

红黏土的击实特性及其击实后的工程性质

聂庆科^{1, 2}, 王英辉^{1, 2}, 田鹏程^{1, 2}, 梁书奇^{1, 2}

(1. 河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省岩土工程技术研究中心, 河北 石家庄 050031)

摘要: 通过击实试验和击实土样的压缩和剪切试验研究红黏土的变形和强度特性。研究表明: 重塑土的最大干密度比原状土的最大干密度大, 而重塑土的最优含水率则比原状土的最优含水率小; 随击实功增大, 土样的干密度增大, 而最优含水率减小; 含水率稍高的击实土样的水稳定性要比含水率稍低的击实土样的水稳定性好; 当含水率较大时, 击实土样的相对固结变形量较大, 固结稳定并浸水再固结后, 原来含水率较小土样的变形增量反而稍微大些。

关键词: 红黏土; 击实试验; 影响因素; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)11-1799-06

作者简介: 聂庆科(1965-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 现主要从事岩土工程设计、施工与理论研究工作。E-mail: nieqingke@126.com。

Compaction characteristics of lateritic clay and engineering properties of its compaction specimens

NIE Qing-ke^{1, 2}, WANG Ying-hui^{1, 2}, TIAN Peng-cheng^{1, 2}, LIANG Shu-qi^{1, 2}

(1. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China; 2. Hebei Province

Center of Geotechnical Engineering Technology, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The deformation and shear strength of lateritic clay are studied by compaction tests and shear tests. The studies show that the maximum dry density of remolded red clay is generally greater than that of undisturbed red clay; however, the optimum moisture content of the former is less than that of the latter. With the increase of compaction energy, the dry density of specimens increases, and the optimum moisture content decreases. When the moisture content increases slightly (compared with the optimum moisture content), the water-sensitivity is better than that of the drier specimens. The compression deformation of compacted specimens with higher moisture content is greater than that of the specimens with lower moisture content; however, due to the inundation of specimens, the deformation of specimens with lower moisture content will be greater than that of the specimens with higher moisture content.

Key words: lateritic clay; compaction test; factor; unconfined compression strength

0 引言

关于红黏土击实特性的研究在诸如将红黏土作为建筑物地基、路堤填筑材料以及地基加固方面有重要的工程意义^[1-3]。研究红黏土的击实特性, 最常见的是利用击实仪进行击实试验。赵颖文等^[4-5]通过对广西贵港红黏土击实样的室内试验, 探讨了红黏土的击实特性、胀缩性能与含水率之间的关系。研究表明, 干密度指标总体上能反映红黏土击实样的强度规律, 而非饱和击实样强度峰值对应的含水率一般偏小, 饱和后土体由于吸水膨胀使强度峰值对应的含水率较饱和前明显增大。吴立坚等^[6]通过击实试验研究了红黏土作为高速公路路堤填料的可行性, 讨论了土的含水率、击实功、饱和度以及密实度之间的相互关系。张麒麟等^[7]对一种高液限红黏土路基的修筑技术进

行了探讨。

为模拟强夯荷载作用下红黏土的工程特性, 为强夯施工提供参考, 本文结合广西信发铝业建设工程^[8], 研究了广西靖西红黏土击实功与土的含水率、密实度的关系, 包括不同含水率条件下, 土样的击实效果(如压实度的变化)、最优含水率以及击实功的合理取值等, 最后研究了击实后的红黏土的固结特征和强度变化。

1 试验方法

所用击实仪的内径为 152 mm, 高度为 116 mm。试验方法如下: 对于原状土, 一次性称重 6.5 kg, 放入击实筒内, 连续击打 300 击; 对于重塑土, 分 5 层,

