DOI：10.16285/j.rsm.2017.07.026

黑方台地区黄土强度弱化的浸水时效特征与机制分析

李 姝[1,2]，许 强[1]，张立展[1]，彭大雷[1]，吕红宾[3]，宋少杰[4]

（1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059；2. 北京市勘察设计研究院有限公司，北京 100038；3. 中国地质大学 水资源与环境学院，北京 100083；4. 成都理工大学 材料与化学化工学院，四川 成都 610059）

摘 要：黑方台地区因灌溉水下渗，导致地下水位上升，深部土体长期处于饱水状态。地下水溶滤作用带走大量盐分，同时改变了孔隙水溶液中的化学成分，影响着黄土的抗剪强度。采用环剪仪、激光粒度分析仪、Zeta 电位仪、电感耦合等离子体发射光谱仪、离子色谱仪等装置从强度和物理化学作用等方面对其进行研究。试验结果显示，黄土抗剪强度及其参数（内摩擦角）—浸水时间曲线呈“勺形”。结合相应的物理化学测试结果，分析了黄土强度弱化的浸水时效机制：浸水初期，胶结物（易溶盐）迅速溶解，黄土微结构破坏，内摩擦角显著降低；同时孔隙水离子浓度增大，与黏粒反离子层发生离子交换作用，黏粒结合水膜厚度变小，致使内摩擦角稍有增大；随着浸水时间的增加，中溶盐石膏逐渐溶解于氯化钠溶液中，导致黄土中粗颗粒进一步分散解体，黏粒含量增加，双电层总厚度有所增大，内摩擦角稍有降低。

关 键 词：饱和黄土；强度；时效性；机制分析

中图分类号：TU 42 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 07－2043－07

Time effect and mechanism of strength weakening of loess soaked in water in Heifangtai area

LI Shu[1,2], XU Qiang[1], ZHANG Li-zhan[1], PENG Da-lei[1], LÜ Hong-bin[3], SONG Shao-jie[4]

（1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Beijing Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China; 3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Department of Material Science & Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China）

Abstract: The infiltration of irrigation water on Heifangtai loess plateau raises the groundwater level and saturates the deep soil all the time. Lixiviation caused by underground water takes away much salt and changes chemical components in pore water at the same time, which affects the strength of loess. In this study, the shear strength and physicochemical characteristics of loess are investigated using ring shear apparatus, laser particle size (LPS) analyzer, Zeta probe (potential measuring apparatus), inductively coupled plasma emission spectrometer (ICP-OES), ion chromatograph. The test results show that the curve of strength (internal friction angle)—soaking time is in a “spoon” shape. Based on the results of physical and chemical tests, mechanism of strength weakening of loess soaked in water is discussed. The cements (soluble salt) among loess particles dissolve in water rapidly, breaking the microstructure and making the internal friction angle decrease. At the same time, ion concentration in the pore water increases, and the ions exchanged with outer layer of clay particles, leading to a decrease in the thickness of adsorbed water of clay particle so as to make the internal friction angle increase slightly. With the increase of soaking time, gypsum dissolves in sodium chloride solution and coarse particles are dispersed into clay particles further, then the total thickness of electrical double layer increases, so the internal friction angle decreases slightly.

Keywords: saturated loess; strength; time effect; mechanism analysis

1 引 言

我国西北黄土高原地区，人们为了改善生活条件，在黄土塬上大力发展提水灌溉农业，灌溉水下渗改变着原有的水文地质条件，形成了新的地下水埋藏条件和补给、径流、排泄关系，从而诱发了大

收稿日期：2015-09-02
基金项目：国家创新研究群体科学基金项目(No. 41521002)；国家重点基础研究发展计划项目(No. 2014CB744703)。
This work was supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (41521002) and the National Program on Key Basic Research Project of China (2014CB744703).
第一作者简介：李姝，女，1991 年生，硕士研究生，主要从事地质灾害评价与预测方面的研究工作。E-mail: leajan@qq.com
通讯作者：许强，男，1968 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事地质灾害监测预警与防治工程方面的教学与科研工作。E-mail: xuqiang_68@126.com

