第 14 卷 第 4 期 2014 年 2 月
1671—1815(2014)04-0269-04

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 14 No. 4 Feb. 2014
© 2014 Sci. Tech. Engrg.

建筑技术

# 石灰改良膨胀土击实样膨胀特性和力学性质试验研究

陈 雷[1,2] 张福海[1,2] 范云中[3] 李娇娜[4] 吴 锐[5]

(河海大学岩土工程研究所[1]；河海大学教育部堤坝与岩土工程重点实验室[2]，南京 210098；
镇江市农业委员会[3]，镇江 212009；长江水利委员会 长江勘测规划设计研究院[4]，武汉 430010；中南地产集团[5]，南通 226000)

**摘 要** 本文以宁淮高速公路淮安段膨胀土填料为研究对象，通过室内试验研究石灰改良膨胀土作为路基填料的膨胀性和力学性质。在天然膨胀土 2% 石灰砂化的基础上，制备不同初始含水率与压实度的石灰改良土，进行不同养护龄期的有荷膨胀率和强度特性试验。试验结果表明：石灰改良土线膨胀率和膨胀力均有大幅度的降低，且随含水率和养护龄期保持减小趋势、随压实度保持增大趋势；石灰改良土无侧限抗压强度、黏聚力、内摩擦角均有一定程度的提高。因此，石灰改良膨胀土作为路基填料的施工工艺在工程中是可行的，为膨胀土改良方案选择以及膨胀土地区公路路基设计和现场施工提供科学依据和参考。

**关键词** 膨胀土 石灰 膨胀性 室内试验 路基填料

**中图法分类号** TU443； **文献标志码** B

天然膨胀土在工程特性方面适用性较差。经过压实后的天然膨胀土其膨胀变形和膨胀力均较大、强度随含水率增大而急剧降低，不能直接作为路基填土等的工程应用，膨胀土给工程带来的灾害性，必须经过处理后才能在工程中使用[1,2]。正是这种严重的灾害驱使前人对膨胀土进行改良，前人提出了不少有效的处理方案，目前处理膨胀土的方法主要是化学改性，如掺石灰、水泥、粉煤灰、氯化钠、氯化钙和磷酸等来稳定膨胀土[3—5]。但各种处理方案都有其优缺点，也都存在一定的问题。其中用掺石灰处理膨胀土是最普遍和有效的方法。石灰改良膨胀性效果显著，已得到了实践的证实，如宁连高速公路许多路段路堤填料即是生石灰改性膨胀土，主要是降低了膨胀土的膨胀性，降低其工程危害性，以确保高速公路的安全运行。

本文以宁淮高速公路淮安段膨胀土填料为研究对象，在天然膨胀土进行掺入 2% 生石灰砂化，通过有荷膨胀试验、无侧限抗压强度试验、直剪试验和承载比试验等研究石灰土的膨胀特性和强度特性，并研究了养护龄期、压实度、含水率对其膨胀变形和强度特性的影响以及石灰改良膨胀土作为填筑材料的工程性质，为膨胀土的改良方案选择以及相关膨胀土工程的设计提供科学依据和参考。

2013 年 9 月 16 日收到 教育部博士点基金(2010 0094 110002)资助
第一作者简介：陈 雷(1988—)，男，硕士。研究方向：岩土工程地基处理。E-mail：chenlei1988x@126.com。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 膨胀土的基本性质

本试验膨胀土取自宁淮高速公路淮安路段，具体位置位于淮安市洪泽县下高速 1 000 m 左右路口处。膨胀土颜色呈黄褐色，其中混杂有坚硬的礓石等杂质，取土深度为 1 ~ 1.5 m，对素土和改性土样按照重型击实标准进行了击实试验，得出其最大干密度为 1.89，最有含水率为 18.6%。其基本物理性质见表 1。

**表 1 膨胀土物理力学性质指标**

| 含水率 /% | 干密度 /(g·mL$^{-1}$) | $Gs$ | 液限 /% | 塑限 /% | 塑性指数 | 自由膨胀率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 25.4 | 1.89 | 2.79 | 54.8 | 26.8 | 28 | 69 |

