

# 黄土的工程特性及湿陷性评价实例

达 瓦

(新疆水利水电勘测设计研究院地质所, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:**在湿陷性黄土地区,能否准确评价场地黄土的湿陷性,将直接影响地基处理方案的使用和工程周期长短及地基处理费用的高低问题。黄土具湿陷性,对建筑物工程影响较大,通过对黄土特性的研究,揭示黄土的湿陷性显得尤为重要。在学习、消化前人的研究成果,并总结多年工程实践的基础上,结合现行规范、规程,紧扣湿陷性黄土地区建筑工程的基本原则,把湿陷性黄土评价和地基处理方法结合起来,从准确评价黄土湿陷性出发,分析如何按照评价结果选用适宜的地基处理方法。最后着重以某渠道工程为例,对黄土渠道工程进行工程地质评价,并提出处理措施。

**关键词:**湿陷性黄土;湿陷性变形;湿陷性评价;工程处理措施

**中图分类号:**TU444 **文献标识码:**B **文章编号:**1004—5716(2007)11—0021—04

## 1 黄土工程特性研究的历史

我国是世界上黄土分布面积最广的国家,黄土覆盖面积约 631000km<sup>2</sup>,约占国土总面积的 6.6%。黄土主要集中分布于黄河中游的甘肃、陕西、山西的大部分地区,以及河南、河北、山东、宁夏、新疆、辽宁等省区的部分地区;在纬度上,主要分布在北纬 33°~47°,在黄土分布地区的山区、丘陵、高原、平原、河流阶地等地貌单元均有黄土分布,其覆盖厚度从几米到几十米甚至达到近 200m。岩土工程特性方面,天然状态下低湿度等黄土一般具有较高的强度和较低的压缩性,但其中部分黄土在浸水甚至增湿时却表现出湿陷的特性,我国学者对黄土的这一工程特性研究大致经历了三个阶段。第一阶段(建国初期~1966 年),第二阶段(1966~1978 年),第三阶段(1978 年),以往对湿陷的研究主要集中在 Q<sub>3</sub>、Q<sub>4</sub> 黄土中,近年来随着工程建设规模的扩大,厚层非饱和黄土和对 Q<sub>2</sub> 黄土湿陷性已成为了工程中待解决的问题,通过各科研单位进行大规模的室内及现场试验研究取得可靠的评价结果。

## 2 黄土的工程特性概述

众所周知,天然状态下低湿度的黄土一般具有较高的强度和较低的压缩性,但其中部分黄土在上覆土的自重压力作用下,或自重压力和建筑物附加压力的综合作用下,一旦浸水甚至增湿时,土结构迅速破坏,并发生显著附加下沉,其强度大幅度骤降,变形大幅度突增,这一特性称为黄土的湿陷性,并称具此工程特性的黄土为湿陷性黄土。反之,不发生湿陷的黄土,则称为非湿陷性黄土。湿陷性黄土又可分为自重湿陷性黄土(在上覆土的自重压力下受水侵蚀发生湿陷的黄土)和非湿陷性黄

土(在大于上覆土的自重压力下受水侵蚀发生湿陷的黄土)两种。

黄土的结构强度和欠压密状态是区别于一般土类的重要标志。因此,黄土的湿陷变形也是一种非常特殊的变形。大量的试验结果及工程实践经验表明:湿陷性黄土的湿陷变形具有突变性、非连续性和不可逆性三大主要特征。然而,应指出的是:黄土湿陷变形的三大特征是在一定的应力状态、温度状态、应力水平和增湿水平情况下产生,并随着这些条件的改变而改变。只有正确理解并辩证分析湿陷变形的三大特征,我们才能较客观地掌握黄土湿陷变形的基本规律。

### 2.1 湿陷变形的突变性与非突变性

湿陷变形是黄土在承受一定压力时,由于浸水作用而使土体在短时间内物理状态和力学性质发生突变引起的附加变形。它的特点是速度快和变形量大,常常超过建筑物所允许的程度。此外,黄土湿陷变形的突变程度还取决于天然湿度、应力状态和增湿水平。黄土的天然含水量越低,注水速度越快,在较大压应力作用下浸水湿陷的突变程度就越高;反之,当黄土的天然含水量较高,作用的压应力较小时,黄土浸水湿陷的突变程度就降低了。在分级浸水的湿陷试验中就不易出现突变性的特点,这已被试验结果验证。

