

Study on Shakedown Behavior of Subgrade Red Clay under Cyclic Loading

Huarong Liao, Cong Zhang

Guangzhou Guang-An Geotechnical Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou
Email: aronglhr@163.com

Received: Feb. 23rd, 2013; revised: Mar. 9th, 2013; accepted: Mar. 24th, 2013

Copyright © 2013 Huarong Liao, Cong Zhang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper describes the shakedown, hysteretic and plastic behavior of cohesive subgrade soil under cyclic loading. Based on the energy dissipation principle, the various mechanic behaviors of subgrade red clay are discussed by repeated loading test. The test was performed in various conditions of subgrade soil. Different moisture content, stress level, the number of repeated loading and stress path are taken into account during the test. According to the test results, the factors that contribute to various mechanic behaviors of subgrade soil are analyzed in detail. In addition, the study presents a discussion on stress-strain relation and plastic deformation model of subgrade red clay with deformation principle. The mechanism of permanent deformation is explained in light of shakedown and hysteretic behavior.

Keywords: Cyclic Loading; Shakedown Behavior; Hysteretic Behavior; Plastic Mechanic Behavior; Energy Dissipation; Subgrade Red Clay

循环动荷载下路基红粘土安定行为研究

廖化荣, 张 聪

广州市广安岩土工程技术有限公司, 广州
Email: aronglhr@163.com

收稿日期: 2013年2月23日; 修回日期: 2013年3月9日; 录用日期: 2013年3月24日

摘 要: 本文根据设计改装的循环动单轴压缩试验, 通过不同含水率、不同轴向应力水平、不同循环加载次数及不同应力加载路径的试验, 研究路基红粘土的安定行为、迟滞行为以及塑性力学行为等。结合能量耗散的分析, 探讨了路基土在循环动荷载作用下的力学行为发展规律, 分析了影响循环荷载作用下路基红粘土力学行为的主要因素, 从变形机理上探讨土的应力-应变关系以及塑性变形模式, 能明确界定红粘土路基在循环荷载下的临界应力状态范围及所容许的塑性应变, 可有效的预测路面随荷载次数累积的车辙, 以减少因车辆所造成的车辙破坏, 为红粘土路基改良及路面厚度设计提供参考依据, 提升路面管理的效能。

关键词: 循环动荷载; 安定行为; 迟滞行为; 塑性力学行为; 能量耗散; 路基红粘土

1. 引言

循环动荷载在地基或土工建筑物上是很常见的, 这些动荷载与静载相比有明显区别。按荷载持时以及与时间的关系可将其分为 3 类, 即循环荷载(周期荷

载)、冲击荷载与不规则荷载。车辆运行时的振动荷载作为一种特殊的循环荷载, 既不同于静载, 也不同于地震荷载, 路基所受的动荷载既具有一定的循环反复性, 又是一定的应力水平不规则的动荷载, 而是长时间往复的循环动荷载^[1]。

路基土在循环动荷载作用下的反应是一个复杂的增量过程。路基土承受变动载反复作用或受到地下水由下而上或雨水由上而下的侵入,塑性变形逐渐累积,形成路基土软化,进而降低路面承载力,且受过大应力反复加载作用,最终将使面层产生过大的车辙变形,甚至导致路基路面破坏^[2]。

华南地区广泛分布着红粘土,其矿物成分主要由粘土矿物、游离氧化物和残余碎屑等三类物质组成。红粘土具有高含水率、高塑限、高液限、高分散性、高孔隙比,极易失水收缩而产生裂隙等特点。红粘土路基的变形导致路面结构破坏的问题十分突出,如高速公路路面因路基下沉而开裂,因累积的塑性变形产生车辙,地铁的长期沉降等^[2,3]。

本文根据自行设计改装的循环动单轴压缩试验,研究不同含水率、不同轴向应力水平、不同循环加载次数、不同应力加载路径条件下路基红粘土的安定行为、迟滞行为以及塑性力学行为,系统分析了影响循环动荷载作用下路基土力学行为的因素,探讨路基土在循环荷载作用下的力学行为发展规律。

2. 循环动荷载试验

试验采用自行设计改装的循环动单轴压缩试验,研究路基红粘土在循环动荷载作用下的力学行为及影响因素。

2.1. 试验仪器

本试验激振设备采用 JZK-40 电磁式激振器,施加在 $\phi 39.0$ mm 试样上的动应力为 0~135 kPa,不同等级的轴向应力由 1027 信号器以及 YE5873 功率放大器控制。试验所施加的循环反复动应力是由 JZK-40 电磁式激振器自带的力传感器通过 YE5850 电荷放大器放大得到。轴向应变采用 0.5 Mpa 电阻应变式土压力传感器经 YF3 应变放大器获取,传感器置于试样的底部。最终采集的数据经 A/D 由电脑 DASP 分析软件进行处理。试样室 ϕ 为 39.0 mm, h 为 90 mm。

