

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.08.016

# 红黏土工程性状的干湿循环效应试验研究

穆 坤, 孔令伟, 张先伟, 尹 松

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:**为研究湿热多雨气候条件诱发的干湿循环过程对红黏土长期性能的影响规律,对制样过程中干湿循环含水率变化幅度控制技术进行改进,制备不同干湿循环次数以及含水率变化幅度试样。利用固结排水三轴剪切与压缩试验,研究了干湿循环次数与干湿循环含水率变化幅度对压实红黏土工程性状的影响规律。结果表明,压实红黏土的黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$  均随干湿循环次数  $N$  的增加而衰减,首次干湿循环之后衰减效应最显著,其后较弱并趋于稳定, $\varphi$  的衰减程度小于  $c$ ,且在低围压下的抗剪强度随干湿循环衰减更加显著;压缩模量  $E_{1-2}$  随  $N$  的总体衰减规律与强度参数类似,但衰减幅度小于  $c$  而大于  $\varphi$ ;随着干湿循环含水率变化幅度增大,压实红黏土  $c$  与  $E_{1-2}$  略有减小, $\varphi$  基本不变,压实红黏土含水率在  $\omega_{opt} \pm 4\%$  变化范围内,具有相对稳定的力学特性。该研究表明,红黏土不宜直接用于填筑路床与边坡表层的填料,可以作为上下路堤堤心的填料,但必须采取防排水工程措施与边坡防护措施。

**关 键 词:**红黏土;干湿循环;含水率;强度;压缩模量

**中图分类号:** TU 447

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2016) 08 - 2247 - 07

## Experimental investigation on engineering behaviors of red clay under effect of wetting-drying cycles

MU Kun, KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, YIN Song

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** To investigate the influence of wetting-drying cycles in seasonal variation on the long-term performance of red clay, the traditional sample preparation method is improved, and the moisture content variation of compacted soil during wetting-drying cycles is controlled in the regime of saturation from the optimum water content  $\omega_{opt}$  to full saturation. Considering the dripping humidification, the  $\omega_{opt} \pm 2\%$  and  $\omega_{opt} \pm 4\%$  water content samples experienced by the wetting-drying cycles were prepared. The consolidated drained triaxial shear test and compression test were conducted to analyze the effects of wetting-drying cycles and moisture change amplitude on the engineering properties of compacted red clay. The results show that cohesion  $c$  and internal friction angle  $\varphi$  decrease with increasing cycle number  $N$ , and the decrease is significant in the first wetting-drying cycle and then becomes stable. However, the rate of decrease of  $\varphi$  is less than that of  $c$ , and the decrease of shear strength under low confining pressure is more drastic than that under high confining pressure during the cyclic wetting-drying process. Compression modulus  $E_{1-2}$  also decreased with increasing  $N$  and the decrease rate is less than that of  $c$  but larger than that of  $\varphi$ . Similarly,  $c$  and  $E_{1-2}$  decrease slightly with increasing moisture change amplitude of the cyclic wetting-drying compacted red clay samples. At the moisture content in range of  $\omega_{opt} \pm 4\%$ , the compacted red clay shows relatively stable mechanical behavior. It is suggested that the red clay should not be directly used as the backfill material, but can be used as the backfill material of the embankment core, if the drainage and slope protection measures are taken effectively.

**Keywords:** red clay; wetting-drying cycles; moisture content; strength; compression modulus

## 1 引 言

红黏土作为在我国广泛分布的一种特殊土,因

其胀缩性、裂隙性与分布不均匀性,在工程应用中存在灾害隐患<sup>[1-3]</sup>。随着公路建设的快速发展,我国红黏土地区难以回避使用红黏土作为路基填料,但因

收稿日期: 2014-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41372314); 中国科学院科技服务网络计划项目 (No. KFJ-EW-STS-122); 交通运输部西部交通建设科技项目 (No. 20113184931700)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41372314), the Program of Science and Technology Service Network Initiative by Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-STS-122) and the Science and Technology Project on Transportation Construction in the West Region by the Ministry of Communications.

