

doi:10.11988/ckyyb.20250120

2026,43(3):126-134

饱和重塑红黏土固结不排水剪切波速特性试验研究

徐兴倩^{1,2},王永昊¹,杨苑君¹,赵 熹¹,李小龙³,王海军^{4,5},黄世传¹,马方雯¹

(1.云南农业大学 水利学院,昆明 650201; 2.云南农业大学 国际学院,昆明 650201; 3.云南农业大学 机电工程学院,昆明 650201; 4.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室,成都 610299; 5.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为探究饱和红黏土剪切波速特性,制备不同干密度的三轴饱和试样,采用改装三轴弯曲元系统进行红黏土固结不排水三轴试验,分析红黏土试样的剪切波速变化规律,最终建立饱和红黏土的剪切波速评价模型。结果表明:饱和红黏土剪切波速总体上随围压、干密度、有效应力的增大呈增大趋势,随孔隙比的增大呈减小趋势,其中剪切波速与围压、有效应力之间呈幂函数关系;采用 4 种不同拟合方式(线性、二次多项式、幂函数和指数函数)分析不同干密度饱和红黏土剪切模量与有效应力的相关性,拟合精度依次为幂函数拟合>指数拟合>二项式拟合>线性拟合,从而获得剪切模量与有效应力的量化关系;根据土体剪切波速与剪切模量相关性,以相对密度、孔隙比和有效应力为变量,建立了饱和红黏土剪切波速模型,经检验该模型实测值与计算值较为吻合,可为饱和红黏土有效应力的评价提供评价指标。该模型通过剪切波速能有效反映固结不排水条件下饱和红黏土的应力状态变化,可为红黏土滑坡的监测预警深入研究提供参考。

关键词:饱和红黏土;剪切模量;剪切波速;三轴固结不排水试验;有效应力

中图分类号:TU411.7

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2026)03-0126-09

Experimental Study on Characteristics of Consolidated Undrained Shear Wave Velocity of Saturated Remolded Red Clay

XU Xing-qian^{1,2}, WANG Yong-hao¹, YANG Yuan-jun¹, ZHAO Xi¹, LI Xiao-long³,
WANG Hai-jun^{4,5}, HUANG Shi-chuan¹, MA Fang-wen¹

(1.College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2.International College, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3.Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4.Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS), Chengdu 610299, China; 5.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the relationship between shear wave velocity and physical-mechanical indices in saturated red clay. [Methods] Triaxial saturated specimens exhibiting varying dry densities were meticulously prepared. Utilizing a specifically modified triaxial bender element apparatus, consolidated undrained (CU) triaxial tests combined with shear wave velocity measurements were conducted on the red clay to identify the primary controlling factors influencing shear wave velocity characteristics within saturated red clay specimens. Subsequently, leveraging the quantitatively established relationships between shear wave velocity and physical-mechanical parameters, an evaluation model for shear wave velocity in saturated red clay was ultimately developed. [Results] (1) The shear wave velocity of saturated red clay generally exhibited an initial ascending phase followed by a progressive decline as dry density increased. Conversely, the shear wave velocity demonstrated a consistent monotonic enhancement in response to escalating confining pressure and effective stress. The interrelationships be-

收稿日期:2025-02-20;修回日期:2025-05-22;接受日期:2025-06-19

基金项目:国家自然科学基金项目(42367025);云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y0883);云南省基础研究计划农业联合专项(202301BD070001-171);云南省高层次人才培养支持计划“青年拔尖人才”专项(YNWR-QNBJ-2020-030)

作者简介:徐兴倩(1985-),男,云南曲靖人,教授,博士,主要从事环境岩土工程及其数值模拟研究。E-mail:xuxingqian_123@163.com

通信作者:王永昊(1998-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:wangyonghao2022@163.com

tween these parameters (confining pressure and effective stress) and shear wave velocity were mathematically modeled employing power function formulations. Correlation coefficients exceed 0.92 ($R^2 > 0.92$), indicating that a positively correlated power-law functional dependence governs the associations between confining pressure/effective stress and shear wave velocity. (2) Linear regression, quadratic polynomial approximation, power function formulation, and exponential function modeling were individually applied to analyze the experimental data. Power function modeling demonstrated higher precision than exponential function modeling, which in turn surpassed quadratic polynomial approximation, with linear regression exhibiting the lowest degree of accuracy. The quantitative interrelationship between shear modulus and effective stress conforms to a power-law functional dependence, thereby establishing a foundational theoretical framework essential for the systematic development of subsequent shear wave velocity predictive models. (3) A comprehensive evaluation model for shear wave velocity was ultimately constructed. This sophisticated model incorporated specific gravity, void ratio, and effective stress as its primary input variables. Implementation of this framework facilitated rigorous nonlinear surface regression analysis applied to experimental datasets, yielding a coefficient of determination of $R^2 = 0.91$. Precisely 89.9% of the data points demonstrated relative errors between measured and calculated values below the 10% threshold, whereas the remaining 11.1% exhibited relative deviations exceeding 10%, which confirms the model's elevated predictive accuracy. [**Conclusion**] A robust correlation exists between the shear wave velocity of saturated red clay and the physical properties of the soil. The evaluation of soil physical parameters through shear wave velocity measurements demonstrates practical feasibility. Concurrently, the developed shear wave velocity model establishes a quantitative relationship between the shear wave velocity of saturated red clay and its physical-mechanical parameters. This achievement provides a significant theoretical foundation for in-depth exploration of the monitoring and early-warning mechanisms for lateritic landslides.

