DOI：10.16285/j.rsm.2017.02.032

伊犁深厚湿陷性黄土浸水入渗及沉降变形特征分析

安 鹏[1]，张爱军[2]，邢义川[3]，倪万魁[1]，张 博[2]

（1. 长安大学 地质工程与测绘学院，陕西 西安 710054；
2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；3. 中国水利水电科学研究院，北京 100048）

摘 要：新疆伊犁黄土原位试验实测资料非常缺乏，为了研究其浸水入渗规律和自重沉降特征，开展了原状土和重塑土的现场浸水试验研究，并对表面沉降和水分进行观测。研究表明：浸水过程中，任一点的饱和度存在明显的暂态饱和区，封闭压缩气体上收缩膜承受的孔隙气压力、孔隙水压力和进气值的短暂力学平衡是其存在的主要原因；原状土因黄土结构性和地层结构性，其沉降特征具有明显的阶段性，其可用分段函数进行描述，重塑土因结构性破坏，其变形阶段性不明显；浸水 21 d，湿润锋面到达 8.8 m，重塑土（S4）的沉降量为 120 cm，原状土（S5）的沉降量为 78 cm，前者比后者大 35%；鉴于软弱土层存在应力集中，湿润锋面以上相邻饱和土变形尚未稳定时，其下非饱和土不发生增湿变形，因此，原状土沉降变形为湿润锋面以上饱和土尚未变形稳定的沉降量，小于自重湿陷量的计算值 85 cm。研究结果对伊犁黄土浸水变形机制和增湿变形计算奠定了基础。

关 键 词：深厚湿陷性黄土；现场浸水试验；暂态饱和区；沉降变形特征
中图分类号：TU 444 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 02－0557－08

Analysis of soak infiltration and deformation characteristics for thick collapsible loess in Ili region

AN Peng[1], ZHANG Ai-jun[2], XING Yi-chuan[3], NI Wan-kui[1], ZHANG Bo[2]

(1. College of Geology Engineering & Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In-situ soaking tests were implemented on undisturbed and remolded soils in the Ili region to study the regularities of soaking infiltration and settlement of Ili loess. Surface settlement and water content were also monitored. The results show that transient saturated zone exists in the soil depending on temporary mechanical equilibrium among pore water pressure, air entry value and pore air pressure of the closed compressed gas. Undisturbed loess presents multistage settlement, which can be described by piecewise function, due to soil structure and stratum structure. On the contrary, there is no obviously multistage settlement for remolded soil due to the structural damage. The wetting front reaches 8.8 m in the 21st day of soaking test. At the same time, the settlement of the remolded soil (S4) is 120 cm, 35% larger than 78 cm of the undisturbed soil (S5). Due to the effect of stress concentration, unsaturated soil below the wetting front does not deform before the saturated soil near the wetting front reaches stable deformation. Therefore, the settlement of S5, less than the calculated value (85 cm) of the dead weight collapsibility volume, is not stable settlement deformation of saturated soil above wetting front. The results provide a basis for the understanding of mechanism of soaking infiltration and calculation of wetting deformation of Ili loess.

Keywords: thick collapsible loess; field soaking test; transient saturated zone; settlement regularity

收稿日期：2016-06-06
基金项目：国家自然科学基金项目（No. 51379220，No. 51279171）；中国博士后科学基金项目（No. 2016M602740）；中央高校基本科研业务费（No. 310826161001）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51379220, 51279171), the China Postdoctoral Science Foundation (2016M602740) and the Central University Fund Project (310826161001).
第一作者简介：安鹏，男，1985 年生，博士，讲师，从事特殊土的工程性质与应用研究。E-mail: anpeng110@163.com
通讯作者：张爱军，男，1964 年生，博士，教授，从事黄土工程理论与计算研究。E-mail: xn_zaj@163.com

1 引 言

湿陷性黄土广泛分布于我国的西北、华北、辽西等干旱半干旱地区。其湿陷变形机制和变形特征方面的研究已经取得了丰富的成果[1−3]。然而，当前地基处理以黄土层的充分湿陷作为计算依据[4]，对于工民建地基，处理深度不大，方法成熟，成本较低。对于深厚湿陷性黄土渠道、水电站等常年浸水地基，依据规范[4]常会出现天价工程。而实践表明，黄土浸水后常出现增湿变形与湿陷变形共存的情况，其可以保持基础的稳定。因此，增湿变形计算是解决这个问题的关键，当前成果颇丰[5−9]。其中通过现场浸水试验获取非饱和黄土入渗规律和变形特征是进行增湿变形计算的基础。当前的黄土浸水试验主要集中在兰州[10−11]、陕西[12]、陇西[12−13]、宁夏[14]、山西[15]等地，新疆伊犁黄土地区未见相关报道，原位试验资料非常缺乏。

