膨胀土地区机场跑道的地基处理研究①

王文良[1,2]，王晓谋[2]，王家鼎[3]

（1.中国民航机场建设集团公司西北分公司，陕西 西安 710075；2.长安大学 公路学院，陕西 西安 710064；
3.西北大学大陆动力学国家重点实验室，陕西 西安 710069）

摘要：为解决在膨胀土山区修建机场时跑道地基处理的问题，以安康地区膨胀土为研究对象，在对现行石灰改良膨胀土施工控制参数常用方法分析的基础上，进行膨胀土及石灰改良膨胀土的膨胀性能和强度的相关试验。研究结果表明：随着石灰掺量的增加，最优含水率增大，最大干密度减小，胀缩潜势呈降低趋势，石灰掺量与最大干密度呈非线性关系，在石灰掺量达到 9％时有荷膨胀率变化的规律性很强；相同石灰掺量改良土的 *CBR* 与击实功、含水量等因素有关，并不随着压实系数增加而增大。掺加石灰的比例对石灰改良膨胀土的强度增长影响较大，石灰掺量 9％时的 *CBR* 值明显大于其他掺量；相同压实系数下石灰掺量 3％和 6％改良膨胀土的压缩性比较接近，石灰掺量增加到 9％时其压缩性明显降低。结合试验结果，提出用石灰改良膨胀土对跑道进行地基处理，并以膨胀性指标作为主要控制指标、强度指标作为验证指标来确定施工参数。

关键词：膨胀土；石灰改良土；养护时间；压实系数；施工控制参数

中图分类号：TU443　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2016)03－0431－08

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2016.03.0431

Foundation Treatment of Airport Runway in Expansive Soil Area

WANG Wen-liang[1,2], WANG Xiao-mou[2], WANG Jia-ding[3],

(1.*Northwest Branch, China Airport Construction Group Corporation of CAAC, Xi'an* 710075, *Shaanxi, China*;
2.*School of Highway, Chang'an University, Xi'an* 710064, *Shaanxi, China*;
3.*State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an* 710069, *Shaanxi, China*)

Abstract: To solve the problem of foundation treatment in the construction of an airport runway in an expansive soil zone, we used the expansive soil in the Ankang area, Shaanxi province as our research object. To determine the construction control parameters of lime-treated expansive soil, we carried out relevant tests on the strength and expansive properties of the soil. The results show that with an increase in the quantity of lime, the optimum moisture content increases, the maximum dry density and the swelling shrinkage potential decreases, and the quantity of lime and the maximum dry density is nonlinear. When the amount of lime is 9％, the regularity of the swelling change rate is strong. The California bearing ratio (CBR), which is related to factors such as compaction and water content, does not increase with an increase in the compaction coefficient. The proportion of added lime had a greater influence on the strength of lime-treated expansive soil. When the amount of lime is 9％, the *CBR* was higher than for other proportions. Under the same compaction coefficient of expansive soil, with lime dosages of 3％ and 6％, the compressibility is relatively similar. When the lime dosage is increased to 9％, the compression significantly decreased. Based on these test results, we propose the use of lime for expansive soil

① **收稿日期**：2015-07-13
基金项目：国家自然科学基金项目(40972193)
作者简介：王文良(1981－)，男，山东聊城人，博士研究生，主要从事特殊岩土地基的研究。E-mail:soilmechanics@163.com。

improvement in runway ground treatment, as well as a method for determining the subgrade construction control parameters with respect to the expansive properties as the main control indexes, and strength as the confirmation index.

Key words: expansive soil; lime-treated soil; curing time; compaction coefficient; construction control parameter

0 引言

膨胀土在我国分布很广,随着建设事业的迅速发展,不可避免地遇到了很多膨胀土问题。由于膨胀土具有超固结、多裂隙、吸水显著膨胀软化、失水收缩开裂及反复变形等基本特性,使得其工程性质很差,与一般黏性土差别很大,常有"逢堑必滑,有堤必塌"之说。膨胀土的这种破坏作用具有长期潜在的危害性和多次反复性,被称为"工程中的癌症"[1-5]。为解决这一工程难题,各行业均对其进行了一定的研究。刘松玉等对膨胀土掺加石灰后的强度进行了相关研究,结果显示掺石灰后的膨胀土强度与掺量存在一定的关系[6-13];杨和平等对膨胀土本身的强度和膨胀性能进行了研究,结果表明改进膨胀土相关参数的测定方法,可以使素膨胀土的强度满足路基设计规范的相关要求[14-17];郭爱国等对填筑体的含水率进行了相关研究,结果显示对于石灰改良膨胀土来说,施工最优含水率比素土稍大[18-20]。相对于高速公路,机场跑道的等级更高,要求更严格,虽然两者有一定的相似之处,但仍有很大的区别,而且相关研究比较欠缺。经石灰改良后的膨胀土土基施工控制参数包括多个方面,本文仅从压实系数、掺灰率和养护时间 3 个方面进行相关研究,以期能达到合理确定石灰改良膨胀土施工控制参数的目的。

1 试验土及石灰的参数

1.1 膨胀土

试验所用的膨胀土取自拟建安康机场建设场地,其自由膨胀率为 70,为高液限的中膨胀土,根据民用机场岩土设计规范,该类土不能直接用于机场跑道地基的铺设。其相关试验参数见表 1。

