#### DOI: 10.11779/CJGE2021S1038

# Q,古土壤强度及其结构性研究

王丽琴<sup>1,2</sup>,王志强<sup>2</sup>,邢 富<sup>2</sup>,李凯宇<sup>2</sup>,李 帅<sup>2</sup>,胡向阳<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点试验室,陕西 西安 710048;2. 西安理工大学土木建筑工程学院,陕西 西安 710048; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710065)

**摘 要:**古土壤是黄土地层的重要组成部分,但目前对古土壤力学性质的研究相对较少。为研究古土壤的强度及其结构 性,以西安某地 Q<sub>3</sub>古土壤为研究对象,通过土力学途径,对原状、重塑、饱和原状古土壤进行无侧限抗压强度试验,得到了 相应状态古土壤的无侧限抗压强度,计算得出其初始结构性指标;通过复合幂指数模型,得到了原状、重塑古土壤无侧限 抗压强度随含水率变化的表达式,分析了原状、重塑古土壤无侧限抗压强度、扰动灵敏度、浸水灵敏度及构度指标的变化 规律。结果表明:古土壤的结构性强,在饱和状态时,其破坏形态仍然为脆性破坏。在密度、湿度、粒度相同条件下,原状 古土壤的强度小于重塑古土壤的强度,其扰动灵敏度小于1,与一般黄土的规律截然相反;古土壤的浸水灵敏度、构度指 标随着含水率的增加而减小,但在含水率较小或较大时,构度随含水率的变化均不大,且构度指标也可小于1,说明古土 壤具有与黄土不同的结构特征。

关键词:古土壤;无侧限抗压强度;扰动灵敏度;浸水灵敏度;构度指标

**中图分类号:**TU43 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4548(2021)S1-0209-05 作者简介:王丽琴(1976—),女,博士,副教授,主要从事岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: wanglq@ xaut. edu. cn。

# Strength and structure of Q<sub>3</sub> paleosol

WANG Li-qin<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-qiang<sup>2</sup>, XIN Fu<sup>2</sup>, LI Kai-yu<sup>2</sup>, LI Shuai<sup>2</sup>, HU Xiang-yang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Power China Northwest Engineering

Corporation Limited , Xi'an 710048 , China )  $\,$ 

Abstract: Paleosol is an important part of loess stratum, but there are few researches on its mechanical properties. In order to study the strength and structure of paleosol,  $Q_3$  paleosol in Xi'an is taken as the research object. Through the way of soil mechanics, the unconfined compressive strength test is carried out for undisturbed, remolded and saturated paleosol. The unconfined compressive strength values of the paleosol in the corresponding states are obtained, and the initial structure index is calculated. Based on the composite power exponent model, the expressions for unconfined compressive strength of the undisturbed and remolded paleosol with the water content are obtained, and the rules of the unconfined compressive strength, the disturbance sensitivity, the immersion sensitivity and the structure index of the undisturbed and remolded paleosol are analyzed. The results show that the structure of paleosol is strong, and its failure mode is still brittle when it is saturated. Under the same density, humidity and particle size, the strength of undisturbed paleosol is less than that of remolded paleosol, and its disturbance sensitivity is less than 1, which is contrary to the law of general loess. The immersion sensitivity and structure index of the paleosol decrease with the increase of water content, but when the water content is small or large, the change of structure with water content is not large, and the structure index can be less than 1, which shows that the paleosol has different structure characteristics from loess.

Key words: paleosol; unconfined compressive strength; disturbance sensitivity; immersion sensitivity; structure index

### 0 引

言

古土壤是黄土地层的重要组成部分,尤其是黄土 高原区,黄土地层中常有古土壤发育。在工程中,以往 研究较多的是黄土地层中的黄土的力学性质与结构 性,而对古土壤的研究主要集中在其成因及古气候等 方面。随着全文西部大开发战略及"一带一路"建设 的持续推进,黄土地区基础工程,特别是公路、铁路及 地下工程的建设,如银西高铁早胜3号隧道<sup>[1]</sup>、西安地

基金项目:西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点试验室项目(QNZX-2019-07) 收稿日期:2020-12-15

铁盾构施工<sup>[2]</sup>遇到的古土壤问题:由于城镇化建设诱 发的黄土台塬黄土-古土壤互层的边坡失稳问题,逐渐 使人们认识到研究古土壤力学性质的重要性[3]。

