

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

干湿过程中膨胀土最大剪切模量及其预测

陈 伟,孙德安,张俊然

The maximum shear modulus of expansive soil during wetting-drying processes and its prediction CHEN Wei, SUN De' an, and ZHANG Junran

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012033

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope 陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing 侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156-156

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model 饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154–162

不同类型黏土的强度特性及其预测

Strength of different clayey soils and its prediction 陈嘉伟, 高游, 付俊杰, 李东映 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 101-106

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying –wetting circles and large deformation 杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93–100

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles 徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012033

干湿过程中膨胀土最大剪切模量及其预测

陈伟¹,孙德安¹,张俊然²

(1. 上海大学土木工程系,上海 200444;

2. 华北水利水电大学岩土力学与结构工程重点实验室,河南 郑州 450045)

摘要:为了研究膨胀土在天然环境下的动力特性,本文利用装有弯曲元的三轴仪对南阳膨胀土原状样和重塑样进行了最 大剪切模量的测试试验。试验包括在不同围压下的饱和原状南阳膨胀土最大剪切模量测试;将初始干密度相近的原状样 和重塑样分别进行脱湿和吸湿,量测整个过程中最大剪切模量的变化,并结合孔隙比进行分析。试验结果表明:饱和南阳 膨胀土的最大剪切模量随着围压增大而增大;脱湿过程中南阳膨胀土最大剪切模量与含水率关系曲线要高于吸湿过程的 曲线,即最大剪切模量与含水率关系存在滞回特性,这主要是吸力作用的缘故;初始干密度相近条件下原状样的最大剪切 模量比重塑样的要小,这是由于原状样内部存在较多大孔隙。本文最后对饱和土最大剪切模量公式进行改进,使之适用于 非饱和原状南阳膨胀土最大剪切模量的预测。

关键词:膨胀土;最大剪切模量;弯曲元;干湿;预测

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)06-0089-08

The maximum shear modulus of expansive soil during wetting-drying processes and its prediction

CHEN Wei¹, SUN De'an¹, ZHANG Junran²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Henan Province Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Structural Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China)

Abstract: In order to examine the dynamic characteristics of expansive soil in natural environment, the maximum shear modulus of undisturbed and remoulded Nanyang expansive soil specimens were tested by using a triaxial apparatus equipping with a pair of bender element. The saturated undisturbed Nanyang expansive soil specimen was tested using the bender element to measure the maximum shear modulus under different confining pressures. The maximum shear modulus of the undisturbed and remoulded specimens with the same dry density were measured in wetting-drying processes and analyzed in combination with the void ratio. The test results indicate that the maximum shear modulus of the saturated Nanyang expansive soil increases with the increasing confining pressure. In the relationship between the maximum shear modulus and water content, the drying curve is higher than the wetting one. It is also found that there is hysteretic characteristics in the maximum shear modulus and water content relationship, which is mainly due to the suction effect. Under similar dry density the maximum shear modulus of undisturbed specimen is smaller than the remoulded one. The reason is that there are more large pores in the undisturbed soil. Finally, an existing formula for the saturated soils is improved for predicting the maximum shear modulus of the undisturbed Nanyang expansive soil.

收稿日期: 2020-12-16; 修订日期: 2021-01-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1509800)

第一作者: 陈伟(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为非饱和土力学。E-mail: chengwei737475078@qq.com

通讯作者:孙德安(1962-),男,教授,研究方向为非饱和土力学。E-mail: sundean@shu.edu.cn

Keywords: expansive soil; maximum shear modulus; bender element; wetting and drying; prediction