表 1 膨胀土的物理性质

Table 1 Physical properties of expansive soil

塑限/%	液限/%	塑性指数/%	自由膨胀率/%	重型击实试验		颗粒成分/%		
				最优含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	> 0.05 mm	0.005~0.05 mm	< 0.005 mm
22.15	46.65	25	70	16	1.87	6.55	50.2	43.25

1.2 石灰

试验时采用消石灰的化学成分见表 2。

表 2 石灰的成分

Table 2 Composition of lime

有效成分	含量/%
氧化钙(GaO)	68.79
氧化镁(MgO)	3.11

2 石灰土的基本物理力学指标试验

2.1 试验方法

通过对掺加不同石灰剂量的膨胀土进行含水率、膨胀性等基本试验,研究石灰不同掺量时改良膨胀土最优含水率、最大干密度、胀缩等级和界限含水量的变化规律。

2.2 界限含水量分析

液限和塑限能够反应土中强结合水和弱结合水含量的变化。对膨胀土来说,结合水的含量与扩散层厚度有关,扩散层厚度决定颗粒间距的大小,土颗粒间连接力的大小主要影响膨胀土的抗剪强度,所以膨胀土的工程性质与液塑限的关系极为密切。

把试样在烘箱内烘干、碾碎并分别过 2 mm 和 0.5 mm 的标准筛备用,石灰掺加剂量采用 3%、6% 和 9%3 种。按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)采用 LG-100D 型数显式土壤液塑限联合测定仪进行界限含水量的测定,结果见图 1。

从图 1 的曲线可以看出,掺石灰之后土样的液、塑限和塑性指数均发生了变化。随着石灰掺量增加,液限和塑性指数均有所减小,而塑限稍有增大。但塑性指数的减小与掺灰率变化并不成正比,掺量 3%时其减小幅度最大,继续掺加石灰,其减小幅度逐渐变小,掺加 6%以上时再增加石灰掺量对塑性指数的变化影响不显著。液限与塑性指数的减小说明掺加石灰后,膨胀土持水能力减弱,亲水性及土颗粒表面活性相对减小,这也从另一个方面证明了掺

入石灰可以改善膨胀土的膨胀性，但是过多地掺入石灰对改善变形性能的作用并不理想。

2.3　胀缩等级划分

按照界限含水量试验、自由膨胀率试验和标准吸湿含水率试验所得结果对不同掺灰量的改良土胀缩等级进行分级，结果见表 3。

从表 3 可以看出，加入石灰后土的胀缩等级均有降低，随着石灰掺量的增加，综合胀缩潜势呈降低趋势，说明石灰可以作为膨胀土的改良剂。

表 3　胀缩等级

Table 3　Grade of swelling-shrinkage

划分标准	自由膨胀率/%		标准吸湿含水率/%		塑性指数/%		综合胀缩潜势
	δ_{ef}	胀缩潜势	W_a	胀缩潜势	I_p	胀缩潜势	
素土	70	中	5.26	中	25	弱	中-弱
石灰掺量 3%	60	中	4.62	弱	25.5	弱	弱-中
石灰掺量 6%	43	弱	4.29	弱	15	弱	弱
石灰掺量 9%	18	无	3.96	弱	17.8	弱	弱

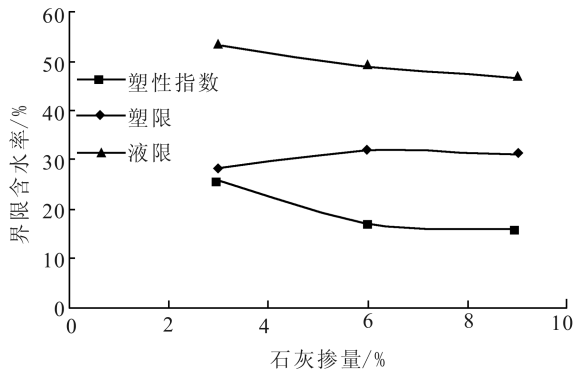

图 1　掺灰量与界限含水率的关系

Fig.1　Relationship between limit moisture content and lime content

2.4　击实试验

膨胀土改良后其成分、结构和基本物理力学指标等均发生变化。干密度、孔隙比、初始含水量等影响土的压缩变形、胀缩特性和强度大小，最优含水率和最大干密度是膨胀土改良试验研究的基础。本次选用重型击实试验，按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)对石灰掺量 3%、6%及 9%的样品进行试验，余土高度控制在 5 mm 以内，实验过程中含水量误差控制在±0.5%以内。结果如表 4。

表 4　击实试验数据

Table 4　Data of the compaction test

石灰掺量	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})
3%	13.3%	1.965
6%	15%	1.928
9%	17.5%	1.785

由表 4 可以看出，随着石灰掺量的增加，改良后的膨胀土的最优含水率有所增大，最大干密度相应减小，石灰掺量与最优含水率基本呈线性关系，与最大干密度呈非线性关系。

3　不同压实系数下胀缩特性试验

膨胀土吸水后含水量增加，孔隙间距增大，土颗粒膨胀变形，引起体积膨胀，所以在工程中通常用膨胀量来反映膨胀土的膨胀性。反之，失水后含水量降低，体积收缩，当达到一定限度时不再缩小，这个限度就是土的缩限，通常采用收缩率和收缩系数来反映膨胀土的收缩性。对于改良膨胀土而言，密实度是土方施工时较为重要的控制参数。为验证哪种密实度下的改良土性质最好，本文对最优含水率下不同压实系数(0.90、0.93、0.96、0.98)的石灰改良土(石灰掺量 3%、6%、9%)进行了自由膨胀率、有荷膨胀率及收缩率的对比试验。