Key words: saturated red clay; shear modulus; shear wave velocity; triaxial consolidated undrained test; effective stress

0 引言

红黏土是一种由碳酸盐岩风化后形成的黏性土体,多呈棕红或黄褐色,通常以残积、坡积或二者混合的堆积形式存在^[1]。针对红黏土,土体参数对于评价土体强度有重要作用,不同含水率条件下,含水率与抗剪强度呈非线性关系^[2]。恒定含水率条件下,初始饱和度和净围压对剪切特性有较大影响^[3]。此外,红黏土的特殊工程性状直接影响边坡稳定性,Chen^[4]指出,降雨是导致红土型边坡不稳定的直接因素,红土型滑坡滑带处的土体多处于饱和状态。剪切波速作为表征小应变条件下土体刚度的重要指标,其获取方法有钻孔法、面波法^[5]及地震波孔压静力触探法^[6-7],室内测试以弯曲元法和共振柱法为主,其中弯曲元法具有便捷、无损的优势,被广泛应用于室内剪切波的测试^[8-9]。剪切波速能有效反映小应变条件下土体的强度特性,为此,研究饱和红黏土的剪切波速特性,能为深入理解红土型滑坡的变形演化过程提供关键依据。

土体剪切波速影响因素较多(如含水率、孔隙比、干密度、围压等),这些因素作为中间变量可以间接反

映土体剪切波速与抗剪强度的相关性。随着含水率的增加,土石混合体或土壤剪切波速、抗剪强度均呈现出逐渐减小趋势^[10-11]。黄土颗粒的胶结程度影响土体孔隙分布,胶结程度越好,孔隙比越小,剪切波速越大^[12]。在外部荷载作用下,土体结构发生改变而引起剪切波速的变化,砂土剪切波速随着围压、有效应力的增加而增大,且围压与剪切波速满足幂函数关系^[13-14]。研究者针对混合土体进行剪切波速研究,橡胶砂颗粒混合土的竖向应力与剪切波速大致呈线性关系^[15]。此外,不同因素对剪切波速的影响程度存在差异,以砾性土为例,含砾量、相对密度、围压、应力比均对剪切波速有影响,但以围压的影响最大^[16]。综上,土体的剪切波速与其物理指标、微观结构及所处应力状态等因素均有着密切联系,且不同因素对剪切波速的影响权重存在较大差异。

通过分析上述因素对土体剪切波速的影响,建立土体剪切波速与物理指标的量化关系模型,可实现土体物理力学指标及其结构特征的剪切波速无损评价。Whalley等^[17]根据土壤剪切波速与孔隙比、有效应力之间的相关性分析,建立非饱和土壤的剪切波速评价模型。刘鑫等^[18]在Hardin经验公式的基础上,引入状态参数代替孔隙比,提出粉质砂土的

剪切波速模型。Majdi 等^[19]结合混凝土现场和室内的剪切波速测试,利用剪切波速评估混凝土试样固结过程中的扰动效应。Romana-Giraldo 等^[20]利用剪切波速分析软土的固结排水、不排水三轴力学行为,结合次塑性模型提出基于剪切波速的软土应力状态预测模型。不同深度条件下的土体剪切波速亦有差距, Kim 等^[21]通过剪切波速与有效应力、有效应力与深度的关系建立剪切波速与非压实路堤砂土深度预测模型。余松等^[22]针对典型黏土、粉土、砂土及碎石土,利用回归模型探究剪切波速与埋深的相关性。综上,目前土体剪切波速的研究主要集中于砂土、黄土、软土和砂砾石土等类型,对于饱和红黏土的剪切波速特性研究却鲜有报道,但该指标对于红土型滑坡的监测预警具有重要意义。

本文以云南红黏土作为研究对象,制备不同干密度的饱和红黏土试样,采用三轴弯曲元系统开展固结不排水试验,分析不同土体参数指标(干密度、孔隙比、围压、有效应力)对剪切波速的影响。探讨饱和红黏土的剪切波速变化规律;结合饱和红黏土剪切波速与剪切模量的拟合关系,最终建立以孔隙比和有效应力为变量的饱和红黏土剪切波速评价模型。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自昆明市(25°18'N, 102°45'E)的浅层红黏土,土体呈红褐色,取样时先去除表层土,获取原位样品后经风干、碾碎,过 2 mm 筛,再置于 105 °C 烘箱内烘干 24 h。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测定其基本物理指标见表 1,颗粒级配曲线如图 1 所示。

1.2 试验设备

在 SLB-1A 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪的基础上,分别在压力室的上下盖预留弯曲元传感器底座位置,改装后的压力室便于将弯曲元传感器嵌入土样,可测定土样垂直方向上的剪切波速。弯曲元传感器由两片可伸缩的压电陶瓷片及中间的金属层粘合而成,外包有环氧树脂,达到防水、绝缘的作用,压力室内导线用橡胶圈与橡胶管连接,以保证密封性。

表 1 红黏土的基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of red clay

原状密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	原状含 水率/%	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最优含 水率/%	相对 密度	液限/ %	塑限/ %
1.38	22.08	1.44	28.90	2.71	53.80	32.70