土的剪切模量是决定土体变形的重要参数,随着 剪应变增大呈现非线性减小^[1]。剪切模量与剪应变关 系曲线的初始阶段,剪切模量最大且几乎为常数,称 为初始剪切模量或最大剪切模量,记为Gmax,其对应的 剪应变范围为极小应变(≤0.001%)。实验室常用弯 曲元和共振柱试验来测量土体的最大剪切模量 G_{max} 。 弯曲元利用压电陶瓷片的振动在土样中产生剪切波, 通过测量剪切波的波速来确定土样的最大剪切模 量。自 Shirley 等^[2] 首次将压电陶瓷弯曲元用于测试 室内土样的剪切波速以来,由于其原理简明、操作便 捷、无损检测等特点,已被众多国内外学者采用并安 装于固结仪、三轴仪等土工试验仪器中。国内外已有 许多学者利用弯曲元对土体动力特性进行了研究,谢 伟等^[3]利用弯曲元研究了不同含水率及压实度对路 基压实土最大剪切模量的影响规律,发现路基土最大 剪切模量随含水率的增加而减小,峰值最大剪切模量 对应的临界压实度随含水率的增加而降低。董林等[4] 使用动三轴弯曲元试验系统对原状黄土和饱和黄土 在不同围压下的最大剪切模量进行测试,发现黄土具 有遇水模量减少及饱和黄土具有触变特性。近年来, 土体的最大剪切模量在深基坑、地铁隧道等周围环境 条件复杂、变形控制要求严格的地下工程数值分析中 得到重视,合理确定土体的最大剪切模量,对正确分 析及预测受动力荷载作用结构的变形有重要作用^[5]。

随着城市化进程加快,高速公路、高速铁路等基 础设施势必跨越更多弱膨胀土地区,同时膨胀土在经 历雨水渗入和蒸发的过程后,土体的各项力学性能明 显降低[6-8]。关于膨胀土在干湿作用下土体力学特性 的变化,国内外学者已经有诸多研究。刘祖德等^[9]发 现周期性的干湿循环作用会导致膨胀土中原生裂隙 的扩展和新裂隙的产生,并在土体中形成相互贯通的 裂隙网络,降低土体的整体性。孙德安等^[10] 通过对南 阳膨胀土进行1~6次的干湿循环试验,研究了干湿 循环对南阳膨胀土的持水能力和湿胀干缩能力的影 响。吕海波等^[11]通过对原状膨胀土进行干湿循环试 验,发现膨胀土抗剪强度随干湿循环次数增加而衰 减,最终趋于稳定,结合压汞试验发现干湿循环对土 的粒间联结产生不可逆的削弱,使得土体形成更大的 孔隙空间,从而降低了其抗剪强度。李朝辉等^[12]研究 了在干湿循环作用下石灰改良膨胀土的工程特性,发 现路堤边坡的变形与含水率变化关系密切,干燥过程

中土体产生少量裂隙,而在湿润过程中裂隙则会消失。张俊然等^[13]对原状南阳膨胀土进行一系列吸力 控制的三轴剪切试验,研究了经过干湿循环后的南阳 膨胀土的应力-应变曲线的变化。

以上研究表明,干湿循环下膨胀土静力强度和变 性特性以及持水特性方面的研究较多,而对于动力特 性方面的研究还比较少。在以膨胀土为路基的公路、 铁路日常运营中,路基膨胀土在季节性干湿循环作用 下的动力特性研究也愈发重要,因此研究干湿过程中 土体最大剪切模量的变化具有重要意义。

1 试验原理与方法

1.1 弯曲元测量剪切波速原理

压电弯曲元是一种典型的机电传感器。在试验 过程中,发射端晶体在脉冲电压下产生振动并在土中 激发剪切波,该剪切波传至接收端,使之振动而产生 电信号,这样通过对比发射与接收信号可以得到剪切 波的传播时间 t,再结合剪切波在土体的传播距离 L(L为晶片之间距离,而非土样高度),可算得土体的 剪切波速V_s,即:

$$V_{\rm s} = \frac{L}{t} \tag{1}$$

需要注意的是,实验开始前需要将弯曲元发射端 和接受端直接接触进行波速测试,此时剪切波速传播 距离 *L*=0,其结果如图 1 所示。



由图1可知,虽然弯曲元直接接触,但接受信号和 发射信号仍存在一个时差Δt,这与信号在放大器等系 统单元上传递的时滞有关,即存在系统延迟。故实际 传播时间为: $t_1 = t - \Delta t \tag{2}$