2.2. 试样制备

试样为圆柱型,规格 $\phi 38$ mm \times h76 mm。试样来自广州某高速公路施工场地,为华南路基中常见的红粘土,取样深度 2 m,棕红色粉质粘土,含少量粒径 0.5~1 mm 的石英颗粒。通过室内常规物理力学试验,

得出物理力学性质指标如表 1 所示。

试样具体制备过程及应注意的问题:

1) 先用切土器制成按 $\phi 50$ mm \times h100 mm 的圆柱型试样,再切削制成 $\phi 38$ mm \times h76 mm 的圆柱型试样,保持试样的规则性,使试样上顶面和下底面平整,各处直径保持一致。试样制备好后立即用胶膜密封,防止水分蒸发。试样直径至少应为土颗粒最大粒径的 4~6 倍,高度至少为试样直径的 2 倍。

2) 不同含水率试样的制备:原状土样按 $\phi 50$ \times h100 mm 的规格制备好之后,分别按 23.8%、32.5%、36.4% 三种含水率制备试样。用滴管将所需增加的水量小心滴入土样中,所加的水量应比设定值大 1%,以抵消试样在制备及处理过程中的水分损失。试样制备好之后用胶膜密封,静置 72 小时,使水分混和均匀。再按 1) 制备的过程制备试样。

2.3. 试验参数

为研究不同荷载作用下土体的反应,试验采用应力控制方式,用正弦波加载。试验加载频率为 5 Hz,加载持续时间为 0.1 秒,代表了以 88 km/h 的移动车辆的荷载时间(See 等, 1955)^[4]。土体破坏以试样的轴向周期应变达到 5% 为标准,采用的应变值为每一周期的峰值。

循环动荷载试验以 4 个试样为 1 组,由不同应力水平及不同含水率要求共试验了 17 组试样,试验过程为不排水。试验所使用的具体试样参数见表 2。

2.4. 数据采集

试验过程中的变形量、轴向应力值等相关数据的采集,以加载次数为 5、10、50、100、500、1000、1500、2000、2500、5000、10,000、12,500、15,000、20,000 时,各点取 5 个循环的数据加以平均,例如第 10 个循环加载的数据,选取 8、9、10、11、12 等 5 循环的变形量平均而得。数据资料是用 DASP 资料采集系统采集,采集频率为 100 Hz。

Table 1. Property parameters of natural samples
表 1. 试样的物理力学性质指标

| ρ_0 | ρ_d | G_s | ω | e | S_r | W_L | W_p | I_p | I_L |
|-------------------|----------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| g/cm ³ | | - | % | - | % | % | % | - | - |
| 1.94 | 1.57 | 2.68 | 23.8 | 0.709 | 90 | 34.3 | 20.8 | 13.5 | 0.22 |

Table 2. Testing controls parameter for samples
表 2. 试验所使用的具体试样参数

| 轴向应力 kPa 应力水平% | 含水率% | | |
|-------------------|------|------|------|
| | 23.8 | 32.5 | 36.4 |
| 22.4 | 26 | 20 | 16 |
| 34.7 | 41 | 31 | 24 |
| 41.8 | 49 | 38 | 29 |
| 50 | 59 | 45 | 35 |
| 67.3 | 79 | 61 | 47 |
| 静三轴最大剪应力 kPa | 118 | 90 | 70 |

3. 试验结果

选取循环加载次数为 10, 100, 1000, 5000, 10,000, 20,000 时, 分析其不同含水率、不同应力水平条件下的轴向应力 - 轴向应变。图 1 为试样含水率 23.8% 时, 循环荷载作用下、不同应力水平试验的轴向应力 - 轴向应变曲线; 图 2 是试样含水率为 32.5% 时, 不同应力水平试验的轴向应力 - 轴向应变关系曲线; 图 3 是试样含水率为 36.4% 时, 循环荷载作用下、不同应力水平试验的轴向应力 - 轴向应变关系曲线。

