

循环振动作用下残积土动力变形特性试验研究

尹松^{1,2}, 孔令伟¹, 杨爱武³, 穆坤¹, 王韬³

(1. 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 武汉 430071;

2. 中原工学院 建筑工程学院 郑州 450007;

3. 天津市软土特性与工程环境重点实验室 天津 300381)

摘要: 为研究压实残积土在循环荷载作用下的变形特性, 对不同含水率压实残积土进行改变围压及轴向动应力幅值条件的动三轴试验, 得到了不同物理力学条件下土的动应力-应变关系滞回曲线、累积塑性应变发展规律曲线及骨干曲线, 分析了动弹性模量随应变的衰变规律, 探究了含水率、围压及动应力幅值等因素对试验结果的影响。结果表明: 当累积塑性应变达到一定值时, 压实残积土变形随动应力幅值 σ_d 的增大增幅明显, 但最终表现为弹性安定行为, 该特性随含水率的增加逐渐减弱; 含水率增加不利于土样变形稳定, 而提高围压可抑制该趋势。另外, 增湿会加快模量的衰减, 并降低残余模量, 围压对衰变规律的影响随应变的增大逐渐减小。研究可为花岗岩残积土作为路基填料的施工过程及土体改良提供技术参考。

关键词: 花岗岩残积土; 循环荷载; 含水率; 累积塑性变形; 动弹性模量

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.11.035

Tests for dynamic deformation characteristics of residual soil under cyclic loading

YIN Song^{1,2}, KONG Lingwei¹, YANG Aiwu³, MU Kun¹, WANG Tao³

(1. State Key Lab of Geo-mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture,

Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 3. Key Laboratory of Soft Soil

Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300381, China)

Abstract: In order to study deformation characteristics of compacted residual soil under cyclic loading, dynamic tri-axial tests for compacted residual soil with different moisture contents, confining pressures and amplitude conditions were conducted. Hysteresis loops of soil dynamic stress versus strain, development law curves of cumulative plastic strain and skeleton curves of soil under different physical and mechanical conditions were obtained. The decay law of dynamic elastic modulus versus strain was analyzed. The influences of moisture content, confining pressure and dynamic stress amplitude on the test results were explored. The results showed that the deformation of compacted residual soil increases significantly with increase in σ_d when the cumulative plastic strain reaches a certain value, but the final behavior of its deformation is an elastic stable one, this characteristic is weakened gradually with increase in water content; increase in water content is not conducive to the deformation stability of soil but increase in confining pressure can suppress this trend; in addition, increase in water content can speed up a delay of modulus and reduce residual modulus; the influence of confining pressure on the decay law of modulus decreases gradually with increase in strain. This study provided a technical reference for the construction process of granite residual soil as roadbed filler and soil improvement.

Key words: granite residual soil; cyclic loading; moisture content; cumulative plastic deformation; dynamic elastic modulus

花岗岩残积土在我国东南部地区分布广泛^[1]。天

然状态下表现为高液限、大孔隙比等较差的物理特性和高强度的较优力学特性异常组合^[2], 属区域性特殊土, 其工程特性的研究一直受到研究者的关注。随着我国交通事业的发展, 穿越残积土分布带工程逐年增加, 对其工程特性进行深入研究, 合理化资源利用具有重要的经济价值和社会意义。

基金项目: 国家自然科学基金(41372314; 11672320); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-122)

收稿日期: 2016-01-27 修改稿收到日期: 2016-04-04

第一作者 尹松 男, 博士生, 1987年生

通信作者 孔令伟 男, 研究员, 博士生导师, 1967年生

由于残积土具有均匀性差的特点,为了保证工程质量,常采用重塑压实处理,降低孔隙比以增强颗粒嵌挤能力,达到保证材料的均匀性的目的^[3]。目前在针对重塑花岗岩残积土和全风化花岗岩物理、力学特性及工程应用方面,国内外研究者已经取得了一定的研究成果。如 Taha 等^[4]通过室内试验评价了夯实残积土作为土质褥垫材料的适用性。Rao 等^[5]研究了干湿循环效应对压实残积土崩解特性的影响,认为干湿循环过程可降低土的崩解趋势,增强其膨胀性。在花岗岩残积土和全风化花岗岩路用性能方面,李志勇等^[6]根据全风化花岗岩重复加载试验,提出了采用动态特性评价公路路基填料的方法,并予以应用;周德泉等^[7]通过室内及现场试验研究,得到了花岗岩残积土路基沉降及累积变形随压实遍数的发展规律和受荷后的湿化特性,提出了现场土体压实过程中增加压路机能量比增加压实次数更为有效的建议。

可见,对于花岗岩残积土或全风化花岗岩的工程应用已经得到了广泛的重视,特别是在其路用性能方

面,研究者们已经从矿物组成、物理特性、水敏性及其改良土静动力学特性方面展开了深入探讨。但对于该类材料直接作为填料应用还应注意环境和动力荷载对路基土体动力特性影响,针对地区环境和施工、营运期间车辆荷载共同作用下路基土体的变形特性展开研究,以保证路基服役期内的稳定性。

为此,本文根据残积土分布地区气候特点,研究湿化环境与循环荷载耦合作用下土的动力变形特性及其刚度特性,分析含水率、应力幅值及围压对动力变形特性的影响,探讨各因素的影响机制,为该类土体的工程应用提供技术积累。

