

大厚度自重湿陷性黄土地基处理厚度 与处理方法研究

黄雪峰^{1, 2}, 陈正汉¹, 方祥位¹, 朱元青¹, 郭剑锋¹, 魏学温¹

(1. 中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 400041; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 大厚度自重湿陷性黄土的地基处理方法、处理深度以及合理控制剩余湿陷量等是黄土地区工程设计中的难点、热点问题。从大厚度自重湿陷性黄土湿陷变形特点出发, 进行 3 个方面的相关工作。首先论述大厚度自重湿陷性黄土地基处理的原则; 然后, 结合建构筑物的类别不同, 提出不同的自重湿陷性黄土层厚度、宜采取的相应地基处理厚度和剩余湿陷量控制标准; 最后, 详细探讨大厚度自重湿陷性黄土地基整片处理、局部处理及多种处理方法的优缺点及适用性等问题, 并给出几种地基处理方法处理效果良好的工程实例。

关键词: 土力学; 大厚度自重湿陷性黄土; 地基处理原则; 地基处理深度; 剩余湿陷量; 地基处理方法

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4332 - 07

STUDY ON FOUNDATION TREATMENT THICKNESS AND TREATMENT METHOD FOR COLLAPSE LOESS WITH LARGE THICKNESS

HUANG Xuefeng^{1, 2}, CHEN Zhenghan¹, FANG Xiangwei¹, ZHU Yuanqing¹, GUO Jianfeng¹, WEI Xuewen¹

(1. *Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China;*

2. *School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China*)

Abstract: Foundation treatment method, treatment thickness and residual collapse settlement of collapse loess with large thickness are hot issues in engineering design in loess areas. Based on the collapse characteristics of collapse loess with large thickness, research work in three aspects related to collapse loess was conducted. Firstly, the principles of foundation treatment for collapse loess under overburden pressure with large thickness were expounded. Secondly, combining various sorts of buildings, the controlling standard of foundation treatment thickness and the residual collapse settlement were suggested. Thirdly, the applicabilities for whole treatment, local treatment of foundation and multiple treatment methods were discussed; and some successful examples for various treatment methods were introduced.

Key words: soil mechanics; collapse loess with large thickness; principle of foundation treatment; foundation treatment deepness; residual collapse settlement; foundation treatment method

1 引 言

中国黄土分布之广、厚度之大以及地层层序之

完整, 是举世闻名的, 它连续分布在甘肃的中部和东部、宁夏南部、陕西的西北部和中部、山西和河南的西部及其他一些地区, 连续分布面积约 4.4×10^5

收稿日期: 2006 - 06 - 15; **修回日期:** 2007 - 07 - 31

作者简介: 黄雪峰(1960 -), 男, 1982 年毕业于成都地质学院地质勘探专业, 现为博士研究生、高级工程师, 主要从事湿陷性黄土地基处理、桩基工程等方面的设计与研究工作。E-mail: hxfen60@163.com

km^2 ^[1], 厚度为 10~400 m(兰州市西津村揭露黄土厚度为 409.93 m, 为全世界最厚的黄土)^[2]。

近年来, 随着国家经济的发展和西部大开发战略的实施, 黄土地区的建设项目日益增多, 规模越来越大, 也出现了需要解决的新问题。主要反映为工程建设由低阶地向高阶地发展, 湿陷性黄土层厚度增大, 如宝鸡第二电厂地基的自重湿陷性黄土厚 18.2 m, 蒲城电厂的湿陷性黄土层厚 35.0 m, 宁夏扶贫扬黄工程的自重湿陷性黄土层厚 36.0 m。处理如此深厚的湿陷性黄土地基缺少经验, 难以把握, 成为困扰黄土地区工程设计人员的一个突出难题, 甚至出现了唯桩才放心以及盲目采用桩基的现象。本文就大厚度湿陷性黄土的处理原则和方法, 结合工程实例进行初步探讨。

2 湿陷性黄土地基处理深度的基本思路

对于湿陷性黄土地基处理的工程实践已有几十年, 具体方法也很多, 但归纳起来其基本思路^[3, 4]不外乎以下几种:

(1) 全部消除基础以下黄土层湿陷性, 这对于湿陷性黄土土层厚度在 15 m 以内时容易达到, 其常用方法有垫层法(处理深度 1~3 m)、强夯法(处理深度 3~12 m)、挤密法(处理深度 5~15 m)等。

(2) 部分消除基础以下黄土层湿陷性, 根据建(构)筑物的重要性及分类, 限定最小处理厚度, 严格控制剩余湿陷量。

(3) 基础穿透湿陷性黄土层, 传力于非湿陷性土层或可靠的持力层上, 常用方法就是桩基。这种方法被广泛应用于比较重要的建(构)筑物的基础。

(4) 充分做好建(构)筑物基础的防水、排水措施, 使基础下湿陷性黄土地基无法浸水, 以达到避免地基湿陷的目的。

3 大厚度自重湿陷性黄土地基处理有关问题的探讨

多年来对于大厚度自重湿陷性黄土是否一定要消除其全部湿陷性问题, 很多工程设计工作者对此提出了疑问。笔者在工程实际中遇到过类似问题。在过去大量的工程实际应用中, 很多建(构)筑物基础以下处理深度(3~5 m)和剩余湿陷量还很大, 但没有水浸入地基, 使用多年也未发现地基湿陷问题。

以宁夏扬黄扩灌工程为例, 通过调查分析发现, 该地区常年降雨量很小^[5], 为 180~400 mm, 而年蒸发量却达到 1 800~2 200 mm, 相当于年降雨量的 5~10 倍, 雨水很难渗透到深厚的湿陷性土层中。据宁夏自治区水电设计院地质勘测队对原固海老灌区地下水变化的大量调查发现, 老灌区十多年来的灌溉运行并没有影响到地下水位的变化, 且大量的灌溉水量仅仅只能引起地表 10 m 范围内的土壤含水量发生变化, 10 m 以下土层含水量保持在稳定状态。另据原建工部建筑科学研究所和西安市自来水公司等单位曾在西安韩森寨一带进行的管道漏水影响范围的试验, 连续漏水 23~153 d, 漏水量为 600~1 400 t, 最大浸湿范围为 5.0~7.3 m。同时, 用 $\phi 350$ mm 的混凝土管做试验, 漏水 32 d 后浸湿范围基本稳定, 最大影响半径为 5.0 m。笔者认为, 大厚度湿陷性黄土是否一定要彻底消除其湿陷性这一问题很值得研究, 尤其在西北地区, 由于该地区湿陷性土层较厚, 通常湿陷性土层厚度在 20 m 以上, 最大达 40 m。完全消除这些土层的湿陷性往往要花费很大代价, 所以对这一问题的深入研究具有直接的经济效益, 能够大量节约工程投资, 并缩短工程工期。

但也有很多相反的工程实例, 如: 兰州一开开关站位于黄土 III~IV 级阶地, 自重湿陷性土层厚大于 20 m, 基础下地基处理采用灰土垫层, 其厚度为 6 m, 剩余湿陷量大于 100 cm。工程交付使用 1 a 后, 地基出现不均匀下沉。兰州红山根一六层住宅楼, 位于黄土 II 级阶地, 自重湿陷性土层厚度大于 15 m, 基础下为灰土挤密桩, 深度为 8 m, 剩余湿陷量为 60 cm。在使用 3 a 后, 地基出现不均匀下沉。类似的工程事故很多(见表 1)^[6]。

根据笔者多年在大厚度自重湿陷性黄土地区地基下沉事故的调查统计分析, 地基处理深度为 10~15 m 且下部未处理湿陷性黄土层的剩余湿陷量还很大, 地基出现的下沉事故相对较少。因此笔者认为:

(1) 现行规范^[4]在自重湿陷性黄土场地上, 仅用剩余湿陷量(乙类建筑不应大于 150 mm, 丙类建筑不应大于 200 mm)控制地基处理深度还不尽合理。对于某些在大厚度自重湿陷性黄土场地上的乙类、丙类建筑, 即使地基处理深度大于 15 m, 未处理地基部分的剩余湿陷量也无法控制在 150~200 mm 范围之内。地基处理再加深, 也无法体现其技术和经济的合理性。

表1 建筑物的湿陷事故和地基处理后剩余湿陷量的关系^[6]