古土壤形成于湿热的环境,而黄土形成于干冷的环 境,两者相比较,古土壤的黏粒含量高,黄土中的碳酸钙 以原生的居多。因遭受的氧化作用与淋滤作用较强[4], 古土壤中的碳酸钙含量高,且以次生的为主[5],且竖向 淋滤裂隙发育<sup>[6]</sup>。古土壤与黄土的性质差异大,因此, 黄土-古土壤互层的黄土地层的工程物理性质随着深度 呈波动变化[7];黄土层试样饱和渗透系数明显大于相邻 古土壤层[8];古土壤与黄土在饱和过程中的破坏模式不 尽相同[3],直剪试验表明,含水率相同时,原状古土壤的 黏聚力大于扰动古土壤<sup>[9]</sup>,但直剪试验固定剪切面的 不足,无法反映竖向裂隙对古土壤力学性质的影响。

在土体的结构性研究方面,目前主要以黄土为研 究对象,古土壤结构性方面的研究还未见报道。为此, 本研究以西安航天城某边坡的 Q,古土壤为研究对象, 开展了不同状态古土壤的无侧限抗压强度试验,分析 了古土壤无侧限抗压强度与结构性的变化规律,揭示 了古土壤在强度与结构性方面与一般黄土的差异,丰 富了古土壤力学性质方面的研究。

#### 试验方案 1

#### 1.1 试验用土

试验用Q<sub>3</sub>古土壤(图1(a))取自西安航天城某边坡 (图1(b)),该边坡黄土层位较明显、古土壤露头清晰。



(a) 古土壤

图 1 Q<sub>3</sub>古土壤及其取土场地

Fig. 1 Q<sub>3</sub> paleosol and its sampling site

此处古土壤距离地表 15 m 左右,上覆典型 Q,黄 土。观察发现此古土壤颜色为红褐色,含有钙质结核, 垂直节理发育。按照《土工试验方法标准》<sup>[10]</sup>,对所取 土样进行物理性质测试,所得原状土样的基本物理性 质指标见表1。

### 1.2 试验方案

对 Q<sub>3</sub>古土壤进行不同含水率(5%,10%,15%, 20%,25%及饱和)、不同状态(原状、重塑及原状饱和) 下的无侧限抗压强度试验。试样尺寸为直径 39.1 mm, 高度 80 mm。本试验采用应变控制式无侧限压缩仪, 试验步骤按标准[10]规定进行,试样含水率采用滴定法 或者自然风干法配制,将配制好含水率的试样用保鲜 膜包裹并放入密闭的保湿缸中养护3d以上,以保证 试样含水率的均匀性:饱和试样采用抽气饱和法制取。

表1 土的物理性质指标

Table 1	Physical	properties	of	soil
---------	----------	------------	----	------

初始含水率	干密度 $ ho_{ m d}$	初始孔隙比	塑限 $w_p$	液限 w <sub>L</sub>
$w_0 / \%$	$/(g \cdot cm^{-3})$	$e_0$	1%	1%
17.39	1.64	0.642	22.8	36.8

#### 2 试验结果与分析

#### 2.1 Q<sub>3</sub>古土壤强度分析

按照预定方案进行试验,得到不同含水率下原状、 重塑古土壤的应力-应变曲线,如图2所示。试样的破 坏形态见图3。





Fig. 2 Stress-strain curves of Q3 paleosol with different water contents



图 3 古土壤试样破坏形态 Fig. 3 Morphology of damaged paleosol samples 从图 2 中可以看出,不同含水率下的原状和重塑 古土壤的应力-应变曲线均为软化型,随着含水率的增 加,应力-应变曲线逐渐由强软化型转化为弱软化型, 说明原状、重塑 Q3古土壤均具有较强的结构性;随着 含水率的增大,其结构强度将降低,古土壤的应变软化 程度减小。饱和时,其软化程度最小,但是仍属软化 型。在全含水率范围,甚至饱和试样,均呈脆性破坏 (图 3)。以上结果说明;浸水只能减小部分结构势。