量滑坡、崩塌等地质灾害。黑方台为灌溉型诱发滑坡最典型的地区。

黑方台位于甘肃省永靖县盐锅峡镇，自 20 世纪 60 年代刘家峡水库的库区移民到这里后，大量开垦农田，从黄河提水灌溉，至今已有 50 多年的灌溉史。若该区保持现有灌溉量（约 600×10^4 m^3/a），那么未来 10 年内，其地下水均衡场仍不会达到稳定，平均水位上升速度为 0.27 m/a[1]。周跃峰等[2]研究了入渗诱发黄土滑坡的力学机制，并认为黑方台大量黄土滑坡是由于地下水位升高到一定程度，底部饱和黄土发生破坏所致。深部黄土长期处于饱水状态，关于地下水长期作用对黄土强度的影响，前人大多是从盐分含量变化的角度进行相关研究：西北水利科学研究所[3]研究了黄土中易溶盐与碳酸钙含量对其抗剪强度的影响，结果表明，对于非饱和黄土，黏聚力将随易溶盐含量的增加而增大，并认为黄土中大量碳酸钙的存在可增强其抗剪强度。卢雪清[4]也得出了碳酸钙含量愈多黄土强度愈高的结论，并指出黄土中难溶盐含量的减小将显著削弱黄土的黏聚力，内摩擦角也随之减小，而易溶盐含量较少，对黄土抗剪强度及其参数的影响较小。张宁宁等[5]对黄土进行淋洗，发现去易溶盐土样的抗剪强度参数比普通土样小，均随着土体含水率的减小而增大，并且易溶盐对黏聚力的影响比内摩擦角大。笔者认为，地下水对黄土强度的弱化是长期性的，易溶盐、中溶盐的溶解和难溶盐的淋滤在破坏黄土微结构的同时，也改变着孔隙水溶液中的化学成分，黄土中黏土矿物的双电层厚度亦随之发生改变，从而影响黄土的抗剪强度。本文采用环剪仪获取地下水长期作用下黄土的软化强度，结合激光粒度分析仪、Zeta 电位仪、电感耦合等离子体发射光谱仪、离子色谱仪等装置探究地下水与黄土之间的相互作用，以揭示强度变化具有时效性的原因。

2 黄土强度弱化的力学试验研究

2.1 试验仪器

环剪仪[6]能够较好地模拟滑坡大位移情况，满足一定的剪切位移和水的长期作用下，尽可能使土体强度弱化的条件。本试验研究采用由德国 Wille Geotechnik 公司生产的 ARS 型全自动闭合回路控制环剪仪。

2.2 试验方案

试验所用黄土取自研究区黑方台，采用激光粒度测试仪测定其颗粒分布，试样粒径累计分布曲线见图 1；采用理学 DMAX-3C 衍射仪对研究区黄土进行矿物成分分析，测试结果（见表 1）表明，黑方台地区黄土以黏土矿物为主，石英次之，含有少量的长石、方解石、白云石等；其他各项物理指标测试结果见表 2。

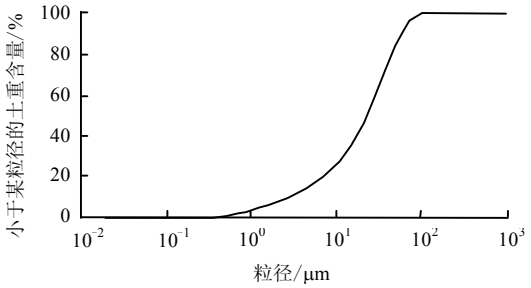


图 1 试样粒径累计分布曲线

Fig.1 Cumulative distribution curve of particles sizes

表 1 全岩 X 射线粉晶衍射分析

Table 1 Results of XRD

矿物成分	百分比/%	矿物成分	百分比/%
伊利石	31	斜长石	11
绿泥石	14	方解石	9
石英	22	白云石	6
钾长石	5	闪石	2

表 2 黄土的物理性质

Table 2 Physical properties of loess

天然密度 /(g/cm³)	含水率 /%	土的相对密度	塑限 /%	液限 /%	不同粒径（mm）颗粒分布/%		
					<0.005（黏粒）	0.005～0.075（粉粒）	>0.075（砂粒）
1.51	3.78	2.71	18.1	26.8	13.91	77.43	8.66

