

文章编号: 0451—0712(2006)07—0327—04

中图分类号: U414. 110. 3

文献标识码: B

# 渝湛高速公路石灰改良膨胀土室内试验研究

曾过生<sup>1</sup>, 周波<sup>2</sup>

(1. 广东冠粤路桥有限公司 广州市 510630; 2. 广州市南沙区建设局)

摘要: 结合渝湛高速公路(粤境段)膨胀土路基处治的工程实际,论述了膨胀土的工程特性和掺石灰改良膨胀土的固化机理,并进行了对比试验研究,分析了石灰对膨胀土物理力学性能的改善效果,论证了石灰改良膨胀土的工程可行性。

关键词: 膨胀土; 掺灰改良; 固化机理; 对比试验研究

随着近年来我国高速公路建设的快速发展,膨胀土灾害问题在高速公路建设中更为突出。国家主干道渝湛高速公路广东境内部分挖方段零星分布有膨胀土,其成因主要为沉积的北海组、湛江组粘土层和蚀变花岗岩风化后形成的残积土层。它们对所在路段的路基、路面、桩基、沿线的生态环保都有很不利的影响。由于膨胀土特殊的工程性质,再加上粤西地区雨水较多且部分地段地下水较丰富,所以渝湛高速公路(粤境段)沿线分布的膨胀土不能直接用于路基填筑。为保证路基的稳定,减少膨胀土路基对路面的破坏,必须对膨胀土进行改良处理。膨胀土问题的合理解决成为渝湛高速公路(粤境段)建设中的一个重要的技术问题。

## 1 膨胀土的工程特性

### 1.1 膨胀土的微结构

膨胀土的微结构是其粘土颗粒组合排列而形成的结构特征。膨胀土的粘土颗粒组合排列方式与膨胀土的含水量大小、组成的矿物成分及所处的地理

环境有关,其中影响最大的是膨胀土的含水量,含水量变化不仅会引起膨胀土体中的矿物发生物理—化学作用,使矿物微粒之间的结合力发生变化,从而引起土体结构的变化。

### 1.2 膨胀土的裂隙性

膨胀土产生裂隙的原因主要是由于膨胀土的胀缩特性,即吸水膨胀失水干缩,往复周期变化,导致膨胀土土体结构松散,形成许多不规则的裂隙。裂隙的发育又为膨胀土表层的进一步风化创造条件,同时裂隙又成为雨水进入土体的通道,含水量的波动变化使膨胀土反复胀缩,从而又导致裂隙的扩展。

### 1.3 膨胀土的超固结性

超固结性是膨胀土的重要特性之一,膨胀土在沉积过程中,在重力的作用下逐渐堆积,土体将随着堆积物的加厚产生固结压密。由于自然环境的变化和地质作用的复杂性,土在自然界的沉积作用并不一定都处于持续的堆积加载过程,而是常常因地质作用而发生卸载作用,致使土层的先期固结压力大于目前的上覆压力,从而使其具有超固结性。

收稿日期: 2006—05—10

—————

表4 沉降观测数据汇总

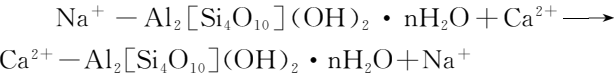
| 桩号      | 累计沉降量/mm              |                       |                       | 最后一次沉降速率/(mm/d)       |                       |                       | 桩号      | 累计沉降量/mm              |                       |                       | 最后一次沉降速率/(mm/d)       |                       |                       |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|         | <i>S</i> <sub>左</sub> | <i>S</i> <sub>中</sub> | <i>S</i> <sub>右</sub> | <i>V</i> <sub>左</sub> | <i>V</i> <sub>中</sub> | <i>V</i> <sub>右</sub> |         | <i>S</i> <sub>左</sub> | <i>S</i> <sub>中</sub> | <i>S</i> <sub>右</sub> | <i>V</i> <sub>左</sub> | <i>V</i> <sub>中</sub> | <i>V</i> <sub>右</sub> |
| K68+230 | 22                    | 21                    | 28                    | 0                     | 0                     | 0                     | K68+540 | 9                     | 6                     | 8                     | 0                     | 0                     | 0                     |
| K68+330 | 16                    | 17                    | 20                    | 0                     | 0                     | 0                     | K68+590 | 16                    | 14                    | 6                     | 0                     | 0                     | 0                     |
| K68+380 | 8                     | 12                    | 12                    | 0                     | 0                     | 0                     | K68+690 | 17                    | 27                    | 7                     | 0                     | 0                     | 0                     |
| K68+480 | 12                    | 23                    | 16                    | 0                     | 0                     | 0                     | K68+800 | 10                    | 9                     | 10                    | 0                     | 0                     | 0                     |

