

ICS 编号
CCS 编号

团 体 标 准

T/CHES XXX—20XX

水利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 engineering**

（征求意见稿）

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

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，按照工程建设标准编写规定（建标〔2008〕182号）的要求，编制本标准。

本标准共分为8章和7个附录，主要技术内容包括水利工程湿陷性黄土地基勘察与湿陷性评价、设计、施工、质量检查与验收、监测与维护等。

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

本文件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。

本文件主编单位：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

本文件参编单位：陕西省水利水电勘测设计研究院 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 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 中国水利水电第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

本文件主要起草人：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 邵 帅 陶 虎 罗亮明

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	3
2.1 术语	3
2.2 主要符号	3
3 基本规定	6
4 勘察与湿陷性评价	7
4.1 一般规定	7
4.2 现场勘察	7
(I) 渠道工程	8
(II) 隧洞工程	10
(III) 涵洞及管道工程	12
(IV) 水池工程	14
(V) 其它水工建筑物	15
4.3 黄土湿陷性试验	17
4.4 渠道、涵洞和管道工程湿陷性评价	19
4.5 隧洞工程湿陷性评价	20
4.6 其他水工建筑物湿陷性评价	21
5 设计	22
5.1 一般规定	22
5.2 处理原则与标准	22
5.3 工程处理设计	23
(I) 渠道工程	23
(□) 隧洞工程	25
(□) 涵洞(管道)工程	27
(□) 其他水工建筑物	27
(□) 水池工程	28
6 施工	30
6.1 一般规定	30

6.2 换填法	30
6.3 预浸水法	31
6.4 强夯法	31
6.5 挤密法	32
6.6 水泥搅拌法	33
6.7 高压喷射法	34
6.8 灌浆法	35
6.9 桩基础	36
7 质量检查与验收	38
7.1 一般规定	38
7.2 质量检查与验收	38
8 监测与维护	42
8.1 一般规定	42
8.2 监测	42
8.3 运行维护	43
附录 A: 不同类型水利工程分级表	45
附录 B: 室内黄土增湿变形试验	46
附录 C: 黄土隧洞试坑浸水试验	52
附录 D: 黄土湿陷变形的离心机试验	54
附录 E: 自重湿陷性黄土砂井浸水试验	59
附录 F: 非自重湿陷性黄土砂井加载浸水试验	64
附录 G: 黄土结构压缩屈服湿陷变形评价方法	70
附录 H: 基于“最大可能增湿变形量”的黄土场地湿陷性评价方法	73
附录 I: 轻量土换填减重消减黄土地基湿陷的方法	76
标准用词说明	79
条文说明	80

Contents

<u>1 General Provisions</u>	1
<u>2 Terms and Symbols</u>	3
<u>2.1 Terms</u>	3
<u>2.2 Symbols</u>	3
<u>3 Basic Requirements</u>	6
<u>4 Geotechnical Investigation and Collapsibility Evaluation</u>	7
<u>4.1 General Requirements</u>	7
<u>4.2 Field Investigation</u>	7
<u>(I) Canal Project</u>	8
<u>(II) Tunnel Project</u>	10
<u>(III) Culvert and Pipeline Project</u>	12
<u>(IV) Pool project</u>	14
<u>(V) Other Hydrolic Structures</u>	15
<u>4.3 Loess collapsibility Experiments</u>	17
<u>4.4 Collapsibility Evaluation for Canal, Culvert and Pipeline Projects</u>	19
<u>4.5 Collapsibility Evaluation for Tunnel Project</u>	20
<u>4.6 Collapsibility Evaluation for Other Hydrolic Structures</u>	21
<u>5 Design</u>	22
<u>5.1 General Requirements</u>	22
<u>5.2 Principle and Standard</u>	22
<u>5.3 Design of Engineering Treatment</u>	23
<u>(I) Canal Project</u>	23
<u>(□) Tunnel Project</u>	25
<u>(□) Culvert and Pipeline Project</u>	27
<u>(□) Pool project</u>	27
<u>(□) Other Hydrolic Structures</u>	28
<u>6 Construction</u>	30
<u>6.1 General Requirements</u>	30

6.2 Replacement Method	30
6.3 Prewatering Method	31
6.4 Dynamic Compaction Method	31
6.5 Compacted Column Method	32
6.6 Cement Mixing Method	33
6.7 High Pressure Injection Method	34
6.8 Grouting Method	35
6.9 Pile foundation	36
7 Quality Inspection and Acceptance	38
7.1 General Requirements	38
7.2 Quality Inspection and Acceptance	38
8 Monitoring and Maintenance	42
8.1 General Requirements	42
8.2 Monitoring	42
8.3 Operation Maintenance	43
Appendix A: Classification of Different Types of Hydraulic Engineering	45
Appendix B: Laboratory Test of Loess Moistening Deformation	46
Appendix C: Field Immersion Test of Loess Tunnel	52
Appendix D: Centrifuge Test of Loess Collapsible Deformation	54
Appendix E: Sand Well Immersion Test of Self-weight Collapseable Loess	59
Appendix F: Sand Well Loading Immersion Test of Non-self-weight Collapseable Loess	64
Appendix G: Evaluation Method of Compressive Yield Collapsible Deformation of Loess Structure	70
Appendix H: Collapsibility Evaluation Method of Loess Site Based on "Maximum Possible Moistening Deformation"	73
Appendix I: A Method for Reducing Loess Foundation Collapsibility with Lightweight Soil Replacement	76
Explanation of Wording in This Code	79
List of Quoted Standards	错误!未定义书签。

Explanation of Provisions	80
---------------------------------	----

1 总则

1.0.1 为规范水利工程湿陷性黄土地基处理的勘察、试验、设计、施工、质量检查与评定方法，满足工程安全 and 经济合理的要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于水利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 水利工程湿陷性黄土地基处理的实施应制定和采取环境保护、职业健康和安全生产措施。

1.0.4 本规程引用的标准主要有：

- 1 《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025
- 2 《灌溉与排水工程设计标准》GB 50288
- 3 《水利水电工程地质勘察规范》GB50487
- 4 《土工合成材料应用技术规范》GB/T 50290
- 5 《渠道防渗衬砌工程技术标准》GB/T50600
- 6 《土工试验规程—黄土湿陷试验》SL237
- 7 《水利水电工程等级划分及洪水标准》SL252
- 8 《水闸设计规范》SL 265
- 9 《碾压式土石坝设计规范》SL274
- 10 《水工隧洞设计规范》SL 279
- 11 《土工实验仪器 环刀》SL370
- 12 《灌溉与排水渠系建筑物设计规范》SL 482
- 13 《引调水线路工程地质勘察规范》SL629
- 14 《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》SL654
- 15 《水工建筑物地基处理设计规范》SL/T 792
- 16 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 17 《水运工程地基设计规范》JTS147
- 18 《强夯地基处理技术规程》CECS 279
- 19 《氢氧化钠溶液（碱液）加固湿陷性黄土地基技术规程》CECS 68
- 20 《铁路黄土隧道技术规范》Q/CR 9511
- 21 《大厚度湿陷性黄土场地工程处理技术规程》DB 62/T25-3060
- 22 《湿陷性黄土地区建筑灌注桩技术规程》DB 62/T25-3084
- 23 《湿陷性黄土场地挤密地基技术规程》DB 62/T25-3118
- 24 《湿陷性黄土场地勘察及地基处理技术规范》DBJ 04-T312

1.0.5 水利工程湿陷性黄土地基处理应符合本规程外，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 湿陷性黄土 collapsible loess

在一定压力下受水浸湿，土的结构迅速破坏，并产生显著附加下沉的黄土。

2.1.2 湿陷性黄土场地 collapsible loess site

天然地面或挖、填方场地的设计地面以下以湿陷性黄土为主要地层的场地，分为自重湿陷性黄土场地和非自重湿陷性黄土场地。

2.1.3 湿陷性黄土地基 collapsible loess foundation

含有湿陷性黄土的建筑物地基。基底下湿陷性黄土层下限深度小于 20m 为一般湿陷性黄土地基，大于等于 20m 为大厚度湿陷性黄土地基。

2.1.4 实际上覆压力下的饱和湿陷量 saturated collapse under actual overburden pressure

在实际上覆压力作用下，地基浸水饱和后最大湿陷变形量。

2.1.5 剩余湿陷量 remnant collapse

拟处理土层底面下未处理湿陷性黄土的湿陷量。

2.1.6 结构压缩屈服湿陷变形 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。

2.1.7 砂井湿陷试验 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。

2.1.8 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。

2.1.9 综合物理指标 comprehensive physical index

综合土的密度、含水率、颗粒比重及塑限指标的一个反映土体基本物理性质的指标。

2.1.10 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。

2.2 符号

2.2.1 抗力和材料性能

α —压缩系数；

E_s —压缩模量；

e —孔隙比；
 f_a —修正后的地基承载力特征值；
 f_{ak} —地基承载力特征值；
 I_p —塑性指数；
 P ——试样的实际上覆压力值；
 P_{sh} —湿陷起始压力值；
 q_{pa} —桩端土的承载力特征值；
 q_{sa} —桩周土的摩擦力特征值；
 R_a —单桩竖向承载力特征值；
 S_r —饱和度；
 w —含水率；
 w_L —液限；
 w_p —塑限；
 w_{op} —最优含水率；
 γ —土的重力密度，简称重度；
 γ_m —基础底面以上土的加权平均重度，地下水位以下取有效重度；
 θ_0 —地基的压力扩散角；
 δ_s —湿陷系数；
 δ_{zs} —自重湿陷系数。

2.2.2 作用和作用效应

p_k —相对于荷载效应标准组合基础底面的平均压力值；
 p_0 —基础底面的平均附加压力值；
 S_s —浸水下沉量；
 Δ_{zs} —自重湿陷量计算值；
 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 几何参数

A —基础底面积；
 b —基础底面的宽度、承压板宽度；
 d —基础埋置深度、桩身（或桩孔）直径、承压板直径；
 l —基础底面的长度，桩身长度。

2.2.4 计算系数

a —溶液灌注系数；
 β —考虑基底下地基土的受力状态及地区等因素的修正系数；

β_0 —因地区土质而异的修正系数；

η_b —基础宽度的承载力修正系数；

η_s —基础埋深的承载力修正系数；

ψ_s —沉降计算经验系数；

i —排水坡度；

i_{min} —地面最小排水坡度。

3 基本规定

3.0.1 湿陷性黄土地基的处理应根据工程等别、建筑物级别及场地类别进行勘察和设计。

3.0.2 湿陷性黄土地基处理勘察和设计应根据工程等级、地质条件、使用目的等因素确定。

3.0.3 水利工程湿陷性黄土地基处理措施，应根据建筑物类别和岩土工程勘察对场地和地基的湿陷性评价结果综合确定，可分为下列三种：

1 地基基础措施

- (1) 消除地基的全部或部分湿陷量；
- (2) 将基础设置在非湿陷性土层上；
- (3) 采用桩基础穿透全部湿陷性黄土层。

2 防水措施

(1) 自身防水措施：水利工程应采用防渗性能良好的现浇钢筋混凝土、塑料管、钢管、钢塑复合管材料，应保持工程结构完整性，连接段严密防水，并应具有柔性。

(2) 防渗措施：对于水利工程地基应采取增设可靠防水层、采用钢筋混凝土排水沟，增设检漏管沟和检漏井等严格防渗措施。

(3) 排水措施：包括截水沟、排水沟、跌水与急流槽、暗沟、渗沟等，应结合地形、天然水系进行布设，并做好进出口的位置选择和处理。

(4) 侧向防水措施：在水利工程地基周围采取防止水从建筑物外侧渗入地基中的措施，如设置防水帷幕、增大地基处理外放尺寸等。

3 结构措施

减小或调整水工建筑物的不均匀沉降，使结构适应地基的变形。

3.0.4 水利工程湿陷性黄土地基处理采用新方法、新工艺时，应进行论证和现场试验，验证其可行性。

3.0.5 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，保证既有建筑物的安全。

3.0.6 根据水工建筑物类别、级别、黄土湿陷几率和运行管理要求，应进行安全监测。

3.0.7 对水利工程湿陷性黄土地基处理，应进行质量检验。

3.0.8 地基处理的环境影响应符合国家评价标准规定。

4 勘察与湿陷性评价

4.1 一般规定

4.1.1 水利工程湿陷性黄土场地的岩土工程勘察除满足《水利水电工程地质勘察规范》（GB50487）外，应查明或试验确定下列岩土参数，并应对场地、地基作出岩土工程评价，对地基处理措施提出建议。

- 1 场地湿陷性黄土层的厚度、下限深度；
- 2 实际压力下的湿陷系数、自重湿陷系数、湿陷系数、湿陷起始压力随深度变化、压力-湿陷系数（ $p-\delta_s$ ）曲线；
- 3 不同湿陷类型场地、不同湿陷等级地基的平面分布。

4.1.2 勘察阶段可划分为规划、项目建议书、可行性和初步设计四个阶段，每一个阶段均应包含区域地质勘察和工程地质勘察两部分，并应符合下列规定：

- 1 各阶段的勘察成果深度应符合《水利水电工程地质勘察规范》（GB 50487）的相关规定；
- 2 对工程地质条件复杂或有特殊要求的建筑物，应进行专项勘察；
- 3 施工过程中应及时进行施工地质编录。

4.1.3 评价湿陷性黄土的不扰动土样应为 I 级土样，且土样的采取应符合下列规定：

- 1 取土勘探点中应有足够数量的探井，其数量宜为取土勘探点总数的 $1/3 \sim 1/2$ ，并不宜少于 3 个；
- 2 探井的深度宜穿透湿陷性黄土层；
- 3 探井取样应在侧壁采用人工方式进行，取样竖向间距宜为 1m，土样直径不宜小于 120mm；
- 4 钻孔取样按《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）执行。

4.1.4 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浸水离心机试验相结合的方法。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。

4.2 现场勘察

4.2.1 区域地质勘察应符合下列规定：

- 1 湿陷性黄土地区水利工程应收集场址周边及线路两侧的工程地质、水文地质及地区建设经验等相关资料。
- 2 应调查湿陷性黄土地区地形地貌和黄土层的地质年代、成因、厚度、湿陷性及地

表水体情况，查明影响工程场地的不良地质作用和环境地质问题。

3 水利工程跨越不同构造单元时，应分区确定地震动参数，结合工程区地质条件综合进行构造稳定性评价。

4 水利工程跨越不同地貌单元时，应分析其形态组合关系、地质环境条件及对工程建筑物的影响。

(I) 渠道工程

4.2.2 项目建议书阶段勘察应包括下列工作内容：

- 1 调查渠道沿线气象、水文情况。
- 2 初步查明渠道沿线地形地貌的类型、分布特征。
- 3 初步查明渠道沿线黄土滑坡、崩塌、陷穴等不良地质现象的分布、成因、规模。
- 4 初步查明渠道沿线黄土层的地质年代、成因、厚度、地下水类型及分布。
- 5 初步查明黄土湿陷类型、湿陷等级和湿陷下限。
- 6 初步查明主要土层的物理力学性质，初步确定主要物理力学参数建议值。
- 7 初步分析可能存在的工程地质问题 and 环境地质问题，对渠线进行工程地质初步评价。

4.2.3 项目建议书阶段勘察方法应符合下列规定：

- 1 渠道两侧的测绘范围各不宜小于 1km，比例尺可选用 1:10000~1:5000。
- 2 渠道沿线宜布置物探剖面，探测地层岩性、地层结构和地下水分布等。
- 3 勘探布置应在工程地质测绘和物探的基础上进行，勘探点应沿渠线布置，勘探点间距宜 1~2km，且每个地貌单元不少于 1 个，傍山渠道可适当加密；勘探深度应穿透湿陷性黄土层。
- 4 各黄土地貌单元主要土层试验累计有效组数不宜少于 6 组。

4.2.4 可行性研究勘察阶段应包括下列工作内容：

- 1 基本查明黄土的地层岩性、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 基本查明黄土陷穴、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，评价对渠道的影响。
- 3 基本查明渠基黄土层中地下水类型，地下水位及变化幅度。
- 4 基本查明渠道沿线黄土层中地下人工构筑物，评价对渠道的影响。
- 5 初步评价傍山渠道黄土山体边坡的稳定性。
- 6 初步评价渠基黄土震陷、液化的可能性。
- 7 应按黄土湿陷性程度分别提出物理力学参数、承载力和开挖边坡建议值，并进行工程地质初步评价。

4.2.5 可行性研究阶段勘察方法应符合下列规定：

1 渠道两侧的测绘范围各不宜小于 500m，比例尺可选用 1:5000~1:2000，复杂地段可适当扩大测绘范围和增大测绘比例尺。

2 勘探点应沿渠线布置，勘探点间距和深度宜分别按表 4.2.5-1、表 4.2.5-2 确定。深挖方、高填方及大厚度湿陷性黄土区等地段可适当加密、加深。

3 取土样和原位测试在每个地貌单元上应具控制性和代表性，取样和原位测试勘探点的数量不得少于全部勘探点的 1/2，每一地貌单元地基主要土层试验累计有效组数不应少于 6 组。

表 4.2.5-1 可行性研究阶段勘探点间距(m)

工程类别 地貌单元	渠道工程	隧洞工程	涵洞及管道工程	水池工程	其它水工建筑物 (水闸、泵站、渡槽、管桥、倒虹吸、陡坎、跌水等)
黄土塬	500~1000	1000~2000	500~1000	100~200	控制性勘探点不少于 1 个
黄土梁、峁	300~500	500~1000	300~500	50~150	控制性勘探点不少于 2 个
黄土斜坡	100~300	100~200	100~300	50~150	控制性勘探点不少于 2 个
黄土阶地	300~500	500~1000	300~500	100~200	控制性勘探点不少于 1 个
黄土沟谷	100~200	50~100	100~200	20~100	控制性勘探点不少于 2 个

表 4.2.5-2 勘探点深度(m)

工程类别 工程级别	渠道工程	隧洞工程	涵洞及管道工程	水池工程	其它水工建筑物 (水闸、泵站、渡槽、管桥、倒虹吸、陡坎、跌水等)
一般性 勘探点 (m)	大型	穿透湿陷性黄土层			
	中型				
	小型				
控制性 勘探点	大型	穿透湿陷性黄土层，且进入设计建基面高程以下 20~30m			
	中型	穿透湿陷性黄土层，且进入设计建基面高程以下 10~20m			
	小型	穿透湿陷性黄土层，且进入设计建基面高程以下 5~10m			

注：1 勘探深度应满足软弱下卧层验算。

2 表中勘探深度内遇稳定地下水位或非湿陷性坚实地层时，部分勘探点可终孔。

4.2.6 初步设计勘察阶段应包括下列工作内容：

1 查明黄土的地层岩性、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 查明黄土陷穴、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，评价对渠道的影响。