第一作者简介: 穆坤,男,1985年生,博士研究生,从事特殊土的动力学特性方面的研究工作。E-mail: mukun2018@163.com

所处的湿热多雨环境及其工程性能的水敏性效应,在路基工程实践中,红黏土的压实控制标准与运营过程的路用性能弱化都与气候环境密切相关<sup>[4-5]</sup>。以往的研究表明<sup>[1-6]</sup>红黏土与膨胀土虽然在一些物理指标及胀缩特性方面具有相似之处,但其力学特性与水敏性特征具有明显的差异;击实红黏土的胀缩性能主要由其含水率决定;红黏土路基在蒸发脱湿与降雨增湿的气候条件作用下,其工程特性将发生不断衰变,这正是导致路基沉陷、纵裂、浅层滑塌等病害发生的一个重要原因。然而,迄今针对压实红黏土路基的工程特性认知尚有诸多有待深化之处,如何确定多因素影响下红黏土工程特性的衰变演化机制,采种何种指标与评价方法研判红黏土的路基长期性能,是学术界与工程界关注的重要问题。

工程中导致土体发生干湿循环的因素包括晴雨天气的交替出现、地下水位的升降变化、湖区或库区水位的季节性变化<sup>[7-8]</sup>;另外,车辆循环荷载作用导致地下水位以下饱和地基土中超静孔隙水压力的发展,也会将地下水泵送至水位线以上,导致路基土体内部产生干湿循环<sup>[9]</sup>。对于气候条件诱发的工程灾害,以往较多侧重于考虑降雨过程引起的土体湿化的影响,而综合考虑气候条件诱发的干湿循环效应对土体力学性状影响的研究少见。近年来,极端气候时有发生,长时间的强降雨与极端干旱天气交错出现,引发了一系列工程灾害。文献[6]报道了在自然环境下广西南宁3种类型膨胀土边坡长时间的现场响应特征,认为降雨是膨胀土边坡发生灾变的最直接的外在因素,同时蒸发效应是边坡灾变的最重要前提条件,降水与干旱天气条件交替出现而产生的干湿循环作用是土体工程性能衰变的重要外因,此外,杨和平<sup>[10-11]</sup>、吕海波<sup>[12]</sup>、孙德安<sup>[13]</sup>等针对膨胀土的强度与胀缩变形特性的干湿循环效应开展了大量工作,国外学者也针对膨胀土(岩)强度变形特性受干湿循环过程影响做了许多研究工作<sup>[14-15]</sup>,但目前干湿循环过程对红黏土强度、变形特性的影响规律还不明确。

关于干湿循环对路基土强度特性的影响,大多

数研究采用室内直剪试验<sup>[9-10]</sup>,通过类比分析其强度指标随干湿循环次数的衰减特性,但实际路基土体受力状态更为复杂,采用三轴试验能较好地反映路基土体的实际受力状态。此外,在试验土样制备方法上,也多将干湿循环的控制含水率变化范围控制在饱和状态到接近缩限含水率的风干状态<sup>[16]</sup>。事实上,红黏土直接作为路基填料一般仅局限于上下路堤,其含水率虽受气候变化较大,但通常并不会使上下路堤土体含水率达到缩限含水率附近,而是在最优含水率上下一定范围内波动。

基于上述考虑,本文通过制备历经不同干湿循环次数与含水率变化幅度的试验土样,并采用三轴固结排水剪切与压缩试验,分析干湿循环次数与含水率变化幅度对压实红黏土强度与变形特性的影响规律,以期进一步认知红黏土工程性状的干湿循环效应。

## 2 试验土样与方法

### 2.1 试验土样

试验用土样取自广西上林县在建来宾-马山高速公路里程号DK281+200,采用探槽法获得25 cm×25 cm×25 cm土块。根据公路土工试验规程<sup>[17]</sup>对其基本物理、压实与力学特性进行了测试,其中液、塑限含水率采用联合测定法进行,结果如图1与表1~3所示。

从物理特性与物质颗粒组成看,所用土样具有不良的物理性质,黏粒含量高,小于5.0 μm与1.0 μm的黏粒分别为42.2%、32.4%;黏土矿物主要以高岭石为主,孔隙比、液限与塑限较高,塑性指数达32.0,渗透性较低,且具有一定的胀缩性。从其力学指标看,该土具有较低的压缩性,如原状土的压缩系数为0.35 MPa<sup>-1</sup>、压实土的压缩系数小于0.45 MPa<sup>-1</sup>;强度指标也较高,黏聚力与内摩擦角分别大于50.0 kPa与26.0°。可以认为,研究土样是一种具有代表性的红黏土。

击实试验结果表明,该土最大干密度 $\rho_{d,max}$ 为1.56 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率 $\omega_{opt}$ =24.6%,比天然含水率小4.0%,更远小于塑限含水率(41.0%)。

