

罗宇生 著

湿陷性黄土地基处理

中国建筑工业出版社

湿陷性黄土地基处理

罗宇生 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

湿陷性黄土地基处理/罗宇生著. —北京: 中国建筑工程
出版社, 2008

ISBN 978-7-112-10027-9

I. 湿… II. 罗… III. 湿陷性黄土—黄土地基—地
基处理 IV. TU475 TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 048751 号

责任编辑: 郭 栋

责任设计: 肖广慧

责任校对: 汤小平

湿陷性黄土地基处理

罗宇生 著

*

中国建筑工程出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京中实兴业公司制版

北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 3½ 字数: 94 千字

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 10.00 元

ISBN 978-7-112-10027-9

(16830)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



本书作者为《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB 50025—2004）主要起草人、《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）编委、《建筑地基处理技术规范》（JGJ79—2002）编委。本书主要包括：湿陷性黄土概述；湿陷性黄土场地的判定与评价；湿陷性黄土地基处理原则；湿陷性黄土地基处理方法；桩基础在湿陷性黄土地基处理中的应用。

本书可供岩土工程、工程勘察人员使用，也可供大中专院校师生参考。



目 录

第一章 概述	1
第一节 黄土的成因、时代和分布概况	1
第二节 湿陷性黄土分布与特征	7
第三节 黄土湿陷性的研究	12
第二章 湿陷性黄土场地的判定与评价	16
第一节 湿陷性黄土场地湿陷类型的判定	16
第二节 湿陷性黄土场地地基评价	19
第三章 湿陷性黄土地基处理原则	28
第一节 剩余湿陷量对建筑物损坏情况研究	28
第二节 湿陷性黄土地基处理原则	30
第四章 湿陷性黄土地基处理方法	41
第一节 设置素土垫层处理湿陷性黄土地基	41
第二节 设置土(或灰土)垫层处理湿陷性黄土地基	47
第三节 夯实法处理湿陷性黄土地基	51
第四节 土(或灰土)挤密桩法处理湿陷性黄土地基	60
第五节 单液硅化加固非自重湿陷性黄土地基	70
第五章 桩基础在湿陷性黄土地基处理中的应用	80
第一节 湿陷性黄土场地上的桩基础	80
第二节 爆扩桩基础在湿陷性黄土地区的应用	84

第一章 概 述

第一节 黄土的成因、时代和分布概况

一、黄土的概念与特征

黄土是第四纪沉积物的一种，具有一系列的内部物质成分和外部形态特征，不同于同时期的其他沉积物。同时，在地理分布上也不同于其他沉积物，而是分布于一定的自然地理区域内，并有一定的规律性。

一般认为，具有以下全部特征的称为黄土，这些特征是：

- (1) 颜色以黄色、褐黄色为主，有时呈灰黄色；
- (2) 颗粒组成以粉粒($0.05 \sim 0.005\text{mm}$)为主，含量一般在60%以上，无大于 0.25mm 的颗粒；
- (3) 孔隙比一般在1.0左右；
- (4) 富含碳酸钙盐类；
- (5) 垂直节理发育；
- (6) 有用肉眼能看见的大孔隙。

当缺乏上述中的一项或几项特征的土称为黄土状土。

黄土按其成因分为原生(或典型)黄土和次生黄土。不具层理的风成黄土为原生黄土。原生黄土经过流水冲刷、搬运和重新沉积而形成的次生黄土，具有层理并含有较多的砂粒以至细砾。次生黄土的结构强度一般低于原生黄土的结构强度，而湿陷性较大。地质界通常将原生黄土称为黄土，将次生黄土称为黄土状土。

建筑工程主要根据土的物理、力学性质评价其工程特性，一般将黄土和黄土状土统称为黄土。

黄土在一定压力(即土自重压力或土自重压力与附加压力)下受水浸湿，结构迅速破坏而发生显著附加下沉的现象，称为湿陷。浸水后产生湿陷的黄土称为湿陷性黄土。不是所有黄土都具有湿陷性。

