

# 高速公路过湿粘土路基掺消石灰处理方法的研究

王 媛      严 蕴                      曹恒进      景 春

( 河海大学土木工程学院    南京    210098 )      ( 江苏省高速公路建设指挥部    南京    210001 )

**摘 要** 在总结分析现有过湿粘土路基处理方法的基础上 ,着重对掺消石灰法进行了研究 .通过室内试验 ,考察了掺消石灰对过湿粘土物理、力学性质的影响 ,进一步研究了不同掺灰率下过湿粘土的改良效果 ,揭示出改良效果并不是随着掺灰率的增加无限增长等特性 ,所得成果旨在为高速公路过湿粘土路段的现场施工提供指导依据 .

**关键词** 高速公路 ;路基 ;过湿粘土 ;石灰处理

**中图分类号** U412.366 ;U416.16

在我国的沿海城市 ,地势低洼地区以及一些气候湿润、地下水位较高的平原及沼泽地区 ,常常广泛分布有过湿粘土 .该土含水率高 ,塑性指数大 ,颗粒细 ,压缩性高 ,强度及渗透性低 ,工程特性很差 ;含水率远远大于最佳含水率 ,用作路基土很难达到压实标准 ,表面极易失水干缩 ,产生收缩变形 ,甚至形成干缩裂缝 ,一旦有雨水渗入 ,又会造成压实的土路堤强度下降而丧失稳定 .由于土地珍贵、土源紧张 ,在过湿粘土地区填筑路基往往只能取用当地土 ,因此就需采取有效的处理措施和施工对策 .

## 1 现有过湿粘土路基处理方法评价及问题的提出

过湿粘土处理的关键是如何快速有效地降低土的含水率 ,使其接近最佳含水率 .传统的处理方法是翻晒法 ,后来又发展到外掺剂法等 .

翻晒法表现上比较经济 ,但该法降低土料含水率的速度较慢 ,受天气影响也较大 ,如果遇到连续阴雨天气 ,往往会延误工期 ,反而增加建设费用 .此外 ,翻晒法的施工质量不易控制 ,容易造成局部土含水率偏高 ,碾压时产生局部翻浆和弹筑现象 .根据施工经验 ,该法只适用于天然稠度大于 0.9 的土 .对于天然稠度小于 0.9 的土 ,采用单一的翻晒法是不可行的 .

外掺剂法是通过掺合某种或几种其他材料来改良土的性质的方法 .该法在多雨潮湿地区施工方便 ,可使工期大幅度缩短 .一般采用的外掺剂有石灰、水泥、砂、粉煤灰等 .水泥的吸水能力较差 ,对于塑性较强( 塑性指数大于 20 )的过湿粘土来说 ,其效果较差 ,砂和粉煤灰在很多地区缺乏 ,难以选用 ;石灰是人们常常采用的一种外掺剂 .

工程中掺石灰法有掺消石灰和掺生石灰粉两种 .生石灰的主要成分是  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  .生石灰与水会发生作用 ,生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ,即消石灰( 也称熟石灰 ) .采用消石灰处理路基的方法从 50 年代就开始研究 ,60 年代起迅速发展 ,到 90 年代已得到了较广泛的使用 ,如沪宁高速公路江苏无锡段、江苏苏北里下河地区 204 国道新阜段等 .但近几年的研究表明 ,掺生石灰粉的效果优于掺消石灰的 ,因为生石灰粉与土的作用能力强 ,掺生石灰粉受气温和雨期影响较小 ,此外 ,生石灰粉撒布拌和易均匀 ,返工率小 ,环境污染也相对较小 ,而且能节省投资 .但生石灰粉法失效快 ,储运时间不能长 .因此 ,掺生石灰粉法虽然在国外应用较广 ,但在国内因生产和使用环节上尚存在一些障碍 ,生石灰粉的质量难以保证 ,储运条件也不易达到要求 ,所以目前掺生石灰粉法仍停留在研究阶段 ,还不能用于大面积施工 .因此 ,国内在过湿粘土路基的处理中常采用掺消石灰的方法 .