新疆伊犁拟修建一条大流量引水渠道，需要穿过深厚湿陷性黄土，为了研究该黄土的浸水入渗特征和沉降变形特征，进行了自然浸水条件下的非充分饱和浸水试验，以便分析伊犁非饱和黄土浸水入渗和沉降变形规律，为工程中黄土增湿变形计算、渠道地基处理提供依据。

2 场地岩土性质概况

试验场地位于伊犁州昭苏县特克斯河Ⅲ级阶地，属于 Q_3^{eol} 地层，场地为草原，地势起伏开阔。北部为阿登套低中山区，为石炭系地层，属安山斑岩。勘探深度内无古土壤层，无地下水。地层从上到下分别为：①上部为 0.4 m 的腐殖质黑土，含有大量草根，黑色；②中部为约 30 m 的风成黄土，土黄色，土质均匀，存在大孔隙，同时可见少量蜗牛化石，属于典型的 Q_3 风成原生黄土；③底部为特克斯河早期冲积鹅卵石层，冰渍土。根据初探结果，其基本物理性质见表 1，10 m 以内强度变形参数见表 2。

表 1 土体物理参数平均值

Table 1 Average values of physical properties of loess

各组分含量/%			土粒相对密度 G_s	液限 W_L /%	塑限 W_p /%	分类
粗粒土 >0.075mm	粉粒 0.075～0.005 mm	黏粒 <0.005 mm				
6.2	71.2	22.6	2.72	30.1	16.6	CL

表 2 10 m 深度内土层的强度变形参数

Table 2 Strength and deformation properties of loess within a depth of 10 m

取样深度 / m	天然状态			饱和固结不排水剪(总应力)		压缩模量		湿陷起始压力 / kPa	自重湿陷系数
	湿密度 / (g/cm³)	含水率 /%	干密度 / (g/cm³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 /(°)	天然状态 / MPa	饱和状态 / MPa		
0.5～1.0	1.34	7.4	1.24	12.4	15.5	32.1	1.68	23	0.062 2
1.0～2.0	1.35	8.9	1.24	12.6	14.0	7.5	1.52	35	0.072 1
2.0～3.0	1.35	10.4	1.22	7.6	13.5	4.8	1.49	23	0.058 2
3.0～4.0	1.34	10.0	1.22			12.0	1.65	14	0.065 8
4.0～5.0	1.33	8.7	1.22	7.1	14.5	24.8	1.62	37	0.062 2
5.0～6.0	1.30	9.0	1.19			20.6	1.58	51	0.071 1
6.0～7.0	1.38	14.2	1.21			23.0	1.60	70	0.038 8
7.0～8.0	1.44	8.5	1.33	13.8	19.0	30.8	1.66	65	0.038 8
8.0～9.0	1.43	6.7	1.34			22.1	1.47	50	0.057 8
9.0～10.0	1.49	7.4	1.39	9.5	15.5	20.0	1.60	75	0.060 8

10 m 深度以内干密度介于 1.19～1.39 g/cm³，密度较小；含水率介于 6.7%～14.2%；地表下 10 m 范围内自重湿陷系数介于 0.038 8～0.072 1，属自重中、强湿陷性黄土。

3 浸水试验基本情况

3.1 场地开挖平整情况

试验场为 66 m×44 m 的矩形，场地最短边不小于湿陷性黄土层厚度，符合规范[4]要求。另外底部铺设砂砾石层 10 cm，作为缓冲材料，防止水流冲刷。为观测重塑土的浸水沉降过程，在场地中轴线构建了两个重塑土回填坑，直径为 1.0 m，深为 30 m，依靠土体自重人工均匀回填，未进行夯实，因大孔隙消失，回填后期增加少量黄土进行表面平整，使之与原状土地基表面持平。其中一个位于试验场的中心，即靓标 S4 处，另一个位于距离中心 20 m 处，平面布置见图 1。

3.2 监测内容、仪器与要求

监测内容包括表面沉降量和土体水分。试验场内布设了 7 个表面沉降观测点（S1～S7），采用水

准测量法观测变形。水分传感器（TDR-3 型）采用自制PVC套筒安装并下沉到一定深度，共计3个孔，编号为 M1、M2、M3，沿深度共埋设 21 个，传感器最深可达 30 m。