二、黄土的成因

土的任何性状都与其成因有关，研究黄土的成因对于解决其湿陷问题有一定的意义。通常有以下三种学说：

- (1) 风成说；
- (2) 水成说；
- (3) 多种成因说。

三、黄土的分布概况

黄土在地球上分布很广，面积达 1300 万 km^2 ，约占陆地总面积的 9.3%。

世界上黄土主要分布于中纬度干旱、半干旱地区，广泛分布于大陆内部、温带荒漠和半荒漠地区的外缘，或分布于第四纪冰川地区的外缘。

据粗略估计：世界各大洲黄土覆盖面积占总面积的比例分别为：欧洲 7%；北美 5%；南美 10%；亚洲 3%。此外，在澳洲和北非洲等地区也有零星分布。

在欧洲大陆、黄土主要分布在北纬 45° 以北的欧洲中部地区、如法国的中部和北部，联邦德国的中部和南部，而以莱茵河流域分布最广。在东欧的罗马尼亚、保加利亚、匈牙利和波兰也有零星分布。在北纬 40° 以北的乌克兰、南高加索、乌兹别克斯坦、南西伯利亚和勒拿河中游等地区均分布有黄土。

在北美大陆，黄土主要分布在北纬 40° 左右的密西西比河上游地区和墨西哥北部地区。在南美大陆，黄土主要分布在南纬

30°~40°的阿根廷草原地区。

我国黄土分布面积,据中国科学院地质研究所和北京大学地理系所编制的中国黄土分布图为 635280km²,占世界黄土分布总面积的 4.9%左右。主要分布在北纬 33°~47°之间,而以 34°~45°最为发育。在这个区域内,一般气候干燥、降雨量少,蒸发量大,属于干旱、半干旱气候类型。黄土分布地区的年平均降雨量多在 250~500mm 之间。年平均降雨量小于 250mm 的地区,黄土很少出现,主要为沙漠和戈壁。年降雨量大于 750mm 的地区,也基本上没有黄土分布。

黄河中游是黄土的主要分布地区,地层全、厚度大,分布连续、发育好,分布在刘家峡、乌鞘岭以东、三门峡、太行山以西,长城以南,秦岭以北的广大区域内,面积约 28 万 km²。

在黄河下游,即三门峡以东,包括太行山东麓、中条山南麓、冀北山地南麓和山东丘陵地区,都有黄土分布。

在我国东北地区,黄土零星分布在松辽平原,即长白山以西、小兴安岭以南、大兴安岭以东的一些地区。

世界上黄土堆积的厚度以我国为最大。欧洲中部地区的黄土厚度一般只有几米,超过 10m 的很少,莱茵河谷的厚层黄土也只有 20~30m。前苏联境内黄土一般稍厚,局部地区有达 40~50m 的。北美和南美黄土厚度则较薄,一般为几米到十几米。

据中国科学院地质研究所调查,我国黄土的厚度以黄河中游的黄土塬为最大,其厚度中心在洛河和泾河流域的中下游地区,最大厚度达 180~200m。由此向东、西两个方向,黄土厚度逐渐减薄,如西部柴达木和河西走廊一带厚度一般为 10~20m,最厚不超过 50m。东部太行山东麓和燕山南麓一带厚度约为 10~40m。

我国湿陷性黄土的分布面积约占我国黄土分布总面积的 60%左右,大部分分布在黄河中游地区。这一地区位于北纬 34°~41°,东经 102°~114°之间,北起长城附近,南达秦岭,西

自乌鞘岭，东至太行山。除河流沟谷切割地段和突出的高山外，湿陷性黄土几乎遍布本地区的整个范围，面积达 27 万 km^2 ，是我国湿陷性黄土的典型地区。除此以外，在山东中部、甘肃河西走廊、西北内陆盆地、东北松辽平原等地也有零星分布，但一般面积较小，且不连续。

湿陷性黄土一般都覆盖在下卧的非湿陷黄土层上，其厚度以六盘山以西地区较大，最大厚度达 30m，六盘山以东地区稍薄，例如汾渭河谷的湿陷性黄土厚度多为几米到十几米。再向东至河南西部则较小，并且常有非湿陷性黄土层位于湿陷性黄土层之间。

