

引调水工程湿陷性黄土地基处理 技术规程

**Technical code for the treatment of collapsible loess foundations
for water diversion projects**

1 总则

1.0.1 为规范引调水工程湿陷性黄土地基处理的勘察、设计、施工、质量检查、监测和试验，制定本标准。

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

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

2 术语和符号

2.1 术语

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

在设计上覆压力作用下，地基浸水饱和后的最大湿陷变形量。

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

浸水后，压缩应力作用下土体结构屈服产生的湿陷变形。

2.1.3 砂井浸水试验 sand well collapsibility test

通过砂井将水导入一定深度土层，测定其湿陷性的试验。

2.1.4 构度指标 structure index

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

2.1.5 综合物理量 comprehensive physical index

综合土的含水率、颗粒比重、初始孔隙比及塑限的反映土体基本物理性质的指标。

2.1.6 结构压缩屈服应力 compressive yield stress

结构性土体的 e - l_{gp} 压缩曲线上曲率半径最小的点对应的横坐标。

2.1.7 调蓄水池 ragulating water-storage ponds

供水或灌溉等引调水工程中，无天然径流汇入的具有蓄水和调节水量作用的水工建筑物。

2.1.8 节点工程 node works

水池、水闸、泵站、渡槽、桥梁、跌水、倒虹吸等点状建筑物。

2.1.9 线性工程 linear works

渠道、隧洞、涵洞、管道等线状输水建筑物。

2.2 符号

2.2.1 抗力和材料性能

e —孔隙比；

p —试样的实际上覆压力值；

S_r —饱和度；

w —含水率；

w_L —液限；

w_p —塑限；

w_{op} —最优含水率；

δ_s —湿陷系数；

δ_{zs} —自重湿陷系数。

2.2.2 作用和作用效应

Δ_{ps} —实际上覆压力下的饱和湿陷量；

Δ_s —湿陷量计算值。

2.2.3 计算系数

β_0 —因地区土质而异的修正系数；

β' —隧洞地基湿陷变形计算修正系数；

i —排水坡度；

i_{min} —地面最小排水坡度。

3 基本规定

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

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

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

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

3.0.5 引调水工程湿陷性黄土地基处理应进行质量检测。

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

4 勘察与湿陷性评价

4.1 一般规定

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

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

4.1.3 引调水工程湿陷性黄土地基地质勘察除满足现行行业标准《引调水线路工程地质勘察规范》SL 629 的规定外，还应符合下列规定。

1 查明场地湿陷性黄土的类型、分布位置与范围、以及湿陷性黄土层的厚度与下限高程。

2 取原状黄土样，试验测定不同深度黄土设计压力下的湿陷系数、自重湿陷系数、湿陷系数和湿陷起始压力，以及每层土的上覆压力~湿陷系数 ($p-\delta_s$) 关系曲线。不同深度取样时，应每 1 m 深度一组。

3 对场地和地基做出岩土工程评价，根据评价结果提出地基处理措施建议。

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

4.1.5 湿陷性黄土场地各个阶段工程地质勘察应符合下列规定。

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

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

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

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

5 招标设计阶段应复核场地湿陷性黄土勘察结果。

6 施工详图设计阶段应完善勘察结果，完成施工中出现的工程地质问题勘察。

7 施工期应结合施工开挖，开展地质编录与新揭示工程地质问题勘察。

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

- 1 探井的深度应穿透湿陷性黄土层；
- 2 探井取样应采用机械洛阳铲或者人工挖孔，人工下井在探井侧壁取样的方法进行；每 1 m 深度取样 1 组~2 组，土样最小边长不宜小于 150 mm；
- 3 钻孔取样按现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 执行，应避免钻孔施工中灌水，改变土样含水率。

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

4.2 现场勘察

4.2.1 湿陷性黄土地区渠道工程勘察应查明下列主要工作内容：

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

4.2.2 湿陷性黄土地区渠道工程勘察方法应符合下列规定：

- 1 各个勘察阶段，沿渠道中心线和垂直中心线布置的勘探点数量应符合《引调水线路工程地质勘察规范》(SL 629) 的规定；
- 2 湿陷性黄土范围、厚度和分布勘察中，可依据土层设计压力下的湿陷系数确定，其值大于 0.015 应判定该土层具有湿陷性，并应依据湿陷性性质和地层分布划分地质单元；
- 3 应专门增设勘探点进行黄土场地湿陷性评价，探井应打穿湿陷性黄土层，并每 1 m 取样开展湿陷性试验。每个地质单元勘探井的数量不应小于 3 个，在地貌变化大的地段或地层变化大的地段应适当增加；

4 对 2 级以上渠道宜开展一组现场浸水试验或者两组离心模型试验测定场地自重湿陷量, 3 级渠道宜开展两组离心模型试验;

5 湿陷性评价中取土样和原位测试应具有控制性和代表性, 每个探井每 1 m 采取一组不扰动土样, 每组样均应开展黄土湿陷试验。

4.2.3 湿陷性黄土地区隧洞工程勘察应包括下列主要工作内容:

1 黄土隧洞沿线地形地貌类型及分布特征;

2 黄土隧洞沿线黄土的成因类型、分布厚度、物质组成及其工程地质性质;

3 黄土隧洞沿线冲沟、盲沟、陷穴、地坑院或窑洞等不良地质体分布位置、形态特征、规模类型、发育程度和成因等;

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

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

6 现场取样并测试黄土的湿陷性相关参数;

7 评价场地的湿陷性, 确定场地湿陷等级, 并给出地基处理措施建议。

4.2.4 湿陷性黄土地区隧洞工程勘察方法应符合下列规定:

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

2 黄土隧洞围岩每一类土体室内物理力学性质试验累计有效组数不应小于六组。

4.2.5 湿陷性黄土地区涵洞及管道工程勘察应包括下列主要工作内容。

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

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

3 地基黄土层中地下水类型, 地下水位及变化幅度;

4 穿越方式和最小埋置深度的地质建议;