由表 1 可知，试验所用天然膨胀土塑限为 26.8%，液限为 54.8%，自由膨胀率为 69%，参考《公路路基设计规范》(JTGD 30—2004)[6] 推荐的分类标准，初步判定其为高液限中等膨胀土，工程性质较差，具有潜在工程危害性，不能满足路基对填料的强度要求，不适合做工程填筑材料。如用于填筑路堤，需要对其进行石灰改性处理。

### 1.2 试样制备及试验方法

关于石灰改良膨胀土的研究表明[1,5,7]，当石灰

剂量超过某一值后,过多的石灰在土中自由存在,反而会导致石灰土强度降低,使其力学性变差。根据前人的研究成果,本次试验中掺灰率采用 2% 干土重,掺灰后,含水率下降在 2% ~4% 之间,膨胀土黏性大大降低,有利于天然土的团粒化,离散化。首先制备试样,在天然膨胀土掺入 2% 石灰进行砂化,配制含水率为 16.5%、18.6% 和 20.5% 石灰改良土试样。试样均分层击实而成,按压实度 90%、93%、96% 制成环刀样,环刀样放置在潮沙中养护,养护龄期为 7d、14d 和 28d。试验依据《土工试验方法标准》(GB /T 50123—1999)[8] 进行。

对制备好的改良膨胀土样分别进行不同含水率、不同压实度和不同养护龄期的胀缩性和力学性质试验,包括无荷膨胀率试验、有荷膨胀率试验、直剪试验和无侧限抗压强度试验。

有荷膨胀率试验采用的主要仪器设备为高压固结仪,将石灰改良土环刀样装入固结仪后分级施加荷载,让试样在不同的竖向荷载的作用下固结稳定。直接剪切试验使用的是应变控制式直剪仪,制备好的试样放入真空抽气缸内抽真空使其浸水饱和,饱和后的试样经充分浸泡后即可进行试验。无侧限抗压试验采用的是无侧限试验仪,饱和试样制备后在保证湿度不变的条件下养护至试验龄期的前一天时浸水 24 h 获得,试验龄期 28 d。试验方法按照《公路土工试验规程》(JTJ 051—93) 进行。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 有荷膨胀试验

有荷膨胀率能够体现土体的结构性对于膨胀特性的影响,对于无结构性膨胀判别指标有进一步补充的优势。有荷膨胀率是指土体在特定荷载和有侧限条件下的单向膨胀率。它是单向体积膨胀,一种线膨胀率。其线膨胀率越大,则说明土的膨胀性愈强。影响有荷膨胀率大小的有关因素也同样控制着膨胀力的变化,如土的起始含水率、压实度、干密度、填筑条件等[9—11]。以下对影响石灰土膨胀土的各因素进行具体试验分析。

#### 2.1.1 含水率对改良土膨胀特性的影响

2% 生石灰土试样以 16.5%、18.6%、20.5% 的石灰土制备压实度为 96% 的环刀样,并养护 7 d 后,将不同含水率环刀样装入固结仪后分级施加荷载,即 0 kPa、12.5 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。让试样在不同的竖向荷载的作用下固结稳定记录其膨胀量。不同含水率试样线膨胀率与上覆荷载下的关系曲线如图 1。

由图 1 可知,改良土在养护 7 d 的改良膨胀土膨胀率有明显的降低。在相同荷载作用下,含水率越大其膨胀性越小,随着上覆荷载的增加,其线膨胀率逐渐减小至零,此时上覆荷载与试样内部膨胀力相等,该曲线与横坐标交点为试样的膨胀力,可以看出改良土线膨胀率和膨胀力有明显降低,随制样含水率增大而有所减小。这是因为土样含水率增加,膨胀潜势减小。随着上覆荷载的增加,试样出现体缩现象,含水率越大体缩现象越明显。

