

文章编号: 1008-2786-(2019)3-392-08

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000432

基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型

杨志全¹, 丁攀², 雨德聪¹, 杨溢^{1*}, 朱颖彦³, 韩用顺⁴

(1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 昆明 650093; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 4. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201)

摘 要: 孔隙率对黄土抗剪强度具有非常重要的影响, 然而, 孔隙率对黄土抗剪强度影响效果的认识并不充分。本文以陕西省延安黄土为研究对象, 开展不同孔隙率的黄土直剪试验研究, 探讨了孔隙率对粘聚力与内摩擦角的定量变化关系; 并以此为基础, 构建了基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型, 并对其进行了验证。研究结果表明: (1) 延安黄土粘聚力与孔隙率间呈幂函数变化关系; (2) 延安不同孔隙率黄土内摩擦角取值呈现出两个区间, 当孔隙率 $n \geq 0.4$ 时, 其内摩擦角在 $25 \pm 2.5^\circ$ 的范围内变动, 而当孔隙率 $n < 0.4$ 时, 其内摩擦角在 $29.5 \pm 2^\circ$ 的范围内变动; (3) 通过分析得到了基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型, 且该模型得到的黄土抗剪强度理论值与实测值间的误差较小, 相对误差均在 7% 以内, 具有较高的精确度。研究成果不仅能为延安黄土抗剪强度研究等提供技术支持, 而且还能为该地区的工程建设等方面提供理论参考。

关键词: 延安; 黄土; 孔隙率; 粘聚力; 内摩擦角; 抗剪强度

中图分类号: TU 444

文献标志码: A

黄土在世界各地的分布都很广泛, 其中以中国最具代表性。中国的黄土具有分布广、厚度大与地层全等特征^[1]。黄土高原是我国典型的黄土地貌地区, 在西部大开发战略的支持下, 黄土高原地区开展了大规模的工程建设, 其中又以延安最具代表性^[2]。

工程建设场地稳定性受黄土的抗剪强度的直接影响。国内外学者在干密度、含水率、干湿与冻融循环作业、粒度分布、植物根系、土壤结构、节理与可溶盐等因素对不同地区黄土抗剪强度的影响作用方面开展了研究。例如, 干密度、含水率对不同地区黄土

抗剪强度的定性或定量影响^[3-11]; 干湿循环与冻融循环与黄土抗剪强度间的变化特征^[12-13]; 黄土结构性、灌水浸出作用与可溶盐含量对其抗剪强度的效果^[14-17]; 包含节理因素的结构黄土节理强度^[18]; 植物根系对黄土抗剪强度的作用^[19]。国外, Gordana^[20]则分析了粒度分布及天然土壤结构对贝尔格莱德黄土非饱和抗剪强度的影响效应。

孔隙率对黄土抗剪强度具有重要的影响。部分学者基于孔隙率对角砾土、非饱和沙土等土体的抗剪强度影响开展了研究^[21-22]。然而, 目前针对孔隙

收稿日期 (Received date): 2019-05-05; **改回日期** (Accepted date): 2019-06-26

基金项目 (Foundation item): 云南省万人计划“青年拔尖人才”专项 (YNWR-QNBJ-2018-321); 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U1502232); 国家自然科学基金项目 (41402272); 中国地质调查局西安地质调查中心科研项目 ([2018]01-21)。[Yunnan Ten Thousand Talents Plan Young & Elite Talents Project (YNWR-QNBJ-2018-321); National Natural Science Foundation Joint Fund Key Project (U1502232); National Natural Science Foundation of China (41402272); Research Project of Xi'an Geological Survey of China Geological Survey ([2018]01-21)]

作者简介 (Biography): 杨志全 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 灾害启动机理与水土保持方面研究。[YANG Zhiqian (1983-), male, Ph. D, professor, research on disaster start mechanism and soil and water conservation research] E-mail: yzq1983816@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 杨溢 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 灾害启动机理与水土保持方面研究。[YANG Yi (1965-), male, Ph. D, professor, specialized in hydrology, disaster start mechanism and soil and water conservation research] E-mail: 2919847230@qq.com

