

ICS 编号

CCS 编号

团体标准

T/CHES XXX—2023

引调水工程湿陷性黄土地基处理 技术规程

Technical code for the treatment of collapsible loess foundations
for water-induction engineering

(送审稿修改)

中国水利学会 发布

前 言

根据中国水利学会团体标准制修订计划安排，按照《水利技术标准编写规定》（SL1-2014）的要求，编制本标准。

本标准共分为 8 章和 6 个附录，主要技术内容包括总则、术语和符号、基本规定、勘察与湿陷性评价、设计、施工、质量检查与检验、监测等。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送至中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条 16 号，邮编 100053），以便今后修订时参考。

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院 西安理工大学 西北农林科技大学

本标准参编单位：陕西省水利电力勘测设计研究院 陕西省引汉济渭工程建设有限公司 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆水利水电规划设计管理局 黄河勘测规划设计研究院有限公司 成都理工大学 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 中国水电建设集团十五工程局有限公司 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司 伊犁州南岸干渠灌区管理处 兰州交通大学

本标准主要起草人：赵卫全 邵生俊 张爱军 邢义川 王丽琴 陈武春 田养军 吕生玺 李江 谢遵党 杨西林 裴向军 林飞 陈刚 刘宏社 哈岸英 王建社 邢建营 周建华 邓国华 任文渊 李雄 柳莹 张晓库 边义成 杨玉生 张晓超 黄华新 郝杰 崔军旗 曹建忠 张国瑞 白玉龙 侯晓萍 邵帅 陶虎 罗亮明

本标准主要审查人：

目 次

前 言	II
1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 基本规定	4
4 勘察与湿陷性评价	5
4.1 一般规定	5
4.2 现场勘察	6
4.3 黄土湿陷性试验	8
4.4 场地湿陷性评价	10
5 设计	13
5.1 一般规定	13
5.2 处理原则与标准	14
5.3 工程处理设计	15
6 施工	20
6.1 一般规定	20
6.2 换填法	20
6.3 预浸水法	21
6.4 强夯法	21
6.5 挤密法	22
6.6 高压喷射法	24
6.7 桩基础	25
7 质量检测	26
7.1 一般规定	26
7.2 质量检测	26
8 监测	30
8.1 一般规定	30
8.2 监测	30
附录 A: 黄土湿陷变形的离心模型试验	33
附录 B: 黄土场地砂井浸水试验	38
附录 C: 黄土结构屈服湿陷变形分析方法	45
附录 D: 轻土工换填减重消减黄土地基湿陷的方法	48
标准用词说明	51
条文说明	52

1 总则

1.0.1 为规范引调水工程湿陷性黄土地基处理的勘察、设计、施工、质量检查与检验、试验，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于引调水工程建设中的蓄水建筑物、输水建筑物及其他水工建筑物的湿陷性黄土地基处理。

1.0.3 本规程主要引用下列标准：

GB50025 湿陷性黄土地区建筑标准

GB50487 水利水电工程地质勘察规范

GB/T50123 土工试验方法标准

GB/T 50290 土工合成材料应用技术规范

GB/T50600 渠道防渗衬砌工程技术标准

SL 265 水闸设计规范

SL274 碾压式土石坝设计规范

SL629 引调水线路工程地质勘察规范

SL654 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范

SL/T 792 水工建筑物地基处理设计规范

Q/CR 9511 铁路黄土隧道技术规范

1.0.4 引调水工程湿陷性黄土地基处理除应符合本规程外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 设计上覆压力下的饱和湿陷量 saturated collapse under actual overburden pressure

在设计上覆压力作用下，地基浸水饱和后的最大湿陷变形量。

2.1.2 结构屈服湿陷变形 collapsible deformation of structure compression yield

浸水后，压缩应力作用下土体结构屈服产生的湿陷变形。

2.1.3 砂井浸水试验 sand well collapsibility test

通过砂井将水导入一定深度土层，测定其湿陷性的试验。

2.1.4 构度指标 structure index

通过原状土、重塑土和饱和原状土的无侧限抗压强度定义的反映土体初始结构性的指标。

2.1.5 综合物理量 comprehensive physical index

综合土的含水率、颗粒比重、初始孔隙比及塑限的一个反映土体基本物理性质的指标。

2.1.6 结构压缩屈服应力 compressive yield stress

结构性土体的 e - $\lg p$ 压缩曲线上曲率半径最小的点对应的横坐标。

2.1.7 调蓄水池 water-storage tanks

天然或人工建造的无天然径流的蓄水工程，容积、坝高（参考小型土石坝水库）。

2.1.8 最大可能增湿变形量 maximum possible collapse deformation

黄土在实际压力作用下，发生实际程度的最大浸湿到一定含水率或者饱和度时，产生的湿陷变形量值，是黄土地基在运行期间最大可能发生的湿陷变形，小于等于饱和湿陷量，当最大可能浸湿含水率等于饱和含水率时两者一致。

2.2 符号

2.2.1 抗力和材料性能

e —孔隙比；

p —试样的实际上覆压力值；

S_r —饱和度；

w —含水率；

w_L —液限；

w_p —塑限；

w_{op} —最优含水率；

δ_s —湿陷系数；

δ_{zs} —自重湿陷系数。

2.2.2 作用和作用效应

Δ_{ps} —实际上覆压力下的饱和湿陷量；

Δ_s —湿陷量计算值。

2.2.3 计算系数

β_0 —因地区土质而异的修正系数；

β' —隧洞地基湿陷变形计算修正系数；

i —排水坡度；

i_{min} —地面最小排水坡度。

3 基本规定

3.0.1 湿陷性黄土地基处理勘察深度和设计方案应考虑工程类别、使用环境、建筑物功能、使用目的等因素。

3.0.2 引调水工程湿陷性黄土地基处理措施应根据建筑物类别和工程勘察对场地和地基的湿陷性评价结果等综合确定，可分为消除地基的全部或部分湿陷量、将基础设置在非湿陷性土层上及采用桩基础穿透全部湿陷性黄土层。

3.0.3 引调水工程湿陷性黄土地基处理采用新材料、新技术、新方法、新工艺应进行技术论证和现场试验。

3.0.4 湿陷性黄土地基处理时，应采取有效措施避免对周边环境和既有建筑物产生不利影响。

3.0.5 引调水工程湿陷性黄土地基处理应进行质量检验。

3.0.6 应根据水工建筑物类别、级别和运行管理要求对处理后的湿陷性黄土增设土体含水率和变形监测。

4 勘察与湿陷性评价

4.1 一般规定

4.1.1 引调水工程地质勘察的基本任务应为调查、查明工程地质条件和工程地质问题，为方案选择、线路比选、工程设计和施工提供工程地质资料。

4.1.2 引调水工程地质勘察范围应包括引调水线路和建筑物场址区及周边与其相关的地带，并满足方案选择、线路比选和工程设计的需要。

4.1.3 引调水工程地质勘察应满足《引调水线路工程地质勘察规范》(SL629)的规定，遭遇湿陷性黄土场地时，还应符合下列规定：

1 查明场地湿陷性黄土的类型、分布位置与范围以及湿陷性层的厚度与下限高程。

2 取原状黄土样，并试验测定不同深度（每 1m 深度 1 组）黄土设计压力下的湿陷系数、自重湿陷系数、湿陷系数和湿陷起始压力，以及每层土的上覆压力~湿陷系数 ($p-\delta_s$) 关系曲线。

3 对场地和地基做出岩土工程评价，根据评价结果提出地基处理措施建议。

4.1.4 引调水线路工程地质勘察阶段与引调水工程设计阶段相对应，划分为引调水线路工程规划、项目建议书、可行性研究、初步设计、招标设计和施工详图设计等阶段。

4.1.5 湿陷性黄土场地各个阶段工程地质勘察应符合下列规定：

1 规划阶段应收集区域地质资料，了解场地湿陷性黄土区的地形地貌形态、地层成因类型、出露条件、地质年代、接触关系、分布范围及岩性特征；了解地面径流情况和地下水埋设与分布。

2 项目建议书阶段应初步查明并测绘各比选线路及主要建筑物地段的湿陷性场地类型、范围与分布；初步开展取样与黄土湿陷性试验；对各个场地黄土的湿陷性进行初步评价。

3 可行性研究阶段应查明并测绘各比选线路及主要建筑物地段的湿陷性场地类型、范围与分布；补充取样与黄土湿陷性试验；对各个场地黄土的湿陷性进行评价，并根据湿陷等级给出地基处理措施。

4 初步设计阶段应查明各比选线路及主要建筑物地段的湿陷性场地类型、范围与分布；复核各个场地黄土的湿陷性进行评价结果，优化完善地基处理措施。

5 招标设计阶段应复核场地湿陷性黄土勘察结果。

6 施工详图设计阶段应完善勘察结果，完成施工中出现的工程地质问题勘察。

7 施工期应结合施工开挖，开展地质编录与新揭示工程地质问题勘察。

4.1.6 黄土湿陷试验所用的不扰动土样应为 I 级土样，采样应符合下列规定：

- 1 探井的深度应穿透湿陷性黄土层；
- 2 探井取样应采用机械洛阳铲或者人工挖孔，人工下井在探井侧壁取样的方法进行；每深度 1m 取样 1~2 组，土样最小边长不宜小于 150mm；
- 3 钻孔取样按《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025) 执行，应避免钻孔施工中灌水，改变土样含水率。

4.1.7 黄土场地湿陷性评价宜采用室内土工试验和现场试坑浸水试验相结合的方法，也可采用室内土工试验和黄土湿陷变形的离心模型试验（附录 B）相结合的方法，或室内土工试验和黄土场地砂井浸水试验（附录 C）相结合的方法。快速评价时，也可采用黄土结构屈服湿陷变形分析方法（附录 D）。土层的初始密度、含水率和力学指标宜以探井取样土工试验为准，地基自重湿陷量或实际压力下的湿陷量宜以现场试坑浸水试验或黄土湿陷变形的离心模型试验结果为准。

4.2 现场勘察

4.2.1 湿陷性黄土区渠道工程勘察应查明下列工作内容：

- 1 黄土的地层岩性、地层结构、各黄土层物理力学性质、湿陷下限、场地湿陷类型、地基湿陷等级等；
- 2 黄土陷穴、滑坡、崩塌、冲沟、土流(泻溜)及地裂缝等不良地质现象的成因、规模、发育特征、分布、类型，以及对渠道的影响；
- 3 渠基黄土层中地下水类型，地下水位及变化幅度；
- 4 渠道沿线黄土层中地下人工构筑物，以及对渠道的影响；
- 5 傍山渠道黄土山体边坡的稳定性；
- 6 现场取样并测试黄土的湿陷性相关参数；
- 7 对湿陷性场地进行湿陷性评价，确定场地湿陷等级，并给出地基处理措施建议。

4.2.2 湿陷性黄土区渠道工程勘察方法应符合下列规定：

- 1 勘探点应沿渠线布置，每个地貌单元不应少于 2 个，深度穿透湿陷性黄土层的勘探点不应少于 1 个，在微地貌变化较大地段或地貌单元分界地带应予以加密。
- 2 取土样和原位测试在每个黄土地貌单元上应具控制性和代表性，其采取不扰动土样的数量不得少于全部勘探点的 1/2，每一黄土地貌单元主要土层累计有效试验组数不应少于 6 组。

4.2.3 湿陷性黄土区隧洞工程勘察应包括下列工作内容：

- 1 黄土隧洞沿线地形地貌类型及分布特征；
- 2 黄土隧洞沿线黄土的成因类型、分布厚度、物质组成及其工程地质性质；
- 3 黄土隧洞沿线冲沟、盲沟、陷穴、地坑院或窑洞等不良地质体分布位置、形态特征、规模类型、发育程度和成因等；

4 穿越黄土塬、梁、峁洞段，应基本查明黄土的形成时代及湿陷性，潜蚀地貌类型、规模及分布特征，裂隙成因及发育特征，地下水分布及类型等；

5 黄土隧洞进出口、浅埋段、过沟段应基本查明上覆土层厚度、成因类型、物质组成及含水性和透水性，评价黄土隧洞进出口边坡及围岩稳定性；

6 现场取样并测试黄土的湿陷性相关参数；

7 对湿陷性场地进行湿陷性评价，确定场地湿陷等级，并给出地基处理措施建议。

4.2.4 湿陷性黄土区隧洞工程勘察方法应符合下列规定：

1 勘探点应沿洞线布置，对于黄土隧洞进出口段、浅埋段、过沟段应布置钻孔或探井；勘探深度应穿透湿陷性黄土层，进入设计洞底以下不宜小于 5m，且至少大于 1.5 倍洞径。

2 黄土隧洞围岩每一类土体室内物理力学性质试验累计有效组数不应小于 6 组。

4.2.5 湿陷性黄土区涵洞及管道工程勘察应包括下列工作内容：

1 黄土的地层岩性、地层结构、各黄土层物理力学性质、湿陷下限、场地湿陷类型、地基湿陷等级等；

2 黄土陷穴、滑坡、崩塌、冲沟、土流(泻溜)及地裂缝等不良地质现象的成因、规模、发育特征、分布、类型，评价对管(涵)的影响；

3 地基黄土层中地下水类型，地下水位及变化幅度；

4 穿越方式和最小埋置深度的地质建议；

5 对于采用顶管、拉管或定向钻等非开挖方式穿越时，应查明穿越段黄土的地层岩性、结构、均一性、含水率、密实度及地下水位变幅等。

6 现场取样并测试黄土的湿陷性相关参数；

7 对湿陷性场地进行湿陷性评价，确定场地湿陷等级，并给出地基处理措施建议。

4.2.6 湿陷性黄土区涵洞及管道工程勘察方法应符合下列规定：

1 勘探点应沿轴线布置，勘探深度应穿透湿陷性黄土层，对于重要镇(支)墩或地质条件复杂地段应加密勘探点。

2 不同黄土地貌单元各主要土层应取原状样进行室内物理力学性质试验，累计有效组数不应少于 6 组。

4.2.7 湿陷性黄土区蓄水池工程勘察应包括下列工作内容：

1 黄土层物理力学性质、湿陷土层厚度、场地湿陷类型、地基湿陷等级及其分布；

2 场区地下水位埋深，预估地下水位的季节性变幅和升降的可能性；

3 评价水池拟建场地的适宜性和稳定性；

4 现场取样并测试黄土的湿陷性相关参数；

5 对湿陷性场地进行湿陷性评价，确定场地湿陷等级，并给出地基处理措施建议。

4.2.8 湿陷性黄土区蓄水池工程勘察方法应符合下列规定：

1 黄土梁、峁、斜坡、沟谷、阶地等地形复杂地区测绘范围除应包括整个水池池盆外，还应包括水池正常蓄水位以上可能浸没区后缘。黄土塬区测绘范围可适当缩小。典型地段应做剖面地质测绘；

2 物探测试场地土体剪切波、视电阻率和氧化还原电位等指标，判定场地土体类型；

3 勘探主要采用井探和钻探相结合。勘探点沿场地纵横剖面或地貌单元纵向布置，勘探深度应穿越湿陷性黄土层；

4 各主要土层应取原状样进行室内物理力学性质试验，累计有效组数不应少于6组。

4.2.9 其他如水闸、泵站、渡槽、桥梁、跌水、倒虹吸等建筑物勘察工作内容和方法参照渠道工程执行。

4.3 黄土湿陷性试验

4.3.1 黄土地基湿陷性评价应在相关试验基础上进行，实际工程中宜根据工程等级和实际要求开展以下全部或者部分试验内容：

1 设计上覆压力下的室内黄土湿陷试验；

2 室内黄土增湿变形试验；

3 现场试坑浸水试验；

4 黄土湿陷变形的离心机模型试验；

5 黄土场地砂井浸水试验。

4.3.2 试验取样应自地表每隔1m采取不扰动土样，土样应保持天然的湿度、密度和结构，并应符合 I 级土样质量的要求。

4.3.3 钻孔取样应按照《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）附录E执行。

4.3.4 设计压力下的室内黄土湿陷试验组数应符合下列规定：

1 挖方工程应从挖方顶部高程到勘探深度底面每1m做1组；

2 填方和半挖半填工程应从填方基面到勘探深度底面每1m做1组。

4.3.5 设计上覆压力下的黄土湿陷试验方法应符合下列规定：

1 平行试验试样密度的允许差值应不大于0.03g/cm³；

2 试验前环刀、透水石应洗净、风干，滤纸、透水石的湿度应接近试样的天然湿度；

3 试验中试样上施加的垂直压力应为试样的设计上覆压力，其值应按式（4.3.5-1）

计算：

$$p = p_z + p_q \quad (4.3.5-1)$$

$$p_z = \rho_{sat} gh \quad (4.3.5-2)$$

$$\rho_{sat} = \rho_d \left(1 + \frac{S_r e}{G_s} \right) \quad (4.3.5-3)$$

式中： p ——试样的设计上覆压力值（kPa）。即：试样在地基中所处的位置处，土体设计承担的饱和自重和附加压力值总和；

p_z ——工程建基面到试样所处位置之间黄土体的饱和自重压力值（kPa）；

p_q ——工程建基面以上的附加压力值（kPa）。一般包括建基面以上的填土引起的设计附加压力，或交通荷载、水荷载和建筑物基底压力引起的设计附加压力；

h ——工程建基面到试样所处位置之间的高差（m）。对于挖方渠道工程建基面应为渠顶，填方和半挖半填渠道应为填方基面；对于隧洞工程，建基面应为洞底地基顶面；对于涵管工程，建基面应为涵洞或者管道地基顶面。

g ——重力加速度值，可取 9.81m/s^2 ；

ρ_{sat} ——黄土的饱和密度（ kg/m^3 ）；

ρ_d ——黄土的干密度（ kg/m^3 ）；

S_r ——黄土饱和度，可取85%；

e ——黄土的孔隙比；

G_s ——黄土的颗粒比重。

4 试样浸水宜用蒸馏水；试样浸水前、后的稳定标准为下沉量不应大于 0.01mm/h ；

5 试验步骤应按《土工试验方法标准》GB/T50123-2019第18章执行，而每个试样施加的垂直压力应为该试样的实际上覆压力值；

6 湿陷起始压力 P_{sh} 值应按《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025第4.3.4条的要求进行试验和取值。

4.3.6 现场试坑浸水试验除应符合《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025的规定外，还应符合下列规定：

1 挖方渠道工程的浸水试坑应设在渠顶；填方和半挖半填渠道的浸水试坑应设在填方基面，且载荷板上施加的最大压力应等于上覆填土的基底压力；

2 隧洞工程的浸水试坑应设在隧洞底面；

3 涵洞与管道工程浸水试坑应设在基础顶面；

4 应取试坑内最大沉降值作为地基在实际上覆压力下的湿陷量。

4.3.7 黄土湿陷变形的离心模型试验应符合本规程附录B的规定。

4.3.8 不同类型和等级的水工建筑物的黄土地基湿陷性评价所开展的试验工作宜按表4.3.8执行。若不具备开展现场试验的条件时，可采用黄土结构屈服湿陷变形分析方法快速评价（附录C）。

表4.3.8 黄土湿陷试验项目表

工程类型	工程等级	试验项目				
		室内黄土湿陷试验	室内黄土增湿变形试验	现场浸水试验	离心模型试验	砂井浸水试验
渠道工程、涵洞与管道工程	2级及以上	√	√	√	√	/
	3级	√	√	/	√	√
	3级以下	√	/	/	/	/
隧洞工程	2级以上	√	√	√	√	/
	3级	√	√	/	√	√
	3级以下	√	/	/	/	/
水池工程	2级及以上	√	√	√	√	/
	其他	√	/	/	/	√
其他建筑物	2级及以上	√	√	√	/	/
	其他	√	/	/	/	√

注：“√”表示需要进行的试验项目，“/”表示不需要进行的试验项目。

4.4 场地湿陷性评价

4.4.1 黄土的湿陷性和湿陷程度，应按设计上覆压力下的湿陷系数 δ_{ps} 进行判定，并应符合下列规定：

- 1 当 $\delta_{ps} \geq 0.015$ 时应判定为湿陷性黄土；当 $\delta_{ps} < 0.015$ 时，应判定为非湿陷性黄土；
- 2 湿陷性黄土的湿陷程度划分应符合下列规定：
 - 1) 当 $0.015 \leq \delta_{ps} \leq 0.030$ 时，湿陷性轻微；
 - 2) 当 $0.030 < \delta_{ps} \leq 0.070$ 时，湿陷性中等；
 - 3) 当 $\delta_{ps} > 0.070$ 时，湿陷性强烈。

4.4.2 湿陷性黄土场地的湿陷类型，应按湿陷量实测值或湿陷量计算值判定，出现矛盾时，应按湿陷量实测值判定。

4.4.3 设计上覆压力下的地基湿陷量 Δ_{ps} 宜采用本场地或者相邻同一地区场地的现场浸水试验或离心模型试验确定，无现场试验资料时，可用室内湿陷试验结果计算得到。

I 渠道、涵洞和管道

4.4.4 设计上覆压力下的饱和湿陷量 Δ_{ps} 的计算应符合下列规定：

- 1 挖方渠道湿陷量计算应自线性工程顶部高程到非湿陷性黄土层的顶面，不应累计其中湿陷系数小于0.015的土层。填方和半挖半填线性工程的计算起始面应为填方基面。
- 2 湿陷量计算值应按式（4.4.4）计算：

$$\Delta_{ps} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \alpha \delta_{psi} h_i \quad (4.4.4)$$

式中： Δ_{ps} ——设计上覆压力下的地基湿陷量（mm）；

δ_{psi} ——第*i*层土层设计上覆压力下的湿陷系数；

h_i ——第*i*层土的厚度（mm）；

β_0 ——修正系数；

α ——浸水机率系数。

3 修正系数 β_0 宜采用本场地或相邻同一地区场地的现场浸水试验或离心模型试验确定，在缺乏实测资料时，陇西地区可取1.50，陇东-陕北-晋西地区可取1.20，关中地区可取0.90，其他地区可取0.50。

4 浸水机率系数 α 取1.0。

4.4.5 应以设计上覆压力下黄土饱和湿陷量 Δ_{ps} 按表4.4.5确定渠道、涵洞和管道工程地基的湿陷性等级。

表4.4.5 渠道、涵洞和管道工程黄土地基湿陷等级及程度表

Δ_{ps} mm	$\Delta_{ps} \leq 50$	$50 < \Delta_{ps} \leq 150$	$150 < \Delta_{ps} \leq 350$	$\Delta_{ps} > 350$
湿陷等级	I	II	III	IV
地基湿陷程度	无	轻微	中等	强烈

4.4.6 对于1、2级渠道、涵洞和管道工程，可采用基于最大可能增湿变形量的黄土地基湿陷性评价方法进行场地湿陷性初步评价。

II 隧洞

4.4.7 隧洞工程通过黄土地基时，应进行湿陷性评价，并应符合以下规定：

1 除按要求开展场地湿陷性评价，还应进行隧洞地基湿陷性评价，提供隧洞地基湿陷性土层厚度、湿陷量及湿陷等级。

2 施工阶段应对隧洞地基的黄土湿陷性进一步验证，核查湿陷性土层的范围及深度，补充完善隧洞地基湿陷性评价。

4.4.8 隧洞工程黄土地基的湿陷性，应按设计上覆压力下地基的湿陷量 Δ_s 进行评价，并应符合表 4.4.8 的规定。湿陷量 Δ_s 应按式 4.4.9 的规定计算。

表 4.4.8 隧洞工程黄土地基湿陷等级及程度表

Δ_s (mm)	$\Delta_s \leq 5$	$5 < \Delta_s \leq 50$	$50 < \Delta_s \leq 350$	$\Delta_s > 350$
湿陷等级	I	II	III	IV
隧洞地基湿陷程度	无	轻微	中等	强烈

4.4.9 隧洞工程黄土地基湿陷量计算值 Δ_s ，根据实际情况，可采用以下方法计算。

1 采用室内湿陷试验指标时，应按下式计算：

$$\Delta_s = \beta' \sum_{i=1}^n \alpha \delta_{si} h_i \quad (4.4.5)$$

式中： Δ_s ——隧洞工程黄土地基湿陷量计算值（mm）；应从隧洞基底算起，至其下非湿陷性黄土层的顶面为止，其中湿陷系数 δ_{si} 小于0.015的土层不累计。圆形断面隧洞，基底从衬砌底部算起；有仰拱隧洞，基底从仰拱底部算起，城门洞形断面隧洞，基底从铺底底面算起。

δ_{si} ——隧洞基底下第*i*层土的湿陷系数；湿陷系数的试验压力，宜采用设计上覆压力，即自重压力与附加压力之和。

h_i ——隧洞基底下第*i*层土的厚度（mm）；

β' ——隧洞地基湿陷变形计算修正系数；缺乏实测资料时，陇西、陇东、陕北、晋西地区， β' 取1.0；关中地区， β' 取0.9；其他地区， β' 取0.5；

α ——浸水机率系数，取1.0；

2 隧洞工程为线性工程，为快速分析线路通过范围内黄土场地的湿陷性，也可采用附录D的方法计算湿陷量计算值 Δ_s 。

4.4.10 对于2级（含）以上的黄土隧洞，宜进行现场浸水试验；对于3级黄土隧洞，宜根据附录C进行砂井浸水试验。

III 水池及其他水工建筑物

4.4.11 水池、水闸、泵站、渡槽、桥梁、倒虹吸、陡坎、跌水等水工建筑物场地湿陷性试验、湿陷量计算和湿陷性评价应以《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025为依据。

4.4.12 对于临水的永久建筑物，浸水机率系数应取1.0。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 引调水工程湿陷性黄土地基处理设计应综合考虑环境作用类别、场地类别、地基湿陷等级、建筑物等级等因素。湿陷性黄土地基处理设计前应收集下列资料：

- 1 相关水文地质、工程地质及岩土物理力学参数；
- 2 工程的布置、结构及相关要求；
- 3 邻近建筑物的相关设计、施工、竣工与运行资料；
- 4 其他相关资料。

5.1.2 湿陷性黄土场地地基处理程度应依据工程重要性等级和地基湿陷性等级确定。

5.1.3 湿陷性黄土场地处理方法，应根据地质条件、地基处理目的和需要达到的处理效果，并结合运行和施工条件，经技术经济比较后确定，可采用换填法、强夯法、挤密法、桩基础、预浸水法、高压喷射法、以及组合法等处理。各类水工建筑物常用的地基处理方法见表 5.1.3。采用新方法处理时，应做充分论证，经现场试验确定各项设计技术参数。

