A Study of Soil Shear Strength Sensing Based on Soil Shear Wave Velocity*

XU Xiajie, LI Qing*, LI Chaopeng, CHEN Cungui
(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: Soil shear strength is a crucial parameter for assessing the mechanical properties of soil, direct reflecting the shear deformation characteristics of soil under external forces and closely related to geological disasters such as landslides. Traditional methods for measuring soil shear strength involve the destruction of soil samples, making it challenging to achieve long-term field monitoring. Research indicates a close correlation between soil shear strength and shear wave velocity in soil, and shear wave velocity allows for continuous monitoring. A measurement device based on shear wave velocity sensing for soil shear strength is proposed, aiming to achieve long-term monitoring of soil shear strength. The device is composed of structures such as piezoelectric elements and a microcontroller hardware circuit. Experimental data obtained from soft clay in the Hangzhou region, under the same moisture content and different soil stress conditions, reveal the relationship between soil shear strength and shear wave velocity, with errors within an acceptable range. The feasibility of the device is demonstrated through experiments, providing an effective means for real-time monitoring of soil shear strength.

Key words: geological hazard monitoring; shear strength; shear wave velocity; piezo ceramic plate
EEACC: 7210A **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.025

基于土剪切波速感知土抗剪强度的研究*

徐夏捷, 李 青*, 李朝鹏, 陈存贵
(中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 土抗剪强度是评估土体力学性质的关键参数, 直接反映了土在外力作用下的剪切变形特性, 与滑坡等地质灾害的发生密切相关。传统的土抗剪强度测量方法需要破坏土样, 难以实现现场长期监测。研究表明, 土抗剪强度与土中剪切波速紧密相关, 而剪切波速可实现持续监测。为此, 提出了一种基于剪切波速感知土抗剪强度的测量装置, 旨在实现土抗剪强度的长期监测。该装置由压电片、单片机硬件电路等结构组成。通过对杭州地区软粘土的实验, 获得了在同一含水率、不同土应力条件下, 土抗剪强度与剪切波速的关系, 误差在可接受范围内。实验证明了该装置的可行性, 为土壤抗剪强度的实时监测提供了一种有效手段。

关键词: 地质灾害监测; 抗剪强度; 剪切波速; 压电片
中图分类号: TU411.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2017-08

抗剪强度是土的主要力学性质之一[1], 描述了土抵抗剪切破坏的能力, 广泛应用于岩土工程、建筑施工以及滑坡灾害等相关领域中。目前成熟的土抗剪强度测量手段有直接剪切试验、三轴试验、无侧限压缩试验、十字板剪切试验等。然而这些方法均需要对土体造成不可逆的剪切破坏, 导致对无法实现对土抗剪强度的长期持续监测。

还有许多学者通过试验和数值模拟等方法, 对土体中剪切波速与土抗剪强度之间的联系进行了深入研究[2-9]。这些研究为土木工程设计和地震工程等领域提供了对土体的观测手段。若能实现对土剪切波速的持续测量, 则有望实现对土抗剪强度的持续监测, 将为滑坡、泥石流灾害预警提供重要依据。

使用压电片可以实现对土剪切波速的持续测量。在过去的十几年中, 使用压电片研究土力学特性的方法逐渐兴起。压电片是一种特殊的材料, 它可以通过应力应变作用产生晶体内部的极化现象(即压电效应), 或者在晶体处于电场作用下发生应变(逆压电效应)。已经有许多研究证明了压电片在测量土剪切波速方面的可靠性[10-13], 并常被用于研究土的剪切模量[14-16]。但是这些使用压电片的研究, 其设备集成度和自动化程度普遍不高。

目前利用单片机和压电片来完成剪切波速测量, 并研究土抗剪强度的研究相对较少[17-18]。单片

项目来源: 国家重点研发计划课题(2022YFC3003403); 浙江省重点研发计划项目(2021C03016)
收稿日期: 2023-08-23 **修改日期**: 2024-01-09

机技术具有实时性强、响应速度快、成本低廉等优势,能够快速完成对剪切波速的分析和计算。通过结合单片机技术的土剪切波速测量,可以更加高效地研究土的抗剪强度特性。

本文通过使用压电片和单片机技术制作了能够快速测量土剪切波速的装置,并尝试基于剪切波速感知土抗剪强度。

1 土剪切波速与土抗剪强度的关联性研究

土剪切波速与抗剪强度之间的关系的研究并非一蹴而就,是基于长期理论发展和实际工程应用得到的。

许多人注意到剪切波速与一些土力学参数的关系,但是并未将波速与土抗剪强度直接挂钩。早在1900 年之前就有地震学家开始测量岩石中的波速度,1925 年就已经有人正式将波速用于石油勘探中。1960 年,Richart 就指出弹性波在土中传播在土木工程领域中有重要作用。

