

水泥搅拌法改良桂林红黏土力学性质试验研究*

刘宝臣 李翠娟 潘宗源 张炳晖

(桂林理工大学土木与建筑工程学院 桂林 541004)

摘要 桂林地区分布的由碳酸盐系出露区的石灰岩经过红土化作用而成的高塑限的红黏土,孔隙比较大、含水量高,而其结构性强且存在上硬下软的成层分布特征,上部红黏土为坚硬-硬塑状态,承载力高,下部红黏土为软塑、流塑状态,为地基软弱下卧层,需进行处理。采用水泥搅拌法对桂林软弱红黏土无侧限抗压强度、抗剪强度、抗拉强度与水泥掺入比、龄期的关系等主要力学性质进行室内试验研究,得出外掺剂对无侧限抗压强度的影响以及无侧限抗压强度、抗拉强度与抗剪强度的关系。结果表明:运用水泥搅拌法对桂林地区软弱红黏土层主要力学性能的无侧限抗压强度与水泥掺入比、龄期之间以及含外掺剂和无外掺剂水泥红黏土无侧限抗压强度之间存在较好的相关性;黏聚力、抗拉强度随水泥掺入比、龄期增大而增大;无侧限抗压强度、抗拉强度与黏聚力存在相关性。

关键词 软弱红黏土 加固参数 强度 水泥搅拌法 桂林

中图分类号: TU472.5 文献标识码: A

LABORATORY TEST FOR MECHANICAL PROPERTIES OF GUILIN RED CLAY MIXED WITH CEMENT

LIU Baochen LI Cuijuan PAN Zongyuan ZHANG Binghui

(Department of Civil Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004)

Abstract The exposed carbonate limestone area at Guilin has red clay of high plastic limit. The clay was formed by laterization from limestone. Its pores are large and have high water contents. It has the character of strong two layer structure. The upper layer is hard and the lower layer is soft. The upper clay has the rigid and hard plastic condition and high bearing capacity. The lower clay is soft plastic, has flowing plastic condition and weak bearing capacity. It needs treatment. This paper uses the soil-cement mixing method to treat the soft red clay. Laboratory tests are done on the mechanical properties of the cemented soils. The test results include the deformation of character and strength of the cemented clays taking into account the effects of cement-soil ratio and age.

Key words Soft red clay, Stabilizing parameters, Strength, Cement mixing method, Guilin

* 收稿日期: 2011-10-28; 收到修改稿日期: 2012-03-07.

基金项目: 广西自然科学基金重点项目(2010GXNSFD013011).

第一作者简介: 刘宝臣, 主要从事土木工程测试、教学及科学研究工作. Email: bc0608@163.com

1 引言

桂林为强岩溶发育区,红黏土约占整个第四系分布面积的 75% 左右,为桂林市主要建筑活动区域。桂林红黏土由碳酸盐系出露区的石灰岩经过红土化作用而成,不同层次红黏土的裂隙发育差别也比较大,有的红黏土土质细腻光滑,胶结特征明显,而有的红黏土则颗粒较大,砂质感强,土质比较松软^[1]。桂林红黏土主要特点为含水量、液限、塑限、饱和度较大,比重、孔隙比、塑性指数较大,通常,液限大于 50%,塑性指数大于 20,平均比重 2.78,孔隙比大于 1.0,饱和度大于 90%,属于饱和土。红黏土地层有明显的分层性,在分布区域普遍具有上硬下软地层结构:上部红黏土为坚硬-硬塑状态红黏土,为建筑物良好天然地基;中部为可塑状态红黏土,在一定的承载力要求下可以作为天然地基,否则要进行加固处理;下部为软塑、流塑状态红黏土,为天然地基软弱下卧层,需要进行加固处理后才能作为建筑物地基。针对这些特性在路基建设有人已经采用加生石灰对无侧限抗压强度进行了试验研究^[2];为保证工程建设的安全与稳定,对红黏土的裂隙结构进行改良研究;由于红黏土裂隙发育,在降水作用下,裂隙成为水运移的有利通道,这将导致土体抗剪强度的降低,造成边坡失稳、地基破坏等工程事故^[3],因此也对其膨胀性等进行了对比研究,得出一些物理力学指标上具有相似之处,及力学特性的差异^[4];有人运用不固结不排气、不排水三轴试验对红黏土应力、应变及强度特性进行了研究^[5],同时有人对红黏土原状土与重塑土的黏聚力和内摩擦角随含水量且随着含水量的变化,裂隙存在对工程特性的影响得出了研究结果^[6~9]。针对红黏土特殊的物理力学特性,我们为改善其工程特性,提高其强度,对桂林地区红黏土进行水泥搅拌加固。水泥土搅拌法具有施工简单、速度快、振动小、土体加固后容重变化小等优点,采用该方法处理下卧可塑、软塑、流塑红黏土,可以改善下卧层的地基承载力和变形模量,充分发挥上部坚硬、硬塑红黏土的地基承载力,形成复合地基,满足建筑物对地基强度和变形的要求,在桂林地区已取得了较好的经济效益,并得到广泛应用。本文在对桂林地区水泥搅拌法加固红黏土软弱地基试验研究的基础上,对水泥红黏土无侧限抗压强度与水泥掺入比、龄期关系,抗剪、抗拉强度与水泥掺入比、龄期关系以及无

