

软土三轴固结不排水抗剪强度性状及临界状态试验研究

肖健¹, 殷杰²

(1. 江苏城乡建设职业学院 土木工程学院, 常州 213147; 2. 江苏大学 土木工程与力学学院, 镇江 212013)

摘要: 为研究软土三轴固结不排水强度及临界状态, 针对原状土和重塑土试样进行一维固结压缩试验、三轴 K_0 固结和等向固结不排水剪切试验, 对比分析不同固结方式下土样的固结不排水抗剪强度特性, 并基于土样的临界状态理论, 考虑各向异性的影响, 提出重塑土 K_0 固结不排水抗剪强度预测公式。试验结果表明: 原状土试样的压缩曲线具有明显的转折点, 重塑土试样的压缩系数随含水率的增加线性增大; 土样在 K_0 固结过程中内部形成侧向约束状态, 剪切过程中相较于等向固结表现出更大的抵抗变形的能力, 同一条件下试样的 K_0 固结不排水抗剪强度大于等向固结不排水抗剪强度, 重塑土 K_0 固结不排水强度与含水率呈线性负相关; 考虑各向异性修正重塑土样 K_0 固结不排水抗剪强度预测公式, 公式计算值与试验值较吻合。研究揭示了软土在不排水条件下的强度统一演化机制, 量化预测软土在不排水剪切下的最终强度与变形, 为地基承载力、边坡稳定等分析提供理论依据。

关键词: 软土; 不排水抗剪强度; 含水率; 各向异性; 临界状态

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0078-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.013

Experimental Study on the Undrained Shear Strength Characteristics and Critical State of Soft Soil in Triaxial Consolidation Test

XIAO Jian¹, YIN Jie²

(1. Department of Civil Engineering, Jiangsu Urban and Rural Construction Vocational College, Changzhou 213147, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To investigate the triaxial consolidated undrained strength and critical state of soft soil, one-dimensional consolidation tests, triaxial K_0 consolidation, and isotropic consolidated undrained shear tests were conducted on both undisturbed and remolded soil samples. The undrained shear strength characteristics of the soil samples under different consolidation methods were comparatively analyzed. Additionally, based on the critical state theory and considering anisotropic effects, a prediction formula for the K_0 consolidated undrained shear strength of remolded soil was proposed. The test results indicate that the compression curves of the undisturbed soil samples exhibit an evident turning point, whereas the compression coefficient of the remolded soil samples increases linearly with rising water content. During the K_0 consolidation process, internal lateral restraint conditions are developed within the soil samples, which consequently demonstrate greater deformation

项目来源: 国家自然科学基金面上项目 (51978315); 国家自然科学基金 (41402251); 江苏省高职院校工程技术研究开发中心-智能建造3D技术应用; 江苏城乡建设职业学院智能建造科研平台。

作者简介: 肖健 (1991—), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 土的基本特性。

收稿日期: 2025-02-17

resistance during shear compared to isotropic consolidation. Under identical conditions, the K_0 consolidated undrained shear strength of the samples is higher than that of isotropically consolidated samples. Furthermore, the K_0 consolidated undrained shear strength of remolded soil displays a linear negative correlation with water content. After incorporating anisotropy corrections into the prediction formula for the K_0 consolidated undrained shear strength of remolded soil, the calculated results closely align with the experimental values. This study reveals the unified strength evolution mechanism of soft clay under undrained conditions, enabling quantitative prediction of its final strength and deformation during undrained shearing, thereby providing a theoretical basis for analyzing foundation bearing capacity and slope stability.

