

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

交通荷载下饱和软黏土的不排水变形特性

孙 磊, 王钰轲

Undrained deformation characteristic of saturated soft clay under traffic loading SUN Lei and WANG Yuke

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性

Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths 赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 李同录, 李萍, 李燕, 张林 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 74-80

人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究

An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay 杨爱武, 郑宇轩, 肖敏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 133-133

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models 魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73

盾构施工与波浪荷载耦合作用后软土力学特性

Mechanical properties of soft clay after coupling between shield construction and wave loading 刘浩旭, 朱剑锋, 饶春义, 潘斌杰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 97-103

高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究

An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content 张遂, 匡航, 靳占英, 徐国方 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 116-124

分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading 张振,陈勇,杨天亮,叶观宝,郑文强 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 89-96



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310006

孙磊, 王钰轲. 交通荷载下饱和软黏土的不排水变形特性 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 126-137. SUN Lei, WANG Yuke. Undrained deformation characteristic of saturated soft clay under traffic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 126-137.

交通荷载下饱和软黏土的不排水变形特性

孙磊1,王钰轲2

(1. 宿州学院资源与土木工程学院,安徽 宿州 234000;

2. 郑州大学水利与交通学院,河南郑州 450001)

摘要:针对以往交通荷载下饱和软黏土不排水变形特性的研究大多忽视循环围压影响的问题,为了深入理解软黏土地基 在交通循环荷载作用下的变形特性,采用 GDS 变围压动三轴试验系统模拟交通循环荷载应力路径,对温州饱和软黏土进行 了一系列不排水条件下的恒定围压(constant confining pressure, CCP)和变围压(variable confining pressure, VCP)应力路径循环 加载试验,重点分析了循环动应力比(CSR)以及应力路径(a)对饱和软黏土动态回弹模量和轴向累积应变的影响。试验结 果表明:在不排水条件下,饱和软黏土的动态回弹模量随着 CSR 和 a 的增大而减小,而轴向累积应变随着 CSR 和 a 的增大 而增大,说明循环围压作用能够提高饱和软黏土在不排水循环加载下的刚度并限制其轴向应变的累积。基于试验结果并 结合现有的经验模型,分别构建了可以反映交通循环荷载应力路径效应的饱和软黏土动态回弹模量和轴向应变累积经验 模型,可以用于交通荷载下软黏土地基长期变形的计算分析。

关键词: 饱和软黏土;应力路径;回弹模量;轴向累积应变;经验模型

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2024)06-0126-12

Undrained deformation characteristic of saturated soft clay under traffic loading

SUN Lei¹, WANG Yuke²

(1. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000, China;
2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Previous studies on the undrained deformation behavior of saturated soft clay under traffic loading usually ignored the effect of cyclic confining pressure. In the present study, a series of undrained constant confining pressure (CCP) and variable confining pressure (VCP) cyclic triaxial tests were conducted on Wenzhou soft clay through GDS cyclic triaxial test system to investigate the deformation behavior of saturated soft clay subgrade under different stress paths due to traffic loading. Special attention was paid to the effects of cyclic stress ratio (*CSR*) and stress path (α) on the dynamic resilient modulus as well as axial accumulated strain. The test results show that under undrained conditions, the dynamic resilient modulus decreases with the increase of *CSR* and α . It suggests that cyclic confining

收稿日期: 2023-10-08; 修订日期: 2024-05-16 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109140);安徽省教育厅高校优秀青年人才支持项目(gxyq2022106);安徽省自然科学基金项目 (1908085QE215)

第一作者: 孙磊(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: leisun2015@163.com

通讯作者: 王钰轲(1989—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土的基本特性与地基处理方面的研究工作。E-mail: ykewang@163.com

pressure can improve the stiffness and restrain the axial strain accumulation of saturated soft clay under cyclic loading. Based on the test results and the existing empirical models, a dynamic resilient modulus empirical model and an axial strain accumulation model were established, respectively, which consider the influence of stress paths due to traffic loading, and can be used to calculate and analyze the long-term deformation of soft clay soil foundation under traffic loading.

Keywords: saturated soft clay; stress path; resilient modulus; axial accumulated strain; empirical model

高速公路(铁路)、城市地铁以及机场跑道等重大 交通基础设施是带动经济发展和构建交通强国的重 要基础,保障交通基础设施的服役安全对提升城市韧 性至关重要[1-3]。交通基础设施在服役过程中面临的 主要威胁来源于交通工具(汽车、火车、飞机等)长期运 营引发的线路沉降问题,如甬台温高速平苍段在开通 运营后月平均沉降量达到了 3.46 cm^[4]; 上海地铁一号 线在经历十余年的运营后其轴向差异沉降高达 10 cm^[5]; 温州永强机场在竣工运营4a后的沉降高达16.6 cm^[6]。 上述交通线路之所以在开通运营之后产生较大的沉 降还与其部分路段建造在软黏土地基上关系密切,尤 其当软黏土处于饱和状态时,对上部交通工具反复加 载引起的附加动应力极为敏感并产生较大的塑性应 变累积继而引发整个路基的沉降,严重影响运营线路 的平顺性和安全性,这也是交通基础设施建造及维护 成本高昂的主要原因。可见,研究饱和软黏土在交通 循环荷载作用下的变形特性对保障交通基础设施的 服役安全和降低维护费用都具有重要的现实意义。