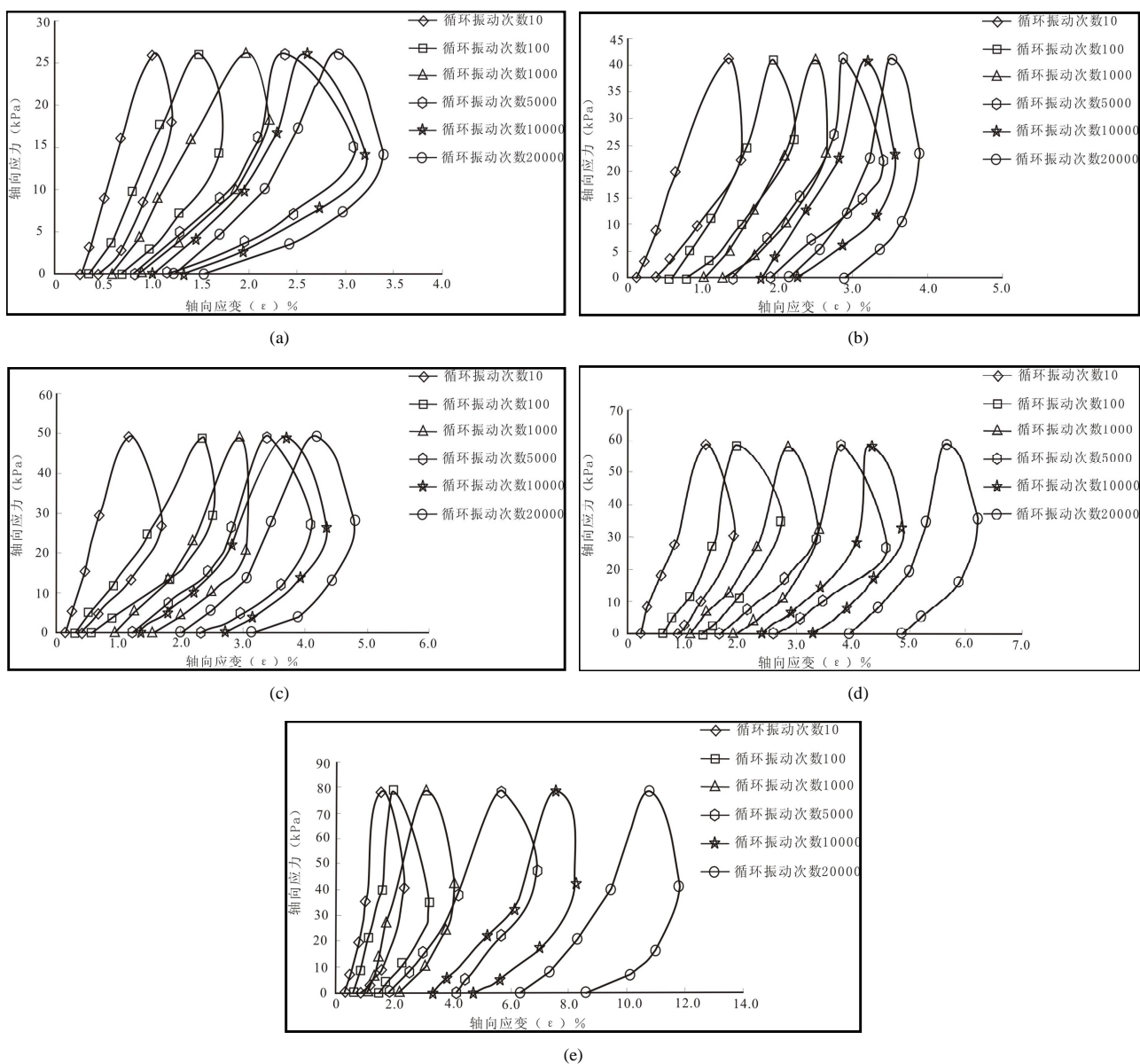
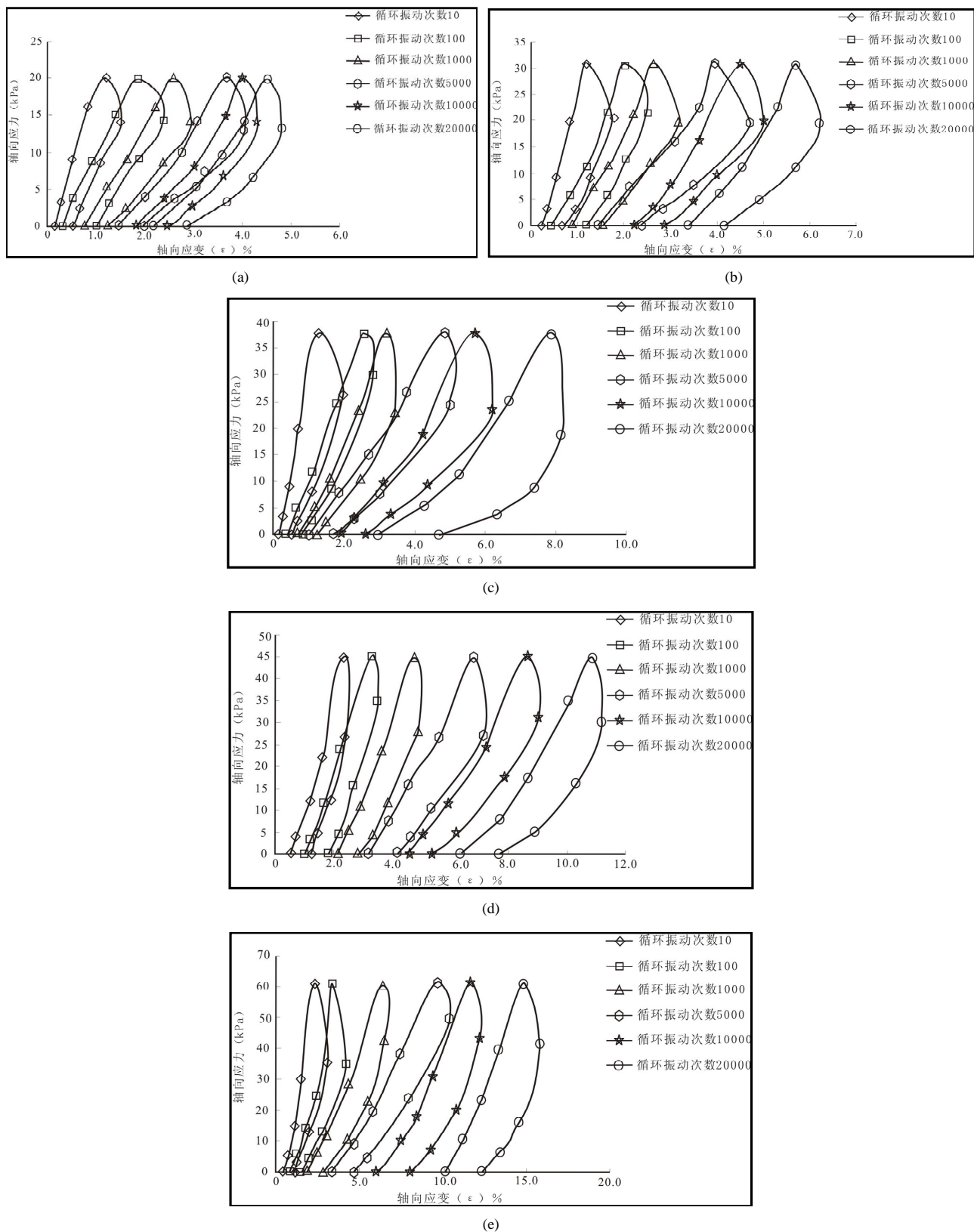