Key words: soft soil; undrained shear strength; water content; anisotropy; critical state

0 引言

在软土地基上进行快速施工时, 土体中的孔隙水压力来不及消散, 孔隙水富存于土体的孔隙之中, 此时土体处于不排水状态, 在外荷载的作用下土体易发生较大的突发性, 因此还需要对软土的力学特性进行全面和深入的研究。

众多学者针对土不排水抗剪强度进行了大量的试验研究。王永昊等^[1]研究发现重塑红黏土的不排水抗剪强度与围压呈线性正相关, 干密度越高强度越大; 李浩等^[2]对海洋原状土研究表明, 当黏粒含量大于 30% 时, 土体表现出明显的应变软化特性, 破坏后的强度明显降低; 彭杨旭等^[3]通过砂质黏土强度的参数研究发现含水率显著影响砂质黏土的内摩擦角和黏聚力, 在不同干密度条件下均表现出明显的函数相关性; 邓蓉^[4]对软土进行研究也得出类似的结论; Lu 等^[5]研究表明, 不排水抗剪强度与围压和固结程度有关; Ding 等^[6]研究结果表明, 土样的不排水抗剪强度曲线由两条直线组成, 屈服后近似为一条过原点的直线; 纠永志等^[7]通过试验提出了土样 K_0 系数和不排水抗剪强度计算公式; 孟祥传等^[8]认为土样的不排水强度与固结方式、剪切方式和超固结比相关。此外, 国内外学者在大量试验的基础上开辟了土的临界状态理论^[9-10], 也基于临界状态建立模型对不同土样进行了研究^[11-12]。刘莹等^[13]对不同超固结状态的黏土, 根据应力破坏点绘制出临界状态线, 拟合出强度预测公式; Gao 等^[14]基于临界状态理论对特定荷载条件下土样不排水抗剪强度进行了推导; Wei 等^[15]研究了有效固结应力、含水合物饱和度对不排水抗剪强度的影响, 并基于临界状态理论, 建立了含水合物细颗粒沉积物的不排水抗剪强度预测模型。需要指出的是, 目前针对

土样不排水抗剪强度的试验主要集中在土样三轴等向固结不排水剪切试验或者三轴 K_0 固结不排水剪切试验, 将两种固结方式进行对比研究的相对较少。且天然土体为 K_0 固结状态。等向固结试验过程中难以模拟土体的天然受力状态。且较多学者是在等向固结试验的基础上探讨土样的临界状态, 而实际工程中的土样因固结过程中的环境和应力历史影响, 呈现 K_0 固结状态, 由此推导的强度理论公式与实际强度值略有偏差。

通过对相同初始含水率原状土试样和不同初始含水率重塑土试样进行三轴不排水剪切试验, 对比分析 K_0 固结和等向固结剪切方式下土样的不排水抗剪强度特性, 并基于土体的临界状态, 提出重塑土 K_0 固结不排水抗剪强度的预测公式。

1 土样基本特性

试验采取土样时, 使用大直径 PVC 管一端削尖制备成取土容器进行获取原状土试样 (直径 30 mm, 高度 30 mm)。取土点为某施工场地, 取土深度为 2.5 m, 取出的土体呈黄褐色, 测定各物理指标参数见表 1。根据土样如图 1 所示中的位置可以判断土样为液限数值较高的黏性土。

表 1 土的基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of soil

取样深度 /m	天然含水率 /%	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p	容重 /(kN/m ³)	相对密度 G_s
2.5	48.6	56.4	28.6	27.8	17.5	2.71

2 试验方案

2.1 一维固结压缩试验

将原状土样从容器中取出, 用环刀制样, 测定试样的一维固结压缩性状, 并将同批次的原状土样烘干后碾碎成粉末状, 过 0.5 mm 筛后加水调配成初

岩土力学

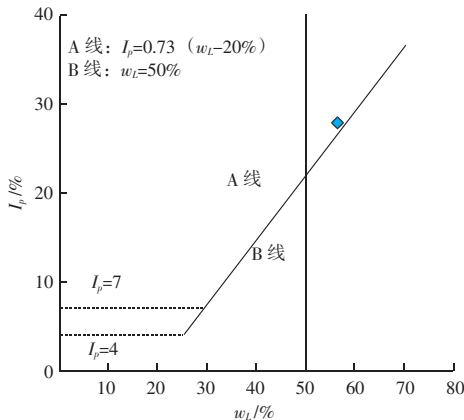


图1 土样塑性图
Fig.1 Plasticity chart

始含水率为 47.5%、49.8%、53.1% 的重塑土试样。根据土工试验方法标准，使用一维固结仪开展压缩试验，竖向固结压力由 12.5 kPa 加压至 1 600 kPa。