在弯曲元试验中,剪切波引起的土体应变量级在 理想弹性范围内(γ<10⁻⁶),因此若知道土体密度和剪 切波速V,则可根据弹性理论算得其最大剪切模量:

$$G_{\rm max} = \rho V_{\rm s}^{\,2} \tag{3}$$

本实验以正弦波为发射信号(正弦波适用范围 广,而方波仅适用于刚度较小的土样^[14]),选取合适的 发射频率,电压幅值为14V,采用时域初达波法读取 剪切波到达时间。

1.2 试验材料与方法

1.2.1 试样土样

土样取自河南省南阳市宛城区红泥湾第一初级 中学附近,取土深度6m,土样为尺寸200mm×200mm× 200mm的立方体,用保鲜薄膜和蜡液密封。原状土 呈棕褐色,表面微缝隙密布,可见许多黑色碳粒状颗 粒(图2)。南阳膨胀土颗粒分布曲线如图3所示,土 样的基本物理性质指标和黏土矿物成分见表1,按照 《膨胀土地区建筑技术规范》^[15]的分类,该土为低膨胀 性膨胀土。重塑样土样为原状土切削过程中的碎土 收集,经烘干、粉碎、过筛后得到。



图 2 南阳原状膨胀土 Fig. 2 Undisturbed Nanyang expansive soil



图 3 南阳膨胀土的颗粒曲线

Fig. 3 Graded curve of the Nanyang expansive soil

表1 南阳膨胀土基本物理指标

Tabi	e i Basic	physical in	dexes o	of the IN	anyang exp	bansive som
石英	伊蒙混层	相对密度	液限	塑限	塑性指标	自由膨胀率
/%	/%	$G_{\rm s}$	$w_{\rm L}/\%$	$w_{\rm P}/\%$	Ip	$\delta_{ m f}$ /%



1.2.2 试验仪器与设备

本次试验采用英国 GDS 公司饱和三轴仪与弯曲 元结合的系统,其构造示意图如图 4 所示。试样吸力 量测使用美国 Meter group 公司生产的 WP4C 露点水 势仪,通过测量土样水分与蒸气压平衡时的湿度推算 总吸力,最快能够在 5~10 min 之内读出吸力数值,具 有方便易携的特点。压汞试验所使用的仪器为美国 麦克公司生产的 Auto Pore IV 9600 全自动压汞仪。

由于弯曲元晶片以悬臂端形式突出,而南阳膨胀 土硬度较大(尤其是含水率很低时),考虑到直接将弯 曲元插入土样可能导致土样损坏,同时为避免土样过 硬对弯曲元晶片造成损坏,且为达到紧密贴合的目 的,本试验采用 3D 扫描技术,对弯曲元的发射和接收 端晶体进行激光扫描建模,并用 3D 打印机打印出 1:1的 ABS 模具(图 5)。制样时使用特制模具可以 在土样的上下端压出与弯曲元晶体贴合程度较高的 凹槽,确保了弯曲元与土样紧密接触及试样底面完全 水平贴合透水石,提高了试验的精度。



图 5 弯曲元三轴试样制样模具 Fig. 5 Triaxial specimen mould for the bender element tests

· 92 ·

原状土试样制备:原状膨胀土天然含水率 21.0%, 饱和度 82%,呈坚硬一硬塑状。同时,土样微裂隙密 布,切削制样难度较大。首先用美工刀等工具将原状 样(约 20 cm×20 cm>20 cm)分为多个长方体状土样后, 移至切土器上,用削土刀配合钢丝锯将土样小心削成 直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱体。完成后将削 好的土样用保鲜膜包好后放入保湿缸中待用。

