

# 内蒙古地区典型路基土动态回弹模量研究

张宜洛<sup>1</sup>, 李宁<sup>2\*</sup>, 邓展伟<sup>1</sup>, 董学超<sup>1</sup>, 程英伦<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广西北投公路建设投资有限公司, 广西 南宁 530028)

**摘要:**内蒙古地区地域广阔,东西跨度大,气候环境复杂多变,公路工程地貌类型众多,路基土质为砂性土、黄土等,工程性质差异较大。为了研究内蒙古地区典型路基土的动态回弹模量。选取了5个地区土样,在确定了路基的应力范围内,采用重复加载动态三轴试验测试方法,利用GDS动态三轴仪,在各个土样各自最佳含水率时,测试不同应力条件下各个地区土样的动态回弹模量;保持相同的应力条件,测试不同地区土样在不同含水率下的动态回弹模量;最后测试各个地区土样在经受冻融循环后动态回弹模量的变化,推荐了选取土样地区的冻融循环折减系数。结果表明:内蒙古地区的路基土在最佳含水率时,动态回弹模量随着围压的增大而不断增大,随着偏应力的增加而不断减小,而且,围压对动态回弹模量的影响程度明显高于偏应力;应力条件恒定时,路基土动态回弹模量随着含水率的增加而降低,土样中细粒含量越高,其回弹模量受含水率变化的影响越大;路基土回弹模量随着冻融循环次数的增大而不断减小,随着细粒含量的增加,路基土回弹模量需要6~9次才能趋于稳定。

**关键词:**道路工程; 动态回弹模量; 围压; 偏应力; 含水率; 冻融循环

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

内蒙古地区主要以温带大陆性气候为主,年平均气温 $0\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,夏季高温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,冬季低温 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,气温年差较大。根据对路基内部观测研究,冬季路基会进入冰冻状态,春季融化,路基反复进行冻融循环,对路基强度造成一定的影响。在中国现在采用的路面设计方法中,回弹模量是表征路基强度的重要力学指标,是路面结构设计中采用的重要参数。在道路的运营过程中,随着路基内部含水率状况的变化以及路基经受的冻融循环作用都会导致路基回弹模量的变化。

国内外许多学者对路基土的动态模量进行了相关研究,Khoury等<sup>[1]</sup>对砂土路基与黏土路基进行了现场试验,分析试验结果可以得出,与砂土相比,黏土对于含水率更加敏感,同时砂土和黏土路基回弹模量对于含水率的变化由于干湿循环而存在滞后现象;Chamberlain等<sup>[2]</sup>对细粒土进行了冻融循环试验,结果发现细粒土受冻融循环的影响与其塑性指数有关,塑性指数越大,土体孔隙比下降及渗透性提高的现象越明显;常丹等<sup>[3]</sup>对青藏高原的粉砂土冻融特性展开研究,结果表明粉砂土的力学性质受冻融循环作用影响显著,在经过7~9次的冻融循环后,粉砂土的弹性模量、抗剪强度等力学指标达到最小值,同时发现冻结过程中

温度对土体力学指标影响较小;Seed等<sup>[4]</sup>对路基土进行动态回弹模量测试,认为偏应力较小( $<105\text{ kPa}$ )时,回弹模量随着偏应力的增大而减小,偏应力较大( $>105\text{ kPa}$ )时,回弹模量随着偏应力增大而增大,但变化幅度较小。路基中承受的偏应力较小,因此其动态回弹模量随着偏应力的增大而减小;Rahim等<sup>[5]</sup>通过对不同粒径路基土动态回弹模量测试,偏应力对粗粒土回弹模量影响较小,对细粒土回弹模量影响较大,随着偏应力增加,细粒土回弹模量逐渐降低;王大雁等<sup>[6]</sup>对黏土的冻融特性进行研究,结果表明冻融循环次数越多,土的黏聚力逐渐减小,但土的内摩擦角呈现不规则的波动变化,表明冻融循环作用对内摩擦角的影响并无明显的规律。综上所述,国内外对路基土动态回弹模量进行不少研究,但是结合内蒙古地区特定气候条件下的路基土以及土样细粒含量进行研究相对比较缺乏。

该文主要针对内蒙古地区高速公路路基土在路基典型应力水平下,分析不同地区土质受应力水平、含水率以及冻融循环后的动态回弹模量的变化情况,根据试验结果,提出了内蒙古典型地区冻融循环折减系数,为内蒙古地区高速公路季节性冻土地区路基回弹模量设计提供服务。

收稿日期:2022-05-28(修改稿)

