

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0089-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.019

兰州砂质黄土的湿陷变形特性

吴爽¹, 赵权利¹, 高玉广², 梁潇丹¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院 西安 710054; 2. 甘肃省建筑科学研究院 岩土工程研究所 兰州 730000)

摘要: 通过在兰州和平镇探井取不同深度 Q₃ 黄土的试样, 在室内做了颗粒分析, 测定了其常规物理力学指标, 并测了不同深度土样的湿陷系数。研究表明: 该地区黄土湿陷性以中等和弱湿陷为主, 少量黄土湿陷性强烈, 湿陷系数的峰值随深度增加而逐渐变小, 湿陷的敏感性一般。该地区不同深度的砂质黄土在不同压力下会表现出不同的湿陷特性。随黄土层位加深, 上部荷载对其湿陷性影响逐步减弱。在同一压力作用下, 上中层黄土的湿陷系数较大, 下层黄土的湿陷系数较小。

关键词: 砂质黄土; 湿陷性; 上部荷载; 物理指标

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Collapsibility And Deformation of Sandy Loess in Lanzhou

WU Shuang¹, ZHAO Quanli¹, GAO Yuguang², LIANG Xiaodan¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054; 2. Institute of geotechnical engineering, Gansu Academy of Building Research, Lanzhou 730000)

Abstract: Taking samples of different depths of Q₃ loess at the exploratory well of Heping Town in Lanzhou, the particle analysis was made in the laboratory. The conventional physical and mechanical indexes were measured, as well as the coefficient of collapsibility of soil samples with different depths. The collapsibility of loess in this area is mainly medium and weak collapsibility, and a small amount of loess is collapsible. The peak of collapsibility coefficient decreases gradually with the increase of depth, and the sensitivity of collapsibility is general. The sandy loess with different depths will show different collapsibility under different pressures. As the Loess horizon deepens, the influence of upper load on Collapsibility gradually decreases. Under the same pressure, the collapsibility coefficient of the upper and middle loess is larger, and the collapsibility coefficient of the lower loess is smaller.

Key words: sandy loess; collapsibility; upper load; physical index

湿陷性是黄土的一种特殊的工程地质性质, 即土体在一定的压力下变形稳定后, 遇水浸湿而发生附加下沉的性质^[1-2]。晚更新世黄土(马兰黄土) Q₃ 为典型黄土, 质地疏松, 无层理, 大孔结构发育, 有强湿陷性^[3]。公路等线性工程因湿陷性造成的病害甚多^[4-6], 高层建筑和高架桥的桩基中, 要考虑自重湿陷性黄土的负摩阻力^[7-8]。国内学者对黄土湿陷变形进行了大量的研究^[9-14]。

本文在兰州和平镇探井取不同深度 Q₃ 黄土试样, 做了颗粒分析并测定了其常规物理力学指标。

用双线法获得土样的不同深度的湿陷系数(压力最大施加到 1 600 kPa), 分析了荷载对湿陷系数的关系及其对最终湿陷量的影响。为湿陷性黄土地区湿陷量的计算提供参考。

1 黄土的物理性质指标

试验所取土样选取兰州市榆中县和平镇袁家营村东侧约 400 m 处(E103° 57'40.21", N35° 59'41.90") 的黄土场地。地貌单元属黄河南岸 III 级阶地, 地下

收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41502286), 中央高校基本科研业务费资助项目(No.310826171008), 陕西省重点研发项目(2017ZZDCXL-SF-03-01-01)

作者简介: 吴爽(1993-), 女, 重庆万州人, 硕士研究生, 主要从事工程地质的研究。

水水位埋深大于 70 m, 场区内 Q₃ 黄土层厚度 36 m。黄土呈棕黄色, 稍密, 稍湿, 可见大孔隙。

取样探井深度 30 m, 全部为 Q₃ 黄土。按垂直间距 1 m 取样, 共 30 组, 进行常规物理指标测试, 测试指标包括比重 (G)、含水率 (w)、密度 (ρ)、塑限 (w_p)、液限 (w_l); 计算获得干密度 (ρ_d) 饱和度 (Sr)、与塑性指数 (Ip) 等。曲线采用 Bettersize2000 智能激光粒度仪对每个土样的颗粒组成进行分析, 得到随深度变化粘粒含量和砂粒含量、粉粒含量以及相关物理指标分布的曲线, 结果如图 1。