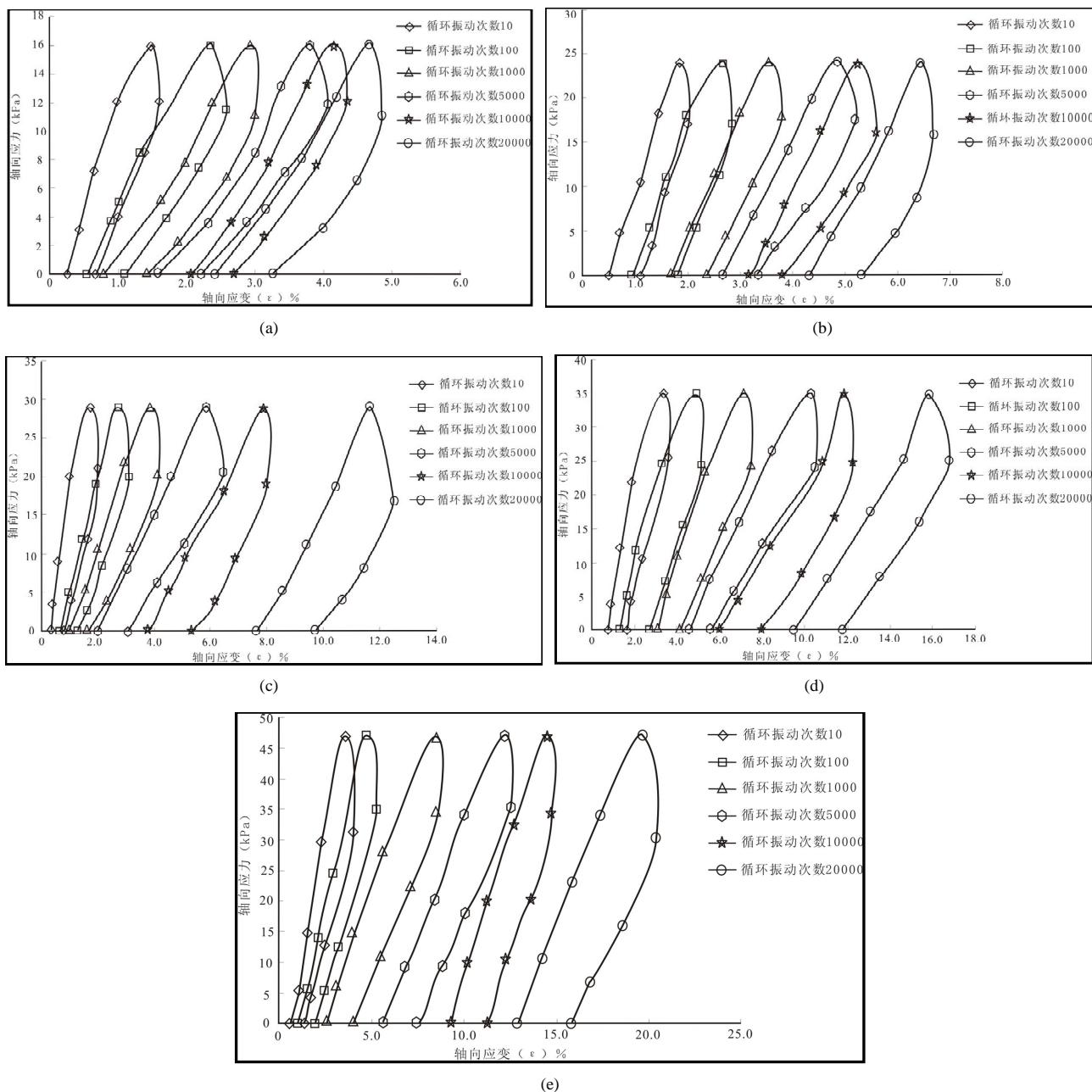
Figure 1. Stress-strain relation under different number of repeated loading and stress level with 23.8% moisture content of samples
图 1. 试样含水率 23.8%、不同循环加载次数、不同应力水平下的轴向应力 - 应变关系曲线