作者简介:张宜洛,男,博士,副教授. E-mail: zhangyiluo@163.com

\* 通信作者:李宁,男,硕士研究生. E-mail: 784038457@qq.com

1 试验

1.1 原材料

在内蒙古境内 5 个地区进行土样采集,取土点位于路基边坡处,取土时清除边坡表面的杂草、腐殖土等,剖开边坡坡面的表层浮土,形成取土坑。对所取土样的基本物理参数进行测试,结果见表 1,土样颗粒组成见表 2。

1.2 土质类型和细粒含量

结合表 2 以及内蒙古地区土质取样的分析结果,可以得到:东胜 G65 高速、临河 G6 高速土样粒径 $<0.075\text{ mm}$ 的细粒组质量为总质量的 $5\%\sim 15\%$ ,土质类型为含细粒土砂。呼和浩特 G0601 高速、通辽 G2511 高速土样粒径 $<0.075\text{ mm}$ 的细粒组质量为总质量的 $15\%\sim 50\%$ ,土质类型为细粒土质砂。赤峰 G45 高速土样粒径 $<0.075\text{ mm}$ 的细粒组质量为总质量的 $59.74\%$ ,其土质类型为黄土。

表 1 土样基础物理指标

土样来源	最佳含水率/%	最大干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	液限/%	塑限/%	塑性指数
东胜(G65)	12.7	1.73	18.55	12.99	5.56
临河(G6)	8.7	1.99	18.04	13.75	4.29
呼和浩特(G0601)	8.4	2.06	20.16	13.94	6.22
通辽(G2511)	8.0	1.92	18.16	10.92	7.24
赤峰(G45)	11.4	1.97	25.73	18.88	6.85

表 2 土样颗粒组成

土样来源	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						土质类型
	5	2	1	0.5	0.25	0.075	
东胜(G65)	100	100	100	100	99.67	9.58	含细粒土砂
临河(G6)	100	97.72	94.53	84.52	77.30	12.23	含细粒土砂
呼和浩特(G0601)	100	98.19	94.87	82.22	71.92	29.88	细粒土质砂
通辽(G2511)	100	99.30	97.84	92.53	82.96	21.83	细粒土质砂
赤峰(G45)	100	98.90	96.34	89.02	84.57	59.74	黄土

2 试验方案

2.1 试件尺寸和制备

试件尺寸与颗粒的最大粒径有关,根据土样的物理参数,该文试验中试件尺寸为直径 $100\text{ mm}$ 、高 $200\text{ mm}$ 的圆柱体试件,采用静压方式成型试件。根据试验测得的不同土样的最佳含水率及最大干密度,配制试件前将土样烘干,同时考虑试件的压实度。

2.2 围压、偏应力对动态回弹模量影响的试验方案

在内蒙古不同高速公路设置 10 个调查点,得到了各类车的平均轴载谱。在双联轴轴载谱中可以看出:7 类车和 8 类车的轴重主要分布在 $100\sim 230\text{ kN}$ ,6 类车轴重主要分布在 $50\sim 100\text{ kN}$ 和 $220\sim 280\text{ kN}$ 。从单轴双胎的轴载谱中可以看出:6、7、8、10 类车的轴重主

要分布在 $40\sim 80\text{ kN}$ 和 $100\sim 160\text{ kN}$ 。从三联联轴载谱中可以看出:8、9、10 类车的轴重主要分布在 $50\sim 150\text{ kN}$ 和 $200\sim 380\text{ kN}$ 。根据对内蒙古地区高速公路车辆轴载谱调查分析,其典型轴载选取为 $100$ 、 $130$ 、 $150$ 、 $200$ 、 $300\text{ kN}$ 。

分析路基应力时,路基内部产生的应力是荷载应力和自重应力的叠加。

路基土计算点处的自重应力按式(1)确定:

$$p_0 = h'_n\alpha_n + \sum_{i=1}^{n-1} h_i\alpha_i \tag{1}$$

路基土的总垂直应力与总侧向应力按式(2)、(3)确定:

总垂直应力:

$$\sigma_1 = \sigma_z + \sigma_0 \tag{2}$$

总侧向应力:

$$\sigma_3=\sigma_{x,y}+k_0p_0$$

(3)

对半刚性基层沥青路面、柔性基层沥青路面以及组合式基层沥青路面3种结构类型在典型荷载条件下的路基应力进行试验,得到内蒙古高速公路路基应力水平如表3所示。

表3 内蒙古高速公路路基应力水平

侧向应力 $\sigma_3/\text{kPa}$	不同竖向应力 $\sigma_1$ (kPa)区间的频数(频率)				
	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60
10~20	9 (6%)	45 (30%)	6 (4%)		
20~30			40 (26.7%)	20 (13.3%)	
30~40				23 (15.3%)	7 (4.7%)

