

DOI: 10.11779/CJGE201506001

# 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究

邵生俊<sup>1, 2</sup>, 李 骏<sup>1</sup>, 李国良<sup>3</sup>, 邓国华<sup>4</sup>, 张继文<sup>5</sup>, 刘 阳<sup>1</sup>, 邵 帅<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学土建学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 4. 西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710048; 5. 机械工业勘察设计院, 陕西 西安 710043)

**摘 要:** 黄土湿陷变形是地基工程的关键问题。依据大量的现场试坑浸水试验和室内湿陷性试验结果, 区分不同黄土地区, 分析了场地浸水自重湿陷变形实测值与计算值之间的关系, 表明陇西地区、陇东—陕北—晋西地区、关中地区和其他地区自重湿陷变形计算值的修正系数分别为 2.0, 1.7, 1.2, 0.4。依据典型场地黄土自重湿陷系数、自重湿陷变形、地层结构随深度的变化特征, 通过现场试验实测不同埋深黄土自重湿陷变形的平均自重湿陷系数与室内试验测试自重湿陷系数的加权平均值之间的关系, 揭示 0~10 m, 10~15 m, 15~20 m 不同埋深范围黄土原位浸水产生自重湿陷变形时, 对应的室内试验自重湿陷系数的加权平均值依次为 0.015, 0.020, 0.025, 确定了大厚度自重湿陷性黄土的自重湿陷系数起始门槛值。关中地区不同场地 Q<sub>2</sub> 黄土的自重湿陷变形实测值一般小于 7.0 cm。该地区不同场地 Q<sub>2</sub> 黄土的自重湿陷系数的均值约为 0.029, 其自重湿陷系数的起始门槛值可取 0.025。

**关键词:** 黄土; 自重湿陷变形; 计算值修正系数; 门槛值; 评价方法

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2015)06-0965-14

**作者简介:** 邵生俊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与黄土力学等方面的教学和科研。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

## Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation

SHAO Sheng-jun<sup>1, 2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, LI Guo-liang<sup>3</sup>, DENG Guo-hua<sup>4</sup>, ZHANG Ji-wen<sup>5</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, SHAO Shuai<sup>1</sup>

(1. Civil Engineering and Architecture Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess

Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China; 3. China Railway First Survey and Design Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China;

4. Xi'an Metro Co., Ltd., Xi'an 710048, China; 5. China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The collapse deformation of loess is a key issue in foundation engineering. A large number of field water immersion test results and corresponding laboratory compression test ones are comparatively analyzed so as to investigate the relationship between the measured and computed collapses under overburden pressure. The test condition differences such as stress, water seepage, air seepage, stratigraphic texture and soil behavior between field and laboratory tests as well as different regions of test sites are considered. The results show that the correction factor of computed collapse under overburden pressure for loess in the western region of Liupan Mountains is 2.0, while in the eastern region of Liupan Mountains, the northern Shaanxi Province and the western Shanxi Province it is 1.7, in the Guanzhong Plain it is 1.2, and in other regions it is 0.4. The changing characteristics of the coefficient of collapsibility and the collapse deformation under overburden pressure and the stratigraphic texture with depth at a typical site are analyzed. Furthermore, the mean coefficients of collapsibility under overburden pressure of in-situ measurements within different depth ranges are compared with the corresponding weighted mean ones of laboratory measurements. It is seen that the weighted mean coefficients of collapsibility under overburden pressure for loess at depths of 0 to 10 m, 10 to 15 m, 15 to 20 m are 0.015, 0.020 and 0.025 respectively. The threshold coefficients of collapsibility under overburden pressure are determined when collapse deformation under overburden pressure occurs at loess site with large depths, which increase with depth. The in-situ collapse deformation of Q<sub>2</sub> loess stratum under overburden pressure at different sites in Guanzhong Plain is commonly smaller than 7.0 cm. However, the collapsible loess under overburden pressure with a larger depth in this region is commonly Q<sub>2</sub> loess. Its averaged

coefficient of collapsibility under overburden pressure at different sites is about 0.029, so the threshold coefficient of

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41272320); 陕西省黄土力学与工程重点实验室科研计划项目(2013JS074)

**收稿日期:** 2014-10-07

collapsibility for the  $Q_2$  loess can be taken as 0.025.

**Key words:** loess; self-weight collapsible deformation; modified parameter of calculated value; threshold value; evaluation method

## 1 概 述

黄土是第四纪地质时期干旱气候环境条件下沉积形成的,其颗粒成分主要以粉粒为主,富含碳酸钙,具有孔隙比大,欠压密和结构性强的基本物性,并且在浸水增湿和饱和条件下产生显著附加压密的湿陷性力学反应。在中国西北和华北广泛分布的浅层黄土状土、 $Q_3$ 黄土具有明显的湿陷性。黄土一旦浸水增湿、甚至饱和后,水分子迅速楔入土颗粒间隙。一方面黄土受自重或者上部荷载作用下湿陷变形发展,产生显著的沉降变形;另一方面,黄土的原有结构遭到破坏,抗剪强度迅速降低,给黄土工程带来巨大的危害。随着黄土地区基础设施建设的日益发展,特别是地铁、高速公路和高铁等工程向黄土塬、黄土高阶地的延伸发展,以往人们对黄土地基湿陷变形和强度稳定性的评价方法已经不能满足实际工程的需要,这给岩土工程实践带来了巨大的挑战。黄土地基不再是低阶地黄土场地上建筑结构附加应力和自重应力共同作用下有限厚度湿陷性黄土地层的地基,而是越来越多地面临大厚度湿陷性黄土深埋基础、隧道衬砌结构等工程。譬如,大厚度湿陷性黄土地层中路堑工程,除具有卸除上覆土层自重应力作用的黄土路基之外,还具有附加剪切作用的黄土边坡;大厚度湿陷性黄土地层中开挖卸除洞身范围自重的隧道工程中,具有自重应力卸荷作用的仰拱黄土地基和侧向应力或竖向支撑卸荷作用的黄土围岩;高填方堆载黄土地基工程中显著地增大了附加自重作用,具有增大自重湿陷性黄土层厚度的黄土地基等。大厚度湿陷性黄土地基工程要求人们更加深入地认识黄土的湿陷特性及其影响因素和变化规律,从而对大厚度自重湿陷性场地的湿陷特性做出准确的认识和评价。

《湿陷性黄土地区建筑规范》(以下简称规范)以黄土场地工业民用建筑多层结构的湿陷性黄土地基或高层建筑黄土地基桩基础为主要对象,经过多次修订和完善,在室内单轴压缩湿陷性试验、场地试坑浸水和载荷板浸水试验的基础上,建立了黄土湿陷性、地基湿陷变形的评价方法,建立了地基基础设计的原则和方法,形成了地基加固处理技术。黄土地基基础设计的出发点是:以场地的自重湿陷变形量和地基的湿陷变形量为依据,首先区分黄土场地湿陷类型和评价黄土地基的湿陷等级;以按照建筑物的安全等级控制地基的剩余湿陷变形量为依据,考虑地基湿陷等级,确定湿陷性黄土地基的加固处理厚度;以建筑结构承载稳定性和自重湿陷变形量为依据,确定湿陷性黄土地

基的桩侧负摩阻力和桩端持力层。场地的自重湿陷变形量和地基的湿陷变形量实际上是浸水饱和和自重作用和基底压力与浸水饱和和自重作用下地基土的压密变形,是黄土地基基础设计的基础依据。它反映了可能浸水饱和和自重与实际荷载作用下湿陷性土层场地浸水后饱和地基的优劣。工业民用建筑湿陷性黄土地基的湿陷变形评价以浅基础基底压力为 200 kPa,湿陷性土层厚度小于 15 m 的黄土地基为主要对象,确定了浅基础基底压力和低阶地湿陷性黄土层厚度。场地的自重湿陷变形以饱和和自重作用下湿陷性黄土地基为对象。前者以基底下 10 m 深度范围 200 kPa 压力和 10~15 m 深度范围 300 kPa 压力下湿陷系数大于或等于 0.015 为湿陷性黄土;后者以地面下饱和土柱自重压力作用的湿陷系数大于或等于 0.015 为自重湿陷性黄土。将湿陷性黄土地基视为一维土柱,分层计算湿陷系数和自重湿陷系数大于或等于 0.015 土层的湿陷变形量,分别将具有湿陷性的各土层在一定压缩应力条件下的湿陷变形量求总和,即可以得到地基湿陷变形量和场地自重湿陷变形量。它们分别与浅基础地基载荷浸水试验和场地试坑浸水试验测试湿陷变形量比较,建立了不同埋深地基土湿陷变形修正和考虑地区差异的场地自重湿陷变形的修正系数。经修正后的地基湿陷变形计算值和场地自重湿陷变形计算值用于场地湿陷类型和地基湿陷变形等级划分。

由此可见,黄土湿陷性和地基湿陷变形的评价方法具有一定的适用范围和条件。湿陷性黄土限于地面下 15 m 深度范围;湿陷压缩应力为上覆饱和土柱自重压力或浅埋基础基底下 10 m 范围 200 kPa, 10~15 m 范围 300 kPa 的压力;湿陷性黄土的湿陷系数大于或等于 0.015;一定平面尺寸范围(约等于探井采取土样测试湿陷性黄土的埋深)试坑连续浸水入渗饱和和湿陷性黄土至入渗锋面趋于稳定,且试坑范围湿陷变形黄土受边界非湿陷黄土的约束作用。当湿陷性黄土的埋深范围大于 15 m,单位面积饱和土柱的自重应力大于 300 kPa 时,在较大压缩应力条件下,判定深埋黄土是否具有湿陷性的湿陷系数是否仍然取 0.015,需要进行分析论证。汪国烈<sup>[1]</sup>建议,黄土的自重湿陷系数界限值应随深度逐渐放大。姚志华等<sup>[2]</sup>根据兰州和平镇浸水试验结果建议陇西地区不同深度黄土的湿陷系数门槛值为:0~15 m 仍采用规范的 0.015, 15~25 m 可采用 0.020, 25 m 以下可采用 0.030,但场地样本少,缺乏代表性。此外,单轴压缩应力条件下黄土的湿陷试验实际上反映了半无限水平场地黄土仅有浸水入渗