循环荷载下路基红粘土安定行为研究



(a)——应力水平 22.4%；(b)——应力水平 34.7%；(c)——应力水平 41.8%；(d)——应力水平 50%；(e)——应力水平 67.3%。

Figure 2. Stress-strain relation under different number of repeated loading and stress level with 32.5% moisture content of samples
图 2. 试样含水率 32.5%、不同循环加载次数、不同应力水平下的轴向应力 - 应变关系曲线



(a)——应力水平 22.4%；(b)——应力水平 34.7%；(c)——应力水平 41.8%；(d)——应力水平 50%；(e)——应力水平 67.3%。

Figure 3. Stress-strain relation under different number of repeated loading and stress level with 36.4% moisture content of samples
图 3. 试样含水率 36.4%、不同循环加载次数、不同应力水平下的轴向应力 - 应变关系曲线

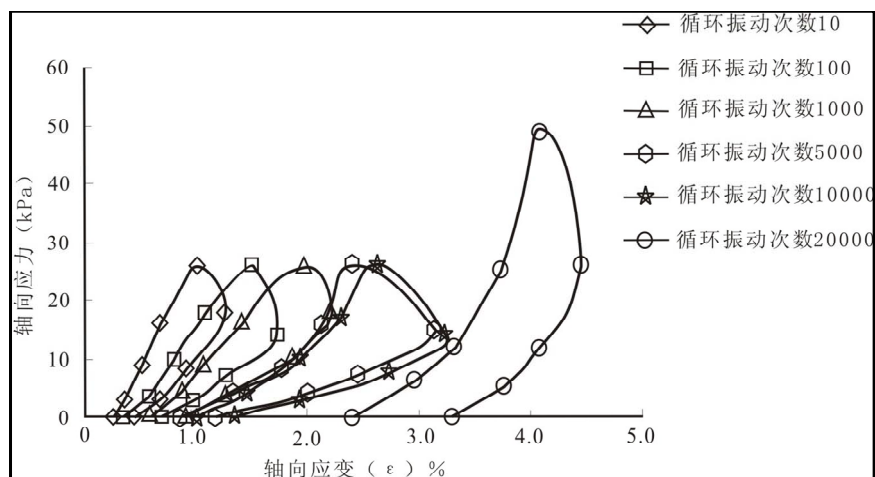
跳跃式加载主要是为了探讨不同加载应力路径对轴向应变的影响，即在循环加载条件下，先在一个低应力水平下加载一定次数后，突然跳跃至更高的应力水平继续加载。本试验选取循环加载次数达 10,000 次时，轴向荷载进行跳跃(图 4)。图 4(a)是含水率为 23.8%时，应力水平从 22.4%跳跃至 41.8%的应力 - 应变关系；图 4(b)是含水率为 23.8%时，应力水平从

