

DOI: 10.11779/CJGE201704021

# 炎热多雨气候影响下残积土小应变刚度特性试验研究

尹 松<sup>1, 2</sup>, 孔令伟<sup>\*1</sup>, 张先伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中原工学院建筑工程学院, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 根据炎热多雨地区轨道交通周边土体的实际工程状态, 开展经历不同干湿循环过程的花岗岩残积土的共振柱试验, 研究炎热多雨气候影响下残积土小应变下的刚度特性。结果表明, 受反复干湿循环效应影响, 在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  小应变范围内, 残积土  $G_{\max}$  随干湿循环次数  $n$  的衰变规律与常应变下黏性土强度特性衰减规律有较大差异, 最大衰减出现在干湿循环中期; 经历多次循环后, 小围压下残积土的  $G - \gamma$  关系曲线出现直线下降和骤降阶段; 利用 Martin-Davidovik 模型和经验关系能较好地反映  $G/G_{\max}$  和  $D$  随  $\gamma$  的变化规律, 发现不同干湿循环次数后,  $G/G_{\max} - \gamma$  关系随围压增大逐渐出现“两极分化”现象。研究还从微观角度对残积土小应变刚度特性的干湿循环效应给予解释, 说明炎热多雨气候下残积土刚度的力学行为是由于结构强度减损、微观结构重塑引起。研究可为轨道交通工程动力参数的选取, 类似工程场地的设计、施工及抗震分析提供技术参考依据。

**关键词:** 炎热多雨; 残积土; 小应变; 干湿循环; 剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)04-0743-09

作者简介: 尹 松(1987-), 男, 吉林白山人, 博士研究生, 主要从事特殊土力学及其工程特性研究。E-mail: ysong87@yahoo.com。

## Experimental study on stiffness characteristics of residual soil at small strain under hot and rainy climate

YIN Song<sup>1,2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, ZHANG Xian-wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** Based on the actual state of the soil along rail transit in hot and rainy area, the resonant column tests on the soil under wetting and drying circles are conducted to study the stiffness characteristics of residual soil at small strain under hot and rainy climate. The results show that the decay law of  $G_{\max}$  in small strain range of  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  of residual soil is quite different from the strength characteristic of clay in conventional strain range, and the maximum attenuation occurs in the metaphase of the process of wetting and drying circles. After multiple cycles, the  $G - \gamma$  curves of residual soil under low confining pressure exhibit the linear decrease tendency and sudden drawdown. The martin-Davidovik model and the empirical relationship may reflect the relationship between  $\gamma$  and  $G/G_{\max}$  as well as  $D$ , after wetting and drying circles, polarization phenomenon of the relationship between  $G/G_{\max}$  and  $\gamma$  presents gradually with the increasing confining pressure. The wetting and drying circle effect of the stiffness characteristics of residual soil at small strain is explained based on the microscopic analysis, and the mechanical behavior of stiffness of residual soil in hot and rainy area results from the injury of the structural strength and microstructure remodeling. This study may provide technical reference for the selection of the dynamic parameters of the rail transit engineering, the design and construction of the similar engineering sites and the seismic analysis.

**Key words:** hot and rainy climate; residual soil; small strain; wetting and drying cycle; dynamic shear modulus; damping ratio

## 0 引言

随着高速铁路及城市轨道交通建设事业的迅猛发展, 人们在享受其高效、快捷服务的同时, 也逐渐认识到了轨道交通设施运行过程中振动对周边人群、岩土构筑物、城市建筑物所带来的不利影响<sup>[1]</sup>。国内外

学者对这一问题展开了深入研究, Volberg<sup>[2]</sup>和 Dawn<sup>[3]</sup>定量分析了列车振动能量对周边建筑物所产生的影

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372314, 11672320, 41472292, 41372291); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-122)

收稿日期: 2016-11-06

\*通讯作者(E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn)

响, 提出了规避其产生的振动能量的合理建议; 夏禾等<sup>[1]</sup>、崔高航等<sup>[4]</sup>也深入分析了列车振动对周边居民及建筑物的不利影响, 给出了采取相应隔振措施的合理方法。列车振动对人们的正常活动及对周边结构物的影响已经得到了广泛的重视, 但其产生的振动波在传递过程中对岩土类传播介质及对周边岩土构筑物工程特性的影响还没有得到充分的认识, 特别是对于炎热多雨、典型季冻区等恶劣环境区域, 环境能场和轨道交通振动机械能场耦合作用对土体工程特性的影响研究尚未开展。现有研究考虑环境能场作用对土体力学特性的影响主要集中在常应变或大应变强度特性方面, 如: Allam 等<sup>[5]</sup>和 Guan 等<sup>[6]</sup>通过室内试验方法指出了干湿循环效应对黏性土抗剪切强度特性产生了不可逆的影响; 沈珠江等<sup>[7]</sup>、孔令伟等<sup>[8]</sup>通过数值模拟及室内试验, 得到了干湿循环过程中黏土中裂隙的演化规律和原状土体在脱湿吸湿过程中的强度特征主要受含水率与裂隙性的双重影响的结论, 从机理上阐释了干湿循环对黏土强度特性的影响; 刘文化等<sup>[9]</sup>、李新明等<sup>[10]</sup>探讨了干湿循环作用对黏性土及改性膨胀土动、静强度参数的影响, 定量描述了环境作用对土体包括临界动应力、累计变形及残余强度等力学参数的影响。这些研究充分说明了干湿循环效应无论对土体微观结构、动静力学特性及变形特性都具有显著的影响, 在工程设计及施工过程中应格外重视。根据轨道交通振动效应的特点及传播路径(见图 1)可知, 列车行进对周边岩土介质及岩土构筑物的影响主要是以应力波传播的机械场能, 产生的应变范围也属小应变范围, 对周边土体的影响也很难达到土体破坏的强度应变量级, 所以轨道交通振动对周边土体的影响主要体现在刚度特性。另外, 考虑到炎热多雨地区, 列车周边岩土体在干湿循环作用下必然导致土体微观结构的变化, 反映在刚度特性上也会受到相应影响。因此, 对特殊环境作用下工程场地地震安全性评价及地基动力反应分析时, 应考虑干湿循环效应对土体的动剪切模量  $G$  和阻尼比  $D$  衰变特性的影响, 这对保证工程结构的安全性和经济性具有重要意义。