国内外专家学者围绕交通线路沉降问题从不同 的视角开展了大量卓有成效的研究工作。如 Hyde 等^[7] 通过蠕变和反复加载试验对比分析了粉质黏土的塑 性变形特性,指出塑性应变和平均孔压在2种试验模 式下的发展规律基本类似,同时蠕变试验的结果可以 成功预测其在重复加载下的反应。何利军等图基于三 轴蠕变试验结果构建了适用于湛江软黏土的流变模 型并可用于指导海积软黏土地区的公路建设。根据 自然沉积的软黏土具有结构性的特点,杨爱武等四通 过三轴蠕变试验研究了人工制备结构性软黏土的长 期变形特性并提出反映土体结构性影响的预测方 程。Chai 等^{10]} 根据交通循环荷载以及路基特点对经 典指数模型进行了拓展并通过实测数据验证了其适 用性。Guo等^[11]针对温州饱和软黏土开展了5万次 的大周数循环三轴不排水加载试验,提出了容许循环 应力比的概念并根据应变时程曲线的特点构建了长 期应变累积经验模型。臧濛等[12]通过指数与双曲线 函数融合提出了能更好描述在循环荷载作用下黏土

累积变形的改进模型。刘志强等四研究了隧道下卧 土层粉质黏土在地铁循环荷载幅值级频率等因素下 的动力特性,结果表明加速度响应受循环荷载频率的影 响较为显著。郑晴晴等[14]研究发现地铁运营间歇效 应能够削弱软黏土的刚度弱化。穆锐等[15] 通过分级 动三轴循环加载试验研究了原状红黏土在高速列车 荷载作用下的动模量变化规律及其预测模型。沈扬 等16月基于扭剪试验分析了循环动应力水平级频率对 南京河西地区软黏土应变累积曲线及剪切模量的影 响。袁亮等[17]通过粉质黏土原位样和重塑试样的三 轴不排水循环加载试验探究了结构性对粉质黏土临 界动应力及能量耗散的影响。然而,出于认知差异及 试验条件的限制,以往的研究大多集中于探究土体在 竖向偏应力单独循环加载下的轴向应变累积特性,而 忽略了交通循环荷载在地基土体中引起的水平方向 动应力分量。实际上,交通车辆行驶过程中在其车轮 正下方土体中引起的动应力场包括竖向正应力(σ_{μ})、 水平向正应力(σ_{22})以及剪应力(σ_{12}),同时这些应力变 化的相互联合作用将导致应力主轴的不断旋转[18]。

测试技术装备的不断升级使得模拟循环荷载在 地基土体中引起的复杂应力路径成为可能。近年来, 围绕交通循环荷载在地基软黏土中引起的竖向与水 平向循环正应力耦合效应,部分专家学者利用变围压 动三轴试验系统可以独立控制循环偏应力和循环围 压的特点,针对饱和软黏土开展了一系列的变围压三 轴循环加载试验,揭示了循环围压对饱和软黏土的孔 压和应变等动力特性具有显著的影响。如谷川等[19] 通过变围压三轴不排水循环加载试验指出循环围压 对饱和软黏土的孔压发展具有显著的影响,并限制轴 向应变的累积;黄珏皓等[20] 通过宁波软黏土在不同循 环围压幅值及频率下的不排水三轴循环加载试验得 出了类似的结论; 刘家顺等[21] 通过饱和粉质黏土在部 分排水状态下的三轴循环加载试验发现循环围压能 够促进土体轴向应变的累积;王朝辉等[22]、黄珏皓 等[23]的相关变围压试验结果进一步验证了循环围压 对部分排水条件下饱和软黏土的永久轴向应变和体

应变的发展具有显著的促进作用。然而在以往的研究中,部分排水仅是在循环加载过程中通过打开排水阀门实现且无法量化,由于部分排水会造成试样内部的应力和孔压分布不均匀,试验结果将与试样的尺寸 有很大的相关性,总结出的相关试验规律与经验公式 也仅适用于对应试验工况下的有效应力变化情形,缺 乏唯一性。因而只能作为规律性探讨而限制了其用 于实际工程分析。此外,目前人们对于天然饱和软黏 土在不排水变围压三轴循环加载作用下的回弹和应 变累积等变形特性的认知还不够深入,相关的经验模 型也尚需进一步完善。

本文在借鉴前人研究思路及方法的基础上,利用 GDS变围压动三轴试验系统近似模拟交通循环荷载 在地基土体中引起的复杂应力路径,针对天然状态下 的温州软黏土开展了一系列恒定围压(constant confining pressure, CCP)以及变围压(variable confining pressure, VCP)应力路径下的不排水三轴循环加载试验, 重点分析了动应力水平以及变围压应力路径对饱和 软黏土的动态回弹模量以及轴向累积应变的影响,并 构建了相应的经验模型。