Table 1 Relation between collapse accident of building and residual collapse settlements after foundation treatment^[6]

单位名称	工程名称	总湿陷量/cm	处理厚度/m	剩余湿陷量/cm	浸水原因	损坏程度
兰州石油 化工机器 段钢车间 厂	二分厂	70	1.5	47	水管冻裂 漏水	严重
	段铁车间	46	1.0	37	地面和室 外漏水	严重
	段铁车间	29	1.0	24	地面和管 沟漏水	严重
兰州机车 车辆厂	空气压 缩站	55	1.0	25	下水倒灌	较严重
	锻工车间	59	3.5	33	地沟漏水	严重
	大联合 车间	50	3.5	22	室内下水 倒灌	轻微
兰州铁路 局	热处理 车间	41	3.5	33	地沟漏水	严重
	锻工车间	41	5.1	22	水管冻裂 漏水	轻微
兰州钢厂	二炼车间	40	2.0	30	循环水浸 入地基	严重
	三轧车间	31	1.5	24	地沟漏水	严重
	二轧车间	27	1.5	20	明沟漏水	轻微
	15号厂房	40	3.0	17	下水管道 漏水	轻微
兰州棉纺 厂	纺织车间	29	1.2	24	明沟漏水	较严重
安宁某厂	1号厂房	30	1.0	24	室内下水 漏水	严重
岷山厂	锻工车间	23	1.5	13	室外雨水 浸入地基	轻微

(2) 在大厚度自重湿陷性黄土地地上, 无论建筑物采用何种基础形式, 地基处理宜采用整片处理, 整片处理比局部处理整体性效果好, 剩余湿陷量的控制也可适当放宽。即使在处理深度以下发生局部湿陷变形, 整片“垫层”能发挥一种“拱”的作用, 可减少地面沉降。若采用局部地基处理时, 剩余湿陷量应严格控制或全部消除。

(3) 在自重湿陷性黄土地地(甲类建筑和对变形有特殊要求的工程除外)上, 剩余湿陷量的控制应与地基处理厚度和自重湿陷性黄土层厚度相联系。当自重湿陷性黄土层厚度不大, 且地基处理厚度较薄时, 剩余湿陷量控制应严格, 或在有条件时应全部消除湿陷性。当自重湿陷性黄土层厚度很大, 且地基处理厚度较厚时, 剩余湿陷量的控制可适当放宽。

(4) 根据地质条件、湿陷性黄土厚度、湿陷量大小、湿陷敏感程度、荷载大小等多种因数和笔者多年工程经验, 建议采用整片最小地基处理厚度和剩余湿陷量控制(见表2)。

表2 整片地基最小处理厚度与剩余湿陷量

Table 2 The minimum foundation treatment deepness and residual collapse settlements

自重湿陷性黄土层厚度/m	整片地基处理厚度/m	剩余湿陷量/mm	
		乙类建筑	丙类建筑
0~10	3~5	0	100
	6~8	100	150
10~20	8~12	150	200
	12~15	200	300
>20	15~20	300	400
	>20	>300	>400

基于甲类建筑的重要性, 地基受水浸湿的可能性和使用上对不均匀沉降的严格限制等与其他建筑都有所不同^[7], 而且甲类建筑的投资规模大, 工程造价高, 一旦出问题, 后果很严重。为此不允许甲类建筑出现任何破坏性的变形, 也不允许因变形而影响使用, 故对其处理应从严, 要求消除地基的全部湿陷量。

乙、丙类建筑涉及面广, 地基处理过严, 将增加建设投资, 不符合我国湿陷性黄土地区现有的技术经济水平。因此, 只要求消除其地基的部分湿陷量, 然后根据地基处理的程度或剩余湿陷量的大小, 采取相应的防水措施和结构措施, 以弥补地基处理深度的不足。

