

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.005

循环荷载下动应力累积效应影响因素及机理研究

郑邓衡^{1,2,3,4}, 汤连生^{*1,2,3,4}, 贺云帆^{1,3,4}, 孙银磊^{1,3,4}, 陈浩昆^{1,3,4}

(1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 广州理工学院 建筑工程学院, 广东 广州 510540;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;
4. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 519082)

摘要:为进一步探究循环荷载下路基土中动应力累积效应的影响特征及变化规律,以华南地区典型花岗岩残积土为研究对象,开展了多组室内循环荷载试验。分别研究了不同循环荷载量、加载频率、应力状态及卸荷量对土体中动应力累积效应的影响,并揭示了循环荷载下土体动应力累积效应的发生条件,同时对动应力累积机理进行了初步分析。结果表明:循环荷载量越大,土体中的动应力累积效应更加显著;加载频率越大,土体中残余应力释放越不彻底,其动应力累积效应也越明显;卸荷量越大,试样的峰值应力、残余应力与累积应变逐渐减小,所产生的动应力累积效应越不明显;相较于有侧限三轴应力状态,无侧限单轴应力状态下土体的动应力累积效应更加显著;由整体结果分析可知,土体中的动应力累积现象存在门槛效应,在极低应力水平下不会发生此效应,在较高应力水平下,随着循环次数的增加残余应力会逐渐累积增大,动应力累积效应也越明显,而当循环次数达到一定程度后残余应力最终会趋于一个稳定值;在循环荷载下,土体材料会被压密,刚度随之增大,有利于应力在土体中传递,外荷载能量耗散减小,从而使更多应力波传递至土体内部,与残余应力累积二者作用形成峰值应力累积增加的结果,为削弱土体内动应力累积效应的负面影响提供参考。

关键词:道路工程;动应力累积;循环荷载试验;花岗岩残积土;残余应力

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 12-0035-11

Study on Influencing Factors and Mechanism of Dynamic Stress Accumulation Effect under Cyclic Loading

ZHENG Deng-heng^{1,2,3,4}, TANG Lian-sheng^{*1,2,3,4}, HE Yun-fan^{1,3,4}, SUN Yin-lei^{1,3,4}, CHEN Hao-kun^{1,3,4}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;
2. School of Architectural Engineering, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou 510540, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;
4. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Zhuhai 519082, China)

Abstract: In order to further explore the influence characteristics and variation rule of dynamic stress accumulation effect in roadbed soil under cyclic loading, a series of laboratory cyclic loading tests are carried out on typical granite residual soil in the southern of China. The effects of different cyclic loading, loading frequency, stress state and unloading amount on the dynamic stress accumulation effect in soil are studied, and the occurrence conditions of the dynamic stress accumulation effect in soil under cyclic loading are revealed. At the same time, the mechanism of dynamic stress accumulation is preliminarily analyzed. The

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277142, 42102303); 广东省自然科学基金项目(2019A1515010554); 中国博士后科学基金项目(2019M663241)

作者简介: 郑邓衡(1995-), 男, 广东揭阳人, 博士研究生。(zhengdh7@mail2.sysu.edu.cn)

* 通讯作者: 汤连生(1963-), 男, 江西萍乡人, 教授。(eestls@mail.sysu.edu.cn)

result shows that (1) the greater the cyclic load, the more significant the cumulative effect of dynamic stress in soil; (2) the larger the loading frequency is, the less complete the release of residual stress is, and the more obvious the dynamic stress accumulation effect is; (3) the larger the unloading amount is, the smaller the peak stress, residual stress and cumulative strain are, and the less obvious the cumulative effect of dynamic stress is; (4) compared with the triaxial stress state with lateral limit, the dynamic stress accumulation effect of soil under uniaxial stress state without lateral limit is more significant, this effect does not occur at very low stress level, but at higher stress level, the residual stress will increase gradually with the increase of cycles, and the dynamic stress accumulation effect is more obvious, when the number of cycles reaches a certain degree, the residual stress will eventually tend to a stable value; (5) under cyclic loading, the soil material will be compacted and the stiffness will increase, which is beneficial to the stress transmission in the soil, and the energy dissipation of external load will be reduced, so that more stress waves will be transmitted to the interior of the soil, the peak stress accumulation results from the interaction with residual stress accumulation, that provides a reference for weakening the negative effect of dynamic stress accumulation in soil.

Key words: road engineering; dynamic stress accumulation; cyclic loading test; granite residual soil; residual stress

0 引言

循环荷载对路面路基结构的负面影响主要源于荷载的反复性,路基土在反复荷载作用下的永久塑性变形和残余应力将会加速地基结构的蠕变变形,引起路面沉降及交通安全事故^[1-5]。循环荷载下土体的应变累积行为已被广泛研究,但对于土体内的动应力累积现象关注相对较少^[6-10]。在循环荷载作用下,道路结构的各层材料会产生残余应力,残余应力会累积并叠加至后续的动应力响应中,使得交通荷载下土体的动应力增大^[11-14]。

近年来,一些模型试验、场地试验记录了路基土中相关的动应力累积现象:Tang等^[15]监测了地铁行车荷载下软黏土的应力-应变响应;Shoop等^[16]监测了重卡车荷载下道路黏性土的动力响应;汤连生等^[17]开展了小尺寸模型试验,并记录了动附加应力的时程曲线,以上监测数据展示了土中残余应力随着加载次数的增加而累积的现象。Wiermann等^[18]的场地试验结果显示,循环行车荷载作用下,黏性土中峰值应力随加载次数的增加而增加;还有一些学者开展了全尺寸模型试验研究,模拟飞机跑道下的高塑限粉土路基,公路的水泥稳定土基层和公路道路的全风化花岗岩路基土在反复荷载下的动力响应,试验结果显示路基土中的峰值应力在最初的几个加载周期中逐渐增加^[19-21];Thakur等^[22]在路面基层上开展循环平板加载试验,试验结果显示砂质黏土路基界面中的峰值应力在最初的几个加载周期中快速

