

基于液性指数和孔隙比的西安地区黄土剪切强度试验研究

张衡, 张耀

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

为定量评价西安地区黄土的力学特性, 本文以西安市长安区的晚更新世(Q₃)黄土为研究对象, 开展了激光粒度分析及不同物理状态下的三轴固结不排水剪切试验(CU)。通过分析粒度分布特征, 系统探讨了液性指数(IL)与孔隙比(e)对原状土及重塑土应力-应变关系与抗剪强度参数(c, φ)的影响规律。结果表明: 西安黄土属级配良好土, 其剪切性状受IL与围压耦合影响显著; 随IL升高和e增大, 黏聚力与内摩擦角均呈减小趋势, 且IL对强度的衰减作用更具物理代表性。基于试验数据建立了剪切强度与IL、e的数学预测模型, 实现了不同水力和结构状态下强度的定量估算。研究结果可为西安地区黄土工程参数选取及边坡稳定性评价提供参考。

关键词

黄土, 三轴试验, 液性指数, 孔隙比, 剪切强度

Experimental Study on Shear Strength of Loess in Xi'an Area Based on Liquidity Index and Void Ratio

Heng Zhang, Yao Zhang

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 25, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

To quantitatively evaluate the mechanical properties of loess in Xi'an area, this paper focuses on

typical Late Pleistocene (Q₃) loess from Chang'an District, Xi'an City, conducting laser particle size analysis and triaxial consolidated undrained shear tests (CU) under different physical conditions. By analyzing the particle size distribution characteristics, the influence of the liquidity index (IL) and void ratio (*e*) on the stress-strain relationship and shear strength parameters (*c*, φ) of undisturbed and remolded soils was systematically investigated. The results show that Xi'an loess is a well-graded soil, and its shear properties are significantly affected by the coupling of IL and confining pressure. With increasing IL and *e*, both cohesion and internal friction angle decrease, and the attenuation effect of IL on strength is more physically representative. Based on the experimental data, a mathematical prediction model of shear strength with IL and *e* was established, enabling quantitative estimation of strength under different hydraulic and structural conditions. The research results can provide a reference for the selection of engineering parameters and slope stability evaluation of loess in Xi'an area.

Keywords

Loess, Triaxial Test, Liquidity Index, Void Ratio, Shear Strength

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

含水量被广泛认为是控制黄土力学行为的主要因素。大量研究表明[1]-[7], 含水量的增加会导致剪切强度降低, 这是由于颗粒间粘结力减弱以及孔隙水的润滑作用所致。然而, 仅使用含水量[8]-[12]作为单一指标来表征土体强度存在固有的局限性。

首先, 含水量是一个绝对物理量, 它无法反映土体稠度极限[13]-[18]的相对位置。对于具有不同塑性特征的土体, 相同的含水量可能对应于完全不同的力学状态, 例如刚塑性或流塑性状态。其次, 含水量无法体现阿特伯格极限的影响[19]-[23], 而阿特伯格极限控制着土体从类固体行为到类液体行为的转变。因此, 它无法充分描述土体从结构主导行为向水主导行为的渐进演变过程[24]-[28]。

为了克服这些局限性[29]-[34], 本文引入了流动性指数(IL)作为归一化状态参数, 该参数同时考虑了含水量和稠度极限。流动性指数的定义如下:

$$IL = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_L - \omega_p} \quad (1)$$

其中, ω 为天然含水量, ω_p 为塑性极限, ω_L 为液性极限。通过将含水量映射到塑性极限和液性极限之间的区间, 流动性指数(IL)提供了一种无量纲的土壤稠度量。

与含水量相比, 流动性指数具有诸多优势。它能够统一描述不同类型土壤的状态, 并允许对从刚性到塑性, 最终到流动状态的转变进行连续表征。更重要的是, 以往的研究表明, 剪切强度参数, 例如粘聚力(*c*)和内摩擦角(φ), 与流动性指数(IL)具有很强的相关性, 并且通常随着流动性指数(IL)的增加而降低。

因此, 流动性指数不仅可以被视为一种状态描述符, 还可以被视为连接水力条件和力学响应的关键参数。在黄土这种结构易塌陷性和水分敏感性显著的土壤中, 与仅使用含水量相比, 流动性指数(IL)为描述强度演变提供了一个更具物理意义的框架。

综上所述, 液性指数(IL)作为一种归一化状态参数, 相比单一的含水量指标, 能够更物理地反映黄土从结构主导向水主导行为演变的力学性状。鉴于此, 本文选取西安地区典型晚更新世(Q₃)黄土, 通过室内

三轴剪切试验与粒度分析, 系统探讨液性指数与孔隙比对黄土抗剪强度的耦合影响规律, 旨在构建一套更具物理意义的强度定量估算模型, 为西安地区黄土边坡稳定性评价及工程参数选取提供科学参考。

2. 材料和方法

2.1. 试验材料

黄土样品于 2023 年 10 月 14 日从陕西省西安市长安区南郊某建筑施工基坑内获取。取土深度范围为 4.0~6.0 m, 位于湿陷性黄土层。土类型为马兰黄土, 呈现褐黄色, 质地坚硬而均匀。为了对原状土尽可能少的扰动, 采用挖槽方法。从表面上看, 地表下 4.0~5.0 m 处采取点一土层一般呈褐黄色, 主要以粉黏粒为主, 土质较均, 含少量杂质, 可见黑色斑点, 手可捻碎, 可搓泥条, 按压硬, 切面较粗糙, 岩芯呈短柱状。在切削土样的过程中发现, 土中含有钙丝、虫孔, 有时还有条带状或夹层状或斑点状细砂。在地表下 5.0 至 8.0 m 处土样采取点二中土层呈黄色垂直节理发育, 土质均匀, 稍密, 稍湿, 黏粒含量少, 易破碎, 切削时应小心谨慎。根据土的宏观特征和西北院边坡工程勘察报告可以初步判断两个采取点的土均为晚更新世黄土(Q₃)。基坑上取土, 切割成约 50 cm × 30 cm × 20 cm 的土样, 并使用黑色塑料袋及胶带紧密包裹并标记土样上中下三部分, 如图 1 所示。

