

# 强夯法处理湿陷性黄土地基 ——以西北地区某水库坝基处理为例

吴向涛 程红涛

黄河勘测规划设计研究院有限公司

DOI:10.12238/jpm.v4i10.6270

**[摘要]** 湿陷性黄土在我国西北地区分布广泛,对工程建设的勘察设计施工及运营都有很大的影响。强夯法作为处理湿陷性黄土的主要处理方法之一,广泛应用于西北地区湿陷性黄土地基处理实践中。正确认识湿陷性黄土地基的物理力学参数以及设计合适的设计强夯方案,对地基处理效果影响很大,亦直接影响到工程施工运营安全。

**[关键词]** 湿陷性黄土;地基处理;强夯法;强夯质量控制

Dynamic compaction method for the treatment of collapsible loess foundation

——Take the treatment of a reservoir in northwest China as an example

Wu Xiangtao, Cheng Hongtao

Yellow River Survey, Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450003

**[Abstract]** The collapsible loess is widely distributed in northwest China, which has a great influence on the survey, design, construction and operation of engineering construction. As one of the main treatment methods for collapsible loess, dynamic compaction method is widely used in the foundation treatment of collapsible loess in northwest China. The correct understanding of the physical and mechanical parameters of collapsible loess foundation and the design of appropriate design dynamic compaction scheme have a great impact on the foundation treatment effect and directly affect the safety of engineering construction and operation.

**[Key words]** collapsible loess; foundation treatment; dynamic compaction method; dynamic compaction quality control

## 1、湿陷性黄土分布

黄土是晚新生代的堆积物,广泛分布在北半球的北纬 30°~60° 和南半球 35°~40° 之间,特别是北半球分布广,厚度大。我国黄土的分布面积达 440680km<sup>2</sup>,在我国境内主要分布在西北陕西、山西及甘肃等省区,中部河南、山东、河北等省区亦有分布<sup>[1]</sup>。

一般认为,黄土的成因主要为风力沉积。刘东生先生指出:以风力搬运、堆积未经次生扰动的、无层理的黄色粉质含碳酸

盐并具有大孔隙的土状沉积物称之为黄土<sup>[2]</sup>。马兰黄土、离石黄土和午城黄土分别代表晚、中、早第四系时期的黄土堆积。

具有湿陷性的黄土,平面分布占黄土总面积的 75%。黄土的湿陷性是黄土在一定压力下受水浸湿后,结构迅速破坏并产生明显附加下沉的性质。黄土的湿陷性与其自身的颗粒组成、黏粒含量、显微结构、孔隙比、碳酸钙含量与赋存状态、天然含水量、饱和度及液限等都有一定的关系。一般认为马兰黄土及离石黄土的表层多具湿陷性,但根据工程建设经验,某些深

切沟谷的侧壁, 离石黄土湿陷深度亦较大。

湿陷性黄土作为各类建(构)筑物的地基, 如不进行必要的处理, 遇水后将产生较大的下沉, 从而导致建(构)筑物的超量沉降、不均匀沉降等, 对建(构)筑物的稳定性及安全性存在极大的不利影响。

## 2、黄土湿陷性常规处理方法

对于湿陷性黄土, 国内的工程建设经验已经十分丰富。常规的处理方法一般有换土垫层法、强夯法、挤密土桩法、灰土井桩法、硅化法、碱液加固法及热加固法等方法<sup>(4) (5)</sup>。不同的处理方法采用不同的处理原理, 都有其适宜性和局限性, 见表1。

表1 湿陷性黄土地基常规处理方法

处理方法	适用条件	处理原理	作用及效果	局限性
换土垫层法	地下水位以上	全部或部分置换湿陷性黄土	提高地基强度、消除或减少湿陷性	需较大施工场地, 对回填土土质要求较高
强夯法	$S_r \leq 60\%$	重锤吊起以一定高度自由落下	消除或减少湿陷性、提高强度	噪音大, 对强夯过程要求严格
挤密土桩法	$S_r \leq 60\%$ $\omega \leq 22\%$	桩管成孔, 内填夯实素土或灰土	消除湿陷性、提高强度	处理深度大时成孔困难
灰土井桩法	下伏非湿陷性密实土层	人工开挖或钻探成孔, 填以夯实灰土	消除湿陷性、提高强度	成孔难度较大
预浸水法	湿陷性中等~强烈的自重湿陷场地	使黄土预先完成湿陷	消除湿陷性、提高强度	浸水过程不易控制, 效果需补充勘察评估
硅化法 碱液加固法 热加固法	地下水位以上, 渗透性较好的湿陷性黄土	灌注化学溶液或加热	消除湿陷性、提高强度	处理过程需严格控制