由表3可以看出:路基侧向应力分布在(10 kPa, 40 kPa),并且大部分分布在(10 kPa, 30 kPa)范围内,路基竖向应力分布在(10 kPa, 60 kPa),大部分分布在(20 kPa, 50 kPa)范围内。

试验的加载波形为半正弦波,加载频率为1 Hz,加载间隔为1 s,荷载作用于试件上的时间为0.2 s,加载完成后的间歇时间为0.8 s,试验前对试件先预压1 000次,然后在每级应力水平下加载的次数为100次。

试验采用GDS动态三轴仪,在选取土样各自最佳含水率条件下,测试不同土样在不同应力水平下的动态回弹模量。试验加载序列如表4所示<sup>[7]</sup>。

2.3 含水率对动态回弹模量影响试验方案

为研究含水率对路基土回弹模量的影响,选取最佳含水率附近的3个含水率 $w_{\text{opt}}-3\%$ 、 $w_{\text{opt}}$ 、 $w_{\text{opt}}+3\%$ ,分别进行回弹模量测试,动态回弹模量测试序列有16组,每一组测试应力水平下都有一个回弹模量值,为便于分析,从16组测试序列中选取最符合路基实际应力状况的3组应力水平进行分析。

2.4 冻融循环对动态回弹模量的影响试验方案

内蒙古地区冬季平均最低气温为-25℃左右,根据测得路基内部温度数据,该地区路基内部最低温度为-6℃,试件内部温度从-25℃下降到-6℃所需的时间大概为6 h。融化时的温度设为20℃,试件内部温度从冻结温度上升到20℃也同样需要6 h。所以冻融循环试验冻结温度设为-25℃,冻结时间为6 h,融化温度设为20℃,融化时间为6 h。

表4 试验加载序列

加载 序列	围压应 力 $\sigma_3$ / kPa	接触应 力 0.2 $\sigma_3$ / kPa	循环偏应 力 $\sigma_d$ / kPa	最大轴向 应力 $\sigma_{\text{mac}}$ /kPa	荷载作 用次 数/次
0—预载	40	8	30	38	1 000
1	40	8	15	23	100
2	40	8	30	38	100
3	40	8	45	53	100
4	40	8	60	68	100
5	30	6	15	21	100
6	30	6	30	36	100
7	30	6	45	51	100
8	30	6	60	66	100
9	20	4	15	19	100
10	20	4	30	34	100
11	20	4	45	49	100
12	20	4	60	64	100
13	10	2	15	17	100
14	10	2	30	32	100
15	10	2	45	47	100
16	10	2	60	62	100

试验采用GDS动态三轴仪,在试件经受0、3、6、9、12次冻融循环后,选取最符合路基实际应力状况的3组应力 $\sigma_3=20\text{ kPa}$ , $\sigma_d=30\text{ kPa}$ ;  $\sigma_3=20\text{ kPa}$ , $\sigma_d=45\text{ kPa}$ ;  $\sigma_3=30\text{ kPa}$ , $\sigma_d=45\text{ kPa}$ ,分析其回弹模量的变化规律<sup>[8]</sup>。

3 试验结果分析

3.1 围压对动态回弹模量的影响分析

试验中围压应力选取10、20、30、40 kPa 4种,偏应力选取15、30、45、60 kPa 4种,其应力组合范围与内蒙古路基应力状况相符合。不同围压作用下路基回弹模量变化如图1所示。

从图1中可以看出:对于不同地区的土样,在偏应力一定的情况下,动态回弹模量随着围压的增大而不断增大,整体上近似于线性增长。但是围压从10~40 kPa过程中,不同地区土样的增长幅度略有差异,从5个地区的不同土样中,选取东胜土样和呼和浩特土样定量分析围压对回弹模量的影响。

