

基于含水率和孔隙比的土壤强度确定方法研究

卞明松*, 习羽, 邵明航, 张耀, 秦健翔, 马可盈

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月7日; 发布日期: 2024年7月19日

摘要

黄土灾害对于黄土高原地区的生态地质环境和人民居住安全构成了严重威胁。黄土具有的特殊细观结构特征, 是造成黄土灾害的根本原因。黄土的细观结构随着外界环境的改变在不断地演变, 这对其宏观力学行为具有决定性影响。本研究旨在探讨一种利用土壤含水率和孔隙比确定土壤强度的方法。通过对不同含水率和孔隙比条件下的土壤样品进行试验, 收集数据并进行分析, 发现含水率和孔隙比对土壤强度具有显著影响。实验结果表明, 随着含水率和孔隙比的增加, 土壤的强度逐渐降低。基于这一发现, 我们提出了一种简便有效的土壤强度确定方法, 可以通过含水率和孔隙比的测量值来预测土壤的强度水平。本研究为土壤工程领域提供了一种新的强度确定途径, 具有一定的实用和推广价值。

关键词

原状黄土, 含水率, 孔隙比, 强度

Research on Soil Strength Determination Method Based on Moisture Content and Porosity Ratio

Mingsong Bian*, Yu Xi, Minghang Shao, Yao Zhang, Jianxiang Qin, Keying Ma

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 7th, 2024; published: Jul. 19th, 2024

Abstract

Loess disasters pose a serious threat to the eco-geological environment and people's living safety in the Loess Plateau. The special mesoscopic structure characteristics of loess are the root cause of

*通讯作者。

文章引用: 卞明松, 习羽, 邵明航, 张耀, 秦健翔, 马可盈. 基于含水率和孔隙比的土壤强度确定方法研究[J]. 土木工程, 2024, 13(7): 1175-1185. DOI: 10.12677/hjce.2024.137127

loess disasters. The mesostructure of loess is constantly evolving with the change of the external environment, which has a decisive impact on its macroscopic mechanical behavior. The purpose of this study was to explore a method for determining soil strength using soil moisture content and porosity. Through the experiments of soil samples under different conditions of moisture content and porosity ratio, the data were collected and analyzed, and it was found that the moisture content and porosity ratio had a significant effect on soil strength. The experimental results show that the strength of the soil gradually decreases with the increase of moisture content and porosity ratio. Based on this finding, we propose a simple and effective method for determining soil strength, which can predict soil intensity levels from measurements of moisture content and porosity. This study provides a new way to determine the strength in the field of soil engineering, which has certain practical and popularization value.

Keywords

Undisturbed Loess, Moisture Content, Porosity Ratio, Strength

Copyright © 2024 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

黄土作为一种多孔、具有亚稳定性、非饱和的第四纪沉积物，其形态、组成及表现出的特点都与其它土有所不同。常见的黄土地质灾害如地基不均匀沉降、土体滑坡、土体崩塌等灾变现象已经给我国工程建设发展带来了严重的阻力[1]-[3]。以陕北高原的城市延安为例，随着“平山造城”、“固沟保塬”和“治沟造地”等重大工程的建设推进深入，当地政府和相关部门采取了许多工程措施来防治黄土地质灾害。虽然使得延安新区回填黄土的表观力学指标达标，但它仍以 45 mm/a 的最大速率继续下沉[4] [5]。究其原因是对黄土特殊的结构性没有深层次的认知，没有找到这些灾变现象的根本原因或深层机理。湿陷性黄土存在较强的结构性，在常含水率情况下具有较高的强度，一般压力情况下不能摧毁它的孔隙结构，使其充分压缩。即使浸水，如果不能让其可溶盐充分的溶解，不能彻底破坏土里的盐晶胶结与架空孔隙结构，也很难让其一次性彻底的发生塌陷[6]-[8]。土的强度主要由颗粒间的相互作用力决定而不是由颗粒矿物的强度决定，这个特点决定了土破坏的主要表现形式是剪切破坏，亦即其抗剪强度主要由颗粒间的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 组成。迄今为止，研究者对黄土的强度进行了大量的研究。

