

红粘土无侧限抗压强度试验影响因素研究

黄 辉^{1,2}

(1.中南大学 土木建筑学院,湖南 长沙 410075; 2.湖南省永州市交通局,湖南 永州 425006)

摘要: 为了研究生石灰改良红粘土的无侧限抗压强度大小以及其影响因素,结合工程实际,从石灰掺入量、压实度、养护条件、试件含水量和粒径大小5个方面,研究了各因素对无侧限抗压强度的影响,并采用无重复双因素方差分析法对它们进行了显著性分析。分析结果表明:压实度、养护条件对石灰改良红粘土的无侧限抗压强度影响最大,而石灰掺入量、粒径、含水量次之。因此,要想使红粘土路基强度达到填筑要求,在满足最佳掺灰量的情况下,一方面要严格控制路基压实度,另一方面要注意路基的养护以及填料的粒径和含水量的控制。

关键词: 红粘土; 无侧限抗压强度; 压实度; 掺灰量; 无重复双因素方差分析

中图分类号: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)04-0022-05

Study on Influencing Factors of Unconfined Compressive Strength of Red Clay

Huang Hui^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Yongzhou Municipal Communications Bureau, Hunan Province, Yongzhou Hunan 425006, China)

Abstract: In order to study the unconfined compressive strength of lime-improved red clay and its influencing factors, combining with the engineering practice, investigated the effective aspects of lime content, compactness, curing conditions, water content and particle size in unconfined compressive strength tests. Meanwhile analysed the factors' prominent property by the method of nonrepeative double factors variance analysis. The analysis results showed that compactness and curing conditions were the main influence factors of unconfined compressive strength, and lime content, water content and particle size were the secondary influence factors. To meet the red clay subgrade filling requirements, on the condition of best lime content the compactness of subgrade should be controlled strictly, and the particle size, curing of the subgrade and water content should also be controlled.

Keywords: red clay; unconfined compressive strength; compactness; nonrepeative double factors variance analysis

0 引言

红粘土是碳酸盐类岩石在湿润气候条件下经红土化作用后所形成的残坡积类型的粘性土或粉土,因呈褐红色或棕红色而得名。湖南省碳酸盐类岩石分布广泛,约5.8万km²,占全省总面积的27.4%。红粘土的

胀缩性接近膨胀土,但按照相关规范,将其划分为非膨胀土,工程设计施工中如果忽略这一点,可能会对构筑物的工程质量和安全埋下隐患。此外,红粘土还具有大孔隙、高含水量、高液限、高塑性、低密实度、低压缩性等特点,这使得其较难满足工程中路基填筑

收稿日期: 2010-05-06

通信作者: 黄 辉(1979-),男,湖南双牌人,湖南省永州市交通局工程师,中南大学工程硕士生,主要从事公路桥梁建设与管理方面的工作与研究, E-mail: hh.6981@163.com

的要求^[1-2]。解决这一问题的途径之一是对不合格填料进行改良,从而使其达到所要求的质量标准。

无侧限抗压强度是反映改良土物理力学特性的一个重要指标,由其确定红粘土改良土的最佳掺合料及掺合料的最佳配合比,并分析其影响因素,对于指导路基的设计与施工相当重要。本文拟对红粘土经生石灰改良后的无侧限抗压强度进行试验分析。

1 红粘土的物理特性试验背景

湖南境内的红粘土矿物组成以石英(SiO_2)和高岭石($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\cdot(\text{OH})_8$)为主,石英+高岭石的质量分数大于80%,大部分矿物在酸性环境中形成,母矿成分对其物理力学性质影响较大;红粘土中 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量分数一般为70%~76%。红粘土中石英的化学性质稳定,具有较强的抗水性和抗风化能力,亲水性弱;红粘土中的高岭石含量较少,故对土质的影响不大。这种化学特性是造成红粘土具有高液限、高塑性、难失水的重要原因。

本研究中,室内试验所取红粘土土样的化学成份如表1所示。

表1 试验土样化学成份

Table 1 Chemical component of the red clay sample

成份	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
质量分数/%	41.7	29.3	12.6	0.64	0.23	0.13	1.63

根据室内试验测试结果,所取红粘土的主要物理性质指标见表2。表2中, W 为土样中水的质量分数, e 为土样的孔隙比, S_r 为土样的饱和度, ρ_d 为土样的干密度, W_L 为土样的液限, W_p 为土样的塑限, I_p 为土样的塑性指数。

