

文章编号:1671-8879(2006)02-0034-04

石灰、粉煤灰改良膨胀土性质机理

惠会清¹, 胡同康¹, 王新东²

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 威海市开元公路工程有限公司, 山东 威海 264202)

摘 要:在分析石灰、粉煤灰混合料改良膨胀土化学机理的基础上,通过膨胀土及其改良土的性质与强度特性试验,得到了石灰、粉煤灰混合料在改良膨胀土中的最佳添加量;发现改良膨胀土的液限、塑限比膨胀土的大,膨胀土的应力-应变曲线呈应变硬化型,改良膨胀土的呈软化型,改良膨胀土的粘聚力比膨胀土的大,而内摩擦角反而小;还发现膨胀土的自由膨胀率随石灰量的增加而减小,无侧限抗压强度随石灰量的增加而增大。

关键词:道路工程;膨胀土;改良;石灰;粉煤灰;静力特性;试验对比

中图分类号:U412.221

文献标识码:A

Improved Mechanism of Expansive Soils by Lime and Fly-ash

HUI Hui-qing¹, HU Tong-kang¹, WANG Xin-dong²

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Weihai Kaiyuan Highway Engineering Co Ltd, Weihai 264202, Shandong, China)

Abstract: Based on the mechanism of improving expansive soil by lime and fly-ash, the physical properties of expansive soils and improved one are researched, the optimum quantity of adding lime and fly ash to the expansive soil is gained. It was found that the liquid limit and plastic limit of improved soil are all bigger than that of expansive soil. Through static tri-axial tests on the two kind of soils, it was found that the stress-strain curve of expansive soils is strain hardening, while the curve of improved expansive soils is strain softening. Improved expansive soils is brittle, the cohesion of improved soil is bigger than that of expansive soils, but the angle of internal friction of improved soil is smaller than that of expansive soils. With the increasing the quantity of lime, the unconfined compression strength of improved soil increases, and the free swell decreases. 3 tabs, 10 refs.

Key words: road engineering; expansive soils; improving; lime; flay-ash; static strength properties; test contrast

0 引 言

灰土和二灰土用于改善和增强某些工程材料的性能,灰土是由石灰与土混合而成,二灰土则是由石

灰、粉煤灰与土混合而成。在膨胀土里加入石灰和粉煤灰可以减小其胀缩性,同时石灰和粉煤灰具有就地取材、防渗效果好、造价低廉、便于推广等优点^[1-2]。膨胀土的特点是遇水后强度很低,失水后强

收稿日期:2005-01-12

基金项目:陕西省自然科学基金项目(97C22、2001C01);地质灾害防治与工程地质环境保护国家专业实验室开放基金项目(GE2005-03)

作者简介:惠会清(1968-),女,陕西渭南人,工程师。

度很高。许多公路、铁路修筑在膨胀土地区,膨胀土的危害问题每年都给国家造成巨大的损失^[3]。本文在石灰改良膨胀土和石灰、粉煤灰混合料改良膨胀土最佳添加量选择试验的基础上,进行了膨胀土和改良膨胀土的静三轴试验,探讨了膨胀土及其改良膨胀土在静荷载下的力学特性,揭示了区域性土的静力特性规律。

1 灰土、二灰土改良膨胀土机理

1.1 灰土改良膨胀土的机理

膨胀土中粘粒主要由亲水性矿物、氢氧化物和各种难溶盐类组成,含有较多的蒙脱石、伊利石、高岭石等,其特点为透水性差、吸水膨胀、失水收缩,还具有较大的胀缩变形能力,遇水导致强度降低,引起膨胀土地基变形,路基发生破坏。石灰改良膨胀土可以有效提高路基的抗剪强度,提高土体的团粒化性和可压实性,降低含水率,并降低其胀缩性,从而提高路基土的强度。

石灰是一种无机的胶结材料,既能在空气中硬化,也能在水中硬化。石灰的性质取决于活性 CaO 和 MgO 的含量,其含量越高,活性越大,胶结能力越强。石灰改良膨胀土的过程既有物理作用,又存在化学反应,两者共同作用促使土体性质发生根本的改变^[4-5]。

1.1.1 离子交换作用

在土壤中水的作用下,生石灰迅速消解,产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和少量 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,进一步离解出二价钙、镁和氢氧根离子。二价钙、镁离子很容易置换膨胀土颗粒所吸附的低价钾离子和钠离子等离子,二价钙、镁离子结合水膜较薄,使膨胀土分散性、坍塌性、亲水性和膨胀性降低,塑性指数下降并易稳定成型,形成早期强度。