随着围压等级的增加,东胜土样的回弹模量在相

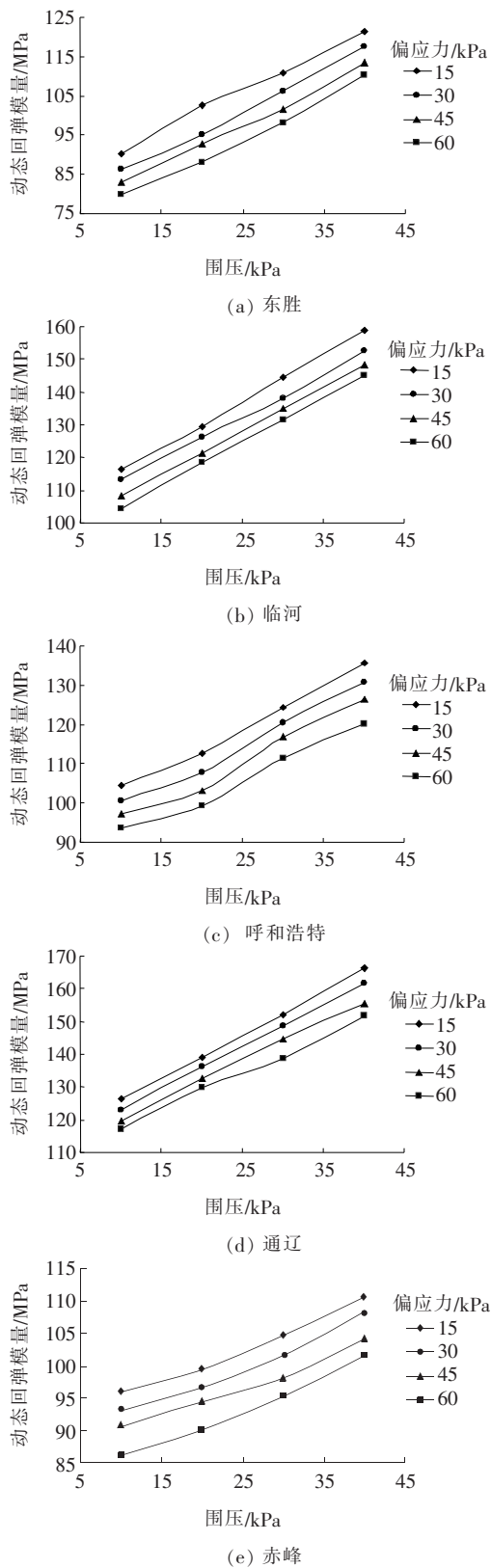


图 1 不同围压下的路基回弹模量变化图

邻两个围压等级间的增大幅度为 8~13 MPa, 逐级增长率最大为 13.7%, 最小为 7.9%。在围压从 10 MPa

增加到 40 MPa 的过程中, 回弹模量整体变化幅度分别为 31.3、31.3、30.4、30.6 MPa, 整体变化率为 34%~39%。呼和浩特市土样的回弹模量在相邻两个围压等级间的增大幅度为 5~12 MPa, 逐级增长率最大为 13.1%, 最小为 5.9%。在偏应力分别为 15、30、45、60 kPa 的条件下, 回弹模量整体变化率为 28%~30%。可以看出呼和浩特土样在围压变化条件下回弹模量的增长幅度小于东胜土样。

综合分析 5 种土样的回弹模量变化规律, 赤峰土样为黄土, 其在围压变化条件下的回弹模量变化幅度最小, 整体变化率为 10%~20%, 其余 4 种土样属于细粒土砂或细粒土质砂, 结合土样的细粒含量(东胜土样中  $<0.075$  mm 的细粒含量为 9.58%, 呼和浩特土样中的细粒含量为 29.88%)发现: 细粒含量对土样的整体动态回弹模量的影响较大, 随着围压的增大, 细粒含量较多的土样的整体动态回弹模量增长幅度呈现减小的趋势。这是由于在围压增大过程中, 土颗粒会相互挤压, 出现相互嵌入的现象, 颗粒排列也会比较规则, 土样的结构比较稳定, 但随着围压的进一步增大, 土颗粒会发生滑移, 部分颗粒的棱角也会被破坏, 进一步填充到试样的孔隙中, 颗粒重新排列之后, 颗粒之间更为紧密, 结构也更稳定。由于细粒含量较少的土样有足够的空间去满足土颗粒的运动和排列过程, 所以并不会发生体积膨胀的现象, 而细粒含量较多的土样由于提供的空间有限, 土颗粒滑移破碎之后产生的变形将不能恢复, 最终导致试样发生体胀现象, 使试件的完整性和结构性发生微变化, 最终使土样的动态回弹模量变化幅度变小。

### 3.2 偏应力对动态回弹模量的影响分析

路基土在不同偏应力等级下的回弹模量变化如图 2 所示。由图 2 可以看出: 对于不同地区的土样, 在围压保持一定的情况下, 动态回弹模量随着偏应力的增加而不断减小。对于不同土样, 偏应力从 15~60 kPa 过程中, 回弹模量的减小幅度略有不同。为充分研究偏应力对回弹模量的影响, 采用与围压分析相同的研究方法, 从 5 个地区的不同土样中, 选取东胜土样和呼和浩特土样进行具体的分析。

随着偏应力等级的增加, 东胜土样的回弹模量在相邻两个偏应力等级间的减小幅度为 2~8 MPa, 逐级减小率最大为 7.3%, 最小为 2.4%。偏应力从 15 MPa 增加到 60 MPa 的过程中, 整体减小幅度在 10~15 MPa, 整体变化率为 9.1%~14.1%。呼和浩特土样的回弹模量在相邻两个偏应力等级间的减小幅度为