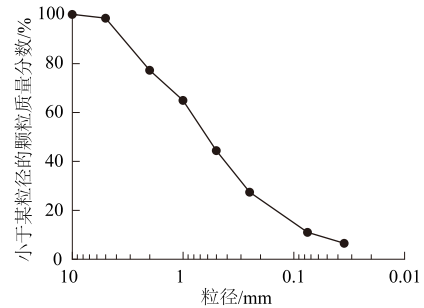


图 1 红黏土的颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of red clay

三轴弯曲元测试系统如图 2 所示,一部分为 SLB-1A 型应力应变控制式三轴剪切试验仪,配有围压与反压控制装置、孔隙水压力与轴向力及位移传感器、压力室及相应的数据采集系统;主要技术参数为:轴向力 0 ~ 10 kN、围压 0 ~ 1.99 MPa、反压 0 ~ 0.99 MPa,可在等应变或等应力控制方式进行饱和、非饱和土的常规三轴剪切试验。另一部分为 WQY-1 型弯曲元试验系统,主要由激发与接收传感器、信号发生器、电荷与功率放大器,以及示波器和数据采集系统构成;主要技术参数为:激发波频率 5 ~ 30 kHz,电荷放大器功率 0.1 ~ 1 000 mV/Unit (Unit 可以是 m/s^2 、N 等),可在正弦波、方波等激发波形下进行 P 波和 S 波测试分析。

1.3 试验原理

剪切波速计算与波的传播时间、传播距离有关。剪切波的传播时间通过解读剪切波形图获得,主要解读方法有时域初达波法、特征点法和互相关法,其中以初达波法的普适性较好^[23]。本文选用初达波法确定剪切波的到达时间,进而计算出剪切波速。具体计算见式(1)和式(2),即:

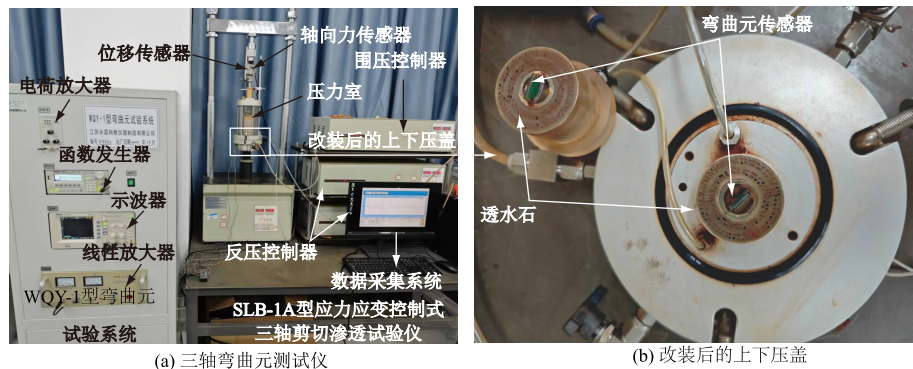


图 2 三轴弯曲元测试系统

Fig.2 Triaxial bender element test system

$$V_s = h/\Delta T, \quad (1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (2)$$

式中: V_s 为剪切波速; h 为激发元和接收元之间土样的有效长度; ΔT 为剪切波的传播时间; T_2 为剪切波形确定的传播时间; T_1 为系统传播时间初值, 本系统中 $T_1 = 22 \mu\text{s}$ 。

1.4 试验方案

将烘干的红黏土制备成初始含水率为 28.90%、不同干密度 (1.15、1.20、1.25、1.30、1.35、1.40 g/cm^3) 的圆柱样, 试样尺寸为 39.1 mm × 80 mm (直径 × 高)。采用真空饱和法对试样进行饱和, 达到饱和条件后将试样安装于三轴压力室内, 在不同围压 (25、50、100、150、200、250、300、350、400 kPa) 条件下进行固结不排水试验, 固结方式为等向固结。在固结完成时进行弯曲元剪切波速测试, 弯曲元参数设置为: 激发波形设置为正弦波; 激发频率设置为 5 kHz; 电荷放大器输出功率设定为 100 mV/Unit, 共计 54 组试验。

1.5 试验步骤

(1) 试样制备。根据目标初始含水率、预设干密度及试样体积, 计算出所需烘干过筛的干土和水的质量, 称量后进行充分拌合, 随后静置 12 h 以利于水分均匀分布。最后采用击实法成型, 制得三轴试验所用试样。

(2) 试样饱和。采用真空饱和法对三轴试样进行饱和, 具体操作时, 黏性土的抽气时间需 > 1 h, 随后注水并静置 10 h。饱和结束后称量试样质量, 据此计算其饱和度与孔隙比。若饱和度 $\geq 95\%$, 则判定为饱和完成; 否则需重复上述饱和步骤。

(3) 试样安装。将橡皮膜套在试样外并将其放在底座上, 将弯曲元传感器插入土体, 套上压力室罩密封并充水准备试验。

(4) 试样固结。在 PC 端上设定好试验方法、围压、应变速率, 进行固结试验。

(5) 剪切波速测试。改变围压, 对不同干密度的饱和试样进行剪切波速测试, 每组试验在土样固结完成后利用弯曲元系统进行剪切波速的测量、激发波与接收波的收集。

(6) 数据采集。三轴及弯曲元试验数据均由 PC 端采集。

1.6 试验数据处理

以干密度 1.20 g/cm^3 、围压 200 kPa 下的测试结果为例, 处理前波形见图 3(a), 通过对该波形曲线进行局部及整体平滑处理, 得到图 3(b)。采用时域初达波法识别处理后的波形图, 确定剪切波到达点,

获得剪切波的传播时间为 0.41 ms, 通过式 (2) 计算出最终传播时间为 0.39 ms; 已知土样高度为 80 mm, 传感器嵌入深度为 2 mm, 剪切波实际传播距离为 76 mm, 代入式 (1) 得出剪切波速 $V_s = 194.759 \text{ m/s}$ 。依此流程处理全部原始波形, 最终获得 54 组试验土样的剪切波速。