重塑样制备: 先将磨细的干燥土样调制成含水率为21.0%, 把土样放入保鲜袋并放入 Lock&Lock 保鲜 盒中静置 24 h, 使水分分布均匀, 之后按照所需干密 度称质量, 分5层压实。在1~4层的压实过程中, 需 要用铁丝将土层表面刮毛, 以防止土样分层。试样压 实完成后直径为50 mm, 高为100 mm。每压完一层用 游标卡尺测量土层高度, 防止试样干密度不均匀。本 试验中制备了含水率为21.0%、干密度为1.65, 1.60, 1.50 g/cm³3 个不同干密度的重塑样。

试验之前,使用特制的弯曲元模具在原状样和重 塑样上下端压出贴合弯曲元晶片的凹槽。

1.2.4 试验方法

试验前,测量南阳原状土试样的体积和质量。将 试样套上橡胶模安装在饱和三轴仪中,先将试样进行 饱和,具体操作为先施加 20 kPa 的围压,然后施加 1个5 kPa 的反压,让水自下而上通过土样,最后从土 样上端的顶帽流出。饱和完成后分别施加围压 20, 40,70,100 kPa,记录试样体积变化。每级压力固结完 成后测量剪切波速。测试完成后卸围压时需要关闭 排水阀,防止卸压过程中南阳膨胀土的吸水膨胀,影 响试样体积的精确量测。

饱和土样测试完成后,将原状土从饱和状态自然 风干到最干状态(4.0% 左右),然后进行喷水吸湿(喷 水至特定含水率后,用保鲜膜密封 24 h,使其水分均 匀),在整个过程中含水率每变化 4 个百分点左右便 进行 100 kPa 围压固结下的最大剪切模量的测量。试 样装样前后分别进行体积和质量的测量。重塑样的 试验方法与上述相同。

2 试验结果及分析

2.1 饱和土的最大剪切模量

饱和后的原状样和重塑样分别在围压 20,40,70, 100 kPa下的最大剪切模量测试结果如图 6(a)所示, 可知,最大剪切模量随围压增大而增大,几乎呈线性 关系。围压从 20 kPa 增至 100 kPa 时,原状样和初始 干密度 1.65 g/cm³ 重塑样的最大剪切模量提高了 40% 左右;而初始干密度为 1.60, 1.50 g/cm³ 重塑样在此过 程中最大剪切模量提高了 60% 左右。由图 6(b)可知, 原状样和初始干密度 1.65 g/cm³ 重塑样的孔隙比降低 了 8% 左右;而初始干密度为 1.60, 1.50 g/cm³ 重塑样 在此过程中孔隙比降低了 10% 左右。因此,围压对试 样最大剪切模量的影响程度和此过程中孔隙比的变 化程度有比较一致的对应关系。



Fig. 6 The maximum shear moduli of the saturated undisturbed and remolded expansive soil

由图 6(a)可以发现,初始干密度越大,其最大剪 切模量也相应更大,结合图 6(b)可以看出,这是由于 初始干密度大的土样试验过程中孔隙比更小,其土体 更加密实,大颗粒之间的咬合力与胶结更强,土中架 空孔隙较少,土体结构更加稳定,故其最大剪切模量 也最大。

2.2 干湿过程中最大剪切模量

因为试样经历饱和、施加不同围压固结后体积有 不同程度的变化,导致干密度也有不同程度的变化。 为讨论方便,选取开始脱湿时(饱和后围压 100 kPa 固 结完成后)试样的真实干密度(*p*_{d1})作为起点。

2.2.1 干湿过程中重塑样的剪切模量

图 7 为重塑样经历干燥-湿润过程中的最大剪切 模量、孔隙比变化曲线。从图 7(a)可知,脱湿过程中 南阳膨胀土最大剪切模量与含水率关系曲线要高于 吸湿过程的曲线,即最大剪切模量与含水率关系也存 在滞回特性。从图 7(b)(c)的孔隙比变化可知,干燥 过程中土体失水收缩,吸湿过程中土体吸水膨胀,而 脱湿过程曲线高于吸湿曲线。结合 Miao 等^[16]、孙德 安等^[17]测得的南阳膨胀土水土特征曲线可知,干湿过 程中试样中吸力与含水率关系存在吸力滞回圈,相同