3 查明渠道沿线黄土层中地下人工构筑物，评价对渠道的影响。

4 查明渠基黄土层中地下水位季节性变幅，评价地下水对渠基的影响。

- 5 评价傍山渠道黄土山体边坡的稳定性。
- 6 评价渠基黄土震陷、液化的可能性。
- 7 评价黄土场地的稳定性，提出主要技术参数和地基处理建议。

4.2.7 初步设计阶段勘察方法应符合下列规定：

1 黄土塬、梁、峁区渠道两侧的测绘范围各不宜小于 300m，比例尺可选用 1:5000～1:1000。黄土阶地、黄土斜坡、黄土沟谷渠道两侧的测绘范围各不宜小于 500m，比例尺可选用 1:2000～1:500。复杂地段可适当扩大测绘范围和增大测绘比例尺。

2 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控制性勘探点不应少于 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，黄土沟谷谷底应有勘探点。

3 勘探点间距及深度见表 4.2.7、表 4.2.5-2。深挖方、高填方及大厚度湿陷性黄土区等地段可适当加密、加深。

4 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 12 组。

表 4.2.7 初步设计阶段勘探点间距(m)

工程类别 地貌单元	渠道工程	隧洞工程	涵洞及管道工程	水池工程	其它水工建筑物 (水闸、泵站、渡槽、管桥、倒虹吸、陡坎、跌水等)
黄土塬	300～500	500～1000	300～500	30～50	控制性勘探点不少于 2 个
黄土梁、峁	200～300	300～500	200～300	20～30	控制性勘探点不少于 3 个
黄土斜坡	50～100	50～100	50～100	20～30	控制性勘探点不少于 3 个
黄土阶地	100～200	300～500	100～200	30～50	控制性勘探点不少于 2 个
黄土沟谷	50～100	20～50	20～50	10～20	控制性勘探点不少于 3 个

注：1 地貌单元分界地带应加密勘探点

2 黄土沟谷谷底应有勘探线或勘探点

(II) 隧洞工程

4.2.8 项目建议书勘察阶段应包括下列工作内容：

- 1 调查、了解隧洞沿线气象、水文情况。
- 2 初步查明隧洞地形地貌、地层岩性、成因类型、分布情况等。
- 3 初步查明隧洞沿线地下水类型、分布特征和含水层的分布等。
- 4 初步查明主要土体物理力学性质，初步确定主要土体物理力学参数建议值。
- 5 基本查明隧洞进出口边坡的稳定性。

- 6 分析可能存在的主要工程地质问题，对洞线进行工程地质初步评价。

4.2.9 项目建议书阶段勘察方法应符合下列规定：

- 1 收集隧洞沿线气象、水文资料。
- 2 隧洞两侧的测绘范围各不宜小于 3km，比例尺宜选用 1:25000~1:10000，复杂地段可选用 1:5000。
- 3 隧洞进出口、浅埋段、过沟段宜布置物探剖面，探测地层岩性、地层结构和地下水分布等。
- 4 勘探布置应在工程地质测绘和物探的基础上进行，隧洞沿线应布置控制性钻孔。隧洞进出口、浅埋段、过沟段及工程地质条件复杂地段宜布置钻孔，深度应穿透湿陷性黄土层，并应进入设计洞底以下不小于 20m。
- 5 各地貌单元主要土体试验累计有效组数不应少于 6 组。
- 6 初步评价隧洞的工程地质条件及可能存在的主要工程地质问题。
- 7 初步确定主要黄土体物理力学参数建议值。

4.2.10 可行性研究阶段勘察应包括下列工作内容：

- 1 基本查明隧洞沿线地形地貌类型及分布特征。
- 2 基本查明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 基本查明隧洞沿线冲沟、盲沟、陷穴以及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 隧洞穿越黄土塬、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。

4.2.11 可行性研究阶段勘察方法应符合下列规定：

- 1 隧洞两侧的测绘范围各不宜小于 1km，比例尺可选用 1:10000~1:5000；对于黄土隧洞进出口段、浅埋段、傍山段、过沟段及黄土潜蚀段等工程地质条件复杂和重要洞段，比例尺可选用 1:5000~1:2000。
- 2 勘探点布置应沿洞线布置，对于进出口段、浅埋段、过沟段应布置钻孔或探井；勘探深度应进入设计洞底以下不宜小于 20m，且至少大于 1.5 倍洞径。勘探点间距和深度宜分别按表 4.2.5-1、表 4.2.5-2 确定。
- 3 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 初步进行围岩分类，黄土隧洞工程地质评价宜符合 SL629 有关规定。

4.2.12 初步设计阶段勘察应包括下列工作内容：

- 1 查明黄土隧洞地形地貌、土体岩性、含水特征及土体强度，进行围岩分类，评价围岩自稳能力，提出隧洞开挖、支护建议措施。

2 查明黄土隧洞沿线冲沟、盲沟、陷穴，以及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。

3 隧洞穿越黄土塬、梁、峁洞段，应查明黄土的形成年代及湿陷性，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。

4 进出口及浅埋段，应查明上覆土层厚度、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。

5 对于黄土隧洞傍山段、过沟段应查明黄土边坡稳定性及沟底松散堆积物厚度、密实程度、地下水分布情况，评价黄土边坡及洞顶土体稳定性。

4.2.13 初步设计阶段勘察方法应符合下列规定：

1 隧洞两侧的测绘范围宜选用 500~1000m，比例尺可选用 1:5000~1:2000；对于黄土隧洞进出口段、浅埋段、傍山段、过沟段及黄土潜蚀段等工程地质条件复杂和重要洞段，应进行专门工程地质测绘，比例尺可选用 1:1000~1:500。

2 勘探点布置应沿洞线布置，对于进出口段、傍山段、浅埋段、过沟段应布置钻孔或探井；勘探深度应进入设计洞底以下不小于 10m，并大于 1 倍洞径。勘探点间距和深度宜分别按表 4.2.7、表 4.2.5-2 确定。

3 每一地貌单元主要土层物理力学性质试验累计有效组数不应小于 12 组。围岩物理力学参数宜在试验成果的基础上，结合工程类比和当地经验综合确定。

4 黄土隧洞超前地质预报应根据黄土隧洞工程地质、水文地质条件，选择与施工方法相适应的方式，及时进行超前地质预报。

(III) 涵洞及管道工程

4.2.14 项目建议书阶段勘察应包括下列工作内容：

1 初步查明沿线地形地貌和黄土层的地质时代、地层岩性、成因、厚度、地下水位以及分布特点。

2 初步查明沿线黄土滑坡、崩塌、土流(泻溜)等不良地质现象的分布、成因、规模。

3 初步查明主要黄土层的物理力学性质，初步确定主要物理力学参数建议值。

4 初步提出管(涵)穿越方式、埋置深度的地质建议。

5 对管(涵)线进行工程地质初步评价。

4.2.15 项目建议书阶段勘察方法应符合下列规定：

1 管(涵)两侧的测绘范围各不宜小于 1000m，比例尺可选用 1:10000~1:5000。

2 管(涵)沿线宜布置物探剖面，探测地层岩性、地层结构和地下水分布等。

3 勘探布置应在工程地质测绘和物探的基础上进行，勘探点应沿轴线布置，勘探点间距宜 1~2km，且每个地貌单元不应少于 1 个，深度应穿透湿陷性黄土层。

4 各地貌单元主要黄土层试验累计有效组数不应少于 6 组。

4.2.16 可行性研究阶段勘察应包括下列工作内容：

1 基本查明黄土的地层岩性、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 基本查明黄土陷穴、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 基本查明地基黄土层中地下水类型,地下水位及变化幅度。

4 提出穿越方式和最小埋置深度的地质建议。

5 评价穿越地段的适宜性和稳定性。

6 基本查明沿线环境水和土的腐蚀性。

4.2.17 可行性研究阶段勘察方法应符合下列规定:

1 管(涵)两侧的测绘范围各不宜小于 500m,比例尺可选用 1:5000~1:2000,复杂地段可适当扩大测绘范围和增大测绘比例尺。

2 勘探点应沿轴线布置,勘探点间距及深度见附表 4.2.5-1、表 4.2.5-2。对于重要镇(支)墩或地质条件复杂地段应布置勘探点。

3 对于开挖穿越段勘探深度应进入设计管(涵)底以下 5~10m;对于非开挖穿越段勘探深度应进入设计管(涵)底以下 10~15m。

4 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。

4.2.18 初步设计阶段勘察应包括下列工作内容:

1 查明沿线不同地貌单元湿陷性黄土分布情况、湿陷深度。

2 根据线路工程地质条件及不良地质体的分布情况,确定涵(管)基持力层,提出地基土体主要物理力学参数及地基处理措施。

3 对于过沟段和穿河段应查明黄土的地层结构、土体颗粒组成和特性,调查沟床冲刷深度,评价沟床及岸坡稳定性,提出防护建议。

4 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。

5 评价线路沿线环境水和土的腐蚀性。

4.2.19 初步设计阶段勘察方法应符合下列规定:

1 测绘范围应包括涵洞(管道)及相关地带,比例尺可选用 1:2000~1:500。

2 对于开挖方式穿越段应在管(涵)轴线布置勘探点;对于非开挖方式穿越段应在管(涵)轴线两侧各 15m 处布置勘探点,两侧勘探点呈交错布置。

3 涵洞及管道工程勘探点间距和深度宜按表 4.2.7、表 4.2.5-2 确定。对于重要镇(支)墩或地质条件复杂地段应布置勘探点。

4 对于采用顶管、拉管或定向钻等方式穿越时,勘探孔间距和深度应根据设计要求确定。

5 不同黄土地貌单元主要土体应取原状样进行室内物理力学性质试验，主要土体试验累计组数不应少于 12 组。

(IV) 水池工程

4.2.20 项目建议书勘察阶段应包括下列工作内容：

- 1 收集并分析与建设场地相关地区的黄土地基处理经验。
- 2 调查、了解工程建设地区大气降水、气温变化等气象、水文情况。
- 3 初步查明场区工程地质、水文地质及环境地质条件。
- 4 初步查明场区湿陷性黄土厚度、湿陷类型、湿陷等级、湿陷深度。
- 5 初步提出地基处理深度和处理措施。

4.2.21 项目建议书阶段勘察方法应符合下列规定：

- 1 黄土塬区工程地质测绘的比例尺可选用1:10000~1:2000；黄土梁、峁、斜坡、沟谷、阶地等地形复杂地区可选用更大的比例尺。
- 2 测绘范围应包括水池区及周边相关地带。
- 3 物探应根据地形、地质条件，采用综合物探方法，探测场区可能发生渗漏或浸没地区的地下水位。
- 4 场区至少垂直布置两条代表性勘探剖面，必要时可增加剖面。勘探剖面上应有探坑或钻孔控制。黄土塬区勘探点间不宜大于150m，黄土梁、峁、斜坡、沟谷、阶地区可适当缩小。水池区至少宜有一个控制性勘探点，深度穿透湿陷性土层。
- 5 场区主要土层取原状样进行湿陷性试验组数不宜少于6组。

4.2.22 可行性研究勘察阶段应包括下列工作内容：

- 1 初步查明场区及其附属建筑物工程地质条件，初步评价存在的主要工程地质问题 and 环境地质问题，提出地基处理的初步地质意见。
- 2 初步查明场区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。
- 3 初步查明场区地下水位埋深，预估地下水位的季节性变幅和升降的可能性。
- 4 基本查明环境水和土腐蚀性。
- 5 初步评价水池拟建场地的适宜性和稳定性。
- 6 结合水池区工程地质条件，分析水池及其附属建筑物布置的合理性，对地基处理方案作出评价和建议，并提出地基处理所需的设计参数建议值。

4.2.23 可行性研究阶段勘察方法应符合下列规定：

- 1 黄土塬区工程地质测绘的比例尺可选用1:2000~1:1000；黄土梁、峁、斜坡、沟谷、阶地等地形复杂地区可选用更大的比例尺。
- 2 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盆地外，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。

3 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，评价土体液化性和腐蚀性。

4 本阶段勘察以场地勘察为主，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。黄土塬区至少应有1个控制性勘探点，黄土梁、峁、斜坡、沟谷、阶地区至少应有2个控制性勘探点。勘探点间距和深度宜分别按表4.2.5-1、表4.2.5-2确定。

5 土体试验可结合勘探工作进行。取样和原位测试勘探点在平面布置上应具有控制性，其数量不得小于全部勘探点的 $1/3 \sim 1/2$ ，并不宜少于3个。控制性勘探点全孔取样，竖向间距宜为1m，土样直径不宜小于120mm。土体物理力学参数应在试验成果的基础上结合工程地质类比法选用。

6 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。

4.2.24 初步设计勘察阶段应包括下列工作内容：

1 查明场区及其附属建筑物工程地质条件，评价存在的主要工程地质问题和环境地质问题。

2 查明场区各土层物理力学性质、湿陷土层厚度、场地湿陷类型、地基湿陷等级及其分布。

3 查明场区地下水位埋深、季节性变幅。

4 提出适宜的地基处理或基础方案并进行分析，对处理深度和主要技术参数提出建议。

4.2.25 初步设计阶段勘察方法应符合下列规定：

1 黄土塬区工程地质测绘的比例尺1:1000~1:500；黄土梁、峁、斜坡、沟谷、阶地等地形复杂地区可选用更大的比例尺。

2 本阶段勘察主要针对建筑物勘察，勘探主要采用井探和钻探相结合。勘探点应沿水池围堤(坝)轴线及附属建筑物基础中心位置布设。勘探点间距和深度宜分别按表4.2.7、表4.2.5-2确定。

3 采取不扰动土样和原位测试的勘探点不应少于全部勘探点的 $2/3$ ，且取样勘探点不应少于全部勘探点 $1/2$ 。

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12组。

(V) 其它水工建筑物

4.2.26 项目建议书阶段水闸、泵站、渡槽、倒虹吸、管桥、陡坎、跌水等其他建筑物勘察工作内容和勘察方法应符合下列规定：

1 收集各建筑物拟建场地有关的工程地质、水文地质资料及地区建筑地基处理经验。

2 调查、了解各建筑物拟建场地的地形地貌，黄土层的地层时代、成因、厚度和湿陷性，有无影响场地稳定的不良地质作用和地质环境等问题。

3 对工程地质条件复杂的建筑物场地宜进行必要的工程地质测绘、勘探和试验等工作。

4 初步提出各建筑物湿陷性黄土地基处理深度和处理措施。

4.2.27 可行性研究阶段水闸、泵站、渡槽、倒虹吸、管桥、陡坎、跌水等其他建筑物勘察工作内容和勘察方法应符合下列规定：

1 初步查明各建筑物场地的工程地质条件、水文地质条件和环境地质条件。

2 基本查明建筑物场地存在的主要工程地质问题。

3 初步查明各建筑物场地土层物理力学性质、湿陷土层厚度、场地湿陷类型、地基湿陷等级及其分布。

4 场地应进行工程地质测绘，其测绘比例尺 1:5000~1:2000。

5 勘探布置应在地质测绘和物探的基础上进行。沿建筑物轴线应布置勘探剖面，对于地质条件复杂地段宜垂直主要剖面布置辅助剖面。黄土塬和黄土阶地勘探剖面控制性勘探点不应少于 1 个，黄土梁、峁、斜坡、沟谷等地质条件复杂地段控制性勘探点不应少于 2 个。勘探点间距和深度宜分别按表 4.2.5-1、表 4.2.5-2 确定。

6 地基持力层主要土层均应取原状样进行室内物理力学性质试验，累计有效试验组数不应少于 6 组。

4.2.28 初步设计阶段水闸、泵站、渡槽、倒虹吸、管桥、陡坎、跌水等其他建筑物勘察工作内容和勘察方法应符合下列规定：

1 对于水闸、泵站应查明场址湿陷性黄土层厚度和湿陷特性，提出物理力学参数、承载力和开挖边坡坡比建议值，并结合建筑物基础形式，提出地基工程处理建议。

2 对于渡槽、倒虹吸、管桥应查明桩(墩)基持力层物理力学性质和工程特性，提出地基工程处理建议。

3 对于陡坎、跌水应查明湿陷性黄土地区土层物理力学性质和工程特性，提出地基工程处理建议。

4 各建筑物场地应进行工程地质测绘，其测绘比例尺 1:2000~1:500。工程地质条件复杂场地其测绘比例尺可大于 1:500。

5 黄土塬和黄土阶地勘探剖面控制性勘探点不应少于 2 个，黄土梁、峁、斜坡、沟谷等地质条件复杂地段控制性勘探点不应少于 3 个。水闸、泵站控制性勘探点应不少于 1 个；渡槽、倒虹吸的桩、墩基结合工程具体情况布置勘探点，每个桩、墩基应不少于 1 个勘探点。勘探点间距和深度视建筑物布置形式和地质条件复杂程度而定，勘探点

间距及深度宜按表 4.2.7、表 4.2.5-2 确定。

6 桩（墩）基每一主要土层均应取原状样进行室内物理力学性质试验，累计有效试验组数不应少于 6 组。桩（墩）基部位需要时可进行原位载荷试验。

4.3 黄土湿陷性试验

4.3.1 黄土地基湿陷性评价中所需要的试验项目应包含下列内容，实际工程中可根据工程等级和实际要求开展全部或者部分试验工作。

- 1 实际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 现场浸水试验。
- 4 测定黄土地基湿陷性的离心模型试验。

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。取样钻探时不得加水，宜采用探井侧壁人工取样。

4.3.3 实际压力下的室内黄土湿陷试验组数应符合下列规定：

- 1 挖方水利工程应从渠顶高程到勘探深度底面每 1m 做 1 组。
- 2 填方水利工程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。

4.3.4 实际上覆压力下的室内黄土湿陷试验方法应符合下列规定：

- 1 不扰动土样的制样质量等级应为 I 级；平行试验试样密度的允许差值应不大于 0.03g/cm^3 。
- 2 试验前环刀、透水石应洗净、风干、冷却，滤纸、透水石的湿度应接近试样的天然湿度。
- 3 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 。