从图 2(a) 中还可看出,原状试样在应变 1% 左右 时,应力达到峰值强度,峰值后强度软化,土体呈脆性 破坏;从图 2(b) 可看出,重塑试样在应变达到 2% 左 右时达到峰值强度。以上说明:Q3古土壤的结构对应 变较敏感,较小的应变就将引起结构的破坏,产生应变 软化;对比图 2(a) 与图 2(b) 可看出,此重塑 Q3古土壤 具有比原状古土壤更大的抵抗单轴压缩应变破坏的 能力。

通过图 2,可得不同含水率下原状及重塑古土壤的无侧限抗压强度 q<sub>u</sub>,则 q<sub>u</sub>随含水率 w 的变化曲线如 图 4 所示。





从图4可以看出,随着含水率的增加,Q<sub>3</sub>古土壤的 原状、重塑试样的无侧限抗压强度 q<sub>u</sub>均呈减小趋势,说 明孔隙水对古土壤的软化作用明显。当含水率较小 时,无侧限抗压强度降低幅度较大,随着含水率的增 大,无侧限抗压强度降低趋势减缓,当含水率超过 20%时,变化趋于平缓。

一般来说,重塑黄土的无侧限抗压强度低于原状 黄土的无侧限抗压强度,这是由于重塑扰动破坏了原 状土体的初始结构,在重塑过程中形成的次生结构强 度不足以弥补扰动破坏的初始结构强度。然而,本次 试验意外发现,重塑 Q<sub>3</sub>古土壤无侧限抗压强度竟高于 原状古土壤的无侧限抗压强度,尤其在含水率较低时 两者相差比较大。重新取样进行试验,结果依然如此。 这个结论与一般黄土研究所得的规律完全相反,说明 此 Q<sub>3</sub>古土壤因重塑而形成的次生结构强度大于其原 生结构强度,考虑其原因在于古土壤的结构特征与一 般黄土存在差异。其一,碳酸钙在黄土与古土壤中的 形态有很大区别。碳酸钙在原状黄土中分布比较均 匀,重塑后与之相似;而Q<sub>3</sub>古土壤由于在其形成时期 遭受了强烈的淋滤作用,其中的可溶碳酸钙随水流逐 渐下渗,造成下部碳酸钙富集量大<sup>[12]</sup>,常表现为钙质 结核的形式存在,并不规则地分布在古土壤中。其二, 原状古土壤中存在较多的淋滤裂隙,形成了结构的软 弱面,降低了整体强度;而在扰动重塑后,原生结构破 坏,形成新的次生结构中不存在裂隙,且土质比较均 匀,具有更强的抵抗破坏的能力,因此表现为重塑古土 壤的无侧限抗压强度反而大于原状古土壤的无侧限抗 压强度。

### 2.2 Q<sub>3</sub>古土壤结构性分析

针对此 Q<sub>3</sub>古土壤的结构性,采用可较好反映土体 初始结构性的构度指标 m<sub>u</sub><sup>[13]</sup>进行研究,其表达式为

$$m_{\rm u} = m_{\rm d} m_{\rm w} = \frac{q_{\rm uo}}{q_{\rm ur}} \cdot \frac{q_{\rm uo}}{q_{\rm us}} \qquad , \qquad (1)$$

式中, $m_{d}$ , $m_{w}$ 分别为扰动灵敏度和浸水灵敏度,反映了 原状土结构完全扰动后强度的潜在变化及原状土完全 浸水饱和后强度的潜在变化。其中 $m_{d} = q_{uo}/q_{ur}, m_{w} = q_{uo}/q_{us}; q_{uo}, q_{ur}, q_{us}$ 分别为原状土、重塑土、饱和原状土 的无侧限抗压强度。

在试验过程中,原状、重塑试样的含水率有差异,因此,利用复合幂指数模型(CPE 模型)<sup>[14]</sup>,对原状、重 塑古土壤无侧限抗压强度的实测值分别进行拟合,得 相应曲线的表达式,如下式所示,相关系数的平方值 *R*<sup>2</sup>均为0.999,相应的曲线见图4。

原状古土壤:  $q_{uo} = 10.42 \exp(-1000w^{3.69})p_a$ , (2) 重塑古土壤:  $q_{ur} = 21.74 \exp(-400w^{3.01})p_a$ , (3)

