

Q_2 黄土大面积浸水试验研究

李大展 何颐华

隋国秀

(中国建筑科学研究院地基所, 北京, 100013) (西北电力设计院, 西安, 710000)

提 要

本文根据原位测试资料和大面积试坑(直径40m)浸水试验的实测数据,对黄土与古土壤交互层地基的自重湿陷量计算值与实测值作出比较。探讨了自重湿陷的时间历程,湿陷量沿深度的变化规律以及湿陷的影响范围。通过试验与分析,最后对该类地基土湿陷性作出了评价。

一、前 言

随着黄土地区经济建设的发展,黄土的湿陷性评价是工程建设中首先要解决的问题。世界各国结合本国国情对于黄土地基湿陷性、地基处理方法都各有侧重。据报道^[1],就规范、标准而言,目前已颁布有专门的湿陷性黄土地区建筑规范的国家为数不多,其中有中国、前苏联和罗马尼亚等。美国、新西兰等国的一些学者对黄土湿陷评价提出了一些个人看法,还未成为正式国家标准。我国黄土分布较广,长期工程实践累积了大量经验。自五、六十年代开始,我国就在不同地区进行多起试坑浸水试验,获得了宝贵的实测资料^[2,3]。但大多是在 Q_3 黄土中进行的。

1990年初为合理解决某电厂工程桩基础设计问题^[4](桩基试验成果拟另文报道——笔者),并为施工工艺提供依据,西北电力设计院委托中国建筑科学研究院承担某湿陷性黄土地区大直径钻孔扩底桩的大面积浸水试验任务。本次试验坑浸水试验具有下列特点:

1. 地基土属于厚层黄土(厚60m),地层为黄土与古土壤成层交互分布,且地表6m以下为离石黄土(Q_2),而对于离石黄土的浸水试验国内尚属首次;

2. 试验规模较大,试坑直径达40m,总注水量近80000m³。在缺水的黄土高原,无论就注水量,还是就试坑面积而言,都是国内外罕见的。

基于上述,可见本次试验不仅对论证该黄土地区某工程方案的可行性和提供设计依据有现实意义,而且会对深化湿陷性黄土地基的认识作出有益探索。

二、试验概况

(一)工程地质条件

试验场地位于陕西渭北黄土原上,地形开阔平坦,无不良地质现象,地面海拔标高约495m。地基土为黄土与古土壤成层交互分布,上部6m为马兰黄土(Q_3),下部为离石黄土(Q_2),

总厚度60m, 属大厚度黄土地基, 各层地基土岩性特征如表1所示。根据勘察报告, 按室内压缩试验累计的计算自重湿陷量评定, 场地为Ⅱ级自重湿陷性黄土。其特点为自重湿陷主要发生在地表下14~32m的 L_3, L_4, L_5 黄土层内。地下水稳定水位为-62.8m, 地基土物理力学性质指标与湿陷性指标见表2所示。

表1 各层地基土岩性特征

地层时代	层号	岩性	深度(m)	层厚(m)	主要岩性特征
Q ₃	L ₁	黄土	5.2	5.2	褐黄色, 稍湿, 硬塑, 土质均匀, 孔隙发育, 可见虫孔和蜗牛壳。
	F ₁	古土壤	6.4	1.2	红褐色, 稍湿, 硬塑, 坚硬, 具碎块结构, 土质均疏松, 孔隙发育中等, 多量钙质结核。
Q ₂	L ₂	黄土	10.4	4.0	褐黄色, 稍湿, 硬塑, 结构不均匀, 含钙质结核, 偶见蜗牛壳, 孔隙发育。
	F ₂	古土壤	13.8	3.4	棕红~褐红色, 稍湿~湿, 硬塑, 土质不甚均匀, 大孔隙较少, 中下部含多量钙质结核。
	L ₃	黄土	19.9	6.1	褐黄色, 稍湿, 硬塑, 土质结构不均匀, 孔隙较发育, 层底钙质结核含量较高。
	F ₃	古土壤	21.4	1.5	红褐色, 稍湿, 硬塑, 土质较均匀、密实, 孔隙不甚发育, 下部可见多量钙质结核。
	L ₄	黄土	26.5	5.1	浅黄色, 稍湿, 硬塑, 土质较均匀, 孔隙发育中等。
	F ₄	古土壤	27.4	0.9	红褐色, 稍湿, 硬塑, 土质较均匀, 大孔隙不甚发育, 下部可见少量钙质结核。
	L ₅	黄土	33.3	5.9	黄褐色, 稍湿, 硬塑, 土质均匀密实, 大孔隙少见, 局部见钙质结核。
	F ₅	古土壤	35.2	1.9	褐红色, 稍湿, 硬塑, 土质不均匀, 呈碎块结构, 大孔隙不发育, 含多量钙质结核。
	L ₆	黄土	39.0	3.8	褐黄色, 稍湿, 硬塑, 土质较均匀密实, 孔隙不发育。
	L ₇	黄土	>41.0	>2.0	红褐色, 稍湿, 硬塑~坚硬, 土质均匀密实, 偶见少量钙质结核。