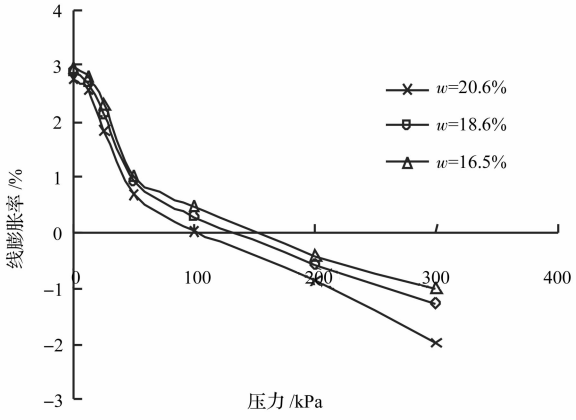


图 1 不同含水率石灰土线膨胀率与压力关系曲线

#### 2.1.2 压实度对改良土膨胀特性的影响

试验所用土样为最优含水率(18.6%)不同压实度养护 28d 的石灰土环刀样,图 2 为不同压实度石灰土线膨胀率与压力关系曲线。由图可以看出,随着上覆荷载的增加,其线膨胀率逐渐减小,压实度越低其下降趋势越明显;在相同荷载作用下,压实度越高其线膨胀率越大。

胀缩总率为在 50 kPa 的压力下的线膨胀率就是其 28 天龄期压实度 90%、93% 和 96% 的改良土样的胀缩总率分别为 0.34%、0.58% 和 0.70%,小于规范《公路路基设计规范 JTGD30—2004》要求的胀缩总率不超过 0.7%,适宜作为路床填料。因此在具体的工程施工中应注意施工的碾压质量控制,以达到最佳的施工效果。

#### 2.1.3 养护龄期对改良土膨胀特性的影响

不同压实度改良土分别养护 7 d、14 d 和 28 d 进行有荷膨胀率实验,其膨胀总率与压实度的关系曲线如图 3 所示。

由图可知,石灰土膨胀性得到明显改善,相同压实度的改良土样,随着养护龄期的增加,其膨胀总率逐渐减小;在相同龄期的改良土样,其膨胀总率随着压实度的增大逐渐增大。

同时可以看出 28 d 龄期改良土胀缩总率已经满足规范要求,三种压实度改良土的胀缩总率分别

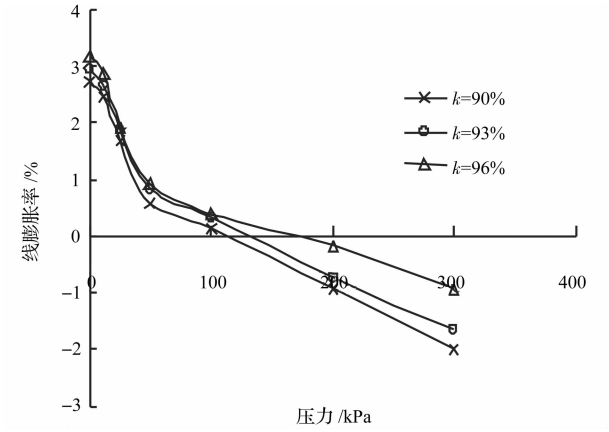


图 2　不同压实度石灰土线膨胀率与压力关系曲线

为 0.426%、0.628%、0.687%,均小于 0.7%,低于规范《公路路基设计规范 JTGD 30—2004》规定的胀缩总率不超过 0.7% 的要求,均可以作为路堤填土;14 d 龄期复合改良土效果明显改善,到 28d 龄期时膨胀率已基本稳定。在具体的工程施工中应注意施工的碾压质量和施工后的养护龄期,确保路基填料的改良效果。

