

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0106

长期循环荷载下卸荷粉土动力特性的试验研究

孟凡丽¹, 娄桢桢¹, 葛 威²

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州, 310027; 2. 宁波开投蓝城投资开发集团有限公司, 浙江 宁波, 315000)

摘 要: 通过杭州地铁 5 号线的卸荷状态饱和粉土的动三轴试验, 研究了长期循环荷载作用下侧向卸荷状态饱和粉土的动力特性, 总结了卸荷应力路径对该类土体的动力特性的影响。试验结果表明: 饱和粉土在侧向卸荷时, 存在临界动应力, 并且土体在卸荷再加荷应力路径下的临界动应力最小; 在动应力未达临界动应力时, 土体累积动应变和累积动孔压发展表现为稳定型; 而当动应力超过临界动应力时, 土体累积动应变和动孔压表现为破坏型, 但侧向卸荷应力路径下土样的累积动孔压发展曲线不会出现陡增阶段。研究结果显示, 在侧向卸荷再加荷应力路径下的土体, 因再加荷过程产生的超孔隙水压力的增加, 会产生更大的动孔压和累积动变形, 同时降低了该应力路径下土样的临界动应力, 这也是引起地铁隧道周围土体的沉降和振陷的一个危险因素。

关 键 词: 长期循环荷载; 侧向卸荷; 饱和粉土; 动力特性

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 1-0383-06

Experimental study on dynamic characters of unloading silt under long-term cyclic loading

MENG Fan-li¹, LOU Zhen-zhen¹, GE Wei²

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. Ningbo Kaitou Lancheng Investment & Development Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: Through the dynamic triaxial test of the saturated silt in the unloaded state of Hangzhou metro line 5, the dynamic characteristics of the lateral unloading saturated silt under long-term cyclic loading are studied, and the influence of unloading stress path on dynamic characteristics of such soil is summarized. The test results show that the saturated silt has critical dynamic stress under the lateral unloading, and the critical dynamic stress of the soil which is under the unloading and reloading stress path is the smallest. When the dynamic load does not reach the critical dynamic stress, the cumulative dynamic strain and cumulative dynamic pore pressure of the soil appear to be stable. When the dynamic load exceeds the critical dynamic stress, the cumulative dynamic strain of the soil appears to be a destructive type. However, in the single lateral unloading stress path, the cumulative dynamic pore pressure development curve of soil samples does not show a steep increase stage. The results show that when the soil sample is under the lateral unloading and reloading stress path, the increase of excess pore water pressure caused by the reloading process will produce larger dynamic pore pressure and accumulated dynamic deformation, and reduce the critical dynamic stress of the soil sample, which is also a risk factor for the settlement and vibration settlement of the soil around the subway tunnel.

Keywords: long-term cyclic loading; lateral unloading; saturated silt; dynamic characteristics

1 引 言

随着我国城市化进程的不断发展, 地铁在城市交通体系中扮演着越来越重要的角色。地铁列车运行产生的长期循环动荷载对隧道周边土体的性状影响较大。另外随着地铁沿线城市建设的发展, 地铁

沿线附近深基坑的开挖也大量涌现。在这类基坑开挖过程会涉及到地铁隧道周围土体的轴向和侧向的卸荷过程, 这种对土体的卸荷扰动会加剧影响区域内土体的变形和动力性能的改变。为保证地铁的安全运营, 掌握地铁隧道周围土体在卸荷应力状态下受到地铁行车荷载作用时的累积动应变和动孔压的

收稿日期: 2021-01-15

修回日期: 2022-02-21

基金项目: 浙江省科技计划项目 (No.20130155)。

This work was supported by the Science and Technology Plan Project of Zhejiang Province(20130155).

第一作者简介: 孟凡丽, 女, 1969 年生, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zgdmfl@zjut.edu.cn