的湿陷变形特征, 而有限范围浸水入渗的试坑试验既受到湿陷变形边界的约束作用, 还受到渗气运动与渗水运动的相互影响及地层结构低透水性土滞水作用的影响。尽管试坑浸水试验更接近于工程场地有限范围浸水入渗有限深度湿陷性黄土地层的实际情况, 但大厚度湿陷性黄土地基工程中压缩应力条件、渗水渗气运动与浅埋湿陷性黄土地基具有明显的差异。因此, 本文依据黄土地区已经开展的大量场地试坑浸水试验及其场地探井采取土样室内单轴压缩应力条件下湿陷性试验基础资料, 开展了大厚度黄土自重湿陷变形的评价方法研究, 以便为大厚度湿陷性黄土工程的建设提供理论基础。

2 大厚度湿陷性黄土自重湿陷变形修正值的研究

黄土地场的湿陷类型及自重湿陷变形量的评价可以依据场地试坑浸水试验测试结果来进行。当没有开展现场试坑浸水试验时, 也可以按照室内黄土单轴压缩浸水的湿陷性试验测试各土层的自重湿陷系数, 累计各自重湿陷性黄土层的计算湿陷变形量经修正后来进行。自重湿陷变形的计算值为

$$\Delta_{zs} = \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad , \quad (1)$$

式中,  $\delta_{zsi}$  为第  $i$  层土在上覆饱和 (饱和度为 0.85) 自重压力下的自重湿陷系数,  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度。

将计算值再进行修正来评价场地的自重湿陷变形量和场地湿陷类型划分。进行修正的原因在于室内试验模拟的条件和现场试验在黄土地层的应力条件、浸水条件、黄土湿陷性、地层结构分布、黄土结构性等差异。关于应力条件, 室内试验是在侧限应力条件下进行的, 是人们为了方便研究黄土湿陷压缩而理想化的应力状态。侧限变形的应力条件束缚了黄土的侧向变形, 增强了黄土的压缩结构强度, 削弱了黄土因侧胀变形发展而引起的自重湿陷变形量, 属于一维变形问题。然而, 现场浸水试坑试验, 是在有侧向变形条件下进行的, 浸水入渗过程不仅伴随压缩应力增大, 还有剪应力的发展, 属于三维变形问题。关于浸水条

件, 室内试验土样薄, 在吸水作用和薄膜水转移条件下逐渐饱和; 而现场试坑浸水试验中, 除渗透锋面下非饱和土有吸水作用和薄膜水转移饱和土之外, 渗透锋面以上的土还受到渗流作用, 渗透力作用于土骨架也会引起沉降变形。不仅如此, 还伴随着天然土层中渗气运动, 渗气运动会阻碍渗水运动。关于浸水范围, 室内试验实际上模拟了每一层土在水平面内无限范围的浸水作用, 且没有考虑不同地层结构土的渗水、渗气运动之间的相互作用。然而, 现场试验是在有限范围内浸水, 具有一定的浸水饱和边界, 这种方法实际上模拟了地基有限范围内浸水的实际情况。与地下水位抬升, 大范围饱和黄土有明显的区别。因此, 现场浸水试坑试验对于模拟实际工程可能在有限范围内浸水, 且受到场地内不同地层土渗水、渗气的影响, 更加符合工程实际情况。关于黄土的湿陷性, 室内试验结果代表了采样土层均匀的湿陷性, 随取样位置不同, 测试得到黄土的湿陷性可能不同, 与实际土层黄土湿陷性的非均匀性有一定的差异。然而, 现场试坑浸水试验在原位地层土体中的入渗面和渗透锋面之间, 不同湿陷性的黄土均被饱和, 既反映了黄土湿陷性的差异, 还反映了地层结构的相互作用。关于黄土的结构性, 室内试样常通过探井采取原状土, 然后在室内切削制备试样的途径进行试验, 不可避免地扰动了原状黄土的结构。同时, 采取土样代表了一层黄土, 因此假定了该层黄土具有均匀的结构性。然而, 现场试坑浸水试验避免了扰动原状黄土结构, 以及均匀化一层黄土结构性的误差。随着自重湿陷性黄土厚度的增大, 由于应力条件、浸水条件、黄土湿陷性、地层结构分布、黄土结构性等差异, 导致黄土室内单轴压缩浸水湿陷性试验与现场试坑浸水试验的差异会越来越大。为了考察室内试验和现场试坑浸水试验测试场地不同地层结构黄土湿陷性的差异, 以及场地自重湿陷变形计算值和实测值的差异, 针对中国黄土分布的陇西地区、陇东—陕北—晋西地区、关中地区和其他地区, 收集了 60 个场地 67 个试坑浸水试验自重湿陷变形测试结果和探井采样室内试验自重湿陷变形计算值, 如表 1 所示。其中试坑的边长或直径变化范围为 7~110

表 1 试坑浸水试验成果表  
Table 1 Results of field soaking tests

地区	工程名称及地点	试坑尺寸 /m	浸水 历时/h	自重湿陷量/mm		$\beta_0$	自重湿陷下限深度/m		文献
				实测值	计算值		室内试验	现场试验	
陇西地区	兰州东岗	$\phi$ 10	96	955	501	1.92	10.5	—	[3-4]
		10×10	79	870	501	1.74	10.5	—	
		10×20	99	844	444	1.90	10.5	—	
		$\phi$ 20	—	930	501	1.86	10.5	—	
		$\phi$ 12	—	915	501	1.83	10.5	—	
	兰州沙井驿	10×10	—	185	104	1.78	7.0	—	[5]
		14×14	—	155	91	1.70	7.0	—	[5]
	兰州工人疗养院	10×10	—	185	118	1.57	—	—	[9]

续表 1

	兰州西固	15×15	68	860	231.5	3.71	10.5	—	[3-4]
		5×5	45	360	231.5	1.56	10.5	—	
	兰州连城铝厂	34×55	37	1151.5	540	2.14	15.0	—	[3-5]
		17×34	35	1075	540	1.99	15.0	—	
陇东— 陕北— 晋西	甘肃永登	—	—	1352	436	3.10	—	—	[9]
	甘肃第二工人疗养院	14×14	—	185	118	1.57	—	—	[9]
	兰州七里河	—	—	564	426	1.32	—	—	[9]
	兰州安东区	—	—	119	110	1.08	—	—	[9]
	兰州龚家湾	12×11.8	—	635	360.0	1.76	10.0	—	[5]
	兰州安宁堡	—	—	119.0	57.7	2.06	—	—	[10]
	兰州和平镇	φ 40	140	2315	1140	2.03	30.0	25	[11-12]
	天水二十里铺	16×28	—	586	405	1.45	14.5	—	[3, 5]
	西宁大通	15×15	—	400	243	1.65	15.0	—	[5]
	西宁南川	32×53	—	650	409	1.58	17.0	—	[5]
	青海物探队	—	—	395	245	1.61	15.0	—	[4]
	兰州新庄岭	φ 15	—	397	691	0.57	15.0	—	[18]
	合阳东五公社糖厂	10×10	56	477	365	1.31	14.5	—	[3, 5]
	陕西耀县梅家坪	10×10	38	413	363	1.14	11.0	—	[3, 5]
关中 地区	延安丝绸厂	9×9	—	357	229	1.56	10.0	—	[3, 5]
	宁夏固原县七营镇	110×70	162	2600	1405	1.85	37	27	[5, 8]
	宁夏固原	φ 15	—	1288.0	1034.0	1.25	30	—	[20]
	河北张家口	φ 11	—	105	88.7	1.10	—	—	[3]
	宁夏宁东镇	φ 14	30	202.8	174.1	1.16	14.5	6	[17]
	陕西富平张桥	10×10	64	207	230	0.90	10.5	—	[3]
	西安交大	10×10	26	8.1	81.2	0.10	—	—	[7]
	西安韩森寨	12×12	—	364	290	1.26	11.5	—	[3]
	陕西三原	10×10	—	337.9	282.2	1.20	10.0	—	[3, 5]
	陕西武功	7×7	—	14	15	0.93	—	—	[9]
	宝鸡二电厂	20×20	—	344	281.5	1.22	—	—	[3]
	西安北郊徐家堡	φ 12	—	90	142	0.64	11.5	—	[3]
	西安冶金学院	10×10	39	17	5	0.29	6.5	—	[6]
	西安北郊	10×10	—	338	273	1.24	—	—	[9]
	陕西蒲城电厂	φ 40	40	65	498	0.10	35	27.4	[6]
	西安财经学院新校区	φ 30	34	-39.8	107	0.0	30	0	[13]
	西安月登阁	φ 26	51	199.4	587	0.34	27	26	[14]
	临潼芷阳村	φ 20	42	52.3	238	0.22	20	16	[15]
	潼关县高桥乡	椭圆 48×42	53	358	570	0.63	32	14	[10]
	华阴市卫峪乡	φ 25	97	1603	463	3.46	22	24.5	[10]
	长安区阳村	φ 25	33	-5	180	—	22	0	[16]
	陕县张湾乡	椭圆 32×28	42	193	596	0.32	25	16	[10]
	灵宝市西闫乡	椭圆 39×33	37	104	358.5	0.29	29	10	[10]
	灵宝市故县镇	φ 35	85	477	702.5	0.68	32	19	[10]
	灵宝市豫灵镇	φ 20	71	593	441	1.34	20	16	[10]
	长安区高望堆村	φ 25	—	-3	103	—	18	0	[16]
	运城	8×8	—	53	192	0.28	—	—	[9]
	河南灵宝	7×7	—	13	55	0.24	—	—	[9]
其他 地区	洪洞县化肥厂	10×10	—	32	74	0.43	—	—	[9]
	太原	7×7	—	13	44	0.30	—	—	[9]
	绛县	10×10	—	16	303	0.05	—	—	[9]
	闻喜	10×10	—	226	572	0.40	—	—	[9]
	东赵	φ 10	—	67	202	0.33	—	—	[9]
	太原山西无线电厂	φ 10	—	36	178	0.20	—	—	[9]
	翼城	10×10	—	19	42	0.45	—	—	[9]
	太原北郊	10×10	—	13	11	1.18	—	—	[9]
	河南西部 1	—	—	2	47	0.04	—	—	[9]
	河南西部 2	—	—	13	76	0.17	—	—	[9]
	巩义市大峪沟镇	φ 20	39	7	48	0.15	18	2	[10]
	偃师市顾县镇	φ 25	34	27	88.5	0.31	12	10	[10]