增加,随后峰值应力稳定至某值或持续增加直至破坏。Sun等^[23]在路面基层上开展循环平板加载试验,并监测路基土中的竖向应力响应和侧向应力响应,发现在较低循环荷载作用下,土中应力响应相对稳定,但在较大循环荷载作用下,土中竖向和侧向应力响应明显随循环次数的增加而增长;Tafreshi等^[24]在橡胶颗粒混合土上开展循环平板荷载试验,监测得到土中峰值应力响应随着循环加载次数的增加而增长;李彰明等^[25-27]在应用动力固结法加固软土地基时,监测到地基中总应力和孔压的响应均滞后于夯击的加载和卸载,土中残余应力和有效应力随夯击次数的增加而增加,认为动力固结法可将软土中部分结合水转换为自由水,实现排出更多水和更大程度固结,暗示了土中残余应力产生和累积有利于施工阶段土体固结。上述的研究都侧面表明路基土、天然地基土在反复荷载下会发生动应力累积效应,即残余应力随荷载次数的增加而累积增长,并叠加至后续加载引起的附加应力累积中。

虽然在上述研究中记录了路基土中残余应力累积增加和峰值应力持续增长的现象,但这种路基土动应力累积现象的发生条件与影响因素等方面尚不明确。路基土中动应力累积效应,作为一种客观的、长期的现象,应开展更加深入的研究。因此,针对目前存在的局限性,本研究开展了一系列室内循环荷载试验,探究循环荷载大小、加载频率、应力状态及卸荷量对土体中动应力累积效应的影响,揭示循环荷载下动应力累积效应在路基土中的发生条件

及机理,为解决路基土动应力累积效应的负面影响提供理论依据。

1 室内循环荷载试验

1.1 试验材料

试验所采用土样为花岗岩残积土,取自广东省珠海市香洲区,呈褐黄至黄红色,其基本物理力学

性质如表 1 所示。花岗岩残积土在我国华南地区分布广泛,常用作高速公路,铁路路基等大型工程填土,具有较强的代表性^[28]。将采集到的花岗岩残积土烘干后碾碎并过 2 mm 级国家标准筛,取粒径范围为 0~2 mm 的花岗岩残积土颗粒,加蒸馏水搅拌均匀,控制土样含水率为 20%,试样颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 花岗岩残积土基本物理力学性质

Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of granite residual soil

天然密度/ (g·cm ⁻³)	天然含 水率/%	比重/ (g·cm ⁻³)	孔隙比	液性指数	塑性指数	压缩系数/ MPa ⁻¹	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
1.85	20.2	2.64	0.82	0.12	14.9	0.4	15.1	25.8

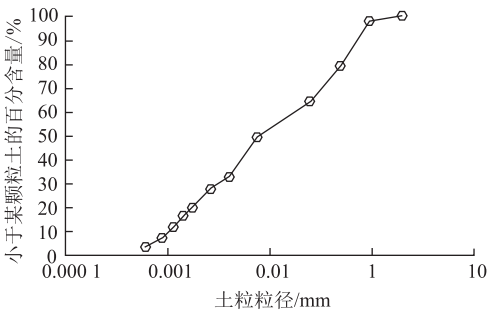


图 1 试样颗粒级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of sample particles

1.2 试验设备及方法

室内循环荷载试验所采用仪器为微机控制电子万能试验机(型号: E45.105),最大试验力: 100 kN,准确度等级: 0.5 级,试验速率为 0.001~500 mm/min,试验力和变形示值误差为示值的 ±0.5% 以内,位移分辨率 0.03 μm。万能试验机通过控制中横梁位移来施加压力或拉力,中横梁上的应力和位移传感器测量试样的外荷载和变形。试验步骤如下:

(1) 将搅拌均匀后的土放入自制的大型土样制作模具(高 200 mm×直径 200 mm),分 10 层击实;土体内应力的测量方法采用土中埋置土压力盒的方式,分别在试样内部 1/4, 1/2, 3/4 高度处埋置土压力盒(型号: LY-350;尺寸: 厚 5 mm×直径 32 mm;测试范围: 0~100 kPa),并将压力盒连接动静态应变仪(型号: TST3827E),用于动静态信号测试仪读取和记录;土样制作完毕后用塑料膜将模具两端密封,并在实验室条件下静置 24 h。

(2) 静置完毕后,通过万能试验机对模具内的土体施加一定的静荷载将试样压实至目标密实度,直至土体应变稳定;根据应力状态选择保留或拆除

模具,后将土样放置在万能试验机的下压盘上,并控制上压盘与试样表面接触。

(3) 连接土压力盒与数据采集仪进行室内循环荷载试验,通过万能试验机软件系统施加三角形波循环荷载,加载、卸载速率为 6 mm/min;万能试验机可直接输出施加荷载与试样的轴向应变,数据采集仪则实时记录试验过程中试样内部动应力的

1.3 试验方案

为探究循环荷载量、加载频率、应力状态及卸荷量等因素对动应力累积效应的影响,本研究共开展 16 组试验,每组试验共 3 个试样,其中 A1, A2 为确定土体在单轴和三轴应力状态下土体强度的单调压缩试验对照组, B1~B5 为无侧限作用时单轴应力状态下施加不同循环荷载, B6~B10 为有侧限作用时三轴应力状态下施加不同循环荷载, B11~B12 为探究加载频率对土体中动应力累积效应影响的对照组, B13~B14 为探究卸荷量大小对土体中动应力累积效应影响的对照组。该试验循环总次数均为 2 000 次,总体试验方案如表 2 所示。

2 试验结果与分析

2.1 循环荷载量的影响

图 2 为 B1~B5 试样在无侧限单轴应力状态下循环荷载量分别为 3.6, 13.6, 43.6, 73.6, 93.6 kPa 时土中动应力累积及其相应的轴向应变累积与循环次数的关系曲线。可知:土体内动应力累积与动应变累积具有相似的规律,在循环加载前期都表现出比较明显的累积效应,随着循环加载次数的增加,动应力与应变累积速率逐渐减小,最终达到稳定状态,而动应力累积会比应变累积更快达到稳定状态。在 3.6 kPa 循环应力下,土体仅有轻微的残余应力累