本试验共需 8 组样品，每组 3 个，均制备成含水率为 5%、密度为 1.5 g/cm³ 的重塑土样。其中 1 组不饱和，另外 7 组采用真空抽气法进行饱和后，继续浸水至 1、3、5、7、10、15、20 d。每组试验均以 20 kPa/min 的速率施加固结应力至 500 kPa，然后以 100 kPa/min 的速率减压至所需正应力大小（分别为 300、375、450 kPa，根据黄土密度 1.5 g/cm³ 以及地下水位距地面 20～30 m 左右确定）；固结稳定后进入剪切阶段，剪切速率 v=5 mm/min，剪切位移 300 mm，采用单级排水剪的方式进行剪切，采集仪每 2 s 记录 1 次数据。

2.3 试验结果分析

从抗剪强度随浸水天数变化曲线（见图 2）可知，在同一正应力作用下，相同浸水天数的试样，

其峰值强度与残余强度相差不大，随浸水天数的增加，抗剪强度的变化具有阶段性：浸水初期强度衰减显著，正应力越大，其衰减越明显，在浸水第 3 d 时达到最低值，当浸水时间继续增加，抗剪强度变化具有波动性，但总体上表现为以较低的幅度继续衰减，曲线整体形似“勺形”。

刘祖典等[7]研究认为，土体强度弱化的实质是土的结构部分或者全部发生破坏，在这个过程中，黏聚力减小，内摩擦角发挥作用。那么，土体软化强度的研究重点就是当土体处于饱和状态下，其内摩擦角的变化。

对比图 2、3 曲线的变化特征可以看出，内摩擦角随浸水天数的变化与抗剪强度随浸水天数的变化有一定的相似性，其“勺形”特点更加明显。内摩擦角-浸水天数变化具有明显的 3 个阶段：第 I 阶段：浸水初期（0～3 d），内摩擦角迅速下降了 5° 左右；第 II 阶段（3～5 d）：内摩擦角值略有上升，第 III 阶段（5～20 d），随着浸水天数继续增加，内摩擦角缓慢减小。

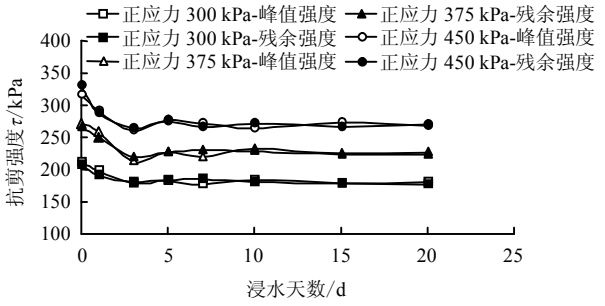


图 2　抗剪强度随浸水天数变化曲线

Fig.2　Variation of shear strength with soaking time

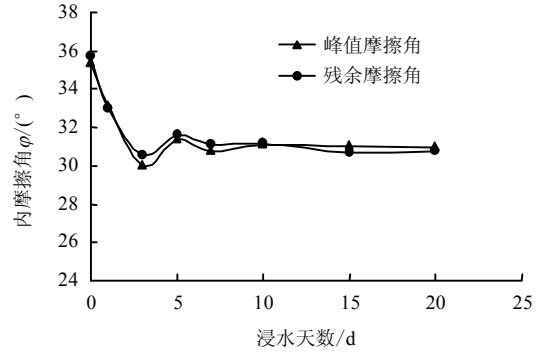


图 3　内摩擦角随浸水天数变化曲线

Fig.3　Variation of internal friction angle with soaking time

3　地下水对黄土的物理化学作用

黄土具有水敏性，遇水后其结构发生破坏，粗颗粒分散解体，细颗粒含量增加，导致黄土强度迅速降低，可通过激光粒度仪测得黏粒含量的变化情况，但倘若只考虑水对黄土结构的破坏是无法解释饱和黄土抗剪强度及其参数（内摩擦角）随浸水时间呈“勺形”变化的原因。笔者从物理和水化学的角度开展研究，分析黄土强度变化具有这一特殊时效性的原因。