1 试验条件及方案设计

1.1 试验测试系统

试验采用英国进口的 GDS 变围压三轴测试系统 (图 1),该测试系统可以通过应变和应力 2 种加载方 式实现对围压和偏应力的独立控制,同时可以根据土 体类型和试验精度要求选择不同量程的压力传感器, 本文所有试验均采用量程为 2 kN,精度为千分之一的 压力传感器进行测试。





1.2 试样制备及试验过程

试验采用薄壁取土法获得的温州原状土样进行, 土样取自温州高教园区某在建工地开挖至一定深度 (7~8m)的基坑内,表1给出了其基本的物理指标。

	表 1	土样的物理指标
Table 1	Phys	sical index of soil samples

物理指标	密度/(g·cm ⁻³)	比重	孔隙比	含水率/%	液限/%	塑性指数
取值	1.61	2.72	1.58	58	67	38

首先借助钢丝锯和切土器制备直径 50 mm、高 100 mm的圆柱体试样,然后在试样的上下两端和周边 贴上滤纸便于排水,最后用乳胶膜包裹后固定在压力 室内的底座上并安装压力室外罩。

试验的关键步骤如下:

(1)利用反压(300 kPa)对试样进行饱和,整个过程中始终保持有效围压为10 kPa,待测定的孔压系数(*B*值)超过0.98,则认为试样达到完全饱和状态。

(2)保持反压恒定,通过增大围压让试样在100 kPa 的有效围压下进行等向固结,待排水体积变化基本稳 定后,认为试样固结完成。

(3)采用应力控制方式对试样进行循环加载试验, 整个动力加载过程中排水阀门始终保持关闭。

1.3 试验方案设计

循环加载试验过程中采用仪器自带的半正弦波 模拟施加于试样的循环围压和循环偏应力。相关研 究表明在低频范围内,循环加载频率对土体动力特性 的影响较小,且不会影响循环围压对土体动力特性的 影响规律^[20],综合考虑循环围压与循环偏应力同步加 载时测试系统稳定性和时间成本等因素,加载频率设 为 0.1 Hz,加载次数为 1 000 次。

图 2 为 CCP 和 VCP 三轴循环加载试验在平均主 应力(*p*)-偏应力(*q*)平面形成的总应力路径示意图,通 常采用偏应力幅值(*q*^{ampl})与球应力幅值(*p*^{ampl})两者之 间的比值加以表征^[19,24]。本文采用图 2 中所示的倾角 *α* 对相应的应力路径进行表征,其中常规的 CCP 试验 形成的总应力路径倾角为 71.6°。

根据交通状况的差异,试验选取了不同的偏应力



幅值 q^{ampl} 和 α 值并定义循环应力比 CSR 如下:

$$CSR = q^{\text{ampl}} / p'_0 \tag{1}$$

表2列出了详细的试验方案。

表 2 试验方案 Table 2 Test schemes

试验编号	CSR	α
U01—U03	0.20	71.6°、45.0°、33.8°
U04—U05	0.25	71.6°, 26.6°
U06—U08	0.30	71.6°, 45.0°, 33.8°
U09—U10	0.40	71.6°, 26.6°
U11—U13	0.45	71.6°, 45.0°, 26.6°
U14—U15	0.55	71.6°、33.8°

2 典型试验结果

图 3 给出了 CSR 为 0.25 时,试样在典型的 CCP (a=71.6°)和 VCP(a=26.6°)三轴应力路径循环加载过

程中记录的相关试验结果。从图 3(a)展示的试样在 VCP 和 CCP 应力路径下的轴向应变时程曲线对比结 果可以看出,2条曲线除了量值不同之外,其形状和发 展规律基本一致,试样在循环过程中产生的轴向总应 变(*ε*'_a)由轴向累积应变(*ε*'_a)和回弹应变(*ε*'_a)两部分构 成,其中*ε*'_a在试样经历 100次循环加载后基本保持恒 定,*ε*'_a在前 100次循环加载过程中迅速累积,随后累积 速率逐渐降低而呈现塑性蠕变状态。图 3(a)的结果 说明,在不排水条件下,当 CSR 的值一定时,循环围压 的存在并未对试样的轴向应变随循环加载次数的演 化规律产生影响,但是会在一定程度上限制试样轴向 应变的产生,图 3(a)中试样在 VCP 应力路径下的*ε*'_a和 *ε*'_a均明显小于相应 CCP 应力路径下的实测结果。

试样在 VCP 和 CCP 应力路径下的有效应力路径 及其总应力路径如图 3(b)所示。可见,由实际施加的 动应力形成的总应力路径与试验方案中设计的总应





力路径基本一致,表明测试系统对循环加载过程中动 应力的控制非常精准。对比图 3(b)中 VCP 和 CCP 条 件下的有效应力路径可以看出,循环围压的存在对试样 的有效应力路径产生严重影响,当 α 一定时,试样在 循环加载过程中形成的有效应力路径的斜率与其总 应力路径基本保持一致。此外,从图 3(b)中还可以看 出,*CSR* 的值一定时,试样在 VCP 条件下比相应的 CCP 条件下具有更大的总平均应力均值($p_{av} = p_{max}/2 + p_{min}/2$) 和有效平均应力均值($p'_{av} = p'_{max}/2 + p'_{min}/2$),说明试样 在 VCP 条件下具有更大的刚度,进而限制了试样轴向 应变的累积。

