

干湿循环下黄土强度衰减与结构强度试验研究

袁志辉¹, 倪万魁², 唐 春¹, 胡盛明¹, 甘建军¹

(1. 南昌工程学院 水利与生态学院, 江西 南昌 330099; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 针对干湿循环作用下黄土强度问题, 系统地开展了常规三轴试验, 提出了黄土结构强度和衰减强度的求取方法, 探讨了不同围压和含水率对结构和衰减强度的影响, 研究了黄土结构与衰减强度的关系。研究表明, 黄土结构和衰减强度都随含水率的增大而减小, 且呈良好的对数函数关系; 结构和衰减强度都随围压的增大而增大, 具有良好的线性关系; 通过对结构和衰减强度的研究, 发现多次干湿循环后原状黄土的强度衰减与相应的重塑黄土的强度衰减和黄土的结构强度之和基本相等, 证明多次的干湿循环作用不仅仅打破了原状黄土的结构强度, 并最终使得其与重塑黄土具有基本相同的土体结构。

关 键 词: 干湿循环; 黄土; 三轴试验; 结构强度; 衰减强度

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-1894-10

Experimental study of structure strength and strength attenuation of loess under wetting-drying cycle

YUAN Zhi-hui¹, NI Wan-kui², TANG Chun¹, HU Sheng-ming¹, GAN Jian-jun¹

(1. College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China;

2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In this study, conventional triaxial tests were conducted to systematically investigate the strength characteristics of loess under the conditions of drying-wetting cycles. We proposed the methods for calculating structural strength and decay intensity of loess, and then discussed the effects of confining pressure and water content on structural strength and decay intensity. The relationship between structural strength and decay intensity was studied as well. The results show that the structural strength and decay intensity decrease with increasing water content and reveal a good logarithmic function with water content. The structural strength and decay intensity increase with the increase of confining pressure, which had a good linear function. The attenuated strength value of undisturbed loess after several drying-wetting cycles is almost equal to the sum of attenuated strength value of remolded loess and structural strength. It is proved that the action of the wetting-drying cycle not only broke the original structure of undisturbed loess, but also made the undisturbed and remolded loess have the same structure of soil mass.

Keywords: wetting-drying cycle; loess; conventional triaxial test; structural strength; decay strength

1 引 言

黄土是干旱、半干旱地区风成的第四纪沉积物, 由于其特殊的形成历史和沉积环境, 造成了黄土具有特殊的物质成分和独特的结构, 而这种独特的结构性直接影响着黄土的物理力学行为^[1]。黄土的强度特性、固结变形、渗透性和湿陷性均与黄土结构具有显著的关系; 土的结构性对其工程性质的

重要性已达成共识, 土的结构性研究也被广大学者所接受, 土结构性的问题是 21 世纪土力学的核心问题^[2-3]。Terzaghi 首次提出了土体微结构的概念和研究土体变形与强度时需注意土体结构的重要性^[4], 由此开创了土的结构性研究。目前, 对于土的结构性研究主要有微观形态、固体力学和土力学。而采用土力学方法研究黄土的结构性主要有 2 种方法, 第 1 种是利用黄土综合结构势和结构性参数等对黄

收稿日期: 2016-07-28

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (No.2013BAJ06B04); 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (No.2012KTDZD03-04)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2013BAJ06B04) and Co-Innovative Engineering Program of Science and Technology of Shaanxi Province, China (2012KTDZD03-04).

第一作者简介: 袁志辉, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土体稳定性方面的研究工作。E-mail: 306246737@qq.com

土的结构性进行定量分析，建立黄土结构性本构模型，进而解释黄土的结构强度和变形特征^[5-12]；第 2 种是利用原状黄土应力-应变曲线转折点处所对应的应力差直接求取黄土的结构强度^[13-18]；但颜斌^[19]认为，第 2 种方法求取黄土的结构强度存在一定的误差，提出了基于抗剪强度的求取方法对结构强度进行求取。

对于我国西北高原地区的黄土来讲，由于地区干旱、少雨和气候周期性变化，黄土总是在降雨和蒸发的干湿循环效应下处于饱和和非饱和的交替变动状态，长期的干湿循环作用必然会引起黄土结构的改变和破坏，从而影响黄土的强度、渗透和变形特性，导致构筑于黄土上建筑物变形和破坏，进而影响工程的正常运行和安全使用^[20]。部分学者对黄土在干湿循环下强度、土-水特征曲线和渗透性方面做过一些有价值的研究^[20-22]，尤其是对黄土的结构强度研究较多，并取得丰硕的成果，但仍存在一些问题，黄土结构强度的求取方法并未完全统一，对

于干湿循环下黄土的强度虽有一定的研究，但并未深入研究干湿循环下黄土的强度衰减力学机制。

鉴于此，本文以陕西洛川黄土为研究对象，利用三轴不固结不排水剪切试验，测试干湿循环作用下原状和重塑黄土的抗剪强度，提出黄土结构和衰减强度的求取方法，探讨黄土结构强度以及抗剪强度的衰减规律，研究黄土在干湿循环作用下的强度衰减与结构强度的内在联系。

2 试验规划

2.1 试验用土的制备与物理力学特性

试验用土取自洛川黄土地质公园内黄土塬边黄土，采用探井取土的方法取得原状土样，深度为 2.50~4.00 m，该层为马兰黄土，土质疏松，土样呈灰黄色，富含大孔和虫孔，土体中见零星白色斑点状盐膜，底部有少量钙质结核，试验土样基本物理参数见表 1。