另一方面, 中国热带、亚热带典型炎热多雨地区普遍分布着岩石风化形成的残积土, 近年来作为轨道交通建设经常穿越的土层之一, 与常规静水沉积黏性土不同, 残积土在天然状态下常表现为遇水湿化、易

崩解等较差的力学特性<sup>[11]</sup>。由此看来, 充分了解残积土在交通振动荷载机械能场及炎热多雨形成的干湿循环作用下的工程特性, 有利于保证该类岩土构筑物的耐久性, 使其能够高效稳定的为工程活动服务。

本文以中国东南地区普遍存在的花岗岩残积土为研究对象, 对土样实施多次干湿循环模拟炎热多雨气候对土性的影响, 利用共振柱试验模拟轨道交通荷载及常规地震产生的机械能, 研究小应变下( $\gamma=10^{-4} \sim 10^{-6}$ )残积土的刚度特性, 分析干湿循环效应对路堑边坡、隧道周边和路基换填土下部等应力释放区土体刚度衰变规律及预测参数的影响, 并从微观角度对机理进行解释, 探究炎热多雨气候影响下残积土小应变刚度特性衰变规律。

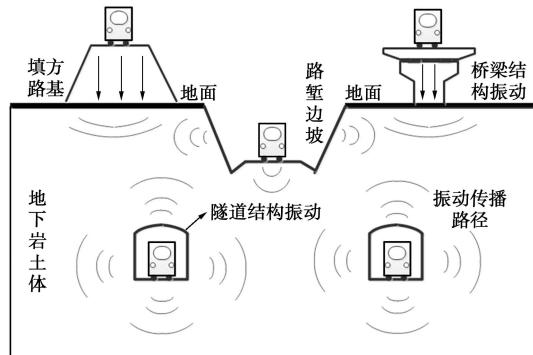


图 1 轨道交通对周围岩土体振动影响

Fig. 1 Environmental vibration of rock and soil induced by rail transit system

## 1 试样与试验方案

### 1.1 试样基本性质

试验土样取自广东省台山市水步镇深茂铁路沿线(里程桩号 DK158+732.57)的下横圳特大桥附近(经度:  $112^{\circ} 50' 19.49''$ , 纬度:  $22^{\circ} 18' 15.11''$ ), 取样场地为花岗岩残积土区丘陵地貌, 取土深度为  $4.0 \sim 6.0$  m 左右。根据《铁路工程土工试验规程》<sup>[12]</sup>得到了花岗岩残积土基本物理力学指标与矿物组成, 结果见表 1, 2。

### 1.2 试样制备

采用反复脱湿、增湿, 即多次干湿循环来模拟炎热多雨气候影响。由于黏性土一般在 5 次干湿循环后力学性质趋于稳定<sup>[10, 13]</sup>, 本研究干湿循环次数最大为 5 次, 首先将原状试样制备成直径 50 mm, 高 100 mm,

表 1 花岗岩残积土的物理力学特性指标

Table 1 Physical and mechanical properties of residual soil

深度/m	密度 $\rho/(g \cdot m^{-3})$	土颗粒相 对密度 $G_s/(g \cdot m^{-3})$	孔隙比 $e_0$	含水率 w/%	液限 $w_L/%$	塑限 $w_p/%$	塑性指数 $I_p$	无侧限 抗压强度 $q_u/kPa$	颗粒组成/%			
									细砾 $>2 mm$	砂粒 $0.075 \sim 2 mm$	粉粒 $0.075 \sim 0.005 mm$	黏粒 $<0.005 mm$
4.0~6.0	1.77	2.73	1.157	38.30	61.0	29.1	31.90	83.75	3.0	35.1	41.1	20.5

表2 花岗岩残积土的矿物成分

Table 2 Mineral compositions of residual soil (%)

样品名称	矿物成分			
	石英	高岭石	黄铁矿	三水铝石
花岗岩残积土	5	90	2	3

然后将6组原状土试样利用恒温恒湿箱分别实施0~5次干湿循环。考虑到极端环境的影响,结合取样地区实际的气候条件,干湿循环试样含水率变化范围为 $w=20\% \sim 40\%$  (饱和度为 $S_r=47.2\% \sim 94.4\%$ ),控制含水率增减幅度 $\pm w=20\%$ 。由于 $w=40\%$ 已接近饱和含水率,所以增湿过程采用真空饱和法;脱湿时控制温度 $T=40^{\circ}\text{C}$ ,湿度RH=90%,定时称量试样质量,达到 $w=20\%$ 时,完成脱湿过程。增湿和脱湿过程控制含水率精度为 $\pm 0.5\%$ ,干湿循环过程如图2所示。

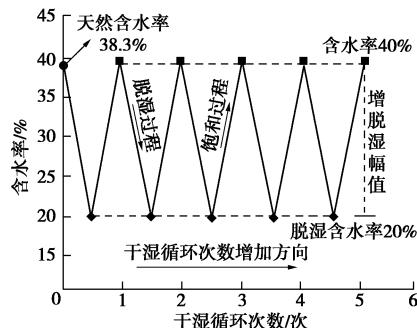


图2 干湿循环过程示意图

Fig. 2 Sketch of wetting and drying cycles

### 1.3 试验方法

共振柱试验以一维波动理论为原理,在一定物理和应力条件下的土柱上施加扭转或弯曲振动,并逐级改变驱动频率,测出土样的共振频率,再切断动力,测试出振动衰减曲线。试验采用英国GDS公司生产的共振柱试验系统(GDS RCA),该系统主要由排水系统、监测系统、驱动系统及压力室等组成,通过驱动系统上的加速度计监测应变。该设备可在试样无损的条件下研究中小应变范围内土的动力学参数 $G$ 和 $D$ 随 $\gamma$ 的变化关系,其精度可达 $10^{-10}$ ,试验数据可靠<sup>[14]</sup>。