Nie 等对黄土样品进行了一系列宏观和细观测试，研究了显微图像中黄土的孔隙特性，探究了孔隙显微指标与力学参数的关系[9]。王丽在两种压实度下对粉质黏土进行直接剪切试验，研究了含水量对抗剪强度的两个参数黏聚力和内摩擦角的影响，并得到了相应的关系式。通过各种含水量状态下的关系图式得出了含水量对土体强度的影响[10]。田堪良等提出了基于强度条件的黄土静力结构性参数即联结结构静力强度势参数 $m\epsilon_1$ ，摩擦结构静力强度势参数 $m\epsilon_2$ 以及结构静力强度势参数 $m\epsilon$ ，并通过黄土的三轴试验研究了原状黄土和人工水泥结构性黄土的结构性及基于强度条件的黄土静力结构性参数的变化规律，表明原状黄土的含水率越小，其结构性越强，结构破坏后土体强度损失越大；黄土结构的损伤破坏主要发生小应变阶段[11]。杨坪等利用侧限压缩实验，研究了同一干密度但不同含水率的重塑黄土进行的压缩固结试验，探讨了含水率对重塑黄土变形的影响。研究发现，低含水率条件下，孔隙比与应力呈线性关系，割线模量则表现出明显的非线性，在应力变化时应变速率显著减小；而高含水率条件下，孔隙比的变化呈现出非线性，割线模量近似呈线性变化，应变速率减小速度较慢[12]。骆丕昭等通过设计不同体积

含水率和两种含根量的重塑土进行三轴试验以用来研究含水率对土体的破坏方式[13]。Mu 等通过进行一系列各向同性压缩试验和润湿试验以及一系列细观试验,探讨了原状和压实黄土的体积特性和黄土体积行为的潜在机制[14]。

综上所述,关于黄土强度的宏观、微观试验已取得较多研究成果。但目前,很少建立有效的模型来通过含水率和孔隙占比预测黄土强度的方法。本文以陕西省西安市长安区南郊原状黄土为研究对象对不同初始含水量原状土进行比较分析。通过固结试验和剪切试验来探讨三个变量之间的关系并提出了一种新的计算模型,用于根据含水量和孔隙比来确定土强度,本模型的建立,对于测定土强度的方法提供有益指导。

2. 试验材料及样品制备

2.1. 试验材料

采用陕西省西安市长安区某建筑施工基坑内的原状土。取土深度范围为 4.5~5 m,位于湿陷性黄土层。在取样时,将整块黄土切割成约 40 cm × 40 cm × 40 cm 的土样,并使用塑料袋及胶带紧密包裹,标记土样的上、下部。按照 GB/T 50123-2019《土工试验方法标准》测定土样的干密度、含水量、土粒比重等基本物理指标,如表 1 所示。

Table 1. Physical properties of soil sample

表 1. 土样的物理指标

土粒比重 G_s	干密度 ρ_d (g/cm ³)	天然含水率/(%)	天然密度 ρ (g/cm ³)	塑限含水率/(%)	液限含水率/(%)	孔隙比 e
2.70	1.23	15.84	1.51	23.57	36.33	1.07

2.2. 样品制备

将天然的原状黄土和配比好的重塑黄土分别装入尺寸为 79.8 mm × 20 mm 的环刀中,压实制样。设计 5%、10%、15%、20%和 25%共 5 个含水率,每个含水率制作 3 组试样进行试验,并预设 2 组进行留存备用。覆盖塑料膜进行密封养护,防止水分蒸发,然后在固结仪上进行压缩试验。

原状黄土固结试验试样制备步骤:(1) 取出的黄土样品,按照标明的上、下方向,削制高度 20 mm、直径 79.8 mm 的环刀样品,测出天然含水率及干密度;(2) 采用风干法与水膜转移法来控制设计含水率。涉及目标含水率为 5%、10%的样品,使用自然风干法,于干燥皿中脱水处理。涉及目标含水率为 20%、25%的试样,用水膜转移法配置,将预定量的蒸馏水均匀、轻轻地分次喷洒至样品的上、下表面;(3) 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 h 以上,用于固结试验。直剪试验的制样只需要利用环刀在原状土上取样,最后削平环刀的两侧即可。

3. 试验方法

试样制备完成后,本研究进行的是将制备好的两组土样在 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 的压力下进行平行试验(具体的试验方案如表 2 所示)。首先对试样进行初始孔隙比 e_0 的计算,对试验组一进行直接剪切试验,测量试验组剪切完成后的抗剪强度 τ_f 。对试验组二进行固结试验(具体的试验方案根据表 1 实施),每一级荷载施加后,根据标准规定的要求进行固结处理,即在每个荷载级别下固结 1 天,或者当试样的变形速率小于 0.01 mm/h 时。记录稳定读数后,再施加下一级荷载,直至试验结束。待试验组各级压力下固结稳定后不剪切,测定各级垂直压力下的含水率 w_g 和孔隙比 e_g 。对不同含水率的土试样[15]分别记录各级垂直压力下所测的抗剪强度 τ_f 值如公式(1)所示。在 Origin 中利用固结孔隙比 e_g 、固结含水率 w_g 和抗剪强度 τ_f ,拟合出三维曲面并输出 τ_f 关于 w_g 和 e_g 的模型表达式如公式(2)所示。最后对拟合模型进行检验,制取 2 组固结稳定后的含水率 w_g 和固结稳定后的孔隙比 e_g 不同于前面 5 组的土试样,将固结稳