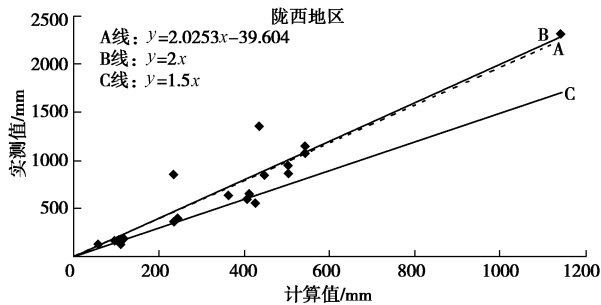


图1 陇西地区自重湿陷变形实测值与计算值的关系

Fig. 1 Relationship between measured and calculated values of self-weight collapsible deformation in Longxi

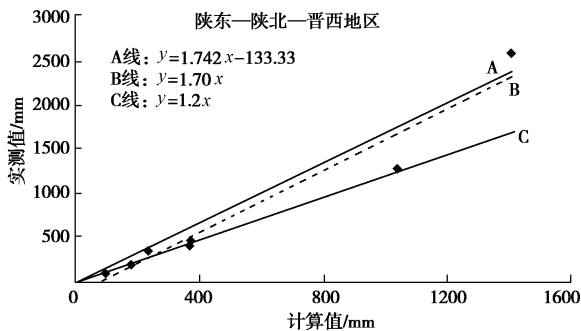


图2 陇东—陕北—晋西地区自重湿陷变形实测值与计算值的关系

Fig. 2 Relationship between measured and calculated values of self-weight collapsible deformation in Longdong-Shanbei-Jinxi m; 室内试验测试场地自重湿陷性黄土的厚度为 7~37 m, 试坑浸水试验测试场地自重湿陷性黄土的厚度为 2~27.6 m。

分别针对 4 个不同地区, 依据现场试坑浸水试验与探井采样室内自重湿陷性试验, 进行了自重湿陷变形的实测值与计算值的相关分析, 如图 1~4 所示。图 1 给出了陇西地区自重湿陷变形的实测值与计算值的线性关系 (A 线) 和现行规范<sup>[3]</sup>建议线性关系 (C 线)。可见, 规范<sup>[3]</sup>建议的修正系数偏小, 可以采用修正的线性关系 (B 线), 自重湿陷变形计算值的修正值为 2.0。图 2 给出了陇东—陕北—晋西地区自重湿陷变形的实测值与计算值的线性关系 (A 线) 和现行规范<sup>[3]</sup>建议线性关系 (C 线)。可见, 规范<sup>[3]</sup>建议的修正系数亦偏小, 可以采用修正的线性关系 (B 线), 自重湿陷变形计算值的修正值为 1.7。图 3 给出了关中地区自重湿陷变形的实测值与计算值的线性关系 (A 线) 和现行规范<sup>[3]</sup>建议线性关系 (C 线)。如果采用修正的线性关系: B 线, 则可以包含该地区实测值与计算值的试验点。可见, 自重湿陷变形计算值的修正值为 1.2。图 4 给出了其它地区自重湿陷变形的实测值与计算值的线性关系 (A 线) 和现行规范<sup>[3]</sup>建议线性关系 (C 线)。可见, 规范<sup>[3]</sup>建议的线性关系: C 线偏大, 宜采用修

正线性关系: B 线。因此, 自重湿陷变形计算值的修正值为 0.4。

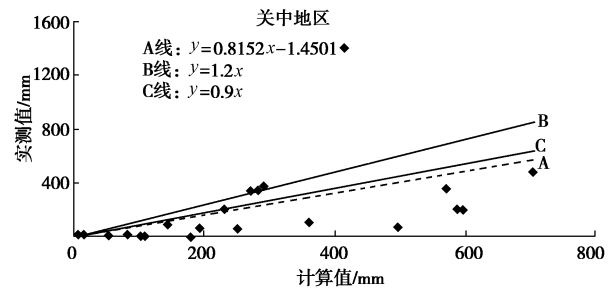


图3 关中地区自重湿陷变形实测值与计算值的关系

Fig. 3 Relationship between measured and calculated values of self-weight collapsible deformation in Guanzhong

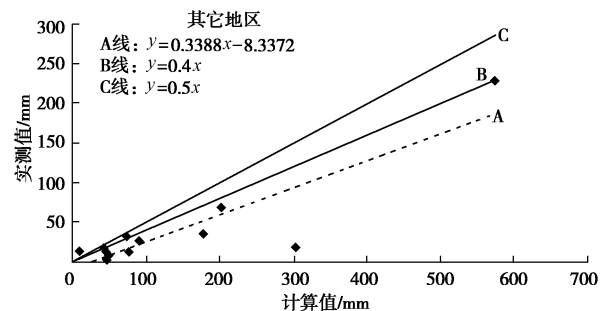


图4 其它地区自重湿陷变形实测值与计算值的关系

Fig. 4 Relationship between measured and calculated values of self-weight collapsible deformation in other regimes

### 3 典型场地黄土湿陷性、自重湿陷变形与地层结构分布特征的分析

越来越多的现场试坑浸水试验表明, 场地自重湿陷变形的实测值与探井采取土样测试自重湿陷系数大于 0.015, 土层自重湿陷变形计算值累计总和修正后的差异较大, 并且出现了两种方法判定场地湿陷类型截然相反的情况。尤其是埋深较大的自重湿陷性黄土, 现场浸水的湿陷变形实测值与计算值差异更大, 从而显著地影响了场地类型和自重湿陷变形的评价结果。为了考察大厚度深埋黄土的湿陷变形特征, 根据收集的 17 个典型场地探井采取原状黄土室内试验和现场浸水试坑试验的结果, 分析了不同场地各黄土层的湿陷性、自重湿陷变形随埋深的变化规律, 以及与地层结构之间的关系。不同场地的分析结果如下:

#### (1) 陕西蒲城电厂<sup>[7]</sup>

试验场地位于渭北蒲城黄土塬上, 地形开阔平坦, 无不良地质现象, 地面海拔标高约为 495 m。场地地层以马兰黄土 (Q<sub>3</sub>) 和离石黄土 (Q<sub>2</sub>) 为主, 且黄土层与古土壤层相互交错分布。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 5 所示。上部马兰黄土约为 6 m, 下部离石黄土约为 54 m, 属

大厚度湿陷性黄土场地。依据室内试验结果，确定场地湿陷性土层厚度 35 m，自重湿陷变形修正计算值的平均值为 44.8 cm ( $\beta_0=0.9$ )，判定为自重湿陷性场地。现场浸水试验的试坑直径为 40 m，浸水历时 40 d，总注水量 79860 m<sup>3</sup>，试坑实测自重湿陷变形 2.8~6.3 cm。该场地地层结构的特点是古土壤层分布较多，弱湿陷性黄土或无湿陷性黄土与中湿陷性黄土层间隔分布；现场试坑浸水试验判定为非自重湿陷性黄土场地，与室内试验判定场地湿陷类型不一致。

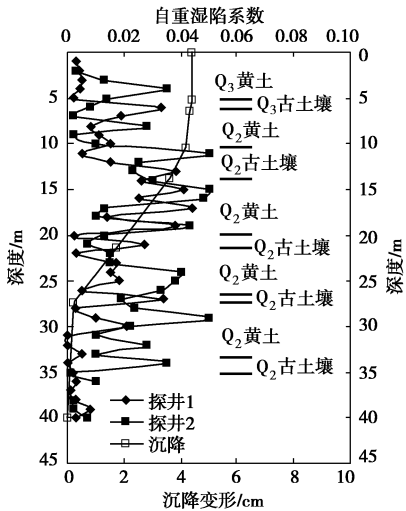


图 5 陕西蒲城电厂试坑浸水试验结果

Fig. 5 Results of field soaking tests at Pucheng Power Plant in Shaanxi Province

(2) 巩义市大峪沟镇<sup>[10]</sup>

试验场地位于巩义市大峪沟镇黄土丘陵区塬上，该场地 20 m 深度范围内地层均为黏质黄土 (Q<sub>3</sub>)，且含有少量钙质条纹，夹有 3 层姜结石富集层，厚度为 0.4~0.5 m，下伏 Q<sub>2</sub> 黏质黄土。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 6 所示。依据室内湿陷性试验，确定场地湿陷性土层厚度为 18 m，场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 8.35 cm ( $\beta_0=0.5$ )，判定为自重湿陷性场地。现场浸水试验的试坑直径为 20 m，浸水历时 39 d，总注水量 18116 m<sup>3</sup>，实测场地自重湿陷变形量 0.67 cm。该场地地层结构的特点是黏质黄土中分布多层钙质结合层，上部浅层黄土无湿陷性，下部无湿陷性黄土与中湿陷性黄土层间隔分布；现场试坑浸水试验判定为非自重湿陷性黄土场地，与室内试验判定场地类型不一致。