试验过程如下:①饱和,由于取土深度位于地下水位以下,处于饱和状态。用抽真空方法饱和试样;②固结,施加围压 $\sigma'_0=25, 50, 100, 200\text{ kPa}$ ,待孔压基本消散,应变恒定时固结结束;③共振柱激振,对固结后试样进行共振柱激振试验,整个试验过程均由微机控制。为保证测试应变范围在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ,从低到高改变激励电压对试样进行扫频,测得不同应变水平下的共振频率;④数据处理,根据共振频率、试样密度、试样的几何尺寸及端部条件,可计算出试样的动剪切模量 $G$ <sup>[13]</sup>:

$$G = \rho(2\pi f h / \beta)^2 \quad (1)$$

式中,  $G$  为土样的动剪切模量,  $\rho$  为土样的质量密度,  $f$  为扭转振动共振频率,  $h$  为土样的高度,  $\beta$  为扭转振动频率方程的特征值。

通过自由振动测出试样在这一剪应变下的振幅衰减曲线,得到相应阻尼比值<sup>[13]</sup>:

$$D = \frac{1}{2\pi m} \ln \frac{A_N}{A_{N+m}} \quad (2)$$

式中,  $A_N$  为第  $N$  次的振幅,  $A_{N+m}$  为第  $N+m$  次的振幅。

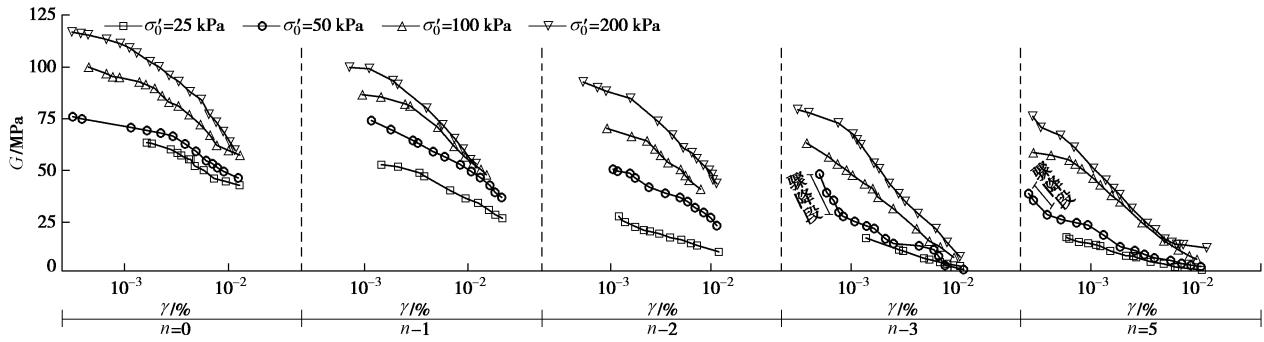
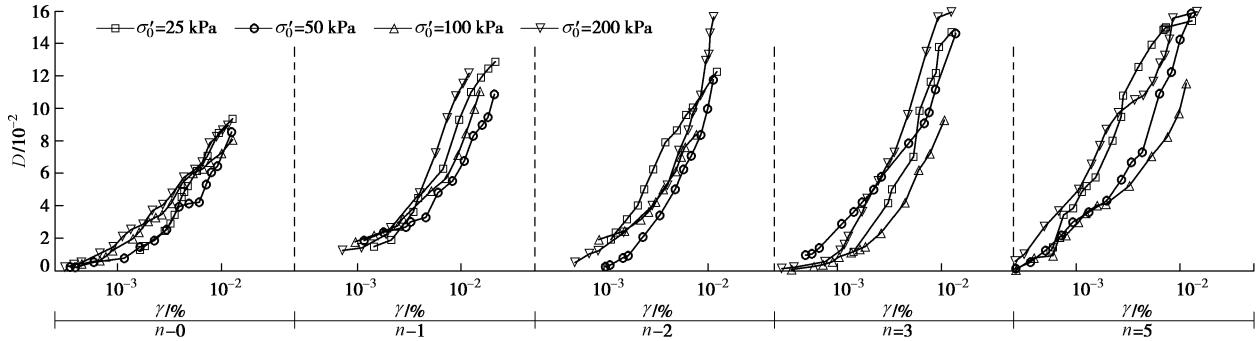
## 2 试验结果与分析

### 2.1 干湿循环作用下残积土 $G - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 关系

各类工程场地地震安全性评价及地基动力反应分析中,动剪切模量 $G$ 和阻尼比 $D$ 是必不可少的两个动力学参数,选取的合理性将直接影响到工程结构的安全性和经济性。图3,4列出不同干湿循环作用次数及围压下的土体  $G - \gamma$  和  $D - \gamma$  关系。

分析可知,干湿循环次数 $n=0 \sim 5$ 时,土体剪切模量 $G$ 值随应变 $\gamma$ 的衰减规律基本一致;相同 $\gamma$ 条件下 $G$ 值随 $\sigma'_0$ 增大而增大;随 $n$ 增加,  $G$ 值随 $\gamma$ 值衰减速率加快,且 $G - \gamma$ 关系沿纵坐标整体下移,在 $n=1, 2$ 次循环中降幅最为显著,其次为 $n=0, 1$ 和 $n=2, 3$ 次循环,  $n \geq 3$ 时,  $G - \gamma$ 关系趋于稳定。这是由于土体经过干湿循环作用后,胶结作用弱化及土体内部水分迁移、裂隙发展等应力集中作用导致微结构损伤,土体抗变形能力减弱所引起。分析各循环次数下土体  $G - \gamma$  关系可知,  $\sigma'_0=25\text{ kPa}, 50\text{ kPa}$ , 干湿循环后土体  $G - \gamma$  关系曲线形态变化较大,  $\sigma'_0=25\text{ kPa}$  时土体  $G - \gamma$  关系随 $n$ 增加有线性降低趋势,而 $\sigma'_0=50\text{ kPa}$ ,  $n \geq 2$  后土体  $G - \gamma$  关系出现了骤降段,与未经干湿循环土体或其他类土体  $G - \gamma$  关系曲线形态差异较大<sup>[14]</sup>。分析原因可知,经过干湿循环后土体内部颗粒结构和粒团被破坏,尤其是经历多次干湿循环作用后,土体内部微结构处于不稳定状态,在静力围压固结过程中即使孔压消散后,土体内部颗粒连接及残余胶结仍没有达到稳定排列,在低围压下即使受到微小的动力触动,也会产生颗粒的运动势能,造成颗粒向稳定方向排列,加快剪切模量 $G$ 的衰减和突变。所以在炎热多雨、地下水位较高等水环境作用剧烈地区,轨道交通周边浅层土体  $G$  值随应变的衰变关系应予以验证,要考虑应力释放后,环境作用对土体微结构的损伤,保证工程的安全性及合理性。