### 2.2 湿陷变形的不连续性与连续性

从微观上看,湿陷就是黄土骨架颗粒间的胶结强度弱化与天然结构崩解,在湿陷变形的过程中,不仅有颗粒间的相对滑动,还有小颗粒落入架空孔隙和大孔隙的跃迁。从宏观上看,湿陷变形是整个变形的不连续过程,具有跳跃性。然而,如果从黄土湿陷变形与总变形

过程的空间特征来看,湿陷变形只是黄土变形过程中的一个阶段,是一个连续过程。大量工程实践经验表明,地基湿陷变形随含水量和应力的增加而增大,是连续的变化过程。

### 2.3 湿陷变形的不可逆性与可逆性

湿陷就是黄土骨架颗粒间胶结物质被水溶解或胶结强度降低,经压力作用使其剩余的强度不能与外加荷载平衡,而使整个结构破坏,这一过程是不可逆的,本质上说,湿陷变形是一种特殊的塑性变形,这不是单纯由应力引起的,而是由于浸水使黄土结构弱化强度减弱产生的。然而,从另一个角度看,湿陷变形具有可逆特征,如果黄土地基在一定压力作用下第一次非饱和浸水产生了湿陷变形,那么在第二次增湿过程中要增湿水平大于前期增湿水平,黄土浸水后还会产生明显的湿陷现象,也就是说,在这种情况下,黄土具有二次湿陷问题。

### 3 黄土湿陷性评价工程实例

工程区黄土分布于近 EW 走向天山北坡坡脚一带,黄土区沿东西呈长条形分布,总地势呈南高北低的缓坡,自然坡度  $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。黄土的成因主要有二种,一种为第四系上更新统( $Q_3^{ol}$ )风成黄土(原生黄土),分布于沟间地和大部分沟谷地内,成份较均一,主要由粉粒组成,无层理,无胶结,颜色以浅黄色为主,厚度 20~50m,局部达 86m;另一种为第四系全新统洪积黄土层( $Q_4^{pl}$ ),属暴雨暂时洪流把黄土冲刷搬运至沟间地内形成的土(次生黄土),其间夹有碎石土层,该土层主要分布于大的冲沟内,其厚度一般 20~40m。

### 4 黄土的物理力学性质

#### 4.1 原生黄土的物理力学性质

由试验成果可知,该原生黄土干密度由上至下呈逐渐增加的趋势,一般  $\gamma_d = 1.36 \sim 1.49 \text{ g/cm}^3$ ,天然含水量  $W = 4.29\% \sim 6.46\%$ ,孔隙比由上至下呈逐渐减小的趋势,一般孔隙比  $e = 0.8 \sim 1.0$ ,饱和含水下压缩系数  $a_v = 0.41 \sim 0.57 \text{ MPa}^{-1}$ ,压缩模量为  $E_s = 3.43 \sim 4.57 \text{ MPa}$ ,属于中等压缩性土。从沿线试验成果分析,该区分布的风积黄土层较均匀,以粉粒为主,粘粒含量  $11\% \sim 18\%$ ,天然含水率低,压实性很差,孔隙较大,孔隙率 45%以上,孔隙比大于 0.8,抗水性弱,遇水强烈崩解。黄土毛细管水上升高度采用直接观测法测定,经现场测定,黄土毛细管水上升高度最大值为 1.25m,最小值为 0.80m,平均值为 1.05m。采用室内及现场铁环注水试验法,测定渗透系数  $K = (0.95 \sim 3.2) \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,为中等—弱透水层。饱和含水下快剪内摩擦角  $\varphi = 22^{\circ} \sim 29^{\circ}$ ,凝聚力  $C = 2.5 \sim 21.6 \text{ kPa}$ 。

#### 4.2 次生黄土的物理力学性质

分布于大沟谷地中的次生黄土为经过流水搬运后堆积于沟谷地底部,次生黄土干密度由上至下呈逐渐增加的趋势,一般  $\gamma_d = 1.42 \sim 1.56 \text{ g/cm}^3$ ,天然含水量  $W = 16.77\% \sim 28.09\%$ ,孔隙比由上至下呈逐渐减小的趋势,一般  $e = 0.73 \sim 0.9$ ,饱和含水下压缩系数  $a_v = 0.23 \sim 0.35 \text{ MPa}^{-1}$ ,压缩模量  $E_s = 5.39 \sim 7.8 \text{ MPa}$ ,属中等压缩性,饱和含水下快剪内摩擦角  $\varphi = 25^{\circ} \sim 29^{\circ}$ ,凝聚力  $C = 15.5 \sim 16.6 \text{ kPa}$ 。

