

DOI: 10.11779/CJGE20231161

# 软黏土取样扰动机理、评估方法及控制措施研究进展

才昊, 叶冠林\*, 兰立信, 张琪, 朱文轩

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 软黏土由于具有含水率高、压缩性强、灵敏度高等特点使其在取样过程中易受到扰动, 导致土体的强度及变形特性显著改变。了解取样扰动的力学机理、减少取样扰动影响并对土样质量进行合理评估对于确定工程设计中有代表性的土体参数具有重要意义。为此, 总结了国内外软黏土取样扰动相关的研究进展, 具体包括软黏土取样扰动因素及力学机理、取样扰动影响的宏观表现、扰动程度的评估方法以及减少扰动的措施。研究表明: 目前针对取样扰动宏观力学机理的研究成果颇丰, 但缺乏相应的微观试验证据及微观机理分析对宏观结果进行佐证; 现存土样质量评估指标大都只针对纯黏土, 对粉质黏土、粉土等低塑性中间土体的适用性存疑, 目前仍没有针对不同性质土体的统一土样质量评价体系; 室内再固结方法可以有效减少取土过程中的应力释放影响, 但无法恢复附加扰动破坏的土体结构。基于此, 对今后亟待开展的研究提出了 4 点建议与展望。

**关键词:** 软黏土; 取样扰动; 土样质量评估; 再固结方法

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)02-0225-09

作者简介: 才昊(1996—), 男, 博士, 主要从事取土扰动影响与土体性质关系方面的研究工作。E-mail: 609559109@qq.com。

## Research progress on disturbance mechanisms, evaluation methods and control measures for sampling of soft clay

CAI Hao, YE Guanlin, LAN Lixin, ZHANG Qi, ZHU Wenxuan

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The soft clay, characterized by high moisture content, strong compressibility and high sensitivity, is prone to disturbance during the sampling process, resulting in significant changes in the strength and deformation characteristics of soils. Understanding the mechanical mechanism behind sampling disturbance, reducing its impact and accurately evaluating the sample quality are crucial for determining the representative soil parameters in engineering design. To address these issues, the current researches on sampling disturbance in soft clay are summarized, including the mechanical mechanisms of sampling disturbance, the macroscopic and microscopic effects, the methods for the sample quality evaluation and the strategies to reduce disturbance. The researches show that there are abundant results on the macroscopic mechanical mechanisms of sampling disturbance. However, there is a lack of corresponding microscopic experimental evidence and analysis to support these macroscopic results. Furthermore, the most existing quality evaluation indices are designed for the clay and may not applicable to the low-plasticity intermediate soils such as silty clay and silt. Currently, there is still no unified quality evaluation system for the soil samples with varying properties. The reconsolidation methods can effectively reduce the stress release during the soil sampling process, but they cannot restore the soil structure damaged by sampling disturbance. Based on this, four suggestions and prospects for future researches are proposed.

**Key words:** soft clay; sampling disturbance; sample quality evaluation; reconsolidation method

## 0 引言

软黏土作为在中国广泛分布的一种特殊土, 具有含水率高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、灵敏度高等特性<sup>[1]</sup>。软土的这些特性导致其在取样过程中易受到扰动。而这种扰动作用会直接导致土体的刚度、强度、内部结构及有效应力产生变化, 进而影响室内

土体力学参数的确定。取土扰动相关研究<sup>[2-4]</sup>从 20 世纪 50~60 年代开始, 是岩土工程中一个基础但又很重

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072317); 上海市社会发展科技攻关项目(21DZ1204300)

收稿日期: 2023-11-27

\*通信作者(E-mail: ygl@sjtu.edu.cn)

要的课题。本文归纳总结国内外针对软黏土取样扰动的研究成果,具体包括软黏土取样扰动因素及力学机制、取样扰动影响的宏观表现、扰动程度的评估方法以及减少扰动的措施,并对今后亟待开展研究的问题和方向提出建议和展望。

## 1 取样扰动因素及力学机制

总体而言,软黏土取样扰动因素及力学机制可理想化,归纳为应力释放和附加扰动两部分。

### 1.1 应力释放(PSA)

应力释放指将土样从地层中取出时上覆和周围压力的卸除,这一部分无法避免。其主要力学机制为:应力卸除导致土体内部有效应力降低,同时空气-土壤边界处的表面张力会阻止土壤膨胀的趋势,引起土体孔隙水承受负压,土体产生吸力。Ladd等<sup>[4]</sup>最先在20世纪60年代提出perfect sampling method(PSA)这一概念来量化应力释放机制,同时作为表征块状取土的一种最小取样扰动情况。

### 1.2 附加扰动(ISA)

附加扰动:指取样、封装、运输、贮存、切削等过程中的扰动,主要用来表征钻孔取土过程,Baligh等<sup>[5]</sup>在1987年最先提出“ideal sampling method(ISA)来量化钻孔取土的附加扰动的影响,Baligh<sup>[6]</sup>利用应变路径法对简单取样器(S-sampler)在饱和黏土地层的不排水贯入过程进行模拟,同时量化分析不同取土器几何形式对土样的扰动影响,研究发现,对于钻孔取土,轴向主应变分量 $\varepsilon_a$ 对于取样器中心线的土体单元起主导作用,而中心线的土体单元在取土过程中在经历“压-拉-压”3个变形阶段后,偏应力最终降为零。其扰动程度随取样器径厚比( $B/t$ )的降低而增加(图1)。