3.1　自由膨胀率试验

最优含水率下不同压实系数和不同石灰掺量改良土的自由膨胀率试验结果如图 2 所示。

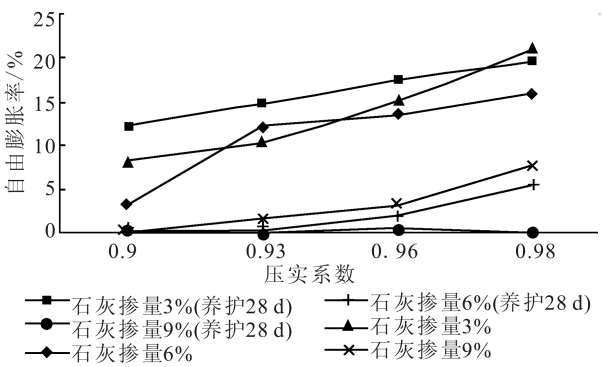

图 2　掺灰率、压实系数与自由膨胀率关系

Fig.2　Relationship between lime content, compaction coefficient and free swelling ratio

从图 2 可以看出，每种石灰掺量下，压实系数 0.90 的自由膨胀率最小，压实系数 0.98 的自由膨胀率最大，随着压实系数增大自由膨胀率呈现出变大

的趋势。这表明压实系数越大,土的孔隙率越小,膨胀土颗粒间的接触面积越大。根据有效应力原理,水进入土体后会分担一部分土颗粒所承担的力,使土颗粒间接触面积减小、颗粒间距离增大。

在相同压实系数下,随着石灰掺量增加自由膨胀率减小,说明石灰掺量越多越有助于降低自由膨胀率。

在养护 28 天后,同一石灰掺量、同一压实系数的样品均比未养护时自由膨胀率小。相同压实系数下,石灰掺量 6%和 9%的改良膨胀土的最终膨胀量明显降低,掺量 3%的最终膨胀量变化不大。由此可以得出,本次试验中石灰掺量大于 6%时,改良膨胀土养护 28 天后最终膨胀量变化较大。

3.2 石灰改良土有荷膨胀率试验

实验仪器为南京土壤仪器厂生产的 GZQ-1 型固结仪,按照《土工试验方法标准》的方法和要求进行。结果如图 3 所示。

(1) 从图 3 可以看出,相同石灰掺量、同一种压实系数下,400 kPa 的有荷膨胀率最小,随着压力减小有荷膨胀率增大。随着压实系数增大,有荷膨胀率整体呈增大的趋势,从图 3(a)看出石灰掺量 3%时这一变化最明显,有荷膨胀率随压力的变化曲线几乎呈直线,石灰掺量越高,有荷膨胀率随压实系数增大而增大的趋势减缓。相同压实系数下,随石灰掺量增加有荷膨胀率呈减小的趋势,而且随着石灰掺量增加,有荷膨胀率减小趋势变缓。

(2) 随着养护时间的增加,在相同压实系数和压力下有荷膨胀率呈减小的趋势,随石灰掺量的增加,有荷膨胀率减小的趋势变缓。

(3) 石灰掺量 9%时有荷膨胀率变化的规律性很强,说明石灰掺量 9%时改良膨胀土的稳定性较好。

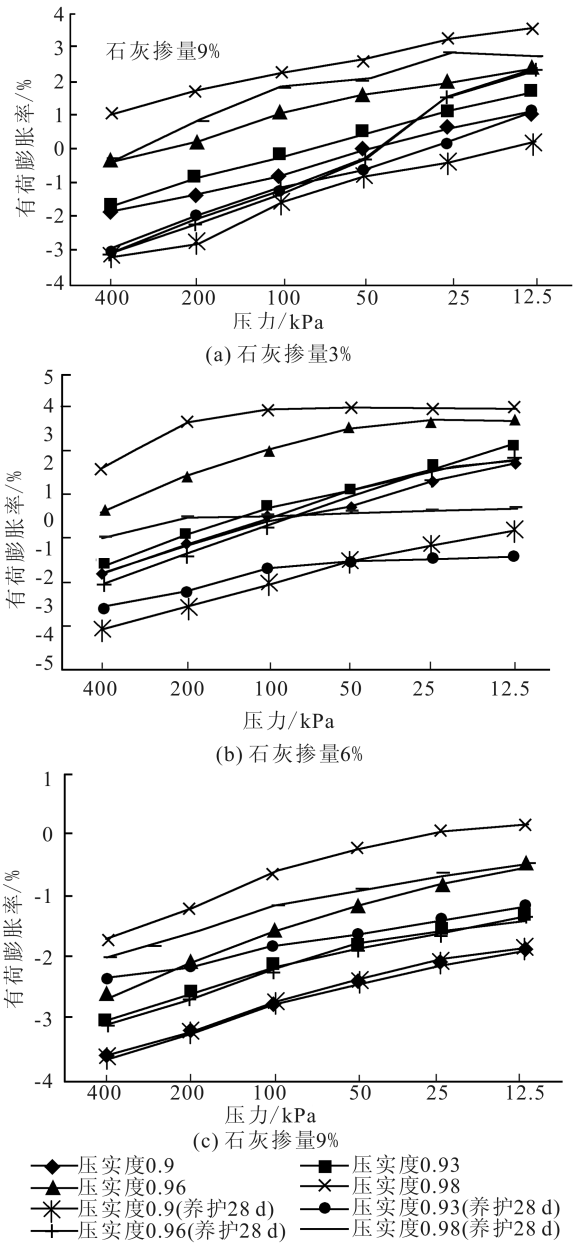

图 3 掺灰率不同时压实系数与有荷膨胀率关系

Fig.3 Relationship between compaction coefficient and linear swelling ratio with different lime content