### 5 黄土的湿陷性特征

工程区黄土分布广、厚度大,黄土的成因不同、深度不同,其湿陷性特征亦不相同,从钻孔及探坑揭露的情况看,本区以大厚度原生黄为主,次生黄土仅分布于两条大的冲沟底部,在其它小的冲沟处,次生黄土覆盖于原生黄土之上,冲沟底的表层,厚度小于 2m。

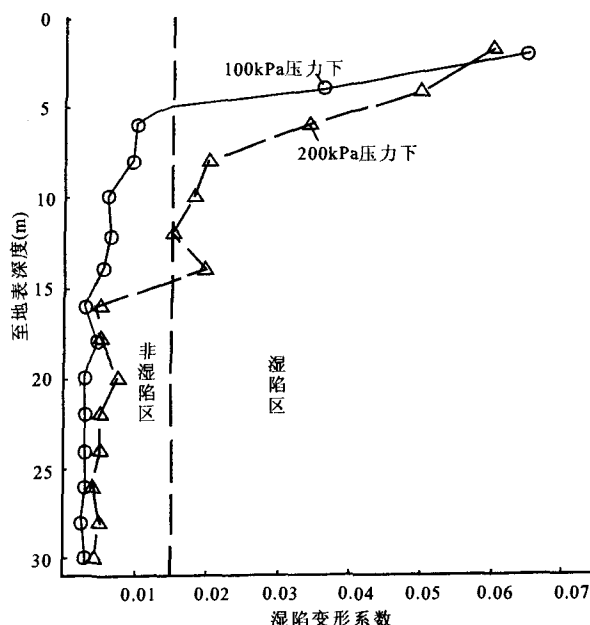


图1 原生黄土湿陷变形系数与深度关系曲线图

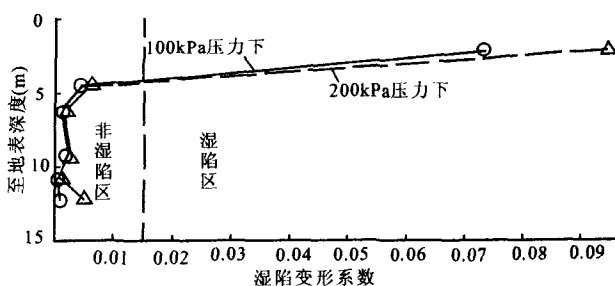


图2 次生黄土湿陷变形系数与深度关系曲线图

在竖井及探坑内,根据对原生及次生黄土不同深度

取样进行湿陷性试验成果所绘制的湿陷变形系数与深度关系曲线(图1、图2)可知:该区黄土由地表向深部,湿陷系数 $\delta_s$ 呈逐渐变小的趋势,根据规范,采用200kPa压力下的湿陷系数进行湿陷级别的判别:该区原生黄土地表以下0~15m,湿陷性系数 $\delta_s=0.015\sim0.059$ ,属于弱—中等湿陷性黄土,湿陷起始压力为43~200kPa;15m以下,湿陷性系数 $\delta_s=0.0041\sim0.0074$ ,属于非湿陷性黄土,湿陷起始压力为307~680kPa;次生黄土地表以下0~3m,湿陷性系数为0.095,属于强湿陷性黄土,湿陷起始压力为20MPa;3m以下,湿陷性系数为0.0005~0.006,属于非湿陷性黄土,湿陷起始压力大于1200MPa。

黄土湿陷类型的划分采用湿陷起始压力 $P_{sh}$ 和饱和自重压力 $P_h$ 比值 $K$ 进行判定:

$$P_h = h[\rho_d + n(\%)s_r(\%)]$$

式中 $s_r$ 取常数85%。

$$K = \frac{P_{sh}}{P_h}$$

当 $K>1$ 时,则为非自重湿陷性黄土; $K<1$ 时,则为自重湿陷性黄土。

根据上式计算,工程区分布的原生黄土除5m深度处判定为自重湿陷外,5m以下均属于非自重湿陷性黄土;次生黄土表层0~3m属于自重湿陷黄土,3m以下均属于非自重湿陷性黄土。

通过该黄土区的渠道主要为挖方,且处于原生黄土的渠段挖深一般大于5m;处于次生黄土的渠段挖深一般大于3m。因此,该黄土区属非自重湿陷性场地。

## 6 黄土湿陷性评价

位于黄土区的渠道大部分为挖方渠道,挖深一般4~8m,局部达10~25m,部分为填方渠道,填方高度一般3~5m,局部达16m。由于渠道基础所处深度的不同,其黄土的物理力学性质及湿陷性也不相同。