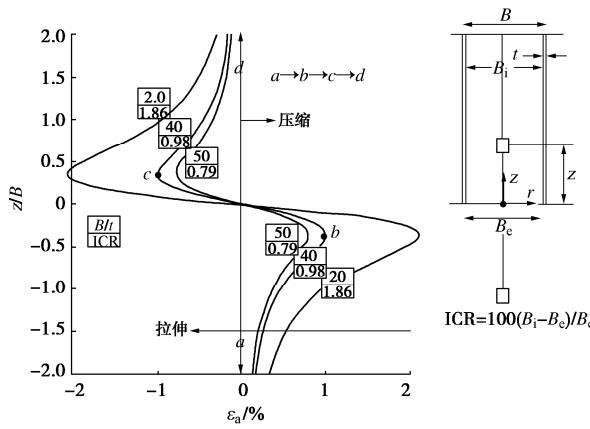


图1 ISA 扰动原理图<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of ISA

笔者针对两种取样扰动机制绘制土体应力路径如图2所示,图中数字±1、±2、±5分别代表土体经

历应变幅值为1,2,5的压-拉-压循环。可以看到仅经历应力释放(PSA)的土体明显具有较大的残余有效应力( $a$ 点);而对于钻孔取土来说,应变幅值越高,土体的残余有效应力越低。一般认为,附加扰动除了会引起土体有效应力的变化外,还会破坏土体天然结构。

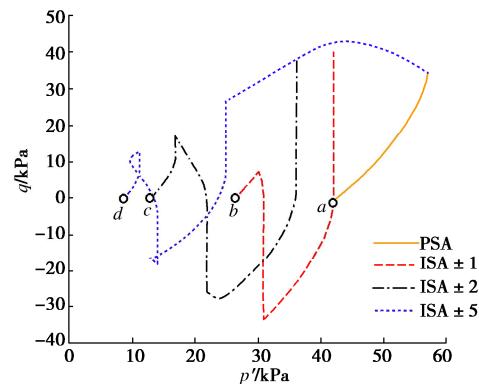


图2 PSA与ISA应力路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress paths for PSA and ISA

以上扰动对土体固有性质如有效应力、孔隙比、结构性等的影响,最终反映在对土体的宏观特性的改变,如强度、刚度、剪切波速、孔径分布等。接下来就软黏土取样扰动影响的宏观表现作简要总结。

## 2 取样扰动影响的宏观表现

### 2.1 土体的强度及刚度特性

#### (1) 土体小应变及大应变下的力学行为

软黏土取样扰动影响具体由室内三轴不排水剪切试验和固结试验表征如图3,4所示。

可以看到,在土体应力-应变关系曲线中,取样扰动影响表现为使土体:①峰值不排水强度降低( $A$ 点);②破坏时对应轴向应变增大( $B$ 点);③大应变下剪切强度增大( $C$ 点);④脆性减弱( $AD$ :破坏后剪切力的衰减);⑤不排水小应变剪切模量减小(土体破坏前曲线斜率)。

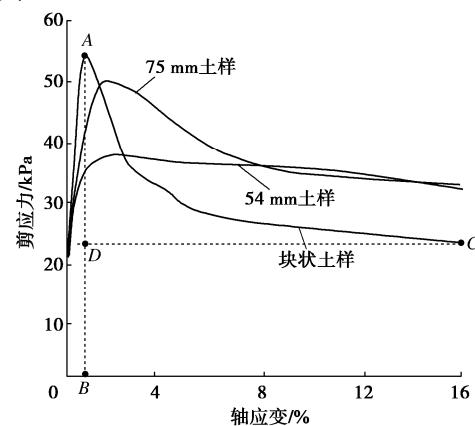


图3 不同取样方式下软黏土典型三轴不排水剪切试验结果<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Typical triaxial undrained shear test results of soft clay by different sampling methods

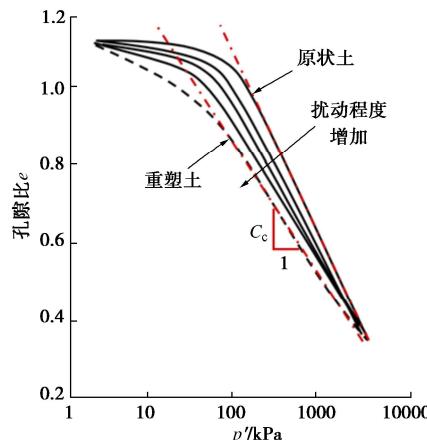
图4 扰动作用下软黏土典型固结试验结果<sup>[10]</sup>

Fig. 4 Oedometer test results of soft clay under disturbance

以上结论在大量研究中得以证实, Lunne 等<sup>[8]</sup>针对挪威黏土研究发现, 通过各向异性固结不排水压缩试验(CAUC)测得块状土样(block sample)的不排水剪切强度是取样管土样(54 mm sample)不排水剪切强度的1.2~1.9倍。Karlsrud 等<sup>[9]</sup>发现在不同试验类型下, 块状样品的不排水强度都在一定程度上高于54 mm取土管样品, 且CAUC(各向异性固结不排水压缩)试验中二者的强度差别要更大(表1), 原因在于相比CAUC试验, CAUE(各向异性固结不排水拉伸)和DSS(单剪)试验中存在主应力轴旋转导致土体结构破坏, 弱化了管状取土造成的扰动影响, 使块状土样与管状土样的强度差别变小。因此, CAUC试验是目前使用最广泛评估取土扰动影响的试验类型。

表1 54 mm 取土管样品与高质量块状样品的强度对比<sup>[9]</sup>

Table 1 Strengths of 54 mm-piston sample as compared to block samples of high quality

试验类型	高于 54 mm 取土管样品强度/%
CAUC	10~50
CAUE	0~10
DSS	5~20

在土体  $e-\lg p$  曲线中, 取样扰动表现为使土体: ①屈服前的压缩性增大——室内压缩曲线下移, 屈服后的压缩性减少——土的压缩指数减小; ②固结曲线变得更圆, 导致先期固结压力变得模糊不清。