图 3(c)(d)进一步分别描绘了试样在 CCP 和 VCP 应力路径下经历1000次循环加载过程中实测的应 力-应变关系曲线。为了看清和便于比较,特别选取循 环次数(N)为1、10、50、100、500和1000的滞回曲线 以彩图的形式加以呈现。从图 3(c)中可以看出试样 在一次循环过程中要经历加载(ABC)和卸载(CDE) 2个阶段,由于累积应变ε。的产生,因此曲线 ABC 与曲 线 CDE 并不重合而是形成一个开口的滞回曲线, 且伴 随循环次数的增加其面积逐渐减小,图 3(d)中 VCP 条件下的滞回曲线也随着循环次数呈现出同样的演 化规律。通过图 3(c)和图 3(d)中滞回曲线的比较可 以看出,在其他试验条件相同的情况下,试样在 VCP 应力路径下的滞回曲线面积要明显小于其相应 CCP 应力路径下的滞回曲线面积,说明试样在经历循环加 载过程中耗散于其内部的能量除了会伴随循环次数 的增加逐渐减小外,还会由于循环围压的存在而减 小。此外,如图 3(c)中所示,以第一次循环产生的滞回 曲线为例,A点与E点之间的水平距离代表试样经历 单独一次循环累积的塑性应变 ɛs, 而 E 点与一次循环

最大应变(C点右侧竖直虚线)之间的水平距离为回 弹应变 ɛ_a, 连接 E 点和 C 点得到的直线 EC 的斜率可 定义为动态回弹模量 M_r, 即循环偏应力的幅值 q^{ampl} 与 回弹应变 ɛ_a 的比值, 是进行路基路面结构设计和变形 预测的重要参数^[25]。

$$M_{\rm r} = q^{\rm ampl} / \varepsilon_{\rm a}^{\rm r} \tag{2}$$

从定性的角度比较图 3(c)(d)中的 *M*,,可以看出, 在 VCP 应力路径下,循环围压的约束效应导致试样在 循环加载过程中呈现更大的动态回弹模量,即具有更 大的刚度。

3 分析与讨论

3.1 动态回弹模量

为了便于描述和比较不同动应力水平(CSR)和应 力路径(α)下试样的动态回弹模量(M_r),图4(a)给出 了试样在 CCP 应力路径循环加载下, CSR 不同时, M. 随循环次数(N)的发展曲线,图4(b)(c)则分别给出了 在 CSR=0.30 和 0.55、α 值不同时,试样 M, 与 N 的关系 曲线。综合图4中的M.变化曲线可以看出,不同应力 路径下, M. 在经历 100~200 次循环后, 其值都趋于恒 定直至循环加载结束。当CSR≤0.30时, M, 会在加载 初始阶段经历一个先减后增的调整过程;当施加的 CSR 超过 0.30 后, M, 基本从加载伊始就呈现快速减小 并趋于稳定的规律。M,是表征土体刚度的重要指标 也是交通路基路面设计中采用的重要参数之一。根 据 M, 的定义(式 2), 其值取决于所施加的动应力幅值 以及试样产生的回弹应变2个方面,当所施加的动应 力幅值一定时,则其变化规律仅取决于回弹应变随循 环加载次数的变化规律。如图4所示,当循环动应力



Fig. 4 M_r under CCP and VCP stress paths

幅值较小时,即 CSR 值较小时(CSR=0.30、0.25、0.20), M,随着 N的增加呈现出先减小后增大的变化趋势,说 明其回弹应变随着循环次数的增加呈现先增大后减 小的变化规律,究其原因可能还是由于原状软黏土具 有一定的结构性,其结构性强度与所施加的动应力在 循环加载过程中相互作用的结果。当施加的动应力 幅值较小时,在循环加载初期由于试样的结构性强度 影响,试样的回弹应变较大,然而伴随循环加载次数 以及塑性应变的不断累积,试样的结构性逐渐破坏, 结构性强度逐渐衰减,因而试样的回弹应变逐渐减小 并趋于稳定。

比较图 4(a)中试样在 CCP 应力路径下, *M*_r在不同 *CSR* 时的结果可以看出, *N* 相同时, 施加的偏应力幅值越大, 试样产生的 *M*_r值就越小。当施加的 *CSR* 值及 *N* 相同而应力路径 α 不同时, 如图 4(b)(c)所示, 试样在 VCP 应力路径下的动态回弹模量 *M*_{r,vCP} 明显大于相应 CCP 应力路径下的动态回弹模量 *M*_{r,cCP}, 且α值越小 *M*_r值越大, 说明循环围压对饱和软黏土的动态回弹模量具有不可忽视的影响。

为了进一步量化试验参数(*CSR*、α)与*M*_r之间的 关系,参照 Gräbe 等^[26]对回弹模量的处理方法,采用 试样经历1000次循环加载的回弹模量平均值(*M*_r^{av}) 作为试样在整个循环加载过程中的回弹模量的代表 值,以下分析中所述的回弹模量均指*M*_r^{av}。