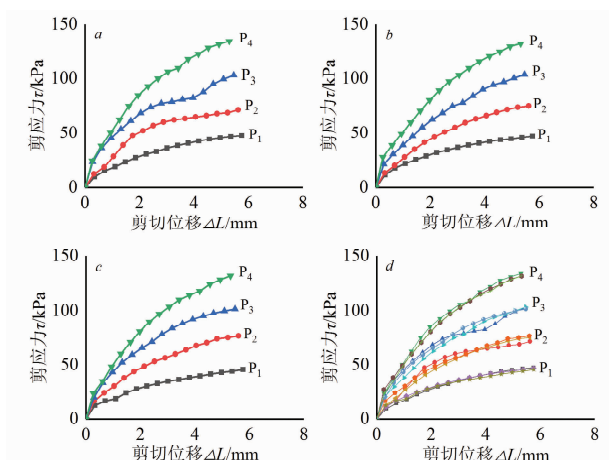


图3 孔隙率 $n=0.54$ 剪应力 - 剪切位移关系图

(a. 第1组; b. 第2组; c. 第3组; d. 整体图)

Fig. 3 Relationship between porosity and shear displacement of porosity at $n=0.54$

(a. Group 1; b. Group 2; c. Group 3; d. Overall diagram)

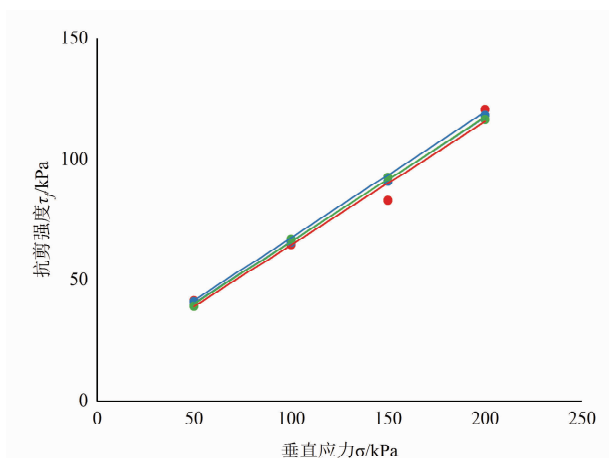


图4 孔隙率 $n=0.54$ 抗剪强度 - 垂直应力关系图

Fig. 4 Porosity-vertical stress relationship of porosity at $n=0.54$

为剪应力 - 剪切位移变化关系图, 选图 3 中剪切位移等于 4 mm 所对应的剪应力为抗剪强度^[23-24]。根据抗剪强度与垂直应力关系绘制抗剪强度 - 垂直应力关系曲线(图 4), 抗剪强度线在纵坐标轴上的截距为粘聚力 c , 直线的倾角为土的内摩擦角 φ 。图 5、图 6 分别显示不同孔隙率黄土的粘聚力与内摩擦角及对应的变化关系。