表 5.1.3 水工建筑物湿陷性黄土地基处理方法

工程类别	常用地基处理方法							
	换填法	强夯法	挤密法	桩基础	预浸水法		高压喷射法	组合法
渠道工程	√	√	√					√
涵洞及管道	√	√	√		√			√
隧洞工程	√		√				√	√
水池工程	√	√	√		√			√
其他建筑物	√	√	√	√	√		√	√

5.1.4 引调水工程湿陷性黄土场地受水浸湿的可能性较大，应做好周边场地截排水，避免外水入渗建筑物地基，并采取防止内水外渗措施。

5.1.5 对重要建筑物的地基处理及特殊环境作用下的建筑物地基处理应进行专题研究。

5.1.6 黄土地基处理材料选择除满足承载力、稳定、变形、渗流要求外，还应满足耐久性要求。

5.1.7 黄土地基变形计算、承载力确定和稳定性计算应符合国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）中地基计算的有关规定。

5.1.8 湿陷性黄土场地采用围堤（坝）方式设计的调蓄水池，应按《碾压式土石坝设计规范》（SL274）相关规定，做好填方区堤（坝）体排水。

5.2 处理原则与标准

5.2.1 湿陷性黄土地基处理应遵循以下原则：

1 应结合供水对象的重要性、工程等别、建筑物级别、结构抗变形能力、供水量在供水对象用水量中所占比例、事故应急供水能力、单双线输水方式、事故工况下的最小供水量、工程受损后的抢修时长、社会影响等，经技术经济综合比选后确定。

2 对于结构受损后可修复性差的节点工程，应根据场地湿陷等级和下部未处理湿陷土层的湿陷起始压力和剩余湿陷量，结合建筑物结构措施和防水措施，综合确定地基处理措施。

3 线性输水工程应采用受损后易抢修恢复正常输水功能的材料和结构，对于湿陷性黄土场地宜采用具有良好隔水性能和能消除部分湿陷量的垫层，并应采取防止外水侵入措施。

4 对于湿陷性黄土地基需处理工程量大的项目，除满足工程设计要求外，尚应做到因地制宜、就地选材，并满足节能环保等要求。

5.2.2 引调水工程湿陷性黄土地基处理应达到以下标准：

1 渠道工程防渗衬砌应符合《渠道防渗衬砌技术标准》(GB/T50600)中 I 级防渗等级。不同级别渠道地基处理后的最大剩余湿陷量应满足表 5.2.2-1。

表 5.2.2-1 渠道工程地基处理后的最大剩余湿陷量 填方、挖方

渠道工程级别	最大剩余湿陷量 (mm)	备注
1、2	无剩余湿陷量	包括湿陷后果严重地段
3	≤150	黄土湿陷等级为 III 级 (含) 以上的渠底应设置不小于 600mm 厚的垫层。
4、5	≤200	

2 涵洞 (管道) 基底压力小于湿陷起始压力的 3 级 (含) 以上工程应设置垫层，4 级和 5 级工程不做专门要求。基底压力大于湿陷起始压力的 1 级和 2 级涵洞 (管道) 或湿陷后果严重地段，应采取措施消除全部湿陷性；3 级涵洞剩余湿陷量应不大于 50mm；4 和 5 级涵洞剩余湿陷量应不大于 150mm。

3 基底压力大于湿陷起始压力的管道工程，宜采用适应变形能力强的整体连接管道，地基处理深度应不小于 1.0m，4 级和 5 级管道处理深度应满足表 5.2.2-2，并应设置厚度不小于 600mm 的整片防渗垫层。

表 5.2.2-2 管道工程地基处理最小深度

管道工程级别	湿陷等级 I、II 级		湿陷等级 III、IV 级	
	整体连接管道	非整体连接管道	整体连接管道	非整体连接管道
1、2	消除全部湿陷性			
3	0.6m	1.5m	1.0m	2.0m
4、5	0.45m	1.0m	0.6m	1.5m

4 湿陷性黄土地层不宜布置有压隧洞。湿陷性黄土地层 1 级和 2 级无压隧洞工程地基处理，应消除全部湿陷性；3 级及以下建筑物，在采取加强防渗的基础上，可参考本条 2 中涵洞标准要求执行。应加强隧洞衬砌的防渗设计。

5 湿陷性黄土场地基底压力小于湿陷起始压力的水池应设置不小于 600mm 整片防渗垫层；基底压力大于湿陷起始压力的水池地基处理宜满足表 5.2.2-3 要求，并应设置不小于 600mm 整片垫层。刚性结构的小型水池工程，参考引调水节点工程地基处理标准和要求执行。

表 5.2.2-3 基底压力大于湿陷起始压力的蓄水池地基处理

水池工程等级	1	2	3	4	5
处理措施	消除全部湿陷量	剩余湿陷量不大于 200mm	整片防渗垫层不小于 2.5m	整片防渗垫层不小于 1.5m	整片防渗垫层不小于 1.0m

6 引调水节点工程，1 级和 2 级水工建筑物，执行《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）。3 级、4 级和 5 级水工建筑物，当湿陷性土层厚度小于 20m 时，执行《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）；当湿陷性土层厚度大于 20m 时，3 级建筑物未处理土层的剩余湿陷量应不大于 200mm，4 和 5 级建筑物未处理土层的剩余湿陷量应不大于 250mm；并应设置不小于 600mm 厚整片防渗垫层，同时应做好防止基础周边积水的工程措施。

5.3 工程处理设计

I 渠道

5.3.1 渠道换填法设计除应按照《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）执行，还应符合以下规定：

1 当湿陷性黄土层厚度不大，且位于地下水位以上时，可采用换填法，换填厚度应根据土质情况、渠道结构型式、荷载大小等因素，以不大于下卧土层允许承载力为原则确定，换填厚度宜不大于 3m。

2 换填材料应就地取材，采用性能稳定、压缩性低的天然或人工材料，可选用灰土、水泥石、轻浆土、黄土等，不宜采用砂砾石、中粗砂、粉砂、细砂、砂壤土。换填材料中不应含有有机质。并应满足以下要求：

(1) 经过处理消除湿陷性的黄土可作为换填料，1 级、2 级渠道换填后的压实系数应不小于 0.95，3 级、4 级渠道应不小于 0.93，5 级渠道应不小于 0.91。

(2) 灰土填料石灰与土体积配合比宜为 2:8 或 3:7，换填后压实系数应不小于 0.95。

(3) 采用水泥石换填时，水泥与土的配合比宜通过试验确定，无经验时，水泥掺量可采用土质量的 7%~12%，按压实系数控制，控制指标同黄土换填。

3 当根据下卧层承载力确定换填层厚度、换填层宽度时，应符合《水闸设计规范》(SL265)相关条文要求。

4 经换填处理的地基，其沉降量等于换填层本身的压缩变形量和下卧土层沉降量之和。下卧土层的沉降量计算可参照《碾压式土石坝设计规范》(SL274)和《水闸设计规范》(SL265)。

5 对填方渠道，换填层应满足地基承载力要求。

6 地基湿陷性等级在 II 级以下的 3 级以下渠道地基，可按照附录 F 的方法采用轻量土换填减重消减黄土地基湿陷性。

5.3.2 强夯法设计除应按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025)执行，还应符合以下规定：

1 强夯法适用于处理地下水位以上、含水率 10%~22%，且平均含水率低于塑限 1%~3%的湿陷性黄土地基，可处理的湿陷性土层厚度为 3m~12m。

2 地下水位高时，应先采取降水等技术措施。

3 当强夯施工产生的振动和噪声对周边环境可能产生有害影响时，应评估采用强夯法的适宜性。

4 对于挖方渠道，应先强夯处理后再开挖；对于梯形断面渠道，宜按阶梯分区进行强夯。

5.3.3 挤密法设计除应按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025)执行，还应符合以下规定：

1 挤密法根据成孔工艺，可分为挤土成孔挤密法和预钻孔夯扩挤密法。宜选用振动沉管法、锤击沉管法、静压沉管法、旋挤沉管法、冲孔夯扩法等挤土沉孔挤密法。

2 挤密法适用于处理地下水位以上，处理深度为 5~15m 的湿陷性黄土渠道地基。

3 对于填方渠道和挖方渠道，桩机施工高程均应经经济技术比较后确定。

4 渠道采用挤密法缺乏经验时，应在工程现场选择有代表性的地段进行试验或试验性施工，取得需要的设计参数后，再进行地基处理设计和施工。

5 挤密孔的孔位宜按正三角形布置，其孔心距、孔径、挤密系数、孔内填料等应按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025)相关要求执行。挤密填孔后，3 级及以上渠道桩间土最小挤密系数不宜小于 0.88；4 级、5 级渠道不宜小于 0.84。

5.3.4 高压喷射施工前应通过试验性施工确定施工工艺参数、施工批次、施工顺序、间隔时间等。施工顺序在平面上应均匀、对称。

5.3.5 湿陷性黄土地基渠道地基处理工程防渗与排水，按照《渠道防渗衬砌工程技术标准》(GB/T50600)规定提高一个防渗等级执行。

II 隧洞

5.3.5 湿陷性黄土隧洞地基处理设计应符合下列规定：

1 地基处理设计，应按照施工及运行安全的要求，结合隧洞工程地质、水文地质、隧洞断面、衬砌结构、施工设备、施工工序、防渗排水等综合确定。

2 宜优先采用少振或无振动处理方法，减少对初期支护和隧洞整体稳定性的影响。常用地基处理方法的适用范围见表 5.3.5。

表 5.3.5 湿陷性黄土隧洞地基处理方法适用范围

方法名称	适用范围	可处理的湿陷性黄土层厚度 (m)
换填法	地下水位以上的湿陷性黄土。适用于隧洞地基或隧洞进出口连接建筑物地基处理	1~3
挤密法	$S_r \leq 65\%$, $w \leq 22\%$ 的湿陷性黄土。适用于大中型洞室隧洞地基或隧洞进出口连接建筑物地基处理	5~15
混凝土灌注桩	用于上述两种地基处理措施不能满足设计要求的建筑物地基，大中型洞室、隧洞地基或隧洞进出口连接建筑物地基处理	5~15
高压喷射法	湿陷性黄土地基或基底以下有软弱层，不能满足施工或安全运行要求时，可用于浅埋洞室地基处理。在地表预先处理地基后，再进行洞室开挖。	>15 或现场试验确定

5.3.6 换填法设计除应按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025) 执行，还应符合以下规定：

1 换填材料满足本规程 5.3.1 条相关要求。

2 采用换填法处理湿陷性黄土隧洞地基时，隧洞洞底需下挖形成基坑，基坑需采取可靠的支护措施，且与洞身支护系统有效衔接形成整体，并便于施工。

3 湿陷性黄土隧洞开挖掘进施工中，宜在洞底（或换填层）表层浇筑厚度为 20~30cm 的干硬性混凝土垫层。

5.3.7 挤密法处理湿陷性隧洞地基，挤密孔孔位宜按正三角形布置，其孔心距、孔径、挤密系数、孔内填料等应按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025) 相关要求执行。

5.3.8 高压喷射法处理湿陷性隧洞地基，应符合以下规定：

1 对位于湿陷性黄土、饱和黄土的隧洞地基，条件允许时可在地面沿隧洞轴线一定范围进行地基处理，以改善地基土的物理力学性质。

2 当缺乏工程经验时，应在工程现场选择有代表性的地段进行试验或试验性施工，确定设计参数后，再进行地基处理方案设计。

III 涵洞（管道）

5.3.11 涵洞（管道）地基处理设计方案应结合环境、地质、运行工况、涵洞（管道）布置、材料、结构等进行综合经济技术比选确定。

5.3.12 湿陷性黄土地地上的涵洞（管道）地基处理设计应根据地质条件、工期要求、材料来源、施工条件、处理深度等可采用垫层法、强夯法、挤密法及组合法。

5.3.13 涵管宜选用整体连接的钢管、PE管和自锚接口的球墨铸铁管，或其他整体连接性能良好，适应地基变形能力好的管材。顶管穿越自重湿陷性黄土时，应采用整体连接的钢管、球墨铸铁管、混凝土管等管材。

IV 水池

5.3.15 应对湿陷性黄土地基上的水池池底、池周及围堤地基分别进行处理，应坚持“强堤弱池”的地基处理原则，水池湿陷性黄土地基处理设计应满足《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）和《水工建筑物地基处理设计规范》（SL/T792）的有关规定，水池围堤地基处理设计应满足《碾压土石坝设计规范》（SL274）的有关规定。

5.3.16 湿陷性黄土水池地基处理可根据地质条件、场地周围环境、材料消耗及来源、施工条件及工期要求、工程造价等因素综合比选确定地基处理方法。

5.3.17 湿陷性黄土水池地基平面处理范围及处理厚度应根据水池分类、湿陷类型、湿陷等级及下卧层未处理湿陷性黄土层的湿陷起始压力、剩余湿陷量等分析确定，可参照《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）的有关规定。

5.3.18 在地震烈度Ⅷ度及以上地区的水池，应在设计烈度地震作用下不发生失稳和具有危害的变形，并应满足《水工建筑物抗震设计规范》（GB51247）的相关规定。

V 其它水工建筑物

5.3.19 水闸、泵站、渡槽、桥梁、倒虹吸、陡坎、跌水等其他水工建筑物工程地基处理，应根据建筑物类别、等级和土层厚度，结合施工设备、进度、材料、费用等经综合比较确定，可选用表 5.3.19 中的一种或几种组合方法进行处理。

表 5.3.19 湿陷性黄土地基处理方法

方法名称	适用范围	湿陷性黄土层的处理厚度（m）
换填法	地下水位以上，干地施工	1~3
强夯法	$S_r \leq 60\%$ 的湿陷性黄土	3~10
挤密法	$S_r \leq 65\%$ ， $w \leq 22\%$ 的湿陷性黄土	5~25
桩基础	处理措施不满足设计要求；或对整体倾斜、不均匀沉降有严格的建筑物或基础	-
预浸水法	湿陷程度中等~强烈的自重湿陷性黄土场地	地表下 6m 以下湿陷性土层

5.3.20 引调水工程不同类型建筑物地基处理方法初选时，可按下列原则选用。

- 1 水闸、泵站类整片状地基可采用换填法、强夯法、挤密法或组合处理方法。

2 倒虹吸、陡坎与跌水类整片状地基可采用换填法、强夯法进行处理，湿陷性厚度较大时可采用消除部分湿陷性的处理措施。跌水与陡坡的消能设施可采用组合处理方法。此类建筑物处理后建筑基底下应采取有效的防渗水措施。

3 渡槽、架空梁式倒虹吸等点状地基宜优先选用桩基或组合方法进行处理。桩基位于自重湿陷性黄土时其承载力应扣除桩侧土饱和后的负摩阻力。

4 水闸、泵站、渡槽、倒虹吸、陡坎、跌水等水利建筑物地基处理后，宜做好建筑物基面下及周边的防渗处理。

5.3.21 换填法、强夯法、挤密法、预浸水法地基处理方案设计应分别满足 5.3.1 条、5.3.2 条、5.3.3 条相关要求。

5.3.22 预浸水法、桩基础地基处理设计应满足《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025) 相关条文要求。预浸水法处理前应进行现场试坑浸水试验。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 引调水工程湿陷性黄土地基处理可采取换填法、预浸水法、强夯法、挤密法、高压喷射法、灌浆法、桩基础或多种处理方法组合。

6.1.2 施工前应编制施工组织设计或施工方案，并宜进行生产性试验，确定施工参数及施工工艺。

6.1.3 施工方案应包括以下内容：

- 1 引调水工程概况、周边环境条件及工程地质条件。
- 2 设计要求、施工依据、施工顺序及施工部署。
- 3 质量、安全、进度保证措施；季节性施工措施；信息化施工措施。
- 4 施工监测方案、预警措施和安全应急预案。

6.1.4 应采取措施防止施工用水、场地雨水和邻近管道渗水等的渗入。

6.1.5 引调水工程场地的防洪工程应提前施工，并应在汛期前完成。

6.1.6 在既有建筑物附近进行湿陷性黄土地基处理时，应采取有效措施，减少场地地基处理对既有建筑物的影响。

6.1.7 湿陷性黄土地基处理后的水工建筑物周围地面的排水坡度 (i) 宜不小于下表的规定。

表 6.1.7 地面最小排水坡度 (i_{min})

建筑物外距离 S	$S \leq 10\text{m}$	$10\text{m} < S \leq 20\text{m}$	$20\text{m} < S \leq 30\text{m}$	$S > 30\text{m}$
i_{min} (%)	2	1.5	1	0.7

6.2 换填法

6.2.1 换填材料应就地取材，宜优先利用当地黏性土，也可选用灰土、水泥石等材料。换填法应根据不同的换填材料选择施工机械。

6.2.2 换填法分层铺填厚度、碾压遍数、碾压速度等施工参数宜通过现场试验确定。

6.2.3 素土和灰土垫层土料的施工含水率宜控制在 $w_{op} \pm 2\%$ 的范围内，当无试验资料时，素土可取该场地天然土的塑限含水率为其填料的最优含水率。

6.2.4 垫层施工均不得在浸水条件下进行。工程需要时应采取降低地下水位的措施。

6.2.5 垫层底面宜设在同一高程上，如深度不同，基底土层应挖成阶梯或斜坡搭接，并按先深后浅的顺序进行垫层施工，搭接处应夯压密实。

6.2.6 换填法分段施工时，不得在水闸、泵站、倒虹吸、跌水及水工附属建筑物柱基、墙角及承重墙下接缝。

6.2.7 换填垫层增设土工合成材料施工，应符合《土工合成材料应用技术规范》GB/T50290 规定。

6.3 预浸水法

6.3.1 预浸水法施工前，应对可能产生影响的相邻建筑物、设施地下管线等采取必要的保护措施，并设置监测系统。

6.3.2 预浸水法的施工应符合下列规定：

- 1 应有充足的水源；
- 2 宜选在蒸发量小的季节进行浸水施工，冬季不宜进行预浸水施工；
- 3 浸水后应有足够的湿陷变形时间；
- 4 预浸水注水孔、坑、槽的位置、尺寸和深度应符合设计要求，并应与引调水工程建筑物结构和型式特征相适应，注水孔可用人工洛阳铲或钻机成孔；
- 5 预浸水法施工应先从远离已有建筑物和湿陷量大的区域开始，待初步取得沉降和注水量规律后，再依次扩大浸水范围；
- 6 浸水时应动态控制渗水速度、注水量，根据湿陷沉降监测结果及时调整注水参数；注水施工期间防止雨水等外来水流入注水孔、坑、槽内。

6.3.3 地基预浸水结束后，在基础施工前应进行补充勘察工作，重新评定地基土的湿陷性，并应采用换填法、强夯法或挤密法处理上部未消除湿陷性黄土层。

6.4 强夯法

6.4.1 采用强夯法处理湿陷性黄土地基，应通过现场试夯试验确定其适用性和处理效果，同时确定夯击能量、有效处理深度、夯点间距、夯击间隔时间等工艺和参数；试夯区应具有代表性，面积不应小于 500m²。

6.4.2 采用强夯法处理湿陷性黄土地基，应满足下列规定：

- 1 土的天然含水率宜低于塑限含水率 1%~3%；
- 2 在拟夯实的土层内，当土的天然含水率低于塑限含水率 5%时，宜提前 3~5d 将土层增湿至接近最优含水率；
- 3 当土的天然含水率大于塑限含水率 3%以上时，宜采用晾干、换土或其他措施适当降低其含水率。

6.4.3 在强夯施工前，地表应铺设一定厚度的垫层，垫层材料可采用碎石、矿渣、建筑垃圾等坚硬粗颗粒材料。

6.4.4 强夯施工机具需符合下列规定：

- 1 起吊设备应满足提升高度的要求，宜选用履带式起重机或其他起重设备。

2 强夯锤可采用圆形或多边形底面的铸钢锤或钢筋混凝土锤，重心应在中垂线上且低于夯锤高度的一半，直径宜为 2.0~3.0m，夯锤重量宜为 80~400kN，锤底静压力宜为 25~80kPa。

3 夯锤底面宜对称设置 2~6 个孔径 250~300mm 上下贯通的排气孔，排气孔的总面积约占夯锤底面垂直投影面积的 15%左右。

4 自动脱钩装置应具有足够的强度和耐久性，安全可靠，其结构形式应满足操作容易、挂钩轻便、脱钩灵活的要求。

6.4.5 施工场地宜按 10m×10m 方格网测量夯前场地高程，并根据基础埋深和试夯时所测得的夯沉量，确定起夯面高程和夯后高程。强夯点定位允许偏差±50mm，且夯点应有明显标记和编号。

6.4.6 冬季施工应在地基土未冻结的状态下进行。雨季施工应在雨前将夯坑推填整平，宜采用塑料膜或彩条布覆盖待强夯区域，并设置良好的排水设施。

6.4.7 强夯施工场地周边应设置围挡和安全标志；挂钩、测量人员避让安全距离应大于 30m；能见度低的恶劣天气，不得施工。

6.4.8 当强夯区附近有建筑物、设备及地下管线等时，应采取避让、防振或隔振措施，并设置监测点。

6.5 挤密法

6.5.1 采用挤密法处理湿陷性黄土地基，应选择有代表性的场地进行现场试验，确定施工方式、施工机械、施工参数和处理效果。现场试验应满足以下规定：

1 试验不宜少于 3 组，每组挤密桩数，三角形布桩时不宜少于 7 根或矩形布桩时不宜少于 9 根；

2 应在桩间土开挖探井，分层检测挤密效果，取样间距不宜大于 1m；

3 对预钻孔夯扩桩，应分段检测桩径。

6.5.2 挤密法处理地基施工的主要工序包括施工准备、土中成孔、桩孔夯填、施工质量自检等任务。各工序应规范运作，并应重视工序间的搭接与配合。

6.5.3 施工准备阶段，应清除影响施工的障碍物，将场地平整到预定标高，确定控制桩桩位中心点。宜对处理范围内的地基土含水率进行普查，宜提前 7d~14d 将拟处理范围内的土层增湿至接近最优含水率或塑限。

6.5.4 挤密法成孔施工应符合下列规定：

1 成孔应按设计要求、成孔设备、现场土质和周围环境等情况，选用振动沉管、锤击沉管、柱锤冲扩及预钻孔夯扩成孔法。

2 锤击沉管宜采用 3t~4t 杆式柴油锤。振动沉管宜采用收紧钢丝绳加压等方法提高沉管速度。沉管桩管壁厚不宜小于 12mm，下端带有活瓣式或锥型透气桩尖。沉管到设计深度后，应及时拔管以免造成拔管困难。

3 柱锤冲扩挤密成孔宜采用直径 0.3~0.5m、长度 2~6m、质量 2~10t 柱状锤，锤形宜为圆锥形、抛物线旋转体形，顶部宜为倒锥台形。冲击成孔设备起重能力宜为柱锤重量的 3~5 倍，成孔时锤体提升高度宜为 0.5~3m。如出现较严重缩径、或塌孔时，应边冲击边将填料挤入孔壁，接近设计孔深时，可填入少量土料挤密桩端土。

4 预钻孔夯扩挤密法钻孔宜采用长、短螺旋钻、机动洛阳铲、旋挖钻机等。夯扩锤宜为圆锥形，宜采取较小长径比，直径宜比钻孔直径小 10~50mm，锤重宜为 30~60kN，落距 3~5m。钻进硬土层时，宜低速慢进，保持钻杆垂直，减少钻杆晃动，以免扩大孔径。螺旋钻机钻至设计深度时，应保持在设计深度处空转清土后再孔外卸土。

5 孔底虚土填料前应夯实，并应检查桩孔的直径、深度和垂直度；桩孔的垂直度允许偏差应为±1%；孔中心距允许偏差应为桩距的±5%。

6 成孔过程中，应对锤重、落距、冲击次数、孔深等进行观测和记录。异常时，应记录出现的问题和处理的方法。

6.5.5 挤密法施工夯填材料应满足下列规定：

1 可采用素土、灰土、二灰土、水泥土等，应拌合均匀，随拌随用；

2 土料宜选用粉质粘土，含水率应控制在最优含水率±2%范围内，有机质含量不应大于 5%，且不得含有冻土、膨胀土和碴土垃圾，粒径不应超过 15mm；

3 雨期或冬期施工，应采取防雨或防冻措施，防止填料受雨水淋湿或冻结。

6.5.6 桩孔夯填施工应符合下列规定：

1 夯实机具：沉管法成孔，宜采用 0.3t 以上夯锤；冲击法成孔，宜采用原成孔机具；钻孔法成孔，宜采用 1.0t 以上夯锤。

2 应分层回填夯实填料，压实系数和桩径满足设计要求后才能回填下层土料。

3 回填夯实顺序，宜从里或中间向外间隔 1~2 孔依次进行，对大型引调水工程，可采取分段施工。当局部处理地基时，宜从外向里间隔 1~2 孔依次进行。

6.5.7 设计桩顶标高以上预留上覆土层的厚度，应符合下列规定：

1 沉管成孔并用 0.3t 以上的夯锤夯填，预留上覆土层厚度不宜小于 1.0m；

2 冲击成孔或钻孔夯扩法成孔，采用 1.0t 以上夯锤夯填，预留上覆土层厚度不宜小于 1.5m；

3 冬季施工可适当增大预留松动层厚度；

4 铺设垫层前，应将预留松动土层挖除或夯（压）实。

6.6 高压喷射法

6.6.1 高压喷射注浆形成的加固体强度和范围，应通过现场和室内试验确定。当无试验资料时，高压喷射注浆加固湿陷性土体直径可按表 6.6.2 确定，定喷和摆喷加固长度可取旋喷注浆加固土体直径一倍。

表 6.6.2 旋喷注浆加固土体直径 (m)

旋 喷 桩 体 直 径 土 质 类 别		旋 喷 方 法		
		单管法	二重管法	三重管法
湿陷性黄土	$I_L > 1$	0.6~0.8	1.0~1.2	1.8~2.2
	$0.75 < I_L < 1$	0.5~0.7	0.8~1.0	1.4~1.8
	$0.25 < I_L < 0.75$	0.4~0.6	0.6~0.8	1.0~1.4

注：表中 I_L 为湿陷性黄土的液性指数。

6.6.3 高压旋喷法采用的水泥浆液配合比应根据试验确定，宜采用强度等级 42.5 级及以上普通硅酸盐水泥，外加剂和掺合料的用量应通过现场试验确定。

6.6.4 高压喷射注浆浆液用量可按式 6.6.4-1、6.6.4-2 计算，并应取其大值。

体积法：

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 K_1 H (1 + \beta) + \frac{\pi}{4} d^2 K_2 h \quad (6.6.4-1)$$

