DOI：10.16285/j.rsm.2017.10.014

可溶盐对兰州非饱和重塑黄土抗剪强度的影响

闫亚景[1]，文宝萍[2]，黄志全[1]

（1. 华北水利水电大学 资源与环境学院，郑州 河南 450045；2. 中国地质大学（北京）水资源与环境学院，北京 100083）

摘 要：岩土体抗剪强度是分析评价斜坡稳定性的关键指标。为了弄清可溶盐在黄土抗剪特性中的作用程度及控制机制，以兰州重塑黄土为对象，基于直剪试验，研究了黄土抗剪强度及其参数在不同溶滤次数下的变化特征。结果显示，可溶盐对非饱和黄土抗剪强度及黏聚力具有明显非线性弱化作用，而对内摩擦角的影响则相对微弱。其中，抗剪强度与黏聚力随可溶盐的变化规律存在临界分段现象，其降低幅度在溶滤 1 次时达到最大值，在溶滤 5 次后近似于 0；而降低速率以易溶盐含量 2 620 mg/100 g 干土为分界值，呈先快后慢的变化特征。上述关系的内在机制是，在溶滤初始阶段，黄土抗剪特性弱化主要源于易溶盐与部分难溶盐分解；随溶滤次数增加，则更多依赖于易溶盐分解与基质吸力减弱。

关 键 词：非饱和黄土；抗剪强度；溶滤；可溶盐

中图分类号：TU 444 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 10－2881－07

Effect of soluble salts on shear strength of unsaturated remoulded loess in Lanzhou city

YAN Ya-jing[1], WEN Bao-ping[2], HUANG Zhi-quan[1]

（1. School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China;
2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China）

Abstract: It is well known that shear strength of soil plays a key role in analyzing the stability of slope. To clarify the variations of shear strength and parameters of the loess after leaching for different times, a series of direct shearing tests is conducted on samples from Lanzhou loess. Results show that, shear strength and cohesion of unsaturated loess decreases significantly nonlinearly with the decrease of soluble salts, and inner friction angle is slightly changed. Specifically, the reduction reaches the maximum value after leaching 1 time and trends zero after leaching 5 times. It is also found that the reduced rate is large when soluble salt content is greater than 2 620 mg/100 g and then reduces. The decrease of loess's shear strength comes primarily from the decomposition of soluble salts and calcium carbonate at the initial stage, and it relies on the dissolution of soluble salts and weakening of matric suction afterwards.

Keywords: unsaturated loess; shear strength; lixiviation; soluble salt

1 引 言

黄土是一类常年处于非饱和态的典型结构性土体，可溶盐是其疏松结构体系的重要胶结物。近几十年来，黄土台塬区灌溉活动愈加频繁，随之诱发大量黄土类滑坡，其中尤以浅层滑坡居多。许多研究均提及，该类黄土滑坡前缘常伴有地下水渗出与“盐华”现象分布[1−4]。众所周知，抗剪强度是评价斜坡稳定性、掌握滑坡活动机制的关键指标，地下水往往是导致岩土体抗剪强度衰减的最活跃因子。随着灌溉水入渗，黄土颗粒间可溶盐分解被带走，那么黄土塬边斜坡失稳就可能与可溶盐流失后黄土抗剪强度劣化有关。实际上，Dijkstra 等[5]早在 1994 年就提出可溶盐溶滤会降低黄土的抗剪强度。但鄢

收稿日期：2016-02-19
基金项目：国家自然科学基金项目(No. 41372260, No. 41402269)；河南省科技创新人才计划(No. 154100510006)；华北水利水电大学高层次人才科研启动金(No. 40432)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372260, 41402269), the Plan For Scientific Innovation Talent of Henan Province (154100510006) and the Startup Fund for Distinguished Scholars of North China University of Water Resources and Electrical Power (40432).
第一作者简介：闫亚景，女，1986 年生，博士，主要从事岩土力学与斜坡稳定性的研究。E-mail: yajinghappy123@163.com
通讯作者：黄志全，男，1970 年生，博士，教授，主要从事岩土力学、边坡与滑坡工程方面的研究。E-mail: huangzhiquan@ncwu.edu.cn

慧等[6]通过试验发现，黄土状盐渍土的抗剪强度在洗盐后明显增大，而原因是其洗盐后黏粒含量增多。此外，Zhang 等[2]利用环剪试验证实，地下水中 NaCl 浓度对饱和黄土峰值、残余强度的影响较为复杂，两个特征强度均随 NaCl 浓度增加呈先增后降的非线性变化趋势，反之亦然。陈炜韬等[7]试验发现，低含水率氯盐盐渍土抗剪强度随 $CaCl_2$ 含量增加先降低后增加。崔自治等[8]发现，与石膏混合情况下，易溶盐反倒会弱化宁夏黄土强度。张宁宁等[9]认为，易溶盐对黄土抗剪强度的贡献仅在低含水率、高围压条件下比较显著。王文孟等[10]试验发现，即使在高含水率时，可溶盐对黄土强度特性仍有一定贡献。但张永双等[11]认为，易溶盐只有在非常干燥、结晶态时才对黄土发挥一定的胶结作用。