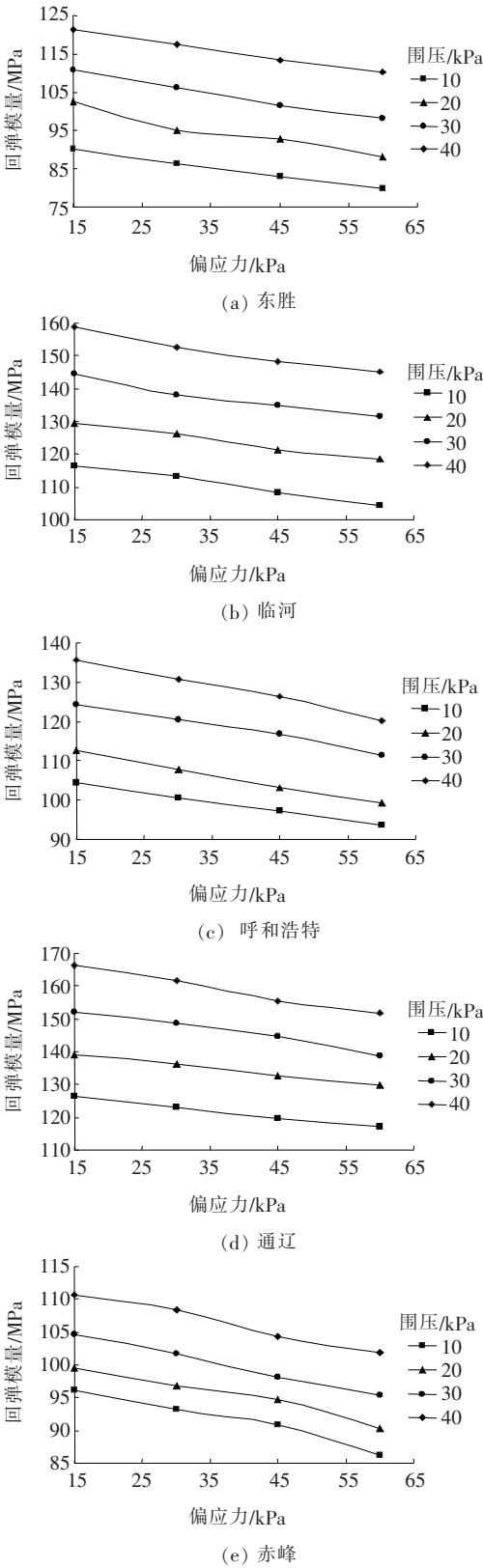


图 2 不同偏应力下的回弹模量变化图

3~7 MPa,逐级减小率最大为 4.9%,最小为 3.1%,整体变化率为 10.2%~11.8%。其他地区的土样变

化率也相对比较稳定,即使细粒含量最大的赤峰地区,整体变化率也处于 7%~10%。

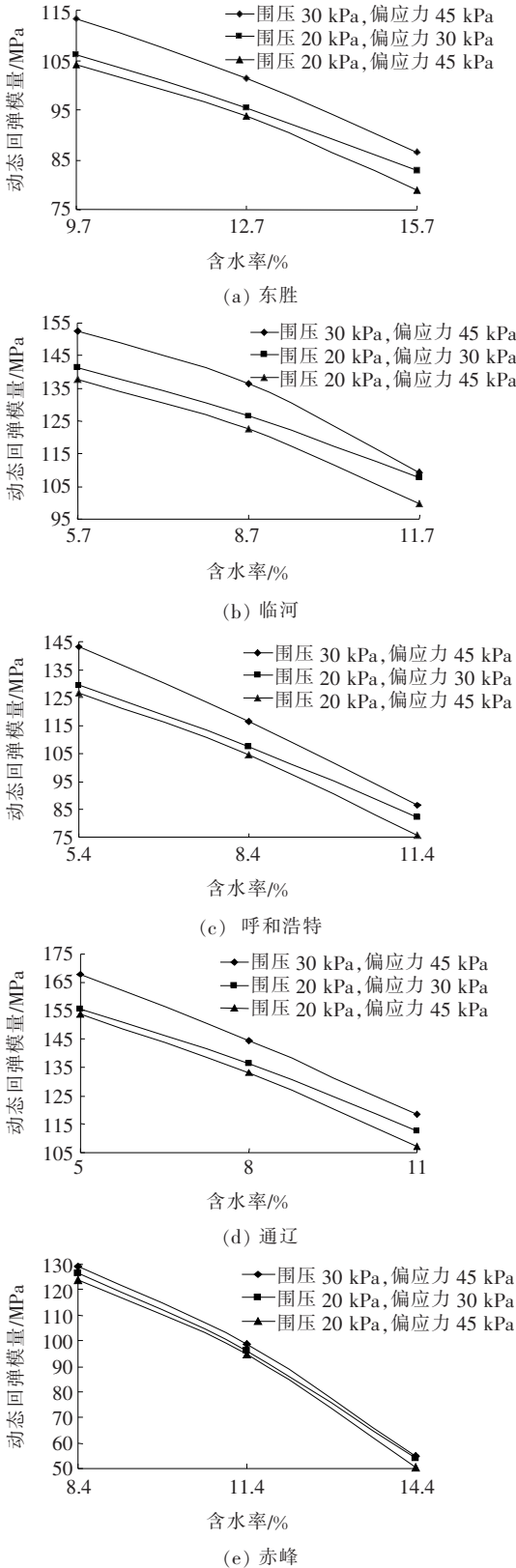


图 3 不同含水率下的回弹模量变化图



根据以上应力水平对回弹模量的影响分析可知:各个地区土样动态回弹模量整体变化率较为稳定。结合土样的细粒含量分析得到,偏应力及土质细粒含量对动态回弹模量的影响不大。同时综合不同应力条件下的动态回弹模量测试结果,得到偏应力对动态回弹模量的影响程度明显低于围压。

### 3.3 含水率对动态回弹模量的影响分析

根据对路基应力的计算分析,选取  $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 30 \text{ kPa}$ ;  $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 45 \text{ kPa}$ ;  $\sigma_3 = 30 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d = 45 \text{ kPa}$  3 个应力水平下的回弹模量进行分析。得到不同含水率下路基回弹模量变化如图 3 所示。

