

DOI:10.11918/202206031

循环荷载作用下非饱和盐化粉土动力特性

易文妮¹, 刘津丞², 余 虔^{3,4}, 宣明敏¹, 刘希重¹, 叶新宇^{1,5}, 张 升^{1,5}

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100002;
3. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 101312; 4. 机场工程安全与长期性能交通运输行业
野外科学观测研究基地, 北京 100029; 5. 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 长沙 410075)

摘 要: 西北地区机场若采用盐化粉土进行道基填筑, 在飞机滑行荷载重复作用下, 道基累积变形将成为影响机场服役性能的关键。为此, 选取北方某地区粉土开展动三轴试验, 研究循环荷载下不同含盐量(质量分数)对粉土动力特性的影响, 并提出以累积塑性应变4%作为道基破坏标准的盐化粉土动强度预测模型。结果表明: 随动应力幅值的增加, 盐化粉土塑性变形逐渐由塑性安定状态向增量破坏转变; 含盐量对粉土累积轴向应变、动模量、临界动应力有明显影响; 相同动应力幅值下, 当含盐量由0增加至5%时, 试样累积轴向应变以1%含盐量为界限呈先减小后增加的趋势; 低动应力幅值下, 试样动模量随含盐量增加而逐渐衰减; 从微观上对盐化粉土在1%低含盐量时强度短暂增强、高含盐量时强度逐渐衰减的现象进行分析, 盐化粉土试样强度与土体孔隙中离子浓度以及土体颗粒排列方式有关; 根据盐化粉土动强度预测模型, 可得1%含盐量的土体塑性安定临界值约为5%含盐量土体的2.2倍。研究结果可为盐化粉土地区机场道基承荷能力设计提供参考。

关键词: 土动力学; 机场道基; 动三轴; 盐化粉土; 累积轴向应变; 临界动应力; 动模量

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2023)06-0125-09

Dynamic characteristics of unsaturated salinized silt under cyclic loading

YI Wenni¹, LIU Jincheng², YU Qian^{3,4}, XUAN Mingmin¹, LIU Xizhong¹, YE Xinyu^{1,5}, ZHANG Sheng^{1,5}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100002, China;

3. China Airport Planning and Design Institute, Beijing 101312, China; 4. Airport Engineering Safety and Long-Term Performance Field Scientific Observation and Research Base of Transportation Industry, Beijing 100029, China;

5. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China)

Abstract: Under long-term loading from aircraft, the cumulative deformation of airport subgrade filled with saline silt in northwest China can be a key factor that affects the service performance of the airport. Taking the silt in a typical area of northern China as example, the dynamic triaxial test was carried out to investigate the influence of salt content (mass fraction) on the dynamic characteristics of silt under cyclic loading. A cumulative plastic strain of 4% was selected as the failure strain based on the test results, and a prediction model of dynamic strength of salinized silt was proposed. Results show that with the increase in dynamic stress amplitude, the plastic deformation of salinized silt gradually changed from plastic stability to incremental failure. The salt content largely affected the cumulative axial strain, dynamic modulus, and critical dynamic stress of silt. At the same dynamic stress amplitude, as the salt content increased from 0 to 5%, the cumulative axial strain decreased firstly and then increased at the salt content of 1%. At low dynamic stress amplitude, the dynamic modulus decreased with the increase in salt content. The strength of salinized silt experienced a short growth at 1% salt content and a gradual attenuation at high salt content, which might be explained from a microscopic view that the strength of salinized silt sample was closely related to the ion concentration in the soil pores and the arrangement of soil particles. According to the dynamic strength prediction model, the critical dynamic stress for the silt with 1% salt content was about 2.2 times that of silt with 5% salt content. The conclusions of the study can provide reference for the airport runway design and construction in saline silt area.

Keywords: soil dynamics; airport subgrade; dynamic triaxial; salinized silt; cumulative axial strain; critical dynamic stress; dynamic modulus

收稿日期: 2022-06-07; 录用日期: 2022-08-11; 网络首发日期: 2022-09-30

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.t.20220927.1206.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(52008401); 湖南省自然科学基金(2021JJ40770); 中南大学研究生自主探索创新项目(2022ZZTS0793)

作者简介: 易文妮(2000—), 女, 硕士研究生; 张 升(1979—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 叶新宇, yexinyu113@csu.edu.cn

中国西北、华北地区粉土广泛分布,淡水资源相对匮乏,机场的道基填筑可考虑采用内陆湖含盐水,此时不可避免地造成粉土的盐化。粉土结构松散、易液化,在飞机荷载的长期作用下,盐化粉土道基的服役性能至今尚不明确^[1-3]。

为正确认识道基/路基在长期循环荷载作用下的动力特性,有学者对动力作用下土体刚度软化规律、动强度以及累积轴向应变的发展规律等进行了研究。冷伍明等^[4]研究了动力作用下动应力、围压、压实状态、含水率对铁路路基粗粒土填料累积应变的影响,提出了适用于铁路路基的临界动应力计算模型;马少坤等^[5]研究了地铁动荷载作用下圆砾土的动力特性,分析了压实度、动应力和循环振次对土体滞回曲线、动孔压和累积轴向应变的影响;Li等^[6]通过对公路路基粗集料的累积变形和动模量特性的研究,探究了动应力幅值、循环振次对累积变形的影响。由于交通荷载的周期性、长期性以及土体本身基本物理属性和受力状况的复杂性,以上学者对粗粒土等开展的研究成果不适用于粉土路基工程。另外,部分学者对饱和粉土的动力特性展开了研究。Hussain等^[7]研究了印度古吉拉特邦地震活跃区饱和粉土的动力特性,其循环强度随塑性指数和细粒含量的降低而迅速降低;全玉丁等^[8]通过循环动三轴试验对原状和重塑海洋粉土进行研究,发现原状和重塑样在相同等效循环振次下动强度的差异性随着固结比的增大而减小。目前,针对非饱和粉土在交通循环荷载作用下动力特性研究相对较少。关彦斌等^[9]通过研究交通循环荷载下黄河冲积粉土的动态特性,发现压实粉土的临界动应力随含水率增加线性降低;任华平等^[10]对非饱和粉土的累积轴向应变发展规律进行了研究,并提出了考虑多因素的累积塑性应变模型。但该研究未对粉土临界动应力以及含盐量(质量分数)的影响展开研究。对非饱和粉土在循环荷载作用下的动力特性的研究较少,而且这些研究并未涉及临界动应力和粉土盐化的影响。