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

6 现场取样并测试黄土的湿陷性相关参数;

7 评价场地的湿陷性, 确定场地湿陷等级, 并给出地基处理措施建议。

4.2.6 湿陷性黄土区涵洞及管道工程勘察方法应符合下列规定:

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

2 不同黄土地貌单元各主要土层应取原状样进行室内物理力学性质试验，累计有效组数不应少于六组。

4.2.7 湿陷性黄土区调蓄水池工程勘察应包括下列主要工作内容。

- 1 黄土层物理力学性质、湿陷土层厚度、场地湿陷类型、地基湿陷等级及其分布；
- 2 场区地下水位埋深，预估地下水位的季节性变幅和升降的可能性；
- 3 评价调蓄水池拟建场地的适宜性和稳定性；
- 4 现场取样并测试黄土的湿陷性相关参数；
- 5 评价场地的湿陷性，确定场地湿陷等级，并给出地基处理措施建议。

4.2.8 湿陷性黄土区调蓄水池工程勘察方法应符合下列规定。

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

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

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

4 各主要土层应取原状样进行室内物理力学性质试验，累计有效组数不应少于六组。

4.2.9 水闸、泵站、渡槽、桥梁、跌水、倒虹吸等其他建筑物勘察工作内容和方法可参照渠道工程执行。

4.3 黄土湿陷性试验

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

- 1 设计上覆压力下的室内黄土湿陷试验；
- 2 室内黄土增湿变形试验；
- 3 现场试坑浸水试验；
- 4 黄土湿陷变形的离心模型试验；
- 5 黄土场地砂井浸水试验。

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

4.3.3 钻孔取样应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025附录E执行。

4.3.4 设计压力下的室内黄土湿陷试验组数应符合下列规定。

- 1 挖方工程应从挖方顶部高程到勘探深度底面每1 m做一组；

2 填方和半挖半填工程应从填方基面到勘探深度底面每1 m做一组。

4.3.5 设计上覆压力下的黄土湿陷试验应符合下列规定。

- 1 平行试验试样密度的允许差值应不大于0.03 g/cm³；
- 2 试验前环刀、透水石应洗净、风干，滤纸、透水石的湿度应接近试样的天然湿度；
- 3 试验中试样上施加的垂直压力应为试样的设计上覆压力，其值应按下列式计算。

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

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

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

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

p_z ——工程建基面到试样所处位置之间黄土体的饱和自重压力，kPa；

p_q ——工程建基面以上的附加压力，kPa。；

h ——工程建基面到试样所处位置之间的高差，m；

g ——重力加速度，m/s²；

ρ_{sat} ——黄土的饱和密度，kg/m³；

ρ_d ——黄土的干密度，kg/m³；

S_r ——黄土饱和度；

e ——黄土的孔隙比；

G_s ——黄土的颗粒比重。

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

5 对于挖方渠道工程，建基面应为渠顶；填方和半挖半填渠道，应为填方基面；对于隧洞工程，建基面应为洞底地基顶面；对于涵管工程，建基面应为涵洞或者管道地基顶面。

6 重力加速度值可取 $g=9.81$ m/s²；黄土饱和度可取 $S_r=85\%$ 。

7 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0.01 mm/h；

8 试验步骤应按现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123第18章执行，而每个试样施加的垂直压力应为该试样的实际上覆压力值；

9 湿陷起始压力 P_{sh} 值应按现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025第4.3.4条的要求进行试验和取值。

4.3.6 现场试坑浸水试验除应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025的规定外，还应符合下列规定。

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

2 隧洞工程的浸水试坑应设在隧洞底面；

3 涵洞与管道工程浸水试坑应设在基础顶面；

4 应取试坑内最大沉降值作为地基在实际上覆压力下的湿陷量。

4.3.7 黄土湿陷变形的离心模型试验应符合本标准附录A的规定。

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

表4.3.8 黄土湿陷试验项目表

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

注：“√”表示需要进行的试验项目，“/”表示不需要进行的试验项目。

4.4 场地湿陷性评价

I 一般规定

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

1 当 δ_{ps} 不小于0.015时应判定为湿陷性黄土；当 δ_{ps} 小于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 δ_{ps} 不小于0.015且不大于0.030时，湿陷性轻微；

2) 当 δ_{ps} 大于0.030且不大于0.070时，湿陷性中等；

3) 当 δ_{ps} 大于0.070时, 湿陷性强烈。

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

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

II 渠道、涵洞和管道

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

1 挖方工程湿陷量计算应从工程顶部到非湿陷性黄土层的顶面, 不应累计其中湿陷系数小于0.015的土层。填方和半挖半填工程的湿陷量计算起始面应为填方基面。

2 湿陷量计算值应按式(4.4.4)计算。

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

式中: Δ_{ps} ——设计上覆压力下的地基湿陷量, mm;

δ_{psi} ——第*i*层土层设计上覆压力下的湿陷系数;

h_i ——第*i*层土的厚度, mm;

β_0 ——修正系数;

α ——浸水机率系数。

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

4 浸水机率系数 α 取1.0。

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

表4.4.5 渠道、涵洞和管道工程黄土地基湿陷等级及程度表

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

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

III 隧洞

4.4.7 隧洞工程通过黄土地地时, 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。

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

表4.4.8 隧洞工程黄土地基湿陷等级及程度表

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

4.4.9 隧洞工程黄土地基湿陷量计算值 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。圆形断面隧洞，基底从衬砌底部算起；有仰拱隧洞，基底从仰拱底部算起，城门洞形断面隧洞，基底从铺底底面算起。根据实际情况，可采用以下方法计算。

