

# 太原某工程场区黄土的湿陷性研究

杨国兴

(总装备部工程设计研究总院, 北京 100028)

**【摘要】** 以大量工程地质勘察成果和对场区黄土的物理力学性质、湿陷性以及微观结构特征研究为基础, 对场区黄土湿陷性进行初步的探讨。

**【关键词】** 黄土; 湿陷性; 湿陷性黄土; 物理力学性质

**【中图分类号】** TU 44

## Study on Collapsibility of Loess in A Site of Taiyuan, China

**【Abstract】** Physical characteristics, mechanical characteristics and microstructure characteristics of loess in a site of Taiyuan are studied on the basis of the results of engineering geologic investigation. On this basis, collapsibility of loess are studied.

**【Key Words】** Loess; Collapsibility; Collapsible loess; physical characteristics; mechanical characteristics

### 0 引言

场区地处黄土高原东部, 主要分布在剥蚀堆积黄土丘陵区, 近山坡处冲沟发育, 多梁峁地形及树枝状冲沟, 以缓坡黄土丘陵地貌特征为主。此地段最为发育的黄土是沿冲沟和河流两岸呈带状展布以冲积成因的上更新统(Q<sub>3</sub>)黄土和遍布全区构成黄土塬、梁、峁、丘陵斜坡主体的表部, 其分布不受高程限制的风积成因上更新统(Q<sub>3</sub>)黄土。

场区分布最广的是数米至数十米新生界第四系地层, 据钻孔可知最深可达 140 余米, 成因类型主要为风积、冲积、洪积三大类。风积物分布在山前地带, 冲积物沿北川河及其支流呈带状展布, 洪积物于山前各黄土沟谷的沟掌部位出露。岩性主要是松散的砂砾石、砂及粉土、粉质粘土。出露的地层有下、中更新统的午城组(Q<sub>1</sub>)和离石组(Q<sub>2</sub>), 上更新统马兰组(Q<sub>3</sub>), 全新统(Q<sub>4</sub>)。

黄土的湿陷性常威胁和破坏工程建筑的正

常使用, 因此对黄土的湿陷性研究具有现实意义。湿陷性黄土发生湿陷的原因是很复杂的, 国内外对这个问题讨论得很热烈, 有着各种各样的解释, 直到目前为止尚无定论。但对湿陷性黄土的微观结构状态是湿陷的主要基因的认识是统一的<sup>[1~3]</sup>。本文认为“加固凝聚力降低或消失假说”<sup>[1]</sup>略为完善些。这个假说的理论是基于水膜楔入作用和胶结物溶解作用下, 加固凝聚力(由土颗粒周围的盐类结晶胶结作用而引起的)受到了破坏, 同时也破坏了土的结构, 因而发生湿陷。处于较为干燥状态的黄土, 其含水量较小, 因此土骨架固体表面水膜较薄, 一旦遇水水膜便力图恢复自己应有的厚度, 水膜增厚的过程必然使土颗粒散化, 这便是水膜楔入作用。溶解作用是在水的楔入作用之后产生的。溶解作用比较缓慢, 在一定的时间过程中, 也是促进湿陷的因素之一。水在湿陷性黄土的湿陷过程中, 主要是水膜楔入作用。

**作者简介:** 杨国兴, 1969 年生, 男, 汉族, 山东招远人, 1991 年毕业于中国地质大学(武汉)水文地质工程地质专业, 工学硕士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察与设计工作。

## 1 黄土的湿陷性特征

### 1.1 黄土的微观结构特征

在场区黄土物理力学性质研究基础上,对黄土湿陷性的认识先从其微观结构特征来分析。根据马兰黄土(Q<sub>3</sub>)的原状土扫描电镜显微图像(图1)观察结果,黄土以粒状颗粒为主,颗粒形状多呈棱角状,少数磨圆度较好,碳酸钙未被淋溶,颗粒连接以点接触为主,胶结程度弱,存在明显的架空空隙,当水侵入并削

弱连接强度时,在一定压力下就会失去稳定,孔隙周围的颗粒落入孔内,造成湿陷现象,尤其是点接触的架空孔隙更易产生湿陷。胶结物主要是粘土矿物伊利石,呈鳞片状粘附在粗颗粒表面,胶结物的含量较少,成薄膜状包着颗粒,以颗粒直接接触为主,接触点处有极少的盐晶和粘胶微粒,连接脆弱,属接触式胶结。因而场区马兰黄土从微观结构特征上看其湿陷性较强。