1.4 膨胀土的渗透性

膨胀土由于其特有的土体结构,其渗透性在很大程度上取决于孔隙中的连通性。这与土体中的气相形态直接相关,同时与土体孔隙中水蒸气、空气与热运动的关系也是相当密切的,但在常温条件可以忽略热效应和孔隙中蒸汽的冷聚和运动效应。

2 膨胀土掺石灰改良固化机理

石灰类固化剂对膨胀土的改良作用已早为人类所熟知,我国长城和古罗马一些道路都曾用石灰来稳定固化土。当石灰掺入到膨胀土中,土孔隙溶液中Ca<sup>2+</sup>浓度大幅度增加,可置换出蒙脱石等矿物中吸附的水合Na<sup>+</sup>,此反应可用下式表示:



这个过程可降低粘土颗粒的水膜层厚度,粘土颗粒凝聚作用增加,有利于粘土颗粒间组成较强的结构连结;石灰的溶解析出Ca(OH)<sub>2</sub>晶体,对石灰土强度的提高也有正面影响。石灰与土中微细粘粒中活性SiO<sub>2</sub>和活性Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>发生缓慢的火山灰反应,形成水化硅酸钙和水化铝酸钙,对粘土颗粒起到胶结作用,同时可减少具有吸水膨胀性能的粘土矿物含量。另外,CO<sub>2</sub>直接和Ca(OH)<sub>2</sub>之间的反应以及CO<sub>2</sub>在水溶液中和Ca<sup>2+</sup>的结合都有助于石灰土强度的形成。

石灰加入膨胀土中灰与土之间发生强烈的、复杂的物理化学作用,使土的工程性质发生固结性变化,这就是石灰效应。其中一系列物理化学作用包括离子交换作用、碳酸化作用、Ca(OH)<sub>2</sub>的结晶反应,灰结作用(火山灰反应)。可以认为,石灰加入土中后经过物理化学作用,石灰土发生团聚。随之有凝胶物生成,构成了凝胶团聚结构。随后棒状及纤维结晶体生成,并不断生长,构成了结晶体的网架结构。随着龄期的继续增长,胶凝结构层加厚,结晶体的网架加密,形成了胶凝—结晶的网状混合结构。离子交换反应使粘土胶体凝聚,土的湿坍性得到改善,使石灰获得初期的水稳性。碳酸化反应、火山灰反应和Ca(OH)<sub>2</sub>的结晶反应,对提高石灰土的强度与稳定性,降低土的膨胀性起决定性的作用。当它们的生成物处于胶凝状态时,石灰土结构属凝聚结构,随着结晶网架的生成,逐渐向结晶缩合结构转化,其强度不断增大,胀缩性下降。因此可以断定,掺生石灰后,经测定为改良后的非膨胀土已成为永久性的非膨胀土,在路基设计中可以将上述改良土作为非膨胀土来考虑。

3 膨胀土掺石灰改良的试验研究

3.1 试验方案的选择

针对渝湛高速沿线的膨胀土情况,根据膨胀土的工程特性和掺灰改良膨胀土的特点,通过对原状土和分别掺4%、6%、8%石灰的土样进行室内对比试验,分析确定合适的掺灰比。本试验选择K52+910处4-1层粘性土,土样的主要物理参数如表1。

表1 试验土样的主要物理参数

| 桩位       | 液限   | 缩限   | 自由膨胀率 | 最大干密度             | 最佳含水量 |
|----------|------|------|-------|-------------------|-------|
|          |      |      | %     | g/cm <sup>3</sup> | %     |
| K52+910处 | 70.0 | 35.0 | 65.5  | 1.63              | 18.7  |

所做的主要室内试验包括:标准击实试验、自由膨胀率试验、承载比(CBR)试验、50 kPa 膨胀率试验和收缩试验。

3.2 标准击实(见表2)

表2 不同掺灰比条件下最佳含水量和最大干密度

| 掺灰比/%                      | 0    | 2    | 4     | 6     | 8    |
|----------------------------|------|------|-------|-------|------|
| 最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.63 | 1.63 | 1.619 | 1.615 | 1.58 |
| 最佳含水量/%                    | 18.7 | 20   | 17.9  | 17.8  | 22   |

3.3 承载比CBR(California Bearing Ratio)

