

DOI: 10.11779/CJGE20240283

# 黄土孔内原位各向异性变形探测系统研制与测试

晏长根<sup>1,2</sup>, 王逸凡<sup>1</sup>, 兰恒星<sup>3,4</sup>, 杨明宇<sup>1</sup>, 董忠红<sup>5</sup>, 雷文斌<sup>5</sup>, 张宏兵<sup>5</sup>, 李森<sup>5</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学西安市绿色智慧交通岩土工程重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064;  
5. 长安大学工程机械学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为了解决传统原位土体变形测试忽略土体各向异性, 加载测试方向单一等问题, 提出黄土孔内各向异性变形原位测试系统的设计构想, 整个测试系统由支撑系统、切削系统和探测系统组成, 类似于孔内各向异性原位水平载荷试验, 成功研制出样机。本样机可实现在钻孔内任意深度处固定, 由切削系统切削出平面, 再由阵列式挤压板进行孔内挤压, 并通过数据采集器记录压力和位移数据, 得到应力-位移关系曲线。基于现场试验测试, 检验了本测试系统的可靠性。测试结果表明, 随着测试深度的变化, 变形模量与含水率之间呈负相关关系, 而与土的黏聚力和峰值锥尖阻力呈正相关关系, 黄土的各向异性与土体含水率和峰值锥尖阻力相关。在一定范围内, 含水率的增加会降低同一深度不同方向黄土的变形模量差; 而随着峰值锥尖阻力的增大, 不同方向黄土的变形模量差也随之增大。验证了本测试系统结果具有较好的可信度。

**关键词:** 原位测试技术; 各向异性变形测试; 变形参数; 黄土

**中图分类号:** TU411      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2025)08-1721-10

**作者简介:** 晏长根(1975—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事岩土与地下工程等方面的研究工作。E-mail: yanchanggen@163.com。

## Development and application of in-situ testing system for anisotropic deformation in loess pores

YAN Changgen<sup>1,2</sup>, WANG Yifan<sup>1</sup>, LAN Hengxing<sup>3,4</sup>, YANG Mingyu<sup>1</sup>, DONG Zhonghong<sup>5</sup>, LEI Wenbin<sup>5</sup>,  
ZHANG Hongbing<sup>5</sup>, LI Sen<sup>5</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Green and Intelligent Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;  
4. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 5. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of ignoring anisotropy of soils and single loading direction in the traditional in-situ soil deformation testing, a design concept of anisotropic deformation in-situ testing system for loess is proposed. The entire testing system consists of support system, cutting system and detection system, similar to the in-situ anisotropic horizontal load tests in boreholes. A prototype is successfully developed. The prototype can be fixed at any depth in the borehole by the support system, a plane can be cut out by the cutting system, and the borehole can be squeezed by the array of squeezing plates, and the pressure and displacement data can be recorded by the data acquisition devices, thus obtaining the stress-displacement relationship curve. The reliability of the testing system is verified based on the field tests. The test results show that the modulus of deformation varies inversely with the water content and positively with the soil cohesion and peak cone resistance, indicating that the anisotropy of loess is related to the water content and peak cone resistance of the soils. Within a certain range, the difference in the deformation modulus between the soils at the same depth in different directions decreases with the increase of the water

**基金项目:** 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(41927806); 国家自然科学基金项目(42077265) This work was supported by the National Major Scientific Research Instrument Development Project of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41927806), and the National Natural Science Foundation of China Project (Grant No. 42077265).

**收稿日期(Received):** 2024-03-29    **修回日期(Revised):** 2024-08-27    **接受日期(Accepted):** 2024-09-29    **网络出版日期(Online):** 2024-09-30

content. With the increase of the peak cone resistance, the difference in the deformation modulus between the soils at the same depth in different directions also increases. The reliability of the test results obtained by the testing system is thus verified.

**Key words:** in-situ testing technology; anisotropic deformation testing; deformation parameter; loess

## 0 引言

黄土在中国分布广泛，随着国家西部大开发战略的实施，黄土地区工程项目方兴未艾，形成了大量超高的黄土挖方边坡<sup>[1]</sup>。黄土本身具有脆弱的结构性和极强的水敏性，而这些重大黄土工程的开展严重扰动着黄土，势必会诱发和激增一批新的工程灾变问题<sup>[2]</sup>，形成的挖方边坡中接触层面种类多样、状态多变易滑。因此精准捕捉黄土边坡在人类工程扰动作用下变形劣化过程，对揭示黄土边坡滑移灾变机制意义重大<sup>[3]</sup>。

