

DOI: 10.11779/CJGE2018S1031

黄土塬地区非饱和结构性黄土的强度特性研究

王 腾^{1, 2}, 周茗如^{*1, 2}, 王晋伟^{1, 2}, 陈志超^{1, 2}

(1. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了揭示黄土塬地区非饱和原状及重塑黄土的结构性强度特性的有关规律, 完善非饱和土的非线性模型, 获得关于黄土塬地区非饱和黄土的变形和强度特性及相关参数, 以陇东 Q_3 原状及重塑黄土为对象开展试验研究, 对不同初始吸力及不同净围压下的非饱和黄土进行了三轴固结排水剪切试验, 研究了黄土塬地区非饱和原状及重塑黄土的变形特性、临界状态、强度参数及吸力变化特性。研究结果表明: 原状黄土的剪切破坏表现出明显的剪缩现象, 重塑土试样的变形出现剪胀和应变软化现象, 剪切变形会出现明显的剪切带现象; 不同初始吸力下, 原状土偏应力与体应变临界状态线均成线性关系, 而非饱和重塑黄土体应变受干密度的影响较大, 试验过程中, 较大干密度的试样出现了先剪缩后剪胀的现象; 非饱和黄土的抗剪强度受基质吸力的影响, 非饱和原状黄土的黏聚力随吸力的增大而增大, 有效内摩擦角受吸力影响较小, 可近似为一常数, 非饱和重塑黄土的强度受基质吸力和干密度的影响较大, 但对内摩擦角的影响较小; 试验得出黄土塬地区非饱和原状及重塑黄土的强度参数, 且求得的原状土参数 K 比重塑土参数 K 受吸力的影响更大。

关键词: 黄土塬地区; 非饱和黄土; 结构性; 三轴试验; 吸力; 变形; 强度参数

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0189-09

作者简介: 王 腾(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事黄土地区复合地基及地基加固的研究。E-mail: wangteng2035@163.com。

Experimental study on strength properties of unsaturated intact loess in loess tableland regions

WANG Teng^{1, 2}, ZHOU Ming-ru^{1, 2}, WANG Jin-wei^{1, 2}, CHEN Zhi-chao^{1, 2}

(1. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of

Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to obtain the deformation and strength parameters and other related parameters of unsaturated intact loess in the loess tableland regions of Gansu Province, the triaxial consolidation drained shear tests are performed on the unsaturated intact loess with various initial suctions and net confining pressures. The deformation characteristics, critical state, strength parameters and suction variation characteristics of unsaturated intact loess are studied under the constant water content. The results show that the shear failure of intact loess belongs to plastic failure and exhibits significant shear contraction phenomenon. Under different initial suctions, the critical states of deviatoric stress and body strain are all linear. The strength envelope of undisturbed loess in $p-q$ plane can be normalized to a straight line, and it can be expressed approximately with the critical state line of saturated soils. The shear strength of unsaturated loess is influenced by matrix suction, and the cohesion of unsaturated loess increases with the increase of the suction. The effective internal friction angle is less affected by the suction, which can be approximated as a constant. The strength parameters of unsaturated undisturbed loess in the loess tableland regions of Gansu Province are obtained. Besides, the parameter K has a great influence on the suction and there is a linear relationship between the parameter K and the suction.

Key words: loess tableland region; unsaturated intact loess; structural property; triaxial test; suction; deformation; strength parameter

0 引言

随着西部大开发战略的继续推进, 工程建设场地向大厚度黄土场地扩展^[1]。甘肃省陇东地区是大厚度

基金项目: 甘肃省建设科技攻关项目 (JK2014-34)

收稿日期: 2017-06-11

*通讯作者 (E-mail: zhoumr@lut.cn)

黄土分布最典型、最广泛的地区，地貌特征属于堆积侵蚀黄土塬区间夹塬边沟壑区地貌单元。该地区是中国大厚度黄土分布最典型、最广泛的地区，其独特的黄土结构性使其在建设工程基础的选型和安全性方面成为当前工程建设研究的重点。

与一般黄土场地不同，陇东黄土塬—董志塬地区黄土结构性相对稳定，是主要的建筑与工程场地^[2]。但由于多方面的原因对其研究较少，主要的基础设计方案都以陕西为参考对象并结合经验进行设计，给陇东地区建设带来了非常大的安全隐患。

本文根据拟建的无日天沟特大桥黄土场地的勘察资料分析，通过非饱和黄土三轴剪切试验，对陇东黄土塬—董志塬地区非饱和原状及重塑黄土的变形和强度特性进行了研究，研究结果可以供实际工程参考。

1 研究方法

20世纪末以来对于非饱和黄土的研究开始涉及黄土特殊的结构性强度特性。但非饱和黄土分布广泛，种类很多，不同类别非饱和黄土的结构性强度特性又呈现不同特点^[2]。大量研究显示，黄土土体强度主要体现在承受偏差应力作用时产生的抗剪强度，其强度指标受到孔隙含水率、应力水平、应力路径、加载时间和速率等因素影响^[3]。几十年来，国内外研究者在典型非饱和黄土的三轴试验研究方面已经有许多有价值的成果。例如，陈正汉等^[4-5]通过自己研发的非饱和土三轴仪对非饱和Q₃、Q₂黄土进行了变形、强度、屈服和水量变化等的试验，研究了重塑非饱和黄土的特殊力学特性，对吸力增加的屈服条件进行了修正，提出了新的吸力增加屈服条件。陈存礼等^[6]对不同初始吸力非饱和原状黄土进行了常含水率等向压缩和三轴剪切试验；高帅等^[7]利用FSY30型应变控制式非饱和土三轴仪采用常含水率试验，研究了陕西泾阳县某边坡原状黄土的特性，并利用含水率建立了工程中实用的抗剪强度公式；李永乐等^[2]对不同含水率条件下原状非饱和黄土的强度和土-水特征曲线进行了试验研究并提出了非饱和土抗剪强度模型。