笔者认为，浸泡黄土后的水溶液中化学成分的变化与黄土颗粒中盐类溶解、离子交换作用、水敏性矿物的水解等有关。黄土浸水后易溶盐迅速溶解，其浸泡液中必然含有相应的阴阳离子，介质环境随着黄土浸水天数而不断变化，而黏土矿物颗粒表面在一定的介质条件下，具有一定的双电层，当介质中的离子成分和浓度发生变化时，自由介质和反离子层中阳离子的原有平衡状态随即遭到破坏，二者之间的阳离子发生离子交换作用，以达到新的平衡。可通过离子色谱仪、光谱仪测量浸泡过黄土后的上层清液中各离子或金属元素的含量，以分析水溶液中化学成分变化情况，找到其与强度随浸水时间变化规律之间的内在联系。

由于黏土颗粒具有负电性，其周围产生负电场，必将吸附介质中的阳离子以平衡其负电荷，这样就形成了双电层，即双电层由结构负电荷构成的内层和反离子构成的外层（或称反离子层、吸附层）组成。反离子层按离子的活动能力可分为固定层和扩散层。固定层中的离子不能完全平衡热力电位，只能中和一部分，其外缘所剩余的电位称为动电电位（或 Zeta 电位）。Zeta 电位由扩散层离子平衡，电位增高则扩散层增厚，而扩散层厚度与弱结合水膜厚度相应。可通过直接测量 Zeta 电位值间接知道水膜的厚度，当 Zeta 电位减小，表明双电层厚度减小，结合水膜厚度亦减小。

3.1　试验仪器

（1）激光粒度分析仪：采用由 Malven 公司生产的 MS2000 激光粒度分析仪，粒度测量范围：0.02 μm～2 mm。

（2）Zeta 电位仪：采用美国 Colloidal Dynamics 公司生产的 ZetaProbe 电位仪。

（3）电感耦合等离子体发射光谱仪：使用美国 PE 公司 Optima 系列 ICP-OES5300V 全谱直读型电感耦合等离子体原子发射光谱仪。该仪器具备的特点：多种元素同步检测、选择性好、检出限较低、检测速度快、准确度高、所需试样量少等。

（4）离子色谱仪：761Compact Ic 离子色谱仪由电脑控制，配有独创的专利 SM 化学抑制系统。具有分析速度快，监测灵敏度高，选择性好，可多离子同时分析，离子色谱柱的稳定性高，使用寿命长

等优点。

3.2 试验方案

（1）黏粒含量测试

准备 6 个塑料瓶，将 100 g 黄土和 100 g 灌溉水混合装入每个塑料瓶中，静置，分别于浸泡的第 1、3、5、10、20、37 d 时，将其中 1 瓶水土混合物全部倒入不锈钢碗里，放置于温度为 108 ℃的烘箱中 24 h，烘干冷却后，用碾磨棒碾磨为细碎颗粒，再过 2 mm 筛，制备好的样品保存于保鲜袋中，采用激光粒度分析仪，使用湿法测试其黏粒含量。

（2）Zeta 电位测试

将 20 g 黄土和 500 g 灌溉水混合装入 1 个塑料瓶中，分别于浸泡 1、5、10、15、20 d 时，将塑料瓶中水土混合物全部倒入测试杯中，测试仪器转速设置为 250 转，测试完毕后，将测试杯中水土混合物全部装回塑料瓶中，静置等待下次测试。