一直以来，室内的或原位的试验方法是研究土体变形特性的重要手段<sup>[4-6]</sup>。室内试验能够很好地控制应力-应变条件、排水条件等，试验精度高，再现性强。但是，室内试验试样尺寸小，脱离现场环境，原状土样的应力环境和原始结构都受到扰动，难以反映原位土体复杂的工程性质<sup>[7-9]</sup>。沈珠江<sup>[10]</sup>指出原位试验是获得可靠土质参数的唯一途径。在研究土体变形特性的原位试验中，代表性的有承压板法变形试验、旁压试验，可以直接在原始应力环境中进行试验。承压板法变形试验操作简便，可以直接测得土体的变形参数，但只能对浅层或表层土体进行，而且加载方向单一，难以模拟土壤在实际工程中受到多轴应力时的变形情况。旁压试验主要依靠旁压仪完成现场原位测试，旁压试验成本低，适应性广，可以在大多数土层中和不同深度处进行试验，但是传统旁压仪的测量腔过短而产生的端部效应<sup>[11]</sup>，使测量所得到的数据与土体变形的真实值之间有较大误差，学者们进一步研发出了三腔旁压仪。但是三腔旁压仪的应用需要在试验现场预先钻孔，孔壁土层中天然应力被解除，导致所求各项强度指标失真。并且旁压实验的机理是把孔壁土体看成均质各向同性，利用线弹性理论进行分析，忽略了土体的各向异性，而土体的各向异性变形特征对边坡稳定性计算影响较大<sup>[12-13]</sup>，Aghajani 等<sup>[14]</sup>研究指出，如果忽略土体的各向异性效应，则边坡安全性被高估 5%~25%，在评估黄土边坡稳定性时，考虑黄土边坡的各向异性及非均质性，已成为准确分析变形和破坏的关键<sup>[7]</sup>。显然，改进创新现有的原位测试方法，是解决上述瓶颈问题的有效手段，如何创新土体变形的原位测试技术是当前迫切需要解决的实际问题。为此，笔者研发了一款黄土孔内原位各向异性变形探测设备，为阐明“水-土-人多因素作用下复杂结构黄土边坡内部的变形变化规律、劣化过程及互馈致灾机理”

提供测试平台与技术支持。

本文首先分析了土体变形特性探测设备发展现状，以此为基础，进一步提出了阵列式各向异性变形原位测试系统，阐述了仪器的研制方案和关键技术，并进行了现场试验来检验设备工作性能，将现场试验结果与其他原位探测仪的结果进行对比，验证仪器测试结果的可靠性。

## 1 阵列式各向异性变形原位测试系统研制

### 1.1 总体构想

针对黄土各向异性变形特性进行研究，旨在弥补室内试验在模拟实际工程环境方面的不足，实现对黄土孔内各向异性变形特性的准确测定和分析，本文提出了阵列式各向异性变形原位测试系统的构想。阵列式各向异性变形原位测试系统的核心思想是基于极具代表性的旁压试验，整套测试系统由 3 个子系统组成，即支撑系统、切削系统和挤压系统。支撑系统与切削系统主要用于孔内支撑固定仪器并切削孔内壁面，挤压系统主要用于孔内挤压，获取测试数据。

研制系统预计能够应用于黄土边坡内部，并获取边坡内部关键部位的土体应力应变指标。如图 1 所示，以黄土边坡测试为例，阵列式各向异性变形原位测试系统相比于同类测试系统有 3 点优势：①该测试系统创新式的采用阵列式挤压板来获取不同方向的土体变形参数，可对孔壁内 4 个方向的土体进行数据采集，获取土体参数更为全面，实现数据化地反映土体的各向异性。②仪器内设置的孔内切削系统，在孔壁切削出平面，有效地解决预先钻孔导致的孔壁天然土体应力释放的问题。③测试流程简捷高效，自动化采集数据，不需要考虑现场施工和布置设备等问题，实施难度和试验成本大大降低。

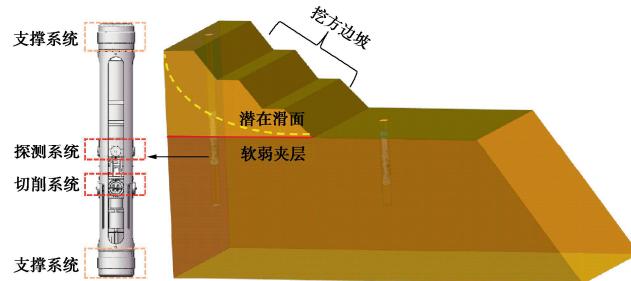


图 1 各向异性变形原位测试系统构想

Fig. 1 Conception of in-situ testing system for anisotropic deformation

图 2 为各向异性变形原位测试系统的结构简图, 测试系统的核心部分主要包括支撑系统、切削系统和探测系统, 支撑系统是为了在复杂的孔内环境下(孔径突变, 孔内局部土体塌陷等)稳定完成探测工作而设计的。支撑系统是由气缸驱动的环状气囊组成, 在孔内支撑系统固定后进行测试作业, 有效避免测试过程中仪器的晃动; 切削系统的主体是由双齿轮轴带动的四向展开的切刀, 当测试系统在孔内固定后, 旋转切削孔壁, 对后续测试加载方向上的孔壁进行修整, 提高探测设备在黄土孔内的测试精度。孔内探测系统的核心部分为径向加载单元, 主体结构是 4 片由 86 步进电机驱动的挤压板, 测试系统在切削系统呈收起状态时下放, 待挤压板到达切削孔位置后, 通过操控系统调整压力大小, 为切削孔提供目标径向压力, 如图 3 所示。

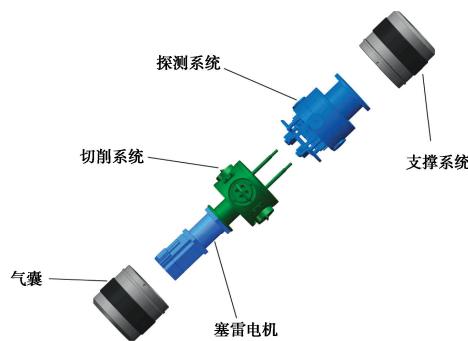


图 2 各向异性变形原位测试系统

Fig. 2 Anisotropic deformation in-situ testing system

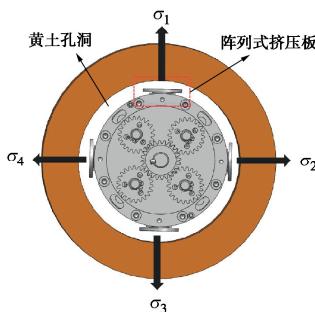


图 3 阵列式挤压板原位测试原理

Fig. 3 Principle of in-situ testing of array extruded plate

## 1.2 测试原理和实施方案

阵列式各向异性变形原位测试系统工作主要分为 3 个主要步骤, 各步骤依次进行(见图 4): ①孔内支撑。如图 4(a)所示, 测试系统到达孔内测试位置后, 支撑系统气囊撑开, 固定测试仪器。②孔内切削。如图 4(b)所示, 电机驱动切削刀头, 按照系统设定的旋转速度和伸出量进行孔内切削, 将孔内弧形壁面切削平整。③孔内探测及数据采集。如图 4(c)所示, 待切削工作完成后, 挤压系统下降高度, 电机驱动挤压板对切削孔施加径向挤压压力, 数据采集系统记录挤压