## 3、工程区黄土物理力学特征及处理方法选择

### 3.1 工程区黄土物理力学特征

拟建西北某水库为注入型调蓄水库, 主坝长 900m, 最大坝高 28m, 正常蓄水位高程 1554m, 总库容约 933.95 万  $m^3$ 。坝址区地层较简单, 钻孔揭露深度范围内主要有白垩系下统砾岩、新近系中新统泥岩、泥质砂岩、砂岩互层、第四系中更新统至全新统松散堆积层。第四系覆盖层主要为中更新统离石黄土和上更新统马兰黄土。

上更新统马兰黄土 ( $Q_3^a$ ): 坝址区广泛分布, 层厚 5~10m, 其岩性主要为砂壤土及壤土, 土质不均, 夹粉细砂、细砂透镜体或薄层, 局部渐变为粉砂, 结构疏松, 植物根孔发育。

中更新统离石黄土 ( $Q_2^1$ ): 伏于上更新统马兰黄土之下, 层厚 5~20m, 呈浅桔红色, 土质均匀, 结构密实, 孔洞不发育, 岩性主要为中~重粉质壤土, 局部为粉质粘土及黏土。

根据可行性研究及初步设计阶段工程地质勘察成果, 坝址区马兰黄土及离石黄土土层物理力学指标见表 3<sup>(8)</sup>。

表3 坝址区土体物理力学指标建议值表

地层代号	$Q_3^a$	$Q_2^1$	
岩性名称	马兰黄土	离石黄土	
黏粒含量 (%)	16.00	16.75	
干密度 $\rho$ ( $g/cm^3$ )	1.55	1.65	
孔隙比 $e$	0.75	0.65	
土粒比重 $G_s$	2.70	2.70	
塑性指数 $I_p$	9.80	10.20	
压缩系数 $A_{v1-2}$ ( $MPa^{-1}$ )	0.22	0.20	
压缩模量 $E_{s1-2}$ (MPa)	8.50	9.00	
抗剪强度(自然)	内聚力 (kPa)	23.0	25.5
	内摩擦角 ( $^\circ$ )	20.0	22.5
地基承载力 (kPa)	180~210	200~220	
渗透系数 $K$ (cm/s)	$3.20 \times 10^{-5}$	$5.90 \times 10^{-6}$	

由于坝址区黄土存在湿陷性,在可行性研究及初步设计阶段工程地质勘察过程中着重对坝址区的湿陷性进行了针对性的原状土样采取及室内黄土湿陷性试验,并对试验成果进行了统计和分析。选取代表性勘探点,对坝址区湿陷量、湿陷深度及湿陷等级进行统计计算,结果见表4。

表4 勘探点湿陷量计算表

序号	取样位置	湿陷量 $\Delta s$ (mm)	自重湿陷量 $\Delta z_s$ (mm)	湿陷深度 m	湿陷等级
1	CZK01	96	0	4.0	I级(轻微) 非自重湿陷
2	CZK03	148.5	0	5.5	I级(轻微) 非自重湿陷
5	ZK26	356.9	242.6	4.5	II级(中等) 自重湿陷
6	ZK27	202.5	0	5.0	I级(轻微) 非自重湿陷

综合试验及计算成果,坝址区离石黄土除表层土体外基本无湿陷性、马兰黄土具轻微-中等湿陷性。湿陷等级为I级(轻微)非自重湿陷~II级(中等)自重湿陷,湿陷深度一般4~6m。