3.3 收缩试验

膨胀土的收缩特性也是一个重要指标,对改良膨胀土的收缩特性研究同样重要。

收缩试验可测得土的线缩率、收缩系数和缩限。收缩试验结果会受到温度和空气湿度的影响,实验过程中尽量选择相似的实验条件,减少试验影响因素。实验仪器为南京土壤仪器厂生产的 SS-1 型收缩仪,试验具体操作步骤按照《膨胀土地区建筑技术规范》(GB50112)的方法和要求进行。结果如图 4 所示。

(1) 线缩率

从图 4(a)可以看出,加入石灰后改良土的线缩率随着压实系数增大均呈减小趋势。对比相同压实系数、不同石灰掺量的线缩率,发现随着石灰掺量的增加改良土的线缩率增大。这是因为土的线缩率与初始含水量有关,初始含水量越高,达到缩限后土体失去的水分越多,体积变换越明显。试验均是在最优含水量条件下进行的,从表 4 可知,随着石灰掺量增加改良土的最优含水率增大,由此可得到改良膨胀土线缩率的大小与初始含水量有关。

从图 4(a)还可看出,养护 28 天后,改良土的线缩率随着压实系数增大均呈减小趋势,压实系数大

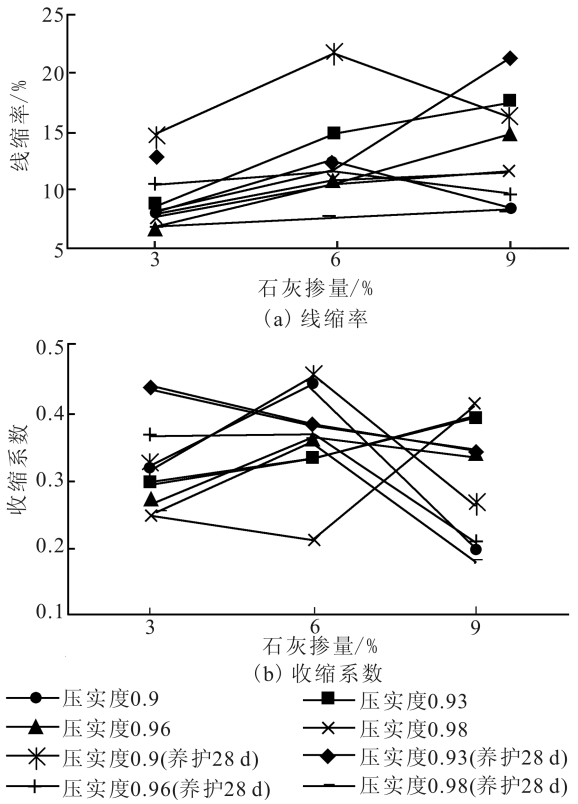

图 4　线缩率及收缩系数试验结果

Fig.4　Test results of linear shrinkage ratio and shrinkage coefficient

于 0.93 以后线缩率变化不大。随着养护时间的增加，石灰与土发生了一系列物理化学反应，将土颗粒粘结在一起，土骨架之间连结基本稳定，失水后土颗粒互相支撑，孔隙间的距离变化不大，整体表现出失水后土体积变化减小。

(2) 收缩系数

从图 4(b)可以看出，加入石灰后土体的收缩系数与石灰的掺量和压实系数均有关，随掺量和压实系数的变化无明显的规律。收缩系数是线缩率与含水量变化之间的关系，与线缩率以及所对应的含水量有关，主要受土体自身物理力学性质的影响。

养护 28 天后，土体的收缩系数随着压实系数的增大而减小。这是因为对掺加同比例石灰的膨胀土来说，压实系数增加必然导致其干密度增加，相应的孔隙率有所减小。减小相同的含水量后，压实系数小的土样因孔隙率大、干密度小，失水后土颗粒重新排列，体积缩小的空间大，其体积变化更明显，所以试验所测得的压实系数小的土样其线缩率变化量比压实系数大的土样大。收缩系数与线缩率以及所对应的含水量有关，减小相同的含水量后，压实系数小的线缩率比压实系数大的线缩率变化量大，所以相同石灰掺量的改良土的收缩系数随着压实系数增加而减小。