通过对这一问题的深入研究可知, 如能合理地控制剩余湿陷量, 则施工相对简单、工期短, 可节约工程投资, 具有直接的经济和社会效益。

4 大厚度自重湿陷性黄土地基处理方法

湿陷性黄土地区地基处理常用处理方法为: 垫层法、夯实法(强夯、重夯)、挤密法、预浸水法以及化学加固法等(见表3)。

近年来, 许多大型工程建设项目不得不建造在大厚度湿陷性黄土地地上, 因而地基处理的深度和难度越来越大, 而现有的地基处理方法(包括高能量强夯和挤密法等), 一般只能消除基底下 10~15 m 地基土的湿陷性, 当基底下的湿陷性黄土层厚度大于 15 m 时, 往往需要采用桩基穿透湿陷性黄土层予以处理, 为了使地基处理工作技术先进、经济合理、确保质量, 今后尚应研究和开发行之有效的处理大厚度湿陷性黄土地基的新方法。本节结合几个

表 3 湿陷性黄土常用的地基处理方法
Table 3 Common methods for foundation treatment of collapse loess

名称	适用范围	一般可处理基础下的湿陷性土层厚度/m
垫层法	素土	地下水位以上的湿陷性黄土, 局部或整片处理
	灰土	
夯实法	强夯	$S_r \leq 60\%$ 的湿陷性黄土, 局部或整片处理
	重夯	
挤密法	成孔挤密	$w \leq 24\%$, $S_r \leq 70\%$ 的湿陷性黄土, 局部或整片处理
	孔内夯实挤密	
预浸水法	III, IV 级自重湿陷性黄土地基, 可消除地面下 6 m 以下土层的湿陷性	(地面下 6 m, 可用素土(灰土)垫层法或夯实法处理)
化学加固法	单液硅化法	一般用于加固地下水位
	碱液加固法	以上的既有建筑物地基

工程实例, 对能够满足大厚度自重湿陷性黄土处理深度的几种处理方法、处理机制及适用范围进行研究探讨。

4.1 预浸水法

预浸水法适宜处理自重湿陷性黄土层厚度大于 10 m, 自重湿陷量大于 500 mm 的场地, 可消除地面 6 m 以下的土层湿陷性。预浸水法最早是用于水工建筑处理地基^[8]。1958 年美国用于处理 medicine creek 土坝地基, 避免土坝在施工和使用期间产生大量的不均匀沉降。1963 年罗马尼亚用于处理大型水池的地基处理。20 世纪 60 年代, 前苏联将预浸水与重锤、土桩等配合使用, 应用到住宅和工业建筑中, 后来又提出采用预浸水法和爆炸综合作用的方法, 可以减少用水量缩短浸水时间、加快湿陷进程。

自 1960 年以来, 我国开展了预浸水处理工业厂房黄土地基的试验研究。1968 年甘肃省有色冶金公司建筑研究所与设计、施工单位配合, 通过现场试验, 将预浸水与土垫层配合使用, 处理了兰州连城铝厂大厚度自重湿陷性黄土地基^[9]。该厂采用预浸水处理的 14 项工程, 经多年来的使用, 效果良好。

2001 年结合国家重点工程, 笔者在宁夏扬黄扩灌工程第 10~12 和南城拐子 4 个泵站厂房预浸水处理大厚度自重湿陷性黄土地基工程, 进行了一系列的研究, 现将目前国内预浸水处理规模最大、有代表性的 11 泵站试验研究成果^[10]介绍如下。

宁夏扬黄扩灌工程 11 泵站主副厂房总长 77.5 m,

主厂房宽 13.0 m, 副厂房宽 14.5 m。其地基为自重湿陷性黄土, 自重湿陷土层厚度达 36.5 m, 自重湿陷等级为 III~IV 级, 湿陷评价为严重~很严重。由于黄土地基湿陷等级太高, 而且厚度很大, 且为大量用水的建(构)筑物, 经过多种处理方法比较, 地基处理方案确定采用预浸水处理, 全部消除黄土的自重湿陷性。设计在建筑物周边扩宽 5~10 m, 试坑尺寸为 110 m×70 m。浸水坑深 80 cm, 在坑内打浸水孔, 孔径 150 cm, 孔深 23 m, 孔距 5.0 m, 孔内填入碎石或砂砾石。浸水时, 保持水头在 0.5 m 以上; 经过 224 d 的持续观测(其中浸水观测 162 d, 停水观测 62 d), 坑内停水前沉降量 127.5~188.6 cm, 平均 167.7 cm, 停水后沉降量 16.2~85 cm。图 1 给出了浸水中期试坑周围的地表形态。该工程采用预浸水处理的 4 个泵站, 经过 3 a 的使用, 效果良好, 地基未出现问题。