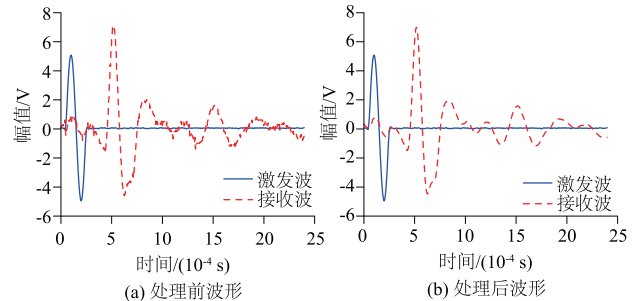


图 3 饱和红黏土弯曲元试验处理前和处理后波形
Fig.3 Bender element test signal waveforms of saturated red clay before and after processing

2 结果与分析

2.1 干密度对饱和红黏土剪切波速的影响

为探究干密度对饱和红黏土剪切波速的影响, 控制围压, 得到剪切波速与干密度的关系曲线 (图 4)。由图 4 可知, 饱和红黏土的剪切波速随干密度增大总体呈现逐渐增大趋势。具体而言, 当干密度 $< 1.30 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, 不同围压条件下总体上土样剪切波速随着干密度的增大逐渐增大, 且围压越大剪切波速越大; 当干密度 $\geq 1.30 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, 不同围压条件下总体上土样剪切波速随着干密度的增大而逐渐减小; 但 100 kPa 和 150 kPa 条件下土样剪切波速随着干密度的增大而逐渐增大。值得注意的是, 当围压介于 200 ~ 300 kPa 时, 曲线虽有波动变化, 但相较于其他曲线, 该围压范围内曲线较为平缓, 说明该围压范围下干密度对剪切波速的影响较小。干密度大小反映土颗粒的密实程度, 干密度的增大意味着单位体积内土颗粒数量增多, 颗粒间的机械咬合作用越显著^[24], 导致剪切波速增大; 但随着干密度的继续增大, 颗粒在围压的作用下排列不均匀, 剪切波传播路径受到阻碍, 导致剪切波速减小。

2.2 孔隙比对饱和红黏土剪切波速的影响

为探究饱和红黏土剪切波速与孔隙比的关系, 通过试验结果分析绘制不同围压下剪切波速与孔隙比的关系曲线 (图 5)。由图 5 可知, 随着孔隙比的增大, 饱和红黏土的剪切波速总体上呈现减小趋势。具体来说, 相同围压条件下, 当孔隙比 < 1.08 时, 土体剪切波速总体上随着孔隙比的增大而增大; 当孔隙

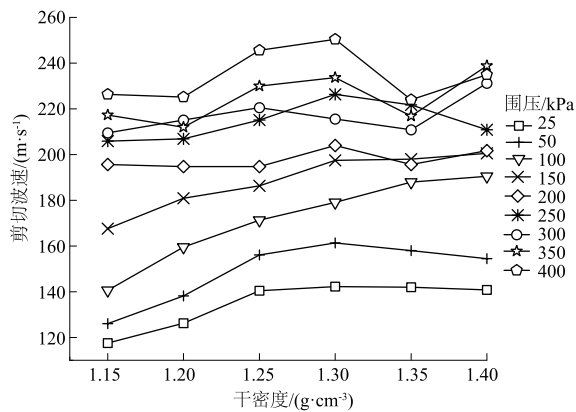


图4 饱和红黏土干密度与剪切波速的关系

Fig.4 Relationship between dry density and shear wave velocity of saturated red clay

比 ≥ 1.08 时,土体剪切波速总体上随着孔隙比的增大而减小。但是,在100 kPa和150 kPa围压条件下,剪切波速随孔隙比的增大呈线性减小趋势。当围压 ≥ 300 kPa时,曲线的波动程度提高。孔隙比反映土壤中孔隙的占比大小,孔隙比越小,土壤中孔隙占比减小,颗粒间排列紧密^[25],在剪切波的传播过程中,能量不易在孔隙中消散,剪切波速增大。与原状红黏土相比,重塑红黏土具有更多的孔隙且体积较大^[26],施加不同围压会使孔隙排列产生较大差异,导致剪切波的传播路径存在较大差异性,剪切波速的变化不均。此外,综合图4与图5的总体趋势可以看出,对于饱和红黏土,随着孔隙比与干密度的增大,剪切波速分别表现出减小和增大的趋势,即饱和红黏土孔隙比与干密度对剪切波速的影响规律相反,原因主要在于微观结构的动态变化及应力水平的双重作用。

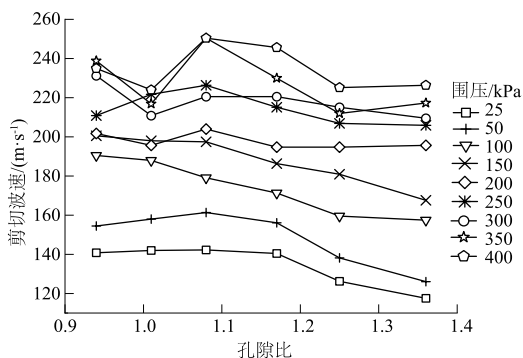


图5 饱和红黏土孔隙比与剪切波速的关系

Fig.5 Relationship between void ratio and shear wave velocity of saturated red clay

2.3 围压对饱和红黏土剪切波速的影响

为探究围压对饱和红黏土剪切波速的影响,控制干密度,获取饱和红黏土围压与剪切波速的关系曲线(图6)。由图6可知,相同干密度条件下,饱和

红黏土剪切波速随围压的增大呈增大趋势。为进一步探究围压对剪切波速的影响,采用幂函数对试验数据进行拟合分析,结果显示拟合精度良好(决定系数 $R^2 > 0.95$),即饱和红黏土剪切波速随围压的增大呈幂函数增大趋势。值得一提的是,图6中剪切波速随围压的增幅要明显大于图4中剪切波速随干密度的增幅及图5中剪切波速随孔隙比的降幅,表明在干密度、孔隙比、围压三因素中,围压对剪切波速的影响最为显著。土样在受到较大围压作用下,土体的压缩仅仅是孔隙体积的减小,土颗粒本身及水体的压缩量可忽略不计^[27],土体结构相对均匀,导致剪切波速变化较缓。