同时，研究亦显示，在相同条件下原状黄土和重塑黄土的抗剪强度存在明显不同^[8]，因此，不论是在基于Bishop的有效应力，还是基于Fredlund等提出的净应力和基质吸力的双应力状态量分析黄土的抗剪强度，其变化规律存在差异^[9-11]。为了研究黄土塬—董志塬地区非饱和黄土的结构性特征，本课题组通过非饱和土三轴仪，以陇东Q₃原状及重塑黄土为对象开展试验研究，对黄土塬地区非饱和原状及重塑黄土的结构性强度特性进行了分析研究，揭示了有关规律，为完善非饱和土的非线性模型及其工程应用提供方便。

1.1 土样性质

试验土样取自陇东黄土塬—董志塬地区无日天沟特大桥工程场地，取样深度在地面以下7~9 m，属于Q₃黄土，土呈黄褐色，以黏粒为主，中孔结构，可见少量虫孔及蜗牛壳，零星结核和云母片，土质较均匀。场地原状土样的基本物理指标：含水率w为13.22%，天然密度ρ为1.62 g/cm³，干密度ρ_d为1.43 g/cm³，颗粒相对密度G_s为2.71，天然孔隙比e为0.895，塑限w_L为19.34%，液限w_P为29.52%。

1.2 试样制备

取土后现场将试样制作成为尺寸为直径39.1 mm，高度80 mm的圆柱状。重塑试样的制备采用原状试样黄土剩余土样，并将土样风干碾碎过5 mm筛处理，然后将土样含水率控制在要求范围之内。试样制备时按照设计干密度，分5层制备并控制土料质量相等。将制备好的试样用保鲜膜覆盖，放入保湿缸中，为使水分均匀放置时间不少于48 h。但由于原状试样天然含水率为12%~14%初始吸力较高，因此利用水膜转移法将制好的试样统一增湿到20%，同样在保湿缸中放置48 h以上，每隔12 h将试样翻动一次以便试样中水分扩散均匀。

1.3 试验方案

试验采用同时控制吸力和净室压力为常数的三轴固结排水剪切试验。确定试验干密度为1.5, 1.6, 1.7 g/cm³。试验采用同时控制吸力和净室压力的方法进行。实验中采用三级控制围压，分别是50, 100, 200 kPa，初始吸力控制为50, 100, 200 kPa。每组3个试样，共计原状样9个，重塑样27个，总共36个试样。

试样固结过程稳定标准为2 h内体变和排水量不超过0.01 cm³，三轴剪切速率为0.016 mm/min，当轴向应变达到ε_a=15%，认为试样已经破坏，停止剪切，剪切过程历时12.5 h。每个试样历时不少于3 d，整个试验过程历时6个多月。

2 原状土与重塑黄土的强度变形分析

图1是控制同一吸力条件，不同净围压(σ₃-σ_a)下的非饱和原状黄土三轴排水剪切试验的(σ₁-σ₃)-ε₁与ε_v-ε₁关系曲线图。

从图1中可以看出：

(1)基质吸力相同时，随着净围压(σ₃-σ_a)的增大，试样破坏类型由弱硬化型向强硬化型破坏发展。

(2)在ε₁较小时，偏应力(σ₁-σ₃)初始段曲线较陡，同时可以看出净室压力越小，偏应力(σ₁-σ₃)初始段曲线愈陡。造成这种现象的原因是由于在剪切初期，较低的围压不足以对黄土的结构性造成破坏。在应变不变的条件下，ε_v表现为随净围压(σ₃-σ_a)的增

大而增大, 进一步说明了净围压越小, 土样的原始结构就越不易被破坏, 试样也越不容易被压密; 随着净围压变大, 试样的原有结构被破坏, 此时试样会产生较大的变形。所以, 试样体应变 ε_v 大, 剪缩现象就会

越明显。

图 2~4 是在三轴剪切试验下不同干密度下的非饱和重塑黄土在控制吸力及净围压 $(\sigma_3 - \sigma_a)$ 下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 与 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线图。

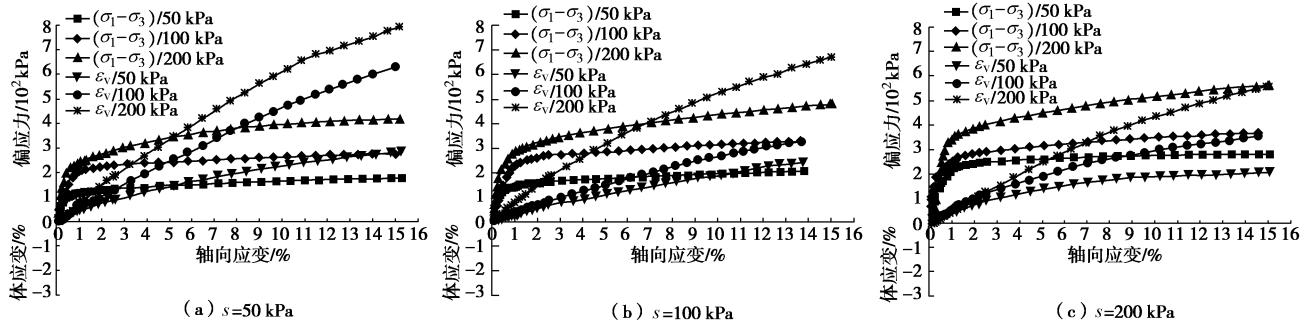


图 1 同一吸力不同净围压下非饱和原状黄土($\sigma_1 - \sigma_3$)和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of unsaturated intact loess with same suction and different net confining pressures