式中： Q —浆液用量 (m^3)；

D —旋喷固结体直径 (m)；

d —注浆管直径 (m)；

K_1 —填充率，可取 0.75~0.90；

H —旋喷长度 (m)；

K_2 —未旋喷范围土的填充率，可取 0.5~0.75；

h —未旋喷段长度 (m)；

β —损失系数，取 0.1~0.2。

喷量法：

$$Q = \frac{H}{v} q (1 + \beta) \quad (6.6.4-2)$$

式中： v —提升速度 (m/min)；

q —单位时间喷射浆液量 (m^3/min)；

β —损失系数，取 0.1~0.2。

6.6.5 高压喷射注浆设备钻孔可采用回转、冲击、冲击回转钻进和振动钻进等方法进行，不得使用射水钻进成孔，钻孔孔径应大于喷射管外径 20mm，钻孔有效深度应大于设计深度 0.3m，钻孔施工时应采取预防孔斜的措施，钻孔偏斜率不应超过 1%。

6.6.6 钻进过程中，出现泥浆严重漏失，孔口不返浆时，可采取加大泥浆浓度、向孔内填充堵漏材料或对漏失段预灌浆等措施，直至孔口正常返浆后再继续钻进。

6.6.7 高压喷射注浆作业应在钻孔检验合格后进行，当喷头下至设计深度，应先进行原位喷射，待孔口返浆后开始提升喷射。对桩顶、桩端附近，及需要扩大直径或提高强度的固结体，可采取复喷措施，复喷长度不宜小于 1.0m。

6.7 桩基础

6.7.1 采用桩基础处理湿陷性黄土地基，应选择有代表性的场地进行现场试桩，确定施工方式、施工机械、施工参数和处理效果。试验不宜少于 3 组，每组桩数不宜少于 6 根。

6.7.2 湿陷性黄土场地上钻孔灌注桩施工应符合下列要求：

1 宜采用人工挖孔、长螺旋钻、机动洛阳铲、振动沉管、内夯沉管干作业钻孔工艺；可采用泥浆护壁钻孔工艺，应采取降低泥浆水对地基土产生不利影响的措施；不宜采用潜水钻、冲击、短螺旋钻孔工艺。

2 沉管、夯扩、长螺旋钻中心压灌灌注桩施工时，应控制拔管速度和高度，宜采用反插法，必要时尚应复打。

3 成孔施工过程中，成孔设备就位应平正稳固，不应发生倾斜，不得让雨水和地表水流入桩孔内。

4 成孔后应对孔中心、孔深、孔径、垂直度、孔底沉渣厚度进行检验；干作业条件下成孔后应对桩端持力层进行检验。

5 应减少各工序间歇时间，成孔后尽快浇筑或压灌混凝土，施工过程不应中断。

6.7.3 静压与锤击预制桩施工应符合下列要求：

1 应合理选择桩型，采用空心管桩、长桩等，减少桩挤土率。

2 宜采用掘削、预钻孔等辅助沉桩法，减少排土量。

3 应合理安排沉桩顺序、进度。

4 宜采用先开挖基坑后沉桩工艺。

5 应采用降低地下水位或改善地基排水特性，减小和加快消散沉桩引起的超静孔隙水压力。

6 宜采用防渗防挤壁，设置防挤土槽或防挤孔。

7 应避免将桩尖停留在硬质黄土层中进行接桩施工，并应尽可能减少接桩时间。

8 应对沉桩深度、停锤标准、桩身垂直度、接桩质量、桩顶完整状况、贯入度及桩尖标高等指标进行检查。

7 质量检测

7.1 一般规定

7.1.1 引调水工程湿陷性黄土地基处理质量检测的项目和参数应根据地基类型、地基处理目的、国家现行标准规定及设计要求综合确定。

7.1.2 质量检测应根据检测对象情况，选择深浅结合、点面结合、室内外试验和原位测试相结合的多种方法综合检测。

7.1.3 抽检位置应按下列要求综合确定：

- 1 抽检点宜随机、均匀和有代表性分布；
- 2 重要和关键部位；
- 3 局部岩土特性复杂可能影响施工质量部位；
- 4 施工出现异常情况的部位。

7.1.4 检测数量应根据场地复杂程度、引调水工程的重要性以及地基处理施工技术的可靠性确定，并满足处理地基的评价要求。

7.1.5 承载力应通过静载荷试验确定。承载力检验时，静载荷试验最大加载量不应小于设计要求的承载力特征值的 2 倍。采用其他方法检测承载力应有本场地同条件下静载试验对比结果。

7.2 质量检测

7.2.1 换填法施工质量，应采用压实度 λ_c 控制，可选用环刀取样、静力触探、轻型动力触探、标准贯入、灌砂试验等方法进行检查。取样点应在每层表面下的 2/3 分层厚度处。取样的数量及位置应符合下列规定：原则性提下，检测部位 人员变更后需要检测

- 1 对输水建筑物，每 10m 每层 1 处，且每层不少于 3 处；
- 2 对蓄水建筑物，每 100~150m² 面积不应少于 1 处，每层不少于 3 处。
- 3 取样点位置应均匀随机布置，并具有良好的代表性，明显存在压实质量缺陷可能的局部区域应单独布点检测；
- 4 采用标准贯入或动力触探检验时，检验点的间距不宜大于 4m；
- 5 承载力检测数量每单体工程不应少于 3 点，单体垫层面积超过 1500m² 的，超出部分每 500m² 增加 1 点，小于 500m²，按 1 点计算；
- 6 取样检验点与垫层边缘距离不宜小于 300mm。

7.2.2 预浸水法施工质量，应检验浸水后地基土物理力学指标、湿陷性系数、地表开裂范围，并据此评价地基湿陷性改善情况。检验点数为 500m²~1000m² 一个点，且不应少于 3 点。

7.2.3 强夯法施工质量检查，并应符合下列规定：

- 1 施工过程中的质量检查，宜采用探井取土样进行土工试验，检测土的干密度、压缩系数和湿陷系数。
- 2 强夯处理后的地基竣工质量检查，承载力检验应根据静载荷试验、其他原位测试和室内土工试验等方法综合确定。
- 3 强夯法检测点数量应根据强夯施工面积按表 7.2.3 确定。每检测点从终止夯面向下每隔 0.5m~1.0m 取样一件，取样深度应大于设计夯实厚度 1.0m 以上。

表 7.2.3 强夯地基检测抽样点数量表

强夯施工面积(m ²)	最少抽样点数	最少抽样点数计算方法
≤500	5	按直线插入法计算
5000	17	
50000	58	按直线插入法计算
500000	200	

注：“强夯施工面积”指在同一工程地质条件（包括含水率类别）的施工场地、用同一强夯参数及同一夯沉量控制指标施工的强夯面积。

- 4 强夯处理后的地基承载力检验，应在施工结束后间隔 14~28d 后进行。

7.2.4 挤密法施工质量检查，应符合下列规定：

- 1 成孔质量检查，包括成孔直径、深度、垂直度、孔底塌落土厚度及缩孔情况等，应在成孔后及时进行，所有桩孔均需检验并做出施工记录。
- 2 孔内填料的夯实质量，应随机及时抽样检查，并应符合下列规定：
 - (1) 自检数量不得少于总桩数的 2%，且每台班不得少于 1 根桩；
 - (2) 质检部门抽检数量不得少于总桩数 1%，且总计不得少于 9 根桩；
 - (3) 每根桩均应按 1.0m 分层取样检测；
 - (4) 宜选用环刀深层取样、轻型动力触探、开挖探井取样检测法，对于非直接检测方法，均应有可靠的对比试验资料后方可采用。
- 3 桩间土挤密效果检查，应符合下列规定：
 - (1) 以平均挤密系数是否达到设计要求为控制标准，通过在相邻增强体构成的挤密单元内开挖探井，按每 1.0m 为一层，采用环刀取样，测试干密度并计算其挤密系数与各层挤密系数的平均值；
 - (2) 节点工程桩间土挤密质量试验不应少于 2 组；
 - (3) 施工后的挤密质量检测探井数应不少于总桩数的 0.33%，且每项单体工程不得少于 3 根。

4 挤密法地基承载力检测，应根据竖向增强体载荷试验、复合地基载荷试验、其他原位测试和室内土工试验等方法综合确定。

5 若桩间土挤密效果、桩体质量检验不合格时，以及地基受水浸湿可能性大的建筑物尚应进行现场浸水载荷试验。

7.2.5 高压喷射法施工质量检查应符合下列规定：

1 喷射注浆时应采集冒浆试样，应不少于 6 组，应集中收集并及时清理返上的泥浆，泥浆池应有防渗措施。

2 宜采用开挖检查、钻孔取芯、标准贯入试验、动力触探和静载荷试验等方法对高压喷射增强体质量进行检查。

3 成桩质量检验点的数量不少于施工桩数的 2%，并不应少于 6 点。对于有代表性的桩位、施工过程中出现异常情况的部位、地基情况复杂的部位，应布置检验点。

4 承载力检验宜在成桩 28d 后进行，地基承载力检验应采用复合地基静载荷试验和单桩静载荷试验。检验数量不得少于总桩数的 1%，且每个单体工程复合地基静载荷试验数量不得少于 3 台。

5 高压喷射法施工设备应配置在线监测控制系统，能够实时对喷射法施工状态进行监测并对施工参数进行调整，同时为施工质量自检与评价提供数据。

7.2.6 灌浆法施工质量检查应符合下列规定：

1 灌浆质量检查应在灌浆结束 14d~28d 后进行。可选用标准贯入、轻型动力触探、静力触探或面波等方法进行加固地层均匀性检测。

2 按处理土体深度范围每间隔 1m 取样进行室内试验，测定土体压缩性、湿陷性、强度及渗透性。

3 注浆检验点不应少于注浆孔数的 2%~5%。检验点合格率小于 80%时，应对不合格的注浆区实施重复注浆。

4 当需要查明处理土体的外形和整体性时，可对有代表性加固土体进行开挖，量测其有效加固半径和加固深度。

7.2.7 桩基础施工质量检查应符合下列规定：

1 灌注桩设计桩长不小于 20m 时，施工过程中应进行成孔质量检测。同类型桩检测数量不应少于总桩数的 20%，且应不少于 10 根。

2 桩施工完成后应对桩身质量进行检验，宜选用低应变法、声波透射法或钻芯法。采用低应变法时，对于灌注桩，抽检数量不应少于总桩数的 30%，且不得少于 20 根；对于预制桩，抽检数量不应少于总桩数的 20%，且不少于 10 根。采用声波透射法或钻芯法时，抽检数量不应少于总桩数的 10%，钻芯法岩芯采取率不应低于 90%。

3 桩基承载力检验可采用单桩静载试验或高应变法，对于地质条件复杂、桩施工质量可靠性低、施工质量异常或采用新桩型、新工艺的桩基础，应采用单桩竖向抗压

静载试验进行验收检验，抽检数量不应少于总桩数的 1%，且不应少于 3 根。对于其他情况，正式施工前进行过试桩承载力静载荷试验的，可采用高应变法进行单桩竖向抗压承载力验收检验，抽检数量不应少于总桩数的 5%，且不得少于 5 根。

4 基桩承载力宜通过浸水载荷试验判定。

8 监测

8.1 一般规定

8.1.1 应根据引调水工程的类型、重要性、工程规模、地基处理方法、黄土地基湿陷程度和环境影响综合确定地基监测的项目，各项目的数量和布置应能满足地基工程质量安全监控和效果评价的要求。

8.1.2 地基处理试验区可适当增加监测的项目及数量。

8.1.3 监测单位应具有相应资质，监测人员应具备相应的从业经历，监测仪器设备应具备合格证和鉴定/校准机构出具的有效证书。

8.1.4 工程建设和管理单位应及时全面收集并妥善保管整编后的引调水工程湿陷性黄土地基安全监测资料，包括岩土勘察报告、地基处理设计文件及施工记录、检测报告、监测设备分布、监测记录等资料，并应建立完善的管理制度。

8.2 监测

8.2.1 引调水工程湿陷性黄土地基主要监测项目为地基沉降及地基土孔隙水压力变化。应对湿陷性黄土地基表面沉降、分层沉降及土层孔隙水压力进行长期监测，并应及时结合监测成果，分析评价地基湿陷沉降趋势以及沉降对引调水工程安全运行影响。

8.2.2 处理湿陷性黄土地基上的水工建筑物，应在处理施工期间及运行期间进行沉降观测，直到沉降达到稳定为止。

8.2.3 监测项目布置数量应符合下列规定：

1 地基面积较大时，宜按照每 20000m²~30000m² 作为 1 个监测区或按照施工分区布置监测项目。

2 输水建筑物等线性地基，宜按照 50m~200m 布置 1 个监测断面布置监测项目。

3 当地质情况或结构、设计参数发生大的改变时，宜增加监测项目的数量。

8.2.4 监测设施设备应按照《水利水电工程安全监测设计规范》(SL725) 要求部署，监测仪器应在湿陷性地基处理前完成埋设，测定初始值，并对埋设过程及埋设完成情况进行记录，监测仪器设备应采取有效的保护措施。

8.2.5 地基处理施工应进行施工全过程的监测，施工中应有专人或专门机构负责监测工作，随时检查施工记录和计量记录，并按照规定的施工工艺对工序进行质量评定。

8.2.6 当夯实、挤密、高喷、注浆等方法地基处理施工可能对周围环境及建筑物产生不良影响时，应对施工过程中的振动、噪声、孔隙水压力、地下管线和建筑物变形进行监测。

8.2.7 对地基处理挤土桩布桩较密或周边环境保护要求严格时,应对打桩过程中造成的土体隆起和位移、临近桩顶标高及桩位、孔隙水压力进行监测。

8.2.8 发现湿陷性黄土地基沉降和地层孔隙水压力变化异常时,应及时反馈给有关单位研究处理。

8.2.9 宜实施自动化安全监测,保持监测数据连续性,实时掌握地基湿陷变形情况,对处理质量进行分析评价。监测自动化系统应结构简单、维护方便、扩展性好,易于改造和升级,监测自动化系统应配有独立的人工观测比测设施或手段。对于渠道、管道等线状引调水工程,自动监测站设置应考虑通信、交通、管理、仪器布置等因素,监测站宜结合工程管理设施布置。

8.2.10 以人工巡查、自动记录、电视监测等监测方法获取的监测成果,均应以填写记录表格、写出报告或制作成电子光盘等形式,真实、及时、完整的形成监测资料。

8.2.11 水准基点、沉降观测点及孔隙水压力监测装置应妥善保护,并定期对水准基点进行校核。引调水工程运维单位在接管沉降监测和孔隙水压力监测工作时,应对水准基点、沉降观测点及孔隙水压力监测装置及监测资料和记录,逐项检查、清点。有监测装置损坏发生时,应由移交单位补齐。

附录 A：黄土湿陷变形的离心模型试验

B.1 一般规定

B.1.1 本试验适用于测定黄土场地的地基湿陷量，可替代现场浸水试验。

B.1.2 离心模型试验的模型率应根据原型结构尺寸和离心机的性能指标等综合确定。

B.1.3 相似准则是判断模型与原型间相似性的数学表达，用相似变换而得的无量纲量表示。离心模型试验应遵守模型与原型的应力对应相等的相似准则，其他物理量可通过相似律换算到原型。主要物理量的相似律如表 B.1.3 所示

表 B.1.3 离心模型试验中的主要物理量的相似比

名称	量纲	符号	模型率	说明
重力加速度	LT^{-2}	g	N	
速度	LT^{-1}	v	1	
位移	L	s	$1/N$	
几何尺寸	L	L	$1/N$	
土体密度	ML^{-3}	ρ_s	1	
液体密度	ML^{-3}	ρ_f	1	
孔隙率	1	n	1	
质量	M	m	$1/N^3$	
含水率	1	w	1	
饱和度	1	S_r	1	
应力	$ML^{-1}T^{-2}$	σ	1	
应变	1	ε	1	
温度	$^{\circ}C$	θ	1	
时间	T	t	$1/N^2$	固结过程
			$1/N$	动力学
			1	蠕变过程
渗透系数	LT^{-1}	k	N	
水力梯度	1	i	1	
黏滞系数	$ML^{-1}T^{-1}$	η	1	静力试验
			N	动力试验

*注：试验中出现同一物理量的相似律比不一致时，应根据关键问题选择相似律，针对具体问题选择合理的解决方案。

B.1.4 模型尺寸的选择应以能够模拟研究对象的主要结构为原则。

- 1 结构尺寸与土体平均粒径之比小于 28 时，应考虑粒径尺寸效应产生的试验误差；
- 2 模型尺寸的相对误差不应大于 2%；
- 3 模型密度及含水率误差要求可参照原型施工技术要求，模型密度的相对误差不宜大于 1%，含水率误差宜小于 1%；
- 4 模型高度宜大于等于 300mm，模型的厚度宜小于等于 150mm，模型宽度应不小于高度的 1.5~2 倍。

B.1.5 模型设计应依据离心机有效荷重、最大加速度、转动半径、吊篮尺寸等基本参数，根据相似律和模型试验的具体要求，确定模型率等试验参数，且应符合下列规定：

- 1 为减少模型变形观测的误差，模型尺寸宜尽量大；
- 2 选取的有效加速度使离心机吊篮台面的加速度应小于最大离心加速度；
- 3 选取的有效荷重与吊篮台面加速度的乘积应小于离心机容量；
- 4 试验采用的有效加速度宜高于 10g；
- 5 模型高度与离心机有效半径之比不宜超过 0.3。

B.1.6 试验中宜选用体积小、精度高、性能好的微型传感器，同时宜合理选用传感器量程和精度，以满足试验观测要求。

B.1.7 离心试验中宜选择转动中心到模型的 2/3 高度处作为有效半径，此时离心模型的应力误差最小。

B.1.8 在模型与透明有机玻璃板接触面上宜分层埋设测点标志，绘出坐标网格，便于试验观察和图像分析处理。采用图像分析处理方法测量断面变形应设置测点标志。

B.2 试验设备

B.2.1 试验设备由主机和附属设备组成。主机设备应具有安全监测和报警系统，各主要组成部件见图 B.2.1。

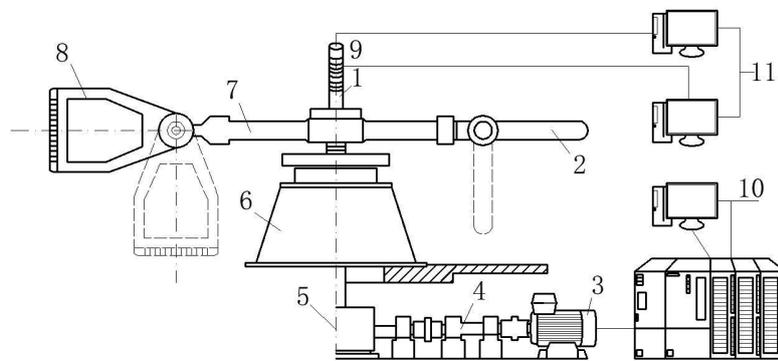


图 B.2.1 土工离心机主要组成部件

- 1-转轴；2-平衡重；3-电动机及整流系统；4-转动轴；5-减速器；6-基座；7-转臂；
8-吊篮；9-滑环；10-视频监测系统；11-数据采集系统

B.2.2 模型箱置于吊篮中，几何尺寸及形状应根据试验要求选定，模型箱应满足以下规定：

- 1 模型箱应根据试验要求进行专项设计，模型箱的底板和侧壁在最大荷载作用下的挠度应不大于 0.1mm；
- 2 模型箱如有一侧为有机玻璃窗，有机玻璃面应透明无明显划痕、无裂缝，且有足够的强度和刚度；

3 模型箱在箱室内充满水时，应在承受设计加速度情况下不漏水。

B.2.3 量测系统宜包括滑环、降雨浸水装置、数据采集系统、各类传感器、各类相关软件等。

B.2.4 模拟原状黄土实际浸水工况，可参考图 B.2.4 制作降雨浸水装置，由储水装置、输水装置和降雨装置组成。其中储水装置包括外挂水箱和电磁控制阀门。输水装置由输水管组成。降雨装置由喷架、独立开关和雾化喷嘴组成。

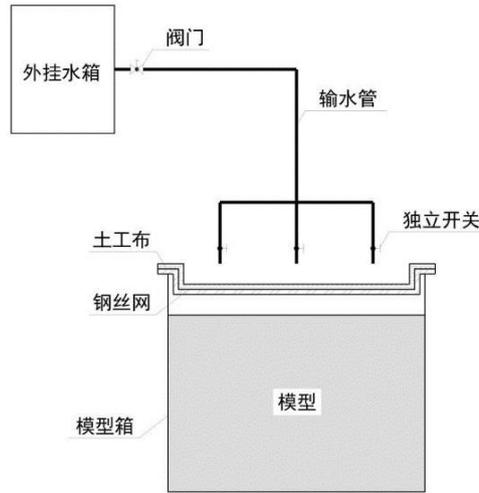


图 B.2.4 浸水装置整体立面图

B.2.5 数据采集系统可包括信号放大器、转换器、信号传输滑环、计算机及软件等。

1 采集系统宜包括图像采集与分析系统，以及其他测量仪器（如微型静力触探仪、微型十字板、弹性波/电磁波无损测试仪等）；

2 数据采集系统可通过光、电滑环与离心机上的采集和控制系统建立联系并进行操作，也可通过局域网建立控制室计算机与离心机上计算机之间的联系。

B.2.6 传感器可包括各类电信号传感器（如加速度、孔隙水压力、土压力、位移、应变、轴力、温度等传感器）和光纤类传感器。

1 传感器在使用之前应进行率定，仪器率定所用压力表、千分尺、测量仪表或标准试件应至少高于被测仪器一个测量精度，取不少于 10%且不少于 3 个同类传感器，按试验要求进行加速度考核，其误差范围应符合 GB/T15406-2007《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》的规定；

2 率定范围不应小于试验所需的量程，率定不应少于两个循环，每个循环应逐级测定，且不应少于 5 级。

B.3 试验过程

B.3.1 模型制作应符合下列规定：

1 天然含水率模型和饱和模型的制作方法宜相同；

2 模型制作过程中应采取措施防止土样含水率变化；

3 按场地黄土地层由上到下的分布次序，选择具有代表性的典型地层的原状土样作为离心模型制作的原始材料，并按照预定尺寸切削成规整的立方体。切削时应保证土样上下两面的平整度和土样的高度满足精度要求；

4 削好的土样应按照原场地地层的顺序上下叠合在一起，并放置在模型箱中间位置，长边一侧贴紧有机玻璃板，其余方向用相同含水率和密度的重塑土填充。重塑土宜采用分层压实和控制密度的方法，每 2cm 为一层，逐层压实填充。模型尺寸的相对误差不应大于 2%；

5 土样模型装好后，在土样与有机玻璃板接触的表面可贴一层湿纸巾，然后用大头针将一定厚度的标记点嵌入模型中，使模型侧面形成具有较大色彩差（RGB 值）的量测区域，以便挂斗侧壁的摄像系统在离心机运转时，记录模型箱中土体的位移变化；

6 标记点是采用泡沫板制成的最大直径约 0.5cm 不规则薄片，厚度约 0.2mm 为宜；

7 标记点固定好后，安装有机玻璃板。有机玻璃面板与透水板一侧宜用玻璃胶密封，防止浸水后，水沿有机玻璃板冲刷模型；

8 饱和模型宜采用抽气饱和法饱和，将制好的模型放入抽气饱和箱进行饱和，密封静置 48h，使模型饱和充分。

B.3.2 试验过程应符合下列规定：

1 利用离心模型试验求取 β_0 值，可分两种方法：完全模拟实际法和典型层模拟法；

2 完全模拟实际的方法是按照实际土层的土性和厚度，将一定倍数缩尺后的原状土样块，按原场地的顺序紧密叠合而制成模型，把模型放入离心机中施加指定的加速度并浸水来测定场地湿陷量。该方法能够较好的反映工程实际，应优先选用；

3 典型层模拟的方法是根据场地实际选取一个典型层，用典型层的原状土样来制作模型，把模型放入离心机中施加指定的加速度并浸水来测定场地湿陷量，其中模型试验值要与引起该典型层黄土湿陷的上覆饱和自重压力的实际值相等。该方法制作模型较为容易，但只有在 β_0 的特性在各个地层中均相等的假设成立下，试验结果才能与实际相符；

4 根据场地土层的含水率、干密度、土层类型，将场地地层进行概化，确定出 3~5 层的地基典型地层，每层选用与实际土层较为相似的典型原状土样制作模型层，最后按照原场地的顺序将各层紧密叠合在一起制成模型；

5 将制作好的模型安置在离心模型试验机上，旋转至指定的加速度，利用湿陷试验的单线法和双线法，分别测定自重湿陷性黄土的湿陷变形；

6 根据离心模型试验得到的湿陷值比室内试验湿陷计算值得到修正系数 β_0 值；

7 湿陷试验的单线法，将制作的天然含水率的模型安置在离心机上旋转至指定的重力加速度 g 值，待压缩变形稳定后浸水到饱和，测定模型的压缩变形和湿陷变形；

8 湿陷试验的双线法，将制作的饱和模型安置到离心机上旋转到指定的重力加速度 g 值，测定模型的沉降变形，将该沉降变形减去第一组天然含水率同级值的压缩变形即得到湿陷变形。

B.3.3 试验操作应符合《港口工程离心模型试验技术规程》（JTS/T 231-7-2013）的相关规定。

附录 B：黄土场地砂井浸水试验

成果评价、应用实例资料（查新）

C.1 一般规定

C.1.1 黄土场地砂井浸水试验分为自重湿陷性黄土砂井浸水试验与非自重湿陷性黄土砂井浸水试验。

自重湿陷性黄土砂井浸水试验是在指定地点开挖探井至设计深度，埋设沉降杆并根据自重等效原理用砾石置换黄土后，向井内注水并监测湿陷变形，其核心就是将水直接导入某一深层湿陷性黄土地层，并以砾石等效替代上部黄土饱和后的重量，以此来测定该地层以下黄土的湿陷变形量，可以评价不同深度黄土层的湿陷性。

非自重湿陷性黄土砂井浸水试验是在指定地点开挖探井至设计深度，铺设垫层后，上面放置刚性板，板的中心设空心承载钢管，钢管顶部加焊沉降杆并粘贴水准仪数字条码纸，在钢管的顶部加受力堆载平台。通过砂井中砂砾石的厚度和堆载平台的堆载重量，调整附加应力大小，然后向井内注水并监测荷载条件下的湿陷变形量。