取样扰动的影响机理在两种试验中表现出了一致性: 扰动使土体在小应变下强度及刚度降低, 大应变下强度及刚度提高。原因在于: 取样扰动引起的土体结构破坏主要影响土体小应变下的力学行为, 而土体大应变下的剪切行为主要由含水率控制<sup>[8-9]</sup>。黏土胶结键的破坏, 使得土体在小应变下剪切阻力下降, 因此扰动越大, 小应变下的土体刚度越小, 不排水峰值强度越低; 同时有效应力降低会导致土体在固结阶段会有更多的水排出, 土体含水率减少且变得更加密实,

使得土体在大应变下的刚度及剪切强度更大。

### (2) 土体先期固结压力

Santagata 等<sup>[11]</sup>认为有效应力降低与土体结构破坏是取样扰动两种最主要的影响机制, 而两者会对先期固结压力的预估造成相反的影响。

图5为两种扰动方式对先期固结压力影响的示意图, 图中 $\sigma'_s$ 是取样后的土体有效应力,  $\sigma'_p$ 是用卡萨格兰德经验作图法对先期固结压力的预估值。由图5可知, 有效应力降低改变的是固结试验中的初始点, 对原位压缩线(VCL)没有影响, 因此会高估土体先期固结压力; 而结构破坏会导致VCL斜率降低, 最终会低估土体先期固结压力。

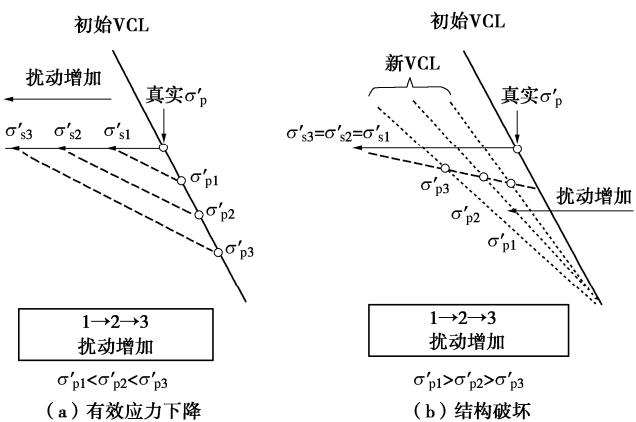
图5 不同扰动形式对软黏土压缩行为影响示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 5 Schematic of effects of disturbance on compression behaviour

### (3) 土体剪切波速

近年来, 大量室内试验研究表明<sup>[12]</sup>土体剪切波速与土体小应变刚度存在确定的函数关系:

$$G_{\max} = \rho v_s^2 \quad (1)$$

同时, 土体的剪切波速与土样密实度、固结时间、超固结效应等控制土样结构性的因素都有较好的相关性, 可以反映土体结构性差异<sup>[13]</sup>。研究表明, 实验室所测土体剪切波速通常低于原位所测值, 且扰动程度越大, 土体剪切波速降低越多<sup>[14-15]</sup>, 重塑土的剪切波速一般要远远小于原状土的剪切波速。

### (4) 土体吸力

如前所述, 在取样过程中土样经历上覆及周围压力卸除后, 此时空气-土壤边界处的表面张力会阻止土壤膨胀的趋势, 导致土样产生负压, 即吸力<sup>[16]</sup>。理想状态下, 土体残余有效应力或者说吸力值( $p'_r$ )应等于土体的原位平均有效应力值( $p'_m = (\sigma'_{v0} + 2\sigma'_{h0})/3$ ), 其中 $\sigma'_{v0}$ 和 $\sigma'_{h0}$ 分别是土体原位竖向和水平向有效应力。然而, 由于负孔压的存在, 使得土体在取样过程中有一部分溶解于水中的气体逸出, 导致土样的残余有效

应力降低, 扰动越大, 所测土体吸力值越小<sup>[14, 17]</sup>。

## 2.2 土体的微观孔径特性

近年来, Pineda 等<sup>[18]</sup>对取样管不同空间位置(图 6)的土体进行压汞(MIP)试验, 同时以 Sherbrooke 块状土样及重塑土样的压汞试验结果作为评估取样扰动的基准, 通过土体孔径分布曲线 PSD(pore size distribution)来反映钻孔取土造成的土体微观结构破坏和含水率及孔隙比的变化(图 6), 为利用微观试验方法分析软黏土取样扰动开辟了新的可能性。研究表明: ①取样管中心线处土体与经历过 CRS 试验的 Sherbrooke 土样 PSD 曲线类似, 说明轴向变形是取样扰动的主要结果。②对于取样管中心线处土体(C), 扰动使主导孔径(PSD 曲线峰值对应孔径)略微增大, 对应峰值降低, 表明土体结构的改变, 且边缘(Perimeter)土体受到的扰动影响要大于中间(Centreline)土体。③对于取样管上下两端土体(A, E 等), 扰动除了使主导孔径略微增大外, PSD 曲线在主导孔隙右侧出现第二峰值, 说明取样扰动使边界线土体产生了额外较大孔径的孔隙。