含水率下脱湿过程吸力值较大,所以试样最大剪切模 量脱湿过程曲线始终在吸湿过程之上。

同时,从图 7(a)中可知,经过干湿过程后土的最 大剪切模量降低。这是因为在土的吸湿膨胀过程中, 由于水的楔入压力和土内膨胀压力的作用,土颗粒集 聚体内的孔隙及土颗粒集聚体间的孔隙发生膨胀,当 压力超过临界值,土颗粒间联结发生不可逆转的削 弱,土颗粒集聚体分散成次一级的集聚体,形成了更 为松散的结构^[11],导致了最大剪切模量的降低。

2.2.2 干湿过程中重塑样和原状样的最大剪切模量对比

从图 8 中可知,原状土的最大剪切模量与含水率 关系也存在滞回特性,并与上述重塑样的规律一致, 都可以用孔隙比和吸力滞回特性来解释。



图 8 干湿过程中原状和重塑样的最大剪切模量 Fig. 8 The maximum shear modulus of the undisturbed and remolded specimens during drying and wetting processes

同时,对比原状样和重塑样的最大剪切模量可以 发现,原状样的最大剪切模量明显小于重塑样。观察 图9所示的两者孔隙比关系可以看出:在干湿过程中 尽管原状样的干密度大于重塑样,但最大剪切模量却 始终小于重塑样。

图 10 表示用压汞试验测得的原状样和重塑样孔 径与孔径分布密度关系。测试前 2 种试样的含水率 均为 20.0%,原状样的含水率 20.0% 是从初始含水率 脱湿得到的,而重塑样是用含水率 20.0% 土样压制 的。从图 10 可知,原状样的大孔隙(>10 μm)占比明 显多于重塑样。主要是因为原状样具有原生结构,存 在较多的集聚体间大孔隙;而重塑土大孔隙几乎没 有,并且在干燥过程中集聚体内孔隙逐渐减小甚至消 失,主要为颗粒间孔隙和小的集聚体内孔隙。这就导 致了原状样相比重塑样虽然整体更密实,但由于其内 部孔隙分布不均,大孔隙分布密度较多,故导致其结 构性更差,最大剪切模量也始终小于重塑样。



图 9 干湿过程中非饱和原状和重塑膨胀土样的孔隙比







3 南阳膨胀土最大剪切模量的预测

自 1972 年来, Hardin 等^[18]、Marcuson 等^[19]研究了 不同因素对最大剪切模量的影响,得出了比较一致的 结论: 围压和孔隙比是影响土体最大剪切模量最重要 的两个因素,同时提出了*G*_{max}的预测公式。但 Hardin 等研究的土体主要是砂土,而对于非饱和黏土而言, 含水率(或者吸力)也是不可忽视的因素。Liu 等^[20]研 究了含水率和含砂量对黄土最大剪切模量的影响,同 时为了方便实际工程应用,提出了黄土G_{max}考虑含水 率而非吸力的预测公式。对非饱和膨胀土考虑吸力 的预测公式还比较少,本研究在改进的 Hardin-Drnevich公式基础上提出了考虑吸力、饱和度、孔隙 比的南阳膨胀土预测公式。先利用试验数据拟合了 饱和土公式参数,再代入非饱和土的预测公式中进行 验证,实测与预测基本一致。

为了正确地预测非饱和土地最大剪切模量,在 Hardin 等^[18]提出的 *G*_{max} 公式中,考虑吸力和饱和度的影响。改进的公式如下:

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot p_{a} \cdot \left(\frac{s \cdot S_{r} + \sigma_{m} + \sigma_{0}}{p_{a}}\right)^{n} \qquad (4)$$