变化情况变得很迫切,非常有必要对受地铁运行荷载作用的卸荷状态土体的动力特性进行更为深入的研究。

土体的动力特性的研究一直受到国内外学者的关注。其中 Mitchell 等^[1]深入探究了软黏土的动循环三轴试验中的动应力和动应变在不同情况下的发展规律情况;通过一系列等向固结动三轴试验,Seed 等^[2]提出了一个振动引起孔压变化的发展模型;潘林有等^[3]通过室内抗剪强度试验研究了在卸荷状态下黏性土的强度变化规律和卸荷影响区范围的估算;闫恩^[4]通过对宝兰重塑黄土的室内一维、三维卸荷试验和一维非饱和卸荷试验研究了其卸荷力学特性,获得了一种新的黄土体卸荷回弹量计算方法以及在三维卸荷条件下黄土的变形规律与强度特性;周秋娟等^[5]对珠三角的典型灰黑色淤泥质软土进行了室内三轴试验研究得到了侧向卸荷条件下软土的强度、变形等典型力学特性及其发展规律;张坤勇等^[6]将粉土在不同围压条件下固结稳定,根据不同卸荷比进行卸荷试验,来模拟实际土体开挖过程中的应力路径,探究了粉土的应力-应变特性及其强度参数。为了确定粉土在车辆动荷载条件下的动力特性,胡小告^[7]模拟车辆荷载条件下的动三轴试验,研究了粉土在长期动荷载作用下不同动应力、不同压实度和不同围压下的动应变、动模量和阻尼比的变化;饶岳成^[8]进行了室内循环三轴试验,通过获得隧道层粉土的动力指标进而建立杭州地铁隧道其有限元模型,模拟在地铁循环荷载作用下粉土层的应力场,为地铁的安全性提供了一个可靠真实的计算方法;王明飞^[9]通过数值分析模拟了地基饱和粉土在不同工况下的孔压发展规律,以及通过模拟地铁荷载研究了不同时刻饱和粉土层不同位置的孔压发展规律,并探讨了饱和粉土层的液化机制,为地铁工程设计提供了一个有益的参考;黄志福^[10]在不同温度下进行了不同动应力循环荷载下黏质粉土的动三轴试验,试验结果表明,循环荷载下黏质粉土的累积塑性应变随温度的升高而减小,随动应力增大而增大;杨献永^[11]对循环荷载作用下的非饱和粉土进行了试验研究,得到列车循环荷载作用下粉土的动应力-应变关系可以用双曲线来描述。但上述研究仅对黏土等卸荷状态下的特性和粉土在交通循环动荷载下的力学特性进行探讨,而结合两者考虑循环荷载作用下粉土卸荷应力路径下的动力特性的还很少。

本文模拟地铁隧道周围土体在临近建筑的深基坑开挖卸荷和建设过程中的不同卸荷应力路径,

通过饱和粉土的动三轴试验,寻找长期循环动荷载作用下饱和粉土的累积动应变和动孔压的发展规律,研究不同卸荷应力路径下这种长期循环动荷载对土体动力特性的影响程度,为保障地铁隧道的安全提供有益的借鉴。

2 试验概况

2.1 试验设备

本试验在 TYD-20 微机控制动三轴试验机上完成,该动三轴仪可以进行轴向的应力控制,围压可调,能够按照试验要求的卸荷应力路径实现各组的应力条件,精确地测定饱和土样的动应力、动应变以及动孔压。该试验仪器的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 仪器主要技术参数
Table 1 Main parameters of instrument

项目	量程	精度
变形	轴向 10 mm	测量精度优于±0.5%
周围压力	3 MPa (钢压力室)	测量精度优于±0.5%
孔隙压力	1 MPa	测量精度优于±0.5%
轴向位移	±50 mm	测量精度优于±0.5%
轴向动荷载	0~5 kN	测量精度优于±0.5%
轴向静荷载	5 kN	负荷控制精度±1%

2.2 土样制备

本试验的粉土原料土取自杭州地铁 5 号线沿线典型区段及深度处的土层。原料土试样的物理指标参数见表 2。

表 2 原料粉土的物理性质参数
Table 2 Physical indicators of silt

含水率 $W/\%$	干密度 ρ_d $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	密度 ρ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	土粒相对密度 G_s	孔隙比 e	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_p
22.0	1.46	1.78	2.72	0.790	31.42	24.63	6.79

试验分为 6 组,每组 12 个试样。试验采用重塑土样,共制备 72 个试样,为 39.1 mm×80 mm 的圆柱形土样,分 5 层静压而成,控制干密度为 1.497 g/cm³,控制土样的含水率为 22%。试样制作完成后装入饱和器进行真空抽气饱和,真空抽气 1 h 后缓慢注入无气水直至没过试样,饱和完成后将试样静置水中待用。

2.3 试验方案

试验选取的土体单元是地铁隧道上方在临近基坑的开挖深度侧向影响范围内的某一个土体单元(如图 1 所示),在基坑开挖即侧向卸荷过程中,或开挖到底板后进行地下室建设完成的过程中,即土