由此可见，尽管黏性土抗剪强度及其参数在溶滤洗盐过程中的作用特征及机制早已被学者们探究，但非饱和黄土抗剪强度在灌溉溶滤可溶盐流失过程中的变化规律及机制如何，目前仍存在争议。另一方面，作为黄土滑坡灾害频发的地区，加之迅猛发展的城市建设，兰州市移山造城工程规模和强度不断增大，人工填土边坡在兰州日趋增多，黄土回填类边坡稳定问题也日渐突出。基于此，本文以兰州地区重塑非饱和黄土为对象，通过室内试验，初步探讨溶滤过程中可溶盐流失后非饱和重塑黄土抗剪强度及其参数的变化特征，并尝试找出灌溉溶滤活动频率对非饱和重塑黄土抗剪强度存在影响的临界值，以期为富含盐分黄土斜坡稳定性评价及预测奠定基础。

2 土样及试验方案

2.1 土样及其物化性质

试验所用土样采自兰州市九州经济技术开发区亨达小区西侧黄土滑坡附近，取样深度为 4.5 m，为上更新世（Q_3）风积成因马兰黄土。土样呈浅灰黄色，质地均匀、结构疏松，有肉眼可见大孔隙。依照现行《土工试验方法标准》[12]，测试土样的基本物理性质、可溶盐成分及含量、黏土矿物成分、兰州段黄河水水化学特征（见表 1～5）。数据显示，该土样富含 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^- 等离子。经化学配平后分析发现，其易溶盐以 Na_2SO_4 为主，$CaCl_2$ 含量次之；中溶盐以 $CaSO_4$、$MgSO_4$ 为主；难溶盐则以 $CaCO_3$ 为主。此外，兰州区段黄河水主要离子浓度较低，总浓度低于 0.1 g/L，属于淡水，类似于去离子水，因此，本文所有试验中水样均由去离子水代替。根据《土的工程性质分类标准》[13]，该类黄土属于低液限黏土质粉土。

表 1 黄土试样基本物理性质
Table 1 Physical properties of the loess specimens

干密度 /(g/cm³)	土粒相对密度	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	粒组及其含量/%		
						黏粒	粉粒	砂粒
1.21	2.74	1.26	27.2	16.2	11	14	85	1

表 2 黄土试样中可溶盐成分及其离子含量（单位：mg/100 g 干土）
Table 2 Compositions and fractions of soluble salts in the loess specimens (unit: mg/100 g dry loess)

K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	总量
10.0	501.8	368.3	13.1	651.8	1 235.6	16.8	2 797.3

表 3 黄土试样中可溶盐类型及含量（单位：%）
Table 3 Types of soluble salts and their contents (unit: %)

易溶盐	中溶盐	难溶盐
2.94	0.13	10.8

表 4 黄土试样黏土矿物成分及含量（单位：%）
Table 4 Clayey mineral compositions and their contents in the loess specimens (unit: %)

伊–蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	黏土矿物总量
19.0	54.0	11.0	16.0	20.1

表 5 兰州地区黄河水水化学特征及离子含量（单位：%）
Table 5 Chemical compositions of the Yellow river water in Lanzhou (unit: %)

K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
1.1	26.3	67.9	67.9	18	52.5	271.7

黄土试样中易溶盐含量高达 2.94%，略大于中等盐渍土含盐量的下限[14]，属于中等盐渍土。因此，在分析富含盐分黄土的工程特性时，不能忽略可溶盐影响。显然，一旦黄河水灌溉入渗溶滤带走黄土结构体系中的胶结可溶盐，可能会改变黄土疏松结构的稳定性，进而影响黄土抗剪特性和黄土斜坡稳定性。

2.2 试验方案

为了掌握非饱和黄土在不同溶滤次数后的剪切特性，室内试验按两阶段实施：第 1 阶段进行溶滤洗盐，第 2 阶段进行直剪试验。

第 1 阶段，采用分层静压法制备与原状黄土干密度相同的环刀试样。接着，利用真空缸饱和环刀试样模拟溶滤洗盐，每抽滤饱和 1 次并静置 48 h 记为溶滤 1 次，本阶段共制备天然重塑、溶滤 1、3、5 次 4 组直剪试样。同时，为了研究不同湿度时非饱和黄土的剪切特性，采用自然风干法，以试样总

重量为测量指标，将已洗盐的饱和试样在自然条件下分别风干至饱和度为 20%、40%、50%、60%、70%、80%等 6 组直剪试样。同时基于室内试验，对比相同洗盐程度风干样与饱和样的易溶盐总量后发现，两者差异不大；加之在风干过程中，已洗盐的饱和试样中并无明显溶液排出，所以本研究认为，风干配置后试样含盐变化量近似于 0；之后，在密封容器中静置48 h待水分均衡后，再进行直剪试验。