1 土样性质及试验方法

1.1 土样性质

试验土样取自广东省台山市水步镇境内,取样场地为花岗岩残积土区丘陵地貌,取土深度为 2.0~4.0 m,土样基本物理力学指标及级配曲线如表 1 与图 1。

表 1 花岗岩残积土的物理力学特性指标

Tab. 1 Physical and mechanical properties of residual soil

| 比重 $G_s / (g \cdot m^{-3})$ | 含水率 $w / \%$ | 液限 $w_L / \%$ | 塑限 $w_P / \%$ | 塑性指数 I_p | 自由膨胀率 $\delta_{ef} / \%$ | 颗粒组成 / % | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|------------|--------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | | | | | | 细砾 $> 2 \text{ mm}$ | 砂粒 $0.075 \sim 2 \text{ mm}$ | 粉粒 $0.075 \sim 0.005 \text{ mm}$ | 黏粒 $< 0.005 \text{ mm}$ |
| 2.77 | 30.20 | 69.9 | 38.3 | 31.60 | 13.1 | 13.5 | 25.5 | 29.6 | 31.4 |

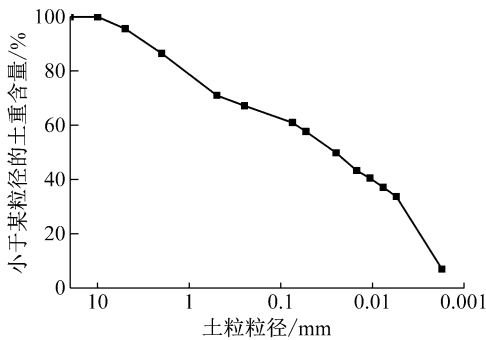


图 1 颗粒级配曲线
Fig. 1 Grading curve

分析可知,该类土具有天然含水率大,液塑限高,自由膨胀率小的特点,通过级配曲线及物性指标可知,该类土属含砂高液限黏土, $C_u > 10$, 颗粒分布范围较大,但 $C_c < 1$, 存在间断级配,颗粒分布呈现“两头多,中间少”的特点。

XRD 衍射矿物成分分析表明(表 2),试验土样主要成分为黏土矿物和石英,含少量黄铁矿及三水铝石,其中黏土矿物以高岭石为主。虽然胀缩性大的矿物成分含量较少,但黏土矿物居多,应注意作为路基填土应用时材料的水稳性。

表 2 花岗岩残积土的矿物成分

Tab. 2 Mineral compositions of residual soil

| 矿物成分(以 100% 计) | | | | | |
|----------------|-----|------|--------|------|-----|
| 石英 | 黄铁矿 | 三水铝石 | 黏土矿物总量 | 黏土总量 | |
| | | | | 高岭石 | 伊利石 |
| 8 | 2 | 3 | 87 | 95 | 5 |

1.2 试验仪器

仪器采用美国 GCTS 公司生产的动态空心圆柱扭剪仪,具有全自动数据采集系统,数据准确可靠,可以施加循环变化的轴向和扭剪荷载、围压、反压、动荷载,加载波形包括正弦波、三角波、矩形波及自定义波形,振动次数最大可振动十万次以上,最大频率为 20 Hz,轴向静态加载能力为 $\pm 22 \text{ kN}$,动态加载力为 $\pm 20 \text{ kN}$,轴向变形传感器量程为 100 mm,线性精度为 0.25%,满足试验要求。

1.3 制样方法

考虑残积土分部带多雨气候特征,在不同含水率状态下进行试验。为了保证试样均匀性,采用空心圆柱试样,试样尺寸为 200 mm \times 100 mm \times 50 mm,以保证试验加/脱湿过程中具有足够的比表面积,容易达到设

定的含水率状态。试样根据击实试验曲线(图2),在最优含水率下制备92%压实度重塑土样,土样在空心模具内分5层分别捣实后压实。

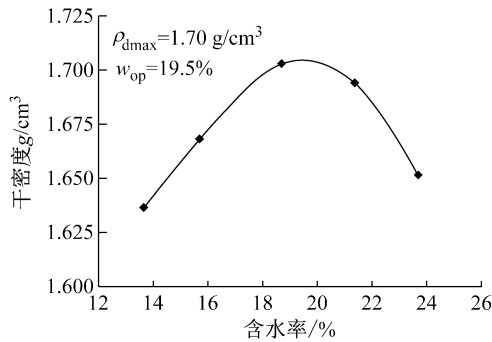


图2 花岗岩残积土击实试验曲线

Fig. 2 Curve of compacting for granite residual soil

为了模拟路基实际施工与运营中湿热气候的影响,对制备好的压实试样进行增/脱湿处理,试样含水率 w 为16%、19.5%(最优含水率)、23%和26.4%(极端饱和状态)。其中,脱湿采用风干法,按一定的时间间隔称量试样总质量后换算成相应的含水率,间隔时间逐渐缩短,达到预定含水率时,为了保证试样均匀性,取同条件下一试样,将其平均分成四等份,测试干密度及含水率差异,干密度差异小于0.5%及含水率差异小于0.3%时方可应用。同样,增湿过程采用喷水增湿法,首先将试样缠绕滤纸条(图3),然后进行喷湿,当达到预定含水率时,用保鲜膜进行密封,存放于保湿缸内,72小时后,采用与风干法一样步骤检验土样均匀性,试样满足要求后方可使用。



图3 空心试样

Fig. 3 Hollow soil sample

饱和试样制备包括三个阶段,首先利用仪器自带抽真空装置抽真空2小时,然后将反压管接入蒸馏水中,接入过程应避免空气进入,待装置内连通管水量稳定上升后,将反压管连接仪器,最后将试样安装完毕后进行反压饱和,检测孔隙水压力系数 B ,饱和度达到95%以上后进行试验。