4 试样的实际上覆压力计算应符合下列规定：

- 1) 挖方工程应按式 (4.3.4-1) 计算：

$$P = P_{zz} + P_{qz} \quad (4.3.4-1)$$

式中： P ——试样的实际上覆压力值（kPa）；

P_{zz} ——自工程顶面高程到试样所处高程之间的黄土体的饱和自重压力（kPa）；

P_{qz} ——工程衬砌结构的自重压力（kPa）。

- 2) 填方工程和半挖半填工程应按式 (4.3.4-2) 计算：

$$P = P_{zz} + P_{tz} \quad (4.3.4-2)$$

式中： P ——试样的实际上覆压力值（kPa）；

P_{zz} ——自填方基面到试样所处高程之间的黄土体的饱和自重压力（kPa）；

P_{tz} ——自基础顶面高程到填方基面之间的填土体的自重压力（kPa）。

3) 计算饱和自重压力时，土的饱和密度应按式（4.3.4-3）计算：

$$\rho_{sat} = \rho_d \left(1 + \frac{S_r e}{G_s} \right) \quad (4.3.4-3)$$

式中： ρ_{sat} ——土的饱和密度（g/cm³）；

ρ_d ——土的干密度（g/cm³）；

S_r ——土饱和度，可取85%；

e ——土的孔隙比；

G_s ——土的颗粒比重。

5 试验方法应按《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025第4.3.1条~第4.3.4条执行，但不执行第4.3.2条第4款的规定，而应将试验的最大加荷压力设为实际上覆压力值。试验步骤应按《土工试验方法标准》GB/T50123-2019第18章执行。

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条的要求试验、取值。

4.3.5 现场浸水试验应满足下列要求：

1 挖方工程宜采用现场浸水试验，试验方法应满足《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025第4.3.8条的规定，试验前应将基础顶部高程以上的土体挖除并设置试坑。

2 填方和半挖半填工程宜采用现场浸水载荷试验测定，试验应在填方基面上进行，并应满足《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025第4.3.6条的规定，载荷板上施加的最大压力应等于上覆填土的基底压力。

3 应取试坑内最大沉降值作为地基在实际饱和自重压力或者实际上覆压力下的湿陷量。

4.3.6 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4.3.6执行。

表4.3.6 黄土湿陷试验项目表

工程类型	工程等级	试验项目			
		实际上覆压力下的室内黄土湿陷试验	室内黄土增湿变形试验	现场浸水试验	测定黄土渠道地基湿陷性的离心模型试验
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 渠道、涵洞和管道工程湿陷性评价

4.4.1 黄土的湿陷性和湿陷程度，应按室内实际上覆压力下的饱和湿陷系数 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 实际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渠道顶部高程至非湿陷性黄土层的顶面，不应累计湿陷系数小于0.015的土层。填方和半挖半填渠道的计算起始面应为填方基面。
- 2 湿陷量计算值应按式（4.4.2-1）计算：

$$\Delta_{ps} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \alpha \delta_{psi} h_i \quad (4.4.2-1)$$

式中： Δ_{ps} ——实际上覆压力下黄土饱和湿陷量（mm）；

δ_{psi} ——第i层土的湿陷系数；

h_i ——第i层土的厚度（mm）；

β_0 ——修正系数；

α ——浸水几率系数。

3 修正系数 β_0 应采用本场地或者相邻同一地区场地的现场浸水试验或者离心模型试验确定，对3级及以下渠道，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 浸水可能性系数 α 取1.0。

4.4.3 应以实际上覆压力下黄土饱和湿陷量 Δ_{ps} 按表4.4.3确定渠基的湿陷性等级。

表4.4.3 渠道、涵洞和管道工程黄土地基湿陷性等级表

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
渠道地基湿陷程度	无	轻微	中等	强烈

4.4.4 对于1、2级建筑物，可采用基于“最大可能增湿变形量”的黄土场地湿陷性评价方法进行场地湿陷性评价，其方法详细见附录J。

4.5 隧洞工程湿陷性评价

4.5.1 隧洞工程通过黄土场地时，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。

4.5.2 隧洞工程黄土地基的湿陷性，应按实际压力下地基的湿陷量 Δ_s 进行评价，并应符合表 4.5.1 的规定。湿陷量 Δ_s 应按 4.5.3 的规定计算。

表 4.5.1 隧洞工程黄土地基湿陷性评价

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

4.5.3 隧洞工程黄土地基湿陷量 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，应按下列式计算：

$$\Delta_s = \beta' \sum_{i=1}^n \alpha \delta_{si} h_i \quad (4.5.3-1)$$

式中： δ_{si} ——隧洞基底下第 i 层土的湿陷系数；湿陷系数的试验应力，宜采用实际应力，即自重应力与附加应力之和。

h_i ——隧洞基底下第 i 层土的厚度（mm）；

α ——浸水几率系数，取 1.0；

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。

隧洞工程黄土地基湿陷量的计算值 Δ_s ，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。圆形断面的隧洞，基底从衬砌底部算起；有仰拱的隧洞，基底从仰拱底部算起，城门洞形断面的隧洞，基底从铺底底部算起。

2 对于2级（含）以上的黄土隧洞，应根据本规程附录C进行黄土隧洞试坑浸水试验。

3 隧洞工程为线性工程，为快速分析线路通过范围内黄土的湿陷性，也可采用附录G的方法进行初步评价。

4.6 其他水工建筑物湿陷性评价

4.6.1 水闸、泵站、渡槽、大坝、蓄水池等其他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。

4.6.2 对于临水的永久建筑物，浸水机率系数应取 1。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 水利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、构筑物等级等因素。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 水利工程的布置、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 根据地基复杂程度、建筑物规模和功能特征以及由于地基问题可能造成建筑物破坏或影响正常使用的程度，将地基处理设计分为三个等级。

5.1.3 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。

5.1.4 对于特殊环境作用下湿陷变形破坏对构筑物耐久性的影响，可根据工程经验、试验研究、综合分析等方法进行评估。

5.2 处理原则与标准

5.2.1 水利工程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 对重大工程的地基处理方案应专题论证。

5.2.2 水利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最大剩余湿陷量

渠道工程级别	剩余湿陷量不大于下列值 (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 厚的防渗垫层。
4、5	200	

2 涵洞 (管道) 基底压力小于湿陷起始压力的 3 级 (含) 以上工程防渗垫层厚度应不小于 300mm, 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 1.00m, 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 □、□ 级		湿陷等级为 III、□ 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	1.00m	2.00m
4、5	0.45m	1.0m	0.60m	1.50m

4 湿陷性黄土地层不宜布置有压隧洞, 并应加强隧洞衬砌的防渗设计。

5 水利节点工程, 1 级和 2 级建筑物或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) 渠道工程

5.3.1 一般规定

1 湿陷性黄土渠道地基处理方法应根据地质条件和地基处理目的, 经技术经济比较综合确定, 可采用换填法、强夯法、挤密法、预浸水法及组合法等。

2 渠道工程黄土地基处理方法、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。

5.3.2 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，可选用砂砾石、中粗砂、灰土、水泥土、黄土等，不宜采用粉砂、细砂、轻砂壤土。换填材料中不应含树皮、草根等杂质。

(1) 砂砾石、中粗砂换填应确保级配良好，1 级、2 级渠道换填后的相对密度不小于 0.70，其他渠道不小于 0.65。

(2) 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度应不小于 0.95，3 级、4 级渠道应不小于 0.93，5 级渠道应不小于 0.91。

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

(4) 采用水泥土换填料时，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%，按压实度控制，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《水运工程地基设计规范》(JTS147) 相关条文要求，渠道换填示意图如图 5.3.2-1 所示。

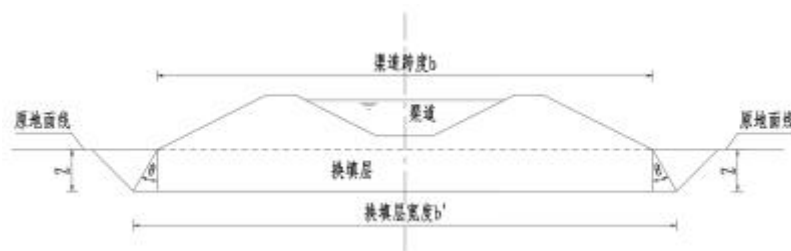


图 5.3.2-1 渠道换填层横断面布置示意图

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。当换填材料为中、粗砂时，压缩模量可取为 20000~30000kPa。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。

5.3.3 预浸水法用于湿陷等级 III 级（含）以上，且湿陷层厚度大于 10m 的情况。处理前应进行现场试坑浸水试验。按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025) 条文规定执行。

5.3.4 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，可处理的湿陷性黄土层厚度为 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。

5.3.5 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 5~25m 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。

5.3.6 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) 隧洞工程

5.3.7 隧洞湿陷性黄土地基处理设计应符合下列规定:

1 湿陷性黄土隧洞地基处理设计,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。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稳定性的影响。

2 湿陷性黄土隧洞地基处理可根据运行和施工条件,采用换填法、挤密法、混凝土灌注桩等方法,或多种方法组合。

表 5.3.7 隧洞工程湿陷性黄土地基处理方法

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。如洞门端,挡、翼墙地基,隧洞进出口连接建筑物地基,明洞地基,隧洞地基	1~3
挤密法	$S_r \leq 65\%$, $\omega \leq 22\%$ 的湿陷性黄土。如隧洞进出口连接建筑物地基,明洞地基,隧洞地基	5~25
混凝土灌注桩	对采用上述两种地基处理措施不能满足设计要求的建筑物地基,如隧洞进出口连接建筑物地基,明洞地基	现场试验确定
灌浆法	施工机械设备受限、或局部处理、改散土体均匀性的隧道地基	现场试验确定
其他方法	经试验研究或工程实践证明行之有效的方法,如铁路行业采用旋喷桩、树根桩等	现场试验确定

5.3.8 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 5.3.2 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，洞底遇水泥化、受侧拱（墙）土压力作用洞底隆起变形等对施工环境和施工安全影响较大，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。

5.3.9 挤密法处理湿陷性隧洞地基，应符合以下规定：

- 1 挤密法适用于处理地下水位以上，处理深度为 5~25m 的湿陷性黄土隧洞地基。
- 2 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。

5.3.10 高压喷射法和水泥搅拌法

- 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、或在洞内采用高压喷射灌浆或水泥搅拌法进行地基处理，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。

5.3.11 灌浆法处理湿陷性隧洞地基，应符合以下规定：

- 1 灌浆法处理湿陷性黄土地基主要包括单液硅化法、碱液加固法及水泥劈裂灌浆法。对有地下水流动的黄土地基，不应采用单液水泥浆液。渗透系数为 0.1~2.0m/d 的地下水位以上的湿陷性黄土，可采用无压或压力单液硅化、碱液灌浆处理。
- 2 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，取得灌浆量、灌浆压力和灌浆有效范围等设计参数后，再进行地基处理设计。
- 3 对于湿陷性黄土水泥劈裂灌浆压力，宜为 0.4~0.8MPa，灌浆点上覆土层厚度宜大于 2m。
- 4 单液硅化法设计应符合《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）条文规定，其加固半径应根据孔隙比、浆液黏度、凝固时间、灌浆速度、灌浆压力和灌浆量试验确定；无试验资料时，可按表 5.3.11 确定。

表 5.3.11 硅化法注浆加固半径

土的类型及加固方法	渗透系数（m/d）	加固半径（m）
黄土 （单液硅化法）	0.1~0.3	0.3~0.4
	0.3~0.5	0.4~0.6
	0.5~1.0	0.6~0.8
	1.0~2.0	0.8~1.0

5 碱液加固黄土地基深度可为基础宽度的（2.0~3.0）倍，宜为 2m~5m，碱液加固法设计应符合《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB50025）条文规定，

5.3.12 湿陷性黄土隧洞地基处理工程的防渗和排水，按照《铁路黄土隧道技术规范》

(Q/CR 9511) 相关规定执行。

(□) 涵洞(管道)工程

5.3.13 湿陷性黄土场地上的涵洞(管道)地基处理设计应遵循下列要求:

- 1 涵洞(管道)设计方案应结合环境、地质、运行工况,对涵洞(管道)布置、材料、结构、地基处理等进行综合经济技术比选,合理确定布置、结构、地基处理等各方方案。
- 2 自重湿陷性黄土地场地首选整体连接的钢管、PE管和自锚接口的球墨铸铁管,或者其他整体连接性能良好,适应地基变形能力好的管材。
- 3 应根据交通运输等施工条件,研判所采用管材结构和连接方式,在事故抢修中所需时长应在容许范围之内。
- 4 黄土地基处理方法应根据地质条件、工期要求、材料来源、施工条件、处理深度经技术经济综合比较确定。
- 5 黄土地基的常用处理方法包括垫层法、强夯法、挤密法、预浸水法和灌浆法,各方法设计应符合《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025)。
- 6 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。
- 7 顶管穿越自重湿陷性黄土时,应采用整体连接的钢管、PE管等整体连接性能好的管材。
- 8 涵洞(管道)设计除满足本条规定外,还应该满足国家和水利工程相关规范规程标准的规定。

(□) 水池工程

5.3.14 一般规定

- 1 湿陷性黄土水池选址布置宜避开陷穴、墓坑、动物巢穴、窑洞等地下洞穴(室),冲沟发育区及临近高陡崖坎区,优先选择在地势相对开阔较平坦区,地形利于排水的场地,避开沟道洪水的地段,且紧临水池下游区,无密集村落、工矿企业等。
- 2 湿陷性黄土地基上的水池受水浸湿的可能性较大,应做好池周周边场地外水截排,避免外水入渗池基基础,同时,应加强池内水外渗的严格防渗漏措施,避免因场地外水入渗和池内水浸水湿陷造成地基不均匀变形、沉陷及水池坡面滑塌等问题。
- 3 湿陷性黄土地基上的水池应采取必要的地基处理措施,消除地基的全部或部分湿陷量或采用复合地基处理,处理后的地基具一定的整体性和均匀性,满足水池强度、稳定和变形的控制目的,并宜采取适当的结构措施以适应地基变形的能力。
- 4 在地震烈度Ⅵ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。
- 5 湿陷性黄土地基上的水池地基处理方法应根据地质条件、外部环境、地基处理

目的等，通过技术经济比较综合确定。

6 湿陷性黄土水池地基处理除满足工程设计要求外，尚应做到因地制宜、就地选材、节能环保等要求。

7 湿陷性黄土水池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，水池围坝坝基处理设计应满足《碾压土石坝设计规范》(SL274)的有关规定。

8 本规定所指的水池为具半挖半填的小型水库类调蓄水池，水池围坝坝高一般不超过 15m，蓄水深度一般不超过 10m。对砌石、混凝土或钢筋混凝土结构材料的矩形、圆形蓄水池应按具体水工建筑物对待，其地基处理设计参照“其他水利建筑物黄土地基处理设计”进行。

5.3.15 地基处理

1 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范围和处理方法。

2 应对湿陷性黄土地基上的水池池底、池周及围坝坝基分别进行处理。处理方法可根据综合考虑的比选因素、现场实际和及场地施工条件等，可采用换土垫层法、强夯法、挤密法和预浸水法等加固处理方法。

3 湿陷性黄土水池地基常用的处理方法和适用的处理类型，可参考表 5.3.14 中选择一种或多种相结合方法组合的最佳处理方法。

4 湿陷性黄土水池地基应坚持“强坝弱池”的地基处理原则，对水池围坝坝基的应加强处理，采取必要可靠的处理措施，消除全部湿陷性或大部分湿陷性，提高坝基强度、承载力，降低压缩性，满足适应沉降变形和承载力要求；对水池池底和池周处理在满足承载力和适应变形的能力的同时，还应具备水稳性要求。

5 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应力值、剩余湿陷量等分析确定，参照执行《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025)的有关规定。

(V) 其它水工建筑物

5.3.16 水闸、泵站、渡槽、倒虹吸、陡坎、跌水等其他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 5.3.14 中的一种或几种组合方法进行处理。

表 5.3.14 湿陷性黄土地基处理方法

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	1~3
强夯法	$S_r \leq 60\%$ 的湿陷性黄土	3~12
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地	地表下 6m 以下土层
灌浆法	主要用于设备施工机械设备受限、或局部处理	现场试验确定
其他方法	经试验研究或工程实践证明行之有效	现场试验确定

5.3.17 水利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水处理。

5.3.18 换填法地基处理设计应满足 5.3.2 条相关要求。

5.3.19 强夯法地基处理设计应满足 5.3.4 条相关要求。

5.3.20 挤密法地基处理设计应满足 5.3.5 条相关要求。

5.3.21 预浸水法地基处理设计应满足 5.3.3 条相关要求。

5.3.22 桩基础地基处理设计应满足《湿陷性黄土建筑标准》(GB50025) 相关条文技术要求。

5.3.23 采用组合处理的水利工程湿陷性黄土地基，应综合考虑地基湿陷等级、处理厚度、工程等别、建筑物级别、结构抗变形能力及社会环境影响等因素综合比选后确定，并应满足《湿陷性黄土建筑标准》(GB50025) 相关条文技术要求。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 水利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、水泥搅拌法、高压喷射法、注浆法、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 水利工程概况及周边环境条件，工程地质条件。
- 2 设计要求、施工依据、施工顺序、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 施工时应采取措施防止施工用水、场地雨水和邻近管道渗水等渗入。

6.1.5 水利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 6.1.1 地面最小排水坡度 (i_{min})

建筑物外距离 S	$S \leq 10m$	$10m < S \leq 20m$	$20m < S \leq 30m$	$S > 30m$
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，宜优先利用就地挖出的黄土或其他黏性土作材料，也可选用灰土、水泥土、砂砾石、中粗砂等作材料。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。根据试压确定的施工参数，分层压实至设计标高。

6.2.3 素土和灰土垫层土料的施工含水率宜控制在 $\omega_{op} \pm 2\%$ 的范围内，当无试验资料时，素土的最优含水率，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 在换填法施工过程中应分层取样对压实质量检验，控制指标采用压实系数。每层压实系数达到设计要求后才能进行下一层的施工。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：

- 1 蓄水建筑物基底垫层，每 100~150m² 面积不应少于 1 处，每层不少于 3 处。
- 2 输水建筑物垫层基底，每 10m 每层 1 处，且每层不少于 3 处；
- 3 其他水工建筑物基底垫层，每层不少于 3 处。
- 4 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。取样点与垫层边缘距离不宜小于 300mm。

6.2.8 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》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，并应与水利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，土的天然含水率宜低于塑限含水率 1%~3%。在拟夯实的土层内，当土的天然含水率低于 5% 时，宜提前 3~5d 将土层增湿至接近最优含水率。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 强夯施工机具应符合下列规定：

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 2.0m~3.0m，夯锤重量宜为 80kN~400kN，锤底静压力宜为 25kPa~80kPa。

3 夯锤底面宜对称设置 2~6 个孔径 250 mm~300mm 上下贯通的排气孔，排气孔的总面积约占夯锤投影面积的 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 冬季施工必须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。试验不宜少于 3 组，每组挤密桩数不宜少于 7 根（三角形布桩）或 9 根（矩形布桩）。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。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、柱锤冲扩挤密及预钻孔夯扩挤密法。

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 的柱状锤，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 0.5m~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 3~6t，落距为 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 $\pm 1\%$ ；孔中心距允许偏差应为桩距的 $\pm 5\%$ 。