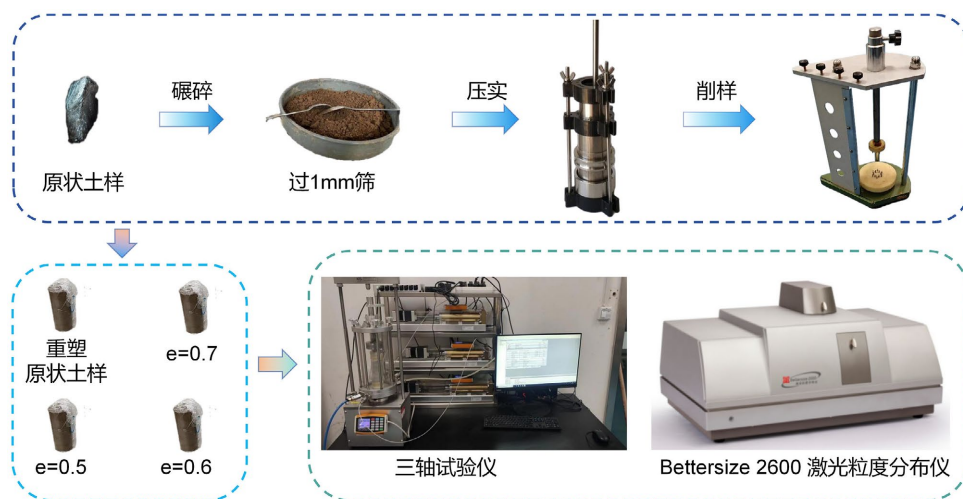


Figure 1. Experimental flowchart
图 1. 试验流程图

2.2. 土的基本物理指标的测定

从 1 号点和 2 号点各采集 5 个土壤样品, 测试其基本物理性质, 并计算平均值。研究区黄土的物理性质见下表 1。此外, 还进行了压实试验, 确定最佳含水量为 14.91%。

Table 1. Physical properties of soil
表 1. 土的物理性质

比重 G_s	干密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	含水率 (%)	最优含水率 w_{op} (g/cm ³)	塑性指数 w_p (%)	液性指数 w_L (%)	孔隙比 e
2.7	1.81	18.24	14.91	17.2	32.7	0.72

根据规范, 开展击实试验, 绘制含水率与干密度关系并拟合, 获得最优含水率 $w_{op} = 14.91\%$, 最大干

密度 $\rho_{dmax} = 1.81 \text{ g/cm}^3$ 。由公式(1)及土工试验方法标准 GB/T 50123-2019 可算出最小孔隙比为 0.5。按照图中曲线 9.3%、11.4% 和 14.55% 的含水量下锤击按 30 次/min, 可获取不同的干密度(1.6 g/cm³, 1.7 g/cm³, 1.8 g/cm³)的土样, 最终黄土击实曲线如图 2(a)所示。