注: 深度和层厚均为平均值。

表2 土层物理力学性指标

层号	天然含水量 ω (%)	天然容重 γ (kN/m ³)	干容重 γ_d (kN/m ³)	天然孔隙比 e	液限 ω_L (%)	液性指数 I_L	饱和度 S_r (%)	粘粒含量 (%)	垂直渗透系数 k_v (cm/s)	水平渗透系数 k_h (cm/s)	直剪粘聚力 c (kPa)	直剪内摩擦角 φ (°)	压缩系数 (kPa ⁻¹)	压缩模量 (kPa)	自重湿陷系数 δ_{zs}	湿陷系数 δ_s	湿陷起始压力 p_{sh} (kPa)
L ₁	16.0	14.3	12.4	1.19	28	0	36	17	7×10^{-5}	7×10^{-5}	15	24	8.0	3×10^3	0.017	0.085	70
F ₁	16.0	17.5	15.0	0.80	30	0	54	23	9×10^{-5}	5×10^{-5}	40	25	1.0	2×10^4	0.004	0.025	250
L ₂	17.0	17.0	14.6	0.86	31	0	53	16	3×10^{-5}	4×10^{-5}	40	18	1.0	2.5×10^4	0.006	0.040	200
F ₂	17.0	17.6	15.0	0.80	32	0	58	32	5×10^{-5}	4×10^{-5}	50	24	1.0	2×10^4	0.015	0.025	300
L ₃	16.0	16.5	14.3	0.90	29	0	48	18	5×10^{-5}	4×10^{-5}	40	25	3.0	1×10^4	0.030	0.040	250
F ₃	16.0	17.5	15.0	0.80	30	0	54	22	1×10^{-5}	6×10^{-6}	70	25	0.9	2.5×10^4	0.015	0.020	400
L ₄	16.0	16.8	14.0	0.93	28	0	47	14	1×10^{-5}	1×10^{-5}	40	20	2.5	1.2×10^4	0.020	0.030	400
F ₄	16.0	18.0	15.5	0.75	28	0	58	24	1×10^{-5}	5×10^{-6}	70	25	0.2	2×10^4	0.015	0.015	450
L ₅	17.0	17.2	14.7	0.84	28	0	55	17	1×10^{-5}	6×10^{-6}	50	25	1.5	1.5×10^4	0.020	0.023	500
F ₅	17.0	18.5	15.8	0.72	29	0	64	22	3×10^{-6}	2×10^{-6}	75	24	0.5	4.5×10^4	0.015	0.015	600
L ₆	17.0	18.5	15.8	0.72	28	0	64	19	5×10^{-6}	3×10^{-6}	50	30	0.6	4×10^4	0.007	0.008	850
L ₇	14.0	19.0	16.3	0.66	28	0	70	22	5×10^{-6}	5×10^{-7}	80	30	0.2	8×10^4	0.008	0.004	950

(二) 试坑设计

为使浸水试验具有代表性, 把试坑布置在整个场区中湿陷系数偏高、压缩性偏低的地段, 计算自重湿陷量平均值为 49.8cm。为使自重湿陷充分发生, 根据《湿陷性黄土地区建筑规范 GBJ25-90》(以下简称《黄土规范》) 规定, 按预计的湿陷下限值, 试坑直径定为 40m, 坑深 1m, 坑底铺 30cm 厚小卵石。为加快坑内地基土浸水饱和, 坑内布置 $\phi 157\text{mm}$, 深 32~40m, 间距为 3m 的注水孔共 140 个。桩长 40m 的桩, 其桩周最近两圈注水孔距 40m, 计 28 个; 其余孔深 32m, 计 112 个(图 1)。注水孔内充填卵石, 粒径 2~8cm, 含泥量小于 1%。

为了测量浸水后地基土表面及其下分层湿陷变形, 需在坑内外埋设标点, 然后用水准仪定期观测各标点的下沉量。在试坑内埋设浅标点 25 个(图 1), 用来测定场地的最大自重湿陷量; 在坑底地面下不同深度处埋设机械式深标点 6 个和磁性分层深标点 9 个, 用来测定自重湿陷量沿深度的分布情况; 试坑外地表埋设地面标点 27 个, 用以测定浸水后的浸润边界。

为测量浸水后地基土的水平变形, 埋设测斜孔 2 个。此外在试坑东南和西北方向, 距坑中心 80m 处分别设置水准基点各 1 个。在浸水后对其进行了复核, 其高程未变。