石灰改变土性质是通过石灰与土之间产生的各种物理化学反应来实现的 ,它对土的作用程度与掺灰率、

土灰的粉碎程度、拌合的均匀性、龄期、成型的温度、湿度等因素有关。特别是掺灰率的影响，人们往往会误认为掺灰率越高，处理效果越好。事实上，据国外文献报道<sup>[1]</sup>，掺灰率在一定的范围内，石灰主要起稳定作用，土的塑性减少，强度增加，超过这一范围，稳定作用反而降低。因此有必要对过湿粘土进行掺灰处理效果的试验，并比较不同掺灰率下土料的物理、力学性质指标，确定合适的掺灰率，以期对过湿土路段的现场施工提供指导依据。

2 掺消石灰对过湿粘土性质影响的试验研究

本文分别进行了不掺灰和掺灰 4% 土样的物理性质试验(包括液限、塑限、颗粒大小分析)、压实制备试样的力学性质试验(包括重型击实试验、收缩试验、压缩试验和无侧限抗压强度试验)，考察了掺灰对土样塑性、压实性、收缩性、压缩性和强度的影响。

2.1 灰样说明和试验方法

试验所用消石灰系由生石灰消解而成，生石灰等级为二级(要求石灰 CaO 和 MgO 的含量高于 70% 之上)。文中所指掺灰率是指消解前的生石灰质量与干土质量之比。

试验方法参照《公路土工试验规程》<sup>[2]</sup>进行。土的液限用 100 g 圆锥下沉 20 mm 测定；重型击实试验采用干土法；压缩试验的最大压力达到 1 600 kPa，用以确定与制备试样压实作用相当的前期固结压力，用于压缩变形计算；无侧限抗压强度试验试样为直径 3.91 cm、高 8 cm 的圆柱。根据多次压实土样试验比较，用这种圆柱试样测得的无侧限抗压强度比直径 5 cm、高 5 cm 的试样的无侧限抗压强度略小，其比值为 1:1.08。压缩、无侧限抗压强度试验均分非饱和试样与饱和试样两种，试样按击实试验最佳含水率和 94% 最大干密度制备；饱和试样是制备后抽气饱和的。为了比较试样掺石灰后不同龄期的力学性质变化，每种掺灰的试样分别做了龄期 7 d 和 28 d 的试验。

2.2 土样的物理性质

试验土样取自淮江高速公路江都路段，土料的物理性质见表 1。根据颗分试验结果，土料主要由粉粒和粘粒组成。由土样的天然含水率和界限含水率，计算得未掺灰土样的天然稠度  $w_c = (w_L - w) / (w_L - w_p) = 0.83$ ， $I_p = 23$ ，按《公路路基施工技术规范》<sup>[3]</sup>规定，该路段土料属于过湿粘土。

表 1 土料的物理性质  
Table 1 Physic parameters of the sample

| 土样情况  | 天然含水率<br>$w / \%$ | 液限<br>$w_L / \%$ | 塑限<br>$w_p / \%$ | 塑性指数<br>$I_p$ | 稠度<br>$W_c$ | 颗粒大小分布 / %       |                  |                   |                   |
|-------|-------------------|------------------|------------------|---------------|-------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|       |                   |                  |                  |               |             | 0.250 ~ 0.075 mm | 0.075 ~ 0.005 mm | < 5 $\mu\text{m}$ | < 2 $\mu\text{m}$ |
| 不掺灰   | 27.5              | 46.7             | 24.0             | 23            | 0.83        | 1                | 69               | 30                | 20                |
| 掺灰 4% |                   | 44.1             | 25.2             | 19            |             |                  |                  |                   |                   |

2.3 掺灰对过湿粘土塑性的影响

掺灰 4% 后土样的界限含水率和塑性指数见表 1。可见掺灰后土样的液限减小，塑限增加，塑性指数由 23 降为 19。因此，掺灰能使过湿粘土的塑性明显降低，有利于填土的粉碎和压实。

2.4 掺灰对过湿粘土最佳含水率和最大干密度的影响

根据不掺灰和掺灰 4% 土样的重型击实试验结果，掺灰土料的最大干密度由 1.92 g/cm<sup>3</sup> 降为 1.88 g/cm<sup>3</sup>，因此掺灰能使过湿粘土的最大干密度减小，这样有利于填土的压实。但掺灰后土料的最佳含水率基本不变，为 14%。

2.5 掺灰对过湿粘土收缩性质的影响

不掺灰和掺灰 4% 土样的收缩试验结果表明，掺灰后土样的线缩率和收缩系数显著减小，降低到原来的 1/4 至 1/3，线缩率由 3.8% 降为 0.8%，收缩系数由 0.290 降为 0.085。因此，掺石灰可明显降低路基的收缩变形。