1.4 试验方法

试验分为常含水率不排水不排气试验和饱和和不排水试验。对于常含水率试样,根据空心试样的应力状态^[8],采用内压 p_0 和外压 p_1 相等及等比应力状态固结

(等效于三轴应力状态),待轴向变形稳定后进行循环荷载试验;对于饱和试样,首先在完成饱和过程后固结,应力状态与常含水率试验相同,待排水体积恒定后进行循环荷载试验。

考虑到施工及运营期车辆荷载的影响深度^[9-10],土样固结围压取为30 kPa及50 kPa。轴向加载波形根据室内试验模拟交通荷载的波形函数相关研究成果^[8],采用式(1)中函数模拟轴向加载波形,加载频率 f 为2 Hz,如图4所示。由于路基施工及运营过程中应保证线路平顺,避免过大的局部变形,所以试验过程中逐级增加大动应力幅值,当累积应变超过5%时完成试验。为了避免应力历史的影响,各动应力幅值循环加载试验时,更换相同物理状态试样,确保试样具有相同初始应力条件。

$$\sigma_d = q \left(\frac{1}{2} \cos \frac{4\pi t}{T} - \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

由于 $t = \frac{2n+1}{2}T$ 时 $\sigma_d = \sigma_{dmax}$,所以 $q = \frac{1}{2}\sigma_{dmax}$ 。

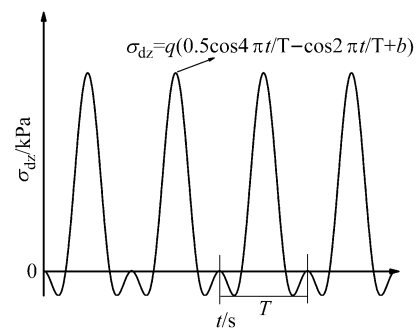


图4 加载波形

Fig. 4 Loading waveform

2 试验结果与分析

2.1 动应力-应变关系

选取相对小动应力幅值下($w = 16%$, $\sigma_{dmax} = 80$ kPa; $w = 19.5%$, $\sigma_{dmax} = 70$ kPa; $w = 23%$, $\sigma_{dmax} = 50$ kPa; $w = 26.4%$, $\sigma_{dmax} = 50$ kPa),荷载作用次数 N 为5、10、50、1 000、1 000、2 000、5 000及9 000的典型试样滞回曲线进行分析,如图5所示。

分析可知,压实残积土在循环动荷载作用下动应力-应变关系出现明显的非线性、滞后性和应变累积性。各应力及物理条件下土样在 $N = 9 000$ 时滞回曲线基本保持稳定,不再向应变发展方向移动或移动微小,每个加载过程中产生的塑性应变逐渐减小,最后接近于0,滞回曲线闭合。另外,从各循环作用过程中滞回曲线形状可以看出,滞回曲线方向有向竖直方向发展的趋势,且滞回圈包围面积逐渐减小,说明随荷载作用次数的增加,压实残积土刚度有所增加,加载过程耗能逐渐减小,有被压密的趋势。循环加载过程中包括塑性