（3）化学成分分析

准备 8 个塑料瓶，将 100 g 黄土和 200 g 灌溉水混合装入每个塑料瓶中，静置，分别于浸泡的第 1、3、5、7、10、15、20、37 d，用注射器抽取其中 1 瓶里的上层清液，过 0.45 μm 水相滤头后，保存于新塑料瓶中，采用电感耦合等离子体发射光谱仪测试金属元素含量，离子色谱仪测试阴离子含量，其中 CO_3^{2-}和 HCO_3^-含量采用滴定法测量。

3.3 试验结果分析

（1）黏粒含量测试

黏粒含量随浸水天数变化曲线见图 4，黄土一旦浸水其结构被破坏，粗颗粒分散解体，细颗粒含量增多，然而浸水初期（前 3 d），其黏粒含量并没有增加反而迅速降低了 5.5%左右，很可能是由于易溶盐的溶解改变了水溶液中化学成分，而黏粒带负电，在其所处的介质中发生了凝聚现象，导致黏粒含量减少；随着浸水天数的增加，粗颗粒进一步分散解体，黏粒含量逐渐增多。

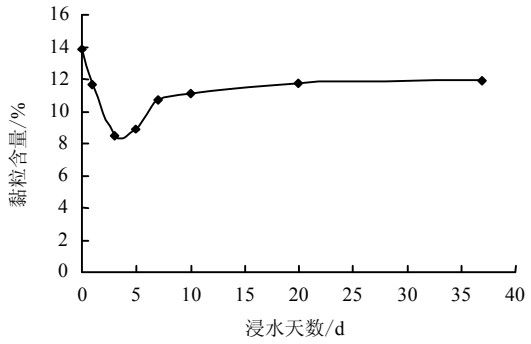


图 4 黏粒含量随浸水天数变化曲线

Fig.4 Variation of content of clay particles with soaking time

（2）Zeta 电位测试

Zeta 电位随浸水天数的变化曲线见图 5。Zeta 电位为负值，表明黏土颗粒周围具有负电场，随着浸水天数的增加，Zeta 电位的绝对值先减小再增大，最后趋于缓慢增加。Zeta 电位随浸水天数的变化可间接表明，在长期浸水的情况下，黄土中黏土颗粒表面结合水膜厚度的变化情况：浸水初期，结合水膜厚度减小，随着浸水时间的增加，结合水膜厚度又逐渐增大。

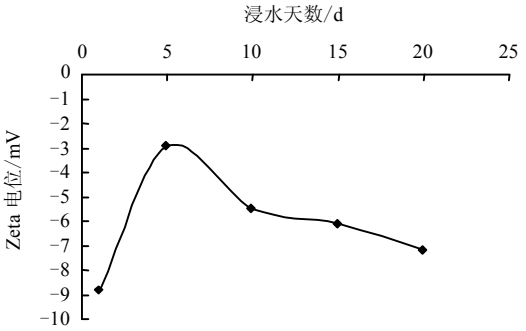


图 5 Zeta 电位随浸水天数变化曲线

Fig.5 Variation of ζ potential with soaking time

（3）化学成分分析

水化学测试结果汇总于表 3。测试结果显示有少量的铝、铁和硅元素，因黏土矿物的晶体具有层状结构，由硅氧四面体层和铝氢氧八面体层按不同数量和方式叠置而成，八面体顶端由 6 个氧和氢氧离子占据，中心常为铝、镁、铁等元素，由此可以推测，上层清液中含有少量的黏土矿物；硅元素含量随着浸水天数的增加略有增多，很可能是水敏性矿物（长石、方解石）经水解作用而形成了新的黏土矿物，其水解反应式为

$$K_2[AlSi_3O_8]\text{（钾长石）} + H_2O \rightarrow K^+ + KAl_2[(Si,Al)_4O_{10}][OH]_2\text{（伊利石）} \quad (1)$$

$$Na_2[AlSi_3O_8]\text{（钠长石）} + H_2O \rightarrow Na^+ + NaAl_2[(Si,Al)_4O_{10}][OH]_2nH_2O\text{（钠蒙脱石）} \quad (2)$$

$$Ca_2[AlSi_3O_8]\text{(钙长石)} + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + CaAl_2[(Si,Al)_4O_{10}][OH]_2nH_2O\text{（钙蒙脱石）} \quad (3)$$