压力和挤压位移, 生成试验曲线。

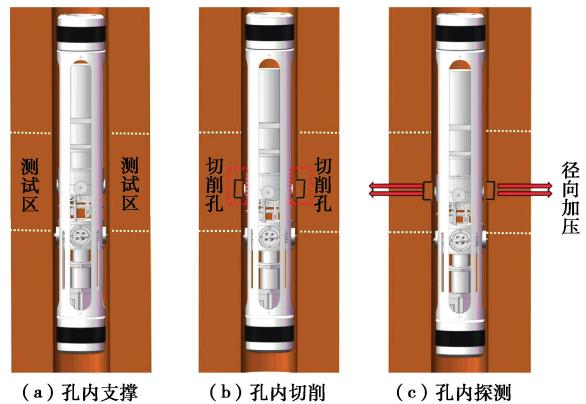


图 4 原位测试流程图

Fig. 4 Flow chart of in-situ tests

## 2 研制进展

### 2.1 技术指标

阵列式各向异性变形原位测试系统设计尺寸为直径 150 mm×高度 1000 mm, 支撑系统非工作状态下最大直径为 120 mm, 在 0.20 MPa 的充气压力下, 可负载 550 N, 可以稳定工作的孔径范围在 140~180 mm; 探测系统的挤压板采用阵列式布置的设计方案, 可实现在 4 个方向上同时对土体进行加荷挤压, 挤压板直径为 40 mm, 在侧向的最大挤压量为 25 mm, 最大加荷压力为 1.4 MPa, 压力传感器最大测量误差为 0.016%, 位移传感器的最大测量误差为 0.25%。

### 2.2 关键技术

#### (1) 孔内切削

孔内切削的关键是要尽可能减少切削过程中对切削面土体的扰动, 为此笔者创新式地采用大小锥齿轮轴协同带动刀具的工作方式, 刀具采用对边开设切削刃, 采用该设计的优点主要有 2 个: ①刀片采用对边切削刃(见图 5)。可以减小在切削过程中因刀具螺旋运动所造成的切削平面倾角, 减弱对切削面土体的扰动作用。②小锥齿轮轴采用悬臂式支撑, 由大锥齿轮同时驱动, 以实现平稳传动, 提高切削过程的稳定性。

#### (2) 孔内探测

如何获取土体各向异性变形参数是本研究的重点, 因此孔内探测是测试过程的关键步骤。设计采用太阳轮轴驱动阵列式挤压板的方式, 分两步完成测试工作。如图 6 所示, 太阳轮轴与 4 个小齿轮轴通过行星齿轮啮合的方式, 经由两步实现测试工作: ①太阳轮轴带动小齿轮轴以相同速率转动, 驱动挤压板; ②小齿轮轴带动挤压板齿条驱动推杆, 使 4 个方向挤压板横向伸出挤压土体, 传感器记录数据,

探测动作完成。

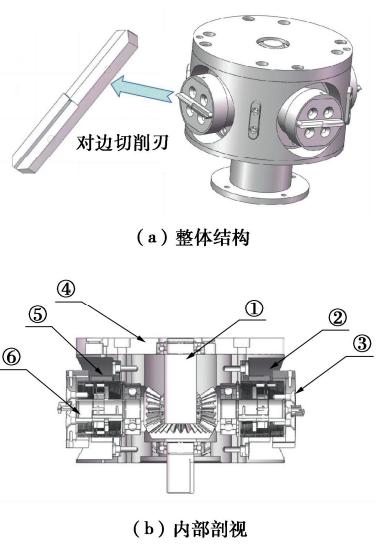


图 5 切削系统  
Fig. 5 Cutting system

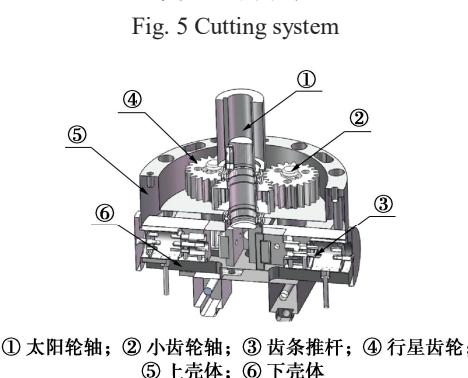


图 6 探测系统  
Fig. 6 Detection system

### 3 现场试验

#### 3.1 探测设备性能试验

为了检验仪器在室外环境的工作性能,项目组在陕西蒲城县模型试验基地进行现场测验,现场钻挖两个试验探测孔洞,孔洞深5.5 m,直径分别为160,180 mm,两钻孔直线相距约15 m,测试孔内的孔壁存在较多凹陷,孔径也随深度发生变化,为测试仪器的支撑性能和探测性能提供试验环境,如图7所示。