第 2 阶段，为了保证剪切试验中试样含水率和基质吸力维持不变或变化程度最低，在试样上、下用不透水薄膜将其与透水石隔开。同时考虑近似模拟浅层高速黄土滑坡的特点，剪切试验采取不固结快剪条件，试验仪器采用美国 Geocomp 公司生产的全自动直剪仪 RSI ShearTrac-Ⅱ，剪切速率为 14 mm/min。如此速度下的剪切试验实为隐含基质吸力的总应力强度试验。由于试样埋深较浅，故试验中采取 25、50、75 kPa 3 级低水平正应力。

3　试验结果

3.1　溶滤后黄土试样中可溶盐的变化特征

基于洗盐后溶滤液的化学成分，换算得到溶滤后黄土试样中剩余的可溶盐成分及主要离子浓度显示（见表 6）。洗盐后，黄土试样仍富含 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-，其中 Na^+、Ca^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}为最活跃阳、阴离子。随着溶滤次数的增加，黄土试样中剩余的易溶盐总量明显减小；然而，相对于天然未洗盐试样中易溶盐总量，溶滤 1、2、3、4、5、6 次后，黄土试样中剩余易溶盐比例分别为 93.8%、33.3%、19%、14.4%、10.1%、10%（见于表 6 中“比例”）。显然，易溶盐在不同溶滤过程的损失度差异明显。其中，试样在洗盐溶滤 1 次后易溶盐减少 6.1%，而溶滤 3 次后淋失比例高达 81%，在溶滤 5、6 次后基本稳定。正是基于此规律，本研究只进行了溶滤 1、3、5 次试样的剪切试验。

表 6　溶滤后黄土试样中可溶盐成分及含量

Table 6　Soluble salts and ion contents in the unsaturated loess specimens after leaching

试样编号	易溶盐离子成分及含量/(mg/100 g 干土)								比例/%
	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	总量	
HD−1	9.3	435.8	375.0	28.3	484.2	1 249.2	42.1	2 623.8	93.8
HD−2	4.3	140.0	122.5	13.0	133.3	488.3	29.8	931.2	33.3
HD−3	2.4	47.8	107.5	7.4	31.6	310.8	23.1	530.7	19.0
HD−4	1.6	17.7	90.8	5.3	9.6	256.7	21.4	403.1	14.4
HD−5	1.0	6.3	68.9	3.2	2.8	179.2	18.6	279.9	10.1
HD−6	0.9	5.7	68.3	3.0	2.6	179.0	18.3	278.8	10.0

值得注意的是，溶滤 1 次后，尽管试样（HD−1）易溶盐总量有一定程度减少，但其 Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、HCO_3^-离子的含量呈一定增大趋势；其中，HD−6 试样中 HCO_3^-含量为 18.3 mg/100 g 干土，仍略大于天然未被溶滤试样中 16.8 mg/100 g 干土；而离子 Na^+、Cl^-含量则明显减小。不同溶滤次数后，部分离子总量与易溶盐总量呈相反变化趋势，可能与非饱和黄土的主要中溶盐、难溶盐局部分解有关。