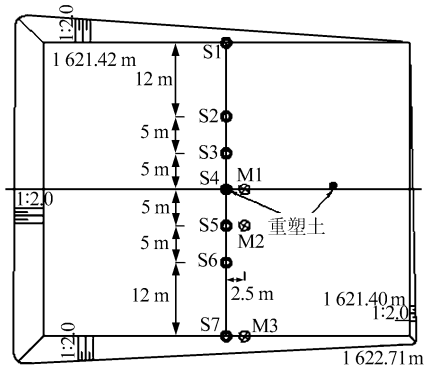


图 1　监测点的平面布置图
Fig.1　Layout of monitoring points

图 2 为现场浸水图片。浸水过程中每天观测 3 次沉降，以最后一次作为该日沉降量，停止浸水后，每天观测两次，最后一次作为该日沉降量。水分观测为实时自动数据采集，以当日平均值作为该日水分观测值。试验时间为 2013 年 8 至 9 月。



图 2　现场浸水照片
Fig.2　Photo of soaking on site

3.3　供水系统及耗水量

浸水期间耗水量大且要求不断水，为此专门修建了高位水池，设计供水规模为 105 m^3/h，并设置管道、止水阀和水表等设备。供水从 8 月 21 日开始到 9 月 4 日结束，历时 15 d，此后，因不均匀沉降，截止到 21 d，中心仍有 0.1～0.3 m 深的积水，总耗水量约为 11 500 m^3。

4　非饱和黄土入渗规律及其特征分析

4.1　入渗规律分析

水分传感器埋设于地下，工作环境复杂，通过监测发现，仅 M2 水分孔所测数据信号稳定，其不同深度的水分传感器实测曲线如图 3 所示。

由图 3 可知，随着浸水时间的持续，饱和度随浸水时间呈倒 S 型变化。对于 1.6 m 处的传感器，在 T = 2 d 时饱和度开始陡增，饱和度达到 68.7%，保持了 2 d 的缓增，T = 4 d 时增大至 83%，之后趋于平缓，并保持到 T = 21 d。4.0、6.4、8.8 m 埋深处传感器数据也具有同样的规律，21 d 内除 8.8 m 埋深处饱和度为 78.2%以外，其余饱和度均超过 85%。13.2 m 处的饱和度在 21 d 内未受影响。由此可见，历时 15 d 注水，21 d 的浸水，T = 21 d 时的湿润锋面可认为约在 8.8 m 处。

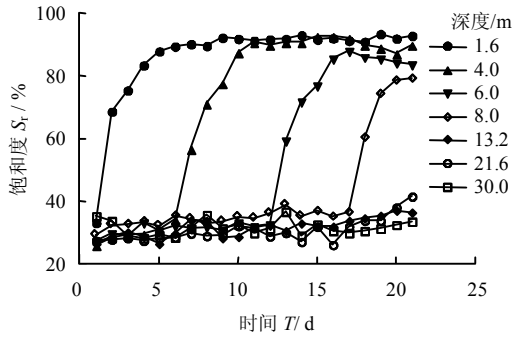


图 3　浸水过程中 M2 传感器实测饱和度
Fig.3　Degree of saturation measured by sensor M2 during soaking test

任一点的饱和度均经历了平缓段（天然初始饱和度）、陡增段、缓增段（暂态饱和区），最后到达平缓段（饱和）。非饱和土的入渗沿着入渗方向可以分为饱和区、暂态饱和区、传导非饱和区和天然非饱和区。当饱和度增大到 75%左右时，进入了暂态饱和区，土体饱和度增速平缓。80%即可认为饱和[16]，通过插值，可得不同深度处湿润锋面到达时刻及其推进速率，如表 3 所示。

表 3　湿润锋面变化情况
Table 3　Changes of wetting front

传感器深度 / m	湿润锋面到达时刻 / d	湿润锋面推进速率 / (m/d)
1.6	3.6	0.44
4.0	9.3	0.42
6.4	15.4	0.38
8.8	≥21.0	

如表 3 所示，湿润锋面推进速率随着入渗深度有减小趋势。这种趋势有两方面原因：①浸水过程中伴随着土体的显著沉降变形，并导致渗透系数的减小；②渗径增大，非饱和区厚度增大，侧渗增强，水力坡降减小。

4.2 暂态饱和区特征分析

非饱和土薄层积水入渗过程中，任一点的饱和度在经历较快增长后，会出现一个缓增时段，该时段可以定义为暂态饱和区[17]。该特征不仅在室内试验中可观测到[18−20]，同时在现场浸水试验中也较明显[13, 21]。

