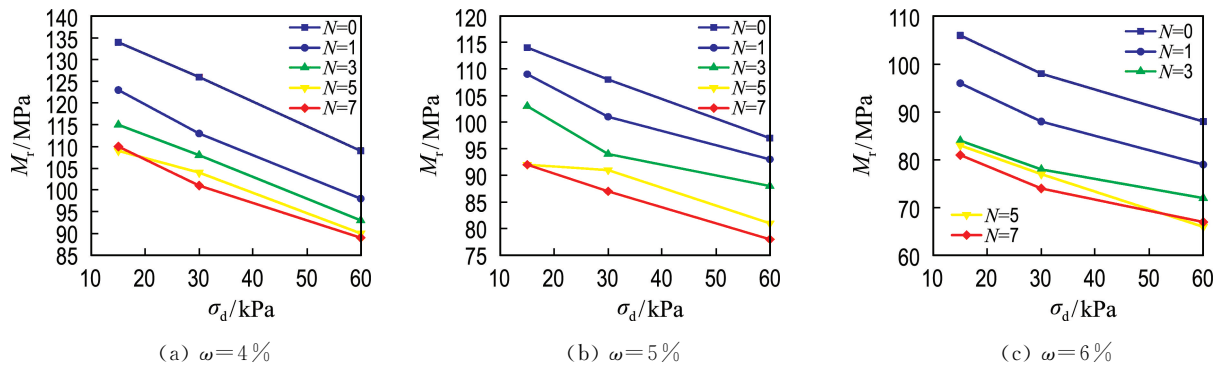


图6 不同冻融循环次数下 M_r 和 σ_d 的关系

Fig. 6 Relationship between M_r and σ_d under different number of freeze-thaw cycles

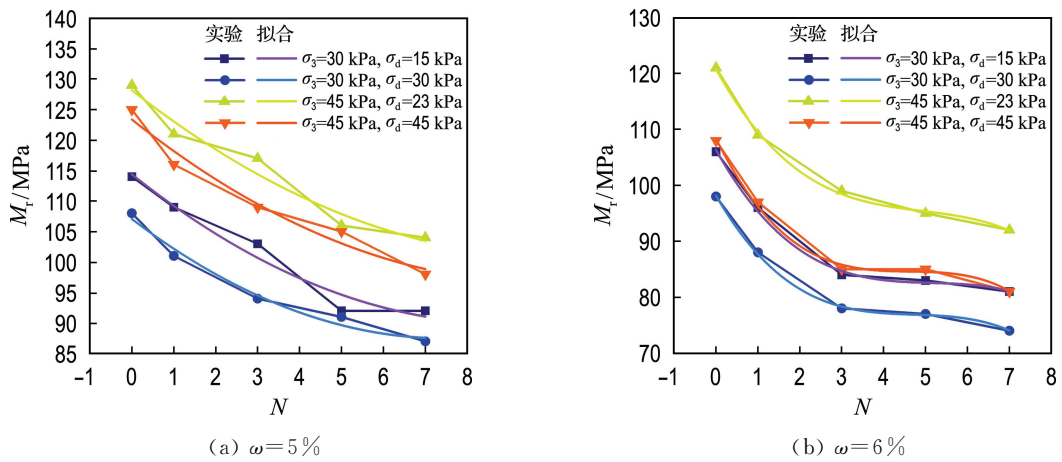


图7 动回弹模量衰变规律拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of dynamic resilience modulus decay law

下粗粒土路基动回弹模量衰变规律,6%的含水率模拟最不利路基湿度状况下动回弹模量的衰变规

律.拟合曲线如图7所示,通过计算得到平均相关系数 $R^2 \geq 0.95$.拟合公式系数如表3所示.