式中, F(e)采用 Hardin^[21] 提出的适用黏性土的公式:

$$F(e) = \frac{1}{(0.3 + 0.7e^2)} \tag{5}$$

式中: s----吸力;

当饱和状态时,吸力s=0,故此时公式为:

$$G_{\max} = A \cdot p_{a} \cdot \frac{1}{(0.3 + 0.7e^{2})} \cdot \left(\frac{\sigma_{m} + \sigma_{0}}{p_{a}}\right)^{n}$$
(6)

将图 6 中饱和南阳原状土的G_{max}、e以及σ_m(即围压)数据代入式(6)中进行拟合,可求得 *A*=427.48、 *n*=0.19, 拟合结果见图 11, 拟合度较高。



将由饱和土试验结果得到的参数 A=427.48、n=0.19 及非饱和原状样的饱和度、吸力和孔隙比的数值代入 式(4),可求得最大剪切模量的预测值,如表 2 所示。 将非饱和南阳膨胀土最大剪切模量的预测值和实测 值(图 8)进行比较,结果如图 12 所示。从图 12 中可 以看出,公式得到的预测值和实测值有较好的对应关 系,因此公式可较好预测非饱和土的最大剪切模量。

表 2 干湿过程中原状南阳膨胀土参数及最大剪切模量的预测值 Table 2 Parameters and the predicted maximum shear modulus values of the undisturbed Nanyang expansive soil during drying and watting processes

and wetting processes										
状态	含水率 w/%	孔隙比e	吸力 s/MPa	饱和度 <i>S_r/%</i>	G _{max} 预测值 /MPa					
	19.8	0.668	0.21	81.3	76.2					
	15.1	0.577	4.26	71.5	144.0					
脱湿过程	11.8	0.532	11.50	60.8	183.0					
	7.8	0.503	36.40	42.7	225.0					
	3.6	0.484	109.40	20.9	251.0					
	7.7	0.521	16.60	40.4	185.0					
	11.7	0.567	2.03	56.5	121.0					
吸湿过程	15.7	0.625	0.16	69.0	77.1					
	19.4	0.674	0.02	78.9	64.1					
	20.3	0.689	0.01	80.5	62.0					

注:吸力使用WP4C露点水势仪测量, $\sigma_m = 0.1$ MPa。



图 12 原状南阳膨胀土的实测值与预测值对比 Fig. 12 Measured and predicted values of the undisturbed Nanyang expansive soil

4 结论

(1)饱和膨胀土的围压和孔隙比是影响其最大剪 切模量的重要因素。在脱湿过程中南阳膨胀土最大 剪切模量与含水率关系曲线要高于吸湿过程的曲线, 即最大剪切模量与含水率关系也存在滞回特性。在 干密度和含水率相同条件下原状南阳膨胀土最大剪 切模量明显低于重塑样,原因在于原状土内部存在较 多大孔隙。

(2) 非饱和南阳膨胀土的最大剪切模量随着含水 率降低而增大,除了本身膨胀土因脱水而收缩导致土 体更加密实外,还有吸力值的变化有关,这些导致南 阳膨胀土有效应力的变化。通过引入考虑吸力值的 状态变量对 Hardin-Drnevich 公式进行改进,得到了可 较好预测原状南阳膨胀土最大剪切模量的公式。

参考文献(References):

- MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: Application to tunnels and deep excavations[J].
 Proceedings of the Institution of Civil Engineers and Civil Engineering, 1993, 97(1); 27 – 41.
- [2] SHIRLEY D J, HAMPTON L D. Shear-wave measurements in laboratory sediments [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 63(2): 607 – 613.
- [3] 谢伟,章定文,杨声.含水率对路基压实土小应变剪切模量的影响规律[J].岩土力学,2017,38(5):1273-1280. [XIE Wei, ZHANG Dingwen, YANG Sheng. Impact of moisture content on variation of small-strain shear modulus of compacted subgrade soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1273 1280. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 董林,王兰民,夏坤,等.原状黄土遇水及饱和后软化特征研究[J].水文地质工程地质,2016,43(3):148-152.
 [DONG Lin, WANG Lanmin, XIA Kun, et al. A study of soften characteristics of wet and saturated loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3):148-152. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ATKINSON J H. Non-linear soil stiffness in routine design[J]. Géotechnique, 2000, 50(5): 487 508.
- [6] 何芳婵,李宗坤.南水北调南阳段弱膨胀土增湿膨胀与力学特性试验研究[J].岩土力学,2013,34(增刊2):190 194. [HE Fangchan, LI Zongkun. Experimental study of wetting expansibility and mechanical properties of weak expansive soil in Nanyang section of South-to-North Water Diversion Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 190 194. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 包承纲.非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J].
 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1 15. [BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1 15. (in Chinese with English abstract)]

- [8] 黄震,陈铖.改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J].水文地质工程地质,2016,43(3):87-93.
 [HUANG Zhen, CHEN Cheng. A study of the swelling shrinkage cracks of the modified expansive soil and its relationship with the shear strength[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3):87-93. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘祖德,孔官瑞.平面应变条件下膨胀土卸荷变形试验研究[J]. 岩土工程学报,1993,15(2):68-73.
 [LIU Zude, KONG Guanrui. Experimental deformation study on unloading expansive soil under plane strain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2):68-73. (in Chinese)]
- [10] 孙德安,黄丁俊. 干湿循环下南阳膨胀土的土水和变形特性[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 115 119.
 [Sun De'an HUANG Dingjun. Soil-water and deformation characteristics of Nanyang expansive soil after wetting-drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup1): 115 119. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 吕海波,曾召田,赵艳林,等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797 3802.
 [LYU Haibo, ZENG Zhaotian, ZHAO Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797 3802. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李朝辉,程谦恭,王艳涛,等.干湿循环下石灰改良膨胀土离心模型试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):111 117. [LI Zhaohui, CHENG Qiangong, WANG Yantao, et al. A centrifugal model test study of lime-improved expansive soil under drying and wetting circles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017,44(4):111 117. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张俊然,孙德安,姜彤.吸力对弱膨胀土应力应变关系和强度的影响[J].水利学报,2015,46(增刊1):200-204. [ZHANG JUNRAN, Sun De'an, JIANG Tong. Effect of suction on stress-strain relationship and strength of weakly expansive soils[J]. Journal of Hydraulic

Engineering, 2015, 46(Sup1): 200 – 204. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 姬美秀,陈云敏,黄博.弯曲元试验高精度测试土样剪 切波速方法[J]. 岩土工程学报,2003,25(6):732 -736. [JI Meixiu, CHEN Yunmin, HUANG Bo. Method for precisely determining shear wave velocity of soil from bender element tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6):732 - 736. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.膨胀土地区建 筑技术规范: GBJ 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工 业出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building in expansive soil regions. GBJ 50112—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]
- [16] MIAO L C, LIU S Y, LAI Y M. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil[J]. Engineering Geology, 2002, 65(4): 261 – 267.
- [17] 孙德安,张俊然,吕海波.全吸力范围南阳膨胀土的 土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1839 – 1846. [Sun De'an, ZHANG Junran, LYU Haibo. Soilwater characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1839 – 1846. (in Chinese with English abstract)]
- [18] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98(7): 667 – 692.
- [19] MARCUSON W F, WAHLS H E. Time effects on dynamic shear modulus of clays[J]. ASCE J Soil Mech Found Div, 1972, 98(SM12): 1359 – 1373.
- LIU X, ZHANG N, LAN H X. Effects of sand and water contents on the small-strain shear modulus of loess[J].
 Engineering Geology, 2019, 260: 105202.
- [21] HARDIN B O. The nature of stress-strain behavior for soils[C]//Geotechnical Division Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, 1978. 编辑:张明霞