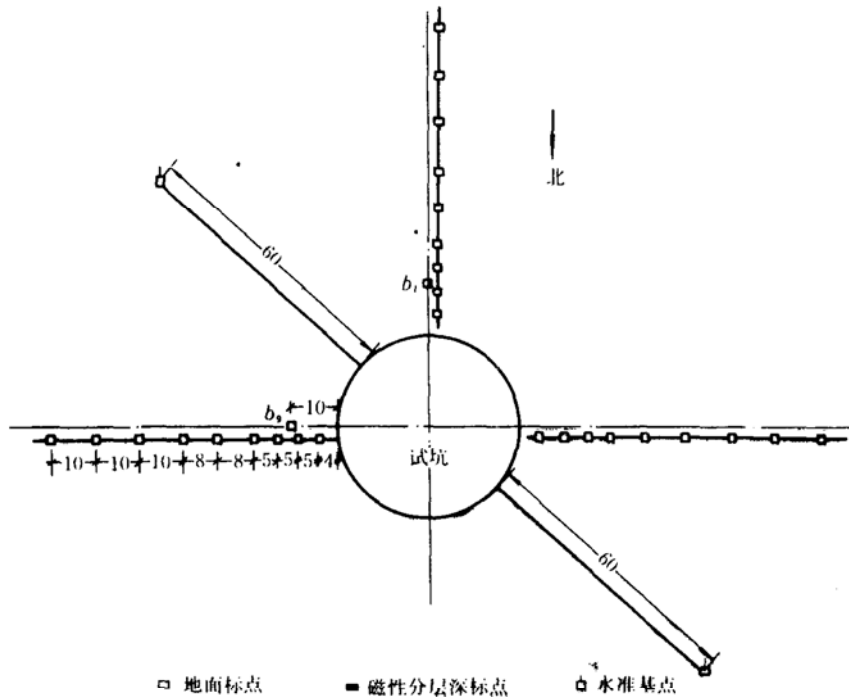


图 1 (a) 总平面设计示意图(坑外)
(长度单位: m)

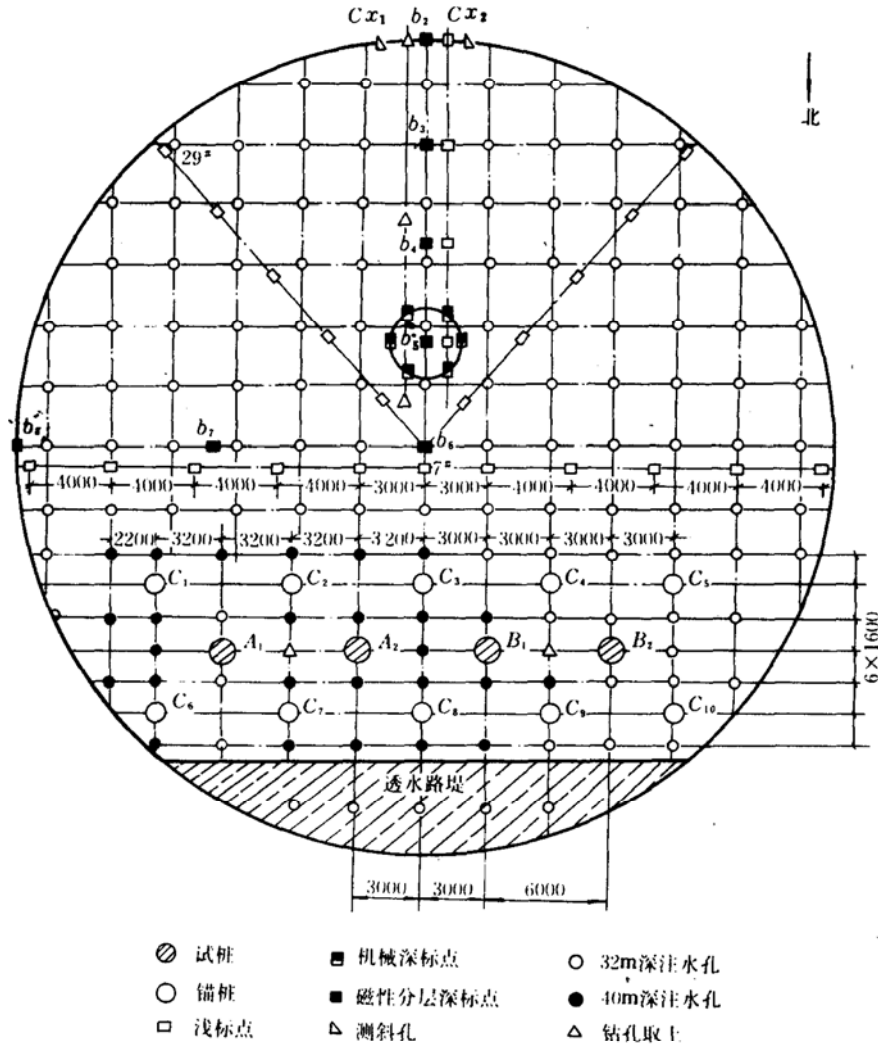


图 1 (b) 总平面设计示意图(坑内)