体单元侧向卸荷-再加荷后，地铁列车运行的交通荷载对其施加循环动应力的条件下，研究在这一系列的过程中该类土体单元的动力学特性及其变化规律。

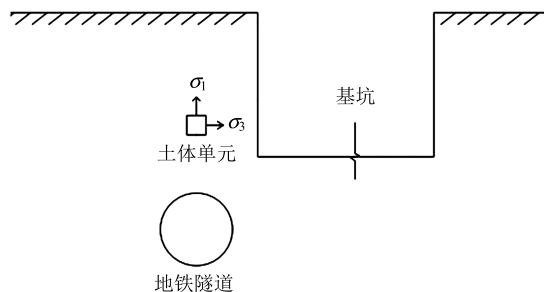


图 1 基坑开挖卸荷下侧向土体影响区域

Fig.1 Lateral soil's influence area under excavation unloading of foundation pit

本试验分为 A、B、C 共 3 组：A 组为常规应力路径的动三轴试验，对应地铁隧道临近的基坑未开挖，即常规状态时的工况；B 组为侧向卸荷应力路径的动三轴试验，该组试验设置 3 个不同卸荷强度的分组试验，测定在不同卸荷强度下侧向卸荷应力路径下土样的动力特性，对应地铁隧道临近基坑分级开挖的工况；C 组为侧向卸荷-再加荷应力路径的动三轴试验，同样设置 3 个不同卸荷强度的分组试验，测定在不同卸荷强度下侧向卸荷-再加荷应力路径下土样的动力特性，对应地铁隧道临近基坑开挖到底板然后进行地下室建设完成后的工况。

试验类型采用固结不排水动三轴试验，根据雷华阳^[12]、唐益群^[13]等关于交通荷载对周围土样影响的研究成果，地铁运行产生的交通荷载用长期循环正弦波动荷载来模拟。试验的动荷载选用正弦波动应力，频率为 1 Hz，固结比 $K_c = 1.0$ ，卸荷前的固结压力设定为 150 kPa，循环加载的总振次为 10 000 次，试验破坏条件为累积动应变达到 5%。具体试验分组方案如表 3 所示。

表 3 侧向卸荷试验方案

Table 3 Lateral unloading test plan

试验方式	试验编号	加卸荷应力路径/kPa
常规加荷	A-0	150
侧向卸荷	B-1	150→140→130→120→110→100→90→80→70→60
	B-2	150→130→110→90→70→60
	B-3	150→120→90→60
侧向卸荷-再加荷	C-1	150→140→130→120→110→100→90→80→70→60→150
	C-2	150→130→110→90→70→60→150
	C-3	150→120→90→60→150

3 试验结果及分析

3.1 不同卸荷路径对粉土累积动应变的影响

总结不同卸荷应力路径下各试验组的试验结果，得到饱和粉土的累积动应变的发展曲线如图 2、3 所示。试验结果显示存在临界动应力，试验的循环动应力大于或小于该临界动应力会表现出不同的变形状态。图 2 为循环动应力未达临界动应力时土样的累积动应变发展曲线。图 3 为循环动应力超过临界动应力时土样的累积动应变发展曲线。

整理分析上述试验数据，得到不同应力状态下

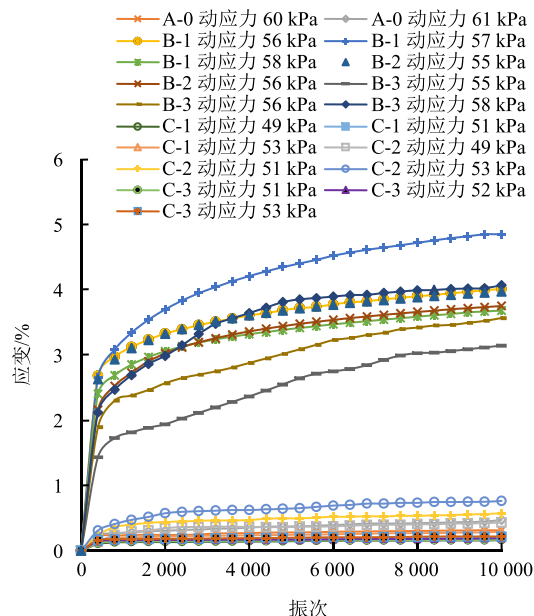


图 2 循环动应力未达临界动应力时饱和粉土累积动应变发展曲线

Fig.2 Cumulative dynamic strain development curves of saturated silt when cyclic dynamic stress does not reach the critical dynamic stress