2.6 掺灰对过湿粘土压缩性质的影响

不掺灰和掺灰 4% 饱和与非饱和土样的压缩系数、压缩模量、压缩指数及前期固结压力列于表 2 中。由表可见，掺灰后土样的压缩模量显著增加，增加到原来的 4~5 倍。因此，掺石灰可显著降低路基的压缩变形。

表2 压缩试验结果

Table 2 Results of compression test

| 土样情况          | 饱和土                              |                    |       |               | 非饱和土                             |                    |       |               |
|---------------|----------------------------------|--------------------|-------|---------------|----------------------------------|--------------------|-------|---------------|
|               | 压缩系数                             | 压缩模量               | 压缩指数  | 前期固结压力        | 压缩系数                             | 压缩模量               | 压缩指数  | 前期固结压力        |
|               | $a_{v1-2}$<br>/MPa <sup>-1</sup> | $E_{s1-2}$<br>/MPa | $C_c$ | $p_c$<br>/kPa | $a_{v1-2}$<br>/MPa <sup>-1</sup> | $E_{s1-2}$<br>/MPa | $C_c$ | $p_c$<br>/kPa |
| 不掺灰           | 0.210                            | 7.7                | 0.169 | 200           | 0.27                             | 5.7                | 0.176 | 190           |
| 掺灰 4% 龄期 7 d  | 0.040                            | 38.7               | 0.020 | 203           | 0.07                             | 21.6               | 0.042 | 220           |
| 掺灰 4% 龄期 28 d | 0.025                            | 61.0               | 0.017 | 222           | 0.04                             | 43.6               | 0.031 | 250           |

2.7 掺灰对过湿粘土强度的影响

不掺灰和掺灰 4% 饱和与非饱和土样的无侧限抗压强度试验结果列于表 3 中。可以看出,不掺灰时饱和土样的无侧限抗压强度远远小于非饱和土样的无侧限抗压强度;掺灰后 7 d 龄期的非饱和土样的无侧限抗压强度改变不大,但饱和土样的无侧限抗压强度增长很多(约为原来的 5 倍)超过了非饱和土样的无侧限抗压强度。因此,未掺灰时,压实土由非饱和变化到饱和,其强度丧失得很厉害,而掺灰后其水稳性则大大提高。

表3 无侧限抗压强度试验结果

Table 3 Results of unconfined compression strength test

| 土样情况          | 饱和土 $q_u$ | 非饱和土 $q_u$ |
|---------------|-----------|------------|
|               | /kPa      | /kPa       |
| 不掺灰           | 178       | 746        |
| 掺灰 4% 龄期 7 d  | 877       | 678        |
| 掺灰 4% 龄期 28 d | 1 301     | 1 126      |

并从表 2、表 3 可以看出,同一掺灰率下,随龄期的增加,压缩模量和无侧限抗压强度均能增加到 1 倍左右。

3 不同掺灰率下过湿粘土改良效果的试验研究

上述研究成果表明,掺石灰能明显改良过湿粘土的性质,但其改良效果随掺灰率的变化是值得研究的。根据不同掺灰率下土样的物理、力学性质试验结果可见,随着掺灰率的增加,塑性指数、最大干密度和收缩系数皆逐渐减小。当掺灰率由 0→4%→6%→8% 时,相应的塑性指数分别为 23→19→18→17,最大干密度分别为 1.92 g/cm<sup>3</sup>→1.88 g/cm<sup>3</sup>→1.85 g/cm<sup>3</sup>→1.85 g/cm<sup>3</sup>,收缩系数分别为 0.290→0.085→0.073→0.077。因此,掺灰改良过湿粘土的效果并不是随着掺灰率的增加无限增长,而是达到某一掺灰率后即呈变化不大的趋势。

图 1、图 2 绘出了土样压缩模量和无侧限抗压强度随掺灰率的变化曲线,可以看出两者也并非随着掺灰率的增加而一直保持递增的趋势,相反地达到某一值后,甚至有所减小。由各图可以看出,本试验土样在掺灰 4% 时,改善效果就已很显著,而且根据《公路路面基层施工技术规范》<sup>[4]</sup>规定“底基层石灰稳定土的 7 d 浸水无侧限抗压强度要求达到 0.8 MPa 以上”,掺灰 4% 的过湿粘土甚至可以用作底基层。