文献[21]认为，渗透力、基质吸力与收缩膜的力学平衡是暂态饱和区存在的机制，同时认为，渗透力是作用在收缩膜上的，这种认识与非饱和入渗过程中，水分主要通过湿桥运移的事实不符，同时渗透力是施加在土颗粒上的。笔者认为，干燥的非饱和土体入渗大概经历这样的过程，渗流初期，形成了大量的收缩膜，土中气体一部分被排出，另一部分被封闭在湿桥隔开的独立空间内，饱和度 S_r 随着入渗时间出现了短时间的缓慢发展，即进入暂态饱和区。水分继续沿着湿桥运移，湿桥逐渐变厚，封闭气体空间变小，气体被压缩，封闭气泡内孔隙气压力 u_a 持续增大。对于非饱和土入渗而言，属于增湿变形，但在封闭气泡处，发生着类似于增加气压迫使非饱和土脱水的过程。当收缩膜上承受的孔隙气压力与孔隙水压力之差(收缩膜上的基质吸力)大于进气值时（$(u_a-u_w)>(u_a-u_w)_d$），封闭气体突破收缩膜溢出到下层非饱和区。饱和度 S_r 再次迅速增大，暂态饱和区下移，这就是暂态饱和区的存在机制，如图 4 所示。

溢出一定量的气体后，部分封闭气体收缩膜上承受的孔隙气压力、孔隙水压力与收缩膜张力再次平衡，水分继续入渗，湿桥继续增厚，封闭气体再次被压缩，基质吸力再次大于进气值时，空气突破收缩膜而排出，如此循环反复，直到下部土体水流阻力减小，湿桥不再变厚为止，留下很多死孔隙，孔隙气压力不再增大。

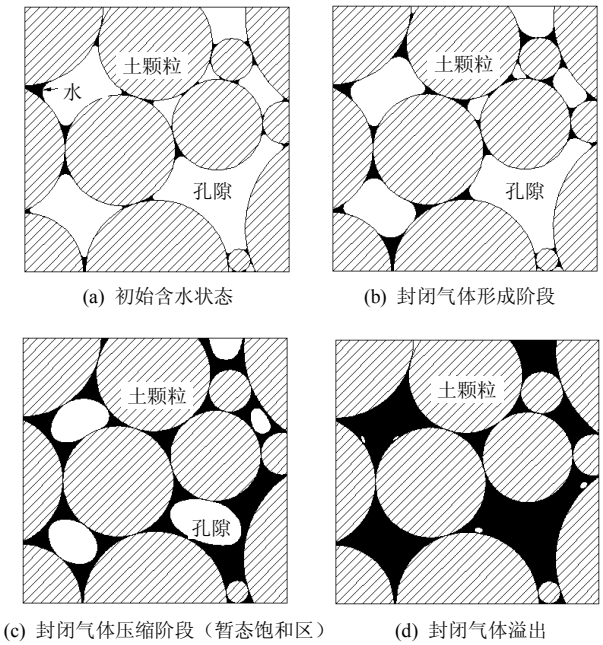


图 4 水分运移与暂态饱和区示意图

Fig.4 Diagrams of water transport and transient saturated zone

5 浸水过程中沉降特征分析

5.1 表面变化特征

供水管的出口位于场地中心，浸水过程中，自由水面由中心向四周不断扩展。根据中轴线上 7 个表面沉降觇标获得的断面沉降时程线如图 5 所示，横轴所在位置为原始地面。

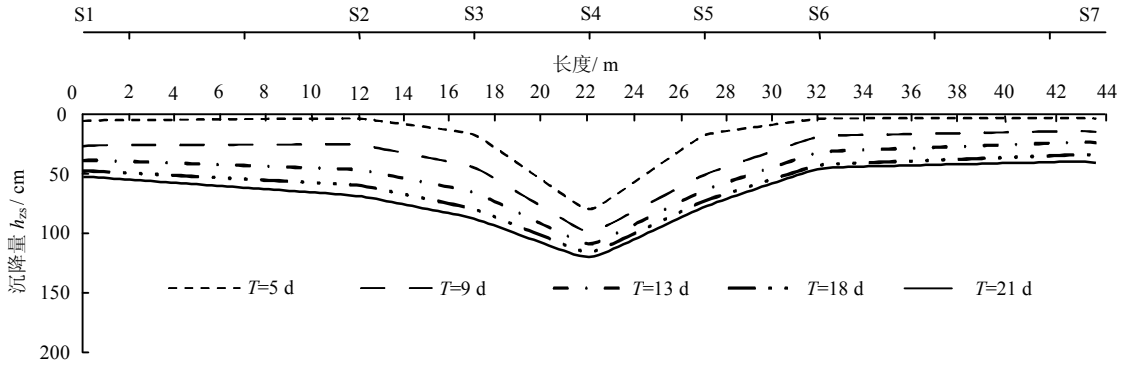


图 5 中轴线剖面的沉降时程图

Fig.5 Time-settlement curves on cross-section in central axis

浸水过程中，重塑土区域的沉降量和沉降速率明显大于原状土，形成两个自由水面较高的低洼，进一步加剧不均匀沉降。中轴线东侧形成了一条长约 20 m 的主裂缝，中间有分叉，裂缝宽度介于 0.04～0.20 m，中轴线西侧未形成主裂缝，有少量短裂缝，中心低洼西侧形成一系列错台，错台高度不超过 10 cm，且均出现在停水以后，如图 6、7 所示。