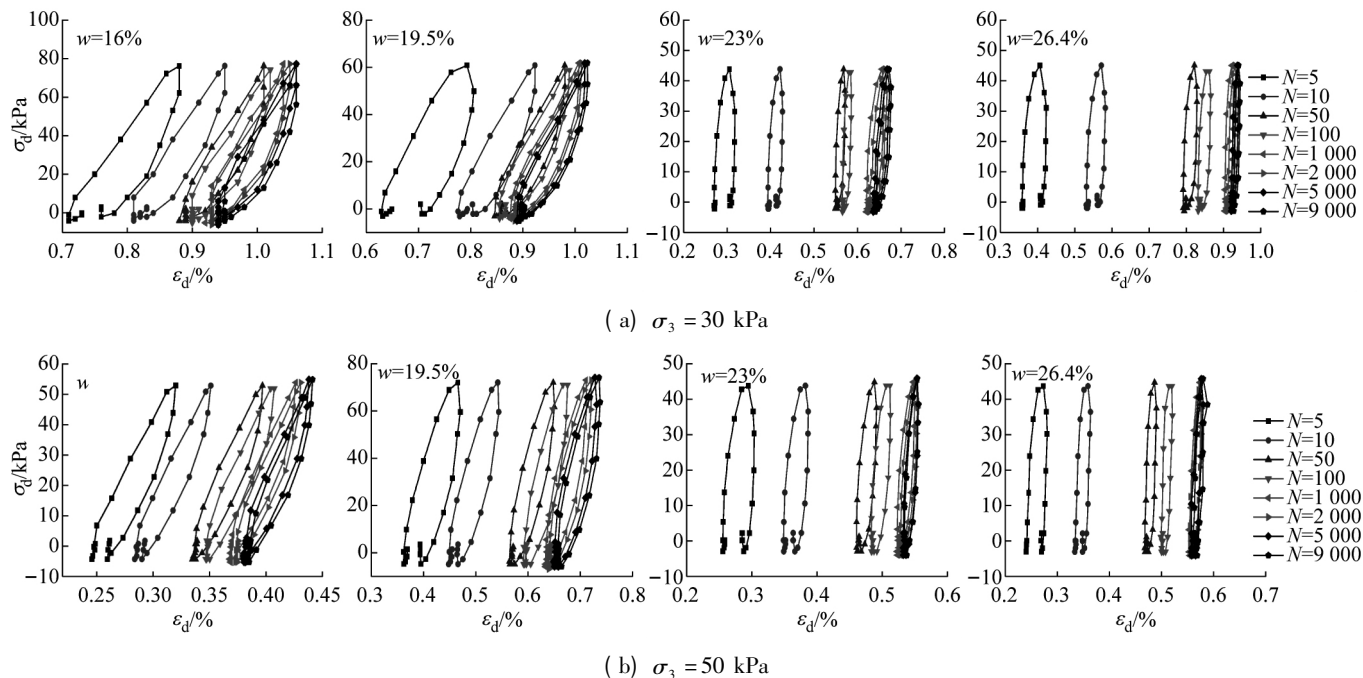


图 5 土的动应力-应变关系

Fig. 5 Dynamic stress-strain relationship

安定行为和弹性安定行为。不同含水率下,土样动应力-应变关系基本相似,但另一方面,随循环荷载作用次数的增加,滞回曲线向应变发展方向的规律有所差异。表现在风干和初始含水率下($w = 16\%、19.5\%$)滞回曲线形状在 $N < 100$ 时前有微小倾倒的趋势,随后便向垂直方向发展直至定;而土样增湿后($w = 23\%、16.4\%$),滞回曲线开始就向垂直方向发展,直至稳定。产生这种现象的原因可能是低含水率下土的初始颗粒排列在较少振次下遭到破坏,为了适应这种变化土颗粒重新排列,其结果会达到更加密实状态;而在相对较高含水率状态下,由于土颗粒间水分的润滑作用,在加载初期颗粒便重新排列,并逐步密实状态发展。从图 5 还可以看出,围压 σ_3 对 $w = 16\%、19.5\%$ 及 23% 的压实土滞回曲线形状影响较小;但对于饱和土体, $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$ 时滞回圈最后趋于重合,而 $\sigma_3 = 30 \text{ kPa}$ 时滞回曲线在加载后期仍向应变发展方向有微小移动,说明饱和状态下,荷载作用条件相同时,高围压应力状态土的变形更易于稳定。

2.2 累积塑性应变发展规律

2.2.1 累积塑性应变与荷载作用次数相关关系

图 6 给出了 $\sigma_3 = 30 \text{ kPa}、50 \text{ kPa}$ 且不同含水率下花岗岩残积土的累积塑性应变 ϵ_a 随荷载作用次数的发展规律($\epsilon_a < 5\%$)。分析可知,当 $w = 16\%$, $\sigma_{dmax} = 260 \text{ kPa}$ 时, ϵ_a 快速增长,试样趋于破坏。总体而言,土的 ϵ_a 随荷载作用次数增加趋于稳定,即使在较大动应力幅值下土样达到控制应变(如 5%),变形也趋于稳定,没有出现典型的“破坏型”与“临界型”。

分析含水率对土的 ϵ_a 发展规律可知,在 $N > 100$

时,风干或初始含水率的土样变形已达稳定,而增湿后,变形虽已趋于稳定,仍有微小发展的趋势。另外, ϵ_a 稳定值的增加随 σ_{dmax} 增大表现出明显的不均匀性,即 σ_{dmax} 值较小时,随着 σ_{dmax} 的增加 ϵ_a 呈稳定增加,增加到一定程度时, ϵ_a 增幅明显,在较高的应变水平下稳定,这种趋势随含水率的增加逐渐减弱。

通过累积塑性应变 ϵ_a 随循环荷载作用次 N 的发展规律可知,各动力幅值下土的变形趋于稳定,根据这个规律可以对稳定型累积塑性应变进行预测,预测模型如式(2)^[11],模型参数见表 3,拟合结果见图 6。

$$\epsilon_a = \frac{aN^b}{1 + cN^b} \quad (2)$$

式中: N 为循环作用次数, $a、b、c$ 为与应力条件及土的性质相关的参数。其中 a/c 值为 ϵ_a 极限值; b 可反映 ϵ_a 发展曲线形态; c 与达到稳定变形作用次数有关,对于稳定型曲线 $c > 0$ 。

通过图 6 可看出,该预测模型对土的 ϵ_a-N 关系拟合效果较好,拟合相关系数 R^2 可达 $95\% \sim 100\%$ 。

分析模型参数可发现,参数 a/c 值随动应力幅值 σ_d 的递增;参数 b 值表征土的 ϵ_a-N 曲线性状的参数,变形速率越大则 b 值越大;参数 c 反映土样达到 ϵ_a 稳定值所需荷载作用次数, c 值越大则稳定越快, c 值越小则累积塑性应变越难以稳定。可以看出,该模型除了可以很好预测稳定型 ϵ_a 极限值,还能够很好地反映不同含水率及围压条件下土样 ϵ_a 的发展趋势。