$$e_{\min} = \frac{\rho_w G_s}{\rho_{d\max}} - 1 \quad (2)$$

式中: ρ (%) 为土的湿密度; m_0 为湿土土样质量; m_d 为干土质量; e_{\min} 为最小孔隙比; G_s 为土粒的比重。

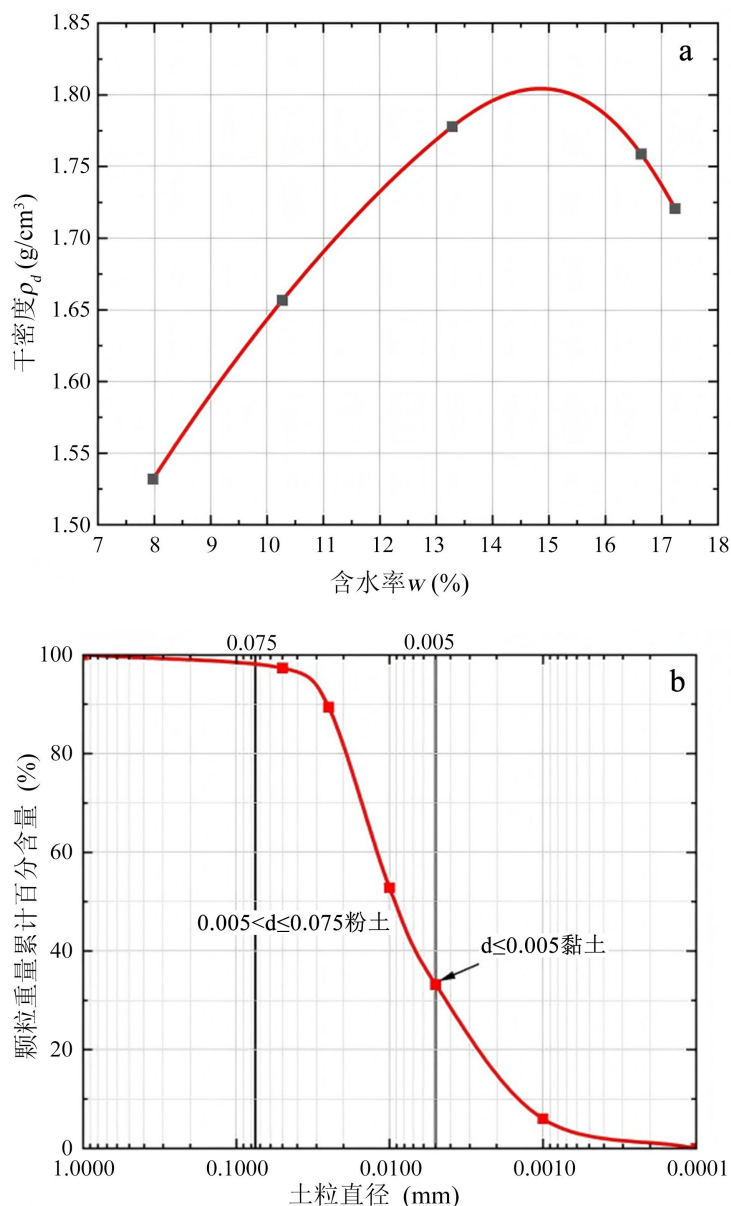


Figure 2. Compaction curve of loess (a) and particle size distribution curve of loess sample (b)

图 2. 黄土击实曲线(a)和黄土样的颗粒分布曲线(b)

用筛分法分析了颗粒组分试验, 颗粒不均匀系数 $C_u > 5$, 曲率系数 C_c 在 1~3 范围之间, 属于级配良好土, 其级配曲线如图 2(b)所示。

2.3. 样品制备

本研究考虑了黄土在五种不同干湿程度下的表现, 参照细粒土状态分类(液性指数)临界值, 确定黄土试样的含水率范围为 17%~31.72%。根据不同干密度控制孔隙比(0.6, 0.7, 0.8), 干密度分别设置为 1.6 g/cm³、1.7 g/cm³ 和 1.8 g/cm³。具体的含水率设置为 15%、17%、20%、27.1%、30.4%和 31.72%。

重塑黄土三轴试验试样的制备如下: (1) 将原状土样进行碾碎处理, 过 1 mm 筛并烘干。(2) 将烘干的土样依次加入纯净水直至目标含水率, 放入封闭盒子中静置 24 h, 期间放入潮湿环境, 避免水分散失。(3) 利用重塑制样装置, 将土样装入三轴试样器内分层压实。(4) 将达到目标含水率的样品密封处理, 放置于保湿皿中静置 72 小时以上, 以便进行剪切试验。

2.4. 三轴试验方法

固结不排水试验, 由于土样处于深度 6~8 m, 因此围压设为 100、200、300、400 kPa。具体实验步骤如下: (1) 橡皮膜套在承膜筒内两侧多余膜翻边, 用吸气球将里面空气排出, 使膜紧贴内壁, 把套好的试样放在压力室底座上, 取出承膜筒。(2) 试样下多余橡皮膜套在底座上并用橡皮筋绑扎牢固, 防止水进入, 同理将上部橡皮膜与试样帽绑扎。(3) 慢慢安装压力室罩, 避免碰到试样, 安装固定后, 转动螺丝使底座缓缓上升使活塞对准试样帽。(4) 开排气孔接通电源, 往压力室注水, 水满溢出关闭排气孔。(5) 使用电脑控制试验仪器, 施加围压至所需的测试值。(6) 使用电脑操控试验仪器使压力室缓慢上升, 直至活塞与试样接触时暂停, 校准轴向位移至零。剪切速率根据规范选用应变控制, 本次试验剪切应变速率设置为 0.3%/min。(7) 先固结再剪切, 剪切过程中出现峰值点, 再继续剪 5%的轴向应变, 读数无明显变化可增至 15%。如表 2 所示。

Table 2. Reformulation of the loess triaxial test scheme

表 2. 重塑黄土三轴试验方案

编号	干密度(g/cm ³)	含水率(%)	围压(kPa)	相应 IL
Y1-20	原状	5, 10, 15, 20, 25	100, 200, 300, 400	
5R1-24	1.8 ($e = 0.5$)	15, 17, 20, 27.1, 30.4, 31.72	100, 200, 300, 400	
6R1-24	1.7 ($e = 0.6$)	15, 17, 20, 27.1, 30.4, 31.72	100, 200, 300, 400	
7R1-24	1.6 ($e = 0.7$)	15, 17, 20, 27.1, 30.4, 31.72	100, 200, 300, 400	

注: 6 种含水率 15、17、20、27.1、30.4、31.72, 对应的液性指数分别为<0、0、0.25、0.75、1.0、1.1。

2.5. 粒度分布测试方法

为了研究不同液性指数和孔隙比下黄土的微观颗粒尺寸分布特征, 采用了 Bettersize 2600 激光湿法粒度分布仪, 如图 1 所示。该设备核心原理是当激光束通过悬浮在介质中的颗粒时, 颗粒会使激光束发生衍射。衍射角度与颗粒的尺寸有关, 颗粒越大, 衍射角度越小; 颗粒越小, 衍射角度越大, 探测器接收散射光并将其转化为电信号, 信号强度与衍射角度相关。通过对不同衍射角度的光强度进行分析, 仪器可以计算出颗粒的大小分布。主要试验步骤: 将待测样品分散在适当的介质中, 以确保颗粒之间不发生团聚; 对仪器进行必要的核准, 以确保测量结果的严谨性; 根据样品特性和测量需求设置仪器参数(如激光强度、探测角度范围等); 数据测量、采集记录和处理。

