

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 2-0150-06

膨胀土与红黏土石灰改性对比试验研究

孙志亮, 郭爱国, 太 俊

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 为探讨石灰改性膨胀土与红黏土的强度发展规律, 以生石灰与消石灰改性的南阳膨胀土与郴州红黏土为研究对象, 进行了无侧限抗压、固结快速直剪和固结压缩试验的对比研究。研究发现: 在 1 a 养生龄期内, 石灰改性的南阳膨胀土与郴州红黏土无侧限抗压强度与养生龄期的对数基本呈线性关系; 按大于最佳含水率 3% 制样的强度在养生 28 d 以后高于按最佳含水率制样; 生石灰改性效果比消石灰改性效果好, 由于矿物成分不同, 石灰改性南阳膨胀土的效果比石灰改性郴州红黏土好。

关 键 字: 膨胀土; 红黏土; 石灰改良; 最佳含水率; 结构屈服强度; 矿物成分

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Comparative laboratory study of lime-treated expansive soil and red clay

SUN Zhi-liang, GUO Ai-guo, TAI Jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: To explore the development law of the strength of lime-treated expansive soil and red clay, the unconfined compression, consolidated quick direct shear tests and consolidation test are carried out to compare the Nanyang expansive soil and Chenzhou red clay modified by quicklime and hydrated lime respectively. The study found that during the one-year curing period of lime-treated Nanyang expansive soil and Chenzhou red clay, the unconfined compression strength is linear with the logarithm of curing age. The strength of the samples with moisture content larger than optimum moisture content for 3% after 28 days curing is higher than that of the optimum moisture content samples. In addition, the modification effect of quicklime is better than the effect of hydrated lime. Due to the different mineral composition, the modification effect of lime-treated Nanyang expansive soil is better than that of Chenzhou red clay.

Key words: expansive soil; red clay; lime-treated; optimum moisture content; structural yield strength; mineral composition

1 引 言

膨胀土与红黏土是两类典型的特殊土, 工程性状独特。这两类特殊黏土在我国广泛分布, 近几十年随着我国社会经济的高速发展, 在膨胀土、红黏土分布区域建成的高速公路越来越多, 这些地区发生路基病害的报道也屡见不鲜。膨胀土有强烈胀缩性, 同时具有超固结性和多裂隙性, 对气候和含水率的变化特别敏感, 主要原因是膨胀土颗粒组成中黏粒含量一般超过 30%, 且黏粒中蒙脱石、伊利石或蒙-伊混成等强亲水性矿物占主导地位。红黏土一般是由碳酸盐岩、玄武岩及少量花岗岩经红土化过程形成的黏土, 其矿物成分以伊利石与高岭石为主,

含极少量或不蒙脱石, 在工程力学特性上主要表现为高收缩性, 失水收缩造成拉裂性破坏。红黏土与膨胀土均具有较高的黏粒含量、天然含水率、孔隙比与液塑限, 而红黏土的这些指标较膨胀土更高, 远超一般黏性土, 但同时红黏土一般具有优于膨胀土的力学特性。目前研究主要集中于不同地区膨胀土或红黏土各自工程特性的纵向对比, 不同特殊黏土类似的工程处理方法横向对比的研究总结成果相对较少。按照我国《公路路基设计规范》规定, 膨胀土与红黏土等特殊黏土一般不能作为高等级公路的路基填料^[1]。在这类高液限黏土中加入石灰改性是工程上常用的方法, 国内外的研究成果也较多^[2-5], 如何使这类含高, 亲水性黏土矿物的特殊

收稿日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51079141); 湖南省交通运输厅 2009 年度科技进步与创新计划 (No.200910)。

第一作者简介: 孙志亮, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事特殊土力学等方面的研究工作。E-mail: whrsm_sunzhi-liang@163.com

土石灰改性达到最佳效果、石灰改性的方法是不是普遍适用等问题还值得深入的研究和总结。本文从生石灰与消石灰改性南阳膨胀土与郴州红黏土的效果对比方面，对上述问题做了一些探讨。