郭玉文等[8–9]研究指出，黄土中的团粒是由原生矿物、黏土矿物以及碳酸钙构成的集合体，黑方台地区黄土团粒中钙元素几乎以 $CaCO_3$ 的形式存在。在黄土湿陷过程中，$CaCO_3$ 以移动损失为主，淋溶损失相对较少。本试验水土混合体系装于盖紧的塑料瓶中，$CaCO_3$ 与 H_2O、CO_2 反应生成碳酸氢钙的化学作用极其微弱，并且滴定法测出的碳酸氢根离子含量也并未像钙元素含量一样随着浸水天数迅速增加。黄土中的中溶盐主要是石膏，虽然 XRD 试

验并未测出其值，但其在氯化钠溶液中的溶解不容忽视。这就解释了 SO_4^{2-}离子含量随浸水天数显著增加的原因，与钙元素含量变化规律相似，那么钙元素也是以离子态的形式存在。

表 3　黄土不同浸水天数下，上层清液化学成分测试结果（单位：mg/L）

Table 3　Contents of different chemical compositions in supernatant liquid after different soaking times (unit: mg/L)

浸水天数/d	Na	K	Ca	Mg	Al	Fe	Sr	Si	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
0	21.97	1.73	55.69	19.71	0.03	0.00	0.50	2.52	17.88	4.76	45.93	11.86	186.89
1	448.90	10.05	40.77	30.70	0.05	0.00	0.58	2.94	369.97	43.85	483.64	11.86	162.78
3	447.40	9.29	29.16	25.33	0.03	0.01	0.51	2.89	346.47	43.82	407.34	11.86	174.83
5	498.30	10.41	32.80	29.11	0.03	0.00	0.96	3.14	386.21	44.47	482.46	11.86	162.78
7	467.90	10.09	33.42	28.20	0.03	0.01	0.78	3.08	368.60	42.33	457.05	5.93	180.86
10	471.20	11.00	39.62	32.86	0.04	0.00	0.98	3.26	375.64	42.97	541.87	5.93	180.86
15	505.50	12.21	43.23	37.25	0.03	0.01	1.44	3.49	385.80	46.37	582.82	5.93	186.89
20	506.50	12.55	51.82	42.32	0.03	0.00	1.83	3.53	391.67	47.26	667.18	5.93	186.89
37	519.70	13.14	77.05	53.74	0.04	0.00	2.84	3.92	394.63	48.60	760.05	5.93	186.89

地下水对黄土的物理化学作用是个复杂的过程，笔者将主要阳离子含量随浸水天数变化（见图 6）分为 5 个阶段，并结合 Zeta 电位随浸水天数的变化规律，对各阶段进行分析：

①第 I 阶段（浸水 0～1 d）：起胶结作用的易溶盐迅速溶解，代表性物质是硫酸钠、氯化钠、氯化钾等，钠离子含量飙升至 448.90 mg/L；钙离子含量却在降低。高国瑞[10]研究指出，被钙离子饱和的孔隙溶液、黏土矿物将迅速发生凝聚，使得钙离子浓度降低。另一方面，张永双等[11]关于陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用的研究认为，黄土中存在钙镁型强-中溶解性盐类时，可促进黏土矿物发生凝聚作用，并决定了其交换阳离子以钙镁离子为主，溶液中浓度相对较高的钙离子因扩散作用进入黏土矿物的反离子层，置换反离子层中的阳离子，也会降低溶液中钙离子的含量。