从图 3 中可以看出:在应力条件保持不变的情况下,各个地区土样的回弹模量随着含水率的增加呈现减小的趋势,但减小幅度与路基含水率相关。当土样的含水率从  $w_{\text{opt}} - 3\%$  变化到  $w_{\text{opt}}$  时,回弹模量减小幅度逐渐变缓;当土样含水率从  $w_{\text{opt}}$  变化到  $w_{\text{opt}} + 3\%$  的过程中,回弹模量衰减幅度逐渐增加。这是由于水有润滑作用,随着含水率的增大,土样颗粒间的摩擦力减小,整体抗变形能力降低,因此含水率越大,回弹模量的变化幅度也有一定程度的增大。

虽然各个地区土样的回弹模量随着含水率的增大都呈现减小的趋势,但是对于不同的地区土样而言,减小的幅度相差很大。东胜土样回弹模量受含水率的影响最小,随着土样含水率逐级增大,土样的回弹模量逐级减小率分别为 10.4%、14.4%,赤峰土样回弹模量受含水率的影响最明显,含水率从  $w_{\text{opt}} - 3\%$  变化到  $w_{\text{opt}} + 3\%$  的过程,回弹模量逐渐减小率分别为 29.3%、43.7%,差异较为明显。

结合土样的颗粒分析结果,东胜土样为细粒土砂,其小于 0.075 mm 细粒含量仅为 9.58%,细粒含量最小;赤峰土样为黄土,属于低液限黏土,其小于 0.075 mm 细粒含量为 59.74%,是 5 种土样中细粒含量最多的,同时结合其余土样中细粒的含量与回弹模量测试结果,可以得出路基土回弹模量受含水率的影响程度与其细粒含量有关,对于试验中所选取的 5 种土样,细粒含量越多,其回弹模量受含水率变化的影响越大。这是由于随着含水率的增加,细颗粒表面的水膜会使土颗粒的接触面积变小,细粒含量较多的土样之间的内摩擦角相比细粒含量较少的土样内摩擦角会明显变小,导致土样的内聚力迅速变小,相应的土样抵抗变形的能力变差,最终导致土样的动态回弹模量快速下降<sup>[9]</sup>。