表2 红粘土主要物理性质指标

Table 2 Basic mechanical property indexes of the red clay

粘粒质量分数	W	e	S_r	ρ_d	W_L	W_p	I_p
/%	/%		/%	$/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	/%	/%	/%
89.7	34.6	1.04	88.6	1.35	68.7	37.2	32.4

从表2中的数据可知:

- 1) 红粘土具有土质均匀、细腻、粘性强的特征,其粘粒在土样中的质量分数相当高,平均达89.7%;
- 2) 土样中的天然含水量一般接近塑限含水量;
- 3) 土样的孔隙比为1左右;
- 4) 土样的饱和度较大,平均为88.6%;
- 5) 土样的最大干密度越接近灰岩时越小,干密度变化较大,介于 $0.88 \sim 1.80 \text{ g/cm}^3$;
- 6) 土样的液限、塑限、塑性指数均较高,具有高

塑性、高水性和低密度的特性,渗透系数较小,一般为典型的不透水层。

2 无侧限抗压强度试验影响因素分析

影响石灰改良土强度的因素有:颗粒级配、粒径大小、石灰掺入量、压实度、龄期、养护条件、与水拌和延迟制样时间、配制试样时含水量^[3-6]等,若全面考虑这些影响因素,则需要花费大量的人力物力。综合考虑试验条件的限制和实际工程需要,本文选取石灰掺入量、压实度、养护条件(包括龄期)、粒径大小、配制试样时含水量作为影响要素进行试验分析。

2.1 石灰掺入量的影响

图1为红粘土经生石灰改良后土的无侧限抗压强度与生石灰掺入量的关系图。

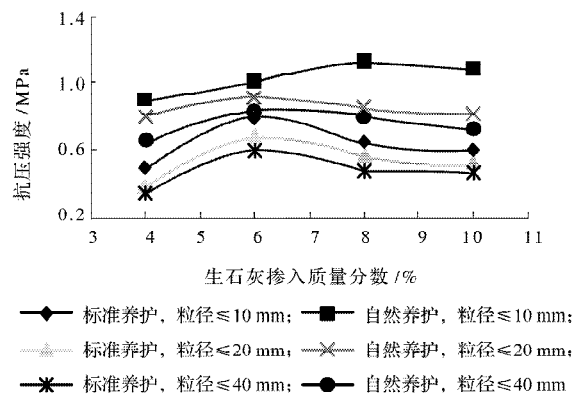


图1 红粘土改良土无侧限抗压强度与生石灰掺入量的关系

Fig. 1 The relationship between unconfined compressive strength and lime content of the improved red clay

由图1可见,刚开始时,红粘土生石灰改良土的无侧限抗压强度随着生石灰掺入质量分数的增加而变大,但当石灰掺入质量分数达6%后,无侧限抗压强度反而随着石灰掺入质量分数的增加而减小,即生石灰掺入质量分数存在最佳值——6%,此时无侧限抗压强度存在最大值。出现这种现象的主要原因是:生石灰的含量较低时,石灰主要起稳定作用,它会使得土的塑性、膨胀性降低,使土样初步具有较好的水稳定性,并使土样的密实度和强度得到增强,随着生石灰掺入量的增加,土样的强度和稳定性均得到提高;但生石灰的含量超过一定量(即最佳质量分数)以后,过多的石灰将沉积在土样孔隙中而不参加反应,导致石灰土强度降低。

2.2 压实度的影响

图2为红粘土经化学改良后,并经标准养护或自

然养护条件养护一段时间后,改良土的无侧限抗压强度与压实度的关系图。

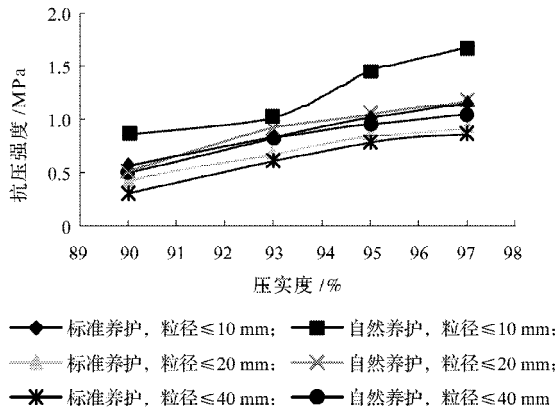


图2 红粘土化学改良土无侧限抗压强度与压实度的关系

Fig. 2 The relationship between unconfined compressive strength and compactness of the improved red clay