1 采用室内湿陷试验指标时，应按下式计算。

$$\Delta_s = \beta' \sum_{i=1}^n \alpha \delta_{si} h_i \quad (4.4.9)$$

式中： Δ_s ——隧洞工程黄土地基湿陷量计算值，mm；

δ_{si} ——隧洞基底下第 i 层土的湿陷系数；

h_i ——隧洞基底下第 i 层土的厚度，mm；

β' ——隧洞地基湿陷变形计算修正系数；

α ——浸水机率系数，取 1.0。

2 湿陷系数的试验压力，宜采用设计上覆压力，即自重压力与附加压力之和。

3 缺乏实测资料时，陇西、陇东、陕北、晋西地区，修正系数 β' 取1.0；关中地区， β' 取0.9；其他地区， β' 取0.5；

4 隧洞工程为线性工程，也可采用附录C的方法计算湿陷量计算值 Δ_s 。

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

IV 水池及其他水工建筑物

4.4.11 水池、水闸、泵站、渡槽、桥梁、倒虹吸、陡坎、跌水等水工建筑物场地湿陷性试验、湿陷量计算和湿陷性评价应以现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 为依据。

4.4.12 对于临水的永久建筑物，浸水机率系数应取 1.0。

5 设计

5.1 一般规定

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

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

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

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

表5.1.3 水工建筑物湿陷性黄土地基处理方法

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

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

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

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

5.1.7 黄土地基变形计算、承载力确定和稳定性计算应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 中地基计算的有关规定。

5.1.8 湿陷性黄土场地采用围堤（坝）方式设计的调蓄水池，应按现行行业标准《碾压土石坝设计规范》SL 274 相关规定，做好填方区堤（坝）体排水。

5.2 处理原则与标准

5.2.1 湿陷性黄土地基处理应遵循以下原则。

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

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

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

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

5.2.2 引调水工程湿陷性黄土地基处理应达到以下标准。

1 渠道工程防渗衬砌应符合现行国家标准《渠道防渗衬砌工程技术标准》GB/T 50600 中I级防渗等级。不同级别渠道地基处理后的最大剩余湿陷量应满足表 5.2.2-1。

表5.2.2-1 渠道工程地基处理后的最大剩余湿陷量

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

注：(1) 4 级及以下渠道渠基处理可考虑防渗措施减小黄土湿陷的效果。

(2) 剩余湿陷量应采用设计上覆压力下的湿陷系数计算。

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

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 1.0 m，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 600 mm 的整片垫层。

表5.2.2-2 管道工程地基处理最小深度

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

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

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

表5.2.2-3 基底压力大于湿陷起始压力的调蓄水池地基处理

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

6 引调水节点工程，1 级和 2 级水工建筑物，应执行现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 的相关规定。3 级、4 级和 5 级水工建筑物，当湿陷性土层厚度小于 20m 时，应执行现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 的相关规定；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 厚整片垫层，同时应做好防止基础周边积水的工程措施。

5.3 工程处理设计

I 渠道

5.3.1 渠道换填法设计除应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 的规定执行，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 3 m。

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

- 1) 经过处理消除湿陷性的黄土可作为换填料，1 级、2 级渠道换填后的压实系数应不小于 0.95，3 级、4 级渠道应不小于 0.93，5 级渠道应不小于 0.91。
- 2) 灰土填料石灰与土体积配合比宜为 2:8 或 3:7，换填后压实系数应不小于 0.95。
- 3) 采用水泥石换填时，水泥与土的配合比宜通过试验确定，无经验时，水泥掺量可采用土质量的 7%~12%，按压实系数控制，控制指标同黄土换填。

3 当根据下卧层承载力确定换填层厚度、换填层宽度时,应符合现行行业标准《水闸设计规范》SL 265 相关要求。

4 经换填处理的地基,其沉降量应等于换填层本身的压缩变形量和下卧土层沉降量之和。下卧土层的沉降量计算可参照现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》SL 274 和《水闸设计规范》SL 265。

5 对填方渠道,换填层应满足地基承载力要求。

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

5.3.2 强夯法设计除应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 的规定执行,还应符合以下规定。

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

2 地下水位高时,应先采取降水等技术措施。

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

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

5.3.3 挤密法设计除应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 的规定执行,还应符合以下规定。

1 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。

2 挤密法宜用于处理地下水位以上,处理深度为 5 m~15 m 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、孔内填料等应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 相关要求执行。挤密填孔后,3 级及以上渠道桩间土最小挤密系数不宜小于 0.88;4 级、5 级渠道不宜小于 0.84。

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

5.3.5 湿陷性黄土地基渠道地基处理工程防渗与排水,应按照现行国家标准《渠道防渗衬砌工程技术标准》GB/T 50600 规定提高一个防渗等级执行。

II 隧洞

5.3.6 湿陷性黄土隧洞地基处理设计应符合下列规定。

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

2 宜优先采用少振或无振动处理方法，减少对初期支护和隧洞整体稳定性的影响。常用地基处理方法的适用范围见表 5.3.6。

表5.3.6 湿陷性黄土隧洞地基处理方法适用范围

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

5.3.7 换填法设计除应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 执行，还应符合以下规定。

1 换填材料满足本标准 5.3.1 条相关要求。

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

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

5.3.8 挤密法处理湿陷性隧洞地基，挤密孔孔位宜按正三角形布置，其孔心距、孔径、挤密系数、孔内填料等应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025 相关要求执行。

5.3.9 高压喷射法处理湿陷性隧洞地基，应符合以下规定。

1 对位于湿陷性黄土、饱和黄土的隧洞地基，条件允许时可在地面沿隧洞轴线一定范围进行地基处理。

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

III 涵洞（管道）

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

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

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

IV 调蓄水池

5.3.13 应对湿陷性黄土地基上的水池池底、池周及围堤地基分别进行处理，应坚持“强堤弱池”的地基处理原则，水池湿陷性黄土地基处理设计应满足现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025和现行行业标准《水工建筑物地基处理设计规范》SL/T 792的有关规定，水池围堤地基处理设计应满足现行行业标准《碾压土石坝设计规范》SL 274的有关规定。

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

5.3.15 调蓄水池地基平面处理范围及处理厚度应根据水池分类、湿陷类型、湿陷等级及下卧层未处理湿陷性黄土层的湿陷起始压力、剩余湿陷量等分析确定，可参照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025的有关规定。