通过图4发现,与  $G - \gamma$  关系相对应,随 $n$ 值的增大,土体  $G - \gamma$  关系曲线趋势基本一致,能够反映出随着土体 $\gamma$ 的增加,  $D$ 值逐渐增大的趋势。另外,随着 $n$ 值的增加,土体  $D$  值随 $\gamma$ 值增幅加大,土体

图 3 干湿循环作用下  $G - \gamma$  关系Fig. 3 Relationship between  $G$  and  $\gamma$  under action of wet and dry cycles图 4 干湿循环作用下  $D - \gamma$  关系Fig. 4 Relationship between  $D$  and  $\gamma$  under action of wet and dry cycle

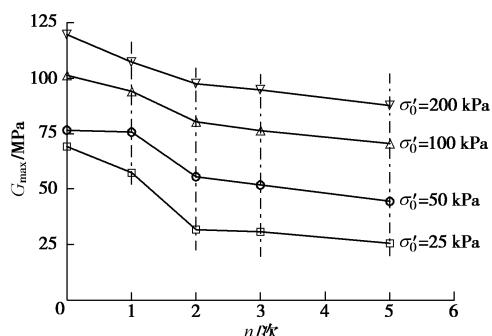
$G - \gamma$  关系受围压影响也越来越大, 反映在图 4 中  $\sigma'_0 = 25 \sim 200 \text{ kPa}$ , 试验点所分布的  $\gamma$  范围随  $n$  增加, 宽度递增, 这也说明了经历干湿循环后土体微结构损伤, 土体黏聚力变小, 土体逐渐趋于重塑土体的特性。

## 2.2 干湿循环作用下残积土 $G_{\max}$ 的衰变特性

通过试验可以得到土体最大动剪切模量  $G_{\max}$ , 该值能够反映土体的极限动强度势能和土体在弹性阈值范围内线弹性特征。对不同干湿循环下的共振柱试验结果进行双曲线拟合(式(3)), 得到了各循环次数及围压下的土体最大剪切模量  $G_{\max}$  值及其与循环次数的关系曲线, 如图 5 所示。

$$G = \frac{1}{a + b\gamma} \quad , \quad (3)$$

式中,  $a$ ,  $b$  为拟合参数,  $1/a$  为最大剪切模量  $G_{\max}$ 。

图 5  $G_{\max}$  与循环次数关系曲线Fig. 5 Relationship between  $G_{\max}$  and circles

分析可知, 各围压下花岗岩残积土最大剪切模量  $G_{\max}$  随干湿循环作用次数  $n$  的增加衰减规律基本相同, 在 5 次循环过程中, 1, 2 次循环对土体  $G_{\max}$  影响最大, 其次为 0, 1 次循环和 2, 3 次循环, 当循环次数达到 5 次时土体  $G_{\max}$  值趋于稳定, 表现在图 5 中直线斜率逐渐减小。这与受气候影响显著的膨胀土所表现的强度特性规律有所差异<sup>[8-10]</sup>, 小应变范围内, 残积土刚度的最大衰减并不是出现在干湿循环初期, 而是干湿循环的中期。这主要是共振柱试验测量的有效应变范围为  $10^{-6} \sim 10^{-4}$ , 远小于土体强度破坏应变, 首次干湿循环过程虽对土体结构强度有所影响, 但对于小应变下土体力学特性影响较小, 土体微结构损伤未能得到充分体现。此外, 从各围压下  $G_{\max}$  衰减规律发现, 在较低围压 25 kPa 和 50 kPa 时, 土体  $G_{\max}$  随循环次数增加衰减较大, 在较高围压 100 kPa 和 200 kPa 时衰减相对较小, 这是由于残积土天然母岩微结构及含铁矿物胶结离子的存在, 表现出一定的结构性, 并且该结构性随着干湿循环作用逐渐减弱, 在低围压下, 体现土体结构性的黏聚力  $c$  值起主导作用, 而高围压下土体内摩擦角  $\varphi$  值起主导作用, 干湿循环主要降低了土体  $c$  值, 对  $\varphi$  值影响较小, 所以高围压时, 循环作用对土体结构强度影响相对较弱。

由于常用的双对数模型可以很好地反映  $G_{\max}$  与有效围压的关系<sup>[15]</sup>, 对不同围压土体的  $G_{\max}$  值进行预测, 可为工程建设提供方便。利用式(4)所示模型对不同

应力状态下土体的  $G_{\max}$  进行拟合, 分析干湿循环作用对土体  $G_{\max} - \sigma'_0$  关系的影响, 结果见图 6。

$$G_{\max} = Kp_a (\sigma'_0 / p_a)^n , \quad (4)$$

式中,  $\sigma'_0$  为有效围压,  $p_a$  为大气压,  $K$  为  $\sigma'_0$  等于  $p_a$  时的  $G_{\max}$ ,  $n$  为直线斜率。

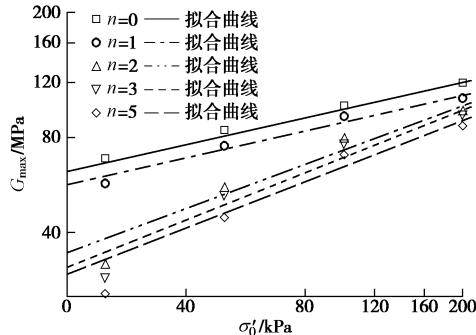


图 6  $G_{\max}$  与  $\sigma'_0$  关系曲线

Fig. 6 Relationship between  $G_{\max}$  and  $\sigma'_0$

图 6 所示模型能反映各循环过程中残积土  $G_{\max}$  随  $\sigma'_0$  非线性递增趋势, 其中干湿循环次数  $n=0, 1$  次后土体  $G_{\max} - \sigma'_0$  关系拟合效果较好,  $n=2 \sim 5$  次后土体在  $\sigma'_0=25$  kPa 时试验点离散性相对较大。分析可知, 在  $n=0, 1$  次循环过程中土体微结构损伤较小, 土体颗粒仍能保持原有排列状态, 小应变触发作用对土体内部结构影响较小;  $n=2 \sim 5$  次循环过程中土体微结构损伤较大, 低围压下小应变触动容易引起土体颗粒向稳定状态发展的趋势, 而高围压下土体颗粒在固结阶段已达到稳定排列状态, 高、低围压下土体结构变化差异较大, 所以模型拟合的离散性相对较大。从整体上看,  $\sigma'_0=50 \sim 200$  kPa 时试验结果拟合关系较好, 采用双对数模型仍能够有效预测环境影响下土体随深度变化的  $G_{\max}$  值, 但对浅层土体进行预测时, 应考虑土体微结构损伤的影响, 采用一定的安全系数。