图 7 现场测试环境  
Fig. 7 Environment of field test

#### (1) 最小充气压力试验

如图8所示,将探测仪器放入测试孔洞内,利用空压机对气囊进行充气,通过减压气动阀调节充气压力大小,当探测仪器固定且不发生滑动时,记录此时充气压力为最小充气压力。改变试验孔径和测试深度后获取数据表1所示。



图 8 现场测试照片  
Fig. 8 Field test

表 1 最小充气压力试验数据

Table 1 Test data of minimum inflation pressure

孔洞直径/mm	测试深度/mm	最小充气压力/MPa
160	200	0.24
	500	0.22
	800	0.22
	1100	0.22
180	200	0.26
	500	0.23
	800	0.23
	1100	0.23

如表1测试结果显示,在相同测试深度条件下,随着黄土孔径的增大,所需的小充气压力也相应增加。同时,在测试孔洞直径不变的情况下,随着测试深度的增加,最小充气压力一开始呈下降趋势,随后随测试深度的进一步增加而趋于稳定。值得注意的是,在整个试验过程中,未观察到探测设备出现滑移现象,这表明该设备能够在试验过程中提供可靠的支撑力。

#### (2) 切削系统性能试验

仪器在孔内进行切削时,切削刀具运动的同步性和双齿轮轴传动时切削力矩的传递会影响切削面的统一性和完整性,因此需对仪器切削系统的工作性能进行测试,试验方案如表2所示。

表 2 探测设备切削性能试验方案

Table 2 Test schemes of cutting performance of detection equipment

性能	测试项目	测试内容
刀具运动同步性	切削刀具位移	每个切削刀具的相对位移量
切削性能	切削能力	在黄土孔洞内切削黄土孔壁

#### a) 刀具运动同步性试验

通过控制刀具起始位置、刀具伸出量等初始条件在室内进行刀具运动同步性试验(图9),由操控系统输入指令使刀具外旋伸出,每次位移后分别测量4个刀盘距离螺母端盖的距离并进行比对,试验共计3次,试验数据如表3所示。

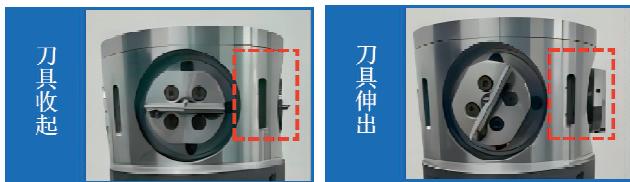


图9 刀具运动同步性试验

Fig. 9 Synchronization tests on tool motion

表3 刀具位移同步性试验数据

Table 3 Synchronization test data of tool displacement

刀具	第一次位移/mm	第二次位移/mm	第三次位移/mm
#1	2.62	4.20	6.54
#2	2.64	4.20	6.50
#3	2.60	4.18	6.52
#4	2.60	4.22	6.50

如表3所示,切削系统刀具之间的位移偏差均控制在±0.04 mm范围内。将#1刀具的位移数据设为参照点,其余刀具的位移数据与此基准的偏差比率被视为误差率。经计算,三轮测试的最大误差率为1.5%。这一结果表明,在无负载条件下,采用阵列式布置刀具的切削系统展现出较好的运动协同性。

### b) 切削系统切削性能试验

进行了干密度为1.63 g·cm<sup>-3</sup>的黄土在测试孔深为0.7, 1.2 m条件下的孔内切削试验。图10为切削系统在切削孔的取样结果,可以看出切削圆环连续,切削面平整,能够满足后续测试需要。



图10 切削孔取样结果

Fig. 10 Sampling results of cutting operation

## 3.2 黄土孔内原位各向异性变形探测试验

为了检验仪器的测试性能,在两个测试孔的不同深度进行了变形测试。通过与同期研发的原位探测仪

器在相同试验条件下获得的试验数据进行对比分析,验证各向异性变形试验数据的可靠性,分别整理出0.4~1.6 m测试深度处变形模量、峰值锥尖阻力、黏聚力等关系曲线。

### (1) 土体各向异性分析

图11对比了B1孔和B2孔4个测试方向的变形模量随深度变化曲线。由图11可知:同一测试深度不同方向的土体变形模量存在明显的各向异性。B1孔0.9 m测试深度处,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  方向变形模量差值达4.62 MPa, B2孔1.5 m测试深度处,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  方向土体变形模量差值达4.97 MPa。

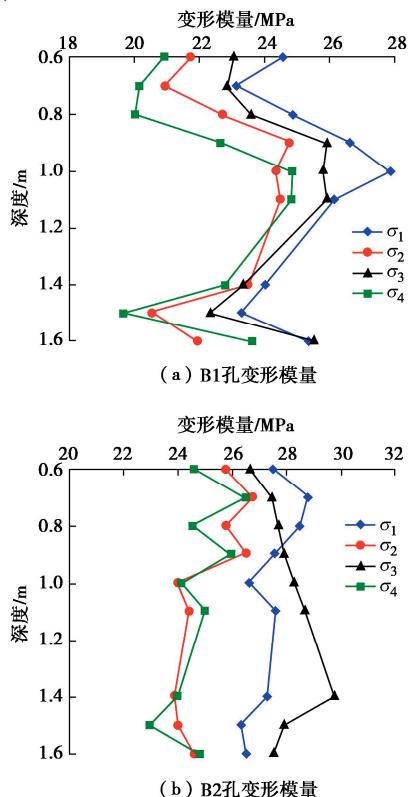


图11 变形模量与深度关系曲线

Fig. 11 Curves of deformation modulus with depth

图12还对比了同一深度4个方向的变形模量,不难看出:同一测试深度,对角方向变形模量数值接近,相邻方向土体变形模量差值明显。由上述分析可知:不同深度不同方向的黄土的孔内原位变形特性具有明显的各向异性。