(长度单位: mm)

三、自重湿陷的时间历程与湿陷中心

(一) 浸水过程与水量

试坑于1990年11月15日开始放水, 至12月3日共注水8112m³, 平均每昼夜注水428m³。自12月4日开始加大水量, 平均每昼夜注水3416m³, 至12月23日又减少水量, 12月25日停水, 总计注水量为79860m³(图2)。

根据钻孔取样试验结果, 12月29日前地表下40m内地层均达到饱和状态, 饱和度平均大于90%。沉降观测时间为1990年11月15日至1991年1月29日, 土层沉降量已达到《黄土规范》规定的稳定标准, 即最后5天的平均湿陷量小于1mm。

(二) 湿陷中心的测定

观测结果表明, 试坑浸水期间, 坑内浅标点在加大水量后(12月5日)稍有上升现象, 停止浸水后地面普遍开始沉降(图2~4)。经初步分析, 可能是由于本次试验在试坑内设置了注水孔, 浸水时地层中有自由水位, 即产生浮力(自重应力降低), 相当于地基土“卸荷回弹”效

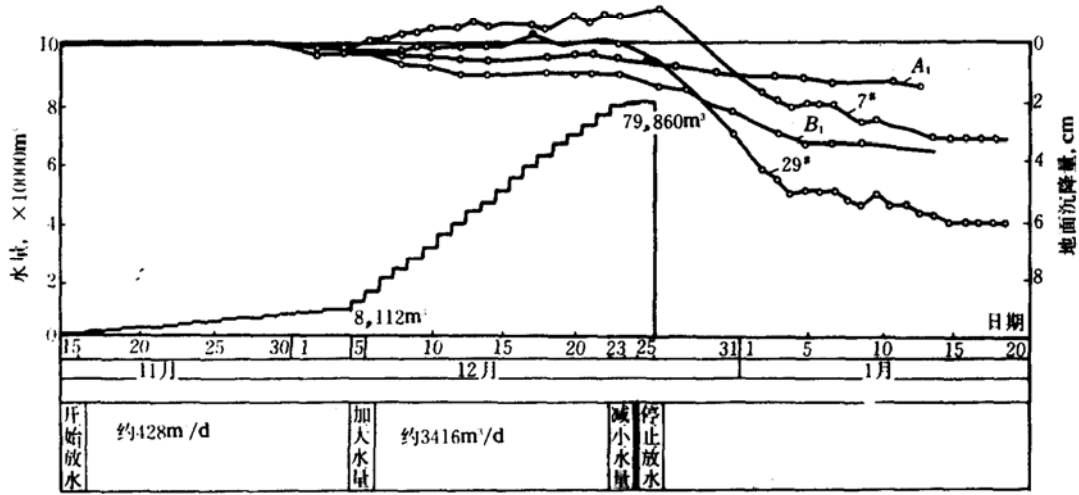


图 2 地面沉降、桩沉降与浸水时间的关系

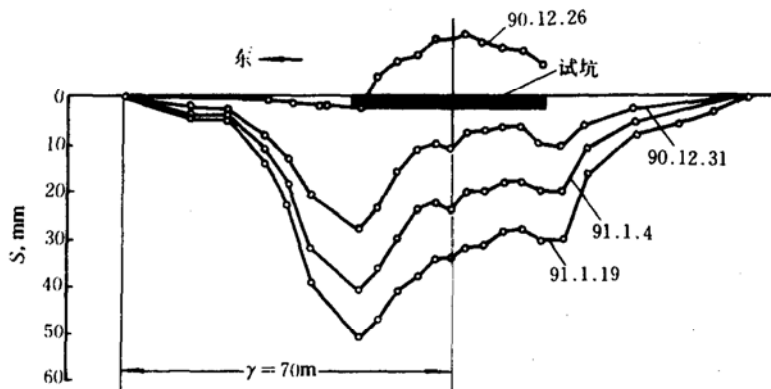


图 3 试坑横断面的湿陷进程(东西向)

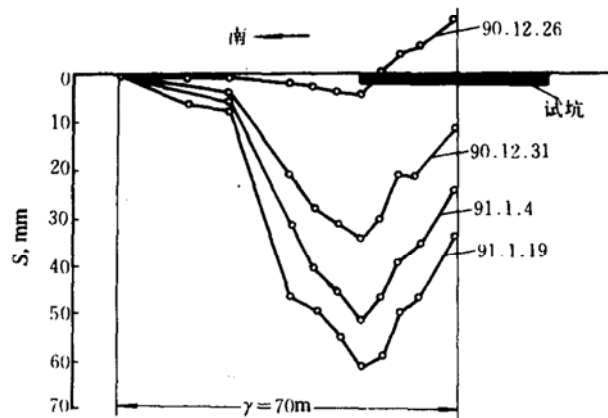


图 4 试坑横断面的湿陷进程(南北向)