2.6. 破坏标准定义

由于所有试样的工程应力 - 应变曲线呈现连续应变硬化特征, 未出现明显的载荷骤降或颈缩现象,

传统的断裂点或最大载荷点无法唯一确定破坏应变。为获得一致且可比较的失效准则, 本研究采用全局总应变阈值法定义破坏标准: 破坏点统一取为工程应变达到 25% 的对应位置。

该阈值的选取基于以下依据:

(1) 预试验中通过 DIC 监测发现, 当应变超过 22% 时, 试样表面开始出现局部微裂纹网络; 25% 对应裂纹贯通前的保守上限。

(2) 该值处于同类合金文献报告的上限应变范围(20%~30%)内, 且符合工程安全设计的许用应变要求。

3. 结果分析

3.1. 原状土样不排水三轴剪切试验结果与讨论

图 3 展示了原状黄土含水率为 5%、10%、15%、20% 和 25% 在不同水平围压下的应力 - 应变关系曲线。以下为分析结果: (1) 可以看出黄土处于低含水率时, 在围压下均出现峰值点, 这是因为含水率低时, 土颗粒间的吸附水薄膜较薄, 水分子间的引力较强, 导致土体的黏聚力较高, 使土体在剪切过程中能够抵抗更高的应力, 直至达到峰值, 但过一段时间后过渡到残余强度, 变现为应变软化特征。(2) 当含水率为 10% 和 15% 含水率条件下, $\sigma_3 = 100 \sim 300$ kPa 围压曲线为应变软化特征。围压增大到 400 kPa 时, 试样的偏应力在一定应变范围内减小, 表现出强烈的应变硬化。(3) 当含水率 20% 和 25% 含水率(高含水率)时, 可以看出 $\sigma_3 = 100$ kPa 低围压下, 应力 - 应变曲线没有明显变化, 还是处于软化特征, 随后在 $\sigma_3 = 200 \sim 400$ kPa 围压状态下, 土样由软化特征过渡到硬化特征, 但出现拐点时间会延后, 应变硬化程度增加。

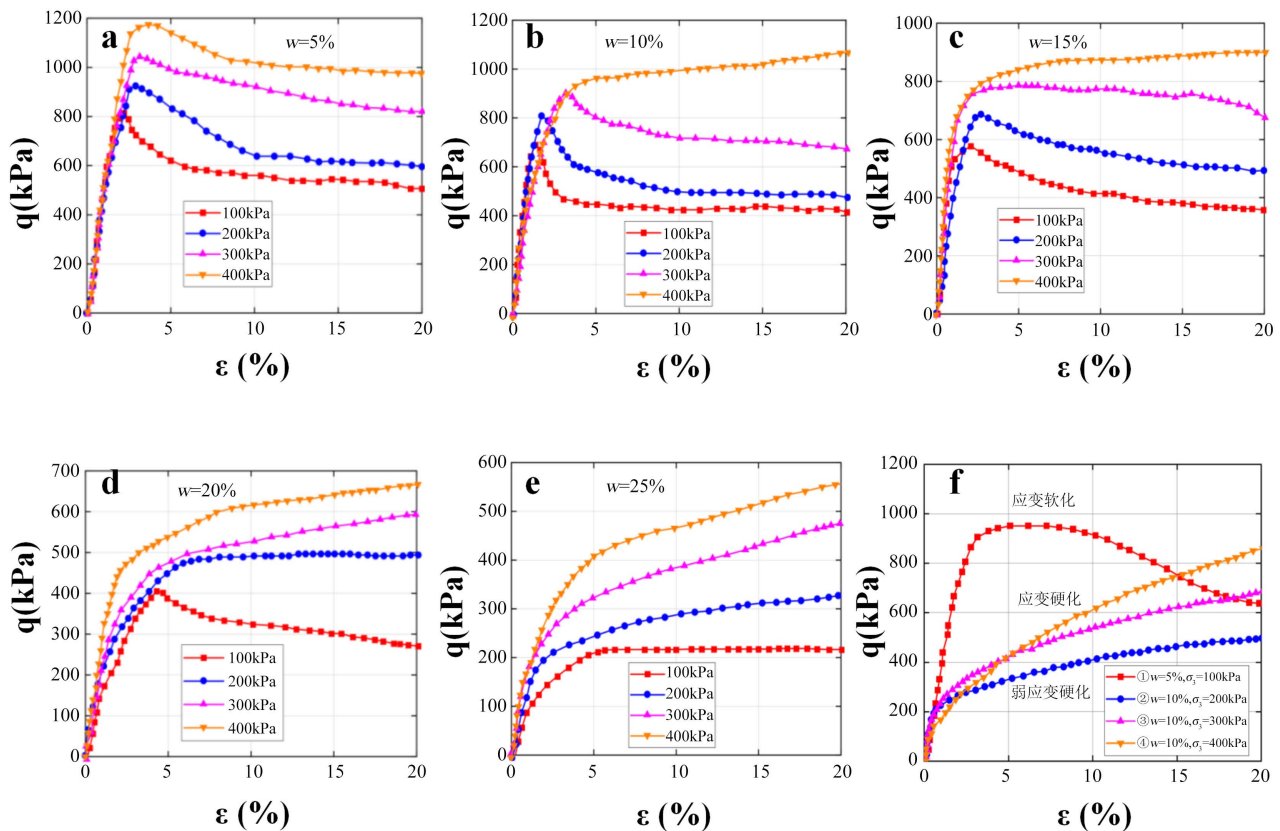


Figure 3. Stress-strain relationship curves of undisturbed loess under different confining pressures