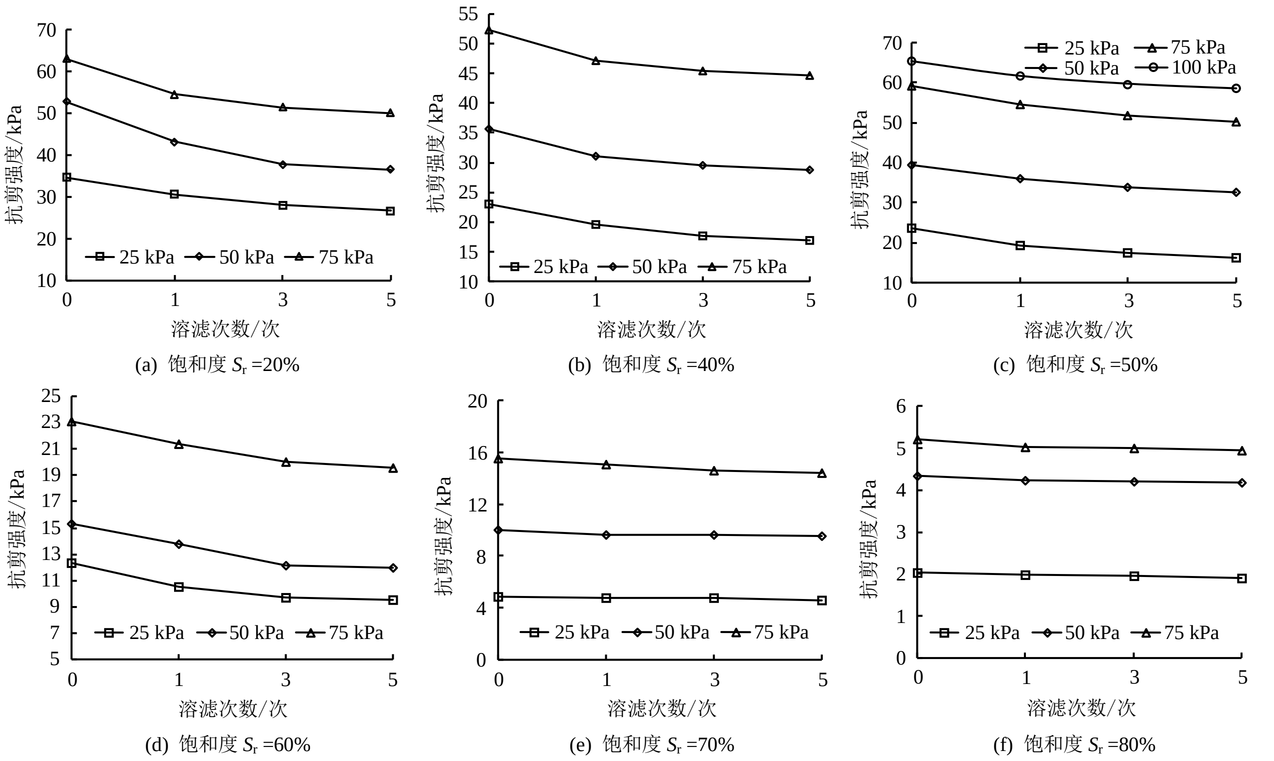
3.2　溶滤后非饱和重塑抗剪强度的变化特征

基于直剪试验结果，整理出 6 类饱和度、3 级正应力水平下，黄土试样抗剪强度与溶滤次数关系曲线（见图 1）。图中清楚显示，溶滤对非饱和黄土的抗剪强度有明显弱化作用，但这种弱化程度与土体正应力状态的相关性不明显，与试样的含水状态关系密切，同时这种弱化程度随土样饱和度的增加呈现一定减小趋势，饱和度 70%似乎是易溶盐能否影响其抗剪强度的一个临界饱和度。当饱和度小于 70%、相应重量含水率小于 32.2%、略大于液限时（见表 1），试样抗剪强度随溶滤次数增加显著下降。饱和度为 20%的试样抗剪强度在溶滤 5 次后降低幅度为 24%；当试样饱和度大于 70%，抗剪强度随溶滤次数增加并无明显降低趋势。饱和度为 80%的试样抗剪强度溶滤 5 次后出现 4%的降低幅度。

此外，由图 1 还可以看出，相同正应力和饱和度条件下，土样抗剪强度随溶滤次数增加呈非线性降低趋势。对于饱和度小于 70%的 4 组试样，相较于重塑未洗盐试样，其抗剪强度在溶滤 1、3、5 次后降低幅度分别为 15%～19%、22%～27%、23%～30%。总体而言，溶滤 1 次试样抗剪强度损失度最大；溶滤 3 次试样抗剪强度进一步减小，但其随可溶盐流失而降低的速度已经弱化；溶滤 5 次试样抗剪强度的损失度最小。而这一规律与溶滤过程中易溶盐及其主要离子的变化特征基本吻合，再次佐证了可溶盐在黄土抗剪特性中的贡献。

如上所述，当饱和度小于 70%时，试样抗剪强度随可溶盐变化而弱化趋势明显，为了直观显示可溶盐对其的作用程度，结合表 2、3、6 整理得到 3 级应力下，饱和度 20%、40%、50%、60%时试样的抗剪强度与溶滤后试样易溶盐总量的关系曲线（见图 2）。图中清楚显示，对于本次研究所用试样而言，不同正应力下，4 种饱和度时各试样以易溶盐含量等于 2 620 mg/100 g 干土为界限，其抗剪强度的降低幅度呈先大后小的变化特征。上述关系反映，尽管易溶盐淋失对非饱和状态黄土的抗剪强

度作用明显，但这种作用程度并非恒定不变的，随黄土中易溶盐总量，或者说与溶滤强度变化而改变，究其原因可能在于黄土独特的胶结特征。实际上，关于土体中易溶盐含量在不同变化范围内对其抗剪强度特性存在差异影响的规律也被其他学者观测并提出过[15−16]。也就是说，非饱和黄土抗剪强度受其易溶盐影响的规律存在临界现象，而这种临界现象与土体含水状态、土体中易溶盐的总量有关。