1963 年,Hardin 等[19]通过试验,研究了不同的土应力、含水率、孔隙率、土颗粒特性条件下,不同砂土土样的横波和纵波波速的变化,通过二次拟合,发现剪切波速与土应力之间有如下形式的关系:

$$\boldsymbol{V}_S = C_1(C_2 - e)\boldsymbol{\sigma}^{C_3} \tag{1}$$

V_S 为剪切波在土中的传播速度,$\boldsymbol{\sigma}$ 为土应力,e 为孔隙比,C_1、C_2 和 C_3 为通过试验数据拟合得到的系数。改写此式用剪切波速表示土应力,并代入库仑公式(式(2))并进行整理,可得到抗剪强度和剪切波速之间的关系:

$$\boldsymbol{\tau}_f = \boldsymbol{c} + \boldsymbol{\sigma} \times \tan\varphi \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\tau}_f = \boldsymbol{c} + P \times \tan\varphi \times \boldsymbol{V}_S^{\,1/C_4} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{\tau}_f$ 为土抗剪强度,$\boldsymbol{c}$ 为内粘聚力,φ 为内摩擦角,系数 $P = (C_1C_2 - C_1e)^{-1/C_3}$。通过试验数据拟合得到的 C_4 的取值范围在 0.2 到 0.3 之间。

夏唐代等[20]受前人启发,先从土应力-应变关系曲线推导出了剪切模量与轴向应力的关系:

$$G = \frac{\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{CZ}}}{2(1+\mu)\varepsilon'} \tag{4}$$

式中:G 为剪切模量,通常通过 $G = \rho \boldsymbol{V}_S^2$ 来计算,ρ 为材料的密度,$\boldsymbol{V}_S$ 为剪切波速。$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{CZ}}$为土的自重应力,$\mu$ 为土的泊松比,ε'为通过试验拟合得到的参数。

依据莫尔-库仑理论的破坏准则,当土体单元达到极限平衡状态的条件时,最大、最小主应力 $\boldsymbol{\sigma}_1'$、$\boldsymbol{\sigma}_3'$有如下关系:

$$\boldsymbol{\sigma}_3' = \boldsymbol{\sigma}_1' \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{4}\right) - 2c' \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{4}\right) \tag{5}$$

式中:φ'为有效内摩擦角,c'为有效粘聚力。

假设土单元不受到剪应力的作用,则通过有限元分析土体单元的有效法向应力可以表示为:

$$\boldsymbol{\sigma}' = \frac{(\boldsymbol{\sigma}_1' + \boldsymbol{\sigma}_3')}{2} + \frac{(\boldsymbol{\sigma}_1' - \boldsymbol{\sigma}_3')}{2}\cos 2\alpha \tag{6}$$

式中:$\alpha = (\pi/4 + \varphi'/2)$ 为剪切破坏面与最大主应力的夹角。将库仑公式(2)改写为有效应力的形式,再把式中的土自重应力替换为土的总有效应力,然后将式(4)、式(5)、式(6)代入其中,并用剪切波速和密度表示剪切模量,则最终可以得到下式:

$$\boldsymbol{\tau}_f = Ac' + B\rho\boldsymbol{V}_S^2 \tag{7}$$

系数 $A = 1 - \tan(\pi/4 - \varphi'/2)\tan\varphi'(1 + \sin\varphi')$,系数 $B = 2(1+\mu)\varepsilon'(1 - \sin\varphi')\tan\varphi'$。从此式中可以看出,土抗剪强度和剪切波速的平方成正比。

在 Hardin 之后,陆续有人注意到了土剪切波速和土抗剪强度具有良好的相关性,并用试验数据进行拟合。比如 2010 年 Kulkarni 等[9]对印度沿海土壤进行试验,得到了关系式(8),R^2 为 0.82。2020 年,黄雅虹等[6]研究了渤海海域黏性土,得到了关系式(9),R^2 为 0.831。

$$\boldsymbol{\tau}_f = 5 \times 10^{-4}\boldsymbol{V}_S^{2.5} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{V}_S = 53.751\boldsymbol{\tau}_f^{0.376} \tag{9}$$

对比这些土剪切波速-土抗剪强度公式,可以发现抗剪强度都是表达为剪切波速的幂函数。这些公式形式相近,参数差别较大原因有两个方面。一是因为试验条件各不相同;二是土作为多孔碎散颗粒材料,表现出来的力学性质并不单一。同时夏唐代等理论推导的式(7)中引入了土密度,也会随着试验条件变化,使得其理论推导出的公式相比其他研究,剪切波速的指数幂较小。

2 土剪切波发生与波速测量装置研制

本研究设计的装置总体包括单片机、激励信号放大电路、接收信号处理电路、信号调理电路和压电片。用电信号激励发射端压电片,使其振动;接收端压电片接收到通过土传播的剪切波后产生电信号。将发射端的激励信号和接收端的信号进行比较可得到剪切波的传播时间从而算得剪切波速,最后通过串口或无线通信将计算得到的结果传送给上位机。