(3) 偃师市顾县镇<sup>[10]</sup>

试验场地位于偃师市顾县镇伊、洛河 II 级阶地上，场地地势平坦，地层主要由 Q<sub>3</sub> 冲洪积砂质黄土和 Q<sub>2</sub> 黏质黄土及冲洪积粗圆砾组成；其下为上第三系泥岩。Q<sub>3</sub> 黄土厚度为 16~30 m，地下水位约为 23 m 左右。

该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 7 所示。依据室内试验测试，该场地自重湿陷性黄土最大埋深为 23 m，该场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 4.43 cm ( $\beta_0=0.5$ )，判定为非自重湿陷性场地。现场浸水试验的试坑直径为 25 m，浸水历时 34 d，总计注水量 16246 m<sup>3</sup>，实测自重湿陷变形量为 2.7 cm。该场地地层结构的特点是弱湿陷性黄土或无湿陷性黄土与中湿陷性黄土层间隔分布，试坑内两个探井不同土层黄土的湿陷性有明显的差异；现场试坑浸水试验判定为非自重湿陷性黄土场地。室内和现场试验场地类型判定一致。

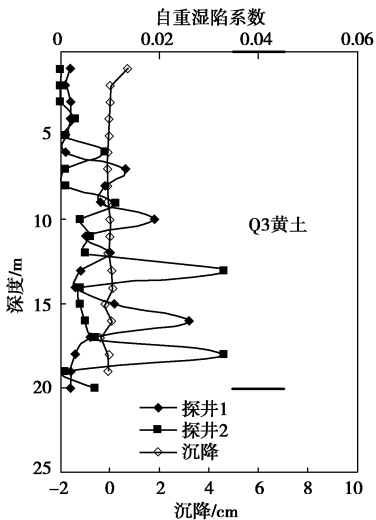


图 6 巩义市大峪沟镇试坑浸水试验结果

Fig. 6 Results of field soaking tests at Dayugou Town in Gongyi County

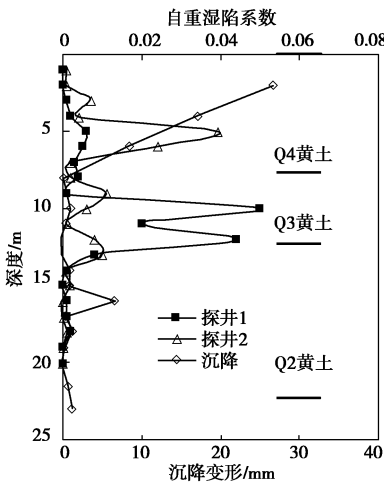


图 7 偃师市顾县镇试坑浸水试验结果

Fig 7 Results of field soaking tests at Guxian Town in Yangshi County

(4) 陕县张湾乡<sup>[10]</sup>

试验场地位于陕县张湾乡黄土塬。上部地层为 Q<sub>3</sub>

砂质、黏质黄土, 厚度约 26 m; 下伏  $Q_2$  黏质黄土, 厚度大于 30 m。地下水埋深 80~90 m。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 8 所示。依据室内试验测试, 场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 53.6 cm ( $\beta_0=0.9$ ), 判定为自重湿陷性场地。湿陷性黄土埋深的下限为 25 m。现场浸水试验的试坑呈椭圆形, 长轴为 32 m, 短轴为 28 m。浸水历时 42 d, 总计注水量 23970 m<sup>3</sup>, 实测自重湿陷变形量为 19.3 cm。该场地地层结构的特点是埋深 4.0 m 以下为中、强湿陷性黄土; 现场试坑浸水试验判定为非自重湿陷性黄土场地。室内和现场试验判定场地类型一致。

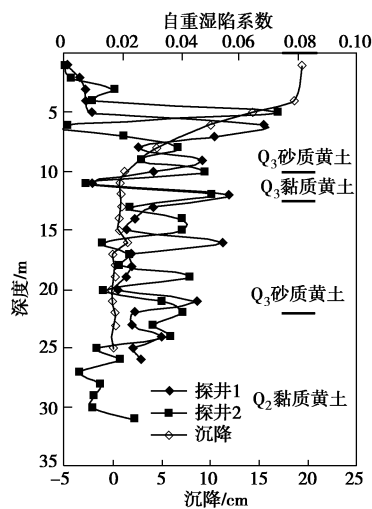


图 8 陕县张湾乡试坑浸水试验结果

Fig. 8 Results of field soaking tests at Zhangwan Town in Shaan County

(5) 灵宝市西闫乡<sup>[10]</sup>

试验场地位于灵宝市西闫乡大字营村南侧, 场地上部为上更新统砂质黄土、砂层, 厚度大于 30 m; 下伏中、下更新统砂层、粉质黏土, 厚度较大。地下水埋藏约为 48 m。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 9 所示。依据室内试验结果, 场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 32.3 cm ( $\beta_0=0.9$ ), 属自重湿陷性场地。该试验场地自重湿陷性土层的下限深度约为 29 m。现场试验浸水的试坑呈椭圆形, 长轴为 39 m, 短轴为 33 m。现场浸水历时 37 d, 总计注水 27424 m<sup>3</sup>, 现场实测自重湿陷性土层厚度为 10 m, 实测自重湿陷变形量 10.4 cm。该场地地层结构的特点是埋深 11.0 m 以上为弱、中湿陷性黄土, 11.0 m 以下为中、强湿陷性黄土, 下部地层含有冲积砂层; 现场试验测试自重湿陷变形发生于上部地层, 且判定为非自重湿陷性黄土场地。室内和现场试验判定场地类型一致。

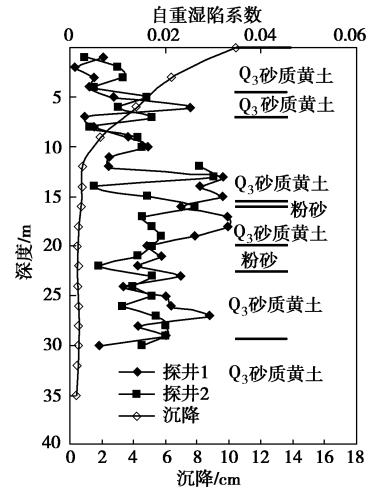


图 9 灵宝市西闫乡试坑浸水试验结果

Fig. 9 Results of field soaking tests at Xiyan Town in Lingbao County

(6) 灵宝市故县镇<sup>[10]</sup>

该试验场地位于灵宝市阳平镇与故县镇交界处黄河 II 级阶地, 地层主要为第四系上更新统砂质黄土, 厚度大于 80 m, 自重湿陷性黄土厚度约 30 m, 地下水埋藏很深。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 10 所示。依据探井室内试验测试结果, 场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 86.2 cm ( $\beta_0=0.9$ ), 属自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验的试坑直径为 35 m。现场浸水历时 85 d, 总计注水 79963 m<sup>3</sup>, 现场实测自重湿陷性土层厚度 19 m, 实测自重湿陷变形量 47.7 cm。该场地地层结构的特点是埋深 7.0 m 以上为弱湿陷性黄土, 7.0 m 以下为弱、中湿陷性黄土; 自重湿陷性地层全部为  $Q_3$  黄土, 且判定为自重湿陷性黄土场地。室内和现场试验判定场地类型一致。

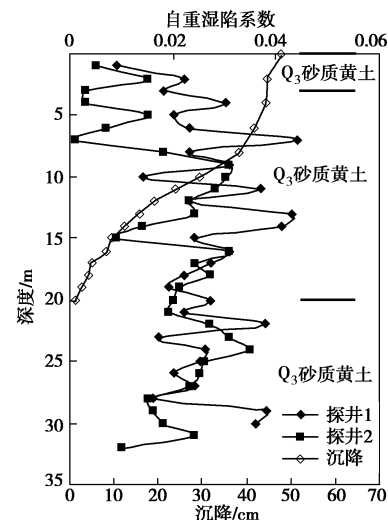


图 10 灵宝市故县镇试坑浸水试验结果

Fig. 10 Results of field soaking tests at Guxian Town in Lingbao County

(7) 灵宝市豫灵镇<sup>[10]</sup>

试验场地位于灵宝市豫灵镇黄河Ⅱ级阶地，该场地上覆第四系上更新统砂质黄土、砂层厚度大于 30 m，下伏第四系中、下更新统砂层、黄土，厚度较大。地下水位埋藏较深。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 11 所示。依据室内试验测试，判定湿陷性黄土埋深的下限为 19 m，场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 38.0 cm ( $\beta_0=0.9$ )，属自重湿陷性黄土地。现场浸水试验试坑的直径为 20 m。现场浸水历时 71 d，总计注水 13483 m<sup>3</sup>，现场实测自重湿陷性土层厚度 16 m，实测自重湿陷变形量为 59.3 cm。该场地地层结构的特点是埋深 15.0 m 以上为弱、中湿陷性黄土，15.0 m 以下为弱湿陷性黄土，且含有冲击粉砂和中粗砂层；自重湿陷性地层全部为 Q<sub>3</sub> 黄土，且现场试验判定为自重湿陷性黄土地。室内和现场试验判定场地类型一致。