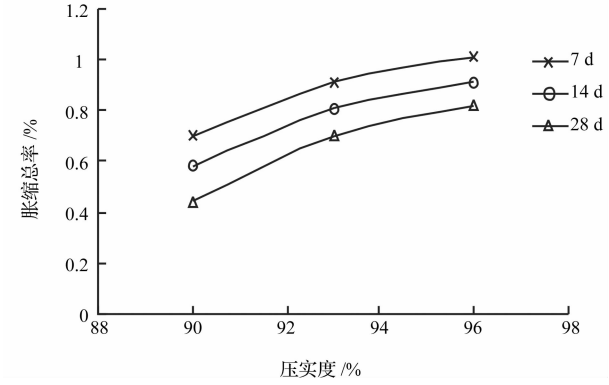


图 3　不同龄期石灰土膨胀总率与压实度的关系

## 2.2　强度特性试验

### 2.2.1　无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度是评价路基土及路面基层材料强度的重要指标,本试验对比素土和对无侧限抗压强度,还考虑了压实度对无侧限抗压强度的影响。不同压实度素土和石灰土的无侧限抗压强值对照如表 2 所示。

**表 2　不同压实度土样的无侧限抗压强度值**

| 含水率 $w$/% | 压实度/% | 无侧限抗压强度/kPa | |
|---|---|---|---|
| | | 素土 | 石灰土 |
| 18.6 | 90 | 318.8 | 446.3 |
| | 93 | 417.7 | 604.6 |
| | 96 | 493.5 | 718 |

由表可知,在相同压实度下与素土比较,石灰土无侧限抗压强度有较大的提高,96% 压实度下 2% 生石灰无侧限抗压强为 718 kPa,素土强度为 493.5 kPa,无侧限抗压强度值增大 45.7%。随着压实度的增加无侧限抗压强度逐渐增大,同时也可以看出,随着石灰改良土压实度的增大,土样无侧限抗压强度不断增大,改善效果越显著。

### 2.2.2　直剪试验

土的抗剪强度参数是评价路堤稳定性的一个重要指标,在长期的工程实践中获得了广泛的应用和成功。试验配制素土和石灰土样含水率为最优含水率 18.6%,压实度分别为 90%、93% 和 96%,养护龄期分别为 14 d,抽气饱和 24 h 进行室内直剪试验。试验成果如图 4 所示。

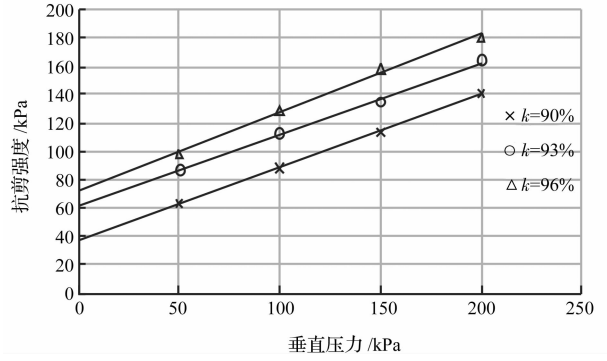


图 4　石灰土抗剪强度与垂直压力关系曲线

由图可以看出,石灰土随着压实度的增大,抗剪强度指标有了明显的提高,所以在施工过程中控制压实度碾压质量尤为重要。现将图 4 中拟合的抗剪强度线计算得到 2% 生石灰土 28 天龄期饱和抗剪强度指标与素土抗剪强度指标列出,以便对比,如表 3。较之素土,2% 生石灰土的抗剪强度指标有所提高,内摩擦角增幅较大,提高了 3 ~ 5°左右,黏聚力 $c$ 也提高了 13 ~ 15 kPa,改善效果显著。

**表 3　素土及 2% 生石灰土饱和抗剪强度指标对比**

| 压实度 | 素土 | | 2% 生石灰土 | |
|---|---|---|---|---|
| /% | $c$/kPa | $\varphi$/° | $c$/kPa | $\varphi$/° |
| 90 | 26.9 | 22.1 | 40.5 | 27.8 |
| 93 | 45.4 | 23.8 | 65.5 | 28.5 |
| 96 | 64.5 | 25.1 | 78.5 | 29.2 |