定后的含水率 e_g 和固结稳定后的孔隙比 e_g 带入公式(2)拟合出的模型中, 得出拟合 τ_f^* , 每组中选取一个土试样通过剪切试验测定其抗剪强度 τ_f 。对比每组土试样的抗剪强度 τ_f 和抗剪强度 τ_f^* , 如果带入模型后抗剪强度 τ_f^* 与抗剪强度 τ_f 的数据误差在 3% 以内, 则认为验证通过, 模型拟合结果能较好反映不同含水率原状黄土切应力与孔隙比的演变规律, 数据有较高的精确度; 若数据误差超过 3%, 则认为验证不通过, 需重新进行试验拟合模型。

$$\tau_f = CR \tag{1}$$

式中: τ_f ——土的抗剪强度(kPa);

C ——率定系数 1.86 (kPa/0.01 mm);

R ——测力计量表读数(0.01 mm);

$$f(w_g, e) = Aw_g^2 + Bw_g + Ce_g^2 + De_g + E \tag{2}$$

式中: e_g ——土试样固结稳定后的孔隙比;

w_g ——土试样固结稳定后的含水率;

A, B, C, D, E ——拟合参数。

Table 2. Standard consolidation test protocol
表 2. 标准固结试验方案

试验对象	试验编号	应力路径(kPa)
5%含水率-黄土 1	5%-GJ1	
5%含水率-黄土 2	5%-GJ2	
10%含水率-黄土 1	10%-GJ1	
10%含水率-黄土 2	10%-GJ2	
15%含水率-黄土 1	15%-GJ1	100
15%含水率-黄土 2	15%-GJ2	200
20%含水率-黄土 1	20%-GJ1	300
20%含水率-黄土 2	20%-GJ2	400
25%含水率-黄土 1	25%-GJ1	
25%含水率-黄土 2	25%-GJ2	

4. 试验结果及讨论

4.1. 竖向压力和含水率对土强度的影响

在固结试验过程中, 预压压力会导致环刀试样的少量水分流失。因此, 测定固结后孔隙比可以使试验数据更加精确, 计算结果如下表 3 所示。依据表 3 的数据, 绘制不同含水量原状的 $e-p$ 、 $e-w$ 曲线, 如图 1 和图 2 所示。

Table 3. Calculation of pore ratio of original loess samples at all levels of pressure
表 3. 各级压力下原状黄土试样孔隙比计算

含水率	5	10	15	20	25
100	0.7011	0.6899	0.6761	0.6615	0.6486
200	0.6916	0.6794	0.6645	0.6456	0.6291
300	0.6804	0.6602	0.6368	0.6143	0.5933
400	0.6657	0.5962	0.5342	0.4517	0.4061