2.2.2 累积塑性应变极限值与动力幅值的相关关系

利用式 2 拟合得到的各物理力学状态下累积塑性应变极限值随动应力幅值的增长关系如图 7 所示,分

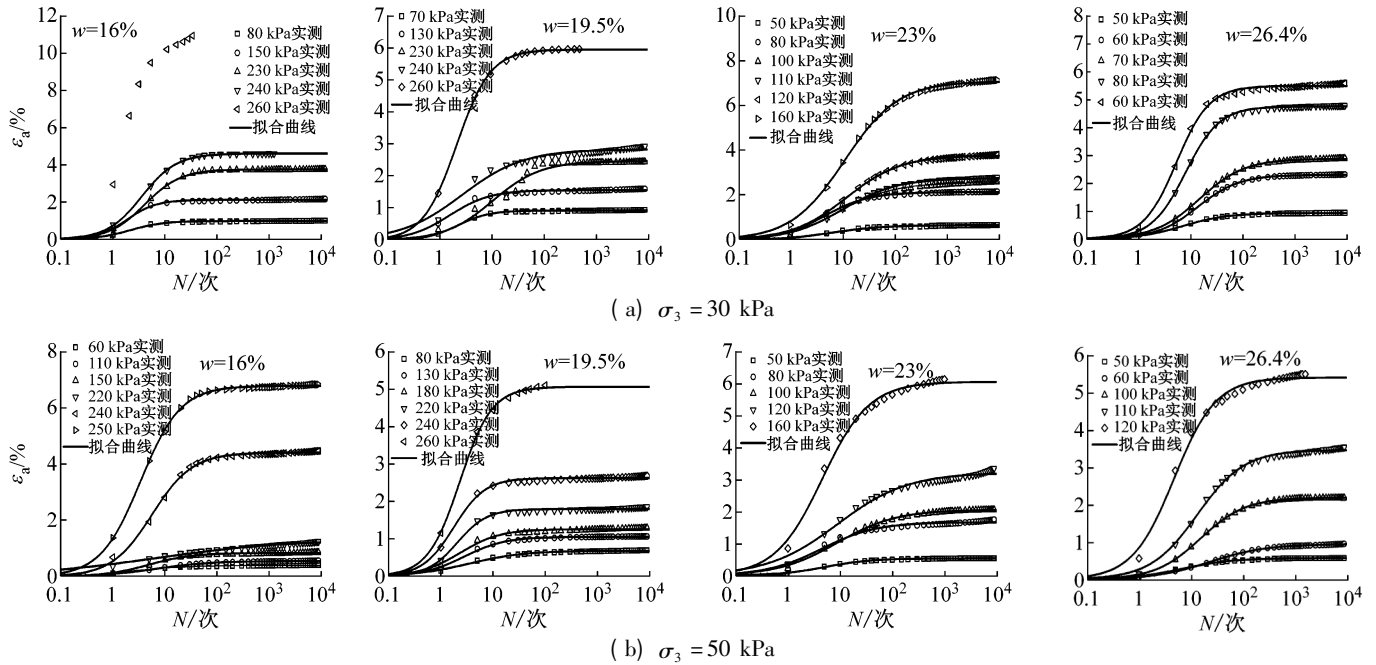


图6 累积塑性应变模型拟合关系与实测值

Fig. 6 Fitting curve and measured values of cumulative plastic

表3 模型拟合参数

Tab.3 Fitting parameters

| σ_3 /kPa | 30 kPa | | | | | | 50 kPa | | | | | |
|-----------------|--------|-----------------|------|------|------|-------|--------|-----------------|------|------|------|-------|
| | w /% | σ_d /kPa | a | b | c | a/c | R^2 | σ_d /kPa | a | b | c | a/c |
| 16.0 | 80 | 0.35 | 1.40 | 0.36 | 0.98 | 0.99 | 60 | 0.21 | 0.80 | 0.51 | 0.40 | 0.98 |
| | 150 | 0.81 | 1.60 | 0.38 | 2.12 | 0.98 | 110 | 0.12 | 0.81 | 0.22 | 0.56 | 0.99 |
| | 230 | 0.64 | 1.30 | 0.17 | 3.76 | 1.00 | 150 | 0.16 | 1.04 | 0.19 | 0.84 | 0.99 |
| | 240 | 0.89 | 1.34 | 0.19 | 4.61 | 1.00 | 220 | 0.69 | 0.34 | 0.52 | 1.33 | 0.98 |
| | - | - | - | - | - | - | 240 | 0.63 | 1.12 | 0.14 | 4.44 | 1.00 |
| | - | - | - | - | - | - | 250 | 1.71 | 1.13 | 0.25 | 6.83 | 1.00 |
| 19.5 | 70 | 0.28 | 1.43 | 0.30 | 0.94 | 0.99 | 80 | 0.24 | 0.82 | 0.35 | 0.69 | 0.99 |
| | 130 | 0.90 | 1.12 | 0.57 | 1.58 | 0.97 | 130 | 0.34 | 1.11 | 0.32 | 1.06 | 0.99 |
| | 230 | 0.26 | 0.95 | 0.10 | 2.49 | 0.97 | 180 | 0.48 | 1.14 | 0.38 | 1.26 | 0.97 |
| | 240 | 1.32 | 0.74 | 0.46 | 2.86 | 0.95 | 220 | 0.60 | 1.52 | 0.33 | 1.81 | 0.97 |
| | 260 | 2.02 | 1.34 | 0.34 | 5.99 | 1.00 | 240 | 1.15 | 1.45 | 0.44 | 2.64 | 0.98 |
| | - | - | - | - | - | - | 260 | 1.55 | 1.42 | 0.31 | 5.09 | 1.00 |
| 23.0 | 50 | 0.12 | 0.92 | 0.18 | 0.65 | 0.98 | 50 | 0.11 | 0.96 | 0.21 | 0.54 | 0.99 |
| | 80 | 0.46 | 1.02 | 0.22 | 2.11 | 0.99 | 80 | 0.50 | 0.82 | 0.30 | 1.67 | 0.96 |
| | 100 | 0.42 | 0.83 | 0.16 | 2.54 | 0.99 | 100 | 0.39 | 0.76 | 0.19 | 2.06 | 1.00 |
| | 110 | 0.39 | 0.84 | 0.14 | 2.73 | 1.00 | 120 | 0.78 | 0.65 | 0.24 | 3.23 | 0.98 |
| | 120 | 0.48 | 0.83 | 0.13 | 3.74 | 1.00 | 160 | 1.40 | 0.97 | 0.23 | 6.07 | 0.99 |
| | 160 | 0.93 | 0.85 | 0.13 | 7.02 | 1.00 | - | - | - | - | - | - |
| 26.4(饱和) | 50 | 0.12 | 1.03 | 0.13 | 0.92 | 1.00 | 50 | 0.10 | 0.89 | 0.18 | 0.57 | 0.99 |
| | 60 | 0.13 | 1.09 | 0.06 | 2.30 | 1.00 | 60 | 0.07 | 0.80 | 0.08 | 0.95 | 1.00 |
| | 70 | 0.19 | 1.00 | 0.07 | 2.87 | 1.00 | 100 | 0.14 | 1.00 | 0.07 | 2.20 | 1.00 |
| | 80 | 0.31 | 1.33 | 0.06 | 4.75 | 1.00 | 110 | 0.29 | 0.96 | 0.08 | 3.47 | 1.00 |
| | 90 | 0.56 | 1.38 | 0.10 | 5.49 | 0.99 | 120 | 1.01 | 1.08 | 0.19 | 5.42 | 0.99 |