2.1 土剪切波速的测量原理

压电片是一种能够实现机械信号和电信号互相转换的压电传感器。本装置采用两片压电片,一片作为发出端,通过设计相应的电路产生信号来激励其振动。另一片压电片作为接收端,将接收的振动转化为电信号传送给电路。电路比较两路正弦波的

相位差,即剪切波传播的时间 t,再结合压电片之间已知的距离 L,可通过式(10)算出剪切波的传播速度 V_S。测量原理如图 1 所示。

$$V_S = L/t \tag{10}$$

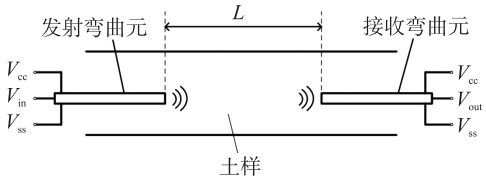


图 1　剪切波速测量原理示意图

2.2　硬件电路设计

剪切波速测量装置的硬件电路主要包括激励信号放大电路、接收信号处理电路以及信号调理电路。在装置运行时,首先,由 STM32F103RCT6 单片机的数字模拟转换器(DAC)生成正弦波。该正弦波通过交流信号放大电路后形成发射端信号,用于激励发射端的压电片并为后续比较提供输入。接收端的压电片接收振动后产生电信号,随后通过电荷放大电路和带通滤波电路以及交流放大电路进行放大和滤波和二次放大。接下来,发射端和接收端的信号分别经过信号调理电路,将两路正弦波信号转换为幅值在 0 到 3.3 V 之间的方波信号。最后,通过单片机的定时器边沿捕获功能,测量发射端信号的上升沿和接收端信号的下降沿之间的时间间隔,从而获取剪切波的传播时间。硬件总体框图见图 2。电路的实物实现如图 3 所示。

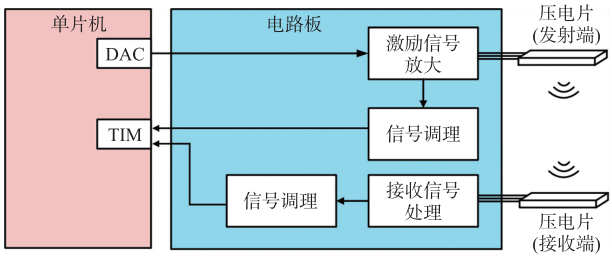


图 2　硬件框图

2.2.1　激励信号放大电路

考虑到单片机的 DAC 发出正弦波的幅值相对较小,如果直接用于激励压电片,将导致剪切波振幅过小,从而降低接收信号的信噪比。同时,为了避免信号中的直流分量被放大,从而影响后续波形调理电路和压电片的正常工作,只对交流分量进行放大。所使用的激励信号放大电路如图 4 所示。

2.2.2　接收信号处理电路

接收信号处理电路包含了电荷放大、带通滤波、交流放大三个环节,其中电荷放大为其核心环节。由于压电片产生的电荷完全由压电效应产生,电荷量小,且内阻极大,一般采用电荷放大电路进行处理。电荷放大电路常用于对电容性传感器的微小信号的放大,并提升带载能力,方便后续信号处理。电荷放大器要求运算放大器具有较大的开环增益、输入电阻,较小的偏置电流、失调电压。根据以上要求,选用了 OPA129。使用的电路如图 5 所示。