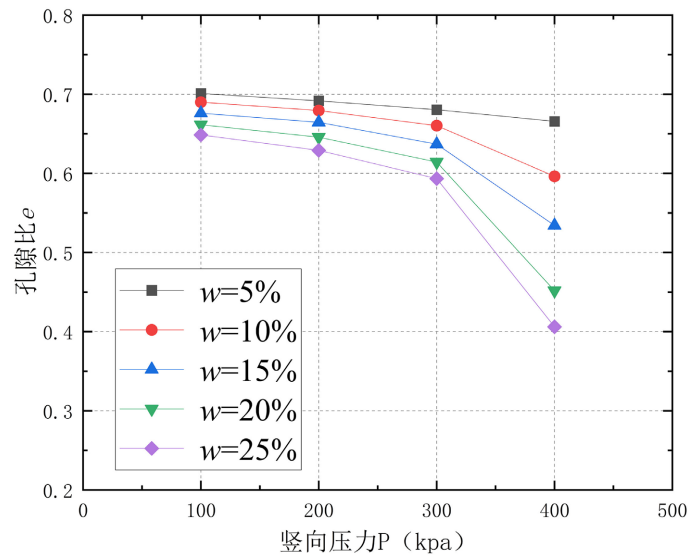


Figure 1. e - p curve of native loess

图 1. 原状黄土 e - p 曲线

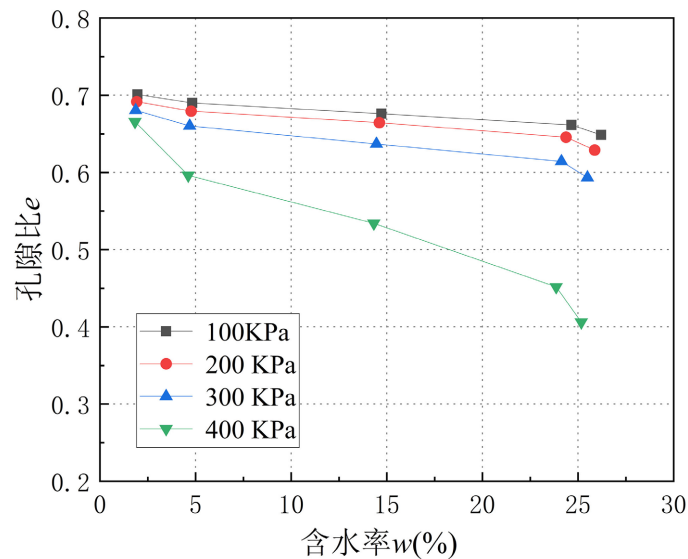


Figure 2. The e - w curvature of the native loess

图 2. 原状黄土的 e - w 曲线

图 1 是不同含水率的原状黄土土样孔隙比 e 与竖向压力 p 之间的关系曲线。可知：(1) 整体上，不同含水率的黄土土样的 e - p 曲线呈现明显的上凹形态，随着竖向压力 p 的增加，孔隙比 e 逐渐减小；(2) 当含水率 w 为 5% 时， e 在 p 增加时缓慢减小，加载至 400 kPa 时 e 仅变化 0.0354，说明低含水率黄土的刚度较高，抵抗垂直荷载引起的变形能力较强；(3) 含水量的增加导致压缩曲线呈前期缓慢减少、中期陡然减少和后期缓慢减少三个阶段，且随着 w 增大，前期缓慢减少阶段的变化幅度更加显著，中期陡然减少阶段的速率增大，后期缓慢减少阶段更加明显[13]；在前期由于低含水量，导致土粒之间的空隙大压缩缓慢，水分填充孔隙时颗粒移动更加容易，才会导致变化显著；中期陡然减少是由于压力增大水份被迅速挤出，孔隙迅速减小从而导致体积急剧减小；后期水份在更小的孔隙中分布压缩困难，颗粒间接触点增多，摩擦力增大；(4) 当含水率 w 为 25% 时， e 随着 p 的增加迅速减小，加载至 400 kPa 时 e 变化量为 0.2098，

约为含水率 w 为 5% 时样本变化量的 6 倍, 说明高含水率黄土的刚度较低, 抵抗竖向荷载引起的变形能力较弱。可以看出: 土壤的含水率对其压缩性质有显著影响。含水率较高时, 土壤压缩性较大, $e-p$ 曲线呈现平缓趋势; 而在干燥状态下, 土壤的压缩性较小, $e-p$ 曲线则呈现陡峭趋势。

通过观察图 1 的 $e-p$ 曲线可知: 当含水率 w 逐渐增加时, 竖向压力从 100 kPa 增加至 300 kPa, 孔隙比 e 在竖向压力 p 增加时缓慢减小, 可知原状黄土的强度在缓慢提升。但当不同含水率的压力从 300 kPa 增加至 400 kPa 时, 除了含水率 w 为 5% 的减小速率较缓, 其余含水率的孔隙比 e 随着竖向压力 p 的增加而陡然下降, 以含水率在 20% 和 25% 两种状态下最为明显。可以看出在 300 kPa 至 400 kPa 这个压力区间内黄土的强度得到了明显的提升。

图 2 是在不同竖向压力 p 作用下的原状黄土孔隙比 e 与含水率 w 的关系曲线。(1) 总体而言, 在不同竖向压力下, 黄土样品的 $e-w$ 曲线变化范围明显, 随着含水率 w 的增加, 孔隙比 e 的变化幅度逐渐减小; (2) 随着竖向压力 p 的增加, $e-w$ 曲线整体呈现稳步减小的趋势。随着 p 的增大, 减小阶段速率明显变大, 减小幅度也逐渐显著增加; (3) 在高压条件下 ($p > 300$ kPa), e 随着 w 的增加的减小幅度较大。当 $p = 400$ kPa 时, e 的最大变化量为 0.2596, 大约是 $p = 100$ kPa 时样品变化量的 5 倍, 这说明土体在高压条件下的压缩变形对水敏感性较强。结果表明: 竖向压力不变时, 含水率越大, 孔隙比减小幅度越大, 土样越疏松。含水率不变时, 竖向压力越大, 孔隙比越小, 土样压缩变形程度越大。基于以上分析, 可以得出结论: 含水量和竖向压力均对原状黄土的压缩性能指标产生影响。