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。异常情况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采用素土、灰土、二灰土、水泥土等，应拌合均匀，随拌随用。土料宜选用粉质粘土，含水率应控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 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。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，宜采用锤重 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，对大型水利工程，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，应根据具体施工工艺及设备加以确定。沉管成孔并用 0.3t 以上的夯锤夯填，不宜小于 1.0m；冲击成孔或钻孔夯扩法成孔，采用 1.0t 以上夯锤夯填不宜小于 1.5m。冬季施工可适当增大预留松动层厚度。铺设垫层前，应将预留松动土层挖除或夯（压）实。

6.6 水泥搅拌法

6.6.1 用水泥搅拌法处理湿陷性黄土地基，应选择有代表性的场地进行工艺性试桩试

验，数量不得少于3根，多轴搅拌施工不得少于3组。应对工艺试桩的质量进行检验，确定施工参数。

6.6.2 固化剂宜选用强度等级32.5及以上的普通硅酸盐水泥。水泥掺入比为被加固土质量的 7%~20%，特殊情况下可通过试验提高掺入比。可根据需要选择早强、缓凝、减水及适合当地湿陷性黄土土质的外加剂。

6.6.3 水泥搅拌法搅拌头翼片的枚数、宽度、与搅拌轴的垂直夹角、搅拌头的回转数、提升速度应相互匹配，干法搅拌时钻头每转一圈的提升（或下沉）量宜为10mm~15mm，确保加固深度范围内土体的任何一点均能经过20次以上的搅拌。

6.6.4 搅拌法施工时，应喷浆搅拌30s，水泥浆与桩端土充分搅拌后，再开始提升搅拌头；停浆面应高于桩顶标高500mm，应将桩顶以上土层及桩顶施工质量差的桩段，采用人工挖除。

6.6.5 搅拌法施工过程中，如因故停浆，应将搅拌头下沉至停浆点以下0.5m，待恢复供浆时，再喷浆搅拌提升；因故停止喷粉，应将搅拌头下沉至停灰面以下1m处，待恢复喷粉时，再喷粉搅拌提升。

6.6.6 采用搅拌法壁状加固时，相邻桩的施工时间间隔不宜超过12h。

6.6.7 水泥搅拌法施工设备应配置在线监测控制系统，能够实时对搅拌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。

6.7 高压喷射法

6.7.1 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，不应在一个区域集中施工。

6.7.2 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本规程表 6.7.1 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 6.7.1 旋喷注浆加固土体直径（m）

旋 喷 桩 体 土 质 类 别		旋 喷 方 法	单管法	二重管法	三重管法
		直 径 (m)			
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。

6.7.3 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 32.5 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。

6.7.4 高压喷射注浆浆液用量可按式 6.7-1、6.7-2 计算，并应取其大值。

体积法:

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 K_1 H (1 + \beta) + \frac{\pi}{4} d^2 K_2 h \quad (6.7-1)$$

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:

$$Q = \frac{H}{v} q (1 + \beta) \quad (6.7-2)$$

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。

6.7.5 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%。

6.7.6 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。

6.7.7 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。

6.7.8 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。

6.7.9 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。

6.8 灌浆法

6.8.1 应选择有代表性的场地进行多孔灌浆试验, 确定工艺适用性, 并确定灌浆压力、速率、时长、浆液耗量、孔间距、排距等施工参数。

6.8.2 单液硅化法施工应符合下列规定:

1 压力灌浆时，应自基底标高起向下分层打入灌浆管和灌注浆液，灌注压力宜由小逐渐增大，最大压力不宜超过 200kPa；

2 溶液自渗时，注入溶液速率宜和自渗速率一致，隔 2h~3h 添加一次溶液；

3 注浆孔宜用体积比 2：8 灰土分层回填夯实。

6.8.3 碱液加固法施工应符合下列规定：

1 灌浆孔可用洛阳铲、螺旋钻成孔或用带尖端的钢管打入土中成孔，孔径宜为 60~100mm，孔中应填入粒径 20~40mm 的石子到注浆管下端标高处，再将 20mm 注浆管插入孔中，管底以上 300mm 应填入 2~5mm 石子，上部宜用 2：8 灰土夯实。

2 配浆液时，应先放水。宜将碱液加热至 90℃~100℃再灌入黄土层中。

3 宜采用隔 1~2 孔灌注，分段施工，灌注速度宜为 0.4L/min~0.5L/min。

6.8.4 水泥劈裂灌浆法施工应符合下列规定：

1 宜采用套阀管法施工工艺自下而上分层劈裂灌浆。套阀管管体可由钢管或聚乙烯（PE）管等制成，底部封闭。沿袖阀管轴向每隔 30cm~50cm 设一环出浆孔。

2 宜采用冲击回转钻进成孔，孔深较大时采用跟管钻进工艺。成孔后应立即灌注套阀管套壳料，套壳料配合比为水泥：黄土：水=1:1.5:2。

3 套壳料灌注后立即下设套阀管，套阀管底端距离灌浆孔应不大于 20cm。套阀管下设完成后宜待凝 2d 以上。

4 水灰比宜选用 0.8:1~1:1，应采用高速搅拌机进行拌制水泥浆。

5 宜采用纯压式灌浆方式。套阀管内下入双联式灌浆塞，每次宜灌注 1 环。灌浆前应先行开环，开环压力宜大于 0.4MPa，灌浆压力大于 0.5MPa。

6.8.5 灌浆过程中应持续监测灌浆压力及流量、地面抬动等，当出现异常情况时，应立即停止灌注溶液，待查明原因后，再继续灌注。

6.9 桩基础

6.9.1 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。

6.9.2 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、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，施工过程中不应中断。

6.9.3 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 质量检查与验收

7.1 一般规定

7.1.1 水利工程湿陷性黄土地基处理质量检查和验收的项目和参数应根据地基或桩基类型、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 质量检查和验收应根据检测对象情况，选择深浅结合、点面结合、载荷试验和其他原位测试相结合的多种试验方法综合检测。

7.1.3 验收检验的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 设计人员认为的重要部位；
- 3 局部岩土特性复杂可能影响施工质量的部分；
- 4 施工出现异常情况的部位。

7.1.4 检验数量应根据场地复杂程度、水利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。承载力验收检验时，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 质量检查与验收

7.2.1 换填法施工质量，应采用压实系数 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。检测点数量及位置应符合本规程 6.2.7 条规定。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。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。

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，宜采用井探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(m²)	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	按直线插入法计算
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（14~28）d 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，自检数量不得少于总桩数的 2%，且每台班不得少于 1 根桩；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。每根桩均应按 1.0m 分层取样检测，检测方法可根据情况和经验，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，以平均挤密系数是否达到设计要求为准。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。

挤密施工前每层取样点如图 7.2.4-1 所示，将挤密单元划分为边长 100mm ~150mm 的方格，数目不宜少于 10 个，每方格中点取一个土样；挤密处理质量检验取样点如图 7.2.4-2 所示，两桩净距划分 10 等格，并画出三条弧线，弧线与分角线交点即为取样点，共 9 个取样点。

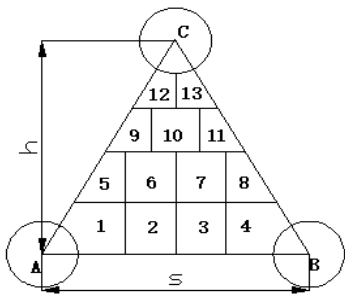


图 7.2.4-1 挤密前分层取样点示意图

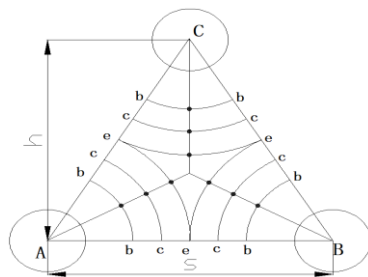


图 7.2.4-2 挤密质量试验、检验取样点示意图

施工后挤密效果检测时，可在图 7.2.2 中三条 cc 弧线中点，分别取 2 或 3 个土样进行试验，并计算出该层桩间土挤密系数平均值。

节点工程桩间土挤密质量试验不应少于 2 组；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 水泥土搅拌法施工质量检查应符合下列规定：

1 成桩3d内，采用轻型动力触探（ N_{10} ）检查上部桩身均匀性，检验数量为施工总桩数的1%，且不少于3根。

2 成桩7d后，采用浅部开挖桩头进行检查，开挖深度宜超过停浆面下0.5m，检查搅拌的均匀性，量测成桩直径，检查数量不少于总桩数的5%。

3 静载荷试验宜在成桩28d后进行。水泥土搅拌法复合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，检验数量不少于总桩数的1%，复合地基静载荷试验数量不少于3台（多轴搅拌为3组）。

4 对变形有严格要求的工程，应在成桩 28d 后，采用双管单动取样器钻取芯样作水泥土抗压强度检验，检验数量为施工总桩数的 0.5%，且不少于 6 点。

7.2.6 高压喷射法施工质量检查应符合下列规定：

1 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。

2 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。

3 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。

7.2.7 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。

7.2.8 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%，且不应少于 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 桩长范围内土层有湿陷性时，基桩承载力宜通过浸水载荷试验判定。

8 监测与维护

8.1 一般规定

8.1.1 应根据水利工程的类型、重要性、工程规模、地基处理方法、黄土湿陷程度和环境影响综合确定监测的项目，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 湿陷性黄土地基处理试验区可适当增加监测的项目和数量。

8.1.3 宜建设施工信息自动化数据采集与监测预警系统，实时掌握地基处理施工状况，对处理质量进行实时分析评价，提高地基处理效果可靠性。

8.1.4 水利工程管理单位应存留完整的湿陷性地基处理技术资料档案，包括岩土勘察报告、设计及变更文件、检验检测报告及其他竣工资料等。

8.2 监测

8.2.1 湿陷性黄土地基水利工程主要安全监测项目应按表 8.2.1 选用。

表 8.2.1 不同类型水工建筑物地基主要监测项目

建筑物类型	地基监测项目						
	表面位移	土体深层位移	地基沉降	土体孔隙水压力	结构物变形和倾斜	土体裂缝开展	土压力
渠道	○	○	●	●	●	●	●
隧洞	●	○	●	●	●	●	●
管涵	○	—	●	●	●	○	○
渡槽	○	—	●	—	●	—	—
大坝	●	●	●	●	●	●	●
水库	●	●	●	●	—	●	●
蓄水池	○	○	●	●	—	●	●
泵站	○	—	●	●	●	—	○
水闸	○	○	●	●	●	—	○

注：●为应测项目，○为选测项目，—为不规定项目。

8.2.2 湿陷性黄土地基处理工程的主要安全监测项目应按表 8.2.2 选用。

表 8.2.2 不同类型地基处理方法监测项目

地基处理方法	表面沉降	分层位移	表层水平位移	隆起	深层水平位移	孔隙水压力	水位	土压力	振动	裂缝
换填	○	—	—	—	○	○	○	—	—	—
预浸水	●	—	—	—	●	●	●	—	—	●
强夯	●	○	○	●	○	●	○	○	●	—

挤密	●	—	○	○	○	●	●	●	○	—
水泥搅拌	●	—	○	○	○	—	○	○	—	—
高压喷射	●	—	○	●	○	—	○	○	—	○
灌浆	○	—	—	●	—	●	○	○	—	○
桩基础	●	—	○	●	●	●	○	●	○	●

注：●为应测项目，○为选测项目，—为不规定项目。

8.2.3 监测项目布置数量应符合下列规定：

1 地基处理面积较大时，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 处理输水建筑物等狭长形地基时，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。

4 作为验证性质的试验区或在地基处理工程经验缺乏时，可根据实际工程需要布置表（8.2.2）以外的监测项目。

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，宜建设施工信息自动化数据采集与监测预警系统，实现施工信息自动化监测。

8.2.5 监测设施监测周期应符合下列规定：

1 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。

2 地基沉降监测应在地基处理施工期间及工程运行期间持续进行，并应及时结合孔隙水压力、水位等监测成果，分析评价地基湿陷沉降趋势以及沉降对工程安全运行的影响。

8.2.6 湿陷性黄土地基施工对周边环境有影响时，应在周边可能影响点位布设监测项目并加强巡视检查。

8.3 运行维护

8.3.1 各种地面排水、防水设施应定期进行检查和维护，雨季前和暴雨后应进行专门详细检查，清除淤积物，保持排水畅通。

8.3.2 各种检漏井、检查井及暗池、沟等均应定期检查，不得有积水、堵塞物或裂缝。

8.3.3 地基应保持原设计排水坡度，周围 6m 内地面应保持排水畅通，发现积水地段，应及时填平夯实，严禁绿化过量浇水。

8.3.4 水利工程湿陷性地基的防护范围内增添或改变用水设施时，应采取相应的防水措施或其他措施。

8.3.5 水利工程建筑物周边水环境发生改变，可能引起建筑物地基浸水或地下水位变化

时，管理单位应收集有关资料，会同原设计单位对建筑物的影响做出评估，并应根据评估结果采取相应措施。

8.3.6 每年冻结期前，应对有可能冻裂的水管采取保温措施，并应对所有管道进行系统检查，管沟或管道的过缝、连接处应重点检查。

8.3.7 管理单位应对水准基点、沉降观测点及水位观测井妥善保护，并应定期根据地区水准控制网对水准基点进行校核。。

8.3.8 发现水工建筑物沉降和地下水位变化异常时，应及时反馈给有关单位处理。

附录 A：不同类型水利工程分级表

表 A.1 永久性水工建筑物级别

工程等别	主要建筑物	次要建筑物
I	1	3
II	2	3
III	3	4
IV	4	5
V	5	5

表 A.2 临时性水工建筑物级别

级别	保护对象	失事后果	使用年限	临时性水工建筑物规模	
				高度 (m)	库容 (10^8m^3)
3	有特殊要求的 1 级永久性水工建筑物	淹没重要城镇、工矿企业、交通干线或推迟总工期及第一台(批)机组发电,造成重大灾害或损失	>3	>50	>1.0
4	1、2 级永久性水工建筑物	淹没一般城镇、工矿企业、交通干线或推迟总工期及第一台(批)机组发电而造成较大经济损失	$3\sim 1.5$	$50\sim 15$	$1.0\sim 0.1$
5	3、4 级永久性水工建筑物	淹没基坑,但对总工期及第一台(批)机组发电影响不大,经济损失较小	<1.5	<15	<0.1

附录 B：室内黄土增湿变形试验

B.1 一般规定

B.1.1 本试验可用于测定非饱和黄土在侧限情况下的增湿变形系数或者减湿变形系数。应根据试验目的要求，采用“先增/减湿后加压路径”或者“先加压后增湿路径”的试验方法。

B.1.2 从同一土样中制备的试样，其密度的最大允许差值应为 $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ 。

B.1.3 试验所用的滤纸及透水石的湿度应接近试样的天然湿度。

B.1.4 变形稳定标准为连续2h内，每小时变形不应大于0.01mm。

B.1.5 原状黄土样的取得和制备，必须保持其密度、湿度和结构，并应符合《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001）中I级土样质量的要求。

B.1.6 重塑黄土样的制备，应根据工程实际情况可分别采用击样法、击实法和压样法，并应符合《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）第4.1~4.5条的要求。

B.1.7 试验开始之前应对所用仪器进行标定，并在记录表格中记录仪器变形量值。

B.2 土样的增湿/减湿方法

B.2.1 重塑黄土样应采用制备不同含水率土样的方法实现土样的增湿/减湿，土样密度的差值应符合本标准B.1.2条的要求，土样含水率应以制备完成后测定的含水率做为实际含水率值。

B.2.2 原状黄土样的增湿可采用水膜转移法，减湿可采用自然风干法。

B.2.3 原状黄土样增湿/减湿主要仪器设备应符合下列规定：

1 环刀：内径79.8mm，2cm，内底面积50cm²，内体积100cm³，并符合《土工实验仪器 环刀》（SL370-2006）切土环刀和相关标准的规定。

2 天平：称重200g，分度值0.01g。

3 其他设备：烘箱、密封缸、橡胶吸水球、量筒、修土刀、玻璃板和盛土器等。

B.2.4 原状黄土样增湿的水膜转移法应符合下列规定：

1 预先测定原状土样的密度和天然含水率。

2 将环刀四周涂上一薄层凡士林，用切土器（或钢丝锯）将原状土块削成略大于环刀直径的土柱，然后将环刀垂直下压，边压边削，至土样伸出环刀为止。将两端留有一定的余土，先不削平。

3 根据增湿后的含水率，按照环刀体积的1.02~1.06倍，计算需要加入土样的水量。

每次增湿的含水率不应大于4%。

4 将环刀连同土样一起放置与干燥的玻璃板上，用橡胶吸水球分5~8次向环刀内土样表面均匀滴水。

5 滴水完成后将土样置于密封缸内静置48h，密封缸周围温度应控制在10℃~30℃之间。

6 取出土样后两头削平，作为试验土样；用削掉的土样测定含水率，以该含水率作为增湿后土样的含水率值。

B.2.5 原状黄土样减湿的自然风干法应符合下列规定：

1 预先测定原状土样的密度和天然含水率。

2 将环刀四周涂上一薄层凡士林，用切土器（或钢丝锯）将原状土块削成略大于环刀直径的土柱，然后将环刀垂直下压，边压边削，至土样伸出环刀为止。将两端留有一定的余土，先不削平。

3 将环刀连同土样一起放置与干燥的玻璃板上，置于室内在室温条件下阴干。阴干时间可根据需要减湿的水量和室内温度和湿度情况选定，一般为12h~72h，阴干时不应将土样放置在阳光直射的地方。每次减湿的含水率不应大于4%。