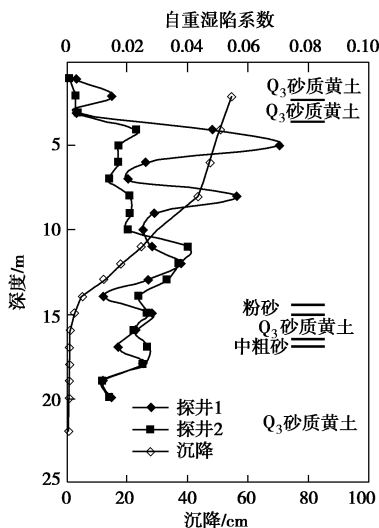


图 11 灵宝市豫灵镇试坑浸水试验结果

Fig. 11 Results of field soaking tests at Yuling Town in Lingbao County

(8) 潼关县高桥乡<sup>[10]</sup>

试验场地位于潼关县高桥乡渭河Ⅱ级阶地，场地上覆第四系上更新统砂质黄土、黏质黄土及砂层，厚度大于 30 m；下伏第四系中、下更新统砂层、黄土，厚度较大。地下水位埋深约 73 m。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 12 所示。依据室内试验测试结果，场地自重湿陷性土层下限深度为 38 m，场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 61.3 cm ( $\beta_0=0.9$ )，属于自重湿陷性黄土地。现场浸水试验试坑呈椭圆形，长轴为 48 m，短轴为 42 m。现场浸水历时 53 d，总计注水 49704 m<sup>3</sup>，现场实测自重湿陷性土层厚度 14 m，实测自重湿陷变形量为 35.8 cm。该场地地层结构的特点是埋深 5.0 m 以上为弱湿陷性黄土，5.0 m 以下为弱、中湿陷性黄土；

自重湿陷性地层全部为 Q<sub>3</sub> 黄土，且判定为自重湿陷性黄土地。室内和现场试验判定场地类型一致。

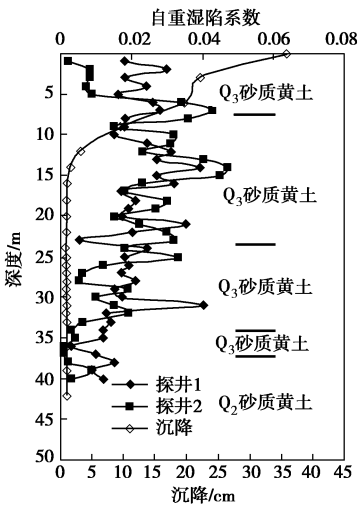


图 12 潼关县高桥乡试坑浸水试验结果

Fig. 12 Results of field soaking tests at Gaoqiao Town in Tongguan County

(9) 华阴市卫峪乡<sup>[10]</sup>

试验场地位于华阴市卫峪乡渭河Ⅱ级阶地，场地上覆第四系上更新统砂质黄土、黏质黄土及砂层，厚度大于 30 m；下伏第四系中、下更新统砂层、粉质黏土，厚度较大。地下水位埋藏约为 35 m。该场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 13 所示。依据室内试验测试结果，该试验场地的自重湿陷性土层下限深度为 22 m，场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 52.2 cm ( $\beta_0=0.9$ )，属于自重湿陷性黄土地。现场浸水试验试坑直径为 25 m。现场浸水历时 97 d，总计注水 17960 m<sup>3</sup>，现场实测自重湿陷性土层厚度为 24.5 m，实测自重湿陷变形量为

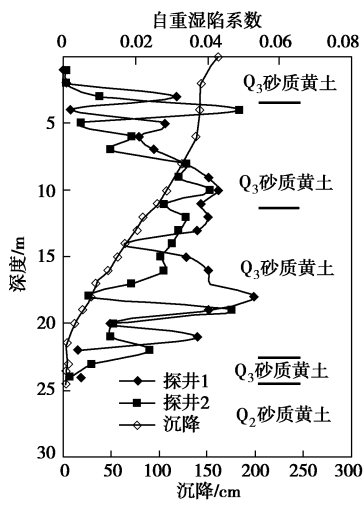


图 13 华阴市卫峪乡试坑浸水试验结果

Fig. 13 Results of field soaking tests at Weiyu Town in Huaying County



160.3 cm, 判定为自重湿陷性黄土场地。该场地地层结构的特点是埋深 4.0 m 以下为弱、中湿陷性黄土; 自重湿陷性土层全部为 Q<sub>3</sub> 黄土。室内和现场试验判定场地类型一致。

(10) 兰州市和平镇<sup>[11-12]</sup>

试验场地位于兰州市和平镇黄河南岸Ⅳ级阶地, 场地上覆第四系上更新统砂质黄土, 最大埋深约 38 m; 下伏第四系中、下更新统砾石土。该场地地下水位大于 100 m。依据 6 个探井室内试验结果, 场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 171.0 cm ( $\beta_0=1.5$ ), 判定为自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验的试坑直径为 40 m; 实测自重湿陷量最大为试坑中心点达到 266.1 cm, 平均值为 231.5 cm; 实测 25 m 以上土层湿陷较大, 25 m 以下土层湿陷量较小, 饱和和下界限深度约 25.0 m; 判定为自重湿陷性黄土场地。该场地地层结构的特点是埋深 18.0 m 以上为中、强湿陷性黄土, 18.0 m 以下为弱、中湿陷性黄土; 自重湿陷性土层全部为 Q<sub>3</sub> 黄土。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 14 所示。室内和现场试验判定场地类型一致。

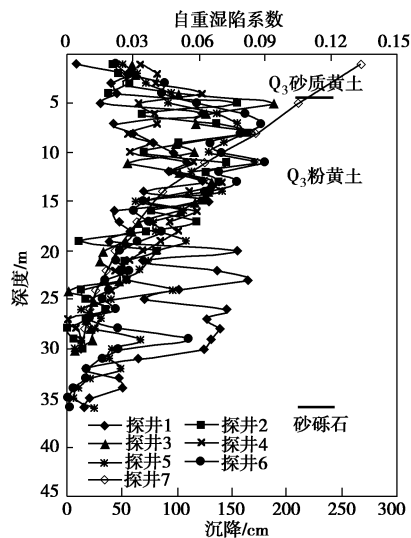


图 14 兰州市和平镇试坑浸水试验结果

Fig. 14 Results of field soaking tests at Heping Town in Lanzhou

(11) 西安财经学院新校区 (韦曲镇)<sup>[13]</sup>

试验场地位于西安长安区韦曲镇, 场地地貌单元属神禾塬二级台地。场地地层自上而下依次为 Q<sub>3</sub> 黄土及古土壤, Q<sub>2</sub> 黄土及古土壤, 以及 Q<sub>1</sub> 冲洪积层。场地地下水位约为 78 m 左右。依据场地 2 个探井室内试验结果, 场地自重湿陷土最大埋深约为 28 m, 场地自重湿陷变形修正计算值的平均值为 47.3 cm ( $\beta_0=0.9$ ), 判定为自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验的试坑直径为 30.0 m, 浸水历时 87 d, 总计浸水量 26855.0 m<sup>3</sup>; 实测试坑没有出现湿陷沉降, 反而出

现抬升, 浸水过程中, 最大抬升量为 9 mm, 最终抬升量为 3.5 mm; 判定为非自重湿陷性黄土场地。该场地地层结构的特点是埋深 10.0 m 以上为无湿陷性 Q<sub>3</sub> 黄土, 且含有两层较厚的古土壤层; 10.0 m 以下浅部 Q<sub>2</sub> 黄土和古土壤呈弱、中湿陷性。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 15 所示。室内和现场试验判定场地类型不一致。

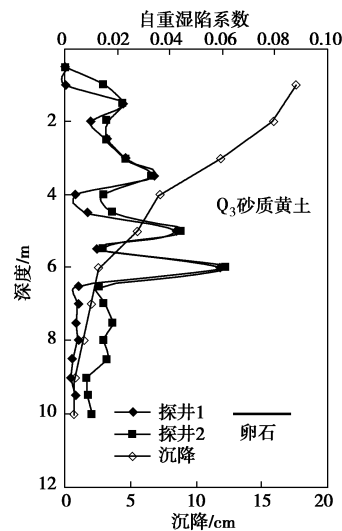


图 15 西安财经学院新校区 (韦曲镇) 试坑浸水试验结果

Fig. 15 Results of field soaking tests at Wei Qu Village in Xi'an

(12) 宁夏宁东镇<sup>[17]</sup>

试验场地位于宁夏宁东镇, 原名磁窑堡镇, 场地地貌单元属平缓岩层单斜构造的宁夏陶灵盐台地缓坡丘陵区, 剥蚀、侵蚀发育。场地地层自上而下主要由上更新统冲积、冲洪积黄土状土、卵石、圆砾、粗砾砂、粉细砂、第三系强—中风化砂纸泥岩等构成。依据试坑周边 2 个探井室内试验结果, 场地自重湿陷性土层厚度自地面下约 10.0 m, 自重湿陷变形修正计算值的平均值为 6.72 cm ( $\beta_0=0.5$ ), 判定为非自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验的试坑直径为 14.0 m, 浸水历时 30 d, 总计浸水量 1786.0 m<sup>3</sup>; 实测试坑自重湿陷量的平均值为 17.68 cm; 判定为自重湿陷性黄土场地。该场地地层结构的特点是埋深 4.0 m 以上和 7.0 m 以下为弱湿陷性黄土, 4.0~7.0 m 之间为弱、中湿陷性黄土; 自重湿陷性土层全部为 Q<sub>3</sub> 黄土。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 16 所示。室内和现场试验判定场地类型不一致。