图 1 浸水中期试坑周围的地表形态

Fig.1 Ground form around water pool in immersion metaphase

根据以往的工程经验, 预浸水法处理湿陷性黄土地基耗时较长(一般根据消除湿陷性土层厚度决定), 一般停水后要 100 d 左右的时间才能使土层的含水量降低到最初状态, 因此采用预浸水处理时一般工期较长。预浸水处理只能消除地表 6 m 以下土层的湿陷性, 对于表层 6 m 范围内的土层还存在外荷湿陷, 应结合使用换填、强夯等办法消除外荷湿陷。这种方法的缺点是对深厚湿陷性黄土来说, 耗时太长, 往往影响工期。优点是施工方便, 费用较低。

4.2 孔内夯实挤密法(DDC 法)

司炳文^[11]在挤密桩的应用基础上发展了一种新方法——孔内夯实挤密法(DDC 法)。孔内夯实挤密法是借鉴挤密法变革而来的, 它先是用长螺旋钻机(见图 2)、人工挖孔或沉管打桩机成孔, 在向孔内填入素土、灰土等填料, 在以重夯锤(1.5~2.5 t)(见图 3)在孔内分层夯实, 使填料向孔周侧向挤出, 一般成孔直径为 0.4 m, 夯扩至成桩直径 0.55~0.60 m, 形成一种挤密的复合地基, 其特点如下:

(1) 具有能量高、超压强、强挤密的作用机制,



图2 成孔的长螺旋钻机

Fig.2 Long twist drill



图3 1.5~2.5 t 重夯锤

Fig.3 Weight hammer of 1.5 - 2.5 t

高能量在孔内深层部位进行冲、挤、压，使其孔内的填料和桩间土得到超强压力的固结。

(2) 处理深度深，地基处理深度可达 30 m。

(3) 成孔、夯击简单方便，钻、挖均能成孔，机械设备简单。

(4) 成桩孔径大、挤密效果好，一般桩径为 600~2 000 mm，最大可达 3 500 mm。

(5) 对填料要求低，建筑垃圾、矿渣、粉煤灰、灰土和素土等均能使用。

DDC 法是一种新型的地基处理方法，近十几年来，在陕西、山西、河南、甘肃、青海在处理大厚度湿陷性黄土地基中已得了广泛使用。对于其加固机制、消除湿陷、控制地基沉降的认识和设计理论研究方面，正在向成熟阶段发展。

结合天水甘谷 110 kV 变电所工程地基处理，作

者对 DDC 法处理自重湿陷性黄土地基进行了系统试验研究。该场地位于渭南南岸 III 级阶地，黄土层厚度大于 40 m，自重湿陷性土层厚度自地面向下 20 m，自重湿陷性等级为 IV 级。经过多种方案对比，最终采用 DDC 整片复合地基处理方案。预成孔直径 0.4 m，孔心距 1.0 m，等边三角形布置，成桩直径大于 0.6 m，夯击能 800~2 000 kJ，桩体压实系数 0.95，桩间土平均挤密系数 0.93，处理深度 15 m，剩余湿陷性小于 20 cm。

施工先采用长螺旋钻机钻进成孔，达到预定深度后，用重锤(重 1.5~2.0 t)进行底夯 4~6 击，然后孔内进行填料(每次填料 0.10~0.15 m³)，用重锤进行挤扩，夯击次数 4~6 击。夯锤落距标准由试验确定，当落距为 10~12 m 时，此时夯击能为 2 000 kJ 左右，夯击次数为 4 击；当落距为 5~10 m 时，此时夯击能为 800~2 000 kJ，夯击次数为 5~6 击，成桩顺序为隔排、隔桩 4 遍打完。