4 阴干完成后，将土样置于密封缸内静置48h，密封缸周围温度应控制在10℃~30℃之间。

5 取出土样后两头削平，作为试验土样；用削掉的土样测定含水率，以该含水率作为减湿后土样的含水率值。

B.3 “先增/减湿后加压路径”非饱和黄土增/减湿变形试验

B.3.1 试验所用仪器设备应符合下列规定：

1 固结容器：由环刀、护环、透水板、加压上盖和量表架组成，即常规的固结仪。

2 加压设备：可采用量程为 5kN~10kN 的杠杆式、磅秤式或其他加压设备。

3 变形测试设备：百分表量程 10mm，分度值为 0.01mm，或最大允许误差应为 $\pm 0.2\%F.S$ 的位移传感器。

4 其他：天平、秒表。

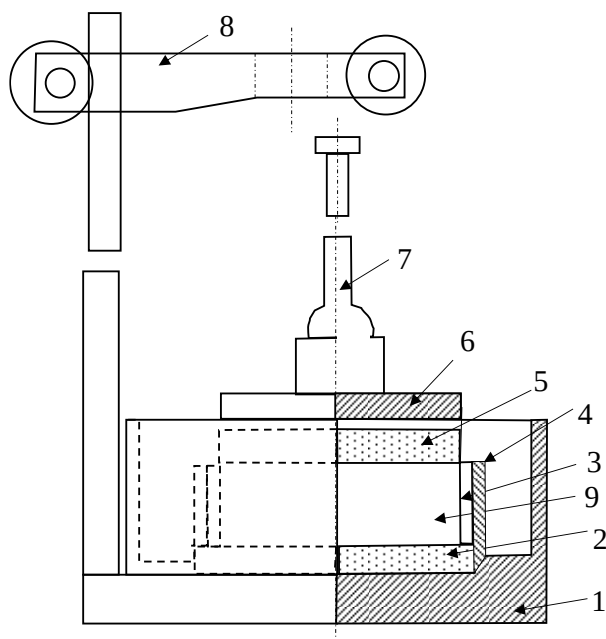


图 B.3.1 固结容器示意图

1—水槽；2—护环；3—环刀；4—导环；5—透水板；6—加压上盖；

7—位移计导杆；8—位移计架；9—试样

B.3.2 初始含水率土样的压缩与湿陷试验应按下列步骤进行：

1 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸，将带有环刀的初始含水率试样小心装入护环中，然后在试样上放薄滤纸、透水板和加压盖板，置于加压框架下，对准加压框架的正中，安装量表。

2 为保证试样与仪器上下各部件之间接触良好，应施加 1kPa 的预压压力，然后调整量表，使读数为零。

3 确定需要施加的各级压力，并分级施加压力，压力等级宜为 50kPa、100kPa、150kPa、200kPa，大于 200kPa 后每级增量为 100kPa。

4 施加第一级压力后，每隔 1h 测定一次变形读数，直至试样变形稳定为止。稳定标准应符合本标准第 B.1.4 条的规定。

5 试样在第一级压力下变形稳定后，施加第二级压力，以此类推。试样在规定的压力变形稳定后，向容器内自上而下或自下而上注入纯水，水面宜高出试样顶面，每隔 1h 测记一次变形读数，直到试样变形稳定为止。

6 测记试样浸水变形稳定读数后，迅速拆卸仪器各部件，取出带环刀的试样。当需要测定试验后含水率时，则用干滤纸吸去试样两端表面上的水，测定其含水率。

B.3.3 土样规定压力下的湿陷系数应按下式计算：

$$\delta_s = \frac{h_{p0} - h'_{p0}}{h_0} \quad (\text{B.3.3-1})$$

式中： δ_s — 某一级压力下的湿陷系数；

- h_{p0} — 在某级压力下，试样变形稳定后的高度（mm）；
- h'_{p0} — 在某级压力下，试样浸水变形稳定后的高度（mm）；
- h_0 — 试样的原始高度（mm）。

B.3.4 增湿或减湿到某一含水率的非饱和黄土压缩与湿陷试验应符合下列要求：

- 1 试验所用仪器设备应符合本标准第 B.3.1 条的规定。
- 2 试验步骤应符合本标准第 B.3.2 条的规定，但所用试样应为增湿或减湿到某一含水率的试样。

B.3.5 规定的压力下的“先增/减湿后加压路径”非饱和黄土增/减湿变形系数应按下式计算：

$$\delta_w = \frac{h_{p0} - h_{pw}}{h_0} \tag{B.3.3-2}$$

- 式中： δ_w — 某一级压力下，“先增/减湿后加压路径”的增湿或减湿变形系数；
- h_{p0} — 在某级压力下，初始含水率的试样变形稳定后的高度（mm）；
 - h_{pw} — 在某级压力下，增湿或减湿到某含水率试样变形稳定后高度（mm）；
 - h_0 — 试样的原始高度（mm）。

B.3.6 应以压力为横坐标，增/减湿变形系数为纵坐标，绘制增湿或减湿变形系数随压力变化曲线，见图 B.3.6。

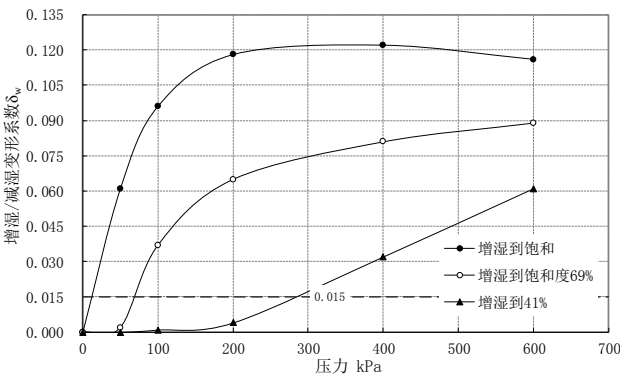


图 B.3.6 增湿或减湿变形系数随压力变化曲线

B.3.7 本试验的记录格式应符合表 B.3.7 的规定。

表 B.3.7 “先增/减湿后加压路径”非饱和黄土增/减湿变形试验记录

任务单号		试验者	
试样编号		计算者	
仪器名称与编号		校核者	
试验方法		试验日期	
环刀号：	仪器号：	环刀号：	仪器号：

经过时间 (h)	初始状态试样					增/减湿到 $w=(\quad)\%$ 状态试样				
	含水率 $w(\%)$					含水率 $w(\%)$				
	初始干密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$					初始干密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$				
	土粒相对密度 G_s					土粒相对密度 G_s				
	试样初始高度 $h_0(\text{cm})$					试样初始高度 $h_0(\text{cm})$				
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	浸水	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	浸水
1										
2										
.....										
仪器变形量 (mm)										
试样变形量 (mm)										
饱和湿陷系数										
增/减湿 变形系数										

B.4 “先加压后增湿路径”非饱和黄土增湿变形试验

B.4.1 试验所用仪器设备应符合下列规定：

- 1 固结容器、加压设备和变形量测设备与本标准B.3.1条所用仪器一致。
- 2 透水板应采用钢制或者铜制多孔板来减小其吸水量。
- 3 在加压盖顶部进水孔上设置进水管，进水管上设置进水阀，并于进水罐相连。
- 4 其他：天平、秒表、量筒。量筒的精度应小于0.5ml。

B.4.2 “先加压后增湿路径”的增湿变形试验应按下列步骤进行：

1 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸，将带有环刀的初始含水率试样小心装入护环中，然后在试样上放薄滤纸、透水板和加压盖板，置于加压框架下，对准加压框架的正中，安装量表。

2 在加压盖顶部进水孔安装进水管与进水罐，关闭进水阀。

3 为保证试样与仪器上下各部件之间接触良好，应施加 1kPa 的预压压力，然后调整量表，使读数为零。

4 确定需要施加的各级压力，并分级施加压力，压力等级宜为 50kPa、100kPa、150kPa、200kPa，大于 200kPa 后每级压力增量为 100kPa。

5 施加第一级压力后，每隔 1h 测定一次变形读数，直至试样变形稳定为止。稳定标准应符合本标准第 B.1.4 条的规定。试样在第一级压力下变形稳定后，施加第二级压

力，以此类推。

6 按增湿后的土样含水率与初始含水率的差值计算需要加入试样的水量。

7 待试样在规定的压力下变形稳定后，用量筒向进水罐内注水，注水量为以上计算的水量值，并使进水罐内水位高于试样顶面 1~2cm。

8 打开进水阀，自上而下向试样注水，每隔 1h 测记一次变形读数，直到量水管内水全部注入试样且试样变形稳定为止，期间应保证进水阀处于打开状态。

9 第一级增湿注水完成后，可在压力不变的情况下进行第二级增湿注水，以此类推，直到土样完全饱和为止。测记每级增湿注水变形稳定后的变形读数。

B.4.3 规定的压力下的“先加压后增湿路径”非饱和黄土增湿变形系数应按下式计算：

$$\delta_w' = \frac{h_{po}' - h_{pw}'}{h_o} \quad (\text{B.4.3})$$

B.4.4 应以压力为横坐标，增湿变形系数为纵坐标，绘制增湿变形系数随压力变化曲线。

B.4.5 本试验的记录格式应符合表B.4.5的规定。

表 B.4.5 “先加压后增湿路径”非饱和黄土增湿变形试验记录

任务单号		初始含水率 $w(\%)$		试验者			
试样编号		初始干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$		计算者			
仪器名称与编号		土粒相对密度 G_s		校核者			
试验方法		试样初始高度 $h_0(\text{cm})$		试验日期			
环刀号：增湿前施加的最大压力(kPa)：							
经过时间 (h)	试样在压力作用下注水增湿的变形						
	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	() (kPa)	加水至() (%)	加水至() (%)	加水至() (%)
1							
2							
.....							
仪器变量量 (mm)							
试样变量量 (mm)							
增湿变形系数							

附录 C：黄土隧洞试坑浸水试验

C.1 一般规定

本试验适用于测试浸水条件下隧洞黄土地层湿陷量、围岩接触压力、混凝土衬砌应力的实测值。

C.2 黄土隧洞现场浸水试验

C.2.1 黄土隧洞试坑浸水试验的试坑应设置在隧洞正上方，宜挖成圆形或方形，其直径或边长不应小于隧洞顶部以上黄土覆盖层深度，并不应小于 10m；试坑深度宜为 0.5m，最深不应大于 0.8m。坑底宜铺 100mm 厚的砂砾石。

C.2.2 试坑内应对称设置观测黄土湿陷的深标点，最大埋设深度应大于室内试验确定的自重湿陷下限深度，各湿陷性黄土层分界深度位置宜布设有深标点。在试坑底部，由中心向坑边以不少于 3 个方向，均匀设置观测湿陷的浅标点。在试坑外沿浅标点方向 10m 或 20m 内设置地面观测标点。观测精度宜为 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

C.2.3 试坑内应设置观测黄土体积含水率的监测点，最大埋设深度应大于室内试验确定的自重湿陷下限深度，各湿陷性黄土层分界深度位置宜布设有监测点。由中心向坑边以不少于 2 个方向，均匀设置监测点。在试坑外沿监测点方向 5m 或 10m 内设置监测点。

C.2.4 隧洞混凝土衬砌应在拱顶、拱肩、拱腰及拱脚等位置设置观测混凝土应力的监测点。监测元器件采用光纤光栅传感器和应变计等元器件。量测时将应变计埋入混凝土内，通过频率测定仪测出应变计振动频率，然后从事先标定出的频率-应变曲线上求出应变，再转求应力。量测时将光纤光栅传感器成对的埋入混凝土内，通过光纤光栅解调仪获得不同时刻的波长，然后再把波长转换为混凝土的应变值，求出应力。测定混凝土应力时，根据具体情况和要求，定期进行测量，每次每个测点的测量不小于三次，力求测量数据可靠、稳定，并做好原始记录。

C.2.5 隧洞应在仰拱外侧拱脚处设置观测围岩接触压力的监测点。该处围岩接触压力是指围岩与初期支护之间接触压力。振弦式压力盒是目前监测接触压力普遍使用的元器件。在埋设压力盒时，要求接触紧密，防止接触不良。埋设好压力盒后应将其电缆统一编号，并集中放置于事先设计好的铁箱内，以免被压断、拉断。观测时，根据具体情况及要求，定期进行测量，每次每个压力盒的读数不少于三次，力求测量数值可靠、稳定，并做好原始记录。

C.2.6 试坑内的水头高度不宜小于 300mm。在浸水过程中，应先测湿陷量、耗水量、浸湿范围和地面裂缝。湿陷稳定后可停止浸水，稳定标准为最后 5d 的平均湿陷量小于 1mm/d。

C.2.7 设置观测标点前，可在坑底面打一定数量及深度的渗水孔，孔内应填满砂砾。

C.2.8 应在试坑内停止浸水前，测试湿陷性土层的饱和度。

C.2.9 试坑内停止浸水后，应继续观测不少于 10d，且最后连续 5d 的平均下沉量不大于 1mm/d，试验终止。

附录 D：黄土湿陷变形的离心机试验

D.1 一般规定

D.1.1 本试验适用于测定黄土渠道地基湿陷性，可替代现场浸水试验，试验组数应每 5km 做 1 组。

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

D.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比换算到原型。主要物理量的相似比如表 D.1.3 所示。

表 D.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	相似比	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。

D.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 材料的断裂力学性能模拟试验应考虑颗粒尺寸效应。
- 3 模型尺寸的相对误差不应大于 2%。
- 4 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%。

D.1.5 当不具备采用原型材料条件时，可采用替代材料，但应检验相应的相似准则，当某些物理量的相似比出现矛盾，应确保满足主要物理过程的相似比。

D.1.6 在黄土地区场地周边开挖探井，探井揭露场地地层由上到下排列，若有耕作层较

薄需要挖除，按照场地土层结构，结合各土层含水率、密度情况，将分层的模型基本情况列出。

D.1.7 模型设计应依据离心机的有效荷重、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。

D.1.8 离心模型试验一般模型尺寸小、试验空间狭小，试验测试宜选用体积小、精度高、性能好的微型传感器，同时宜合理选用传感器的量程和精度，以满足试验观测要求。

D.1.9 根据初步确定的模型率 N 值，可按原型几何尺寸缩小至 $1/N$ 制作模型。若模型箱的尺寸不能满足模型尺寸要求，可适当增大 N 值或更换模型箱。

D.1.10 静力离心试验中，离心加速度随转臂长度变化，应根据模型土的高度确定有效加速度计算的有效半径。由于模型中加速度分布与半径有关，因此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。

D.1.11 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。

D.2 试验设备

D.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 D.2.1。

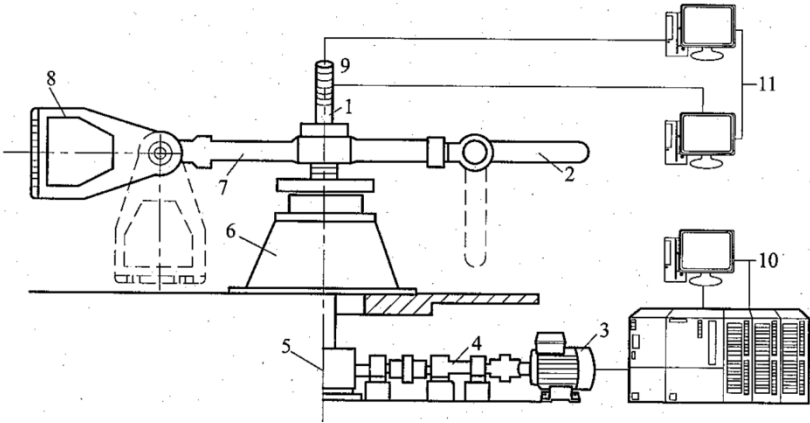


图 D.2.1 土工离心机主要组成部件

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

D.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。

D.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。

D.2.4 模拟原状黄土实际浸水工况，可参考图 D.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。

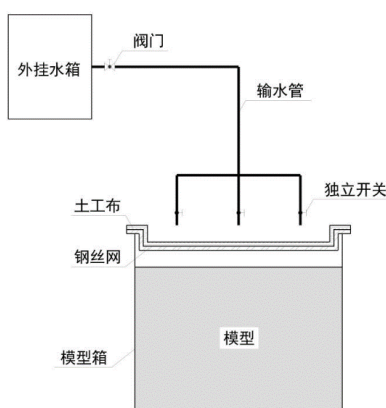


图 D.2.4 浸水装置整体立面图

D.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。

D.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。

D.3 试验程序

D.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 先将典型层原状土样按照预定的尺寸切削平整, 为了保证每层土样的高度和平整度符合要求, 削样时当土样接近目标尺寸时, 将土样放入提前制作好的模具中修整, 模具的高度与土样目标高度应相同, 长、宽比土样目标尺寸宜略大。
- 3 削好的土层应按照原场地顺序, 将模型材料中分好的多层模型土样叠合整齐, 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, 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%。
- 4 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。
- 5 标记点是采用泡沫板制成的最大直径约 0.5cm 的不规则薄片, 厚度约 0.2mm 为宜。
- 6 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。
- 7 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。

D.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模型薄层, 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模拟场地湿陷。该方法能够较好的反映工程实际, 但土层多, 模型制作困难。由于应力状态不同、土性不同, 各层土的 β_0 值均有区别, 因此应优先采用本方法。
- 3 典型层模拟的方法是根据场地实际选取一个典型层, 按照典型层的密度和含水率等情况制作模型, 将模型放入离心机中施加指定的加速度模拟场地湿陷情况, 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 to 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/现场浸水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。

附录 E：自重湿陷性黄土砂井浸水试验

E.1 一般规定

E.1.1 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。

E.1.2 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。

E.1.3 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。

E.1.4 井口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。

E.1.5 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。各监测点布设方案可参考图 E.1.5-1~E.1.5-2。

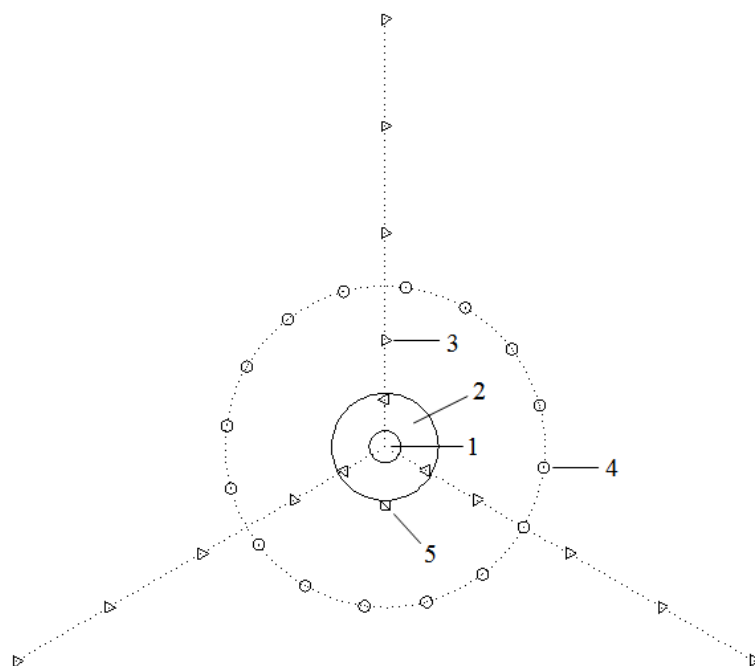


图 E.1.5-1 砂井浸水试验各标点布设平面示意图

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

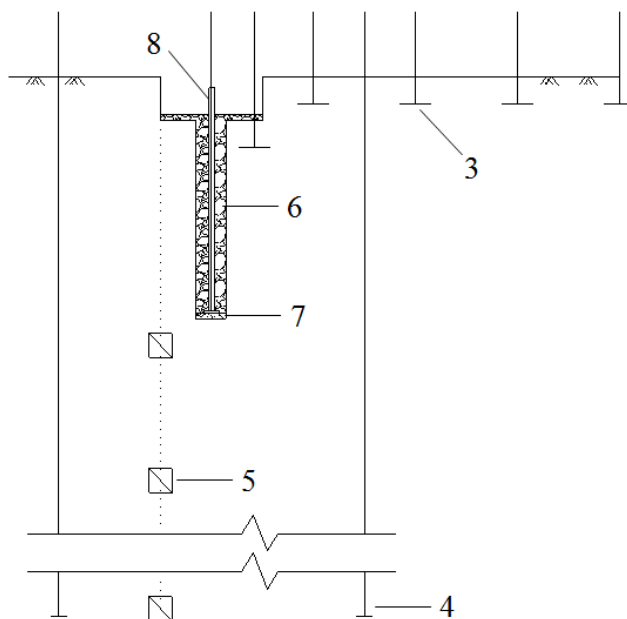


图 E.1.5-2 砂井浸水试验各标点布设剖面示意图

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

E. 2 仪器设备

E.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。

E.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 的钢卷尺最为读数标杆。

E.2.3 水分计: 埋设于不同深度, 监控浸水影响内对应深度含水率的变化。

E.2.4 沉降观测装置: 宜满足二级变形精度要求的水准仪。

E. 3 操作步骤

E.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 E.0.3-1~E.0.3-2, 其次序与要求如下:

- (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。

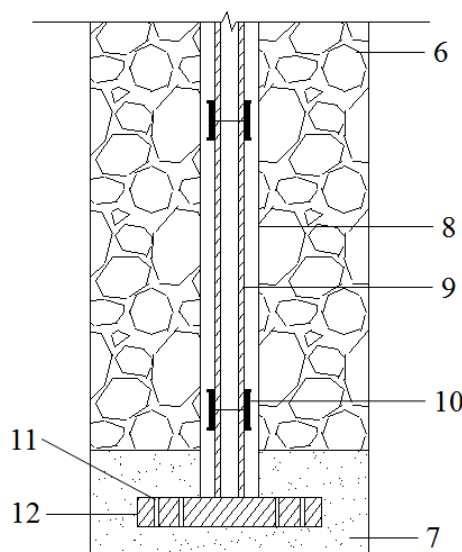


图 E.3.1-1 井内结构详图

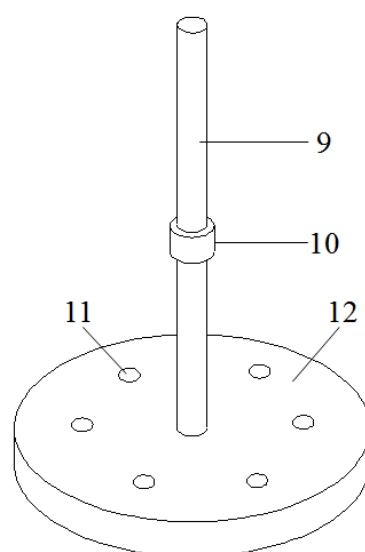


图 E.3.1-2 井内承载板详图

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。

3 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。

4 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) 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井底，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 E.3.1-3 所示。

(2) 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。

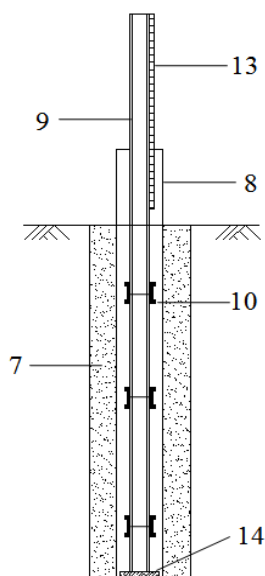


图 E.3.1-3 深标点结构图

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。

(3) 水分计埋设：下放埋设水分计，校值埋设前后的读数，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夯实，进行回填，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。

(4) 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。

E.3.2 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。

E. 4 试验资料整理

E.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。

E.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。

E.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只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。

E.4.4 砂井浸水试验记录应按附录 E 表 E.4.4-1、表 E.4.4-2 填列。

表 E.4.4-1 浸水试验沉降观测记录表

工程名称：		试验深度：		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)	(m)		(m)	(m)	(m)

表 E.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 F：非自重湿陷性黄土砂井加载浸水试验

F.1 一般规定

F.1.1 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。

F.1.2 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，填直径宜为 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 F.1.2-1~F.1.2-3。

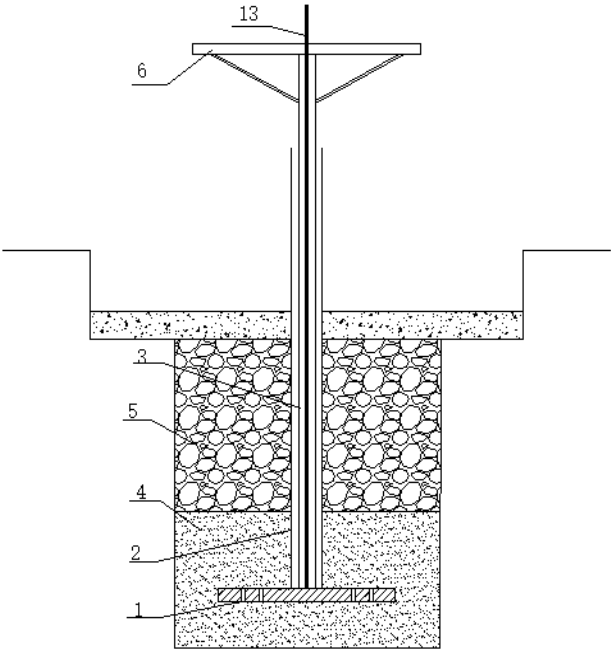


图 F.1.2-1 砂井底部构造图

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-水准仪数字条码纸贴

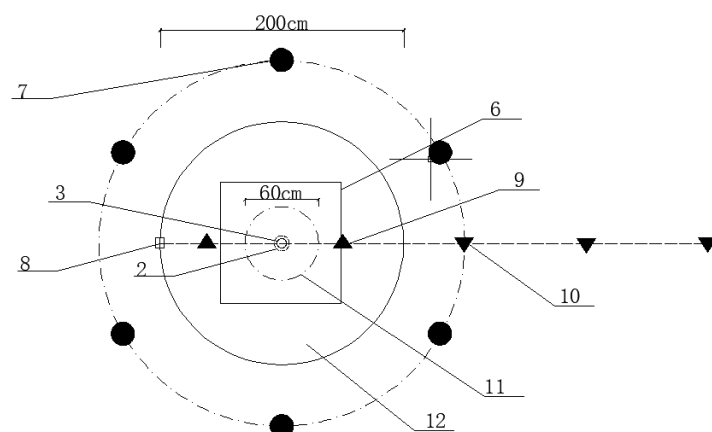


图 F.1.2-2 砂井顶部构造图

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

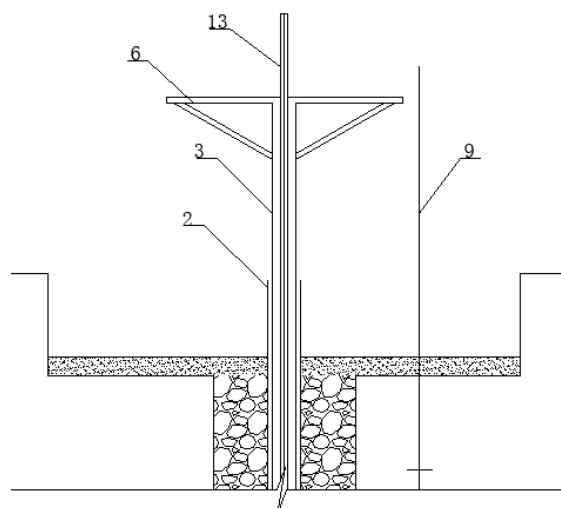


图 F.1.2-3 砂井顶部剖面图

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

F.1.3 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。

F.1.4 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。

F.1.5 在深标点埋设位置开挖直径为 40cm，深 50cm 的坑，清理弃土，平整坑底，放入足够长的沉降杆，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。

F.1.6 堆载平台与承载钢管在中心处对接焊接，平台构造如图 F.1.6 所示。堆载平台上加加载混凝土块，测量其变形量，待变形稳定后再浸水。

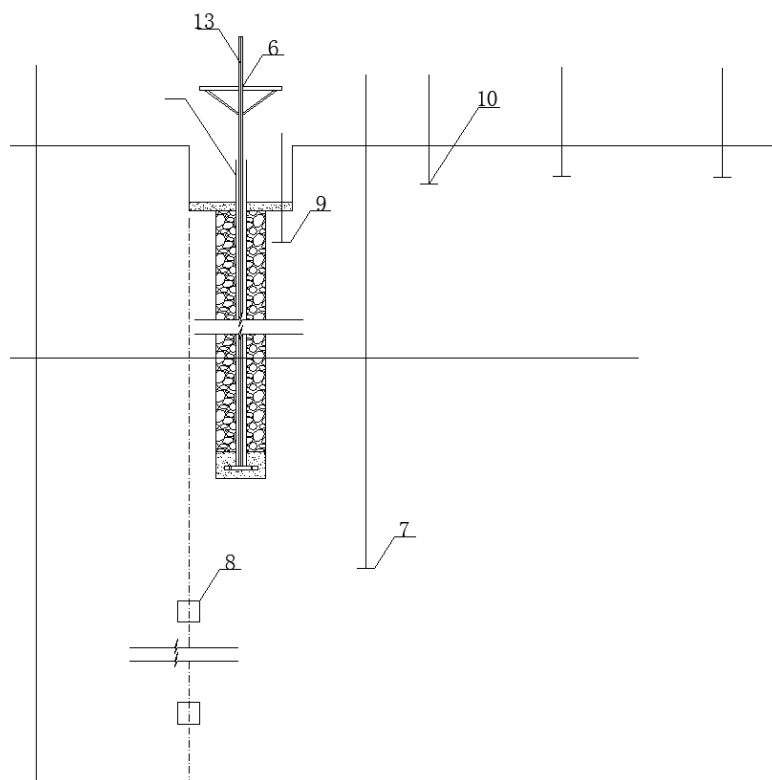


图 F.1.6 砂井剖面图

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-水准仪数字条码纸贴

F.1.7 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 and 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。

F.1.8 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。

F.2 仪器设备

F.2.1 承载钢管：下部与沉降板连接，上部接堆载体，直径不宜小于 10cm，不应大于 15cm，管壁厚宜为 3cm 的钢管。

F.2.2 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 3~5cm。

F.2.3 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。

F.2.4 水分计：埋设于不同深度，监控土层湿度变化。

F.2.5 沉降观测装置：在沉降监测杆上方粘贴水准仪数字条码纸。

F.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。

F.3 操作步骤

F.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 F.3.1-1~图 F.3.1-2，其次序与要求如下：

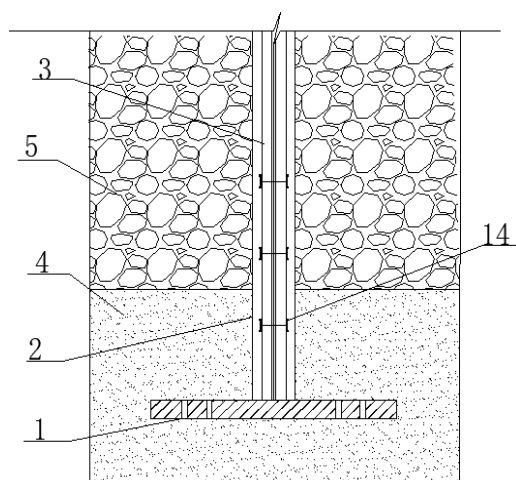
(1) 向井内灌入一定量的中细砂，使井底形成约 10cm 厚的砂垫层；

(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) 回填砾石厚度约 20cm，在上部堆放荷载，在井口处开挖直径 2m，深 60cm 的试坑。



F.3.1-1 井内结构详图

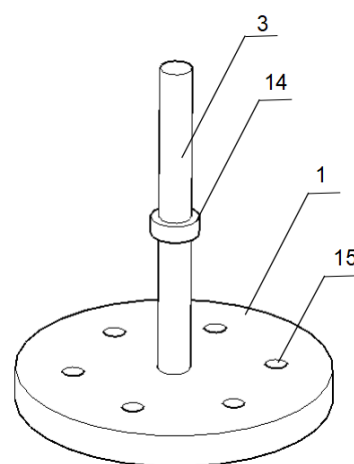


图 F.3.1-2 井内承载板详图

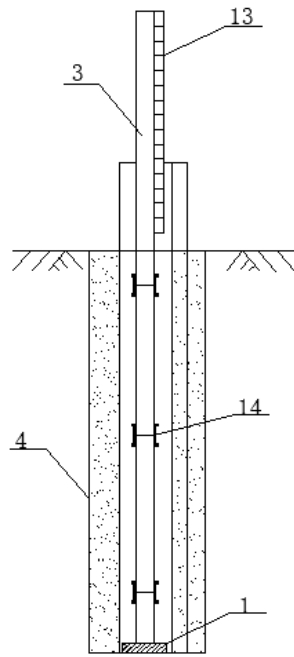
1-带孔沉降板；2-PVC 管；3-承载钢杆；4-中细砂；5-砾石层；14-钢接头；15-透水孔

3 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。

F.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 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井底，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水准仪数字条码纸的标杆。其构造如图 F.3.2 所示。

2 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，连接带有水准仪数字条码纸的标杆，确保标杆竖直，并分层回填素土夯实。



F.3.2 深标点结构图

1-带孔沉降板；3-承载钢杆；4-中细砂；13-水准仪数字条码纸贴；14-钢接头

3 水分计埋设：下放埋设水分计，经理设前及埋设后的读数校值，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进行分层回填夯实，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，回填用素土夯实，保证浸水过程中不会由于孔内渗透速度的增大，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。

4 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，防止浸水过程中侧壁坍塌。

F.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。

F.4 试验资料整理

F.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。

F.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。

F.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。

F.4.4 砂井浸水试验记录应按附录 F 表 F.4.4-1、表 F.4.4-2 填列。

表 F.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)						

表 F-1-2 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 G：黄土结构压缩屈服湿陷变形评价方法

G.1 应用条件

使用本方法分析评价黄土场地与地基的湿陷性时，应先对评价的场地进行勘探，鉴定岩芯并对每米深度处的土样进行基本的土工试验，取得三相比指标及液塑限指标，按照以下步骤进行计算。

G.2 黄土初始结构性指标（构度指标）计算

G.2.1 黄土构度指标的表达式为：

$$m_u = \frac{q_{uo}}{q_{ur}} \cdot \frac{q_{uo}}{q_{us}} \quad (G.2.1-1)$$

式中： q_{uo} 、 q_{ur} 、 q_{us} 分别为原状土、重塑土、饱和原状土的无侧限抗压强度。

不同物理状态下黄土的构度指标 m_u ，可通过原状土、重塑土、饱和原状土的无侧限抗压强度试验，由式 (G.2.1-1) 计算得到，也可采用黄土综合物理指标 Z 与构度指标 m_u 的经验关系式 G.2.1-2~G.2.1-4 计算。

$$Q_3 \text{ 黄土: } m_u = 10.7e^{-0.1Z} + 1 \quad (G.2.1-2)$$

$$\text{西安 } Q_2 \text{ 黄土: } m_u = 2.9e^{-0.1Z} + 1 \quad (G.2.1-3)$$

$$\text{兰州 } Q_2 \text{ 黄土: } m_u = 5.4e^{-0.1Z} + 1 \quad (G.2.1-4)$$

式中： e 为自然对数的底数； Z 为黄土的综合物理指标，其表达式如下：

$$Z = \frac{(w - w_p)}{(G_s + e_0)} \cdot \frac{G_s^2}{1 + e_0} \quad (G.2.1-5)$$

式中： w 、 G_s 、 e_0 、 w_p 分别为黄土的含水率（%）、颗粒比重、初始孔隙比和塑限（%）。

G.3 黄土结构压缩屈服应力计算

G.3.1 不同物理状态下黄土的结构压缩屈服应力 p_{sc} 可采用卡萨格兰德(Casagrande, A.) 法取得，也可采用结构压缩屈服应力 p_{sc} 与构度 m_u 之间的关系式 G.3.1-1~G.3.1-2 计算。

$$Q_3 \text{ 黄土: } p_{sc} = 0.39m_u p_a \quad (G.3.1-1)$$

$$Q_2 \text{ 黄土: } p_{sc} = (0.8m_u + 6.0)p_a \quad (G.3.1-2)$$

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

G.4 黄土压缩曲线的描述

G.4.1 不同物理状态下黄土的压缩曲线可用式 G.4.1-1~G.4.1-2 描述。

$$Q_3 \text{ 黄土: } \begin{cases} e = e_0 e^{-0.1 \left(\frac{p}{p_{sc}} \right)^{0.8}}, & p \leq p_{sc} \\ e = 1.6 e_0 e^{-0.57 \left(\frac{p}{p_{sc}} \right)^{0.26}}, & p > p_{sc} \end{cases} \quad (G.4.1-1)$$

$$Q_2 \text{ 黄土: } \begin{cases} e = e_0 e^{-0.14 \left(\frac{p}{p_{sc}} \right)^{0.7}}, & p \leq p_{sc} \\ e = 1.6 e_0 e^{-0.61 \left(\frac{p}{p_{sc}} \right)^{0.27}}, & p > p_{sc} \end{cases} \quad (G.4.1-2)$$

式中: p 为实际的压力值; e 为压力 p 作用下压缩稳定后黄土的孔隙比。

G.5 湿陷系数的计算

G.5.1 压力 p 作用下黄土的湿陷系数 δ_s , 可用式(G.5.1)计算:

$$\delta_s = \frac{e_p - e_p'}{1 + e_0} \quad (G.5.1)$$

式中: e_p ——天然含水率的原状试样, 压力 p 作用下压缩稳定后的孔隙比;

e_p' ——饱和 (饱和度 $S_r=0.85$) 含水率的原状试样, 压力 p 作用下压缩稳定后的孔隙比。

G.5.2 e_p 与 e_p' 可通过以下步骤获得:

1 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) 由式 (G.2.1-5) 分别计算天然与饱和状态下黄土的综合物理指标 Z 与 Z' , w_{sat} 为黄土浸水后的含水率;

2 由式 (G.2.1-1~G.2.1-4) 分别计算天然与饱和状态下黄土的构度指标 m_u 与 m_u' ;

3 由式 (G.3.1-1~G.3.1-2) 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}' ;