应。停止浸水后，地层中的自由水位逐渐降低，土的自重应力逐渐增大，最终大于天然土的

自重应力，即产生压缩变形量。由图2~4可见，实测的地面沉降量主要由停水后土层排水固结产生的，从而说明本场地黄土的自重湿陷性很弱。因此严格地说，本文所述的浸水后的湿陷量与一般黄土浸水发生的自重湿陷量在机理上是有所区别的。这再次显示了本场地黄土的特殊性。

根据1991年1月19日沉降量观测结果绘制的地表湿陷等值线图(图5)，坑内湿陷量为28~63mm。其变化趋势是，从西北至东南方向湿陷量逐渐增大。湿陷中心向东南方向偏移至29#试标点，湿陷量63mm。这可能是由于试坑北部14根大直径桩的侧阻力对土层沉降仍有一定约束作用。此外试坑内地面标高西北高，东南低，使东南部分水量积聚较多也是原因之一。

如上所述，本场地黄土湿陷量是在停水后出现的，而并非像一般自重湿陷性黄土在浸水后1~5天后即开始产生自重湿陷。以湿陷中心(试标点29#)为例，最大湿陷速率出现在停水后第8天(1月2日)，约11mm/d，其后沉降速率迅速减小，至1月14日已基本稳定(图6)。

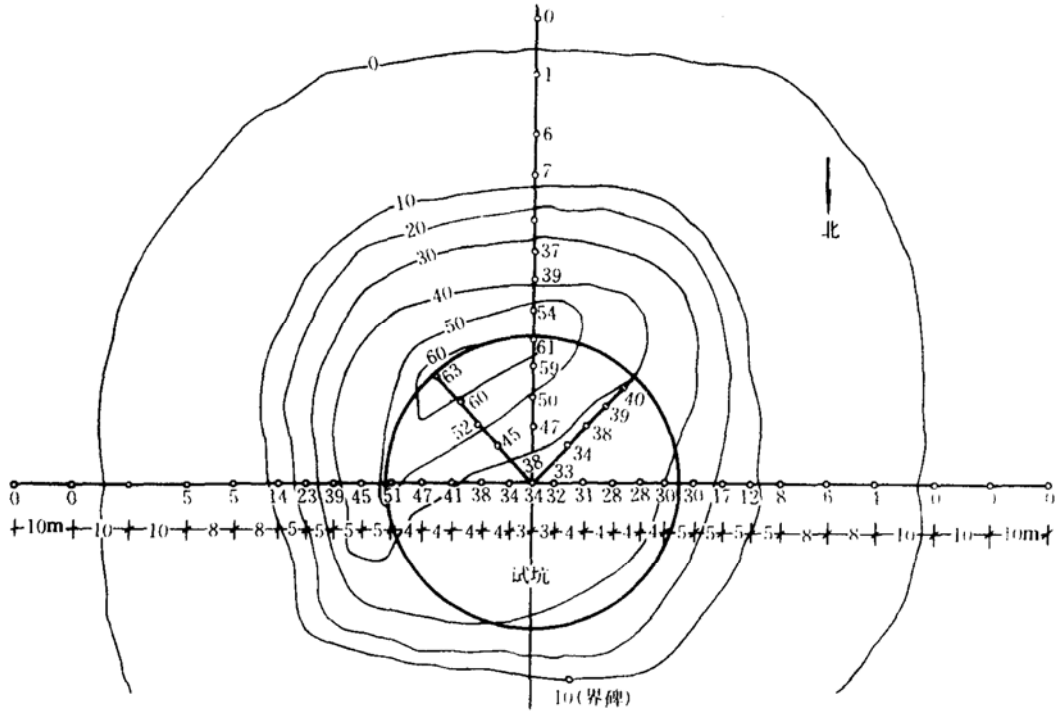


图5 地表湿陷等值线图(湿陷量单位: mm)

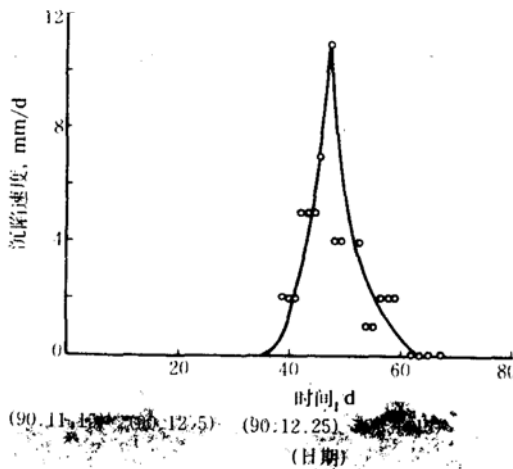


图6 湿陷速度随时间变化

四、湿陷的下限深度及其影响范围

(一) 湿陷下限深度及其沿深度的分布

在现场由 c_3 和 c_6 桩孔取土测得的地基土分层湿陷系数如表3所示。根据《黄土规范》规定,当湿陷系数 δ_s 小于0.015时, 应定为非湿陷性黄土。因此确定湿陷下限深度为35m, 相应地层标高约为459m。