2 延安黄土抗剪强度模型

2.1 粘聚力 - 孔隙率的定量变化关系

分析图 5 可知, 延安黄土的粘聚力与孔隙率具

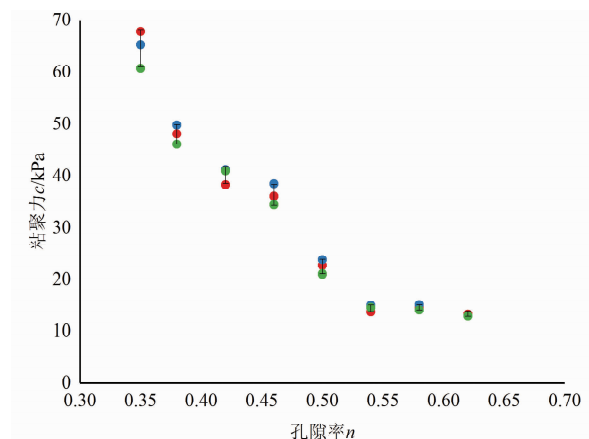


图5 粘聚力 - 孔隙率变化关系

Fig. 5 Relationship between cohesion and porosity

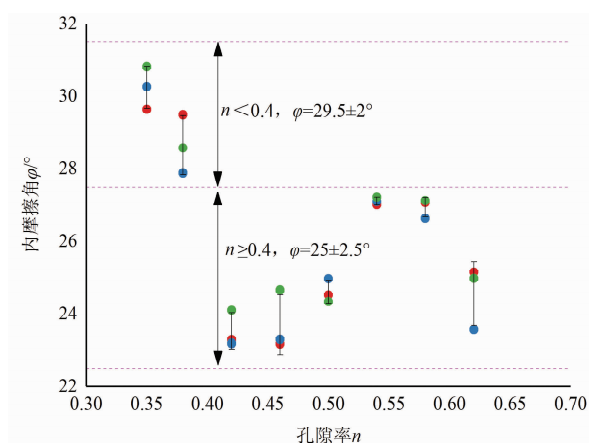


图6 内摩擦角 - 孔隙率变化关系

Fig. 6 Internal friction angle-porosity relationship curve

有明显的反向变化关系; 然后, 目前尚无相关的黄土粘聚力 - 孔隙率的定量变化模型可借鉴; 因此本文选用数学上最基础且实践中应用最为广泛的四种模型, 即, 线性模型、指数模型、幂函数模型与对数函数模型; 并以此为基础采用数值分析方法及 Origin 软件探讨延安黄土粘聚力与孔隙率间的定量变化关系; 再依据数理统计理论与试验验证综合分析确定其最优模型。拟合得到的延安黄土粘聚力 - 孔隙率间的线性、指数、幂函数与对数函数等 4 种变化关系模型及对应的方差分析结果见表 3。

在表 3 中: SS 与 MS 分别为回归平方和与均方差; F 为 F 检验分布值; P 为确定回归拟合模型是否具有显著统计意义系数, 通常与 $\alpha = 0.05$ 进行比较, 如果 P 值低于 0.05, 则拟合模型相关性统计意义显著; R^2 与 $R^2(\text{adj})$ 分别为未调整与调整后的相关系数, 一般情况下, $R^2(\text{adj})$ 大于 80%, 且 $R^2(\text{adj})$

表 3 延安地区黄土粘聚力与孔隙率变化关系各拟合模型及对应的方差分析结果
Tab. 3 The fitting model of the relationship between cohesion and porosity of loess in Yan'an area

模型	函数表达式	来源	自由度	SS	MS	F	P	R ²	R ² (adj)
指数模型	$c = 597.14e^{-6.43n}$	回归	1	10435.66	5217.83	453.48	0.00	97.20%	96.73%
		残差误差	6	69.04	11.51				
		合计	7	10504.69					
幂函数模型	$c = 3.35n^{-2.82}$	回归	1	10427.56	5213.78	405.56	0.00	96.87%	96.35%
		残差误差	6	77.14	12.86				
		合计	7	10504.7					
对数模型	$c = -89.76\ln n - 35.55$	回归	1	10369.54	5184.77	230.18	0.00	94.51%	93.60%
		残差误差	6	135.15	22.53				
		合计	7	10504.69					
线性模型	$c = -186.8n + 121.6$	回归	1	2250.31	2250.31	63.28	0.00	91.34%	89.90%
		残差误差	6	213.36	35.56				
		合计	7	2463.67					

越大,则模型拟合数据的优度越高。

依据数学统计理论分析表 3 可得到:拟合的 4 种模型相关系数 R^2 均大于 90%,且调整的 R^2 (adj) 也都接近 90%,说明 4 种模型与试验结果间的回归分析效果均较好;在方差分析(表 3)中,各模型均满足 $P=0.00<\alpha=0.05$,且 F 值均大于 $F_{0.05}(1,6)=5.99$ 。因此可见,拟合的延安黄土粘聚力-孔隙率间的线性、指数、幂函数与对数函数等 4 种变化关系模型均满足数学统计理论的要求。

然而,模型选取不仅要判断是否满足数学统计理论的要求,而且还应该考虑以下两个要求:(1)模型系数及关系式要简单,便于理解;(2)还需通过试验验证其在实践工程中的适用性与精确性。