从图 3 所示的孔隙比 e 与含水率 w 的关系曲线可以观察到, 黄土的孔隙比 e 随着含水率 w 的增加而减小, 这表明水分的加入会导致黄土的孔隙度降低, 从而使土体更加致密。这一现象在竖向压力作用下更为明显, 随着压力的增加, 孔隙比 e 减小的幅度加大, 说明黄土在受到外部压力时, 其内部结构会发生重新排列, 从而减小孔隙比 e , 增加土体的压缩性。

此外在高压条件下, 孔隙比的变化对含水率 w 更为敏感, 这可能是因为高压下, 土体的颗粒排列更加紧密, 水分子的存在对颗粒间的排列产生了更大的影响。这种敏感性表明, 在高等压力下的土体工程中, 水分的控制对于防止土体的过度压缩和维持土体的稳定性至关重要。然而, 黄土的压缩性能不仅取决于其初始的孔隙比 e 和含水率 w , 还与其固结后的强度密切相关。固结是指土体在长期竖向压力作用下, 孔隙比 e 减小、密度增加、强度提高的过程, 且固结后的黄土将具有更高的承载能力和更低的压缩性。在实际工程中, 通过对黄土进行预压固结, 可以提高其强度, 减少未来使用过程中的沉降。固结过程中, 土体的颗粒会重新排列, 形成更加稳定的结构, 这不仅提高了土体的强度, 也改善了其工程性能。

4.2. 黏聚力对土强度的影响

各种初始含水率下的原状黄土试样的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 的计算结果详见表 4。按照黄土抗剪强度计算公式计算得到固结后的强度如表 5 所示, 将计算结果进行拟合, 如图 3 所示。

Table 4. Shear strength parameters in native loess
表 4. 原状黄土抗剪强度参数

测定对象	含水率(%)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)
原状黄土	5	92.52	26.57
	10	65.66	26.02
	15	41.15	25.87
	20	32.34	25.51
	25	23.76	25.22

Table 5. Calculation of strength after consolidation of raw loess samples at all levels of pressure
表 5. 各级压力下原状黄土试样固结后强度计算

含水率竖向压力	5	10	15	20	25
100	148.34	123.25	92.94	78.33	67.68
200	200.59	151.49	142.11	130.70	121.89
300	252.13	206.82	173.46	170.11	150.89
400	298.04	270.77	225.51	218.30	207.37

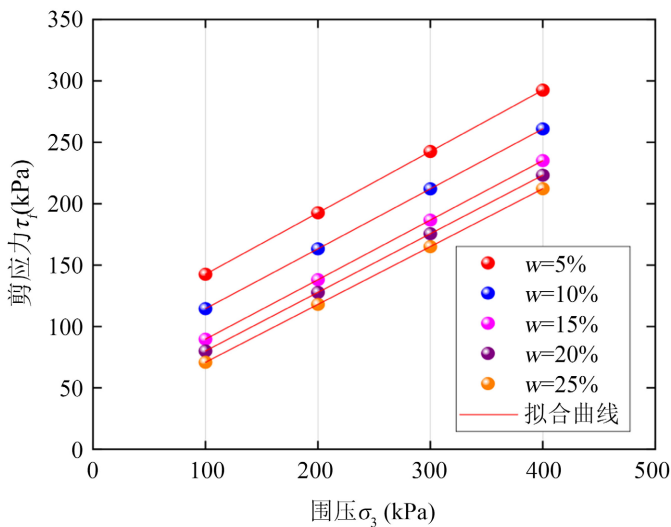


Figure 3. Strength envelope plot of the soil
图 3. 土的强度包络图

图 3 是不同含水率情况下土的强度包络图。可以从图中看出黏聚力 c 随着含水率 w 的增加而降低，这是因为水分的增加削弱了土壤颗粒间的粘结作用。从图中可以看出，饱和含水率下的黏聚力最小，仅为 23.76 kPa，而在 5% 含水率下最大，为 92.52 kPa。这种黏聚力 c 变化表明土壤在低含水率条件下具有更高的稳定性，而在高含水率条件下更容易发生剪切破坏。其中五个不同含水率下的内摩擦角相差不大，实际上在这个范围内内摩擦角有一个微弱的降低趋势，从 26.57° 降低到 25.22° 。土壤的抗剪强度 τ 由黏聚力 c 和内摩擦角 φ 共同决定，在所得到的数据中，黏聚力 c 的降低对抗剪强度的影响更为显著。及在饱和含水率下，黏聚力 c 比 5% 含水率下降了约 75%，这将导致土壤的抗剪强度显著降低。