(13) 长安区阳村<sup>[16]</sup>

该试验场地位于长安少陵塬二级黄土台塬, 场地地层自上而下依次为 Q<sub>4</sub> 黑垆土、Q<sub>3</sub> 黄土、Q<sub>3</sub> 古土壤、Q<sub>2</sub> 黄土、Q<sub>2</sub> 古土壤, 地下水位埋深约 41 m。根据室内试验, 场地两个探井的自重湿陷变形修正计算值分

别为 12.9 cm 和 16.4 cm ( $\beta_0=0.9$ )，场地内湿陷性土层的最大埋深约 22 m，属于自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验试坑的直径为 25 m，浸水历时 34 d，总计浸水量 12034.0 m<sup>3</sup>；现场实测试坑内地面出现抬升，抬升量最大值为 7 mm，判定场地为非自重湿陷性场地。该场地地层结构的特点是埋深 11.0 m 以上为无湿陷性 Q<sub>3</sub> 黄土和古土壤层；11.0 m 以下浅部 Q<sub>2</sub> 黄土和古土壤呈弱、中湿陷性。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 17 所示。室内和现场试验判定场地类型不一致。

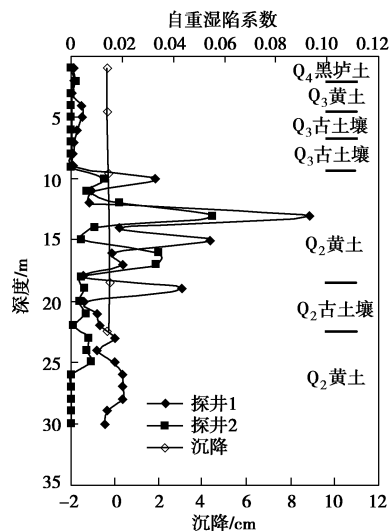


图 16 宁夏宁东镇试坑浸水试验结果

Fig. 16 Results of field soaking tests at Ningdong Town in Ningxia Province

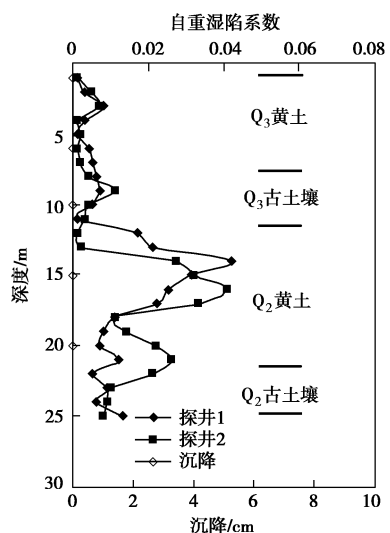


图 17 长安区阳村试坑浸水试验结果

Fig. 17 Results of field soaking tests at Yang Village in Xi'an (14) 长安区高望堆村<sup>[16]</sup>

该试验场地位于长安少陵塬二级黄土台塬，场地地层自上而下依次为 Q<sub>4</sub> 黑垆土、Q<sub>3</sub> 黄土、Q<sub>3</sub> 古土壤、

Q<sub>2</sub> 黄土、Q<sub>2</sub> 古土壤，地下水位埋深约 30 m 左右。根据室内试验成果，场地两个探井的自重湿陷变形修正计算值分别为 13.2 cm 和 8.2 cm ( $\beta_0=0.9$ )，场地内湿陷性土层的最大埋深约 22 m，属于自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验试坑的直径为 25 m，浸水历时 43 d，总计浸水量 17902.0 m<sup>3</sup>；现场实测试坑内地面出现抬升，抬升量最大值为 3 mm，判定场地为非自重湿陷性场地。该场地地层结构的特点是埋深 11.0 m 以上为 Q<sub>3</sub> 黄土和古土壤无湿陷性；11.0 m 以下浅部 Q<sub>2</sub> 黄土呈弱、中湿陷性。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、湿陷变形量沿深度的变化如图 18 所示。室内和现场试验判定场地类型不一致。

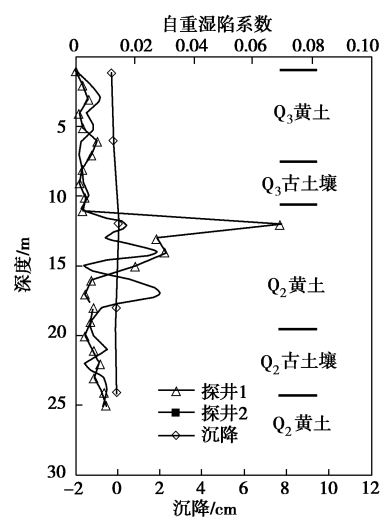


图 18 长安区高望堆村试坑浸水试验结果

Fig. 18 Results of field soaking tests at Gaowangdui Village in Xi'an

(15) 西安月登阁<sup>[14]</sup>

月登阁停车场附近 Q<sub>3</sub>、Q<sub>2</sub> 黄土层厚度相对较大，湿陷性强，地貌单元属于泾河三级阶地，地下水位最大埋深 58 m。根据室内试验成果，场地 3 个探井黄土地层的自重湿陷变形修正计算值的平均值为 54.7 cm ( $\beta_0=0.9$ )，场地内湿陷性土层的最大埋深约 27 m，属于自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验试坑的直径为 26 m，浸水历时 51 d，总计浸水量 14492 m<sup>3</sup>；试验场地实测平均自重湿陷量为 19.94 cm，Q<sub>3</sub> 黄土实测平均自重湿陷量为 16.89 cm，Q<sub>2</sub> 黄土实测平均自重湿陷量为 2.74 cm。判定场地为自重湿陷性场地。该场地地层结构的特点是埋深 4.0 m 以下 Q<sub>3</sub> 黄土呈弱、中自重湿陷性，Q<sub>3</sub> 古土壤无自重湿陷性；17.0 m 以下浅部 Q<sub>2</sub> 黄土呈弱、中自重湿陷性。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、自重湿陷变形量沿深度的变化如图 19 所示。室内和现场试验判定场地类型一致。

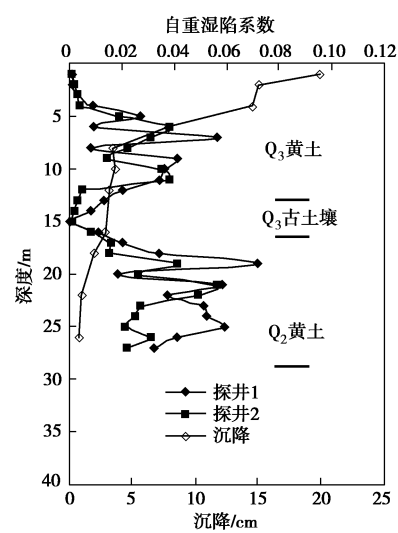


图 19 西安月登阁试坑浸水试验结果

Fig. 19 Results of field soaking tests at Yuedengge Village in Xi'an

(16) 临潼芷阳村<sup>[15]</sup>

试验场地位于黄土塬前洪积台地, 场地自上而下依次为全新统残积黑垆土、上更新统风积黄土及残积古土壤、中更新统风积老黄土及冲积粉质黏土, 自重湿陷性黄土最大埋深约 20 m。地下水位埋深约 26 m。根据室内试验成果, 场地两个探井黄土地层自重湿陷变形修正计算值的平均值 21.4 cm ( $\beta_0=0.9$ ), 属于自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验试坑的直径为 20 m, 浸水历时 42 d, 总计浸水量 23960 m<sup>3</sup>; 试验场地实测平均自重湿陷量为 5.23 cm, 判定场地为非自重湿陷性场地。该场地地层结构的特点是浅埋 Q<sub>3</sub> 黄土呈弱、中自重湿陷性, Q<sub>3</sub> 古土壤和上部 Q<sub>2</sub> 黄土层中无自重湿陷性土和弱、中自重湿陷性土间隔分布。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、自重湿陷变形量沿深度的变化如图 20 所示。室内和现场试验判定场地类型不一致。

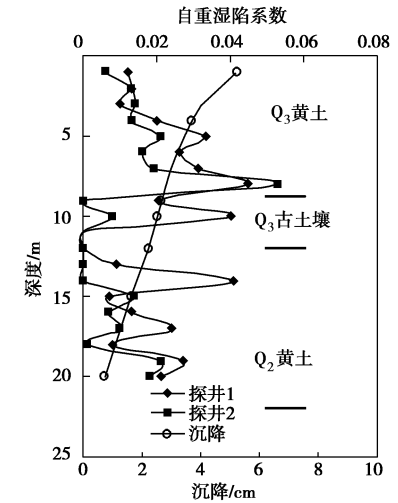


图 20 临潼芷阳村试坑浸水试验结果

Fig. 20 Results of field soaking tests at Zhiyang Village in Lintong Town

(17) 西安灞桥赵东村<sup>[19]</sup>

试验场地位于洪庆河洪积扇地貌单元。场地地层自上而下依次为新近堆积黄土, 上更新统风积黄土及残积古土壤, 下更新统风积、洪积老黄土及残积古土壤以及风积老黄土。自重湿陷性黄土最大埋深约为 19 m。地下水位埋深约 26 m。根据室内试验成果, 场地探井的自重湿陷变形量计算值的平均值 16.1 cm ( $\beta_0=0.9$ ), 属于自重湿陷性黄土场地。现场浸水试验试坑的直径为 20 m, 浸水历时 51 d, 总计浸水量 10904 m<sup>3</sup>; 试验场地实测平均自重湿陷量为 10.8 cm, 判定场地为自重湿陷性场地。该场地地层结构的特点是浅埋 Q<sub>4</sub> 黄土无自重湿陷性, Q<sub>3</sub> 黄土和上部 Q<sub>2</sub> 黄土呈弱、中自重湿陷性。场地地层结构、黄土自重湿陷系数、自重湿陷变形量沿深度的变化如图 21 所示。室内和现场试验判定场地类型一致。