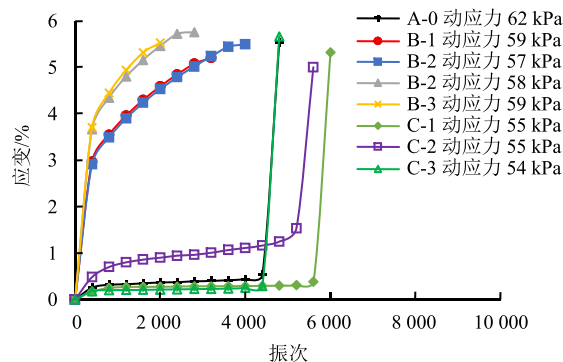


图 3 循环动应力超过临界动应力时饱和粉土累积动应变发展曲线

Fig.3 Cumulative dynamic strain development curves of saturated silt when cyclic dynamic stress exceeds critical dynamic stress

饱和粉土的临界动应力和破坏振次的汇总, 如表 4 所示。

表 4 不同卸荷应力路径下饱和粉土临界动应力汇总
Table 4 Summary of critical dynamic stress of saturated silt under different unloading paths

试样编号	临界动应力/kPa	破坏振次
A-0	62	4 680
B-1	59	3 204
B-2	57	4 040
B-3	59	1 382
C-1	55	5 400
C-2	55	5 729
C-3	54	4 658

根据上述的图表以及应力-应变关系可以看到, 饱和粉土在侧向卸荷状态下, 存在临界动应力。从各组临界动应力的汇总可以看到, 饱和粉土在不同卸荷应力路径下的临界动应力均小于常规三轴下土体的临界动应力, 并且 C 组侧向卸荷-再加荷应力路径下土体的临界动应力小于 B 组侧向卸荷应力路径下土体的临界动应力。分析产生这个现象的原因, 应该是土体在侧向卸荷-再加荷后, 土体结构在这个卸荷再加荷的过程中被扰动破坏了, 土体卸荷后再加荷不但没起到加强土体间的连接或黏结作用, 反而加剧了土体内部颗粒结构的调整, 增加了塑性变形的累积, 从而降低了试样的临界动应力, 因此表现出 C 组临界动应力比 B 组单一卸荷应力路径下的还小。这个现象提醒我们, 在工程实施过程中, 卸荷再加荷的扰动可能比单一卸荷对土体稳定性的影响还大。

卸荷应力路径下饱和粉土的累积动应变在不同的循环动应力作用下呈现不同的发展形态, 当试样的循环动应力小于临界动应力时, B 组土体累积动应变远大于 A 组和 C 组的土体累积动应变, 并且 B 组的累积动应变发展曲线在振动初期有一个快速增长的过程, 但增加到一定程度会逐渐趋于平缓, 而 A、C 组的累积动应变发展则没有迅速增长的阶段而是呈现平缓的稳定发展状态, 表现为稳定型。B 组是土体在侧向卸荷还未加载的应力状态, 也就是模拟地铁隧道周围土体有临近基坑正在开挖卸荷的工况。从试验结果可以看到, 该侧向卸载影响区域的土体如果受到长期循环动荷载的作用会产生较大的累积动应变, 从而可能会造成既有地铁隧道的安全隐患。当试样所受循环动应力达到或超过临界动应力时, B 组侧向卸荷应力路径下饱和粉土土体的累积动应变发展曲线的前半段也远大于常规三轴

和 C 组侧向卸荷-再加荷应力路径下土体的累积动应变, 但无一例外试验最后各组试样都会出现累积动应变达到或陡增超过 5% 的试样破坏标准, 试样呈现出液化破坏, 表现为破坏型。而在 C 组侧向卸荷-再加荷应力路径下, 无论循环动应力是否超过临界动应力, 试样的累积动应变和 A 组常规应力路径条件下的累积动应变发展曲线形态基本保持在比较小的变化范围内, 显示出基本一致的形态。

由图 3 数据比较还可以看到, 无论在侧向卸荷应力路径下还是在侧向卸荷-再加荷应力路径下, 当循环动应力达到或超过临界动应力时, 卸荷强度越大土体累积动应变就越早达到 5% 的试样破坏标准而出现液化破坏。