侧限抗压强度、抗拉强度与黏聚力的关系进行试验分析。

2 材料及试验制备

参照桂林地区水泥搅拌法施工实际情况,制备的土样取自于桂林某工地软弱层红黏土,土样的基本物理力学指标见表 1。水泥为 425 号普通硅酸盐水泥,外掺剂为生石膏,用量为水泥质量的 2%,水灰比为 0.5,水泥掺入比为 7%、10%、15%、20%、25%、30%。根据现有试验条件确定试验方案,按现行土工试验规程制作无侧限抗压、剪切、轴向压裂水泥红黏土试样各 24 个,共计 144 个,其中无侧限抗压、剪切、轴向压裂试样尺寸分别为: $\Phi 39.1\text{mm}$, $h100\text{mm}$; $\Phi 61.8\text{mm}$, $h20\text{mm}$; $\Phi 61.8\text{mm}$, $h15\text{mm}$ 。

表 1 试验土样物理力学性质

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil sample

W/(%)	P/g·cm ⁻³	e	I _p	I _L	C/kPa	Φ/(°)
51.0	1.80	1.40	26	0.76	19	13.2

3 试验目的和方法

3.1 试验目的

为了研究水泥土无侧限抗压强度、抗剪强度、抗拉强度与水泥掺入比、龄期关系以及无侧限抗压强度、抗拉强度与抗剪强度的关系,根据不同目的分别对不同试块进行无侧限抗压强度、轴向压裂和直接剪切试验。

3.2 试验方法

按比例称取所需材料,制作试样前将红黏土按 51% 的饱和含水率加水浸泡,加水泥混合均匀搅拌,装模,震捣,静置 24 h 后脱模,在温度为 20±2℃、相对湿度为 95% 的标准养护室内湿砂养护至各龄期(7d、28d、60d、90d),龄期前 24h 放入养护瓶中养护,然后进行试验。试验分 12 组,每组试样 12 个,分别进行无侧限抗压强度、轴向压裂和直接剪切试验。

4 试验成果与分析

4.1 无侧限抗压强度与水泥掺入比、龄期关系

水泥土的抗压强度特性是影响水泥土搅拌法形

成的复合地基沉降和承载力的重要因素,对其进行研究有极其重要的意义。对试验实测数据进行分析,得出水泥土无侧限抗压强度与水泥掺入比、龄期的关系(图1、图2)。分析图1、图2可知:水泥红黏土的无侧限抗压强度随着水泥掺入比的增大而增大,当水泥掺入比 $a \geq 20\%$ 时,强度增长趋于缓慢,水泥掺入比从7%增加到20%强度提高的幅度为44%~90%,从20%增加到30%强度提高幅度只有1%~19%,在实际施工中,考虑到技术和经济指标,取水泥掺入比 $a \leq 20\%$ 较合理;水泥红黏土的无侧限抗压强度随着龄期的增长而增大,28d强度是90d强度的63%~85%。