为此,为分析四种模型在实践工程中的适用性与精确性,笔者设计了 4 组对照试验对其进行对比验证,孔隙率分别为 0.37、0.40、0.48 与 0.56,对应的试验编号分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 。拟合得到的延安黄土粘聚力与孔隙率变化关系模型验证结果见表 4 所示。

联合分析表 3~4 可知:(1)指数模型和幂函数模型 R^2 (adj)、 P 、 F 值均比较接近,除 P 值外, R^2 (adj) 与 F 值均优于对数模型与线性模型;同时,在验证试验结果中,指数模型和幂函数模型的平均差异(不到 8%)均小于对数模型与线性模型的平均差异(接近 10%),且通过分析差异极差也可发现,

前两个模型也较优于后两个模型,因此,首先可排除对数模型与线性模型;

(1)虽然指数模型和幂函数模型 R^2 (adj)、 P 、 F 值与验证试验的平均差异均接近,但是由于前者的差异极差(11.24%)不如后者的差异极差(8.51%);且幂函数模型较指数模型要简单,因此,通过比较二者可发现幂函数模型优于指数模型。

综上所述,选取的延安黄土粘聚力与孔隙率间定量变化关系的最优模型为幂函数模型,即:

$$c = 3.35n^{-2.82} \tag{2}$$

2.2 内摩擦角 - 孔隙率的定量变化关系

分析图 6 可知,延安黄土内摩擦角与孔隙率间具有如下的定量变化关系特征:

- (1)当孔隙率 $n < 0.4$ 时,黄土内摩擦角在 $29.5 \pm 2^\circ$ (即, $27.5^\circ \sim 31.5^\circ$) 的区间范围内变动;
- (2)当孔隙率 $n \geq 0.4$ 时,黄土内摩擦角在 $25 \pm 2.5^\circ$ (即, $22.5^\circ \sim 27.5^\circ$) 的区间范围内变动。

为验证以上定量变化关系在实践工程中的适用性与精确性,利用 2.1 中所述编号为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 的四组验证试验实测的内摩擦角对其进行对比验证,结果见表 5 所示。

分别表 5 可知,本研究得到的延安黄土内摩擦角与孔隙率间定量变化规律具有较好的适用性与精确性。

表 4 延安黄土粘聚力与孔隙率合变化关系模型验证结果

Tab.4 Verification of models for the relationship between cohesion and porosity of loess in Yan'an area

模型	试验编号	孔隙率 n	验证结果				
			理论值/kPa	实测值/kPa	差异分析/%		
					各组差异	平均差异	极差分析
指数模型	Y_1	0.37	55.32	62.31 ± 1.27	12.64	7.80	11.24
	Y_2	0.40	45.61	48.86 ± 1.79	7.12		
	Y_3	0.48	27.26	27.65 ± 0.74	1.40		
	Y_4	0.56	16.30	17.94 ± 0.91	10.04		
幂函数 模型	Y_1	0.37	55.30	62.31 ± 1.27	12.68	7.83	8.51
	Y_2	0.40	44.38	48.86 ± 1.79	10.08		
	Y_3	0.48	26.54	27.65 ± 0.74	4.17		
	Y_4	0.56	17.19	17.94 ± 0.91	4.39		
对数模型	Y_1	0.37	53.69	62.31 ± 1.27	16.05	9.57	11.42
	Y_2	0.40	46.70	48.86 ± 1.79	4.63		
	Y_3	0.48	30.33	27.65 ± 0.74	-8.84		
	Y_4	0.56	16.49	17.94 ± 0.91	8.76		
线性模型	Y_1	0.37	52.48	62.31 ± 1.27	18.72	10.49	14.5
	Y_2	0.40	46.88	48.86 ± 1.79	4.22		
	Y_3	0.48	31.94	27.65 ± 0.74	-13.42		
	Y_4	0.56	16.99	17.94 ± 0.91	5.58		

表 5 延安黄土内摩擦角与孔隙率变化关系验证结果

Tab.5 Verification results of relationship between internal friction angle and porosity of loess in Yan'an area

试验 编号	试验 编号	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$		
		变动的区 间范围	实测值	实测值是否 在区间范围
Y_1	0.37	29.50 ± 2.00	29.30 ± 0.32	是
Y_2	0.40		24.65 ± 0.54	
Y_4	0.48	25.0 ± 2.50	24.21 ± 0.55	
Y_2	0.56		25.33 ± 0.97	