4 由式 (G.4.1-1~G.4.1-2) 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' 。

若计算自重湿陷系数, 压力 p 为饱和 ($S_r=0.85$) 时计算点处黄土的竖向自重应力。

若计算增湿条件下的湿陷系数, 则步骤 1 中浸水后的含水率采用增湿后的含水率即可。

G.6 湿陷量的计算

G.6.1 计算各层黄土实际压力作用下的湿陷系数 δ_{si} , 将其代入式 (G.6.1) 即可得黄土地基的湿陷量。

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \delta_{si} h_i \quad (\text{G.6.1})$$

式中： δ_{si} ——地基中第 i 层土实际压力下的湿陷系数。

h_i ——地基中第 i 层土的厚度 (mm)；

黄土地基湿陷量的计算值 Δ_s ，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。

G.7 湿陷性评价

黄土地基的湿陷性，根据上述计算所得的地基自重湿陷量 Δ_{zs} 和实际压力下的湿陷量 Δ_s ，按相应工程地基湿陷性的规定进行评价。

附录 H：基于“最大可能增湿变形量”的黄土场地湿陷性评价方法

H.1 评价量

H.1.1 以实际压力下地基的“可能增湿变形量” Δp 为评价量。

H.1.2 可能增湿变形量是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。其要素有两个,即:实际压力和最大可能的实际浸湿程度,也就是实际上最大可能发生的浸湿含水率或者饱和度。该值是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。

H.1.3 可能增湿变形量采用实际压力作为上覆压力,就不再需要区分自重湿陷和非自重湿陷。

H.2 评价量的计算方法

H.2.1 现场取样开展系列室内试验,取得增湿变形系数、土水特征曲线和渗透系数等计算参数;进行非饱和渗流场数值计算,得到地基的可能湿度场;由湿度场和增湿变形系数仍采用分层总和法计算可能增湿变形量。具体方法为:

采用人工探坑开挖的方法进行取样,取样深度为整个黄土层厚度,每 1 m 取得土样 1 组,分层开展以下室内试验工作,以取得湿陷评价基本参数。试验工作主要有:含水率、密度、比重、颗粒分析、界限含水率等基本物理性质试验;黄土土水特征曲线;黄土饱和渗透系数,对于冻土地区,表层受冻融影响的土层和防渗层应该测定受到多次冻融循环的土样的饱和渗透系数;采用单线法或者双线法进行各层黄土压缩试验,测定各层黄土达到饱和时的湿陷系数,最大上覆荷载根据黄土层上覆荷载确定,最小达到 400 kPa 以上。同时计算各层黄土的湿陷起始压力;选择典型土层,测定从初始饱和度增湿到不同饱和度(从非饱和到饱和含水率)各级压力下的黄土压缩试验,得到增湿到不同饱和度时的增湿变形系数。

定义不同地层的从初始含水率(由取样测定得出)增湿到不同饱和度时的增湿变形系数与完全饱和湿陷系数的比值称为折算比值 α ,其计算公式为:

$$\alpha = \frac{\delta'_s}{\delta_s} \times 100 \quad (\text{H.2.1})$$

式中: $\alpha, \delta_s, \delta'_s$ 分别为折算比值(%),完全饱和湿陷系数和增湿到某一饱和度时的增湿变形系数。

湿陷和非湿陷的界限标准仍以湿陷系数达到 0.015 为准。绘制完全饱和下湿陷系数与上覆压力的关系曲线,以及折算比值与饱和度、上覆压力的关系曲线。

H.2.2 采用非饱和渗流有限元方法计算渠道渗流场,得出渠道在校核水位下地基黄土层的饱和度分布场。计算中考虑防渗系统的影响(不考虑板膜结构的防渗作用)。计算地基黄土层的体积含水率或者饱和度的分布场(即湿度场),为增湿变形计算提供基础。

H.2.3 由湿度场并根据增湿试验结果选择折算比值 α ,采用实际上覆压力,用分层总和法计算出地基的“可能增湿变形量”,用之评价地基的湿陷性。可能增湿变形量 Δp 的计算公式如下:

$$\Delta_p = \beta_0 \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_{si} h_i \quad (\text{H.2.3})$$

式中: Δ_p 为可能增湿变形量,单位 mm; α_i 为第 i 层土在实际压力下增湿到某个饱和度时的折算比值; δ_{si} 为第 i 层土在实际压力下的饱和湿陷系数; h_i 为第 i 层土的土层厚度,单位 mm; β_0 地区修正系数。

对于挖方地基直接按照以上方法进行计算即可。对于填方地基,计算实际上覆压力时应该考虑上部填土的作用荷载引起地基内的附加应力,将自重和附加应力之和作为计算面的上覆压力,同时计算渗流场时考虑填土的影响,计算起算面从填筑基面算起。对于半挖半填渠道应该按照填方进行计算,计算基面应该从渠道水面算起,且考虑填方部位填土的增湿湿陷变形。

对于自重湿陷性黄土地基,直接按照以上方法进行。对于非自重湿陷性地基而言,若是挖方地基,由于渠道各个部位上覆压力均小于湿陷起始压力,而湿陷发生的两个必要条件是水的作用和压力的影响,压力小于湿陷起始压力黄土将不会发生湿陷,按照非湿陷地基考虑;若是填方地基和半挖半填地基,考虑填土的附加应力,根据实际上覆压力与相应位置黄土的湿陷起始压力对比判断是否湿陷,并按照实际上覆压力和考虑填土影响的渗流场进行增湿湿陷变形的计算。

以上公式计算的要点在于:(1)上覆压力采用实际压力,也就是每一层土均按照实际承受的压力计算,这个压力包括自重和附加荷载在该层位置的值;(2)折算比值的选取,折算比值需要根据实际计算的渗流场得到的不同位置的饱和度值和实际压力,在试验得出的折算比值曲线上用内插值法得到;(3)地区修正系数主要是室内试验与现场试验的差异、侧向挤出的影响等综合修正,依据黄土规范规定的方法进行。

H.3 评价标准

H.3.1 应由计算得到的可能增湿变形量按下表评价黄土地基的湿陷性等级。

表 H.3.1 基于“可能增湿变形量”的渠道工程黄土地基湿陷性等级表

Δ_p mm	$\Delta_p \leq 50$	$50 < \Delta_p \leq 150$	$150 < \Delta_p \leq 350$	$\Delta_p > 350$
湿陷等级	I	II	III	IV

说明： Δ_p 为地基可能增湿变形量的计算值，单位 mm。等级划分不再区分自重与非自重湿陷，而以实际荷载作用下的可能增湿变形量为评价标准。同时起算高程从顶部高程算起，计算中考虑局部开挖卸荷作用，按照顶部最小的开挖高度计算，这样偏于安全。

H.4 不同等级地基处理程度

H.4.1 考虑到水利工程是行水建筑物受水浸湿的可能性较大，在湿陷评价类别中设甲、乙、丙三级，不设丁级次要建筑物。其等级划分见表 H.4.1 所示。

表 H.4.1 水利工程重要性等级划分表

工程类别	特大型	大型	中型	中小型	小型
设计流量 m ³ /s	>300	300~100	100~20	20~5	<5
水利工程等级	1	2	3	4	5
湿陷评价建筑物类别	甲类		乙类		丙类

H.4.2 根据重要性等级和地基湿陷性等级确定是否需要进行地基处理。特大型和大型工程要进行专门的论证，以处理后消除全部湿陷量为标准确定地基处理方法；在考虑防渗措施的影响后，地基湿陷性等级为Ⅰ级，可以不做处理；在考虑防渗措施的影响后，中型和中小型工程，且湿陷等级为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级时，需要进行消除湿陷性的处理，处理后剩余湿陷量控制在 50 mm 之内；在考虑防渗措施的影响后，小型工程湿陷等级为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级时，处理后剩余湿陷量控制在 150 mm 之内。鉴于板膜结构防渗性能可靠度差，不能考虑板膜结构的防渗作用，只是考虑除板膜结构以外的垫层和防渗毯等防渗措施的防渗效果。此外，箱涵工程处理后的剩余湿陷量可以适当放宽到 150 mm。

附录 I： 轻量土换填减重消减黄土地基湿陷的方法

I.1 应用条件

I.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。

I.1.2 本方法的基本方法是在地基表层设置轻量土换填层，利于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。

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

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

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

$\Delta_{\text{换填层原湿陷量}}$ —由于轻量土本身不湿陷而减小的地基湿陷量，m；

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

I.2 轻量土换填材料

I.2.1 轻量土材料应符合下列规定：

1 轻量土主要分为水泥发泡型和素土加轻质材料混合型，其中，水泥发泡轻量土是由水泥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 $0.3 \sim 1.2 \text{g/cm}^3$ ；素土加轻质材料混合轻量土是由砂、水泥和轻质材料的 EPS 颗粒构成，单位体积重量在 $0.5 \sim 1.5 \text{g/cm}^3$ 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。

I.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、自然养护或蒸汽养护，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。

I.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，按需选择原料黄土、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。

I.3 轻量土换填设计

I.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实际上覆压力。
- 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。

I.3.2 对于水利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。

I.4 换填施工工艺

I.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。

I.4.2 应将施工范围内的植被、杂物及腐殖质土清除干净，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。

I.4.3 应对场地进行初步处理，包括开挖与基底精平与碾压，基底压实度要求不小于 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。

I.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。

I.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。

I.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 20cm,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。

I.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。

I.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。

I.5 质量检测

I.5.1 分层施工中,对基底采用环刀压入法,检测压实度,要求不小于 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。

I.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

水利工程湿陷性黄土地基处理技术规程

T/ CHES: XXXX—2022

条 文 说 明

目录

1 总则	82
3 基本规定	83
4 勘察与湿陷性评价	84
4.2 现场勘察	84
(I) 渠道工程	84
(II) 隧洞工程	85
(III) 涵洞(管道)工程	85
(IV) 水池工程	86
(V) 其他水工建筑物	86
4.3 黄土湿陷性试验	87
4.4 渠道工程黄土场地湿陷性评价	87
4.5 隧洞工程黄土地基湿陷性评价	88
5 设计	90
5.2 处理原则与标准	90
5.3 工程处理设计	91
(I) 渠道工程	91
(□) 隧洞工程	93
(□) 其他水工建筑物	94
(□) 水池工程	95
6 施工	97
6.1 一般规定	97
6.2 换填法	97
6.3 预浸水法	98
6.4 强夯法	99
6.5 挤密法	102
6.6 水泥搅拌法	108
6.7 高压喷射法	109
6.8 灌浆法	111
6.9 桩基础	112
7 质量检查与验收	114
7.1 一般规定	114
7.2 质量检查与验收	114
8 监测与维护	116
8.1 一般规定	116
8.2 监测	116
8.3 运行维护	116
附录 I	118

1 总则

1.0.2 水利蓄水建筑物包括水库、水塘、蓄水池等；水利输水建筑物包括渠道、隧洞、管涵、倒虹吸、渡槽等；水利工程其他水工建筑物包含泵站、桥梁、水闸等节点建筑物。

3 基本规定

3.0.1 水利工程种类很多，按照使用功能可以划分为输水建筑物（渠道、隧洞、管涵、倒虹吸、渡槽等）、蓄水建筑物（水库、水塘、蓄水池等）、其他水工建筑物（泵站、桥梁、水闸等）。对水利工程分类分级是为了地基处理设计采取措施时区别对待，保证水利工程安全的同时，提高地基处理的实用性、经济性。

3.0.3 增强水工建筑物抵抗不均匀沉降的结构措施主要有 2 种：①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；②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。

3 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。

4 勘察与湿陷性评价

4.2 现场勘察

4.2.1 本条是在水利工程常规区域地质勘察规定的基础上,对湿陷性黄土地区水利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水利工程,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。

(I) 渠道工程

4.2.6 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和勘察方法。

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。

4.2.7 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。

表 4.2.5-1 为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) 隧洞工程

4.2.12 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和方法。

1 对于水利工程黄土隧洞来说，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，无自称能力。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 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 的有关规定。

(III) 涵洞（管道）工程

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。

4.2.17 本节规定了可行性研究阶段勘察方法。

2、3 勘探工作根据穿越方式而布置。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，一般按非穿越方式布置勘探工作。

4.2.18 本节规定了初步设计阶段涵洞及管道勘察内容和方法。

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。

4.2.19 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) 水池工程

4.2.23 本节规定了项目建议书阶段勘察方法。

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。

4.2.25 本节规定了初步设计阶段勘察方法。

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

4.2.28 1 对于点状建筑物水闸和泵站来说，地基黄土体湿陷深度及湿陷程度是勘察重点；对于点状建筑物陡坎、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 对于渡槽、管桥、倒虹吸来说，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本阶段勘察重点。渡槽、管桥、倒虹吸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办法,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。

4.3.3 本标准与《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。

4.3.5 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 渠道、涵洞和管道工程湿陷性评价

本标准采用实际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。但是对于水利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，因此本标准针对水利工程的特点采用实际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。采用实际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，作为输水建筑物的水利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，因此本标准采用实际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 H 列出了这种方法。

4.4.4 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。

4.5 隧洞工程黄土地基湿陷性评价

4.6.3 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。

5. 设计

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，应该在水利工程可承受的停运时长范围内得以修复。

大量的水利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，据调查已建水利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，水利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。通常水利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水利工程受益对象可承受的范围之内，以合理控制工程投资。

2 在线型输水的水利工程中，有不少关键的节点工程，常见的有：取水口、水闸、分水池、渡槽、管桥、泵站等，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 水利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、水泥土垫层等，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。

4 隧洞底板和侧壁围岩主要指高于隧洞设计水位 300mm 以下的部分。

5.3 工程处理设计

(I) 渠道工程

5.3.1 一般规定

1 应以实际上覆压力下黄土饱和湿陷量按表 1 确定渠基的湿陷性等级。

表 5.3.1 渠道工程黄土地基湿陷性等级表

Δp_s (mm)	$\Delta p_s \leq 50$	$50 < \Delta p_s \leq 150$	$150 < \Delta p_s \leq 350$	$\Delta p_s \geq 350$
湿陷等级	I	II	III	IV

进行湿陷性等级评价前应进行黄土年代、成因、地形地貌、厚度等工程地质和水文地质条件进行查明，并采取分层取样，通过室内试验（必要时进行现场试验）获取湿陷系数、湿陷起始压力等参数。随后基于计算获取的渠基在实际压力下的饱和湿陷量进行湿陷性评价，场地湿陷等级的划分不在区分自重和非自重湿陷性。

2 渠道等级划分按《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL252）执行。

3 当多种地基处理方法均能满足地基处理设计目的时，应比较其经济、环保、施工条件等因素，择优确定。本规范只涵盖了湿陷性黄土渠道实践中相对成熟的地基处理方法。

4 渠道耐久性有明确的定量要求，使用年限应符合《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》（SL654）。湿陷性黄土渠道地基耐久性设计应根据环境条件和工程正常使用寿命综合确定。

5 湿陷性黄土渠道地基处理设计前应收集的其他相关资料，邻近地下工程、建筑场地环境、施工用地大小、工期、当地材料、当地施工机械、施工难易程度和工程造价等所有与地基处理相关的信息。

5.3.2 挖填置换法

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、水泥土等。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度控制,1 级、2 级渠道的压实度不小于 0.95,3 级、4 级渠道的压实度不小于 0.93,其他渠道的压实度不小于 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。

5.3.6 防渗与排水

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。

(□) 隧洞工程

5.3.7 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。

5.3.9 挤密法

1 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 15m 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）。

2 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。

5.3.10 高压喷射法和水泥搅拌法

1 高压喷射法是借助于高压射流，通过冲击切割和强列扰动，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；水泥搅拌法是一种将水泥作为固化剂，利用搅拌桩机将水泥喷入土体并充分搅拌，使水泥与土发生一系列物理化

学反应，达到土体硬结而提高地基强度或消除湿陷性目的。

高压喷射法和水泥搅拌法均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。

高压喷射灌浆和搅拌固结方法应结合工程地质、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 高压喷射灌浆和水泥搅拌固结法处理湿陷性黄土、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。

(□) 水池工程

5.3.14 一般规定

1 湿陷性黄土场地受降水的影响、冲蚀，影响严重的往往会形成陷穴、塌落坑洞、发育冲沟等，危及水池的结构安全，应根据实际地表情况尽量在选址时避开，优先选址地势相对开阔平坦场地，并利于排水，避免外水集存造成湿陷性黄土地基受水湿陷。同时，水池下游区密集村落、工矿企业等，存在“头顶一盆水”，为保障的安全，防止可能发生意外事故造成人员伤亡或重大财产损失，宜避开。

2 湿陷性黄土场地上的水池关键在于防水，防止内（池内）水外渗和场地外水排水不畅而集存浸水地基，湿陷性黄土在浸水作用后，土中胶结连接强度丧失，孔隙比减小，土体结构迅速破坏，在外力作用下发生显著附加下沉，土体压缩，造成地基受水湿陷，导致水池失稳或产生过大的变形，甚至破坏，发生湿陷造成事故，因此应严格做好防渗漏措施对确保水池安全使用非常重要，并严格执行。

3 湿陷性黄土地基上的水池采取地基（池底、池周和围坝坝基）处理措施是满足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。

4 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。

5 受地质条件、外部周边（城镇、村庄和工矿企业）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。

7 水利工程的调蓄水池属水利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。

8 本条所界定的水池为具半挖半填的小型水库类调蓄水池，属水库工程，坝型为土石坝，根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》SL252，挡水坝高和上下游水头差以15m 和 10m 为界限区分山区、丘陵区和平原、海滨区建筑物的洪水标准，在相同建筑物级别下，对应的洪水标准有较大的差异，因而本条界定了坝高一般不超过 15m，蓄水深度一般不超过 10m，当超过该规定时，应进行必要的论证。

5.3.15 地基处理

1 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，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。

2 本条只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。

4 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。

(V) 其他水工建筑物

5.3.22 表 5.3.14 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经济性差的问题，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。

表 5.3.14 中所列方法可组合使用。如预浸水法与换填法、强夯法等组合使用。

5.3.23 水利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 水利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，起到防水侵入的作用，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 湿陷性黄土地基水利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。

6.1.4 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。水利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、水泥土垫层一般采用平碾、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。

6.2.8 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 ω_p （1%~3%）或 $0.6\omega_L$ （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 6.4-1 式的规定。否则应采取注水润湿或降低湿度措施。

$$\begin{cases} |\bar{\omega}_{op} - \bar{\omega}| \leq 6\% \\ 8\% \leq \omega \leq 24\% \end{cases} \quad (6.4-1)$$

式中， ω —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 ω 值按开夯标高下每 0.5~1.5m 厚度计取。 ω 范围值中的高含水率土层，宜位于处理厚度的底层。

$\bar{\omega}$ —土层处理深度内，土的天然含水率 ω 的加权平均值（%）。

$\bar{\omega}_{op}$ —土层处理深度内，土的最优含水率 ω_{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） $\bar{\omega}_L$ 取值。