效果检验采用桩身开剖，深度为 15 m。成桩直径：3~5 m 为 500~570 mm，5~10 m 为 500~600 mm，10~15 m 为 550~700 mm，地表下 2 m 以内，成桩挤密效果不佳，深部成桩挤密效果好。第 1, 2 遍成桩直径较大，第 3, 4 遍成桩直径较小。压实系数：桩体压实系数一般为 0.94~1.05，上下比较均匀。桩间土最小挤密系数一般为 0.84~0.88，平均挤密系数一般为 0.88~0.91，基本消除在 200 kPa 压力下的湿陷性。

采用 DDC 法处理后的地基，桩间土的湿陷性基本消除，土的力学性质得到明显改善，深部挤密效果好于浅部。该工程已运行 5 a，未发现地基下沉问题，使用情况良好。

应当指出的是，孔内夯实挤密法在地基加固机制及计算理论方面还有待进一步研究与完善，以促进我国大厚度湿陷性黄土地基处理技术的发展。

4.3 挤密法

我国使用挤密法最早在 20 世纪 60 年代，国外如前苏联、罗马尼亚等在这方面的研究工作比较活跃，有些试验规模也较大，但尚未看到系统的成果资料。1968 年原建工部建筑科学研究院西北科研小分队在甘肃天水与原建工部七局五公司等单位协作，对湿陷性黄土地基进行了“爆扩挤密”的试验研究^[12]。20 世纪 70 年代起，西安地区用“机械挤密”处理湿陷性湿陷性黄土地基取得了较好的试验效果，并在工程中大量推广应用。“机械挤密”在兰州、天水等地对大厚度自重湿陷性黄土的地基处理进行了大规模的试验研究^[13]，取得了较好的试验

成果, 在工程中得到大量推广应用。目前, 挤密法是一种很成熟的地基处理方法。主要应用于多层及高层建筑物的地基处理, 因其具备施工速度快、造价低廉、施工设备简单、技术可靠、社会效益好及处理厚度大等特点, 得到了越来越广泛的应用。

该法的特点: 挤密地基是以消除黄土湿陷性、减小土的压缩性和提高地基承载力为最终目的。挤密法属于沉管横向挤密, 处理后的地基竖向均匀, 一般处理深度较大, 可达 5~15 m; 孔的材料是素土、灰土等, 属就地取材的廉价材料, 造价低, 地基处理效果好。

该法的机制: 挤密作用是通过两方面作用来实现的: 一是利用机械打桩成孔, 在成孔时将孔周围的土挤密, 提高了桩间土的密实度和承载力, 消除黄土湿陷性; 二是利用孔内夯实灰土遇水分解、膨胀, 脱水、固结, 使土桩与桩间土共同形成复合地基, 从而达到挤密地基效果, 提高地基承载力, 消除湿陷性, 使地基土变形均匀, 沉降量减少。

处理深度: 应根据建筑物重要性、地基的湿陷类型、湿陷等级以及湿陷土层厚度, 并结合打桩机械的条件综合考虑决定桩长, 从基础底面算起, 一般不小于 3 m, 处理厚度过小, 采用挤密地基很不经济, 由于机械设备限制, 处理深度最深不宜大于 15 m。

结合兰州张家台 330 kV 变电所工程地基处理, 对挤密法处理自重湿陷性黄土地基进行了系统试验研究^[4]。张家台 330 kV 变电所位于兰州市西固区达川乡东北侧的达家台上, 地处黄河左岸 IV 级阶地, 场地地层自上而下为: (1) 黄土状粉土, 层厚 33~40 m。上部浅黄色, 稍湿, 垂直节理发育, 有虫孔和大孔隙; 17 m 以下呈棕黄色, 略显水平层理。(2) 黄土状粉质黏土, 层厚大于 30 m, 棕红色, 一般可塑, 含可见孔隙, 具水平层理, 夹黄土状粉土薄层。该场地的湿陷性土层下限深度大于 30 m, 湿陷系数 $\delta_s = 0.003 \sim 0.114$, 自重湿陷系数 $\delta_{zs} = 0.003 \sim 0.085$, 自重湿陷量 $A_{zs} = 23.10 \sim 172.51$ cm, 总湿陷量 $A_s = 52.2 \sim 213.8$ cm, 为自重湿陷性黄土场地, 湿陷等级一般为 IV 级。设计采用挤密法处理地基, 为整片处理。桩孔直径均为 400 mm; 按等边三角形布孔, 孔心距为 950 mm。地基处理深度为 15 m。