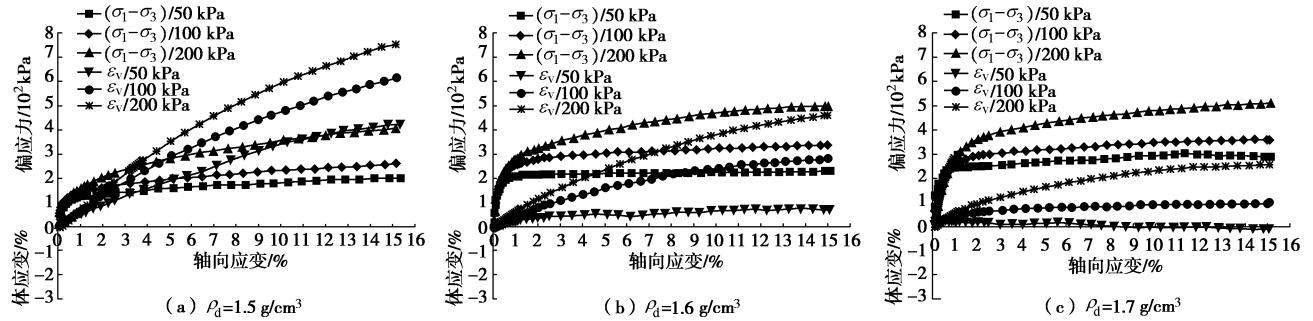


图 2 $s = 50$ kPa 时非饱和重塑黄土($\sigma_1 - \sigma_3$)和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of unsaturated remolded loess when $s = 50$ kPa

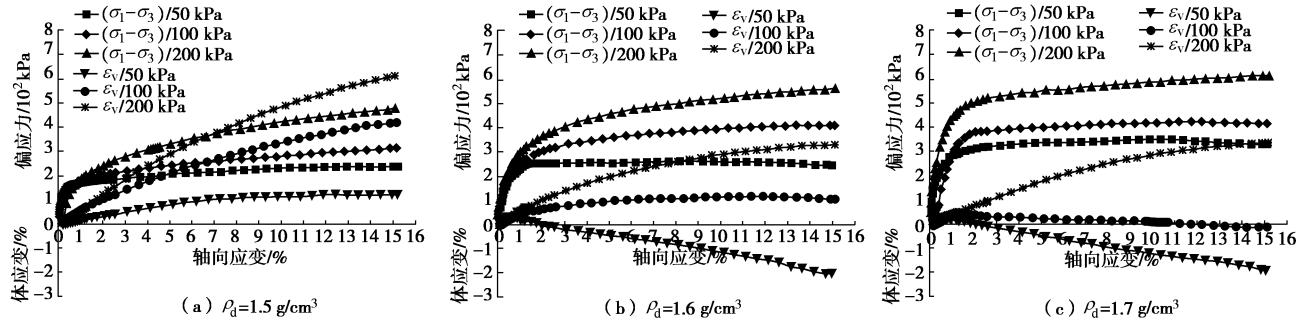


图 3 $s = 100$ kPa 时非饱和重塑黄土($\sigma_1 - \sigma_3$)和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of unsaturated remolded loess when $s = 100$ kPa

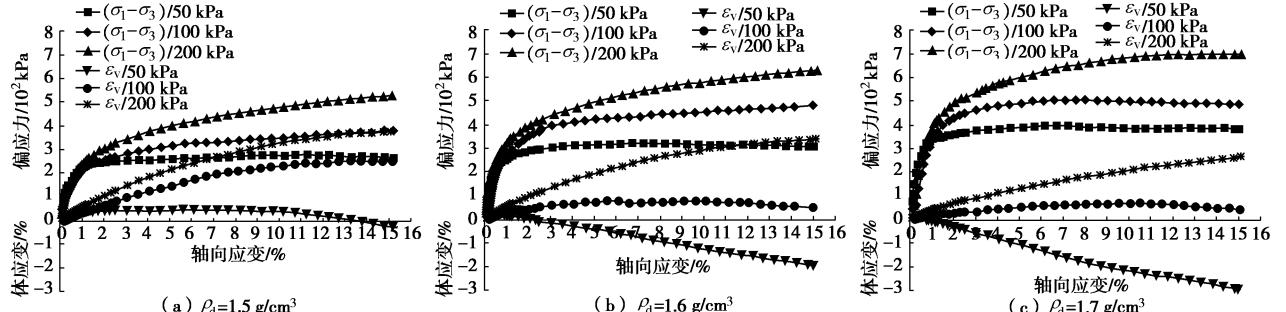


图 4 $s = 200$ kPa 时非饱和重塑黄土($\sigma_1 - \sigma_3$)和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of unsaturated remolded loess when $s = 200$ kPa

从图 2~4 可以看出, 在较小吸力条件下重塑黄土的变形趋势与原状黄土变形趋势基本一致(见图 2);但在大吸力条件下, 重塑黄土的变形趋势与原状黄土变形趋势却存在明显不同。从图 2~4 可以看出:

(1) 当干密度一定时偏应力随净围压($\sigma_3 - \sigma_a$)的增加而呈上升趋势。在轴向应变 ε_i 较小时偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)呈迅速攀升趋势, 并出现交叉现象, 此时, 重塑黄土的结构性没有被破坏。此时, 试样的体应变却随吸力及净围压的变化呈现不断变化趋势。

(2) 当净围压($\sigma_3 - \sigma_a$)一定时, 偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)随含水率的增加而增加。在较小的净围压作用下($\sigma_3 - u_a = 50$ kPa), 干密度越大, 试样的($\sigma_1 - \sigma_3$) - ε_i 曲线呈弱软化型, 并且在后期会出现下降趋势, 试验结束后发现试样出现明显的斜裂缝剪切破坏。

(3) 在净围压($\sigma_3 - \sigma_a$)一定时, 试样的偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)受干密度的影响变化很大, 尤其出现在轴向应变 ε_i 较小的条件下, 偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)会随干密度的增大而迅速增加, 这表明密度越大, 试样抵抗变形的能力也越强。