2 试验研究

2.1 试验土样与石灰

本文选取的膨胀土样取自河南南阳内邓高速公路某标段现场，红黏土样取自厦门至成都高速公路湖南郴州段，2种土的物性指标见表1，矿物成分见表2，颗粒分析见图1，南阳膨胀土的黏粒含量($\leq 2\mu\text{m}$)为36.2%，郴州红黏土的黏粒含量为57.1%。选用的消石灰粉与生石灰粉过0.5mm筛，化学成分分析见表3。

表1 试验用土性质参数

Table 1 Physical parameters of tested soils

土样	天然含水率 w/%	天然湿密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	土粒相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数	自由膨胀率 /%
膨胀土	27.8	1.68~1.77	2.80	69.9	27.0	42.9	60.5
红黏土	36.8	1.68~1.76	2.74	65.1	34.7	30.4	37.5

注：液限、塑限的测定分别采取76g锥入土17、2mm作为标准。

表2 南阳膨胀土与郴州红黏土矿物成分

Table 2 Mineral compositions of expansive soil and red clay

土样	矿物成分百分含量/%						
	石英	长石	赤铁矿	蒙脱石	绿泥石	伊利石	高岭石
膨胀土	40.0	8.0	0.0	15.6	18.2	7.8	10.4
红黏土 ^[5]	30.0	5.0	5.0	0.0	20.0	15.0	25.0

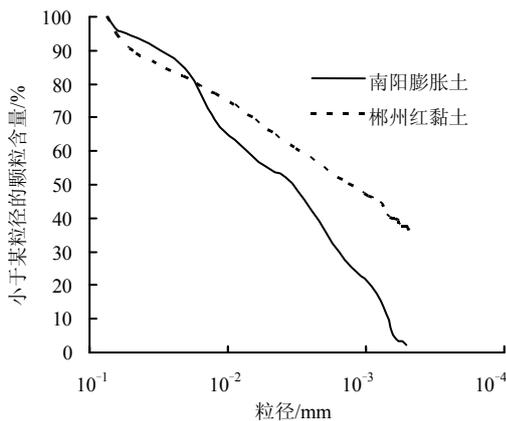


图1 试验用土颗粒分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curves of tested soils

表3 石灰化学成分

Table 3 Chemical compositions of lime

石灰	有效化学成分	百分含量/%	合计/%
生石灰	CaO	73.3	77.2
	MgO	3.9	
消石灰	Ca(OH) ₂	77.2	81.6
	Mg(OH) ₂	4.4	

2.2 试样制备及试验方法

制备界限含水率试验土样时，取过0.5mm筛的烘干膨胀土与红黏土两种土样各两份，每种土样一份加入过0.5mm筛的生石灰粉，一份加入过0.5mm筛的消石灰粉，均采用5%质量比的灰剂量，混合均匀。加入适量的蒸馏水拌合达到塑限左右的状态，充分拌合调成土膏，然后将土膏密封保湿24h，利用液塑限联合测定仪测定液限、塑限。

制备无侧限抗压试样尺寸： $d \times h = 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、固结快速直剪试样和压缩高压固结试样尺寸： $d \times h = 61.8\text{mm} \times 20\text{mm}$ 时，取膨胀土与红黏土风干土样各2组，1组掺入5%质量比的生石灰，1组掺入5%质量比的消石灰，各组又分别按灰土闷料24h后的击实最佳含水率（小筒重型击实）与大于击实最佳含水率3%的含水率控制来制2批样，压实度均为96%。

将上述配比的土料分层填入模具，在液压千斤顶上按静压法压至相应的体积，为了减小制样误差，静压荷载保持一致，约为6.5MPa。试样质量与含水率控制如表4所示，试验编号中字母E(expansive soil)代表膨胀土，L(red clay)代表红黏土，H(hydrated lime)代表消石灰，Q(quick lime)代表生石灰，O(optimum moisture content)代表最佳含水率，M(3% more than optimum moisture content)代表大于最佳含水率3%的含水率。试样制好后立即称重、量测高度（2正交方向处取平均值），无侧限样高度误差控制在 $\pm 1.0\text{mm}$ 以内，直剪与压缩样高度误差控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内，选择满足前述制样标准的试样，迅速用保鲜膜包裹，蜡封后贴上标签，再用密封性好的塑料袋封装好，以尽量减少水分的损失，然后放入地下室保湿养生。大致按照7、14、28、90、180、365d这6个批次来养生，养生龄期最后1d采用控制水面高出试样10cm的浸水饱和和养生。无侧限抗压强度试验的加载速率为0.093mm/s，固结快剪的剪切速率控制为0.90mm/min，在3~5min内剪损。压缩固结试验采用快速试验法以节省时间，各级荷载下的压缩时间规定为1h，最后一级荷载固结24h，然后以两者变形之比作为校正系数校正变形量。