图 5 给出了不同应力路径下,试样的 M_r^{av}随参数 CSR 的变化规律,可以看出,在相同的应力路径下, M_r^{av} 随着 CSR 值的增大逐渐衰减,表明循环偏应力对饱和 软黏土的动态回弹模量具有显著的影响,根据 Li 等^[27] 的建议可采用幂函数建立 M_r^{av}与 CSR 之间的关系如下:



 $M_r^{\rm av} = K \cdot CSR^n \tag{3}$

Fig. 5 Relationships between M_r^{av} and *CSR* under different stress paths

式中:K、n——通过三轴循环加载试验获得的拟合参数。

选取 CCP 应力路径下的动态回弹模量(*M*^{av}_{r,CCP})对 所有试样的 *M*^{av}进行归一化处理,其结果与应力路径 α之间的关系如图 6 所示。从图中可以看出,两者之 间呈线性关系且与参数 *CSR* 无关,即

$$\frac{M_{\rm av}^{\rm av}}{M_{\rm r,CCP}^{\rm av}} = -0.01\alpha + 1.723 \tag{4}$$

联合式(3)和式(4),则可以构建同时考虑循环动 应力水平以及应力路径双重影响下饱和软黏土的动 态回弹模量经验公式:

$$M_{\rm r}^{\rm av} = (1.723 - 0.01\alpha) \cdot K \cdot CSR^n \tag{5}$$

图 7 进一步给出了双对数坐标下归一化动态回弹 模量(*M*^{av}_r/*M*^{av}_{r,CCP})与归一化球应力(*p*^{ampl}/*p*^{ampl})之间的关 系。由图可见,两者之间在双对数坐标下近似呈线性 关系,即

$$\lg\left(\frac{M_{r}^{av}}{M_{r,CCP}^{av}}\right) = 0.212 \lg\left(\frac{p^{ampl}}{p_{CCP}^{ampl}}\right)$$
(6)

联合式(3)和式(6)同样可以构建同时考虑参数



图 6 归一化动态回弹模量与应力路径之间的关系

Fig. 6 Relationship between normalized dynamic resilient modulus and stress paths



图 7 归一化动态回弹模量与归一化平均主应力之间的关系 Fig. 7 Relationship between dynamic resilient modulus and normalized mean principal stress

CSR 与 α 综合效应的饱和软黏土的动态回弹模量经验 公式:

$$M_{\rm r}^{\rm av} = \left(\frac{3}{\tan\alpha}\right)^{0.212} \cdot K \cdot CSR^n \tag{7}$$

3.2 轴向累积应变

图 8 给出了部分试样在 CCP 和 VCP 应力路径下, 经历 1 000 次不排水三轴循环加载产生的典型轴向累 积应变的实测结果。图 8 表明,随循环加载次数的增 加,试样在不同的动应力水平和应力路径下均呈现一 致的演化规律。从图 8(a)可以看出,当应力路径一定 时,在循环加载过程中对试样施加的循环偏应力幅值 越大(*CSR* 值越大),导致的轴向累积应变就越大。然 而如图 8(b)所示,当施加的循环偏应力幅值一定时, 在循环加载过程中对试样施加的循环围压幅值越大 (α值越小),产生的轴向累积应变反而越小,说明在不 排水三轴循环压缩的情况下,循环围压会抑制饱和软 黏土轴向应变的累积,且施加的循环围压幅值越大抑 制效应就越强,这主要是由于在循环加载过程中施加 于试样的循环偏应力需要不断平衡同步施加的循环 围压的结果。





选取试样在不同应力路径下经历1000次循环加载后的轴向累积应变实测值($\varepsilon_{a,100}^{\prime}$)并绘制其与参数 *CSR*之间的关系(图9)。从图中可以看出, $\varepsilon_{a,100}^{\prime}$ 随着 *CSR*的增大呈指数规律增长,即:

$$\varepsilon_{a,1\,000}^{\rm p} = a \mathrm{e}^{(b \cdot CSR)} \tag{8}$$

式中: a、b——拟合参数, 与应力路径有关。



图 9 不同应力路径下 1 000 次循环加载后轴向累积应变与 CSR 之间的关系

Fig. 9 Relationship between axial accumulated strain after 1 000 cycles and *CSR* under different stress paths

采用与动态回弹模量类似的归一化处理方法,选取 CCP 应力路径下,试样经历 1 000 次循环后的轴向 累积应变 $\epsilon_{a,1000}^{p,CCP}$ 对所有试样经历 1 000 次循环后的轴向 累积应变 $\epsilon_{a,1000}^{o}$ 进行归一化处理并建立其与应力路径 α 之间的关系(图 10)。从图中可以看出,归一化轴向 累积应变($\epsilon_{a,1000}^{p,CCP}$)与应力路径 α 之间呈线性关系



图 10 归一化 1 000 次循环加载后轴向累积应变与应力路径之间 的关系

Fig. 10 Relationship between normalized axial accumulated strain after 1 000 cycles and stress paths

且与 CSR 值无关, 即:

$$\frac{\varepsilon_{a,1000}^{p}}{\varepsilon_{a,1000}^{p,CCP}} = 0.009\alpha + 0.337 \tag{9}$$