通过对比分析发现, 无论是重塑黄土还是原状土, 其初期黄土的结构性相对稳定, 初始结构强度对外界压力起到很强的抵抗作用, 但随着剪切变形的发展, 外界压力越来越大。黄土的结构强度的抵抗性就会慢慢减弱, 直至破坏。但从图中可以看出, 在相同吸力条件下, 重塑土的结构性小于原状土的结构性。随着初始吸力 s 的增大, 黄土破坏时的峰值强度也会变得愈大, 这也说明了非饱和土中由于吸力的存在, 增强了非饱和黄土的结构性。但就破坏形式上, 原状黄土试样应变 ε_v 越大, 其剪缩现象就会越明显; 而重塑黄土试样 ε_v 受吸力的影响较大, 随吸力的增大, 试样表现出先剪缩后剪胀的现象。

3 原状土与重塑黄土的强度特性分析

3.1 抗剪强度准则及破坏包络线

依据 Mohr-Coulomb 准则, 非饱和黄土的抗剪强度公式表示为

$$\tau_f = c + (\sigma - u_a) \tan \varphi' , \quad (1)$$

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b = c' + \tau_s , \quad (2)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \tau_s , \quad (3)$$

从式(1)~(3)可以看到, 非饱和黄土的抗剪强度由有效黏聚力 c' 、摩擦强度 $(\sigma - u_a) \tan \varphi'$ 和不稳定黏聚力 $(u_a - u_w) \tan \varphi_b$ 共同承担。

通过 Mohr-Coulomb 强度准则求出三轴剪切过程

中每个试样破坏时的应力 p'_f 和 q'_f , 并将其绘制成 $q'_f - p'_f$ 坐标, 进而求出非饱和黄土在 $\tau - (\sigma - u_a)$ 坐标内的总黏聚力 c 和有效内摩擦角 φ' , 然后利用黏聚力与吸力之间的 $c - s$ 关系求出有效黏聚力 c ^[13-14]。

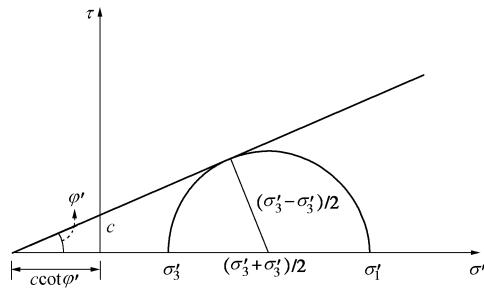


图 5 $\tau - \sigma'$ 平面上的破坏包线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of failure envelope in $\tau - \sigma'$ plane

Mohr-Coulomb 强度理论(图 5), 有

$$\left(c \cdot \cot \varphi' + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \cdot \sin \varphi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} , \quad (4)$$

整理得

$$c \cdot \cot \varphi' + \frac{3}{2} p' \sin \varphi' - \frac{\sigma'_3}{2} \sin \varphi' = \frac{q'}{2} . \quad (5)$$

由于

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} = \sigma'_3 + \frac{q'}{3} , \quad (6)$$

则

$$\sigma'_3 = p' - \frac{q'}{3} , \quad (7)$$

所以有

$$c \cdot \cot \varphi' + \frac{3}{2} p' \sin \varphi' - \frac{(p' - q'/3) \sin \varphi'}{2} = \frac{q'}{2} , \quad (8)$$

$$q' = \frac{6c \cdot \cot \varphi'}{3 - \sin \varphi'} + p' \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} , \quad (9)$$

$$c = \frac{3 - \sin \varphi'}{6 \cot \varphi'} \xi , \quad (10)$$

$$\sin \varphi' = \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega} . \quad (11)$$

3.2 试验结果分析

针对前文分析的试样破坏形式本文选取了不同的极限状态, 并称此时的应力为该试样的破坏应力。规定脆性破坏的破坏应力为: 应力应变关系曲线上的峰值点所对应的应力; 塑性破坏的破坏应力为: 轴向应变 $\varepsilon_i = 15\%$ 时所对应的应力。将在三轴剪切试验中得出的所有试件的破坏应力(p_f , q_f)及通过公式(10)、(11)求得的原状土及重塑土的 c 和 φ' 分别列于表 1, 3 中, 并将 $p_f - q_f$ 关系绘制成曲线, 如图 6, 7 所示。

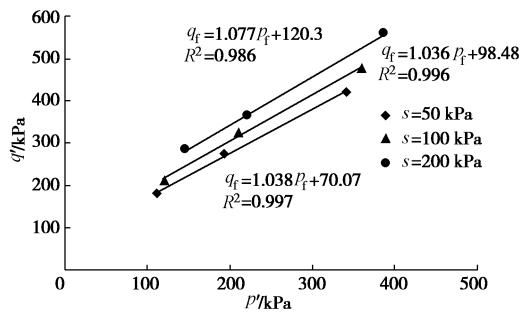
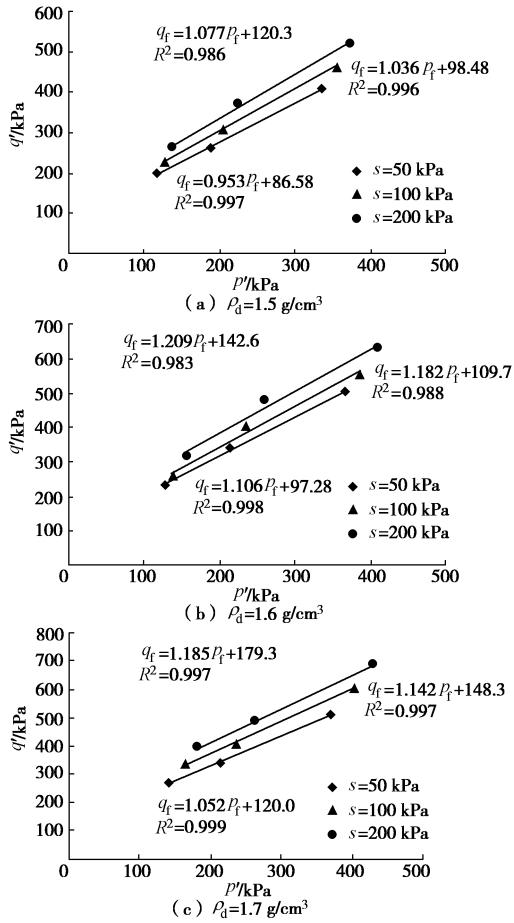
图 6 $p_f - q_f$ 平面内的原状黄土强度包线Fig. 6 Strength envelopes of undisturbed loess in $p_f - q_f$ plane图 7 $p_f - q_f$ 平面内的重塑黄土强度包线Fig. 7 Strength envelopes of remolded loess in $p_f - q_f$ plane