图 6　不均匀沉降产生的裂缝
Fig.6　Cracks generated by uneven settlements

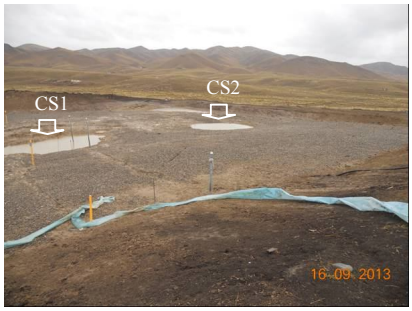


图 7　重塑土产生的低洼
Fig.7　Ponded water on remolded site

5.2　表面沉降规律

沉降观测点布置在中轴线上，用来获取一个中心断面的沉降变形，布置如图 1 所示。其中觇标 S4 位于重塑土之上，浸水初期沉降速率大，形成低洼，觇标 S3、S5 距离低洼较近，这 3 个点在$T=21$ d 时仍有 0.1～0.3 m 的自由水面；觇标 S1、S2、S6、S7 距离重塑土较远，浸水时间小于 21 d。不同觇标代表土体结构、浸水时间、入渗形式不同的地基，其沉降规律有所差异。

觇标 S3、S5 位于原状土地基上，距离低洼较近，垂直入渗和侧渗同时存在，另外重塑土与原状土的边界可能形成水流通道，加速重塑土及周边土体的湿陷变形。图 8 为低洼附近原状土沉降时程线。$T=0$～3 d 时沉降量很小，$T=4$ d 时开始出现了陡降，陡降持续了 2 d，$T=6$ d 时又趋于平缓，$T=11$ d 时再次出现了陡降，持续了 1 d。图 9 反映了沉降率V_s的变化趋势。浸水沉降过程具有明显的阶段性，即平缓段与陡降段交替出现，这与黄土不同地层的压缩性有关。

觇标 S1、S2、S6、S7 距离重塑土低洼较远，可反映垂直浸水入渗时原状土的沉降变形，如图 10 所示。与觇标 S3、S5 沉降规律相似，即出现缓降段与陡降段的交替，该特征在图 11 中比较明显。不同的是，水分以垂直入渗为主，初期平缓段保持了 5 d，在$T=6$ d 才出现陡降，$T=11$ d 又出现陡降后再次趋缓。由此可见，在$T=11$ d，原状土区

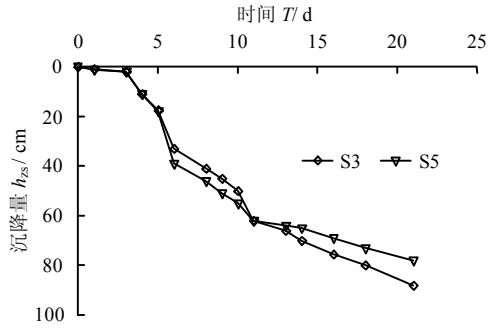


图 8　低洼附近原状土沉降时程线
Fig.8　Time-settlement curves of undisturbed soil nearby low-lying land

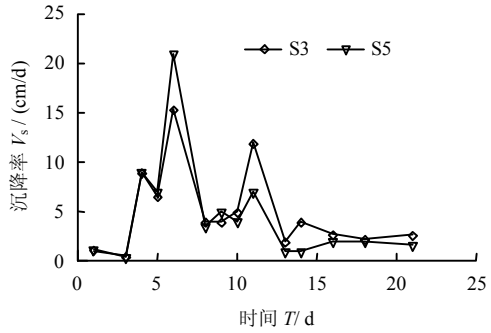


图 9　低洼附近原状土沉降率时程线
Fig.9　Time-settlement rate curves of undisturbed soil nearby low-lying land

域所有觇标湿润锋面深度接近，说明随着湿润锋深度的增加，侧渗与垂直入渗强度受土体基质势影响较大，土体湿润锋面深度趋同。

觇标 S4 代表重塑土地基的浸水沉降变形过程，如图 12 所示，其水分入渗形式同样包括重塑土的垂直入渗与边界入渗。其沉降量在$T=0$～3 d 基本线性降低，之后逐渐趋缓，这个区域形成低洼，在$T=21$ d 仍持续浸水，沉降率如图 13 所示，其值由大变小，逐渐趋于 0。随着湿润锋面的推进，重塑土在上覆饱和自重作用下变形较大，虽然连续，但阶段性不明显，在$T=21$ d 最大沉降量为 120 cm，远大于原状土，但其变形仍可能受到原状土边界的一定约束。与原状土相比，重塑土颗粒联结破坏、排列形式变化，大孔隙数量减少，结构势基本消失，层状结构消失，属于正常固结的欠压密土，浸水时，水分以水膜楔入的方式进入粒间，粒间摩擦力降低。而原状黄土属于具有大孔隙，且表现出超固结性的欠压密土，其粒间联结强，层状结构稳定。