表3 分层湿陷系数

取土深度 (m)	湿陷系数 δ_s		取土深度 (m)	湿陷系数 δ_s		取土深度 (m)	湿陷系数 δ_s		取土深度 (m)	湿陷系数 δ_s	
	c_3	c_6		c_3	c_6		c_3	c_6		c_3	c_6
1	0.107	—	11	0.003	0.116	21	0.050	0.014	31	0.013	0.018
2	0.111	0.075	12	0.043	0.055	22	0.055	0.042	32	0.007	0.038
3	0.104	0.046	13	0.066	0.040	23	0.058	0.048	33	0.008	0.011
4	0.100	0.186	14	0.051	0.057	24	0.038	0.039	34	0.046	0.031
5	0.003	0.113	15	0.080	0.097	25	0.041	0.038	35	0.003	0.001
6	0.098	0.047	16	0.059	0.061	26	0.025	0.037	36	0.002	0.011
7	0.054	0.003	17	0.063	0.032	27	0.043	0.033	37	0.001	—
8	0.009	0.132	18	0.044	0.046	28	0.033	0.045	38	0.004	0.002
9	0.072	0.025	19	0.032	0.047	29	0.022	0.054	39	0.012	0.002
10	0.047	0.026	20	0.004	0.048	30	0.028	0.069	40	0.004	0.001

根据机械式深标实测的湿陷量沿深度变化和根据磁性深标实测的沉降相对稳定时土层中的等湿陷线分别如图7、图8和图9所示。可见两种方法的测量结果大致吻合, 湿陷量主要由地表下15~25m的 L_3 和 L_4 的 Q_2 黄土产生。在地表下30~35m, 已无湿陷量发生, 这和表3所得结果基本相同。

(二) 湿陷的影响范围

浸水后水平方向湿陷影响范围可由地表湿陷等值线图(图5)求出, 浸润边界约在试坑边缘外45~50m。

另根据现场物探的电阻率法及电磁感应法测试结果, 试坑浸水后的浸润边界沿试坑及周围大致呈园台分布, 试坑外影响边界约40~50m, 浸润边界的侧向渗透扩散角约40°。

湿陷的影响范围(浸润半径)也可用下式计算^[5]:

$$r = H(0.5 + m_s \operatorname{tg} \beta) \quad (1)$$

式中 r 为湿陷后的浸润半径; H 为湿陷土层的厚度; m_s 为由于各分层和夹层的透水能力不同, 使水向侧面传播的增加系数, 其变化范围为1~2; β 为由浸水场地向侧面浸水的扩散角, 对于黄土和黄土状粉土, 取 $\beta = 35^\circ$, 对于黄土状粉质粘土, 取 $\beta = 50^\circ$ 。

对于本次试验, $H = 35\text{m}$, $\beta = 40^\circ$, 若取 $m_s = 1.8$, 则得

$$r = 35(0.5 + 1.8 \operatorname{tg} 40^\circ) = 35 \times 2.01 \approx 70\text{m}$$

可与实测值符合。

综上所述,本场地的湿陷影响范围为试坑边缘外50m左右,比文献[1]报道的要大(表4),大致为湿陷性黄土层厚度的1.3~1.4倍。这可能是由于本次试验试坑尺寸较大,注水量较多,使得土体能够充分被水浸透之故。

土层序号	土层名称	深度(m)	设置位置						分层沉降量(mm)	累计沉降量(mm)
			1*	2*	3*	4*	5*	6*		
1	L ₁	5.2								44
2	F ₁	6.4	5.2m							43
3	L ₂	10.4	6.5m						1	42
4	F ₂	13.8	10.7m						6	36
5	L ₃	19.9	14.0m							19
6	F ₃	21.4								17
7	L ₄	26.5	21.4m							15
8	F ₄	27.4								2
9	L ₅	33.3	28.5m							