由图 1 可知, 该地区黄土在 15 m 深度的范围内含水率随深度增大, 15 m 以下在 15% 左右变化, 反映出大气蒸发影响范围可达 15 m。液限为 21% ~ 28%, 塑限为 10% ~ 20%, 塑性指数为 7 ~ 10。塑限、液限随深度无明显变化, 但二者随深度的变化趋势大体一致; 塑性指数和干密度随土层深度增加而增大, 塑性指数越大, 土层的持水性就越强, 因此含水率也越大。粘粒含量在 10% 左右, 砂粒含量在 20% ~ 30% 之间, 其中粉粒含量在 60% ~ 70% 之间, 土层较均匀, 属于砂质黄土。自重湿陷系数随深度的增加呈现出先增大后减小的趋势, 其中部湿陷性最大。

2 不同条件下黄土的湿陷性

按所取黄土垂直间距 1 m 削取环刀样, 环刀尺寸直径为 8 cm, 高 2 cm, 采用双线法测试湿陷系数, 依次施加 12.5 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、

300 kPa、400 kPa、500 kPa、600 kPa、700 kPa、800 kPa、1 600 kPa 级的压力。试验仪器为 WB-1C 型三联固结仪。表 1 为不同深度的最大湿陷系数。

《湿陷性黄土地区建筑规范 GB50025》^[15] 规定测定湿陷系数 δ_s 的试验压力: 1) 基底下 10 m 以内的土层应用 200 kPa, 10 m 以下至非湿陷性黄土层顶面, 应用其上覆土的饱和自重压力 (当大于 300 kPa 压力时, 仍应用 300 kPa); 2) 当基底压力大于 300 kPa 时, 宜用实际压力; 3) 对压缩性较高的新近堆积黄土, 基底下 5 m 以内的土层宜用 100 ~ 150 kPa 压力, 5 ~ 10 m 以下至非湿陷性黄土层顶面, 应分别用 200 kPa 和上覆土的饱和自重压力。设一建筑基础底面尺寸为 100 m × 20 m, 埋深 2 m, 基底压力分别为 200 kPa, 600 kPa。自基础底面起算, 直至 30 m。饱和自重由试验测得的干密度与比重计算得出。每米自重湿陷量、规范修正后每米自重湿陷量、规范湿陷量 (实际湿陷量)、修正湿陷量分别由公式 (1)、(2)、(3)、(4) 得出。