2.2 三轴固结不排水剪切试验

试验采用全自动应力路径三轴仪，通过其 \$K_0\$ 固结模块测得原状土试样的 \$K_0\$ 系数为 0.59，\$K_0\$ 系数的理论计算为公式 (1) 所示。加载过程中设定试样的固结压力为 25、50、100、200 kPa，分别对重塑土与原状土试样进行等向固结与 \$K_0\$ 固结试验，其中原状土增做一组 15 kPa 固结压力的试样。待试样固结稳定后，设定 0.073 mm/min 的剪切速率对试样进行固结不排水剪切试验，当试样的轴向应变达到 20% 时终止试验。

$$K_0 = \sigma_v / \sigma_h \quad (1)$$

三轴固结不排水剪切试验数据分析时，试样的应力状态可用偏应力 (\$\sigma_v - \sigma_h\$) 与有效均应力 \$p'\$ 关系表示，其中 \$p'\$ 可表示为：

$$p' = (\sigma_v + 2\sigma_h) / 3 = (1 + 2K_0) \sigma_v / 3 \quad (2)$$

3 试验结果与分析

3.1 一维固结压缩性状

对原状土试样和重塑土试样进行一维固结压缩试验，如图 2 所示（图中括号内参数表示不同重塑土试样的初始含水率）。三组重塑土试样的压缩曲线变化趋势一致，孔隙比均随固结压力的增大快速下降。原状土试样在先期固结压力 50 kPa 前后表现出显著的转折点，这表明天然沉积形成的颗粒排列和胶结作用在低压条件下具有较高的抗压缩能力。随

着竖向压力超过先期固结压力，胶结作用被破坏，土样表现为较高的压缩性，压缩曲线逐渐趋于重塑土的变化趋势，当竖向压力高于 1 000 kPa 时不同土样的压缩曲线逐渐趋于一点。原因是原状土的初始结构（如矿物胶结作用）在较低固结压力下能够承受外荷载，直到达到屈服压力后结构逐渐破坏。利用 Casagrande 法可获得原状土试样的先期固结压力为 50 kPa，大概位于曲线的转折点处。

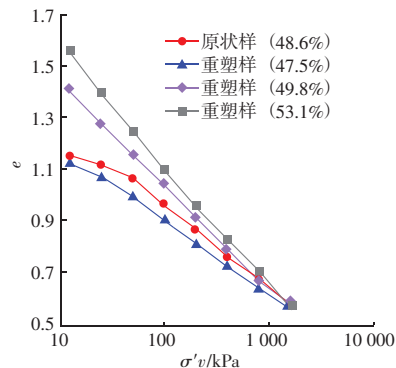


图2 土样压缩曲线图
Fig.2 Soil compression curve

为了分析不同初始含水率影响重塑土试样的压缩特性，试验中取竖向固结压力为 100、200 kPa 对应的孔隙比计算不同试样的压缩系数。图 3 显示了不同重塑土试样的压缩系数与含水率的关系曲线，随着含水率的增加，土颗粒间润滑效应变大，从图中压缩系数的变化趋势可看出重塑土试样的压缩系数随着试样的含水率的增加呈近似线型增长。

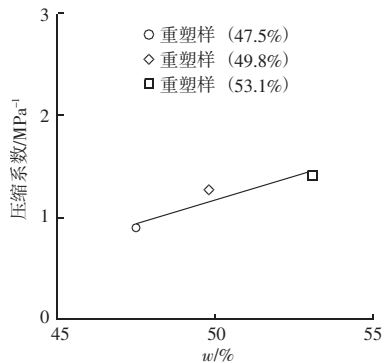


图3 压缩系数与含水率关系图
Fig.3 Relationship between compressibility coefficient and water content