粉土的盐化会导致土体性质发生改变,有学者就土体含盐量的影响展开了多项研究。杜宇航等^[11-12]发现,随着含盐量的增加,土体的渗透系数会逐渐降低。周凤玺等^[13]通过固结试验发现孔隙溶液中盐分的存在增大了土体的初始蠕变变形与最终蠕变量;洪安宇等^[14-15]通过对高含盐量土体进行非饱和和不固结不排水三轴剪切试验和直接快剪试验发现,随着氯盐质量分数增加,土体抗剪强度参数先减小后增大,峰值含盐量分别为9%和10%;杨晓华等^[16]发现不同含盐量路基填料在温度变化循环试

验中冻胀和最终沉陷变形量不同。然而,以上研究均是在常规静荷载条件下获得的结果。目前,有少量研究基于动三轴试验探讨了含盐量与动强度和动弹模之间的关系。李来仕^[17]通过动三轴试验发现当振次达到100时易溶盐质量分数越高盐渍土动强度越低;郑英杰等^[18]通过动三轴试验及冻融试验发现粉土初始动模量损伤度随含盐量增加呈线性递增。但以上研究未将含盐量对土体的影响与临界动应力、累积轴向应变进行逻辑联系以及公式表达。

为探究含盐量对道基粉土动力特性的影响,开展了不同动应力幅值和含盐量条件下粉土的动三轴试验,揭示了含盐量对粉土动力特性的影响规律,提出了考虑盐化的粉土累积轴向应变模型以及适用于盐化粉土塑限安定状态下的临界动应力预测模型;同时对盐化粉土临界动应力进行了分析,探究了动力响应演化的内因,为盐化粉土地地区铁路路基和机场道基的设计提供重要依据。

1 试 验

1.1 试验仪器

试验仪器为英国生产的 Controls/WF 动静三轴试验系统(图1),型号为 Dynatirax100/14,该仪器同时具备试验与数据采集系统。试样成型采用自制击实成样器,击实锤质量为2.5 kg,锤头落高45 cm,制样时保持每层锤击数一致。为减少脱模时对试样造成的扰动,采用全自动脱模仪。



图1 动三轴试验系统

Fig. 1 Dynamic triaxial test system

1.2 土样性质

粉土试样取自北方某机场跑道道基施工区地表以下5 m内,根据地下水位勘察情况,施工区地表以下5 m内粉土常年处于非饱和状态。根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行试验可知试验粉土为砂质粉土,其液限为15.4%,塑限为23.0%,塑限指数为7.6,颗粒相对密度为2.67,最优含水率为13.1%,最大干密度为1.87 g/cm³。土样级配曲线见图2。

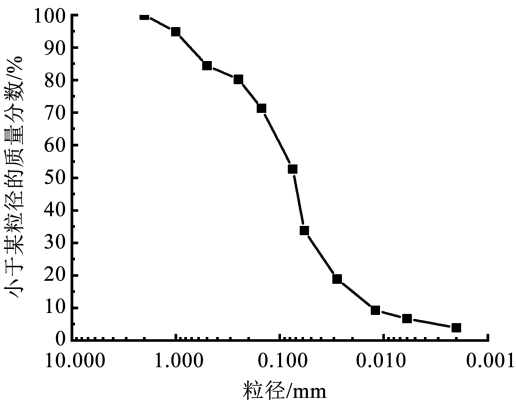


图2 研究区粉土级配曲线

Fig.2 Gradation curve of silt in the study area

部分学者^[19-20]对原状土与重塑土的强度特性展开研究,发现原状土强度略高于重塑土,两种土样在动强度下发展趋势相同。因此,试验中采用土样均为重塑土样,并根据原状土性质及工程实际情况进行设置,最大程度上还原工程实际。现场取样后将土样进行烘干、碾碎、过筛,配置最优含水率土样。根据试样中氯化钠质量与干土质量的比值不同,采用无离子水制备含盐量(质量分数)分别为1%、3%、5%的试样。试样制备过程中,将溶液均匀喷洒入烘干土样中,搅拌均匀后静置48 h。采用自制模具进行击实样制样,试样直径100 mm、高200 mm,分为5层击实,每层压实后对表面进行刮毛处理。试样出模后,裹以保鲜膜,于常温下静置24 h(土样制备示意图3)。为保证压实效果,现场通常使用最优含水率下的粉土进行填筑,道基被大面积硬化覆盖,飞机荷载响应土体深度范围内含水率变化不显著。因此,选择以13.1%含水率的非饱和土进行相关试验(饱和度为67.4%)。为体现实际道基受荷的变形响应,试验过程中并未对饱和度(基质吸力)进行控制。

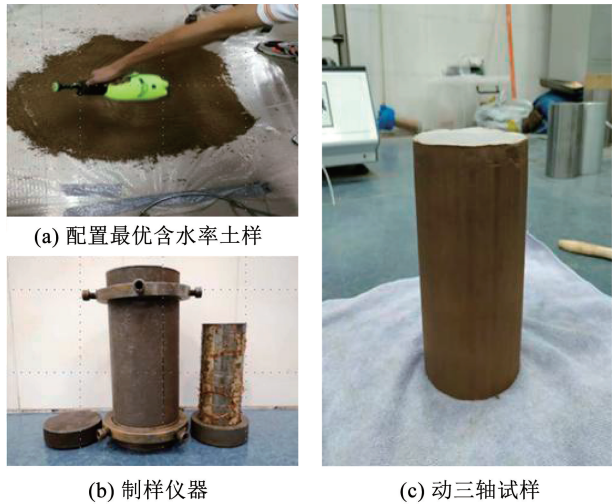


图3 土样制备示意

Fig.3 Schematic of soil sample preparation

1.3 试验方案设计

根据MH/T 5010—2017《民用机场沥青道面设计规范》道面结构层的厚度及容重和粉土容重对道基深度1~5 m处的粉土所处围压进行推算,围压在30~90 kPa。本文围压选取60 kPa代表道基3 m深处的土层所处围压状态。在MH/T 5027—2013《民用机场岩土工程设计规范》中规定,填方段道面以下深度0.8 m内压实度不低于96%,挖方段道面以下深度0.8 m内压实度不低于94%,填方段4 m以下压实度不低于92%。结合实际工程中可能存在压实不均匀的现象,试样压实度统一取94%(干密度1.757 8 g/cm³)进行固结不排水试验。飞机在起降滑行过程中,振动频率与飞机的滑行重量、移动速度有关^[21],支线客机产生的振动频率约为1 Hz,飞机滑行时振动频率为0.5~5 Hz,随着飞机滑行速度增加,飞机升力增大,飞机动荷载对道基影响减小^[22-23]。由于动三轴仪器频率越低,测量数据越准确,综合考虑飞机振动频率及仪器精度,试验中荷载频率统一选用1 Hz,动应力幅值采用半正弦波方式加载^[24]。飞机滑行时道基顶面最大动应力幅值约为100 kPa,为研究不同动应力幅值下道基土体变形特性^[25],取动应力幅值 $\sigma_d = 60、80、100、120、140、180、200、220、260$ kPa。其中,为了充分分析试样不同的应变发展状态,设置了动应力幅值大于1 607 kPa的试样组。试验以累积轴向应变达到10%或循环振次达到10 000作为试验停止条件^[22-24]。