联合式(8)和式(9)则可以构建特定循环次数下 同时考虑循环动应力水平以及应力路径双重效应的 饱和软黏土轴向累积应变经验公式,如式(10)所示。

$$\varepsilon_{a.1\,000}^{p} = (0.009\alpha + 0.337)ae^{(b \cdot CSR)}$$
(10)

图 11 进一步描述了归一化轴向累积应变(ε^p_{a.100}/ ε^{p,CCP}_{a.100})与归一化平均主应力幅值(p^{ampl}/p^{ampl})之间的关 系。从图中可以看出,在双对数坐标下,两者之间存 在如下线性关系,即:

$$\lg\left(\frac{\varepsilon_{a,1\,000}^{p}}{\varepsilon_{a,1\,000}^{p,CCP}}\right) = -0.289 \lg\left(\frac{p^{ampl}}{p^{ampl}_{CCP}}\right)$$
(11)

联合式(8)和式(11)同样可以构建特定循环次数 下同时考虑参数 CSR 与α综合效应的饱和软黏土轴 向累积应变经验公式,见式(12)。

$$\varepsilon_{a,1\,000}^{p} = \left(\frac{3}{\tan\alpha}\right)^{-0.289} a \mathrm{e}^{(b \cdot \mathrm{CSR})} \tag{12}$$







3.3 轴向累积应变经验公式

选取所有试样在 CCP 应力路径下的轴向累积 应变实测结果并绘制其与循环次数之间的关系曲线 (图 12)。从图中可以看出,在双对数坐标下,经过 10次循环加载后,试样的轴向累积应变与循环次数之 间近似呈如下线性关系:

$$\lg \varepsilon_{a,CCP}^{p} = \lg \varepsilon_{a,10}^{p} + k \lg \frac{N}{10}$$
(13)

式中: $\varepsilon_{a,CCP}^{p}$ ——CCP 应力路径下试样的轴向累积应变; $\varepsilon_{a,10}^{p}$ ——试样经历 10 次循环加载后的轴向累积



化曲线

Fig. 12 Axial accumulated strain versus number of load cycles in CCP tests

应变;

K──轴向累积应变增长速率/s⁻¹,即图中所示直线的斜率。

图 13(a)(b)分别给出了式(13)中的参数 ε^p_{a10}和 k、 CSR 之间的关系。由之前的分析可知,在给定的应力 路径 α 和循环次数 N下,试样的轴向累积应变与 CSR 之间呈幂函数关系。因此,可采用式(8)对ε^p_{a10}与





*CSR*之间的关系进行拟合, 拟合结果如图 14(a)中的 实线所示, 式(8)中的拟合参数 a 和 b 分别为 0.064 和 5.506。如图 14(b)所示, 在本文试验中对试样施加的 动应力水平范围内, 参数 k 的值随着 *CSR* 的增大分布 在一个较窄的范围内(0.160~0.215), 已有的相关研究 结果表明循环动应力水平对其影响较小, 通常可根据 试验土样的性质取为常数^[28-29], 因此, 式(13)中的参 数 k 取不同 *CSR* 下参数 k 的平均值(0.19)将参数 $\epsilon_{a,10}^{a}$ 和 k 的值代入式(13)可以得到 CCP 应力路径下试样 的轴向累积应变经验公式如下:

$$\varepsilon_{a,CCP}^{p} = 0.064 e^{(5.506 \cdot CSR)} \left(\frac{N}{10}\right)^{0.19}$$
 (14)

由于式(14)只针对围压恒定,偏应力单独循环加载的情况,因此需要在其基础上进一步的拓展使其 具备考虑循环围压效应的能力。图 14 描述了试样在 VCP 应力路径循环加载过程中产生的轴向累积应变 $(\varepsilon_{a,vcP}^{p})与相应 CCP 应力路径循环加载过程中产生的$ $轴向累积应变<math>(\varepsilon_{a,ccP}^{p})之间的关系,可见,在相同的 VCP$ $应力路径下,<math>\varepsilon_{a,vcP}^{p} = \varepsilon_{a,ccP}^{p} 之间近似呈线性关系可用过$ 原点的直线进行拟合且与 CSR 无关,因此,可利用图 14中拟合直线的斜率 R 定量表征两者之间的关系。



图 14 VCP 应力路径与相应 CCP 应力路径下试样轴向累积应变 之间的关系

Fig. 14 Relationships between axial accumulated strains in VCP and corresponding CCP tests

图 15 进一步描述了 *R* 与归一化应力路径(*a*/*a*_{ccr}) 之间的关系。从图中可以看出 *R* 与 *a*/*a*_{ccr}之间近似呈 如下的线性关系:

$$R = \frac{\varepsilon_{\rm a}^{\rm p}}{\varepsilon_{\rm a,CCP}^{\rm p}} = 0.686(\alpha/\alpha_{\rm CCP}) + 0.306 \tag{15}$$

联合式(14)和式(15)则可以建立不排水三轴循环 加载下同时考虑循环动应力水平(CSR)、循环次数 (N)以及应力路径(a)综合影响的饱和软黏土轴向应 变累积经验公式如下:

$$\varepsilon_{a}^{p} = \left(0.686 \frac{\alpha}{\alpha_{CCP}} + 0.306\right) 0.064 e^{5.506CSR} \left(\frac{N}{10}\right)^{0.19}$$
(16)