根据图 3 的研究结果可以得出以下结论：(1) 原状黄土试样在不同初始含水率条件下，随着水平围压的增大，剪切强度近似呈线性增加。低含水率时，剪切强度增加幅度更大，这表明土体对力的响应能力更强。而高含水率时，剪切强度增加幅度很小，这表面此时土体对力的响应能力较差；(2) 原状黄土试样的抗剪强度 τ_f 在不同围压条件下与初始含水率呈负相关。在低围压条件下 ($\sigma_3 = 100$ kPa)，减小效果更为显著，在含水率 $w = 15\%$ 时，剪应力 τ_f 下降到 100 kPa 以下。而高围压条件下 ($\sigma_3 = 400$ kPa)，试样的减小量更大，且在高含水率 ($15\% < w < 25\%$) 时减小速率变化更为明显，说明此时水的软化效果更加明显。

5. 模型拟合及检验

5.1. Origin 拟合模型表达式

在 Origin 中利用固结孔隙比 e_g 、固结含水率 w_g 和抗剪强度 τ_f ，拟合出三维曲面并输出 τ_f 关于 w_g 和

e_g 的模型表达式(为公式(2)); 具体的拟合操作为: 在 Origin 软件中, 将 X 轴、Y 轴、Z 轴依次设重新排列, 导致 $e\text{-}l\text{gp}$ 压缩曲线向下移动。同时, 相同荷载条件下, 含水量增加会导致土样的孔隙比减为土试样固结稳定后的含水率 w_g 、土试样固结稳定后的孔隙比 e_g 和抗剪强度 τ_f , 将所有实验获得的所有数据输入到 Origin 软件中, 通过软件的拟合得到一个曲面模型, 并输出 τ_f 关于 w_g 和 e_g 的表达式 $\tau_f = f(w_g, e_g)$ 。如式(2)所示; 后续在该性质土层中测定土的抗剪强度仅需测定原装土的含水率和孔隙比[16], 带入拟合出的表达式即可快速得出土的抗剪强度 τ_f 。对模拟的表达式进行检验, 需制取 2 组固结稳定后的含水率 w_g 和固结稳定后的孔隙比 e_g 不同于前面 5 组的土试样, 将固结稳定后的含水率 w_g 和固结稳定后的孔隙比 e_g 带入公式(2)拟合出的模型中, 得出拟合 τ_f^* ; 每组中选取一个土试样通过剪切试验测定其抗剪强度 τ_f 。对比每组土试样的抗剪强度 τ_f 和抗剪强度 τ_f^* , 如果带入模型后抗剪强度 τ_f^* 与抗剪强度 τ_f 的数据误差在 3% 以内, 则认为验证通过, 模型拟合结果能较好反映不同含水率原状黄土切应力与孔隙比的演变规律, 数据有较高的精确度; 若数据误差超过 3%, 则认为验证不通过, 需重新进行试验拟合模型。

根据图 4 和图 5 整体来看, 外部荷载条件即轴向围压影响下的不同初始含水率原状黄土试样孔隙比 e 与切应力 τ_f 的三维散点图变化趋势同二维拟合曲线一致, 且在三维坐标系中加上第三变量含水率后, 能够更加直观的感受原状黄土试样含水率、切应力、孔隙比, 三个变量之间存在密切关联; 从图 4 中可以看出, 初始含水率由低到高, 原状黄土抗剪强度 τ_f 的增长对土试样孔隙比的变化影响是一个阶段性的过程。结合图 5 分析可得, 这一阶段整体变化趋势经历了一个由缓慢增长到快速增长的阶段。非线性曲面拟合模型拟合因子 R^2 为 0.9997, 量化方程见式(3):

$$\tau_f = -290.8445w_0^2 + 235.7281w_0 + 3.1223e_g^2 - 0.1817e_g + 1 \quad (3)$$

式中: τ_f ——土的抗剪强度(kPa);

e_g ——土试样固结稳定后的孔隙比;