表 2 室内循环荷载试验方案
Tab. 2 Scheme for laboratory cyclic loading test

试验类型	测试组	试样编号	应力状态	循环荷载 上限值/kPa	循环荷载 下限值/kPa	循环荷载 大小/kPa	加载频率/ Hz
单调压缩试验	Group 1 对照组	A1	单轴	—	—	—	—
		A2	三轴	—	—	—	—
循环荷载试验	Group 2 循环荷载量对比	B1	单轴	10	6.4	3.6	0.10
		B2		20	6.4	13.6	0.10
		B3		50	6.4	43.6	0.10
		B4		80	6.4	73.6	0.10
		B5		100	6.4	93.6	0.10
		B6		10	6.4	3.6	0.10
	Group 3 应力状态对比	B7	三轴	20	6.4	13.6	0.10
		B8		50	6.4	43.6	0.10
		B9		80	6.4	73.6	0.10
		B10		100	6.4	93.6	0.10
	Group 4 加载频率对比	B11	三轴	50	6.4	43.6	0.05
		B12		50	6.4	43.6	0.15
	Group 5 卸荷量对比	B13	三轴	100	31.4	68.6	0.10
		B14		100	56.4	43.6	0.10

积现象，且试验停止后一段时间内残余应力可完全释放；随着循环荷载量的增加，土体内动应力累积中的峰值应力与残余应力也越大，同时累积应变与弹性应变也越大，动应力累积效应也越明显。

图 3 表示经过 2 000 次循环后循环荷载量对土体中动应力累积效应的影响。试验结果表明：在循环荷载作用下，土体中动应力累积发生存在门槛状态，当循环荷载量大于某一阈值时，土中才会发生动应力累积现象。当循环荷载足够小的情况下，土体没有出现塑性变形，呈现出弹性行为，此时土体中不会出现残余应力累积增长的现象；而当循环荷载增大时，土体中才会出现明显的塑性变形和残余应力累积，残余应力的累积又叠加至后续的动应力中，表现为峰值应力随加载次数的增加而增大。循环荷载越大，土体中峰值应力，残余应力以及动应力幅值越大，其所对应的累积应变及弹性应变也越大，动应力累积效应也越明显。有侧限三轴应力状态下，循环荷载量对动应力累积效应的影响与无侧限单轴应力状态下的试验结果具有相同的规律。

2.2 应力状态的影响

应力状态对动应力累积效应影响的试验结果如图 4 所示。总体来看，在相同循环荷载的情况下无侧限的动应力累积效应比有侧限时动应力累积效应更为明显，并且随着循环荷载的提高，二者在

峰值应力，残余应力与轴向应变之间的差值越来越大。这是因为无侧限单轴受力状态时土体试样可以自由地发生侧向变形，有侧限三轴受力状态土体试样的侧向变形受到约束作用，而这种约束作用会抵消土体内一部分的内应力与应变，从而造成了土体在三轴状态下的残余应力与峰值应力小于单轴状态下的残余应力与峰值应力的结果。

2.3 加载频率的影响

加载频率对动应力累积效应的影响如图 5 所示。由结果可知：加载频率越大，2 000 次加载循环后土体的累积变形也越大，但每个循环的回弹变形更小，而土中的峰值应力和残余应力随着加载频率的增加而增大。花岗岩残积土的变形具有黏性特征，黏性土的卸荷回弹变形是个依赖时间的过程，土中残余应力源于土颗粒在外荷载作用下发生的旋转、位移和变形，黏性土的卸荷回弹变形会造成残余应力的释放。因此，土体内应力的释放也是一个依赖时间的过程，在循环荷载下，每次卸载后土体的回弹变形尚未完全完成，内应力也没有完全地释放，加载频率越大（加载时间间隔越小），卸荷回弹变形量与残余应力的释放程度越小，则会有更多的残余应力累积到下一个循环中，使土体产生更明显的动应力响应效应。也就是说，加载频率越大，残余应力累积的速率越快。