5.3.16 在地震烈度Ⅷ度及以上地区的调蓄水池，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》GB 51247的相关规定。

V 其他水工建筑物

5.3.17 水闸、泵站、渡槽、桥梁、倒虹吸、陡坎、跌水等其他水工建筑物工程地基处理，应根据建筑物类别、等级和土层厚度，结合施工设备、进度、材料、费用等经综合比较确定，可选用表 5.3.17 中的一种或几种组合方法进行处理。

表5.3.17 湿陷性黄土地基处理方法

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

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

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

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

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

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

5.3.20 预浸水法、桩基础地基处理设计应满足现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 500258 相关条文要求。预浸水法处理前应进行现场试坑浸水试验。

6 施工

6.1 一般规定

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

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

6.1.3 施工方案应包括以下内容。

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

6.1.4 应采取措施防止施工用水、场地雨水和邻近管道渗水等的渗入。

6.1.5 引调水工程场地的防洪工程应提前施工，并应在汛期前完成。

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

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

表 6.1.7 地面最小排水坡度 (i_{min})

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

6.2 换填法

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

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

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

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

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

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

6.2.7 换填垫层增设土工合成材料施工，应符合现行国家标准《土工合成材料应用技术规范》GB/T 50290 规定。

6.3 预浸水法

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

6.3.2 预浸水法的施工应符合下列规定。

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

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

6.4 强夯法

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

6.4.2 采用强夯法处理湿陷性黄土地基，应满足下列规定。

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

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

6.4.4 强夯施工机具应符合下列规定。

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

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

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

6.4.5 施工场地宜按 10 m×10 m 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应为±50 mm，且夯点应有明显标记和编号。

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

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

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

6.5 挤密法

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

1 试验不宜少于三组，每组挤密桩数，三角形布桩时不宜少于七根或矩形布桩时不宜少于九根；

2 应在桩间土开挖探井，分层检测挤密效果，取样间距不宜大于 1 m；

3 对预钻孔夯扩桩，应分段检测桩径。

6.5.2 挤密法处理地基施工的主要工序应包括施工准备、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 7 d~14 d 将拟处理范围内的土层增湿至接近最优含水率或塑限。

6.5.4 挤密法成孔施工应符合下列规定。

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

2 锤击沉管宜采用 3 t~4 t 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 12 mm，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。

3 柱锤冲扩挤密成孔宜采用直径 0.3 m~0.5 m、长度 2 m~6 m、质量 2 t~10 t 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 倍~5 倍，成孔时锤体提升高度宜为 0.5 m~3 m。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 mm~50 mm，锤重宜为 30 kN~60 kN，落距 3 m~5 m。钻进硬土层时，宜低速慢进，保持钻杆垂直，减少钻杆晃动。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。异常时，应记录出现的问题和处理的方法。

6.5.5 挤密法施工夯填材料应满足下列规定。

1 可采用素土、灰土、二灰土、水泥土等，应拌合均匀，随拌随用；

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

3 雨期或冬期施工，应采取防雨或防冻措施，防止填料受雨水淋湿或冻结。

6.5.6 桩孔夯填施工应符合下列规定。

1 夯实机具：沉管法成孔，宜采用 0.3 t 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 1.0 t 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 孔~2 孔依次进行，对大型引调水工程，可采取分段施工。当局部处理地基时，宜从外向里间隔 1 孔~2 孔依次进行。

6.5.7 设计桩顶标高以上预留上覆土层的厚度，应符合下列规定。

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

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

3 冬季施工可适当增大预留松动层厚度；

4 铺设垫层前，应将预留松动土层挖除或夯（压）实。

6.6 高压喷射法

6.6.1 高压喷射注浆形成的加固体强度和范围，应通过现场和室内试验确定。当无试验资料时，高压喷射注浆加固湿陷性土体直径可按表 6.6.1 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 6.6.1 湿陷性黄土旋喷注浆加固土体直径 (m)

旋喷桩体直径 (m)	旋喷方法		
	单管法	二重管法	三重管法
$I_L > 1$	0.6~0.8	1.0~1.2	1.8~2.2
$0.75 < I_L < 1$	0.5~0.7	0.8~1.0	1.4~1.8
$0.25 < I_L < 0.75$	0.4~0.6	0.6~0.8	1.0~1.4

注：表中 I_L 为湿陷性黄土的液性指数。

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

6.6.3 高压喷射注浆浆液用量可按式 6.6.3-1、6.6.3-2 计算，并应取其较大值。
体积法。

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 K_1 H (1 + \beta) + \frac{\pi}{4} d^2 K_2 h \quad (6.6.3-1)$$

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 ；

B ——损失系数，取 0.1~0.2。

喷量法：

$$Q = \frac{H}{v} q (1 + \beta) \quad (6.6.3-2)$$

式中： v ——提升速度， m/min ；

q ——单位时间喷射浆液量， m^3/min ；

B ——损失系数，取 0.1~0.2。

6.6.4 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 20 mm，钻孔有效深度应大于设计深度 0.3 m，钻孔施工时应采取预防孔斜的措施，钻孔偏斜率不应超过 1%。

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

6.6.6 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 1.0 m。

6.7 桩基础

6.7.1 采用桩基础处理湿陷性黄土地基，应选择有代表性的场地进行现场试桩，确定施工方式、施工机械、施工参数和处理效果。试验不宜少于三组，每组桩数不宜少于六根。

6.7.2 湿陷性黄土场地上钻孔灌注桩施工应符合下列要求。

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

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

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，成孔后宜尽快浇筑或压灌混凝土，施工过程不应中断。

6.7.3 静压与锤击预制桩施工应符合下列要求。

1 应合理选择桩型，采用空心管桩、长桩等，减少桩挤土率。

2 宜采用掘削、预钻孔等辅助沉桩法，减少排土量。

3 应合理安排沉桩顺序、进度。

4 宜采用先开挖基坑后沉桩工艺。

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

6 宜采用防渗防挤壁，设置防挤土槽或防挤孔。

7 应避免将桩尖停留在硬质黄土层中进行接桩施工，并应尽可能减少接桩时间。

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

7 质量检测

7.1 一般规定

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

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

7.1.3 抽检位置应按下列要求综合确定。

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

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

7.1.5 承载力应通过静载荷试验确定。承载力检验时,静载荷试验最大加载量不应小于设计要求的承载力特征值的二倍。采用其他方法检测承载力应有本场地同条件下静载试验对比结果。