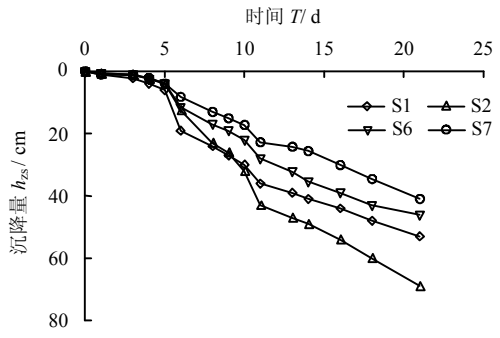


图 10 原状土的沉降时程线

Fig.10 Time-settlement curves of undisturbed soil

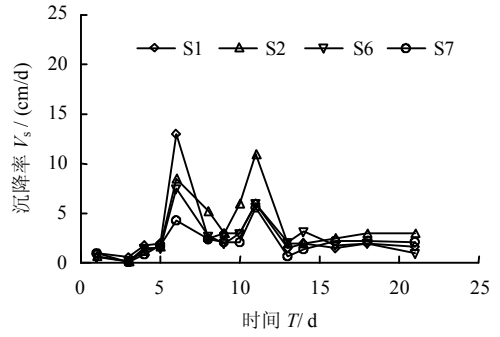


图 11 原状土的沉降率时程线

Fig.11 Time-settlement rate curves of undisturbed soil

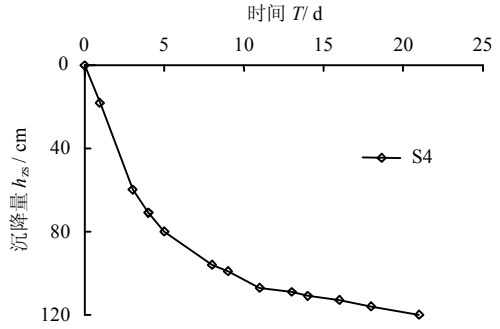


图 12 重塑土浸水沉降时程线

Fig.12 Time-settlement curve of remolded soil

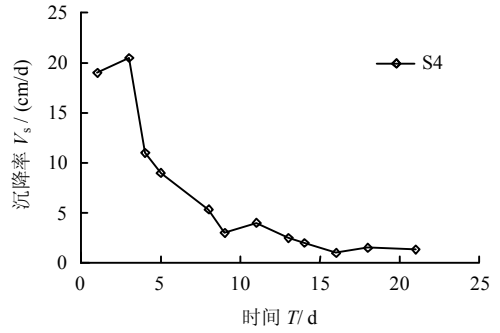


图 13 重塑土沉降率时程线

Fig.13 Time-settlement rate curve of remolded soil

现将上述沉降过程线进行拟合，如表 4 所示。重塑土浸水沉降时程线可采用对数函数进行描述，即

$$h_{zs} = m\ln T - n \tag{1}$$

原状土浸水沉降时程线可采用分段函数进行描述，即

$$\left.\begin{aligned} h_{zs} &= cT + d,\ T \leqslant t_0 \\ h_{zs} &= m\ln T - n,\ T > t_0 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：c、d、m、n 为与黄土性质有关的参数；T 为入渗时间（d）；h_{zs} 为自重沉降量（cm）；t_0 为湿润锋面推进到某层土时，该层土的湿陷起始压力不大于上覆压力（土体饱和自重与静水压力之和）的时刻，取决于湿润锋面的推进速率以及湿润锋面处土层的湿陷起始压力。