由图2可见,在标准养护或自然养护条件下,红粘土石灰改良土试件的无侧限抗压强度都随着压实度的提高而增大。当生石灰改良土的压实度由92%提高到97%时,其无侧限抗压强度会增加90%以上。这说明压实度对红粘土化学改良土的无侧限抗压强度的影响非常大。

2.3 养护条件的影响

图3为在标准养护或自然养护条件下,过10 mm筛的红粘土+6%生石灰试样的无侧限抗压强度与压实度关系曲线。且在自然养护条件下,试样试件表面未发现破损、开裂现象。

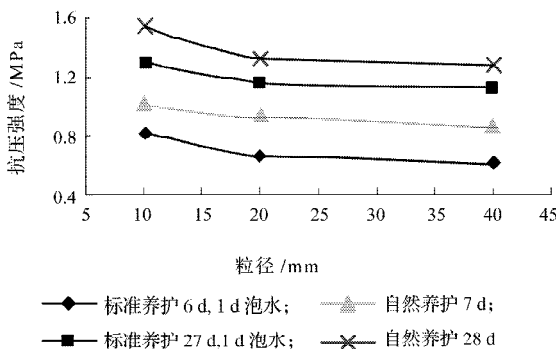


图3 不同养护条件下改良土无侧限抗压强度与粒径的关系

Fig. 3 The relationship between unconfined compressive strength and partial size of the improved red clay under different curing conditions

由图3可看出,红粘土生石灰改良土的无侧限抗压强度随着龄期的增长而增大,各种不同养护条件下,试件的无侧限抗压强度随粒径的变化曲线基本平行。因此,红粘土化学改良土在实际施工过程中,必

须注意对其进行养护,确保其强度、稳定性能够得到有效增长;另外,如何合理地确定改良土填筑完毕后对其进行质量检测的时间和时机,还有待通过现场填筑试验研究来进一步解决。

2.4 制样含水量的影响

红粘土+6%生石灰改良土试件(在压实度为93%和不同含水量下制样)的无侧限抗压强度值与配制试样的含水量的关系如图4所示。

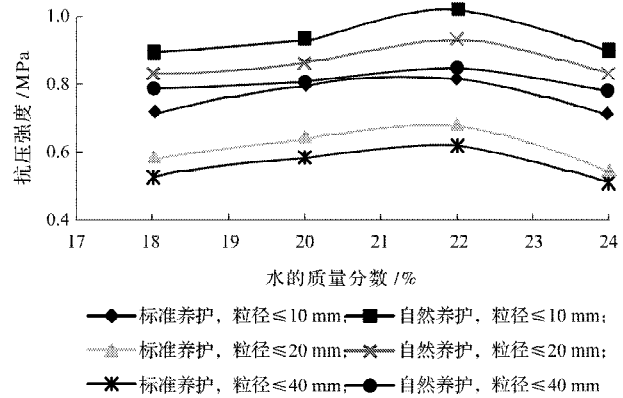


图4 改良土无侧限抗压强度与不同配制含水量关系
Fig. 4 The relationship between unconfined compressive strength and water content of the improved red clay

由图4可看出,试件的无侧限抗压强度随配制试样中含水量的变化曲线近似为抛物线,生石灰改良土的含水量略大于最优含水量——2%,存在最大值。其基本原因在于土样中的自由水除充满颗粒间的孔隙外,生石灰与土粒的水解和水化作用需要一定量的水分。含水量较低时,水解和水化作用不充分,使得无侧限抗压强度较低。当含水量过高时,由于多余水分的存在,影响了无侧限抗压强度和水稳性,致使土样的强度和水稳性降低。

2.5 粒径的影响

为了获得技术经济合理的红粘土化学改良土的施工方案,笔者取试验段附近料场的红粘土化学改良土进行了大量无侧限抗压强度试验。为了反映材料的颗粒级配对红粘土化学改良土的强度的影响,分别对颗粒粒径 $\Phi \geq 40$ mm, $\Phi \geq 20$ mm, $\Phi \geq 10$ mm土样进行改良配比试验。其中所有试件均在压实度93%、最优含水量 w_{opt} 附近的条件下制样,并标准养护7d(最后1d泡水)。不同掺量下的红粘土生石灰改良土试件的饱和和无侧限抗压强度统计如表3所示。