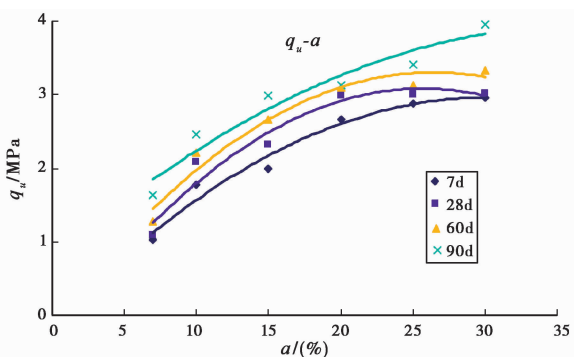


图1 无外掺剂水泥红黏土 q_u - a 曲线

Fig. 1 q_u - a curves of the cement-laterite without additive

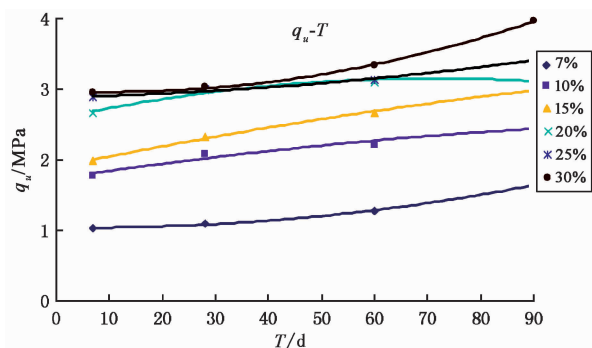


图2 无外掺剂水泥红黏土 q_u - T 曲线

Fig. 2 q_u - T curves of the cement-laterite with additive

周丽萍等人通过水泥土试验研究发现无侧限抗压强度与水泥掺入比、龄期存在较好相关性^[10]。对无侧限抗压强度与水泥掺入、龄期进行多项式回归分析,无侧限抗压强度 q_u 与水泥掺量 a 、龄期 T 的关系可分别表示为: $q_u = A_1 a^2 + B_1 a + C_1$, $q_u = A_2 T^2 + B_2 T + C_2$, q_u 与 a 、 T 的回归系数见表2、表3。水泥土无侧限抗压强度与水泥掺入比、龄期的关系较好地符合二次抛物线关系,按二次算式拟合,相关系数 R

在0.9801和0.9697以上。

表2 无侧限抗压强度 q_u 与水泥掺量 a 回归系数

Table 2 Relation between unconfined compressive strength q_u cement a

参数	水泥掺入比/%					
	7	10	15	20	25	30
A_1	-0.00009	-0.00004	-0.00004	-0.0001	0.00005	0.0002
B_1	-0.001	0.0112	0.0157	0.0161	0.0017	-0.0031
C_1	1.0415	1.7332	1.8905	2.5809	2.8853	2.9735
R	0.9988	0.9804	0.9988	0.9851	0.9942	0.9996

表3 无侧限抗压强度 q_u 与龄期 T 回归系数

Table 3 the relation between unconfined compressive strength q_u and regressive factor of age T

参数	龄期/d			
	7	28	60	90
A_2	-33.984	-52.521	-49.387	-22.626
B_2	20.57	26.943	26.062	16.988
C_2	-0.1491	-0.3722	-0.1357	0.7683
R	0.9838	0.9738	0.9789	0.9697

4.2 外掺剂对无侧限抗压强度的影响

外掺剂可激发、调节水泥水化作用,改善水泥与土颗粒间的作用,从而对软弱地基土起到较好的改性效果。参照桂林地区施工经验,试验采用生石膏粉为外掺剂对水泥红黏土无侧限抗压强度进行研究,结果表明,随外掺剂生石膏粉的加入水泥红黏土无侧限抗压强度提高(图3),对含外掺剂和不含外掺剂水泥土无侧限抗压强度进行对数函数回归分析,设含外掺剂和不含外掺剂水泥红黏土无侧限抗压强度分别为 y 和 x ,两者之间的关系式为: $y = 2.2343 \ln x +$