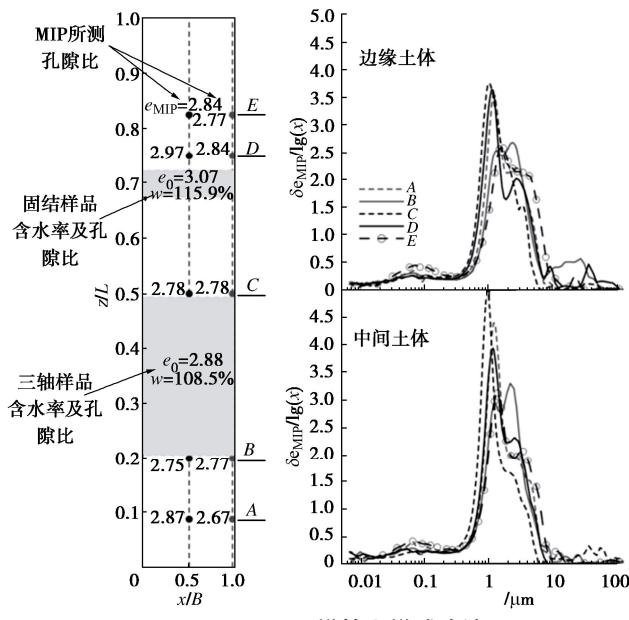


图 6 50 mm Shelby 取样管土样试验结果<sup>[18]</sup>

Fig. 6 Test results of 50 mm-Shelby sample

目前取土扰动造成的土体结构变化的微观试验证据仍然较少, 且大多停留在定性阶段。更重要的是, 如何将扰动过程中土体的孔径分布、颗粒错动滑移等微观参量与土体体变、有效应力等宏观参量建立关联, 这对于理解软黏土取样扰动影响的机制至关重要。

## 2.3 土体性质与取样扰动影响

取土扰动影响的程度除受取土方法、机械等外部因素影响外, 与土体本身性质, 如颗粒级配, 塑性指数  $I_p$ , 天然含水率, 超固结比 OCR, 敏感度  $S_t$  等同样有着密切的联系<sup>[19]</sup>, 即不同性质的土体对于取样扰动

的敏感度也不同。

### (1) 超固结比 OCR

大量研究表明<sup>[9, 20]</sup>, 取样扰动影响程度随土体 OCR 增大而显著降低。Santagata 等<sup>[20]</sup>的研究表明: 土体 OCR 越大, 扰动造成的有效应力降低程度越小, 土体越不易受到扰动。

### (2) 土体塑性

Lukas 等<sup>[21]</sup>利用 Silica silt(S) 和 Kaolin clay(K) 两种颗粒(主要矿物成分分别为石英和高岭石)在不同配比下制备成不同塑性的土体, 并对土体在三轴室内施加扰动来研究取样扰动对不同土体的影响机理。不同合成土体的物理指标及分类如表 2 所示。图 7 为文中典型结果(S 和 K 前面的数字代表两种颗粒各自的百分比含量, 如 50S50K 表示 50% Silica silt, 50% Kaolin clay), 可以看到: 粉粒含量越多, 即土体塑性越小, 扰动造成土体有效应力降低程度越大。

表 2 5 种合成土体的物理指标<sup>[21]</sup>

Table 2 Physical parameters of five synthetic soils

土体	$w_L / \%$	$w_p / \%$	$I_p / \%$	细粒含量/ %	土体分类
0S100K	59	25	34	100	CH
50S50K	31	15	16	88	CL
70S30K	24	15	9	83	CL
85S15K	19	15	4	79	CL-ML
98S02K	18	NP	NP	75	ML

注:  $w_L$  为液限,  $w_p$  为塑限,  $I_p$  为塑性指数, 细粒: <0.075 mm。

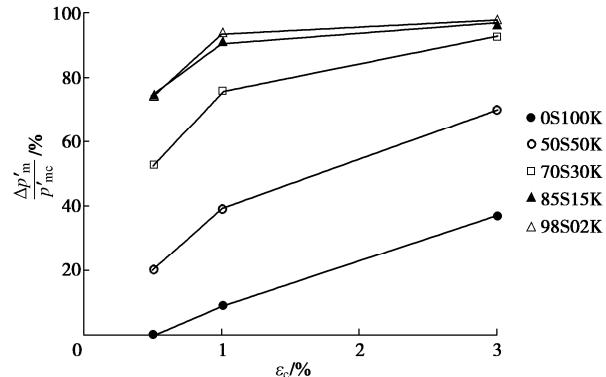


图 7 不同塑性土体受扰动后有效应力降低程度图<sup>[36]</sup>

Fig. 7 Diagram of degree of effective stress reduction in soils with different plasticities under disturbance

Donohue 等<sup>[14]</sup>及 Karlrud 等<sup>[9]</sup>同样发现: 取样扰动对于普通软黏土只影响其应力路径初始的偏转方向, 而对于低塑性粉质黏土, 取样扰动影响使土体的力学行为由“剪缩性”转变为“剪胀性”, 表明取样扰动对低塑性粉质黏土的影响更加显著。

目前对取样扰动影响的研究主要针对纯黏土, 对于粉土、粉质黏土等低塑性土体的取样扰动宏微观影响研究仍十分有限, 且缺乏对内在机理的探讨与分析。笔者认为: 高塑性黏土颗粒很小, 接触数较多, 颗粒

间的化学键与斥力主要作为土骨架来承受外部荷载, 土体表现为更灵活的线弹性弹簧, 有能力在更大剪切应变下保持稳定, 因此不容易受到扰动; 而低塑性土体颗粒较大, 粒间接触数较少, 重力及颗粒间的摩擦发挥承担外部荷载的主导作用, 使其在较小应变范围下颗粒就开始发生滑动, 产生永久变形, 使其更容易受到扰动。以上分析需要更多针对低塑性中间土体的宏微观力学试验结果加以佐证。

### 3 取样扰动程度的评估方法

目前最常用的土样质量评估方法主要基于: ①土体初始刚度为一般基于固结至原位应力后土体产生的应变及孔隙比变化; ②土体小应变(屈服前)及大应变(屈服后)下力学行为的对比; ③对土体剪切波速及吸力的量测。

#### 3.1 基于土体初始刚度评估

##### (1) $\varepsilon_a$ 指标

1979年, Andresen<sup>[22]</sup>将土体 $K_0$ 固结至原位竖向有效应力 $\sigma'_v$ 时所产生的轴向应变 $\varepsilon_a$ 作为评估取样质量的指标。轴向应变越大, 代表土样质量越差。