孔内填料试验结果见表 4。两桩间中点挤密土密实度抽检, 两桩间中点部位挤密土抽检的含水量、干密度和挤密系数试验结果见表 5。三桩间挤密土最小密实度抽检, 三桩间处理单元重心点部位挤密土的最小挤密系数 $\eta_{c\min}$ 试验结果见表 6。

表 4 孔内填料试验结果

Table 4 Test results of hole packing

探井编号	填料种类	含水量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	压实系数 λ_c
2 区-1	灰土	12.8~18.4	1.57~1.63	0.96~1.00
		12.8~18.1	1.52~1.68	0.96~1.00
	素土	13.0~14.9	1.62~1.71	0.94~0.99
		13.0~14.9	1.60~1.73	0.94~0.99
2 区-2	灰土	13.5~17.4	1.59~1.62	0.98~0.99
		13.5~17.4	1.58~1.63	0.98~0.99
	素土	11.7~16.6	1.66~1.72	0.96~0.98
		11.7~16.6	1.79~1.93	0.96~0.99
2 区-3	灰土	13.7~17.1	1.56~1.64	0.96~1.01
		13.7~17.1	1.53~1.59	0.96~1.01
	素土	12.3~15.2	1.63~1.71	0.94~0.99
		12.7~15.2	1.61~1.69	0.94~0.99

表 5 两桩间试验结果

Table 5 Test results of two piles

探井编号	含水量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	挤密系数 η_c
2 区-1	12.9~16.1	1.47~1.65	0.86~0.95
2 区-2	11.8~19.5	1.49~1.72	0.88~1.02
2 区-3	11.5~17.0	1.54~1.67	0.91~0.98

表 6 三桩间试验结果表

Table 6 Test results of three piles

探井编号	$\eta_{c\min}$
2 区-1	0.86~0.95
2 区-2	0.84~0.94
2 区-3	0.84~0.93

挤密效果检验采用桩身剖剖, 深度 15 m。成桩直径: 0~15 m 为 400~450 mm, 地表下 0.5 m 以内, 成桩挤密效果不佳(表层松动层), 深部成桩挤密效果好, 且上下均匀。桩体压实系数一般为 0.94~1.00, 上下比较均匀; 三桩间土最小挤密系数一般为 0.84~0.95, 平均挤密系数一般为 0.88~0.91, 基本消除在 200 kPa 压力下的湿陷性。

采用挤密法处理后的地基, 桩间土的湿陷性全部消除, 土的力学性质得到明显改善, 挤密效果上下均匀。该工程已运行 2 a, 未发现地基下沉问题, 使用情况良好。

在该场地自重湿陷性黄土层处理厚度为 15 m, 其剩余湿陷性量大于 800 mm, 但因做好了必要的防排水措施, 能够保证工程的正常使用。

5 结 论

在大厚度自重湿陷性黄土场地上, 针对涉及面广的乙、丙类建筑, 地基处理要求过严, 将增加建设投资, 有些处理方法因机械设备条件的限制, 无法达到处理深度的要求。因此只要求消除其地基的部分湿陷量, 然后根据地基处理的不同深度及合理的控制剩余湿陷量的大小, 并采取相应的防水措施和结构措施, 以弥补地基处理的不足, 来保证工程的正常使用。

在大厚度自重湿陷性黄土场地上, 无论建构筑物采用何种基础形式, 地基处理宜采用整片处理, 整片处理比局部处理整体性效果好, 剩余湿陷量的控制也可适当放宽。

湿陷性黄土地基处理方式多种多样, 针对不同的工程特点和要求, 选用合适的处理方法非常重要。预浸水法、DDC法和挤密法都是处理大厚度湿陷性黄土地基行之有效的方法, 在推广应用的同时应注意总结经验, 进一步加以改进, 只要合理的控制剩余湿陷量, 就可达到施工简便、保证质量、节约工程投资的目标, 取得良好的经济效益和社会效益。

参考文献(References):