### 3.2 处理方法选择

地基处理应做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量、保护环境。根据坝址区工程地质条件、地形地貌、交通条件、附近居民点分布、施工单位技术能力、经济效益及质量保证等各方面因素,考虑到坝址区黄土湿陷性深度(4~6m),综合各种黄土湿陷性处理方法的适用性和局限性,推荐采用强夯法对坝基黄土进行处理。

## 4、强夯法加固机理及处理过程

### 4.1 加固机理

强夯法是法国梅那(Menard)技术公司与1969年首创的地基加固方法,亦称动力固结法<sup>(3)</sup>。主要原理是利用落锤产生的巨大夯击能(一般为600~10000kN·m)在地基中产生冲击波和动应力,对地基土进行挤密,提高地基的承载力,降低其压缩性,消除或降低黄土地基的湿陷性,提高砂土地基的抗液化能力<sup>(6)</sup>。

### 4.2 设计计算

#### (1) 处理深度

强夯的加固处理深度,应根据工程建设对地基土的物理学指标要求、地基处理目的及工程地质条件等综合确定<sup>(4)</sup>。考虑到本工程大坝填筑的特性,结合坝址区具体地层结构和湿陷

性条件,处理深度按6m进行计算。

#### (2) 强夯能级

强夯能级应根据湿陷性黄土时代、处理深度、处理深度内地层含水率、饱和度等因素综合确定。不同能级的加固影响深度可按式1确定。初步设计时强夯能级宜根据当地试验资料或工程经验确定,亦可按表5选用。根据本工程计划处理深度,强夯能级选取4000kN·m。

$$Z = \alpha\sqrt{0.1Mh} \quad (\text{式1})$$

式中 Z——加固有效深度(m)

M——锤重(kN)

H——落距(m)

$\alpha$ ——修正系数。

表5 强夯能级与处理深度关系表

强夯能级 (kN·m)	处理深度(m)	
	全新统(Q <sub>4</sub> )黄土或 上更新统(Q <sub>3</sub> )黄土	中更新统 (Q <sub>2</sub> )黄土
1000	3.0~4.0	
2000	4.0~5.0	
3000	5.0~6.0	
4000	6.0~6.5	
5000	6.5~7.0	
6000	7.0~7.5	6.0~6.5
8000	7.5~8.5	6.5~7.5

#### (3) 强夯处理范围

强夯处理湿陷性黄土宜采用整片处理,平面处理范围应超出建(构)筑物基础外缘的宽度,不应小于设计夯实处理深度的1/2,且不小于3.0m。考虑到运营期水库可能发生的库底渗漏对地基土的影响,坝前处理范围为坝脚向库内延伸6m,坝后处理范围为坝脚向库外延伸6m。

#### (4) 夯点布置

根据建(构)筑物结构类型、地基土和地下水情况共同确定,宜按正三角形、正方形网格布置<sup>(7)</sup>。夯点中心距可取重锤直径的(1.2~2.0)倍。处理深度小、强夯能级低时取小值;处理深度大,强夯能级高时取大值。结合本工程实际条件,夯点按正三角形布置,间距取6.5m。

#### (5) 夯点的夯击次数

夯击次数应根据强夯试验夯击次数与夯沉量关系曲线、最后两击平均夯沉量、夯坑周边地面隆起程度等因素综合确定<sup>(7)</sup>。最后两击平均夯沉量,应满足表6的要求;夯坑周围地表不应

发生过大的隆起; 不因夯坑过深而发生提锤困难。

表6 最后两击平均夯沉量

单击夯击能 E (kN·m)	最后两击平均夯沉量不大于 (mm)
$E < 4000$	50
$4000 \leq E < 6000$	100
$6000 \leq E < 8000$	150
$E \geq 8000$	200

#### (6) 夯击遍数

夯击遍数根据地基土的性质和建(构)筑物的使用需求确定, 一般为2~3遍, 间隔时间根据土层孔隙水压力消散时间确定。根据本工程建(构)筑物条件以及地基地质条件, 设计夯击遍数选取3遍。第一遍点夯, 第二遍跳夯, 第三遍满夯; 第一遍第二遍间隔时间为7天, 第二遍第三遍间隔时间为7天。