试验分为3个加载阶段,即等压固结阶段、静力预压阶段、动应力施加阶段(半正弦波加载阶段),在动力加载前为消除试样上下的不规则性,避免试样在外力突然作用下产生过大初始变形,进行耗时100 s预压力为15 kPa的静力预压^[4](轴向荷载加载示意图4)。

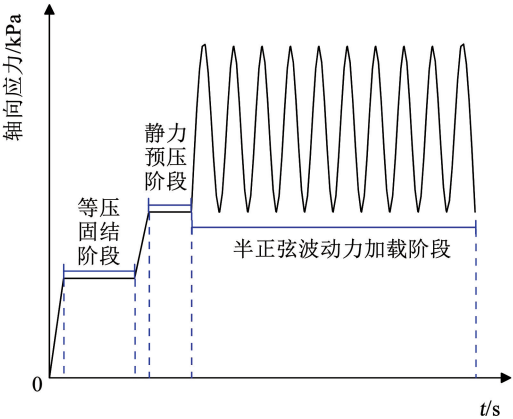


图4 轴向荷载加载示意

Fig.4 Schematic of axial loading

本研究中,原状粉土含盐量低于弱盐渍土的界限含盐量 0.3%,可判定试验用粉土不属于盐渍土,将该粉土的含盐量视为 0。通过资料调研发现^[27-29],西北盐化粉土地区盐分以氯盐为主,机场浅层范围内含盐量在 0~5% 变动。制备含盐量分别为 1%、3%、5% 的试样,研究氯盐对原粉土道基动力特性的影响。固结过程中试样排水量为 0,试样固结前后盐溶液浓度不变。试验共设计 4 组(30 个)试样用于探究在不同含盐量、不同动应力幅值下盐化粉土的动力特性,试验方案见表 1。

表 1 盐化粉土试验方案

Tab. 1 Test conditions of salinized silt

含盐量/ %	相对压实度 C_R /%	围压/ kPa	动应力幅值/kPa
0	94	60	60、80、100、120、140、180、220、240
1	94	60	60、80、100、120、140、180、220、240、260
3	94	60	60、80、100、120、140、160、180
5	94	60	60、80、100、120、140

2 盐化粉土累积轴向应变分析

2.1 累积轴向应变发展趋势

图 5 给出含盐量为 3%、相对压实度 C_R 为 94% 的盐化粉土试样在围压 $\sigma_3 = 60$ kPa 下累积轴向应变 ε_p 随循环振次 N 的变化。可以看出,动应力幅值 σ_d 对累积轴向应变 ε_p 的发展有显著影响。 σ_d 较小时,试样的累积应变随循环振次 N 的增加不断增长最终趋于稳定;随着 σ_d 增大,加载前期的试样累积轴向应变快速发展,随着 N 的增大,累积应变增长速率有所放缓但仍呈现增长趋势。由此,循环荷载下土体的累积应变增长规律受动应力幅值影响较大,主要原因是循环动荷载作用下,土体结构变形中存在临界动应力,即土体不发生结构破坏的最大循环应力,可用于描述路基填料等散体材料在循环荷载作用下的永久变形特性^[28-29]。Werkmeister 等^[30-31]将循环荷载作用下散体材料的塑性变形行为分为塑性安定行为、塑性蠕变行为、增量破坏行为。

对比图 5 可知,当 σ_d 较小时,在整个循环加载过程中,试样产生的累积轴向应变较小,应变基本小于 2%;加载前期,试样的塑性变形发展较快,随着循环周次的增加,应变增长速率逐渐减缓,当加载至一定循环周次后,试样进入加载稳定阶段,累积轴向应变基本处于相对安定或微弱增长的状态,此时试样的累积轴向应变表现为塑性安定。随着 σ_d 的增大(如图 5 中, $\sigma_d = 160$ 和 180 kPa),在加载前期,试样累积轴向应变迅速发展,试样的动力稳定状态被

打破;在循环加载后期,试样累积轴向应变以一定速率持续增长,试样结构虽然处于相对安全状态,但仍存在随着循环振次进一步增大,累积应变速率突变进而发生结构迅速破坏的可能,此时试样的累积轴向变形表现为塑性蠕变。当 σ_d 超过一定限值后(如图 5 中, $\sigma_d = 220$ kPa),试验在循环开始阶段就产生较大变形,且塑性变形增长速率较大,在有限的循环振次后,试样因过大的塑性变形而发生结构破坏,此时试样的破坏形态一般表现为压缩膨胀和剪切破坏,这种试样的应变行为便表现为增量塑性破坏。

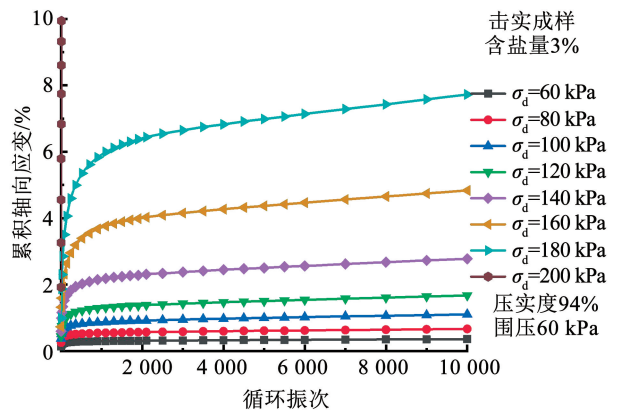


图 5 盐化粉土试样累积轴向应变与循环振次关系

Fig. 5 Relation between cumulative axial strain and cyclic vibration times of salinized silt samples