表1 广西红黏土的基本物理指标

Table 1 Basic physical property indexes of Guangxi red clay

| 天然含水率 $\omega$<br>/% | 天然重度 $\gamma$<br>/(kN/m <sup>3</sup> ) | 天然<br>孔隙比 $e$ | 颗粒<br>相对密度<br>$G_s$ | 液限 $\omega_L$<br>/% | 塑限 $\omega_P$<br>/% | 塑性指数<br>$I_p$ | 渗透系数 $K_h$<br>/(m/d)  | 线缩率 $\delta$<br>/% | 无荷膨胀率<br>/% |
|----------------------|--|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| 28.3                 | 18.1                                   | 0.92          | 2.71                | 73.0                | 41.0                | 32.0          | $6.83 \times 10^{-4}$ | 4.7                | 1.2         |

表 2 广西红黏土的粒度组成与矿物成分

Table 2 Particle size distributions and mineral compositions of Guangxi red clay

| 颗粒 (mm) 组成/% |        |        |        |        |        | 矿物组成/% |     |     |    |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|----|
| <0.001       | <0.005 | <0.020 | <0.050 | <0.075 | >0.075 | 石英     | 高岭石 | 绿泥石 | 长石 |
| 32.4         | 42.2   | 59.0   | 75.8   | 85.0   | 15.0   | 7      | 81  | 5   | 7  |

表 3 广西红黏土的力学指标

Table 3 Mechanical property indexes of Guangxi red clay

| 土样  | 含水率 $\omega$<br>/ % | 干密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 压实度<br>/ % | 压缩系数 $a_{1-2}$<br>/MPa <sup>-1</sup> | 压缩模量 $E_{1-2}$<br>/MPa | 有效应力强度指标  |               |
|-----|---------------------|------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|-----------|---------------|
|     |                     |                              |            |                                      |                        | $c'$ /kPa | $\phi'$ / (°) |
| 原状土 | 28.3                | 1.42                         |            | 0.35                                 | 5.41                   | 53.1      | 27.6          |
| 压实土 | 24.6                | 1.50                         | 96         | 0.33                                 | 5.44                   | 78.9      | 25.3          |

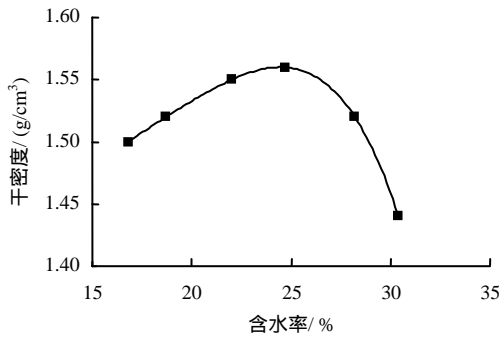


图 1 广西红黏土的击实曲线

Fig.1 Curve of compaction test of Guangxi red clay

2.2 不同干湿循环次数试样的制备方法

现场调研表明，即使气候变化剧烈，填筑在上下路堤的红黏土含水率还是会在最优含水率上下波动。为了尽可能真实反映实际工况，不同干湿循环次数压实土样的含水率变化范围为最优含水率（模拟施工完成状态）至饱和（模拟极端降雨状态）。

三轴固结排水剪切试样尺寸为  $\phi$  39.1 mm $\times$  80 mm，压缩试样尺寸为  $\phi$  61.8 mm $\times$  20 mm。在试样制备过程中，分别使用相应尺寸模具，利用千斤顶分层静压成样，压实度  $K$  控制在 96%，含水率为最优含水率。吸湿过程为首先将压实样装入饱和器中，然后将饱和器放入真空饱和器中抽真空饱和，饱和完成后擦净饱和器外表面水分，称量饱和器与饱和后试样总质量，至此完成由最优含水率吸水增湿至饱和状态过程；脱湿过程为将饱和试样连同饱和器放入恒温恒湿箱脱湿（温度 40 与相对湿度 20%），每隔 2 h 对试样称重，计算含水率值大小，当含水率接近最优含水率脱湿终点时，每 0.5 h 称重一次，直至含水率达到  $\omega_{opt}$  时中止脱湿过程，从而实现 1 次干湿循环。重复上述试验步骤，实现多次干湿循环。

值得说明的是，历经不同干湿循环次数试样，从饱和器取出后都用保鲜膜包裹严密，然后放入保湿缸中静置 48 h，使其含水率趋于均匀一致。

2.3 干湿循环试样含水率变化幅度的控制方法

为了模拟实际工程中，受干旱蒸发气候影响的红黏土含水率常在  $\omega_{opt}$  一定范围内的波动影响，将击实试样含水率控制在  $\omega_{opt} \pm 2\%$  与  $\omega_{opt} \pm 4\%$ 。通过设计滴水吸湿方法，实现更精准地控制含水率。由于土样吸湿均匀化需要合理的静置时间，制样前首先要得到吸湿静置时间。为此，选择 3 组共 21 个不同的平行试样（ $\phi$ 50 mm $\times$ 100 mm、 $K = 96\%$ 、 $\omega = 24.6\%$ ），用小吸管在试样顶部缓慢滴水至目标含水率 26.6%，每隔 1 d 用削土刀沿试样高度方向每隔 20 mm 顺次均匀切割成 5 份，测试试样不同位置的含水率，结果如图 2 所示。