利用式(16)计算得到的试样在不同应力路径三轴 不排水循环加载过程中产生的轴向累积应变预测值 与实测值之间在双对数坐标下的对比结果如图 16 所 示。从图中对比结果可以看出,由于式(16)中的相关 参数都是基于 10 次循环加载后的轴向累积应变实测 数据确定的,因此式(16)在预测前 10 次循环加载产生 的轴向累积应变时误差较大,然而当循环次数超过 10 后经验公式(16)的预测能力明显提升且随着循环 次数的增加逐渐逼近实测值,说明该经验公式能够较 为精确地描述不排水三轴循环加载作用下饱和软黏 土在不同动应力水平以及不同应力路径下的轴向应 变累积行为。



Fig. 15 Relationship between *R* and α/α_{CCP}

4 结论

(1)饱和软黏土不排水三轴循环累积应变和回弹 模量与施加的循环动应力水平(循环偏应力、循环围 压)及其耦合应力路径密切相关。施加的循环偏应力 幅值越大,饱和软黏土产生的动态回弹模量越小,轴 向累积应变越大,然而同步施加的循环围压却表现出 与之相反的影响规律,循环围压对饱和软黏土轴向应 变的累积则表现出明显的约束效应。

(2) 在相同的不排水三轴应力路径循环加载条件 下, 饱和软黏土的动态回弹模量和给定循环次数(*N*= 1000)下的轴向累积应变随着循环应力比的增大分别 呈幂函数规律衰减和指数增长。进一步通过归一化 处理和回归分析建立了动态回弹模量和给定循环次 数(*N*=1000)下的轴向累积应变分别与应力路径及循



Fig. 16 Comparison between the predicted and experimental axial accumulated strain

环球应力幅值之间的定量关系。

(3) 在指数函数的基本框架下,结合 VCP 与相应 CCP 应力路径加载下饱和软黏土轴向循环累积应变 之间的定量关系构建了可以考虑循环偏应力水平、 应力路径以及循环次数等参数综合影响效应的饱和 软黏土轴向循环应变累积经验公式。

参考文献(References):

- [1] 郑刚,程雪松,周海祚,等.岩土与地下工程结构韧性 评价与控制[J].土木工程学报,2022,55(7):1-38.
 [ZHENG Gang, CHENG Xuesong, ZHOU Haizuo, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7):1-38. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 周孝鑫, 谭钦文, 林志果, 等. 京广铁路 K1219 路基土 质边坡深层滑移失稳机制与整治对策 [J]. 地质科技 通报, 2022, 41(6): 85 - 94. [ZHOU Xiaoxin, TAN Qinwen, LIN Zhiguo, et al. Deep sliding instability mechanism and remediation measures: The subgrade soil slope along the jingguang railway at K1219[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 85 -

94.(in Chinese with English abstract)]

- [3] 伍运霖,刘天翔,王丰,等.考虑长期蠕变劣化的昔格 达黏土岩公路路堑边坡稳定性评价及防护对策建 议——以西攀高速公路边坡为例[J].中国地质灾害 与防治学报,2024,35(4):56-66. [WU Yunlin, LIU Tianxiang, WANG Feng, et al. Stability assessment of the road cut slopes in the xigeda mudstone considering long-term creep deterioration and suggestion for countermeasures: A case study of cut slopes along the Xichang-Panzhihua expressway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 56 -66.(in Chinese with English abstract)]
- 【4】 黄茂松,姚兆明.循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型.岩土工程学报,2011,33(3):325-331.
 [HUANG Maosong, YAO Zhaoming. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3):325-331. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 郑永来,潘杰,韩文星.软土地铁隧道沉降分析.地下 空间与工程学报,2005,1(1):67-74. [Zheng Yonglai, Pan Jie, Han Wenxing. Analysis on the settlements of metro tunnels in soft soil [J]. Chinese Journal of

Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 67 – 74. (in Chinese with English abstract)]

- [6] 郭林,蔡袁强,王军,等.长期循环荷载作用下温州结构性软黏土的应变特性研究[J].岩土工程学报,2012,34(12):2249 2254. [GUO Lin, CAI Yuanqiang, WANG Jun, et al. Long-term cyclic strain behavior of Wenzhou structural soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12):2249 2254. (in Chinese with English abstract)]
- [7] HYDE A F L, BROWN S F. The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading[J]. Géotechnique, 1976, 26(1): 173 184.
- [8] 何利军, 孔令伟, 张先伟, 等. 湛江软粘土蠕变特性及 经验模型 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 59-64. [HE Lijun, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei, et al. Creep properties and empirical model of soft clay in Zhanjiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 59 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨爱武,郑宇轩,肖敏.人工制备结构性软黏土长期 变形特性试验研究[J].水文地质工程地质,2019, 46(2):133 - 140. [YANG Aiwu, ZHENG Yuxuan, XIAO Min. An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2):133 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- [10] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907 – 916.
- [11] GUO Lin, WANG Jun, CAI Yuanqiang, et al. Undrained deformation behavior of saturated soft clay under longterm cyclic loading[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2013, 50(7): 28 – 37.
- [12] 臧濛, 孔令伟, 曹勇. 描述循环荷载作用下黏土累积 变形的改进模型 [J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 435 442. [ZANG Meng, KONG Lingwei, CAO Yong. An improved model for cumulative deformations of clay subjected to cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 435 - 442. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘志强,王博,王飞,等.地铁循环荷载下隧道下卧土 体动力特性研究[J].土木工程学报,2020,53(增刊 1):194-199. [LIU Zhiqiang, WANG Bo, WANG Fei, et al. Dynamic characteristics of the underlying soil of subway tunnel under cyclic loading [J]. China Civil