析可知,不同含水率下土样 $\varepsilon_a - \sigma_{dmax}$ 关系曲线变化规律有所不同, ε_a 发展初期,随 σ_{dmax} 增长缓慢,当 σ_{dmax} 达到一定程度时,应变发展速率增大;而较高含水率下, ε_a 变化表现为线性快速增长。这反映出,该类材料动力特性易受湿热环境影响,应考虑作为受气候与动荷载

影响较小的下路堤备用填料,但对于路基本体路床与上路堤,因路基本体的含水率变化受气候影响较大且承受一定的较大动应力,应在进行土性改良且满足要求的论证基础上取舍。

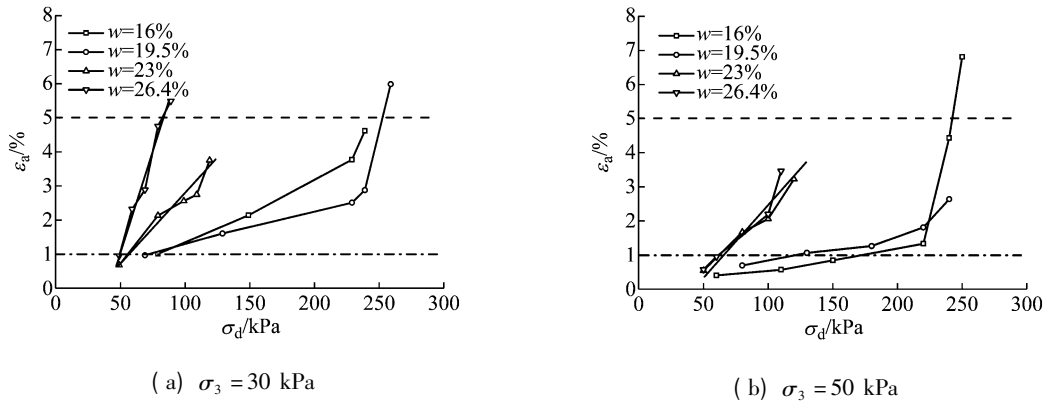


图 7 不同含水率下 σ_d 与 ε_a 关系

Fig. 7 Relationship between σ_d and ε_a under different water content

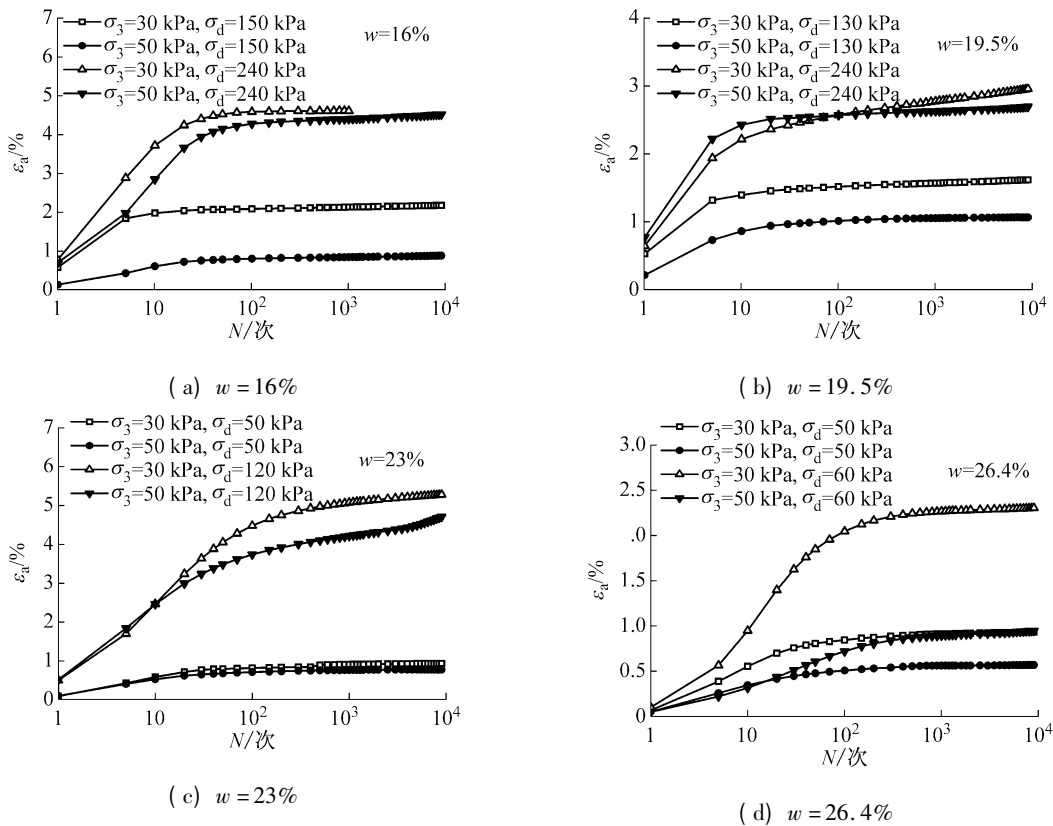


图 8 各围压下土的累积塑性应变

Fig. 8 Cumulative plastic strain under different confining pressures

2.2.3 围压对累积塑性应变的影响

分析围压对累积塑性应变影响可知, $\sigma_3 = 30$ kPa、50 kPa 时 ε_a 随 N 发展趋向相同,但相同动应力幅值 σ_d 下 σ_3 对 ε_a 值影响明显(图 8)。 $w = 16\% \sim 23\%$ 时 σ_3 对较高动应力幅值下土样变形影响随含水率增加而增大,而较低应力幅值时则相反,饱和状态土的 ε_a 受 σ_3 影响均较大。这主要是压实残积土在循环荷载作用下