##### (2) $\varepsilon_{v0}$ 指标

Tezaghi等采用Andresen<sup>[22]</sup>的方法<sup>[23]</sup>, 提出“specimen quality designation (SQD)”的概念, 基于土体再固结体变 $\varepsilon_{v0}$ 将土样质量分为从A(最好)到E(最差)的5个等级。

##### (3) $\Delta e/e_0$ 指标

1997年, Lunne等<sup>[7]</sup>针对挪威软土提出基于孔隙比变化的土样质量评价标准:  $\Delta e/e_0$ , 其中 $e_0$ 是初始孔隙比,  $\Delta e$ 为将土样固结至原位竖向有效应力下的孔隙比变化, 并根据 $\Delta e/e_0$ 值将土样质量分为“very good to excellent” “good to fair” “poor” 和 “very poor” 4个等级(表3)。由于 $\Delta e/e_0$ 准则进行了归一化处理, 相比体积应变法则可以更准确地反映扰动影响程度。目前该准则是应用最为广泛的土样质量评价准则。

表3  $\Delta e/e_0$  土样质量评价指标<sup>[7]</sup>

Table 3 Sample quality evaluation based on  $\Delta e/e_0$

OCR=1~2	OCR=2~4	评级
<0.04	<0.03	very good to excellent
0.04~0.07	0.03~0.05	good to fair
0.07~0.14	0.05~0.10	poor
>0.14	>0.10	very poor

##### (4) $D_{sd}$ 指标

Hong等<sup>[24]</sup>于2007年基于孔隙指数 $I_v$ 的概念, 提出 $D_{sd}$ 指标评估敏感黏土的土样质量, 该指标将土体质量范围分为0(完全无扰动)~100%(土体完全重塑), 其定义如图8所示。

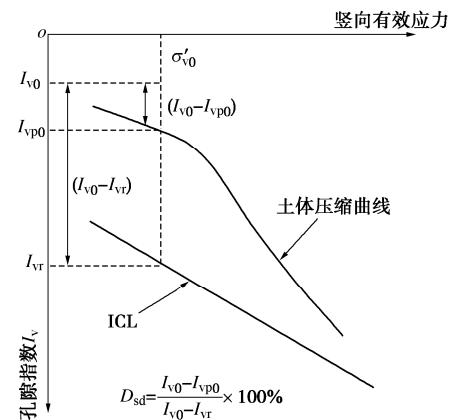


图8 基于孔隙指数的土样质量评价指标<sup>[24]</sup>

Fig. 8 Indices of sample quality evaluation based on void index

##### (5) $\frac{C_{CLB}}{C_{CLR}}$ 指标

Hong等<sup>[25]</sup>在Butterfield<sup>[26]</sup>的研究基础上, 针对双对数坐标中土体压缩曲线呈双直线的特性提出土体扰动度的概念:

$$SD = \frac{C_{CLB}}{C_{CLR}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $C_{CLB}$  和  $C_{CLR}$  分别为扰动样和重塑样屈服前  $\ln(1+e)$ -lgp 坐标中压缩曲线的斜率(图9)。基于该指标, 土体完全未受到扰动时 SD 为 0, 结构完全被破坏时, SD 为 100%。

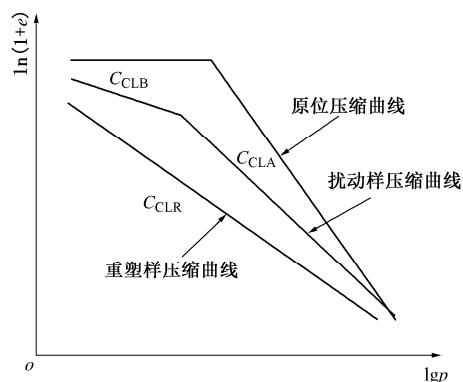


图9 修正体积压缩法扰动度定义<sup>[25]</sup>

Fig. 9 Definition of modified volume compression method

#### 3.2 基于土体小应变及大应变力学行为评估

##### (1) $M_0/M_L$ 指标

Karlsrud等<sup>[9]</sup>提出用土体最大最小压缩模量的比值 $M_0/M_L$ (图10)作为另一评估取样质量的参数。如前所述, 取样扰动越小, 土体小应变下的压缩模量 $M_0$ 越大, 大应变下压缩模量 $M_L$ 越小, 二者比值越大。

##### (2) $C_r/C_c$ 及 $C_{rw}/C_{cw}$ 指标

DeJong等<sup>[27]</sup>提出的 $C_r/C_c$ 及 $C_{rw}/C_{cw}$ 指标分别代表 $e$ -lgp坐标系下土体压缩曲线初始段与自然压缩段斜率比值以及功坐标系下土体压缩曲线初始段与自然压缩段的斜率比值。其中 $C_{rw}/C_{cw}$ 指标经验证可适用于

不同塑性土体的质量评估。

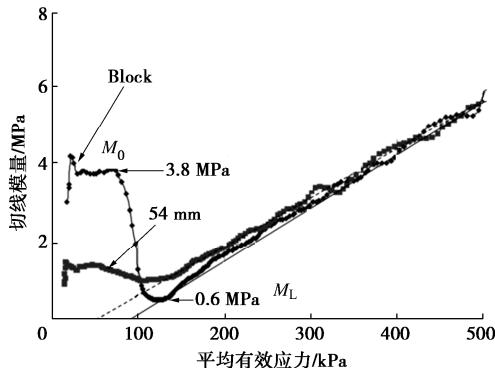


图 10  $M_0/M_L$  指标定义<sup>[9]</sup>

Fig. 10 Definition of  $M_0/M_L$

### 3.3 基于土体剪切波速与吸力

以上土样质量评价指标都是基于室内三轴或固结试验进行，存在试验耗时长等问题。随着土工试验技术的发展，以测定土体剪切波速、吸力为主的快速、无损评估土样质量的试验方法逐渐被认可。