由表3可发现,同等生石灰掺量下,制作试件时所选取的土样颗粒粒径越大,试件直径越大,相应强度值越小,变异越大,即意味着制生石灰改良土有最佳掺入量,在该掺入量下,土样的强度最强,而变异性最小,其它情况下,无论是增加还是减少掺入量,

其对应的强度均比它小，变异性比它大。这说明在现场实际施工时，红粘土化学改良土取样时所选择的土样颗粒粒径越大，改良土变异性越大。进一步分析还发现，实际施工中对大粒径控制是非常必要的，结合施工工艺简易程度与经济效益，最大粒径以不超过 20 mm 为宜。同等生石灰掺量下，粒径越大，改良土变异性增大；质量分数为 6% 的生石灰掺量下改良土性能最好，它能满足 $P_u > 0.5$ MPa 的要求。

表 3 红粘土生石灰改良土的无侧限抗压强度

Table 3 The unconfined compressive strength of lime-improved red clay

要 求	参 数						
	掺料比 /%	试验组数 / 个	极大值 /MPa	极小值 /MPa	平均值 /MPa	变异系数	变异性
试件直径 $\Phi 50$ mm	4	24	0.63	0.34	0.49	0.31	大
粒径限值 $\Phi \geq 10$ mm	6	24	0.87	0.77	0.82	0.14	小
	8	24	0.72	0.56	0.63	0.26	大
	10	24	0.77	0.47	0.62	0.32	大
试件直径 $\Phi 100$ mm	4	16	0.58	0.32	0.42	0.36	大
粒径限值 $\Phi \geq 20$ mm	6	16	0.82	0.54	0.68	0.37	大
	8	16	0.63	0.48	0.56	0.17	小
	10	16	0.61	0.48	0.54	0.24	大
试件直径 $\Phi 150$ mm	4	12	0.48	0.26	0.38	0.29	大
粒径限值 $\Phi \geq 40$ mm	6	12	0.71	0.56	0.62	0.20	大
	8	12	0.68	0.39	0.50	0.24	大
	10	12	0.66	0.37	0.48	0.28	大

表 4 无重复双因素方差分析结果综合表

Table 4 The results of nonrepeative double factors variance analysis

试验条件	差异源	平方和 (S_s)	自由度 (d_f)	均方 (M_s)	F	P_{value}	F_{crit}
93 % 压实度 最优含水量	掺入量	0.115 092	3	0.038 364	79.832 37	3.16E-05	4.757 063
	粒 径	0.047 717	2	0.023 858	49.647 4	0.000 185	5.143 253
	误 差	0.002 883	6	0.000 481			
	总 计	0.165 692	11				
6 % 生石灰 最优含水量	压实度	0.865 5	3	0.288 5	376.304 3	3.23E-07	4.757 063
	粒 径	0.101 267	2	0.050 633	66.043 48	8.2E-05	5.143 253
	误 差	0.004 6	6	0.000 767			
	总 计	0.971 367	11				
6 % 生石灰 93 % 压实度	含水量	0.027 158	3	0.009 053	88.081 08	2.37E-05	4.757 063
	粒 径	0.085 717	2	0.042 858	417	3.64E-07	5.143 253
	误 差	0.000 617	6	0.000 103			
	总 计	0.113 492	11				
6 % 生石灰 93 % 压实度	养护条件	0.817 625	3	0.272 542	289.424 8	7.05E-07	4.757 063
	粒 径	0.091 217	2	0.045 608	48.433 63	0.000 198	5.143 253
	误 差	0.005 65	6	0.000 942			
	总 计	0.914 492	11				

3 结论

通过对生石灰改良的红粘土进行无侧限抗压强度

2.6 无重复双因素方差分析

在实际应用中，一个试验结果（试验指标）往往受多个因素的影响。不仅这些因素会影响试验结果，而且这些因素的不同水平的搭配也会影响试验结果。统计学上把多因素不同水平搭配对试验指标的影响称为交互作用，在多因素的方差分析中，把交互作用当成一个新因素来处理。