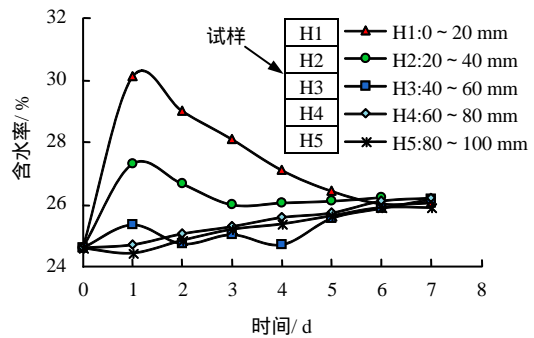


图 2 土样内部不同部位含水率随时间变化

Fig.2 Relationships between time and water content of soil samples at different positions

从中可以看出，增湿初期试样顶部含水率急剧升高，试样底部含水率则变化不明显，当试样密闭静置 6 d 后，试样含水率开始均匀接近目标值。为此，制备  $\omega_{opt} \pm 2\%$  与  $\omega_{opt} \pm 4\%$  含水率变化范围的压实样，均采用滴水吸湿法后在保湿缸静置 6 d 后试验，虽然制样时间较长，但却可以实现增湿幅度的有效控制，提高试验的精准度。

至于不同含水率变化幅度试样的脱湿过程，采

用与不同干湿循环次数试样相同控制方法。

### 2.4 红黏土干湿循环的力学效应试验方法

针对  $K = 96\%$ 、 $\omega = 24.6\%$  的压实红黏土，通过

制备历经不同干湿循环次数与含水率变化幅度试样，采用 SJ-1A 型三轴剪力仪进行三轴固结排水试验(CD)与固结压缩试验，试验方案见表 3。

表 3 红黏土干湿循环的力学效应试验方案

Table 3 Test program for mechanical effect of wetting-drying cycles on red clay

| 干湿循环次数<br>/ 次 | 含水率变化幅度<br>/ %   | 三轴固结排水试验     |                       | 压缩试验           |                       |
|---------------|--|--------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
|               |  | 围压/ kPa      | 试样尺寸/ mm              | 竖向荷载/ kPa      | 试样尺寸/ mm              |
| 0、1、2、5、10    | $\omega_{opt} \pm 0$ 、 $\omega_{opt} \pm 2$ 、 $\omega_{opt} \pm 4$ | 25、50、75、100 | $\phi 39.1 \times 80$ | 50、100、200、400 | $\phi 61.8 \times 20$ |

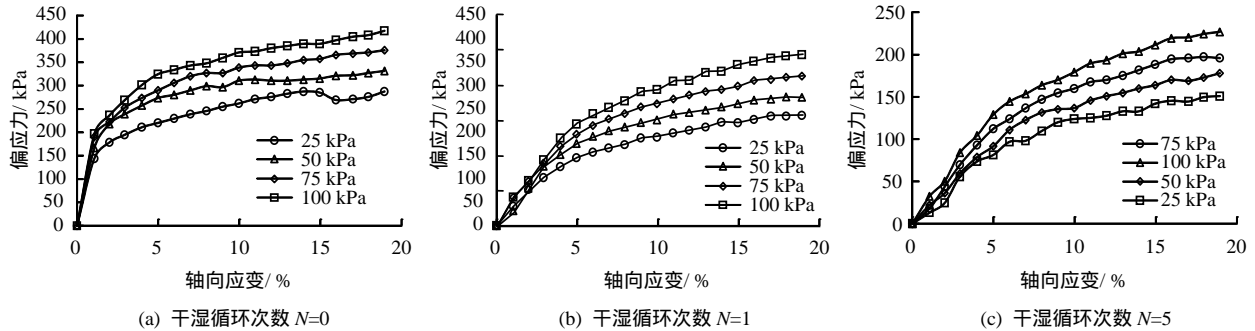


图 3 典型不同干湿循环次数红黏土轴向应变与偏应力关系曲线

Fig.3 Typical relationships between axial strain and deviatoric stress of red clay under various wetting-drying cycles