表 1 非饱和原状黄土的强度参数

Table 1 Strength parameters of unsaturated intact loess

ρ_d (g·cm ⁻³)	s /kPa	$\sigma_3 - u_a$ /kPa	q_f /kPa	p_f /kPa	$\tan \omega$	ξ	c /kPa	ϕ' (°)	ϕ' (°) 平均值
1.43	50	180	110.0						
	50	276	192.0	1.038	70.07	33.31	26.26		
	200	421	340.33						
	50	212	120.67						
	100	329	209.67	1.107	85.44	40.79	27.86	27.65	
	200	480	360.0						
	50	284	144.67						
	100	365	221.67	1.149	114.6	54.89	28.83		
	200	561	387.0						

原状土不同吸力下的 $p_f - q_f$ 关系如图 6 所示, 图

7 表示为重塑黄土强度包线。从图 6 可以看出原状黄土的应力应变曲线基本表现出应变硬化的特征, 呈塑性破坏。不同吸力下, $q_f - p_f$ 试验点分布范围很窄, 其临界状态可以归一为一条直线, 且临界状态线近似随着吸力减小而平行下移。表 1, 2 可以看出, 非饱和黄土的抗剪强度受基质吸力的影响, 非饱和原状及重塑黄土的黏聚力 c 随吸力呈线性增加趋势, 而内摩擦角受吸力的影响较小, 可以近似的认为是一常数; 非饱和土的黏聚力随干密度的增加呈线性增加趋势, 同样干密度对非饱和土的内摩擦角的影响也较小。分析得出, 随着吸力的增大, 土体孔隙水将转变为存在于颗粒接触处的弯液面水, 此时弯液面水起到在颗粒接触点形成封闭气泡的作用, 从而使内部颗粒间产生接触力, 而吸力的增加会使颗粒接触力增加, 从而增加黏聚力 c [15-18]。

表 2 非饱和重塑黄土的强度参数

Table 2 Strength parameters of unsaturated remolded loess

ρ_d (g·cm ⁻³)	s /kPa	$\sigma_3 - u_a$ /kPa	q_f /kPa	p_f /kPa	$\tan \omega$	ξ	c /kPa	ϕ' (°)	ϕ' (°) 平均值
1.5	50	200	116.67						
	50	100	262	187.33	0.953	86.58	40.98	24.28	
	200	408	336.00						
	50	229	126.33						
	100	310	203.33	1.036	98.48	46.80	26.21	25.89	
	200	467	355.67						
	50	263	137.67						
	100	370	223.33	1.077	120.3	57.32	27.16		
	200	519	373.00						
1.6	50	235	128.33						
	50	100	340	213.33	1.106	97.28	46.44	27.84	
	200	501	367.00						
	50	260	136.67						
	100	407	235.67	1.182	109.7	52.69	29.59	29.21	
	200	559	386.33						
	50	318	156.00						
	100	480	260.00	1.209	142.6	68.67	30.21		
	200	629	409.67						
1.7	50	270	140.00						
	50	100	341	213.67	1.052	120.0	57.09	26.59	
	200	511	370.33						
	50	340	163.33						
	100	412	237.33	1.142	148.3	71.00	28.67	28.30	
	200	612	404.00						
	50	396	182.00						
	100	490	263.33	1.185	179.3	86.15	29.66		
	200	689	429.67						

这样为简化计算, 可近似用饱和固结排水三轴剪切条件下 $q_f - p_f$ 关系表示, 此时只要确定饱和土的有效抗剪强度参数, 就可描述非饱和土的抗剪强度特性, 从而大大简化了非饱和土临界状态下确定黏聚力的困难。但通过对比表 2, 3 可以看出, 原状土的黏聚力小于重塑土的黏聚力, 但内摩擦角却略有起伏。整体上可以看出, 随着含水率的增加土体黏聚力和内摩擦

角的降低幅度是不相同的，相对于黏聚力来说，摩擦力随含水率增大而产生的降幅较小，这表明含水率对黏聚力具有较大的灵敏性^[19-20]。

3.3 参数求解

φ_b 表示抗剪强度随吸力增加的速率，是表征非饱和和黄土抗剪强度的重要参数。将非饱和原状土及重塑土的 $c - s$ 关系分别绘制于图 8、9。从图 8 中可以看到，原状土黏聚力 c 随吸力 s 呈线性增加关系，由此能够获得原状黄土的吸力摩擦角 $\varphi_b = 8.14^\circ$ 。从图 9 及表 3 中可以看到在一定的净竖向应力作用下，重塑土黏聚力 c 随干密度的增加而增加。在试验所做的吸力范围内，黏聚力 c 随着吸力的增加呈线性增加（图 9）。经计算得出 $\rho_b = 1.5, 1.6, 1.7 \text{ g/cm}^3$ 的重塑试样的吸力摩擦角 φ_b 分别为 $6.16^\circ, 8.47^\circ, 10.59^\circ$ 。