四、我国黄土地层的划分

我国黄土地层自下而上简述如下：

1. 早更新世黄土

简称 Q_1 黄土，形成于距今 1200000~700000 年之间。其标准剖面在山西省隰县午城镇可找到，所以又叫午城黄土。粒度成分以粉粒为主，粉粒和黏粒含量较后期黄土为高。夹 17~18 层密集钙质结核层，是古土壤钙化的遗物。底部常有砾石层和砂层与较老地层不整合接触。质地较均匀，致密坚实，压缩性低，无湿陷性。分布较少，一般在古地形低洼的地方可见到，厚度为 40~100m。

2. 中更新世黄土

简称 Q_2 黄土，形成于距今 700000~100000 年之间。其标准剖面在山西省离石县可找到，所以又叫离石黄土。粒度成分以粉粒为主，粉粒和黏粒含量较马兰黄土为高。质地较均匀、致密。分上、下两部分：下部黄土色灰褐，较坚实，夹有 4~8 层红褐色古土壤。上部黄土呈浅灰褐色，无湿陷性或有轻微湿陷性。厚度为 50~70m，但在黄河中游最厚可达 170m，并成为该区黄土地层的主体。

3. 晚更新世黄土

简称 Q_3 黄土，形成于距今 100000~5000 年之间。其标准剖面在北京西北丰沙铁路雁翅车站以西 23km 的斋堂村马兰山谷的阶地上可找见，所以又叫马兰黄土。粒度成分以粉粒为主，粉粒和黏粒含量较早期黄土为少。质地较均匀，但较疏松，有用肉眼可见的大孔隙，具湿陷性或强烈湿陷性，有些地区还有黄土溶洞（黄土喀斯特）。

4. 全新世黄土

简称 Q_4 黄土，形成于距今 5000 年内。一般土质疏松，具有湿陷性。底部有厚 0.7~1.3m 的黑垆土。厚度较薄，但在塬、梁、峁坡脚、山洞沟谷、狭窄河流的低级阶地上覆盖较厚。分两个亚层：全新世早期堆积黄土，简称 Q_4^1 黄土；全新世新近堆积黄土，简称 Q_4^2 黄土，由于形成年代短，成岩作用差，很疏松，往往压缩性高，强度低，并具有湿陷性。厚度一般为 3~8m，但最厚可达 15~20m。

由于古气候和古地形不尽相同，上述 Q_1 到 Q_4 黄土往往并非完全按形成年代顺序整合接触，如有的在上层并无 Q_3 和 Q_4 黄土覆盖， Q_2 黄土直接出露地表；有的下层见不到 Q_1 黄土， Q_2 黄土直接与基岩石或第三纪红土接触；有的只有 Q_3 、 Q_4 黄土，而下部 Q_1 、 Q_2 黄土缺失。

我国地质学界将午城黄土和离石黄土统称为老黄土，而将马兰黄土和全新世各种成因形成的黄土状土统称为新黄土。

我国黄土地层的划分见表 1-1。

我国黄土地层的划分

表 1-1

时 代		地层的划分	说 明
全新世(Q_4)黄土	新黄土	黄土状土	
晚更新世(Q_3)黄土		马兰黄土	
中更新世(Q_2)黄土	老黄土	离石黄土	上部部分土层具湿陷性
早更新世(Q_1)黄土		午城黄土	不具湿陷性

注：全新世(Q_4)黄土包括早期堆积(Q_4^1)黄土和新近堆积(Q_4^2)黄土。

五、我国黄土地区的地貌

我国黄土地区的地貌有平原、丘陵、高原、山地等四种类型。在黄河中游地区，这四类地型都有，而且比较典型。

在工程地质方面，常将黄土地区地貌分为两大类，即高原类和河谷类。

1. 高原类

黄土高原的地形明显受到下伏古地形的影响。在古地形平坦开阔处，覆盖其上的黄土形成塬；在古地形起伏变化较剧烈的地段，覆盖其上的黄土形成梁或峁。

塬的地形平坦，面积宽广，黄土厚度达几千米到百余米。

梁的地形为长条形，长达几公里到几十公里，梁顶宽由几十米到几百米，两侧为深沟，分布于陕北(如宜君梁)、晋西南、陇东北部和陇西北部等地。

峁为穹形的黄土丘陵地形，面积大小不一，有圆形和椭圆形多种。峁的坡度变化在 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间，分布于陇西、陇东和陕北的北部等地。塬、梁、峁都由原生黄土构成，厚度较大。

