

# 浅谈湿陷性黄土地基的评价及处理

李谷丰

内蒙古第十地质矿产勘查开发院, 内蒙古 赤峰

Email: lgf1967@163.com

收稿日期: 2021年8月17日; 录用日期: 2021年9月17日; 发布日期: 2021年9月24日

---

## 摘要

形成湿陷性黄土的有利条件是干燥的气候。天然状态的黄土具有高强度和低压缩的性质。但遇水浸湿后, 土的抗剪强度下降, 压缩性增强, 外部体现为土体湿陷。本文旨从湿陷性黄土的成因、影响及处理几个方面进行分析和研究。

## 关键词

湿陷性黄土, 评价, 成因, 影响因素, 措施

---

# Talking about Evaluation and Treatment of Collapsible Loess Foundation

Gufeng Li

Inner Mongolia Tenth Geological and Mineral Exploration Institute, Chifeng Inner Mongolia

Email: lgf1967@163.com

Received: Aug. 17<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 24<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

Collapsible loess is formed in dry climate, which has obvious high strength and low compressibility. The favorable condition for the formation of collapsible loess is dry climate. However, the collapse is caused by the sudden increase of soil deformation and the rapid decrease of soil strength. Loess in natural state has the properties of high strength and low compression. In this paper, the evaluation, cause, influence factors and treatment measures of collapsible loess are analyzed and studied.

## Keywords

Collapsible Loess, Evaluation, Formation, Influencing Factors, Measures

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

湿陷性黄土在我国广泛分布,以东北、西北为主要分布区。在较干燥的工程地质环境下,湿陷性黄土具有高强度和低压缩性的特点。但湿陷性黄土遇水浸湿后,土颗粒结构迅速破坏,抗剪强度大幅降低,在上部结构附加压力作用下会产生较大沉降。在湿陷性土发育地区,由地基土湿陷性引起的房屋承重结构破坏,墙身开裂,公路路基下陷等问题多不胜数(见图1)。

对湿陷性黄土的有效处理已经是建筑物长期保持结构功能正常使用的先决条件。



Figure 1. Seismic subsidence disaster of collapsible loess

图1. 湿陷性黄土震陷灾害

## 2. 湿陷性黄土的评价

湿陷性黄土属特殊性土,定义为在一定压力下(通常指上覆土自重应力压力,有时还包括附加应力)受水浸湿,土结构破坏而发生显著附加下沉的黄土。

### 2.1. 湿陷系数

对黄土湿陷指标的测定,可通过室内黄土湿陷试验[1]测定黄土的湿陷系数、自重湿陷系数。

$$\delta_s = (h_p - h'_p) / h_0 \quad (1)$$

式中:  $\delta_s$  为湿陷系数;  $h_p$  为在某一级压力下,试样变形稳定后的高度;  $h'_p$  为在某一级压力下,试样浸水湿陷达到变形稳定的高度;  $h_0$  为试样原始高度。

$$\delta_{zs} = (h_z - h'_z) / h_0 \quad (2)$$

式中： $\delta_{zs}$ 为自重湿陷系数； $h_z$ 为饱和自重压力下，试样变形稳定后的高度； $h'_z$ 为在饱和自重压力下，试样浸水湿陷达到变形稳定的高度。

## 2.2. 湿陷性判定

根据《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025-2018)，按室内浸水(饱和)压缩试验，在一定压力下测定的湿陷系数 $\delta_s$ 判定其湿陷性和湿陷程度[2]。当 $\delta_s \geq 0.015$ 时，判定为湿陷性黄土；当 $\delta_s < 0.015$ 时，判定为非湿陷性黄土。

## 2.3. 湿陷程度划分

根据上述规范，当 $0.015 \leq \delta_s \leq 0.03$ 时，判定为轻微湿陷性；

当 $0.03 < \delta_s \leq 0.07$ 时，判定为中等湿陷性；

当 $\delta_s > 0.07$ 时，判定为强烈湿陷性。

## 2.4. 湿陷量计算

湿陷性黄土场地自重湿陷量可按式计算

$$\Delta_{zs} = \beta_o \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad (3)$$