表 1 试验用土的基本物理参数
Table 1 Basic physical parameters of soil

干密度 ρ_d (g/cm ³)	天然含水率 w /%	孔隙 比 e	饱和度 S_r /%	土粒相对 密度 G_s	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性指 数 I_p	粒组(mm)及其含量/%		
								砂粒>0.05	粉粒 0.005~0.05	黏粒<0.005
1.18~1.22	20.50	1.26	44.25	2.72	18.50	28.80	10.30	8.91	67.64	23.45

2.2 试验方案和试验过程

考虑取土场土体含水率测试结果和取土深度，本次试验黄土干湿循环幅度控制在 5%~25%，分别进行 0 次和 3 次干湿循环试验。为了研究不同含水率与抗剪强度之间的关系，选定含水率为 5%、10%、15%、20%和 25%共 5 个试验点，以试验含水率 20%为例，干湿循环过程如图 1 所示。当含水率达到试验含水率时，进行三轴不固结不排水剪切试验，剪切速率为 0.10 mm/min，土样采用大三轴试样，试样直径为 6.18 cm，高度为 12.5 cm，每组 3 个样，围压分别取 50、100、200 kPa。由于本文研究的是

黄土结构强度和干湿循环下黄土的强度衰减力学机制，并且诸多研究表明土样经过 2~3 次干湿循环后，强度基本趋于稳定^[20, 23-25]，因此本次只对黄土进行 0 次和 3 次干湿循环的抗剪强度试验，总共需要原状和重塑黄土试样 60 个。

考虑到土样可能在后期干湿循环过程中开裂变形情况，在削样过程中不直接将土样削成最终试验时土样，而是削成直径和高度都比试验尺寸要大的土样。试样干燥过程采用自然风干，温度控制为 26±2 ℃；增湿过程采用水膜转移法；试样含水率控制采用称重法，选取同一批次土样中的一个放于天平上进行含水率观察，当该土样含水率接近试验含水率时，将其他土样也逐个进行称重，达到试验含水率时停止风干；试样风干到 5%和增湿到 25%时，将土样密封养护至少 24 h 以上，以保证水分的充分运移，然后再次进行试样的干湿循环。当达到试验所需要的干湿循环次数后，再将土样风干或增湿到试验含水率，并将达到试样含水率的土样密封养护至少 24 h 以上，然后再将土样进行削样制成试验尺寸的试样，最后进行抗剪强度试验。

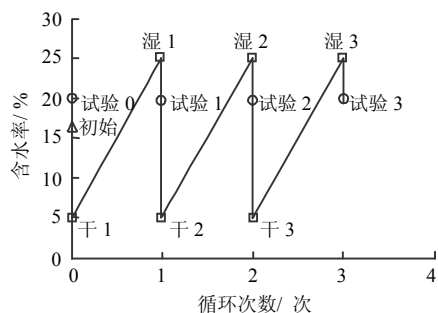


图 1 干湿循环过程示意图

Fig.1 Schematic of the wetting-drying cycle

3 试验结果和分析

通过干湿循环作用下黄土的三轴不固结不排水试验的应力-应变曲线,有峰值时取峰值作为破坏点,无峰值时按规定取15%的轴向应变的主应力差作为破坏点,以便得到不同干湿循环次数和不同含水率的黄土抗剪强度参数。本文定义 c_o^N 和 c_r^N 分别为 N 次干湿循环的原状和重塑黄土黏聚力(kPa);

φ_o^N 和 φ_r^N 分别为 N 次干湿循环的原状和重塑黄土内摩擦角($^\circ$)。那么0次干湿循环的原状和重塑黄土的黏聚力和内摩擦角分别表示为 c_o^0 、 c_r^0 、 φ_o^0 和 φ_r^0 ;3次干湿循环的原状和重塑黄土的黏聚力和内摩擦角表示为 c_o^3 、 c_r^3 、 φ_o^3 和 φ_r^3 ;由此便得到了0次和3次干湿循环的原状和重塑黄土的抗剪强度,如图2、3所示。