收稿日期: 2008-07-17

表 1 试验土样物理性质指标
Table1 Properties of lateritic clays

土样 编号	类型	含水率/%	初始 孔隙比	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性 指数 I_p	土样来源说明
C			1.38	78.9	39.8	39.1	原状土 4.3 m 处
D-JG1	原状击实后	43.2	1.21	89.1	43.7	45.4	原状土 1 m 处 4 号
D-JG2	原状击实后	40.9	1.21	89.1	43.7	45.4	原状土 1 m 处 4 号
D-CJG1	重塑击实后	40.1	1.16	89.1	43.7	45.4	原状土 1 m 处 4 号
D-CJG2	重塑击实后	39.8	1.11	89.1	43.7	45.4	原状土 1 m 处 4 号
D-CJG3	重塑击实后	32.3	0.89	89.1	43.7	45.4	原状土 1 m 处 4 号
E-JG4	原状击实后	35.1	0.98	71.3	43.8	27.5	原状土 1 m 处 11 号
E-JG5	原状击实后	40.3	1.10	71.3	43.8	27.5	原状土 1 m 处 11 号
E-JG6	原状击实后	30.4	0.90	71.3	43.8	27.5	原状土 1 m 处 11 号
E-JG7	原状击实后	33.4	1.16	71.3	43.8	27.5	原状土 1 m 处 11 号
E-CJG4	重塑击实后	34.9	0.90	71.3	43.8	27.5	原状土 1 m 处 11 号
E-CJG5	重塑击实后	29.9	0.85	71.3	43.8	27.5	原状土 1 m 处 11 号

每层土称重 1.3 kg，每层 60 击。每层试样高度大致相等，两层交界处的土面应刨毛。这样可保证原状土样与重塑土样所受的击实能大致相等。重塑土样制备时，先将自然风干后的红黏土碾散后过 2 mm 筛，然后均匀洒水调制到要求的含水率。

此外，为研究击实能对击实密度的影响，用土类 E（物理性质指标见表 1）制备重塑土样后还进行了不同击实次数（20 击、40 击、60 击）下的试验，而击实过程和分层数不变。

2 红黏土击实特性分析

2.1 原状土与重塑土击实特性的比较

图 1 给出两种土类（土类 C 和 E）的原状土以及重塑土击实曲线的变化规律及其比较。试验土类编号及其物理性质指标见表 1。对于土类 C，原状试样的含水率为 31.3%~42.8%，重塑试样的含水率为 29.5%~42.8%；对于土类 E，原状试样的含水率为 30.4%~43.8%，重塑试样的含水率为 22.1%~39.8%。可以看出，随着含水率的增大，无论是原状土样还是重塑土样，均出现一个明显的峰值干密度（即最大干密度）及其最优含水率。然而，重塑土的最大干密度（如土类 C， $\rho=1.52\text{ g/cm}^3$ ）比原状土的最大干密度（如土类 C， $\rho=1.36\text{ g/cm}^3$ ）要大。而重塑土的最优含水率（ $w=33.5\%$ ）则比原状土的最优含水率（ $w=38.6\%$ ）要小。

可见，土样初始含水率对其击实后密度的影响是非常大的。因此，在强夯加固重塑红黏土（即扰动后的回填土）时，应特别注意将含水率保持合适的值，当然原状土与重塑土要求的含水率是不同的。

由图 1 可以看出，当含水率较小时，经过击实后原状土的干密度比重塑土的干密度要小很多。也就是说，原状土不易击实，此时的击实能更多地耗散于对原有土结构的破碎（如克服原来团粒之间的联结强度）；而当含水率较大时，原状土的干密度与重塑土的干密度就比较接近，但其干密度均比较小，土体并不容易压实。

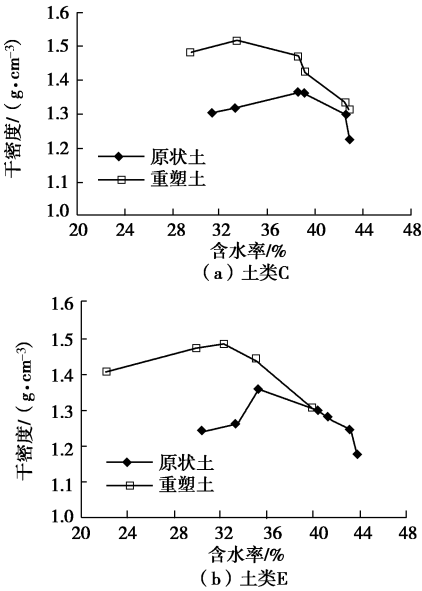


图 1 原状土与重塑土击实曲线比较

Fig. 1 Comparison of compaction curves of undisturbed and remolded specimens

2.2 击实能对试验结果的影响

由图 2 可以看出，随着击实能的增大，击实曲线逐渐靠上（即干密度逐渐增大）。但是，随着击实能的

继续增大, 干密度的增加量开始减小。特别是在含水率较大时 (如 $w=36\%\sim 40\%$), 此时的击实能有很大一部分以阻尼的形式在土体中耗散, 土体产生较大的剪切变形。当含水率较小时, 如果击实能较小, 其中大部分能量消耗于对坚硬团颗的破碎上, 因此击实后土样密实度较小。此时, 需要较大的能量才可以使土体得到密实。