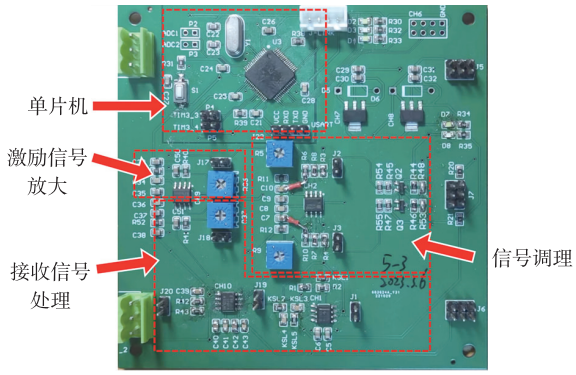


图 3　电路板实物

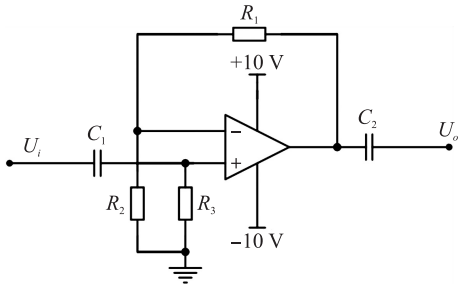


图 4　激励信号放大电路

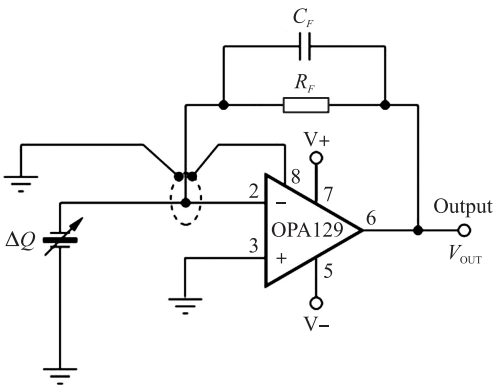


图 5　电荷放大电路

2.2.4　信号调理电路

为了便于后续单片机测量剪切波传播时间,必须将输入和输出的两路压电片信号调整为幅值低于 3.3 V 的方波信号。如果直接使用过零比较器,当信号电压接近 0 电位时,微弱的抖动可能导致输出信号的剧烈变化。为了提高抗干扰性,采用了 LM393 构建滞回比较器,将正弦波转换为±10 V 的方波信号。输出的两路方波通过 N 型 MOS 管将电压降至 3.3 V 左右,最终得到两路存在相位差的方波信号。

所使用的电路如图 6 所示。

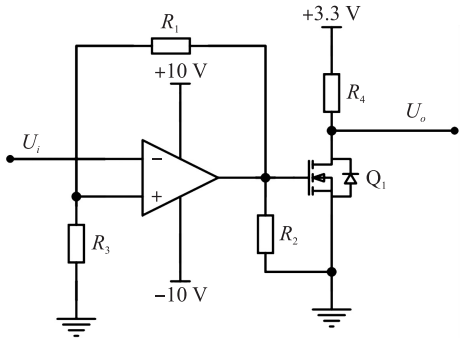


图 6 信号调理电路

最后通过 STM32 定时器的边沿捕获功能测量两路方波信号的相位差。将发射端的信号连接定时器的通道 1 引脚,接收端的信号连接定时器的通道 2 引脚,并将定时器设置为上升沿触发。当发射端信号的上升沿到达时,触发中断清零定时器的计数值;当接收端信号的上升沿到达时,读取当前定时器的计数值,计数值乘以定时器的计数周期就可以准确计算出知两路信号的相位差也就是传播时间 t。电路部分整体的波形转换和传播时间确定方法如图 7 所示。装置测出剪切波速后,针对试验土样可以利用下文推导的拟合模型 $\tau_f = 0.014\ 65(V_S - 85)^{2.696}$ 得到土抗剪强度。详细的推导过程见第 3 节。

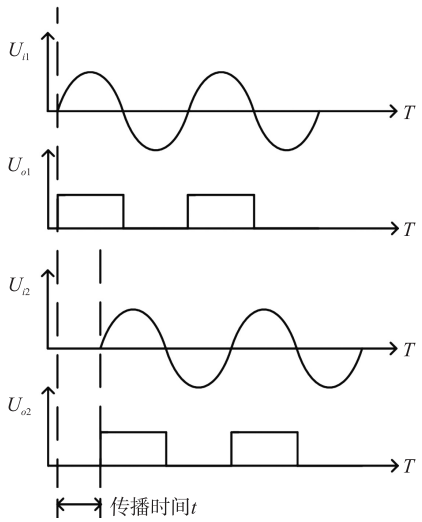


图 7 波形转换示意图

2.3 传播时间初值的确定

装置测量到的传播时间实际上包含了压电片响应时间、电信号经过滤波等环节所造成的延时,因此必然会存在传播时间初值,需要通过试验来确定传播时间初值,以获取准确的剪切波传播时间。阅读文献并归纳,大致有以下四种测定传播时间初值的方法:①在共振柱试验仪上加装压电片,用两种方法测量同一土样,对比得到的结果,以此测量偏差时间[15]。②将压电片贴在有机玻璃柱的两端,已知有机玻璃的尺寸和在某温度下的纵波传播速度,以此来测量[21-22]。③试验前通过测试压电片之间自由端与端接触时的反应时间来大致确定[23]。④利用在其他条件不变的情况下,纵波在水中的传播速度不会变的特性,来测量传播时间初值。

第一种方法需要购买或改造共振柱试验仪,成本高昂。第二种和第三种方法经过试验发现,测试结果与物体之间接触紧密程度有关。第四种方法搭建试验平台相比方法一简单,在测量原理上相比方法二、三可靠,故选用方法四进行偏差值的测量。

试验使用纯净水,在室温 25 ℃下进行试验,两压电片之间相隔 10 cm,进行十次测量,去除最大值和最小值并取平均,测得传播时间为 116 μs,而通过计算传播时间应为 67 μs,故测得传播时间初值为 49 μs。

3 剪切波速-抗剪强度测量试验及测量模型的导出

3.1 试验平台

为了深入研究土剪切波速与土抗剪强度之间的关系,需要搭建一个试验平台,该平台能够通过改变土应力的方式来改变土样的抗剪强度,且能对同一土体进行剪切波速和土抗剪强度的测量,以便获取必要的数据并建立剪切波速-土壤抗剪强度的关联模型。此外,该平台还可用于后续的土抗剪强度测量装置的性能测试和评价。试验平台的结构如图 8、图 9 所示。