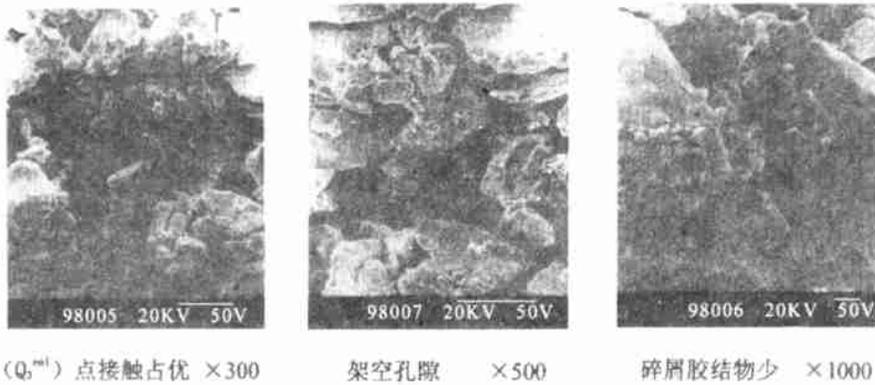


图1 原状土显微结构图片

### 1.2 黄土的湿陷系数

湿陷系数是研究与评价黄土湿陷性的重要参数。湿陷系数的求得最主要的方法是室内压缩试验,文中湿陷系数压缩试验按《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25-90)附录六<sup>[5]</sup>要求,采用双线法压缩试验。首先对场区黄土地层的湿陷系数和自重湿陷系数进行了统计,见表1。

表1 场区黄土湿陷性质指标平均值统计表

地形地貌	年代	湿陷系数 $\delta_s$	自重湿陷系数 $\delta_{zs}$
冲沟、冲沟边缘	Q <sub>3</sub> <sup>pl</sup>	0.021~0.050	0.018~0.046
冲沟边缘、斜坡坡底	Q <sub>3</sub> <sup>pl</sup>	0.027~0.104	0.005~0.054
缓斜坡	Q <sub>3</sub> <sup>pl</sup>	0.013~0.061	0.014~0.054
缓斜坡	Q <sub>2</sub> <sup>pl</sup>	0.002~0.011	

在调查的地貌单元上,湿陷性黄土的厚度约为18~20 m,非湿陷性黄土的顶面基本与

中更新统地层的顶面相一致,局部厚差约3 m左右。该区缓坡丘陵地貌地段,中更新统黄土的湿陷系数平均值小于0.015,属非湿陷性黄土,层厚不详;上更新统和新近堆积黄土的湿陷系数平均值在0.03~0.07之间,属中等湿陷性黄土,见表2,冲积和风积的上更新统黄土的沉积层序是并列的。

### 1.3 黄土的湿陷系数与物理力学性质指标的关系

通过对该区具湿陷性的上更新统黄土590个土样的统计计算,其中风积的土样510个,冲积的土样80个,发现湿陷系数与其它物理力学性质指标关系密切,特别是天然重度、干重度、孔隙比和天然含水量。从湿陷系数与上述指标的散点图看(图2和图3),风积黄土的各指标之间具有较好的分布规律特征,冲积和新近堆积黄土可能由于参加统计的样本数

较少,离散点规律性差。这里仅讨论场区分布最广的上更新统风积黄土的湿陷系数与其它

物理力学性质指标的分布规律,见表3。

表2 黄土湿陷与时代关系表

时代	湿陷系数 $\delta_s$ 平均值	湿陷类型	常见层厚 /m
中更新统 $Q_2^{pl}$	<0.015	非湿陷性黄土	未见底
上更新统 $Q_3^{pl}$	0.047	中等湿陷性黄土	16~18
上更新统 $Q_3^{sl}$	0.042	中等湿陷性黄土	16~18
新近堆积 $Q_4^{pl}$	0.039	中等湿陷性黄土	1~2

表3 场区  $Q_3^{sl}$  黄土湿陷系数与物理力学性质指标统计表

深度 $H/m$	湿陷系数 $\delta_s$	天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	干重度 $\gamma_d/(kN \cdot m^{-3})$	孔隙比 $e$	天然含水量 $w/\%$	塑性指数 $I_p$	压缩系数 $a_{1-2}/(MPa^{-1})$
1	0.058 0	14.97	13.30	1.029	11.3	9.7	0.501 0
2	0.058 0	15.02	13.40	0.998	10.6	9.4	0.332 0
3	0.055 2	15.30	13.60	0.987	11.6	9.6	0.419 8
4	0.055 8	14.96	13.55	1.004	10.8	9.6	0.406 6
5	0.047 8	15.00	13.50	1.005	11.3	9.6	0.306 3
6	0.050 8	14.97	13.57	1.014	11.4	9.6	0.292 0
7	0.050 3	14.78	13.47	1.020	10.5	9.4	0.329 3
8	0.040 5	14.73	13.57	1.036	10.7	9.3	0.313 5
9	0.047 8	14.73	13.43	1.026	9.8	9.4	0.227 0
10	0.047 0	14.85	13.40	1.036	10.8	9.6	0.221 5
11	0.060 5	15.10	13.67	1.050	10.4	9.6	0.358 8
12	0.035 8	15.25	13.67	0.980	10.1	9.5	0.172 0
13	0.052 3	15.37	13.90	0.989	10.9	9.6	0.182 3
14	0.034 0	15.47	13.93	0.978	11.2	9.5	0.199 0
15	0.036 3	15.40	13.83	0.966	11.9	9.8	0.206 0
16	0.027 7	15.65	14.03	0.956	11.9	9.7	0.149 6
17	0.042 5	16.40	14.75	0.908	11.0	9.3	0.135 0
18	0.008 5	17.60	15.55	0.804	12.1	9.6	0.118 5
19	0.008 0	16.88	15.00	0.881	14.5	9.5	0.140 7
20	0.013 0	17.27	15.60	0.856	13.6	9.8	0.132 5