3 试验结果及分析

3.1 石灰闷料24h后液塑限试验结果

由液塑限联合测定仪测定的灰土闷料24h后的液塑限试验结果见表5。对比素土的液塑限，可以明

显看到,虽然郴州红黏土的黏粒含量为 57.1%要高于南阳膨胀土的 36.2%,但掺石灰的红黏土液塑限变化很小,液限降低不到 8%,塑限略有增大,而膨胀土的液限下降达 30%,塑限增大较红黏土明显。

表 4 改性膨胀土与红黏土试样标准

Table 4 Standard of the remolded samples of lime-treated expansive soil and red clay

试样编号	无侧限试样质量/g	直剪与压缩试样质量/g	制样含水率/%
EHO	416.73±0.5	127.32±0.2	17.2±0.5
EHM	427.39±0.5	130.58±0.2	20.3±0.5
EQO	418.51±0.5	127.87±0.2	18.0±0.5
EQM	429.92±0.5	131.35±0.2	21.0±0.5
LHO	404.77±0.5	123.67±0.2	23.1±0.5
LHM	414.63±0.5	126.68±0.2	26.1±0.5
LQO	406.51±0.5	124.20±0.2	24.0±0.5
LQM	416.92±0.5	127.38±0.2	27.0±0.5

表 5 灰土 24 h 后液塑限结果

Table 5 Results of limit moisture contents under lime-treated after 24 h curing

土样	E	EH	EQ	L	LH	LQ
液限 w_l /%	69.9	50.4	48.7	65.1	60.2	62.6
塑限 w_p /%	27.0	36.1	37.6	34.7	35.8	35.5

3.2 无侧限抗压强度试验结果

8 组无侧限抗压强度试验数据与龄期的半对数关系见图 2 所示,从图 2 可以看出在本次试验龄期 1 a 范围内,石灰改性膨胀土与红黏土无侧限抗压强度 q_u 与龄期 N 的对数 $\lg N$ 具有良好线性关系,而且生石灰改性的强度在后期发展比消石灰改性的增长快,大于 3%最佳含水率的试样比最佳含水率的试样后期强度高,改性膨胀土试样的无侧限强度比改性红黏土试样要大。

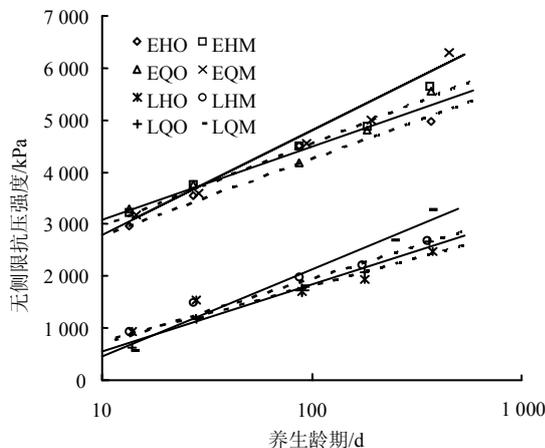


图 2 无侧限抗压强度与养生龄期关系

Fig.2 Relationships between unconfined compression strength and curing time

3.3 直剪试验结果

固结快速直剪试样在浸水饱和过程中,红黏土试样出现了遇水崩解现象,情况见表 6,而膨胀土试样则没有。从改性红黏土直剪样可以看出,按最佳含水率压制的改性红黏土直剪样在 7、14、28、90 d 养生龄期的最后一天浸水饱和时都发生了不同程度的遇水崩解现象,而按大于最佳击实含水率 3% 制样的改性红黏土直剪样发生遇水崩解现象相对好一些,如图 3 所示。

表 6 石灰改性红黏土试样浸水饱和崩解情况统计

Table 6 Disruption statistics of lime-treated red clay samples when immersed in water