图 3. 不同围压原状黄土的应力 - 应变关系曲线

3.2. 重塑土样不排水三轴剪切试验结果与讨论

图 4 展示了不同孔隙比重塑黄土含水率为 15%、17%、20%、27.1%、30.4% 和 31.72% 的应力 - 应变曲线。重塑土样结果分析: 通过整理试验所得数据, 得到 3 种孔隙比和 5 种含水量下的应力 - 应变曲线。重塑黄土本身结构已经破坏, 因此曲线基本都是应变硬化曲线, 偏差应力破坏点取轴向应变的 15% 作为破坏点。经分析: (1) 当液性指数 $IL < 0$ 时, 在 $\sigma_3 = 100 \sim 400$ kPa 水平围压下, 均产生了峰值偏应力, 各峰值点均不相同, 但会随着水平围压的增大, 峰值点会推迟, 并在峰值点后变现为应变软化特征。(2) 当液性指数 $IL = 0$ 时, 即土样处于塑性状态; 在 $\sigma_3 = 100 \sim 200$ kPa 水平围压(低围压), 应力 - 应变曲线拐点出现较早, 经过一段时间后变现为弱硬化特征, 但在高围压下, 拐点会延迟, 在出现拐点后, 变现为硬化特征。(3) 当液性指数 $IL = 0.25$ 时, 即土样处于硬塑状态; 围压 $\sigma_3 = 100$ kPa 时, 试样发生应力破坏点在 136 kPa 附近; 当围压 $\sigma_3 = 400$ kPa 时, 最大应力偏差在 320 kPa 附近, 试样发生剪切变形表面可塑状态下: 围压大小对最大主应力偏差影响显著, 应力 - 应变曲线变现为弱硬化特征, 随着围压的增大, 会转化为强硬化特征。(4) 当液性指数 $IL = 0.75$ 时, 即土样处于可塑状态; 随着 σ_3 增大, 曲线逐渐由弱应变软化型演变为硬化型。这是因为高围压下, 土颗粒被更加紧密地压紧, 颗粒间的接触力显著增加。这种紧密的接触使得土体在承受剪切力时具有更高的抵抗力。(5) 当液性指数 $IL = 1$ 或 1.1 时, 即土样处于软塑或流塑状态; 曲线逐渐平稳, 随着 σ_3 的增加, 偏应力在一定应变范围内增加, 表现出强烈的应变硬化和流塑的特征。这是高围压使得土体内部的微裂隙闭合, 整体结构更加稳定和密实, 减少了土体在剪切过程中的变形能力。

比较同一含水率不同干密度会发现: (1) 偏应力与围压的关系: 在相同孔隙比和含水量下, 黄土试样的偏应力随着围压的增加呈现递增关系, 这种趋势在高围压条件下尤为明显。这是因为围压的增加使得土颗粒间的接触力增强, 从而提高了土体的抗剪强度, 导致偏应力的增大。(2) 含水量对破坏应力点的影响: 在相同孔隙比下, 黄土的破坏应力点随着含水量的增加而减小。在最优含水量附近, 破坏应力点变化不明显。在整个压缩过程中, 应力 - 应变曲线没有峰值出现。这是因为在垂直压力作用下, 黄土重新生成新的结构强度。围压不变的情况下, 随着垂直压力的不断增加, 土颗粒间的间距逐渐增大, 直至破坏。(3) 孔隙比对应力 - 应变曲线的影响: 在相同含水量下, 不同孔隙比的应力 - 应变曲线变化显著, 特别是在高围压条件下更为明显。随着孔隙比的减小, 偏应力破坏点逐渐增大。这是由于土样的干密度增大, 导致试样孔隙减小, 体积减少, 从而使偏应力增大。上述分析表明, 围压、含水量和孔隙比对黄土的力学特性具有显著影响。在工程应用中, 合理选择和控制这些参数, 对于提高黄土的稳定性和承载能力具有重要意义。

3.3. 黄土的抗剪强度特性分析

在常规静三轴试验中, 偏差应力与轴向应变图像有两种形式: 应变硬化型和应变软化型。试样破坏前偏差应力随着轴向应变的增大逐步上升, 这种属于应变硬化型。应变软化型是在一定的轴向应变范围内达到峰值点后逐渐下降。对于应变软化曲线, 通常选取峰值点作为破坏时的偏差应力 q , 而在应变硬化曲线中, 通常取轴向应变达到 15% 时的偏差应力作为破坏偏差应力 q 。摩尔 - 库仑强度包络线利用最小二乘法线性回归计算得出。