### 2.3 干湿循环作用下残积土动力参数预测

由上述分析可知, 应力释放后的花岗岩残积土在经历过干湿循环后, 由于微结构损伤, 土体  $G - \gamma$  与  $D - \gamma$  关系较原始状态差异较大, 尤其在低围压下表现更为明显。为评价干湿循环对土体刚度特性的影响规律, 采用三参数 Martin-Davidovik 模型和三参数  $D - \gamma$  经验关系曲线对不同干湿循环作用次数及围压下的土体  $G/G_{\max} - \gamma$  和  $D - \gamma$  关系进行拟合分析, 模型表示为<sup>[16]</sup>

$$G(\gamma) = G_{\max} (1 - f(\gamma)) , \quad (5)$$

$$f(\gamma) = \left( \frac{(\gamma / \gamma_0)^{2B}}{1 + ((\gamma / \gamma_0)^{2B})} \right)^A , \quad (6)$$

式中,  $A, B, \gamma_0$  均为与土性有关的拟合参数。

$D - \gamma$  关系经验公式为<sup>[16]</sup>

$$D = D_{\min} + D_{\max} (1 - G / G_{\max})^n , \quad (7)$$

式中,  $D_{\min}, D_{\max}$  分别为最小(基本)阻尼比和最大阻尼比,  $n$  为拟合参数。

经最大剪切模量  $G_{\max}$  归一化的  $G/G_{\max}$  随应变  $\gamma$  衰变的试验点分布及模型拟合曲线如图 7~10 所示。可以看出 Martin-Davidovik 模型能够很好地拟合  $G/G_{\max}$  随  $\gamma$  的衰变规律, 拟合相关性较好, 能够反映出干湿循环作用导致土体  $G/G_{\max}$  随  $\gamma$  衰变速率增加的趋势。不同围压下,  $n=0, 1$  次干湿循环作用对土体  $G/G_{\max} - \gamma$  关系影响较小, 二者关系接近重合, 但  $n=2 \sim 5$  次干湿循环对土体  $G/G_{\max} - \gamma$  关系影响较大, 表现在  $\sigma'_0=25 \sim 200$  kPa 时, 试验点所分布  $\gamma$  范围随循环次数增加宽度递减, 其中  $n=2$  次循环后土体  $G/G_{\max} - \gamma$  关系随  $\sigma'_0$  增加逐渐向初始状态土体  $G/G_{\max} - \gamma$  关系靠拢及  $n=3, 5$  次循环后土体  $G/G_{\max} - \gamma$  关系随  $\sigma'_0$  增加逐渐靠拢甚至趋于重合的现象。究其缘由, 主要是围压越大, 土体力学特性受其微结构黏结强度影响较小, 受其颗粒级配及颗粒形状影响较大, 所以经历多次干湿循环后土体接近重塑土体力学性质, 而较少干湿循环作用下, 土体仍保留大部分残余结构, 土体接近于初始状态力学特性, 引起图 7~10 中随围压增加, 不同干湿循环作用次数下土体  $G/G_{\max} - \gamma$  关系中的“两极分化”现象。因此, 对于残积土轨道交通路基, 土体开挖后如需选取  $G/G_{\max} - \gamma$  参数, 应根据实际工程环境选取环境作用后趋于稳定的参数值, 选取开挖初期土体参数值过于冒险。

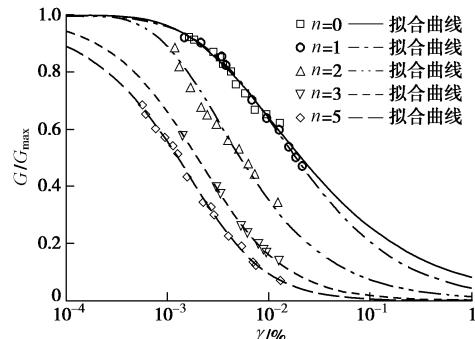


图 7  $G/G_{\max}$  与  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0=25$  kPa)

Fig. 7 Relationship between  $G/G_{\max}$  and  $\gamma$  ( $\sigma'_0=25$  kPa)

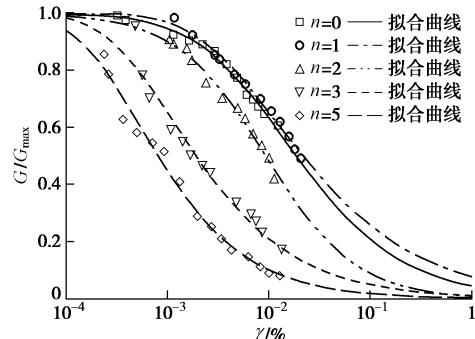
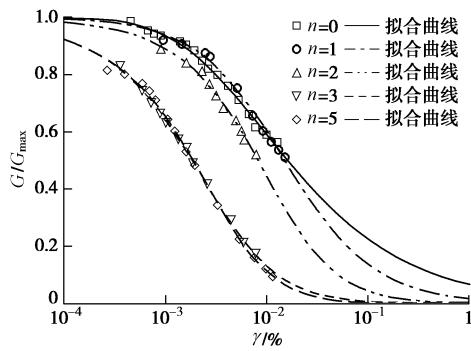
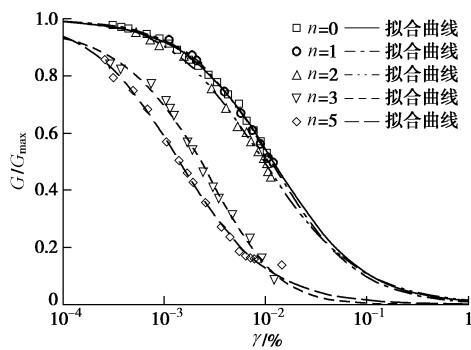
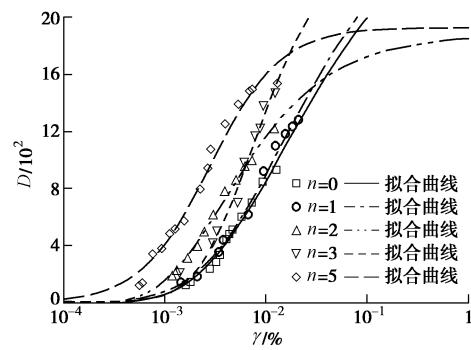