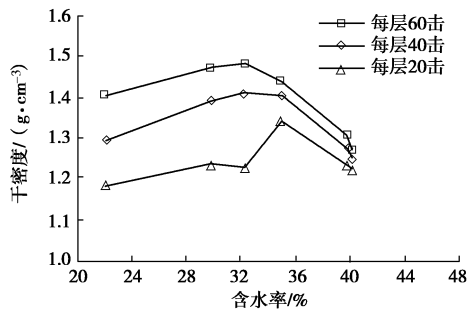


图 2 击实功对红黏土击实曲线的影响

Fig.2 Effect of compaction energy on compaction curves

由图 2 可知, 随着夯击能的增大, 最优含水率有减小的趋势 (三种击实能条件下, 最优含水率依次为 34.9%, 34.1%, 32.3%)。

因此, 实际工程中应选取合适的夯击能, 并不是夯击能愈大效果愈明显。而且, 应该根据施工时现场地基土的含水率选择夯击能。根据本次试验结果认为, 当土的含水率较小时 (例如小于 32.3%), 可采用较大的夯击能进行强夯施工, 并适当增加夯击遍数, 以提高地基的密实度; 当土的夯水量较大时 (如大于 32.3%), 试图单纯通过增大夯击能的方法来提高地基土的密实效果是不明显的。此时, 可通过晾晒的方法适当降低现场地基土的含水率, 特别是在雨水后更应注意施工时夯击能的适宜性。

2.3 击实土样及击实饱和土样的无侧限抗压强度

(1) 试样制备和试验方法

利用图 2 中已经过击实后的部分土样 (相当于在中型击实能下进行击实, 即分 5 层, 每层 40 击), 制备成标准三轴试样 (直径 $\phi=3.91\text{ cm}$, 高 $h=8\text{ cm}$), 然后利用三轴试验机进行无侧限抗压强度试验 (实际上为剪切试验, 围压 $\sigma_3=0$), 剪切速率为 0.32 mm/min 。试验时, 一部分土样击实后直接进行剪切, 另一部分土样放在真空缸中抽真空加以饱和, 然后再进行剪切。剪切过程中, 当有峰值出现时, 以峰值作为无侧限抗压强度; 无明显峰值时, 以轴向应变 10% 作为无侧限抗压强度。

(2) 试验结果分析

图 3 给出无侧限抗压强度的比较试验结果, 试样的含水率为 22.1%~40.1%。

由图 3 可以看出, 击实后土样强度的变化大致与击实曲线的变化有相同的趋势 (见图 2)。此时, 土样的强度主要受其密实度的控制, 因此在最优含水率附近其无侧限抗压强度也较高。

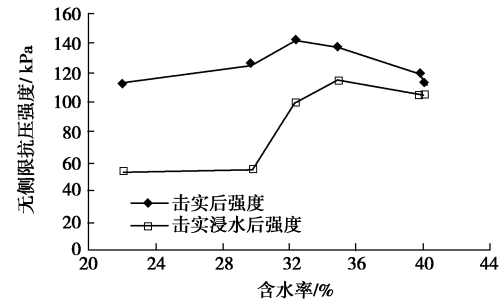


图 3 击实以及再浸水后的无侧限抗压强度

Fig. 3 Unconfined compression strength of lateritic clay after compaction and re-saturation

当对击实土样进行饱和后, 土颗粒之间的联结强度减弱, 剪切强度明显下降。可以看出, 原来含水率较小时进行击实后的土样的强度值下降得更为明显, 而原来含水率较大时进行击实后的土样的强度值稍微有所下降 (与饱和前比较接近)。实际上, 当含水率较大时, 原来土样已接近饱和状态, 后续的饱和作用对原来土结构强度的影响不大。从这个意义上来看, 含水率稍高 (即与最优含水率相比处于偏湿状态) 的击实土样的水稳定性要比含水率稍低 (偏干状态) 的击实土样的水稳定性好 (尽管击实后两种情况下土样的干密度接近)。因此, 在实际强夯施工时, 在同时能满足密实度要求的条件下, 则含水率较大状态下红黏土的水稳定性要比含水率较小状态下的水稳定性更好。

上述研究表明, 在进行强夯施工时, 应尽量保证地基土含水率在最优含水率附近范围内 (对于本次试验用土, 这一含水率为 31%~35%), 这样除可保证地基土在强夯作用下有较大的密实度外, 还可使地基土有较高的剪切强度和水稳定性。