w_0 ——土试样固结稳定后的含水率(%)。

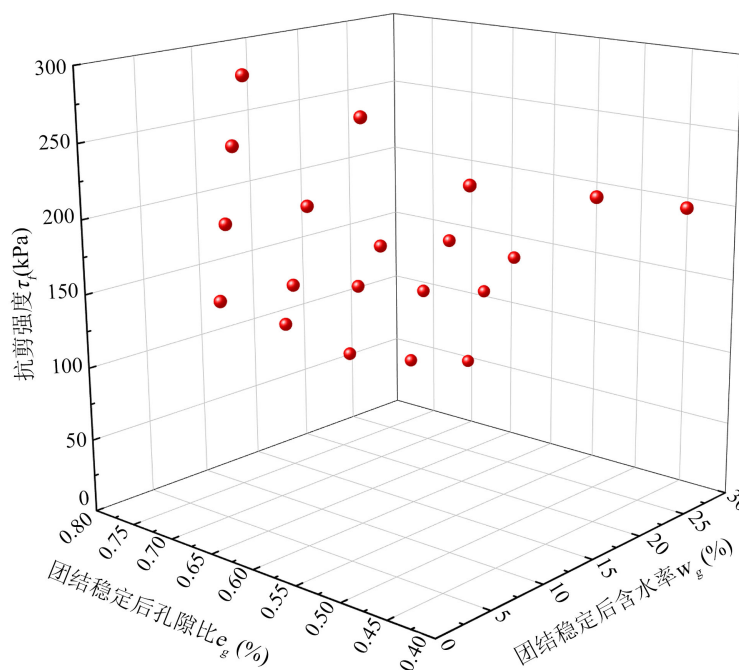


Figure 4. 3D scatter plot of water content-shear stress and pore ratio

图 4. 含水率 - 剪应力 - 孔隙比三维散点图

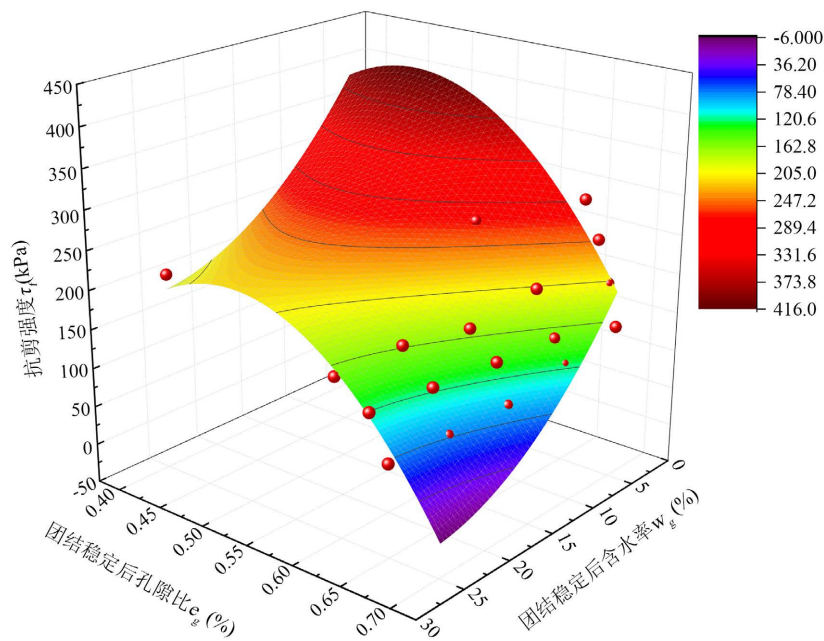


Figure 5. Water content-shear stress-pore ratio 3D fitting model curvature
图 5. 含水率 - 剪应力 - 孔隙比三维拟合模型曲

5.2. 拟合模型表达式的检验

通过非线性曲面拟合模型，可发现在确定围压下不同初始含水率原状黄土试样孔隙比与切应力的三维拟合模型拟合程度均接近于 1，拟合程度高。但在实际工程应用中，对土体施加单一恒定荷载的情况相对较少，大多数情况下是连续变化的荷载作用于土体产生破坏。因此，为了让试验结论更贴近于实际工程问题，且为了能量化分析不同初始含水率原状黄土在不同围压下剪切的孔隙比 e 与抗剪强度 τ_f 之间的连续关联性，将 5%、10%、15%、20%和 20%原测定对象含水率 w (%)粘聚力 c (kPa)内摩擦角 φ (°)原状黄土试样的孔隙比与抗剪强度的三维散点图进行整合，并对整合散点图进行三维非线性曲面拟合，模拟出原状黄土含水率 - 切应力 - 孔隙比的关联拟合模型，模型拟合结果较好反映不同含水率原状黄土切应力与孔隙比的演变规律，使拟合模型更为接近实际受荷情况。

拟合完成后，按照说明书要求，用同一土样制备的土试样进行两次固结剪切试验，通过试验测定土试样 A 的固结含水率 w_g 为 12.14%、固结孔隙比 e_g 为 72.6、切应力 τ_f 为 102.39 (kPa)。将土试样 A 的固结含水率 $w_g = 12.14\%$ 和固结孔隙比 $e_g = 72.6$ 代入拟合公式(6)算得切应力为 103.85，对比土试样 A 的实验值和计算值可发现拟合误差为 1.42%，在工程允许误差内。通过试验测定土试样 B 的固结含水率 w_g 为 18.91%、固结孔隙比 e_g 为 70.5、切应力 τ_f 为 82.15 (kPa)。将土试样 B 的固结含水率 $w_g = 18.91\%$ 和固结孔隙比 $e_g = 70.5$ 代入拟合公式(3)算得切应力为 83.42 (kPa)，对比土试样 B 的实验值和计算值可发现拟合误差为 1.55%，在工程允许误差内(表 6 为不同土样的检验参数对比)。对比数据得出，模型拟合结果能较好反映不同含水率原状黄土切应力与孔隙比的演变规律，数据有较高的精确度。