34.7%跳跃至 50%的应力 - 应变关系曲线。

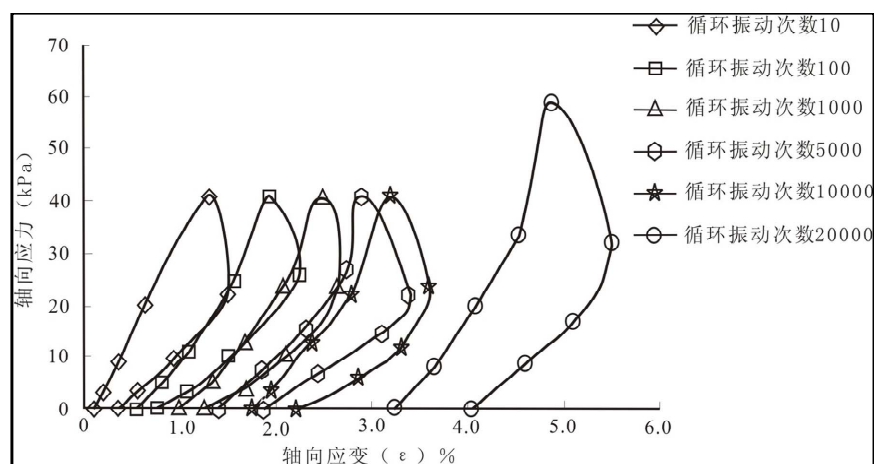
4. 安定行为及试验结果分析

4.1. 安定及迟滞行为概念

Melan 于 1936 年^[5]针对弹塑性(elastic-plastic)和随动硬化(kinematic hardening)材料推导出静态安定理



(a)



(b)

(a)——应力水平从 22.4% 跳跃至 41.8%；(b)——应力水平从 34.7% 跳跃至 50%。

Figure 4. Stress-strain relation under jumping stress level and different number of repeated loading with 23.8% moisture content of samples
图 4. 试样含水率 23.8%、跳跃式加载时不同循环加载次数下的轴向应力 - 应变关系曲线

论。安定概念最初用于描述金属在承受循环反复应力时的力学行为。安定是指结构体在某特定的反复荷载下，所产生的塑性变形会在有限的荷载次数后稳定下来，且在安全界限之内，结构体并不会产生破坏。但应力状态持续增加到某一程度时，塑性变形会随着荷载次数不断地累积，而呈现不稳定状态，直至结构体因过大塑性变形而产生破坏。

安定概念可描述材料在反复荷载下的行为，其中常见的行为有完全弹性行为、弹性安定行为、塑性行为、塑性潜变行为和增量崩溃行为^[6,7]。

路基土在循环反复荷载下的应力 - 应变关系曲线是非线性的，应变在应力撤销之后不可恢复，形成一个迟滞圈。

迟滞圈是能量耗散的表现形式，迟滞圈内的面积代表每次循环载重所损失的能量。若迟滞圈完全稳定(或材料为完全弹性材料)，只要应力维持在弹性范围，将可抵抗无数次的循环荷重，迟滞圈均是闭合的，所产生的任何结构变化为可逆反应，而且不至于导致更大的损坏，其能量未发生损耗。若迟滞圈慢慢由闭合向不闭合发展，且不闭合程度越来越大，表明材料在受力过程中发生了能量损耗，迟滞圈不闭合程度逐渐加大，材料逐渐由弹性向塑性甚至破坏阶段发展。