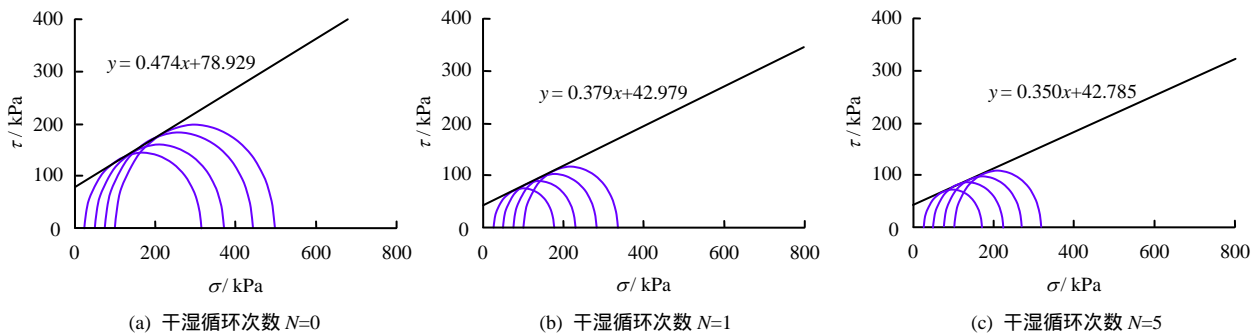


图 4 典型不同干湿循环次数红黏土强度包线曲线

Fig.4 Typical strength envelope curves of red clay under various wetting-drying cycles

## 3 干湿循环次数对红黏土性状的影响

### 3.1 干湿循环次数对红黏土强度特性影响

图 3 为红黏土 ( 初始状态压实度  $K = 96\%$  与含水率  $\omega = 24.6\%$  ) 历经不同干湿循环次数后的 CD 试验典型应力-应变关系，图 4 为对应的强度包线曲线。从中可见，压实红黏土不管是否历经过干湿循环，还是历经多少次干湿循环，其应力-应变关系均呈现应变硬化特征，这与历经重塑压实引起其结构性丧失相关。

从干湿循环次数对压实红黏土强度指标的影响看 ( 见图 5 )，随着干湿循环次数  $N$  的增加，不管是黏聚力  $c$  还是内摩擦角  $\phi$  均呈现不断降低与衰减，说明干湿循环引起了其强度的弱化。另一方面，

在干湿循环不同次数阶段，其衰减幅度与速率有明显不同，主要表现为  $c$  的减小，如第 1 次干湿循环后， $c$  衰减达 45.5%，其后衰减较弱，经历第 2~10 次的干湿循环， $c$  虽然仍呈下降趋势，但变化范围仅为 4% 以内，且渐趋于某一稳定值； $\phi$  随干湿循环次数的变化，总体上与  $c$  具有一定的相似性，并且其衰减幅度与速率随  $N$  变化具有与  $c-N$  关系曲线类似规律，如历经第 1 次干湿循环后  $\phi$  减小幅度为 17.8%。相对于黏聚力衰减程度而言，衰减程度并不十分显著，这也充分体现了岩土体是典型摩擦型材料的共性强度特征，同时也表明红黏土在经历不同干湿循环次数之后，其长期性能会趋于稳定。

为了进一步定量评价干湿循环效应对红黏土强度特性的影响，定义抗剪强度的绝对衰减率为

$$\Delta_{N,\sigma_3} = \frac{|\tau_N - \tau_0|}{\tau_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\sigma_3$  为三轴试验施加的围压； $\tau_0$ 、 $\tau_N$  分别为第 0 次与第  $N$  次循环时的抗剪强度。

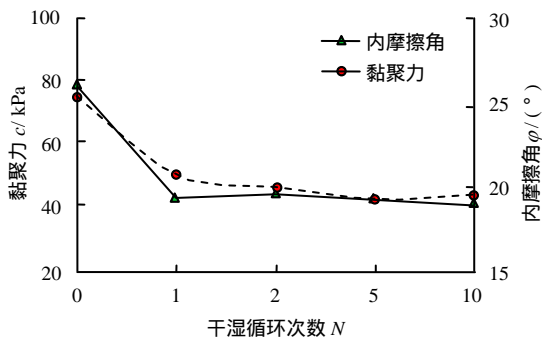


图 5 干湿循环次数对红黏土强度指标的影响  
Fig.5 Influences of wetting-drying cycles number on strength index of red clay