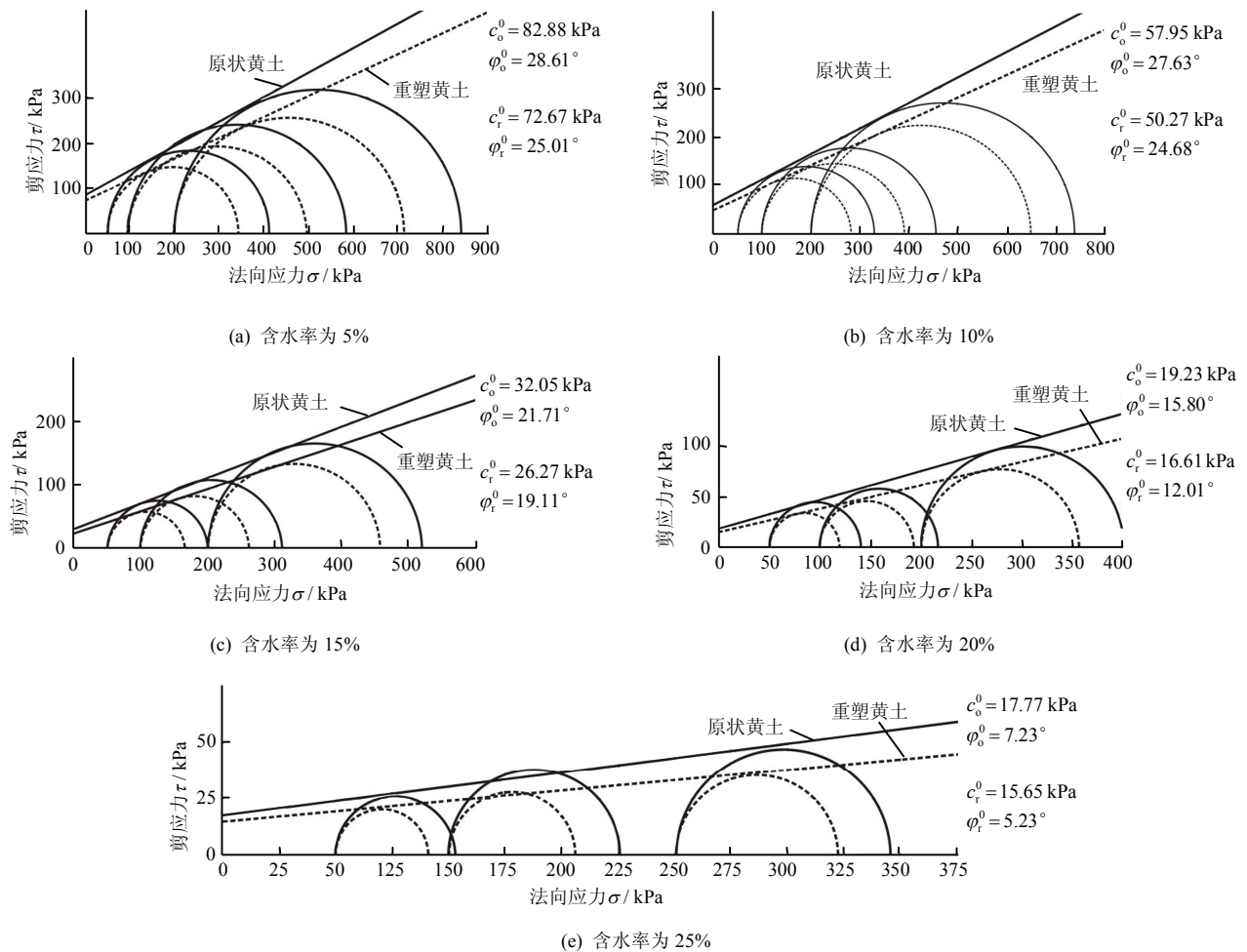


图2 0次干湿循环下不同含水率的原状和重塑黄土的强度包络线
Fig.2 Strength envelopes of undisturbed and remolded loess with different water contents after 0 time of wetting-drying cycles

3.1 黄土结构强度分析^[13-14, 19, 26]

3.1.1 结构强度求取

众多研究者采用图4所示方法求取黄土的结构强度,将其称为传统结构强度求取方法。黄土结构强度定义为黄土在天然结构破坏时原状黄土与其相应(同密度、同含水率)重塑黄土的应力差,其应力差-应变曲线(结构强度曲线)的峰值点即是黄土的结构强度;在峰值点之前,主应力差随着应变的增加急剧增大,表明黄土的结构强度迅速发挥作用,其原有结构逐渐被破坏,当应变达到15%时,原有结构全部丧失,因此,峰值点就是黄土的结构强度。

笔者认为,该种求取方法值得商榷,因为黄土的结构强度是一种力学机制,实质上是土体结构抵抗外力的一种能力,研究表明,岩土材料的黏聚力和内摩擦角两部分的抗剪力并不是同时发挥作用的,黄土的黏聚力在轴向应变不大于1%时就能完全发挥作用,而内摩擦角则在较大的应变时才能达到最大值,前者具有脆性性质,而后者具有塑性性质,因此,岩土材料的破坏过程是土颗粒间胶结力逐渐丧失,而摩擦强度逐步发挥作用的过程^[1, 26]。图4可以看出,原状黄土的曲线峰值点意味着其黏聚强度和摩擦强度均已完全发挥作用;而重塑黄土