对于实际工程而言,路基通常不会在有限的交通动载作用下发生突发破坏,而是在长期服役中产生较大沉降,进而引起道面结构破坏,导致跑道不能继续服役。因此,确定路基粉土塑性安定和塑性蠕变状态间的临界动应力水平,是判断路基粉土在交通荷载作用下是否能达到动力稳定状态的关键因素。

2.2 含盐量对累积轴向应变的影响

图 6 为盐化粉土试样试验过程中累积轴向应变发展速率与累积轴向应变关系曲线,根据变形行为对图 6 曲线进行区间划分^[32]。当含盐量为 3% 和 5% 时,不同动应力幅值下试样破坏形态有明显区分,试样分别在动应力幅值为 220 和 140 kPa 时迅速发生结构破坏。含盐量为 0 和 1% 的试样在动应力幅值为 260 kPa 时,试样应变速率均有所增长,但尚处于塑性蠕变阶段。其中,含盐量为 0 的试样应变速率发展更快,并在试验停止时应变达到 10%。如以试样塑性蠕变及增量破坏间临界状态为土体结构破坏标准,当动应力幅值为 260 kPa 时,含盐量为 0 试样的试验已临近结构破坏,含盐量为 1% 的试样应变发展相对稳定。

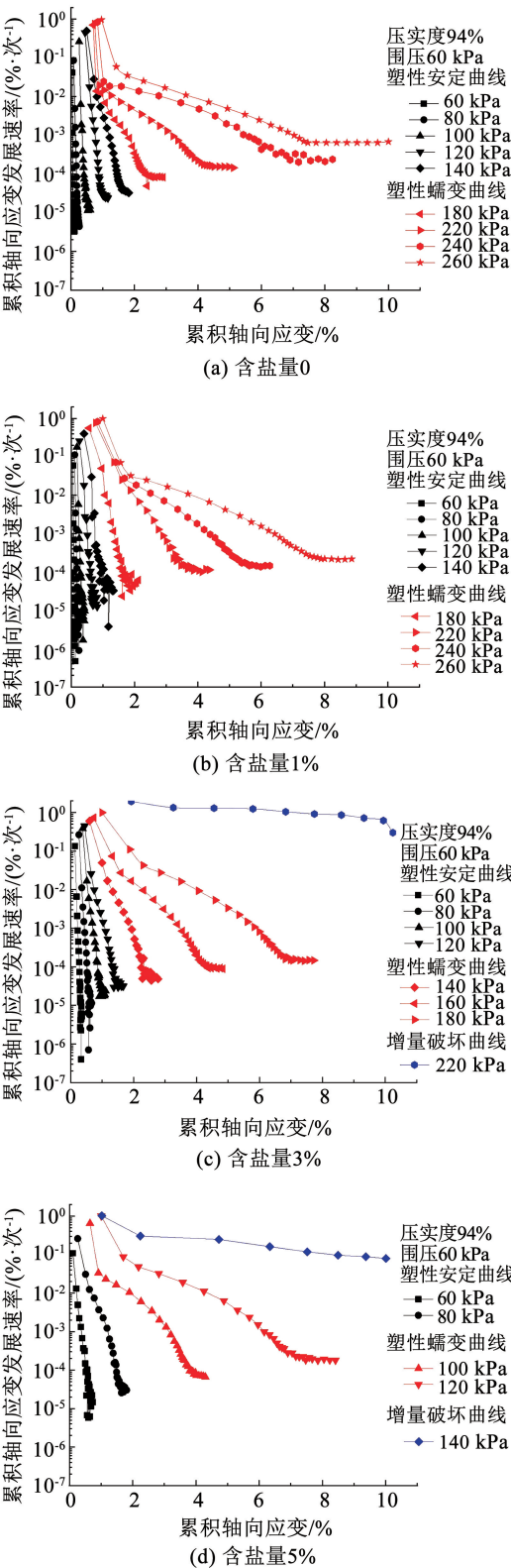


图6 不同含盐量下累积轴向应变发展速率与累积轴向应变关系

Fig. 6 Relation between cumulative axial strain development rate and cumulative axial strain with different salt contents

图7为围压60 kPa时不同含盐量试样在试验停止时($N=10\,000$ 次)累积轴向应变随动应力幅值的变化。可以看出,含盐量对试样累积轴向应变的

影响经历了两个阶段。第一阶段为原粉土(含盐量0)向含盐量1%的盐化粉土过渡阶段,在此阶段内含盐量增加有助于试样的“硬度”增强,相同动应力幅值下,盐化粉土的累积应变小于原粉土。第二阶段是由低含盐量向高含盐量的发展阶段,在此阶段内,随着含盐量增加试样的“硬度”快速衰减,相同动应力幅值下,含盐量越大,试样的累积轴向应变越大。原因为随着含盐量的增大,孔隙溶液中离子浓度增加,土颗粒间双电层厚度减小,导致颗粒间斥力减小、联结增强。当含盐量为0~1%时,表现为颗粒间应力较大,颗粒可移动范围缩小,导致土样累积轴向应变降低;当含盐量为1%~5%时,由于土粒间双电层厚度存在极限,随着盐溶液离子浓度进一步增强,土样颗粒排列由定向性分散结构向无定向絮凝结构转变,导致土体结构疏松,表现为在相同动应力幅值下,土体累积塑性应变增大^[33-34]。

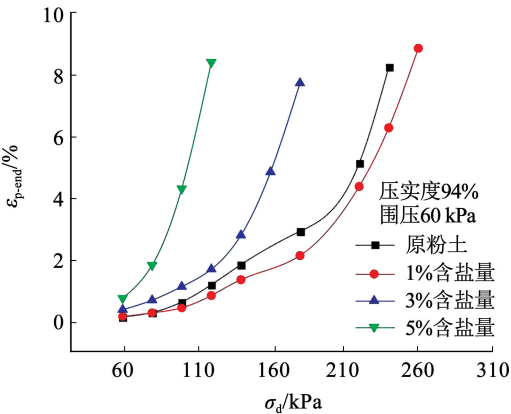


图7 不同含盐量下试验停止时($N=10\,000$)累积轴向应变 $\varepsilon_{p-end}-\sigma_d$ 关系

Fig. 7 Cumulative axial strain $\varepsilon_{p-end}-\sigma_d$ curves of samples with different salt contents when the test stops($N=10\,000$)