### (2) 土体变形模量与含水率的关系

土的变形特性受到其物理性质的影响,图13为4个测试方向的平均变形模量与测试孔洞含水率的关系。如图13所示,可以看出,土体含水率随测试深度的加深出现波动变化,B1、B2孔内黄土的变形模量均与含水率随测试深度的变化呈负相关关系。为了进一步验证仪器测试数据的可靠性,通过室内三轴试验结果来分析黄土变形模量与含水率之间的变化规律。室内三轴试验所用的黄土均取自陕西蒲城县五星村模

型试验基地, 取样深度 0.5~1.5 m。

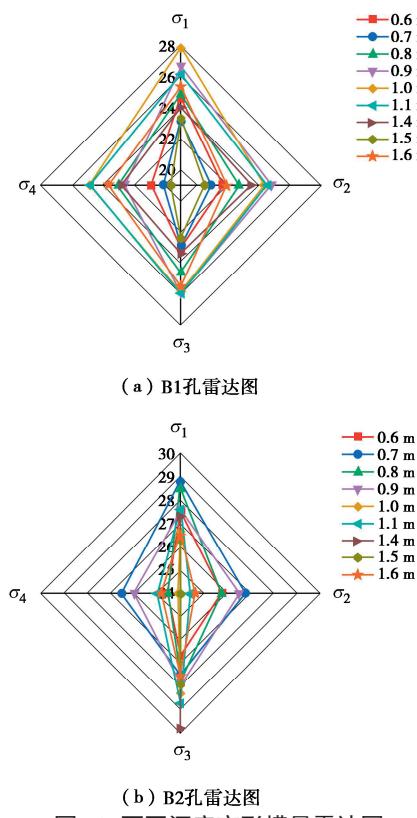


图 12 不同深度变形模量雷达图

Fig. 12 Radar map of deformation modulus at different depths

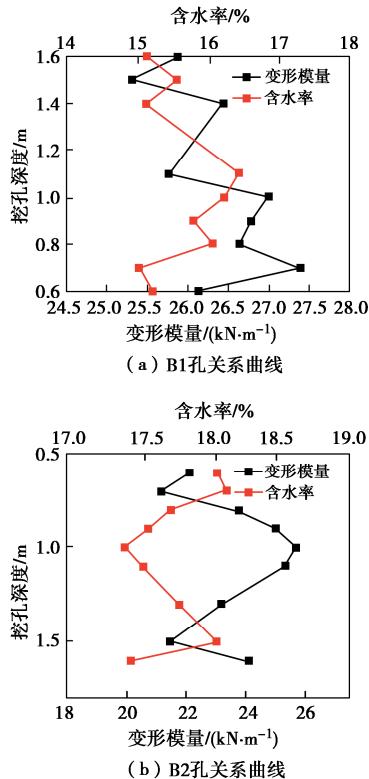


图 13 B1、B2 孔变形模量均值与含水率随深度变化曲线

Fig. 13 Curves of mean deformation modulus and moisture content of holes B1 and B2 with depth

将 B1 测试孔测得阵列式仪器变形模量数据与三

轴试验所得试样的模量数据作关系散点图, 如图 14 所示。由图 14 可以看出, 室内三轴试验和现场试验测得的变形模量都与含水率的变化呈负相关关系, 随含水率的升高有递减趋势。其中无侧限、10, 20 kPa 三种情况下的模量值均小于阵列式仪器测得的模量值, 平均值分别减少 64.95%, 50.76%, 39.8%。50 kPa 条件下的模量值均大于阵列式仪器测得的模量值, 增加了约 8.89%。导致室内三轴试验和原位各向异性试验结果出现偏差的原因可能由于剪切面的尺度效应。

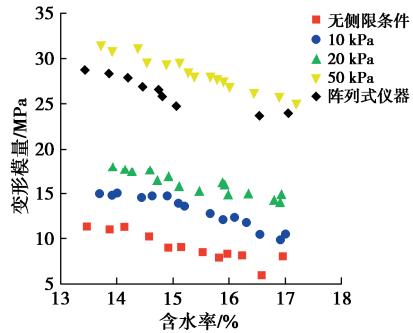


图 14 孔内/室内变形模量对比

Fig. 14 Comparison of in-hole/in-room deformation modulus

为了研究不同方向变形模量差值与土体含水率之间的关系, 分别计算出 B1 孔和 B2 孔的同一深度相邻方向的变形模量差, 即  $|\sigma_1 - \sigma_2|$ ,  $|\sigma_3 - \sigma_4|$ ,  $|\sigma_2 - \sigma_3|$  和  $|\sigma_1 - \sigma_4|$ , 以相邻方向土体变形模量差值来衡量黄土变形各向异性, 如图 15 所示。