7.2 质量检测

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

- 1 对输水建筑物,每 10 m 一处,且每层不少于三处;
- 2 对蓄水建筑物,每 100 m²~150 m² 面积不应少于一处,每层不少于三处。
- 3 取样点位置应均匀随机布置,并具有良好的代表性,明显存在压实质量缺陷可能的局部区域应单独布点检测;
- 4 采用标准贯入或动力触探检验时,检验点的间距不宜大于 4 m;
- 5 承载力检测数量每单体工程不应少于三点,单体垫层面积超过 1500 m² 的,超出部分每 500 m² 增加一点,小于 500 m²,按一点计算;
- 6 取样检验点与垫层边缘距离不宜小于 300 mm。

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。检验点数应为 $500\text{ m}^2\sim 1000\text{ m}^2$ 一个点，且不应少于三点。

7.2.3 强夯法施工质量检查，应符合下列规定。

1 施工过程中的质量检查，宜采用探井取土样进行土工试验，检测土的干密度、压缩系数和湿陷系数。

2 强夯处理后的地基竣工质量检查，承载力检验应根据静载荷试验、其他原位测试和室内土工试验等方法综合确定。

3 强夯法检测点数量应根据强夯施工面积按表 7.2.3 确定。每检测点从终止夯面向下每 $0.5\text{ m}\sim 1.0\text{ m}$ 取样一件，取样深度应大于设计夯实厚度 1.0 m 以上。

表 7.2.3 强夯地基检测抽样点数量表

强夯施工面积(m^2)	最少抽样点数	最少抽样点数计算方法
≤ 500	5	按直线插入法计算
5000	17	
50000	58	按直线插入法计算
500000	200	
注：“强夯施工面积”指在同一工程地质条件（包括含水率类别）的施工场地、用同一强夯参数及同一夯沉量控制指标施工的强夯面积。		

4 强夯处理后的地基承载力检验，应在施工结束后间隔 $14\text{ d}\sim 28\text{ d}$ 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，所有桩孔均应检验并做出施工记录。

2 孔内填料的夯实质量，应随机及时抽样检查，并应符合下列规定。

- 1) 自检数量不得少于总桩数的 2%，且每台班不得少于一根桩；
- 2) 质检部门抽检数量不得少于总桩数 1%，且总计不得少于九根桩；
- 3) 每根桩均应按 1.0 m 分层取样检测；
- 4) 宜选用环刀深层取样、轻型动力触探、开挖探井取样检测法，对于非直接检测方法，均应有可靠的对比试验资料后方可采用。

3 桩间土挤密效果检查，应符合下列规定。

- 1) 以平均挤密系数是否达到设计要求为控制标准，通过在相邻增强体构成的挤密单元内开挖探井，按每 1 m 为一层，采用环刀取样，测试干密度并计算其挤密系数与各层挤密系数的平均值；
- 2) 节点工程桩间土挤密质量试验不应少于二组；

3) 施工后的挤密质量检测探井数应不少于总桩数的 0.33%，且每项单体工程不得少于三根。

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，以及地基受水浸湿可能性大的建筑物地基尚应进行现场浸水载荷试验。

7.2.5 高压喷射法施工质量检查应符合下列规定。

1 喷射注浆时应采集冒浆试样，应不少于六组，应集中收集并及时清理返上的泥浆，泥浆池应有防渗措施。

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

3 成桩质量检验点的数量不少于施工桩数的 2%，并不应少于六点。对于有代表性的桩位、施工过程中出现异常情况的部位、地基情况复杂的部位，应布置检验点。

4 承载力检验宜在成桩 28 d 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三台。

5 高压喷射法施工设备应配置在线监测控制系统，能够实时对喷射法施工状态进行监测并对施工参数进行调整。

7.2.6 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 20 m 时，施工过程中应进行成孔质量检测。同类型桩检测数量不应少于总桩数的 20%，且应不少于十根。

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%，且不得少于二十根；对于预制桩，抽检数量不应少于总桩数的 20%，且不少于十根。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%，且不应少于三根。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%，且不得少于五根。

4 基桩承载力宜通过浸水载荷试验判定。

8 监测

8.1 一般规定

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

8.1.2 地基处理试验区可适当增加监测的项目及数量。

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

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

8.2 监测

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

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

8.2.3 监测项目布置数量应符合下列规定。

1 地基面积较大时，宜按照每 20000 m²~30000 m² 作为一个监测区或按照施工分区布置监测项目。

2 输水建筑物等线性地基，宜按照 50 m~200 m 布置一个监测断面布置监测项目。

3 当地质情况或结构、设计参数发生大的改变时，宜增加监测项目的数量。

8.2.4 监测设施设备应按照《水利水电工程安全监测设计规范》SL 725 要求部署，监测仪器应在湿陷性地基处理前完成埋设，测定初始值，并对埋设过程及埋设完成情况进行记录，监测仪器设备应采取有效的保护措施。

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

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

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

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

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

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

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

附录 A 黄土湿陷变形的离心模型试验

A.1 一般规定

A.1.1 本试验适用于测定黄土地基的湿陷量。

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

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

表 A.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	\mathcal{C}	θ	1	
时间	T	t	$1/N^2$	固结过程
			$1/N$	动力学
			1	蠕变过程
渗透系数	LT^{-1}	k	N	
水力梯度	1	i	1	
黏滞系数	$ML^{-1}T^{-1}$	η	1	静力试验
			N	动力试验