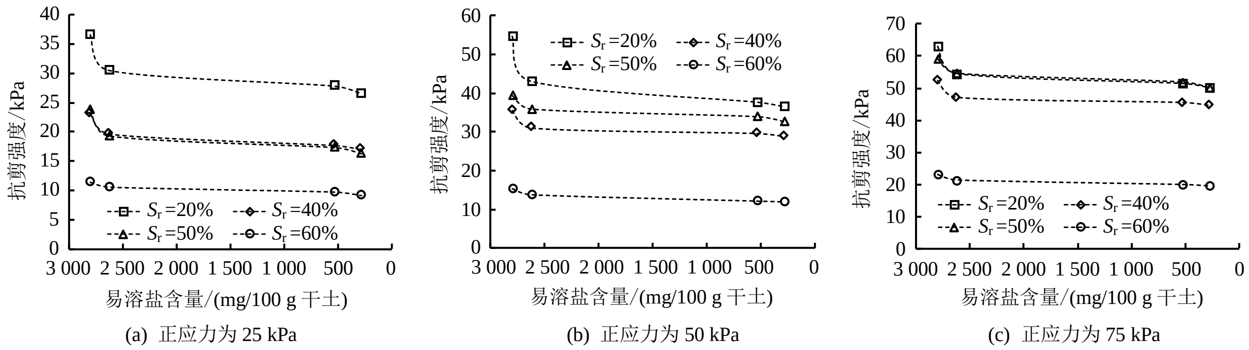


(a) 饱和度 S_r =20%　(b) 饱和度 S_r =40%　(c) 饱和度 S_r =50%

(d) 饱和度 S_r =60%　(e) 饱和度 S_r =70%　(f) 饱和度 S_r =80%

图 1　非饱和重塑黄土抗剪强度与溶滤次数关系曲线

Fig.1　Correlations between leaching time and shear strength of unsaturated remoulded loess specimens with different degrees of saturation



(a) 正应力为 25 kPa　(b) 正应力为 50 kPa　(c) 正应力为 75 kPa

图 2　非饱和重塑黄土抗剪强度与易溶盐含量关系曲线

Fig.2　Correlations between shear strength and soluble salt content of unsaturated remoulded loess specimens with different degrees of saturation

值得注意的是，图 2 显示 3 级正应力条件下，饱和度为 50%试样的抗剪强度明显大于饱和度为 40%试样的抗剪强度，且差异值随应力水平的增高而增大。而这一规律可能与非饱和黄土中基质吸力的活跃性密切相关，将在讨论部分详细阐述。

3.3　溶滤后非饱和重塑黄土强度参数的变化特征

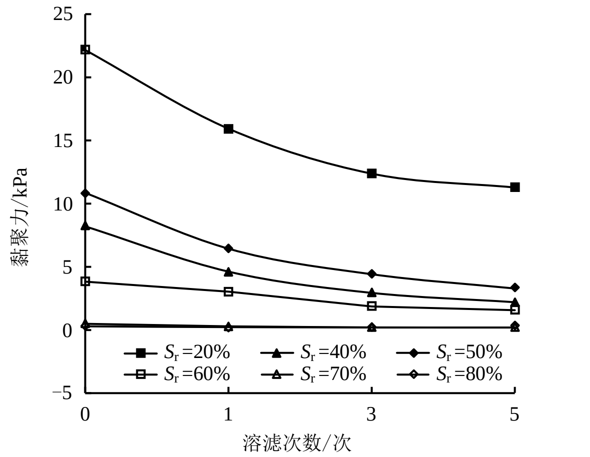
土体抗剪强度是黏聚强度与摩擦强度的综合构成。其中，黏聚强度主要来源于胶结材料的联结作用，摩擦强度更多取决于颗粒之间的咬合摩擦作用，而黏聚力与内摩擦角又分别是这两种强度的直观反映。所以，作为重要的胶结组成，可溶盐对土体抗剪强度的影响应主要显现在黏聚力上，内摩擦角的变化相对较小[7, 9]。

本研究黄土试样强度参数随溶滤次数的变化特征如表 7、图 3 所示。结果表明，随着溶滤次数增加，非饱和黄土（饱和度小于 70%）的黏聚力呈现

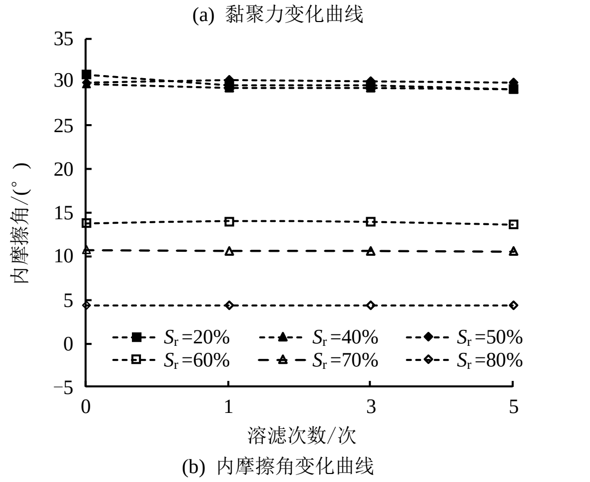
与抗剪强度类似的非线性变化特征，但黏聚力的变化程度较抗剪强度更为强烈。饱和度等于 20%、40%、50%、60%、70%、80%试样的黏聚力在溶滤 5 次后减小量分别为 10.9、6、7.5、2.3、0.2、0.1 kPa，较未溶滤试样的黏聚力降低幅度达 25%～73%；但内摩擦角随溶滤次数增加的变化特征明显异于黏聚力，与抗剪强度也不同。其中，仅有饱和度等于 20%试样的内摩擦角在洗盐 1 次后减小 2.2°，降低比例约 7.2%，其余内摩擦角随溶滤次数的增加并无明显变化特征，基本维持在稳定状态。