表 4 沉降时程拟合曲线

Table 4 Fitting formulae of time-settlement curves

场地类型	觇标	拟合函数
重塑土	S4	$h_{zs} = 33.14\ln T + 23.58$
靠近重塑土的原状土	S3	$h_{zs} = 0.628T + 0.228$ ($T \leqslant 4$ d), $h_{zs} = 44.93\ln T - 49.72$ ($T > 4$ d)
	S5	$h_{zs} = 0.642T + 0.142$ ($T \leqslant 4$ d), $h_{zs} = 39.58\ln T - 38.46$ ($T > 4$ d)
原状土	S1	$h_{zs} = 1.12T - 0.274$ ($T \leqslant 6$ d), $h_{zs} = 30.36\ln T - 39.21$ ($T > 6$ d)
	S2	$h_{zs} = 0.705T - 0.215$ ($T \leqslant 6$ d), $h_{zs} = 45.53\ln T - 70.84$ ($T > 6$ d)
	S6	$h_{zs} = 0.729T - 0.275$ ($T \leqslant 6$ d), $h_{zs} = 29.78\ln T - 44.17$ ($T > 6$ d)
	S7	$h_{zs} = 0.65T - 0.05$ ($T \leqslant 6$ d), $h_{zs} = 25.81\ln T - 40.53$ ($T > 6$ d)

M2 与觇标 S5 距离最近，两者相距 2.5 m，其基本可以反映 S5 浸水沉降变形过程中的水分变化与湿润锋面的实时位置。1.6 m 以内湿润锋面的推进速率为 0.44 m/d（见 4.1 节分析），$T = 4$ d 时达到 1.76 m 处，0.5～2.0 m 埋深处的平均干密度为 1.24 g/cm^3（见表 2），饱和重度为 18.08 kN/m^3，1.76 m 以上的饱和自重压力为 31.28 kPa，0.3 m 静水压力为 2.94 kPa，上覆荷载为 34.22 kPa，而 1.5～2.0 m 范围内土样的实测湿陷起始压力为 35 kPa（见表 2），两者基本相当。

6 自重沉降量与自重湿陷量的讨论

浸水过程中的自重湿陷量是湿陷性黄土层全部达到饱和时的最终稳定沉降量。对于非充分浸水试验，其最终稳定的变形包括湿润锋面以上的自重湿陷量和湿润锋面以下的增湿变形量两部分，要达

到稳定均需要较长时间，其中增湿变形稳定需要更长时间。而浸水过程中实时监测的表面瞬态变形量可称为自重沉降量。鉴于存在应力集中，浸水过程中，湿润锋面以上附近的饱和土体变形未稳定的情况下，其下相邻非饱和土的增湿变形可忽略，因此，浸水过程中增湿变形可以忽略。当停水以后，湿润锋面的推进速率降低，甚至停滞，饱和区的自重水在重力势的驱动下向锋面以下继续入渗，但难以达到饱和，此时，湿润锋面以下非饱和区即发生着增湿变形。现以觇标 S5 的沉降过程进行讨论。

S5 在 $T=21$ d 时自重沉降量为 78 cm，最后 5 d 的平均沉降为 1.8 cm/d，远大于规范[4]给定的 1 mm/d，因此，土体沉降变形尚未完成。S5 在 $T=21$ d 的沉降值属于湿润锋面以上尚未完成的自重沉降量，小于湿润锋面以上土体的自重湿陷量，湿润锋面以下非饱和区也没有发生增湿变形。

本文通过现场勘探，在 30 m 深度内每米取一个试样进行室内压缩试验。自重湿陷系数 δ_{zs} 按照规范[4]给出的公式（4.3.4-2）计算，10 m 埋深内自重湿陷系数 δ_{zs} 沿深度的大小见表 2。场地自重湿陷量的计算按下式进行：

$$\Delta_{zs}=\beta_0\Delta_h=\sum_{i=1}^{n}\delta_{zsi}h_i \tag{3}$$

式中：Δ_{zs} 为场地自重湿陷量的计算值；δ_{zsi} 为第 i 层的自重湿陷系数；h_i 为第 i 层土层的厚度；Δ_h 为分层总和法计算的变形量；β_0 为因地区、土质、侧限等因素差异的修正系数，现行规范[4]未对新疆伊犁黄土给出参考值。

在本试验场以东 40 m 处另设一个圆形试验场，圆形试验场布设了注水孔，水分观测表明，整个黄土层（30 m 厚）全部饱和，自重湿陷量为 3.529 m，与室内自重湿陷量计算值比较可知，该场地黄土的修正系数 $\beta_0=1.64$。

觇标 S5 的自重沉降量为 78 cm，湿润锋面 8.8 m 以上充分饱和并且变形稳定后的自重湿陷量依据室内压缩试验结果，采用分层总和法计算的变形量 $\Delta_h=0.52$ m，依据式（3）可得，修正后场地的自重湿陷量 $\Delta_{zs}=0.85$ m，该值比实测自重沉降量大 7 cm，由此也证实了湿润锋面以上土体尚未完全沉降稳定。