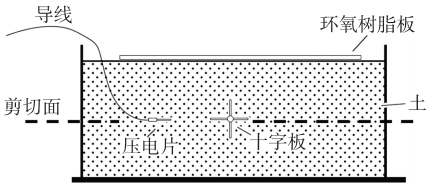


图 8 试验平台侧视图

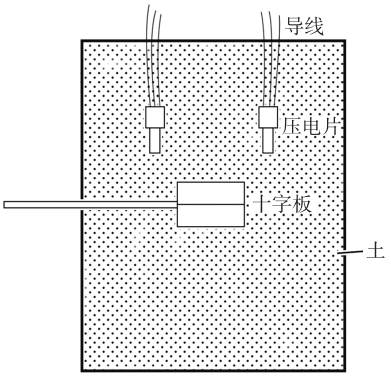


图 9 试验平台俯视图

试验平台选用十字板作为土抗剪强度的测量工具。相比使用直剪仪和三轴仪,使用十字板不需要

对测量工具本身进行改造,操作方便,而且从侧面插入土样进行测量,每次测量之后,土样会受应力作用重新紧贴十字板重新固结,一个土样就可以进行多组试验。另外,十字板是原位土抗剪强度测量的手段,与本装置进行无损原位土抗剪强度监测的目的契合。使用的十字板如图 10 所示,最终搭建的试验平台实物如图 11 所示。

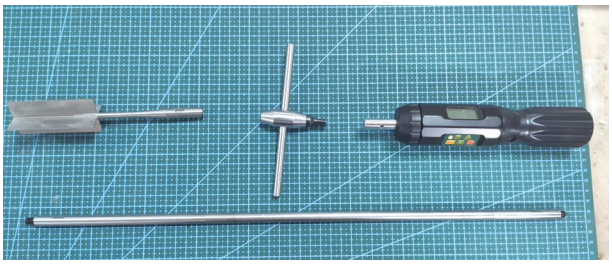


图 10　十字板

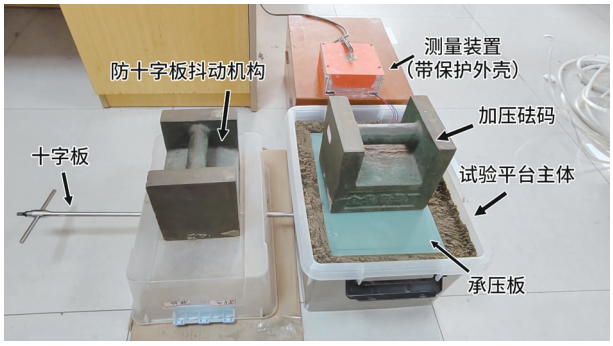


图 11　试验平台实物图

一般情况下,十字板都是竖向安装使用,而试验平台由于土体上方被重物遮挡,只能横向安装使用。十字板横向安装测量与竖向安装测量在土中的受力情况有一些区别,从扭矩到抗剪强度的换算公式并不一致,需要重新计算,这将在下一小节进行详细分析。

3.2　十字剪板侧装测量受力情况分析

在试验过程中,由于需要放置承压板和砝码于土体竖直方向上,无法在距剪切波速测量装置较近的位置竖直安装十字板进行测量。因此,只能在水平方向上横向安装十字板来进行测量。当将土样视作各向同性,则两种使用方法得到的扭矩-抗剪强度换算公式相同;若视作各向异性,则换算公式会有差别,为了研究横向安装十字板对测量的影响,这里视土样为各向异性进行分析。为便于分析,本文假设十字板旋转剪切产生的剪切破坏面为一个理想圆柱体减去一个小圆(由十字板的连接扭杆导致),如图 12 所示。

记这个小圆的半径为 R',圆柱体底面半径与十字板扇叶宽度相同,记为 R,圆柱体的高与扇叶长度

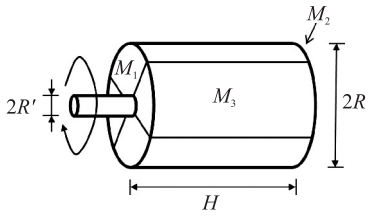


图 12　横向安装十字板破坏面示意图

相同,记为 H,τ_f 为土抗剪强度,M_{max} 为最大扭矩。最大扭矩实际上是由圆柱上下底面和侧面三个面的抗剪强度对圆心所产生的抗扭力矩所组成的。记三个面的扭矩分别为 $\boldsymbol{M}_1$、$\boldsymbol{M}_2$、$\boldsymbol{M}_3$。