表 7 非饱和黄土试样强度参数值
Table 7 Shear strength parameters of unsaturated loess specimens

饱和度	HD		HD−1		HD−3		HD−5	
/%	c/kPa	φ /(°)	c/kPa	φ /(°)	c/kPa	φ /(°)	c/kPa	φ /(°)
20	22.1	30.9	15.9	28.7	12.4	28.6	11.3	28.9
40	8.2	29.9	4.6	29.3	2.9	29.3	2.2	29.2
50	10.8	30.0	6.4	30.2	4.4	30.1	3.3	30.0
60	3.9	13.8	3.0	14.0	1.9	14.0	1.6	13.7
70	0.5	10.8	0.4	10.7	0.2	10.6	0.2	10.5
80	0.3	4.4	0.3	4.4	0.2	4.3	0.2	4.3



(a) 黏聚力变化曲线



(b) 内摩擦角变化曲线

图 3 非饱和重塑黄土强度参数与溶滤次数关系曲线
Fig.3 Correlations between leaching time and shear strength parameters of unsaturated remoulded loess specimens

与前人研究所得结论相似，非饱和黄土中黏聚力对可溶盐变化，或者对灌溉溶滤相对于内摩擦角更加敏感。此外，由于在饱和度 40%～50%，相应含水率 18%～23%的变化区间，不仅非饱和土体基质吸力作用比较强烈，黄土体中黏粒周围强结合水膜的联结增强，所以各组试样抗剪强度随饱和度增加呈增大趋势，同时黏聚力也出现明显增大趋势，原因详见讨论部分。

4 讨论与分析

较于天然重塑试样，溶滤洗盐黄土具有相同矿物成分、干密度（孔隙比）及相似颗粒组成，但随着可溶盐淋失，由其提供的黏结力会完全或部分丧失。因而，溶滤过程中黄土试样的强度参数明显降低的原因就应该归咎于土体可溶盐含量不同所造成的颗粒间黏结力的破坏以及黄土亚稳定结构体系的改变。所以，在此从颗粒胶结、孔隙特征及基质吸力方面讨论可溶盐在黄土抗剪特性中的作用机制。

众所周知，易溶盐具有干析潮解的特性，随着灌溉水缓慢入渗和起胶结作用的易溶盐含量减小的情况下，黄土抗剪强度及其构成部分——黏聚力总体上呈降低趋势并不难理解。但究其变化规律存在临界现象的原因笔者认为，应归咎于易溶盐的分布与胶结特征。黄土中的易溶盐或富集与骨架颗粒接触处，或散布在粉砂表面，或充填于土体孔隙中，仅有前者会有效影响骨架土粒间的黏结力，后两者则可能降低土体强度与盐分含量的相关性。所以黄土以易溶盐含量 2 620 mg/100 g 干土为界限，当易溶盐总量大于该值，土体抗剪强度随易溶盐减少快速降低，易溶盐对土体骨架颗粒的胶结凸显；而小于该值时，抗剪强度衰减速率降低；再者，尽管难溶盐的胶结作用具有不可逆性，一旦重塑破坏较难恢复，但其在黏粒、易溶盐等黏合作用下易形成较大的胶结集合体，从而会以集粒形态连结松散的黄土骨架颗粒[17−18]。所以在溶滤初期（HD−1），除颗粒接触点处易溶盐、中溶盐被溶解，难溶盐也存在淋溶分解现象，而这与前人研究结论基本吻合[19]。尽管相对于易溶盐，难溶盐溶解度较低，但其数量明显多于前者，在灌溉水渗入土体初期，孔隙溶液中 Ca^{2+}、HCO_3^-浓度并不高，加之 CO_2 渗入量的增加，会促使难溶盐 $CaCO_3$ 的逆向分解，这也就是为什么洗盐 1 次后，试样易溶盐总量并无明显降低，但抗剪强度、黏聚力均大幅下降，显然在此阶段易、难溶盐分解是土体抗剪特性弱化的主要原因。随溶滤程度增加，易溶盐溶解进一步加剧并成为水−土化