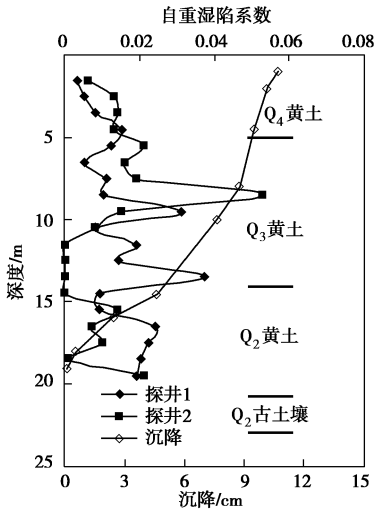


图 21 西安灞桥赵东村试坑浸水试验结果

Fig. 21 Results of field soaking tests at Zhaodong Village of Baqiao Zone in Xi'an

依据上述场地试坑浸水试验分析, 黄土状土、Q<sub>3</sub> 黄土和上部 Q<sub>2</sub> 黄土构成地层的场地, 随着埋深增大, 土层的自重湿陷变形逐渐减小。比较各场地地层结构、黄土自重湿陷性随深度的变化及累计自重湿陷变形随深度的分布变化, 场地的湿陷类型和自重湿陷变形的发展具有如下特点: ①具有中、强自重湿陷性的大厚度 Q<sub>3</sub> 黄土场地的自重湿陷变形发展大, 室内试验和现场试验判定场地的类型一致; ②弱、中自重湿陷性 Q<sub>2</sub> 黄土场地的自重湿陷变形发展小, 室内试验和现场试验判定场地的类型不一致; ③浅层无、弱自重湿陷性 Q<sub>3</sub> 黄土与下伏弱、中自重湿陷性 Q<sub>2</sub> 黄土场地的自重湿陷变形发展很小, 甚至会出现隆起变形, 室内试验和现场试验判定场地的类型不一致; ④浅层弱、中自重湿陷性 Q<sub>3</sub> 黄土与下伏弱、中自重湿陷性 Q<sub>2</sub> 黄土场地的自重湿陷变形发展较大, 室内试验和现场试验判定场地类型基本一致。为了依据室内试验正确评价场地湿陷性类型和自重湿陷变形, 依据上述现场试坑浸

水试验成果,开展了不同埋深黄土室内试验测试自重湿陷系数加权平均值与现场实测自重湿陷变形确定平均湿陷系数之间关系的分析。

室内压缩应力条件下浸水饱和测试的湿陷变形仅仅反映了黄土的一维湿陷变形特性。在现场黄土场地有限范围内浸水表现出来的变形不同,受不同地层构成、浸水入渗边界约束、地层土非侧限变形条件、浸水入渗渗透特性等因素的影响。它们的影响总体上反映在原位不同埋深地层黄土湿陷变形的变化中,由此,按不同的埋深对黄土地层进行分层,把每层土的湿陷变形量除以土层的厚度可得到该层土的试坑浸水试验的平均湿陷系数:

$$\bar{\delta}'_{zsi} = \frac{\Delta'_{zsi}}{h_i} \quad (2)$$

式中  $\bar{\delta}'_{zsi}$  为试坑浸水试验场地第  $i$  层土的平均湿陷系数;  $\Delta'_{zsi}$  为第  $i$  层土的实测自重湿陷变形量;  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度。

把室内试验每层土的自重湿陷系数按照土层厚度的加权平均值称作室内试验加权平均自重湿陷系数:

$$\bar{\delta}_{zsi} = \frac{\delta_{zsi}d_1 + \cdots + \delta_{zsj}d_j}{h_i} \quad (3)$$

式中  $\bar{\delta}_{zsi}$  为第  $i$  层土的室内试验加权平均自重湿陷系数;  $\delta_{zsj}$  为第  $i$  层土中代表第  $j$  土样代表土层的自重湿陷系数;  $d_j$  为第  $i$  层土中第  $j$  土样代表土层的计算厚度;  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度。

表 2 现场试验平均湿陷系数与室内实验平均湿陷系数  
Table 2 Mean values of self-weight collapsible parameters of field soaking tests and laboratory tests

场地名称	0~10 m		10~15 m		15~20 m	
	$\bar{\delta}_{zsi}$	$\bar{\delta}'_{zsi}$	$\bar{\delta}_{zsi}$	$\bar{\delta}'_{zsi}$	$\bar{\delta}_{zsi}$	$\bar{\delta}'_{zsi}$
蒲城电厂	0.012	0.002	0.030	0.002	0.025	0.003
巩义市大峪沟镇	0.008	0.0	0.008	0.0	0.009	0.0
偃师市顾县镇	0.008	0.003	—	—	—	—
陕县张家湾	0.024	0.018	0.030	0.001	0.025	0.002
灵宝市西闫乡	0.010	0.009	0.020	0.002	0.023	0.001
灵宝市故县镇	0.018	0.019	0.027	0.040	0.025	0.017
灵宝市豫灵镇	0.022	0.030	0.029	0.054	0.019	0.003
潼关县高桥乡	0.029	0.029	0.033	0.012	0.022	0.001
华阴市卫峪乡	0.022	0.054	0.032	0.100	0.030	0.090
兰州和平镇	0.046	0.126	0.058	0.125	0.037	0.070
西安月登阁	0.017	0.014	0.011	0.002	0.029	0.003
宁夏宁东镇	0.012	0.017	—	—	—	—
西安财经学院新校区	0.003	0.0	0.027	0.0	0.017	0.0
临潼芷阳村	0.021	0.002	0.006	0.002	0.015	0.002
西安灞桥赵东村	0.014	0.003	0.008	0.006	0.006	0.006
长安区阳村	0.004	0.0	0.018	0.0	0.019	0.0
长安区高望堆村	0.003	0.0	0.021	0.0	0.009	0.0

依据表 2 所述 0~10 m, 10~15 m, 15~20 m 不同埋深黄土现场试验平均自重湿陷系数和室内试验加权平均自重湿陷系数,绘制了两者之间的线性关系拟

合曲线,如图 22 (a)~(c) 所示。图 22 (a) 表明,0~10 m, 10~15 m, 15~20 m 不同埋深范围黄土室内试验测试自重湿陷系数的加权平均值分别大于 0.015, 0.020, 0.025 时,现场原位测试黄土才产生明显的自重湿陷变形,两者拟合关系曲线为 C 线。当室内试验测试自重湿陷系数加权平均值小于 A 线时,该埋深范围原位黄土层无自重湿陷变形;当室内试验测试自重湿陷系数加权平均值大于 A 线时,该埋深范围原位黄土层的自重湿陷变形沿 B 线变化的平均自重湿陷系数发展。由此可见,不同埋深范围黄土的自重湿陷系数门槛值不同;随着埋深增大,起始自重湿陷变形的自重湿陷系数在增大。

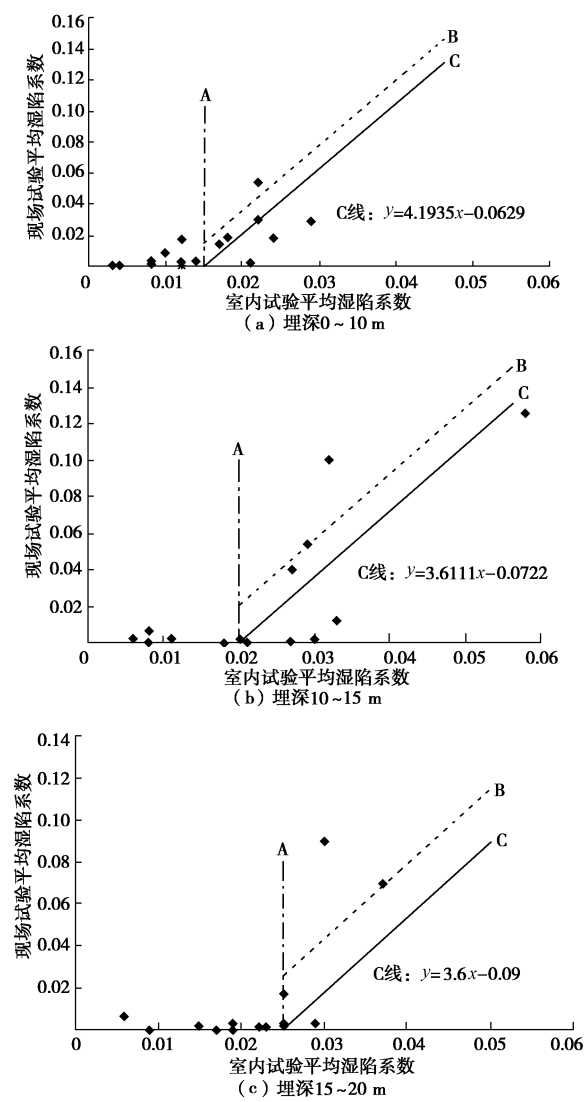


图 22 现场与室内试验平均湿陷系数的关系曲线

Fig. 22 Relationship between field soaking tests and laboratory experiments

实际上,探井或钻孔采取原状样室内试验测试埋深较大的自重湿陷性黄土一般为上部  $Q_2$  黄土。然而,关中地区  $Q_2$  黄土层原位浸水产生的自重湿陷变形很小,甚至因古土壤层的分布而产生隆起变形。蒲城电