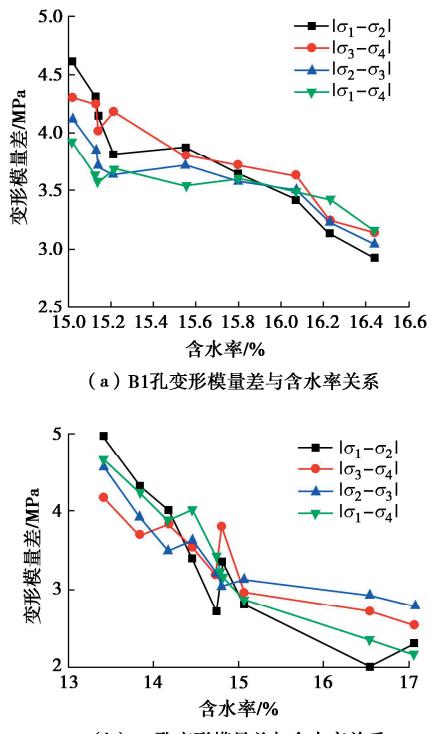


图 15 变形模量差与含水率关系

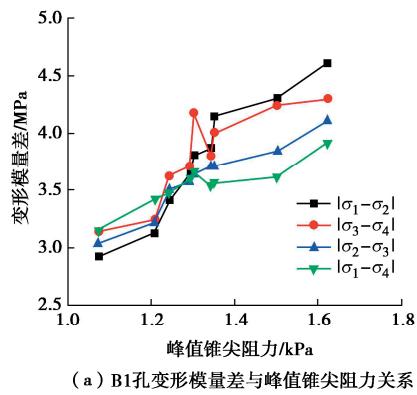
Fig. 15 Relationship between difference of deformation modulus and moisture content

图 15 为相邻方向土体变形模量差值与含水率的

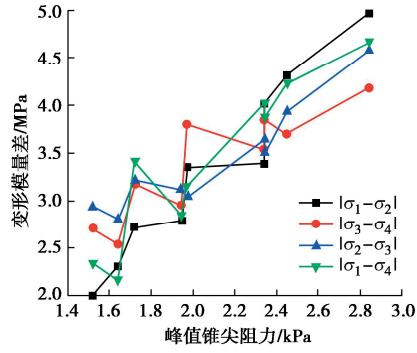
关系, 由图 15 可知, 随着黄土含水率的增大, 同一深度不同方向的黄土变形模量差值在减小, 因此, 控制黄土的含水率可以减小各向异性对于黄土变形的影响。

### (3) 土体变形模量与静力触探强度参数的关系

土体强度指标的改变势必会引起土体变形的差异, 在测试现场同孔位利用孔内微型变角度静力触探仪器<sup>[7]</sup>获取了不同深度锥尖阻力参数, 图 16 为相邻方向土体变形模量差值与孔内峰值锥尖阻力的变化关系, 由图 16 可知, 随着峰值锥尖阻力的增大, 同一深度不同方向的土体变形模量差值也随之增大, 笔者认为是由于土体的强度和结构性更高, 导致土体的各向异性更加明显。



(a) B1孔变形模量差与峰值锥尖阻力关系



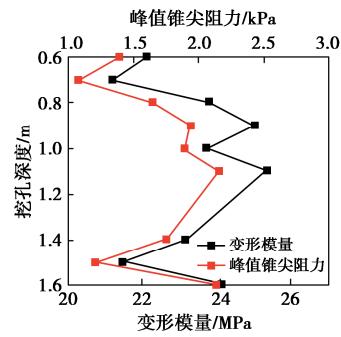
(b) B2孔变形模量差与峰值锥尖阻力关系

图 16 变形模量差与峰值锥尖阻力关系

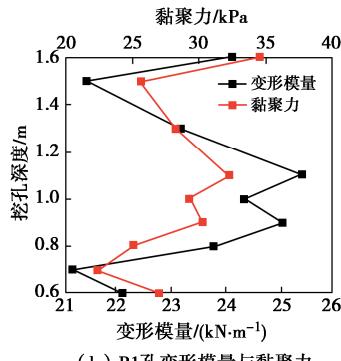
Fig. 16 Relationship between difference of deformation modulus and peak cone-tip resistance

图 17 对比了变形模量与峰值锥尖阻力和黏聚力的试验结果, 不难看出, 随着测试深度的变化, 土体的变形模量与峰值锥尖阻力和黏聚力呈现正相关关系。这与经验公式呈现的趋势一致, 为了更准确地描述变形模量与强度参数的关系, 对试验数据进行回归分析。

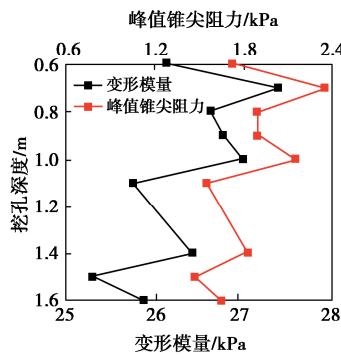
采用 Logarithm 数学模型将不同深度下的变形模量与静力触探强度参数进行拟合后, 获取拟合关系, 拟合曲线如图 18 所示。



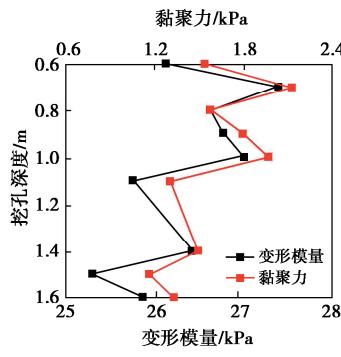
(a) B1孔变形模量与峰值锥尖阻力



(b) B1孔变形模量与黏聚力



(c) B2孔变形模量与峰值锥尖阻力



(d) B2孔变形模量与黏聚力

图 17 B1、B2 孔变形模量均值与强度参数随深度变化曲线

Fig. 17 Variation curves of mean deformation modulus and strength parameters of holes B1 and B2 with depth