表3 不同冻融循环次数下动回弹模量拟合曲线

Tab. 3 Fitting curve of dynamic resilience modulus under different number of freeze-thaw cycles

σ_3/kPa	σ_d/kPa	$y=a+bx+cx^2+dx^3$									
		$\omega=5\%$					$\omega=6\%$				
		a	b	c	d	R^2	a	b	c	d	R^2
30	15	113.28	-1.69	-1.17	0.14	0.93	106.31	-13.39	2.55	-0.17	0.98
30	30	107.96	-8.33	1.56	-0.11	0.99	98.15	-12.96	2.68	-0.18	0.99
45	23	127.90	-4.41	-0.11	0.04	0.86	120.74	-13.58	2.57	-0.17	0.99
45	45	124.80	-10.37	2.19	-0.17	0.99	108.36	-15.18	3.25	-0.23	0.98

3 粗粒土 M_r 的调整系数

通过以上试验结果可知:含水率、冻融循环次数的增加对粗粒土动回弹模量有削弱作用,根据我国《公路路基设计规范》(JTG D 30—2015)中

提出的动回弹模量调整系数概念对粗粒土动回弹模量调整系数 D_N (如式(1)所示)进行统计回归:

$$D_N = M_N/M_0 \quad (1)$$

式中: M_0 为未冻融粗粒土土样在最佳含水率下的动回弹模量,MPa; M_N 为经过 N 次冻融循环作

用下的动回弹模量,MPa; N 为冻融循环次数.

表 4 和 5 分别为粗粒土在不同含水率、不同应力水平及不同冻融循环次数下动回弹模量的调整系数,表 6 为调整系数汇总表. 根据本文对粗粒土应力加载与动回弹模量之间关系研究得出高围压、低偏应力时调整系数取大值;低围压、高偏应力时调整系数取小值;表中未列冻融循环次数条件可以通过线性插值法进行取值.

表 4 动回弹模量调整系数($\omega=5\%$)

Tab. 4 Adjustment factors for dynamic resilience modulus ($\omega=5\%$)

σ_3 / kPa	σ_d / kPa	动回弹模量调整系数 D_N				
		$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=5$	$N=7$
15	8	1	0.94	0.89	0.82	0.81
	15	1	0.95	0.89	0.81	0.81
	30	1	0.94	0.89	0.85	0.78
30	15	1	0.96	0.90	0.81	0.81
	30	1	0.94	0.87	0.84	0.81
	60	1	0.96	0.91	0.84	0.80
45	23	1	0.94	0.91	0.82	0.81
	45	1	0.93	0.87	0.84	0.78

表 5 动回弹模量调整系数($\omega=6\%$)

Tab. 5 Adjustment factors for dynamic resilience modulus ($\omega=6\%$)

σ_3 / kPa	σ_d / kPa	动回弹模量调整系数 D_N				
		$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=5$	$N=7$
15	8	0.90	0.81	0.73	0.70	0.69
	15	0.89	0.80	0.74	0.70	0.67
	30	0.90	0.80	0.72	0.69	0.69
30	15	0.93	0.84	0.74	0.73	0.71
	30	0.91	0.81	0.72	0.71	0.69
	60	0.91	0.81	0.74	0.68	0.69
45	23	0.94	0.84	0.77	0.74	0.71
	45	0.86	0.78	0.68	0.68	0.65

表 6 调整系数汇总表

Tab. 6 Summary table of adjustment coefficients

$\omega/\%$	动回弹模量调整系数 D_N				
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=5$	$N=7$
5	1	0.93~	0.87~	0.81~	0.78~
		0.96	0.91	0.85	0.81
6	0.86~	0.78~	0.68~	0.68~	0.65~
		0.94	0.81	0.77	0.74

4 结 论

(1)偏应力一定时,围压越大对应的动回弹模量越大;围压一定时,偏应力越大动回弹模量反而减小. 不同冻融循环次数作用下围压和偏应力对动回弹模量的影响仍然遵从着相同的变化规律,不会产生较大波动.

(2)含水率为 4%的试件动回弹模量整体上高于含水率为 5%和 6%的试件. 不同含水率之间的动回弹模量差值在冻融循环作用后不会发生较大的变化.

(3)动回弹模量随着冻融循环次数的增加整体呈衰减趋势,不同含水率试件动回弹模量随着冻融循环次数的增加可分为 3 个变化阶段:快速衰减阶段($N=0\sim3$)、缓慢衰减阶段($N=3\sim5$)、衰减停止阶段($N=5\sim7$).

(4)冻融循环调整系数的拟合方程,为粗粒土路基强度的养护和检测提供了参考依据.