迟滞圈对于每个加载循环均产生了不可恢复的塑性变形和可恢复的弹性变形。每个迟滞圈的变形过程中，大约有 95% 的能量转化成热能而耗散掉，只有很小的一部分累积下来。

4.2. 试验分析

由循环动荷载作用下得出的应力 - 应变关系曲线, 结合迟滞行为、安定概念, 对红粘土的塑性力学行为进行分析, 区分不同阶段的安定行为。

从图 1~3 可知, 试样在循环反复动荷载作用下均有迟滞现象发生, 即轴向应力达峰时, 对应的轴向应变尚未达到最大, 而是在这之后的某个时刻才达到峰值点。

由图 1 可以看出, 试样含水率为 23.8% 情况下, 当应力水平为 22.4%、34.7% 时, 塑性应变趋于稳定; 当应力水平为 50%、67.3% 时, 塑性应变迅速累积, 最终导致土体发生剪切破坏; 当应力水平为 41.7% 时, 处于临界状态。

试样在含水率 23.8%, 应力水平 22.4%(图 1(a)) 作用下, 当循环荷载 5000 次以内时, 迟滞圈明显朝应变增大的方向移动, 在 5000 次以后, 应变只是略微增长, 直至 20,000 次, 但迟滞圈前移的幅度与前 5000 次循环相比, 减小了很多, 只前移了很小的距离。在前 5000 次加荷过程中, 应力 - 应变关系曲线是不闭合的, 说明发生了明显的不可恢复的塑性变形, 在循环加载 5000 次之后, 迟滞圈呈现闭合趋势, 在某些特定轴向荷载下完全闭合, 并出现了重叠, 说明出现了弹性变形或者是微小的塑性应变。总体上, 塑性应变是逐渐累积的, 塑性变形的增大趋于平缓, 且有略微增大的趋势。在整个加载过程中, 出现了弹性安定行为、塑性安定行为以及塑性潜变安定行为。循环加载初期, 有较大的塑性应变产生, 但随后塑性应变缓慢增加且渐趋稳定, 接近塑性潜变安定行为。在应力水平为 34.7% 时(图 1(b)), 情况与此类似, 也属塑性安定行为。

图 1(c) 所示的是试样在含水率为 23.8%, 应力水平为 41.8% 时的轴向动应力 - 轴向应变关系曲线。土在循环荷载情况下, 初期的迟滞行为与塑性安定行为相类似, 但迟滞圈更加明显的朝应变增大方向移动。迟滞圈彼此重叠的区域逐渐减小, 并且没有闭合的迟滞圈出现, 说明塑性应变的累积在逐渐增大, 出现了明显的永久变形。与应力水平 22.4% 和 34.7% 时的塑性行为相比, 塑性应变增大的趋势更加明显, 随着循环加载次数的增加, 塑性应变持续累积, 接近增量崩溃行为, 属塑性潜变安定行为。

在应力水平 50% 时(图 1(d)), 这种情况下土的迟滞行为在变形初期与前述三者相似, 不同的是在变形后期, 迟滞圈完全不重叠, 且明显的向塑性应变增大的方向移动。当循环加载次数达 20,000 次时, 土的轴向应变已经超过 5%, 出现了剪切破坏。塑性应变迅速累积, 且很快增大。若再持续施加循环荷载, 土体最终将发生剪切破坏。这一现象与安定概念中的增量崩溃行为相符, 为增量崩溃行为。

在应力水平 67.3% 时(图 1(e)), 土在循环反复荷载作用下, 塑性应变即迅速累积, 塑性应变增大幅度明显, 并且在较少的循环次数下土体即很快达到剪切破坏。试样在这种应力水平作用下, 最终完全破坏, 强度丧失。

图 2 为试样在含水率为 32.5% 时不同应力水平下的轴向应力 - 轴向应变关系曲线。从图 2 中可以看出, 各应力水平下土的迟滞行为、塑性应变行为等均与试样含水率为 23.8% 时各应力水平加载的情况相似。但随着土含水率的升高, 在相同的循环加载条件下, 塑性应变是增大的, 且塑性应变向随循环加载次数的增加, 向塑性应变增大方向移动的幅度也增大, 塑性应变累积亦比相同循环加载条件下、低应力水平时的累积速度快。在应力水平为 22.4% 时(图 2(a)), 试样即直接进入塑性潜变安定行为, 而没有塑性安定行为过程; 当应力水平为 34.7% 时(图 2(b)), 土进入增量崩溃阶段, 开始出现破坏; 当应力水平为 41.8%、50%、67.3% 时(图 2(c)~(e)), 试样很快进入剪切破坏状态。

图 3 为试样在含水率为 36.4% 时不同应力水平下的轴向应力 - 轴向应变关系曲线。各应力水平下土的迟滞行为、塑性应变行为等均与试样含水率为 32.5% 时各应力水平加载的情况相似。试样在应力水平为 34.7% 时(图 3(b)), 试样开始进入增量崩溃状态。