试样编号	养生龄期/d					
	7	14	28	90	180	365
LHO	崩解	崩解	崩解	崩解		
LHM	崩解					
LQO	崩解	崩解	崩解	崩解		
LQM	崩解	崩解	崩解			



(a) LHO-14

(b) LHM-14

图 3 不同含水率试样浸水 24 h 后崩解状态

Fig.3 Disruption states of samples with different moisture contents when immersed in water after 24 h

值得注意的是,按相同配比压制的改性红黏土无侧限抗压试样在龄期 7 d 时浸水 24 h 后,表面出现裂缝,但没有崩解,原因可能是无侧限试样的质量、体积是直剪样的 3 倍多,含水分质量也是 3 倍多的关系,由于制样过程中,水、石灰与黏土颗粒不可避免会分布不均匀,含有的水量越多,受不均匀性的影响就相对较小,于是无侧限试样中的反应会进行得更快一些,可见改性土试样中的反应也会受到试样尺寸的影响。如图 4 所示,黏聚力 c 与内摩擦角 ϕ 随龄期增大的趋势明显,改性膨胀土的 c 、 ϕ 值一般较改性红黏土的要大。

3.4 固结压缩试验

本次试验通过加、卸载曲线测定压缩指数 C_c 及回弹指数 C_s ,根据龄期不同,开始卸载时的竖向

压力选为 400 kPa 或 800 kPa, 典型压缩曲线见图 5。

在试验中发现试样的压缩曲线在孔隙比 e 与轴向应力 P 的半对数坐标中的拐点有随养生龄期增加而增大的趋势, 对于石灰改性膨胀土与红黏土来说, 这一点代表的是改性土的内部胶结结构的损伤破坏。因此, 可以借鉴确定先期固结压力的方法, 将压缩曲线拐点定义为改性土的结构屈服强度 $P_c^{[6]}$ 。本文先通过指数函数来拟合压缩曲线, 然后确定曲率最大点, 通过传统的 Casagrande 方法来确定 P_c , 试验结果见表 7。