因此, 在实际施工中建议用干密度和含水率两个指标来同时控制施工参数, 而在进行有关项目的检测时, 也应该选择合适的含水率条件, 而不宜在过干或过湿的状态下进行。

3 室内击实土样的压缩特性

3.1 土样击实后的固结

先对土样进行击实 (分 5 层, 每层 60 击), 然后进行单轴固结试验来评价击实后土样的压缩特性。试验土类编号及物理性质指标见表 2。图 4~6 分别给出土类 D 和土类 E 的试验结果。

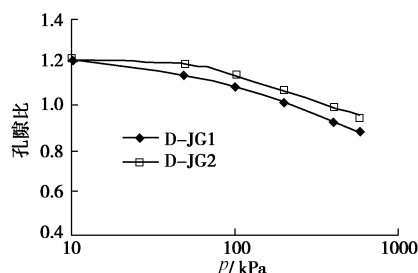


图4 原状土击实后单向压缩曲线(土类 D)

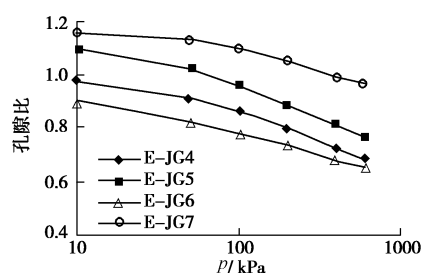
Fig. 4 The e - $\lg p$ curves for undisturbed samples after compaction (Soil D)

图5 原状土击实后单向压缩曲线(土类 E)

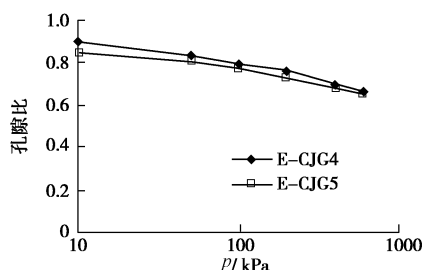
Fig. 5 The e - $\lg p$ curves for undisturbed samples after compaction (Soil E)

图6 重塑土击实后单向压缩曲线(土类 E)

Fig. 6 The e - $\lg p$ curves for remoulded samples after compaction (Soil E)

可见,红黏土土样经过击实后,如果再进行固结试验(即单向压缩作用),仍然会产生一定的压缩变形量。而且,由图5所给出的击实样的试验结果可以看出,不同的初始孔隙比(即不同的含水率)条件下,其 e - $\lg p$ 曲线几乎是平行的。

对于原状土样(图4和图5),在压力较小时(大致为 $p=50$ kPa)似乎出现一个转折点,之后基本呈直线变化。而对于重塑土(图6),由于土样的孔隙比较小($e=0.85, 0.9$),因而后续的压缩变形量较小。

3.2 土样击实后的浸水固结

图7给出土类D在不同含水率(物理性质指标见表1)的重塑土击实后的固结以及浸水后固结试验结果。可以看出,当含水率较大时,土样的相对变形量较大,固结稳定并浸水再固结后,原来含水率较小的

土样的变形增量比原来含水率较大的土样的变形增量稍微大些。

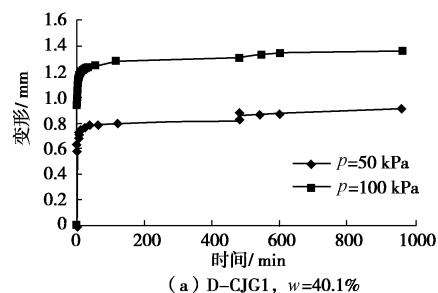
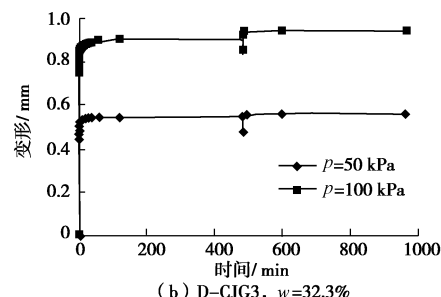
(a) D-CJG1, $w=40.1\%$ (b) D-CJG3, $w=32.3\%$

图7 重塑土击实后单向压缩曲线(土类 D)

Fig. 7 The compression curves for remoulded samples after compaction (Soil D)