2.3 考虑盐化的粉土累积轴向应变模型

利用式(1)拟合图6中不同含盐量下盐化粉土的 $\varepsilon_{p-end}-\sigma_d$ 关系,如图8所示,拟合结果见表2。

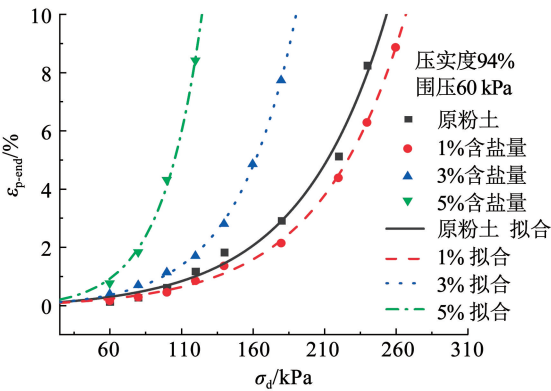


图8 不同含盐量下盐化粉土的 $\varepsilon_{p-end}-\sigma_d$ 关系拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of $\varepsilon_{p-end}-\sigma_d$ relation of salinized silt with different salt contents

根据 Monismith 提出的指数模型^[35],采用式(1)对相同围压下不同含盐量盐化粉土的 $\varepsilon_{p-end} - \sigma_d$ 关系进行拟合^[10],即

$$\varepsilon_{p-end} = A_1 (e^{B_1 \sigma_d} - 1)$$

(1)

其中 A_1 、 B_1 为与土性质相关的参数。

表 2 不同含盐量下盐化粉土 $\varepsilon_{p-end} - \sigma_d$ 关系公式参数取值

Tab. 2 Parameter values of $\varepsilon_{p-end} - \sigma_d$ relation formula of salinized silty soil with different salt contents

含盐量/%	围压/kPa	A_1	B_1	R^2
0	60	0.158 2	0.016 4	0.98
1	60	0.112 0	0.016 9	0.99
3	60	0.102 2	0.024 1	0.99
5	60	0.117 7	0.035 8	0.99

由表 2 可知,当含盐量由 0 增至 5% 时, A_1 随含盐量 w_y 的增加先减小后增大,拟合公式见式(2); B_1 随含盐量 w_y 增大而快速增大,拟合公式见式(3)。

$$A_1 = \frac{0.042\ 6}{w_y^{0.264}}, R^2 = 0.90$$

(2)

$$B_1 = 0.018\ 7 - 0.318 w_y + 8.51 w_y^2, R^2 = 0.99$$

(3)

将式(2)和(3)代入式(1)整理可得不同含盐量下循环振次 $N = 10\ 000$ 时盐化粉土累积轴向应变 ε_{p-end} 随动应力幅值 σ_d 和含盐量的变化关系:

$$\varepsilon_{p-end} = A_1 (e^{B_1 \sigma_d} - 1) = \frac{0.042\ 6}{w_y^{0.264}} \times [e^{(0.018\ 7 - 0.318 w_y + 8.51 w_y^2) \sigma_d} - 1]$$

(4)

3 盐化粉土动力强度特性分析

累积轴向应变是盐化粉土在动力效应下导致道基沉降的直观反映,动模量和临界动应力分别代表道基抵抗变形和承受动荷载的能力。为探究盐化粉土动力响应内因,对盐化粉土动模量及临界动应力与含盐量之间的关系展开研究。

3.1 盐化粉土动模量发展规律

动弹性模量计算式为^[18]

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\Delta \varepsilon}$$

(5)

式中: σ_d 为动应力幅值, $\Delta \varepsilon$ 为当次循环中最大和最小应变差。

图 9 为 $\sigma_3 = 60\ \text{kPa}$ 、 $\sigma_d = 60\ \text{kPa}$ 时不同含盐量下试样的动模量 E_d 随循环振次 N 的变化。可以看出,试样含盐量越大,试样的动模量越小。相同动应力幅值下,试样含盐量由 0 上升至 5%,试样的动模量衰减了约 40%。原因为在低动应力水平下,随着易溶盐质量分数增加,土体内部结构改变,扰乱了土体原有的孔隙结构,使得孔隙变大,进而削弱甚至直接破坏了土颗粒间原有的胶结连接,使土体的整体结构性大大降低,在动荷载作用下最终导致盐化粉土的动模量降低^[34,36]。

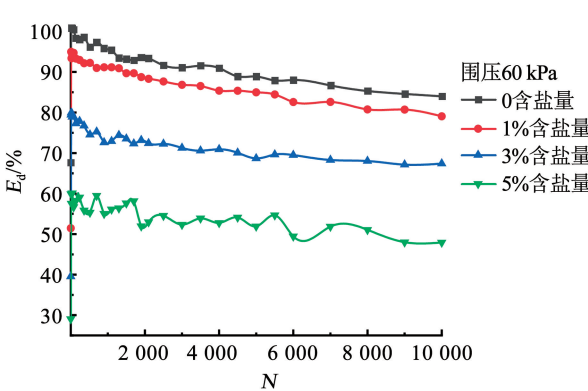


图 9 $\sigma_d = 60\ \text{kPa}$ 时不同含盐量下盐化粉土 $E_d - N$ 关系

Fig. 9 $E_d - N$ relation of salinized silt with different salt contents at $\sigma_d = 60\ \text{kPa}$

3.2 盐化粉土临界动应力分析

3.2.1 破坏标准

国外一些学者提出,可按照动荷载作用下变形转陡作为土体破坏应变的判别标准^[37]。Lee^[38]通过室内动三轴试验发现高灵敏性黏土应变达到 4% ~ 6%、低灵敏性黏土应变达到 2% ~ 3% 时会出现破坏剪切面,此时若循环振次继续增加,应变将会急速上升,最终导致试样结构失稳。为便于对土体结构破坏作出统一判别,提出以单幅应变 3% 作为判断土体破坏的应变标准;Seed 等^[37]将试样累积轴向应变达到某一定值(如 5% 或 10%)作为破坏应变标准。此外,不少学者根据研究土样的工程背景,分别以累积应变轴向应变达到 1%、5%、10% 或者 15% 作为破坏应变的标准^[35,39]。

土体破坏标准可分为两种:一种是上述文献所言,以试样在试验过程中土体结构破坏作为破坏应变标准;另一种是根据工程设计条件,推算土体所能承受的最大沉降,并以此换算作为破坏应变标准。从工程实际的角度出发,路基的“破坏”并不是真正意义上路基土体的结构破坏,而是路基是否还能满足正常的交通运营条件。因此,综合考虑机场跑道道基的实际工程情况、试验中试样应变的发展特征,根据 MH/T 5027—2013《民用机场岩土工程设计规范》地基沉降指标规定,参考相关研究^[39]可算得飞机跑道在移动荷载作用下道基土体的允许沉降变形为 4% ~ 6%。