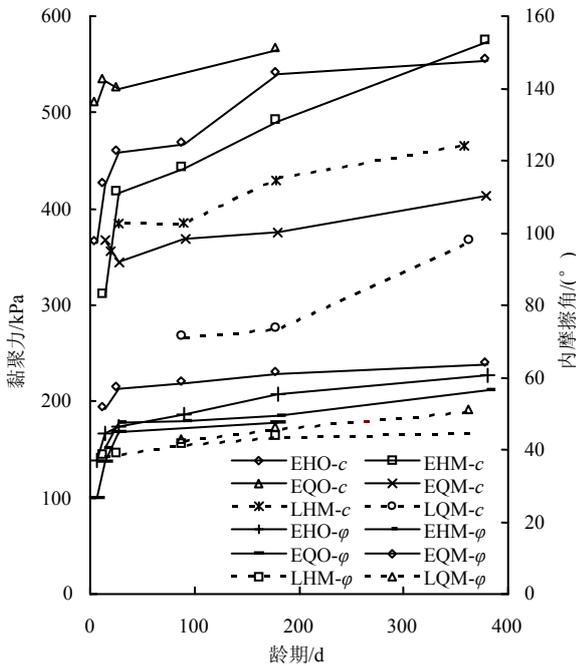


图 4 直剪试验 c 、 ϕ 值与龄期关系

Fig.4 Effects of curing time on the c , ϕ values

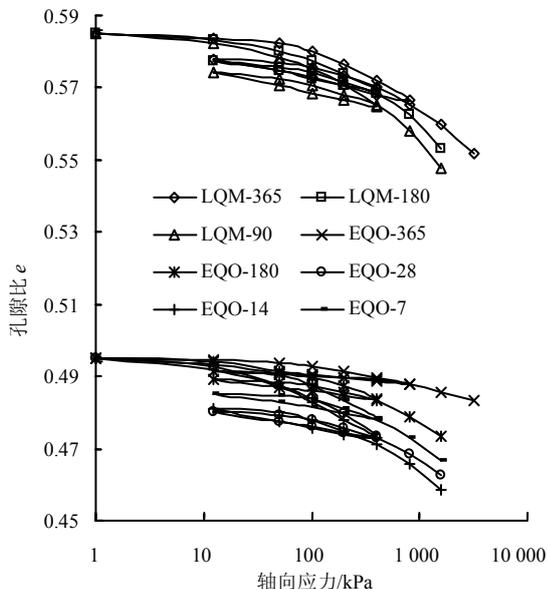


图 5 典型压缩试验曲线

Fig.5 Typical compression test curves

表 7 压缩固结试验数据

土样编号	养生龄期/d	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s	结构屈服强度/kPa	
EQO	7	1.99×10^{-2}	3.31×10^{-3}	69	
	14	2.26×10^{-2}	4.32×10^{-3}	60	
	28	1.66×10^{-2}	4.54×10^{-3}	55	
	180	1.65×10^{-2}	3.76×10^{-3}	110	
	365	7.33×10^{-3}	1.79×10^{-3}	145	
EHO	7	2.10×10^{-2}	3.67×10^{-3}	52	
	14	2.13×10^{-2}	3.48×10^{-3}	50	
	28	1.62×10^{-2}	4.80×10^{-3}	44	
	180	1.81×10^{-2}	4.81×10^{-3}	118	
	365	6.23×10^{-3}	1.44×10^{-3}	150	
EQM	7	2.05×10^{-2}	4.49×10^{-3}	72	
	14	1.64×10^{-2}	4.13×10^{-3}	62	
	28	2.12×10^{-2}	4.23×10^{-3}	70	
	120	1.74×10^{-2}	4.07×10^{-3}	105	
	215	1.40×10^{-2}	4.03×10^{-3}	110	
EHM	380	1.56×10^{-2}	2.55×10^{-3}	105	
	7	2.16×10^{-2}	3.94×10^{-3}	73	
	14	3.05×10^{-2}	6.00×10^{-3}	86	
	120	2.03×10^{-2}	4.81×10^{-3}	100	
	215	1.87×10^{-2}	2.46×10^{-3}	176	
LQO	380	2.17×10^{-2}	3.64×10^{-3}	200	
	90	2.92×10^{-2}	4.37×10^{-3}	95	
	180	4.11×10^{-2}	4.67×10^{-3}	140	
	365	2.69×10^{-2}	4.63×10^{-3}	200	
	LHO	90	3.49×10^{-2}	5.76×10^{-3}	150
180		5.81×10^{-2}	5.12×10^{-3}	195	
365		2.81×10^{-2}	5.88×10^{-3}	220	
LQM		90	2.49×10^{-2}	5.41×10^{-3}	110
		180	2.49×10^{-2}	5.09×10^{-3}	100
	365	2.62×10^{-2}	5.80×10^{-3}	202	
	LHM	90	2.03×10^{-2}	4.48×10^{-3}	125
		180	3.35×10^{-2}	4.71×10^{-3}	136
365		2.52×10^{-2}	5.99×10^{-3}	145	

3.5 试验结果分析与讨论

综合前述的试验结果发现, 试样的强度随养生龄期的增长而增强的规律基本是一致的。由图 2 可以看出, 按照公式 $q_{un}=q_{u7}+k \lg(N/7)$ 可以预估较长时间以后的无侧限强度, q_{u7} 为 7d 龄期对应的无侧限抗压强度, q_{un} 为预测的 N 天龄期所对应的无侧限抗压强度, k 为直线的斜率, 本试验对石灰改性的典型膨胀土与红黏土变化不大, 图 2 中 k 可大约取为 530~600 kPa; 图 4 中的直剪试验 c 、 ϕ 值随龄期逐渐增大, 增长速率逐渐降低, 反映了石灰改性后, 土颗粒与石灰之间的胶结作用增强, 粒团化趋势明显^[7], 随着龄期的增长, 石灰与水消耗, 反应速率逐渐降低; 表 7 中压缩性指标随龄期的增长而降低, 图 6 中的结构屈服强度随龄期的增长而变大, 说明石灰加入以后相当于促成了黏土内部形成一种人工结构性, 降低了土的压缩性, 增强了土体的强度。