从以上分析可知, 在不同含水率条件下, 试样在循环动荷载作用下的塑性力学行为、迟滞行为以及安定行为相类似, 但在不同含水率时, 试样开始进入增量崩溃状态的应力水平不同。

图 4 所示的是土在含水率为 23.8%, 不同循环加载应力路径下, 土的塑性变形行为。图 4(a) 是应力水平从 22.4% 跳跃至应力水平 41.8% 的情况, 图 4(b) 是应力水平从 34.7% 跳至 50% 时的情况, 两种情况都是在循环加载至 10,000 次时突然跳跃。从图中可以看出, 从低应力水平跳跃至高应力水平时, 迟滞圈明显

增大,产生的塑性变形也明显增大。

将图 4(a)与图 1(a)、1(b)作比较,可以看出,在相同含水率条件下,在循环加载 10,000 之前,即应力水平较低时,图 4(a)的迟滞行为与图 1(a)、1(b)相同加载条件下的迟滞行为相似,波动不大;在循环加载 10,000 之后,也就是从低应力水平跳跃至高应力水平时,图 4(a)的迟滞行为与图 1(c)相应循环加载条件下的迟滞行为相比差异较大,应力水平跳跃后产生的塑性变形明显小于相同加载条件下应力水平不跳跃所产生的塑性应变,迟滞圈向塑性应变增大方向移动的幅值较小,塑性应变的累积也较慢。图 4(b)与图 1(b)、图 1(d)作比较,所产生的迟滞行为、塑性变形情况与上述情况相类似。

将图 4 与图 1、图 2 和图 3 作比较,而在相同应力水平下,不同含水率的试验出现的安定行为类似,在循环加载次数 10,000 次之前,即应力水平跳跃之前,迟滞行为相似,波动不大;但在应力水平由低跳跃至高时,与上述相同含水率条件下跳跃产生的行为相似。

5. 结语

1) 在循环荷载作用下,路基土出现明显的安定行为,且大致分为弹塑性安定行为、塑性潜变至崩溃安定行为、破坏行为 3 大类。

2) 路基土承受循环荷载作用时,塑性力学行为相对于所施加的循环动荷载有一个滞后的过程,是一种迟滞行为。随着循环加载次数的增加或试样含水率的增大或应力水平的提高,迟滞圈增大,能量耗散现象越明显,塑性永久变形显著增大。

3) 永久变形随循环加载次数的增加而增加。循环荷载作用初期,永久变形的增加幅度较小;当达到一

定加载次数后,永久变形增加的趋势会突然变大,直至土体发生剪切破坏。相同含水率、循环加载次数相同的情况下,永久变形随应力水平的提高而增大。相同应力水平、循环加载次数一样的情况下,永久变形随含水率的升高而增大,且较大含水率的土会产生较大的永久变形。

4) 应力路径对循环荷载作用下土的塑性力学行为有较大的影响。应力加载路径改变时,产生的迟滞圈大小发生改变。当应力水平跳跃式增加时,迟滞圈变大,能量损耗增大,导致塑性应变累积以及永久变形增大。据此可明确界定红粘土路基在循环荷载下的临界应力状态范围及所容许的塑性应变,可有效的预测路面随荷载次数累积的车辙,以减少因车辆所造成的车辙破坏,为红粘土路基改良及路面厚度设计提供参考依据,提升路面管理的效能。

参考文献 (References)

- [1] 汤连生,廖化荣,刘增贤等. 路基土动荷载下力学行为研究进展[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2): 103-112.
- [2] 廖化荣. 红粘土路基循环动荷载下塑性力学行为及预测模型研究[硕士学位论文][D]. 广州: 中山大学, 2004.
- [3] 钟辉虹,黄茂松,吴世明等. 循环荷载作用下软黏土变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 629-632.
- [4] H. B. Seed, C. K. Chan and C. L. Monismith. Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay. HRB Proceedings, 1955, 34: 541-558.
- [5] E. Melan. Theorie statisch unbestimmter ysysteme ausidealplastischen baustoff. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, 1936, 1: 45-195.
- [6] S. Werkmeister, R. Numrich, A. R. Dawson, et al. Deformation behaviour of granular materials under repeated dynamic load. Environmental Geomechanics-Monte Verità, 2002, 2: 1-9.
- [7] S. Werkmeister, A. R. Dawson and F. Wellner. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. Proceedings 80th Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2001: 1-152.