由黄土湿陷性系数与深度曲线图(图1、图2)可知,在200kPa压力下,原生黄土15m以上均具弱—中等湿陷性;次生黄土5m以上均具中等—强湿陷性。

根据黄土的湿陷起始压力及渠道施于持力土层的实际荷载(约90kPa),针对挖方渠道在不同挖深下及填方渠道在不同填方高度下,渠基持力土层的物理力学性质及湿陷性特征作如下分析。

### 6.1 挖方渠道

由试验成果可知,该区原生黄土地表以下0~5m,湿陷起始压力35~52.5kPa,在100kPa压力下(相当渠道实际荷载),湿陷系数为0.035~0.044,具中等湿陷性;5m以下湿陷起始压力125~400kPa,在100kPa压

力下湿陷系数为0.0027~0.0077,无湿陷性;该区次生黄土地表以下0~3m,湿陷起始压力20kPa,在100kPa压力下(相当渠道实际荷载),湿陷系数为0.073,具强湿陷性;3m以下湿陷起始压力大于1200kPa,在100kPa压力下湿陷系数为0.001~0.0044,无湿陷性。由此不难看出,处于原生黄土区的挖方渠道,挖深大于5m的渠段,渠基黄土起始湿陷压力已大于渠道附加压力土层,可不必考虑湿陷性设防措施;对挖深小于5m的渠段,湿陷性处理深度须根治湿陷压力 $P_{sh}>(P_z+P_h)$ 的层位。具体可根据不同成因黄土层的起始湿陷压力 $P_{sh}$ 与深度关系曲线、上覆土体自重压力 $P_h$ 与深度关系曲线来确定处理深度。

### 6.2 填方渠道

填方渠段渠基湿陷性处理深度须根据渠基持力土层的起始湿陷压力与实际附加荷载 $P_z$ 及上覆土体自重压力 $P_h$ 的关系确定,即选择起始湿陷压力 $P_{sh}>(P_z+P_h)$ 的层位。当然,实际附加荷载 $P_z$ 除考虑水体、砗板及垫层所产生的附加应力外,还应包括填方土饱和和自重压力及持力层以上土体的自重。具体可根据起始湿陷压力 $P_{sh}$ 与深度关系曲线和上覆土体自重压力 $P_h$ 与深度关系曲线(图3、图4)确定处理深度,须计算出填方土体饱和和自重压力。

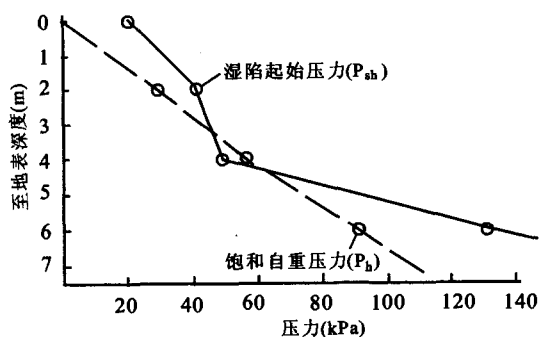


图3 原生黄土深度与湿陷起始压力、饱和自重压力关系曲线

黄土的湿陷性对渠道及渠系建筑物影响主要是浸水后在附加荷载作用下发生湿陷,地基承载力降低,并产生较大的湿陷变形,从而影响渠道及渠系建筑物安全。工程处理措施分为:地基处理措施、防水措施、结构措施。防水措施是必要的防护措施,防止地基湿陷性土浸水产生不均匀沉陷。结构措施是在结构设计上尽可能减少建筑物的不均匀沉陷或使结构适应地基变形。地基处理措施以消除地基全部或部分湿陷量。表1列举了几种湿陷性土层地基处理的经验,供参考采用。

表1 常用的黄土湿陷性地基处理措施

处理方法	适用范围	处理厚度(m)	作用与效果
强(重)夯	地下水位以上,为稍湿状态的土,局部或整片处理均宜,渠道及渠系建筑物	强夯 3~6 重夯 1~2	增加土的密实度,改善土的物理力学性质,减小或消除地基土的湿陷变形,可使土的干容重不小于 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ ,并消除土的湿陷性
预浸水	强湿陷的自重湿陷性黄土地基,渠道及渠系建筑物	$>10$	消除6m以下土层全部湿陷性,上部仍结合垫层等方法处理,注意对邻近建筑物的影响
土桩挤密	地下水位以上,消除深层土湿陷性,渠系建筑物	5~15	有效处理厚度较大的地基土的湿陷性
桩基础	湿陷土层大于6m,下部有可靠持力层,渠系建筑物	$\leq 30$	不以改善土的物理力学性质为目的,而是将上部荷重转移到下部持力层
(灰)土垫层	地下水位以上,局部或整片处理均宜,渠道及渠系建筑物	1~3	消除基础底面以下一定深度内土层湿陷性,减小或消除地基土的湿陷变形。增强地表防水效果,减少土垫层下未处理土层的浸水机会