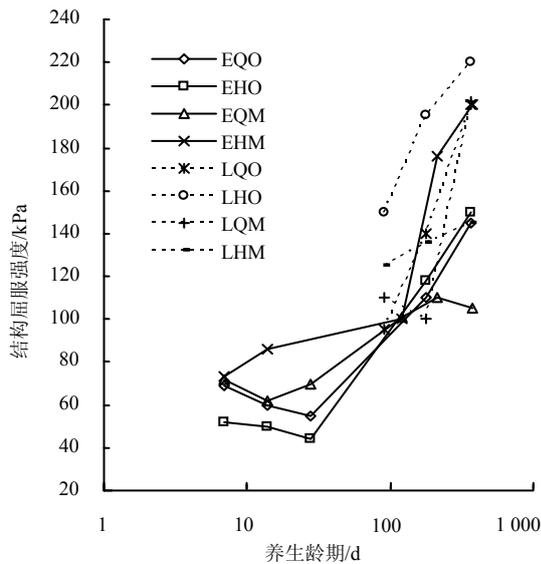


图6 结构屈服强度与龄期关系

Fig.6 Effects of curing time on destructuration strength

黏土中加入石灰后,石灰溶解出来大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与黏土颗粒表面吸附的 Na^+ 、 K^+ 等发生离子交换,减少了黏土颗粒双电层的厚度,缩小颗粒间的距离,促进了黏土颗粒间的凝聚结构的形成,这一过程在石灰加入后就立即发生,生石灰的消化放热反应会加剧这一过程,有效降低了黏土的塑性。同时,加入石灰后的黏土处于碱性环境,促进了水化硅酸钙C-S-H和水化铝酸钙C-A-H等凝胶形成,反应在不断吸收水分的情况下逐渐完成,试样这时就具有很好的水稳定性,这一过程持续时间较长,受环境温度、湿度等因素影响^[2]。后期主要是碳化反应,这一过程主要发生在与空气接触的表面。但不同的制样含水率,不同的石灰,不同的黏土,试样中反应就会有所差别,宏观反映出来的就是不同的强度发展规律与不同的水稳定性。

从制样含水率来看,按大于最佳含水率3%制样的强度,基本在28 d龄期以后要大于最佳含水率3%制样的强度。图2中在龄期380 d时,改性膨胀土EQM的无侧限抗压强度6 500 kPa,而EQO只达5 500 kPa,强度相差18%左右;改性红黏土LQM在龄期365 d时无侧限强度达到3 200 kPa, LQO在龄期375 d时只达到2 700 kPa,相差18.5%。分析原因,这是由于本文采用的最佳含水率,是按石灰与黏土混合闷料24 h以后的击实曲线得到的,以这一不变的标准去评价强度、内部结构等随龄期不断改变的石灰改性土,自然无法得到最优的结果。最佳含水率只能保证试样养生初期具有较大的干密度,但其发展趋于稳定后的强度并非最高。火山灰反应在含水率稍高的试样中反应更充分,因此,控制大于击实最佳含

水率3%左右的制样更利于石灰改性土强度的发挥,也利于现场施工,我们应该规定大于击实最佳含水率3%左右的含水率为“施工最佳含水率”,本文试验结果进一步验证了郭爱国等^[8]的研究成果。而且从表6中可以看出,按大于最佳含水率3%的改性红黏土制样的水稳定性要好于按最佳含水率的制样,原因就是较高的含水率有利于C-S-H和C-A-H等水硬性凝胶的较快生成,从而水稳定性较好。

从生石灰与消石灰的改性效果来看,图2与图4的试验结果表明无论是南阳膨胀土还是郴州红黏土,生石灰的改性效果从长期来看要优于消石灰的改性效果,这一方面是消石灰在遇水消化的过程中大量放热,促进石灰的水化与离子交换反应的进行,强度发展比消石灰改性要快;另一方面是本试验按5%的质量百分比外掺生石灰,消石灰直接由本次试验使用的生石灰消化而成,生石灰的分子量为40,消石灰的分子量为58,因此相同质量的生石灰比消石灰具有更高的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度,离子交换速度更快,与黏土中水分反应后形成碱性环境的pH值更高,火山灰反应更迅速。