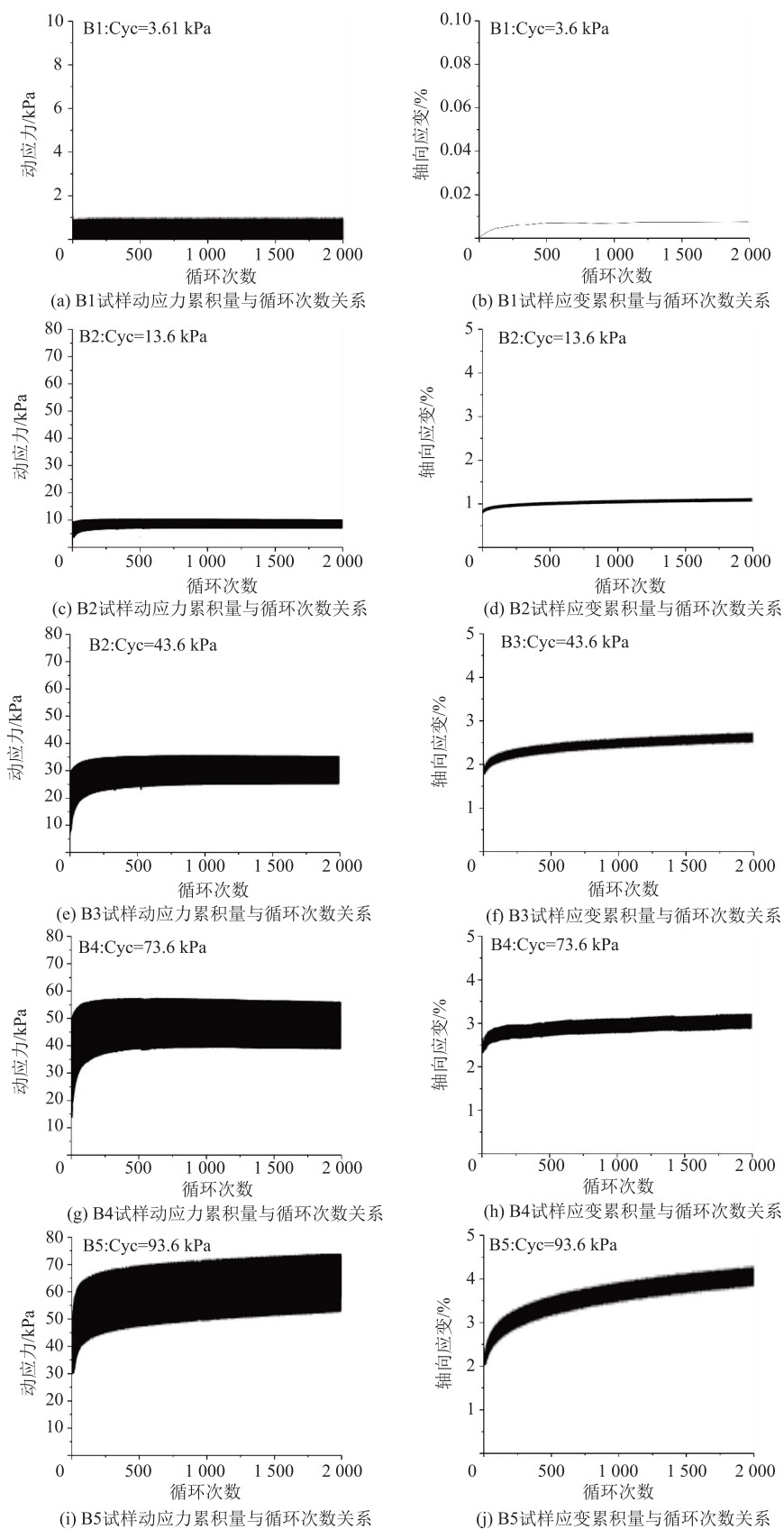


图 2 不同循环荷载量下动应力及轴向应变与循环次数关系

Fig. 2 Relationship of cyclic times with dynamic stress and axial strain under different cyclic loading

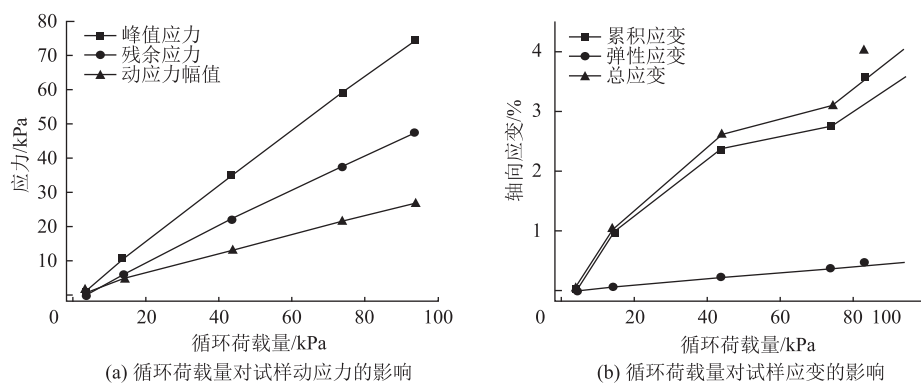


图3 循环荷载量对动应力累积效应的影响

Fig. 3 Influence of cyclic loading on dynamic stress accumulation effect

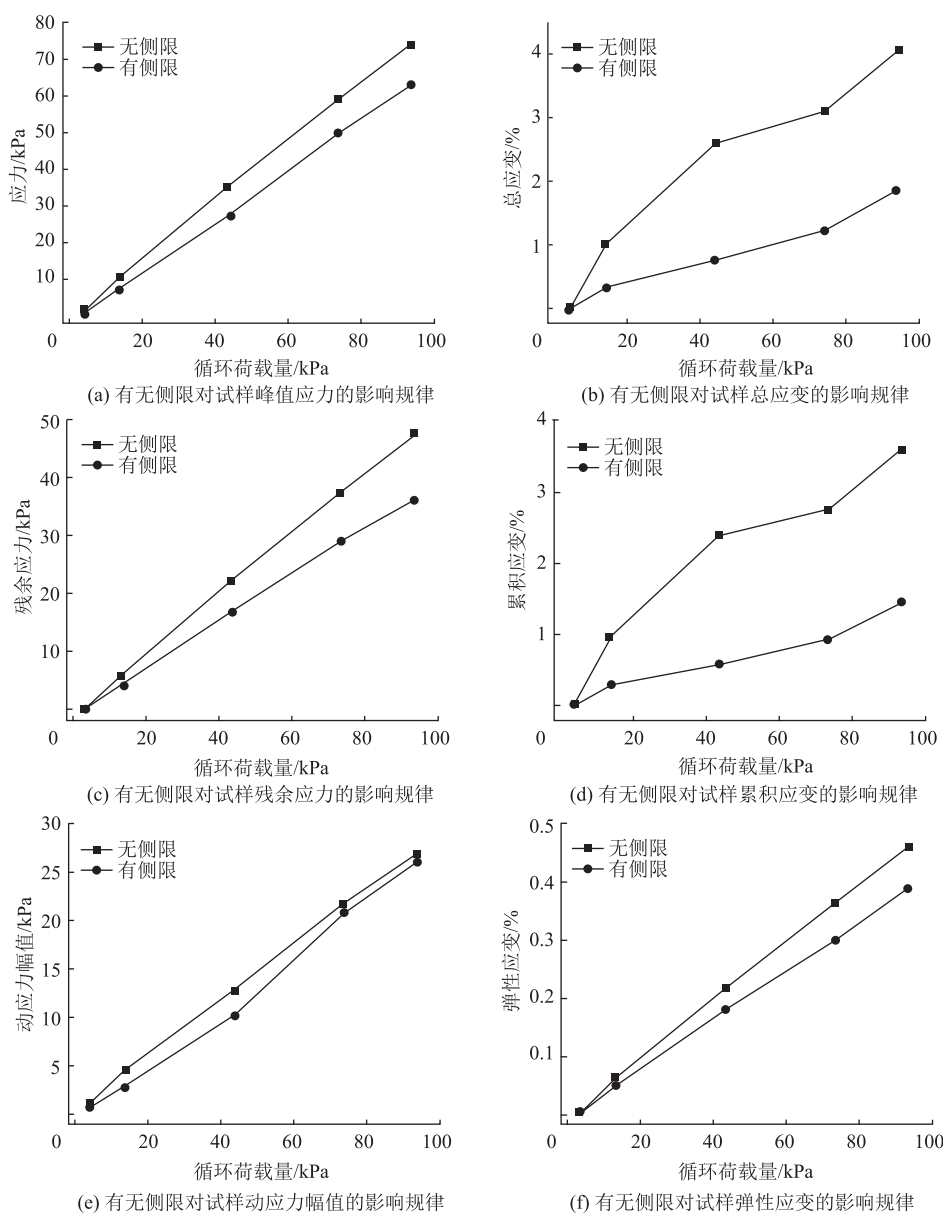
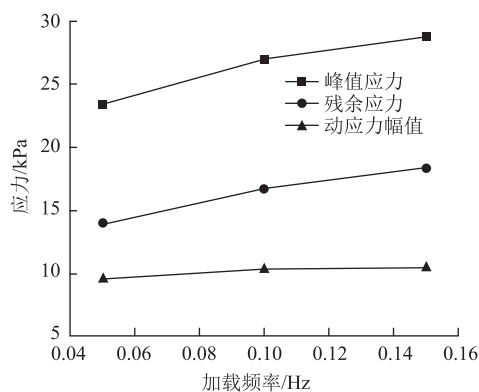
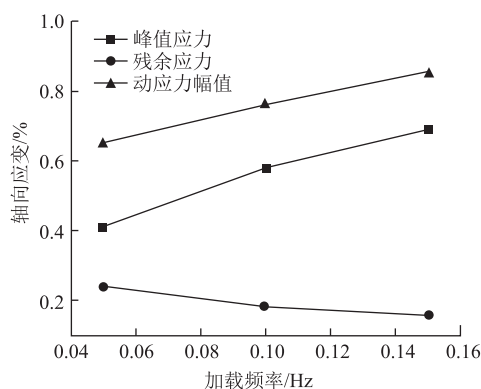