Engineering Journal, 2020, 53(Sup 1): 194-199. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 郑晴晴,夏唐代,张孟雅.考虑间歇效应的循环荷载 下软黏土刚度软化特性 [J].哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 88 - 96. [ZHENG Qingqing, XIA Tangdai, ZHANG Mengya. Stiffness degradation of soft clay under cyclic loading considering intermittency effect[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11): 88 - 96. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 穆锐,黄质宏,姚未来,等.分级循环荷载下原状红黏 土动力特性试验研究 [J].水文地质工程地质,2022, 49(3):94 - 102. [MU Rui, HUANG Zhihong, YAO Weilai, et al. An experimental study of the dynamic characteristics of the undisturbed laterite under graded cyclic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 94 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 沈扬,王钦城,王俊健.不同幅值和频率的交通荷载下黏土变形特性研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(2):476 486. [SHEN Yang, WANG Qincheng, WANG Junjian. Deformation characteristics of clay under traffic load with different amplitudes and frequencies[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2):476 486. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 袁亮,杨正玉,吴祖云,等.循环荷载下粉质黏土的变形与耗能特性[J].地下空间与工程学报,2023,19(6): 1870 - 1877. [YUAN Liang, YANG Zhengyu, WU Zuyun, et al. Deformation and energy-dissipation behavior of silty clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(6): 1870 - 1877. (in Chinese with English abstract)]
- [18] WANG Yuke, GAO Yufeng, LI Bing, et al. One-way cyclic deformation behavior of natural soft clay under continuous principal stress rotation[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(6): 1002 – 1013.
- [19] 谷川,王军,蔡袁强,等.考虑变围压因素的饱和软黏 土循环纯压动力特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1307 - 1315. [GU Chuan, WANG Jun, CAI Yuanqiang, et al. Undrained dynamic behaviors of saturated clays under compressive stress paths considering cyclic confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1307 - 1315. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 黄珏皓,陈健,孔令智,等.考虑循环围压与振动频率

影响的饱和软黏土动力特性试验研究 [J]. 岩土力 学, 2019, 40(1): 173 – 182. [HUANG Juehao, CHEN Jian, KONG Lingzhi, et al. Experimental study of dynamic behaviors of saturated soft clay considering coupling effects of cyclic confining pressure and vibration frequency [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 173 – 182. (in Chinese with English abstract)]

- [21] 刘家顺, 王来贵, 张向东, 等. 部分排水时饱和粉质黏 土变围压循环三轴试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1413 - 1419. [LIU Jiashun, WANG Laigui, ZHANG Xiangdong, et al. Cyclic triaxial test on saturated silty clay under partial drainage condition with variable confining pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1413 - 1419. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王朝辉,李向辉,陈晓波.变围压循环荷载下饱和软 黏土的变形特性 [J].浙江工业大学学报,2023,51(5): 509 - 513. [WANG Chaohui, LI Xianghui, CHEN Xiaobo. Deformation characteristics of saturated clay under cyclic loading with variable confining pressure[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2023, 51(5): 509 - 513. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 黄珏皓,王宏超,陈健,等.间歇性变围压循环荷载作用下饱和软黏土变形特性[J].岩土工程学报,2023,45(增刊1):67-70.[HUANG Juehao, WANG Hongchao, CHEN Jian, et al. Effects of intermittent cyclic loading with cyclic confining pressure on deformation behaviors of saturated clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(Sup 1):67-70.(in

Chinese with English abstract)]

- [24] RONDÓN H A, WICHTMANN T, TRIANTAFYLLIDIS T, et al. Comparison of cyclic triaxial behavior of unbound granular material under constant and variable confining pressure[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(7): 467 – 478.
- [25] 凌建明,苏华才,谢华昌,等.路基土动态回弹模量的 试验研究 [J].地下空间与工程学报,2010,6(5):919-925. [LING Jianming, SU Huacai, XIE Huachang, et al. Laboratory research on dynamic resilient modulus of subgrade soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5):919-925. (in Chinese with English abstract)]
- [26] GRÄBE P J, CLAYTON C R I. Effects of principal stress rotation on resilient behavior in rail track foundations[J].
 Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(2): 04013010.
- [27] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006 - 1013.
- [28] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975(537): 1-17.
- [29] WANG Yuke, GAO Yufeng, GUO Lin, et al. Cyclic response of natural soft marine clay under principal stress rotation as induced by wave loads[J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 191 – 202.

编辑:刘真真