(1) 剪切波速指标： $v_{vh} / v_{in-situ}$

目前基于土体剪切波速的研究主要是将经历取土扰动后的软黏土在现场<sup>[15]</sup>或实验室<sup>[17]</sup>使用弯曲元的方法测定土体剪切波速，并与通过原位测试方法（CPTU, SCPTU）获得的天然地层中土体剪切波速对比，基于扰动前后土体剪切波速的比值评估土样质量。

典型结果如图 11 所示，图中  $v_{SCPTU}$  和  $v_{vh}$  分别代表运用 SCPTU 和弯曲元获得的取土扰动前后土体剪切波速值，可以看出，取土扰动会使土体剪切波速下降，块状土样的剪切波速值最接近天然土层中的土体波速值，其比值( $v_{vh} / v_{in-situ}$ )在 0.7~0.8，固定活塞取样管土样的比值为 0.65~0.7，自由活塞取样管土样的比值只有 0.3~0.5，而完全重塑土体的比值只有 0.1~0.2。

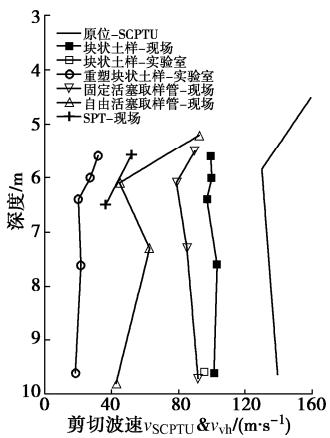


图 11 通过 SCPTU 和弯曲元在不同样品上测量的土体剪切波速剖面图<sup>[15]</sup>

Fig. 11 Measured shear wave velocity profiles of different samples using SCPTU and bending elements

(2) 吸力与剪切波速结合指标： $L_{vs}-L_u$

Donohue 等<sup>[14]</sup>将土体的无侧限剪切波速(原状土： $v_{s0}$ ；重塑土： $v_{s-remoulded}$ )和基质吸力  $u_r$  结合并提出了一种新的软黏土土样质量评价的经验准则：

$$L_{vs} = \frac{v_{in-situ} - v_{s0}}{v_{in-situ} - v_{s-remoulded}}, \quad (3)$$

$$L_u = \frac{0.2\sigma'_{v0} - u_r}{0.2\sigma'_{v0}}. \quad (4)$$

研究中基于该准则对 3 个地区的软黏土取样质量进行了评估，其结果与  $\Delta e / e_0$  准则获得的结果具有较高的一致性。

除以上评估指标外，Tsuchida 提出：将土样的无侧限压缩强度  $s_{u(q_0)}$  与将土体固结至原位有效应力后得到的强度  $s_{u(scu)}$  进行对比来评估土样质量<sup>[28]</sup>。但其通过无侧限抗压强度定义土体不排水强度的方法并没有得到其他国家学者的认可，在此不进行过多介绍。

### 3.4 现存土样质量指标存在的问题

一方面，现存土样质量评估指标仅依靠室内试验，缺乏与实际工程之间的联系。另一方面，目前大部分评估指标都只适用于纯黏土，对于粉土、粉质黏土等低塑性土体的适用性存疑。如在很多研究<sup>[21, 27]</sup>中， $\Delta e / e_0$  将经历较高程度扰动后的低塑性土体依然评价为第一或第二评级。Carroll 等<sup>[29]</sup>发现在某些低塑性粉土的实际钻孔取样过程中可能出现排水现象，导致土体致密化，产生极小的  $\Delta e / e_0$  值，也证实了  $\Delta e / e_0$  准则并不适用于低塑性黏土。因此，建立可考虑土体性质的统一质量评价体系仍是众多学者面临的挑战。

## 4 减少取样扰动的措施

### 4.1 减少应力释放——尽快进行试验以维持吸力

杨守华等<sup>[30]</sup>最先通过在土体中部埋设小型压力传感器，将土体  $K_0$  固结后再将偏应力卸除，之后保持不变监测土体残余有效应力变化，结果表明：土体残余有效应力随着贮存时间的增长而逐渐消散，在 20 d 时土体残余有效应力仅为卸荷瞬时的 18%。因此，取土后应尽快进行试验，以减少应力释放的影响，测得较为可靠的结果。

### 4.2 减少附加扰动——改善取土方法及取土器形式

取土附加扰动的程度主要由取土方法和取土器结构形式控制。国外对于不同取土方法及取土器形式对土体的扰动作用研究较多，在目前国际公认取样质量最好的 Sherbrooke sampler<sup>[31]</sup>问世之后，Rochelle 等<sup>[32]</sup>在 1981 年开发了一种同样是大尺寸（内径 200 mm）的钻孔取样器，名为“Laval sampler”，且通过对比发现 Laval sampler 与块状取土方式获得的土样质量基本一致。Tanaka 等<sup>[33]</sup>对几种不同类型的取土器进行了评估，发现使用日本标准取样器（JPN：内径 75 mm）

获得的黏土样品质量与 Laval 取样器获得的样品质量较好且都与块状取土质量大致相等, 但 Shelby 取土器(内径 72 mm)和 ELE100 类型取土器(内径 101 mm)取样质量较差。

国内对于取土扰动的研究较少, 研究成果主要集中在取土器尺寸<sup>[34]</sup>与取土器形式<sup>[35]</sup>对软黏土扰动影响程度的对比等。一般认为, 活塞固定、管壁越薄、径厚比越大、尖端倾角越小的取样器取土质量越好。

#### 4.3 补偿法——室内再固结方法

取土过程中对土体的力学扰动无法从源头上避免, 因此一些学者提出在室内试验中将土体再固结来弥补取土扰动造成的影响, 力求恢复土体在天然土层中的力学状态。目前使用最广泛的室内再固结方法有再压缩方法(recompression)<sup>[36]</sup>和 SHANSEP(stress history and normalized soil engineering properties)<sup>[37]</sup>方法两种。