图 8  $G/G_{\max}$  与  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0=50$  kPa)

Fig. 8 Relationship between  $G/G_{\max}$  and  $\gamma$  ( $\sigma'_0=50$  kPa)

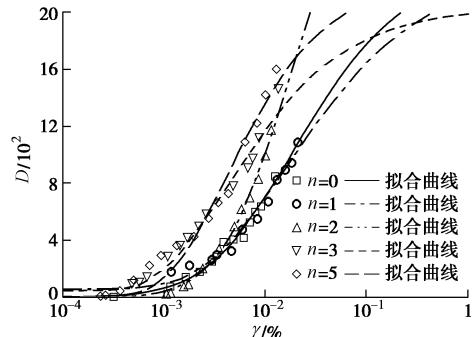
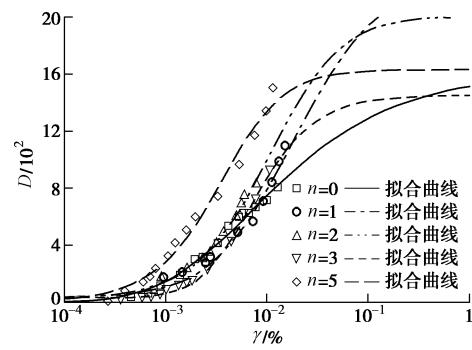
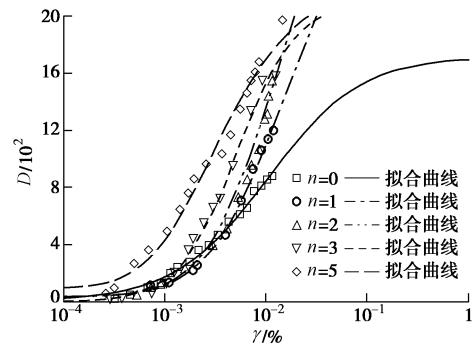
图 9  $G/G_{\max}$  -  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0 = 100$  kPa)Fig. 9 Relationship between  $G/G_{\max}$  and  $\gamma$  ( $\sigma'_0 = 100$  kPa)图 10  $G/G_{\max}$  -  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0 = 200$  kPa)Fig. 10 Relationship between  $G/G_{\max}$  and  $\gamma$  ( $\sigma'_0 = 200$  kPa)

从图11~14可以看到,选用的经验模型能很好地反映不同循环作用次数和各围压下土体阻尼比 $D$ 随应变 $\gamma$ 的非线性递增关系,基本能够反映出经历数次干湿循环后土体阻尼比 $D$ 增大,且随 $\gamma$ 增加速率加大的趋势。另外,同上述 $G/G_{\max}$  -  $\gamma$ 关系一致,随 $\sigma'_0$ 增大,不同干湿循环次数作用下 $D$  -  $\gamma$ 关系虽未出极化现象,但有重合趋势,进一步说明了土体微结构受到损伤,高围压时土体力学特性趋于重塑土的客观现象。

图 11  $D$  -  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0 = 25$  kPa)Fig. 11 Relationship between  $D$  and  $\gamma$  ( $\sigma'_0 = 25$  kPa)

经过以上分析,为了给今后炎热多雨地区轨道交通周边岩土体结构物的设计及施工提供参考,笔者考虑干湿循环作用对土体刚度特性的影响,根据试验结

果与 $G/G_{\max}$ 随 $\gamma$ 变化的模型拟合曲线及阻尼比 $D$ 与应变 $\gamma$ 的经验关系,给出了涵盖 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 应变范围内 $G/G_{\max}$ 及 $D$ 的建议值,如表3, 4。

图 12  $D$  -  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0 = 50$  kPa)Fig. 12 Relationship between  $D$  and  $\gamma$  ( $\sigma'_0 = 50$  kPa)图 13  $D$  -  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0 = 100$  kPa)Fig. 13 Relationship between  $D$  and  $\gamma$ 图 14  $D$  -  $\gamma$  关系曲线 ( $\sigma'_0 = 200$  kPa)Fig. 14 Relationship between  $D$  and  $\gamma$  ( $\sigma'_0 = 200$  kPa)

### 3 土体结构微观机理分析

上述结果反映出残积土的刚度特性受气候环境影响显著,应变在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 的小应变范围内有特殊的力学行为表现,为探寻炎热多雨气候对残积土小应变刚度特性的影响机理,利用真空冷冻升华干燥法制备经历不同干湿循环次数的试样,利用扫描电子显微镜(SEM)分析反复干湿循环作用对残积土微观结构的