因此,针对延安不同孔隙率黄土的内摩擦角取值做如下建议:

(1)当孔隙率 $n \geq 0.4$ 时,其内摩擦角在 $25 \pm 2.5^{\circ}$ 的范围内取值,一般情况下取 25° ;

(2)当孔隙率 $n < 0.4$ 时,其内摩擦角在 $29.5 \pm 2^{\circ}$ 的范围内取值,一般情况下取 29.5° 。

2.3 基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型

岩土体抗剪强度基本理论公式^[25]:

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \tan \varphi \tag{3}$$

式中: τ_f 为抗剪强度,kPa; σ 为施加的正应力或法向应力,kPa; c 为粘聚力,kPa; u 为超静孔隙水压力,kPa; φ 为内摩擦角($^{\circ}$)。

将上文探讨得到的延安黄土粘聚力、内摩擦角与孔隙率的定量变化关系带入式(2)可构建得到基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型:

$$\begin{cases} \tau_f = 3.35n^{-2.82} + 0.47(\sigma - u) & n \geq 0.4 \\ \tau_f = 3.35n^{-2.82} + 0.57(\sigma - u) & n < 0.4 \end{cases} \tag{4}$$

3 模型验证

为验证上文得到的延安黄土抗剪强度模型的可靠性与精度,利用 2.1 中所述编号为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 的四组验证试验对其进行对比验证。

采用基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型(式(4))可计算获得对应验证试验的抗剪强度理论值,其与试验实测值的对比分析结果见表 6。

由表 6 可看出,采用基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型(式(4))计算得到不同正应力 σ 的黄土抗剪强度理论值与实测值间均相差不大,其相对误差均在 7% 以内,尤其超过 90% 的相对误差在 5% 以内变动。这表明,本文构建的基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型(式(4))能用来较好地预测计算延安黄土抗剪强度指标。

表6 延安地区黄土抗剪强度预测值与实测值及差异分析

Tab.6 Predicted value, measured value and difference analysis of loess shear strength in Yan'an area

试验 组别	施加的正应力 σ/kPa	实测值 /kPa	预测值 /kPa	相对误差 /%	试验 组别	施加的正应力 σ/kPa	实测值 /kPa	预测值 /kPa	相对误差 /%
Y ₁ 验证试验 ($n=0.37$)	100	115.73 ± 0.88	112.30	3.05	Y ₂ 验证试验 ($n=0.40$)	100	92.44 ± 0.59	91.38	1.16
	200	177.75 ± 1.09	169.30	4.99		200	147.98 ± 0.62	138.38	6.94
	300	232.42 ± 2.10	226.30	2.70		300	182.08 ± 4.44	185.38	-1.78
	400	284.58 ± 3.78	282.30	0.45		400	235.13 ± 2.33	232.38	1.18
Y ₃ 验证试验 ($n=0.48$)	100	70.12 ± 1.74	73.54	-4.65	Y ₄ 验证试验 ($n=0.56$)	25	30.21 ± 0.71	28.94	4.39
	150	99.00 ± 2.51	97.04	2.02		50	40.99 ± 0.37	40.69	0.74
	200	117.33 ± 4.12	120.54	-2.66		75	53.35 ± 1.46	52.44	1.74
	250	138.96 ± 3.39	144.04	-3.53		100	65.53 ± 2.46	64.19	2.09

4 结论

以分布在陕西省延安的黄土为研究对象,开展不同孔隙率的黄土直剪试验研究,探讨了孔隙率对粘聚力与内摩擦角的定量变化关系;并以此为基础,构建了基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型,并对其进行了验证,得到以下结论:

(1)延安黄土粘聚力与孔隙率间呈明显的反向变化关系,其最优模型为幂函数模型,即, $c=3.35n^{-2.82}$;

(2)延安不同孔隙率黄土内摩擦角取值建议:当孔隙率 $n \geq 0.4$ 时,其内摩擦角在 $25 \pm 2.5^\circ$ 的范围内取值,一般情况下取 25° ;而当孔隙率 $n < 0.4$ 时,其内摩擦角在 $29.5 \pm 2^\circ$ 的范围内取值,一般情况下取 29.5° ;