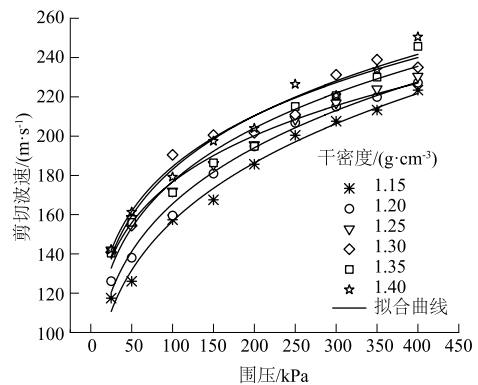


图6 饱和红黏土围压与剪切波速的关系

Fig.6 Relationship between confining pressure and shear wave velocity of saturated red clay

2.4 有效应力对饱和红黏土剪切波速的影响

为探究饱和红黏土有效应力与剪切波速的关系,依据有效应力理论,以有效应力为横坐标,剪切波速为纵坐标绘图(图7),同时采用幂函数对试验数据进行拟合。由图7可知,采用幂函数的拟合精度良好(决定系数 $R^2 = 0.930$),即饱和红黏土的剪切波速随有效应力增大呈幂函数增大趋势,主要原因在于有效应力表征土颗粒间的应力变化,有效应力的增大说明颗粒间应力增大,颗粒胶结作用增强,导致剪切波速增大。

3 饱和红黏土剪切波速评价模型

3.1 模型构建

试验在室温、饱和红黏土(饱和度 $S_r \geq 95\%$)、围压(25~400 kPa)、干密度(1.15~1.40 g/cm³)、激发频率5 kHz等限制条件下进行。为进一步探究饱和红黏土剪切波速与土体物性参数的量化关系,本研究从剪切模量和有效应力的关系(图8)出发,建立饱和红黏土剪切波速评价模型。采用4种拟合方

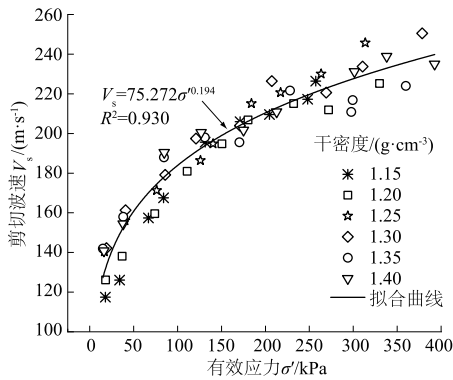


图7 饱和红黏土有效应力与剪切波速的关系
Fig.7 Relationship between effective stress and shear wave velocity of saturated red clay

式(线性函数、二次多项式、幂函数、指数函数)比较剪切模量与有效应力之间的决定系数大小(表2)。

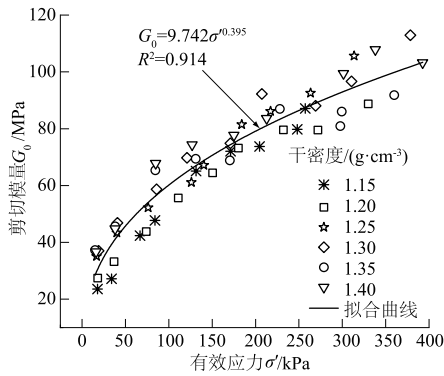


图8 饱和红黏土有效应力与剪切模量的幂函数拟合关系
Fig.8 Power function relationship between effective stress and shear modulus of saturated red clay

表2 饱和红黏土剪切模量与有效应力拟合关系对比

Table 2 Comparison of fitting relationships between shear modulus and effective stress of saturated red clay

干密度/(g·cm ⁻³)	不同拟合方式的R ²			
	线性函数	二次多项式	幂函数	指数函数
1.15	0.914	0.987	0.985	0.990
1.20	0.876	0.986	0.979	0.989
1.25	0.976	0.992	0.958	0.992
1.30	0.911	0.954	0.970	0.963
1.35	0.792	0.917	0.948	0.945
1.40	0.862	0.949	0.974	0.962

由表2可以看出,幂函数与指数函数的拟合精度较高。同时根据表2可推出线性函数、二次多项式、幂函数、指数函数的综合拟合精度的方差分别为0.003 80、0.000 87、0.000 19、0.000 38,故幂函数拟合效果最好,所以选取幂函数表征剪切模量与有效应力的量化关系(式(3))。随后结合剪切模量的计算公式(式(4))以及饱和密度与孔隙比的换算公式(式(5)),最终建立剪切波速、孔隙比与有效应力的量化模型(式(6))。

$$G_0 = a (\sigma')^b, \quad (3)$$

$$G_0 = \rho V_s^2, \quad (4)$$

$$\rho_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \rho_w, \quad (5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{a (\sigma')^b (1 + e)}{(G_s + e) \rho_w}}. \quad (6)$$

式中:G₀为剪切模量(MPa);σ'为有效应力(kPa);a、b为系数;ρ为土体密度(g/cm³);V_s为剪切波速(m/s);ρ_{sat}为土体饱和密度(g/cm³);e为孔隙比;G_s为土体相对密度,取2.71;ρ_w为水的密度,取1.0 g/cm³。