3.3.1 浸水CBR(见表3)

表3 浸水条件下CBR试验结果

| 掺灰量/% | 浸水CBR |      |      |      |      |
|-------|-------|------|------|------|------|
| 0     | 含水量/% | 18.7 | 20.7 | 22.7 | 24.7 |
|       | CBR/% | 0.8  | 0.93 | 1.1  | 1.0  |
| 4     | 含水量/% | 17.9 | 19.9 | 21.9 | 23.9 |
|       | CBR/% | 5.9  | 6.4  | 6.5  | 7.5  |
| 6     | 含水量/% | 17.8 | 19.8 | 21.8 | 23.8 |
|       | CBR/% | 6.6  | 6.3  | 7.0  | 8.1  |
| 8     | 含水量/% | 22.0 | 24.0 | 26.0 | 28.0 |
|       | CBR/% | 7.2  | 8.7  | 9.5  | 10.5 |

根据表3的试验成果分析可见:仅从CBR所表征的强度角度考虑,掺灰处理以后,其CBR值有明显的提高,掺灰为4%的时候,CBR的强度已经超过5%,已经能满足高速公路路用填料的指标要求。对于掺灰提高到6%到8%,其灰土的强度提高并不明显(浸水CBR和含水量的关系见图1)。如果膨胀性

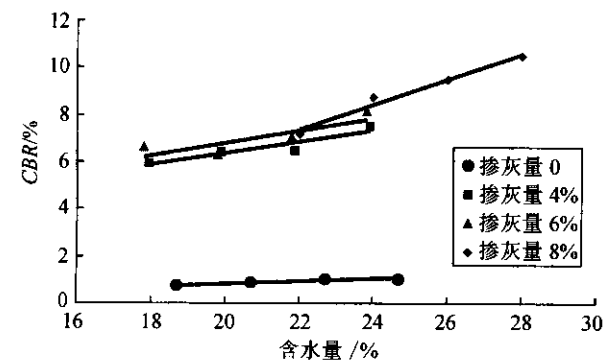


图 1 浸水 CBR 与含水量关系

指标等能满足高速公路填料的要求,可以采用较低的石灰掺入量。

3.3.2 不浸水 CBR(见表 4、图 2)

对比浸水 CBR 试验成果和不浸水 CBR 试验结果得:浸水的 CBR 和不浸水的 CBR 相差很大,说明浸水以后,路基填料的强度会发生较大的变化,这种填料的水稳性不好。因此,如利用该填料填筑的路堤,当发生路堤长时间浸水现象时,路堤强度会降低。

3.3.3 CBR 线膨胀率(见表 5、图 3)

| 掺灰量/% |       | 不浸水 CBR |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-------|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0     | 含水量/% | 18.9    | 18.6 | 20.6 | 20.7 | 22.3 | 22.8 | 24.5 | 22.5 |
|       | CBR/% | 30.8    | 32.5 | 32   | 29.9 | 27   | 25.1 | 17.5 | 25.8 |
| 4     | 含水量/% | 16.8    | 17.4 | 18.8 | 19.8 | 22.7 | 20.5 | 22.1 | 22.1 |
|       | CBR/% | 37.9    | 40   | 30.8 | 32.4 | 20.9 | 32.5 | 21.4 | 19.9 |
| 6     | 含水量/% | 13.4    | 14.3 | 14.7 | 16.7 | 19   | 19.7 | 21.6 | 21   |
|       | CBR/% | 62.2    | 49.4 | 54.7 | 38.9 | 38   | 31   | 26.8 | 29.8 |
| 8     | 含水量/% | 21.3    | 20.9 | 23.1 | 23.1 | 25.1 | 25.7 | 25.1 | 26.6 |
|       | CBR/% | 32.6    | 35.7 | 29.4 | 31.6 | 28.5 | 25.4 | 29.9 | 21   |