图4 应力状态对动应力累积效应的影响

Fig. 4 Influence of stress state on dynamic stress accumulation effect



(a) 加载频率对试样动应力的影响



(b) 加载频率对试样应变的影响

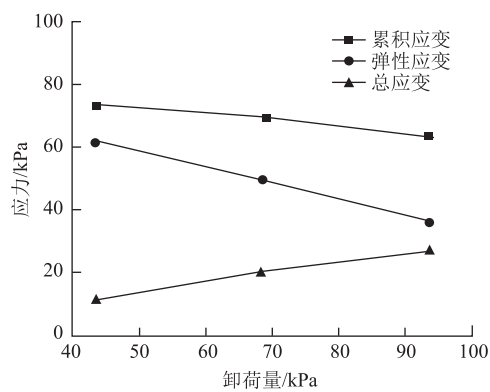
图 5 加载频率对动应力累积效应的影响

Fig. 5 Influence of loading frequency on dynamic stress accumulation effect

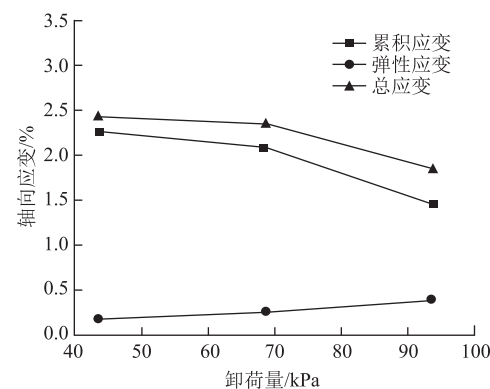
由以上结果可以推断: 在低应力水平及有限时间内, 土体弹性变形总能完全恢复, 或者说残余应力完全释放所需时间小于加载间隔时间, 土中不会出现动应力累积效应; 而如果加载间隔时间相对较短, 土体变形未能完全恢复, 其残余应力也不能完全释放, 则会叠加至下一加载周期中。加载时间间隔越小, 每一次加载期间残余应力释放得越不充分, 则在循环荷载初期残余应力累积速率越快; 土体在较高应力水平下发生不可恢复的塑性变形时, 土体中始终留有残余应力, 将叠加至后续加载周期中, 加载频率越大, 残余应力释放越不彻底, 动应力累积效应也越明显。

2.4 卸荷量的影响

卸荷量对动应力累积效应的影响试验结果如图 6 所示。可知, 循环荷载上限值不变下限值改变的情况下, 卸荷量越大, 试样的动应力幅值及弹性应变逐渐增大, 但是其峰值应力、残余应力与累积应变逐渐减小。这是因为卸荷量越大时, 卸载后恢复的弹性变形越大, 同时释放的残余应力也越大, 叠加



(a) 卸荷量对试样应力的影响



(b) 卸荷量对试样应变的影响

图 6 卸荷量对动应力累积效应的影响

Fig. 6 Influence of unloading amount on dynamic stress accumulation effect

至后续动应力就越小, 因此表现为峰值应力与累积应变逐渐减小, 所产生的动应力累积效应也越不明显。

3 讨论

3.1 动应力累积效应发生条件

根据上述试验现象及分析, 归纳总结土体在循环荷载下动应力累积效应发生的条件, 其示意图见图 7。可分为以下两种情况:

(1) 若土体在极低应力水平下表现出完全弹性行为, 即在有限的时间内土体变形总能完全恢复, 那么土中不会出现残余应力累积, 或残余应力微小得足以忽略。如果残余应力完全释放所需时间小于加载间隔时间, 即在下一加载之前动应力恢复至零, 则土中不会出现动应力累积现象; 若下一加载之前, 残余应力未能完全释放, 则它会叠加到下一周期中。加载时间间隔越小, 每一循环下残余应力释放得越不充分, 则在循环荷载初期残余应力累积速率越快。但在这种情况下土中残余应力的累积很快达到稳定, 且残余应力微小得足以忽略, 循环荷载停止后, 只