从膨胀土与红黏土这两种含有不同矿物成分的黏土改性效果来看,石灰改性南阳膨胀土的效果要优于石灰改性郴州红黏土。郴州红黏土含5%左右的赤铁矿, K^+ 、 Na^+ 含量低,离子交换作用有限,因而初期的强度低,水稳定性差,表6的统计结果证实了这一点。表6中90 d龄期以后,石灰改性红黏土浸水饱和没有崩解,图6中石灰改性红黏土在90 d龄期以后的结构屈服强度一般略高于同龄期的改性膨胀土,说明除了有离子交换、火山灰反应等反应生成的凝聚胶结作用外,红黏土中的部分铁氧化物也开始对强度有贡献。改性红黏土结构屈服强度较高,但破坏强度没有改性膨胀土大,这是因为改性红黏土孔隙比较大,密度较改性膨胀土小,屈服后密度开始对强度起了主要作用。值得注意的是,图6中90 d龄期以前的结构屈服强度增长缓慢,规律性不强,可能的原因是在静压法制样时施加的6.5 MPa的压力对结构屈服强度产生了干扰,直到90 d龄期以后,内部结构的发展超过了静压形成的超固结作用,才表现出对结构屈服强度试验结果的影响。红黏土的特性主要是难破碎、难失水和难压实,易干缩开裂,物理性质较差但力学性质较好^[9]。由表5可知,石灰改性红黏土的液塑限指标在加入石灰24 h后没有明显变化,而南阳膨胀土的液限降低明显,基本从本质上改善了膨胀土的工程性质。这说明石灰改性郴州红黏土虽然提高了强度,但对

物理性质的改善并不明显, 而且加入石灰后干缩开裂有加剧趋势, 石灰改性的目的没有达到, 而膨胀土则达到了改性的效果。因此, 石灰改性并非对所有的这类含高亲水性矿物黏土都能取得好的效果。

4 结 论

(1) 在 1 a 的养生龄期内, 石灰改性南阳膨胀土和郴州红黏土的无侧限抗压强度与养生龄期的对数基本成线性关系, 黏聚力 c 与内摩擦角 φ 值也相应增大, 强度随龄期的增长而增大。

(2) 无论是南阳膨胀土还是郴州红黏土, 按大于最佳含水率 3% 制样的强度在龄期 28 d 以后一般高于最佳含水率制样的强度, 而且水稳定性要好, 生石灰改性效果比消石灰的改性效果要好。对比南阳膨胀土与郴州红黏土的改性效果, 发现南阳膨胀土的改性效果比郴州红黏土的要明显而且迅速, 主要原因就是二者含有不同的矿物成分, 各自具有独特的物理化学性质, 从而与石灰反应后表现出不同力学性状, 也说明石灰改性的方法并不普遍使用。

参 考 文 献

- [1] 中交第二公路勘察设计研究院. JTJ GD30-2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] MUZAHIM A M, ABDELMADJID L, ALCOVER J F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C[J]. **Applied Clay Science**, 2010, 50: 191-198.
- [3] RUNGO B L, FERBER V, CUI Y J, et al. Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions[J]. **Engineering Geology**, 2011, 118(1-2): 20-28.
- [4] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils [J]. **Engineering Geology**, 1996, 42(4): 223-237.
- [5] 曹豪荣, 李新明, 樊友杰, 等. 考虑干湿循环路径的石灰改性红黏土路用性能试验研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(9): 2619-2624.
CAO Hao-rong, LI Xin-ming, FAN You-jie, et al. Experimental study of pavement performances of lime-treated laterite soil considering drying-wetting cycle paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(9): 2619-2624.
- [6] 廖义玲, 毕庆涛, 席先武, 等. 关于红黏土先期固结压力的探讨[J]. **岩土力学**, 2006, 27(11): 1391-1394.
LIAO Yi-ling, BI Qing-tao, XI Xian-wu, et al. On preconsolidation pressure of red clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1391-1394.
- [7] 程钰, 石名磊, 周证明. 消石灰对膨胀土团粒化作用的研究[J]. **岩土力学**, 2008, 29(8): 2209-2213.
CHENG Yu, SHI Ming-lei, ZHOU Zheng-ming. Aggregation effect of slaked lime on treated expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2209-2213.
- [8] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰改性膨胀土施工最佳含水率确定方法探讨[J]. **岩土力学**, 2007, 28(3): 517-521.
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian, et al. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 517-521.
- [9] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 典型红黏土与膨胀土的对比试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(15): 2593-2598.
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2593-2598.