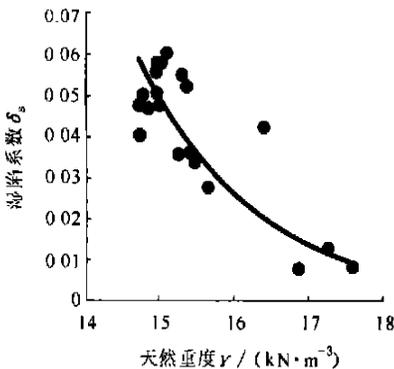


图2 湿陷系数与天然重度散点图( $Q_3^{sl}$ )

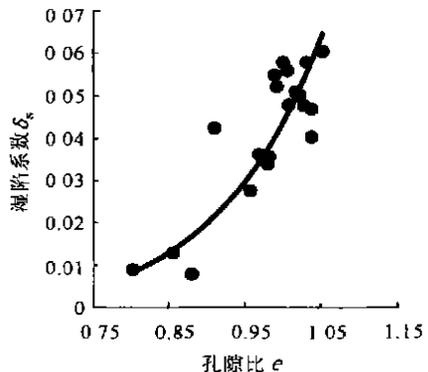


图3 湿陷系数与孔隙比散点图( $Q_3^{sl}$ )

从散点图中,可以发现以下规律:

1)除湿陷系数与塑性指数散点图以外,其它散点图表现出较强的相关性,拟合曲线呈指数型或幂函数型,规律性较好。

2)天然含水量、天然重度、干重度与湿陷系数成较明显的指数负相关关系,即随着湿陷系数的减小而增大;孔隙比、压缩系数与湿陷系数成明显的正相关关系,前者为指数关系,后者为乘幂曲线关系。这与黄土物理力学参数作相关分析时得到的结论是一致的。

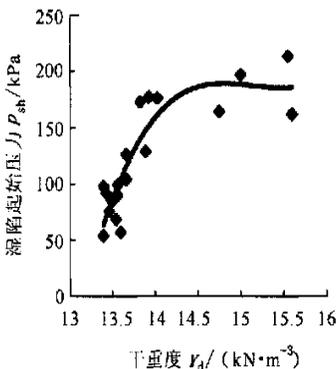
3)天然重度、干重度和孔隙比与湿陷系数相关关系相对较好,说明天然重度、干重度和孔隙比对场区湿陷系数的影响比较大。

4)该区天然含水量对湿陷系数的影响不显著,离散点的相关性一般,分布特征不显著。

5)塑性指数与湿陷系数的相关性较差,规律不清。

#### 1.4 湿陷起始压力

场区黄土的湿陷起始压力值是根据双线法压缩试验湿陷系数取 0.015 时取得的,绘制湿陷起始压力与饱和自重压力深度关系曲线以及一些对其有影响的物理指标离散点图,见图 4、图 5。



4 湿陷起始压力与干重度散点图(Q3<sup>old</sup>)

从图中可以看出:

- 1)湿陷起始压力值随深度的增加而增大;
- 2)湿陷起始压力值小于饱和自重压力值,自重湿陷性特征明显;

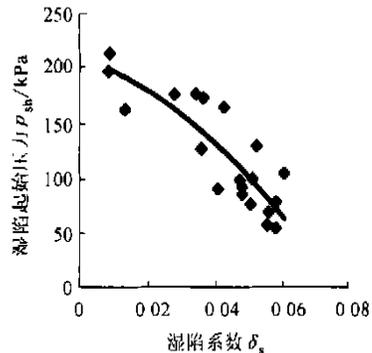
3)湿陷起始压力值随孔隙比的减小而增大;

4)湿陷起始压力值随天然含水量的增大而增大,散点图有些分散,但总的趋势还是较明显,塑性指数与湿陷起始压力值的相关性较差,规律不清;