2. 河谷类

在河谷内有两种不同的阶地类型。

宽广的堆积阶地。阶面开阔，在陕西关中、河南西部和山西汾河河谷分布较广。

根据河谷的发育情况，可将阶地划分为若干级，如渭河河谷有四级阶地，一、二级阶地低而新，地形平坦；三、四级阶地高而老，与高原的丘陵地形差不多。一级阶地黄土的湿陷性较弱，一级阶地以下的河漫滩黄土往往没有湿陷性。

建筑工程大多分布在河谷地带的一、二级阶地上，在高阶地上较少。

六、黄土的结构特征

土的结构是指土的颗粒组成、土粒形状及其相互排列、土粒

表面特性、土粒间胶结情况和孔隙特征等，土的结构特殊性与其物理力学性质密切相关。

构成黄土空间结构体系的支柱是骨架颗粒，其形态表征传力性能和变形特性，其连接形式直接影响黄土结构体系的胶结强度，而排列方式决定结构体系的稳定性。

第二节 湿陷性黄土分布与特征

一、我国湿陷性黄土的分布概况

我国湿陷性黄土主要分布在山西、陕西、甘肃的大部分地区，河南西部和宁夏、青海、河北的部分地区，面积达 44 万 km^2 。此外，新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区和山东、辽宁、黑龙江等省的局部地区亦分布有湿陷性黄土。

湿陷性黄土是一种非饱和的欠压密土，具有大孔和垂直节理，在天然湿度下，其压缩性较低，强度较高，但遇水浸湿时，土的强度显著降低，在附加压力或在附加压力与上覆土的自重压力下，引起的湿陷变形是一种下沉量大、下沉速度快的失稳性变形，对建筑物危害性大。因此，在湿陷性黄土地区进行建设，应根据湿陷性黄土的特点和工程要求，因地制宜，采取以地基处理为主的综合措施，防止地基受水浸湿引起湿陷对建筑物产生危害。

防止或减小湿陷性黄土地基受水浸湿引起湿陷的综合措施，可分为地基处理、防水措施和结构措施三种。其中，地基处理措施主要用于改善土的物理力学性质，减小或消除地基的湿陷变形；防水措施主要用于防止或减少地基受水浸湿；结构措施主要用于减小和调整建筑物的不均匀沉降，使上部结构适应湿陷性黄土地基的变形。

湿陷性黄土的特性有以下几种：

(1) 在土自重压力或在土自重压力与附加压力的共同作用下，受水浸湿后发生显著附加下沉；

- (2) 孔隙比一般在 1 左右, 并具有肉眼可见的大孔隙;
- (3) 颗粒组成以粉砂为主(0.05~0.005mm), 约占 60%;
- (4) 含有大量的可溶盐;
- (5) 颜色为黄色和褐黄色;
- (6) 天然剖面形成垂节理。

湿陷性黄土一般都覆盖在下卧的非湿陷性黄土层上, 其厚度以六盘山以西地区较大, 最大厚度达 30m; 六盘山以东地区稍薄, 例如, 汾渭河谷的湿陷性黄土厚度多为几米到十几米。再向东至河南西部则更小, 并且常有非湿陷性黄土层位于湿陷性黄土层之间。

我国部分地区湿陷性黄土的厚度可见表 1-2。

我国部分地区湿陷性黄土的厚度(m)

表 1-2

区 域	地 点	一级阶地	二级阶地	三、四级阶地
陇西地区	西 宁	0~4.5	4~15	27
	兰 州	0~5.0	5~16	
	天 水	0~3.0	3~7	
陇东—陕北地区	固 原	0~5.0	15	
	延 安	0~4.5	6	
	平 凉			
关中地区	宝 鸡	6~11	6~11	5
	虢 镇	6~9	6~9	
	西 安	0~3	5~10	
	乾 县			
河南地区	蒲 城			5~14
				6~13
	三门峡	8	8	8~12
山西地区	洛 阳	0~3	5~8	<8
	太 原	2~10		17
	临 汾	8~9		
	候 马	6		