3.2 不同卸荷路径对粉土累积动孔压的影响

饱和粉土在不同卸荷路径下的累积动孔压发展曲线如图 4、5 所示。图 4 为试样循环动应力未达临界动应力时土样的累积动孔压发展曲线。图 5 为试样循环动应力超过临界动应力时土样的累积动孔压发展曲线。

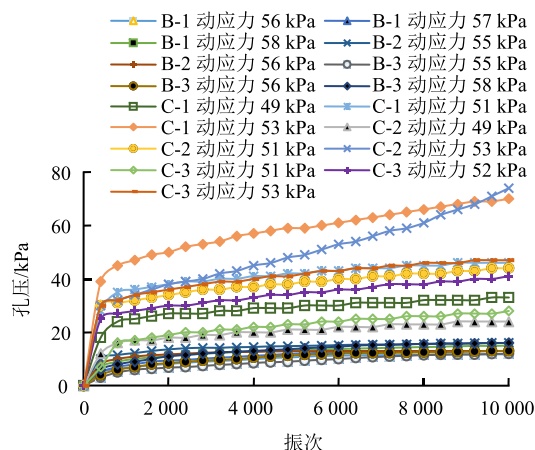


图 4 循环动应力未达临界动应力时饱和粉土累积动孔压发展曲线

Fig.4 Cumulative dynamic pore pressure development curves of saturated silt when cyclic dynamic stress fails to reach the critical dynamic stress

由图 4 可以看到, 在不同的侧向卸荷应力路径下, 饱和粉土试样的累积动孔压发展与施加循环动应力的幅值大小密切相关。在循环动应力幅值未达临界动应力时, 土体的累积动孔压在振动前期呈小幅增长, 随后再逐渐平缓, 最终趋于稳定值, 表现为稳定型, 如图 4 所示。当循环动应力幅值达到或超过临界动应力时, C 组的孔压发展在振动初期增长明显, 并且在快液化前迅速增长直至达到围压值, 表现为破坏型, 如图 5 所示。而 B 组试样的孔压发

展表现不同于 C 组, 在振动初期孔压也会有一定的小幅增长, 后续是逐渐增长并趋于稳定直至试样破坏, 与其动应力幅值未超过临界动应力的试样表现趋于一致。

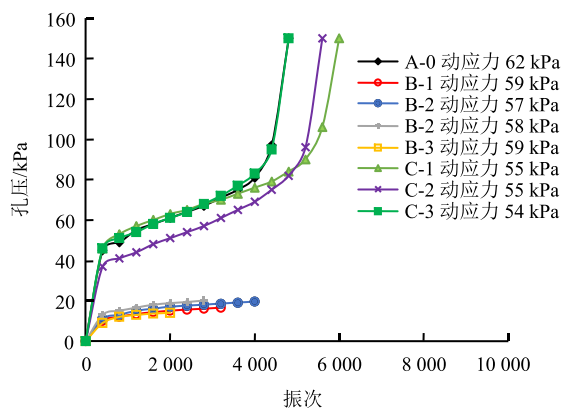


图 5 侧向卸荷动应力超过临界动应力时饱和粉土累积动孔压发展曲线

Fig.5 Cumulative dynamic pore pressure development curve of saturated silt when the lateral unloading cyclic dynamic stress exceeds the critical dynamic stress

比较 B 组和 C 组的孔压发展曲线可以发现, 无论其动应力幅值是否超过临界动应力, 在相同振次下 C 组的累积动孔压均高于 B 组的累积动孔压。这也解释了为什么 C 组临界动应力比 B 组低, 这主要是因为 C 组土样在卸荷再加荷的过程中累积了再加荷过程中产生的超孔隙水压力, 扰动了土体内部的结构并增加了塑性变形, 从而使该组临界动应力降低。

4 结 论

本文通过一系列固结不排水动三轴试验, 探究了在长期循环荷载作用下, 在不同的侧向卸荷应力路径下饱和粉土的动力特性, 得出了以下结论:

(1) 侧向卸荷应力状态下, 有临界动应力存在。饱和粉土在侧向卸荷状态下的临界动应力均小于常规三轴下土体的临界动应力。并且侧向卸荷-再加荷应力路径下土体的临界动应力小于侧向卸荷应力路径下土体的临界动应力, 原因是侧向卸荷再加荷的过程使土体内的超孔隙水压力增大, 加剧了土体内部颗粒及结构的调整, 增加了塑性变形的累积, 从而降低了试样的临界动应力。