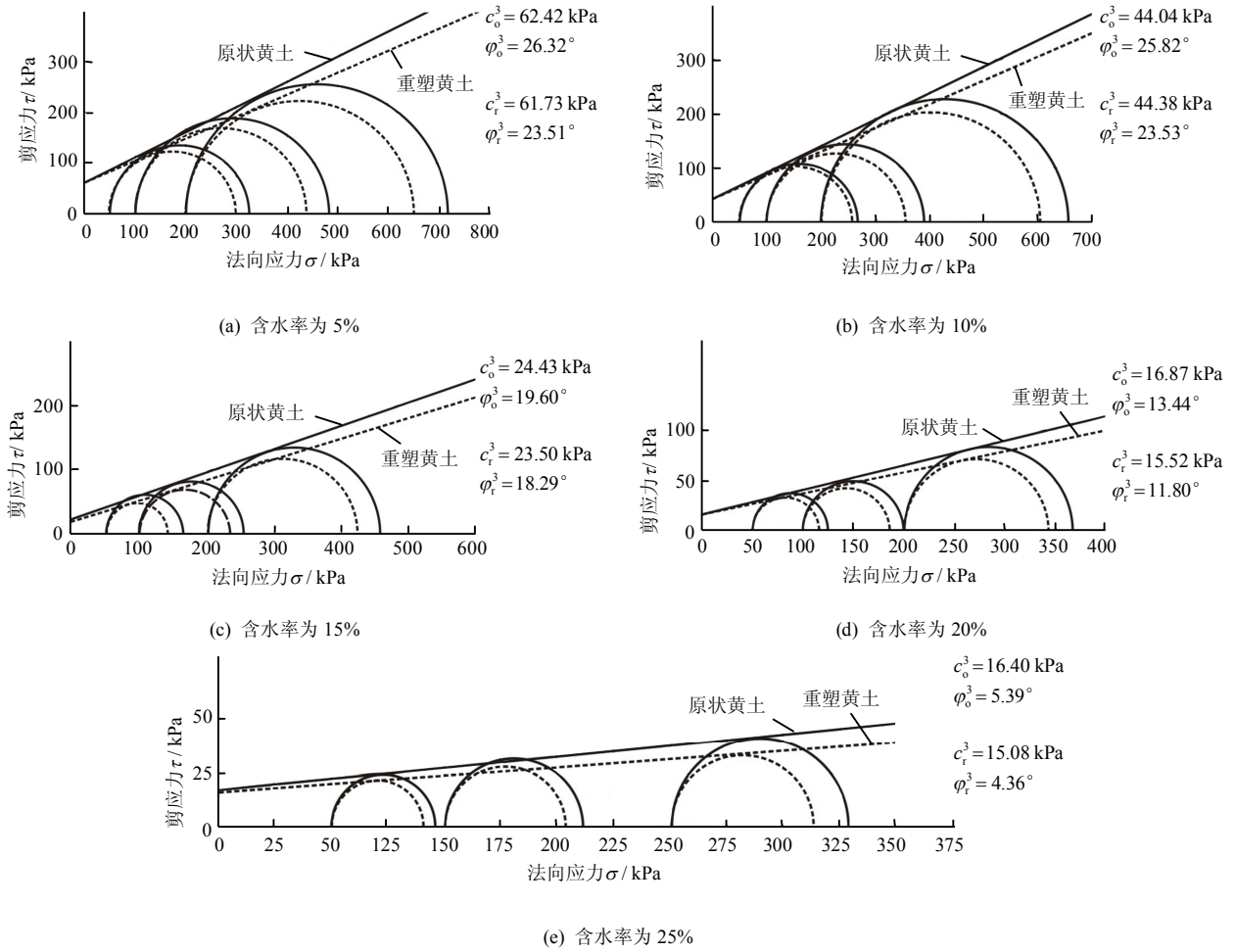


图3 3次干湿循环下不同含水率的原状和重塑黄土的强度包络线
Fig.3 Strength envelopes of undisturbed and remolded loess with different water contents after 3 times of wetting-drying cycles

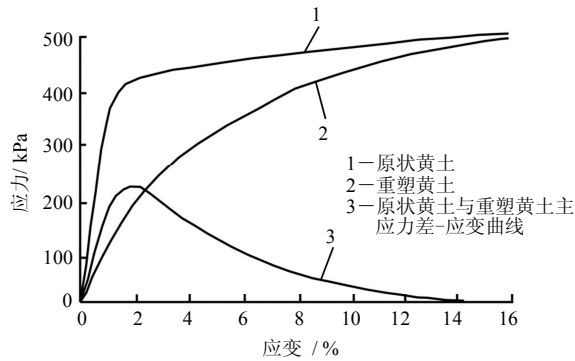


图4 传统结构强度求取方法
Fig.4 Traditional method for evaluation of structure strength

由于其原有结构的破坏,其应力-应变曲线表现为应变硬化,在初始阶段,重塑黄土的黏聚强度也已经充分得到发挥,但其摩擦强度需要较大的应变时才能达到最大值,因此,用原状黄土与其相应的重塑黄土的应力差的峰值点作为结构强度时势必包括了重塑黄土中部分的摩擦强度,所以传统结构强度求取方法并不合适,而应该采取抗剪强度的方法求取。

黄土结构强度的求取为原状和重塑黄土两者剪切强度的差值作为其结构强度,计算公式为^[19]

$$q_s = \tau_{of} - \tau_{rf} = c_o^0 - c_r^0 + \sigma(\tan \phi_o^0 - \tan \phi_r^0) \quad (1)$$

式中: q_s 为结构强度 (kPa); τ_{of} 和 τ_{rf} 分别为原状和重塑黄土抗剪强度 (kPa); σ 为主应力 (kPa)。

由式(1)可知,黄土结构强度是原状与重塑黄土的黏聚强度差值和摩擦强度差值组成,因此,结构强度包含黏聚强度和摩擦强度两部分。在 $\tau - \sigma$ 应力平面上绘制摩尔应力圆,得到原状和重塑黄土的摩尔包络线(见图5)。由图5可知,利用式(1)来求取黄土结构强度时,由于其主应力均为 σ ,所以结构强度即是 BF 段;但实际上在相同的围压下,原状和重塑黄土土样破坏时其主应力是不同的,原状黄土破坏时其主应力为 OA 段,而重塑黄土破坏时其主应力是 OC 段,实际上黄土结构强度应是 BE 段,因此须对式(1)进行修正,修正后公式为

$$q_s = \tau_{of} - \tau_{rf} = c_o^0 - c_r^0 + \sigma_o^0 \tan \phi_o^0 - \sigma_r^0 \tan \phi_r^0 \quad (2)$$

式中: σ_o^0 和 σ_r^0 分别为 0 次干湿循环的原状和重塑黄土的主应力 (kPa)。

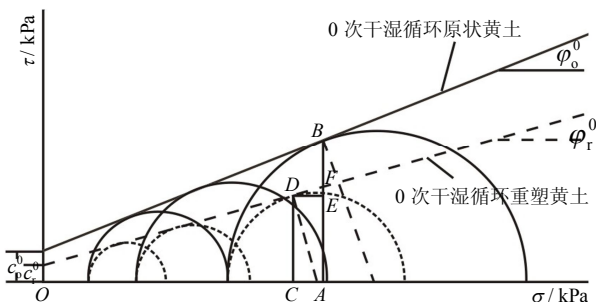


图 5 基于抗剪强度下的结构强度求取方法

Fig.5 Method for evaluation of structure strength base on shear strength

3.1.2 黄土结构强度变化规律

根据原状和重塑黄土三轴试验结果 (见图 2、3), 结合式 (2) 得到黄土结构强度 (见表 2), 并整理出含水率和围压与结构强度的关系曲线 (见图 6、7)。