从图 4(b)还可以看出，养护 28 天后，石灰掺量 9%的收缩系数明显小于其他石灰掺量的改良土，说明随着石灰掺量的增加改良土的收缩系数减小。

综合线缩率和收缩系数均可以看出，随着石灰掺量增加，改良土的收缩性降低；随着压实系数增加，改良土的收缩性也在降低。

3.4　胀缩总率计算

膨胀土的胀缩总率与膨胀土的结构特征、土颗粒大小、矿物成分有关，能够反应土体自身的一些特征。根据有荷膨胀率试验结果和收缩试验结果，计算改良土的胀缩总率。

计算所用初始含水量均为其最优含水率，据相关资料，旱季含水量平均值取为 15.2%，计算结果如表 5。

表 5　胀缩总率数据

Table 5　Data of total swell-shrink ratio

工况	压实系数 λ	石灰掺量		
		3%	6%	9%
未养护	0.90	0.351	−1.021	−2.116
	0.93	0.788	−0.699	−1.533
	0.96	1.840	0.832	−0.885
	0.98	2.842	1.126	0.083
养护 28 d 后	0.90	−2.155	−3.690	−3.833
	0.93	−2.022	−3.630	−2.898
	0.96	−1.861	−1.858	−2.157
	0.98	0.970	−2.363	−1.362

根据计算结果，石灰掺量 9%的改良膨胀土胀缩总率均小于 0.7%，达到了规范和设计要求；掺量 3%和 6%时，仅部分压实系数下的改良土符合规范和设计要求。在养护 28 天后，除石灰掺量 3%改良膨胀土的胀缩总率大于 0.7%外，其余均符合规范和设计要求。

4　石灰改良土强度特性试验研究

由于膨胀土吸水软化、易分化，普遍具有强度折减特性和强度变动特性，一般天然状态时其峰值强度极高，而残余强度极低。前人对膨胀土强度做了大量试验研究，分析研究成果发现，膨胀土的强度与其物质成分、裂隙发育状况、初始含水量、含水量变化、密实程度、干湿循环次数及土的上覆压力等因素有关。

无侧限抗压强度指标体现土体的无侧限抗压强度，承载比值和抗剪强度体现土体的有侧限抗压强度，在道路工程中，一般用无侧限抗压强度、承载比

值衡量土的强度。

4.1 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度值是跑道土基填料的一项重要控制指标,反映土体无侧向条件下的抗压强度。本次试验所用仪器为 LD127-Ⅱ型路强仪,对不同石灰掺量的改良膨胀土进行无侧限抗压强度试验。试验的主要目的是对比改良土的无侧限抗压强度大小。

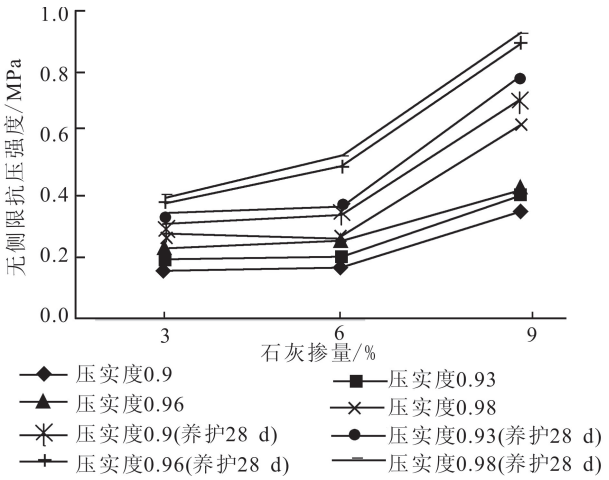

图 5 无侧限抗压强度试验结果

Fig.5 Test results of unconfined compressive strength

实验数据分析所得结果如图 5 所示。没有养护期的石灰改良膨胀土无侧限抗压强度在石灰掺量 3%和 6%时差别不大,而当石灰掺量增大到 9%时,改良土的无侧限抗压强度明显增大。目前我国设计中一般要求养护 7 天后改良地基土的无侧限抗压强度 $q_u \geqslant 0.8$ MPa。本次试验中,压实系数为 0.93、0.96和 0.98 的强度时,石灰掺量 9%的改良膨胀土养护 28 天后达标。

养护 28 天以后,无侧限抗压强度大小有一个明显的排序,并且随着石灰掺量的增加,改良土的无侧限抗压强度均呈现出增大的趋势,且随着石灰掺量的增加,无侧限抗压强度的增加变得明显,掺量由 6%增至 9%时强度变化非常大。

4.2 *CBR* 试验

CBR(加州承载比)值是反映贯入试验后部分土体与整体样品间产生相对位移(即剪切力)时,在剪切面上产生的抗剪特征,是土体抵抗局部剪切(潜在强度)的反应。该试验模拟改良土满足压实系数要求,被水浸泡最不利环境下,土颗粒间孔隙被水充填其联结强度降低的情况。《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)将承载比试验列为表征路基粒料、稳定土和一般土体强度的指标,其适用范围是路面基层和底层材料。改良膨胀土用于下道床以下的部分,其承载比值应不小于 5%。