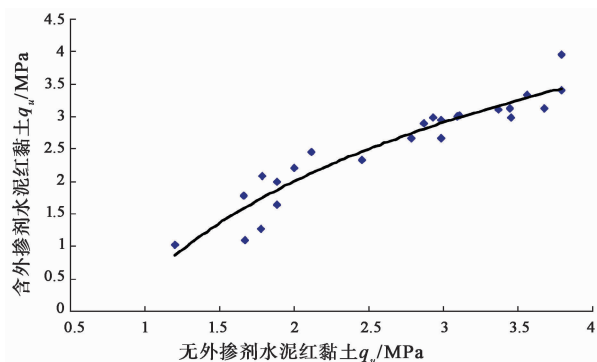


图3 无外掺剂和含外掺剂水泥红黏土无侧限抗压强度关系曲线

Fig. 3 Curves of the cement-laterite without additive

0.4521, 相关系数 $R=0.948$ 。

4.3 抗剪强度与水泥掺入比及龄期关系

水泥土通常情况下与土性质较接近, 一般会产生剪切破坏^[11], 水泥土的剪切强度及变形在分析结构的受力破坏过程和有限元计算中都有重要意义, 因此有必要对水泥土抗剪强度进行研究。通过试验测得水泥红黏土在不同水泥掺入比和龄期下的黏聚力, 对水泥土的黏聚力进行系统的研究和探讨。结果表明, 水泥土的黏聚力随水泥掺入比增长而增大(图4); 此外, 分析图5, 水泥红黏土的黏聚力随龄期的增长而增长, 28d内增长较快, 而后增长趋于缓慢, 后期黏聚力较大, 龄期为90d的水泥土抗剪强度比28d时增长12%~61%。

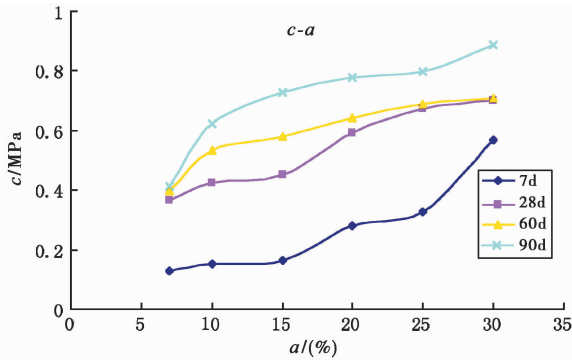


图4 无外掺剂水泥红黏土 c - a 曲线

Fig. 4 c - a curves of the cement-laterite without additive

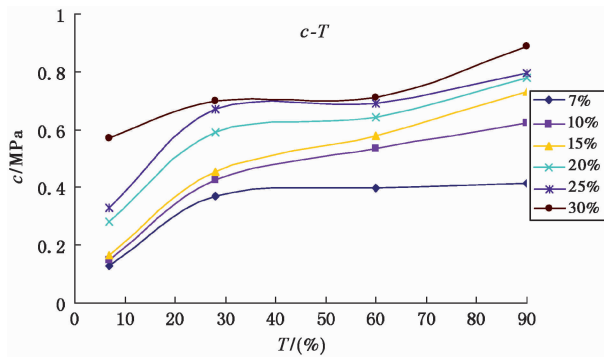


图5 含外掺剂水泥红黏土 c - T 曲线

Fig. 5 c - T curves of the cement-laterite with additive

4.4 抗拉强度与水泥掺量以及龄期关系

对于水泥土的抗拉强度, 国内外学者研究相对甚少, 而水泥土的抗拉强度及变形直接影响水泥土结构的开裂、变形和耐久性, 是水泥土破坏机理和强度理论的重要研究依据^[12]。本试验主要研究水泥掺入比和龄期对水泥红黏土抗拉强度的影响。由图

6可知, 随水泥红黏土养护龄期的增大, 水泥土的抗拉强度相应都在增长, 但提高幅度不明显。当水泥掺入比为25%时的水泥红黏土抗拉强度最大, 随龄期增大平均增长速率较快, 从0.1358MPa提高到0.1752MPa, 提高幅度为29%; 水泥掺入比为20%与30%的水泥红黏土抗拉强度总体上呈增长趋势, 但前者趋势线先凹后凸, 后者趋势线先凸后凹(图7), 随水泥掺入比的增大水泥红黏土的抗拉强度有先增后减的趋势, 增长趋势线较缓, 减小趋势线较陡。各龄期的水泥红黏土抗拉强度随水泥掺入比的增大增长趋势线基本一致, 以水泥掺入比在25%为分界, 当水泥掺入比小于25%时, 水泥红黏土抗拉强度随水泥掺入比的提高而提高, 其中水泥掺入比在10%~15%抗拉强度增长较缓慢, 水泥掺入比在15%~25%抗拉强度增长较快, 当水泥掺入比小于25%时, 水泥红黏土抗拉强度随水泥掺入比的提高而减小。