Mohr-Coulomb 强度准则可以表示为公式:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

式中, σ 为法向应力, 单位: kPa。

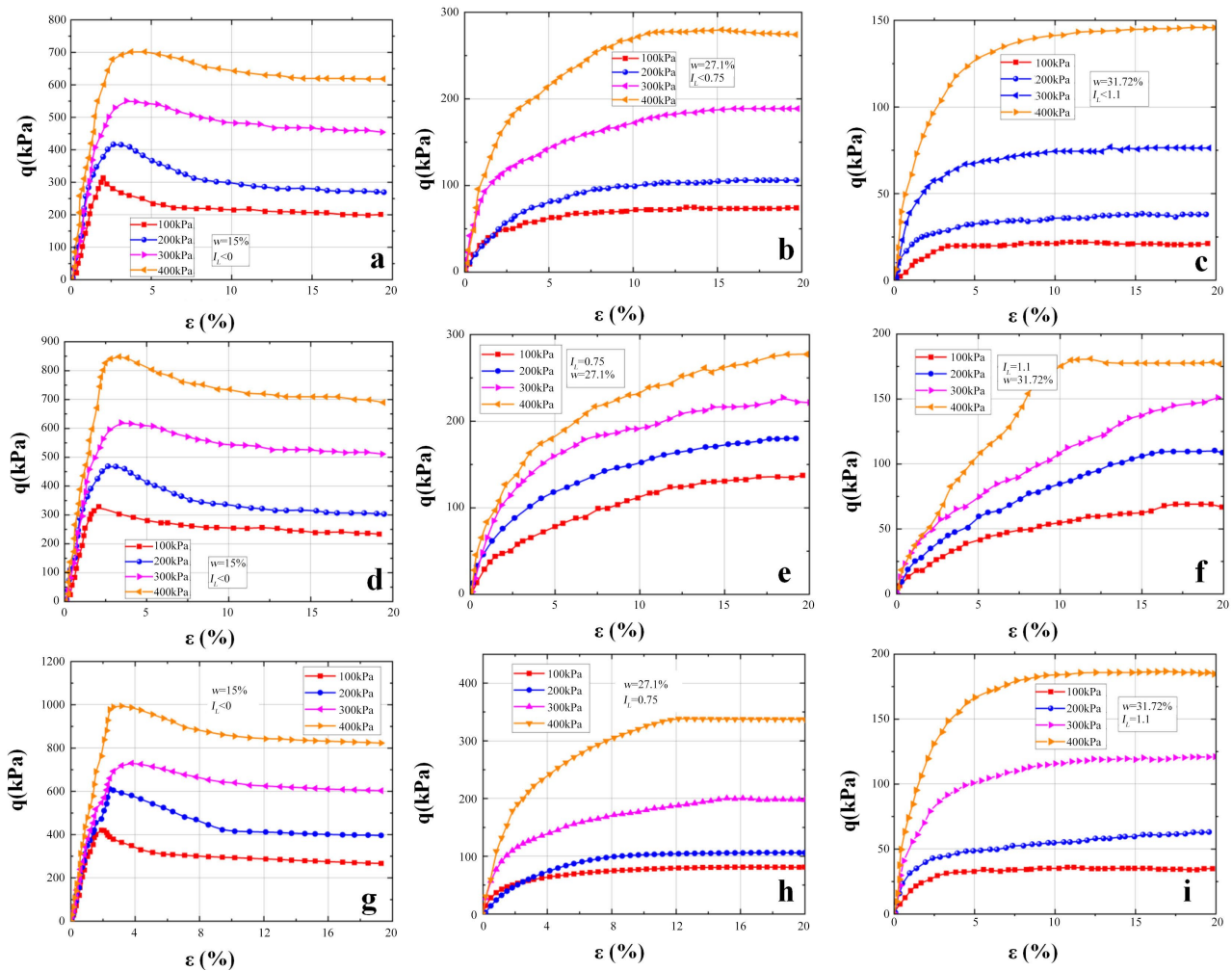


Figure 4. Stress-strain relationship curves of loess with different void ratios and water contents

图 4. 不同孔隙比和含水量的黄土的应力 - 应变关系曲线

依据三轴试验数据, 通过确定黏聚力 c 和内摩擦角 $\arctan(\tan\varphi)$ 最终确定土的抗剪强度 τ_f 。具体方法如下。观察图 4 的偏差应力与轴向应变曲线, 表现出应变软化型和硬化型两种形式。依据规范对于应变软化型曲线, 取偏差应力峰值状态为破坏应力状态。而在应变硬化曲线中, 通常取轴向应变达到 15% 时的应力状态作为破坏应力状态; 根据应力状态计算摩尔圆圆心、半径并绘制莫尔圆; 再对每组四个围压下的四个摩尔圆求公切线。该公切线的截距和斜率即为黏聚力 c 和内摩擦角 $\arctan(\tan\varphi)$ 。四个摩尔圆的理论公切线是一条, 但实际实验数据不可能完全统一, 即公切线并不唯一。如果两圆有一个公切线, 则实际有 6 条公切线, 所以最终的公切线是对这 6 条公切线拟合成一条误差最小的公切线, 进而得到最终的莫尔库伦强度的参数黏聚力 c 和内摩擦角 $\arctan(\tan\varphi)$ 。孔隙比 0.7 的各含水率(液性指数)条件对应摩尔圆及强度包络线绘制见图 5。全部重塑黄土试样的强度参数计算结果见表 3。

由表 3 可知: (1) 随着液性指数 IL 的升高, 重塑黄土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随之减小, 在液性指数 $IL > 0.25$ (软塑流塑状态) 条件下, 重塑黄土的黏聚力 c 和摩擦角 φ 数值相对偏小, 抗剪强度低, 而液性指数 $IL < 0.25$ (坚硬硬塑状态) 条件下, 重塑黄土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 数值偏大, 抗剪强度高, 此为黄土固有的强度特点; (2) 当考虑液性指数因素时, 低液性指数条件下影响剪切强度的主要因素为黄土本身的结构状态、颗粒间的距离大小以及孔隙大小, 当含水量较小时, 土颗粒间的强结合水大于弱结合

水, 随着轴向应力的增大, 颗粒间的位移迅速变化, 孔隙也会减小, 结构发生变化, 能够迅速达到峰值点。当土样液性指数逐渐增大, 试样的剪切强度性能弱结合水大于强结合水, 颗粒被自由水隔开, 土颗粒结构形态因素的影响逐渐被缩小, 土体就不能承受剪应力。(3) 孔隙比与液性指数均对重塑黄土内摩擦角的影响不大, 但对黏聚力影响显著, 液性指数对黏聚力的影响较孔隙比更为明显。