本次的试验测试了不同石灰掺量在不同压实系数下的 *CBR* 值。由于条件限制,未进行养护。

石灰掺量 3%、6%的试样是贯入量 5.0 mm 时的 *CBR* 值,而 9%的试件是贯入量 2.5 mm 的 *CBR* 值。所得试验结果如图 6 所示。

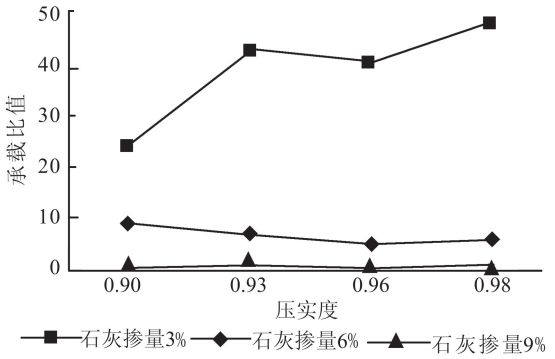

图 6 *CBR* 试验结果

Fig.6 Test results of *CBR*

根据试验结果,相同压实系数不同石灰掺量下,其 *CBR* 值随含灰量的增加而增大。其中石灰掺量 3%改良膨胀土的 *CBR* 值小于 5%,不符合要求。石灰掺量 9%时,改良膨胀土的 *CBR* 值突然增大。分析其原因为:石灰的主要成分是 CaO,遇水后发生如下反应:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

同时散发出大量的热量,体积膨胀 1～2.5 倍。石灰掺量 9%时土体砂化得更彻底,絮凝作用将土颗粒牢牢地粘结在一起,土体结构颗粒的形状被改变得最多,土骨架之间连结得比较好,土体的结构框架基本稳定且不易被破坏,此时孔隙率虽然较高,吸水后膨胀土中的孔隙首先被填满,胀缩总率相对较低,在水中侵泡后膨胀变形量较小。石灰中的游离 Ca^{2+} 与膨胀土中的氧化硅和氧化铝作用,生成含水的硅酸钙和铝酸钙,是石灰改良膨胀土强度增大的主要原因。改良土中游离 Ca^{2+} 含量越多,改良土的强度就越高。

改良土的 *CBR* 并不是随着压实系数增加而增大。根据前人的研究结果,膨胀土的 *CBR* 值与击实功、含水量等因素有关。击实功相同时,*CBR* 值随含水量的变化规律与击实曲线相似,*CBR* 峰值所对应的含水率一般稍大于最优含水率。

5 石灰改良土固结压缩试验研究

5.1 试验目的

根据室内固结压缩试验得到石灰改良膨胀土的

压缩曲线，从而求得土的压缩系数 α、压缩指数 C_c、压缩模量 E_s 等指标。

5.2　固结压缩试验数据分析

分别进行石灰掺量 3%、6%和 9%的改良膨胀土试验，养护期分别为 0 天和 28 天，压实系数分别为 0.90、0.93、0.96 和 0.98。试验步骤及数据处理严格按照《土工试验方法标准》进行，所施加的各级压力为 25、50、100、200 和 400 kPa。试验所用仪器为 GZQ-1 型固结仪。实验结果如图 7。

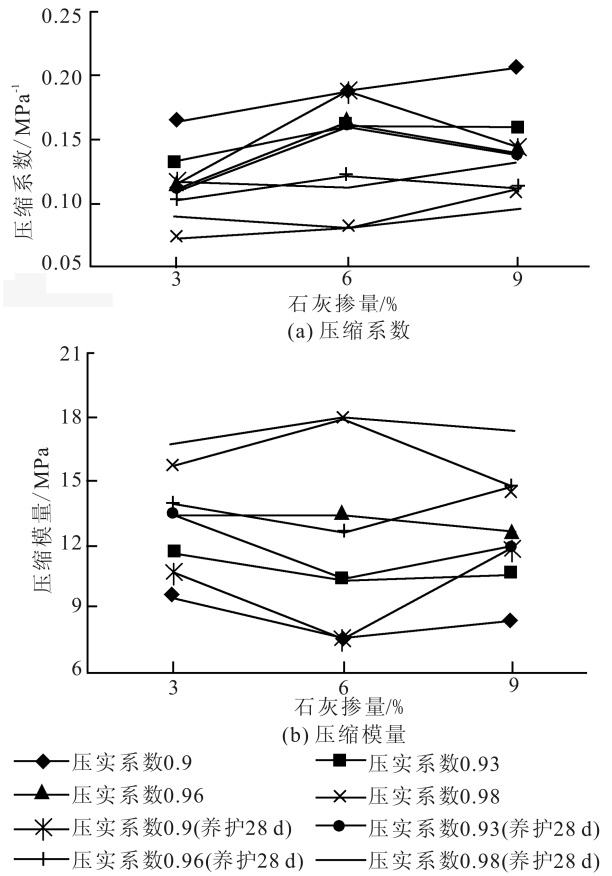

图 7　石灰改良土固结压缩试验结果

Fig.7　Results of consolidation compression tests on lime-treated soil

石灰改良膨胀土初始孔隙随石灰掺量的增加而增大，初始孔隙比越大，受压后压缩空间越大，其孔隙比变化越多，从这一理论出发石灰改良土压缩性随石灰掺量的增加而增大。但是从图 7 可知，石灰改良膨胀土的压缩系数和压缩模量非常接近，其压缩性大小顺序很难从图上看出。随着石灰掺量增加，改良膨胀土越不易于压密，受压后孔隙变化情况越不明显。

根据试验结果，石灰改良土养护 28 天后的压缩系数均比养护 0 天的压缩系数有一定程度的减小，而压缩模量均比养护 0 天的压缩模量有一定程度的提高，其压缩性有所降低。