利用式(6)进行曲面拟合,得到剪切波速的评价模型(图9),该模型的决定系数R²为0.910,说明所建模型精度良好,结合拟合参数最终得到饱和红黏土的剪切波速评价模型(式(7))。在室内通过弯曲元法分析出饱和土样的剪切波速,可以有效反映有效应力的变化,从而为饱和红黏土有效应力间接评价提供新的思路。

$$V_s = 100 \sqrt{\frac{(\sigma')^{\frac{2}{5}} (1 + e)}{(G_s + e) \rho_w}}. \quad (7)$$

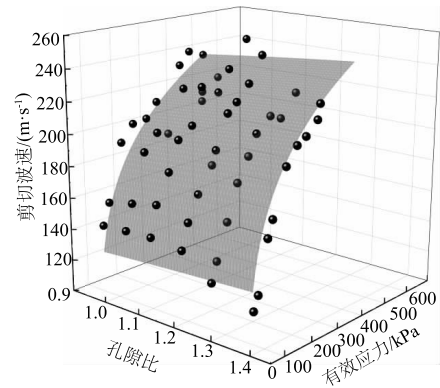


图9 不同孔隙比和有效应力下饱和红黏土的剪切波速模型曲面

Fig.9 Shear wave velocity model of saturated red clay under different void ratios and effective stresses

3.2 模型计算效果误差分析

图10为饱和红黏土剪切波速模型计算值与试验值的关系,以斜率为1的直线对二者进行线性拟合,发现二者在直线附近均匀分布,决定系数R²=0.911,实测值与计算值之间的吻合程度较好,说明构建的饱和红黏土剪切波速预测模型精度较好。通过剪切波速模型计算值与实测值的对比分析(表3),可以看出剪切波速的计算值与模型计算值相对误差在0.125%~22.292%范围内波动,相对误差>10%的占11.111%,相对误差<10%的占89.889%,表明饱和红黏土剪切波速模型能够较准确地反映剪切波速、孔

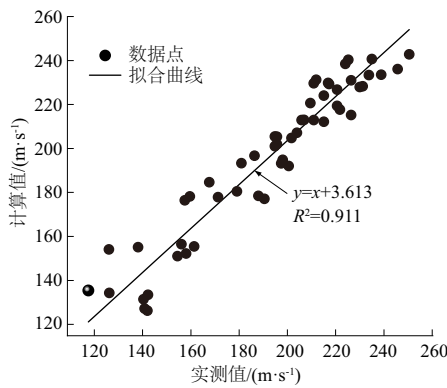


图 10 饱和红黏土剪切波速实测值与模型计算值对比分析
Fig.10 Comparative analysis of measured and modelled values of shear wave velocity in saturated red clay

隙比以及有效应力之间的量化关系,也说明了饱和和红黏土的剪切波速模型具有可行性。

当围压<100 kPa 时,部分试验组出现剪切波速实测值与计算值相对误差较大的情况,最大相对误差达到了22.292%。主要原因在于孔隙比较大时土体饱和含水率较高,试验过程中施加外部荷载导致土体内部出现部分液化^[28],对剪切波速传播路径影响较大,导致剪切波速的实测值相较于计算值出现较大幅度减小;当孔隙比较小时,低围压对土体的固结效果较差,土体颗粒排列较为松散,剪切波的传播路径不均匀,进而导致剪切波速大小不均,相对误差较大。

表 3 饱和红黏土剪切波速实测值与模型计算值的相对误差分析

Table 3 Relative error analysis of measured and modelled values of shear wave velocity in saturated red clay

孔隙比	干密度/ (g·cm ⁻³)	围压/ kPa	有效应 力/kPa	剪切波速/(m·s ⁻¹)		相对误 差/%	孔隙比	干密度/ (g·cm ⁻³)	围压/ kPa	有效应 力/kPa	剪切波速/(m·s ⁻¹)		相对误 差/%
				实测值	计算值						实测值	计算值	
1.357	1.15	25	17.8	117.492	135.438	15.274	1.081	1.30	25	19.0	142.222	133.494	6.137
		50	34.0	126.051	154.150	22.292			50	40.8	161.334	155.541	3.591
		100	66.8	157.443	176.446	12.070			100	86.0	179.101	180.556	0.812
		150	84.0	167.579	184.720	9.985			150	121.0	197.428	193.317	2.082
		200	131.5	195.641	202.043	3.272			200	171.0	203.949	207.163	1.576
		250	171.1	205.902	212.965	3.430			250	207.3	226.376	215.294	4.895
		300	204.6	209.534	220.719	5.338			300	269.1	220.604	226.827	2.821
		350	248.1	217.265	229.395	5.583			350	310.6	233.721	233.428	0.125
1.246	1.20	400	257.3	226.378	231.071	2.073	400	378.4	250.462	242.830	3.047		
		25	18.0	126.209	134.369	6.465	25	15.0	141.990	126.341	11.021		
		50	37.0	138.131	155.197	12.355	50	38.2	158.018	152.314	3.610		
		100	74.0	159.543	178.275	11.741	100	84.4	187.991	178.482	5.058		
		150	111.0	180.912	193.334	6.866	150	131.0	198.040	194.886	1.593		
		200	150.5	194.759	205.471	5.500	200	170.3	195.638	205.385	4.982		
		250	180.3	206.875	213.031	2.976	250	227.9	221.734	217.709	1.815		
		300	232.1	215.109	224.067	4.164	300	297.7	210.907	229.658	8.891		
1.168	1.25	350	271.9	211.948	231.273	9.118	350	299.3	216.873	229.905	6.009		
		400	329.9	225.202	240.392	6.745	400	359.8	224.032	238.528	6.471		
		25	16.8	140.382	131.485	6.338	25	16.2	140.830	127.250	9.643		
		50	40.2	156.089	156.552	0.297	50	38.2	154.418	151.066	2.171		
		100	76.2	171.279	177.912	3.873	100	84.8	190.468	177.188	6.972		
		150	126.0	186.367	196.738	5.565	150	127.0	200.539	192.095	4.211		
		200	140.5	194.761	201.071	3.240	200	175.0	201.702	204.815	1.543		
		250	184.1	215.112	212.239	1.336	250	212.8	210.909	212.985	0.984		
0.936	1.40	300	217.4	220.602	219.415	0.538	300	301.4	231.221	228.341	1.246		
		350	263.5	229.986	228.019	0.855	350	338.0	238.878	233.635	2.195		
		400	313.7	245.671	236.111	3.891	400	392.7	234.991	240.750	2.451		