C.1.2 自重湿陷性黄土砂井浸水试验的砂井直径宜为 60cm~80cm，填充砾石直径宜为 15mm~31.5mm。井口需开挖直径宜为 2m 的试坑，用以储水及增大浸水面积，试坑深度宜为 60cm，坑底铺设 10cm 厚的砾石。

非自重湿陷性黄土砂井浸水试验的砂井直径宜为 60cm~80cm，设计深度底部水平铺设厚度为 10cm 的中细砂透水垫层，垫层上放置直径为 40~60cm，厚度为 3cm 的钢板，钢板上设透水孔，孔径不宜小于 5cm，钢板中心逐级接长承载杆，杆径不宜小于 10cm，承载杆外侧套 PVC 护筒，PVC 管露出井口 0.5m，管径宜大于杆径 5~10cm，保证承载钢管可以自由下沉。向砂井内回填砂砾石，其直径宜为 15mm~31.5mm，钢管顶端连接堆载平台，平台为正方形钢板，边长不宜小于 1.2m，厚度不宜小于 3cm。砂井底部和顶部可参考图 C.1.2-1~C.1.2-3。

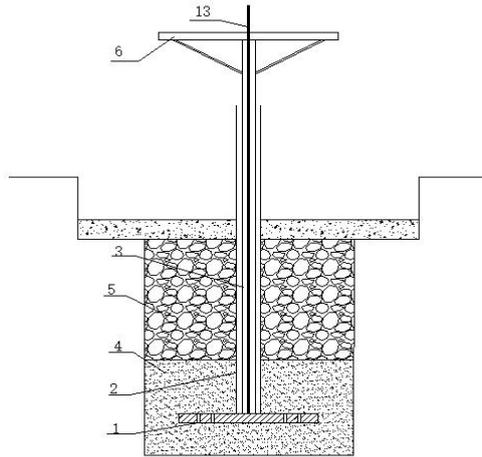


图 C.1.2-1 砂井底部构造图

1-带孔沉降板；2-PVC管；3-承载钢杆；4-中细砂；5-砾石层；6-堆载平台；13-水准仪数字条码纸

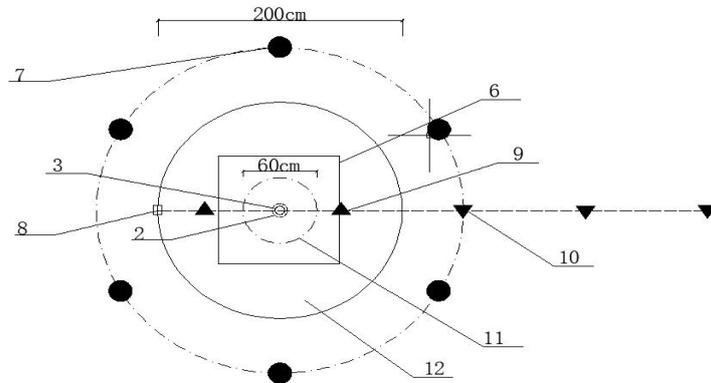


图 C.1.2-2 砂井顶部构造图

2-PVC管；3-承载钢杆；6-堆载平台；7-深标点；8-水分计；9-坑内浅标点；10-坑外浅标点；11-砂井；12-浅坑

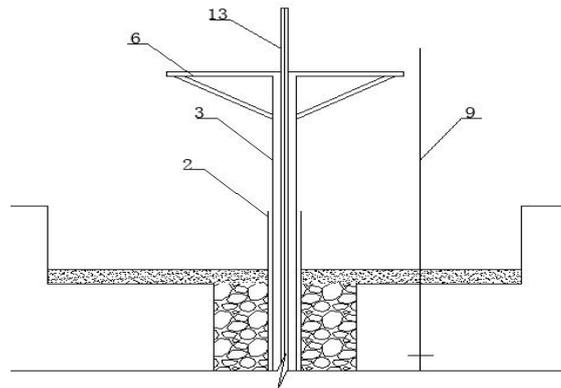


图 C.1.2-3 砂井顶部剖面图

2-PVC管；3-承载钢杆；6-堆载平台；9-坑内浅标点；13-水准仪数字条码纸

C.1.3 自重湿陷性黄土砂井浸水试验布设沉降点，砂井中心布设一个沉降标点，监测井底土层湿陷；由井中心向外不少于2个方向均匀设置观测地表湿陷量的浅标点，每个方向上试坑内设置一个，试坑外宜间隔2m布设，场地最终总湿陷量取试坑内浅标点测得的平均值。可在距井中心为3m的圆周上对称布设不同埋深的深标点，监测不

同深度土层湿陷，设置深度按各湿陷性黄土层顶面深度及分层数确定，不宜过密，一般小于等于 16 个。各监测点布设方案可参考图 C.1.3-1~C.1.3-2。

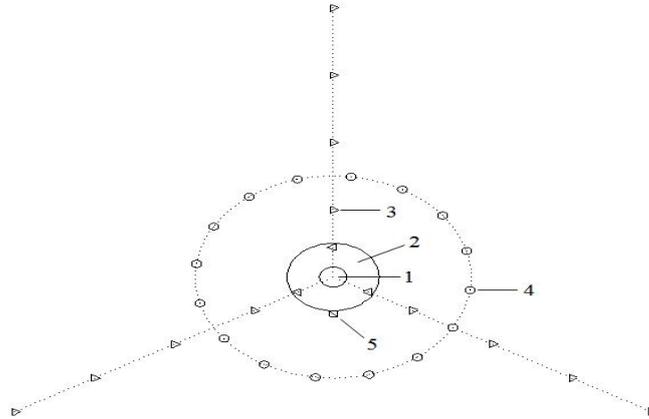


图 C.1.3-1 砂井浸水试验各标点布设平面示意图

1--探井(砂井); 2--地表试坑; 3--浅标点; 4--深标点; 5--水分计

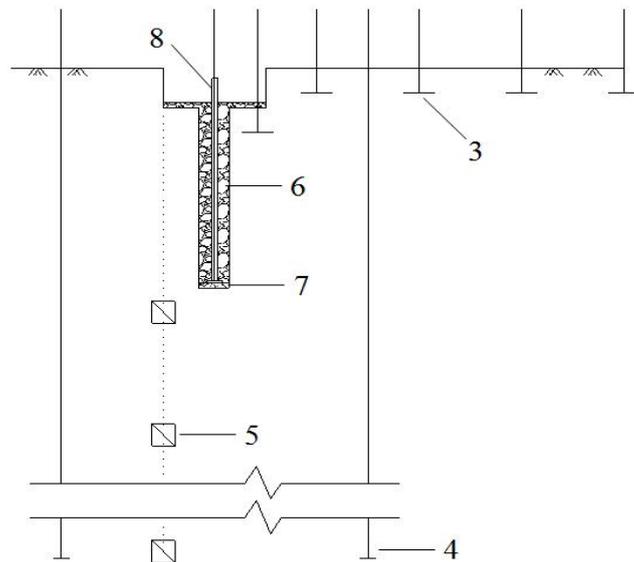


图 C.1.3-2 砂井浸水试验各标点布设剖面示意图

3--浅标点; 4--深标点; 5--水分计; 6--砾石; 7--中细砂; 8--护筒(PVC管)

非自重湿陷性黄土砂井浸水试验布设沉降点，在浅坑中设置一个监测点，向下分层间隔 5m 依次布设水分计，水分计数据测试正常后用素土回填夯实，依次放置下一个水分计。水分计数据采集线固定在地表集线盒，确保水分计采集线路正常。在浅标点埋设位置开挖直径为 40cm，深 50cm 的坑，清理弃土，平整坑底，放入沉降杆并将上端出露地面 1.5m，在沉降杆外套上 PVC 管，沉降杆下端连接直径为 20cm，厚 1cm 的带孔圆形钢板，将水准仪数字条码纸贴在沉降杆上端，沉降时读取数据。

C.1.4 堆载平台与承载钢管在中心处对接焊接，平台构造如图 C.1.4 所示。堆载平台上方加载混凝土块，测量其变形量，待变形稳定后再浸水。

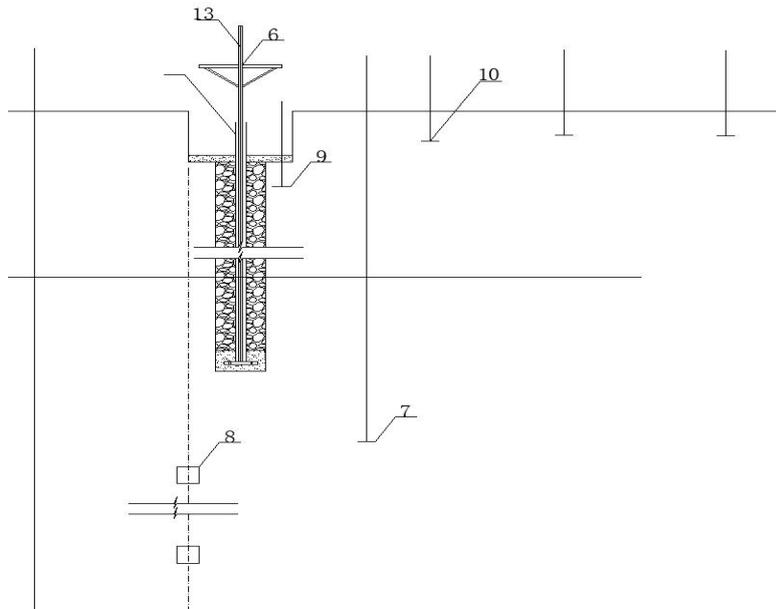


图 C.1.4 砂井剖面图

6-堆载平台；7-深标点；8-水分计；9-坑内浅标点；10-坑外浅标点；13-水准仪数字条码纸

C.1.5 湿陷性黄土砂井浸水试验的试坑内水头高度不宜小于 30cm，在浸水过程中，应观测湿陷量、耗水量、浸湿范围和地面裂缝。湿陷稳定可停止浸水，其稳定标准为最后 5d 的平均湿陷量小于 1mm/d。

C.1.6 砂井内停止浸水后，应继续观测不少于 10d，且连续 5d 的平均沉降量不大于 1mm/d，试验终止。

C.2 仪器设备

C.2.1 沉降板：根据沉降标点类型的不同分为三种。砂井内部一般采用直径 30cm~40cm，厚度 1cm 且带有透水孔的圆形钢板；浅标点和深标点一般采用直径不宜小于 20cm，厚度不小于 1.5cm 的带孔圆形钢板。

C.2.2 沉降杆：一般采用直径 2.5cm 且带有车丝的钢管，出露地表部分绑扎固定最小刻度为 1mm 的钢卷尺作为读数标杆。

C.2.3 承载钢管：下部与沉降板连接，上部接堆载体，宜采用直径不小于 10cm 且不大于 15cm，管壁厚宜为 3cm 的钢管。

C.2.4 PVC 管：保护承载钢管，避免钢管与外界产生摩擦力，PVC 管直径宜大于承载钢管 3cm~5cm。

C.2.5 带孔沉降板：根据沉降标点类型的不同，沉降板选用圆形钢板。砂井内直径宜为 40cm~60cm，厚度不小于 3cm，孔径不宜小于 5cm，透水孔不少于 4 个；浅标点和深标点直径不宜小于 20cm，厚度不小于 1.5cm。

C.2.6 堆载平台：边长不宜小于 1.2m，厚度不宜小于 3cm 的正方形钢板，平台水平放置并与承载钢管垂直焊接。

C.2.7 水分计：埋设于不同深度，监控浸水影响范围内对应深度含水率的变化。

C.2.8 沉降观测装置：宜满足二级变形精度要求的水准仪。

C.2.9 自重湿陷性黄土砂井浸水试验的仪器设备要求说明为 C.2.1、C.2.2、C.2.7、C.2.8，非自重湿陷性黄土砂井浸水试验的仪器设备要求说明为 C.2.3、C.2.4、C.2.5、C.2.6、C.2.7、C.2.8。

C.3 操作步骤

C.3.1 试验场地与试验元器件应符合下列要求：

1 在具有代表性的地点，平整场地，在场地中心开挖直径 60cm~80cm 的探井至设计深度，去除井底浮土、整平，人工开挖时可在开挖过程中取原状土做室内试验。

2 井内元器件埋设参照图 C.3.1-1~C.3.1-2，其顺序与要求如下：

(1) 向井内灌入一定量的中细砂，使井底形成约 10cm 厚的砂垫层；

(2) 逐节连接下放井内沉降板及沉降杆至井底，夯实井底砂垫层，确保沉降杆位于井中央位置；

(3) 沉降杆外套上 PVC 护筒，保证沉降杆不受侧限，可随地层变形自由升降；

(4) 再次灌入约 20cm 厚度的中细砂，防止砾石回填过程中井底土层及沉降板受下落砾石冲击产生变形；

(5) 回填砾石至井口约 60cm 处，在井口处开挖直径 2m，深 60cm 的试坑。

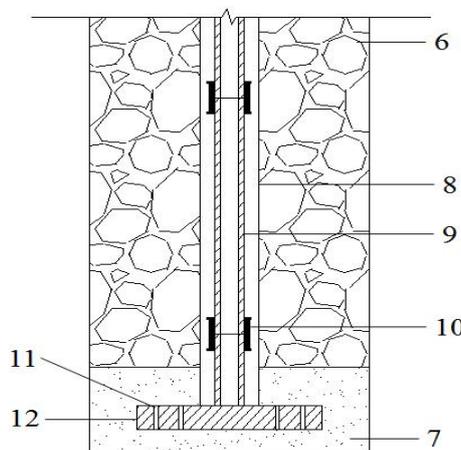


图 C.3.1-1 井内结构详图

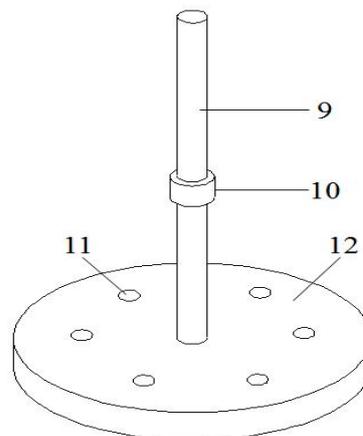


图 C.3.1-2 井内承载板详图

6--砾石；7--中细砂；8--护筒(PVC管)；9--沉降杆(钢管)；10--钢接头；

11--透水孔；12--井内沉降板。

C.3.2 沉降标点埋设，分为深、浅标点两类，其埋设应符合下列要求：

1 在深标点及水分计埋设位置进行预钻孔，深标点孔径 108mm，水分计孔径 120mm，确保钻孔竖直，深度准确，钻孔完成后封闭孔口，防止孔内水分蒸发。

2 深标点埋设。向深标点钻孔内逐节连接下放深标点沉降板及沉降杆至孔底，夯实孔底浮土，孔口出露一段；沉降杆外套上 PVC 护筒，护筒外围空隙用素土或中细砂回填密实，出露地表端连接带有钢卷尺的读数标杆。其构造如图 C.3.2-1 所示。

3 浅标点埋设。在浅标点埋设位置开挖 40cm×40cm、深度 50cm 的坑，整平坑底，将带有一段沉降杆的浅标点沉降板放于坑内，连接带有钢卷尺的读数标杆，确保标杆竖直，并分层回填素土夯实。

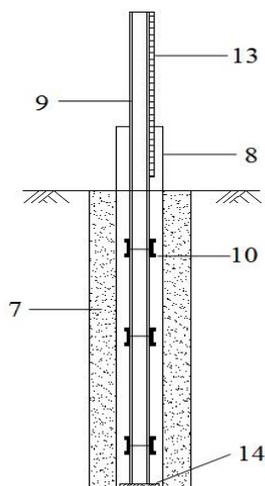


图 C.3.2-1 深标点结构图

7-中细砂；8--护筒(PVC 管)；9--沉降杆(钢管)；10--钢接头；13--钢卷尺；14--深标点沉降板。

4 水分计埋设。下放埋设水分计，校准埋设前后的读数，确定水分计正常工作后，利用探槽取得并预先碾压好的素土分层回填夯实，并不断用测绳测量回填高度，待回填夯实达下一设计深度时，下放埋设下一个水分计，直至砂井井底埋深处，以上部分继续用素土回填夯实，尽量保证浸水过程中不会由于孔内渗透速度的增大而加快水分计的变化速率。埋设完成后在地表固定集线盒，用以保护水分计读数接头。

5 清理井口试坑底面浮土，并铺设 10cm 厚度的砾石，在试坑侧壁铺设防水塑料布，防止侧壁在浸水过程中坍塌。

C.3.3 注水及沉降观测应符合下列规定：

1 在砂井浸水影响范围外（距井中心 15m 以外）设立基准点，通过沉降标点与基准点高差变化来反映各点湿陷变形量。上述砂井试验准备工作完成后，对各沉降标点及水分计进行连续监测，待完全稳定后开始注水，并保持试坑内有 30cm 高的水头。

2 浸水初期，沉降观测不少于 2 次/d，带沉降发展逐渐变缓后可减为 1 次/d；水分计读数不少于 2 次/d，当某一深度水分计开始发生变化时应增加读数频率；浸水过程中每天记录用水量及地表裂缝变化，直至试验结束。

C.4 试验资料整理

C.4.1 耗水量：绘制各砂井单天耗水量及累计耗水量随时间的变化关系，可反映试验过程中砂井周围土层渗透速率的变化，进而反映周围土体饱和程度，再结合水分计数据及沉降数据分析地层湿陷变形规律。

C.4.2 水分计数据：通过所记录的数据绘制水分计埋设位置土体含水率随时间的变化关系，可反映浸水影响深度及不同深度土层浸水影响程度。

C.4.3 沉降标点数据：绘制不同标点单日沉降量及累计沉降量随时间的变化关系，可反映砂井浸水条件下不同地层湿陷变形发展规律，根据点位埋设位置不同分为三种：

1 井中心标点：反映井底埋深至浸水影响最大深度处之间的土层湿陷变形发展情况。可根据同一场地不同埋深砂井的中心标点沉降量之差，得到不同砂井埋深之间土层的湿陷变形。

2 地表浅标点：试坑内浅标点反映场地浸水影响深度范围内的总湿陷；试坑外浅标点反映砂井浸水湿陷影响范围。

3 周围深标点：反映砂井浸水条件下不同深度土层湿陷变形情况。

4 地表裂缝：根据地表裂缝发展情况记录可分析裂缝发展规律，并绘制裂缝分布平面图，反映砂井浸水地表影响范围。

C.4.4 砂井浸水试验记录应按表 C.4.4-1、表 C.4.4-2 填列。

表 C.4.4-1 砂井浸水试验记录表

工程名称： 试验深度： 平台上方载重： 记录编号：
 试验方法： 试验日期： 共 页 第 页

本次观测时间：		基准点号	上次观测基准点值：		基准点号	上次观测基准点值：	
上次观测时间：			本次观测基准点值：			本次观测基准点值：	
标点号	上次观测值	本次观测值	本次沉降量	标点号	上次观测值	本次观测值	本次沉降量
	(m)				(m)		

表 C.4.4-2 砂井试验各标点湿陷变形记录表

砂井编号_____ 读数时间_____ 天气状况_____ 记录者_____ 校核者_____

沉降标点编号	读数 (cm)	基准点读数 (cm)	高差(cm)	初始高差 (cm)	累计湿陷变形量 (cm)	备注
A1	X	Y	Z=X-Y	O	M=O-Z	
.....	

附录 C：黄土结构屈服湿陷变形分析方法

鉴定成果、评价等

C.1 应用条件

使用黄土结构屈服湿陷变形分析方法评价黄土场地与地基湿陷性时，应先对评价场地进行勘探，确定不同深度土层的沉积时代，并对竖向间隔 1 米深度的土样进行基本的土工试验，取得三相比例指标及液塑限指标。

C.2 湿陷系数的计算

C.2.1 黄土的湿陷系数 δ_s ，可用式(D.2.1)计算：

$$\delta_s = \frac{e_p - e_p'}{1 + e_0} \quad (C.2.1)$$

式中： e_0 ——黄土的初始孔隙比；

e_p ——保持天然湿度和结构的试样，在压力 p 作用时压缩稳定后的孔隙比；

e_p' ——压力 p 作用时压缩稳定后的试样，在浸水饱和和条件下，附加压缩稳定后的孔隙比。

计算湿陷系数 δ_s 时，压力 p 为计算位置处的设计上覆压力。当压力 p 为上覆黄土的饱和（ $S_r=0.85$ ）自重压力时，湿陷系数 δ_s 为自重湿陷系数 δ_{zs} 。

C.2.2 e_p 与 e_p' 可通过以下步骤获得：

1 测试或计算天然与饱和状态下黄土的构度指标

黄土的构度指标 m_u ，宜通过原状土、重塑土（粒度、密度及湿度与原状土相同）、饱和原状土的无侧限抗压强度，由式（D.2.2-1）计算：

$$m_u = \frac{q_{uo} \cdot q_{uo}}{q_{ur} \cdot q_{us}} \quad (C.2.2-1)$$

式中： m_u ——黄土的构度指标；

q_{uo} ——原状土的无侧限抗压强度（kPa）；

q_{ur} ——重塑土（粒度、密度及湿度与原状土相同）的无侧限抗压强度（kPa）；

q_{us} ——饱和原状土的无侧限抗压强度（kPa）。

黄土的构度指标 m_u 也可采用其与综合物理量 Z 的经验关系式 C.2.2-2~C.2.2-4 计算：

$$Q_3 \text{ 黄土: } m_u = 10.7e^{-0.1Z} + 1 \quad (C.2.2-2)$$

$$\text{西安 } Q_2 \text{ 黄土: } m_u = 2.9e^{-0.1Z} + 1 \quad (C.2.2-3)$$

$$\text{兰州 } Q_2 \text{ 黄土: } m_u = 5.4e^{-0.1Z} + 1 \quad (C.2.2-4)$$

式中：e——自然对数的底数；

Z——综合物理量，其表达式为：

$$Z = \frac{(w - w_p)}{(G_s + e_0)} \cdot \frac{G_s^2}{1 + e_0} \quad (\text{C.2.2-5})$$

式中：w——黄土的含水率（%）；

G_s ——黄土的颗粒比重；

w_p ——黄土的塑限（%）。

快速计算原状黄土的湿陷系数时，通过浸水前后各层黄土的基本物性指标（ w 、 G_s 、 e_0 、 w_p ）、（ w_{sat} 、 G_s 、 e_0 、 w_p ）， w_{sat} 为黄土的饱和含水率，由式（C.2.2-5）分别计算天然与饱和（ $S_r=0.85$ ）状态下黄土的综合物理量 Z 与 Z' 。根据黄土所在地域与沉积时代，将 Z 与 Z' 代入式（C.2.2-2）～式（C.2.2-4），分别计算天然与饱和状态下黄土的构度指标 m_u 与 m_u' 。

2 计算天然与饱和状态下黄土的结构压缩屈服应力

黄土的结构压缩屈服应力 p_{sc} 可通过式（C.2.2-6）、式（C.2.2-7）计算：

$$Q_3 \text{ 黄土: } p_{\text{sc}} = 0.39m_u p_a \quad (\text{C.2.2-6})$$

$$Q_2 \text{ 黄土: } p_{\text{sc}} = (0.8m_u + 6.0)p_a \quad (\text{C.2.2-7})$$

式中： p_{sc} ——黄土的结构压缩屈服应力（kPa）；

p_a ——标准大气压（ $p_a = 101.3 \text{ kPa}$ ）。

快速计算原状黄土的湿陷系数时，根据黄土的沉积时代，将其构度指标 m_u 与 m_u' 代入式（C.2.2-6）或式（C.2.2-7），分别计算天然与饱和状态下黄土的结构压缩屈服应力 p_{sc} 与 p_{sc}' 。

3 计算天然与饱和状态下黄土压缩变形稳定后的孔隙比

Q_3 黄土的压缩曲线可用式（C.2.2-8）描述； Q_2 黄土的压缩曲线可用式（C.2.2-9）描述。

$$Q_3 \text{ 黄土: } \begin{cases} e = e_0 e^{-0.1 \left(\frac{p}{p_{\text{sc}}} \right)^{0.8}}, & p \leq p_{\text{sc}} \\ e = 1.6e_0 e^{-0.57 \left(\frac{p}{p_{\text{sc}}} \right)^{0.26}}, & p > p_{\text{sc}} \end{cases} \quad (\text{C.2.2-8})$$

$$Q_2 \text{ 黄土: } \begin{cases} e = e_0 e^{-0.14 \left(\frac{p}{p_{\text{sc}}} \right)^{0.7}}, & p \leq p_{\text{sc}} \\ e = 1.6e_0 e^{-0.61 \left(\frac{p}{p_{\text{sc}}} \right)^{0.27}}, & p > p_{\text{sc}} \end{cases} \quad (\text{C.2.2-9})$$

式中： p ——设计上覆压力（kPa）；

e ——黄土压缩曲线上与压力 p 相对应的孔隙比。

快速计算原状黄土的湿陷系数时，根据黄土的沉积时代，将压力 p 、黄土的初始孔隙比 e_0 及结构压缩屈服应力 p_{sc} 与 p_{sc}' 代入式 C.2.2-8 或式 C.2.2-9，分别计算天然与饱和状态下黄土在压力 p 作用下压缩变形稳定后的孔隙比 e_p 与 e_p' 。

C.2.3 计算增湿条件下的湿陷系数时， w_{sat} 应为增湿后的含水率 w_h ； e_p' 为压力 p 作用时压缩稳定后的试样，在浸水增湿条件下，附加压缩稳定后的孔隙比。

C.3 湿陷量的计算

C.3.1 湿陷性黄土场地自重湿陷量计算值，可按式计算：

$$A_{zs} = \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad (\text{C.3.1})$$

式中： A_{zs} ——自重湿陷量计算值（mm）；应自天然地面（挖、填方场地应自设计地面）算起，计算至其下非湿陷性黄土层的顶面为止；勘探点未穿透湿陷性黄土层时，计算至控制性勘探点深度为止，其中自重湿陷系数 δ_{zs} 值小于 0.015 的土层不累计；