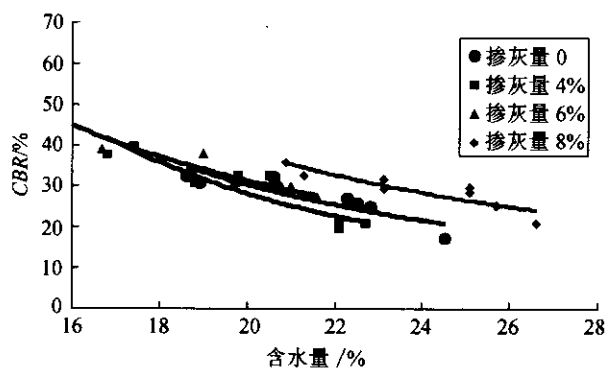


图 2 不浸水 CBR 与含水量关系

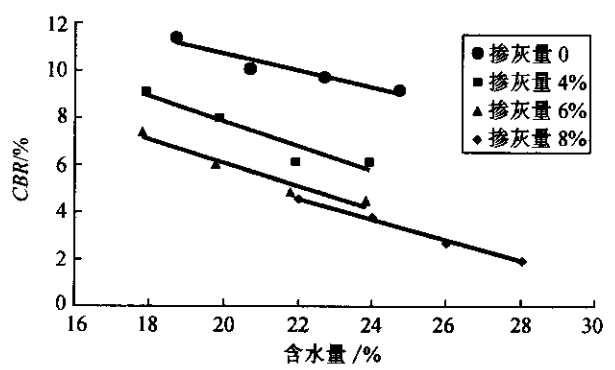


图 3 CBR 线膨胀率与含水量关系

| 表 5 浸水 CBR 线膨胀率试验结果汇总 |            |          |      |      |      |
|-----------------------|------------|----------|------|------|------|
| 掺灰量/%                 |            | CBR 线膨胀率 |      |      |      |
| 0                     | 含水量/%      | 18.7     | 20.7 | 22.7 | 24.7 |
|                       | CBR 线膨胀率/% | 11.4     | 10.1 | 9.7  | 9.2  |
| 4                     | 含水量/%      | 17.9     | 19.9 | 21.9 | 23.9 |
|                       | CBR 线膨胀率/% | 9.1      | 8.0  | 6.2  | 6.2  |
| 6                     | 含水量/%      | 17.8     | 19.8 | 21.8 | 23.8 |
|                       | CBR 线膨胀率/% | 7.4      | 6.0  | 4.8  | 4.5  |
| 8                     | 含水量/%      | 22.0     | 24.0 | 26.0 | 28.0 |
|                       | CBR 线膨胀率/% | 4.5      | 3.8  | 2.7  | 1.9  |

从图 3 试验结果可见:

(1)可以看出进行掺灰处理以后,其 CBR 线膨胀率的变化明显,随掺灰量的增加以及含水量的增加, CBR 线膨胀率可减小 20%~60%;

(2)掺灰量分别为 4%和 6%时,对土的膨胀性改变有明显的影 响。若采用 6%的掺灰量,在比最佳含水量加 4%的含水量作为碾压含水量进行控制的,其土的潜在膨胀势基本上已属非膨胀;

(3)当掺灰量为 8%时,最佳含水量时其土的潜在膨胀势基本上已属非膨胀,可进行碾压施工。

3.4 50 kPa 膨胀率(见表 6、图 4)

表 6 50 kPa 膨胀率试验结果汇总

| 掺灰量/% | 50kPa 膨胀率    |      |      |      |      |
|-------|--------------|------|------|------|------|
|       | 含水量/%        | 18.2 | 19.7 | 21.9 | 25.0 |
| 0     | 含水量/%        | 18.2 | 19.7 | 21.9 | 25.0 |
|       | 50 kPa 膨胀率/% | 2.8  | 2.3  | 1.5  | 1.0  |
| 4     | 含水量/%        | 17.5 | 17.4 | 20.9 | 21.8 |
|       | 50 kPa 膨胀率/% | 1.0  | 0.9  | 0.8  | 0.7  |
| 6     | 含水量/%        | 16.0 | 18.9 | 21.8 | 22.0 |
|       | 50 kPa 膨胀率/% | 1.2  | 0.8  | 0.5  | 0.6  |
| 8     | 含水量/%        | 20.0 | 22.0 | 23.6 | 25.6 |
|       | 50 kPa 膨胀率/% | 0.9  | 0.7  | 0.7  | 0.7  |