$$\Delta_{zsi} = \delta_{zsi} h_i \tag{1}$$

$$\Delta_{zsi} = \beta_0 \delta_{zsi} h_i \tag{2}$$

其中 β₀ —修正系数, 取 1.5。

$$\Delta_{si} = \delta_{si} h_i \tag{3}$$

$$\Delta_{si} = \beta \delta_{si} h_i \tag{4}$$

其中 β —考虑地基土侧向挤出等因素的修正系数。基底下 0 ~ 5 m 深度内, 取 1.5。基底下 5 ~ 10 m 深度内, 取 1。

实际压力由饱和自重压力与附加应力求得, 湿陷系数由图 3 得出。计算结果如表 2 所示。现场浸

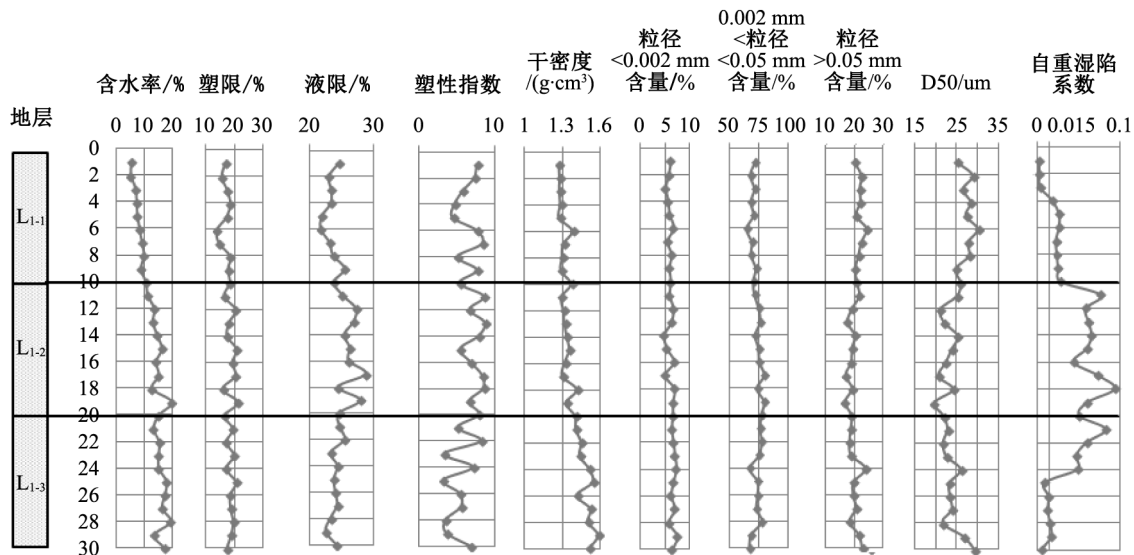


图 1 和平镇黄土基本物理指标随深度变化曲线

Fig.1 Basic physical parameters of Hepingzhen loess with respect to depth

水湿陷量通过现场浸水试验得出。

在现场进行了浸水试验，浸水试坑的直径为 20 m，浸水历时 70 天，注入水量为 4 364 m³。试坑内设深标点 6 个，最深的深标点设置为 21 m。埋置深度为 3 m 的深标点总的沉降量为 650 mm。埋置深度为 6 m 的深标点总的沉降量为 562 mm。埋置深度为 12 m 的深标点总的沉降量为 47 mm。埋置深度为 15 m 的深标点总的沉降量为 31 mm。埋置深度为 18 m 的深标点总的沉降量为 72 mm。埋置深度为 21 m 的深标点总的沉降量为 22 mm。

由表 2 可知自重湿陷量约现场浸水湿陷量的两

表 1 不同深度的最大湿陷系数

Tab.1 Maximum collapsibility coefficient at different depths

深度 /m	最大湿陷系数	最大湿陷系数 对应压力 /kPa
1	0.027	150
2	0.035	700
3	0.048	600
4	0.126	800
5	0.065	800
6	0.065	300
7	0.079	800
8	0.097	800
9	0.056	400
10	0.037	400
11	0.078	200
12	0.071	800
13	0.111	800
14	0.080	300
15	0.061	300
16	0.057	200
17	0.077	400
18	0.123	500
19	0.062	300
20	0.058	600
21	0.102	300
22	0.061	400
23	0.061	300
24	0.062	800
25	0.011	300
26	0.014	400
27	0.040	150
28	0.021	300
29	0.054	800
30	0.014	150

倍。由现场浸水试验可得深标点随着深度的增加其沉降量逐渐减小。也就是说，浸水试验中，长期浸水后湿润锋以下的黄土仍处于非饱和状态^[16]。自重湿陷系数是在室内黄土饱和状态下测出的，浸水试验中湿润锋以下的黄土仍处于非饱和状态，同时现场浸水的湿陷起始压力和湿陷系数的室内测试条件不同，故而自重湿陷量与现场浸水湿陷量存在较大的差异。若按照规范再加以修正，其湿陷量相差更多，会使得在实际工程中高估其湿陷性。

在室内试验中，规范所用的湿陷系数与实际压力对应的湿陷系数存在一定的差异。在湿陷性大的土层，实际的湿陷系数大于规范所用湿陷系数，在湿陷性小的土层，实际的湿陷系数小于规范所用湿陷系数。若用规范来确定该地区的湿陷系数与湿陷量，必定导致对湿陷性小的土层过高估计其湿陷性的危害，而对湿陷性大的土层的湿陷性危害估计不足。

当基底压力为 200 kPa 时，实际压力对应的湿陷量比规范的湿陷量多约 40 mm。若按规范修正，其修正后的湿陷量比实际湿陷量多约 100 mm。故在该地区，基底压力小于 300 kPa，不修正的湿陷系数与实际湿陷系数接近。当基底压力为 600 kPa 时，实际压力对应的湿陷量比基底为 200 kPa 时的实际压力对应的湿陷量少约 90 mm。故该地区当基底压力较大时，湿陷量比较小。在该地区实际工作中，对不同深度土的湿陷性应当采用不同的湿陷系数来判定。按不同深度采用其实际的湿陷系数，可使该地区自重湿陷性黄土湿陷性评价趋于合理，有效节约大量地基处理费用以及增加其安全性。

3 结论

1) 该地区的黄土属于砂质黄土。在 15 m 深度以上含水量与深度呈正相关性，15 m 以下稳定于 15% 左右。其液限为 21% ~ 28%，塑性指数为 7 ~ 10。干密度随土层深度增加而增大。