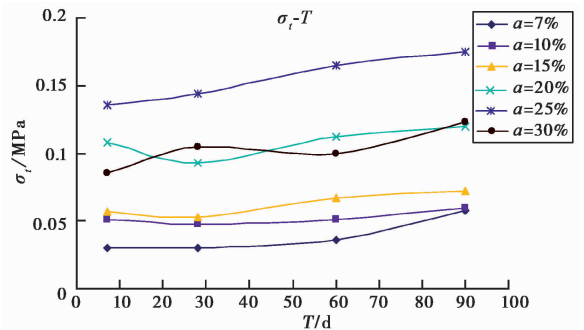


图6 无外掺剂水泥红黏土 σ_t - T 曲线

Fig. 6 σ_t - T curves of the cement-laterite without additive

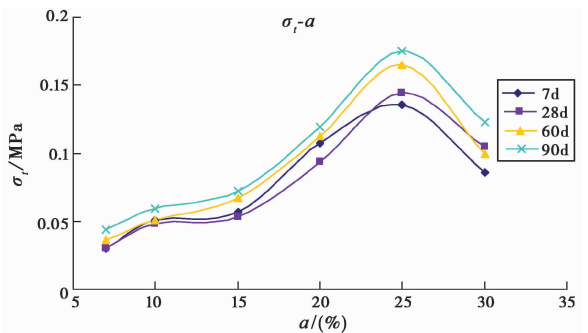


图7 无外掺剂水泥红黏土 σ_t - a 曲线

Fig. 7 σ_t - a curves of the cement-laterite without additive

4.5 无侧限抗压强度与抗剪强度关系

很多研究表明水泥土的无侧限抗压强度 q_u 与其内聚力 c 之间存在良好的线性关系^[13]。作者在此基础上对桂林水泥红黏土的无侧限抗压强度与抗

剪强度的关系探讨。取水泥红黏土无侧限抗压强度 q_u 与其黏聚力 c 为研究对象,以抗压强度 q_u 为纵坐标,水泥土黏聚力 c 为横坐标, q_u-c 关系如图 8、图 9 所示,进行指数函数回归分析,得出无外掺剂水泥红黏土的关系式为: $q_u = 1.2336e^{1.2752c}$, 相关系数为 0.7537, 含外掺剂水泥红黏土的关系式为: $q_u = 1.0576e^{1.2925c}$, 相关系数为 0.9335。分析可知,水泥红黏土抗剪强度随其无侧限抗压强度增大而增大,无侧限抗压强度越大,抗剪强度也越大,无侧限抗压强度 q_u 与其黏聚力 c 之间的相关性一般,其中含外掺剂无侧限抗压强度 q_u 与其黏聚力 c 之间的相关性相对较好。