5)湿陷起始压力值与湿陷系数呈负相关,离散点规律性好,相关性强,说明黄土湿陷起始压力所表现的湿陷敏感程度,与湿陷系数所表现的湿陷强烈程度是有相关性的;

6)湿陷起始压力值随干重度的增大而增大,其增大的趋势不是直线型的,是三次方抛物线型的,曲线的拐点出现在干重度为  $14.2 \text{ kN/m}^3$  左右。

湿陷起始压力在某种意义上表示土浸水后的结构强度,而结构强度是由构成土骨架的颗粒接触点的连接强度所决定,孔隙比越小,土越紧密,干重度越大,土越密实,单位体积内接触点相对越多,连接强度也必然越高,因而湿陷起始压力则越大,反之则小<sup>[1]</sup>。从图中和该区黄土的微观结构特征分析中,都可印证场区马兰黄土具有以上特点。



5 湿陷起始压力与湿陷系数散点图(Q3<sup>old</sup>)

#### 1.5 湿陷类型与湿陷等级<sup>[4]</sup>

地基土湿陷类型和湿陷等级的确定是依据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25-90)<sup>[5]</sup>规定,按室内压缩试验累计的计算自重湿陷量  $\Delta_s$  和总湿陷量  $\Delta_s$  判定。计算结果见表 4。

表4 湿陷类型与湿陷等级计算表

时代	湿陷系数 $\delta_s$ 平均值	自重湿陷系数 $\delta_{zs}$ 平均值	平均厚度 $h/\text{cm}$	总湿陷量 $\Delta_s/\text{cm}$	计算自重湿陷量 $\Delta_{zs}/\text{cm}$
Q <sub>4</sub>	0.039	0.032	100	70~49	48~33.6
Q <sub>3</sub>	0.045	0.028	1 600		
Q <sub>2</sub>	<0.015	<0.015			

该场区的湿陷类型根据计算结果,计算自重湿陷量  $\Delta_{zs} > 7 \text{ cm}$ ,判定为自重湿陷性黄土场地。地基土的湿陷等级按《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25-90)表 2.3.7<sup>[5]</sup>判定,场区丘陵斜坡的黄土为Ⅲ级自重湿陷性黄土,实际上描述为Ⅱ级~Ⅳ级自重湿陷性黄土更准确一些。

## 2 小结

通过对该场区黄土的湿陷性特征研究,确认该场区黄土湿陷性指标与 GBJ 25-90 规范附录二<sup>[5]</sup>中的数据有较大出入,见表 5。判定场区黄土丘陵斜坡的黄土为Ⅱ~Ⅳ级自重湿陷性黄土。通过数值计算拟合,发现上更新统

风积黄土的湿陷系数与物理力学性质指标之间相关关系,并依据得到的相关方程推算出上更新统风积黄土湿陷系数为 0.015 时,相应各物理力学性质指标的界限值见表 6。

计算自重湿陷量  $\Delta_{zs}$  中的修正系数  $\beta_0$  取值建议不能按《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ 25-90)<sup>[5]</sup>取值 0.5。因为场区湿陷性黄土的物理力学性质指标的特征,与陇西地区、陇东、陕北地区和关中地区的黄土特征有相似的地方,所以在本文和实际工作中判定场区地基土的湿陷等级时,修正系数取值 1.0~0.7,该系数应在以后的工作中根据多次的原位载荷试验进行调整修正。

表5 场区湿陷性黄土的湿陷指标与规范中数据比较

分类	湿陷性黄土层厚度 /m	地下水埋藏深度 /m	湿陷系数 $\delta_s$	自重湿陷系数 $\delta_{zs}$
规范	1~4	5~10	0.032~0.059	非
实际	1~20	大于 30	0.020~0.083	0.010~0.054

表6 场区 Q<sub>3</sub><sup>ol</sup> 黄土物理力学性质指标湿陷界限值

湿陷系数 $\delta_s$	含水量 $w/\%$	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	干重度 $\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 $e$	压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	湿陷起始压力 $p_{sh}/\text{kPa}$
0.015	13.4	16.9	15.1	0.866	0.125	188

## 参 考 文 献

- 1 钱鸿缙等. 湿陷性黄土地基. 北京:中国建筑工程工业出版社,1987
- 2 郑晏武. 中国黄土的湿陷性. 北京:地质出版社,1982
- 3 冯连昌等. 中国湿陷性黄土. 北京:中国铁道出版社,1982
- 4 张苏民. 湿陷性黄土的术语和基本概念. 岩土工程技术,2000(1):42~46
- 5 GBJ 25-90 湿陷性黄土地区建筑规范. 收稿日期:2001-12-27