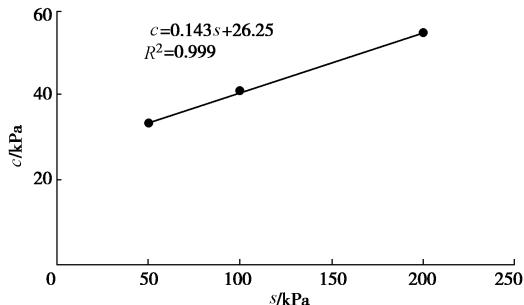


图 8 非饱和原状黄土 $c - s$ 关系曲线

Fig. 8 The $c-s$ curves of unsaturated intact loess

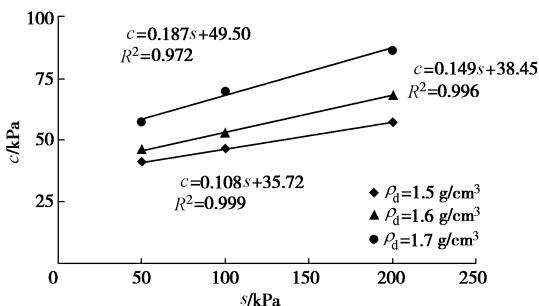


图 9 重塑黄土 $c - s$ 关系曲线

Fig. 9 The $c-s$ curves of unsaturated remolded loess

将重塑土摩擦角 φ_b 与干密度的用曲线表示，见图 10。从图 10 中可以看出非饱和重塑黄土摩擦角与干密度呈线性增加关系。

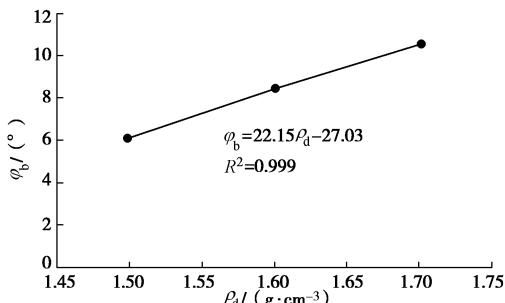


图 10 重塑黄土 $\varphi_b - \rho_d$ 关系曲线

Fig. 10 $\varphi_b - \rho_d$ curves of unsaturated remolded loess

将原状土的 $\varphi' - s$ 关系曲线绘制于图 11。从图 11 中可以看到，在一定范围内，有效内摩擦角 φ' 与吸力 s 呈线性增加关系。但增长幅度极小，仅为黏聚力随吸力的增长幅度的 $1/10$ ，因此可以认为是一常数，且等于饱和土的内摩擦角。

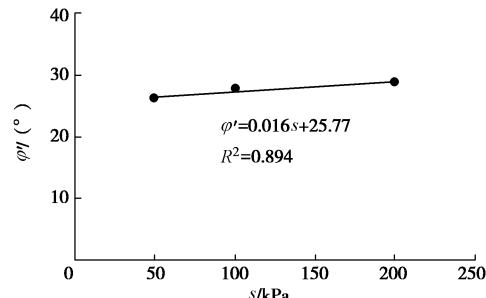


图 11 非饱和原状黄土 $\varphi' - s$ 关系曲线

Fig. 11 $\varphi'-s$ curves of unsaturated intact loess

本文采用 D G Fredlund 等^[21]提出的非饱和土强度公式分别对黄土塬地区原状及重塑黄土的各个参数进行求解分析，揭示有关规律，为完善非饱和土的增量非线性模型及其工程应用提供方便。公式如下：

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (12)$$

式中， c' 为饱和土的有效黏聚力， φ' 为饱和土的有效内摩擦角； $(\sigma - u_a)$ 为破坏面上的净法向应力； $(u_a - u_w)$ 为基质吸力； φ_b 为吸力摩擦角， $\tan \varphi_b$ 为抗剪强度随 $(u_a - u_w)$ 增加的速率，即基质吸力对非饱和土抗剪强度的贡献速率。可以得出黄土塬地区非饱和原状黄土的强度参数为 $c' = 26.25 \text{ kPa}$ ， $\varphi' = 27.65^\circ$ ， $\varphi_b = 8.14^\circ$ 。

通过以上分析得出，非饱和重塑黄土的强度受基质吸力和干密度的影响较大。在数值上体现在基质吸力和干密度对土体黏聚力的影响较大，但对内摩擦角的影响较小。黏聚力与基质吸力的关系可以用下式体现，即

$$c = c' + s \tan \varphi_b \quad (13)$$

式中 c' 为饱和土的有效黏聚力， φ_b 为吸力摩擦角，在分别体现在直线的截距和斜率，其数值可以用最小二乘法分析得出， s 为吸力。将不同干密度下的 c' 和 $\tan \varphi_b$ 列于表 3。

表 3 不同干密度下的 c' 和 $\tan \varphi_b$ 值

Table 3 Values of c' and $\tan \varphi_b$ under different dry densities

$\rho_d / (\text{g}/\text{cm}^3)$	c'/kPa	$\tan \varphi_b$
1.5	35.72	0.108
1.6	38.45	0.149
1.7	49.50	0.187

通过最小二乘法对 ρ_d ， c' ， $\tan \varphi_b$ 进行线性拟合，其关系曲线见图 12，其关系式如下：

$$c' = 68.9\rho_d - 69.01 \quad , \quad (14)$$

$$\tan\varphi_b = 0.395\rho_d - 0.484 \quad . \quad (15)$$

通过以上分析可以得出, 黄土塬地区重塑黄土修正后的非饱和土抗剪强度理论公式为

$$\tau_f = (68.9\rho_d - 69.01) + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)(0.395\rho_d - 0.484) \quad . \quad (16)$$