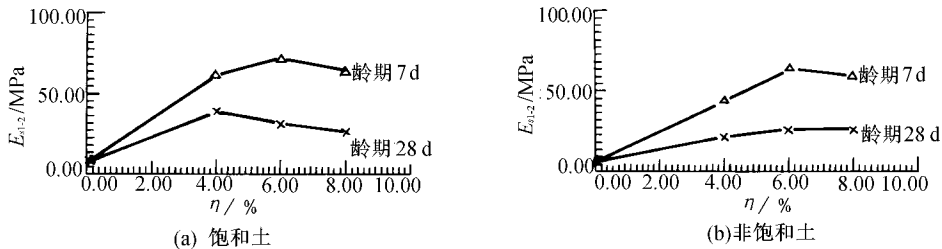


图1 土样压缩模量随掺灰率  $\eta$  变化曲线

Fig.1 Influence of the addition of lime on compression modulus

4 不同掺灰率下过湿粘土路堤压缩变形量和收缩变形量的估算

为进一步比较掺石灰的效果,有必要根据试验参数进行各种掺灰率下路堤压缩变形、收缩变形的估算。计算选用江都 L1 标段最大断面(堤高  $H$  为 7 m)。

4.1 压缩变形量的估算

计算只考虑由自重引起的路堤本身的压缩量,不包括地基的压缩量。计算方法采用能考虑应力历史的  $e-\lg p$  曲线法,路堤总压缩量按下式计算:

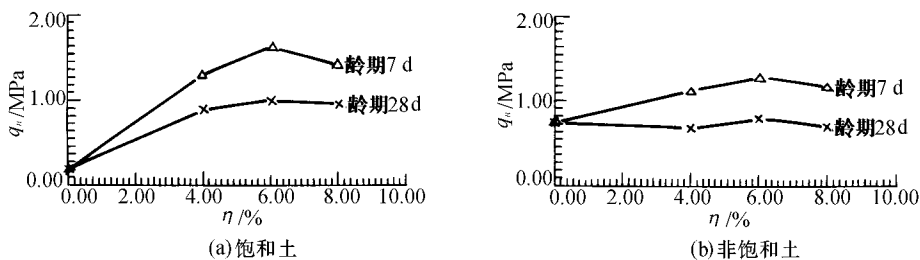


图 2 土样无侧限抗压强度随掺灰率  $\eta$  变化曲线

Fig.2 Influence of the addition of lime on unconfined compression strength

当  $p_1 < p_c$  时 
$$S_1 = \sum \frac{\Delta H}{1 + e_0} C_s \lg \frac{p_1}{p_0} \tag{1}$$

当  $p_1 > p_c$  时 
$$S_1 = \sum \frac{\Delta H}{1 + e_0} (C_s \lg \frac{p_c}{p_0} + C_c \lg \frac{p_1}{p_c}) \tag{2}$$

式中  $\Delta H$ ——各土层厚度,取 1 m;  $p_0$ ——各层初始应力,取 1 kPa;  $e_0$ ——初始孔隙比;  $p_1$ ——各层平均自重应力;  $C_c$ 、 $p_c$ ——压缩指数和前期固结压力,采用室内制备土样 28 d 龄期的试验结果;  $C_s$ ——回弹指数,取为压缩指数  $C_c$  的 1/10。

由于  $e$ - $\lg p$  曲线法不能考虑土体侧向变形的影响,故采用文献[5]建议的修正方法,将式(1)和式(2)的计算结果乘以一个修正系数  $M_{s2}$ (当堤高为 4~6 m 时,取 1.08~1.118)。本文取  $M_{s2}$  为 1.12。

由试验参数,计算出不掺灰时路堤在不饱和及饱和两种情况下的压缩量为 16 cm 左右,掺灰 4%~8% 后压缩量降低到 1~3 cm,因此掺石灰对降低路堤的压缩变形具有明显的效果。

#### 4.2 路堤收缩变形估算

路堤的收缩变形采用最大线缩率  $e_{sl}$  来计算,如此得到的收缩变形即是含水率由饱和含水率降低为收缩界限含水率的收缩变形。若堤高为  $H$ ,则收缩变形为

$$S_2 = e_{sl}H$$

根据不同掺灰率(0→4%→6%→8%)下室内制备土样 7 d 龄期的最大线缩率(分别为 3.8%→0.8%→0.75%→0.95%),计算得不掺灰时饱和土的收缩变形为 27 cm,掺灰后收缩变形降低到 5~7 cm,由此可见掺石灰对降低路堤的收缩变形具有明显的作用。