式中： $\Delta_{zs}$ 为自重湿陷量； $\delta_{zsi}$ 为第*i*层土的自重湿陷系数； $h_i$ 为第*i*层土厚； $\beta_o$ 为因地区土修正系数。

湿陷性黄土地基受水浸湿饱和，其湿陷量可按式计算

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \alpha \beta \delta_{si} h_i \quad (4)$$

式中： $\Delta_s$ 为总湿陷量； $\delta_{si}$ 为第*i*层土的湿陷系数； $h_i$ 为第*i*层土厚； $\beta$ 为考虑基底下地基土的受力状态及地区等因素的修正系数； $\alpha$ 为不同深度地基土浸水机率系数。

## 3. 湿陷性黄土的成因

湿陷性黄土土颗粒间存在很多空隙使得土层处于欠压密状态。土颗粒接触点处的胶结物在遇水浸湿后逐渐失去胶结性，此时，当上覆压力超过湿陷起始压力时，将产生显著附加沉降。

大气影响深度与环境湿度呈负相关，干燥气候条件，蒸发的影响大于降水的影响，黄土层普遍形成于干旱气候下，且黄土通常是由风积形成于地表。在形成过程中湿度低、无上覆压力，这将导致黄土层的压密欠佳[3]。在黄土形成过程中，影响深度范围内土壤中蒸发量大于降水量，土中的含水量不断减小。土颗粒中的水分子在毛细作用下，逐步聚集到较粗颗粒附近，与细粉粒、粘粒以及一些水溶盐类相互作用形成胶结。在天然低湿度条件下，土颗粒所含的胶结物具有凝聚结晶作用，使土颗粒粘结牢固。但遇水浸湿后，胶结物逐渐失去胶结性，使得湿陷性黄土的变形大幅增加，同时抗剪强度降低，在一定压力作用下产生湿陷[4]。

## 4. 黄土湿陷性的影响因素

### 4.1. 黄土的物质成分对湿陷性的影响

黄土中存在大量可溶盐和黏土矿物，二者都有很好的胶结作用，而黄土的湿陷性与胶结作用有直接关系[5]。具体而言，黄土颗粒中形成的胶结物在遇水浸湿后不断被溶解，胶结作用减弱，其胶结强度也不断被削减。当外部荷载强度超过土颗粒间的胶结作用，荷载将促使土颗粒发生移动，产生湿陷。

## 4.2. 黄土的物理性质对湿陷性的影响

黄土的物理性质对湿陷性的影响主要体现在密度、孔隙以及含水状态见表 1。黄土力学性质主要受孔隙种类、赋存状态、孔隙与土骨架颗粒的相互关系和孔隙率影响。孔隙率的影响主要体现在黄土的湿陷性随着孔隙率的增大而变强[6]，同时，孔隙的构成也同样影响着黄土的湿陷性。在湿陷变形过程中，大孔隙的被破坏程度主要受孔隙的坚固程度影响；中等孔隙结构的不稳定性导致其在浸水条件下极易被破坏；而微、小孔隙结构的稳定性使其在浸水过程中不易被破坏。

**Table 1.** Physical and mechanical indexes of collapsible loess in China  
**表 1.** 我国湿陷性黄土的物理力学指标

地名	天然含水量(%)		塑限(%)		液限(%)		孔隙比(e)	
	平均值	常见值	平均值	常见值	平均值	常见值	平均值	常见值
兰州	11	7~16	17	14~20	27	20~30	1.08	0.85~1.27
西安	19	12~25	18	15~22	32	25~37	1.04	0.85~1.22
太原	14	5~20	17	15~20	26	20~30	0.96	0.82~1.13
子长	14	7~20	19	18~20	28	25~30	0.93	0.82~1.03
延安	14	7~20	18	16~22	29	25~33	1.17	1.00~1.32
平凉	16	12~22	19	16~22	30	25~35	1.04	0.89~1.22