变形主要分为压密变形和侧向变形,较小 σ_{dmax} 值时,土样变形主要由压密作用产生,含水率增加会增大间颗粒润滑作用,颗粒易于重新排列,容易达到变形稳定状态,此时 σ_3 主要提供侧向约束力,对压密变形影响较小,表现出 σ_3 对变形影响随含水率增加逐渐减小;而较大 σ_{dmax} 值时,土样变形主要为侧向变形,增大 σ_3 会限制土样侧向变形发展,所以 σ_3 对变形之影响随含水

率增加逐渐增大。当土样饱和时,由于孔隙水压力的影响, ε_a 受 σ_3 影响较大。

2.3 动弹性模量分析

2.3.1 骨干曲线

骨干曲线是在一个加、卸载周期内,将不同动应力幅值下滞回曲线中动应力及应变幅值绘出并连接而成的曲线^[12]。图9为 $N=5 \sim 9\,000$ 次的典型土样应力-

应变骨干曲线($\sigma_3 = 30\text{ kPa}$, $w = 16\%、19\%$)。分析可知,在循环荷载作用过程中,由于压密作用,土样应力应变关系曲线曲率逐渐减小,并逐渐向应力轴偏离,初始斜率增大,随着含水率的增加,荷载作用次数对曲线形状的影响更为显著。所以,当选用骨干曲线来描述土的刚度特性时,应考虑循环周次的影响,尤其是受多雨潮湿环境影响下的压实土体。

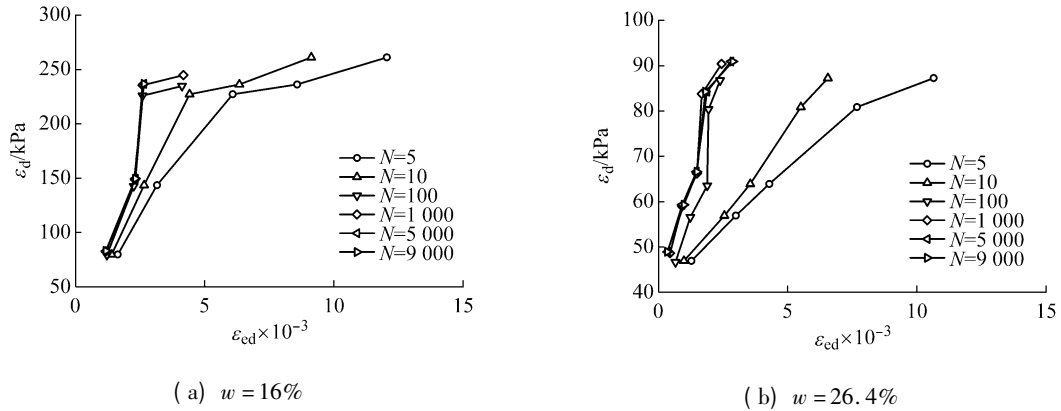


图9 骨干曲线

Fig.9 Backbone curve

2.3.2 动弹性模量衰变规律

由于骨干曲线形态接近双曲线,可以采用 Hardin-Drnevich 模型对土的应力应变关系进行描述,如式(3)、(4)所示, $N=5$ 时模量衰变拟合结果,见图10^[12]。

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{\frac{1}{E_0} + \frac{\varepsilon_d}{\sigma_y}} \quad (3)$$

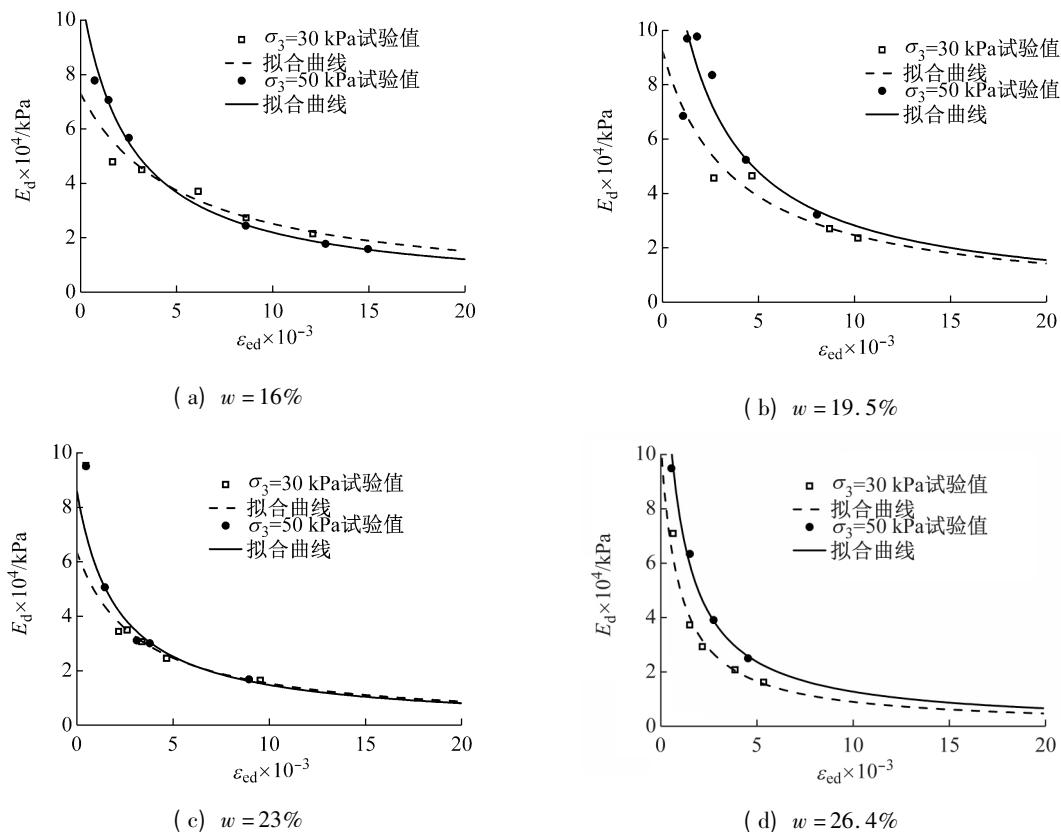


图10 模量衰变曲线

Fig.10 Modulus decay curve

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} = \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{\varepsilon_d}{\sigma_y}} \quad (4)$$