1.1.2 碳酸化作用

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 在土中还会不断和空气中的 CO_2 反应,生成具有较高强度和水稳定性的 CaCO_3 和 MgCO_3 坚硬固体颗粒。由于 CaCO_3 对土体的胶结作用使得土体加固,形成石灰稳定土,此作用过程相当长,形成了石灰土的后期强度。

1.1.3 凝胶反应(火山灰作用)

在进行离子交换反应的后期,随龄期增长的膨胀土中的硅胶、铝胶将与石灰进一步反应形成含水 CaSiO_3 和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,这两种凝胶能够在水环境下发生硬化,在膨胀土的粘粒外围形成稳定的保护膜,具有很强的粘结力,形成网状结构,使灰土强度

增长并保持长期的稳定。同时保护膜还能起到隔离水分的作用,使膨胀土获得水稳定性。

1.1.4 结晶作用

石灰掺入膨胀土中后,溶解度很小,除了离子交换和碳酸化作用外,绝大部分以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶水的形式结晶,进一步提高了膨胀土的强度和水稳定性。

1.2 二灰土改良膨胀土的机理

粉煤灰是燃煤电厂排出的一种工业废料,属于富含粘土矿物的硅质材料,由多种氧化物组成。一般粉煤灰的化学成分主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO ,前 3 种成分的含量一般占 70% 以上。加入的粉煤灰膨胀土中也发生离子交换和团粒化作用、碳酸化作用、胶凝作用等。石灰和粉煤灰混合治理膨胀土,石灰和粉煤灰各自发挥成分的特长,使膨胀土的早期强度提高,后期强度稳步增长。

石灰、粉煤灰混合料改良的膨胀土,早期主要发生离子交换和团粒化作用,减薄了土粒吸附水膜的厚度,使土体塑性降低、最大干密度减小、最佳含水量增大,促使较大的土团粒进一步联合,土粒之间形成较强的联结。

石灰和膨胀土的胶凝反应进行较慢,早期强度不高,而粉煤灰含有大量活性 SiO_2 和 Al_2O_3 ,在石灰存在的情况下,水化生成胶凝性物质、胶结膨胀土颗粒,膨胀土颗粒形成网状连接,早期强度提高。

2 膨胀土及其改良土的性质试验

2.1 膨胀土的物理性质

试验用土取自南宁某工地,是由膨胀岩风化后形成的强膨胀土,颜色呈淡黄色、褐色,层里呈片状,成因类型为冲积、洪积母岩或物质来源是泥灰岩、粘土岩风化物,其基本指标为 $w_L = 48.03\%$, $w_p = 22.43\%$, $I_p = 25.6$,土粒容重 $\gamma_0 = 27.6 \text{ (kN} \cdot \text{m}^{-3})$,土的天然含水量 $w = 22.5\%$, $I_L = 0.0027$ 。由 $I_p > 17$ 知,此土属粘土; $I_L = 0.0027$, $0 < I_L < 0.5$,故知呈硬塑性状态。由击实试验得到最大干容重 $\gamma_{d\max} = 16.2 \text{ (kN} \cdot \text{m}^{-3})$,最佳含水量 $w_{op} = 23.2\%$ 。

2.2 石灰改良膨胀土试验

膨胀土和石灰过 0.5 mm 筛,将石灰添加到膨胀土内拌匀,石灰的添加量分别为干混合料的 6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%,制样时含水量控制在 30% 左右。制成的试样进行自由膨胀率、无侧限抗压强度及水稳定性试验。试验结果表明,膨胀土的自由膨胀率随石灰量的增加而减小,其无

侧限抗压强度随石灰量的增加而增大。根据改良后膨胀土的膨胀率减小规律及强度增加规律,石灰添加量为 10% 以上时,其变化趋势减小,从经济角度出发,选择石灰改良膨胀土的添加量为 10%。添加量为 10% 改良膨胀土的液限、塑限、最佳含水量等指标见表 1。

表 1 3 种土的物理指标对比

指标	膨胀土	石灰土	提高值/%	二灰土	提高值/%
塑限/%	22.43	40.30	80.0	37.70	68.0
液限/%	48.03	60.50	26.0	54.80	14.0
塑性指数	25.60	20.00	-22.0	17.10	-33.0
最佳含水量/%	23.00	23.20	0.9	24.50	6.5
最大干容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	16.20	15.00	—	15.00	—
土粒容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	27.60	27.03	—	26.31	—