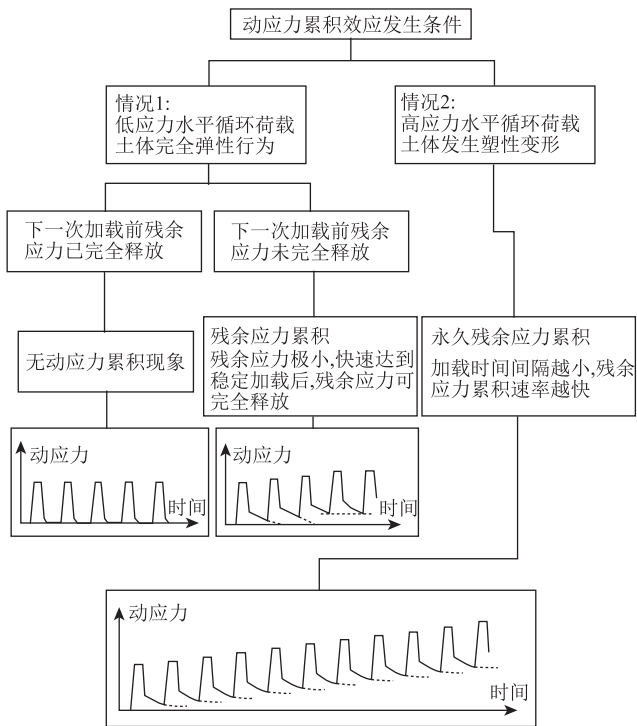


图7 路基土动应力累积效应发生条件

Fig. 7 Occurrence conditions of dynamic stress accumulation effect of subgrade soil

要时间足够长,残余应力总会完全释放。

(2) 若欠压密的土体处于中高应力水平的循环荷载下,土体必然发生不可恢复的塑性变形,卸荷后的土中始终留有残余应力,残余应力将会叠加到后续的加载周期中;加载时间间隔越小,残余应力释放得越不充分,则残余应力累积增长的速率越快。

土体在极低应力水平下表现出完全弹性行为的现象常发生在深部路基土中,车辆荷载引起的动应力沿深度呈指数型衰减规律,在路基土门槛深度以下,动应力引起的土体变形为完全弹性行为^[1]。完全弹性行为下,土体中没有由车辆荷载引起的残余应力累积,或者说有残余应力累积,但残余应力很快达到稳定且微小得足以忽略;另一方面,若土体循环复荷载下表现出完全弹性行为,则表明土体在此低应力水平反复荷载下是稳定的,满足道路结构安全性的要求。欠压密的土体处于中高应力水平的循环荷载下必然发生不可恢复的塑性变形,该现象常发生在浅层路基土和基层材料中,这种情况应该重点关注,因为无论研究土体的应力累积还是其应变行为,最终目的都是为了研究土体的力学稳定性和安全性。

3.2 动应力累积效应机理分析

图8所示分别为在循环荷载及静荷载加载卸载过程中土体的动应力累积与应变累积结果。在循环荷载作用下土体中的动应力累积与变形累积具有一致的变化规律,在每个循环内,当外部循环应力卸去后,土体的回弹变形随时间而变化,表现出明显的弹性后效特征,土体内的残余应力随着土体的回弹变形的发展而逐渐释放;在每个循环结束时,土体的动应力并没有完全恢复至循环加载开始时的值,卸载后土中的残余应力随着循环次数的增加而累积增长,并叠加至下一轮循环加载的动应力中,从而使峰值应力也随着循环次数的增加而增大。在静力加载卸载作用下,在每一级加载的初期动应力迅速增长而后趋于稳定,而土体的累积变形由迅速增加转变为缓慢增长;当外部荷载卸去后,土体中出现了明显的残余变形与残余应力,且土体发生黏性回弹时土中的残余应力也略有释放。

土体是典型的不均质材料,其黏弹塑性特征是影响残余应力的重要因素,残余应力的产生是材料内部的变形不协调所致。在外荷载作用下,土颗粒会发生旋转和位移,而组成土体的多种矿物材料弹性性能不一,在同一外荷载的加载卸载作用下将产生不等的变形与回弹,但由于土颗粒之间的约束作用,使得矿物颗粒的变形与回弹不能完全进行,导致矿物颗粒间的结构应力增大,这是土体出现残余应力的原因^[30]。卸去荷载后土体发生弹性回弹变形,土体内一部分内应力会随着释放,未释放的内应力即为残余应力,会留在土体内叠加至后续的循环加载中;当下一个循环荷载作用于土体时,土颗粒变形位移及旋转的幅度会更大,进一步错位内锁造成的结构应力也越大,表现为残余应力的不断累积增长。土中的残余应力与土体卸荷后的残余变形有很大的关系,一方面卸荷后的土体回弹变形决定了内应力的释放量,另一方面土体的累积变形决定了卸荷后的残余应力。但是,土体中的残余应力累积并不是无限增长的,在循环后期会趋于一个稳定值,但是此时土体仍然会发生塑性应变,试验结果表明单次加卸荷循环下有新增的残余应力累积,就表示一定已发生了新的累积变形,但是发生了新的累积变形,不一定有新增的残余应力累积,也就是说累积变形是土体残余应力累积发生的必要条件而非充分条件。