此外,通过分析不同含盐量下试样 $\varepsilon_{p-end} - \sigma_d$ 关系曲线(图 7)发现,试样的累积轴向应变 ε_{p-end} 达 2% ~ 4% 时,其增长速率加快,在 ε_{p-end} 达到 4% 后增长速率趋于稳定,呈线性增长趋势。结合上述土体破坏标准的分析,可将累积轴向应变 ε_{p-end} 达到 4% 视为不同试验条件下 $\varepsilon_{p-end} - \sigma_d$ 变化曲线的分隔点。选取累积轴向应变达到 4% 作为破坏应变标准,同时以各试样累积轴向应变发展过程中试样应

变达到 4% 时所对应的循环振次作为破坏循环振次 N_{tp} 。

3.2.2 临界动应力预测模型

利用式(4)计算当循环振次 $N = 10\ 000$ 时不同含盐量条件下,盐化粉土试样累积轴向应变达到 4% 时所需的动应力幅值,结果如表 3 所示。

表 3 不同含盐量下试样在 $N = 10\ 000$ 时累积轴向应变达到 4% 所需的动应力幅值

Tab.3 Dynamic stress amplitude required for cumulative axial strain of samples to reach 4% at $N = 10\ 000$ times with different salt contents

含盐量/%	围压/kPa	动应力幅值/kPa	循环振次 N
1	60	213	10 000
3	60	153	
5	60	97	

图 10 为不同含盐量下盐化粉土试样达到破坏应变时动应力幅值同循环振次的关系。可以看出,达到土体破坏应变标准时,含盐量越大,所需的动应力幅值越小。

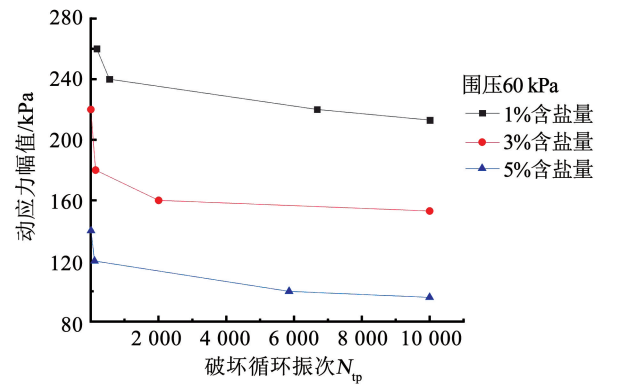


图 10 不同含盐量粉土达到破坏应变时动应力幅值 - 循环振次曲线

Fig. 10 Dynamic stress amplitude-cyclic vibration time curves of silt with different salt contents when it reaches failure strain

不同含盐量下粉土达到破坏应变时动应力 $\sigma_{d,tp}$ 与相应破坏循环振次 N_{tp} 可采用式(6)描述^[10]:

$$\sigma_{d,tp} = \alpha_0 + \beta_0 \gamma_0^{N_{tp}} \tag{6}$$

式中: α_0 、 β_0 、 γ_0 均为拟合参数,拟合取值见表 4,拟合结果见图 11。可以看出,式(6)对不同含盐量下 $\sigma_3 = 60\text{ kPa}$ 时,盐化粉土试样达到破坏应变时动应力 - 循环振次曲线的拟合效果较好。

表 4 拟合参数取值
Tab.4 Fitting parameter values

含盐量/%	α_0	β_0	γ_0	R^2
1	213.096 7	60.426 7	0.998 5	0.95
3	144.342 6	59.228 0	0.999 4	0.97
5	95.000 4	48.189 6	0.994 3	0.78

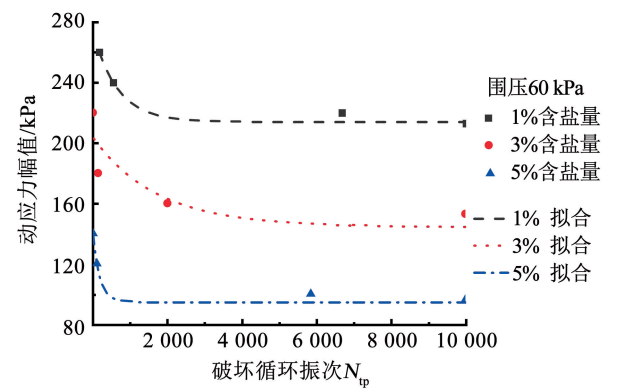


图 11 不同含盐量下重塑粉土达到破坏应变时动应力幅值 - 循环振次拟合曲线

Fig. 11 Dynamic stress amplitude-cyclic vibration time fitting curves of remolded silt with different salt contents when it reaches failure strain

从表 4 中各拟合参数的取值可以看出,对于式(6),随着破坏振次 N_{tp} 的增大, $\sigma_{d,tp}$ 逐渐减小;当破坏循环振次 N_{tp} 趋近于无穷大时, $\sigma_{d,tp-\min} = \alpha_0$ 。同理可以认为,对于不同条件下的盐化试样,当加载动应力幅值小于 α_0 时,随着循环振次的增加,试样的累积轴向应变将趋于一个稳定值,且小于 4%。因此,可以认为塑性安定临界动应力应是试样达到破坏应变时动应力的最小值 $\sigma_{d,tp-\min}$ 。不同含盐量下粉土试样的塑性安定临界动应力取值见表 5,不同含盐量下试样的临界动应力曲线见图 12。

表 5 不同含盐量下盐化粉土试样塑性安定临界动应力幅值
Tab.5 Critical dynamic stress amplitude of plastic stability of salinized silt samples with different salt contents

含盐量/%	围压/kPa	塑性安定临界动应力幅值/kPa
0	60	192
1	60	213
3	60	144
5	60	95

参考试样变形行为划分标准对含盐量与动应力幅值关系进行划分,并利用虚线对不同变形行为进行区分。由图 12 可知,在不同的破坏标准下,临界动应力发展趋势相似,含盐量对盐化粉土的塑性安定状态临界值存在显著影响,含盐量越大,塑性安定临界值越小。由于实际工程中,道基的破坏是指道基是否能满足正常运营需要,而非真正的结构破坏。因此,以试样产生 4% 应变作为破坏标准时临界动应力值偏小,更符合工程实际。其中,1% 含盐量的土体塑性安定临界值约为 5% 含盐量土体的 2.2 倍。当含盐量为 0 ~ 1% 时,由于孔隙溶液中离子浓度较低,土颗粒表面形成羽翼状胶体,颗粒间联结增强^[29],导致土体临界动应力增强。当含盐量为 1% ~ 5% 时,羽翼状胶体逐渐消失,土体内部孔隙分