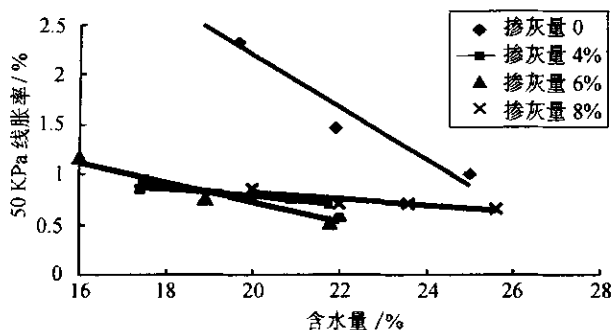


图 4 50 kPa 线膨胀率与含水量关系

根据图 4 试验得出的指标分析可见:4-1 层土在经过掺灰处理以后,其 50 kPa 膨胀量明显降低;当掺灰量大于 4% 后,50 kPa 膨胀量改变量不大。

### 3.5 收缩试验

将不同掺灰量的不浸水 CBR 的数据汇总,数据如表 7 所示。缩限、收缩系数与含水量的关系分别见图 5 和图 6。

表 7 缩限、收缩系数试验结果汇总

| 掺灰量 % | 收缩试验    |      |      |      |      |
|-------|---------|------|------|------|------|
|       | 初始含水量/% | 18.7 | 20.7 | 22.7 | 24.7 |
| 0     | 初始含水量/% | 18.7 | 20.7 | 22.7 | 24.7 |
|       | 缩限/%    | 2.1  | 2.3  | 2.6  | 2.9  |
|       | 收缩系数    | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 0.2  |
| 4     | 初始含水量/% | 17.9 | 19.9 | 21.9 | 23.9 |
|       | 缩限/%    | 10.5 | 12.5 | 13.7 | 15.1 |
|       | 收缩系数    | 0.0  | 0.1  | 0.1  | 0.2  |
| 6     | 初始含水量/% | 17.8 | 19.8 | 21.8 | 23.8 |
|       | 缩限/%    | 10.0 | 11.2 | 12.0 | 13.0 |
|       | 收缩系数    | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 0.1  |
| 8     | 初始含水量/% | 22.0 | 24.0 | 26.0 | 28.0 |
|       | 缩限/%    | 14.0 | 15.0 | 16.3 | 16.5 |
|       | 收缩系数    | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 0.2  |

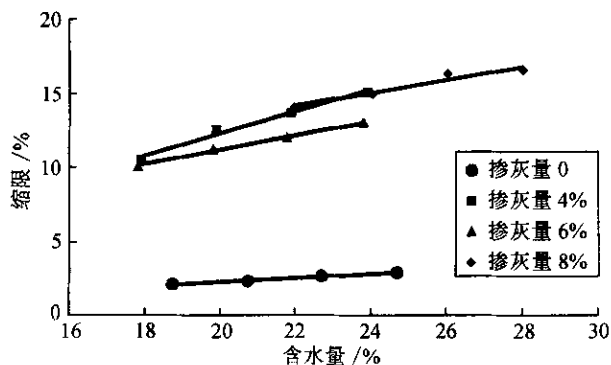


图 5 缩限与含水量关系

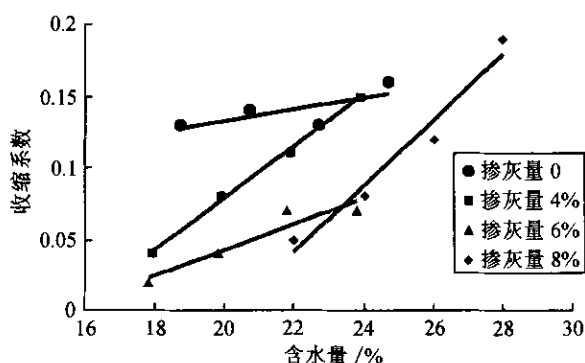


图 6 收缩系数与含水量关系

根据图 5 和图 6 试验得出的指标分析可见:

(1) 在 4% 和 6% 的掺灰量的情况下,对于收缩系数减小明显;

(2) 在 8% 的掺灰量的情况下,收缩系数反而变大,主要原因是其初始含水量相对于 6% 的含水量增加不少;

(3) 收缩系数总体随掺灰的增加而减小;

(4) 对于缩限来说,掺灰以后,灰剂量的增加影响不是很明显,特别是当采用大于 4% 的掺灰量时。主要的影响因素是起始含水量的影响;

(5) 无论何种灰剂量对于收缩系数和缩限都是随着含水量的增加而增大,基本成直线变化的规律。

### 3.6 胀缩总率(见表 8)

对表 8 试验结果进行分析可知:

(1) 该击实土的收缩试验对胀缩总率影响很小,胀缩总率可近似等于 50 kPa 膨胀率;

(2) 若掺灰为 6%,还需对碾压含水量进行控制,其土的潜在膨胀势基本上已属非膨胀;