δ_{zsi} ——第 i 层土的自重湿陷系数；

h_i ——第 i 层土的厚度（mm）。

C.3.2 湿陷性黄土地基受水浸湿饱和，其湿陷量计算值可按式计算：

$$A_s = \sum_{i=1}^n \delta_{si} h_i \quad (\text{C.3.2})$$

式中： A_s ——湿陷量计算值（mm）；应从基底算起，至其下非湿陷性黄土层的顶面为止，其中湿陷系数 δ_{si} 小于 0.015 的土层不累计。

δ_{si} ——第 i 层土在设计上覆压力 p 作用下的湿陷系数；

C.3.3 湿陷性黄土地基受水增湿，其湿陷量计算值可按式计算：

$$A_{hs} = \sum_{i=1}^n \delta_{hsi} h_i \quad (\text{C.3.3})$$

式中： A_{hs} ——增湿湿陷量计算值（mm）；应从基底算起，至其下非湿陷性黄土层的顶面为止，其中增湿湿陷系数 δ_{hsi} 小于 0.015 的土层不累计。

δ_{hsi} ——第 i 层土在设计上覆压力 p 作用下的增湿湿陷系数；

C.4 湿陷性评价

黄土场地与地基的湿陷性，根据上述计算所得的地基自重湿陷量 A_{zs} 和实际压力下的湿陷量 A_s ，按相应工程湿陷性黄土场地判定和地基湿陷性评价标准进行评价。

附录 D： 轻量土换填减重消减黄土地基湿陷的方法

D.1 应用条件

D.1.1 本方法可用于湿陷等级为 II 级及以下且湿陷土层分布在浅层的湿陷性黄土场地的地基处理中。

D.1.2 本方法的基本原理是在地基表层设置轻量土换填层，利用轻量土重度小的特点来减少整个下卧地基土层的上覆压力，从而减小地基的湿陷量。

D.1.3 设置轻量土换填层后，减小的地基自重湿陷量可用式 (D.1.3-1) 计算：

$$\Delta_{\text{差值}} = \Delta_{\text{换填层的原湿陷量}} + \Delta_{\text{下卧层减重后湿陷量的减小值}} \quad (\text{D.1.3-1})$$

式中： $\Delta_{\text{差值}}$ 一为设置轻量土换填层后减小的地基湿陷量值 (m)；

$\Delta_{\text{换填层的原湿陷量}}$ 一由于轻量土本身不湿陷而减小的地基湿陷量 (m)；

$\Delta_{\text{下卧层减重后湿陷量的减小值}}$ 一下卧层由于上覆压力减小而减小的湿陷量 (m)。

D.2 轻量土换填材料

D.2.1 轻量土材料应符合下列规定：

1 轻量土分水泥发泡型和素土加轻质材料混合型两种，其中，水泥发泡轻量土是由水泥砂浆和发泡剂制成的含有封闭气孔的水泥凝固体，重量最轻可达 $0.3\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ ；素土加轻质材料混合轻量土是由素土、砂、水泥和 EPS 颗粒构成，单位体积重量在 $0.5\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 范围内。

2 根据场地地基处理原则，按需选择原材料，进行正交试验设计，通过密度试验、渗透试验和无侧限抗压强度试验，综合确定最优配合比。

D.2.2 水泥发泡型轻量土的配合比设计应符合下列规定：

1 水泥发泡型轻量土是多孔混凝土的一种，采用发泡剂，通过机械搅拌、空气发泡等方式制出泡沫，再将泡沫加入含硅质材料、钙质材料、水及各种外加剂等组成的料浆中，或者采用原位发泡，最终制成泡沫料浆，然后浇筑成型、自然养护，所形成的一种微孔结构的水泥混凝土轻质材料。发泡混凝土的密度较小。发泡混凝土料浆可自流平，自密实，施工和易性好，便于泵送及整平，与所有其他建材几乎都有较好的相容性，且强度可调控。

2 根据场地地基处理原则，按需选择泡沫混凝土强度等级，进行配合比设计。

D.2.3 轻质材料混合型轻量土的配合比设计应符合下列规定：

1 根据场地地基处理原则，按需选择原料素土、水泥、砂、EPS 颗粒和水为材料，进行正交试验设计确定足有配合比。为增加换填层的渗透性可掺加棉杆纤维等加筋材料。

2 优化目标为：满足密度、承载力、渗透性以及黄土湿陷性处理等要求。

3 轻量土密度主要受 EPS 颗粒含量影响，EPS 含量越多材料的密度越小。换填层的承载力和渗透性主要受水泥含量影响，水泥掺量越大地基承载力越高而渗透性越差。

D.3 轻量土换填设计

D.3.1 轻量土换填层厚度设计计算应符合下列规定：

1 开展室内黄土压缩试验，测定地基顶部到湿陷性土层顶部每 1m 黄土层的自重湿陷系数与压力的关系曲线；开展土层基本物理力学性能试验，测定其密度和含水率等参数。

2 计算未设换填层时地基各土层的自重压力、湿陷量、自重湿陷量。

3 根据地基处理要求，选定轻量土换填材料，并确定其设计重度。计算不同换填层厚度下地基下卧层的设计上覆压力。

4 查压力与湿陷系数关系曲线，得出换填后各个土层的自重湿陷系数，计算换填后的各层自重湿陷量。

5 根据换填后的自重湿陷量判定换填减湿陷的效果，若自重湿陷量 $\Delta_{zs} \leq 70\text{mm}$ ，则达到消除场地自重湿陷性的效果；或者将自重湿陷量减小到地基允许的剩余湿陷量的范围内。

D.3.2 对于引调水工程中开挖场地进行换填设计时，需要考虑开挖面的卸荷作用，即利用开挖卸荷与开挖面以下轻量土换填相结合的计算方法，提高卸荷效果，减小换填厚度，同时达到黄土场地湿陷性处理效果。

D.4 换填施工工艺

D.4.1 施工前应复核轻量土的设计配合比，计算材料用量，并备料。

D.4.2 应将施工范围内的植被、杂物及腐殖质土清理干净，进行测量放样，并测量清除地表杂质后的地面高程，计算开挖深度，做好施工前场地的准备工作。

D.4.3 应对场地进行初步处理，包括开挖与基底精平与碾压，基底压实系数要求不小于 0.90；采用白灰在基底上打方格控制上料密度，根据自卸车运载量及选定的松铺厚度来确定方格网尺寸。同时每隔 5m 埋设高程控制桩，标示松铺厚度挂线控制摊铺整平。

D.4.4 轻质材料混合型轻量土的配制步骤应符合下列规定：

1 将原料土、水泥、砂和棉秆纤维按照最优配合比加入到灰浆搅拌机内，混合搅拌 5min，直至混合料均匀；

2 加入配合比掺量的自来水，启动搅拌机，将混合料充分搅拌 5min，直至形成均匀的水泥土；

3 为避免 EPS 颗粒上浮，最后加入称量好的 EPS 颗粒，强制式搅拌 10min，获得均匀的混合土。

D.4.5 发泡混凝土轻量土的配制步骤应符合下列规定：

1 将水泥和粉煤灰计量后加入搅拌机；

2 将 10%发泡剂水溶液制成 1mm 左右微细均匀泡沫，并加入搅拌机；

3 将泡沫和水泥浆混合均匀。

D.4.6 轻量土填筑步骤应符合下列规定：

1 将制备好的换填材料采用边卸料边摊铺的方法，卸料后先用装载机对填料进行粗平，粗平时参照控制桩顶部进行摊料，注意保护高程控制桩，用平地机按作好的标记高度精平，填料不足的用平地机补平。

2 分层、分段浇筑，每层浇筑厚度 40cm，同一区段上下相邻浇筑层，浇筑间隔时间不小于 12h，并且第二层浇筑前，将上一浇筑面刮毛后再继续铺筑。

3 对振捣完成部分用土工布遮盖，防止水分流失。

D.4.7 摊铺成型后，进行洒水养护至少 7 天，期间除洒水车外其余车辆禁止通行，连续铺筑上层时可不洒水养护。

D.4.8 施工质量控制应遵循“三快”原则，即快速摊铺、快速整平、快速检测，保证整个施工过程在水泥初凝前完成。每层浇筑完成后使用取样环刀现场取样，测量换填材料的密度、含水率和渗透系数，控制其在要求范围内。

D.5 质量检测

D.5.1 分层施工中，对基底采用环刀压入法，检测压实系数，要求不小于 0.90；对每层垫层采用环刀压入法，检测换填密度符合设计要求。

D.5.2 换填结束后，根据工程要求进行质量验收，可采用荷载试验或者静力触探试验等，检测地基处理质量。

标准用词说明

标准用词	严格程度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应、不得	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件可以这样做

团 体 标 准

引调水工程湿陷性黄土地基 处理技术规程

T/CHES: XXXX—2023

条 文 说 明

目录

1 总则	54
3 基本规定	55
4 勘察与湿陷性评价	56
4.1 一般规定	56
4.2 现场勘察	56
4.3 黄土湿陷性试验	59
4.4 黄土湿陷性评价	60
5.设计	62
5.1 一般规定	62
5.2 处理原则与标准	62
5.3 工程处理设计	63
6 施工	69
6.1 一般规定	69
6.2 换填法	69
6.3 预浸水法	70
6.4 强夯法	71
6.5 挤密法	74
6.6 高压喷射法	80
6.7 桩基础	82
7 质量检测	84
7.1 一般规定	84
7.2 质量检测	84
8 监测	86
8.1 一般规定	86
8.2 监测	86
附录 D 轻量土换填减重消减黄土地基湿陷的方法	87

1 总则

1.0.1 考虑到引调水工程基本都是涉水建筑物，地基受水浸湿的可能性较大，在湿陷性黄土地区进行建设，防止地基湿陷，保证水工建筑物工程质量和效益安全发挥，做到技术先进、经济合理、保护环境、节约能源，是制定本规程的宗旨和指导思想。

1.0.2 蓄水建筑物包括大坝、调蓄水池、水闸等；输水建筑物包括渠道、隧洞、管涵及倒虹吸等；其他建筑物包括渡槽、桥梁、跌水等。对大坝的湿陷性黄土地基处理，《碾压式土石坝设计规范》（SL274-2020）第 6.3.4 条已有相关技术要求，因此本规程的适用范围不包括大坝工程。

3 基本规定

3.0.1 引调水工程种类很多,按照使用功能可以划分为线性工程(渠道、隧洞、管涵等)和节点工程(水池、泵站、桥梁、水闸等)。对引调水工程分类是为了地基处理设计采取措施时区别对待,保证引调水工程安全的同时,提高地基处理的实用性、经济性。

3.0.2

2 自身防水措施主要为采用防渗性能良好的现浇钢筋混凝土、塑料管、钢管、钢塑复合管等材料,且连接段防水严密。防渗措施包括增设可靠防水层、采用钢筋混凝土排水沟,增设检漏管沟和检漏井等。排水措施包括截水沟、排水沟、跌水与急流槽、暗沟、渗沟等。侧向防水措施包括设置防水帷幕、增大地基处理外放尺寸等。

3 增强水工建筑物抵抗不均匀沉降的结构措施主要有 2 种:其一为加强结构的整体性和空间刚度,以减小或调整水工建筑物的不均匀沉降;其二为选用柔性结构材料、适宜的结构体系和基础形式,以使结构适应地基的变形。

4 勘察与湿陷性评价

4.1 一般规定

4.1.3 规划阶段工程地质勘察主要对规划方案的区域地质及基本工程地质条件进行宏观的工程地质论证，一般不针对具体建筑物进行地质勘察。规划阶段工程地质勘察的精度为“了解、调查”，但对影响建筑物方案布置的工程地质、水文地质、环境地质问题地段应达到“初步查明”的精度。

4.1.4 黄土沟谷主要包括黄土涧地、崾岬、掌地、杖地、细沟、悬沟、冲沟、峡谷、坳沟等次级地貌单元。

4.1.8 本条是在引调水工程常规区域地质勘察规定的基础上，对湿陷性黄土地区引调水工程做了进一步规定：

1 根据工程近场区勘察的需要，范围确定为线路两侧各 10~25km。

2 区域地质勘察是对建设项目场地的稳定性和适宜性作出初步评价，交待宏观地质条件和地质问题。对于湿陷性黄土地区引调水工程，线路调查工作极为重要，尤其是调查沿线不良地质作用、环境地质问题、黄土湿陷性问题是本节勘察的主要内容。

3 区域构造稳定性是关系水利水电工程是否可行的根本地质因素，要求在线路选址论证时做出明确评价。地震动参数又是工程抗震设计的重要依据，应根据工程场地地震安全性评价报告或现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB18306-2015 确定地震动参数。

4 对于区域构造稳定性分级宜按水利口的三分法评价。按《引调水线路工程地质勘察规范》SL629-2014 条文说明中表 3 执行。

4.2 现场勘察

I 渠道

4.2.5 本条针对湿陷性黄土渠道工程地质条件和可能存在的工程地质问题，规定了应查明的内容。

2 黄土陷穴、滑坡、崩塌、冲沟、土流(泻溜)及地裂缝等不良地质现象对湿陷性黄土地区的渠道地基和边坡稳定性影响极大，应查明其工程地质条件，分析其稳定性。

3 渠道沿线地下埋置的建筑物或构筑物对渠道选线、施工和安全运行影响极大。尤其是不可移动的国防光缆和油气管道等在前期勘察时一定要查明线路走向，提前绕避或确定合理的穿行方案。另外对于废弃而掩埋于地下的地坑院、窑洞、防空洞、取

土场或排水盲沟等，在线路穿越其上时，一定要查明其埋深、规模和分布规律，提出合理的处理措施或穿行方案。

4 当挖（填）方深（厚）度较大时，黄土场地湿陷类型、湿陷等级可能发生变化，湿陷性评价应自挖（或填）方整平后的地面（或设计地面）标高算起。当场地地下水位有可能上升至地基压缩层深度以内时，宜提供饱和状态下的土体强度和变形参数。

4.2.6 1 条文规定了不同黄土地貌单元测绘比例尺各异。对于黄土塬、梁、峁区等地貌形态简单的可采用较小比例尺；对于黄土阶地、黄土斜坡、黄土沟谷等地貌形态复杂的可采用较大比例尺。

2 黄土渠道沿线若发育有多个地貌形态时，勘察内容和方法需要统筹兼顾、因地制宜、突出重点，要有针对性地安排勘察内容，合理使用有效的勘察方法，勘察内容不漏项，技术深度到位，实现勘察目的。

一般性勘探点深度应控制主要受力层，控制性勘探点深度至少应穿透湿陷性黄土层，实际深度应结合建筑规模特征及拟采用基础形式，根据湿陷性黄土层的厚度和地基压缩层深度来具体确定。

钻孔取样土工试验数据宜在探井取样对比分析的基础上使用，土层密度、孔隙率（比）、湿陷性和力学指标宜以探井取样土工试验为准。

考虑到黄土成因的特殊性，黄土分布均匀性较好，本规定渠道工程勘探点间距略大于《引调水线路工程地质勘察规范》SL629 之规定。

3 查明渠道沿线埋置的光缆和管道，废弃掩埋的地坑院、窑洞及防空洞，存在的渠道、塘坝和积水坑，回填的地下取土场、排水盲沟等地下构筑物的埋置深度、分布范围。

II 隧洞

4.2.11 本条针对黄土隧洞工程地质条件和工程地质问题，规定了黄土隧洞勘察内容。

1 对于引调水工程黄土隧洞来说，由于黄土围岩中孔隙、裂隙、垂直节理较发育，是一种非均质各向异性的结构体，内水和外水对黄土围岩稳定性影响极大。土体干燥或含水率较低时，黄土围岩自身稳定性较好；对于自身饱和度大于 80% 的黄土或受外水入渗呈软塑或流塑状态的黄土围岩，无自稳能力。由于饱和黄土具有很高的液态势和流态破坏势，当黄土层中含水率较高时，在自重作用或外力扰动下，极易沿洞壁发生流滑，引起洞室土体失稳定坍塌，甚至形成洞内泥石流。因此，对于黄土隧洞来说，查明地下水位埋深和土体天然含水率尤为重要。

2 黄土冲沟、陷穴、土流（泻溜）等是湿陷性黄土地区特有的地貌形态，是黄土侵蚀和潜蚀的结果。这些不良地质体对黄土隧洞布置和工程稳定十分不利。黄土隧洞选线宜尽量绕避。

4、5 黄土隧洞进出口、浅埋洞段、傍山段、过沟段的黄土边坡及洞顶土体稳定性极差，极易受施工开挖扰动，造成土体滑塌、冒顶。对于黄土隧洞来说，这些部位应为勘察重点。

对于黄土隧洞勘察方法，应根据地貌形态变化，灵活应用，主要宜以钻探和井探为主，并结合取样试验，综合评价黄土隧洞围岩稳定性，进行围岩工程地质分类。黄土隧洞围岩分类宜符合《引调水线路工程地质勘察规范》SL629 附录 D 规定。

III 涵洞（管道）

4.2.15 本节规定了可行性研究阶段勘察应包括下列工作内容。

4 穿越方式主要包括开挖穿越和非开挖穿越两种。非开挖穿越方式包括顶管、拉管、定向钻等。埋置深度主要考虑土层的物质组成、地下水分布、最大冻结深度等因素。通过勘察应根据地质条件，提出穿越方式的最小埋置深度的地质建议。

4.2.16 本节规定了可行性研究阶段勘察方法。

3 本款按开挖穿越和非开挖穿越两种方式对勘探深度作了规定。如穿越方式尚未确定，需进一步论证时，一般按非穿越方式确定勘探深度。

4.2.17 本节规定了初步设计阶段涵洞及管道勘察内容。

3、4 主要针对湿陷性黄土地区地貌形态和地基土体特点，对涵洞及管道勘察内容进行了补充，增加了过沟段、穿河段的顶管、拉管或定向钻等穿越方式的勘察内容。

4.2.18 本节规定了初步设计阶段涵洞及管道勘察方法。

4 对于涵洞及管道勘察方法，除了常规开挖穿越和非开挖穿越方式外，近年来，受黄土高原生态环境保护、水土流失治理等因素影响，为了尽量减少开挖面积大、弃土量多、地面生态植被破坏严重的问题，针对工程建设现状和今后发展方向，目前多采用顶管、拉管或定向钻等方式穿越有特殊保护要求或限制开挖地段，已取得了良好生态效果，本节提出了顶管、拉管或定向钻穿越方式。

5 试验项目应根据穿越方式和黄土性质确定。开挖穿越(沟埋敷设)应进行液限、塑限、颗粒分析、渗透系数试验项目。顶管和拉管或定向钻等非开挖方式穿越除应进行上述试验外，宜对黄土进行物理、力学试验。

IV 水池

4.2.20 本节规定了项目建议书阶段水池勘察方法。

4 勘探宜以轻探为主，对于大厚度湿陷性黄土可适量采用重探。对于湿陷性黄土层厚度在 20m 以内时，采用人工开挖探井是基本可行的；对于湿陷性黄土层厚度大于 20m 时，考虑到人身安全问题，宜采用机械开挖探井或采用钻探方法揭穿湿陷性黄土层。

4.2.24 本节规定了初步设计阶段水池勘察方法。

3 采取不扰动土样，必须保持天然的湿度、密度和结构，并应符合 I 级土样质量的要求。进行湿陷性试验的土样，应优先考虑探井中取样，竖向间距宜为 1.0m，20m 以下可为 1.5m，土样直径不宜小于 120mm。

如确需在钻孔中取样，应按《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025-2018)附录 E 中的规定执行。钻孔取样的土工试验数据宜在与探井取样对比分析的基础上使用，土层的密度、湿陷性和力学指标宜以探井取样土工试验为准。

V 其他水工建筑物

4.2.27 本条规定了初步设计阶段勘察工作内容和勘察方法。

1 对于节点工程水闸和泵站来说，地基黄土体湿陷深度及湿陷程度是勘察重点；对于节点工程陡坎、跌水来说，地基黄土体颗粒组成和土体密实程度是勘察重点。

2 对于节点工程渡槽、倒虹吸、管桥来说，跨越湿陷性黄土地段桩(墩)基的工程地质条件及其稳定性和穿越方式的适宜性是现阶段勘察重点。渡槽、倒虹吸、管桥常见的工程地质问题主要有黄土岸坡的滑动或坍塌、桩(墩)基不均匀沉降和滑移。因此，要查明其工程地质条件，确定桩(墩)基稳定持力层，进行黄土岸坡和地基稳定性评价。岸坡稳定性评价可按《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2018)附录 K 的规定进行。桩(墩)基稳定变形评价既要考虑上部荷载作用下，桩(墩)基垂向压缩变形，又要考虑地基可能的侧身滑移变形。因此，要充分分析黄土岸坡及桩(墩)基的工程地质条件，合理确定工程地质参数(承载力和抗滑稳定系数)。

5 对建筑物桩型、桩长和桩端持力层深度提出合理建议，并提供设计所需的技术参数及单桩竖向承载力的预估值。

4.3 黄土湿陷性试验

4.3.1 黄土湿陷性试验方法主要有室内黄土压缩试验和现场浸水试验，一般认为现场浸水试验得到的地基在饱和自重作用下的湿陷量更为可靠，更为符合实际，但是费用较大且工期较长。对于重要建筑物应该进行现场浸水试验，本标准规定 2 级及以上水工建筑物应该开展现场浸水试验，其他等级的工程一般不进行这类试验，有条件情况下也可以进行。鉴于现场浸水试验的缺陷，本标准提出了采用黄土湿陷的离心模型试验的方法来替代现场试验的方法，该方法具有较室内黄土压缩试验更为准确，较现场浸水试验更便宜和缩短工期的优势，随着我国离心模型试验设备的增多和试验技术的进步，该方法值得大力推广。增湿试验是用来评估有限渗漏和非饱和增湿情况下地基湿陷变形的的方法，对于高等级或者防渗较为严格、结构措施较强的地基可以考虑使用。

4.3.5 本规程与《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025-2018)不同点主要在于：

(1) 采用实际压力下的黄土湿陷试验参数来评估地基的湿陷性，而黄土规范是以基底压力为 200kPa 的标称压力下的湿陷参数来评估地基的湿陷性，本标准方法更为符合渠道、隧洞和管道等工程实际。

(2) 明确了地基湿陷量计算的起算高程，规定以渠顶高程或者填方基面作为起算基面，这样更为适合开展渠道、涵洞、隧洞和管道等存在开挖槽体的建筑物的地基湿陷性评价。

(3) 规定了现场浸水试验浸水坑的高程应该与渠顶高程一致，将渠顶高程以上需要挖除的土体挖除，这样就可以充分考虑建筑物的开挖卸荷作用。

4.3.6 鉴于现场浸水试验费用考虑，对于同样一个地基单元，其试验组数应在 1~3 组。

4.4 黄土湿陷性评价

本规程采用设计上覆压力下黄土地基饱和湿陷量作为评价场地湿陷性的标准，摒弃了《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025-2018) (以下简称原黄土规范) 中自重湿陷量和非自重湿陷量的概念，主要基于以下考虑：

(1) 原黄土规范主要针对工业与民用建筑的黄土地基湿陷性评价编制，而这类建筑物属于点状工程，建筑物占用的场地范围较小，采用 200kPa 的建筑物基底压力作为地基湿陷性的上覆压力与建筑物实际基底压力较为相近，因此其湿陷量的计算在表层采用上覆压力为 200kPa 作用下的湿陷系数值进行计算。但是对于引调水工程常见的线型工程如渠道、隧洞，大部分工程处于挖方状态，如挖方渠道是挖出土填上了水，地基的基本处于卸荷状态，再采用 200kPa 的上覆压力作用下的湿陷系数计算地基的湿陷量显然是不合适的，会大大高估地基的湿陷性，因此本标准针对引调水工程的特点采用设计上覆压力下的湿陷系数计算地基的湿陷量，这样就没有必要区分自重与非自重湿陷，也可以统一考虑加荷与卸荷两种情况下的地基湿陷量计算。

(2) 原黄土规范采用统一的上覆压力下的湿陷系数进行场地湿陷性评价标准性较强，有其优点。采用设计上覆压力下的湿陷系数时，由于工程各处的实际压力均有所不同，因此本标准以工程各点最大的实际压力作为评价量，并对其他典型情况进行校核即可。

(3) 黄土湿陷发生的条件一是上覆压力存在，二是浸水或者增湿，二者缺一不可，作为输水建筑物的引调水工程本身就是行水的，地基受水的几率极大，浸水与增湿几乎是不可避免的，因此减小上覆压力是消减地基湿陷的重要的方法，比如在渠道线路选择上尽量选取挖方渠道，避免或者减少填方段，甚至有意识降低渠道顶面高程，造成渠道顶面以上挖除一定深度的土体，从而减小渠道地基土的上覆压力，或者采用轻质材料换填一部分渠道表面土体，来减小渠道整体地基土的上覆压力，这些方法将是渠道工程减小湿陷性的很好的方法，具有较高的推广价值。但是如按照原黄土规范

的地基湿陷性评价方法,采用 200kPa 上覆压力下的湿陷系数计算地基的湿陷性将不能反映这种“主动卸荷”对地基湿陷性的减小,无法体现这些方法消减湿陷性的效果,因此本标准采用设计上覆压力下的黄土地基湿陷量作为场地湿陷性评价的指标,这个指标可以正确反映以上消减结果。

(4) 防渗措施对减小渠道和隧洞工程中地基湿陷量作用较大,但是存在一定的风险。原黄土规范将之作为一个安全措施考虑,若对其考虑宜采用增湿试验得到的最大可能湿陷量来对地基湿陷性等级进行评价,本规范附录 E 列出了这种方法。

4.4.5、4.4.8 本标准确定的区分各级黄土地基湿陷性的湿限量界限值是按照渠道和隧洞工程允许的变形量确定的,与原黄土规范不同,这些界限值是多个工程实际观测值总结得到,主要适用于渠道和隧洞工程,其他工程可以参照执行。

4.4.9 目前对隧洞地基湿陷变形计算修正系数的研究尚不充分,由于隧洞地基埋深较大,一般在 10m 以下,因此借鉴《铁路黄土隧道技术规范》Q/CR 9511 确定修正系数。