表 2 不同围压和含水率下的黄土结构强度
Table 2 Structure strength of loess at various water contents and confining pressures

含水率 / %	围压 / kPa		
	50	100	200
5	24.98	36.46	47.35
10	17.91	25.17	35.17
15	13.23	18.16	26.61
20	9.24	12.22	20.65
25	6.47	8.37	12.29

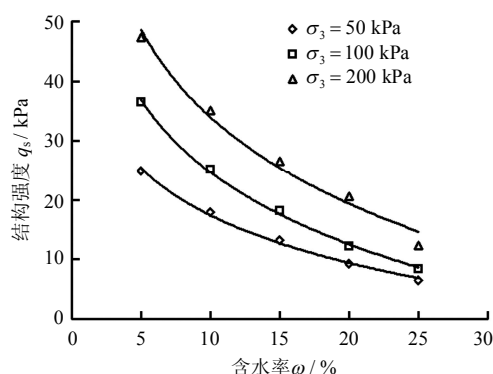


图 6 含水率与黄土结构强度的关系

Fig.6 Relationship between structure strength and water content of loess

由图 6 可知, 同一围压下, 黄土结构强度随含水率的增大呈非线性减小趋势, 两者具有良好的对数函数关系。当含水率较小时, 黄土结构强度较大, 随着含水率的增大, 其结构强度变小, 曲线较缓。

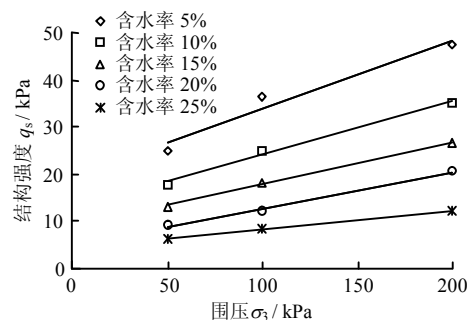


图 7 围压与黄土结构强度的关系

Fig.7 Relationship between structure strength and confining pressure

由图 7 可知, 同一含水率下, 黄土结构强度随围压增大而增大, 围压越大, 其结构强度相应增大, 两者呈良好的线性关系; 当含水率较大时, 尽管处于不同的围压下, 结构强度数值较小; 而当含水率减小时, 其结构强度在不同的围压下数值较大。

黄土结构强度随含水率的增大而减小主要是因为黄土的水敏性较强, 含水率的增大对结构强度起弱化作用。含水率的增大使得黄土颗粒中的胶结物质得到溶蚀, 化学胶结物质的浓度降低, 使得具有架空结构的黄土胶结作用弱化, 造成了由黏聚强度提供的那部分结构强度降低; 同时含水率的增大会使得土颗粒之间的摩擦减小, 进而影响了土体的摩擦强度, 导致由摩擦强度构成的那部分结构强度也会降低, 进而造成土体结构强度的降低。

黄土结构强度随围压增大而增大是土体所受围压越大, 对土颗粒具有压密作用, 使土体结构更加稳定, 抵抗外力的能力越强, 结构强度能得到充分发挥, 因此, 围压对黄土结构强度起到强化作用。

3.2 干湿循环下黄土强度衰减分析

3.2.1 强度衰减定义和求取方法

土体抗剪强度由黏聚强度和摩擦强度组成, 因此, 干湿循环下黄土强度的降低是其黏聚强度和摩擦强度降低造成的; 文献[20-21, 23, 25]均对土体的强度衰减变化规律做过研究, 但均未对强度衰减进行定义, 这里将黄土强度衰减定义为 0 次干湿循环时黄土的抗剪强度值减去 N 次干湿循环后的黄土抗剪强度值, 即为黄土的抗剪强度衰减。

那么原状和重塑黄土在干湿循环后的抗剪强度衰减分别用公式表示为

$$\Delta \tau_{\text{odt}}^N = (c_o^0 + \sigma_o^0 \tan \varphi_o^0) - (c_o^N + \sigma_o^N \tan \varphi_o^N) \quad (3)$$

$$\Delta \tau_{\text{rdt}}^N = (c_r^0 + \sigma_r^0 \tan \varphi_r^0) - (c_r^N + \sigma_r^N \tan \varphi_r^N) \quad (4)$$

式中: $\Delta \tau_{\text{odt}}^N$ 和 $\Delta \tau_{\text{rdt}}^N$ 分别为 N 次干湿循环后原状和

重塑黄土衰减值 (kPa)。

与黄土结构强度求取方法类似,通过图8得出干湿循环下原状黄土抗剪强度衰减值为图中BE段,同理,可以得到重塑黄土的强度衰减值。

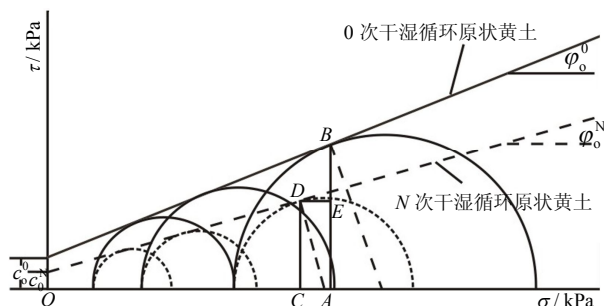


图8 干湿循环下黄土抗剪强度衰减值求取方法

Fig.8 Method for evaluation of shear strength attenuation value of loess under wetting-drying cycle

3.2.2 强度衰减值的变化规律

根据干湿循环下原状和重塑黄土试验结果,结合强度衰减值的求取方法,得到经过3次干湿循环后不同围压和不同含水率下的黄土强度衰减值(见表3);并整理得到含水率和围压与黄土强度衰减值的关系曲线如图9、10所示。