$\bar{\omega}_L$ —土层处理深度内，土的液限含水率 ω_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 估算：

$$V = (\bar{\omega}_{op} - \bar{\omega})h \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (6.4-2)$$

式中， V —每平方米水畦面积浇水量（m³）。

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。

强夯法在水利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 7m，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 $500\sim 1000\text{m}^2$ 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 m^2 , 总库容约 230 万 m^3 , 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 20 m。选用间距 5 m 的三角形布置形式, 最大夯击能为 $4\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 进行 2 遍点夯, 然后用 $2\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的低能量各满夯 1 遍。强夯结束 7 d, 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 0.384 MPa^{-1} 降低到 0.165 MPa^{-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 m^3 , 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 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$, 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 $8000\text{ kN}\cdot\text{m}$, 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 $4000\text{ kN}\cdot\text{m}$; 第 4 遍满夯, 前后夯印搭接 1/4 锤底面积, 夯击能 $2000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。主、复夯夯击次数均为 7~9 击, 主夯最后两击夯沉量 $\leq 200\text{ mm}$, 复夯最后两击夯沉量 $\leq 100\text{ mm}$; 满夯夯击 2 击。夯锤直径 2.57 m, 锤高 1.23 m, 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 81 d 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。

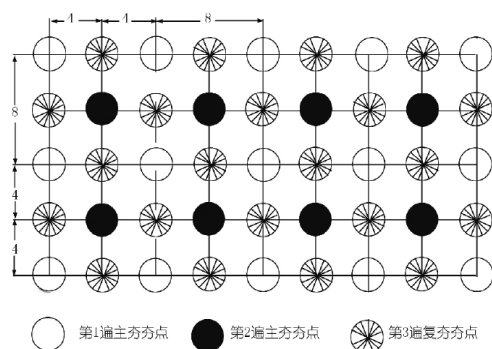


图 1 夯点布置示意图

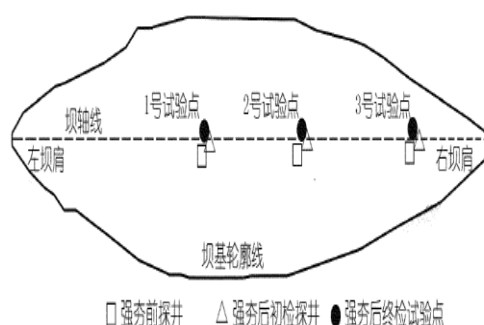


图 2 试验点平面布置示意图

初检和终检湿陷系数全部小于 0.015, $8000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 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。

6.5.6 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。

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。

6.5.8 为确保工程质量，避免施工中可能出现的问题，针对挤密地基施工的特点，对施工质量检验提出了规定。此规定是针对施工过程中的自检，不是第三方验收检测。

- （1）成孔质量检验的内容、数量等要求；
- （2）孔内回填质量检验的内容、数量等要求；
- （3）对预钻孔夯扩桩夯实质量检验的内容、数量等要求。

通过上述试验测试，所取得的结果和试验中所揭示的现象，可进一步验证设计内容和施工要求是否合理、全面，也是调整补充设计内容和施工要求的重要依据，以保证这些重要或大型工程的安全可靠及经济合理。

用挤密法时，应慎用预钻孔夯扩挤密（俗称 DDC）。若必须采用预钻孔夯扩挤密时，应加强施工控制和质量检测，确保夯扩填料直径到达设计要求。

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，在水利工程中也大量应用，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 $\times$ 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 15.3~18.0 mm。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 15.0 m 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 52.9 km。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陷量	可处理自重湿陷性黄土地，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	不适用

			围条件	
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, 地基土 $\omega \geq 24\%$ 、饱和度 $S_r > 65\%$, 不宜用挤密桩法	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%, 因此本工程可采用挤密桩法进行地基处理	适用
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 kPa, 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、	施工振动较大、与其他工序交叉较多、对初期支护要

	经济适用	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机。组合式无振动挤密机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<3.5t，长3.3m、高3.1m、宽1.6m，平面作业半径≥5m。组合式无振动挤密机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0.2~0.3m/min，深层土层成孔速率为0.1~0.2m/min。分离式无振动挤密机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12~18m/h，深层黄土层的成孔速率为6~12m/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、无振动挤密机的适应性及有效性，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 $S_1=0.8m$ ， $S_2=0.9m$ ， $S_3=1.0m$ ， $S_4=1.2m$ ，各孔均采用隔孔挤密成孔的方式。结果表明，当桩间为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规定要求（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 $S_1=0.8m$ ，湿陷和自重湿陷系数均为0.000~0.001；② $S_2=0.9m$ ，湿陷和自重湿陷系数均为0.000~0.002；③ $S_3=1.0m$ ，湿陷系数和自重湿陷系数均为0.000~0.001；④ $S_4=1.2m$ ，湿陷系数为0.002~0.005，自重湿陷系数0.002~0.009。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0.8~1.2m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土挤密桩处理,根据地基黄土层处理厚度,水泥土挤密桩桩长 6~12m,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、1m³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 4~6d 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 水泥搅拌法

6.6.1 每一个搅拌施工现场,由于黄土土质差异,固化剂品种不同,因而搅拌加固质量有较大差别。在正式搅拌桩施工前,均应按施工组织设计确定的搅拌工艺,制作数根试桩,最后确定水泥浆的水灰比、泵送时间、搅拌机提升速度和复搅深度等参数。

6.6.3 粉喷桩机一般均已考虑提升速度与搅拌头转速的匹配,在不同的提升速度下,钻头每提升不超过 15mm 搅拌一圈,从而保证成桩搅拌的均匀性。搅拌机施工时,搅拌次数越多,则拌和越均匀,水泥土强度也越高,但施工效率降低。试验证明,当加固范围内土体任一点的水泥土经过 20 次的拌和,其强度即可达到较高值。

6.6.4 根据搅拌法实际施工经验,在施工到顶端 300mm~500mm,因上覆土压力较小,搅拌质量较差。场地整平标高应比设计确定的基底标高再高出 300mm~500mm,桩制作时仍施工到地面,待开挖基坑时,再将上部 300mm~500mm 的桩体质量较差的桩段挖去。根据现场实践表明,当搅拌桩作为承重桩进行基坑开挖时,桩顶和桩体已有一定的强度,若用机械开挖基坑,往往容易碰撞损坏桩顶,因此基底标高以上 300mm 宜采用人工开挖,以围护桩头质量。

6.6.7 喷浆量及搅拌深度的控制,直接影响成桩质量,采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动记录,可有效控制成桩质量。搅拌桩施工检查是检查搅拌桩施工质量和判明事故原因的基本依据,因此对每一延米的施工情况均应如实及时记录。

(1) 河南神力集团污水处理改造工程,其主要构筑物包括调节池、初次沉淀池、

厌氧水解池、中间沉淀池、UBF 反应器等。该工程场区地层土为灰黄色粉土。从地表至 12.0~19.5m 范围内土层具有湿陷性，最大湿陷系数 0.098，总湿陷量最大值达 84.4cm，属 II 级或 III 级自重湿陷性黄土。由于该工程构筑物多为钢筋混凝土结构或钢结构，运行过程中地基基础受水浸湿的可能性极大，同时 UBF 反应器为直径 11m、高 12m 的圆形钢结构罐体，对基础变形要求较高，必须对地基进行处理，消除场地土的湿陷性。

采用基底下设置整片垫层结合水泥搅拌桩的综合治理方案。桩长 8~12.5m。桩径采用 500mm，桩距为 800~1000mm。每延米注入 32.5 级普通硅酸盐水泥不少于 55kg。施工时基础垫层以下、桩顶以上 700mm 范围内的土层采用三七灰土并夯实，使上部荷载均匀地传递到桩基复合地基。为有效阻止上部水流对下部地基的浸湿，在垫层与混凝土池底板之间铺设二毡三油防水层。

对成桩后的复合地基承载力、单桩承载力进行静载荷试验，用低应变抽查了不少于总桩数 15% 的桩身质量，并用浸水静载荷试验检验水泥喷浆桩消除湿陷性黄土的效果。根据现场试验结果，浸水后的复合地基承载力略低于无浸水情况，其沉降量也略大于同级静载荷下无浸水复合地基，但仍满足设计对地基承载力和变形需求。全部工程竣工后投入使用至今已接近 20 年，未出现不良沉降变形，结构完整，表明该地基处理方案达到了预期效果。

(2) 山西某水利工程项目全长 12 km，位于黄土地区，沿线涵洞箱涵净宽 4 m、净高 2m，箱涵顶板、底板和侧板厚度均为 40 cm，基础宽度 5.2 m，厚度 0.1 m，箱涵涵顶覆土厚度平均为 4.1m。涵洞黄土地基自重湿陷量 $\Sigma\Delta_{zs}=488.9\text{ mm}$ ，总湿陷量 $\Sigma\Delta_s=687.1\text{ mm}$ ，地基土为 III 级自重湿陷性黄土。

为保证涵洞地基的稳定性，项目对涵位处地基采用水泥土搅拌桩进行处理。箱涵地基处理深度为 10 m（有效桩长 9.5 m，保护桩头 0.5 m），桩径 0.5 m，梅花型布桩，桩距 1.2 m。涵洞基础底与桩顶间设置 0.3 m 的三七灰土褥垫层。涵洞台身两侧设置过渡段，采用回填砂砾的方式。

对涵洞地基进行水泥土搅拌桩处理后，湿陷系数由处理前 0.036~0.068，变为处理后 0.003~0.018，黄土的湿陷性得到明显改善，水泥土搅拌桩对地基土的处理效果良好。地基处理后，涵洞 1 年的累计沉降量为 17.4 mm，完成地基最终理论沉降量的 86%，涵洞累计沉降量的变化趋势为先增大后平缓。地基处理的前 3 个月，沉降量较大，随着时间的推移，涵洞沉降量变小直至趋于稳定。

6.7 高压喷射法

6.7.1 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，对于水利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 6.7.1-（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 6.7.1-（2）选取。

表 6.7.1-（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 型液压泵, 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 6.7.1-（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	φ2~φ3 (2 个)	φ2~φ3 (2 个)	φ10 (2 个) ~φ14 (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)	(0.8~1.0)v		
摆喷	摆速 (次/min)	(0.8~1.0)v		
	摆角	15°~30°		

6.7.3 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，可为水利工程湿陷性黄土地基处理提供一定的借鉴和参考。

6.8 灌浆法

6.8.4 水泥劈裂注浆是浆液注入土体中后，以劈裂和挤密的形式作用于土体，是目前注浆法应用于加固地基时常见的注浆形式，劈裂注浆是浆液注入土体中后，首先对注浆孔周围土体进行挤密，当压力超过一定值后，浆液劈开土体，土体出现裂缝，浆脉进行扩展，现场脉络状固结体，而浆脉的产生现场骨架作用来加固土体。目前，在黄土地基加固中，理想的劈裂注浆形式是浆液在土体中可以形成“网状”结构，多个“网状”结构的相互交错，可以将土体分割成块，在稳固地基土体的同时，这种交错的浆脉结构可以抵抗黄土的湿陷性。

4 水泥浆常用水灰比 $W/C=0.5\sim 2.0$ ，不同水灰比的水泥浆液有不同的特性； $W/C=0.5\sim 0.7$ 时水泥浆液为幂流体浆液； $W/C=0.8\sim 1.0$ 时为宾汉流体水泥浆液；牛顿流体剪切应力与变形速率成正比；宾汉流体剪切力超过某值时发生剪切变形且变形速率呈线性变化。由于黄土孔隙小，且土质疏松，为增强水泥浆液对土体的挤密作用，宜选用

宾汉流体水泥浆液作为黄土注浆加固。黄土具有较强吸水性，水泥浆液进入土体水分遗失，其含水率迅速降低，水泥浆液水灰比减小，稠度增大，在后期产生劈裂时水泥浆液流变性减小，因此宜选用 0.8~1.0 水泥浆液进行黄土灌浆加固。

单液硅化或碱液加固法在建筑、交通领域湿陷性黄土处理中已有大量成功应用案例。水泥劈裂注浆方法施工机具简单，施工时要求的操作空间较小；施工安全性高，施工时噪音和振动小；桩孔较小，对地基土都不产生任何次应力，不扰动地基土的正常工作情况。基于以上特点，水泥劈裂注浆方法在建筑、交通领域湿陷性黄土地基处理工程中应用广泛，特别是对于既有建筑物加固及纠倾方面。对于水利工程建筑物地基处理工程中的应用，还未见相关报道。应用时应先开展现场劈裂灌浆试验，确定对于特定湿陷性黄土地基处理合适的灌浆工艺和参数。

6.9 桩基础

6.9.1 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洞、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 $0.6\text{m} \times 1.8\text{m}$ 的平面尺寸， $2.1\text{m} \sim 2.7\text{m}$ 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 质量检查与验收

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 质量检查与验收

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 本条是对水泥土搅拌法施工质量检验的要求。水泥土搅拌桩复合地基承载力的检验应进行单桩或多桩复合地基静载荷试验和单桩静载荷试验。检测分两个阶段，第一阶段为施工前为设计提供依据的承载力检测，试验数量每单项工程不少于3根，如单项工程中地质情况不均匀，应加大试验数量。第二阶段为施工完成后的验收检验，数量为总桩数的1%，每单项工程不少于3根。上述两个阶段的检验均不可少，应严格执

行。对重要的工程，对变形要求严格时宜进行多桩复合地基静载荷试验。

4 对重要的、变形要求严格的工程或经触探和静载荷试验检验后对桩身质量有怀疑时，应在成桩28d后，采用双管单动取样器钻取芯样作水泥土抗压强度检验。水泥搅拌桩的桩身质量检验目前尚无成熟的方法，特别是对常用的直径500mm干法桩遇到的困难更大，采用钻芯法检测时应采用双管单动取样器，避免过大扰动芯样使检验失真。当钻芯困难时，可采用单桩竖向抗压静载荷试验的方法检测桩身质量，加载量宜为（2.5~3.0）倍单桩承载力特征值，卸载后挖开桩头，检查桩头是否破坏。

7.2.6 1 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。

2 每个水利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。

3 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。

7.2.7 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。

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。

7.2.8 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 监测与维护

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测方法，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 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

8.2.1 表 8.2.1 是在《水利水电工程安全监测设计规范》(SL-725)对于不同类型水工建筑物地基施工主要监测项目规定的基础上，结合相应建筑物地基处理特点加以调整，并增加了水库、蓄水池地基的处理施工的监测项目。

8.2.2 表 8.2.2 是在各规范对于相应地基处理方法监测项目规定的基础上，结合湿陷性黄土地基上不同方法特点加以调整。水利工程地基处理施工时，还应根据现场实际情况，对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 根据湿陷性黄土实际工程的监测经验编写。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、水泥土搅拌桩法、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。

8.3 运行维护

8.3.1、8.3.2 各种排防水及配套设施应定期进行检查和维护，对开裂损坏者，要记录裂缝形态、宽度、长度和开裂时间等。每年雨季前雨季前和暴雨后，应重点检查截洪沟、排水干道有无损坏、渗漏和堵塞。

8.3.4 湿陷性黄土地基处理施工期间，如需在地基防护范围内增加用水设施或其他涉水临时措施，应根据原设计检查防水设施是否符合相关要求，如不符合应按要求采取防水措施等。并对新建用水设施可能的渗漏对地基的影响进行评估，有影响时应采取防范措施。

8.3.5 地基处理施工过程中及完成后，周边如有新建或扩建的涉水建筑物（如水库、湖

泊、渠道等设施), 均可能引起水环境变化。管理单位应及时收集相关资料和信息, 会同原设计、勘察等单位, 共同对可能的影响作出评估, 采取相应对策, 防止对湿陷性水利工程地基产生危害。

8.3.7 通过沉降观测可及时发现地基的湿陷变形。因为地基浸水湿陷往往需要一定的时间, 须保证相应基准点及水位观测井稳定可靠, 监测数据真实可信, 从而为发现水利工程地基的不正常沉降情况提供信息支持, 及早采取措施, 切断水源, 制止湿陷变形发展。

附录 I

I.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。

I.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Ⅲ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 I.3-1。

表 I.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 G_s	含水率 w (%)	密度 ρ (g/cm ³)	湿陷 系数 δ_s	自重 湿陷系 数 δ_{zs}	湿陷 起始压力 P_{sh} (kPa)	天然 孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	饱和密度 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 I.3-1。用密度为 1.11g/cm³ 的轻量土对自重湿陷性黄土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 I.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 I.3-2。

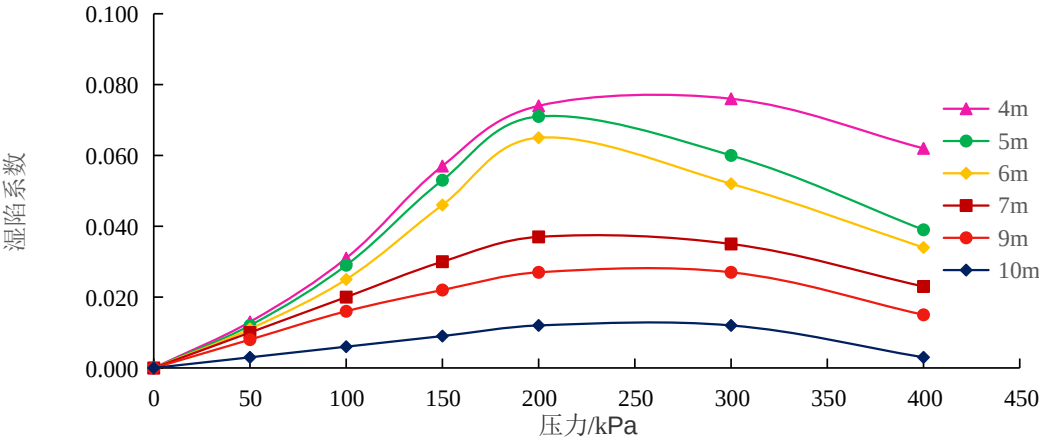


图 I.3-1 场地压力与湿陷系数关系曲线

表 I.3-2 轻量土换填厚度为 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 δ_{zs}	湿陷 起始压 力 P_{sh} (kPa)	场地自 重湿陷 量 Δ_{zs} (mm)	场地自地 面起的自 重湿陷量 Δ_{zs} (mm)	换填 密度 P (g/cm ³)	换填后 自重压力 该层 P_{zs} (kPa)	换填后 自重压力 累计 P_{zs} (kPa)	换填后 自重湿 陷系数 δ_{zs}	场地换 填后 自重湿 陷量 各层 Δ_{zs} (mm)	换填后场地 自地面算起 的自重湿陷 量 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 I.3-2 可知, 用密度为 1.11g/cm^3 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。