### 3.4 冻融循环对动态回弹模量的影响

冻融循环次数对路基动态回弹模量的影响结果见

图 4。

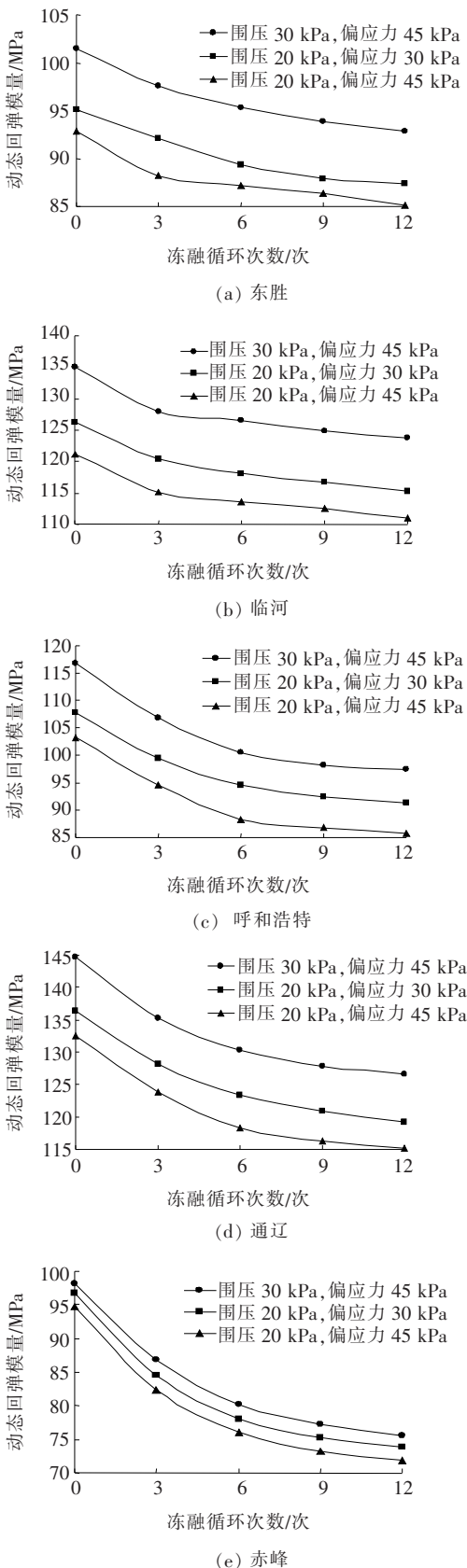


图 4 不同冻融循环次数回弹模量变化图

从图 4 可以看出:① 对于试验中所选取的 5 种土样,在相同的应力测试条件下,回弹模量随着冻融循环次数的增大而不断减小;② 冻融循环对不同土样的影响有一定的差异。为充分了解冻融循环作用对不同土样的影响程度,选取  $\sigma_3=20\text{ kPa}$ , $\sigma_d=30\text{ kPa}$  应力水平下的回弹模量测试结果,进行冻融循环对回弹模量影响的定量分析。

不同地区的土样受冻融循环的影响程度有一定的区别,赤峰土样受冻融循环作用影响最大,经过 12 次冻融循环作用后,回弹模量降低了 23 MPa,东胜土样受冻融循环作用影响最小,经过 12 次冻融循环作用后,回弹模量降低了 7.2 MPa。冻融循环作用过程中,不同土样的回弹模量降低速率也有一定的差异,土样分别经过 0、3、6、9、12 次冻融循环后,赤峰土样回弹模量变化速率为 12.6%、7.3%、3.6%、2.4%,东胜土样回弹模量变化速率为 4.0%、1.9%、1.0%、0.9%,赤峰土样经过 9~12 次的冻融循环作用后,其回弹模量才逐渐趋于稳定,东胜土样经过 3 次冻融循环后,其回弹模量变化率就已经很小,回弹模量已经趋于稳定。

从冻融的微观角度来看,冻结初期,土体会发生轻微的收缩现象,随后发生明显的冻胀变形,随着冻结时间的延长,土体持续发生冻胀现象。随着冻结的继续,土体中的空隙水和结合水开始冻结,且外界水分在毛细作用上升到一定位置后,在冻胀力的作用下促进了水分的向上迁移并发生冻胀,土体体积快速膨胀,大量的冰充满了土体的空隙和裂隙中<sup>[10]</sup>。土体融化时,由于温度的升高,裂隙和空隙中的冰开始融化,土体稳定性变差,土颗粒在自重作用下发生崩塌情况,土体产生了融沉变形,但是由于此时的冻胀量远大于融沉量,所以土体表现出显著的膨胀变形。由于在土样冻融之前,土样中细粒含量增加会提高土样的黏结性,进而提高土样的抗变形能力,但是土样在冻融之后,就因为细粒土的冻胀性削弱土样的整体性,导致土样的动态回弹模量快速变小。这是由于土样中的细粒含量越多,试件中的空隙率相对越小,这样土样的毛细作用越明显,在同等条件下,细粒含量更多的土样产生的膨胀变形量也越大,导致土样动态回弹模量变化幅度增大<sup>[11]</sup>。从试验过程中可以看出:砂性土在开放系统下,前 3 次冻融循环过程中,土体冻胀变形特别明显,而 3 次冻融循环后,土体冻胀变形量没有快速增加,而是趋于一个稳定值的附近。