4.4.10 基于最大可能增湿变形量的黄土场地湿陷性评价方法见条文说明的附录E。

5. 设计

5.1 一般规定

5.1.5 重要水工建筑物为建筑物级别高、破坏后果严重、破坏后社会影响大的水工建筑物，特殊环境作用指地震、暴雨、洪水、滑坡、泥石流作用等及其组合作用。

5.2 处理原则与标准

5.2.1 1 针对黄土湿陷性的地基处理方案应该认真研判工程的可修复性来确定，工程运行期间，若发生因湿陷造成的工程损伤，应该在引调水工程可承受的停运时长范围内得以修复。大量的引调水工程是以线性工程为主的，尤其是管、涵、渠穿越湿陷性黄土地区时，依据现行有关标准，针对黄土的湿陷性所做的大深度地基处理，将产生很高的投资，甚至造成工程难以立项上马，据调查已建引调水工程少有按照这么高标准做处理，建成投运后，为国民经济建设发挥着巨大的作用。另一方面，引调水工程的线性工程基本都能够承受一定时间段的暂停运行，为线性工程的事故抢修提供了可行性。通常引调水工程是其供水对象的供水工程之一，或者供水对象有一定的事故调蓄能力，对于只是单一水源的供水工程，按照《室外给水设计标准》GB50013，应该设置双线管（涵），以保障在事故状态下，供水能力达到用水户的最低用水量。黄土的湿陷是在有水浸泡之后发生的，所以，在做好地基防水的前提下，实际工程发生湿陷的几率较低，对于修复工期相对不长的线性输水工程，应该合理确定其黄土的湿陷性地基处理方案，使其因偶发湿陷造成的修复工期在引调水工程受益对象可承受的范围之内，以合理控制工程投资。

2 在线型输水的引调水工程中，有不少关键的节点工程，常见的有：水闸、水池、渡槽、管桥、泵站、倒虹吸、跌水陡坡等，这些工程的结构主体多采用现浇钢筋混凝土结构，自身有相当的强度和整体性能，对地基变形有一定的适应能力，然而一旦因湿陷沉降受损，可修复性比较差，工期需要数十天至数月才能恢复工程的正常运行。同时，这些关键工程均为单一的节点工程，地基处理范围相对不大，投资占比也不大。所以，对于这一类节点工程地基的湿陷性应采用有效处理措施，消除或者基本消除黄土的湿陷性，严格控制剩余湿陷量，使工程后期不会因湿陷发生修复困难的损伤。

3 引调水工程的线性输水工程在其工程投资中占比很大，若大量采用消除或者基本消除黄土湿陷性的地基处理措施，势必大量增加工程投资，鉴于这类工程都允许发生偶发性的短期内可修复的事故，所以，在输水工程材料和结构的选择时，应该选用

整体性能良好，有较好适应地基变形能力，且受损后短期内易抢修恢复工程供水的方案。以达到大量减少湿陷性地基处理的费用，节省工程投资。

5.2.2 1 湿陷后果严重地段主要指发生湿陷后会引引起工程大范围破坏，或者因为工程受损水外溢，进而引发地面湿陷，会造成附近建筑物损坏，带来社会问题的地段。

2 工程防渗垫层主要指灰土垫层、水泥石垫层等，不但具有良好隔水能力，同时也是换填湿陷性黄土的一种处理垫层。

3 整体连接管道主要指焊接或者法兰连接的钢管、聚乙烯 PE 管，以及自锚球墨铸铁管等。非整体连接管道主要指 T 型承插连接的球墨铸铁管，承插连接的聚乙烯 PE 管、U—PVC 管、PVC—UH 管、钢筒混凝土管等。

5.3 工程处理设计

I 渠道

5.3.1 1 换填置换法是一种浅层处理湿陷性黄土的传统方法，具有因地制宜、就地取材、施工简便等特点，在湿陷性黄土地区应用广泛。处理厚度超过 3m 时，挖填方量较大，施工质量不易保证，选用时应进行技术经济比较。

2 根据工程实践经验，换填材料的选用，要遵循就地取材的原则，采用性能稳定、压缩性低的天然或人工材料，例如壤土、中砂、粗砂、含砾砂土、水泥石等。从方便施工的角度考虑，以采用黏粒含量为 10%~20% 的土最为适宜，因为这类土易于破碎压实，抗剪强度高，结构稳定。黏粒含量为 20%~25% 的土一般也能满足使用要求，而黏粒含量超过 25% 的黏性土，特别是天然含水率超过 30% 的软弱黏性土或淤泥质土一般不能使用，因为这类土的施工含水率不易控制，要压实这类土往往费工费时，难度很大。但含砾黏土（即使黏粒含量超过 25%）却是较好的换填材料，因为这类土含有较多的砂粒和细砾，有利于土块的破碎和疏干。

(1) 砂砾石换填层最大粒径不宜大于 50mm，黏粒含量不得大于 5%。

GB/T50600-2020《渠道防渗衬砌工程技术标准》5.3.2 规定，“渠基土体的压实标准应符合下列规定：非黏性土填方渠道应按相对密度控制，1 级、2 级渠道的相对密度不小于 0.70，3 级、4 级渠道的相对密度不小于 0.65，其他渠道的相对密度不小于 0.60”，湿陷性黄土渠道砂砾石换填压实标准较之提高。

(2) 黄土换填料压实标准参照 GB/T50600-2020《渠道防渗衬砌工程技术标准》5.3.2，“渠基土体的压实标准应符合下列规定：黏性土填方渠道应按压实系数控制，1 级、2 级渠道的压实系数不小于 0.95，3 级、4 级渠道的压实系数不小于 0.93，其他渠道的压实系数不小于 0.91”。

(3) 由于级配良好的中砂和粗砂施工时比较容易振动密实，因此用作换填料也是适宜的。至于粉砂、细砂土，当采用合理的施工方法时，虽然也可达到一定的相对密度，但由于这类砂性土颗粒细而均匀，不均匀系数多在 1~3 之间，在遭受振动荷载作用的情况下，容易产生“液化”现象，因此一般不采用这类砂性土作换填材料。

(4) 水泥土也称水泥稳定土，由水泥、土按一定比例拌和均匀，经机械压实、养生后形成的结硬性混合物，合物中的土依靠水泥所起的稳定作用而固结，具有较高的强度和耐久性。土料中含水率除满足水泥水化作用外，还需满足机械碾压的工艺要求。当水泥掺入量较大时，也可掺入一定量粉煤灰降低造价，但需注意按照相关规定控制粉煤灰中 SO_3 含量。

(5) 灰土强度随土料中黏粒含量增高而加大，塑性指数小于 4 的粉土中黏粒含量太少，不能达到提高灰土强度的目的，因而不能用于拌和灰土。灰土所用的消石灰应符合Ⅲ级以上标准，贮存期不超过 3 个月，所含活性 CaO 和 MgO 越高则胶结力越强。通常灰土的最佳含灰率为 $\text{CaO}+\text{MgO}$ 约达总量的 8%。石灰应消解 3~4d 并筛除生石灰块后使用。

5.3.4 渠基内排水设施应尽量采用排水出渠的方式，将渠基渗水排出渠道外边。没有条件的情况下可以用排水入渠的方法。排水入渠一般需要设置逆止阀，而逆止阀非常易于淤堵或者夹入泥沙而失效，可靠性较差，特别是对于多泥沙渠道，其可靠性更差。南水北调工程中许多地段采用集水井加自动强制抽排的方式排渗水，该方法虽然增加运行成本，但是较为可靠。

II 隧洞

5.3.5 1 湿陷性黄土的典型特征是存在大孔隙、遇水湿陷性等，隧洞开挖过程中，未处理的隧洞基底拱脚处会出现明显的应力集中现象，导致压缩变形增大、拱脚下沉。若施工期用水不当或运行期内防排水措施失效，可能使基底下未处理黄土发生较大的湿陷变形，从而产生基底沉降变形、衬砌结构开裂等病害，对隧洞的施工与运行安全造成威胁。

湿陷性黄土隧洞地基处理首先应满足施工安全及建筑物安全运行的应力、应变要求，目前国内大多数湿陷性黄土隧洞地基主要处理洞底（底拱）部分，处理后的洞底（底拱）承载力和变形满足隧洞结构及内水情况下安全运行要求。

由于隧洞内施工空间狭小，建筑工程中常用的碾压、强夯、大型静力挤密桩、大型动力/振动挤密桩等湿陷性黄土地基处理方法，受施工条件、施工安全的限制无法使用。

黄土隧洞地基处理优先采用无振动或少振动的处理方法，以确保施工安全；水工隧洞一般断面相对较小，为满足隧洞狭小空间施工工序要求，地基处理方法拟定时应考虑施工设备的小型化。

2 湿陷性黄土地基的处理方法主要包括换填法、预浸水法、强夯法、挤密法、灌浆法、桩基础等，但对于隧洞工程地基处理，预浸水法、强夯法等由于施工安全和施工条件的限制而无法使用。湿陷性黄土地区隧洞基底加固方案的选择主要考虑处理原则、处理效果、施工空间、施工工序、振动控制要求等因素综合确定，可采用换填法、挤密法、混凝土灌注桩等单一措施或组合措施，必要时需经现场试验研究或专门论证后确定。

5.3.7 挤密法主要消除地基土的湿陷性，一般选用素土挤密桩；当处理深度大于 10m 时，一般采用预钻孔柱锤冲扩挤密桩进行处理；隧洞洞内一般采用无振动挤密桩进行地基处理。

近年来，一些铁路行业的科研院所致力于研究小型化无振动挤密处理黄土湿陷性技术，研发了无振动挤密器、挤密机等，并将成果应用于“湿陷性黄土隧道基底处理”，经宝兰、银西客运专线等地基处理实践，能够达到预期效果（在正常工作状态下，表层黄土层的成孔速率为 12~18m/h，深层黄土层的成孔速率为 6~12m/h）。

挤密法处理湿陷性黄土地基在建筑、市政、铁路、公路等行业领域普遍使用，在技术参数和工程质量控制方面积累了丰富的经验，隧洞工程地基处理方法确定时可参考执行。

5.3.8 1 高压喷射法是借助于高压射流，通过冲击切割和强烈扰动，使浆液在射流作用范围内扩散、充填周围土层，并与土粒混掺搅和，硬化后形成凝结体，从而改变原地层结构和组成，以达到提高地基强度、消除湿陷性或防渗目的。

高压喷射法可用于湿陷性黄土和饱和黄土地层的隧洞地基处理，也可用于既有隧洞等建筑物地基加固，使用时可根据环境条件、经济性等综合比较分析确定。高压喷射灌浆法应结合工程地质、水文地质、黄土物理力学特性、加固要求等综合考虑，优先采用水泥浆材。

2 高压喷射灌浆法处理湿陷性黄土、饱和黄土地基时，灌浆范围、孔深、孔距、灌浆压力等对黄土物理力学特性和处理标准影响较大，宜通过现场试验确定。

III 调蓄水池

5.3.15 调蓄水池作为新出现的一种建筑物型式（或者说是以前的涝坝替代建筑物），是为解决引调水工程枯水期引流量不足、检修期停水或冰冻期引水困难等，在受水区建设的存储水源，为整个系统的配套工程，解决了引调水工程“只有肠子没有胃”的问题。我国现行国标和水利规范没有提及调蓄水池工程，围堤式的调蓄水池工程设计，主要是以《碾压式土石坝设计规范》（SL274）中的均质土坝设计理念和方法作为指导和依据，开展设计和指标控制等，实际上调蓄水池工程与水库大坝工程有着本质的区别，调蓄水池专指无天然径流汇入的注入式蓄水工程，多采用挖填平衡围堤设计、全池盆防渗（土基），一般不需要施工导流、溢流泄水、排沙等配套建筑物，本规程作为

团体标准，首次将“调蓄水池”作为建筑物纳入，并对“调蓄水池”作了明确定义，是本规程的一个创新和亮点。近十年来，为解决我国北方缺水地区降水和河流水量时空分布不均、工程检修期停水或冰冻期引水困难等，一些供水、灌溉等工程在受水区建设了很多分散的调蓄水池，如甘肃省已建调蓄水池 143 座（其中 10 万 m³~100 万 m³ 69 座、100 万 m³ 以上 21 座），规划新建 148 座。

湿陷性黄土地基上的调蓄水池采取地基（池底、池周和围坝坝基）处理措施是满足调蓄水池在施工及蓄水运行期强度、稳定和变形的控制目的。湿陷性黄土地基上的水池参照 GB50025“表 3.0.1 建筑物分类”划分规定，属“乙类”地基受水浸湿可能性较大的重要建筑物。对处理湿陷性土层厚度较小时（一般小于 3m），宜采用全部挖除或其他处理措施消除全部湿陷量；对湿陷性黄土层厚度较大（一般大于 3m 以上），消除全部湿陷量比较困难、施工难度大、造价高等原因时，在有严格防渗漏控制措施，并经适当的计算和复核论证，在满足地基承载力和控制变形的基础上，可消除地基的部分湿陷量，宜采取适当的结构措施（如增设现浇混凝土垫层、水泥土垫层等）或其他辅助措施（如建基层面平面碾压夯实等）以弥补地基处理的不足，增设垫层或平面碾压夯实层作为持力层，强化了持力层的刚度和均匀性，同时压实后的垫层对水有一定的阻渗作用，使处理后的地基具一定的整体性和均匀性，减小不均匀沉陷和变形，满足设计要求。

调蓄水池围坝坝型为土石坝结构，对围坝的坝基应按土石坝坝基要求进行处理。《碾压土石坝设计规范》SL274 之 6.4.6、6.4.7 规定“湿陷性黄土可用于低坝坝基，但应论证其沉降、湿陷和溶滤对土石坝的危害，并做好处理工作”、“湿陷性黄土坝基宜采用挖除、翻压、强夯等方法，消除湿陷性……”。因此，本条强调了坝基应加强处理的原则。

调蓄水池围坝为土石坝结构，Ⅷ度及以上地区有抗震设防要求，应满足土石坝设计和水工建筑物抗震设计规范要求，防止在地震情况下水池导致失稳或产生过大变形。受地质条件、外部周边（城镇、村庄和工况企业）环境和材料来源等限制，湿陷性黄土地基处理费用占水池建设工程投资的比重不断增加，因而在地基处理时，需通过技术经济综合比较确定，并贯彻执行国家的节能环保政策等，做到经济合理、就地取材和节能环保。

引调水工程的调蓄水池属引调水工程中的水工建筑物，常见的半填半挖式调蓄水池围坝为土石坝坝型结构，其地基处理设计除满足《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025 规范外，尚应满足《水工建筑物地基处理设计规范》SL/T792 和《碾压土石坝设计规范》SL274 的有关规定。

关于调蓄水池的建筑物级别问题，我国现行《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL252）和《防洪标准》（GB50201）均未对“调蓄水池”的建筑物级别作明确规定，

《防洪标准》(GB50201)在供水工程相关条文中虽有“调蓄工程”的相关表述,但均专指调蓄水库,水库工程是按库容、坝高等指标确定工程等级和建筑物级别,调蓄水池如按水库工程定级则会出现与实际不匹配性。调蓄水池工程一般不是单项立项建设,设计过程中应按工程功能(或类型)中的相关指标界定整个工程等别,工程等别确定后按主要建筑物确定“调蓄水池”建筑物级别,常见“调蓄水池”多为引调水工程中的供水工程(或供水兼灌溉工程)所包含的建筑物,应根据相关指标确定建筑物级别。

以甘肃引洮供水工程为例,城乡配套供水工程中设计有超过20座调蓄水池,引洮供水工程等别为II等、规模为大(2)型,对于调蓄水池的建筑物级别,采用了《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252)中具体条款界定,即“承担县级及以上城市主要供水任务的永久性水工建筑物级别不宜低于3级、承担建制镇主要供水任务的供水工程永久性水工建筑物级别不宜低于4级”,经分析供水对象的重要性、调蓄规模指标,最终确定对于县城和以上城市供水的调蓄水池(围堤最大填方高度均在30m以下),池容规模均在100万 m^3 或以上,按3级建筑物设计,建制镇(乡)及以下池容均在100万 m^3 以下、10万 m^3 以上,按4级建筑物设计。引洮供水工程位于甘肃中部,是典型的在黄土地区建设的大型引调水工程,其中绝大多数调蓄水池位于湿陷性黄土地区,这些调蓄水池如单列开来按水库工程池容、坝高等指标确定工程等别和建筑物级别,则全部应为小型(池容规模均在1000万 m^3 以下)和4级及以下建筑物。对于湿陷性黄土,其特性决定了严格意义上要做到地基无湿陷性变形,非常困难,作为容积较大的蓄水建筑物,一旦发生渗漏和防渗体系失效,地基变形几率大增,大变形甚至造成溃堤,淹没和冲毁下游农田、设施等,也会造成大量水土流失,基于供水工程(或供水兼灌溉工程)的高保证率和湿陷性黄土地区调蓄水池损毁后的严重后果,建议本规程在确定调蓄水池建筑物级别时统一按工程类别定级,但当单独立项时可按池容、围堤最大高度(围堤高度30m以下,湿陷性黄土不推荐中高围堤)等在参考水库工程的基础上提高一级(即池容1000万 m^3 及以上建筑物级别为2级,1000万 m^3 ~100万 m^3 建筑物级别为3级;100万 m^3 ~10万 m^3 建筑物级别为4级;10万 m^3 以下为5级),池容1000万 m^3 以上目前尚无工程实例,甘肃目前在湿陷性黄土地区围堤设计最大的调蓄水池容积为400万 m^3 (会宁县城调蓄水池)。

5.3.16 当多种地基处理方法均能满足地基处理的设计目的,或一种地基处理难以达到设计目的,需要采取两种或以上方法结合处理时,应比较周围环境的适应性、经济、施工条件等因素,择优确定,并选定其处理的范围。

本规程涵盖了常见并适合于水池地基处理的类型和实践中相对成熟的地基处理方法,应根据适用范围和场地类型选择一种或两种及以上组合进行地基处理,并进行技术经济比较。

IV 其他水工建筑物

5.3.19 表 5.3.19 列出了湿陷性黄土几种地基处理方法，是多年工程实践的总结。比较常用的处理方法为换填法、强夯法、挤密法。含水率低于 12% 时土的强度高，挤密效果差，宜增湿后再施工挤密桩。渡槽、架空梁式倒虹吸等建筑物对变形、结构安全要求高，运行后出现问题修复难度大，因其属于点状地基采用其他方法存在工程量大大经济性问题，宜结合湿陷性厚度采用桩基进行处理。预浸水法适用于自重湿陷量大的自重湿陷性场地，时间较长，工期等条件许可时可采用。注浆法主要用于既有建筑物的加固，使用时宜通过实验确定。

5.3.20 引调水工程由不同类型建筑物组成，从建筑物基面面积大小及施工因素考虑，可划分为两大类，一类是地基处理面积较大属整片状，如水闸、泵站、倒虹吸与跌水类建筑物，其工程量相对较大，便于采用一种设备连续施工；另一类是地基处理面积较小类似于点状地基，如渡槽、架空式倒虹吸类建筑物，大多采用桩基础处理。

1 从建筑物的重要性和后期运行维护考虑，水闸、泵站等建筑物建成后若地基变形较大，维修加固困难，此片状类宜消除地基湿陷性，采用换填、强夯、挤密法施工工艺成熟，效率高，费用低。

2 倒虹吸、陡坎与跌水类建筑物以过水为主，其上部无相关建筑物，可采用消除部分湿陷性的处理措施，即使出现问题，也便于维修加固。

3 渡槽、架空梁式倒虹吸类建筑物一般情况下高度较大，一旦发生问题有可能造成整体破坏，宜采用桩基础进行处理，或者根据湿陷层厚度采用组合处理方法。

4 湿陷性黄土的特征是对水的敏感性，遇水后结构容易发生破坏。从保护结构安全考虑，除建筑物自身做好防渗止水外，对处理后的地基做好防渗水处理也是保证结构安全运行的重要措施之一，特别是消除部分湿陷性地基，做好放水处理是保障结构安全的重要措施。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 引调水工程湿陷性黄土地基处理的目的是消除地基处理范围内的湿陷性及提高地基承载力、降低压缩性、提高水稳性等，对处理地基以下的湿陷性黄土层，起到阻隔水浸入的作用，对地基处理后仍有剩余湿陷性土层的工程场地特别重要，尤其对大厚度湿陷性场地上的工程则更为重要。

6.1.2 湿陷性黄土场地引调水工程地基处理工程质量一般由设计质量和施工质量共同控制，但大量工程实践证明，地基处理质量主要由施工因素控制，涉及地层、土质、设备、工艺、监控、人为等因素众多，如钻孔夯扩挤密桩（DDC）中显现的极其突出，要求施工从 d （预钻孔直径）夯扩到 D （孔填料设计夯扩直径），施工过程要求极为严苛，地基处理方案应突出强调施工的重点、难点和施工质量控制、解决方法有效性论证，以确保地基处理施工质量。

6.1.5 防洪工程应在雨季到来前完成，以防止洪水淹没现场引起地基湿陷等灾害。

6.1.7 场地积水，往往是地基湿陷事故的重要原因之一。引调水工程建筑物周围地面的排水坡度，是保证场地不积水、一旦下雨或场地有水能及时通常有效排除的必要条件，一般讲建筑物外的一定范围内不准有浸水源、地面不准倒坡、不准积水。防护范围的度为湿陷性土层下限深度的（1.0~1.5）倍，坡度要求靠近建筑物可取不小于 2%、远离建筑物可取不小于 0.7%、逐步变化。

6.2 换填法

6.2.1 土、灰土、水泥石垫层一般采用平碾、振动碾或羊足碾，以及蛙式夯、柴油夯。砂石垫层通常采用振动碾、平板振动器。

6.2.2 换填施工按试压试验确定的垫层施工参数分层碾压至设计标高。垫层质量的好坏与施工因素有关，诸如土料或灰土的含水率、灰与土的配合比、灰土拌合的均匀程度、虚铺土（或灰土）的厚度、夯（或压）实次数等是否符合设计规定等。

6.2.3 为了确保换填法施工质量，施工中将土料过筛，在最优或接近最优含水率下，将土（或灰土）分层夯实至关重要。

6.2.5 填挖交界面的开挖应满足《碾压土石坝设计规范》（SL274-2020）7.1.11 条规定。

6.2.7 在地基土层表面铺设土工合成材料时，保证地基土层顶面平整，防止土工合成材料被刺穿、顶破。

6.3 预浸水法

6.3.2 4 采用预浸水法处理湿陷性黄土地基，浸水坑开挖时根据建筑物的基础开挖尺寸，在宽度和长度方向适当加大开挖量，浸水坑的边长不得小于湿陷性黄土层的厚度，基坑深度则根据地基土特性计算或现场试验确定欠挖深度，一般欠挖 0.3~0.5m。

对于纵坡较大，建筑物比较长的渠系交叉建筑物(如倒虹吸管等)，浸水时采用梯田式基槽形式，泡水田从上到下分层供水，各台阶田埂的溢水口处铺塑料薄膜防冲，待浸泡完成后，平埂清坡、原土夯实。

湿陷性黄土厚度较大时，可采用沙沟、沙井等向地基黄土层中补水，当同时用两台钻机钻孔时，孔距应相距 10m 以上。成孔之后，应及时用洗净的碎石或粗砂充填密实，以防孔壁坍塌。在浸水过程中，如发现砂井内碎石下沉，应及时进行填充。浸泡时，当某个砂井或几个相邻砂井渗水迅速、渗水量大且砂井孔径逐渐扩大时，应停止浸泡，改用泥浆灌填砂井，当到泥浆从砂井返浆时即可结束，继续用水浸泡。

5 浸水坑边缘至既有建筑物距离不宜小于 50m，防止由于浸水影响附近建筑物和场地边坡的稳定性。

6 每个注水孔、坑、槽应单独设置阀门及水量、水压计量装置。预浸水法施工过程中应做好每个注水孔、坑、槽的浸水量计量和记录，根据湿陷沉降监测资料随时调整注水量。

6.3.3 采用预浸水法处理地基，土的湿陷性及其他物理力学性质指标有很大变化和改善，本条规定浸水结束后，在基础施工前应进行补充勘察，重新评定场地或地基土的湿陷性，并应采用垫层法或者其他方法对上部湿陷性黄土层进行处理。

新疆维吾尔自治区巩留县伊犁河南岸湿陷性黄土段渠道地基采用预浸水法处理，对于大厚度原生黄土层上的半挖半填渠段及挖方渠段分别进行浸水试验，试验段长度每段为50m。对于挖方试验段，浸水面应维持在渠堤以下30~50cm，对于半挖半填试验段，浸水面维持在地面以上不小于30cm。

对于挖方试验段，浸水70d沉降量观测值介于5~25mm。渠堤采用黄土填筑的半挖半填试验段，浸水70d沉降量观测值仅为6~9mm，采用竖井取样测试，发现渠堤以下原生黄土层并未达到完全饱和。渠堤采用砂砾石填筑的半挖半填试验段，浸水90d时渠堤沉降量为13~16mm，渠底沉降量为37~163mm，最大沉降量发生在渠底下3m处。挖方段和渠堤采用砂砾石填筑的半挖半填试验段，浸水45d后，沉降变形趋于稳定；而渠堤采用黄土填筑的半挖半填试验段，浸水60d后，沉降变形趋于稳定。

由黄土填筑的半挖半填渠道，由于沉降变形量较小，在两侧渠堤上未发现裂缝形成。挖方试验段和砂砾石填筑的半挖半填渠道裂缝都主要发生在渠坡与渠堤的交界部位，另外，砂砾石的渗透性较大，能促使渠坡中发生较大的沉降变形，渠坡中也出现

了裂缝，裂缝的延伸长度一般为10~25m，一般宽度为1.5~2.5cm，最宽可达8.05cm，深度一般为1.5~3.0m，最深为3.0m。裂缝尺寸变化与形成裂缝差异沉降幅度有关。

6.4 强夯法

6.4.1 采用强夯法处理湿陷性黄土地基，在现场选点进行试夯，可以确定在不同夯击能下消除湿陷性黄土层的有效深度，为设计、施工提供有关参数，并可验证强夯方案在技术上的可行性和经济上的合理性。

6.4.2 采用强夯法处理湿陷性黄土地基，土的含水率至关重要。天然含水率低于10%的土，呈坚硬状态，夯击时表层土容易松动，夯击能量消耗在表层土上，深部土层不易夯实，消除湿陷性黄土的有效深度小；天然含水率大于塑限含水率3%以上的土，夯击时呈软塑状态，容易出现“橡皮土”；天然含水率相当于或接近最优含水率的土，夯击时土粒间阻力较小，颗粒易于互相挤密，夯击能量向纵深方向传递，在相应的夯击次数下，总夯沉量和消除湿陷性黄土的有效深度均大。为方便施工，在工地可采用塑限含水率 w_p (1%~3%) 或 $0.6w_L$ (液限含水率) 作为最优含水率。