Table 6. Test parameters for different soil samples
表 6. 不同土样的检验参数

土试样	固结含水率(w_g)	固结孔隙比(e_g)	切应力 τ_f (kPa)	计算切应力 τ_f (kPa)	误差(%)
A	12.14	72.6	102.39	103.85	1.42
B	18.91	70.5	82.15	83.42	1.55

6. 结论

本文介绍了在含水率和孔隙比确定的情况下如何快速有效地确定黄土的强度,着重阐明了建立有效的模型来通过含水率和孔隙比两个变量预测黄土的强度 τ_f 。在此过程中,对一系列不同含水率下的原状黄土进行了固结压缩试验和直接剪切试验,同时对每种原状黄土的其他物理性质指标进行了很好的控制。为了实际目的,还根据 Origin 软件拟合了三维曲面模型,导出了一个全新的双变量计算模型。本研究的主要结果总结如下:

不同的含水率对黄土的强度产生规律性影响。含水率的增加会导致黄土的强度减小。竖向压力的增加使得黄土强度与含水率的关系曲线呈现阶梯式下降。竖向压力不变时,含水率越大,孔隙比减小幅度越大,土样越疏松。含水率不变时,竖向压力越大,孔隙比越小,土样强度指标变化越大。

随着初始含水率 w 的升高,原状黄土的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 随之减小,在高含水率条件下($w = 25\%$),原状黄土的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 数值相对偏小,抗剪强度低,而在低含水率条件下($w = 5\%$),原状黄土的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 数值偏大,抗剪强度高。不同含水率条件下,原状试样的剪切强度 τ_f 随着围压的增大呈近似线性增长。不同水平围压条件下,原状试样的抗剪强度 τ_f 则随着初始含水率的增加而逐渐减小。

孔隙比、含水率及土强度三者之间有很密切的关联性。且导出了一个双变量计算模型,通过含水率和孔隙比确定黄土的强度 τ_f 。通过检验证明:此模型有很高的精确度。

参考文献

- [1] 肖尊群,耿星月,舒志鹏,等. 非饱和粗,细颗粒混合土在动荷载作用下的细观力学响应[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11734-11740.
- [2] 肖文斌,李靖,武科,等. 湿陷性黄土微观力学特征及其路基沉降规律[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 163-173.
- [3] 王铁行,郝延周,汪朝,程磊,李江乐. 干湿循环作用下压实黄土动强度性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1242-1251.
- [4] 蒲川豪,许强,赵宽耀,蒋亚楠,郭鹏,杜鹏川,袁爽. 基于遥感分析的延安新区平山造城工程地面沉降及植被恢复特征研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 597-609.
- [5] 徐张建,马宏敏,赵治海. 黄土地区大厚度填方地基填筑期间沉降变形监测方法[J]. 工程勘察, 2015, 43(5): 1-5, 22.
- [6] 张炜,张继文,于永堂. 第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告-黄土高填方关键技术问题与工程实践[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(1): 12-19.
- [7] 杨海清,陈池威,赵岗,等. 砂岩质文物内部毛细水运移过程微电极响应特征[J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 120-132.
- [8] 黄雪峰,孔洋,李旭东,马龙,杨宝山. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 37-44.
- [9] Nie, Y., Ni, W., Lü, X., Tuo, W. and Yuan, K. (2023) Macroscopic Mechanical Behavior and Microstructural Evolution of Compacted Loess in the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, **232**, Article ID: 105767. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105767>
- [10] 王丽. 含水量对土体强度的影响[J]. 内蒙古科技与经济, 2015(13): 99-100.
- [11] 田堪良,张慧莉,马俊. 基于强度条件的黄土结构性静力试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1993-1999.
- [12] 杨坪,吴民晖,许德鲜. 含水率对重塑黄土的变形特性影响的实验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1066-1071.
- [13] 骆丕昭,王云琦,李通,等. 基于三轴 UU 试验的土体含水率对根土复合体强度特性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 153-160.
- [14] Mu, Q.Y., Zhou, C. and Ng, C.W.W. (2020) Compression and Wetting Induced Volumetric Behavior of Loess: Macro- and Micro-Investigations. *Transportation Geotechnics*, **23**, Article ID: 100345. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100345>

-
- [15] The, M.K. and András, M. (2018) The, K.M. A Study on the Relationship between Matric Suction and the Void Ratio and Moisture Content of a Compacted Unsaturated Soil. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **62**, 709-716.
- [16] 马闫, 王家鼎, 李彬, 等. 压实黄土变形影响因素与计算模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 44-53.