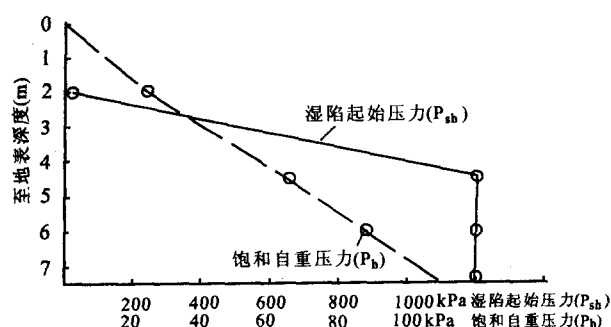


图4 次生黄土深度与湿陷起始压力、饱和自重压力关系曲线

综合上述处理措施,应根据工程建筑物的性质和不同地段、层次黄土的湿陷特性采用不同的处理方法,建议本工程挖深大于5m渠段,渠基黄土起始湿陷压力已大于渠道附加压力可不考虑湿陷性防治措施;对挖深小于5m的渠段及半挖半填渠道,宜采用预浸水及夯(压)实处理措施;填方渠道段宜采用先预加荷载,再对填方基础浸水的方法,将基础土体泡透,配合湿陷变形观测,湿陷达到稳定后再进行渠道整形、衬砌;渠系建筑物基础根据工程建筑物特点及黄土湿陷特性采取不同的处理措施,如预浸水、桩和强夯等方法。

## 7 结论及建议

(1) 我国黄土工程特性研究大致经历了三个阶段,通过大量的实践经验,总结并认识了湿陷性黄土的湿陷变形具有突变性、非连续性和不可逆性三大主要特征,只有在学习、消化前人的研究成果的基础上,不断地总结、创新成果,我们才能较客观地掌握黄土湿陷变形的基本规律,这样才能更好地为工程服务,防止地基湿陷对建筑物产生危害。

(2) 渠道通过的黄土区主要为第四系上更新统

( $Q_3^{ol}$ )风成黄土(原生黄土),分布于沟间地和大部分沟谷地内,局部为第四系全新统洪积( $Q_3^{pl}$ )黄土层(次生黄土),属暴雨暂时洪流把黄土冲刷搬运至沟间地内所形成,其间夹有碎石土层,该土层主要分布于大的冲沟内。

(3) 工程区分布的原生黄土除5m深度处判定为自重湿陷外,5m以下均属于非自重湿陷性黄土;次生黄土表层0~3m属于自重湿陷黄土,3m以下均属于非自重湿陷性黄土。渠道所通过的黄土区黄土湿陷性随深度变化,表部多为中—强湿陷性黄土;往深部湿陷性变小至非湿陷性黄土。

(4) 根据渠道实际荷载,大部分挖方渠道可避开湿陷性黄土的影响,填方或半挖半填渠道须考虑黄土湿陷性影响,具体可根据不同成因黄土层的起始湿陷压力  $P_{sh}$  与深度关系曲线、上覆土体自重压力  $P_b$  与深度关系曲线来确定处理深度。

(5) 建议对湿陷性黄土的处理采用预浸水法、强夯法、土桩挤密法、桩基础法、(灰)土垫层法等处理措施,应根据挖方渠道的不同开挖深度、填方渠道的填方高度采用相应的处理措施。

(6) 建议下阶段黄土区进行现场湿陷性试验,以更进一步了解黄土的湿陷性特性,为黄土区的渠道及渠系建筑物的设计提供科学可靠的试验数据。

## 参考文献:

- [1] 陕西省计划委员会,中华人民共和国建设部. GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004.
- [2] 杨增光. 湿陷性黄土地基处理探讨[M]. 山西建筑出版社, 2001.
- [3] 毕毅. 黄土地基湿陷性研究与工程应用中的若干问题[J]. 盐城工学院报, 1999.
- [4] 新疆水利水电勘测设计研究院. 渠道黄土湿陷性专题研究[R]. 2003.