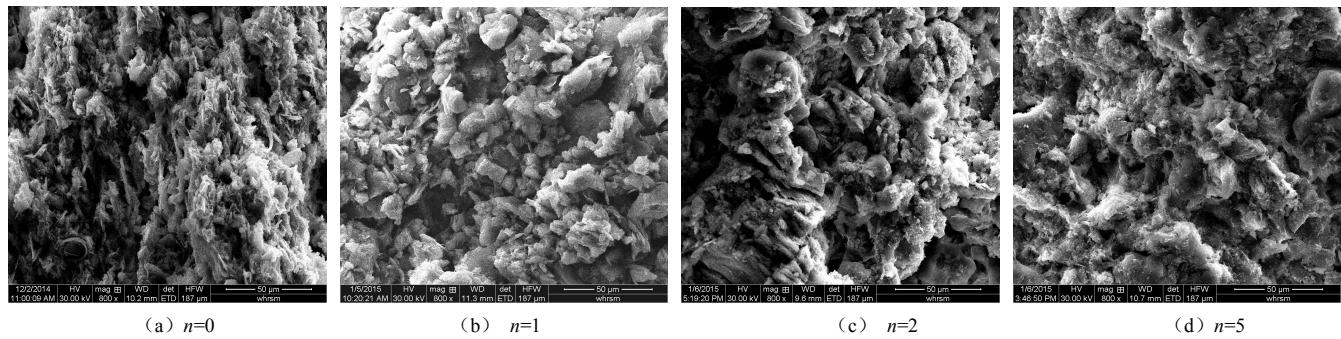


图 15 干湿循环作用下土体微观结构

Fig. 15 Microstructure of soil under action of wetting and drying cycles

表 3 干湿循环作用下残积土  $G/G_{\max}$  -  $\gamma$  关系预测值Table 3 Parameters of empirical relationship between  $G/G_{\max}$  and  $\gamma$  of residual soil under action of wetting and drying cycles

n	$\sigma'_0$ /kPa	剪切应变 $\gamma/10^{-4}$					$R^2$
		0.01	0.1	1	10	100	
0	1.000	0.960	0.638	0.256	0.080	0.974	
1	0.999	0.959	0.635	0.204	0.045	0.992	
2	25	1.000	0.888	0.347	0.074	0.013	0.975
3		0.943	0.658	0.161	0.017	0.002	0.999
5		0.891	0.554	0.094	0.006	0.0003	0.997
0	0.997	0.948	0.632	0.209	0.046	0.992	
1		1.000	0.968	0.653	0.258	0.078	0.992
2	50	0.989	0.902	0.482	0.089	0.010	0.986
3		0.985	0.652	0.211	0.050	0.011	0.960
5		0.939	0.450	0.102	0.019	0.003	0.985
0	0.999	0.938	0.591	0.226	0.068	0.992	
1		0.995	0.941	0.599	0.138	0.018	0.992
2	100	0.984	0.892	0.443	0.046	0.002	0.975
3		0.924	0.645	0.131	0.008	0.000	0.999
5		0.924	0.653	0.112	0.004	0.000	0.997
0	0.991	0.921	0.544	0.112	0.013	0.998	
1		0.994	0.929	0.536	0.099	0.010	0.992
2	200	0.992	0.906	0.492	0.109	0.016	0.997
3		1.000	0.995	0.492	0.026	0.001	0.994
5		0.941	0.588	0.130	0.016	0.002	0.996

影响作用, 结果见图 15。天然状态下的花岗岩残积土(即  $n=0$ , 见图 15 (a)) 为絮凝结构, 在较大放大倍数下观察可以看到, 花岗岩残积土的结构单元体其实是书卷状的高岭石以边 - 面、面 - 面接触形成的絮凝体。这种结构虽然与海洋沉积的絮凝结构相似, 表现在结构疏松, 孔隙度较高, 但不同的是具有较高的结构强度, 这是因为一方面经风化淋溶作用, 松散结构间还存有剩余的化学键强度, 另一方面, 风化淋溶出的胶体氧化物在微粒间产生的胶结作用强化了结构强度。大量研究表明, 残积土颗粒间的胶结物质可以明显提高土体强度, 但易受气候影响胶结效果减弱<sup>[17]</sup>。从图 15 (b) ~ (d), 可以看出, 随着干湿循环的发展, 天然状态下的絮凝结构转变为具有一定定向性的团聚结构。如图 15 (a) 所示, 1 次干湿循环作用后,

结构单元体旋转、偏移、聚集形成新的团聚体, 虽然孔隙度减小, 定向性增加, 但团聚体仍以边 - 面、面 - 面接触, 保留一定的结构强度; 随着干湿循环次数增长, 孔隙间水分不断蒸发 - 补给, 颗粒间的胶结物质产生应力集中而被破坏, 最后在饱和状态下随水分有所丧失, 团聚体在变化的温湿度影响下重新聚集成更大的集合体, 结构强度进一步降低(图 15 (c)); 当干湿循环达到 5 次后, 土的结构基本被破坏, 孔隙向均匀化发展, 微观结构与重塑土相似(图 15 (d))。由此看来, 反复的干湿循环会改造残积土的微观结构, 这种微观结构重塑也会影响残积土的刚度特征, 反映在共振柱试验结果中  $G$ ,  $G_{\max}$  随干湿循环增加逐渐衰减,  $D$  逐渐增大(见图 3~5)。

表 4 干湿循环作用下残积土  $D$  -  $\gamma$  关系预测值Table 4 Parameters of empirical relationship between  $D$  and  $\gamma$  of residual soil under action of wetting and drying cycles

n	$\sigma'_0$ /kPa	剪切应变 $\gamma/10^{-4}$					$R^2$
		0.01	0.1	1	10	100	
0	0.001	0.642	8.612	20.042	25.687	0.984	
1	0.010	0.615	8.106	20.272	25.117	0.977	
2	25	0.001	1.620	11.710	17.334	18.600	0.995
3		0.151	0.634	13.510	24.130	25.586	0.985
5		0.287	4.163	16.071	19.149	19.360	0.982
0	0.037	0.697	7.122	17.873	22.389	0.985	
1	0.639	1.026	7.136	16.542	21.150	0.977	
2	50	0.008	0.472	10.241	29.139	33.963	0.995
3		0.122	0.278	7.529	17.857	21.563	0.976
5		0.123	1.480	13.719	20.801	22.368	0.975
0	0.044	1.493	7.507	12.947	15.172	0.992	
1	0.391	1.103	7.935	19.459	22.722	0.982	
2	100	0.292	1.533	10.014	19.025	20.056	0.989
3		0.340	0.648	8.787	14.127	14.541	0.996
5		0.243	2.895	13.469	16.245	16.357	0.984
0	0.251	1.819	8.643	15.649	17.183	0.992	
1	0.384	1.275	11.209	26.200	29.549	0.995	
2	200	0.414	1.301	13.781	33.097	38.668	0.987
3		0.000	0.000	5.063	20.269	21.380	0.994
5		0.690	4.443	17.206	21.729	22.342	0.994