图7 机械深标点测试结果

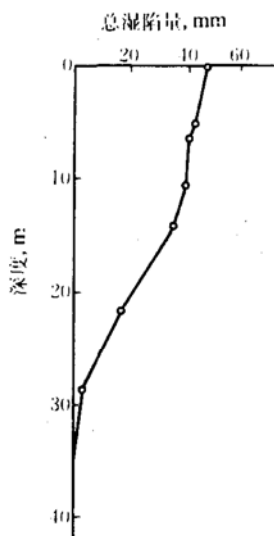


图8 机械深标点实测湿陷量沿深度的变化

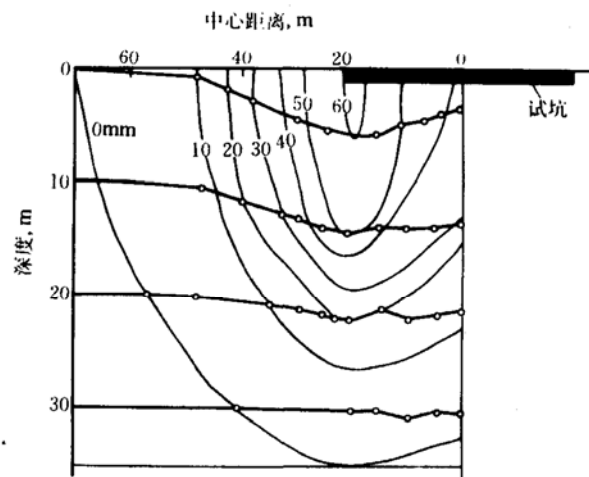


图9 沉降相对稳定时土层中的等湿陷线

表4 不同场地上自重湿陷影响范围

试验地点	湿陷性黄土层厚度 (m)	浸水试坑尺寸 (m)	地表下沉范围(距试坑边) (m)	下沉范围与湿陷性黄土厚度之比
陕西富平	9.4	10×10	8.0	0.85
陕西耀县	15.0	10×10	10.0	0.67
	15.0	2×2	4.0	0.27
	15.0	10×10	>13.5	>0.93
陕西合阳	14.5	5×5	>10.0	>0.69
	14.5	2.5×2.5	>7.6	>0.52
本文试验	35.0	(φ40)	45~50	1.3~1.4

五、自重湿陷量计算值与实测值比较

由现场 c_3 , c_6 桩孔取土测得的地基土分层自重湿陷系数和自重湿陷量计算值如表5示, c_3 和 c_6 桩孔计算值分别为42.6cm和65.1cm。而91年1月19日实测(图5), 1月29日复测的坑中与湿陷中心湿陷量数据如表6示。可见本场地黄土的湿陷量实测值与计算值相差很大, 前者大致仅为后者的1/10左右。

另根据 c_3 , c_6 桩孔取样, 室内土的湿陷性试验结果与分层磁性深标点实测结果比较, 湿陷量实测值与计算值的比值 β_0 随深度变化的散点图如图10所示。可见除22m以下可能由于测试误差使离散性较大外, β_0 值大致在0.10~0.15之间。

分析其原因可能是由于本场地地基土由黄土与古土壤成交互分布, 其物理力学性质不尽相同, 非湿陷层在地基中产生拱效应使地基湿陷土在产生自重湿陷趋势时应力减小, 不致产生如实验室中样品试验时的最大湿陷量。根据文献[1]报道, 在非自重湿陷性黄土场地, 实测自重湿陷量都小于计算自重湿陷量, 实测量与计算量的比值 β_0 在0.10~0.45之间。本文试验结果与其相符合(表7)。

综上所述, 本场地黄土与古土壤成层互交, 实测自重湿陷量与按室内自重湿陷性试验累计的计算自重湿陷量相差悬殊, 且沉陷主要是由停水后土层固结产生的。在浸水试坑周围也未发现自重湿陷性黄土地区较普遍的迹象——环形裂缝; 场区附近也没有发现碟形湿陷洼地, 宏观上说明本场地没有自重湿陷现象。因此按本试验现场实测自重湿陷量(小于7cm)应评定为非自重湿陷性黄土地。