3.3 不同含水率土样击实后压缩特性的比较

试验土样的物理性质指标见表1(土类C)和表2。图8和图9给出原状土样以及重塑土样在经过室内击实后的单向压缩曲线。图8中,原状土样的含水率为31.3%~42.8%,初始孔隙比为0.82~1.25;图9中,重塑土样的含水率为29.5%~42.8%,初始孔隙比为0.85~1.35。试样的孔隙比和含水率比较大,而试验结果的离散性也是非常大的。

表2 击实土样的孔隙比和含水率

土样编号	含水率/%	初始孔隙比
C-JG1, C-JS1	42.4	1.12
C-JG2, C-JS2	39.1	1.02
C-JG3, C-JS3	38.5	1.12
C-JG4, C-JS4	33.2	0.81
C-JG5, C-JS5	42.8	1.24
C-JG6, C-JS6	38.6	1.02
C-JG7, C-JS7	31.3	0.83
C-CJG1, C-CJS1	42.4	1.06
C-CJG2, C-CJS2	39.1	1.01
C-CJG3, C-CJS3	38.5	1.04
C-CJG4, C-CJS4	29.5	0.85
C-CJG5, C-CJS5	42.8	1.10
C-CJG6, C-CJS6	38.6	1.35

图8和图9给出的固结试验所施加的最大固结压力可达600 kPa。可以看出,随着含水率的增大,土样

的孔隙比一般较大, 但不同土样的压缩指数似乎变化不大。特别是对于原状土样 (图 8), 经过击实后, 不同土样的 $e - \lg p$ 曲线几乎呈一族平行线。这一现象表明, 红黏土的初始含水率对地基密实度的影响是非常大的, 而在外部荷载作用下地基的压缩变形量不大 (由图 8 和图 9, 压缩系数分别为 $a_{1-2}=0.43 \sim 0.44 \text{ MPa}^{-1}$ 和 $a_{1-2}=0.23 \sim 0.46 \text{ MPa}^{-1}$)。这一特点与饱和软黏土或其它松软土的压缩特征完全不同。

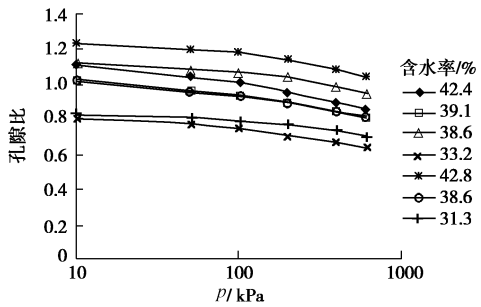


图 8 原状土击实后单向压缩曲线

Fig. 8 The $e - \lg p$ curves for undisturbed samples after compaction (Soil C)

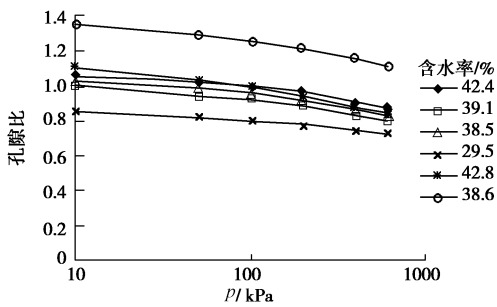


图 9 重塑土击实后单向压缩曲线

Fig. 9 The $e - \lg p$ curves for remoulded samples after compaction (Soil C)

4 击实后土样的三轴剪切特征

图 10 和图 11 给出土类 C (物理性质指标见表 1) 的原状土经过击实以后以及所制备的重塑土样的三轴试验结果 (所施加的围压为 100 kPa)。

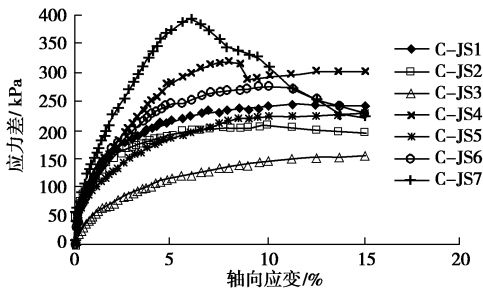


图 10 原状土击实后三轴试验结果 (土类 C)

Fig. 10 The stress-strain curves for undisturbed samples after compaction (Soil C)

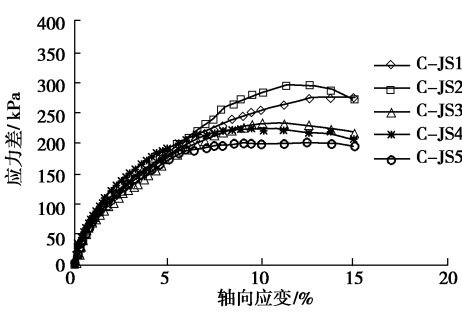


图 11 重塑土击实后三轴试验结果 (土类 C)