强夯施工开夯前，宜在施工场地按10m×10m方格网点测定开夯面以下土层处理厚度内土的含水率。对于湿陷性黄土，其含水率应符合6.4.2-1式的规定。否则应采取注水润湿或降低湿度措施。

$$\begin{cases} |\bar{w}_{op} - \bar{w}| \leq 6\% \\ 8\% \leq w \leq 24\% \end{cases} \quad (6.4.2-1)$$

式中， w —土层处理深度内，土的天然含水率(%)，以拟建场地勘察资料为准，土层划分厚度及其 w 值按开夯标高下每0.5~1.5m厚度计取。 w 范围值中的高含水率土层，宜位于处理厚度的底层。

\bar{w} —土层处理深度内，土的天然含水率 w 的加权平均值(%)。

\bar{w}_{op} —土层处理深度内，土的最优含水率 w_{op} 的加权平均值(%)，宜按室内标准击实试验确定。当无试验资料时，可近似按(0.56~0.60) \bar{w}_L 取值。

\bar{w}_L —土层处理深度内，土的液限含水率 w_L 的加权平均值(%)。

当需要加水润湿的土层限于上层，且厚度小于1.0m时，可采用地表水畦浇水润湿。每平方米水畦面积的浇水量按下式6.4.2-2估算：

$$V = (\bar{w}_{op} - \bar{w})h \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (6.4.2-2)$$

式中， V —每平方米水畦面积浇水量(m^3)。

h —需加水润湿的土层厚度(m)， $h < 1.0m$ 。

6.4.3 当地表土软弱或地下水位高的情况，宜采用人工降低地下水位，或在表层铺填一定厚度的松散性材料，目的是在地表形成硬层，可以用以支承起重设备，确保机械设备通行和施工，又可加大地下水和地表的距离，防止夯击时夯坑积水。

为满足强夯施工场地应满足施工设备行走、运转和运输要求，需清除场区耕植土、污泥及其它有机物质；清除施工场地上 1.5 倍吊臂高度范围内空中线路；拆除地下管线、树根、废旧基础等障碍物；埋深大于 2/3 处理厚度的地下坑穴应事先填实处理，埋深较浅的地下坑穴及局部松软地段应在地面作出明显标记，施工时应注意加强夯击或提前局部换填处理。

6.4.4 强夯施工技术发展到现在，仍然没有定型的专业化施工设备，现在大量使用的设备有两种：一是履带式起重机起重臂直接悬挂夯锤；二是履带式起重机加装辅助门架支撑装置的强夯设备。

强夯施工时，由于夯锤脱离脱钩器时会产生较大的冲击力，所以强夯设备宜加装辅助门架支撑装置，同时，加装支承装置设备还具有以下的特点：

(1) 带有支承装置的强夯设备，强夯时夯击的落点好，重叠性好。

(2) 带有支承装置的强夯设备，以门架和起重机组成三点承重结构，稳定性好，安全性、可靠度高。

(3) 带有支承装置的强夯设备，可通过组合滑轮降低起重设备起重量，经济性好，节约能源。

6.4.5 测量控制网应满足施工平面和高程控制测量精度的要求。现场坐标控制点及高程控制点应建立在不受施工影响的稳周区域，并严加保护。

6.4.8 当单击夯击能在 $1000\text{kN}\cdot\text{m}\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时，水平安全距离应大于 30.0m，距地下管线等的安全距离应大于 10.0m，空中安全距离应大于 18.0m；当单击夯击能为 $2000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时，强夯振害安全避让距离应大于 15m；当单击夯击能大于 $2000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时，对仪表车间及灵敏度高的建筑物的安全距离，尚应通过试夯实测的结果进行调整。

强夯法在引调水工程湿陷性黄土地基处理中的典型应用工程实例如下：

(1) 南水北调中线一期总干渠沙河南-黄河南荥阳段，路总长约 23.97 km，设计流量 $265\text{ m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $320\text{ m}^3/\text{s}$ 。本渠段黄土湿陷等级多为轻微~中等湿陷性，局部具强湿陷性，湿陷深度一般 3~8 m，局部可达 10 m。强夯法处理深度为 8m，处理后承载力达到 200 kPa。采用一遍二序夯击方式，单击夯击能 $3000\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，夯击点为正方形布置，I 序夯击点间距为 7 m，II 序夯击点位于 I 序夯击点位之间，点夯后整平夯坑，再以低能量满夯两遍。满夯采用轻锤或低落距锤多次夯击，锤印搭接。强夯处理范围每边超出基础外缘宽度为设计处理深度的 1/2 至 1/3，并不得少于 3 m。

强夯最后两击相对夯沉量 $\leq 5\text{ cm}$ ，在地基强夯结束 30 d 左右，采用静载荷试验测定强夯土的承载力，承载力满足要求。在强夯施工中或施工结束后，隔 7~10 d，在

每 500~1000 m² 面积内夯点间任选一处, 自夯击终止夯面起至其下 6~12 m 深度, 每隔 1 m 取 1 个土样进行室内试验, 测定土的干密度、压缩系数和湿陷系数。

(2) 合阳调蓄池位于合阳县城东北侧的黄土台塬部位, 面积超过 20 万 m², 总库容约 230 万 m³, 自重湿陷深度达 20.8m, 湿陷性等级为IV级(很严重)。其中湿陷性强烈深度下限在 4.4~6.4m; 湿陷性中等深度下限在 8.5~9.3m; 湿陷性轻微深度下限在 15.5~20.8m; 20.8m 以下黄土不具湿陷性。

采用夯锤直径为 2.4 m、锤重 20 t、落距 20m。选用间距 5 m 的三角形布置形式, 最大夯击能为 4 000 kN·m 进行 2 遍点夯, 然后用 2 000kN·m 和 1 000 kN·m 的低能量各满夯 1 遍。强夯结束 7d, 在试验区不同部位挖 3 个探井进行质量检查。黄土湿陷性处理深度可达 6 m, 湿陷性系数均小于 0.015, 强夯后干密度较强夯前干密度平均提高 16.3%, 压缩系数平均值由 0.384MPa⁻¹ 降低到 0.165MPa⁻¹。

(3) 杜窑沟水库位于宁夏盐池县冯记沟乡杜窑沟村, 总库容 332 万 m³, 主坝最大坝高 15 m。主坝坝基湿陷性黄土厚度 4.2~8.2 m, 左坝肩为II级湿陷, 右坝肩为III级(严重)湿陷, 其余坝段为II级(中等)湿陷。

试夯区选定在下游坝基, 范围 20 m×20 m, 夯点正方形布置, 如图 1 所示。夯击 4 遍, 第 1、2 遍主夯, 夯点间距 8 m, 夯击能 8000kN·m, 第 2 遍夯点在第一遍夯点中间; 第 3 遍复夯, 夯点在主夯夯点中间, 间距 8 m, 夯击能 4000kN·m; 第 4 遍满夯, 前后夯印搭接 1/4 锤底面积, 夯击能 2000kN·m。主、复夯夯击次数均为 7~9 击, 主夯最后两击夯沉量≤200mm, 复夯最后两击夯沉量≤100mm; 满夯夯击 2 击。夯锤直径 2.57 m, 锤高 1.23m, 锤重 49.55 t。夯机为履带式起重机, 主架高度 25 m, 龙门架高度 24 m。主坝坝基强夯结束后 30 d, 采用土工试验、静力荷载试验和标准贯入试验的方法对强夯效果进行初检。强夯结束 81d 后, 对强夯前和初检检测点进行原位终检。试验点平面布置示意图如图 2 所示。

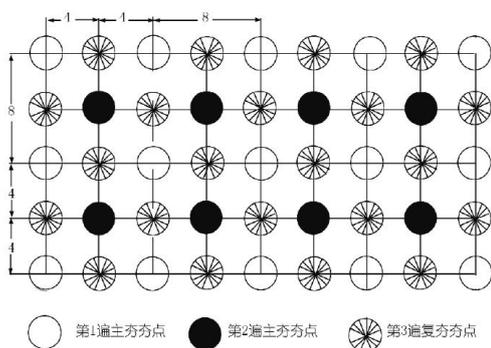


图 1 夯点布置示意图

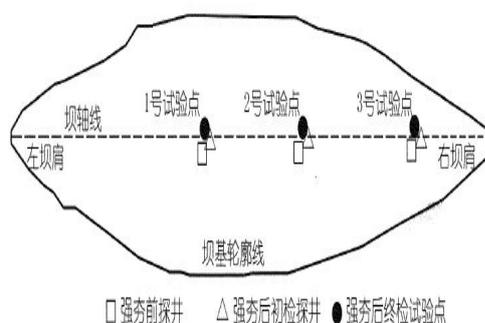


图 2 试验点平面布置示意图

初检和终检湿陷系数全部小于 0.015, 8000kN·m 夯击能可以消除 8 m 湿陷厚度内的III级(严重)湿陷性。强夯后初检干密度平均值较强夯前增大 8.9%, 终检干密度平均值较强夯前增大 14.9%, 经强夯处理的地基, 其强度随时间增长而逐步恢复和提高。

强夯后初检的孔隙比平均值较强夯前减小 19.9%，终检孔隙比平均值较强夯前孔隙比平均值减小 28.0%，与干密度逐步恢复和提高的结果一致。

6.5 挤密法

6.5.1 反应挤密效果的指标主要为桩体压实系数、桩间土平均挤密系数、相邻桩形心处桩间土湿陷性及常规物理力学指标。

挤密桩是分层回填夯实起来的，各层夯实质量和施工过程控制有很大关系，验证检测一般采取全桩段开挖取样方式检测，取样过程比较困难，对挤密地基也会产生破坏，而挤密桩间距一般较小，桩数量较大，因此抽检比例不宜过高。桩身压实系数是施工过程中施工质量控制的主要参数，施工中应该经常抽测，检测时取样难度也不大，抽检比例宜大一些。

桩间土的挤密程度与距桩边的距离密切相关，在平面上各处桩间土的挤密系数是不同的，因此检测桩间土平均挤密系数时，取样的位置至关重要，位置的偏差会得出完全不同的检测结果。对预钻孔夯扩桩，桩间土的挤密完全取决于夯扩程度，即成桩桩径，必要时可检测成桩桩径，作为评价挤密效果的参数之一。

6.5.3 当地基土含水率低于 10%，或土质坚硬成孔挤密困难、影响挤密效果时，可对处理范围内的土层进行预浸水增湿。增湿一般有 2 种方法，当预浸水土层深度在 2.0m 以内时，可采用地表水畦（高 30cm~50cm，每畦范围不超过 50m²）漫水的方法；浸水土层深度超过 2.0m 时，应采用地表水畦与深层浸水孔结合的方法。深层浸水孔可用洛阳铲挖孔或钻机钻孔，注水孔正三角形布置效果最佳，孔径为 100~150mm，孔心距应考虑后期挤密孔的孔心距，二者最好重合，在挤密孔成孔时将注水孔破坏，不形成直接过水通道。孔深宜为预计浸水深度的 2/3~3/4，可根据增湿土层厚度，设置 2~3 种不同孔深，孔距 1.0m~2.0m，待土中水分分布基本均匀（约 7d~14d）后即可正式施工。相比之下，爆破挤密比其他方法挤密，对地基土含水率的要求严格一些。

6.5.5 灰土中消石灰与土的体积配合比宜为 2: 8 或 3: 7，水泥土中水泥和土的体积配合比宜为 1: 5~1: 8。灰土、二灰拌和后堆放时间不应超过 24 小时；水泥土拌和后堆放时间不应超过水泥的终凝时间。

6.5.6 2 沉管初始阶段，控制桩锤处于低锤轻击状态，待桩管入土深度超过 1m，能保证桩管垂直，方向稳定后再加大落距，直至桩管沉到设计深度为止。若因机械故障等原因，桩管在土中搁置时间较长，造成拔管困难，可采用管周浸水、复打、转动桩管或增加辅助起重机械等方法拔管。

局部轻微缩径，不影响夯锤及填料顺利下落时，可不加处理，若出现影响正常施工的缩颈现象时，可采用如下措施：加大跳打间隔；靠近上部的局部缩颈用洛阳铲铲

去；拔管后填入生石灰块、碎砖块、干土等，待土体含水率降低后复打；如大面积出现较严重缩径与回淤，可采用钻孔夯扩法或其它方法处理地基。

3 开始时低锤勤击，等锤头入土 1m 以上，且进入的深度足以定向，可加大冲程但冲程不可过大，以免引起塌孔或卡锤等事故。施工中遇到卡锤时，可交替紧绳、松绳，将锤体慢慢吊起，不得猛提猛拉，必要时可用打捞套、打捞钩借助于其它起重设备提起。施工中，操作人员必须及时准确地控制松绳长度。松绳过短会打空锤而将冲击力全部作用于起吊设备，不仅不能产生进尺，而且可能造成设备的非正常损坏；松绳过长，会因增加了夯后多余的紧绳时间而降低工效。施工中，操作人员还应定时检查提升钢丝绳的磨损和连接情况，不合乎安全要求的应及时更换或紧固，防止断绳掉锤。一旦发生掉锤事故，应采用打捞机具及时组织打捞，否则塌孔缩径效应会导致打捞失败。

若因地下块石、砌体等障碍物导致桩孔明显偏斜，深度小于 2.0m 时，可清除后再行施工；如深度较大或因地层结构不均匀所致，可用石灰块、碎石、干土回填到偏斜起点位置以上，并调整冲锤的落点中心，再重新冲击成孔。

4 当出现钻杆跳动、机架显著晃动或钻不进尺等异常情况，应立即停机，如遇到砌体、孤石等地下障碍物，应清除后再钻或改用其它方法成孔（如冲击法）。

5 此条强调了孔内填料前的要求，特别是预钻孔，孔底可能残留虚土，填料前必须夯实。对孔底虚土可采取如下措施：当虚土厚度在 50cm 以内时，用填料的夯锤进行夯底，一般夯击 8~10 锤（落距 2~3m）至锤声清脆为止；当虚土厚度大于 50cm 时，用细长带橄榄状锤尖的重锤（2t 左右）进行夯底；当虚土厚度很大时可复打。桩孔经检测符合设计要求后，应及时组织夯填，尤其是对可能出现缩径、塌孔的桩孔，应立即组织夯填。

挤密法既能处理黄土湿陷性，又有一定地基加固作用，处理效果好，施工受天气影响较小，且可以通过施工合理组织实现较短的工期，处理大厚度湿陷性地基大多均采取挤密桩的方案，在引调水工程中也大量应用，积累了一定的施工和管理经验。

（1）甘肃省引洮一期工程香泉暗渠，该段渠基多置于黄土状粉质壤土中，渠基土具强湿陷性、中高压缩性、弱透水性，属Ⅲ级~Ⅳ级自重湿陷性场地。香泉暗渠断面为矩形，断面尺寸 5.05m×4.69m，长约 1.5 km。

沿渠道长度范围内的地基全部进行小直径水泥土挤密桩处理，设计桩身直径为 200 mm，桩中心距为 400 mm，梅花形布置，设计桩长为 5.0 m。设计要求处理后的复合地基承载力设计值 ≥ 200 kPa。水泥土配比为 2:8。采用复合地基现场静载荷试验和试坑浸水试验，检验小直径水泥土挤密桩复合地基承载力能否满足设计要求，并进行湿陷性和渗透性检验。

浸水坑尺寸为 5 m×5 m，深 60 cm，试坑底铺垫了 10 cm 厚的砂砾，坑底布设了 7 个注水孔，孔深 2 m，间距 2 m，孔径 100~150 mm，试验共进行 26 d，其中浸水观测 15 d，停水观测 11 d。在浸水坑内对称布置 9 个自重湿陷观测标点，在试坑外沿渠道纵向 30 m 范围内对称布置 10 个自重湿陷观测标点，另在距试坑边缘约 25 m 处设置沉降观测基点。

通过对于现场试验数据分析，可以得到如下结论：

①小桩径水泥土挤密桩的 P~S 关系曲线为无明显拐点的缓降型。处理前地基土的允许承载力为 100~120 kPa，处理后复合地基承载力特征值达到 200~240 kPa。小桩径水泥土挤密桩复合地基对地基承载力提高作用是十分显著的。

②在处理深度范围内埋深 3.0 m 处自重湿陷量较小，为 9.4~10.6 mm，沉降量差异较小，侧向挤出作用微弱。处理深度范围外湿陷量较大，高达 15.3~18.0mm。该地基在处理前基础深度范围内原状土湿陷量平均在 0.81~1.08 m 之间，处理深度以外地基土湿陷量比处理前降低了 98.11%~98.33%。

试坑内地表自重湿陷量为 6.6~8.1 mm；距试坑外边缘 1.0 m 处为 4.2~5.2 mm，距试坑外边缘 5.0 m 处为 1.5~1.9 mm，距试坑外边缘 15.0m 处仅为 0.3~0.4 mm。距试坑外边缘越近，自重湿陷量越大；距试坑外边缘越远，自重湿陷量越小；在湿陷性黄土浸水区地表产生湿陷早、快、大，距离浸水区远的湿陷性黄土自重湿陷量小。

小桩径挤密桩处理后地基土的竖向及横向湿陷速率已很小，且不同处理深度范围内差别不大。

③在浸水期间，浸水坑周围地面浸湿速度很缓慢；停水后，浸湿范围距浸水坑最远距离仅为 1.15~1.33 m。在整个浸水试验期间，浸水坑周围地面未产生地面裂缝。这是因为采用小桩径挤密桩布桩密度较大，桩间距较小，桩间土的密实度高，渗透性减小，渗水速度慢，浸水范围和浸水深度也随之减小，在本次试验条件下，小桩径挤密桩复合地基防水抗渗性十分优越，可以认为小桩径挤密桩复合地基基本不渗水。

④灰土挤密桩处理的地基，在 12~13d 时达到最大值，平均每 m²耗水量约 0.85t，水泥土挤密桩处理的地基，在 15d 时达到最大值，平均每 m²耗水量仅 0.34t，说明灰土挤密桩复合地基的渗水速度大于水泥土挤密桩复合地基的渗水速度，水泥土挤密桩的防水抗渗性要优于灰土挤密桩，其竖向渗透速度比灰土挤密桩降低 25%~45%。

(2) 南水北调中线一期总干渠沙河南-黄河南禹州长葛段工程长 53.7 km，沿线湿陷性黄土累计长度约 52.9km。土质为黄土状中、重粉质壤土，以轻微和中等湿陷为主，一般湿陷深度为 2~7m。沿线黄土状土多为非自重湿陷性黄土。

土挤密桩试验施工技术参数：桩径 400 mm，桩长 6.5m，桩间距 1.3m，成正三角形布置；成孔采用螺旋挤密桩机，沉管全长 10 m；成孔后夯实孔底，夯实次数不小于 8 击；回填采用提升式夯机及梨形锤，锤质量 1.0t；填土厚度 30 cm，高度 2.5m，夯

击次数 8 击。施工时，当地基土含水率低于 12% 时，增湿至最优含水率。在地基处理前 4~6 d，将水通过一定数量和一定深度的渗水孔均匀浸入拟处理的土层中。桩孔中心点偏差不应超过桩距设计值的 5%，且不大于 5 cm。当孔垂直度偏差大于 1.5% 或桩孔偏位超过 5 cm 时，及时纠偏和填平桩孔，确保夯击能均匀传递。成孔后出现塌落土，则孔深减少小于 0.5m，增加底夯次数，当孔深减少大于 0.5m 时，采取二次冲孔复打。孔底出现饱和土或严重回淤，则在孔内填碎石、生石灰或干石灰等重新复打成孔。土挤密桩桩体的填料采用壤土、一般黏性土。土料中有机质含量不得超过 4%，粒径不大于 15 mm。

施工结束后，桩顶向下 6.5m 深度范围内，每隔 1 m 取样进行试验，测定土的干密度、压实系数、湿陷系数及桩体挤密系数。桩体压实系数达到 0.986，桩间土最小挤密系数大于 0.93，桩间土湿陷性系数由挤密前的 0.070，降低为挤密后的 0.011，湿陷性完全消除。

(3) 引洮供水二期配套会宁县城乡供水工程共新建调蓄水池 5 座，容积 112 万 m³；新建水厂 4 座，总供水规模 4.1 万 m³/d，对接管网沿线高位水池 8 座，总容积 0.9 万 m³，输配水管网 19 条，长 152.50 km。其中，祁家湾蓄水池场地布置于黄土梁峁区沟掌地斜坡上，蓄水池场地湿陷性黄土层一般厚 8~18 m，因为马兰黄土层厚度较大，消除全部湿陷量难度较大，需对基础进行处理。自设计池底高程计算，自重湿陷量 $\Delta_{zs}=150\sim386$ mm，属自重湿陷性场地，地基湿陷等级为 II 级（中等）。

表 1 湿陷性黄土地基处理方案比较

方案	处理深度	特点	适用性	结论
预浸水处理法	可消除地面下 6m 以下湿陷性黄土层全部湿陷量	可处理自重湿陷性黄土场地，地基湿陷等级为 III 级或 IV 级，浸水面积较大，用水量大，使湿陷性土层达到湿陷稳定时平均耗水量约 5 t/m ²	本工程区水资源匮乏，满足不了浸水水源需求，浸水时间和施工工期也较长，浸水过程中还可能因渗漏引起场地边坡失稳等坍塌现象	不适用
强夯法	根据单击夯击能不同，有效加固深度 3.0~10 m	通过一定重量的重锤起吊一定高度自由下落，对地基进行强力夯实，使地基土压密和振密，以加固地基土，达到提高强度降低压缩性和消除湿陷性目的	本工程区周边为村庄，强夯法重锤落地时会对周边的建筑物产生强大震动，从以往的实施经验来看，本工程不具备强夯法实施的外围条件	不适用
挤密桩	可处理的湿陷性黄土层厚度 5~15 m	适用地下水位以上， $S_r \leq 65\%$ 的湿陷性黄土。当地基土的含水率略低于最优含水率时，挤密效果最好，	本工程区地基土天然含水率地下水位 2~3 m 以上范围含水率小于 24%，饱和度小于 65%，	适用

		地基土 $w \geq 24\%$ 、饱和度 $S_r > 65\%$ ，不宜用挤密桩法	因此本工程可采用挤密桩法进行地基处理	
换填法	0.5~3.0 m	适用地下水位以上，局部或整片处理，可处理的湿陷性黄土层厚度 1~3 m。该方法不能全部消除基础下地基湿陷量，部分段地基湿陷性仍然强	本工程区消除全部湿陷量难度较大，土体换填压实后渗透系数达到 10^{-6}cm/s ，且池底有防渗处理措施，下部地基土浸水可能性较小。	适用

基于祁家湾调蓄水池垫方段地基处理方案比较表明本工程基础处理方案为：表层挖除换填+灰土挤密桩。挤密桩采用梅花形布置，桩孔按等边三角形布置，桩孔之间的中心距离取桩孔直径的 2 倍，桩径 40 cm，挤密中心距 100 cm。桩孔内的灰土填料，其消石灰与土的体积配合比为 3:7，土料中的有机质含量未超过 5%，渣土垃圾粒径不超过 15 mm，石灰选用新鲜的消石灰，粒径不应大于 5 mm；孔内填料应分层回填夯实，填料的平均压实系数 $\lambda_c \geq 0.97$ ，桩顶标高以上设 500 mm 厚 100%水泥土垫层，压实系数 ≥ 0.96 。经检测，处理后地基承载力大于 200 k Pa，满足本工程地基承载力要求。

采用表层挖除部分湿陷层后分层碾压换填+灰土挤密桩法处理深度较大，成本较为节省，适用性更高，可以更好地适应周围环境及基础结构。

(4) 近年来，我国在黄土区修建了大量的铁路与公路隧道，高速铁路对隧道工程质量要求更高、地基沉降控制标准更严格、施工宜为无振动、施工作业空间有限、工序繁琐等特殊要求，目前常用的黄土区隧道基底处理的方法为旋喷桩法、换填垫层法、冲击挤密法、树根桩法。相应方法对于处理黄土隧道地基的优缺点如下表 2 所示。

表 2 黄土隧道地基处理常用方法优缺点

方法	优点	缺点
换填垫层	工程费用低、施工工艺简单	处理深度浅，增大了隧道开挖断面，削弱拱脚承载力，降低隧道整体稳定性；垫层夯实振动影响隧道施工安全，同时与隧道施工的相互影响也较大。
旋喷桩	技术较成熟，加固质量能够得到保障，长期稳定性好	隧道内作业环境差，与隧道施工有交叉影响，工程造价高，黄土湿陷性难以完全消除，对隧道环境产生二次污染，并使基底产生附加湿陷变形，影响黄土隧道施工安全。
冲击挤密	方法成熟、应用经验丰富、经济适用	施工振动较大、与其他工序交叉较多、对初期支护要求高，影响黄土隧道施工安全。
树根桩	施工机具简单、施工安全性高，作业占用空间小	加固范围有限、整体加固效果难以控制检验

为满足隧道湿陷性黄土基底加固处理的特殊要求，应根据现场实际情况与黄土层的结构及其物理特征，所采用的加固处理技术需考虑无振动或控制振动、消除湿陷性、提高承载力、无浆液污染或附加湿陷变形等因素。中铁西北科学研究院成功研发了“湿陷性黄土隧道基底无振动处理技术”，并配套研制了无振动挤密器、无振动挤密机等。

无振动挤密器主要由动力部、修正部、挤土部、开孔与导向部等四部分构成，形状呈锥形，利用小孔扩张理论与极限平衡理论可对无振动挤密器受力特征进行分析。为了适应不同工况的要求，分别研制了组合式及分离式无振动挤密器。组合式无振动挤密器是针对湿陷性黄土隧道等小空间或狭小场地研发的专用施工设备。该设备将小型移动装置、起重支撑系统、液压系统、操作系统、无振动挤密器等组装为一个整体，其自重 $<3.5\text{t}$ ，长 3.3m 、高 3.1m 、宽 1.6m ，平面作业半径 $\geq 5\text{m}$ 。组合式无振动挤密器仅采用电控按钮即可实现对卷扬机、液压支腿、无振动挤密器的定点操作。正常施工作业时，表层黄土层成孔速率为 $0.2\sim 0.3\text{m}/\text{min}$ ，深层土层成孔速率为 $0.1\sim 0.2\text{m}/\text{min}$ 。分离式无振动挤密器是为了更好的适应隧道洞内及房屋室内等小空间作业条件而研发的，主要将液压及操作装置、移动及起重装置、无振动挤密器 3 大部分完全分离，根据现场实际需要三者之间通过液压软管、钢丝绳等连接，以满足设备的多方面使用要求。正常状态下，表层黄土层成孔速率为 $12\sim 18\text{m}/\text{h}$ ，深层黄土层的成孔速率为 $6\sim 12\text{m}/\text{h}$ 。各部件采用电控按钮操作可实现同时对卷扬系统与无振动挤密器的定点控制。