从图 6 可见,不同围压  $\sigma_3$  下红黏土抗剪强度虽均随着  $N$  的增加而衰减,尤其是  $N = 1$  时,抗剪强度衰减最为明显,但在不同的围压下的衰减程度存在差别, $\sigma_3 = 25$  kPa 时,其抗剪强度衰减超过 41.0%, $\sigma_3 = 100$  kPa 时,抗剪强度衰减为 36%,说明在小围压条件下,土样强度随着干湿循环作用次数的增加,绝对衰减更明显,考虑到路基浅表上覆土压力较小,在工程实践中,红黏土不宜直接用于路床与边坡表层的填筑。

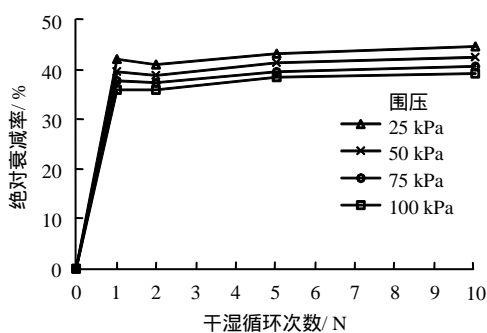


图 6 不同干湿循环次数后抗剪强度的绝对衰减率  
Fig.6 Decay rates of shear strength after various wetting-drying circles

### 3.2 干湿循环次数对红黏土变形特性影响

根据压缩试验结果,选择压缩模量  $E_{1-2}$  作为干湿循环次数对压实红黏土变形特性的评价指标,获得压实度分别 90%、93%与 96%红黏土(初始含水率 24.6%)压缩模量随干湿循环次数的变化关系,如图 7 所示。

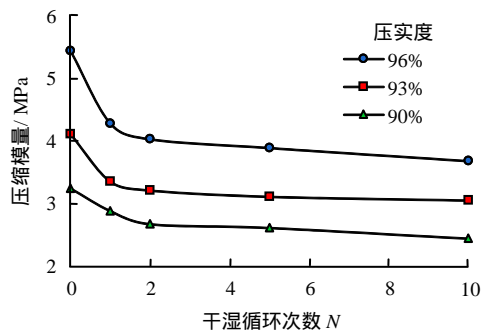


图 7 红黏土的压缩模量与干湿循环次数关系  
Fig.7 Relationship between compression modulus of red clay and wetting-drying cycles number

通过类比图 5 与图 7 的曲线形态发现,不同压实度的红黏土  $E_{1-2}$  随  $N$  增大而减小,总体衰减规律与强度参数类似,均是第 1 次干湿循环后衰减幅度较大,其后衰减逐渐减弱,并趋于某一稳定值。但  $E_{1-2}$  随  $N$  的衰减幅度变化有别于强度参数,表现为  $E_{1-2}$  随  $N$  的衰减幅度小于黏聚力,但大于内摩擦角,说明压实红黏土的强度与变形特性随干湿循环次数  $N$  衰减并不同步。

## 4 干湿循环含水率变化幅度对红黏土工程性状的影响

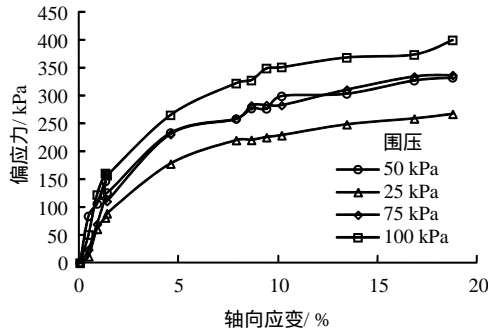
### 4.1 含水率变化幅度对红黏土强度特性影响

为了类比分析历经 1 次干湿循环的压实红黏土(初始压实度 96%、含水率 24.6%)在不同含水率变化幅度条件下的强度特性,图 8 给出了含水率变化范围  $\omega_{opt} \pm 2\%$  与  $\omega_{opt} \pm 4\%$  红黏土三轴应力-应变关系,图 9、10 为根据图 8 获得的不同含水率变化幅度条件下强度参数黏聚力、内摩擦角以及抗剪强度的绝对衰减率。

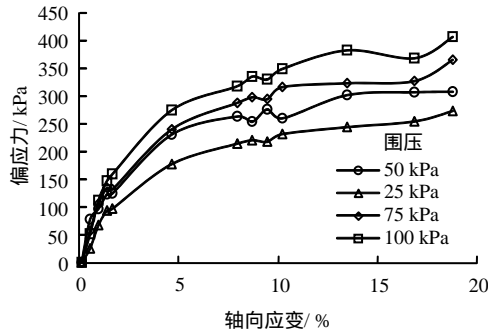
从图 8 可以发现,不同含水率变化幅度影响下,压实红黏土的应力-应变关系仍呈应变硬化型,也就是说,不同干湿循环次数以及含水率变化幅度控制在不大于  $\omega_{opt} \pm 4\%$  范围内,土体不会发生软化形式的破坏。