式中: E_0 为初始压缩模量; E_d 为动弹性压缩模量; σ_y 为最大动压应力; σ_d 为动应力幅值; ε_d 为动应变幅值。

从图 10 可看出, Hardin-Drnevich 模型可以较好地描述土的应力应变关系, 还能够反映出动弹性模量 E_d 非线性衰减规律。从图 10 还可以看出 σ_3 对应力应变关系的影响随着 ε_d 的增大逐渐减小, 土样增湿会加速 E_d 衰减, 降低残余模量值 ($E_d-\varepsilon_d$ 曲线水平渐近线), 所以应注意土的初始状态对模量衰变特性的影响。

3 结 论

(1) 加载过程中, 土的变形包含塑性安定行为和弹性安定行为。总体而言, 土样滞回曲线随加载次数增加向竖直方向发展至稳定, 高围压有利于变形稳定。

(2) 土的累积塑性应变呈稳定型发展 ($\varepsilon_a < 5\%$), 稳定型应变预测模型能够很好的拟合土的 ε_p-N 关系。 ε_a 随动应力的增加增幅差异较大, 且差异值在土样增湿后逐渐减小, 土体增湿不利于变形稳定。

(3) 压实花岗岩残积土动力特性易受湿热环境影响, 应考虑作为受气候与动荷载影响较小的下路堤备用填料。对于路基本体路床与上路堤, 应在土性改良且满足要求的基础上取舍。

(4) 在一定动应力幅值作用下, 土体呈硬化趋势。围压对动弹性模量衰减规律的影响随应变的增大逐渐减小。土样增湿会加速模量衰减并降低残余模量值, 应注意土的物理状态对模量衰变特性的影响。

值得指出, 本文主要是结合多雨气候特点, 分析了实际工程中压实机械及车辆荷载对不同含水率压实残积土动力压密特性和模量衰变特性的影响。但对于循环荷载作用下, 非饱和土的动力特性影响机制分析仍需结合非饱和理论进行深入探讨。

参 考 文 献

- [1] 张先伟, 孔令伟, 臧濛. 雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 855-863.
ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, ZANG Meng. Engineering geological characteristics of basalt residual soils in Leizhou Peninsula [J]. Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 855-863.
- [2] 尹松, 孔令伟, 张先伟, 等. 基于自钻式旁压仪的残积土原位力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 688-695.
YIN Song, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei, et al. Experimental study on the in-situ properties of residual soil by self-boring pressuremeter [J]. Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 688-695.
- [3] 李剑, 陈善雄, 姜领发, 等. 应力历史对重塑红黏土动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014(9): 1657-1665.
LI Jian, CHEN Shanxiong, JIANG Lingfa, et al. Experimental study on influence of stress history on dynamic properties of remolded red clay [J]. Geotechnical Engineering, 2014(9): 1657-1665.
- [4] TAHA M R, KABIR M H. Tropical residual soil as compacted soil liners[J]. Environmental Geology, 2005, 47(3): 375-381.
- [5] RAO S M, REVANASIDDAPPA K. Influence of cyclic wetting drying on collapse behaviour of compacted residual soil[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24(3): 725-734.
- [6] 李志勇, 曹新文, 谢强. 全风化花岗岩的路用动态特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2269-2272.
LI Zhiyong, CAO Xinwen, XIE Qiang. Test study of dynamic characteristics of granitic residual soil for highway subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2269-2272.
- [7] 周德泉, 谭焕杰, 徐一鸣, 等. 循环荷载作用下花岗岩残积土累积变形与湿化特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1657-1665.
ZHOU Dequan, TAN Huanjie, XU Yiming, et al. Indoor experimental study for accumulative and wetting deformation of granite residual soil under cyclic loading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(4): 1657-1665.
- [8] 钱建固, 王永刚, 张甲峰, 等. 交通动载下饱和和软黏土累积变形的不排水循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2013(10): 1790-1798.
QIAN Jiangu, WANG Yonggang, ZHANG Jiafeng, et al. Undrained cyclic torsion shear tests on permanent deformation responses of soft saturated clay to traffic loadings [J]. Geotechnical Engineering, 2013(10): 1790-1798.
- [9] 王暄, 张家生, 杨果岳, 等. 重载作用下公路路基及基层动应力测试研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(6): 169-173.
WANG Xuan, ZHANG Jiasheng, YANG Guoyue, et al. Test study on the dynamic stress in roadbed and grass-roots of highway under heavy load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(6): 169-173.
- [10] 冷伍明, 刘文斌, 周文权. 振动荷载作用下重载铁路路基粗颗粒土填料临界动应力试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 25-30.
LENG Wuming, LIU Wenjie, ZHOU Wenquan. Testing research on critical cyclical stress of coarse-grained soil filling in heavy haul railway subgrade [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 25-30.
- [11] 张勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 循环荷载下饱和和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1542-1548.
ZHANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1542-1548.
- [12] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.