3.2 三轴固结不排水抗剪强度性状

根据试样剪切过程中应力应变曲线的变化趋势确定固结不排水抗剪强度数值 \$S_u\$。具体确定方法如下：若土样在固结不排水剪切过程中，轴向应变在

达到 15% 前出现最大偏应力 $(\sigma_v - \sigma_h)_{\max}$ 时, 即土样呈现应变软化趋势时, 取 $S_u = 0.5 (\sigma_v - \sigma_h)_{\max}$, 未出现最大偏应力时, 即土样呈现应变硬化趋势时, 取 $S_u = 0.5 (\sigma_v - \sigma_h)_{15\%}$, 图 4 为试样的固结不排水抗剪强度对比图。

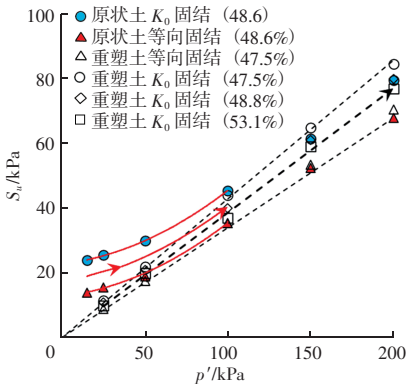


图 4 固结不排水抗剪强度对比图

Fig. 4 Comparison chart of consolidated undrained shear strength

由图 4 可知, 原状土与重塑土试样的固结不排水抗剪强度总趋势与有效均应力呈正相关关系。重塑土试样的固结不排水抗剪强度变化趋势为图中虚线箭头所示, 与有效均应力呈线性增大关系。试样的固结不排水抗剪强度与初始含水率和固结压力相关, 同一条件下与初始含水率的增加呈负相关关系, 与固结压力的增加呈正相关关系。原状土试样三轴固结不排水抗剪强度曲线大致分为三个阶段, 前两阶段为实线箭头所示, 最后阶段等同于虚线箭头的变化趋势。通过公式 (2) 可换算出试样的三轴屈服压力为 36 kPa。当有效均应力低于 36 kPa 时, 随着固结压力的增加, 试样的固结不排水抗剪强度增幅不明显。原因是原状土在天然沉积过程中固体颗粒被矿物质胶结形成一定的排列方式, 颗粒间的相互作用构成了土体的初始结构, 增强了土样的初始强度; 当固结压力未达到三轴屈服压力时, 初始结构能抵消部分荷载作用下的变形, 因此试样的不排水抗剪强度增加不明显。当有效均应力在 36~100 kPa 时, 因土样结构性作用在荷载作用下逐渐衰减, 抵抗结构变形能力逐渐减弱, 试样的固结不排水抗剪强度明显增大。当有效均应力高于 100 kPa 时, 试样的结构性基本丧失, 力学特性等同于重塑土试样, 故试样的固结不排水抗剪强度变化趋势与重塑土相同。

为研究不同的固结方式对试样的不排水抗剪强

度的影响, 这里定义两者的抗剪强度比参数 k^* , k^* 为相同含水率试样的 K_0 固结与等向固结不排水抗剪强度的比值, 得到 k^* 与 p' 的关系图, 如图 5 所示。