厂、西安月登阁、西安财经学院新校区、临潼芷阳村、西安灞桥赵东村、长安区阳村、长安区高望堆村自重湿陷性  $Q_2$  黄土 (自重湿陷系数  $\geq 0.015$ ) 的平均湿陷系数分别为 0.038, 0.029, 0.030, 0.028, 0.036, 0.025, 0.021, 它们的平均值为 0.029。可见, 关中地区自重湿陷性  $Q_2$  黄土的平均湿陷系数小于 0.029 时, 该层黄土产生的自重湿陷变形一般小于 7.0 cm, 甚至因古土壤层分布可能会产生隆起变形。当上覆  $Q_3$  黄土无自重湿陷性或无  $Q_3$  黄土时, 一般属于非自重湿陷性黄土场地。

## 4 结 论

(1) 现场试坑浸水试验与室内单轴压缩浸水湿陷性试验在模拟应力条件、渗水条件、渗气条件、地层结构条件和土性条件等方面存在明显差异。大量的现场试验测试结果揭示了陇西地区、陇东—陕北—晋西地区、关中地区和其他地区场地浸水自重湿陷变形的实测值与计算值之间的关系, 陇西地区、陇东—陕北—晋西地区、关中地区和其他地区黄土自重湿陷变形计算值的修正系数分别为 2.0, 1.7, 1.2, 0.4。关中地区黄土场地的自重湿陷变形实测值与计算值之间的相关性较差。

(2) 黄土场地自重湿陷系数、自重湿陷变形、地层结构随深度的变化揭示了不同黄土地层的自重湿陷变形特征。通过现场试验实测不同埋深黄土的平均自重湿陷系数与室内试验测试自重湿陷系数的加权平均值之间的关系, 揭示 0~10 m, 10~15 m, 15~20 m 不同埋深范围黄土的湿陷变形特征不同, 原位黄土浸水产生自重湿陷变形时对应的室内试验自重湿陷系数的加权平均值依次为 0.015, 0.020, 0.025, 表明大厚度自重湿陷性黄土原位产生自重湿陷变形的自重湿陷系数的门槛值随埋深而增大。

(3) 场地的湿陷类型和自重湿陷变形的发展具有如下特点: ①具有中、强自重湿陷性的大厚度  $Q_3$  黄土场地的自重湿陷变形发展大, 室内试验和现场试验判定的场地类型一致; ②弱、中自重湿陷性  $Q_2$  黄土场地的自重湿陷变形发展小, 室内试验和现场试验判定的场地类型不一致; ③浅层无、弱自重湿陷性  $Q_3$  黄土与下伏弱、中自重湿陷性  $Q_2$  黄土场地的自重湿陷变形发展很小, 甚至会出现隆起变形, 室内试验和现场试验判定的场地类型不一致; ④浅层弱、中自重湿陷性  $Q_3$  黄土与下伏弱、中自重湿陷性  $Q_2$  黄土连续分布场地的自重湿陷变形发展较大, 室内试验和现场试验判定场地的类型基本一致。

(4) 关中地区不同场地  $Q_2$  黄土地层的自重湿陷

变形实测值一般小于 7.0 cm, 而计算值往往较大。该地区不同场地  $Q_2$  黄土自重湿陷系数的均值约为 0.029。关中地区  $Q_2$  黄土自重湿陷系数的门槛值可取 0.025。

## 参考文献:

- [1] 汪国烈. 甘肃省大厚度湿陷性黄土场地工程处理措施暂行规定[S]. 兰州: 甘肃省土木建筑学会, 甘肃省建设科技专家委员会, 2008. (WANG Guo-lie. Provisional regulations of engineering measure at site with a large depth loess in Gansu Province[S]. Lanzhou: The Civil and Architecture Society in Gansu Province, The Scientific Expert Committee of Civil and Architecture in Gansu Province, 2008. (in Chinese))
- [2] 姚志华. 关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 998 - 1006. (YAO Zhi-hua. New recognition of collapsibility evaluation and remnant collapse of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 998 - 1006. (in Chinese))
- [3] GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004. (GB 50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. 2004. (in Chinese))
- [4] 罗宇生. 湿陷性黄土地基的评价方法[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 87 - 91. (LUO Yu-sheng. Assessment of collapsibility of collapsible loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 87 - 91. (in Chinese))
- [5] 黄雪峰. 大厚度自重湿陷性黄土的湿陷变形特征、地基处理方法和桩基承载性状研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2007. (HUANG Xue-feng. Collapse deformation characteristics, foundation treatment method and pile bearing capacity behavior of large thickness self-weight collapsible loess strata site[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2007. (in Chinese))
- [6] 钱鸿缙, 涂光祉. 关中地区黄土的湿陷变形[J]. 土木工程学报, 1997, 30(3): 49 - 54. (QIAN Hong-jin, TU Guang-zhi. Experimental study on collapsible deformation of loess foundation in Guanzhong Region of Shaanxi in China[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(3): 49 - 54. (in Chinese))
- [7] 李大展, 何颐华, 隋国秀.  $Q_2$  黄土大面积浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 1 - 11. (LI Da-zhan, HE Yi-hua, SUI Guo-xiu. Study and test on large area immersion of  $Q_2$  loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 1 - 11. (in Chinese))
- [8] 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 - 389. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 382 - 389. (in Chinese))
- [9] 丁文士. 现场实测黄土自重湿陷变形量与室内试验湿陷量的相关分析[J]. 工程勘察, 1981(4): 19 - 20. (DING Wen-shi. Analysis on self-weight collapse deformation of loess between field and indoor tests[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1981(4): 19 - 20. (in Chinese))
- [10] 中铁西北科学研究院有限公司. 郑西客运专线湿陷性黄土路基关键技术研究: 湿陷性黄土地基工程特性及设计参数研究总报告[R]. 西安: 中铁西北科学研究院有限公司, 2009. (Northwest Research Institute Co Ltd of CREC. General report on engineering characteristics and design parameters of collapsible loess foundation on study of key techniques for collapsible loess road foundation of Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line[R]. Xi'an: Northwest Research Institute Co Ltd of CREC, 2009. (in Chinese))
- [11] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土地浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65 - 74. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65 - 74. (in Chinese))
- [12] 姚志华. 大厚度自重湿陷性黄土的水气运移和力学特性及地基湿陷变形规律研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2012. (YAO Zhi-hua. Water-air migration, mechanics characteristics and foundation collapse deformation of self-weight collapse loess with large thickness loess strata[D]. Chongqing: Logistics Engineering College, 2012. (in Chinese))
- [13] 机械工业勘察设计研究院. 西安财经学院新校区一期工程湿陷性黄土地现场试坑浸水试验报告[R]. 西安: 机械工业勘察设计研究院, 2004. (China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design. Report on soaking test of collapsible loess site of the first phase of the new campus of Xi'an Institute of Finance and Economics[R]. Xi'an: China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, 2004. (in Chinese))
- [14] 机械工业勘察设计研究院. 西安市地铁五号线月登阁试坑浸水试验报告[R]. 西安: 机械工业勘察设计研究院, 2014. (China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design. Report on soaking test of Yuedengge site in Xi'an Metro Line 5[R]. Xi'an: China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, 2014. (in Chinese))
- [15] 西安岩土工程新技术开发公司. 西安市地铁临潼线一期工程芷阳村试坑浸水试验报告[R]. 西安: 西安岩土工程新技术开发公司, 2014. (Xi'an Geotechnical Engineering New Technology Development Company. Report on immersion test of Zhiyang Village in the first phase engineering of Lintong Line of Xi'an Metro[R]. Xi'an: Xi'an Geotechnical Engineering New Technology Development Company, 2014. (in Chinese))
- [16] 西安市地下铁道有限责任公司. 西安地铁穿越湿陷性黄土工程性质及应对措施研究成果报告[R]. 西安: 西安市地下铁道有限责任公司, 2013. (Xi'an Metro Co Ltd. The research report on engineering behaviors and measures of tunnel passing collapsible loess strata in Xi'an Metro[R]. Xi'an: Xi'an Metro Co Ltd, 2013. (in Chinese))
- [17] 机械工业勘察设计研究院. 宁夏宁东镇湿陷性黄土试坑浸水试验报告[R]. 西安: 机械工业勘察设计研究院, 2013. (China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design. Report on immersion test in Ningdong town in Ningxia[R]. Xi'an: China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, 2013. (in Chinese))
- [18] 刘保健. 公路路基沉降过程试验与理论分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (LIU Bao-jian. Test and theoretical analysis on the process of settlement of highway subgrade[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [19] 中国有色金属工业总公司西安勘察设计院. 西安市地铁临潼线一期工程灞桥赵东村试坑浸水试验报告[R]. 西安: 中国有色金属工业总公司西安勘察设计院, 2014. (Xi'an Engineering Investigation and Design Institute in China Nonferrous Metals Industry Corporation. Report on immersion test in Zhaodong Village of the first phase of Lintong Line engineering in Xi'an Metro[R]. Xi'an: Xi'an Engineering Investigation and Design Institute in China Nonferrous Metals Industry Corporation, 2014. (in Chinese))
- [20] 黄雪峰. 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. A study progress on in-situ soaking test on collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 222 - 228. (in Chinese))