- [1] 钱鸿缙, 罗宇生. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.(QIAN Hongjin, LUO Yusheng. Collapsed loess foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985.(in Chinese))
- [2] 白凤龙, 商日媛. 兰州西津村黄土及其地球化学环境[C]// 全国黄土学术会议论文集. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1994: 96 - 102.(BAI Fenglong, SHANG Riyuan. Loess and geochemical environment in Xijinchun, Lanzhou[C]// China Loess Learning Conference Discourse. Urumchi: Xingjiang Science and Sanitation Press, 1994: 96 - 102.(in Chinese))
- [3] 罗宇生, 汪国烈. 湿陷性黄土研究与工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 123 - 126.(LUO Yusheng, WANG Guolie. Research and engineering of collapsed loess[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001: 123 - 126.(in Chinese))
- [4] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50025 - 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.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50025 - 2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [5] 王军平. 对深厚湿陷性黄土地基处理的探讨[J]. 西北水电, 2004, (2): 41 - 43.(WANG Junping. Discussion on profundity collapsible loess foundation treatment[J]. Northwest Water Power, 2004, (2): 41 - 43.(in Chinese))
- [6] 罗宇生. 湿陷性黄土地基处理[J]. 陕西建筑, 2005, (1): 26 - 30.(LUO Yusheng. Collapsible loess foundation treatment[J]. Shaanxi Architecture, 2005, (1): 26 - 30.(in Chinese))
- [7] 廖盛修. 湿陷性黄土地基预浸水[J]. 有色冶金建筑, 1983, (2): 1 - 13.(LIAO Shengxiu. Collapsible loess foundation beforehand immersion[J]. Coloured Metallurgy Building, 1983, (2): 1 - 13.(in Chinese))
- [8] BELES A A, STANCULESCU I I, SCHALLY V R. Protection of loess-soil foundation for hydraulic structures[C]// Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1969: 389 - 397.
- [9] 甘肃省有色冶金公司建筑研究所. 预浸水处理湿陷性黄土地基的试验及应用[J]. 建筑技术通讯, 1973, (1): 48 - 58.(Gansu Province Coloured Metallurgy Company Building Research Institute. Test of prewetting method for treatment foundation and application[J]. Building Technology Communication, 1973, (1): 48 - 58.(in Chinese))
- [10] 甘肃省建筑科学研究院. 宁夏扶贫扬黄灌溉工程 11 泵站预浸水法处理地基施工、沉降观测及效果检验报告[R]. 兰州: 甘肃省建筑科学研究院, 2002.(Building Research Institute of Gansu Province. Prewetting method for treatment foundation in Ningxia Yellow River pumping irrigation project of the eleventh pump station[R]. Lanzhou: Building Research Institute of Gansu Province, 2002.(in Chinese))
- [11] 司炳文. 湿陷性黄土地基处理的新技术(DDC工法)[C]// 全国黄土学术会议论文集. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1994: 245 - 247.(SI Bingwen. A new technology(DDC constructing method) for collapsed loess treatment foundation[C]// China Loess Learning Conference Discourse. Urumchi: Xingjiang Science and Sanitation Press, 1994: 245 - 247.(in Chinese))
- [12] 甘肃省建工局建筑科学研究所. 自重湿陷性黄土土桩挤密地基的试验研究[R]. 兰州: 甘肃省建工局建筑科学研究所, 1979.(Building Research Institute of Gansu Province. Research of crush pile for collapse loess under overburden pressure[R]. Lanzhou: Building Research Institute of Gansu Province, 1979.(in Chinese))
- [13] 甘肃省建工局建筑科学研究所. 自重湿陷性黄土挤密地基的试验研究[R]. 兰州: 甘肃省建工局建筑科学研究所, 1982.(Building Research Institute of Gansu Province. Research of crush pile for collapse loess under overburden pressure[R]. Lanzhou: Building Research Institute of Gansu Province, 1982.(in Chinese))
- [14] 中国建筑技术集团有限公司甘肃公司. 330 kV 张家台变电所挤密地基试验报告[R]. 兰州: 中国建筑技术集团有限公司甘肃公司, 2004.(China Building Technology Group Ltd.(Gansu). Research report of crush pile for 330 kV transformer substation in Zhangjiatai[R]. Lanzhou: China Building Technology Group Ltd.(Gansu), 2004.(in Chinese))