2.3 石灰、粉煤灰混合材料改良膨胀土试验

在膨胀土中添加一定比例的粉煤灰,制成试样做强度及浸水试验,发现单独加入粉煤灰后虽然土的强度指标比素土有很大提高,但浸水后均呈散泥状,与重塑膨胀土无异,水稳定性很差;在抗压强度试验中,试样破坏状态呈脆裂状,裂隙从上到下贯穿整个试样。

采用粉煤灰、石灰混合料改良膨胀土,制成一系列不同添加比例的试样进行自由膨胀率、无侧限抗压强度及水稳定性试验。根据改良后膨胀土的膨胀率减小及强度增加的规律,从经济角度出发并参考相关资料^[6-7],确定混合料的干重比以石灰 6%、粉煤灰 9% 为宜,测定二灰土改良土的液限、塑限、最佳含水量等指标^[8]。

从表 1 可以看出,改良土的容重都小于土粒的容重,主要因为石灰、粉煤灰的比重小于膨胀土的比重。改良后石灰土的液限、塑限分别比素土提高了 26%、80%,二灰土分别提高了 14%、68%。单从液、塑限两项指标的提高值可以看出,改良后膨胀土的可塑状态界限含水量比素膨胀土大,说明改良后膨胀土的水稳定性好。通过对比可以看出,膨胀土、石灰土、二灰土的最佳含水量分别为 23.00%、23.20%、24.50%,从而说明膨胀土改良前后的最佳含水量变化不大。

2.4 静三轴试验

根据试验路段的要求,压实系数 λ_c 分别取 0.95 和 0.90,各种土均采用最佳含水量配土,试样的尺

寸为 $\Phi 6.18 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}$,分层击实而成。围压取 0~100 kPa,按一定固结比 K_c 做不等向固结不排水剪切试验^[9-10]。

3 试验结果分析

分别做了两种压实系数下的静三轴试验,每个围压下的 2 个试验一直做到结果相近为止。

从所做的应力-应变曲线发现,对于强膨胀土试样,压实系数 $\lambda_c=0.95$ 时,随着轴向应变的增大,主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 在增加,呈非线性关系变化,整个曲线没有应力峰值,曲线呈应变硬化型。对压实系数 $\lambda_c=0.90$ 的膨胀土试样,其 $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_L$ 曲线特性与 $\lambda_c=0.95$ 时的相似。

对于石灰土,当固结比 $K_c=1.2, \lambda_c=0.9$ 时,随着围压的增大,其 $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_L$ 关系曲线的形状逐渐由软化型过渡到弱软化型,每个峰值点对应的轴向应变 ϵ_L 随着围压的增大而增大,从而说明在低围压下石灰土表现出明显脆性。

对于石灰土,当 $\lambda_c=0.95$ 时,其应力-应变曲线的峰值点比 $\lambda_c=0.90$ 时出现的早,说明压实系数越大,石灰土越脆。

二灰土的应力-应变曲线皆为软化型,从试验结果看,其规律性同石灰土。

从表 2 可以看出,改良土的强度皆比膨胀土的大。对于石灰土,在围压 σ_3 为 60 kPa, $\lambda_c=0.9, K_c=1.2$ 时,强度提高 72.7%;在围压为 40 kPa, $\lambda_c=0.95, K_c=1.2$ 时,强度提高 75.4%。对于二灰土, $\lambda_c=0.95, K_c=1.2$ 时,在围压分别为 20 kPa、60 kPa 时,强度分别提高 48.8% 和 36.9%; $K_c=1.0$ 时,对于围压为 60 kPa 时,其强度提高了 28.2%,从而说明,固结比不同,强度提高的百分比也不同。

表 2 不同围压下改良膨胀土的破坏应力和破坏应变

土 种类	$\sigma_3 /$ kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f /$ kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 提 高的比率/%	$\epsilon_f /$ %	试样及试验条件	
石 灰 土	60	400	72.7	2.05	$\lambda_c=0.90$	$K_c=1.2$
	40	520	75.4	1.48	$\lambda_c=0.95$	$K_c=1.2$
二 灰 土	20	380	48.8	1.48	$\lambda_c=0.95$	$K_c=1.2$
	60	470	36.9	1.64	$\lambda_c=0.95$	$K_c=1.2$
	60	440	28.2	1.36	$\lambda_c=0.95$	$K_c=1.0$