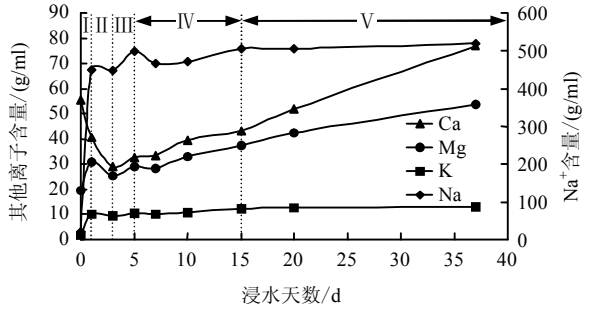


图 6　主要阳离子含量随浸水天数变化曲线

Fig.6　Variation of content of main cation with soaking time

②第 II 阶段（浸水 1～3 d）：类似于浸水 1 d，由于溶液中易溶盐的溶解，钠、钾、镁离子浓度增加，但随后因参与平衡黏土矿物表面的负电荷，与反离子层发生离子交换作用，致使其浓度有所降低。

③第 III 阶段（浸水 3～5 d）：黄土中盐类的进一步溶解以及原生矿物的水解，使得溶液中相应的阳离子含量增加，溶液的浓度则决定着黏土矿物扩散层的厚度，扩散层厚度与弱结合水膜厚度相应。溶液浓度愈高，黏土矿物扩散层厚度愈薄，其结合水膜厚度愈薄。而 Zeta 电位仪测试结果显示其绝对值在浸水初期减小，证明了结合水膜厚度确实变薄。

④第 IV 阶段（浸水 5～15 d）：盐类胶结物的减少，导致黄土颗粒之间排列发生变化，散粒在静置的溶液中缓慢固结，溶液微弱地溶蚀剩余的盐类，溶液中氯化钠、硝酸钾浓度缓慢增加；黄土中原生矿物的水解，使得溶液中相应的阳离子含量增加；黄土里中溶盐是石膏（硫酸钙），硫酸钙微溶于水，但可溶于氯化钠溶液。在一定浓度的氯化钠溶液中，硫酸钙的溶解度随着氯化钠浓度的增大而增大[12]。中溶盐石膏在氯化钠含量较高的溶液中开始逐渐溶解，增加的钙离子将置换黏土矿物反离子层中的镁离子，那么钙、镁离子含量随浸水天数均逐渐增加。

⑤第 V 阶段（浸水 15～37 d）：易溶盐溶解殆尽，原生矿物的水解作用也已完成，钠、钾离子含量趋于稳定。在氯化钠含量较高的溶液中，石膏晶体随着浸水天数的增加而持续溶解，钙离子含量逐渐增加，由于其交换能力较强，将置换反离子层中的镁离子，镁离子含量随浸水天数也逐渐增加。

浸水后期，土体粗颗粒进一步分散解体，黏粒含量增加，比表面积增大，双电层的总厚度也变大，这与 Zeta 电位测试结果显示在浸水后期，其电位绝对值随浸水天数稍有增加相一致。

4　黄土强度弱化的机制分析

笔者认为，黄土内摩擦角随浸水天数变化（见

图 3）与主要阳离子含量随浸水天数变化（见图 6）之间有一定的对应关系。

图 3 的第 I 阶段对应图 6 的第 I、II 阶段。浸水初期，随着水对黄土颗粒之间胶结物（易溶盐）的持续作用，颗粒接触部位的易溶盐迅速溶解，最显著的指标为钠离子浓度飙升，值得注意的是钙离子由于参与离子交换作用和黏粒的凝聚反应，其含量反而在该阶段为降低的趋势，黏粒含量也相应减少。易溶盐的溶解导致黄土的结构遭到破坏，内摩擦角迅速降低。

图 3 的第 II 阶段对应图 6 的第 III 阶段。随着黄土中盐类的进一步溶解以及原生矿物的水解，孔隙水中离子浓度增加，与黄土中黏土颗粒反离子层发生离子交换作用，导致黏土颗粒结合水膜厚度减小（Zeta 电位绝对值减小），从而使得颗粒之间的摩阻力增大，内摩擦角稍有增大。