表3 3次干湿循环后原状黄土和重塑黄土的强度衰减值 $\Delta\tau_{\text{odt}}^3$ 和 $\Delta\tau_{\text{rdt}}^3$

Table 3 $\Delta\tau_{\text{odt}}^3$ of undisturbed loess and $\Delta\tau_{\text{rdt}}^3$ of remolded loess after 3 times of wetting-drying cycle

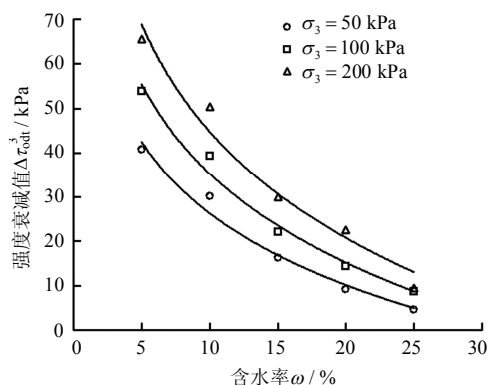
含水率 /%	围压/kPa			围压/kPa		
	50	100	200	50	100	200
	$\Delta\tau_{\text{odt}}^3$ / kPa			$\Delta\tau_{\text{rdt}}^3$ / kPa		
5	40.73	53.81	65.63	19.85	23.14	25.93
10	30.12	39.28	50.41	12.71	16.09	18.79
15	16.31	22.17	30.04	5.50	7.95	10.50
20	9.20	14.42	22.66	2.51	4.14	6.04
25	4.51	8.65	9.52	0.82	1.45	3.39

由图9可知,当围压一定时,经过3次干湿循环后的原状和重塑黄土强度衰减值与含水率的关系密切;当含水率较大时,原状和重塑黄土的强度衰减值都较小,随着含水率的减小,强度衰减值逐渐增大;数据拟合表明,原状和重塑黄土的强度衰减值均与含水率呈良好的对数函数关系。

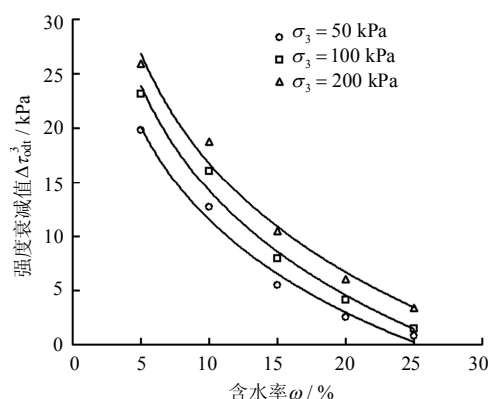
由图10可知,同一含水率下,围压对干湿循环的原状和重塑黄土的强度衰减影响显著;经过3次干湿循环后,原状和重塑黄土的强度衰减均随着围压的增大而增大,两者之间呈线性关系。

土体的强度由黏聚强度和摩擦强度两部分组成,对于原状黄土来讲,黏聚强度来源于原始黏聚力、加固黏聚力和吸附强度;而重塑黄土黏聚强度

则来源于原始黏聚力和吸附强度。



(a) 原状黄土



(b) 重塑黄土

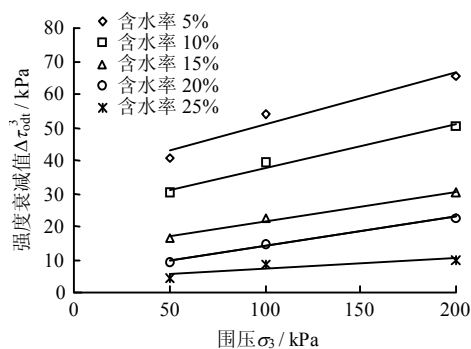
图9 干湿循环下原状与重塑黄土强度衰减值与含水率关系

Fig.9 Relationship between strength attenuation value and water content of remolded loess under wetting-drying cycle

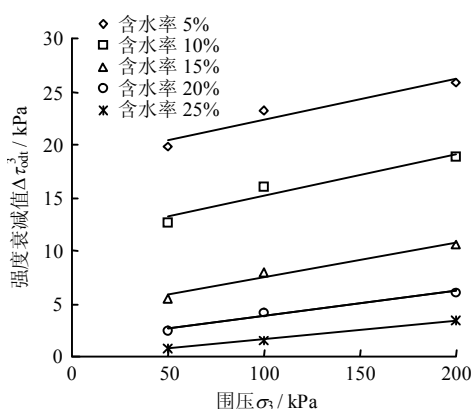
理论上讲,只要土体的密度和成分不变,那么其原始黏聚力是恒定值;加固黏聚力是由碳酸盐、石膏和盐类薄膜等化学胶结作用而形成,其大小与胶结物质的成分、数量和土的含水率有关;而吸附强度是由土体的基质吸力和毛细压力而形成的强度。

因此,干湿循环下黄土衰减强度随含水率的增大而减小,主要是由摩擦强度和黏聚强度中的加固黏聚力和吸附强度的变化等造成的。首先,当土体干密度不变,不同含水率下土体中的胶结物质浓度是不同的,随着含水率的增大,胶结物质浓度减小,多次的干湿循环必然会使得土体中的胶结物质得到溶蚀,进而削弱其胶结作用,导致加固黏聚力的衰减。低含水率的土体其胶结物质浓度较高,胶结作用强,多次的干湿循环使其胶结作用的削弱也就更加显著,加固黏聚力的衰减也就较大;高含水率的土样由于胶结物质已经处于较低浓度,再进行多次的干湿循环,其胶结作用的削弱不明显,加固黏聚