黄土的含水状态对湿陷性的影响同样明显。如黄土试样含水率较低，浸水后的稳定湿陷变形量通常较大[7] [8]；相反，黄土试样含水率较高，稳定湿陷变形量往往很小。这一结论也证实了黄土的湿陷性随饱和度的增加而较小的观点，当黄土的含水量达到饱和(通常认定饱和率达到 85%的黄土为饱和黄土)时，不发生湿陷。究其原因，随着水的侵入，黄土中的胶结物胶结虽逐渐失去胶结性，但当含水量达到某一临界值后，在一定外力作用下，土体中的孔隙被水填充，湿陷性逐渐削弱。

黄土的密度对湿陷性的影响主要体现在其对孔隙率的影响[9] [10]。黄土的孔隙随着密度增加不断闭合，土体逐渐趋于密实状态，此时湿陷变形空间不断减小，湿陷性减弱。相反，随着密度减小，孔隙率增大，土质由密实变得疏松，湿陷变形空间增大，湿陷性增强。

## 4.3. 黄土的埋深对湿陷性的影响

黄土的埋深对湿陷性的影响主要体现在：随着黄土埋深不断越大，由于土的压密作用，土体变得密实。由上述密度对湿陷性的影响可知，随着黄土埋深的逐渐增加增大，湿陷性逐渐减小。相反，埋深浅的黄土，密度较小，土颗粒间孔隙较大，具有较高的湿陷性。

## 4.4. 黄土的成土时代和环境对湿陷性的影响

对于不同时代形成的黄土，新近堆积黄土较相邻层位古土壤具有更强的湿陷性[11]，这是因为新近堆积黄土尚未完成自重固结，自身孔隙率较大，而古土壤已完成自重固结甚至由于上部扰动形成超固结状态，自身空隙率较小。黄土形成过程中所处的环境湿度、植被覆盖等形成环境不同，黄土的湿陷性程度也不尽相同。在干旱的荒漠草原生物气候条件下形成的黄土湿陷性更强；在半干旱和半湿润草原生物条件下形成的黄土湿陷性较弱；在湿润气候条件下形成的黄土一般不具湿陷性。

## 5. 湿陷性黄土地基的处理

对于湿陷性黄土，一般无法直接用作地基持力层或下卧层，需要对其进行处理后方可使用，常用的

处理方法有：垫层法、夯实法、挤密桩法、桩基础、化学加固法等[12][13][14][15]。各类处理方法的适用范围和可处理湿陷性土厚度见表2。

**Table 2.** Comparison and selection of foundation treatment methods in collapsible loess area  
**表 2.** 湿陷性黄土地区地基处理方法比选

地基处理方法	适用范围	可处理的湿陷性黄土厚度(m)
垫层法	地下水位以上	1~3
夯实法	$S_r \leq 60\%$ 的湿陷性黄土	3~6
挤密法	$S_r \leq 65\%$ 、 $w \leq 22\%$ 的湿陷性黄土	5~10
桩基础	坚硬下卧层	-
化学加固法	可灌性较好的土层	现场试验确定

### 5.1. 垫层法

垫层法是用力学性质较好的土替换基础影响范围内的湿陷性黄土。先将基础影响范围内的湿陷性黄土挖除，然后用素土、灰土等回填材料分层填筑、分层夯实形成垫层。此法可有效的消除处理深度范围内地基土的湿陷性，有效提高其承载力，使得地基土承载力和地基土的压缩变形满足设计要求。换填时可根据换填范围和基础形式采用局部式或整体式；可根据所要达到的技术要求采用土垫层或灰土垫层。但此方法适用于地下水位以上的土层，处理厚度一般为 1~3 m。此外，对于深厚湿陷性黄土地层或对变形要求较高的工程不建议采用此方法。

### 5.2. 夯实法

夯实法主要有强夯法和重锤表层夯实法两种方法。前者处理深度一般为 3~6 m，对处于最佳含水量范围内的土层的夯实效果最好；后者处理深度一般不超过 3 m，主要用于处理饱和度不大于 60%的湿陷性黄土。处理后，有效处理深度范围内土的性质显著改善，土的压缩性降低，土的承载力提高。但此方法的处理深度不超过 6 m，存在一定的局限性，超过处理深度的土的性质改善效果不明显。且在夯实过程中，要注意夯实点间距，避免造成“表面硬壳”现象，影响下部土层的夯实效果。