(3)由基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型计算得到的黄土抗剪强度理论值与实测值间的相对误差均在7%以内,尤其超过90%的相对误差在5%以内变动。因此,其可作为延安黄土抗剪强度的理论计算基础。

本文主要着重与定量分析延安黄土的孔隙率与抗剪强度参数直接的联系,建立基于孔隙率的黄土抗剪强度计算方法,但是形成此种关系的内在原因有待进一步分析和验证,因此在后续的研究中应加强此部分的研究。本文的研究成果不仅能为延安黄土抗剪强度研究等提供技术支持,而且还能为该地区的工程建设等方面提供理论参考。

参考文献(References)

[1] 李威,庄建琦,王颖. 饱和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 626 - 632. [LI Wei, ZHUANG Jianqi, WANG Ying. Experimental study on influencing factors of shear strength of saturated remolded loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 626 - 632]

[2] 李旭东,黄雪峰,杨佳,等. 延安新区压实黄土抗剪强度试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2018, 35(1): 19 - 23. [LI Xudong, HUANG Xuefeng, YANG Jia, et al. Experimental study on shear strength of compacted loess in Yan'an New Area[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2018, 35(1): 19 - 23]

[3] 王林浩,白晓红,冯俊琴. 压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 132 - 135. [WANG Linhao, BAI Xiaohong, FENG Junqin. Discussion on the influencing factors of shear strength index of compacted loess-like fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 132 - 135]

[4] 邢鲜丽,李同录,李萍,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. [XING Xianli, LI Tonglu, LI Ping, et al. Variation of shear strength and water content of loess[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(3): 53 - 59, 97]

[5] 王娟娟,张秀丽,王铁行. 考虑含水量和密度影响的压实黄土抗剪强度特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2014, 46(5): 687 - 691. [WANG Juanjuan, ZHANG Xiuli, WANG Tiexing. Study on shear strength characteristics of compacted loess considering influence of water content and density[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(5): 687 - 691]

[6] 贾亮,朱彦鹏,朱盛川. 兰州马兰、离石压实黄土抗剪强度影响因素探讨[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 120 - 124. [JIA Liang, ZHU Yanpeng, ZHU Yichuan. Discussion on the influencing