6　跑道土基填筑施工控制参数的确定

根据上述研究，笔者认为在确定跑道土基填筑施工控制参数(最优掺灰率和最优含水率)时，可以按照如下步骤进行：(1)采用自由膨胀率、界限含水率及线膨胀总率等指标，对经石灰改良后的膨胀土进行 1 d 龄期下的膨胀性能测定，以此确定最优掺灰率；(2)确定最优掺灰率后进行强度试验，确定其最优施工含水率；(3)在最优掺灰率和最优施工含水率条件下，进行 7 d 龄期的无侧限抗压强度、*CBR* 等试验，以验证其能否满足跑道土基铺筑的强度要求。如果强度满足要求，则可以按照此控制参数进行施工；若不满足要求，应重新按照上述步骤进行，直到强度符合要求。

7　结语

(1) 随着石灰掺量增加，石灰改良膨胀土液限和塑性指数 I_P 均减小，但其塑限增大；加入石灰后土的胀缩等级均有所降低，随着石灰掺量增加，综合胀缩潜势呈降低趋势。

(2) 随着石灰掺量的增加，改良后膨胀土的最优含水率有所增大，最大干密度相应减小，石灰掺量与最大干密度呈非线性关系。

(3) 随着石灰掺量增加，改良膨胀土的最终无荷膨胀率均减小，养护 28 天后，同一石灰掺量、同一压实系数的样品均比养护 0 天的自由膨胀率小。在本次试验中石灰掺量大于 6%时，养护 28 天后最终自由膨胀量变化较大。

(4) 随着石灰掺量增加有荷膨胀率减小，石灰掺量越高，有荷膨胀率随压实系数增大而增大的趋势减缓。石灰掺量越少，养护 28 天后有荷膨胀率降低的越多。石灰掺量 9%时有荷膨胀率变化的规律性很强，说明石灰掺量 9%时其改良膨胀土的稳定性好。

(5) 影响其线缩率的主要因素是初始含水量，随着石灰掺量增加，土的收缩性降低，随着压实系数增加，改良土的收缩性也在降低。

(6) 养护 0 天时，只有石灰掺量 9%的改良膨胀土胀缩总率小于 0.7%，养护 28 天以后，除石灰掺量 3%改良膨胀土的胀缩总率大于 0.7%外，其余改良膨胀土的胀缩总率均小于 0.7%。

(7) 本次试验中，压实系数为 0.93、0.96 和

0.98，养护 28 天后石灰掺量 9%的改良膨胀土其无侧限抗压强度大于 0.8 MPa，其余均小于 0.8 MPa。相同石灰掺量改良土的 *CBR* 并不随压实系数的增加而增大，其大小与击实功、含水量等因素有关，其 *CBR* 值明显大于其他改良土的 *CBR* 值。

(8) 相同压实系数下石灰掺量 3%和 6%改良膨胀土的压缩性比较接近，石灰掺量增加到 9%时其压缩性明显降低。养护 28 天后的压缩性均降低。

参考文献(References)

[1] 廖世文.膨胀土与铁道工程[M].北京：中国铁道出版社，1984.
LIAO Shi-wen.Expansive Soils and Railway Engineering[M].Beijing:China Railway Publishing House,1984.(in Chinese)

[2] 郭军辉，阎长虹，夏良斌，等.某一级公路路基填土膨胀性试验[J].地球科学与环境学报，2007，29(1)：85-89.
GUO Jun-hui，YAN Chang-hong，XIAO Liang-bin，et al.Experimental Study on Swelling Property of Subgrade Soil in a First Class Highway[J].Journal of Earth Sciences and Environment，2007，29(1)：85-89.(in Chinese)

[3] 王文良.膨胀土山区机场存在的岩土工程问题分析[J].中国民用航空，2014(8)：84-86.
WANG Wen-liang.An Analysis of the Geotechnical Engineering Problem Existing Airports Located in the Mountain Area with Expansive Soil[J].China Civil Aviation，2014(8)：84-86.(in Chinese)

[4] 毛新虎.公路膨胀土路堑边坡防护方案探讨[J].地球科学与环境学报，2004，26(4)：49-53.
MAO Xin-hu.Discuss of Cutting Slope Treatment Project for Expansive Soil on Highway[J].Journal of Earth Sciences and Environment，2004，26(4)：49-53.(in Chinese)

[5] 李荣建，郑文，王莉平，等.非饱和土边坡稳定性分析方法研究进展[J].西北地震学报，2011，33(增刊)：2-9.
LI Rong-jian，ZHENG Wen，WANG Li-ping，et al.Progress and Developing Trend on Stability Analyses of Unsaturated Soil Slope[J].Northwestern Seismological Journal，2011，33(Supp)：2-9.(in Chinese)

[6] 查甫生，刘松玉.合安高速公路膨胀土掺石灰试验研究[J].公路交通科技，2006，23(1)：36-39.
ZHA Fu-sheng，LIU Song-yu.Experiment Study on the Effect of Lime on Expansive Soils of Hean Expressway[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development，2006，23(1)：36-39.(in Chinese)

[7] 刘军，黄斌，龚壁卫，等.膨胀土水泥改性均匀性及长期效果试验研究[J].西北地震学报，2011，33(增刊)：204-208.
LIU Jun，HUANG Bin，GONG Bi-wei，et al.Experimental Study on Uniformity and Long-term Effects of Cement Modified Expansive Soil[J].Northwestern Seismological Journal，2011，33(Supp)：204-208.(in Chinese)