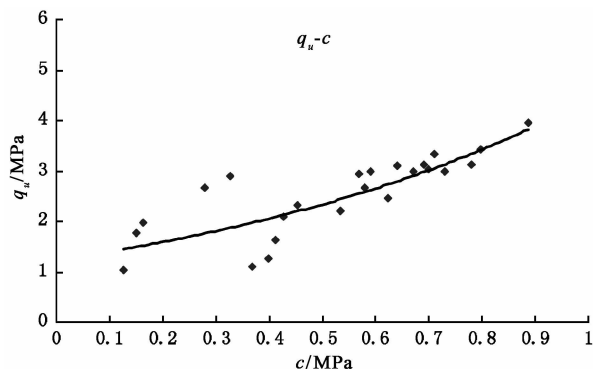


图 8 无外掺剂水泥红黏土 q_u-c 曲线

Fig. 8 q_u-c curves of the cement-laterite without additive

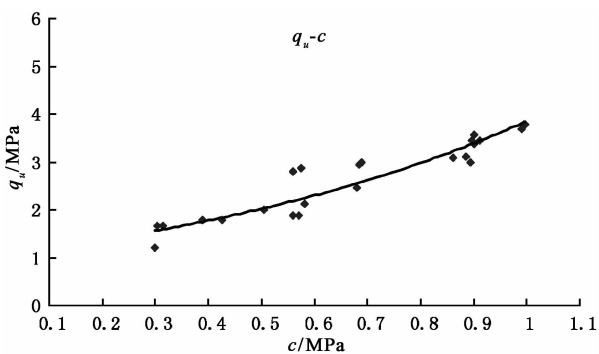


图 9 含外掺剂水泥红黏土 q_u-c 曲线

Fig. 9 q_u-c curves of the cement-laterite with additive

4.6 抗拉强度与抗剪强度关系

很多学者认为水泥土抗拉强度和抗压强度一样都是靠颗粒之间的黏聚力来维持强度,桂林地区分布的由碳酸盐系出露区的石灰结构性强^[14],为了探讨水泥红黏土抗拉强度与其黏聚力之间的关系,以黏聚力 c 为横坐标,抗拉强度 σ_t 为纵坐标作出图 10 和图 11。分析得知,水泥红黏土的抗拉强度 σ_t 随

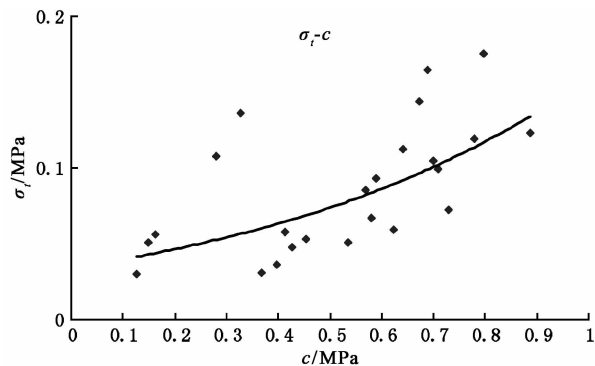


图 10 无外掺剂水泥红黏土曲线

Fig. 10 σ_t-c curves of the cement-laterite without additive

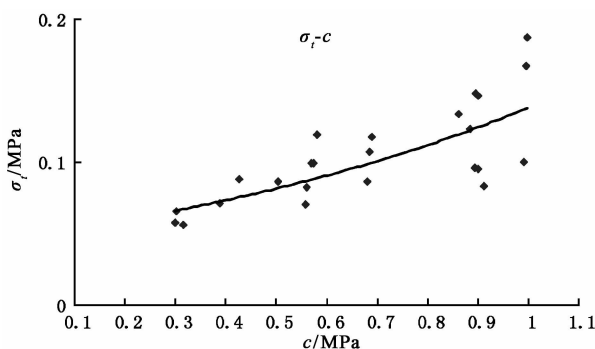


图 11 含外掺剂水泥红黏土 σ_t-c 曲线

Fig. 11 σ_t-c curves of the cement-laterite with additive

其黏聚力 c 增大基本呈增长趋势,其中含外掺剂水泥红黏土抗拉强度增长趋势相对较明显。采用指数函数进行回归分析,得出无外掺剂水泥红黏土 σ_t-c 关系式为 $\sigma_t = 0.034e^{1.5483c}$, 相关系数为 0.6411, 含外掺剂水泥红黏土 σ_t-c 关系式为 $\sigma_t = 0.0481e^{1.0547c}$, 相关系数为 0.7842, 表明水泥红黏土抗拉强度 σ_t 与其黏聚力 c 之间相关性一般。

5 结论

(1) 水泥红黏土无侧限抗压强度 q_u 与水泥掺入比 a 、龄期 T 的关系较好地符合二次抛物线关系,含外掺剂和无外掺剂水泥红黏土无侧限抗压强度可用对数函数拟合,相关性都较好。

(2) 水泥红黏土的黏聚力 c 随水泥掺入比 a 、龄期 T 增大而增大,28d 内增长较快,而后增长趋于缓慢。

(3) 水泥红黏土的抗拉强度 σ_t 随龄期 T 增大而增大,增长趋势较缓;随水泥掺入比 a 增大抗拉强度

σ_i 先增大后减小, 抗拉强度减小趋势线较陡, 其中在水泥掺入比 a 为 25% 时水泥红黏土的抗拉强度最高。

(4) 水泥红黏土的无侧限抗压强度 q_u 与抗拉强度 σ_i 与其黏聚力 c 也存在相关性, 并随其增大基本呈增长趋势, 含外掺剂水泥红黏土增长趋势相对较明显。