4 结 论

本文基于改装的三轴弯曲元系统开展不同干密度、围压条件下饱和红黏土的固结不排水试验及剪切波速测试研究,分析饱和红黏土剪切波速的影响因素,并在考虑孔隙比及有效应力的情况下建立饱

和红黏土的剪切波速评价模型,得出以下主要结论:

(1)随着干密度、围压、有效应力的增大,饱和红黏土剪切波速总体呈现增大趋势,采用幂函数对剪切波速与有效应力、围压的拟合效果较好,即剪切波速随着有效应力、围压的增大呈现幂函数增大趋势;相比之下,随着饱和红黏土孔隙比增大,剪切波速总体呈现逐渐减小的趋势。

(2)根据4种拟合方法得到红黏土剪切模量与有效应力关系的相关性,其中以幂函数拟合精度最高;采用幂函数关系构建以孔隙比、有效应力为变量的剪切波速评价模型,为饱和红黏土有效应力的评价提供参考指标。

(3)通过实测数据对红黏土剪切波速模型进行曲面拟合的决定系数为0.911,从而得到饱和红黏土剪切波速评价模型系数,实测值与计算值相对误差较小,两者对比分析验证了模型的可行性。该模型建立了饱和红黏土剪切波速与其物理力学参数之间的量化关系,剪切波速可间接反映红土型滑坡土体应力变化,对于红土型滑坡的监测预警深入研究提供理论依据。

(4)本文提出的红黏土剪切波速模型可用于红土型边坡物理力学指标评价,分析了剪切波速评价红黏土变形及滑坡监测预警可行性,但在采用诸如固结排水、 K_0 固结(K_0 为静止土压力系数)等试验方法分析土体剪切波速变化规律及剪切波速评价模型影响因素(如温度、埋深等)时还需要深入探讨。未来可采用面波仪或地震波孔压静力触探等方法辅助开展原位试验研究,以验证该模型的适用性。

参考文献(References):

- [1] 杨鑫,陈学军,宋宇,等.中国红黏土的成因及物理力学特征研究进展[J].河北地质大学学报,2022,45(4):1-5.(YANG Xin, CHEN Xue-jun, SONG Yu, *et al.* Research Progress on Genesis and Physical-mechanical Characteristics of Red Clay in China[J]. Journal of Hebei Geological University, 2022,45(4):1-5.(in Chinese))
- [2] 毕庆涛,姜国萍,丁树云.含水量对红粘土抗剪强度的影响[J].地球与环境,2005(增刊1):144-147.(BI Qing-tao, JIANG Guo-ping, DING Shu-yun. The Effect of Water Content on the Shear Strength of Red Clay[J]. Earth and Environment, 2005(Supp.1):144-147.(in Chinese))
- [3] MA S K, HUANG M S, HU P, *et al.* Soil-water Characteristics and Shear Strength in Constant Water Content Triaxial Tests on Yunnan Red Clay[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(5): 1412-1419.
- [4] CHEN K. Field Test Research on Red Clay Slope under Atmospheric Action[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6668979.
- [5] KITSUNEZAKI C. A New Method for Shear Wave Logging[J]. Geophysics, 1980, 45(10): 1489-1506.
- [6] 何先龙,赵立珍,余天莉.基于能量变化率法自动拾取场地剪切波速[J].岩土力学,2015,36(3):847-853.(HE Xian-long, ZHAO Li-zhen, SHE Tian-li. A New Method for Automatic Picking Shear Wave Velocity Based on Energy Gradient[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(3):847-853.(in Chinese))
- [7] VALSSON S M, DAHL M, HAUGEN E, *et al.* Estimating Shear Wave Velocity with the SCPTu and Bender Element[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2021,710(1):012017.
- [8] 董全杨,蔡袁强,徐长节,等.干砂饱和砂小应变剪切模量共振柱弯曲元对比试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(12):2283-2289.(DONG Quan-yang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, *et al.* Measurement of Small-strain Shear Modulus G_{max} of Dry and Saturated Sands by Bender Element and Resonant Column Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2283-2289.(in Chinese))
- [9] 袁振霞,付英杰,李新明,等.共振柱和弯曲元研究石灰固化粉土的小应变刚度特性[J].建筑科学,2020,36(7):99-105.(YUAN Zhen-xia, FU Ying-jie, LI Xin-ming, *et al.* Measurement of Small-strain Stiffness of Lime-treated Silt Using Resonant-column and Bender Elements[J]. Building Science, 2020,36(7):99-105.(in Chinese))
- [10] 张宇辉,张献民,程国勇.土石混合介质中石料间土压实度剪切波速评价研究[J].岩土工程学报,2011,33(6):909-915.(ZHANG Yu-hui, ZHANG Xian-min, CHENG Guo-yong. Evaluation of Compactness Degree of Interval Soil in Soil-stone Mixtures by Use of Shear-wave Velocity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 909-915.(in Chinese))
- [11] CHEN Y, IRFAN M, UCHIMURA T, *et al.* Retracted Article: Relationship between Water Content, Shear Deformation, and Elastic Wave Velocity through Unsaturated Soil Slope[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(8): 4107-4121.
- [12] 王平,王强,王峻,等.黄土场地剪切波速影响因素模糊灰关联分析研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):4299-4304.(WANG Ping, WANG Qiang, WANG Jun, *et al.* Research on Loess Site's Shear Wave Velocity Influencing Factor Based on Fuzzy-gray Relational Analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(Supp.2):4299-4304.(in Chinese))
- [13] 梁晓敏,杨朔成,顾晓强.砂土应力诱发弹性波速各向异性的试验研究[J].岩土力学,2023,44(11):3235-3240.(LIANG Xiao-min, YANG Shuo-cheng, GU Xiao-qiang. An Experimental Study on the Stress-induced Anisotropic Elastic Wave Velocities of Sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(11):3235-3240.(in Chinese))