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

A.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，并应满足下列要求。

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

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

- 1 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 10 g；
- 5 模型高度与离心机有效半径之比不宜超过 0.3。

A.1.6 试验中宜选用体积小、精度高、性能好的微型传感器，同时宜合理选用传感器量程和精度。

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

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

A.2 试验设备

A.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 A.2.1。

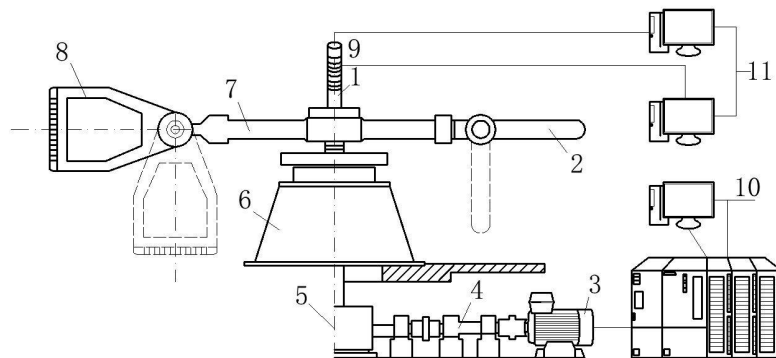


图 A.2.1 土工离心机主要组成部件

- 1-转轴；2-平衡重；3-电动机及整流系统；4-转动轴；5-减速度器；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

A.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 0.1 mm；
- 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。

A.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。

A.2.4 模拟原状黄土实际浸水工况，可参考图 A.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。

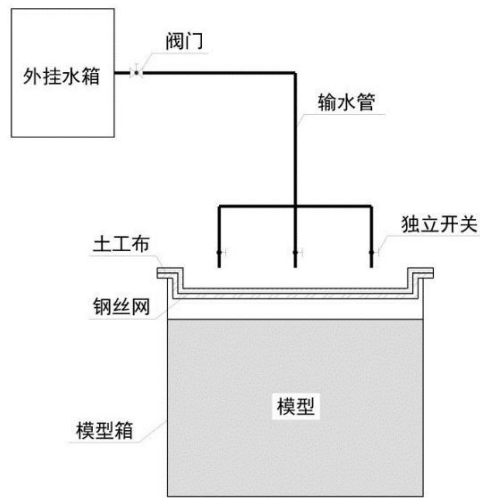


图 A.2.4 浸水装置整体立面图

A.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，并应满足下列要求。

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。

A.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，并应满足下列要求。

1 传感器在使用前应进行率定，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/T 15406《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。

A.3 试验过程

A.3.1 模型制作应符合下列规定。

- 1 天然含水率模型和饱和模型的制作方法宜相同。
- 2 模型制作过程中应采取措施防止土样含水率变化。

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

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

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

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

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

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

A.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:多地层法和典型层模拟法。

2 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 层~5 层地基的典型地层,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。

3 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,测定黄土地基在饱和自重荷载作用下的湿陷量。

4 离心模型试验得到的湿陷量除以室内试验湿陷计算值得到修正系数 β_0 值。

5 湿陷试验的单线法:将天然含水率的模型安置在离心机上旋转 to 指定的重力加速度 g 值,待压缩变形稳定后浸水到饱和,测定模型的压缩量和湿陷量。

6 湿陷试验的双线法:将饱和模型和天然含水率模型分别安置到离心机上,旋转 to 指定的重力加速度 g 值,测定两者的沉降值,两沉降值相减即为湿陷量。

7 在土样模型顶部施加不同的荷载,也可测定上覆荷载作用下地基的湿陷量。

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

附录 B 黄土场地砂井浸水试验

B.1 一般规定

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

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

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

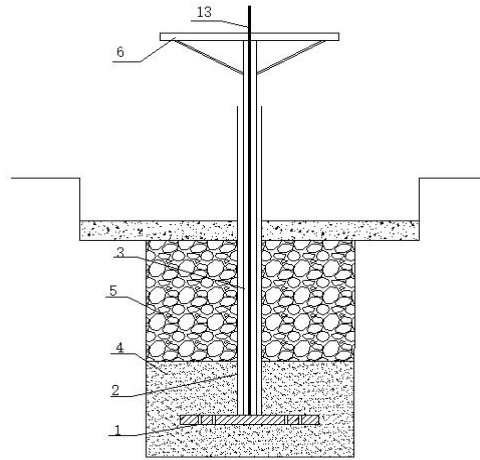


图 B.1.2-1 砂井底部构造图

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

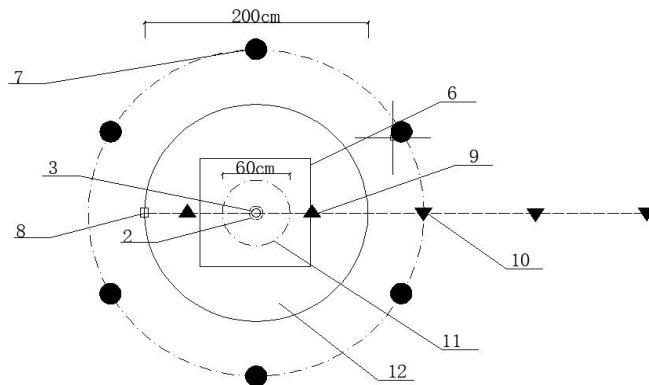


图 B.1.2-2 砂井顶部构造图

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

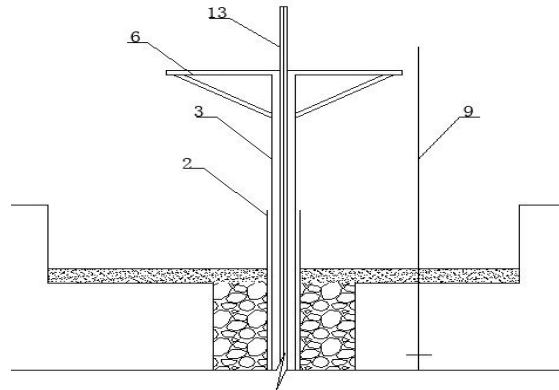


图 B.1.2-3 砂井顶部剖面图

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

B.1.3 自重湿陷性黄土砂井浸水试验布设沉降点，砂井中心布设一个沉降标点，监测井底土层湿陷；由井中心向外不少于 2 个方向均匀设置观测地表湿陷量的浅标点，每个方向上试坑内设置一个，试坑外宜间隔 2 m 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 3 m 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，宜小于等于 16 个。各监测点布设方案可参考图 B.1.3-1~B.1.3-2。