图 3 的第 III 阶段对应图 6 的第 IV、V 阶段。浸水后期，一方面，由于盐类胶结物的减少，黄土结构发生更彻底的破坏，颗粒之间排列发生变化，散粒在静置的溶液中缓慢固结，地下水对黄土的化学作用缓慢；另一方面，随着易溶盐溶解殆尽，原生矿物的水解作用也已完成，对钠盐、钾盐的溶解趋于稳定；与此同时，黄土颗粒间石膏晶体逐渐溶解于氯化钠溶液中，导致其粗颗粒进一步分散解体，黏粒含量增加，双电层总厚度有所增大（Zeta 电位绝对值增大），内摩擦角稍有降低，但不如刚开始浸水时那么显著。

综上所述，地下水对黄土长期的物理化学作用在宏观上表现出黄土抗剪强度及其参数（内摩擦角）随着浸水时间的增加呈“勺形”变化的趋势。

5 结 论

（1）黄土抗剪强度及其参数（内摩擦角）随浸水天数的变化曲线成“勺形”，浸水 3 d 试样的强度指标最低，位于“勺底”，试验结果表明地下水对黄土强度的弱化具有时效性。内摩擦角-浸水天数曲线可分为 3 个阶段，即：浸水初期（1～3 d），内摩擦角迅速下降；3～5 d 时，内摩擦角值略有上升；随着浸水天数继续增加（5～20 d），内摩擦角缓慢减小。

（2）地下水对黄土的长期物理化学作用显著：激光粒度分析仪测试结果表明黏粒含量随着浸水天数的增加先减少后增多；Zeta 电位仪测试结果表明，随着浸水天数的增加，结合水膜先减小后增大；水化学试验显示主要阳离子含量随浸水天数的变化可分为 5 个阶段，对应着内摩擦角随浸水天数变化的 3 个阶段。

（3）一系列复杂的微观物理化学作用，导致黄土在宏观上表现出强度弱化的浸水时效性，其机制分析如下：浸水初期，胶结物（易溶盐）迅速溶解，黄土微结构破坏，内摩擦角显著降低；同时孔隙水离子浓度增大，与黏粒反离子层发生离子交换作用，黏粒结合水膜厚度变小，致使内摩擦角稍有增大；随着浸水时间的增加，中溶盐石膏逐渐溶解于氯化钠溶液，黄土中粗颗粒进一步分散解体，黏粒含量增加，双电层总厚度有所增大，内摩擦角稍有降低。

参 考 文 献

[1] 孙萍萍, 张茂省, 董英, 等. 灌溉诱发型滑坡风险控制关键技术[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 899－903.
SUN Ping-ping, ZHANG Mao-sheng, DONG Ying, et al. Measures of risk mitigation for landslides induced by irrigation[J]. **Geological Bulletin of China**, 2013, 32(6): 899－903.

[2] 周跃峰, 谭国焕, 甄伟文, 等. 入渗诱发黄土滑坡的力学机制[J]. 岩土力学,2013,34(11): 3173－3186.
ZHOU Yue-feng, TAN Guo-huan, ZHEN Wei-wen, et al. Mechanism of infiltration-induced loess landslides[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(11): 3173－3186.

[3] 西北水利科学研究所. 西北黄土的性质[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1959.
Northwest Institute of Water Conservancy. The property of loess in Northwest China[M]. Xi′an: Shaanxi People’s Publishing House,1959.

[4] 卢雪清. 盐分变化对黄土强度特性影响的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
LU Xue-qing. Study on the effect of salinity changes on strength character of loess[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.

[5] 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.

[6] 洪勇, 孙涛, 栾茂田, 等. 土工环剪仪的开发及其应用研究现状[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 628－634.
HONG Yong, SUN Tao, LUAN Mao-tian, et al. Development and application of geotechnical ring shear apparatus: An overview[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 628－634.

下转第 2058 页