二、湿陷性黄土的性质

1. 湿陷性黄土的物理性质

黄土由固态、液态和气态三相所组成, 其三相组成间重量和

体积的比例关系,可以反映出土的一系列物理性质,这些性质常用下列指标表示;如颗粒组成、土粒相对密度、含水量、密度、孔隙比、孔隙率、饱和度、液限、塑限、塑性指数、液性指数等。湿陷性黄土的颗粒组成见表 1-3。

研究黄土的物理性指标及其与湿陷性质的关系,在工程上具有一定的实际意义。

湿陷性黄土的颗粒组成(%)

表 1-3

地 区	粒 径(mm)		
	砂粒>0.005	粉粒 0.05~0.005	黏粒 0.005
陕 西	20~29	58~72	8~14
陕 北	16~27	59~74	12~22
关 中	11~25	52~64	19~24
山 西	17~25	55~65	18~20
豫 西	11~18	53~66	19~26
总 体	11~29	52~74	8~26

2. 土粒相对密度和天然含水量

黄土的相对密度一般为 2.51~2.84,平原地区的黄土则大多在 2.62~2.76 范围内。相对密度的大小与土的颗粒组成有关,当粗粉粒和砂粒含量较多时,相对密度常在 2.69 以下;如黏粒含量多,则相对密度多在 2.72 以上。

由于黄土的颗粒组成与其液限、塑限有一定关系,因而可以建立塑性指数与相对密度之间的对应关系表 1-4。

湿陷性黄土土粒相对密度 d_s 与塑性指数 I_p 的统计关系 表 1-4

I_p	土粒相对密度
<7	2.67
7~10	2.69
10~13	2.71
13~17	2.72
>17	2.73~2.74

3. 干密度和孔隙比

干密度是衡量土密实程度的一个重要指标,与土的湿陷性也

有较明显的关系。一般，干密度小，湿陷性强；反之，则弱。

湿陷性黄土干密度的变化范围一般在 $1.14 \sim 1.69 \text{g/cm}^3$ 之间。当黄土在形成过程中，由于前期固结压力大，土已经被压实，干密度超过某一数值后，黄土就由湿陷性的转变为非湿陷性的。对于黄土状粉质黏土，当干密度达到 1.5g/cm^3 以上，一般都属于非湿陷性。但对于洪积、冲积成因的、颗粒较粗的黄土状黏质粉土或新近堆积黄土，则干密度超过 1.5g/cm^3 ，仍有可能具有湿陷性。

湿陷性黄土的密实程度也常用孔隙比或孔隙率来表达。湿陷性黄土孔隙比的变化范围为 $0.85 \sim 1.24$ ，大多数在 $1.0 \sim 1.1$ 之间。孔隙比与干密度成反比关系。大多数情况下，土的孔隙比随着埋藏深度的增加而减小。

4. 含水量和饱和度

湿陷性黄土的天然含水量在 $3.3\% \sim 25.3\%$ 之间变化，其大小与场地的地下水位深度和年平均降雨量有关。在多数情况下，黄土的天然含水量都较低。在塬、梁、峁上的黄土，由于地下水位埋藏较深，含水量通常只有 $6\% \sim 10\%$ ；低阶地上的黄土则由于地下水位较高，其含水量在 $11\% \sim 21\%$ 之间，地下水位以下的饱和黄土，含水量可达 $28\% \sim 40\%$ 。

湿陷性黄土的饱和度在 $15\% \sim 77\%$ 之间变化，多数为 $40\% \sim 50\%$ ，亦即处于稍湿状态。稍湿状态的黄土，其湿陷性一般较很湿的为强。随着饱和度的增加，湿陷性减弱。当饱和度接近于 80% 时，湿陷性已基本消失。

5. 稠度指标

稠度指标包括液限、塑限、塑性指数和液性指数，它们反映了水对土的性状的影响。

湿陷性黄土的液限和塑限分别在 $20\% \sim 35\%$ 和 $14\% \sim 21\%$ 之间变化，塑性指数为 $3.3 \sim 17.5$ ，大多数在 $9 \sim 12$ 左右；液性指数在零上下波动。在塬、梁、峁和高阶地上的黄土，由于含水量常低于塑限，其液性指数小于零；低阶地黄土则在 $0 \sim 0.5$ 之