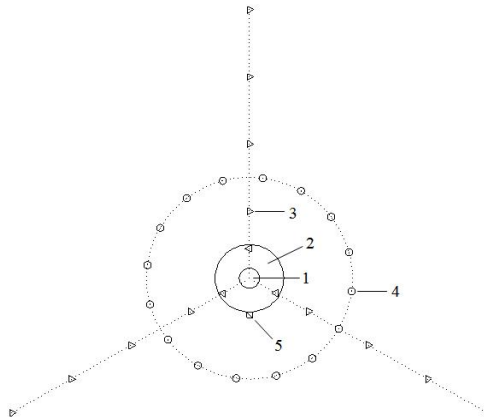


图 B.1.3-1 砂井浸水试验各标点布设平面示意图

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

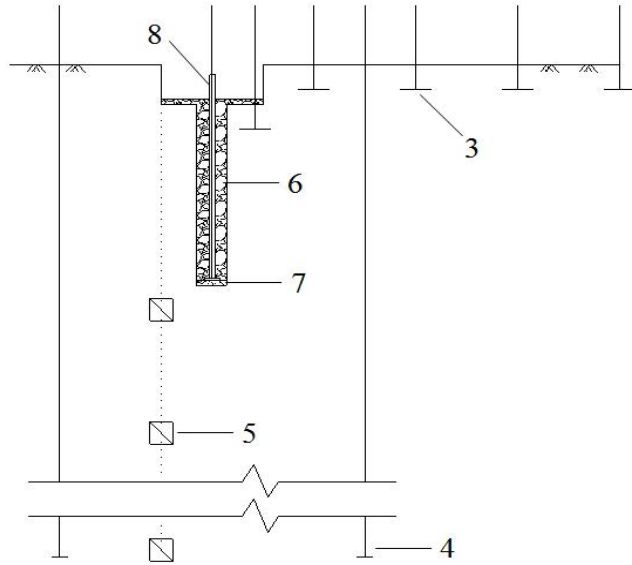


图 B.1.3-2 砂井浸水试验各标点布设剖面示意图

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

非自重湿陷性黄土砂井浸水试验布设沉降点，在浅坑中设置一个监测点，向下分层间隔 5 m 依次布设水分计，水分计数据测试正常后用素土回填夯实，依次放置下一个水分计。水分计数据采集线固定在地表集线盒，确保水分计采集线路正常。在浅标点埋设位置开挖直径为 40 cm，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 1.5 m，在沉降杆外套上 PVC 管，沉降杆下端连接直径为 20 cm，厚 1 cm 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。

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

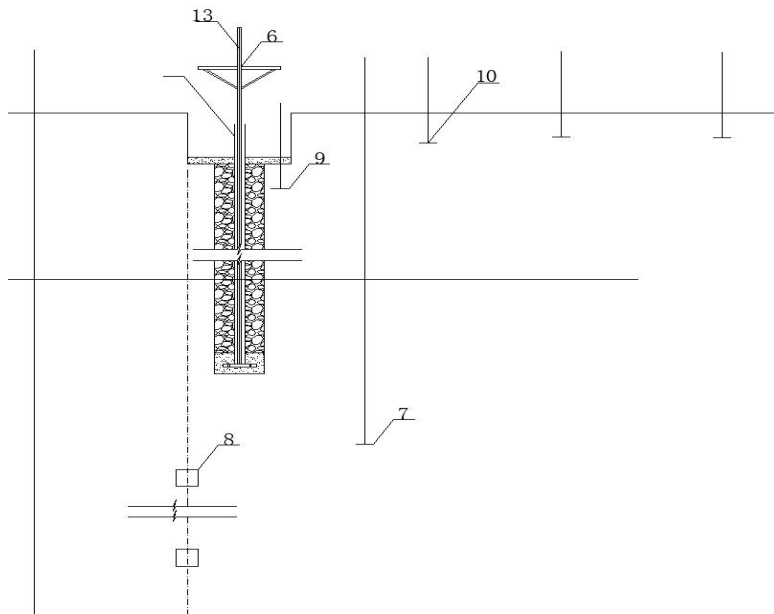


图 B.1.4 砂井剖面图

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

B.1.5 湿陷性黄土砂井浸水试验的试坑内水头高度不宜小于 30 cm，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 1 mm/d。

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

B.2 仪器设备

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

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

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

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

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

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

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

B.2.8 沉降观测装置：宜满足二级变形精度要求的水准仪。

B.2.9 自重湿陷性黄土砂井浸水试验的仪器设备应符合 B.2.1、B.2.2、B.2.7、B.2.8 的规定，非自重湿陷性黄土砂井浸水试验的仪器设备应符合 B.2.3、B.2.4、B.2.5、B.2.6、B.2.7、B.2.8 的规定。

B.3 操作步骤

B.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 60 cm~80 cm 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 井内元器件埋设应符合图 B.3.1-1~B.3.1-2 的规定，其顺序与要求如下。

1) 向井内灌入一定量的中细砂，使井底形成约 10 cm 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 20 cm 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 60 cm 处，在井口处开挖直径 2 m，深 60 cm 的试坑。