式中,p。为标准大气压。

从图 4 可以看出: CPE 模型的拟合曲线几乎全部 穿越实测点,说明式(2)与式(3)可以正确描述此古土 壤的无侧限抗压强度 q<sub>u</sub>随含水率 w 的变化规律。因 此,将式(2)与式(3)代入式(1)可得此 Q<sub>3</sub>古土壤构度 m<sub>a</sub>的表达式为

 $m_{\rm u} = m_{\rm d} m_{\rm w} = 73.9 \exp(400 w^{3.01} - 2000 w^{3.69}), (4)$   $\vec{\rm x} \oplus m_{\rm d} = 0.48 \exp(400 w^{3.01} - 1000 w^{3.69}), (5)$  $m_{\rm w} = 154 \exp(-1000 w^{3.69}), (6)$ 

由此可得该 $Q_3$ 古土壤的扰动灵敏度 $m_d$ 、浸水灵敏度 $m_w$ 、构度 $m_u$ 随含水率w的变化曲线如图 5~7 所示。

从图 5 可以看出:此Q<sub>3</sub>古土壤的扰动灵敏度 m<sub>d</sub>小于1,在整个含水率范围内,扰动灵敏度 m<sub>d</sub>大致在 0.5~0.8之间变化,说明重塑可使此古土壤的结构性

增强,其抗压强度不降反升,这与一般土体扰动灵敏度 m<sub>d</sub>≥1的结论<sup>[11]</sup>不同,表明重塑形成的次生结构强度 也可大于原生结构强度,或者说原生结构也可能产生 负强度,导致土体强度的降低。为区分,本研究将土体 原状土强度大于重塑土强度的结构特性,称为正结构 性;土体原状土强度小于重塑土强度的结构特性,称为 负结构性。图5表明此古土壤具有负结构性,土体中 原生的竖向裂隙将导致原状古土壤强度的降低,重塑 后,土体相对均匀,无原始裂隙,试验中表现为强度的 提高,因此,扰动灵敏度 m<sub>d</sub>小于1。此Q<sub>3</sub>古土壤具有 负扰动结构性。



从图 6 可以看出:在整个含水率范围内,此 Q<sub>3</sub>古 土壤的浸水灵敏度  $m_w$ 随着含水率的增加而减小。在 含水率  $w \leq 20\%$  时, $m_w$ 降幅很大;w > 20% 后, $m_w$ 变化 不大,说明浸水对土体结构强度具有很强的消弱作用, 在接近饱和后,土体的结构强度已所剩无几。

以上分析可知:浸水是影响土体结构性的最主要因素。因此,从图7可以看出:由扰动灵敏度 m<sub>d</sub>与浸

水灵敏度 m<sub>w</sub>相乘所得的 Q<sub>3</sub>古土壤的构度 m<sub>u</sub>,与黄土 相类似,仍然表现为随着含水率的增加而减小的规律, 但其在含水率较小时,构度随含水率的变化不大,这与 一般黄土构度的变化规律有所不同。

## 3 结 论

(1)原状、重塑 Q3古土壤均具有较强的结构性, 在全含水率范围内,其应力-应变曲线均为软化型,古 土壤的结构对应变较敏感,应变为1%~2%时,土体 发生脆性破坏。此重塑古土壤具有比原状古土壤更大 的抵抗单轴压缩应变破坏的能力。

(2)此Q3古土壤重塑后的无侧限抗压强度高于 原状时的无侧限抗压强度,尤其在含水率较低时两者 相差较大,该结论与一般黄土的规律完全相反,说明此 Q3古土壤特殊的物理特性使其因重塑而形成的次生结 构强度大于其原生结构强度。

(3)此Q<sub>3</sub>古土壤的初始结构性与一般黄土的差 别较大,其扰动灵敏度 m<sub>d</sub> <1,具有负扰动结构性,重 塑可使其结构性增强,其抗压强度不降反升;浸水对古 土壤结构强度具有很强的消弱作用,是影响土体结构 性的最主要因素,因此,浸水灵敏度 m<sub>w</sub>随着含水率的 增加而减小。Q<sub>3</sub>古土壤的构度指标 m<sub>u</sub>,仍然表现为随 着含水率的增加而减小的规律,但其在含水率较小时, 构度随含水率的变化不大,这与一般黄土的构度规律 有所不同。