另一方面,从图 15 中还可以看出,随着干湿循环次数的增加,花岗岩残积土的孔隙度逐渐减小,颗粒定向性增强,理论上土的强度应该增大,抗变形能力增强。然而,由于残积土特殊的成土环境,结构中会保留母岩一定的结构强度,虽然干湿循环引起颗粒的重新聚集会导致结构密实,但不足以弥补结构强度损失,导致反复干湿循环后土体刚度衰减、强度降低,这种现象也同样出现其他黏性土中<sup>[8-9]</sup>。

## 4 结论与建议

(1) 在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  小应变范围内,各应力状态下土体最大剪切模量  $G_{\max}$  随干湿循环作用次数  $n$  的增加衰减规律基本相同,但土体  $G_{\max}$  值在 1, 2 次循环中衰减最大,其次为 0, 1 次循环和 2, 3 次循环, 3~5 次循环后土体  $G_{\max}$  值趋于稳定。

(2) 双对数模型能够反映出各循环过程中残积土的最大剪切模量  $G_{\max}$  随应变  $\gamma$  非线性递增趋势,但在低围压时试验点离散性相对较大,50~200 kPa 围压下试验结果拟合关系较好。采用该模型对浅层土体  $G_{\max}$  值进行预测时,应考虑干湿循环效应的影响,采用一定的安全系数。

(3) 干湿循环初期,土体动剪切模量  $G$ 、阻尼比  $D$  随应变  $\gamma$  的变化规律基本一致,随着干湿循环次数 ( $n > 3$ ) 增加,土体  $G - \gamma$  关系曲线形态与常规土体有所差异,尤其表现  $\sigma'_0 = 25, 50$  kPa,  $G - \gamma$  关系呈直线下降和骤降。因此,在水环境作用剧烈地区,轨道交通周边浅层土体  $G$  值随  $\gamma$  的衰变关系应予以验证,保证工程的安全性及合理性。

(4) Martin-Davidovik 模型及选用的阻尼比随应变  $\gamma$  的变化关系能够很好地反映  $G/G_{\max}$  和  $D$  随  $\gamma$  的变化规律。由于干湿循环作用对土体结构损伤程度不同,不同循环次数下土体  $G/G_{\max} - \gamma$  关系随围压增加逐渐出现“两极分化”现象。工程中如需选取开挖后土体  $G/G_{\max} - \gamma$  参数,应选取环境作用后趋于稳定的参数值,选取开挖初期土体参数值将不利于工程安全。

(5) 从微观机理角度分析了干湿循环作用下土体结构变化,验证了文中试验结果及模型拟合分析的合理性,进一步说明了干湿循环后土体刚度特性的宏观改变是由于土体微观结构变化所引起。

## 参考文献:

- [1] 夏 禾, 吴 萱, 于大明. 城市轨道交通系统引起的环境振动问题[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(4): 1~7. (XIA He, WU Xuan, YU Da-ming. Environmental vibration induced by urban rail transit system[J]. Journal of Northern

- Jiaotong University, 1999, 23 (4): 1~7. (in Chinese))
- [2] VOLBERG G. Propagation of ground vibrations near railway tracks[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, 87(2): 371~376.
- [3] DAWN T M. Ground vibrations from heavy freight trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, 87(2): 351~356.
- [4] 崔高航, 陶夏新, 陈宪麦. 城轨交通引起的环境振动问题综述研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 38~43. (CUI Gao-hang, TAO Xia-xin, CHEN Xian-mai. Studies on environmental vibration induced by urban rail transit[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 38~43. (in Chinese))
- [5] ALLAM M M, SRIDHARAN A. Effect of wetting and drying on shear strength[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(4): 421~438.
- [6] GUAN G S, RAHARDJO H, CHOON L E. Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(4): 594~606.
- [7] 沈珠江, 邓 刚. 黏土干湿循环中裂隙演变过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 1~6. (SHEN Zhu-jiang, DENG Gang. Numerical simulation of crack evolution in clay drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 1~6. (in Chinese))
- [8] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727~732. (KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 727~732. (in Chinese))
- [9] 刘文化, 杨 庆, 唐小微, 等. 干湿循环条件下粉质黏土在循环荷载作用下的动力特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 425~432. (LIU Wen-hua, YANG Qing, TANG Xiao-wei, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of silt clay subjected to drying-wetting cycles under cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 425~432. (in Chinese))
- [10] 李新明, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于工程包边法的膨胀土抗剪强度干湿循环效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 675~682. (LI Xin-ming, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental research on shear strength of expansive soil under wetting-drying cycles based on wrapping method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 675~682. (in Chinese))

- [11] 张先伟, 孔令伟, 臧濛. 雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 855 - 863. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, ZANG Meng. Engineering geological characteristics of basalt residual soils in Leizhou Peninsula[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 855 - 863. (in Chinese))
- [12] 2010 TB 铁路工程土工试验规程[S]. 2010. (2010 TB Code for soil test of railway engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [13] 尹松, 张先伟, 孔令伟, 等. 海洋沉积土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 459 - 464. (YIN Song, ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, et al. Testing study of dynamic shear modulus and damping ratio of seabed sediment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 459 - 464. (in Chinese))
- [14] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Beijing: Higher Education
- Press, 2011. (in Chinese))
- [15] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute. Technical manual of soil experimentation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [16] 贾鹏飞, 孔令伟, 王勇, 等. 低幅值小应变振动下土体弹性刚度的非线性特征与表述方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3145-3150-3158. (JIA Peng-fei, KONG Ling-wei, WANG Yong, et al. Nonlinear characteristics and determinate method of elastic stiffness for soils due to low-amplitude small-strain vibrations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3145-3150-3158. (in Chinese))
- [17] ZHANG X W, KONG L W, LI J. An investigation of alternations in Zhanjiang clay properties due to atmospheric oxidation[J]. Géotechnique, 2014, 64(12): 1003 - 1009.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学理论和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com))全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4开, 双栏排版, 192页, 每月中旬出版, 每期定价40元, 全年定价480元。

本刊国际标准刊号ISSN 1000-4548, 国内统一刊号CN 32-1124/TU, 国内发行代号28-62, 国外发行代号MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关34号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)