土体中的峰值应力与残余应力变化规律基本一致,也是在循环荷载初始阶段迅速增大,随着试验

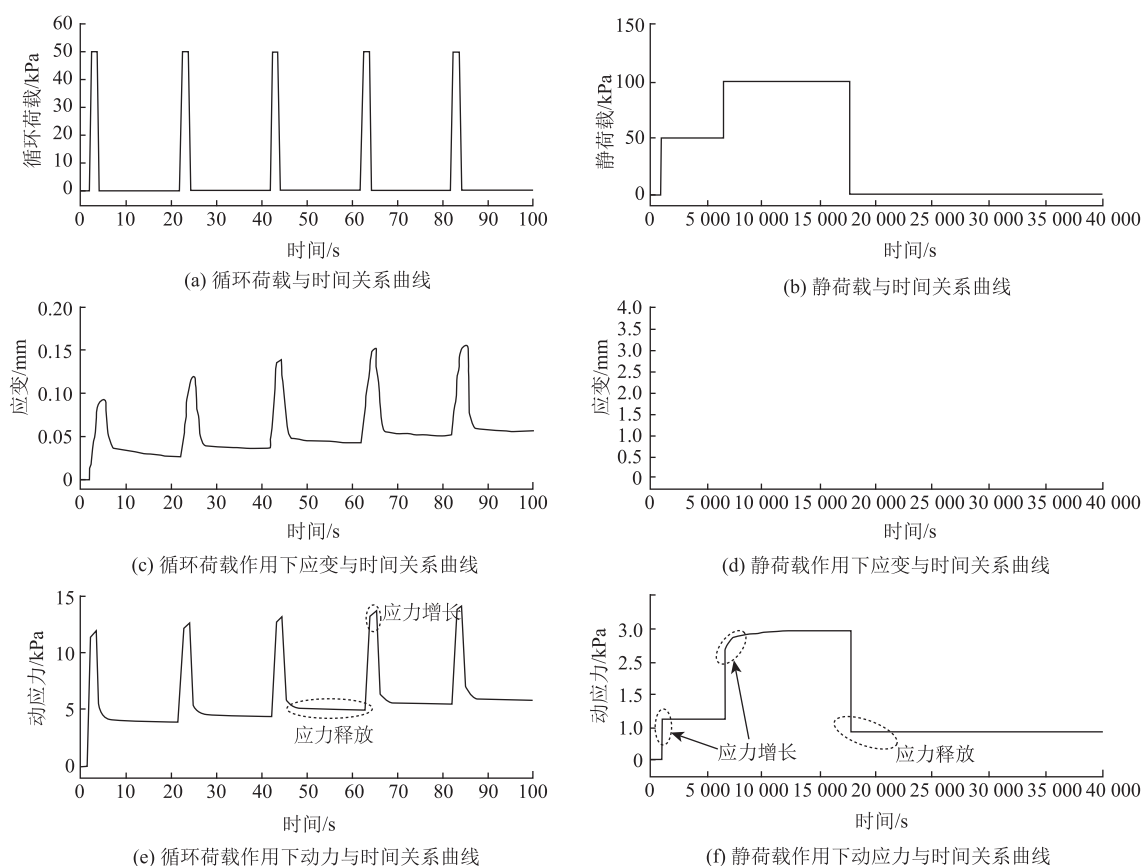
图 8 加载卸载过程中土体内动应力累积及应变累积结果^[29]

Fig. 8 Accumulation results of dynamic stress and strain in soil during loading and unloading

的进行增长速率逐渐降低, 最后趋于稳定。试验结果表明动应力累积幅值随着循环次数的增加而逐渐增大, 每一循环中的动应力累积幅值与土体材料的密实度和刚度有关, 在循环荷载作用下土体不断被压密, 刚度也逐渐增大, 更有利于应力在材料中的传递, 越密实的土体外荷载能量耗散越小, 从而使更多应力波传至土体内部。因此, 峰值应力的增加一方面源于不断增长的残余应力叠加至后续的动应力累积中, 另一方面源于不断增长的动应力累积幅值。

4 结论

本研究通过万能试验机进行室内循环荷载试验, 研究循环荷载量、加载频率、应力状态与卸荷量对土体中动应力累积效应的影响, 并对动应力累积效应发生条件及机理进行分析, 得出以下结论:

(1) 循环荷载越大, 土体中动应力累积的峰值应力、残余应力和幅值越大, 动应力累积效应也越明显; 加载频率越大, 卸荷回弹变形量和残余应力释放量越不充分, 残余应力累积速率越快, 动应力

累积效应越明显; 有侧限三轴应力状态下的动应力累积效应明显小于无侧限单轴应力状态下, 侧限压力的约束作用有助于弱化动应力累积现象; 卸荷量越大, 土体卸荷后的回弹变形越大, 所释放的内应力随之增大, 从而使峰值应力及累积应变减小。

(2) 土体内的动应力累积效应存在门槛状态, 在极低应力水平下表现出完全弹性行为时土体不会出现动应力累积现象, 而在受到较大应力的循环荷载下, 土体会发生不可恢复的塑性变形, 卸荷后始终存在残余应力, 并且残余应力将叠加至后续循环加载周期中。

(3) 循环荷载作用下, 土体颗粒会发生位移、旋转以及变形, 使得土体内出现结构应力, 卸去荷载后土体发生回弹释放一部分内应力, 而另一未释放的部分即为残余应力, 将叠加至后续的动应力累积中, 表现为残余应力的累积增加; 土体材料刚度越大, 越有利于应力在土体中传递, 其外荷载能量耗散越小, 从而使更多应力波传递至土体内部, 与残余应力累积二者作用形成峰值应力不断增加的结果。

参考文献:

References:

- [1] CUI X Z, ZHANG N, ZHANG J, et al. In Situ Tests Simulating Traffic-load-induced Settlement of Alluvial Silt Subsoil [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 58 (1): 10-20.
- [2] 陈志波, 安亚洲, 谢永宁, 等. 循环荷载作用下原状花岗岩残积土动力特性 [J]. 铁道工程学报, 2020, 37 (11): 25-30.
CHEN Zhi-bo, AN Ya-zhou, XIE Yong-ning, et al. Dynamic Characteristics of Undisturbed Granite Residual Soil under Cyclic Loading [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37 (11): 25-30.
- [3] TUN T W, SATO T, SAITO H, et al. Mechanical Properties and Stress-dilatancy Relationships of Unsaturated Soil under Various Cyclic Loading Conditions [J]. Acta Geotechnica, 2019, 15 (7): 1799-1813.
- [4] 尹松, 孔令伟, 杨爱武, 等. 循环振动作用下残积土动力变形特性试验研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (11): 224-231.
YIN Song, KONG Ling-wei, YANG Ai-wu, et al. Tests for Dynamic Deformation Characteristics of Residual Soil under Cyclic Loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36 (11): 224-231.
- [5] GUCHOWSKI A, SOBÓL E, SZYMAŃSKI A, et al. Undrained Pore Pressure Development on Cohesive Soil in Triaxial Cyclic Loading [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (18): 3821-3834.
- [6] 谢栋, 吴建奇. 循环荷载作用下红黏土累积变形研究 [J]. 地震工程学报, 2019, 41 (6): 1623-1629.
XIE Li, WU Jian-qi. Accumulative Deformation of Red Clay in Southern Jiangxi under Cyclic Loading [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41 (6): 1623-1629.
- [7] 江杰, 陈思达, 罗方正, 等. 铁路路基粗粒土填料累积变形试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (23): 9954-9960.
JIANG Jie, CHEN Si-da, LUO Fang-zheng, et al. Experimental Study on Accumulated Deformation of Coarse-grained Soil in Railway Subgrade [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (23): 9954-9960.
- [8] 张宏博, 黄茂松, 宋修广. 循环荷载作用下粉砂土路基累积变形试验研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (9): 6-12.
ZHANG Hong-bo, HUANG Mao-song, SONG Xiu-guang. Experimental Study on Cumulative Deformation of Silty Sand Roadbed under Repeated Loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (9): 6-12.
- [9] 胡玉红, 宫全美, 周顺华, 等. 循环荷载下地铁隧道累积变形的有限元法 [J]. 华东交通大学学报, 2018, 35 (6): 1-7.
HU Yu-hong, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua, et al. Finite Element Method for Accumulative Deformation of Subway Tunnel under Cyclic Loading [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35 (6): 1-7.
- [10] 张向东, 刘家顺. 循环荷载作用下风积土累积塑性变形试验研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (3): 18-25.
ZHANG Xiang-dong, LIU Jia-shun. Experimental Study on Cumulative Plastic Deformation of Aeolian Soil under Cyclic Loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (3): 18-25.
- [11] TANG L S, CHEN H K, SANG H T, et al. Determination of Traffic-load-influenced Depths in Clayey Subsoil Based on the Shakedown Concept [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77 (1): 182-191.
- [12] 汤连生, 张庆华, 廖化荣. 公路软基工后沉降研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增2): 3449-3455.
TANG Lian-sheng, ZHANG Qing-hua, LIAO Hua-rong. Advance in Post-Construction Settlement of Soft Subgrade Soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S2): 3449-3455.
- [13] 汤连生, 徐通, 林沛元, 等. 交通荷载下层状道路系统动应力特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增2): 3876-3884.
TANG Lian-sheng, XU Tong, LIN Pei-yuan, et al. Studies on Dynamic Stress Characters of Layered Road System under Traffic Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S2): 3876-3884.
- [14] MICHALOWSKI R L, NADUKURU S S. Static Fatigue, Time Effects, and Delayed Increase in Penetration Resistance after Dynamic Compaction of Sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138 (5): 564-574.
- [15] TANG Y Q, CUI Z D, ZHANG X, et al. Dynamic Response and Pore Pressure Model of the Saturated Soft Clay around the Tunnel under Vibration Loading of Shanghai Subway [J]. Engineering Geology, 2008, 98 (3-4): 126-132.
- [16] SHOOP S, COUTERMARSH B, DIEMAND D, et al.

- Using Soil Stress State Transducers in Freezing Ground [C] // Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction. Duluth: American Society of Civil Engineers, 2009: 562-571.
- [17] 汤连生, 张庆华, 尹敬泽, 等. 交通荷载下路基土动应力应变累积的特性 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2007, 46 (6): 143-144.
- TANG Lian-sheng, ZHANG Qing-hua, YIN Jing-ze, et al. Accumulated Behavior of Subgrade Clay under Traffic Loading [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46 (6): 143-144.
- [18] WIERMANN C, WAY T R, HORN R, et al. Effect of Various Dynamic Loads on Stress and Strain Behavior of a Norfolk Sandy Loam [J]. Soil and Tillage Research, 1999, 50 (2): 127-135.
- [19] LU Z, YAO H L, WU W P, et al. Dynamic Stress and Deformation of a Layered Road Structure under Vehicle Traffic Loads: Experimental Measurements and Numerical Calculations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 39 (1): 100-112.
- [20] GARG N, PECHT F, JIA Q. Subgrade Stress Measurements under Heavy Aircraft Gear Loading at FAA National Airport Pavement Test Facility [C] // Paving Materials and Pavement Analysis. Shanghai: American Society of Civil Engineers, 2010: 484-491.
- [21] EGUCHI T, MURO T. Measurement of Compacted Soil Density in a Compaction of Thick Finishing Layer [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44 (5): 347-353.
- [22] THAKUR J K, HAN J, POKHAREL S K, et al. Performance of Geocell-reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases over Weak Subgrade under Cyclic Plate Loading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 35 (1): 14-24.
- [23] SUN X H, HAN J, KWON J, et al. Radial Stresses and Resilient Deformations of Geogrid-stabilized Unpaved Roads under Cyclic Plate Loading Tests [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43 (5): 440-449.
- [24] TAFRESHI S N, KHALAJ O, DAWSON A R. Repeated Loading of Soil Containing Granulated Rubber and Multiple Geocell Layers [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42 (1): 25-38.
- [25] 李彰明, 刘俊雄. 高能量冲击作用下淤泥孔压特征规律试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (2): 339-345.
- LI Zhang-ming, LIU Jun-xiong. Experimental Study of Pore Water Pressure Variation Law of Muck under High Energy Impact [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (2): 339-345.
- [26] 李彰明, 罗智斌, 林伟弟, 等. 高能量冲击下淤泥土体能量传递规律试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (6): 1573-1580.
- LI Zhang-ming, LUO Zhi-bin, LIN Wei-di, et al. Experimental Study of Energy Transfer in Muck Soil Subjected to High-energy Impact [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (6): 1573-1580.
- [27] 李彰明, 曾文秀, 高美连. 不同荷载水平及速率下超软土水相核磁共振试验研究 [J]. 物理学报, 2014, 63 (1): 359-366.
- LI Zhang-ming, ZENG Wen-xiu, GAO Mei-lian. Nuclear Magnetic Resonance Test and Analysis on Water Phase of the Ultra-soft Soil under Different Load Level and Rate [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63 (1): 359-366.
- [28] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (12): 2299-2304.
- WU Neng-sen. Study on Classification of Granite Residual Soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (12): 2299-2304.
- [29] 陈浩昆. 交通荷载下路基土动应力累积机理及量化模型探索 [D]. 广州: 中山大学, 2016.
- CHEN Hao-kun. The Mechanism and Quantification Model of Traffic-load-induced Dynamic Stress Accumulation Effect within Subgrade and Subsoil [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2016.
- [30] MICHALOWSKI R L, NADUKURU S S. Static Fatigue, Time Effects, and Delayed Increase in Penetration Resistance after Dynamic Compaction of Sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138 (5): 564-574.