### 参考文献:

- [1]叶万军,吴云涛,陈 明,等.大断面古土壤隧道围岩压力 分布规律及支护结构受力特征分析——以银西高铁早胜3 号隧道为例[J]. 隧道建设,2019,39(3):355-361.(YE Wan-jun. WU Yun-tao. CHEN Ming, et al. Surrounding rock pressure distribution law and supporting structure stress characteristics of large cross-section paleosol tunnel: a case study of Zaosheng No. 3 Tunnel on Yinchuan-Xi' an Highspeed Railway[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 355 – 361. (in Chinese))
- [2]张吉宏. 古土壤地层盾构施工引起的地表沉降分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(1):78-83. (ZHANG Jihong. Research on ground settlement of shield tunneling in paleosol strata [J]. Jouranal of disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1):78-83. (in Chinese))
- [3]曹春山, 吴树仁, 潘 懋, 等. 古土壤力学特性及其对黄土 滑坡的意义[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 127 – 132. (CAO Chun-shan. WU Shu-ren. PAN Mao. et al. Mechanics characteristics of paleosol and its implication to loess landslide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 2016. 43(5): 127 – 132. (in Chinese))
- [4]梁莲姬,孙有斌, CHRISTIAAN J,等. 黄土中的碳酸盐矿

物特征与化学风化[J]. 第四纪研究, 2014, **34**(3): 645 – 653. (LIANG Lian-ji, SUN You-bin, CHRISTIAAN J, et al. Characteristics of carbonate minerals in loess and its implication for chemical weathering[J]. Quaternary Sciences, 2014, **34**(3): 645 – 653. (in Chinese))

- [5]赵景波.西安蓝田杨家湾黄土中第一层古土壤(S1)元素含量与环境[J].第四纪研究.2011.31(3):514-521.
  (ZHAO Jing-bo. Element content and environment of the first layer of paleosol (S1) in yangjiaban loess, lantian, Xi'an[J].
  Quaternary Research, 2011,31(3):514-521. (in Chinese))
- [6] 赵景波,罗小庆,刘 瑞,等.关中平原黄土中第1层古土 壤发育时的土壤水分研究[J].地质学报,2015,89(12): 2389-2399. (ZHAO Jing-bo. LUO Xiao-qing. LIU Rui. et al. Research in soil moisture during development of S1 paleosol in Guanzhou plain [J]. Acta Geologica Sinica. 2015,89(12):2389-2399. (in Chinese))
- [7] 于永堂,张继文,郑建国,等. 驻波比法测定黄土含水率的标定试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(7):1462 1469. (YU Yong-tang, ZHANG Ji-wen, ZHENG Jian-guo, et al. Calibration of standing-wave ratio sensors for determining water content of loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1462 1469. (in Chinese))
- [8] 史贵君,胡林,林 涛,等.关中地区黄土边坡饱和渗透 系数变异性和各向异性研究[J].灾害学,2019,34(增刊 1):213-219. (SHI Gui-jun. HU Lin. LIN Tao. et al. Variability and anisotropy of saturated permeability coefficient of loess slope in Guanzhong Region [J]. Journal of Catastrophology. 2019. 34(S1):213-219. (in Chinese))

- [9]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 Jun-tao, ZHANG Yan, WANG Juan-juan. Shear strength characteristics of loess paleosol [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 319 322. (in Chinese))
- [10] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Soil Test Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [11]王丽琴. 黄土的结构性与湿载变形特性及其评价方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (WANG Li-qin. Study on the Structural and Wet-Load Deformation Characteristics of Loess and Its Evaluation Methods [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [12]赵景波. 黄土地层中的 CaCO<sub>3</sub> 与环境[J]. 沉积学报, 1993, 11(1): 136 - 142. (ZHAO jing-bo. CaCO<sub>3</sub> and environment in loess strata[J]. Acta Sedimentaria Sinica, 1993, 11(1): 136 - 142. (in Chinese))
- [13] 邵生俊,郑 文,王正泓,等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15 19. (SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong et al. Loess structure index and test determination method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15 19. (in Chinese))
- [14]王丽琴, 鹿忠刚, 邵生俊. 岩土体复合幂-指数非线性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1269 1278.
  (WANG Li-qin, LU Zhong-gang, SHAO Sheng-jun. A composite power exponential nonlinear model of rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1269 127. (in Chinese)

(编校:黄贤沙)