### 5.3. 挤密桩法

对地下水位以上且基础上覆压力较大的湿陷性黄土地基的处理，挤密桩法从经济角度和实际操作角度都有良好的应用。施工时，按设计方案预先在挤密桩所在位置进行钻探，然后用下素土、灰土等回填材料分层填筑、分层捣实到设计标高，要求回填土的含水量在最优含水量附近。通过先期成孔和后期桩体夯实不断挤密桩间土，使其承载力有所提高，其处理深度可达到 5~10 m。桩与桩间土共同形成柔性复合地基，当施加上部荷载时，由桩和桩间土共同承担上部荷载，能有效的扩散应力，在加固深度以下附加应力已大为衰减。但由于挤密的桩间土和作为挤密桩成分的土的自身承载力不高，此方法对于上部荷载较大的建筑物可能存在承载力无法满足要求的情况。

### 5.4. 桩基础

桩基础不属于地基处理，而属于基础形式的一种。桩的承载力由桩侧和桩端共同承担，二者分配比例因桩型而异。因为此方法并没有对上层的湿陷性土进行处理，故而当桩侧湿陷性土遇水浸湿后，土体强度降低无法提供摩阻力，此时在桩侧产生负摩阻力，减小了桩的桩侧承载力，同时湿陷性黄土层作用



方向向下的负摩阻力转化为上部荷载。故在湿陷性黄土地，不建议采用摩擦型桩，可采用端承桩或摩擦端承桩，且在施工是要做好地面防水。桩基础工程造价一般较高，如上述几种处理方式可满足要求时，不建议采用此方法；当以上处理都无法达到设计要求，且湿陷性土下存在压缩性较低的岩土层时，可采用此处理方法。

### 5.5. 化学加固法

化学加固法是利用硅酸钠溶液与土颗粒凝结作用和氢氧化钠溶液的置换作用，改善土的物理力学性质，消除湿陷性。化学加固法对湿陷性的消除效果最好，但其成本较高，故此方法并未得到广泛应用，目前仅用于处理既有建筑物地基湿陷的处理。

## 6. 结语

黄土的物质成分、物理特性、埋深及形成环境是产生湿陷的内因，而黄土所处的水文地质条件是触发黄土湿陷性的外因。本文对不同处理方法的试用范围、处理厚度分别进行论述，为工程建设中对湿陷性黄土地基处理方案选型论证及实施提供技术支持。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50025-2018 湿陷性黄土地区建筑标准[S]. 北京: 中国建设工业出版社, 2018.
- [3] 李彦慧, 刘蛟. 浅谈湿陷性黄土形成原因和处理措施[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2011(27): 246-248.
- [4] 赵景波, 岳应利, 陈云. 黄土湿陷性及其成因[J]. 地质力学学报, 1997, 3(4): 62-68.
- [5] 李雨浓. 影响黄土湿陷系数因素的分析[J]. 世界地质, 2007, 26(1): 108-113.
- [6] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B 辑), 1987, 17(12): 1309-1316.
- [7] 王吉庆, 雷胜友, 等. 黄土湿陷系数与物理性质参数的相关性[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 42-45.
- [8] 包惠明, 魏雪丰. 干湿循环条件下膨胀土裂隙特征分形研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 478-482.
- [9] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [10] 谷天峰, 王家鼎, 郭乐, 等. 基于支持向量机的 Q3 黄土孔隙微观结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 6(37): 102-104.
- [11] 陈果. 浅谈黄土湿陷性的影响因素[J]. 江西建材, 2016, 8(185): 239-240.
- [12] 张绪芬. 浅谈黄土的湿陷性及其地基处理问题[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(7): 37-40.
- [13] 李华文. 浅谈湿陷性黄土的特征及预防措施[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(F6): 58-60.
- [14] 卜林虎. 湿陷性黄土地区道路施工影像与处理措施[J]. 山西建筑, 2016, 42(29): 143-144.
- [15] 杨志成, 李伟峰. 浅谈湿陷性黄土地质特性及处理方法[J]. 公路, 2012, 4(4): 196.