为验证无振动挤密处理技术及其配套研制的无振动挤密器、无振动挤密器的适用性及有效性，中铁西北院的科研人员在宝兰客专高铁湿陷性黄土隧道基底加固中，进行了应用性试验。试验中无振动挤密孔预成孔径为 0.41m ，桩间距分别为 $S_1=0.8\text{m}$ ， $S_2=0.9\text{m}$ ， $S_3=1.0\text{m}$ ， $S_4=1.2\text{m}$ ，各孔均采用隔孔挤密成孔的方式。结果表明，当桩间距为 0.8 、 0.9m 时，桩间土最小挤密系数、平均挤密系数均超过规范要求（ 0.88 ， 0.93 ），当桩间距为 1.0m 、 1.2m 时，与均未能达到相应规范的具体要求。

不同桩间距下桩间土湿陷性变化情况如下：① $S_1=0.8\text{m}$ ，湿陷和自重湿陷系数均为 $0.000\sim 0.001$ ；② $S_2=0.9\text{m}$ ，湿陷和自重湿陷系数均为 $0.000\sim 0.002$ ；③ $S_3=1.0\text{m}$ ，湿陷系数和自重湿陷系数均为 $0.000\sim 0.001$ ；④ $S_4=1.2\text{m}$ ，湿陷系数为 $0.002\sim 0.005$ ，自重湿陷系数 $0.002\sim 0.009$ 。湿陷系数和自重湿陷系数均小于 0.015 ，即黄土隧道在桩径 0.41m 、间距 $0.8\sim 1.2\text{m}$ 处理参数下进行无振动挤密加固后，完全消除了黄土湿陷性。

(5) 延安市宝塔区及延长县境内麻科义隧道工程，隧道正线全长为 8728.55m ，为单洞双线隧道，最大埋深 234m ，最浅埋深 8m ，隧道穿越黄土地层，黏质老黄土，砂质新黄土。砂质新黄土含水率低，呈松散结构；黏质老黄土呈大块状压密结构。

麻科义隧道穿越黄土地段基底处理措施主要采用水泥石挤密桩处理，根据地基黄土层处理厚度，水泥石挤密桩桩长 $6\sim 12\text{m}$ ，保证桩底伸入老黄土地层不小于 0.5m 。根据试验室击实试验确定水泥用量为 15% ，夯实锤重量 0.6t ，落锤高度不小于 2m 。每个施工点配置JKL2型洛阳铲及夯机1套、铁锹4把、 1m^3 量斗1台、DSA320型水准仪1台、莱卡TS-06型全站仪1台。

处理区段地基土含水率宜接近最优含水率或塑限，当土含水率低于 12% 时，在地基处理前 $4\sim 6\text{d}$ 对该范围内土层完成增湿处理；调平洛阳铲机架，使铲保持垂直，确

保垂直度偏差不大于 1.5%；采用洛阳铲反复冲击成孔，成孔后清底夯实、夯平，夯实次数不小于 8 击。水泥土采用过筛拌和，随伴随用，拌和均匀，色泽一致，无灰团、灰和花面现象。已拌和完成的水泥土不得超过 6 小时或隔夜使用。水泥土分层回填夯实，逐层以量斗定量向桩孔内下料，采用电动卷扬机提升式夯实锤分层夯实。

成桩 7~14d 后采用重型动力触探、钻孔取样进行干密度测定。成桩 28d 后采用钻孔取样进行湿陷性测定和密实度试验进行桩间土质量检测。成桩 28d，采用平板载荷试验进行复合地基承载力检测。现场实践证明，水泥土挤密桩工艺能快速有效加固处理黄土隧道基底，及时使隧道支护封闭成环，减少隧道沉降风险。

6.6 高压喷射法

6.6.1 高压旋喷法在我国公路、铁路黄土地基处理工程中取得了良好的应用效果，对于引调水工程湿陷性黄土地基，因当前试验资料和施工实例较少，应预先进行现场试验。高压喷射注浆主要机具设备选择如表 6.6.1-1 所示。初始施工参数可根据地基土质条件和设计要求按表 6.6.1-2 选取。

表 6.6.1-1 高压喷射注浆主要机具设备选择表

设备名称	型号	规格	所用机具		
			单管法	二重管法	三重管法
高压泥浆泵	SNC-H300 水泥注浆车, Y-2 型液泵, XPB-90C	压力 20 MPa~40MPa 流量 60 L/min~150L/min	+	+	
高压水泵	3XB,3W7B, 3DZ-SZ-75/50	压力 20 MPa~35MPa 流量 50 L/min~120L/min			+
钻机	工程钻机, 震动钻机	钻深深度 30~100m	+	+	+
泥浆泵	BW-150,BW-250/50	压力 5MPa~7MPa 流量 50L/min~150L/min			+
空气压缩机	各种型号	风压 0.7MPa~0.8MPa 风量 8m ³ /min~12m ³ /min		+	+
泥浆搅拌罐	各种型号	3m ³ ~5m ³	+	+	+
单管	普通钻杆	φ42mm	+		
二重管	TY201 型	φ40mm~75mm		+	
三重管	TY301 型	φ75mm~90mm			+
高压胶管	钢丝缠绕型液压胶管	φ19mm~22mm 压力 20MPa~40MPa	+	+	+
匀速卷扬机	各种型号	提升力 1000kg 速度 5 cm/min~0cm/min	+	+	+

表 6.6.1-2 湿陷性黄土地基高压喷射注浆常用施工参数表

项目		单管法	双管法	三管法
水	压力 (MPa)	—	—	20~30
	流量 (L/min)	—	—	80~120
	喷嘴孔径 (mm) 及个数	—	—	φ2~φ3 (2 个)
气	压力 (MPa)	—	0.6~0.8	0.6~0.8
	流量 (L/min)	—	0.8~1.2	0.8~1.2
	喷嘴间隙 (mm) 及个数	—	1~2 (2 个)	1~2 (2 个)

浆	压力 (MPa)	25~40	25~40	1~3
	流量 (L/min)	70~120	70~120	80~150
	喷嘴孔径 (mm) 及个数	$\phi 2 \sim \phi 3$ (2个)	$\phi 2 \sim \phi 3$ (2个)	$\phi 10$ (2个) ~ $\phi 14$ (1个)
	密度 (g/cm ³)	1.4~1.5	1.4~1.5	1.5~1.7
	回浆密度 (g/cm ³)	≥ 1.3	≥ 1.3	≥ 1.3
提升速度 v (cm/min)		10~20		
旋喷	转速 (r/min)	$(0.8 \sim 1.0)v$		
摆喷	摆速 (次/min)	$(0.8 \sim 1.0)v$		
	摆角	$15^\circ \sim 30^\circ$		

6.6.3 高压喷射注浆用水泥浆液应根据工程需要选用，一般可采用 P·O 42.5 水泥，水灰比宜为 1~1.5。当需要减缓水泥浆液沉淀速度及保持良好的可喷性时，可在其内加入 3%水泥重量的膨润土和 3%膨润土重量的碳酸钠。膨润土细度宜为 200 目。对于要求平均抗压强度在 20MPa 以上的旋喷桩体，可选用不低于 P·O52.5 水泥或在 P·O42.5 水泥中掺入高效能扩散剂，其配合比应由试验确定。

丹拉高速公路西宁过境公路西段大有山隧道基底加固处理工程，大有山隧道地处典型的陇西湿陷性黄土区，基底分布 IV 级自重湿陷性黄土，土体呈低含水率，大孔隙比状态，具高压缩性和湿陷性，湿陷性深度可达 10~20m。

本隧道基底加固旋喷桩采用西安探矿机械厂生产的 XL-50 型钻机施工，水泥浆水灰比宜为 0.5:1~1:1，为减缓水泥浆液沉淀速度、防止离析及保持良好的可喷性，在浆液中加入水泥用量 3%的膨润土。施工工艺参数：①浆液压力:20MPa~40MPa；②浆液比重：1.51~1.75；③旋喷速度：20m/min~30m/min；④提升速度：0.2m/min~0.25m/min；⑤喷嘴直径：2.8mm；⑥浆液流量：100L/min；⑦复喷次数：1 次。

旋喷成桩操作原则：先喷浆后旋转和提升。旋喷成桩步骤：①试喷完毕，旋喷管在桩底部原地边旋转边喷射水泥浆液 1min；②边旋转喷管、边提升、边喷射浆液成桩。转速按 20r/min 控制，提升速度按 20~25cm/min 控制，注浆泵泵压按 20MPa、流量按 80~120L/min 控制。③当旋喷管提升接近桩顶时，应从桩顶以下 1m 开始，应减缓提升速度，慢速提升旋喷至桩顶，并停止提升原地旋 30s，再向上慢速提升旋 0.5m，确保桩顶质量。④喷射结束、拔管、器械清洗：旋喷注浆达到设计桩顶后，注浆泵继续送浆液，同时拔出旋喷管，待水泥浆液从孔口返出后，即可停止送浆，并将注浆泵的吸浆管移至清水箱中，抽吸定量清水将泥浆泵和注浆管路中的水泥浆液顶出，然后停泵。⑤机具移位、桩顶补灌：机具移位采用导轨法进行。旋喷注浆结束后，由于水泥浆液的析水作用，一般均有不同程度的收缩，使旋喷桩固结体顶部出现凹穴，应及时用水灰比为 0.6 的水泥浆补灌。

旋喷桩质量检验应在喷射注浆结束 4 周后进行。钻孔取芯芯样无侧限抗压强度 $\geq 3.5\text{MPa}$ ，复合地基承载力 $\geq 150\text{kPa}$ 。满足设计要求，旋喷法处理大厚度湿陷性黄土地

基，技术较成熟，施工经验丰富，加固质量能够得到保障，长期稳定性好，可为引调水工程湿陷性黄土地基处理提供一定的借鉴和参考。

6.7 桩基础

6.7.1 桩基础是起荷载传递作用，而不是消除黄土的湿陷性，故桩底端应支承在压缩性较低的非湿陷性土层（在非自重湿陷性黄土地区，桩底端应支承在压缩性较低的非湿陷性土层中（岩层）；对自重湿陷性黄土场地，桩底端应支承在可靠的持力层中）。

湿陷性黄土地区桩基础一般采用打入桩、静压桩、钻孔或人工挖孔灌注桩以及沉管灌注桩等，近年来使用较多的为钻孔灌注桩、静压桩以及沉管灌注桩。与其他地区所用桩基础不同的是，在湿陷性黄土土层中不但不能考虑桩的摩擦力，还应在桩的承载能力上减去桩的负摩擦力，正负摩擦力的大小宜通过现场试验确定。在桩基础施工时，特别是灌注桩成孔后，必须将孔底清理干净，以免影响桩的端承力，造成事故。经过 30 多年的工程实践证明，如桩穿透湿陷性土层，支承于可靠的持力层上，则地基受水浸湿后完全能保证建筑物的安全。

桩基技术在各类湿陷性黄土地基处理中的应用已十分成熟，能满足不同工程领域加固需求。但桩基施工设备较大，对于施工空间要求较高，常规桩基不适用于隧道、涵洞等有限空间湿陷性地基处理工程。树根桩既为适应有限空间地基加固需求而产生的一种桩型。树根桩是一种直径在 100~300mm、长径比大于 30 的小型钻孔灌注桩。它是利用钻机钻孔到设计深度，然后放入钢筋笼、碎石和注浆管，再用压力灌注水泥浆或水泥砂浆的办法制成的钢筋混凝土桩。布桩方式可采用垂直、倾斜设置，也可采用网状如树根状布置，故称为树根桩。树根桩技术最初主要应用于古建筑修复中的托换工程，发展至今，在湿陷性黄土隧道、涵洞工程软土地基的加固等方面已有相当广泛的应用，其设计计算理论和施工工艺也已日臻成熟。

与其它的地基加固处理措施相比，树根桩具有如下特点：

（1）施工机具简单，施工时要求的操作空间较小，一般有 0.6m×1.8m 的平面尺寸，2.1m~ 2.7m 的空间即可施工，因而适合于作业区域狭小或地下障碍物较多的地段施工，且施工基本不影响既有建筑的正常使用。

（2）施工安全性高，施工时噪音和振动小，不会给原有结构物的稳定带来任何新增危险，即使在不稳定的地基中也可以进行施工。

（3）因桩孔较小，故对墙身和地基土都不产生任何次应力，也不扰动地基土的正常工作情况。

（4）桩、承台和墙身联结成一体，使结构的整体性得到大幅度的改善。

（5）压力注浆使桩的外表面比较粗糙，桩与土之间的摩阻力较大，故树根桩具有较大的承载力。

(6) 压力注浆使水泥浆或水泥砂浆对桩周围土壤有一定的渗透、挤密作用，改变了桩周围土壤的物理力学性能，使桩周地基土的承载力得到提高。

基于以上特点，树根桩在隧道、涵洞等有限空间湿陷性黄土地基处理中应用越来越广泛。

7 质量检测

7.1 一般规定

7.1.3 质量检验的抽检点宜随机分布，是指对地基处理工程整体处理效果评价的要求。设计人员认为重要部位、局部岩土特性复杂可能影响施工质量的部分、施工出现异常情况的部位的检验，是对处理工程是否满足设计要求的补充检验。两者应结合，缺一不可。

7.1.4 检验数量应根据场地复杂程度、建筑物重要性以及地基处理施工技术可靠性确定，并满足处理地基的评价要求。在满足本规程各种处理地基的检验数量，检验结果不满足设计要求时，应分析原因，提出处理措施。对重要的部位，应增加检验数量。

7.1.5 工程验收承载力检验静载荷试验最大加载量不应小于设计承载力特征值的 2 倍，是处理工程承载力设计的最小安全度要求。

7.2 质量检测

7.2.3 强夯施工中所采用的各项参数和施工步骤是否符合设计要求，在施工结束后往往很难进行检查，所以要求在施工过程中对各项参数和施工情况进行详细记录，经常检查各项测试数据和施工记录，不符合设计要求时应进行补夯或采取其他有效措施。

经强夯处理的地基，其强度是随着时间的增长而逐步恢复和提高的，称为“时间效应”，因此强夯施工结束后应隔一定时间再对地基质量进行检验，间隔时间越长，强度时效性越明显。

7.2.4 桩孔夯填质量检验，是挤密法施工质量检验的一个重要项目。桩孔夯填成桩后，已为隐蔽工程，检测难度较大，事后补救也比较困难。故在施工过程中严格监测夯填质量十分必要。同时规程对检验的数量及方法提出要求，施工自检宜采用小环刀深层取样法和轻型动力触探法，质检单位则宜采用开挖探井取样法。如用动测法等间接测试方法时，应有切实可靠的对比试验资料后，方可采用。

工程经验表明，只要桩间土的平均挤密系数达到一定要求，挤密地基即可消除其湿陷性。故本规程以平均挤密系数是否达到设计要求为控制标准。考虑到湿陷性黄土为自然历史产物，同一土层的天然土性也不尽完全均匀。因此，对在施工前进行挤密效果试验时，分区多点取样是必要的。

7.2.5 2 开挖检查法简单易行，通常在浅层进行，但难以对整个固结体的质量作全面检查。钻孔取芯是检验单孔固结体质量的常用方法，选用时需以不破坏固结体和有代表性为前提，可以在 28d 后取芯。标准贯入和静力触探在有经验的情况下也可以应用。

3 每个引调水工程地基高压喷射处理后，不论其大小，均应进行检验。检验量为施工孔数的 2%，并且不应少于 6 点。检验点的位置应重点布置在有代表性的加固区，对高压喷射时出现过异常现象和地质复杂的地段亦应进行检验。

4 高压喷射处理湿陷性黄土地基的强度离散性大，强度增长速度较慢。检验时间应在喷射注浆后 28d 进行，以防由于固结体强度不高时，因检验而受到破坏，影响检验的可靠性。

7.2.6 对注浆加固效果的检验，加固地层的均匀性检测十分重要，要针对不同湿陷性性土层采用相适应的检测方法，并注重注浆前后对比。

1 对水泥为主剂的注浆加固的检测时间有明确的规定，土体强度有一个增长的过程，故验收工作应在施工完毕 28d 以后进行。

2、4 注浆加固工程质量的判定除以沉降观测为主要依据外，还应对加固土体的强度、有效加固半径和加固深度进行测定。有效加固半径和加固深度目前只能实地开挖测定。强度则可通过钻孔或开挖取样测定。

7.2.7 桩基础的相应质量检验方法与抽检比例应按《桩基础检测技术规范》（JGJ106）要求进行。对于基桩承载力，应考虑浸水对于桩基承载力的不利影响，宜通过浸水载荷试验判定。

8 监测

8.1 一般规定

8.1.1 地基处理是隐蔽工程，施工时必须重视施工质量监督方法，只有通过施工全过程的监督管理，才能保证湿陷性黄土地基处理质量，及时发现问题采取措施。

8.1.4 监测资料维护管理工作应根据设计要求，由业主单位的管理部门制定制度和详细的实施计划，并负责监督检查。使用单位应建立建设工程档案，设计图纸、竣工图、设计变更通知、隐蔽工程施工验收记录和勘察报告及维护管理记录应及时归档，妥善保管。管理人员更换时，应认真办理上述档案的交接手续。

8.2 监测

8.2.2 引调水工程湿陷性黄土地基主要监测项目为地基沉降及地基土孔隙水压力变化。引调水工程地基处理施工时，应结合施工现场实际情况，对湿陷性黄土地基监测项目进一步调整，以保证地基处理施工过程及周边环境的安全与稳定。

8.2.3 监测项目布置数量应符合本条规定。对于狭长地段，距离较大时监测断面间距取大值。

8.2.6 当采用强夯法、夯扩挤密法、高压喷射注浆法、锤击沉桩法对湿陷性黄土地基处理时，需要对周边临近建筑物、岸坡等进行监测，防止地基土因施工扰动而强度下降造成建筑物失稳或振动诱使极限状态的建筑物失稳。

8.2.9 有条件的工程应实施自动化安全监测，能够最大程度保持监测数据连续性，实时掌握地基湿陷变形情况，对处理质量进行分析评价，为运行期安全评价提供依据。

附录 D 轻量土换填减重消减黄土地基湿陷的方法

D.2 轻量土换填材料

1 以陕西省咸阳市自重湿陷性黄土为原料土,以原料黄土、棉秆纤维、水泥、砂、EPS 颗粒和水为材料,采用正交试验设计,通过密度试验、渗透试验和无侧限抗压强度试验,综合确定最优配合比为:棉秆纤维 7g/kg,水泥 30g/kg, EPS 颗粒 10g/kg,砂 120g/kg,其余为原料黄土,以上均为各掺入材料所占原料土的重量百分比。最优配合比下无侧限抗压强度为 160.13kPa,渗透系数为 $7.5 \times 10^{-7} \text{cm/s}$,密度为 1.03g/cm^3 。

2 轻量土密度主要受 EPS 颗粒含量影响,密度越小,减重效果越好,黄土湿陷性处理越到位。适当的养护条件下,轻量土的密度不受龄期的影响,受材料含量影响的主次顺序表现为>砂>棉秆纤维>水泥。

3 地基处理的承载力主要受水泥含量影响,轻量土的抗压强度随着龄期的延长呈增大的趋势,受材料含量影响的主次顺序表现为水泥>EPS 颗粒>砂>棉秆纤维。

4 轻量土渗透性主要受水泥含量影响,渗透性越小,对下层湿陷性黄土越有利。渗透系数随着龄期的延长呈减小的趋势,受材料含量影响的主次顺序表现为水泥>砂>EPS 颗粒>棉秆纤维。

5 棉秆纤维轻量土可应用于湿陷性黄土地区海绵城市透水道路的路基处理中,以解决海绵城市路面透水性和黄土路基湿陷性之间的矛盾,与现有的湿陷性黄土地基处理方法采用阻断水分下渗而使雨水资源得不到存储和利用相比,既能满足场地承载力和路面透水性要求,同时具有一定持水和保水能力,起到涵养水资源的效果,适用于道路等线状工程。

D.3 轻量土换填设计

以陕西省西安市石家街自重湿陷性黄土为例进行换填计算说明。

(1) 属 II 级自重湿陷性场地。取样深度为 9m,每米取 3 个 $30 \times 30 \times 30 \text{cm}$ 原状土样。场地表层为 1.0m 厚的杂填土,取土及换填时需要挖除,黄土层起讫深度为 2~9.0m,自重湿陷土层主要分布在 2~7.0m。取各土层土样开展室内试验确定各层含水率、密度、

干密度、天然孔隙比、饱和度等物理特性指标，以及不同压力下的湿陷系数、自重湿陷系数、湿陷起始压力等结果见表 F.3-1。

表 D.3-1 黄土室内湿陷试验结果

土样编号	土层深度 h (m)	土粒比重	含水率	密度	湿陷系数	自重湿陷系数	湿陷起始压力	天然孔隙比	饱和度	饱和密度
		G_s	w (%)	ρ (g/cm^3)	δ_s	δ_{zs}	P_{sh} (kPa)	e	S_r (%)	ρ_{sat} (g/cm^3)
1-01	1.0~2.0	/	/	/	/	/	/	/	/	/
1-02	2.0~3.0	2.71	20.80	1.62	0.027	0.002	157.00	1.021	55.20	1.77
1-03	3.0~4.0	2.71	10.90	1.43	0.071	0.016	67.00	1.102	26.80	1.74
1-04	4.0~5.0	2.71	11.80	1.44	0.065	0.017	81.00	1.104	29.00	1.74
1-05	5.0~6.0	2.71	11.80	1.46	0.074	0.027	75.00	1.075	29.70	1.75
1-06	6.0~7.0	2.71	15.40	1.53	0.037	0.019	106.00	1.044	40.00	1.77
1-07	7.0~8.0	2.71	17.90	1.65	0.023	0.013	156.00	0.936	51.80	1.81
1-08	8.0~9.0	2.71	21.50	1.67	0.012	0.009	>200.00	0.972	60.00	1.79

(2) 根据湿陷试验结果计算各土层自重压力、湿陷量、自重湿陷量，其中，因地区土质而异的修正系数 β_0 值取 0.9；整理压力与湿陷系数关系曲线，见图 D.3-1。用密度为 $1.11\text{g}/\text{cm}^3$ 的轻壤土对自重湿陷性黄土场地自其顶部土层开始逐层进行换填；换填后，各土层的累计自重压力减小，重新计算换填层的自重压力 and 不同深度的累计自重压力；根据累计自重压力查图 D.3-1 不同深度压力与湿陷系数关系曲线，得出土层的自重湿陷系数；计算得到换填后的各层自重湿陷量、湿陷量，自重湿陷总量，湿陷总量。换填 1.0m 厚度的计算结果见表 D.3-2。

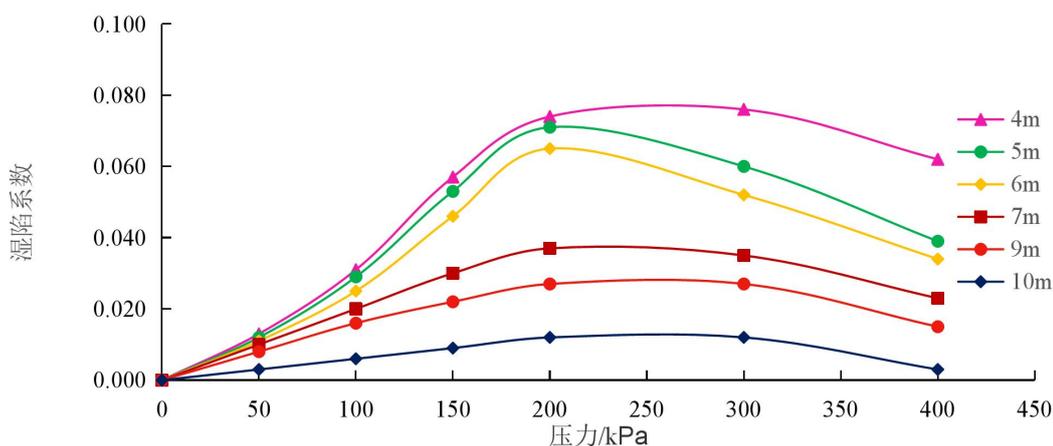


图 D.3-1 场地压力与湿陷系数关系曲线

表 D.3-2 轻壤土换填厚度为 1m 时地基的自重湿陷量计算结果

土层深度 (m)	自重湿陷系数	湿陷起始压力	场地自重湿陷量	场地自地面起的自重湿陷量	换填密度	换填后自重压力	换填后自重湿陷系数	场地换填后自重湿陷量	换填后场地自地面算起的自重湿陷量

	δ_{zs}	P_{sh} (kPa)	各层 Δ_{zs} (mm)	Δ_{zs} (mm)	P (g/cm ³)	该层 P_{zs} (kPa)	累计 P_{zs} (kPa)	δ_{zs}	各层 Δ_{zs} (mm)	Δ_{zs} (mm)
1.0~2.0	0.002	157.00	0.0	89.1	1.11	33.40	33.40	0.000	0.0	32.4
2.0~3.0	0.016	67.00	14.4		/	16.40	49.80	0.007	0.0	
3.0~4.0	0.017	81.00	15.3		/	17.40	67.20	0.009	0.0	
4.0~5.0	0.027	75.00	24.3		/	18.30	85.40	0.021	18.9	
5.0~6.0	0.019	106.00	17.1		/	18.50	103.90	0.015	13.5	
6.0~7.0	0.013	156.00	0.0		/	21.30	125.20	0.009	0.0	
7.0~8.0	0.009	>200.00	0.0		/	16.00	141.20	0.007	0.0	
8.0~9.0	0.020	160.00	18.0		/	18.00	159.30	0.010	0.0	

(3) 根据表 D.3-2 可知, 用密度为 1.11g/cm³ 的棉秆纤维轻量土对自重湿陷性黄土场地杂填土以下黄土层进行换填, 换填厚度为 1.0m 时, 场地的自重湿陷量由 89.1mm 减小至 32.4mm, 场地的自重湿陷性完全消除。

(4) 该方法对于低等级自重湿陷场地, 且自重湿陷土层分布在浅层时较为适用。而对于湿陷等级较高的场地, 需要联合其他湿陷性处理方法才能完全消除地基的湿陷性。