### 5 结 论

- a. 掺石灰能降低过湿粘土的塑性指数和最大干密度,有利于填土粉碎和压实。
- b. 掺石灰对过湿粘土提高强度、减小压缩变形和收缩变形均有明显的效果。
- c. 掺石灰能提高过湿粘土的水稳性,掺灰压实土浸水饱和前后的力学性质较稳定、变化小,而未掺灰压实土浸水饱和后强度下降,压缩和收缩变形增大很多,不能满足路堤的设计要求。
- d. 掺石灰改良过湿粘土的效果并不是随着掺灰率的增加无限增长,而是达到某一掺灰率后即呈变化不大的趋势,甚至有所减小。
- e. 对于本试验土料(稠度为 0.83),当掺灰 4% 时土样的各项指标即已得到很明显的改善。根据规范要求,现场施工掺灰率要比室内试验的掺灰率增加 1%,所以路堤的现场掺灰率应不小于 5%。

### 参 考 文 献

- 1 Bell F G. Stabilization and treatment of clay soils with lime. Ground Engineering, 1988, 21(1): 12~15
- 2 中华人民共和国交通部. JTJ051—93 公路土工试验规程. 北京:人民交通出版社, 1993. 1~225
- 3 中华人民共和国交通部. JTJ033—95 公路路基施工技术规范. 北京:人民交通出版社, 1996. 154~156
- 4 中华人民共和国交通部. JTJ034—93 公路路面基层施工技术规范. 北京:人民交通出版社, 1993. 30~33

5 吴钰,徐泽中,陈景扬.不同方法估算路基沉降量的分析研究.见 江苏沪宁高速公路股份有限公司,江苏省高速公路建设指挥部主编.沪宁高速公路江苏段建设论文集.北京:人民交通出版社,1997.97~105

Research on Treatment of Over-Wet Clay with Lime

Wang Yuan      Yan Yun

( College of Civil Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098 )

Cao Hengjin      Jing Chun

( Construction Headquarters of Highway in Jiangsu Province ,Nanjing 210001 )

**Abstract** On the basis of studies on the existing methods for over-wet clay ,treatment research on lime treatment method is emphasized. With the aid of laboratory experiments ,lime effects on physical and mechanical properties of over-wet clay are studied. Furthermore ,in consideration of the influences of different lime-soil ratios ,different degrees of improvement of the properties of over-wet clay are also discussed. Several important conclusions are drawn.

**Key words** highway ;roadbed ;over-wet clay ;lime treatment



·简讯·

全国水利系统贯彻堤防工程规范会议  
在无锡、仪征召开

由水利部国际合作与科技司、建设与管理司、国家防办、水利部水利水电规划设计总院共同主持的全国水利系统贯彻堤防工程规范会议于1998年11月18日~21日在江苏省无锡市、仪征市召开.主持单位的领导、建设部有关部门的领导、江苏省水利厅的领导与全国七大流域机构和各省、市、自治区水利(电)厅(局)及其设计单位的技术负责人以及高校、科研单位的代表共150多人出席了会议.无锡市、扬州市及仪征市的领导到会祝贺.

水利部张基尧副部长作了题为“发扬抗洪精神,搞好堤防建设”的书面讲话,要求加强贯标培训工作,指出从事灾后堤防建设的部门、单位和个人必须严格执行强制性的国家和行业标准,强调堤防工程必须严把设计关、施工质量关,实行项目法人责任制、招标投标制和工程建设监理制,要求认真贯彻朱总理的指示,积极推广应用土工合成材料这一新材料、新技术.

会上,10位专家分别作了关于国标《堤防工程设计规范》、水利行标《堤防工程施工规范》、《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》的宣传贯彻报告以及《堤防除险加固实用技术》的专题报告.代表们考察了锡山市锡澄运河、江阴市长江申港港堤土工模袋护岸工程和江阴市、靖江市、泰兴市及仪征市的长江堤防达标建设现场,参观了无锡海浪集团太极四分厂的高强机织土工布和仪征无纺布厂的聚酯纺粘长丝土工布的生产线.

国际合作与科技司董哲仁司长在会议总结中指出:应从流域生态重建的角度考虑建立防洪减灾体系,改变堤防粗放型管理方式,要加强堤防勘测及资料收集,按规范对堤防进行安全复核,严格控制工程质量,加强堤防科研工作,积极推广新材料、新机具、新工艺和新技术.

(束一鸣供稿)