由于土体自重的影响,下层土体受到的土应力比上层大,根据库仑公式(式(2))可知,下层土的抗剪强度会大于上层。

为了便于分析,假定土体均匀,受到土自重应力的影响,土的抗剪强度随深度线性变化,且相同深度土体各向的抗剪强度相等。可表达为式(11):

$$\tau_f=\tau_0+kh \tag{11}$$

$$k=\rho g\tan\varphi \tag{12}$$

式中:τ_0为规定的基准面的抗剪强度(即圆柱形破坏面深度最浅位置),k 为深度-抗剪强度转换系数,可由式(12)计算,h 为基准面以下的深度,基准面的深度为 0。将式(11)中的 τ_0 改写为 τ_1,则三个面上的力矩数学表达式为:

$$\boldsymbol{M}_1=2\int_0^{\pi}\int_{R'}^{R}[\tau_1+k(H-r\cos\alpha)]r^2\mathrm{d}r\mathrm{d}\alpha \tag{13}$$

$$\boldsymbol{M}_2=2\int_0^{\pi}\int_0^{R}[\tau_1+k(H-r\cos\alpha)]r^2\mathrm{d}r\mathrm{d}\alpha \tag{14}$$

$$\boldsymbol{M}_3=2\int_0^{\pi}[\tau_1+kR(1-\cos\alpha)]R^2H\mathrm{d}\alpha \tag{15}$$

对计算结果进行整理,可得到:

$$\tau_1=\frac{\boldsymbol{M}_{max}}{\left(\frac{4}{3}\pi R^3-\frac{2}{3}\pi R'^3+2\pi R^2H\right)}-kR \tag{16}$$

十字板的尺寸为 $R=1.905\times10^{-2}$ m,$H=7.62\times10^{-2}$ m,$R'=3\times10^{-3}$ m。将尺寸参数代入,可得到如下的换算公式:

$$\tau_1=4.936\times10^3\times\boldsymbol{M}_{max}-0.019\ 05k \tag{17}$$

而十字板厂家提供的,正常竖向安装十字板时的换算公式为:

$$\tau_2=4.936\times10^3\times\boldsymbol{M}_{max} \tag{18}$$

式中:抗剪强度的单位为 kPa,最大扭矩的单位是 kN·m,k 的单位是 kPa/m。对比式(17)和式(18)可以发现前者仅多了一个与 k 有关的项。后续代入试验数据发现,两式算得结果差别不大,将在 3.4 小节详细说明。

3.3 试验过程与分析

依据《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019，进行土的力学试验前需要对土样进行 2 mm 筛分。为避免上一次试验的固结对下一次试验的影响，在试验前需要将土样捣松。试验所使用土样的含水率为 10.1%，其内摩擦角为 31.6°。在承压板上放置重物时，必须确保承压板在水平各个方向上的倾角不超过 1°，并在放置重物后静置三分钟，以使土样达到稳定的固结状态。接下来，首先使用本文提出的装置测量剪切波速，然后使用十字板测量土样的抗剪强度。

试验过程中，需要在承压板上依次放置总共 20 kg、40 kg、60 kg、80 kg、100 kg、120 kg、145 kg 的重物，并重复进行上述操作。在试验结束后，需要确认压电片是否损坏，若损坏则将该次试验视为无效。

在上述试验后，反复多次测量各个应力条件下的土样密度，用于通过式(17)来计算土抗剪强度。

3.4 试验数据预处理

理论上，每种实验方法的一系列实验结果在其正常的误差范围内，总体上应该有较好的一致性，但任何实验数据都难免出现一些明显偏离正常群体量值区间的粗差点。而且土体是由各种大小不同的土颗粒组成的，无法像铁、塑料这些固体表现出单一而稳定的力学性质。因此本文需要先剔除数据的粗差点。本文依据以下基本规律和经验常识，判断数值明显过高或者过低的粗差点。①在同一土应力条件下，土的密度、剪切波速和抗剪强度应大致接近。②随着土应力增加，土密度、剪切波速、抗剪强度总体上应相应增大。

对各个应力条件下的土样密度进行了 6 次测量，得到了 42 个数据，如图 13 所示。对各个应力下土密度去除最大值和最小值后求平均，得到了含水率为 10.1%的各个土应力条件下土样的参考密度，如表 1 所示，便可以通过式(17)计算得到各向异性条件下的抗剪强度。

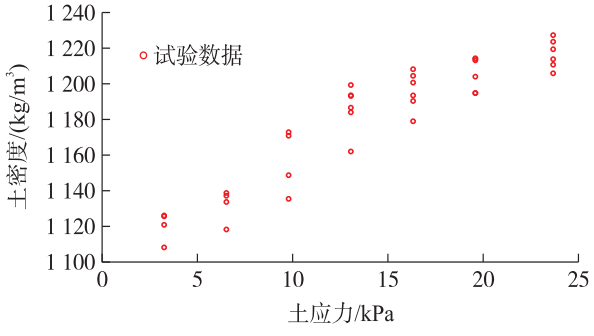


图 13 各土应力下土密度

表 1 参考土密度

土应力/kPa	参考土密度/(kg/m³)
3.267	1 123
6.533	1 135
9.800	1 160
13.067	1 190
16.333	1 198
19.600	1 207
23.683	1 217