假设某个试验中，有 2 个可控因素在变化，因素 A 有 a 个水平，记作 A_1, A_2, \dots, A_a ；因素 B 有 b 个水平，记作 B_1, B_2, \dots, B_b ，在它们的每种搭配 (A_i, B_j) 下的总体 ξ_{ij} 服从正态分布 $N(\mu_{ij}, \sigma^2)$ ($i=1,2,\dots,a; j=1,2,\dots,b$)，则 A 与 B 的不同水平组合 $A_i B_j$ 共有 ab 个，每个水平组合称为一个处理，每个处理只作一次试验，得 ab 个观测值 X_{ij} ，可得双因素无重复实验表^[7]。

下面结合具体的工程试验，分析上述因素对红粘土的无侧限抗压强度试验结果的影响。无重复双因素方差分析综合结果见表 4。

由方差分析结果可知，文中所取因素的方差分析 F 值均远大于 F_{crit} 值，而且该 F 值对应的显著性水平均几近于 0，所以上述所选因素对无侧限抗压强度值有极显著的影响，且压实度、养护条件影响最大，石灰掺入量、粒径、含水量次之。

试验分析和无重复双因素方差分析，不难总结出以下结论：

- 1) 压实度和养护条件对红粘土化学改良土强度的

影响非常大,若要确保路基强度,则在红粘土化学改良土的实际施工过程中,必须控制好路基压实度,并注意对其进行养护,以确保其强度、稳定性能够得到有效的增长;

2) 掺加生石灰能使红粘土的无侧限抗压强度有所提高,当生石灰掺入质量分数为6%时,无侧限抗压强度出现最大值,在施工时具体的生石灰掺入量应从安全和经济的角度出发,根据试验所得最优配合比设计来确定;

3) 当试样含水量超过最优含水量(2%)时,土样的无侧限抗压强度达最大值,因此在施工过程中应该注意对路基含水量的控制;

4) 现场实际施工时,对红粘土化学改良土最大粒径进行控制是非常必要的,结合施工工艺简易程度与经济效益,最大粒径以不超过20 mm为宜。

参考文献:

- [1] 廖义玲,朱立军.贵州碳酸盐岩红土[M].贵阳:贵州人民出版社,2004.
Liao Yiling, Zhu Lijun. Carbonate Red Clay in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 2004.
- [2] 韦时宏,廖义玲,秦刚,等.黔中地区红粘土的超固结性及低密实度和变形特征[J].贵州工业大学学报:自然科学版,2006,35(4):9-12.
Wei Shihong, Liao Yiling, Qin Gang, et al. On Overconsolidation Properties, Low Degree of Density, and Characteristics of Deformation of Red Clay in Qianzhong Area [J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 35(4): 9-12.
- [3] 徐培华,王安玲.公路工程混合料配合比设计与试验技术手册[M].北京:人民交通出版社,2001.
Xu Peihua, Wang Anling. Manual of Mix Proportion Design and Testing Technique in Highway Engineering[M]. Beijing: China Communication Press, 2001.
- [4] 赵青海,梁波,马学宁.高速铁路石灰改良路基填料试验研究[J].铁道科学与工程学报,2005,2(6):53-57.
Zhao Qinghai, Liang Bo, Ma Xuening. Experiment Study of Filling Material on Lime-Improved Loess for High-Speed Railway Embankment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(6): 53-57.
- [5] 韩文斌,王元汉.京沪高速铁路路基基床填料改良试验研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增):1910-1916.
Han Wenbin, Wang Yuanhan. Testing Study on Modification of Railway Roadbed for Beijing-Shanghai High-Speed Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S): 1910-1916.
- [6] 贺建清,张家生.石灰改良软土路基填料饱水强度特性研究[J].矿冶工程,2004,24(4):18-21.
He Jianqing, Zhang Jiasheng. Improving the Strength Properties of Water-Saturated Packings for Soft Roadbed Using Lime-A Study[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2004, 24(4): 18-21.
- [7] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2002.
Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [8] 杨果林,李珍玉.客运专线非饱和红粘土的快剪与慢剪对比试验研究[J].湖南工业大学学报,2007,21(2):14-20.
Yang Guolin, Li Zhenyu. The Contrast Study between Quick Shear Test and Slow Shear Test of Unsaturated Red Clay in the Passenger Transportation Line[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007, 21(2): 14-20.

(责任编辑:廖友媛)