[8] 查甫生，刘松玉.石灰-粉煤灰改良膨胀土试验[J].东南大学学报：自然科学版，2007，37(2)：339-344.
ZHA Fu-sheng，LIU Song-yu.Experiment on Improvement of Expansive Clays with Lime-Fly Ash[J].Journal of Southeast University：Natural Science Edition，2007，37(2)：339-344.(in Chinese)

[9] 陈爱军，张家生.石灰改良膨胀土无侧限抗压强度试验[J].桂林理工大学学报，2011，31(1)：91-95.
CHEN Ai-jun，ZHANG Jia-sheng.Experiment on Unconfined Compressive Strength of Lime Improving Expansive Clay[J].Journal of Guilin University of Technology，2011，31(2)：91-95.(in Chinese)

[10] 杨明亮，陈善雄.空军汉口新机场试验路段石灰改性膨胀土试验研究[J].岩石力学与工程学报，2006，25(9)：1868-1875.
YANG Ming-liang，CHEN Shan-xiong.Experimental Research on Improved Expansive Soil with Lime in Test Section of the New Hankou Airfield[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(9)：1868-1875.(in Chinese)

[11] 郭爱国，刘观仕.高速公路建设中中膨胀土特性的试验研究[J].岩土力学，2005，26(3)：397-403.
GUO Ai-guo，LIU Guan-shi.Testing Study on Properties of Mid-expansive Soil for Expressway Construction[J].Rock and Soil Mechanics，2005，26(3)：397-403.(in Chinese)

[12] 崔伟，李华栾.石灰改性膨胀土工程性质的试验研究[J].岩土力学，2003，24(4)：606-609.
CUI Wei，LI Hua-luan.Experimental Research on Engineering Character of Improved Expansive Soil with Lime[J].Rock and Soil Mechanics，2003，24(8)：606-609.(in Chinese)

[13] 谭松林，黄玲，李玉花.加石灰改性后膨胀土的工程性质研究[J].工程地质学报，2009，17(3)：421-425.
TAN Song-lin，HUANG Ling，LI Yu-hua.Engineering Properties of Expansive Soil Mixed with Lime at Yichang－Jingmen Expressway[J].Journal of Engineering Geology，2009，17(3)：421-425.(in Chinese)

[14] 李雄威，孔令伟.考虑水化状态影响的膨胀土强度特性[J].岩土力学，2008，29(12)：3193-3198.
LI Xiong-wei，KONG Ling-wei.Strength Characteristics of Expansive Soil Considering Effect of Hydrousstate[J].Rock and Soil Mechanics，2008，29(12)：3193-3198.(in Chinese)

[15] 胡波，龚壁卫，程展林，等.膨胀土裂隙面积强度的直剪试验研究[J].西北地震学报，2011，33(增刊)：246-248.
HU Bo，GONG Bi-wei，CHENG Zhan-lin，et al.Direct Shear Test on Shear Strength of Fissure-plane in Expansive Soil[J].Northwestern Seismological Journal，2011，33(Supp)246-248.(in Chinese)

[16] 马新，孙友宏，刘大军.高速公路路基膨胀土改性处理的实验研究[J].吉林大学学报：地球科学版，2005，35(2)：213-217.
MA Xin，SUN You-hong，LIU Da-jun.A Study on the Experimental of Modified Treatment on the Expansive Soil for Expressway Bed[J].Journal of Jilin University：Earth Science Edition，2005，35(2)：213-217.(in Chinese)

(下转 444 页)

响的研究[J].岩土力学,2010,31(1):87-91.
YANG Li-guo, LUO Ya-sheng, LI Yan, et al. Research on Effect of Initial Stress Conditions on Dynamic Strength of Compacted Loess[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(1):87-91.(in Chinese)

[18] 李又云,谢永利,刘保健.路基压实黄土动力特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1037-1046.
LI You-yun, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Experimental Research on Dynamic Characteristics of Roadbed Compaction Loess[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(5):1037-1046.(in Chinese)

[19] 谢定义.土动力学[M].西安:西安交通大学出版社, 1988.
XIE Ding-yi.Soil Dynamics[M].Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,1988.(in Chinese)

(上接 438 页)

[17] 杨和平,赵鹏程.膨胀土填料改进 *CBR* 试验方法的提出与验证[J].岩土工程学报,2007,29(12):1751-1757.
YANG He-ping,ZHAO Peng-cheng.Suggestion and Verification on Modified *CBR* Test Method for Expansive Soils Fill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (12):1751-1757.(in Chinese)

[18] 杨和平,湛文涛.南宁膨胀土做路堤填料的土性试验[J].中国公路学报,2011,24(1):1-7.
YANG He-ping, ZHAN Wen-tao. Soil Property Testing of Nanning Expansive Soil as Embankment Filler [J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(1):1-7.(in Chinese)

[19] 李志祥,胡瑞林.改良膨胀土路堤填筑含水率优化试验研究[J].工程地质学报,2005,13(1):113-116.
LI Zhi-xiang, HU Rui-lin. Experimental Study on Optimal Water Content of the Modified Experiment Clay Used as the Embankment Fills[J].Journal of Engineering Geology,2005, 13(1):113-116.(in Chinese)

[20] 郭爱国,孔令伟.石灰改良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. On Determination of Optimum Water Content of Lime-treated Expansive Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(3):517-521.(in Chinese)