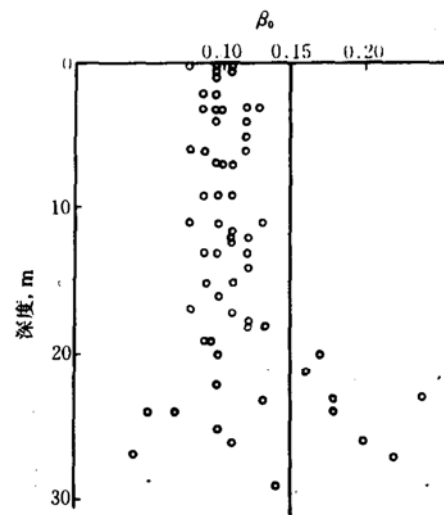
图10 β_0 值散点图

表5 自重湿陷量计算表

取土深度 (m)	自重湿陷系数 δ_{zs}		$\delta_{zst}h_t$ (cm)		取土深度 (m)	自重湿陷系数 δ_{zs}		$\delta_{zst}h_t$ (cm)	
	c_s	c_e	c_s	c_e		c_s	c_e	c_s	c_e
1	0.003	—	—	—	21	0.027	0.007	2.7	—
2	0.004	0.003	—	—	22	0.003	0.015	—	1.5
3	0.005	0.013	—	—	23	0.017	0.015	1.7	1.5
4	0.004	0.035	—	3.5	24	0.015	0.040	1.5	4.0
5	0.002	0.014	—	—	25	0.018	0.038	1.8	3.8
6	0.033	0.008	3.3	—	26	0.005	0.033	—	3.3
7	0.019	0.002	1.9	—	27	0.034	0.019	3.4	1.9
8	0.008	0.020	—	2.8	28	0.003	0.024	—	2.4
9	0.011	0.002	—	—	29	—	0.050	—	5.0
10	0.015	0.010	1.5	—	30	0.021	0.022	2.1	2.2
11	0.005	0.050	—	5.0	31	0	0.010	—	—
12	0.015	0.025	1.5	2.5	32	0	0.028	—	2.8
13	0.038	0.023	3.8	2.3	33	0.005	0.010	—	—
14	0.026	0.030	2.6	3.0	34	0	0.035	—	3.5
15	0.041	0.050	4.1	5.0	35	0.002	0.001	—	—
16	0.025	0.48	2.5	4.8	36	0.003	0.010	—	—
17	0.044	0.010	4.4	—	37	0.001	—	—	—
18	0.014	0.013	—	—	38	0.003	0.002	—	—
19	0.038	0.043	3.8	4.3	39	0.008	0.002	—	—
20	0.002	0.013	—	—	40	0.003	0.007	—	—
					$\Sigma \delta_{zst}h_t$	42.6		65.1	

表6 湿陷量的实测值与计算值比较

序号	测量时间	坑中(7*点)		湿陷中心(29*点)	
		实测 (mm)	计算 (mm)	实测 (mm)	计算 (mm)
1	1991.1.19	34	426	63	651
2	1991.1.29	—	426	65	651

表7 非自重湿陷性黄土场地的 β_0 值

试验地点	试坑尺寸(m)	浸水时间(d)	实测自重湿陷量(cm)	计算自重湿陷量(cm)	$\beta_0 = \frac{\text{实测值}}{\text{计算值}}$
西安交大	10×10	26	0.81	8.12	0.10
山西翼城	10×10	25	1.90	4.20	0.45
西安冶院	10×10	39	0.50	1.70	0.29
本文试验	φ40	40	6.50	65.10	0.10~0.15

六、结 论

1. 本次黄土地基浸水试验, 试坑直径达40m, 注水量近80000m³, 规模较大。地基土为黄土与古土壤成层交互分布, 地表6m以下为 Q_2 黄土。浸水后实测表明, 该地基土湿陷下限为35m左右, 浸润半径为70m。

2. 通过浅标点、机械式深标点和磁性分层深标等多种方法测试结果, 本场地地基沉陷量主要是在停水后出现的, 是由土层固结引起的。说明 Q_2 黄土与古土壤交互分布地基土与一般自重湿陷性黄土的湿陷特性有很大区别。

3. 室内试验与原位观测数据表明, 本场地黄土(Q_2)实测自重湿陷量与计算自重湿陷量相差悬殊, 其比值 β_0 约为0.10~0.15。

4. 根据浸水试验实测湿陷中心最终沉降量以及场地附近宏观现象分析, 按本试验现场实测自重湿陷量(小于7cm), 判定本场地为非自重湿陷性黄土场地。由于本试验是结合实际工程需要进行的, 时间要求紧, 有关黄土自重湿陷机理等方面理论问题, 有待今后进一步研究。

西安冶金建筑学院滕文川同志参加了本次试验工作, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 钱鸿缙等. 湿陷性黄土地基. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 87~132.
- [2] 甘肃省建工局建筑科学研究所等. 自重湿陷性黄土的试验研究. 中国土木工程学会第三届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [3] 何颐华, 闵连太. 湿陷性黄土地基桩的负摩擦问题. 建筑结构学报. 1982, 3(6)
- [4] 李大展等. 蒲城电厂扩底灌注桩试验报告. 中国建筑科学研究院地基所, 1991.
- [5] A A 穆斯塔伐耶夫. 湿陷性黄土上地基与基础的计算, 张中兴译. 北京: 水利电力出版社, 1984: 39~46.

Study and Test on Immersion of Q_2 Loess in Large Area

Li Da-zhan He Yi-hua

(China Academy of Building Research, Beijing)

Sui Guo-xiu

(Northwest Elec. Power Design Inst., Xi'an)

Abstract

According to observed data from in-situ test and immersion of large pit test, the calculated and observed values of self-weight collapsibility were compared for subsoil with interbedded strata of loess and fossil soil. The time-varying, depth-varying and influence zone of self-weight collapsibility were discussed. Assessment from experiment and analysis of subsoil collapsibility was made.