2) 该地区黄土湿陷性以中等和弱湿陷为主，少量黄土湿陷性强烈，湿陷系数的峰值随深度增加而逐渐变小，湿陷的敏感性一般。

3) 在该地区实际工作中，对不同深度土的湿陷性应当采用不同的湿陷系数来判定。按不同深度采用实际的湿陷系数，可使该地区自重湿陷性黄土湿陷性评价趋于合理，有效节约大量地基处理费用以及增加其安全性。

表2 不同深度的实际湿陷量与规范所用湿陷量
Tab.2 Actual collapsibility and collapsibility used by standard at different depths

深度/m	自重湿陷系数 δ_{zs}	每米自重湿陷量/mm	规范修正自重湿陷量/mm	基底压力 200 kPa				基底压力 600 kPa					
				规范对应压力/kPa	规范所用湿陷系数 δ_{si}	规范湿陷量/mm	规范修正湿陷量/mm	实际压力/kPa	实际湿陷系数 δ_{si}	实际湿陷量/mm	实际压力/kPa	实际湿陷系数 δ_{si}	实际湿陷量/mm
3	0.004	4.0	6.0	200	0.040	39.7	59.6	217	0.040	39.7	616	0.048	48.1
4	0.020	20.0	30.0	200	0.111	110.5	165.8	234	0.111	110.5	633	0.121	120.5
5	0.028	27.9	41.9	200	0.059	59.5	89.2	252	0.059	59.5	649	0.060	60.4
6	0.028	27.5	41.3	200	0.053	52.6	78.9	269	0.053	52.6	665	0.062	62.3
7	0.024	23.8	35.7	200	0.037	37.5	56.2	286	0.064	64.0	680	0.077	76.5
8	0.025	25.2	37.8	200	0.043	42.8	42.8	303	0.058	58.0	694	0.091	91.4
9	0.027	26.5	39.8	200	0.038	38.2	38.2	319	0.052	51.9	707	0.050	49.6
10	0.030	29.5	44.3	200	0.030	29.5	29.5	336	0.033	32.6	720	0.033	33.0
11	0.078	77.6	116.4	200	0.078	77.6	77.6	352	0.064	63.6	731	0.057	56.5
12	0.060	59.7	89.6	200	0.060	59.7	59.7	368	0.064	64.2	743	0.068	68.3
13	0.063	62.9	94.3	233	0.063	62.9	62.9	384	0.097	96.7	753	0.109	109.0
14	0.067	66.6	99.9	250	0.067	66.6	66.6	400	0.057	57.0	764	0.046	46.5
15	0.061	60.9	91.4	268	0.034	33.9	33.9	415	0.045	45.2	774	0.035	34.6
16	0.045	45.2	67.7	286	0.045	45.2	45.2	431	0.033	33.0	783	0.011	11.0
17	0.075	74.8	112.1	300	0.075	74.8	74.8	446	0.077	77.4	792	0.051	50.6
18	0.095	94.6	141.9	300	0.095	94.6	94.6	462	0.113	112.8	802	0.112	112.3
19	0.062	61.6	92.4	300	0.062	61.6	61.6	478	0.058	57.8	811	0.051	51.0
20	0.052	52.0	78.0	300	0.052	52.0	52.0	493	0.054	54.1	820	0.032	32.4
21	0.084	83.6	125.4	300	0.102	102.1	102.1	509	0.071	71.1	830	0.047	46.7
22	0.061	60.5	90.8	300	0.060	60.1	60.1	525	0.060	60.1	840	0.048	48.3
23	0.048	48.1	72.2	300	0.061	61.0	61.0	542	0.037	37.4	849	0.015	15.0
24	0.050	50.2	75.2	300	0.045	44.8	44.8	558	0.056	55.6	860	0.052	52.3
25	0.009	9.4	14.1	300	0.011	11.0	11.0	575	0.007	7.1	870	0.007	6.8
26	0.014	14.2	21.3	300	0.012	12.0	12.0	591	0.013	12.7	880	0.008	7.5
27	0.013	13.4	20.0	300	0.015	14.6	14.6	608	0.017	17.2	891	0.014	14.4
28	0.016	16.0	24.0	300	0.021	21.2	21.2	625	0.010	10.5	902	0.005	5.2
29	0.045	44.7	67.0	300	0.034	34.0	34.0	642	0.049	48.6	914	0.053	53.2
30	0.014	14.3	21.5	300	0.011	11.0	11.0	659	0.005	4.7	925	0.001	0.8
总湿陷量/mm	1 194.5	1 791.7				1 410.8	1 560.7			1 455.4			1 363.9
现场浸水自重湿陷量/mm	656												

参考文献:

- [1] 冯连昌, 郑晏武. 中国湿陷性黄土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.
- [2] GB 50025—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.
- [3] 孙建中, 黄土学, 中篇, 黄土岩土工程学[M]. 西安: 西安地图出版社, 2013.
- [4] 高凌霄, 栾茂田, 杨庆. 基于微结构参数主成分的黄土湿陷性评价[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1921-1926.