7　结　论

（1）非饱和黄土入渗过程中，任一点的饱和度随时间的变化过程呈倒 S 型，即经历了天然饱和度–陡增段–缓增段–平缓段。缓增段为暂态饱和区，其存在机制是：大孔隙中气体被湿桥封闭，水分沿着湿桥运移，湿桥变厚，气体被压缩，孔隙气压力 u_a 增大，当收缩膜处的基质吸力大于进气值时，封闭气体突破收缩膜溢出，土体饱和，暂态饱和区下移。

（2）原状土浸水过程中的沉降特征表现为平缓段–陡降段–缓降段，沉降变形的阶段性明显；可用分段函数描述，分段参数 t_0 为湿润锋面推进到某层土时，该层土的湿陷起始压力不大于上覆压力的时刻。重塑黄土因结构性破坏，表现为持续缓降，阶段性不明显，沉降变形大于原状土。

（3）水分观测表明，$T=21$ d 时，湿润锋面到达 8.8 m，觇标 S5 的自重沉降量为 78 cm。鉴于存在应力集中，浸水过程中，湿润锋面以上附近的饱和土变形未稳定的情况下，其下相邻非饱和土的增湿变形可以忽略。因此，觇标 S5 在 $T=21$ d 时的沉降量属于湿润锋面以上尚未完成的自重沉降量，小于修正所得的自重湿陷量 85 cm。本文的研究结果对认识伊犁黄土浸水变形机制并为其黄土地基的增湿变形计算奠定了基础。

参 考 文 献

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.

[2] 苗天德, 刘忠玉, 任久生. 湿陷性黄土的变形机制与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 383－387.
MIAO Tian-de, LIU Zhong-yu, REN Jiu-sheng. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsed loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(4): 383－387.

[3] 沈珠江, 胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2003, 25(7): 1－6.
SHEN Zhu-jiang, HU Zai-qiang. Duality medium model of loess[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, 25(7): 1－6.

[4] 中华人民共和国建设部. GB50025–2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50025-2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.

[5] 罗爱忠, 邵生俊, 陈昌禄, 等. 黄土的湿载结构性本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2209－2215.
LUO Ai-zhong, SHAO Sheng-jun, CHEN Chang-lu, et al.

A structural constitutive model for loess under the wetting condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(8): 2209－2215.

[6] 黄雪峰, 孔洋, 李旭东, 等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 37－44.
HUANG Xue-feng, KONG Yang, LI Xu-dong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.2): 37－44.

[7] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 基于割线模量法的黄土增湿变形本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 609－617.
ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Study on constitutive relation of loess moistening deformation based on secant-modulus method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 609－617.

[8] 邢义川, 李京爽, 李振. 湿陷性黄土与膨胀土的分级增湿变形特性试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 546－551.
XING Yi-chuan, LI Jing-shuang, LI Zhen. Deformation characteristics of collapsible loess and expansive soil under the condition of wetted in stages[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(5): 546－551.

[9] 倪万魁, 颜斌, 刘海松. 公路路基黄土湿陷性评价问题[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 513－520.
NI Wan-kui, YAN Bin, LIU Hai-song. Evaluation of collapsible loess subgrade along expressway[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(4): 513－520.

[10] WANG Xue-lang, ZHU Yan-peng. Theoretical analysis on compacting effect of lime compaction piles[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 94－96(2): 745－749.

[11] 黄雪峰, 杨校辉. 湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 222－228.
HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui. A study progress on in-situ soaking test on collapsible loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(2): 222－228.

[12] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 965－978.
SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(6): 965－978.

[13] 刘保健, 谢永利, 于友成. 黄土非饱和入渗规律原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4156－4160.
LIU Bao-jian, XIE Yong-li, YU You-cheng. In-situ testing study on infiltration in unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(24): 4156－4160.

[14] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 382－388.
HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 382－388.

[15] 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 537－546.
MA Yan, WANG Jia-ding, PENG Shu-jun, et al. Immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(3): 537－546.

[16] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 35－36.
FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Translated by CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-jiong, et al. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997: 35－36.

[17] DAVID J B, PETER S. Fundamental of physical geography[M]. [S. l.]: Rowman and Littlefield, 1986: 288－289.

[18] LUO Y, WANG T H, LIU X J. Study on seepage character of loess vertical joint[J]. **Disaster Advances**, 2013, 6(12): 154－160.

[19] BEMADINER M G. A capillary microstructure of the wetting front[J]. **Transport in Porous Media**, 1998, 30: 251－265.

[20] WANG Z, FEYEN J, NIELSEN D R, et al. Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects[J]. **Water Resources Research**, 1997, 33: 2759－2767.

[21] 李佳, 高广运, 黄雪峰. 非饱和原状黄土边坡浸水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1043－1048.
LI Jia, GAO Guang-yun, HUANG Xue-feng. Experimental research on immersion for unsaturated intact loess slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 1043－1048.