# 3　结论

本文主要进行了 2% 生石灰改良膨胀土的室内试验研究,对其膨胀特性以及强度特性进行研究,具体得到以下结论。

(1)通过有荷膨胀试验研究发现,石灰土的线膨胀率和膨胀力有大幅度的降低,随含水率和养护

龄期的增大而减小,随压实度的增大而增大,所以在具体的工程施工中应注意施工的碾压质量和施工后的养护龄期,确保路基填料的改良效果。

(2)由强度特性试验得出,石灰土较之素土,无侧限抗压强度、黏聚力、内摩擦角都有所提高,并随压实度和养护龄期的增大而增大。膨胀土加灰改良的混合土其工程地质性质变化较大,强度增大,完全可以达到对膨胀土土质改良的目的为工程建设带来经济。

## 参 考 文 献


1 王保田, 张福海, 张文慧. 改良膨胀土施工技术与改良土的性质研究. 岩石力学与工程学报, 2006;增(1): 3157—3161

2 孙长龙, 殷宗泽, 王福生,等. 膨胀土性质研究综述. 水利水电科技进展, 1995; 15(6): 10—14

3 孙树林, 魏荣耀, 张 鑫. 废弃轮胎胶粉改良膨胀土抗剪强度研究. 岩石力学与工程学报, 2009; 28(1): 3071—3075

4 余湘娟, 王 媛. 掺石灰处理膨胀土路基填料的试验研究. 华东公路, 1999; (2): 46—50

5 张福海. 石灰改良膨胀土的物理力学性状试验研究与工程应用. 南京: 河海大学, 2008

6 中华人民共和行业标准编写组. 公路路基设计规范(JTGD30—004). 北京:人民交通出版社,2004

7 王保田,张福海. 膨胀土的改良技术与工程应用. 北京:科学出版社, 2009

8 SL237—1999. 水利部土工试验规程. 北京:中国水利水电出版社,1999

9 李 进. 膨胀土改良的室内试验研究及地基胀缩变形分析. 南京:河海大学. 2006

10 崔 伟, 李华銮, 穆乃敏. 石灰改性膨胀土工程性质的试验研究. 岩土力学, 2003; 24(4): 606—609

11 黎灿明. 石灰稳定土强度影响因素研究及其合理填筑条件探讨. 南京: 河海大学, 2005

12 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究. 岩土力学, 2002; 24(4): 412—417

13 杨和平, 肖 夺. 干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005; 2(2): 1—5

14 张小平, 施 斌. 加筋纤维膨胀土的试验研究. 长江科学院院报, 2008; 25(4): 60—62

15 雷胜友,丁万涛. 加筋纤维抑制膨胀土膨胀性的试验. 岩土工程学报,2005;27(4): 482—485


# Experimental Study on the Expansive and Strength of Expansive Soil Stabilized with Lime


CHEN Lei[1,2], ZHANG Fu-hai[1,2], FAN Yun-zhong[3], LI Jiao-na[4], WU Rui[5]

(Geotechnical Engineering Institute of Hohai University[1],
Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics Embankment Engineering[2], Nanjing 210098, P. R. China;
Agricultural Committee of Zhenjiang City[3], Zhenjiang 212009, P. R. China; Changjiang Institute of Survey,
Planning, Design and Research, Changjiang Water Resources Commission[4], Wuhan 430010, P. R. China;
Central South Real Estate Group Ltd[5], Nantong 226000, P. R. China)



[**Abstract**] Engineering properties of the Lime-improved expansive soil as highway foundation filling soils were studied here with the engineering background of Ninghuai Highway in Huaian part. According to the 2% lime-improved natural expansive soil, swelling ratio and unconfined compressive test were carried out with different initial moisture content and the compacted ratio. The final results indicated that the value of line expansive ratio and expansive stress for lime improved soil both decreased greatly, which also suggested that both of the two values would keep decreasing with initial moisture content and curing age, but keep increasing with the compacted ratio. Moreover, the lime-improved expansive soil unconfined compressive strength, cohesion as well as the internal friction angle were all improved effectively. And so, it can be concluded that the lime-improved method for expansive soil is reasonable, and the new developed method is also helpful for road foundation design.



[**Key words**] expansive soil lime expansive property laboratory test foundation filling materials