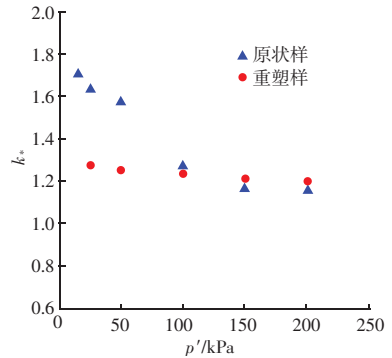


图 5 固结不排水抗剪强度比参数对比图

Fig. 5 Comparison chart of consolidated undrained shear strength ratio

由图 5 可知, 重塑土试样的 k^* 值在不同有效均应力下基本保持在 1.2 左右; 原状土试样的 k^* 值在有效均应力小于 100 kPa 时随着有效均应力的增加呈线性降低, 有效均应力超过 100 kPa 后 k^* 值随有效均应力增加逐渐平缓, 且与重塑土试样变化趋势相似。图中原状土与重塑土试样的 k^* 值均大于 1, 表明试样在同一有效均应力下 K_0 固结不排水抗剪强度大于等向固结不排水抗剪强度。原因是土样在 K_0 固结过程中, 随着竖向应力逐渐增加, 水平方向应力保持不变, 这种不对称的应力路径使土体内部形成侧向约束状态, 在剪切过程中表现出更大的抵抗变形的能力。具体而言, K_0 固结过程中, 随着竖向应力的增加, 水平方向应力保持不变, 这种应力路径使得土体内部颗粒间接触力增强, 从而提高了抗剪强度。相比之下, 等向固结状态下土样缺乏类似的侧向约束, 因此其抗剪强度相对较低。

为进一步表征不同固结方式对土样三轴固结不排水抗剪强度的影响规律, 令 $S_u' = S_u/p'$, 将有效均应力归一化。由图 6 可知, 原状土 S_u' 前期因结构性的影响随有效均应力的增加变化较大, 不同固结方式下的 S_u' 值在 0.35~1 之间, 结构性丧失后与重塑土类似, S_u' 值在 0.35~0.45 之间。

3.3 土的临界状态性状

众多学者对土体的临界状态研究结果表明, 剑桥模型可以用来表征土的弹塑性力学特性。考虑到土体的各向异性, 目前广泛使用修正剑桥模型来表

岩土力学

示土样的屈服状态，根据以上试验获得的数据绘制的屈服面轨迹图，如图 7 所示。

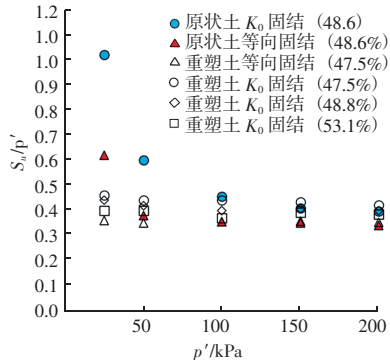


图 6 S_u/p' 与 p' 关系图

Fig. 6 Relationship between S_u/p' and p'

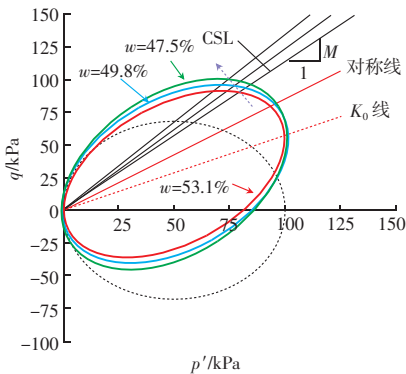


图 7 屈服面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the yield surface

图 7 中外侧的椭圆表示初始含水率为 47.5% 的土样，内侧初始含水率为 53.1% 的土样，中间初始含水率为 49.8% 的土样。当不考虑土样的各向异性时，椭圆以 p' 轴为对称轴的椭圆，为图中虚线表示。屈服面轨迹在 K_0 线处相交，随着试样初始含水率的降低， K_0 固结不排水屈服面围绕交点逐渐对称扩大。图中 CSL 线的斜率 M 也称为滑动摩擦系数，土样在剪切阶段破坏时的偏应力 q 的大小依赖于有效均应力 p' 和滑动摩擦系数 M 的变化。滑动摩擦系数 M 也表明了 q/p' 的界限值，这里的破坏指土样达到临界状态时的破坏点。随着试样含水率的减小，CSL 线与屈服面的交点按图示箭头逐渐向上旋转偏移，屈服面轨迹的最高点也逐渐向上偏移。这表明较低含水率试样具有更高的初始结构强度和抗剪强度。