布范围变大,土体内部形成松散的絮凝状结构^[33],土体结构松散,导致临界动应力急剧降低。到含盐量 5% 时,试样的临界动应力衰减了约 60%。

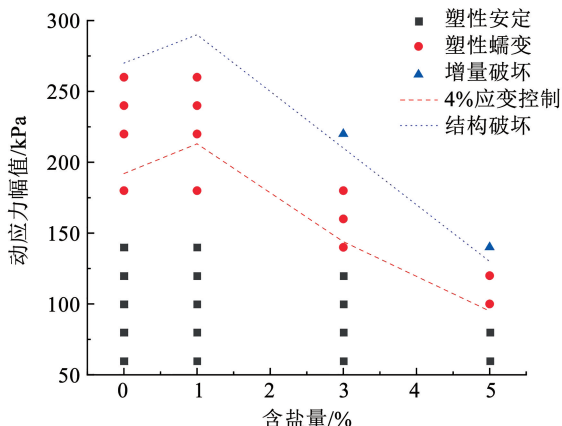


图 12 不同含盐量下试样的临界动应力曲线

Fig. 12 Critical dynamic stress curves of samples with different salt contents

综合粉土盐化前后动模量及临界动应力的变化规律不难发现,随着含盐量的增大,试样的动模量和临界动应力相对于原粉土试样都出现了相当大的衰减。原因为土颗粒的连接包括土颗粒的接触连接、颗粒间吸附水膜连接和胶结连接^[33-34]。随着含盐量的增大,孔隙水中的离子浓度增大,导致土体内部结构改变,从而土刚度和强度均发生大幅衰减。

4 结 论

1) 含盐量对动荷载下粉土的动力特性影响显著。动模量随循环振次、含盐量的增大而减小;粉土中少量的盐分(如 1% 的含盐量)有助于粉土“硬化”,使累积塑性应变降低。但含盐量过大时,动荷载作用下粉土累积塑性应变明显增大。

2) 依据规范要求及累积塑性应变发展速率,以累积轴向应变达到 4% 作为粉土道基破坏应变标准,从而获得不同含盐量下盐化粉土临界动应力预测模型。该模型考虑了含盐量与动应力之间的关系,可为不同含盐量的机场粉土道基承荷能力的计算提供参考。

3) 在不同破坏标准下,盐化粉土临界动强度变化趋势相同。当含盐量较低时(0~1%),粉土累积轴向应变降低;随着含盐量持续增加(超过 1%),粉土的动力性能衰减明显,含盐量为 1% 的试样临界动强度约为 5% 盐化试样的 2.2 倍。从细观上分析,低含盐量有助于颗粒间应力增强,而当含盐量进一步增大,会促使土体内部结构改变,有利于累积应变的发展,使试样的动模量和临界动应力相对原粉土出现显著衰减。

参考文献

- [1] 胡春. 内蒙古中小机场发展战略研究[D]. 上海:复旦大学, 2011
HU Chun. Research on development strategy of small and medium-sized airports in Inner Mongolia[D]. Shanghai: Fudan University, 2011
- [2] 卢海印. 中国民用航空制造业目标定位及发展路径研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015
HU Haiyin. The targeting and development strategy of China's civil aviation industry[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015
- [3] 董念清. 中国通用航空发展现状、困境及对策探析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2014, 16(1): 110
DONG Nianqing. A research on the situation, difficulties and countermeasures of China's general aviation development[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2014, 16(1): 110
- [4] 冷伍明, 周文权, 聂如松, 等. 重载铁路粗粒土填料动力特性及累积变形分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 728
LENG Wuming, ZHOU Wenquan, NIE Rusong, et al. Analysis of dynamic characteristics and accumulative deformation of coarse-grained soil filling of heavy-haul railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 728. DOI:10.16285/j.rsm.2016.03.015
- [5] 马少坤, 王博, 刘莹, 等. 南宁地铁区域饱和圆砾土大型动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 168
MA Shaokun, WANG Bo, LIU Ying, et al. Large-scale dynamic triaxial tests on saturated gravel soil in Nanning metro area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 168
- [6] LI Jia. Permanent deformation and resilient modulus of unbound granular materials[D]. Ames: Iowa State University, 2013
- [7] HUSSAIN M, SACHAN A. Dynamic behaviour of Kutch soils under cyclic triaxial and cyclic simple shear testing conditions [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 14(8): 902
- [8] 全玉丁, 杨贵, 刘汉龙. 原状和重塑海洋粉土动力特性对比试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 952
TONG Yuding, YANG Gui, LIU Hanlong. Comparative test study on dynamic characteristics of undisturbed and remolded marine silt [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2014, 36(4): 952. DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0952
- [9] 关彦斌, 肖军华, 陈建国. 循环荷载下压实粉土的动态特性[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 28
GUAN Yanbin, XIAO Junhua, CHEN Jianguo. Dynamic characters of compacted silt under cyclic load [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(2): 28
- [10] 任华平, 刘希重, 宣明敏, 等. 循环荷载作用下击实粉土累积塑性变形研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1045
REN Huaping, LIU Xizhong, XUAN Mingmin, et al. Study of accumulative plastic deformation of compacted silt under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1045
- [11] 杜宇航. 盐渍化作用对黄土工程特性的影响及改良研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019
DU Yuhang. Research on influence of salinization concerning about engineering properties of loess and its improvement[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019
- [12] 王东栋. 冻融循环下盐渍土风致疲劳动力特性的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2017
WANG Dongdong. Experimental study on wind-induced fatigue dynamic characteristic of saline soil under freeze-thaw cycles[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2017
- [13] 周凤玺, 王立业, 赖远明. 饱和盐渍土的一维蠕变试验与模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 142
ZHOU Fengxi, WANG Liye, LAI Yuanming. One-dimensional creep tests and model studies on saturated saline soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 142. DOI: 10.11779/CJGE202001016
- [14] 洪安宇, 杨晓松, 党进谦, 等. 非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 52
HONG Anyu, YANG Xiaosong, DANG Jinqian, et al. Shear strength property of unsaturated chlorine saline soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 52.

- DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.04.012
- [15] 陈炜韬,王明年,王鹰,等.含盐量及含水量对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J].中国铁道科学,2006,27(4):1
CHEN Weitao, WANG Mingnian, WANG Ying, et al. Influence of salt content and water content on the shearing strength parameters of chlorine saline soil[J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 1. DOI:10.3321/j.issn:1001-4632.2006.04.001
- [16] 杨晓华,刘伟,张莎莎,等.温度变化对粗粒硫酸盐渍土路基变形影响分析[J].中国公路学报,2020,33(3):64
YANG Xiaohua, LIU Wei, ZHANG Shasha, et al. Influence of temperature change on deformation of coarse-grained sulfate saline soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 64
- [17] 李来仕.吉林省镇赉地区盐渍土动力特性试验研究[D].长春:吉林大学,2017
LI Laishi. Experimental study on dynamic characteristics of saline soil in Zhenlai area, Jilin province [D]. Changchun: Jilin University, 2017
- [18] 郑英杰,金青,崔新壮,等.冻融循环作用下黄泛区饱和含盐粉土动力性能及细观损伤演化规律[J].中国公路学报,2020,33(9):32
ZHENG Yingjie, JIN Qing, CUI Xinzhuang, et al. Dynamic behavior and meso-damage evolution of saturated saline silt from Yellow River flooded area under freezing-thaw cycle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 32. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.09.004
- [19] 赵俊明,刘松玉,石名磊,等.交通荷载作用下低路堤动力特性试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(5):921
ZHAO Junming, LIU Songyu, SHI Minglei, et al. Experimental study on dynamic response of low embankment under traffic load[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(5): 921. DOI:10.3321/j.issn:1001-0505.2007.05.036
- [20] 王淑云,楼志刚.原状和重塑海洋粘土经历史荷载后的静强度衰减[J].岩土力学,2000,21(1):20
WANG Shuyun, LOU Zhigang. The degradation of undrained shear strength of undisturbed and remolded marine clay after cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 20. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2000.01.005
- [21] 凌道盛,王云龙,赵云,等.飞机主起落架移动荷载作用下道基动力响应分析[J].岩土工程学报,2018,40(1):64
LING Daosheng, WANG Yunlong, ZHAO Yun, et al. Dynamic response of subgrade under moving loads of main landing gears[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 64. DOI:10.11779/CJGE201801005
- [22] 刘小兰,张献民,董倩.飞机滑行下道基动静模量相关分析模型[J].北京航空航天大学学报,2019,45(4):778
LIU Xiaolan, ZHANG Xianmin, DONG Qian. Correlation analysis model of dynamic and static modulus for subgrade with taxiing aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(4): 778. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0428
- [23] 翁兴中,寇雅楠,颜祥程.飞机滑行作用下水泥混凝土道面板动响应分析[J].振动与冲击,2012,31(14):79
WENG Xingzhong, KOU Yanan, YAN Xiangcheng. Dynamic response of cement concrete pavement under aircraft taxiing load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 79
- [24] 蔡迎春,郑元勋,刘忠玉,等.飞机荷载作用下粉砂土路基动力响应研究[J].岩土力学,2012,33(9):2863
CAI Yingchun, ZHENG Yuanxun, LIU Zhongyu, et al. Study of dynamic response of silty sand subgrade loaded by airplane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2863. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2012.14.017
- [25] 赵云.飞机荷载作用下高填方机场道基动力响应及累积沉降研究[D].杭州:浙江大学,2018
ZHAO Yun. Dynamic responses and accumulative settlement of subgrade under aircraft load in high-fill airport [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018
- [26] 蔡袁强,赵莉,曹志刚,等.不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1238
CAI Yuanqiang, ZHAO Li, CAO Zhigang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1238. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.0947
- [27] 张平川,董兆祥.敦煌民用机场地基的破坏机制与治理对策[J].水文地质工程地质,2003(3):78
ZHANG Pingchuan, DONG Zhaoxiang. Destruction mechanism and treatment countermeasure of dunhuang civil airport foundation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003(3): 78. DOI:10.3969/j.issn.1000-3665.2003.03.020
- [28] 熊云亮,高一飞.克拉玛依民用机场盐渍土地基处理试验浅析[J].西部探矿工程,2006(增刊1):106
XIONG Yunliang, GAO Yifei. Analysis of saline soil foundation treatment in Karamay Civil Airport[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(Sup.1): 106. DOI:10.3969/j.issn.1004-5716.2006.zl.058
- [29] 华遵孟,沈秋武.某机场跑道破坏原因与防治[J].工程勘察,1992(6):14
HUA Zunmeng, SHEN Qiuwu. Failure analysis and prevention of runway in an airport[J]. Engineering Investigation and Survey, 1992(6): 14
- [30] WERKMEISTER S, NUMRICH R, WELLNER F. The development of a permanent deformation design model for unbound granular materials with the shakedown concept[C]//International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields. Lisbon: [s. n.], 2002
- [31] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Pavement design model for unbound granular materials[J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(5): 665. DOI:10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:5(665)
- [32] NIE R, SUN B, LENG W, et al. Resilient modulus of coarse-grained subgrade soil for heavy-haul railway: an experimental study[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150(4): 106959. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106959
- [33] 姚传芹,韦昌富,马田田,等.孔隙溶液对膨胀土力学性质影响[J].岩土力学,2017,38(增刊2):116
YAO Chuanqin, WEI Changfu, MA Tianian, et al. Effects of pore solution on mechanical properties of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup.2): 116
- [34] 梁健伟,房营光,陈松.含盐量对极细颗粒黏土强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3821
LIANG Jianwei, FANG Yingguang, CHEN Song. Experimental research on effect of salt content on the strength of tiny-particle clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup.2): 3821. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2009.z2.076
- [35] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1975(537): 1
- [36] 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):2
TANG Yiqun, WANG Yanling, 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): 2. DOI:10.3321/j.issn:0253-374X.2004.06.001
- [37] SEED H B, CHAN C K, MONISMITH C L. Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay[J]. Highway Research Board Proceedings, 1955
- [38] LEE K L. Cyclic strength of a sensitive clay of eastern canada[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 163
- [39] 聂庆科,白冰,胡建敏,等.循环荷载作用下软土的孔压模式和强度特征[J].岩土力学,2007,28(增刊1):724
NIE Qingke, BAI Bing, HU Jianmin, et al. The pore pressure model and undrained shear strength of soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Sup.1): 724