整体来看, 现场试验土体的变形模量与峰值锥尖阻力和黏聚力均呈正相关关系, 其中黏聚力和峰值锥尖阻力与变形模量近似呈对数函数关系, 拟合关系式为

$$y = a - b \ln(x + c) \quad \text{。} \quad (1)$$

拟合曲线方程, 参数  $a$ ,  $b$  和  $c$  及相关系数  $R^2$  如表 4 所示。

表 4 拟合曲线及确定的参数

Table 4 Fitting curves and determined parameters

拟合参数	B1 测试孔拟合曲线及参数				拟合方程
	a	b	c	R <sup>2</sup>	
峰值锥尖阻力	10.38838	-11.06223	1.55197	0.84099	$E = 10.38838 - 11.06223 \ln(q_c + 1.55197)$
黏聚力	22.11997	-2.47918	-20.19347	0.95778	$E = 22.11997 - 2.47918 \ln(c - 20.19347)$
拟合参数	B2 测试孔拟合曲线及参数				拟合方程
	a	b	c	R <sup>2</sup>	
峰值锥尖阻力	26.75447	-1.79690	1.01711	0.97617	$E = 26.75447 - 1.79690 \ln(q_c - 1.01711)$
黏聚力	24.57793	-1.75973	-24.36958	0.95460	$E = 24.57793 - 1.75973 \ln(c - 24.36958)$

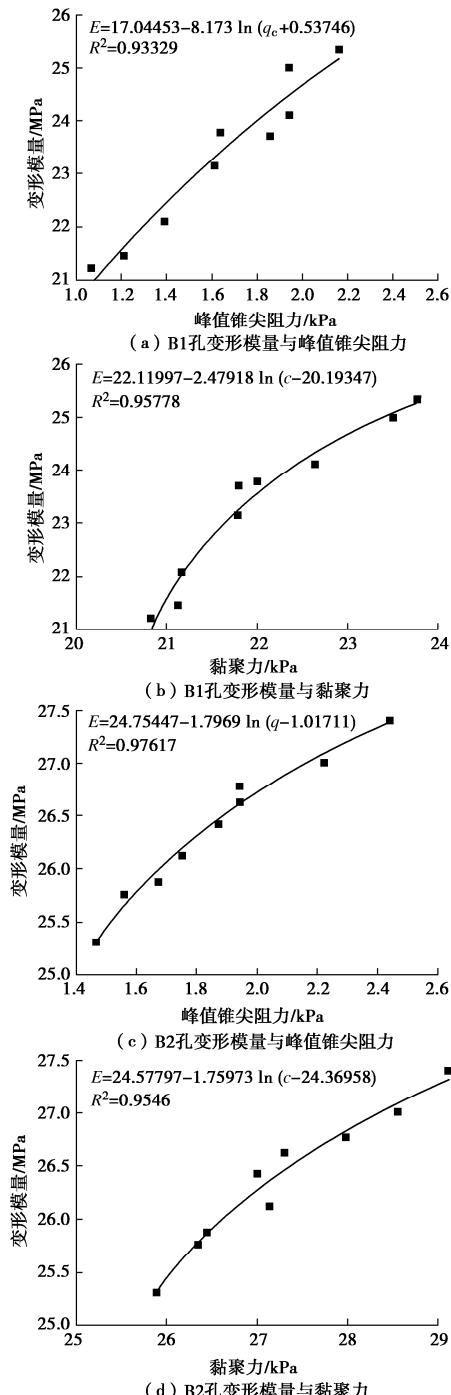


图 18 B1、B2 孔变形模量均值与强度参数拟合曲线

Fig. 18 Fitting curves of mean deformation modulus and strength parameters of holes B1 and B2

## 4 结 论

(1) 研制了一种适用于黄土孔内各向异性变形试验的原位测试仪器。仪器相较于目前常用的旁压仪，具有加载稳定、多方向采集数据，可以数据化分析土体各向异性的特点。

(2) 整套测试系统由支撑系统、切削系统和探测系统组成。采用大小锥齿轮轴协同切削设计和阵列式挤压板设计，分别实现孔壁切削和孔内探测，子系统之间协同配合实现土体各向异性变形参数的获取。采用样机进行现场测试，测试结果表明研制仪器控制协调良好，各子系统动作均能达到设计要求。

(3) 对黄土孔内的各向异性变形参数进行测定和分析，通过和其他原位测试仪器试验数据对比，验证了该系统测试的工作效率和测试的可靠性。结果表明不同测试方向的原状黄土的变形特性存在着明显的各向异性，B1 孔 0.9 m 测试深度处， $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  方向变形模量差值达 4.62 MPa；B2 孔 1.5 m 测试深度处， $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  方向土体变形模量差值达 4.97 MPa。

(4) 测试结果表明，黄土各向异性的变化与土体含水率和峰值锥尖阻力相关。在一定范围内，含水率的增大会降低同一深度不同方向黄土的变形模量差；而随着土体峰值锥尖阻力的增大，不同方向黄土的变形模量差也随之增大。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 晏长根和兰恒星参与实验设计；董忠红、张宏兵、李森、雷文斌完成实验仪器设计；杨明宇、王逸凡、雷文斌完成实验操作；晏长根、杨明宇、王逸凡参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿的提交。YAN Changgen and LAN Hengxing participated in the experimental design; DONG Zhonghong, ZHANG Hongbing, LI Sen and LEI Wenbin completed the experimental instrument design; YANG Mingyu, WANG Yifan and LEI Wenbin completed the experimental operation; YAN Changgen, YANG

Mingyu, and WANG Yifan participated in the writing and editing of the paper. All authors have read and agreed to submit the final manuscript.