结合图 9、10 可以看出,干湿循环过程中,压实红黏土的含水率变化幅度对其强度特性具有一定的影响,随着在最优含水率上下变化幅度增大,其强度参数与抗剪强度衰减也相对较大, $c$  有所减小,但  $\phi$  基本不变;即使是  $c$  虽有衰减,但在  $\omega_{opt} \pm 4\%$  变化范围内衰减幅度小于 12.0%,且  $c$  仍然超过 70.0 kPa,保持较高的强度,这反映出压实红黏土具有相对的稳定性。因此,在实际红黏土路基工程建设中,如采用了切实有效的防排水工程与边坡防护





(a) 干湿循环  $N=1$ , 含水率变化幅度  $\omega_{opt} \pm 2\%$



(b) 干湿循环  $N=1$ , 含水率变化幅度  $\omega_{opt} \pm 4\%$

图8 干湿循环不同含水率变化幅度的红黏土轴向应变与偏应力关系曲线

Fig.8 Relations between axial strain and deviatoric stress of red clay under moisture change amplitude during wetting-drying cycles

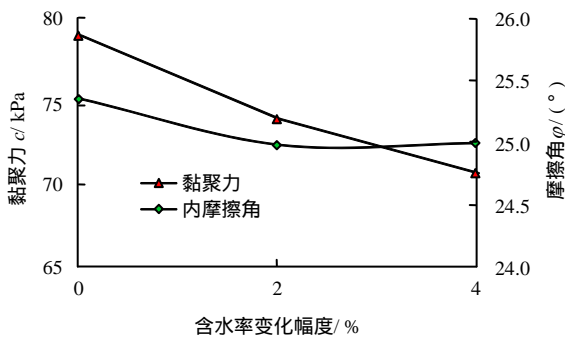


图9 含水率变化幅度对红黏土强度指标的影响  
Fig.9 Influences of moisture change amplitude on strength indexes of red clay

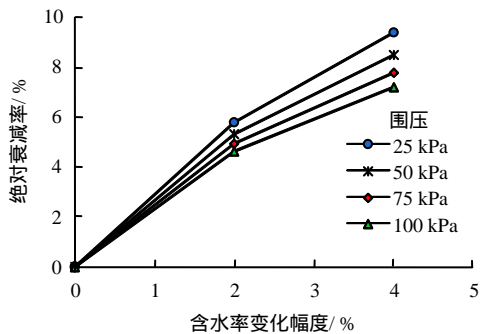


图10 不同含水率变化幅度下抗剪强度的绝对衰减率  
Fig.10 Decay rates of shear strength under various moisture change amplitudes

措施, 可以考虑红黏土直接作为上下路堤堤心的填料应用, 发挥其在有限含水率变化范围内仍具有相对稳定力学性质的潜能。

### 4.2 含水率变化幅度对红黏土变形特性的影响

图 11 为不同压实度红黏土在  $\omega_{opt} \pm 0\%$ 、 $\omega_{opt} \pm 2\%$  与  $\omega_{opt} \pm 4\%$  含水率变化范围内, 历经 1 次干湿循环后  $E_{1-2}$  的变化关系。不难发现, 不同压实度红黏土  $E_{1-2}$  随干湿循环含水率变化幅度的增大而减小, 总体衰减规律与强度特性类似。  $E_{1-2}$  在  $\omega_{opt} \pm 4\%$  含水率变化范围内, 其衰减幅度处于 9.7% ~ 15.3% 之间, 基本与  $c$  衰减幅度 (12.0% 左右) 相当。但类比含水率变化范围很大的干湿循环次数对压实红黏土强度特性与压缩模量的弱化作用, 含水率变化幅度在  $\omega_{opt} \pm 4\%$  范围内, 压实红黏土的力学性状变化相对较小, 具有相对稳定的力学特性。

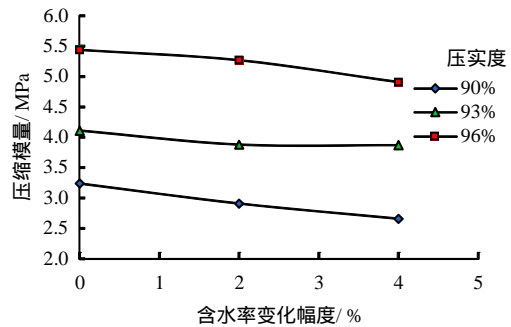


图 11 红黏土压缩模量与含水率变化幅度相互关系  
Fig.11 Relationships between compression modulus of red clay and various moisture change amplitudes