参 考 文 献

- [1] 王英辉, 聂庆科, 张全秀, 等. 广西靖西红黏土的变形和强度特性研究[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(4): 550 ~ 556.
Wang Yinghui, Nie Qingke, Zhang Quanxiu, et al. Deformation and shear strength of laterite clays in Jingxi, Guangxi province. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(4): 550 ~ 556.
- [2] 黄辉. 红黏土无侧限抗压强度试验影响因素研[J]. 湖南工业大学学报, 2010, **24**(4): 22 ~ 26.
Huang Hui. Study on influencing factors of unconfined compressive strength of red clay. Journal of Hunan University of Technology, 2010, **24**(4): 22 ~ 26.
- [3] 邹飞, 夏怡. 红黏土平面裂纹扩展的分形特征[J]. 人民长江, 2011, **42**(15): 58 ~ 62.
Zou Fei, Xia Yi. Fractal characteristics of plane crack propagation of red clay. Yangtze River, 2011, **42**(15): 58 ~ 62.
- [4] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 典型红黏土与膨胀土的对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(15): 2593 ~ 2598.
Zhao Yingwen, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 2593 ~ 2598.
- [5] 杨松, 卢廷浩. 非饱和红黏土的不排气、不排水三轴剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增1): 356 ~ 359.
Yang Song, Lu Tinghao. Research on unventilated-undrained triaxial shear test of red cohesive soil. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S.1): 356 ~ 359.
- [6] 唐益群, 余恬钰, 张晓晖, 杨坪, 王建秀. 贵州石漠化地区降雨条件下红黏土剪切强度特性随含水量变化关系探讨[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(2): 249 ~ 252.
Tang Yiqun, She Tianyu, Zhang Xiaohui, Yang Ping, Wang Jianxiu. Changing of red clay shear strength with water content under rainfall in karst rocky desertification areas, Guizhou province. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(2): 249 ~ 252.
- [7] 李培勇, 杨庆, 栾茂田, 等. 非饱和膨胀土裂隙开展深度影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增1): 2967 ~ 2972.
Li Peiyong, Yang Qing, Luan Maotian, et al. Research on influential factors of crack propagation depth of unsaturated expansive soils. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S.1): 2967 ~ 2972.
- [8] 陈开圣, 胡鑫. 高液限红黏土变形特性研究[J]. 公路交通科技, 2010, **27**(3): 49 ~ 58.
Chen Kaisheng, Hu Xin. Study of deformation characteristic for high liquid limit red clay. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, **27**(3): 49 ~ 58.
- [9] 张麒蛰. 高液限红黏土路基修筑技术探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, **5**(7): 83 ~ 85.
Zhang Qizhe. Discussion on construction techniques of red clay subgrade with high liquid limit. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, **5**(7): 83 ~ 85.
- [10] 周丽萍, 申向东, 李学斌, 等. 天然浮石粉水泥土力学性质的试验研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, **39**(3): 492 ~ 497.
Zhou Liping, Shen Xiangdong, Li Xuebin, et al. Experiment study of mechanical properties of natural pumice powder cement-soil. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, **39**(3): 492 ~ 497.
- [11] 王珊珊, 卢成原, 孟凡丽. 水泥石抗剪强度试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2008, **36**(4): 456 ~ 460.
Wang Shanshan, Lu Chengyuan, Meng Fanli. An experimental study of shear strength of cement soil. Journal of Zhejiang University of Technology, 2008, **36**(4): 456 ~ 460.
- [12] 马军庆, 王有熙, 李红梅, 等. 水泥石参数的估算[J]. 建筑科学, 2009, **25**(3): 65 ~ 67.
Ma Junqing, Wang Youxi, Li Hongmei, et al. Study on the relations of cement-soil parameters with compressive strength. Building Science, 2009, **25**(3): 65 ~ 67.
- [13] 肖武权, 冷伍明, 律文田. 深层搅拌法加固软弱土层的室内实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, **35**(3): 490 ~ 494.
Xiao Wuquan, Leng Wuming, Lv Wentian. Laboratory test for treatment of the poor soil using deep mixing method. Journal of Central South University (Science and Technology), 2004, **35**(3): 490 ~ 494.
- [14] 刘宝臣, 牟春梅. 有机质污染红黏土地基加固效果的力学效应分析[J]. 工业建筑, 2010, **40**(2): 128 ~ 131.
Liu Baochen, Mu Chunmei. Study on mechanical effect of red clay polluted by organic matter during strengthening foundation. Industrial Construction, 2010, **40**(2): 128 ~ 131.