- [5] 井彦林, 仵彦卿, 杨丽娜, 等. 基于数据挖掘技术的黄土湿陷性评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 130-134.
- [6] 刘悦, 王家鼎. 黄土湿陷性评价中的模糊信息优化处理方法[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2000, 30(1): 78-82.
- [7] 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 黄土湿陷性与土性指标的关系及其预测模型[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 120-128.
- [8] 王家鼎. 地理学研究中的模糊信息(下转第112页)

如果说随机性研究,要解决的关键问题是,建立二值逻辑支撑的、概率理论的公理化体系的话;那么模糊性研究要解决的关键问题是,在近似推理逻辑支撑下,解决基于相关关系的知识转换算法实现。

这是成功的随机性研究的启示,失败的模糊集合论研究的启示,更是无法取得实质性进展的当今模糊性研究的启示。

2 结语

集合中元素具有像电子一样的“不可分割性”不容挑战,所以破坏了“元素不可分割性”的模糊集合,是一种破坏性概念,是导致模糊集合论不成功的根本原因。须研究的模糊性,不是“元素部分

属于模糊集合”呈现的虚拟模糊性,而是因信息不完备,不完整,目标值的“真值”人们无法知道只能确定真值近似产生的不确定性。模糊性研究要解决的基本问题是通过建立一种支撑逻辑,解决“计算不可重复”、“计算结果不唯一”和“不是相对最优近似”问题;实质性问题,是解决相关关系下知识转换的算法实现。

参考文献:

- [1] Zadeh L.A. Fuzzy Sets. Information and Control. 1965(8): 338-353.
 [2] 李德毅, 杜鹞著. 不确定性人工智能 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(责任编辑 李新)

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] 刘建成, 顾永宁. 基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真 [J]. 工程力学, 2003, 20(5): 155-162.
 [2] 余志祥, 许浒, 吕蕾. 落石冲击对山区桥梁墩柱破坏的影响 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(6): 86-91.
 [3] BERTHET-RAMBAUD P, TIMSAH Y, DAUDEVILLE L, et al. Finite Element Modelling of Concrete Protection Structures Submitted to Rock Impacts; proceedings of the Proceedings of 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, F, 2003[C].

- [4] 崔堃鹏, 夏超逸, 刘炎海, 等. 高速铁路桥墩汽车撞击力的数值模拟与特性分析 [J]. 桥梁建设, 2013, 43(6): 57-63.
 [5] 李裕春, 等. ANSYS11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
 [6] FUJIKAKE K, LI B. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical valuation [J]. Journal of Structure, ASCE, 2009, 135(8): 938-950.
 [7] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-02-2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
 [8] 张路青, 杨志法, 许兵. 滚石与滚石灾害 [J]. 工程地质学报, 2004(3): 225-231.

(责任编辑 李新)

(上接第 93 页)

- 优化处理方法 [J]. 地理与地理信息科学, 1999, 15(1): 75-80
 [9] 刘祖典. 影响黄土湿陷系数因素的分析 [J]. 工程勘察, 1994(5): 6-11.
 [10] 高凌霄, 赵天雁. 黄土湿陷系数与物性指标间的定量关系 [J]. 大连民族大学学报, 2004, 6(5): 63-65.
 [11] 李萍, 李同录. 黄土物理性质与湿陷性的关系及其工程意义 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 506-512.
 [12] 谢婉丽, 王家鼎, 张新军, 等. 模糊信息优化方法在黄土湿陷性评价中的应用 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 95-99.

- [13] 李瑞娥, 谷天峰, 王娟娟, 等. 基于模糊信息优化技术的黄土湿陷性评价 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(2): 213-218.
 [14] 韩晓萌, 王家鼎, 王煜, 等. 高速铁路地基黄土湿陷性评价中的 ANFIS 方法 [J]. 地理科学, 2008, 28(6): 833-837.
 [15] 中华人民共和国水电部. 土工试验方法标准 [M]. 北京: 中华计划出版社, 1989.
 [16] 罗奇斌, 王家鼎, 康东卫, 等. 湿陷性黄土试坑浸水试验中土压力的变化情况 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 88-92.

(责任编辑 李新)