## 5 结 论

(1) 在降雨与干旱蒸发气候条件交错的影响下, 上下路堤土体的含水率通常在最优含水率上下一定范围内波动, 干湿循环过程中, 压实土的含水率变化控制在最优含水率至饱和状态, 更加符合实际工况; 提出的滴水吸湿法并将静置时间设定为 6 d, 可以实现土样增湿幅度的有效控制。

(2) 压实红黏土的强度参数  $c$  与  $\phi$  均随干湿循环次数的增加而衰减, 首次干湿循环  $c$  值衰减最大达 45.5%, 其后衰减较弱并趋于稳定;  $\phi$  衰减相对较小, 首次干湿循环的衰减幅度为 17.8%。  $E_{1-2}$  随干湿循环次数的总体衰减规律与强度参数类似, 但整体衰减幅度小于  $c$  而大于  $\phi$ , 且红黏土在小围压下的抗剪强度随干湿循环衰减更加显著。

(3) 压实红黏土随着在最优含水率上下变化幅度增大, 其强度参数、抗剪强度与压缩模量  $E_{1-2}$  衰减也相对增大, 但衰减程度均较小, 主要表现为  $c$

与  $E_{1-2}$  略有减小,  $\varphi$  基本不变, 含水率在  $\omega_{opt} \pm 4\%$  变化范围内, 压实红黏土具有相对稳定的力学特性。因此, 如采用了切实有效的防排水工程与边坡防护措施, 可以考虑红黏土直接作为上下路堤堤心的填料应用。

### 参 考 文 献

- [1] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568 - 572.  
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 568 - 572.
- [2] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141 - 161.  
KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(5): 141 - 161.
- [3] GIDIGASU M D. Laterite soil engineering: pedogenesis and engineering principles[M]. [S. l.]: Elsevier Scientific Pub Co., 1976.
- [4] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 851 - 855.  
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 851 - 855.
- [5] HORPIBULSUK S, SUDDEEPONG A, CHAMKET P, et al. Compaction behavior of fine-grained soils, lateritic soils and crushed rocks[J]. **Soils and Foundations**, 2013, 53(1): 166 - 172.
- [6] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065 - 1073.  
KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 1065 - 1073.
- [7] 易进来, 胡甜, 赵健, 等. 干湿循环增湿与脱湿过程中高液限黏土强度变化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2011, 8(3): 39 - 43.  
YI Jin-lai, HU Tian, ZHAO Jian, et al. Change of high liquid limit clay intensity during humidification[J]. **Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science)**, 2011, 8(3): 39 - 43.
- [8] 胡甜. 干湿循环下长沙绕城高速公路典型路基土软化特性试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.  
HU Tian. Experimental study on softening characteristic of typical subgrade soil of Changsha round-the-city expressway under wet-dry cycle[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.
- [9] 盛岱超, 张升, 李希. 高速列车与路基冻胀相互作用机理[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2186 - 2191.  
SHENG Dai-chao, ZHANG Sheng, LI Xi. Effects of train loads on frost heave of embankments[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(12): 2186 - 2191.
- [10] 杨和平, 王兴正, 肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949 - 954.  
YANG He-ping, WANG Zheng-xing, XIAO Jie. The influence of dry-wet cycles effect on strength characteristics of Nanning expansive soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(5): 949 - 954.
- [11] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936 - 1941.  
YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(11): 1936 - 1941.
- [12] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797 - 3802.  
LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3797 - 3802.
- [13] 孙德安, 黄丁俊. 干湿循环下南阳膨胀土的土水和变形特性[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 115 - 119.  
SUN De-an, HUANG Ding-jun. Soil-water and deformation characteristics of Nanyang expansive soil after wetting-drying cycles [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.1): 115 - 119.
- [14] ESTABRAGH A R, PARSAEI B, JAVADI A A. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil[J]. **Soils and Foundations**, 2015, 55(2): 304 - 314.
- [15] PINEDA J A, ROMERO E, SHENG D, et al. Shear strength degradation in claystones due to environmental effects[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(6): 493 - 501.
- [16] 黄丁俊, 张添锋, 孙德安, 等. 干湿循环下压实红黏土胀缩特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 79 - 86.  
HUANG Ding-jun, ZHANG Tian-feng, SUN De-an, et al. Experimental study of swell-shrinking behaviour of compacted laterite after wetting-drying cycles[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2015, 42(1): 79 - 86.
- [17] 交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E40-2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.