Fig. 11 The stress-strain curves for remoulded samples after compaction (Soil C)

由图 10 和图 11 可以看出, 尽管试验结果有较大的离散性, 但一般随着含水率的减小, 其强度值明显增大。当含水率不同时, 击实作用对土的压密效应的影响是非常大的, 从而也影响到对其强度的影响上。

实际上, 红黏土具有很强的结构性, 在剪切过程中, 土样内部原的微结构不断破坏、调整和重新组合, 表现为剪胀和剪缩的交替变化。因此, 剪切过程中原状土的应力应变关系曲线十分复杂, 而其孔隙水压力也反复变化 (上升或下降)。

5 结 论

(1) 随着含水率的增大, 无论是原状土样还是重塑土样, 均出现一个明显的最大干密度及最优含水率。然而, 重塑土的最大干密度比原状土的最大干密度要大, 而重塑土的最优含水率则比原状土的最优含水率要小。因此, 在强夯加固重塑红黏土 (即回填土) 时, 应该特别注意其含水率保持合适的值。

(2) 随着击实功的增大, 土样的干密度增大。但是, 随着击实功的继续增大, 干密度的增加量开始减小。实际工程中, 当土的含水率较小时, 可采用较大的夯击能进行强夯施工, 并适当增加夯击遍数, 以提高地基的密实度; 当土的含水率较大时, 试图通过增大夯击能的方法来提高地基土密实度效果不很明显。

(3) 当对击实土样进行饱和后, 土颗粒之间的联结强度减弱, 强度明显下降, 而且原来含水率较小时进行击实后的土样的强度值下降得更为明显。从这个意义上来看, 含水率稍高的击实土样的水稳定性要比含水率稍低的击实土样的水稳定性好。

(4) 当含水率较大时, 土样的相对变形量较大, 固结稳定并浸水再固结后, 原来含水率较小土样的变形增量比原来含水率较大土样的变形增量稍微大些。

(5) 击实后土样的三轴剪切试验表明, 土样呈现应变硬化特点。而且, 随着含水率的逐渐增大, 其应力应变关系曲线也相应降低, 主应力差减小量非常明

显。当然,随着围压的增大,土样的强度也相应提高。

(6) 实际上,红黏土具有很强的结构性,在剪切过程中,土样内部原有的微结构不断破坏、调整和重新组合,表现为剪胀和剪缩的交替变化。因此,剪切过程中原状土的应力应变关系曲线十分复杂,而其孔隙水压力也反复变化(上升或下降)。

参考文献:

- [1] 白冰,肖宏彬. 软土工程若干理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (BAI Bing, XIAO Hong-bin. The theory and application of soft clay engineering[M]. Beijing: china Water Power Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 欧孝夺,吴恒,周东. 广西红黏土和膨胀土热力学特性的比较研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1068 - 1073. (OU Xiao-duo, WU Heng, ZHOU-Dong. Comparative study on thermodynamics characteristics of red clay and expansive soils in Guangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 20(7): 1068 - 1073. (in Chinese))
- [3] 肖智政,刘宝琛. 残积红黏土的力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 990 - 993. (XIAO Zhi-zheng, LIU Bao-chen. Experimental study on mechanical strength of residual laterite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 990 - 993. (in Chinese))
- [4] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,拓勇飞. 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 Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, TUO Yong-fei. Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2593 - 2598. (in Chinese))
- [5] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,拓勇飞. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 369 - 373. (ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, TUO Yong-fei. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 369 - 373. (in Chinese))
- [6] 吴立坚,钟发林,吴昌兴,等. 高液限土的路用特性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 193 - 195. (WU Li-jian, ZHONG Fa-lin, WU Chang-xing, et al. Study on road made by high liquid limit soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 193 - 195. (in Chinese))
- [7] 张麒麟. 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(1): 83 - 85. (ZHANG Qi-zhe. Discussion on construction techniques of red clay subgrade with high liquid limit[J]. Journal of Water Resources and Architecture Engineering, 2007, 5(1): 83 - 85. (in Chinese))
- [8] 聂庆科,王英辉. 广西红黏土工程特性研究报告[R]. 石家庄: 河北建设勘察研究院有限公司, 2008. (NIE Qing-ke, WANG Ying-hui. The engineering properties of the red clay in Guangxi[R]. Shijiazhuang: Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd. 2008. (in Chinese))