#### 4.3 质量检测

强夯地基应检测地基承载力和夯实土的物理力学指标。考虑到本次处理的主要目的为消除处理深度内的湿陷性, 在强夯范围内另布置一定数量的探井, 探井内采取不同深度内的原状土样进行湿陷试验。

### 5、强夯质量控制

#### (1) 过程控制

强夯施工应在过程中严格按设计方案进行施工, 精确控制夯点位置、夯点间距、夯击次数、夯击遍数及间隔时间等, 准确测量每一击的夯沉量, 保证强夯处理效果。

#### (2) 强夯地基保护

施工中与竣工后的场地, 均应设置良好的排水系统, 防止场地被雨水浸泡, 形成弹簧土; 当天打完的夯坑, 应及时回填; 如降雨导致夯坑积水, 必须将水排除后挖净坑底淤土, 填入干土后方可继续施工; 强夯面要避免车辆的碾压, 竣工后的场地应及时投入使用, 不应久置。

#### (3) 冬季施工

冬季施工应根据所在地区的气温、冻深和施工设备性能及施工效益共同确定; 当最低温度在 $-15^{\circ}$ 以上、冻深在800mm以内时, 可进行点夯施工, 不可进行满夯施工, 点夯的击数和能级适当增加, 低于 $-15^{\circ}$ 时应停止强夯作业; 冬季点夯处理的地基, 满夯应在解冻后进行, 能级适当增加; 如跨年度长期不能施工, 冬季来临应填土覆盖保护, 厚度应大于标准冻深<sup>(7)</sup>。

### 6、强夯处理效果

#### 6.1 黄土湿陷性

为了验证黄土湿陷性的处理结果, 强夯前后在坝基范围内分别采取了6个点位的土样进行湿陷试验, 每个点位采样深度超过处理深度, 采样间隔1m。根据湿陷性试验结果, 处理前湿陷深度4.5~5.5m, 处理后, 强夯试验影响范围内的土样均不具湿陷性。

#### 6.2 地基土物理力学性质

强夯过程中重锤的势能转化为冲击动能, 使土体的孔隙率减小, 密实度增加, 压缩系数减小, 抗压缩性提高, 地基承载力亦有较大程度的提高。根据强夯前后的标准贯入试验数据, 处理前表层黄土的标贯击数7~10击提高到处理后的15~17击。承载力有了很大的提高, 干密度等物理力学性质也有了很大的提升。

#### 6.3 重点关注

强夯过程中对强夯面的保护极其重要, 包括避免降雨等地表水的下渗和汽车压路机等重型设备的碾压。本次强夯处理过程中, 经历了降雪、降雨。由于对强夯面未进行覆盖和排水保护, 汽车及施工机械又经常碾压, 导致填筑坝基时局部建基面出现了弹簧土, 不得不挖除返工, 影响工期和经济效益。

### 7、总结

湿陷性黄土在我国分布广泛, 西北地区工程建设受其影响很大。选择有效合理的处理措施对工程建设的质量、安全、投资及工期等均具有重大的积极意义。强夯法处理黄土地基的湿陷性目前已经比较成熟, 广泛应用于西北地区水利、公路、铁路及工民建等各行业工程建设中。合理的设计强夯方案和控制强夯过程, 是关系到地基处理质量和效果的关键。强夯过程中和完成后对强夯面的保护极为重要。

#### [参考文献]

- [1]张贵义等. 陇东黄土工程地质[M]. 陕西科学技术出版社. 2001.
- [2]刘东生. 黄土与环境[M]. 科学出版社. 1985
- [3]左名麟. 强夯法地基加固[M]. 中国铁道出版社. 1990
- [4]GB 50025-2018. 湿陷性黄土地区建筑标准[S]
- [5]工程地质手册编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 中国建筑工业出版社. 2018
- [6]彭士标等. 水力发电工程地质手册[M]. 中国水利水电出版社. 2011
- [7]DB62T375-2019. 甘肃强夯法处理黄土地基技术规程[S]
- [8]黄河勘测规划设计研究院有限公司. 某水库初步设计阶段工程地质勘察报告[R]. 2019