学作用中的主要形式，而难溶盐 $CaCO_3$ 的逆向分解进程则基本结束，土体抗剪强度降低幅度减小，溶滤 3 次后强度降低幅度进一步减小，溶滤 5 次后，易溶盐析出量趋于 0，强度衰减也趋于稳定，这一现象与表 6 中 Na^+、K^+、Cl^-、SO_4^{2-} 等主要离子的变化规律基本相符，说明在此阶段土体中易溶盐溶解是导致其抗剪强度劣化的主因。

此外，作为非饱和土与饱和土的最大差异所在，基质吸力对非饱和土抗剪强度具有明显增强效应，并主要赋存于土体毛细孔隙中的特性早已被广泛证实。那么，在可溶盐淋失过程中，受制于孔隙结构的基质吸力变化也可能对强度变化有一定影响。所以，基于压力板仪试验数据反映溶滤过程中基质吸力随可溶盐含量呈现图 4 所示规律。

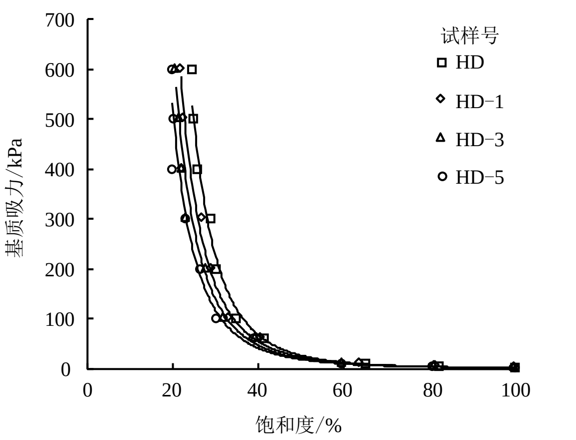


图 4 溶滤前、后非饱和重塑黄土土−水特征曲线
Fig.4 Soil-water characteristic curves of unsaturated remoulded loess specimens before and after leaching

图 4 显示，在饱和度大于 80%的近饱和、饱和区域，各组试样基质吸力并无明显差异；随着土体的饱和度减小、孔隙水分排出，试样基质吸力随溶滤次数增加而逐渐减小；在饱和度小于 70%的非饱和变化区间，本研究各组试样基质吸力差异愈加明显。很显然，在饱和度 20%～70%范围内，基质吸力受控于可溶盐含量变化的规律相对明显。此时，在基质吸力、可溶盐所提供黏结力均减弱的叠加作用下，饱和度小于 70%试样抗剪强度会更明显受制于可溶盐含量的变化。

此外，本研究各组黄土试样的土−水特征曲线变化特征与国内外研究者揭示的其他类型非饱和土的持水特性近乎一致。同时，关于非饱和土基质吸力对其抗剪强度具有明显增强作用也已被证实，笔者也曾得到过相似结论[20]。对于非饱和重塑黄土抗剪强度及其参数随饱和度（图 2、3、表 7）呈现上述变化特点的机制，笔者认为这可能归结于不同饱水状态下黄土内孔隙水的形态特征与颗粒构成有关。进入非饱和状态后，尤其在饱和度 40%～50%区间，孔隙中的水分逐渐减少、进入孔隙内的空气逐渐增多，不仅由孔隙气压、水压差产生的基质吸力增大；同时，土体在该点处含水率接近或略大于塑限，说明土体中黏粒周围重力水、毛细水已基本消失，水分以强结合水膜形态为主，所以黏粒周围(集合体)的联结增强，说明土这种联结也为土体抗剪强度、黏聚力产生贡献[20]。这也就解释了为什么相同溶滤强度后，饱和度为 50%黄土试样的抗剪强度及其参数黏聚力略大于饱和度为 40%黄土试样的强度及其参数值。

显然，在灌溉可溶盐溶失过程中，非饱和黄土抗剪特性的弱化主要源于颗粒间的黏结力和基质吸力的弱化。

5 结 论

（1）随着可溶盐溶滤流失，饱和度小于 70%、易溶盐含量大于 2 620 mg/100 g 干土的非饱和黄土抗剪强度、黏聚力呈明显非线性降低趋势，但内摩擦角变化量相对微弱。

（2）灌溉或降雨条件下，可溶盐对非饱和黄土抗剪特性的影响规律存在临界分段现象。溶滤 1 次后，黄土中易溶盐损失量最小，但其抗剪强度、黏聚力降低幅度最大；溶滤 5 次后，黄土中易溶盐含量降至最低值，其抗剪强度、黏聚力变化量较小。

（3）非饱和黄土抗剪特性随可溶盐呈上述变化特征的机制在于可溶盐溶滤造成颗粒间黏结力的弱化及孔隙结构的改变。具体而言，溶滤初期源于易溶盐、难溶盐的共同分解；随溶滤强度进一步加剧，难溶盐短暂分解现象结束，黄土抗剪强度在易溶盐继续分解与基质吸力减小的叠加效应下进一步弱化，但其降低速率减小。

参 考 文 献

[1] WEN B P, HE L. Influence of lixiviation 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(1): 56－63.