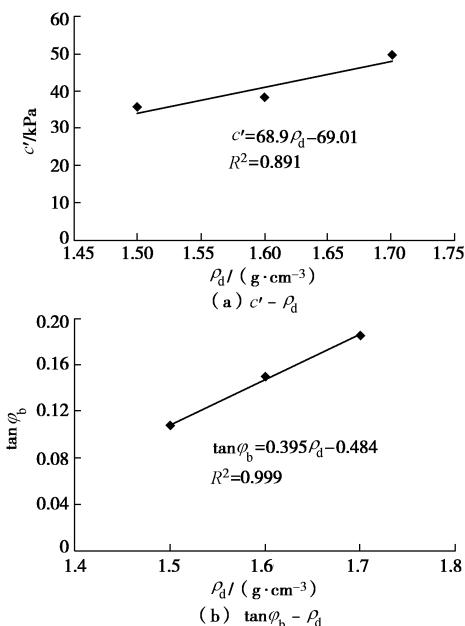


图 12 \$\rho_b\$, \$c'\$ 及 \$\tan\varphi_b\$ 关系曲线

Fig. 12 Relation curves of \$\rho_b\$, \$c'\$ and \$\tan\varphi_b\$

4 吸力、围压对土体结构性参数的影响

将试验结果按 \$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - \varepsilon_1\$ 的关系进行整理发现二者近似成线性关系。由于 \$d(\sigma_2 - u_a) = d(\sigma_3 - u_a) = 0\$, 所

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} = \frac{a}{(a + b\varepsilon_1)^2} \quad . \quad (17)$$

根据前文求得在不同吸力下的破坏比 \$R_f\$ (\$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}\$), 可以得出吸力对破坏比的影响很小, 可以近似取为常数, 确定破坏比 \$R_f = 0.871\$。进而可以将 \$E_t\$ 表示为应力的函数形式, 整理化简得到

$$E_t = E_i \left[1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 \quad . \quad (18)$$

根据 Mohr-Coulomb 强度准则, 有

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cdot \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad . \quad (19)$$

对于非饱和土而言, 式 (19) 应写成

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2[c' + (u_a - u_w)\tan\varphi_b]\cos\varphi' + 2(\sigma_3 - u_a)\sin\varphi'}{1 - \sin\varphi'} \quad . \quad (20)$$

进一步计算得到非饱和黄土的切线变形模量表达式为

$$E_t = KP_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{P_a} \right)^n \cdot \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi')}{2[c' + (u_a - u_w)\tan\varphi_b]\cos\varphi' + 2(\sigma_3 - u_a)\sin\varphi'} \right]^2 \quad . \quad (21)$$

从公式 (21) 分析可以得出, 切线变形模量的公式中共包括 \$k_0\$, \$\beta\$, \$n\$, \$c'\$, \$\varphi'\$, \$\varphi_b\$, \$R_f\$ 7 个材料常数, \$K\$ 是试验常数, \$K\$ 代表 \$\lg(E_t/P_a)\$ 与 \$\lg[(\sigma_3 - u_a)/P_a]\$ 直线的截距, 将 \$K\$ 随吸力的变化关系绘制而成曲线 (见图 13)。而强度参数 \$c'\$, \$\varphi'\$, \$\varphi_b\$ 在前文已经求得。当吸力 \$s=0\$ 时, 式 (21) 就退化为饱和土的邓肯-张模型。将起始切线模量随净围压的变化曲线绘制成图 14。

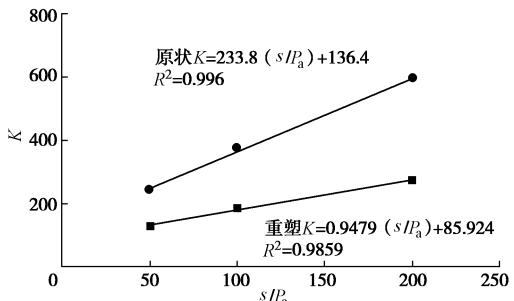


图 13 参数 \$K\$ 随吸力的变化关系曲线

Fig. 13 Curves of parameter \$K\$ under different suctions

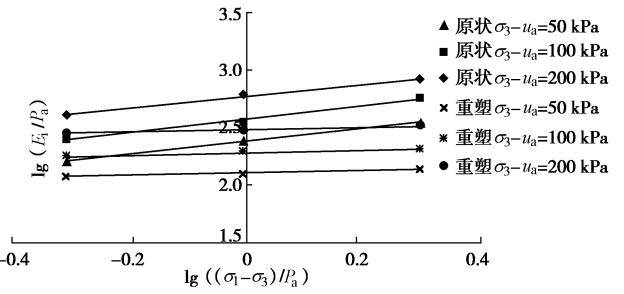


图 14 \$E_t\$ 随净围压的变化曲线图

Fig. 14 Curves of \$E_t\$ under different net confining pressures

从图 14 可以看出, 不论是原状土还是重塑土, 其通过对实验数据进行拟合得到参数 \$K\$ 随吸力 \$s\$ 呈线性增长关系, 且通过对比发现, 求得的原状土参数 \$K\$ 比重塑土参数 \$K\$ 受吸力的影响更大。

5 结 论

(1) 黄土塬地区非饱和黄土在三轴固结排水剪切条件下, 原状黄土的剪切破坏均呈塑性破坏型, 表现出明显的剪缩现象; 重塑土在试验过程中试样的变形出现剪胀和应变软化现象, 剪切变形会出现明显的剪切带现象。

(2) 三轴剪切试验中, 原状黄土表现出随吸力的增大, 偏应力及体应变都呈现为增大趋势; 同一吸力下, 随着净围压的增大, 试样会由弱硬化型向强硬化型破坏发展; 但重塑土表现出, 试样的体应变随吸力及净围压的变化呈现不断变化趋势, 其变化规律反映了试样的剪缩、剪胀现象。