(5)冻融循环次数 $N=5\sim7$ 时动回弹模量已经开始稳定,根据极限设计原则可取经过 7 次冻融循环后的动回弹模量作为粗粒土工程设计参考指标.

(6)最不利含水率 $\omega=6\%$ 条件下, $N=0$ 时模量调整系数 D_N 取 0.86~0.94; $N=1$ 时, D_N 取 0.78~0.81; $N=3$ 时, D_N 取 0.68~0.77; $N=5$ 时, D_N 取 0.68~0.74; $N=7$ 时, D_N 取 0.65~0.71.

参考文献:

- [1] 温 智, 盛 煜, 马 巍, 等. 退化性多年冻土地地区公路路基地温和变形规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1477-1483.
WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, *et al.* Ground temperature and deformation laws of highway embankments in degenerative permafrost regions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7): 1477-1483. (in Chinese)
- [2] 毛雪松, 杨锦凤, 张正波, 等. 温度-湿度-荷载综合作用下路基冻融过程试验研究 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 427-434.
MAO Xuesong, YANG Jinfeng, ZHANG Zhengbo, *et al.* Experimental study of integrated temperature-moisture-load effect on subgrade during freeze-thaw cycle [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 427-434. (in Chinese)
- [3] 孟上九, 李 想, 孙义强, 等. 季冻土路基永久变

- 形现场监测与分析[J]. 岩土力学, 2018, **39**(4): 1377-1385.
- MENG Shangjiu, LI Xiang, SUN Yiqiang, *et al.* In-situ monitoring and analysis of permanent subgrade deformation in seasonally frozen regions [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, **39**(4): 1377-1385. (in Chinese)
- [4] 胡晓. 细粒土对高铁路基填料冻融强度和冻胀量影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- HU Xiao. Study on the influence of fine grained soil to filler of high way freeze-thaw strength and the frost heave amount [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [5] 张互助. 季冻区路基压实黏土损伤效应及能量演化机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- ZHANG Huzhu. Damage effect and energy evolution mechanism of compacted clay in subgrade of seasonal frozen area [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [6] 宋金华, 李博楠, 王亮, 等. 冻融循环作用下石灰改良土路基填料的动力特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, **37**(2): 47-54, 65.
- SONG Jinhua, LI Bonan, WANG Liang, *et al.* Dynamic characteristics of lime modified soil subgrade filling under freezing-thawing cycles [J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)**, 2018, **37**(2): 47-54, 65. (in Chinese)
- [7] 冉武平, 李玲, 张脩, 等. 重塑黄土动态回弹模量依赖性分析及预估模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, **45**(9): 130-137.
- RAN Wuping, LI Ling, ZHANG Xiao, *et al.* Dependence analysis and prediction model of dynamic resilient modulus of remodeled-loess [J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2018, **45**(9): 130-137. (in Chinese)
- [8] 化晋创. 冻融循环条件下粗粒土填料的静、动力特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
- HUA Jinchuang. Study on static and dynamic properties of coarse grained soil subjected to freeze-thaw [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014. (in Chinese)
- [9] 刘晖, 刘建坤, 邹博文, 等. 冻融循环对含砂粉土力学性质的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, **50**(3): 135-142.
- LIU Hui, LIU Jiankun, TAI Bowen, *et al.* Mechanical properties changes of sandy silt due to freeze-thaw cycles [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2018, **50**(3): 135-142. (in Chinese)
- [10] LIU Weizheng, QU Shuai, NIE Zhihong, *et al.* Effects of density and moisture variation on dynamic deformation properties of compacted lateritic soil [J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2016, **2016**: 5951832.
- [11] 陈忠达, 陈冬根, 陈建兵, 等. 冻融循环对不同含水率粗粒土回弹模量的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, **35**(4): 9-13.
- CHEN Zhongda, CHEN Donggen, CHEN Jianbing, *et al.* Influence of freezing-thawing cycle on the modulus of resilience of coarse-grain fill with different water contents [J]. **Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)**, 2014, **35**(4): 9-13. (in Chinese)
- [12] CHEN Youliang, NI Jing, JIANG Lihao, *et al.* Experimental study on mechanical properties of granite after freeze - thaw cycling [J]. **Environmental Earth Sciences**, 2014, **71**(8): 3349-3354.
- [13] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils [J]. **Engineering Geology**, 1979, **13**(1): 73-92.
- [14] 王瀚霖. 高速铁路路基力学性能及水分运移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- WANG Hanlin. A study on mechanical properties and water migration law of high speed railway subgrade [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [15] 房建宏, 陈鑫, 徐安花, 等. 冻融循环对青藏红黏土物理力学性质影响试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, **40**(1): 62-69.
- FANG Jianhong, CHEN Xin, XU Anhua, *et al.* Experimental study on the influence of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of Qinghai-Tibet red clay [J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2018, **40**(1): 62-69. (in Chinese)
- [16] 戎虎仁, 顾静宇, 房建宏, 等. 冻融循环作用下单孔红砂岩强度及微观孔隙变化规律试验研究[J]. 青海交通科技, 2018(5): 87-92.
- RONG Huren, GU Jingyu, FANG Jianhong, *et al.* Experimental study on strength and microscopic pore variation of single-hole red sandstone under freeze-thaw cycles [J]. **Qinghai Transportation Technology**, 2018(5): 87-92. (in Chinese)
- [17] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1208-1214.
- LI Jielin, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, *et al.* Experimental study of rock porous structure damage

- characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, **31**(6): 1208-1214. (in Chinese)
- [18] 韩春鹏, 何东坡, 程培峰, 等. 寒区公路路基温度场的自动监测与特性 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, **31**(3): 21-26.
HAN Chunpeng, HE Dongpo, CHENG Peifeng, *et al.* Automatic measure and character of highway subgrade temperature field in cold region [J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2011, **31**(3): 21-26. (in Chinese)
- [19] 陈声凯, 凌建明, 张世洲. 路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定 [J]. 公路, 2006(11): 148-152.
CHEN Shengkai, LING Jianming, ZHANG Shizhou. Fixing loading sequence for resilient modulus test of subgrade soil [J]. **Highway**, 2006(11): 148-152. (in Chinese)
- [20] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
LUO Zhigang. Study on dynamic modulus parameters of subgrade and granular layer [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [21] RAHIM A M, GEORGE K P. Models to estimate subgrade resilient modulus for pavement design [J]. **International Journal of Pavement Engineering**, 2005, **6**(2): 89-96.
- [22] 刘小平. 非饱和土路基水作用机理及其迁移特性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
LIU Xiaoping. A study on the mechanism of water action and migration characteristics of unsaturated soil subgrade [D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)

Study of decay law of dynamic resilience modulus of coarse-grained soil subgrade in freeze-thaw cycle

RAN Wuping^{*1,2}, CHEN Huimin^{1,2}, HUANG Jianjun³, LI Ling^{1,2}, AI Xianchen^{1,2}

(1. School of Architectural Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;
2. Xinjiang Civil Engineering Technology Research Center, Urumqi 830047, China;
3. Urumqi City Construction Design Institute, Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to clarify the effect of freeze-thaw cycle on the mechanical properties of coarse-grained soil subgrade, the variation of dynamic resilience modulus of coarse-grained soil under different moisture contents, different stress loading paths and different freeze-thaw cycle times is studied by means of dynamic triaxial test system. And on this basis, adjustment factors for dynamic resilience modulus and fitting formula of decay law are proposed for coarse-grained soil. The experimental results show that the dynamic resilience modulus decreases with the increase of moisture content, the dynamic resilience modulus corresponding to 4% of moisture content is the largest, and the difference of dynamic resilience modulus corresponding to different moisture contents will not change greatly after freeze-thaw cycle. When the partial stress is constant, the confining pressure is positively correlated with the dynamic resilience modulus. When the confining pressure is fixed, the partial stress is negatively correlated with the dynamic resilience modulus. The dynamic resilience modulus decreases with the increase of the number N of freeze-thaw cycles. The decay process can be divided into three stages: rapid attenuation ($N=0-3$), slow attenuation ($N=3-5$) and attenuation stop ($N=5-7$). The research results can provide reference for the design of highway subgrade strength in seasonal frozen area of China.

Key words: road engineering; coarse-grained soil; dynamic resilience modulus; freeze-thaw cycle; adjustment coefficient