从表 3 可以看出,改良土的粘聚力比膨胀土大很多,但内摩擦角的改变,仅仅只有在 $\lambda_c=0.90$ 条件下,石灰土的内摩擦角比膨胀土的大,其余几种情况下的内摩擦角都比膨胀土的小。由此可见,膨胀

表 3 膨胀土及其改良土的强度指标对比

指标	石灰土 $K_c=1.2$		二灰土 $K_c=1.2$	二灰土 $K_c=1.0$	膨胀土 $K_c=1.2$	
	$\lambda_c=0.90$	$\lambda_c=0.95$	$\lambda_c=0.95$	$\lambda_c=0.95$	$\lambda_c=0.90$	$\lambda_c=0.95$
粘聚力 c/kPa	105	130	135	110	66	64
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	24.50	28.50	22.00	27.00	20.16	31.61
粘聚力增量 $\Delta c/\text{kPa}$	39	66	71	46	—	—
内摩擦角增量 $\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	4.34	-3.11	-9.61	-4.61	—	—

土改良后,只是粘聚力显著提高。

4 结 语

(1)根据改良后膨胀土的膨胀率减小及强度增加的规律,石灰改良膨胀土的添加量应为 10%。在粉煤灰、石灰混合料改良膨胀土中,混合料的干重比应为石灰 6%、粉煤灰 9%。

(2)改良后石灰土、二灰土的液限、塑限皆比膨胀土的大。

(3)改良膨胀土的吸水膨胀性明显减小。

(4)膨胀土的应力-应变曲线呈应变硬化型,改良膨胀土的应力-应变曲线呈应变软化型,相比较而言,改良膨胀土较多表现为脆性。

(5)改良试验结果表明,改良膨胀土的粘聚力比膨胀土的大,而内摩擦角反而比膨胀土的小;膨胀土的自由膨胀率随石灰量的增加而减小,其无侧限抗压强度随石灰量的增加而增大。

(6)与其他改良膨胀土的方法相比,石灰和粉煤灰混合添加法是一种改良效果好、成本低、原料易得的方法。

参考文献:

References:

[1] 韩会增. 南昆线膨胀岩(土)工程地质性质及土质改良[R]. 成都:西南交通大学,1991.
HAN Hui-zeng. Geotechnical Properties of Expansive Rock and Improved Soil[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,1991.

[2] 陈克望. 膨胀土及其改良土的动力特性试验研究[D]. 成都:西南交通大学,1993.
CHENG Ke-wang. Experimental Investigation on the Dynamic Properties of Expansive Soil and Improved

One[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University , 1993.

[3] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
LIU Te-hong. The Expansive Soil in Engineering Construction[M]. Beijing: China Building Press, 1997.

[4] SDS01-79. 土工试验规程[S].
SDS01-79. Rules of Soil Test[S].

[5] 雷胜友,李克钊. 膨胀土的动力特性研究[J]. 成都科技大学学报,1995, 84(3):20-24.
LEI Sheng-you, LI Ke-chuan. Experimental Investigation on the Dynamic Properties of Expansive Soil [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995, 84(3):20-24.

[6] 郭志勇. 膨胀土改性试验及动力特性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003, 23(4):18-21.
GUO Zhi-yong. Experimental and Dynamic Properties of Improved Expansive Soil[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003,23(4): 18-21.

[7] 杨和平,郑健龙. 云南楚大公路膨胀土的土性试验研究[J]. 中国公路学报,2002,15(1):10-14.
YANG He-ping, ZHENG Jian-long. Experimental Research on Properties of Expansive Soil on Chu-da Expressway in Yunnan[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002,15(1):10-14.

[8] 汪双杰,黄晓明,倪一鸿. 改性膨胀土路基受水特性[J]. 交通运输工程学报,2004,4(1):15-20.
WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming, NI Yi-hong. Infiltrating Properties of Modified Swelling Soil Subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2004,4(1):15-20.

[9] 郑木莲,王秉纲,胡长顺. 多孔混凝土疲劳性能的研究[J]. 中国公路学报,2004,17(1):7-11.
ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Study of Fatigue Property of Porous Concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004,17(1):7-11.

[10] 李炜光,申爱琴,张超,等. 粉煤灰活性测试方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):16-19.
LI Wei-guang, SHEN Ai-qin, ZHANG Chao, et al. Measuring of Fly-ash's Activity Peculiarity[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(5):16-19.