土剪切波速-抗剪强度试验总共获取了 94 个数据，将十字板测得的扭矩分别通过式(17)、式(18)计算得到两组抗剪强度数据。这里记通过式(17)计算得到的土剪切波速-抗剪强度数据为第一组数据，记通过式(18)得到的数据为第二组数。

得到的两组数据如图 14 所示，两种计算方法得到的数据总体相差不大。因此在本试验中，可以将十字板周围的土视作各向同性，因此下文仅对第二组数据进行分析。依据之前的原则，对数据剔除了 7 个粗差点，所占比例为 7.4%。剔除的粗差点如图 15 所示。

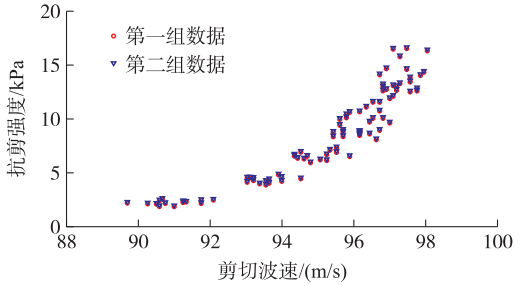


图 14 分别用式(17)、式(18)得到的两组数据

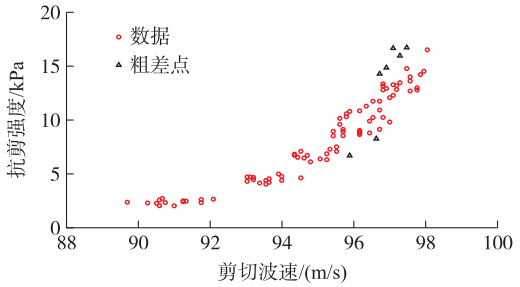


图 15 波速-抗剪强度数据

观察剪切波速的变化范围，可以发现试验得到的剪切波速分布在 85 m/s~100 m/s 之间。为了减少公式拟合的计算量，将数据整体左移，即将所有数据点的剪切波速减去一个偏移值，得到偏移剪切波速 V_S'。最终在后续公式拟合中，确定将剪切波速的数据整体减去 85 m/s。

3.5 土剪切波速与抗剪强度的拟合关系

将得到的数据用一次拟合、二次拟合、幂函数拟

合得到拟合公式,可以观察到数据点离拟合曲线越近,分布越密集,这表明数据在拟合曲线附近大致呈正态分布。根据每种拟合方式的 R^2 来给数据赋予权重。权重 w 计算方法如下,n 取 1 到 3:

$$w_n = R_n^2/(R_1^2+R_2^2+R_3^2) \tag{19}$$

对每种拟合方法,分别使用 3σ 法则找到误差过大数据后,对误差点剔除相应的权重,再进行加权拟合最终得到新的拟合公式,拟合曲线如图 16 所示,三种拟合方法的拟合情况如表 2 所示。

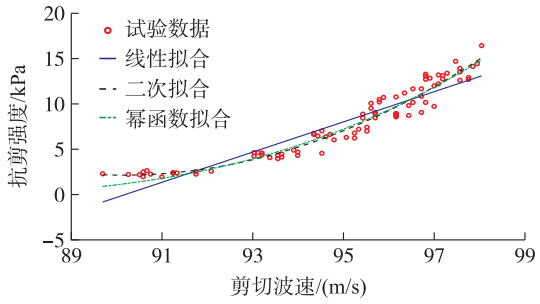


图 16　波速-抗剪强度拟合曲线

表 2　三种拟合方法的拟合情况

拟合方法	SSE	R^2	RMSE	满程误差/%
一次拟合	125.00	0.896 2	1.213 0	20.27
二次拟合	48.44	0.959 8	0.759 4	13.09
幂函数拟合	55.14	0.954 2	0.805 4	12.78

得到的三个拟合公式分别为:

$$\tau_{f1} = 1.666V'_S - 8.592 \tag{20}$$

$$\tau_{f2} = 0.206\ 5V'^2_S - 2.116V'_S + 7.603 \tag{21}$$

$$\tau_{f3} = 0.014\ 65V'^{2.696}_S \tag{22}$$

式中:V'_S是偏移剪切波速,单位是 m/s,τ_f 是抗剪强度,单位是 kPa。可以发现从统计学参数上来看,二次拟合的拟合程度最好,其次是幂函数拟合,一次拟合效果最差,这在一定程度上应证了夏唐代教授的理论。然而,幂函数拟合却表现出最小的满程误差。基于在拟合情况差异不大,优先选参数较少且形式简单的函数的原则,可以选择式(22)作为实际场合中,用于剪切波速测量土抗剪强度的公式。代入剪切波速的偏移值,最终确定剪切波速-土抗剪强度的最佳公式(式(23))。将此模型输入到装置的单片机中,就可以实现对土抗剪强度的持续监测。