##### (1) 再压缩方法(recompression)

再压缩方法由 Bjerrum 在 1973 年提出<sup>[36]</sup>, 他认为只要试验前土样的内部膨胀处于弹性阶段, 由力学因素引起的扰动相对较小, 在试验前就可以通过将土样再固结到原位应力条件( $\sigma'_{v_0}$ ,  $K_0\sigma'_{v_0}$ )下来消除膨胀产生的扰动影响。

##### (2) SHANSEP(stress history and normalized soil engineering properties)方法

SHANSEP 名为“应力历史及归一化土体工程特性”, 最先由 Ladd<sup>[37]</sup>提出, 该方法源自于取土扰动对土体压缩曲线的影响。如图 12 所示, 在初始压缩线(VCL)上的自然沉积土体经历卸载时沿线 a 移动, 伴随着有效应力降低、土体膨胀、土体变为超固结状态, 再固结后, 土体状态沿线 b 移动回 VCL。实际上土体膨胀造成的土体孔隙比变化很小, 可以忽略不计, 因此, 可以认为超固结土体的压缩曲线一直在 VCL 下方。位于图 12 中①点的自然固结土体在经历取土扰动后, 状态变为②点, SHANSEP 方法为了消除取土扰动影响, 通常将土样固结至 1.5~2.0 倍的先期固结压力, 目的是让土体状态回到 VCL 上, 以完全消除扰动造成的超固结影响。

##### (3) 室内再固结方法评估及对比分析

两种方法都采用  $K_0$  固结的方式, 再压缩方法将土样固结至原位应力状态, 对应于图 12 中的⑤点; 而 SHANSEP 方法将土样固结至几倍的先期固结压力下来使得土体状态达到 VCL, 对应于图 12 中的③点。使用再压缩方法的土体由于状态仍在 VCL 下方, 土体仍处于超固结状态, 在不排水剪切中表现出“剪胀”的力学特性, 因此很多研究中发现该方法会使所测土体不排水剪切强度偏大<sup>[8, 20, 38]</sup>。使用 SHANSEP 方法

的土体可以消除取样扰动造成的超固结影响, 但该方法将土体在大于先期固结压力的应力条件下固结, 会对土体结构性造成一定的破坏<sup>[8, 38]</sup>, 因此会使得所测土体强度偏小。

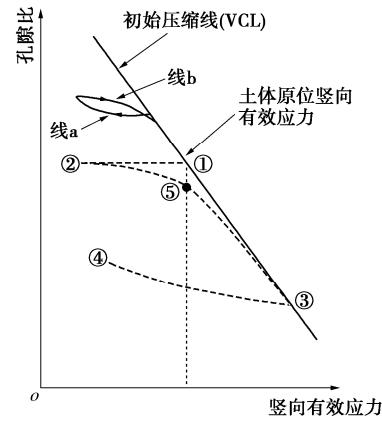


图 12 取土扰动影响示意图<sup>[37]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of sampling disturbance effects on compression curve of soils

总结而言, 如果土体灵敏度较低, 结构性不强, 可以使用 SHANSEP 方法; 而对于灵敏度高、结构性较强的土体, 则应使用再压缩方法。两种方法都旨在补偿取土过程中的力学扰动影响, 无法恢复扰动破坏的土体结构。此时只能通过改善取土方法及取土器形式尽可能在取土过程中减少扰动影响。

## 5 结论及展望

目前, 对于取样扰动作用及影响方面已有了较为深刻的认识, 但在系统、定量地揭示取样扰动宏观规律和微观机制、评估土样质量等方面, 还有一些工作亟需开展。

(1) 软黏土取样扰动影响的微观机理研究及宏观参量联系的构建。取样扰动造成的软黏土结构变化的微观试验证据目前仍较少, 且大多数微观研究停留在定性阶段。如何将扰动过程中土体的孔隙分布、颗粒滑移等微观参量与土体体变、有效应力等宏观参量建立关联对于理解取样扰动的影响机制至关重要。

(2) 取样扰动对低塑性粉质黏土影响的系统研究以及针对不同性质土体的统一土样质量评价体系构建。目前关于软黏土取样扰动的研究大多针对于国外塑性较高的纯黏土, 对于我国东南沿海广泛分布的低塑性粉质黏土的研究十分匮乏。且现存的土样质量评价指标对于粉质黏土、粉土等低塑性土体可能会给出不合理的评价等级。因此, 建立针对不同性质土体的统一土样质量评价体系仍是众多学者面临的挑战。

(3) 土体评估指标与实际工程的结合。目前已有的土样质量评估指标大都仅依靠室内试验, 在实际工程

的应用程度较低。笔者认为, 可将不同取土方法下通过室内试验所测的土体不排水强度与地勘报告中的天然土体的不排水强度进行对比, 评估土样质量, 进而选取合适的强度参数应用在实际工程中, 增强室内试验与实际工程的关联性。