- [14] AGHAEI H, PENKOV G M, SOLOMOICHENKO D A, *et al.* Density-dependent Relationship between Changes in Ultrasonic Wave Velocities, Effective Stress, and Petrophysical-elastic Properties of Sandstone [J]. *Ultrasonics*, 2023, 132: 106985.
- [15] 张涛, 刘松玉, 蔡国军. 橡胶-砂颗粒混合物压缩特性与胶结退化试验[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 21-30. (ZHANG Tao, LIU Song-yu, CAI Guo-jun. Experimental on Compression Characteristics and Bonding Degradation of Rubber-sand Mixtures [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(11): 21-30. (in Chinese))
- [16] 李天宁, 汪云龙, 张瑞滨. 砾性土剪切波速影响因素试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39(1): 166-171. (LI Tian-ning, WANG Yun-long, ZHANG Rui-bin. Experimental Study on Influencing Factors of Shear Wave Velocity of Gravelly Soil [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(1): 166-171. (in Chinese))
- [17] WHALLEY W R, JENKINS M, ATTENBOROUGH K. The Velocity of Shear Waves in Unsaturated Soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 125: 30-37.
- [18] 刘鑫, 杨峻, 张宁. 粉质砂土剪切波速测定的弯曲元试验[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(2): 279-284. (LIU Xin, YANG Jun, ZHANG Ning. Experimental Study on Shear Wave Velocity of Silty Sand Using Bender Element [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(2): 279-284. (in Chinese))
- [19] MAJDI A A, DABIRI R, GANJIAN N, *et al.* Evaluation of the Specimen Disturbance Effects in the Consolidation Test Using Shear Wave Velocity [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38: 1-17.
- [20] ROMANA-GIRALDO J, BRYSON L S. Geophysics-based Approach to Predict Triaxial Undrained and Drained Compressive Behavior in Soft Soils [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2023, 213: 105022.
- [21] KIM N, LEE J S, PARK G, *et al.* Evolution of Relative Density and Shear Wave Velocity in Non-compacted Embankment Layers: Geological Long-term Monitoring [J]. *Engineering Geology*, 2024, 340: 107674.
- [22] 余松, 吴建超, 蔡永建, 等. 湖北襄阳地区土体剪切波速与深度的相关性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2024, 44(6): 618-623, 629. (YU Song, WU Jian-chao, CAI Yong-jian, *et al.* Study on the Correlation between Shear Wave Velocity and Depth of Soil in Xiangyang Area, Hubei Province [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(6): 618-623, 629. (in Chinese))
- [23] YAMASHITA S, KAWAGUCHI T, NAKATA Y, *et al.* Interpretation of International Parallel Test on the Measurement of G_{max} Using Bender Elements [J]. *Soils and Foundations*, 2009, 49(4): 631-650.
- [24] 刘先峰, 马杰, 袁胜洋, 等. 干密度和含水率对压实红层泥岩路基填料强度特性的影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(10): 2910-2918. (LIU Xian-feng, MA Jie, YUAN Sheng-yang, *et al.* Study on the Influence of Dry Density and Moisture Content on the Strength Characteristics of Compacted Red Mudstone Subgrade Filler [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(10): 2910-2918. (in Chinese))
- [25] 王星华, 黄长溪, 隆威. 直接快剪条件下黏土抗剪强度影响因素探讨[J]. *铁道科学与工程学报*, 2012, 9(5): 46-49. (WANG Xing-hua, HUANG Chang-xi, LONG Wei. Discussion on Influencing Factors of Shear Strength of Clay under Direct Rapid Shear Condition [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2012, 9(5): 46-49. (in Chinese))
- [26] ZHANG Y, PU S, LI R Y M, *et al.* Microscopic and Mechanical Properties of Undisturbed and Remoulded Red Clay from Guiyang, China [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 18003.
- [27] 赵蕊, 李小林. 基于有效应力原理的红黏土孔隙水压力演化规律及破坏机理研究[J]. *土工基础*, 2022, 36(5): 771-774, 781. (ZHAO Rui, LI Xiao-lin. Study on Evolution Law and Failure Mechanism of Pore Water Pressure of Red Clay Based on Effective Stress Principle [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2022, 36(5): 771-774, 781. (in Chinese))
- [28] KUO Y S, CHONG K J, TSENG Y H, *et al.* Excess Pore Water Pressure Response of Soil Inside the Mini Bucket Embedded in Saturated Soil under Seismic Loading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 182: 108751.