$$\tau_f = 0.014\ 65(V_S - 85)^{2.696} \tag{23}$$

4　结论

本文针对目前缺乏持续监测土抗剪强度手段的现状,以单片机和压电片为核心开发了一种基于土剪切波速感知土抗剪强度的装置。借助该装置和十字剪切板,进行了土剪切波速-土抗剪强度试验,研究了同一含水率、一定应力范围下,剪切波速与抗剪强度的关系。尽管试验数据存在一定的分散性,但通过数据预处理和加权拟合的方法,得到了较为令人满意的拟合公式,误差控制在可接受的范围内。试验数据的分散性和误差源于测量工具本身的一定误差,以及土作为碎散颗粒材料,其力学性质在较大范围内波动这两个原因。本文得出的公式显示,剪切波速的指数幂高于夏唐代的理论推导。这一现象归因于土体应力增加所导致的土壤密度提升,从而使得土抗剪强度曲线上升速率更为显著。借助本文提出的装置和拟合公式,能够有效监测特定条件下土的抗剪强度,为土力学领域的持续监测提供了新的解决方案。

参考文献:

[1] 李广信. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013:169.

[2] Moon S W,Ku T. Undrained Shear Strength in Cohesive Soils Estimated by Directional Modes of in-situ Shear Wave Velocity[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2018,36(5):2851-2868.

[3] Long M,D'Ignazio M. Shear Wave Velocity as a Tool for Characterising Undrained Shear Strength of Nordic Clays[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2021,710(1):012008.

[4] L'Heureux J S,Long M. Relationship between Shear-Wave Velocity and Geotechnical Parameters for Norwegian Clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2017,143(6):04017013.

[5] Oh T M,Bang E S,Cho G C,et al. Estimation of Undrained Shear Strength for Saturated Clay Using Shear Wave Velocity[J]. Marine Georesources & Geotechnology,2017,35(2):236-244.

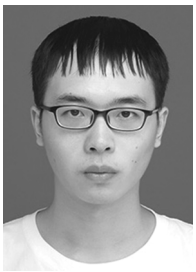
[6] 黄雅虹,吕悦军,彭艳菊. 渤海海域黏性土剪切波速与抗剪强度统计关系的初步研究[J]. 中国地震,2020,36(3):527-538.

[7] Trafford A,Long M. Relationship between Shear-Wave Velocity and Undrained Shear Strength of Peat[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2020,146(7):04020057.

[8] Alshameri B. Prediction the Shear Strength and Shear Modulus of Sand-Clay Mixture Using Bender Element[J]. Journal of Applied Engineering Science,2022,20(1):168-176.

[9] Kulkarni M P,Patel A,Singh D N. Application of Shear Wave Velocity for Characterizing Clays from Coastal Regions[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2010,14(3):307-321.

[10] Lee J S, Santamarina J C. Bender Elements: Performance and Signal Interpretation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(9): 1063-1070.
[11] 李青. 侧装式弯曲元测量软黏土剪切波速的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 413-416.
[12] Gao Y, Zheng X, Wang H, et al. Effect of Wave Attenuation on Shear Wave Velocity Determination Using Bender Element Tests[J]. Sensors, 2022, 22(3): 1263.
[13] 柳鸿博, 周凤玺. 非饱和土中剪切 S 波的传播特性分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(4): 960-966.
[14] 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.
[15] 黄博, 殷建华, 陈云敏, 等. 压电陶瓷弯曲元法测试土样弹性剪切模量[J]. 振动工程学报, 2001, 14(2): 35-40.
[16] 尹思琪. 冻融作用下路基土剪切波速特征及动态回弹模量预估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
[17] 胡鹏. 基于剪切波波速与含水率的抗剪强度测量方法的研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015.
[18] 陈森. 基于压电效应的原位土体抗剪强度测量装置研制[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
[19] Hardin B O, Richart Jr F E. Elastic Wave Velocities in Granular Soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 33-65.
[20] 夏唐代, 颜可珍, 石中明, 等. 地基剪切波速与抗剪强度的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4435-4437.
[21] 窦帅. 基于侧装式弯曲元法的正融土剪切模量特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
[22] 王崧美, 李海鹏, 窦帅, 等. 侧装式弯曲元高压冻融试验装置研制与初步应用[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 717-725.
[23] 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.



徐夏捷(1999—), 男, 中国计量大学在读硕士研究生, 主要科研方向为土剪切波速和抗剪强度的关系, xvxiajie1999@163.com;

李 青(1955—), 男, 通讯作者, 中国计量大学二级教授、博士生导师, 主要科研方向为动态测量与控制、传感技术, lq13306532957@163.com。