(4) SHANSEP 方法对于中国不同地区土体的适用性研究。SHANSEP 方法对于灵敏度低、结构性不强的软黏土不失为一种可取的室内再固结方法, 然而目前该方法在中国的应用及研究成果较少。研究 SHANSEP 方法对我国土体的适用性对于丰富室内试验流程、获取准确的土体参数具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [2] HVORSLEV M J. Subsurface exploration and sampling of soil for civil engineering purposes[C]// Waterways Experiment Station. Vicksburg, 1949.
- [3] SKEMPTON A W, SOWA V A. The behaviour of saturated clays during sampling and testing[J]. Géotechnique, 1963, 13(4): 269-290.
- [4] LADD C C, LAMBE T W. The strength of “undisturbed” clay determined from undrained tests[M]// Laboratory Shear Testing of Soils. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2009: 342-342-30.
- [5] BALIGH M M, AZZOUZ A S, CHIN C T. Disturbances due to “ideal” tube sampling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(7): 739-757.
- [6] BALIGH M M. Strain path method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(9): 1108-1136.
- [7] LUNNE T, BERRE T, STRANDVIK S. Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay[C]// Recent developments in soil and pavement mechanics, Rio de Janeiro, Brazil, 1997: 81-102.
- [8] LUNNE T, BERRE T, ANDERSEN K H, et al. Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(7): 726-750.
- [9] KARLSRUD K, HERNANDEZ-MARTINEZ F G. Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(12): 1273-1293.
- [10] RUTLEDGE P C. Relation of undisturbed sampling to laboratory testing[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 109(1): 1155-1183.
- [11] SANTAGATA M C, GERMAINE J T. Sampling disturbance effects in normally consolidated clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(12): 997-1006.
- [12] 顾晓强, 杨 峻, 黄茂松, 等. 砂土剪切模量测定的弯曲元、共振柱和循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 740-746. (GU Xiaoqiang, YANG Jun, HUANG Maosong, et al. Combining bender element, resonant column and cyclic torsional shear tests to determine small strain shear modulus of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 740-746. (in Chinese))
- [13] 王建华, 程国勇, 张 立. 取样扰动引起土层剪切波速变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2604-2608. (WANG Jianhua, CHENG Guoyong, ZHANG Li. Study on variation of shear wave velocity caused by sampling disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2604-2608. (in Chinese))
- [14] DONOHUE S, LONG M. Assessment of sample quality in soft clay using shear wave velocity and suction measurements[J]. Géotechnique, 2010, 60(11): 883-889.
- [15] HORNG V, TANAKA H, OBARA T. Effects of sampling tube geometry on soft clayey sample quality evaluated by nondestructive methods[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(1): 93-107.
- [16] DONOHUE S, LONG M. Suction measurements as indicators of sample quality in soft clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 32(3): 286-296.
- [17] DONOHUE S, LONG M. Suction measurements as indicators of sample quality in soft clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 32(3): 286-296.
- [18] PINEDA J A, LIU X F, SLOAN S W. Effects of tube sampling in soft clay: a microstructural insight[J]. Géotechnique, 2016, 66(12): 969-983.
- [19] KONNI G R. Influence of soil properties and composition, and applied hydraulic pressures on sample quality of Pusan clays[J]. European Journal of Engineering and Technology Research, 2017, 2(1): 32-38.
- [20] SANTAGATA M, GERMAINE J T. Effect of OCR on sampling disturbance of cohesive soils and evaluation of laboratory reconsolidation procedures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 459-474.
- [21] LUKAS W G, DEGROOT D J, DEJONG J T, et al.

- [Undrained shear behavior of low-plasticity intermediate soils subjected to simulated tube-sampling disturbance[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(1): 04018098.]
- [22] ANDRESEN A. The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials, state of the art on current practice of soil sampling[C]// Progressing of The International Symposium of Soil Sampling, Singapore, 1979.
- [23] HATHEWAY A. Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd Edition[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1996.
- [24] HONG Z S, HAN J. Evaluation of sample quality of sensitive clay using intrinsic compression concept[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 83-90.
- [25] HONG Z S, ONITSUKA K. A method of correcting yield stress and compression index of ariake clays for sample disturbance[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(2): 211-222.
- [26] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils (an advance on  $e-lgp'$ )[J]. Géotechnique, 1979, 29(4): 469-480.
- [27] DEJONG J T, KRAGE C P, ALBIN B M, et al. Work-based framework for sample quality evaluation of low plasticity soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(10): 04018074.
- [28] TSUCHIDA T. Evaluation of undrained shear strength of soft clay with consideration of sample quality[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(3): 29-42.
- [29] CARROLL R, LONG M. Sample disturbance effects in silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(9): 04017061.
- [30] 杨守华, 魏汝龙. 土样扰动对正常固结黏土强度及压缩特性的影响[J]. 水利水运科学研究, 1992(1): 73-83. (YANG Shouhua, WEI Rulong. Influence of sampling disturbances on strength and consolidation behavior of normally consolidated clay[J]. Hydro-Science and Engineering, 1992(1): 73-83. (in Chinese))
- [31] LEFEBVRE G, POULIN C. A new method of sampling in sensitive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 226-233.
- [32] ROCHELLE P L, SARRAILH J, TAVENAS F, et al. Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(1): 52-66.
- [33] TANAKA H, SHARMA P, TSUCHIDA T, et al. Comparative study on sample quality using several types of samplers[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(2): 57-68.
- [34] 高大钊, 张少钦, 姜安龙, 等. 取样扰动对土的工程性质指标影响的试验研究[J]. 工程勘察, 2006, 34(3): 6-10. (GAO Dazhao, ZHANG Shaoqin, JIANG Anlong, et al. Experimental study on influence of sampling disturbance to indices for engineering properties of soils[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(3): 6-10. (in Chinese))
- [35] 李高山, 潘永坚, 周江锋. 取样方法对饱和软土物理力学指标影响机理研究[J]. 工程勘察, 2019, 47(3): 9-16. (LI Gaoshan, PAN Yongjian, ZHOU Jiangfeng. Study on the influence mechanism of sampling on physical and mechanical indexes of saturated soft soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(3): 9-16. (in Chinese))
- [36] BJERRUM L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others)[C]// The 8th International Conference on Computational Mechanics of Solids and Structures. Singapore, 1973.
- [37] LADD C C, FOOTT R. New design procedure for stability of soft clays[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, 100(7): 763-786.
- [38] TANAKA H, SHIWAKOTI D R, TANAKA M. Applicability of shansep method to six different natural clays, using triaxial and direct shear tests[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(3): 43-55.