(3) 非饱和原状及重塑黄土的抗剪强度受基质吸力的影响较大, 非饱和原状黄土的黏聚力 c 随吸力的增大而增大。在一定范围内, 有效内摩擦角 ϕ' 与吸力 s 呈线性增加关系。但增长幅度极小, 仅为黏聚力随吸力的增长幅度的 $1/10$, 因此可以认为是一常数, 且等于饱和土的内摩擦角。而非饱和重塑黄土的强度在数值上体现在基质吸力和干密度对土体黏聚力的影响较大, 但对内摩擦角的影响较小。

(4) 分析了基质吸力对非饱和黄土的强度参数和非线性变形参数的影响。试验中发现, 非饱和原状黄土破坏比 R_f 受吸力的影响较小, 可近似取为常数, 其值为 0.871; 而参数 K 受吸力的影响较大, 通过拟合得到参数 K 随吸力 s 呈线性增长; 而非饱和重塑黄土在试验所做的吸力范围内表现出黏聚力 c 随着吸力的增加呈线性增加。但原状土参数 K 比重塑土参数 K 受吸力的影响更大。

(5) 不论是原状土还是重塑土, Fredlund 提出的非饱和土抗剪强度公式对本文的试验土是适用的, 且本文对其进行了数值上的修正, 可以供实际工程参考。

参 考 文 献:

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3 - 13. (in Chinese))
- [2] 李永乐, 张红芬, 余小光, 等. 原状非饱和黄土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2859 - 2863. (LI Yong-le, ZHANG Hong-fang, SHI Xiao-guang, et al. Experimental study of triaxial test of undisturbed unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2859 - 2863. (in Chinese))
- [3] DUNCAN J M, WONG K S, MARBY P. Stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movement in soilmass[R]. Berkeley: University of California, 1978.
- [4] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82 - 90. (CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moismre change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 82 - 90. (in Chinese))
- [5] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 53 - 56. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 53 - 56. (in Chinese))
- [6] 陈存礼, 张登飞, 董玉柱, 等. 常含水率三轴条件下非饱和原状黄土的吸力和力学特性[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1195 - 1202. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-feng, DONG Yu-zhu, et al. Suction and mechanical behaviours of unsaturated intact loess from constant water content triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1195 - 1202. (in Chinese))
- [7] 高帅, 骆亚生, 胡海军等. 非饱和原状黄土增湿条件下力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1313 - 1318. (GAO Shuai, LUO Ya-sheng, HU Hai-jun, et al. Triaxial tests on water immersion of unsaturated and undisturbed loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1313 - 1318. (in Chinese))
- [8] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状 Q2 黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学, 2008, 27(2): 383 - 389. (FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess Q2[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 383 - 389. (in Chinese))
- [9] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰. 原状 Q3 黄土湿陷特性的 CT-三轴试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1288 - 1296. (LI Jia-gui, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng. CT-triaxial test for collapse abllity of undisturbed Q3 loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1288 - 1296. (in Chinese))
- [10] BURLAND J B. Some aspects of the mechanical behavior of partly saturated soils[C]// Moisture Equilibria and Moisture Changes in the Soils Beneath Areas, A Symposium in Print, Butterworth, Sydney, 1965: 270 - 278.
- [11] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. SMFE ASCE, 1970, 96(SM5): 1629 - 1653.
- [12] 殷德顺, 王保田, 王云涛. 不同应力路径下的邓肯-张模型量公式[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1380 - 1385. (YIN De-shun, WANG Bao-tian, WANG Yun-tao. Tangent

- elastic modulus of Duncan-Chang model for different stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1380 - 1385. (in Chinese))
- [13] 殷宗泽, 周 建, 赵仲辉, 等. 非饱和土本构关系及变形计算[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 137 - 146. (YIN Zong-ze, ZHOU Jian, ZHAO Zhong-hui, et al. Constitutive relations and deformation calculation for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 137 - 146. (in Chinese))
- [14] 王朝阳, 许 强, 倪万魁, 等. 非饱和原状黄土的非线性损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1108 - 1111. (WANG Chao-yang, XU Qiang, NI Wan-kui, et al. Experimental study of triaxial test of undisturbed unsaturated loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1108 - 1111. (in Chinese))
- [15] 王菁莪, 项 伟, 毕仁能. 基质吸力对非饱和重塑黄土崩解性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3258 - 3262. (WANG Jing-e, XIANG Wei, BI Ren-neng. A nonlinear damage constitutive model of unsaturated undisturbed loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3258 - 3262. (in Chinese))
- [16] 冷艳秋. 饱和-非饱和重塑黄土变形强度特征[D]. 西安: 长安大学, 2014. (LENG Yan-qiu. The deformation and strength characteristics in saturated-unsaturated remodeled loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese))
- [17] 马秀婷, 邵生俊, 杨春鸣, 等. 非饱和结构性黄土的强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 68 - 75. (MA Xiu-ting, SHAO Sheng-jun, YANG Chun-ming, et al. Experimental research on the strength characteristic of unsaturated structural loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 68 - 75. (in Chinese))
- [18] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347 - 1351. (SHEN Chun-ni, FANG Xiang-wei, WANG He-wen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1347 - 1351. (in Chinese))
- [19] 杨 磊. 黄土抗剪强度特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3): 163 - 165. (YANG Lei. Analysis of characteristics about shear strength of loess[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(3): 163 - 165. (in Chinese))
- [20] 党进谦, 李 靖. 非饱和黄土的强度特征[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 56 - 61. (DANG Jin-qian, LI Jing. Strength characteristics of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 56 - 61. (in Chinese))
- [21] FREDLUND D G RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley, 1993.

(本文责编 孙振远)