间变动，地下水位以下黄土(属于非湿陷性的)的液性指数则接近或大于 1.0。所以，大多数处于坚硬或硬塑状态，承载力较高，压缩性为中等或偏低。少部分黄土(主要是新近堆积黄土)处于可塑或软塑状态。

液限是决定黄土力学性质的一个重要指标，当液限在 30% 以上时，黄土的湿陷性较弱，且多为非自重湿陷性的。而液限小于 30% 时，湿陷性一般较强烈。我国新、旧黄土规范在确定土的容许承载力时也都考虑了液限这一因素，液限越大，承载力越高。

三、湿陷性黄土的压缩性

湿陷性黄土的力学性质主要包括压缩性、湿陷性、抗剪强度和渗水性，其中以湿陷性最为重要。黄土湿陷性在第三节中专门叙述。

压缩性是土的一项重要工程性质，它反映地基土在外荷作用下产生压缩变形的大小。对湿陷性黄土地基，压缩变形是指地基土在天然含水量条件下受外荷作用所产生的变形，它不包括地基受水浸湿后的湿陷变形。湿陷性黄土的压缩性指标用压缩系数 a 、压缩模量 E_s 和变形模量 E_0 表示。

由于我国湿陷性黄土地基的容许承载力一般不超过 200kPa，因此，按压缩曲线计算压缩系数和压缩模量的压力区间采用 100~200kPa，也即

$$a_{1\sim 2} = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = \frac{e_1 - e_2}{2 - 1} = e_1 - e_2$$
$$E_{s_{1\sim 2}} = \frac{1 + e_1}{a_{1\sim 2}}$$

式中 e_1 、 e_2 ——分别为土样在 100kPa 和 200kPa 压力下压缩稳定后的孔隙比；

$a_{1\sim 2}$ ——压力区间为 100 ~ 200kPa 时的压缩系数

(MPa^{-1});

$E_{s_{1\sim 2}}$ ——相应于上述压力。

对于新近堆积黄土，压缩系数的峰值出现较早，因此计算 a 和 E_s 的压力区间宜取 $50\sim 150\text{kPa}$ 或 $50\sim 100\text{kPa}$ 。深度在 10m 以下的黄土层，自重压力较大，相应的压力区间则宜取 $100\sim 300\text{kPa}$ 或 $200\sim 300\text{kPa}$ 。判定黄土压缩性的标准与一般黏性土相同，即：

$a_{1\sim 2} \geq 0.5\text{MPa}^{-1}$ ，为高压缩性土；

$0.5 > a_{1\sim 2} \geq 0.1\text{MPa}^{-1}$ ，为中压缩性土；

$a_{1\sim 2} < 0.1\text{MPa}^{-1}$ ，为低压缩性土。

我国各地湿陷性黄土的压缩系数一般在 $0.1\sim 1\text{MPa}^{-1}$ 之间变化。

一般在中更新世末期和晚更新世早期形成的湿陷性黄土，压缩性多为中等偏低，少量为低压缩性土；晚更新世末期和全新世时期黄土则压缩性多为中等偏高，有的甚至为高压缩性；新近堆积黄土的压缩性多数较高，最高可达 $1.5\sim 2\text{MPa}^{-1}$ 。

压缩模量系通过压缩系数换算而得，一般在 $2000\sim 20000\text{kPa}$ 之间变化。

压缩系数和压缩模量都是通过室内压缩试验得来的。

第三节 黄土湿陷性的研究

工程实践和试验研究成果表明，黄土有湿陷性和非湿陷性两种。湿陷性黄土在一定压力下受水浸湿，土结构迅速破坏，并产生显著附加下沉；非湿陷性黄土在一定压力下受水浸湿，土结构无明显变化，附加下沉量很小。故湿陷性黄土与非湿陷性黄土的性质截然不同。

一、室内压缩试验

黄土是否具有湿陷性？国内外目前主要是在现场采取天