- factors of shear strength of compacted loess in Lanzhou Malan and Lishi[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36** (S2): 120–124]
- [7] 邓军涛,张艳,王娟娟. 黄土古土壤的抗剪强度特性[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(5): 319–322. [DENG Juntao, ZHANG Yan, WANG Juanjuan. Shear strength characteristics of loess paleosol [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, **35**(5): 319–322]
- [8] 张奎,李梦姿,杨贝贝. 含水率和干密度对重塑黄土抗剪强度的影响[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2016, **36**(3): 74–79. [ZHANG Kui, LI Mengzi, YANG Beibei. Effect of water content and dry density on shear strength of remolded loess [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2016, **36**(3): 74–79]
- [9] SI Zhongqian. Study on the effect of water content on shearing strength parameters of unsaturated loess[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **3489**(638): 585–588.
- [10] LI Yanrong. A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in China[J]. Engineering Geology, 2018, **236**(SI): 4–10.
- [11] LUO Y, WANG T, LIU X, et al. Laboratory study on shear strength of loess joint [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, **39**(11): 7549–7554.
- [12] 慕焕东,邓亚虹,李荣建. 干湿循环对地裂缝带黄土抗剪强度影响研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(5): 1131–1138. [MU Huandong, DENG Yahong, LI Rongjian. Study on the influence of dry and wet cycle on the shear strength of loess in ground fissure zone[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(5): 1131–1138]
- [13] XU Jian, REN Jianwei, WANG Zhangquan, et al. Strength behaviors and meso-structural characters of loess after freeze-thaw [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, **148**: 104–120.
- [14] WEN Baoping, YAN Yajing. Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China[J]. Engineering Geology, 2014, **168**(16): 46–58.
- [15] WEN Baoping, HE Lei. Influence of leaching by irrigation water on residual shear strength of weathered red mudstone in Northwest China: Implication for its role in landslides' reactivation [J]. Engineering Geology, 2012, **151**: 56–63.
- [16] 闫亚景,文宝萍,黄志全. 可溶盐对兰州非饱和和重塑黄土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2017, **38**(10): 2881–2887. [YAN Yajing, WEN Baoping, HUANG Zhiqian. Effect of soluble salts on shear strength of unsaturated remolded loess in Lanzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(10): 2881–2887]
- [17] ZHANG Fanyu, WANG Gonghui, KAMAI T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of Sodium chloride solution [J]. Engineering Geology, 2013, **155**: 69–79.
- [18] LI Rongjian, LIU Junding, YAN Rui, et al. Characteristics of structural loess strength and preliminary framework for joint strength formula[J]. Water Science and Engineering, 2014, **7**(3): 319–330
- [19] ZHANG Chaobo, CHEN Lihua, LIU Yaping, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of Roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(1): 19–26.
- [20] GORDANA D. The influence of the grain-size distribution and soil structure on the unsaturated shear strength of loess sediments in Belgrade, Central Serbia [J]. Geološki Anali Balkanskog Poluostrva, 2009, **2009**(70): 83–91.
- [21] 韦猛. 孔隙率对角砾土抗剪强度和微型桩结构变形的影响分析 [G]//《工业建筑》编委会、工业建筑杂志社有限公司.《工业建筑》2018 年全国学术年会论文集(下册). 北京:工业建筑杂志社, 2018: 716–719 [WEI Meng. Analysis of the influence of porosity on the shear strength of breccia and the deformation of micro-pile structure [G]//“Industrial Buildings” Editorial Board, Industrial Construction Magazine Co., Ltd. Proceedings of the 2018 National Academic Annual Conference of Industrial Building (2). Beijing: Industrial Architecture Magazine, 2018: 716–719]
- [22] SASAHARA K, SAKAI N, KURIHARA J. Shear strength and void ratio of unsaturated soil with different initial void ratio at failure, critical state[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu C, 2008, **64**(2): 197–208.
- [23] SL237–021–1999, 中国行业标准土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999. [SL237–021–1999, China industry standard geotechnical test procedures[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1999]
- [24] DBJ 61/T 134–2017, 陕西省工程建设标准湿陷性黄土地区土工试验规程[S]. 北京:中国建材工业出版社, 2017. [DBJ 61/T 134–2017, Shanxi province engineering construction standard collapsible Loess Regional Geotechnical Test Procedures [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2017]
- [25] 李广信,张丙印. 土力学[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社, 1994: 198–203. [LI Guangxin, ZHANG Bingyin. Soil Mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 198–203]

Shear Strength of Yan'an Loess Interpreted by Porosity

YANG Zhiquan¹, DING Pan², YU Decong¹, YANG Yi^{1*}, ZHU Yingyan³, HAN Yongshun⁴

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;

4. College of Resources, Environment and Safety engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Porosity has a very important effect on the shear strength of loess. However, the specific effect of porosity on the shear strength of loess is not fully understood. In this paper, the Yan'an loess in Shaanxi Province was taken as research object, and a series of direct shear tests of loess with different porosity were carried out. The quantitative relationship between porosity with internal friction angle as well as cohesive force were carefully discussed. Based on this, a shear strength model of Yan'an loess based on porosity was constructed and verified by comparison with observations. By this research, it found that: (1) there was a power function relationship between cohesion and porosity of Yan'an loess; The values of internal friction angles of Yan'an could be defined by two sections in terms of certain porosity. As porosity $n \geq 0.4$, its internal friction angle varied within the range of 252.5 whereas as porosity $n < 0.4$, its internal friction angle changed within the range of 29.52; (3) Through analysis, the Yan'an loess shear strength model based on porosity was obtained, and the errors between theoretical values and measured values of loess shear strength obtained by the model was small, with a relative error lower than 7%, suggesting the high accuracy of the model. The research results can not only provide technical support for the shear strength research of Yan'an loess, but also provide theoretical reference for the engineering construction in this area.

Key words: Yan'an; Loess; porosity; cohesion; internal friction angle; shear strength