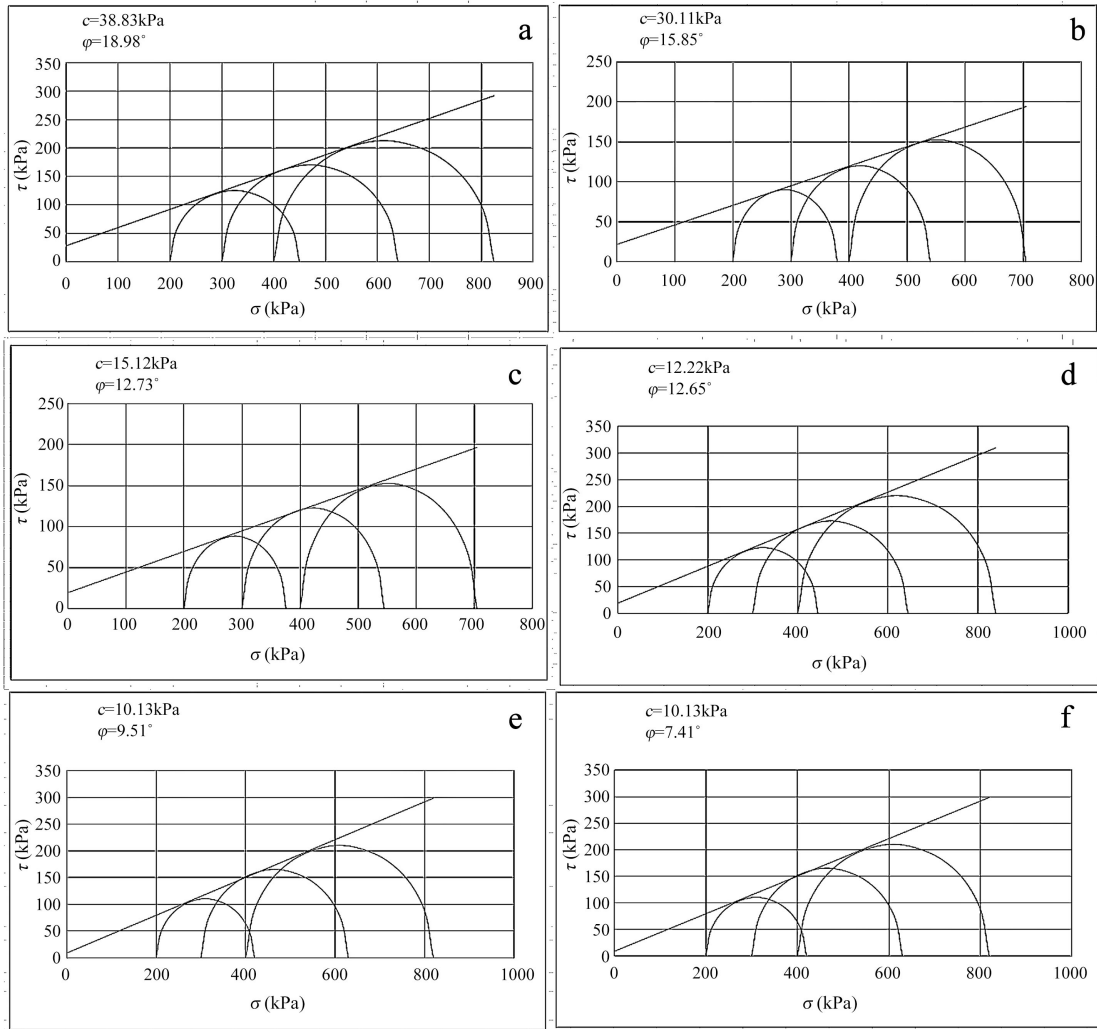


Figure 5. Mohr circles for different liquidity indices
图 5. 不同液性指数的莫尔圆

Table 3. Shear strength parameters of undisturbed loess and reformed loess
表 3. 原状黄土和重塑黄土抗剪强度参数

序号	干密度(g/cm ³)	含水量(%)	液性指数	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)
1		5	/	92.52	26.57
2		10	/	65.66	26.02
3	原状	15	/	41.15	25.87
4		20	/	32.34	25.51
5		25	/	23.76	25.22

续表

1		15	<0	38.83	18.98
2		17	0	30.11	15.85
3	1.6 ($e = 0.7$)	20	0.25	15.12	12.73
4		27.1	0.75	12.22	12.65
5		30.4	1	10.13	9.51
6		31.72	>1	7.41	6.35
1		15	<0	54.44	25.30
2		17	0	45.37	22.10
3	1.7 ($e = 0.6$)	20	0.25	21.07	19.00
4		27.1	0.75	15.53	15.82
5		30.4	1	11.83	12.67
6		31.72	>1	8.21	9.53
1		15	<0	70.21	31.65
2		17	0	61.14	28.45
3	1.8 ($e = 0.5$)	20	0.25	34.73	25.20
4		27.1	0.75	17.55	22.17
5		30.4	1	13.23	19.03
6		31.72	>1	9.73	15.83

4. 结论

以西安地区典型的 Q₃ 黄土为研究对象, 通过系统的三轴剪切试验, 深入探讨了不同含水率条件下原状土和重塑黄土的抗剪强度特性及其内在机制。主要结论如下:

(1) 系统分析了黄土在各个围压条件下的应力 - 应变关系。结果表明, 黄土的剪切强度特性受到含水率和围压的显著影响: 在低含水率下, 黄土表现出明显的应变软化特征, 而随着含水率的增加和围压的增大, 应变硬化现象逐渐显现。这一发现表明原状黄土含水率和围压的相互作用在决定黄土力学行为中起到了关键作用。