力的衰减也就较小。其次,多次的干湿循环使土体的胶结物质被溶蚀,必然使原有结构改变,进而孔隙发生变化,使土体中的中、小孔隙向中、大孔隙发展,或者中、小孔隙被贯通,而孔隙的这种变化在低含水率时比在高含水率时更加显著,因此,土体的吸附强度的衰减也就不同。再次,多次的干湿循环作用会使不规则土颗粒变得更加圆滑,从而使土体摩擦强度减弱。显然,在干湿循环下,低含水率的摩擦强度的减弱比在高含水率时更加明显,因为,在高含水率下,土体的摩擦已经得到减弱,而在低含水率时,干湿循环才会使其变得更加明显。



(a) 原状黄土



(b) 重塑黄土

图 10 干湿循环下原状与重塑黄土强度衰减值与围压关系
Fig.10 Relationship between strength attenuation value and confining pressure of remolded loess under wetting-drying cycle

干湿循环下不同含水率的原状黄土强度衰减较重塑黄土强度衰减大,是因为原状黄土的强度衰减包括了摩擦强度的衰减和黏聚强度中的加固黏聚力和吸附强度的衰减,而重塑黄土的衰减是摩擦强度和吸附强度的衰减,因此,它们强度衰减值是不同的。

4 黄土强度衰减与结构强度的关系

从以上分析可知,黄土的结构强度和多次的干

湿循环后黄土的强度衰减与含水率和围压的关系都具有高度一致性,因此,黄土的结构强度与多次的干湿循环下黄土的强度衰减应该存在某种联系。

多次的干湿循环作用使得黄土的黏聚强度和摩擦强度均有所衰减,但原状和重塑黄土的强度衰减是不一样的,原状黄土的强度衰减是摩擦强度和黏聚强度中的加固黏聚力和吸附强度衰减所组成,重塑黄土的强度衰减是摩擦强度和黏聚强度中的吸附强度衰减组成的。如果将 N 次干湿循环下原状黄土的强度衰减减去重塑黄土的强度衰减即是加固黏聚力和摩擦强度差值组成,即是部分黏聚强度和摩擦强度组成,其表达式为

$$\Delta\tau_{\text{odt}}^N - \Delta\tau_{\text{rdt}}^N = [(c_o^0 + \sigma_o^0 \tan \phi_o^0) - (c_o^N + \sigma_o^N \tan \phi_o^N)] - [(c_r^0 + \sigma_r^0 \tan \phi_r^0) - (c_r^N + \sigma_r^N \tan \phi_r^N)] \quad (5)$$

根据式(5)可以得到3次干湿循环条件下原状黄土的强度衰减与重塑黄土的强度衰减的差值,其表达式为

$$\Delta\tau_{\text{odt}}^3 - \Delta\tau_{\text{rdt}}^3 = [(c_o^0 + \sigma_o^0 \tan \phi_o^0) - (c_o^3 + \sigma_o^3 \tan \phi_o^3)] - [(c_r^0 + \sigma_r^0 \tan \phi_r^0) - (c_r^3 + \sigma_r^3 \tan \phi_r^3)] \quad (6)$$

利用表3数据,结合式(6)便可得到3次干湿循环下原状黄土的强度衰减与重塑黄土的强度衰减的差值,并将强度衰减的差值和黄土的结构强度(见表3)绘于同一坐标系中(见图11)。

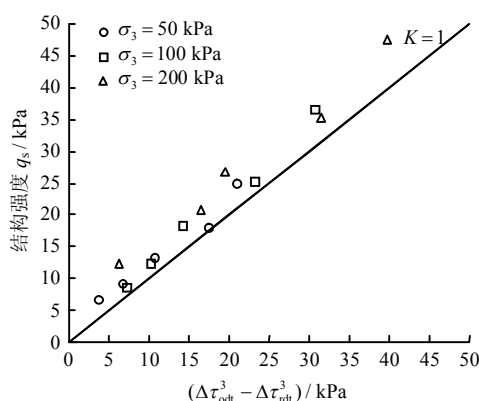


图 11 干湿循环下黄土强度衰减差值与结构强度的关系
Fig.11 Relationship between structure strength and strength attenuation value of loess under wetting-drying cycle

图11可以看出,3次干湿循环后原状黄土的强度衰减与重塑黄土的强度衰减的差值和黄土的结构强度基本相等,黄土的结构强度稍大于强度衰

减值的差值,但从理论上讲,干湿循环条件下强度衰减值的差值应该与黄土的结构强度值相等,因为原状黄土在干湿循环条件下强度的衰减主要是摩擦强度和黏聚强度中的加固黏聚力和吸附强度的衰减,而重塑黄土在干湿循环条件下强度的衰减是吸附强度和摩擦强度的衰减,那么它们的差值即是加固黏聚力和摩擦强度的衰减,而对于同一干密度、含水率和围压的原状和重塑黄土来讲,其衰减的差值主要是加固黏聚力,因此,根据式(2)和式(6)可以认为

$$\Delta\tau_{\text{odt}}^3 - \Delta\tau_{\text{rdt}}^3 \approx q_s \quad (7)$$

运用式(7)来计算时会产生一定的误差,这主要是3次干湿循环后的黏聚强度(c_o^3)和内摩擦角(φ_o^3)与重塑黄土的黏聚强度(c_r^3)和内摩擦角(φ_r^3)存在一定的差异,也就是说它们的强度并未完全的稳定,只有经过足够多的干湿循环次数后,原状和重塑黄土才可能具有基本相同的强度特性和土体结构。因为多次的干湿循环后,消失了结构强度的原状黄土与重塑黄土无异,土体均会重新排列,趋向于一种稳定结构。存在的差别可能是过筛的重塑黄土内摩擦角较原状黄土小,导致结构强度大于原状黄土强度衰减与重塑黄土强度衰减值的差值。