根据试验所取土样的试验结果,不同土样的动态

回弹模量受冻融循环后的影响程度差别较大。总体而言,前 3 次的冻融循环作用对土样的影响最大,土样的动态回弹模量下降幅度最大,3 次之后土样回弹模量的衰减率逐渐降低。对于含有细粒较少的砂类土,经过前 3 次冻融循环作用后其回弹模量的变化率就已经比较稳定,细粒含量较多的砂类土一般经过 6~9 次冻融循环作用后其回弹模量才能趋于稳定,对于黄土,一般需要 9~12 次的冻融循环作用,其回弹模量才趋于稳定。

4 路基回弹模量折减系数的确定

路基回弹模量冻融循环折减系数即经受冻融循环作用后的路基回弹模量与未经受冻融循环作用的路基回弹模量的比值,试验中,选取的 5 种土样在经受 12 次冻融循环作用后其回弹模量都能趋于稳定,因此选取 12 次冻融循环后的路基回弹模量来研究不同土样的冻融循环折减系数。

路基回弹模量具有一定的应力依赖性,根据对内蒙古地区高速公路路基应力的分析,综合不同应力水平下的试验结果,不同地区的路基回弹模量冻融循环折减系数如表 5 所示。

表 5 路基回弹模量冻融循环折减系数

地区	应力水平/kPa	冻融循环回弹模量/MPa		冻融循环折减系数
		0 次	12 次	
东胜	(20,30)	95.1	87.9	0.92
	(20,45)	92.8	85.0	
	(30,45)	101.5	93.5	
临河	(20,30)	126.3	115.3	0.92
	(20,45)	121.2	111.3	
	(30,45)	135.1	123.7	
呼和浩特	(20,30)	107.8	91.3	0.84
	(20,45)	103.2	85.8	
	(30,45)	116.7	97.6	
赤峰	(20,30)	96.8	73.8	0.76
	(20,45)	94.7	71.3	
	(30,45)	98.2	75.3	
通辽	(20,30)	136.3	119.4	0.87
	(20,45)	132.5	115.1	
	(30,45)	144.7	126.5	

## 5 结 论

通过动态三轴压缩试验,对内蒙古不同地区土样进行动态回弹模量测试,得出以下主要结论:

(1) 动态回弹模量随着围压的增大而不断增大,土样中 $<0.075\text{ mm}$ 的细粒含量越少,围压应力对动态模量的整体变化率的影响越大。动态回弹模量随着偏应力的增加而不断减小,偏应力变化时,不同土样的动态回弹模量变化幅度的差异较小,同时综合分析不同应力条件下的动态回弹模量测试结果,围压对动态回弹模量的影响程度明显高于偏应力。

(2) 动态回弹模量随着含水率的增加而降低,动态回弹模量受含水率的影响程度与其细粒含量有关,对于试验中所选取的 5 种土样,细粒含量越高,其回弹模量受含水率变化的影响越大。

(3) 回弹模量随着冻融循环次数的增大而不断减小,前 3 次的冻融循环作用对土样的影响最大,对于含有细粒较少的砂类土,经过前 3 次冻融循环作用后其回弹模量就趋于稳定,随着细粒含量的增加,一般经过 6~9 次冻融循环作用后回弹模量趋于稳定,对于黄土,一般需经过 9~12 次的冻融循环作用,其回弹模量才趋于稳定。

(4) 冻融循环折减系数为:东胜 0.92、临河 0.92、呼和浩特 0.84、赤峰 0.76、通辽 0.87。

### 参考文献:

[1] KHOURY Naji N, ZAMAN Musharraf M. Correlation between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil

Suction for Subgrade Soils[J]. Transportation Research Record, 2004, 1 874(1): 99—107.

[2] CHAMBERLAIN Edwin J, GOW Anthony J. Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1): 73—92.

[3] 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, 33(7): 1 496—1 502.

[4] SEED H B, CHAN C K, LEE C E. Resilience Characteristics of Subgrade Soils and their Ations to Fatigue Failures in Asphalt Pavements[C]. International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, 1962: 611—636.

[5] RAHIM A M, GEORGE, K P. Models to Estimate Subgrade Resilient Modulus for Pavement Design[C]. In: 84th Annual Meeting of Transportation Research Board, 2005.

[6] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 313—4 319.

[7] 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, 51(11): 148—152.

[8] 冯恺. 冻融循环后路基土三轴试验与模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.

[9] 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.

[10] 雷明轩. 季节性冰冻地区路基回弹模量试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.

[11] 王静, 刘寒冰, 吴春利. 冻融循环对不同塑性指数路基土弹性模量的影响研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3 665—3 668, 3 688.