(2) 通过三轴试验数据的分析, 建立了描述黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与孔隙比 e 和液性指数 IL 之间随孔隙比和液性指数变化的数学模型。结果表明, 随着孔隙比的增加和液性指数的升高, 黄土的黏聚力呈现出下降的趋势, 而内摩擦角则表现出更加复杂的变化规律。该模型为工程实践中黄土边坡稳定性分析的参数选取提供了参考依据。

参考文献

- [1] 杨国庆, 刘汉林, 席卓恒. 某滑坡地质灾害点的特征、成因机制及防治处理措施浅析——据贵州省黔东南州台江县排羊乡排孔景区公路景区停车场旁滑坡[J]. 地下水, 2022, 44(1): 191-194+250.
- [2] 蔡清礼, 王国民, 陈劲斌. 汶川“4·8”龙溪乡阿尔村山体滑坡灾害成功应对经验及启示[J]. 中国减灾, 2018(13): 50-53.
- [3] 刘国中, 张伟, 李晓明. 黄土液性指数和孔隙比对边坡稳定性影响的研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 45-52.
- [4] 张宏伟, 李娜, 王磊. 不同液性指数和孔隙比条件下黄土边坡的稳定性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 1225-1232.

- [5] 王建军, 赵宇. 液性指数和孔隙比对黄土边坡稳定性的数值模拟分析[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 88-95.
- [6] 王弘起, 邱明明, 孙杰龙, 等. 物理性质对黄土抗剪强度指标的影响规律[J]. 科技通报, 2023, 39(4): 38-44+61.
- [7] 邢鲜丽, 李同录, 习羽, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53-59+97.
- [8] 张耀, 胡再强, 陈昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 681-688.
- [9] 卢全中, 陈树峰, 彭建兵, 等. 三轴压缩条件下裂隙性黄土应力-应变特性及变形破坏机制[J]. 中国公路学报, 2015, 28(1): 8-16.
- [10] 杜玉鹏, 田堪良, 张爱军, 等. 黄土地区不积雨条件下降雨入渗及其湿润锋移动规律[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 9-12+190.
- [11] 朱志坤. 干密度和含水量对太原重塑黄土强度及强度参数影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [12] 庞旭卿. 路基压实黄土力学特性三轴试验研究[J]. 铁道建筑, 2009(9): 75-78.
- [13] Dijkstra, T.A. and Dixon, N. (2000) The Influence of Liquefaction on the Stability of Loess Slopes. *Engineering Geology*, **57**, 87-99.
- [14] Ng, C.W.W. and Zhan, L.T. (2007) Comparative Study of Centrifuge and Numerical Modeling of Loose Fill Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**, 641-653.
- [15] Wang, G. and Zhang, D. (2014) Effects of Pore Water Pressure on the Stability of Loess Slopes. *Landslides*, **11**, 689-698.
- [16] Guo, Y.X., Ni, W.K. and Liu, H.S. (2021) Effects of Dry Density and Water Content on Compressibility and Shear Strength of Loess. *Geomechanics and Engineering*, **24**, 419-430.
- [17] Kong, D.Q., Wan, R., Zhao, C.K., et al. (2021) Effect of Conglomeration Gradation on Loess Shear Strength with Different Water Content. *Science Progress*, **104**, Article 368504211010581.
- [18] Bao, G.B., Li, H., Zhang, Y., et al. (2018) Experimental Study on Shear Strength of Unsaturated Loess Based on Different Water Content in Xining Area. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, **153**, Article 032018.
- [19] 高大钊. 岩土工程的回顾与前瞻[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [20] 张伟, 等. 基于极限平衡法的黄土边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 1225-1232.
- [21] 陈凯强. 土坡稳定分析 Spencer 法与 Morgenstern-Price 法的有效应力形式[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [22] 张常亮. 边坡稳定性三维极限平衡法研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008.
- [23] 陈祖煜, 邵长明. 最优化方法在确定边坡最小安全系数方面的应用[J]. 岩土工程学报, 1988(4): 1-13.
- [24] Mohamed, T., Kasa, A. and Mukhlisin, M. (2016) Prediction of Slope Stability Using Statistical Method and Fuzzy Logic. *TOJSAT: The Online Journal of Science and Technology*, **4**, 68-73.
- [25] Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- [26] Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999) Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Géotechnique*, **49**, 387-403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
- [27] Lu, N. and Likos, W.J. (2004) *Unsaturated Soil Mechanics*. Wiley.
- [28] 罗珍贵, 廖少棚. 基于 C++ 的 Fellenius 法土坡稳定性分析改进计算方法[J]. 工程技术研究, 2022, 7(8): 1-4+24.
- [29] 徐晓东, 杜文秀. 融合 Bishop 算法和 FLAC3D 的露天矿边坡安全系数敏感性分析[J]. 金属矿山, 2023(6): 200-206.
- [30] 李金海. 基于简化毕肖普法的河道边坡稳定性分析[J]. 陕西水利, 2023(1): 105-106+115.
- [31] Harabinová, S., Kotrasová, K., Kormaníková, E. and Hegedüsová, I. (2021) Analysis of Slope Stability. *Civil and Environmental Engineering*, **17**, 192-199. <https://doi.org/10.2478/cee-2021-0020>
- [32] 李迪. 基于 Morgenstern-Price 法的露天边坡稳定评价[J]. 中国矿业, 2022, 31(S1): 68-71.
- [33] 常思源, 陈柘舟, 柴利杰, 等. 有限元法在岩质边坡稳定性分析中的应用示例[J]. 城市地质, 2020, 15(4): 380-387.
- [34] 郑卫纲, 张伯涛, 丁敏. 坡面不规则楔体稳定性分析方法研究[J]. 人民珠江, 2012, 33(6): 8-13.