5 结 论

(1) 针对传统的黄土结构强度存在的问题,修正了基于抗剪强度计算黄土结构强度的求取方法,并作了理论验证,该方法合理可行。

(2) 利用修正的结构强度求取方法,发现围压和含水率对黄土结构强度的影响显著。同一围压下,黄土结构强度随含水率的增大而减小,呈良好的对数函数关系;同一含水率下,黄土的结构强度随围压的增大而增大,两者之间具有良好的线性关系。

(3) 基于摩尔-库仑强度理论提出了干湿循环下黄土强度衰减值的计算方法,得出围压和含水率对黄土强度衰减的影响。当围压一定时,经过干湿循环后的原状和重塑黄土的强度衰减随含水率的减小而逐渐增大,呈良好的对数关系;在同一含水率下,随着围压的增大,原状和重塑黄土的强度衰减也增大,两者呈简单的线性关系。

(4) 研究发现,干湿循环作用最终破坏了原状黄土的结构强度,多次的干湿循环会使得原状黄土的结构强度消失,使得原状和重塑黄土具有基本相同的强度特性和土体结构。

参 考 文 献

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西省科学技术出版社, 1996.
LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996.
- [2] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. The mathematical model of soil structure—The core problem of soil mechanics in the 21st century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95—97.
- [3] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000.
- [4] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 土体微结构力学——概念·观点·核心[J]. 地球学报, 1999, 20(20): 150—156.
HU Rui-lin, LI Xiang-quan, GUAN Guo-lin, et al. Soil micromechanics—Concept, view and core[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1999, 20(20): 150—156.
- [5] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35—40.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive law considering soil structural properties[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 35—41.
- [6] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形强度的关系[J]. 水利学报, 1999, 21(10): 1—6.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHU Yuan-lin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 21(10): 1—6.
- [7] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651—656.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651—656.
- [8] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 532—536.
SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 532—536.
- [9] 陶虎, 邵生俊, 李小林, 等. 黄土的非饱和和特征参数与结构性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 148

- 154.
- TAO Hu, SHAO Sheng-jun, LI Xiao-lin, et al. Experimental study of the characteristic parameters and structural behavior of loess[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(7): 148—154.
- [10] 田堪良, 王沛, 张慧莉. 考虑结构性的原状黄土应力—应变关系的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1893—1898.
- TIAN Kan-liang, WANG Pei, ZHANG Hui-li. Discussion on stress-strain relation of intact loess considering soil structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1893—1898.
- [11] 张宁宁, 骆亚生. 非饱和黄土的结构性与强度特性的关系[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1838—1844.
- ZHANG Ning-ning, LUO Ya-sheng. Relationship between structure and strength property of unsaturated loess[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2015, 46(5): 1838—1844.
- [12] 邓国华, 邵生俊, 高虎艳. 土的综合结构势及结构性参数研究进展[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 178—184.
- DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun, GAO Hu-yan. Advances in comprehensive structural potential and structural parameters of soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 178—184.
- [13] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001, 7: 79—83, 90.
- DANG Jin-qian, LI Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001, 7: 79—83, 90.
- [14] 张伯平, 袁海智, 王力. 含水量对黄土结构强度影响的定量分析[J]. 西北农业大学学报自然科学版, 1994, 22(1): 54—60.
- ZHANG Bo-ping, YUAN Hai-zhi, WANG Li. The quantitative analysis of effects soil moisture upon the loess structure strength[J]. **Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)**, 1994, 22(1): 54—60.
- [15] 何青峰, 林斌, 赵法锁. 西安地区马兰黄土的结构强度研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 5: 21—24.
- HE Qing-feng, LIN Bin, ZHAO Fa-suo. Research on the structural strength of Malan loess in Xi'an area[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2007, 5: 21—24.
- [16] 吴志刚, 党进谦, 高建勇. 非饱和黄土抗剪强度与结构强度的关系特性[J]. 人民长江, 2007, 38(1): 117—118.
- WU Zhi-gang, DANG Jin-qian, GAO Jian-yong. Relation of structural strength and shear strength of non-saturated loess[J]. **Yangtze River**, 2007, 38(1): 117—118.
- [17] 田堪良, 张慧莉, 骆亚生, 等. 黄土的结构强度及其定量分析方法[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 西安: 中国科学技术出版社, 2002: 178—180.
- TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, LUO Ya-sheng, et al. The structural strength of loess and its quantitative analysis methods[C]//Proceedings of the 7th Academic Conference on Rock Mechanics and Engineering Society of China. Xi'an: China Science and Technology Press, 2002: 178—180.
- [18] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 黄土的结构性及其结构强度特性研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 64—67.
- TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, ZHANG Bei-ping, et al. Research on structural characteristics and strength of loess[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(2): 64—67.
- [19] 颜斌. 洛川剖面黄土的结构性及其力学特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- YAN Bin. Research on the structural and mechanical characteristics of Luochuan loess profile[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [20] 刘宏泰, 张爱军, 段涛, 等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2010, 4: 38—42.
- LIU Hong-tai, ZHANG Ai-jun, DUAN Tao, et al. The influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of remolded loess[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2010, 4: 38—42.
- [21] 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土—水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 132—136, 142.
- LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong, et al. Effects of initial density and drying-wetting cycle on soil water characteristic curve of unsaturated loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 132—142.
- [22] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土—水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2445—2453.
- ZHAO Tian-yu, WANG Jin-fang. Soil water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2012, 43(6): 2445—2453.