根据土样试验过程中达到临界状态坏时偏应力 q 与有效均应力 p' 的比值关系，可得到 CSL 线的斜率

M ，计算公式见式 (3)。因临界状态土力学是针对重塑土而建立，讨论不同含水率重塑土试样 K_0 固结不排水剪切过程中 M 值与试样的含水率的关系，如图 8 所示。

$$q = Mp' \quad (3)$$

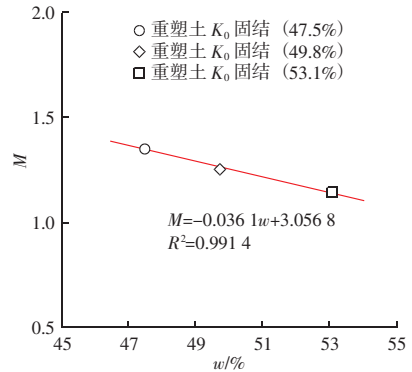
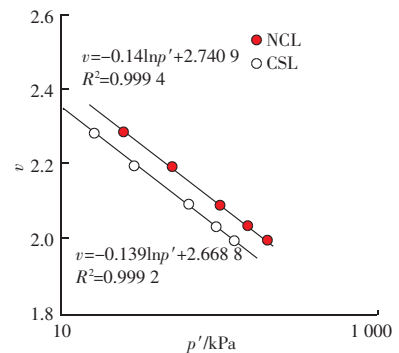


图 8 含水率与 CSL 线斜率关系图

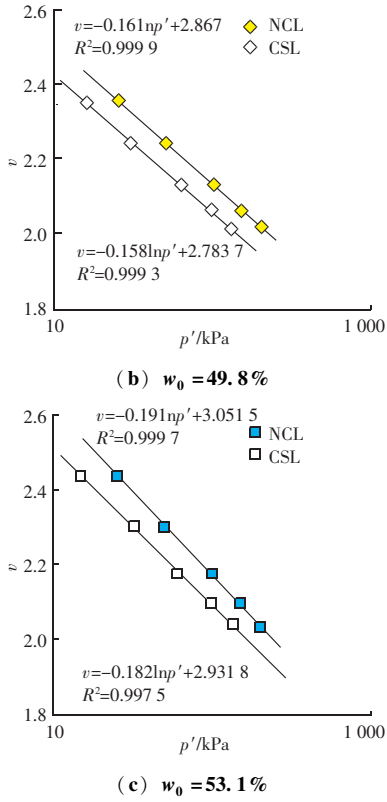
Fig. 8 Relationship between water content and the slope of the CSL

由图 8 可知，含水率为 47.5% 的试样 CSL 线的斜率 M 为 1.348，含水率为 49.8% 的试样 CSL 线的斜率 M 为 1.248，含水率为 53.1% 的试样 CSL 线的斜率 M 为 1.144。由图中曲线的变化关系可以看出，随着试样含水率的增加，CSL 线的斜率线性减小，也可以解释图 7 中随着含水率的减小，屈服面轨迹逐渐扩大，土体的强度也逐渐变大。

饱和重塑土黏土正常固结过程中，应力状态与土的体积状态一一对应。因试验为固结不排水剪切方式，剪切前后其体积不变，剪切完成后试样的孔隙比 e 即为试样 K_0 固结完成后的孔隙比。即试样临界状态线上孔隙比与对应的正常固结线上孔隙比相一致。图 9 为不同含水率试样的 K_0 固结不排水剪切试验中的 NCL 线与 CSL 线，图中比体积 v 用 $1 + e$ 表示。