(2) 对于饱和粉土的累积动应变无论循环动应力是否超过临界动应力, C 组侧向卸荷-再加荷应力路径下土样的累积动应变和 A 组常规应力路径条件下的累积动应变发展曲线形态基本保持相同的发展

趋势, 而 B 组侧向卸荷应力路径下饱和粉土的累积动应变则在应变发展的前期远大于 A 组和 C 组土体的累积动应变, B 组的累积动应变发展曲线在振动前期会呈现出一个快速增长的过程, 但增加到一定程度会逐渐趋于平缓, 各组均表现为稳定型。当循环动应力达到或超过临界动应力时, B 组试样都会出现累积动应变持续增长达到或超过 5% 的试样破坏标准, 而 A 组和 C 组试样在前期累积动应变增长并不明显, 但后期会出现陡增到 5%, 迅速使土样呈现出液化破坏, 表现为破坏型。而无论在侧向卸荷应力路径下还是在侧向卸荷-再加荷应力路径下, 当循环动应力达到或超过临界动应力时, 卸荷强度越大土体累积动应变就会越早达到 5% 的试样破坏标准。

(3) 饱和粉土试样在相同振次下土体的累积动孔压发展曲线与施加的循环动应力的幅值密切相关, 在循环动应力未达临界动应力时, 土体的累积动孔压曲线发展表现为稳定型。当循环动应力超过临界动应力时, C 组在侧向卸荷再加载到原来的荷载值后土体孔压发展在振动初期增长明显, 并且在快液化前迅速增长直至达到围压值, 表现为破坏型。而 B 组仅侧向卸荷条件下, 不会出现土样液化前的从相对稳定发展到陡增到围压值的情况, 表现形态与动应力幅值未超过临界应力时一致。

参 考 文 献

- [1] MITCHELL R J, KING R D. Cyclic loading of an Ottawa area Champlain sea clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 14(1): 52-63.
- [2] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1976, 13(7): 323-346.
- [3] 潘林有, 程玉梅, 胡中雄. 卸荷状态下黏性土强度特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 490-493.
PAN Lin-you, CHENG Yu-mei, HU Zhong-xiong. Experimental study on the shear strength of clay under the unloading state[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 490-493.
- [4] 闫恩. 重塑黄土卸荷力学特性试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
YAN En. Experimental research on the mechanical characteristics of remodeled loess under unloading[D].

- Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [5] 周秋娟, 陈晓平. 侧向卸荷条件下软土典型力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2215-2221.
- ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping. Test research on typical mechanical characteristics of soft clay under lateral unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(11): 2215-2221.
- [6] 张坤勇, 李广山, 梅小洪, 等. 基于 K_0 固结排水卸荷应力路径试验粉土应力-变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1182-1188.
- ZHANG Kun-yong, LI Guang-shan, MEI Xiao-hong, et al. Stress-deformation characteristics of silty soil based on K_0 consolidation and drainage unloading stress path tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(7): 1182-1188.
- [7] 胡小告. 车辆动荷载条件下粉土力学特性试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(10): 141-144.
- HU Xiao-gao. Experimental study on mechanical properties of silt under vehicle dynamic load[J]. **Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition)**, 2011, 7(10): 141-144.
- [8] 饶岳成. 地铁行车荷载下粉土动力特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- RAO Yue-cheng. Researches on dynamic properties of silty soil under subway loading[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014.
- [9] 王明飞. 地铁列车振动引起饱和粉土地基动力响应及液化[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- WANG Ming-fei. Dynamic response of saturated silt soil and liquefaction by the subway's vibration[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [10] 黄志福. 交通循环荷载作用下粉土路堤动力特性试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- HUANG Zhi-fu. Experimental study on dynamic characteristics of silt embankment under cyclic traffic load[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [11] 杨献永. 循环荷载下压实粉土的动力特性试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- YANG Xian-yong. Experimental study on dynamic properties of silt sub grade under cyclic load[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [12] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动应力动应变关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 3052-3057.
- LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi, et al. Experimental study of dynamic stress-strain relation of structural soft soil under traffic load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 3052-3057.
- [13] 唐益群, 王艳玲, 黄雨, 等. 地铁行车荷载下土体动强度和动应力-应变关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 701-704.
- TANG Yi-qun, WANG Yan-ling, HUANG Yu, et al. Dynamic strength and dynamic stress-strain relation of silt soil under traffic loading[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2004, 32(6): 701-704.