[2] ZHANG F Y, WANG G H, KAMAI T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution[J]. **Engineering Geology**, 2013, 155(1): 69－79.

[3] XU L, DAI F C, THAM L G, et al. Field testing of

irrigation effects on the stability of a cliff edge in loess, Northwest China[J]. **Engineering Geology**, 2011, 120(1－4): 10－17.

[4] ZHOU Y F, THAM L G, YAN W M, et al. Laboratory study on soil behavior in loess slope subjected to infiltration[J]. **Engineering Geology**, 2014, 183: 31－38.

[5] DIJKSTRA T A, ROGERS C D F, SMALLEY I J, et al. The loess of North-central China: Geotechnical properties and their relation to slope stability[J]. **Engineering Geology**, 1994, 34: 153－171.

[6] 邴慧，武俊杰，邓津. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 796－800.
BING Hui, WU Jun-jie, DENG Jin. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2011, 33(4): 796－800.

[7] 陈炜韬，王明年，王鹰，等. 含盐量及含水量对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学，2006, 27(4): 1－5.
CHEN Wei-tao, WANG Ming-nian, WANG Ying, et al. Influence of salt content and water content on the shearing strength parameters of chlorine saline soil[J]. **China Railway Science**, 2006, 27(4): 1－5.

[8] 崔自治，寇小娜，周伟红，等. 石膏易溶盐复合对黄土力学性能的影响研究[J]. 科学技术与工程，2015, 15(14): 200－204.
CUI Zi-zhi, KOU Xiao-na, ZHOU Wei-hong, et al. The effect of gypsum soluble salt compound on the mechanical properties of loess[J]. **Science Technology and Engineering**, 2015, 15(14): 200－204.

[9] 张宁宁，骆亚生. 易溶盐对黄土强度特性的影响[J]. 人民黄河, 2014, 36(8): 103－105.
ZHANG Ning-ning, LUO Ya-sheng. Influence of soluble salt on the strength characteristics of loess[J]. **Yellow River**, 2014, 36(8): 103－105.

[10] 王文孟，郭少春，崔自治. 可溶盐对黄土触变性的作用效应研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3385－3389.
WANG Wen-meng, GUO Shao-chun, CUI Zi-zhi. Study of effect of soluble salt on loess thixotropy[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3385－3389.

[11] 张永双，曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 18－28.
ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin. Effect of sand loess and their cementation in North Shaanxi and West Shanxi[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2005, 13(1): 18－28.

[12] 中华人民共和国水利部. GB/T50123−1999 土工试验方法标准[S]. 北京：中国计划出版社, 1999.
Ministry of Water Resources of China. GB/T 50123−1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.

[13] 中华人民共和国水利部. GB/T50145−2007 土的工程分类标准[S]. 北京：中国计划出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of China, GB/T50145−2007 Standard for Engineering Classification of Soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.

[14] 中华人民共和国建设部. GB/50021−2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of China. GB/50021−2001 Code for Investigation of Geotechnical Engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.

[15] 米海珍，王月礼，赵景华，等. 含盐量对水泥灰土强度特性的影响[J]. 建筑科学与工程学报，2013, 30(3): 91－95.
MI Hai-zhen, WANG Yue-li, ZHAO Jing-hua, et al. Effects of salt content on strength characteristic of cement lime soil[J]. **Journal of Architecture and Civil Engineering**, 2013, 30(3): 91－95.

[16] 何蕾，文宝萍. 灌溉溶滤对西北地区红层风化泥岩不排水抗剪强度的影响[J]. 水文地质与工程地质，2014, 41(3): 47－52.
HE Lei, WEN Bao-ping. Effect of lixiviation by irrigation water on undrained shear strength of weathered red mudstone in Northwest China[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2014, 41(3): 47－52.

[17] GAO G R. Formation and development of the structure of collapsing loess in China[J]. **Engineering Geology**, 1988, 25: 235－245.

[18] ROGERS C D F, DIJKSTRA T A, SMALLEY L J. Particle packing from an earth-science viewpoint[J]. **Earth Science Review**, 1994, 36: 59－82.

[19] 郭玉文，张玉龙，党秀丽，等. 由灌溉引起的黄土湿陷过程中碳酸钙行为研究[J]. 土壤学报，2008, 45(6): 1034－1039.
GUO Yu-wen, ZHANG Yu-long, DANG Xiu-li, et al. Behaviors of $CaCO_3$ in loess collapse caused by irrigation[J]. **Acta Pedologica Sinica**, 2008, 45(6): 1034－1039.

[20] 闫亚景，文宝萍，计博勋. 基质吸力对非饱和重塑黄土抗剪强度的贡献[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 865－875.
YAN Ya-jing, WEN Bao-ping, JI Bo-xun. Contribution of matric suction to shear strength of unsaturated remoulded loess soils[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(6): 865－875.