## 参考文献:

- [1] 李森. 黄土孔内原位各向异性变形探测成套设备研发[D]. 西安: 长安大学, 2023. (LI Sen. Research and Development of Complete Equipment for In-situ Anisotropic Deformation Detection in Loess Hole[D]. Xi'an: Changan University, 2023. (in Chinese))
- [2] 蔡怀恩, 张继文, 李鹏军, 等. 黄土挖填方场地形成的关键岩土工程问题[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(1): 22-25. (CAI Huai'en, ZHANG Jiwen, LI Pengjun, et al. Key geotechnical engineering problems in loess excavation and filling site formation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2022, 36(1): 22-25. (in Chinese))
- [3] 王龙, 张连科, 马伊明, 等. 工程扰动对黄土抗蚀性与抗冲性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 14-20, 26. (WANG Long, ZHANG Lianke, MA Yiming, et al. Influence of engineering disturbance on soil anti-erodibility and anti-scourability of loess[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 14-20, 26. (in Chinese))
- [4] 谢文龙. 黄土各向异性的试验研究[D]. 西安: 西安工业大学, 1996, 18(5): 94-95. (XIE Wen-long. Experimental Study on Anisotropy of Loess[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021. (in Chinese))
- [5] 温文峰, 严志娟, 王胜源. 原位各向异性测试技术及其在工程中的应用 [J]. 岩土工程技术, 2017, 31(5): 221-224+271. (WEN Wenfeng, YAN Zhijuan, WANG Shengyuan. In-situ anisotropy testing technology and its application in engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017, 31(5): 221-224+271. (in Chinese))
- [6] 胡建华, 汪稔, 周平, 等. 旁压仪在地基工程原位测试中的应用及其成果分析 [J]. 岩土力学, 2003(增刊 2): 418-422. (HU Jianhua, WANG Ren, ZHOU Ping, et al. Application and analysis of pressiometer to in-situ measurement of foundation works[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(S2): 418-422. (in Chinese))
- [7] LUNNE T, POWELL J J M, ROBERTSON P K. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice[M]. CRC Press, 2002.
- [8] MAYNE P W, KULHAWY F H, KAY J N. Observations on the development of pore-water stresses during piezocene penetration in clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(4): 418-428.
- [9] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(4): 718-733.
- [10] 沈珠江. 原状取土还是原位测试: 土质参数测试技术发展方向刍议[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 94-95. (SHEN Zhujiang. Undisturbed soil sampling or in-situ testing--A brief discussion on the development direction of soil parameter testing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 94-95. (in Chinese))
- [11] 黄剑波. 旁压试验在膨胀土中的应用及规律研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020. (HUANG Jianbo. Application and Regularity of Pressure Test in Expansive Soil[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [12] CHEN W F, SAWADA T. Earthquake-induced slope failure in nonhomogeneous, anisotropic soils-science direct[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(2): 125-139.
- [13] STOCKTON E, LESHCHINSKY B A, OLSEN M J, et al. Influence of both anisotropic friction and cohesion on the formation of tension cracks and stability of slopes[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 31-44.
- [14] AGHAJANI F H, SALEHZADEH H, SHAHNAZARI H. Application of artificial neural network for calculating anisotropic friction angle of sands and effect on slope stability[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 1878-1891.
- [15] 马扬帆. 基于孔内微型变角度静力触探识别含界面黄土力学参数方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2023. (MA Yangfan. Identification of Mechanical Parameters of Interfacial Loess Based on Micro-Variable Angle Static Sounding in a Hole[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023. (in Chinese))
- [16] 晏长根, 梁哲瑞, 贾卓龙, 等. 黄土边坡防护技术综述 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(4): 1-22. (YAN Changgen, LIANG Zherui, JIA Zhuolong, et al. Review on surface protection technologies of loess slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(4): 1-22. (in Chinese))
- [17] 邵生俊, 王永鑫. 刚柔混合型大型真三轴仪研制与验证[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1418-1426. (SHAO Shengjun, WANG Yongxin. Development and verification of large-scale true triaxial apparatus with rigid-flexible-flexible loading boundary mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2019, **41**(8): 1418-1426. (in Chinese))
- [18] 刘中原, 李德武, 张文博, 等. 干密度和含水率对黄土各向异性差值的影响[J]. 公路工程, 2023, **48**(6): 143-146, 168. (LIU Zhongyuan, LI Dewu, ZHANG Wenbo, et al. Influence of loess physical parameters on its anisotropy difference[J]. Highway Engineering, 2023, **48**(6): 143-146, 168. (in Chinese))
- [19] ZAN W, ZHANG W, WANG N, et al. Stability analysis of complex terrain slope based on multi-source point cloud fusion[J]. Journal of Mountain Science, 2022, **19**(9): 2703-2714.
- [20] 晏长根, 王 瑞, 许江波, 等. 一种孔内原位测量土体各向异性参数的装置及方法: CN110006756A[P]. 2019-07-12. (YAN Changgen, WANG Rui, XU Jiangbo, et al. The Invention Relates to a Device and Method for In-Situ Measurement of Soil Anisotropy Parameters in a Hole: CN110006756A[P]. 2019-07-12. (in Chinese))
- [21] CETIN K, SEED R B, DER KIUREGHIAN A, et al. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(12): 1314-1340.
- [22] JUANG C H, YUAN H, LEE D H, et al. Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(1): 66-80.
- [23] GOLDBERG D. The role of downhole measurements in marine geology and geophysics[J]. Reviews of Geophysics, 1997, **35**(3): 315-342.
- [24] 徐光黎, 张晓伦, 王春艳. 自钻式原位剪切旁压仪的开发及应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 950-955. (XU Guangli, ZHANG Xiaolun, WANG Chunyan. Development and application of self-boring in situ shear pressuremeter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 950-955. (in Chinese))