(3) 若掺灰为 8%,可直接在最佳含水量时进行碾压,潜在膨胀势基本上已属非膨胀。

文章编号: 0451—0712(2006)07—0331—06

中图分类号: U416.03

文献标识码: A

# RLWT 与 APA 车辙试验加载模式比较分析

张俊标<sup>1</sup>, 徐科<sup>2</sup>, 张肖宁<sup>2</sup>

(1. 广东省高速公路有限公司 广州市 510010; 2. 华南理工大学道路工程研究所 广州市 510640)

**摘 要:** 旋转车辙仪(RLWT-Rotary Loaded Wheel Tester or Rutmeter)于 20 世纪 90 年代末开始在美国出现,因其轻便、易用,迅速受到关注。研究表明,RLWT 与沥青路面分析仪(APA)、国际车辙仪的相关性都不理想。本文利用数字图像处理技术对 RLWT 与 APA 车辙试验的加载模式进行了分析,通过量测 RLWT 试件、APA 试件与原样试件中粗集料颗粒长轴与 X 轴夹角的差异,得出结论:RLWT 与 APA 车辙试验的加载模式存在较大差异。

**关键词:** 旋转车辙仪(RLWT); 沥青路面分析仪(APA); 车辙试验; 数字图像处理

车辙是沥青路面的一种流动变形,是国际上最常见的沥青路面损坏现象。据国际资料统计,在沥青路面的维修养护中,有约 80% 是因为车辙变形。与开裂、水损坏相比,车辙的危害性直接威胁交通安全。同时,车辙损坏的维修最为困难,因为车辙不仅发生在表面,也经常危及中下面层,这就是世界各国在防治沥青路面的损坏中,历来把防治车辙放在第一位的原因<sup>[1]</sup>。

为防治车辙,需评价沥青混合料的抗车辙变形

能力,一般可使用国际车辙仪、沥青路面分析仪(APA)、汉堡车辙仪等。旋转车辙仪(RLWT-Rotary Loaded Wheel Tester or Rutmeter)是 20 世纪 90 年代末开始在美国出现的,因其轻便、易用,迅速受到关注。该车辙仪可以对直径 100 mm 及 150 mm 的混合料试件及芯样进行车辙试验评价。2002 年在美国沥青技术国家中心(NCAT)环道试验路中对其应用进行了研究<sup>[2]</sup>。试验过程中,RLWT

收稿日期:2006—05—10

表 8 胀缩总率结果汇总

| 掺灰量/% | 含水量和胀缩总率的变化 |      |      |      |      |
|-------|-------------|------|------|------|------|
|       | 含水量/%       | 18.2 | 19.7 | 21.9 | 25   |
| 0     | 胀缩总率/%      | 2.76 | 2.32 | 1.47 | 1.01 |
|       | 含水量/%       | 17.5 | 17.4 | 20.9 | 21.8 |
| 4     | 胀缩总率/%      | 0.96 | 0.86 | 0.76 | 0.7  |
|       | 含水量/%       | 16   | 18.9 | 21.8 | 22   |
| 6     | 胀缩总率/%      | 1.16 | 0.76 | 0.51 | 0.6  |
|       | 含水量/%       | 20   | 22   | 23.6 | 25.6 |
| 8     | 胀缩总率/%      | 0.86 | 0.71 | 0.71 | 0.66 |

## 5 结论

通过对石灰改良膨胀土进行了对比试验研究,表明掺加一定量的石灰后能明显改善膨胀土的胀缩性能,从而论证了石灰改良膨胀土的工程可行性,但在施工时要找出最适合的掺灰量和控制好含水量。

(1) 浸水 CBR 试验表明,掺灰为 4% 时, CBR 的强度已经能满足高速公路路用填料的指标要求。

(2) 不浸水 CBR 试验表明,浸水的 CBR 和不浸水的 CBR 相差很大,说明填料的水稳性不好。

(3) 掺灰处理以后,其 CBR 线膨胀率和 50 kPa 膨胀量变化明显,说明掺灰对膨胀土的膨胀性有明显的改善效果。

(4) 收缩试验表明,掺灰有利于收缩系数的减小。

(5) 胀缩总率试验表明,若掺灰为 6%,还需对碾压含水量进行控制,其土的潜在膨胀势基本上已属非膨胀。

## 参考文献:

[1] 陈新民,等.生石灰改良膨胀土的试验研究[J].工程勘察,1997,24(6).

[2] 孔令伟,郭爱国,赵颖文,陈善雄.荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[J].岩土工程学报,2004,(6).

[3] 彭波,原健安,等.固化剂加固土的研究[J].西安公路交通大学学报.1998,18(3).

[4] JTJ 051—93,公路土工试验规程[S].