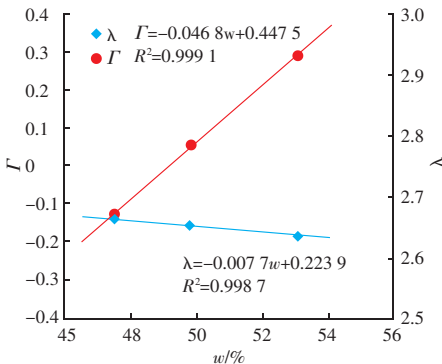
(a) $w_0 = 47.5\%$

图9 ν 与 p' 关系图Fig. 9 Relationship between ν and p'

在 $\nu \sim \ln p'$ 平面上可以表示为:

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \quad (4)$$

式中: Γ 为 $\nu \sim \ln p'$ 平面中 CSL 线中 ν 在 p' 为 1 kPa 时的截距; λ 为 CSL 线的斜率。由图 9 可知, $\nu \sim \ln p'$ 平面上 NCL 与 CSL 近似平行关系, 其比体积均随着有效均应力的增加呈线性减小。原因是随着有效均应力的增加, 土样中的孔隙被压缩逐渐减小, 土样逐渐密实。由 $\nu \sim \ln p'$ 关系曲线可得到 Γ 、 λ 与试样的含水率关系图, 如图 10 所示。

图 10 Γ 、 λ 与 w_0 关系图Fig. 10 Relationship between Γ 、 λ and w_0

由图 10 可知, 参数临界强度参数 Γ 与 λ 随土样初始含水率的增加呈正相关性, 参数 Γ 的变化趋势较大。根据 $\nu \sim \ln p'$ 平面中 NCL 线与 CSL 线几何关系, 饱和土样固结不排水剪切强度 S_u 可以根据以上参数用公式 (5) 计算^[16]:

$$S_u = \frac{M}{2} \exp\left(\frac{\Gamma - v}{\lambda}\right) \quad (5)$$

需要指出的是, 公式 (5) 是以各向同性土为基础建立的, 本次试验土样的固结方式为 K_0 固结。由图 7 可知, 实际屈服面对称线并非为 p' 轴, 考虑到各向异性对土样临界状态的影响, 利用各向异性系数 η_{NCL} ^[17-18] 修正 K_0 固结土样临界状态的滑动摩擦系数 M , 修正公式如下:

$$M^* = \sqrt{M^2 + \eta_{\text{NCL}}^2} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{NCL}}^2 = \frac{\eta_{K_0}^2 + 3\eta_{K_0} - M^2}{3} \quad (7)$$

式中: η_{K_0} 为 K_0 的斜率。固结不排水剪切试验过程中饱和土样的孔隙比 e , 可用以下公式计算:

$$e = wG_s \quad (8)$$

结合公式 (5) ~ 公式 (8), 拟合出重塑土 K_0 固结不排水抗剪强度预测公式:

$$S_u = \frac{1}{2} \sqrt{M^2 + \left(\frac{\eta_{K_0}^2 + 3\eta_{K_0} - M^2}{3}\right)^2} \cdot \exp\left(\frac{\Gamma - (1 + wG_s)}{\lambda}\right) \quad (9)$$

根据试验中的实测数值, 绘制预测公式计算值与试验实测值对比关系图, 如图 11 所示。

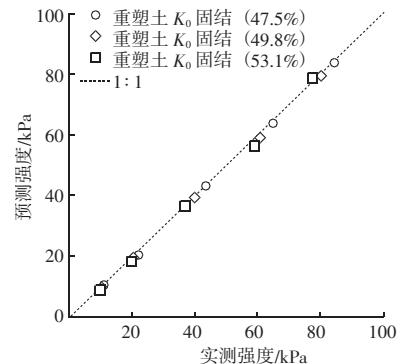


图 11 土样预测值与试验值对比

Fig. 11 Comparison between predicted and measured values for soil samples

岩土力学

由图 11 可知, 重塑土样 K_0 固结不排水预测强度与实测值较为吻合, 表明公式 (9) 可以较好的预测重塑土样的 K_0 固结不排水抗剪强度。

4 结论

通过对原状土和重塑土试样进行一轴固结压缩试验、三轴 K_0 固结和等向固结不排水剪切试验, 分析固结不排水抗剪强度特性, 得出以下结论:

(1) 原状土与重塑土压缩曲线差异较大, 当竖向压力高于先期固结压力后, 两者变化趋势相似, 竖向压力高于 1 000 kPa 后逐渐趋于一点, 重塑土试样的压缩系数随试样含水率的增大呈线性增加。

(2) 土样在 K_0 固结过程中内部形成侧向约束状态, 剪切过程中相较于等向固结表现出更大的抵抗变形能力, K_0 固结不排水抗剪强度值也较高, 重塑土 K_0 固结不排水抗剪强度随含水率的增加而减小。

(3) 基于临界状态理论, 提出重塑土 K_0 固结不排水抗剪强度预测公式, 经验证, 预测结果与试验值较吻合。

参 考 文 献

- [1] 王永昊, 徐兴倩, 赵熹, 等. 饱和重塑红黏土固结不排水三轴剪切特性及本构模型研究 [J/OL]. 水力发电, 2025, 51 (8): 115-123.
- [2] 李浩, 吴琪, 陈国兴, 等. 基于孔压静力触探的海洋细粒土不排水抗剪强度的评价方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46 (3): 428-437.
- [3] 彭杨旭, 任浩, 周圆超, 等. 砂质黏土固结不排水力学特征三轴试验研究 [J]. 四川建筑, 2024, 44 (5): 137-139.
- [4] 邓蓉. 福州地区饱和淤泥不固结不排水强度特性研究 [J]. 福建建筑, 2024, (5): 132-135.
- [5] LU Y, CHEN J, HUANG J, et al. Post-cyclic mechanical behaviors of undisturbed soft clay with different degrees of

- reconsolidation [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (16), 7612.
- [6] DING J, FENG X, CAO Y, et al. Consolidated undrained triaxial compression tests and strength criterion of solidified dredged materials [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018 (PT. 9): 1-10.
- [7] 纠永志, 黄茂松. 超固结软黏土的静止土压力系数与不排水抗剪强度 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (4): 951-957, 964.
- [8] 孟祥传, 刘润, 梁超, 等. 饱和黏土不排水抗剪强度特性研究 [J]. 土木工程学报, 2024, 57 (5): 86-98.
- [9] 费建波, 唐昊, 介玉新, 等. 临界状态土的物理标度律 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (9): 1831-1839.
- [10] 王学涛, 王立忠, 洪义, 等. 砂土各向异性临界状态模型及砂质海床板锚承载特性评价 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (11): 2346-2356.
- [11] 蔡世兴, 唐译, 关云飞. 基于临界状态理论的海相含细粒土砂液化特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (增刊1): 63-66.
- [12] 李海潮, 李涛, 童晨曦, 等. 适用于黏土和砂土的亚塑性剑桥模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (12): 3096-3107.
- [13] 刘莹, 朱圣焱, 李艳, 等. 超固结黏土不排水剪切的屈服与临界状态 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (19): 8193-8200.
- [14] GAO Z, CAI H. Effect of total stress path and gas volume change on undrained shear strength of gassy clay [J]. International Journal of Geomechanics, 2021.
- [15] WEI R, LIU L, JIA C, et al. Undrained triaxial shear tests on hydrate-bearing fine-grained sediments from the shen hu area of south china sea [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11 (8): 1604.
- [16] 郑威威, 洪义, 王立忠. 含气软黏土的不排水抗剪强度计算模型 [J]. 岩土力学, 2022 (8): 2233-2240.
- [17] 王立忠, 沈恺伦. K_0 固结结构性软黏土的本构模型 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (4): 496-504.
- [18] 侯乐乐, 翁效林, 周容名, 等. 结构性黄土的各向异性临界状态模型 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (4): 1077-1086.