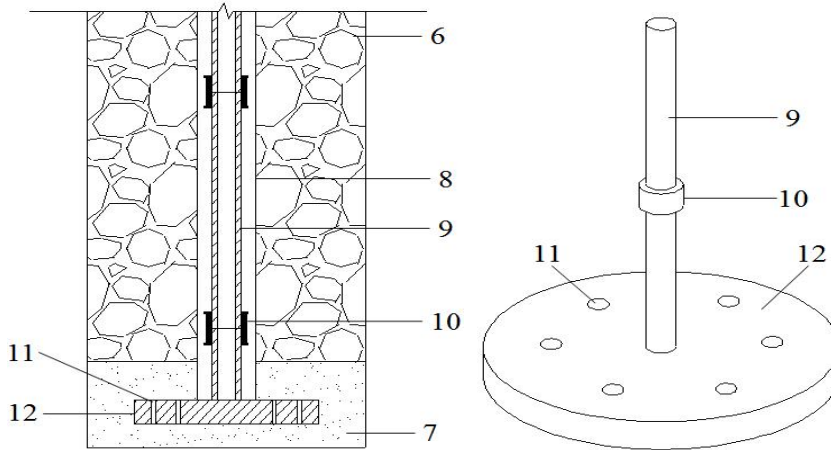


图 B.3.1-1 井内结构详图

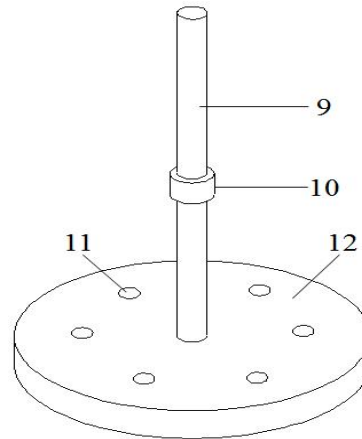


图 B.3.1-2 井内承载板详图

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。

B.3.2 沉降标点埋设，分为深、浅标点两类，其埋设应符合下列要求。

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

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

3 浅标点埋设。在浅标点埋设位置开挖 40 cm×40 cm、深度 50 cm 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。

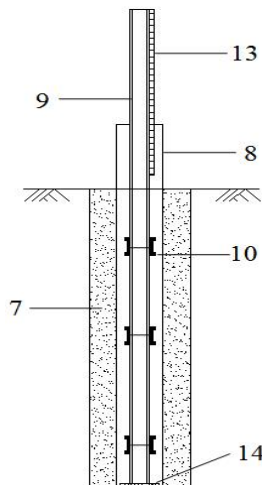


图 B.3.2-1 深标点结构图

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

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

5 清理井口试坑底面浮土，并铺设 10 cm 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。

B.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 30 cm 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。

B.4 试验资料整理

B.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。

B.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。

B.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。

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

表 B. 4. 4-1 砂井浸水试验记录表

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

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

表 B. 4. 4-2 砂井试验各标点湿陷变形记录表

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

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

附录 C 黄土结构屈服湿陷变形分析方法

C.1 应用条件

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

C.2 湿陷系数的计算

C.2.1 黄土的湿陷系数 δ_s ，可用式(C.2.1)计算。

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

式中： e_0 ——黄土的初始孔隙比；

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

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

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

C.2.2 e_p 与 e_p' 可通过以下步骤获得。

1 测试或计算天然与饱和状态下黄土的构度指标应按下列要求计算。

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

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

式中： m_u ——黄土的构度指标；

q_{uo} ——原状土的无侧限抗压强度，kPa；

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

q_{us} ——饱和原状土的无侧限抗压强度，kPa。

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

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

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

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

式中： e ——自然对数的底数；

Z ——综合物理量，其表达式为：

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

式中： w ——黄土的含水率，%；

G_s ——黄土的颗粒比重；

w_p ——黄土的塑限，%。

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

- 2) 天然与饱和状态下黄土的结构压缩屈服应力应按下列要求计算。

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

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

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

式中： p_{sc} ——黄土的结构压缩屈服应力，kPa；

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

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

- 3) 天然与饱和状态下黄土压缩变形稳定后的孔隙比应按下列要求计算。

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

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

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

式中： p ——设计上覆压力，kPa；

e ——黄土压缩曲线上与压力 p 相对应的孔隙比。

- 2) 快速计算原状黄土的湿陷系数时，根据黄土的沉积时代，将压力 p 、黄土的初始孔隙比 e_0 及结构压缩屈服应力 p_{sc} 与 p_{sc}' 代入式 C.2.2-8 或式 C.2.2-9，分

别计算天然与饱和状态下黄土在压力 p 作用下压缩变形稳定后的孔隙比 e_p 与 e_p' 。

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

C.3 湿陷量的计算

C.3.1 湿陷性黄土场地自重湿陷量计算值,应自天然地面(挖、填方场地应自设计地面)算起,计算至其下非湿陷性黄土层的顶面为止;勘探点未穿透湿陷性黄土层时,计算至控制性勘探点深度为止,其中自重湿陷系数 δ_{zs} 值小于 0.015 的土层不累计,按下式计算。

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

式中: Δ_{zs} ——自重湿陷量计算值, mm;

δ_{zsi} ——第 i 层土的自重湿陷系数;

h_i ——第 i 层土的厚度, mm。

C.3.2 湿陷性黄土地基受水浸湿饱和,其湿陷量计算值应从基底算起,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,按下式计算。

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

式中: Δ_s ——湿陷量计算值, mm;

δ_{si} ——第 i 层土在设计上覆压力 p 作用下的湿陷系数。

C.3.3 湿陷性黄土地基受水增湿,其增湿湿陷量计算值应从基底算起,至其下非湿陷性黄土层的顶面为止,其中增湿湿陷系数 δ_{hsi} 小于 0.015 的土层不累计,按下式计算。

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

式中: Δ_{hs} ——增湿湿陷量计算值, mm;

δ_{hsi} ——第 i 层土在设计上覆压力 p 作用下的增湿湿陷系数。

C.4 湿陷性评价

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

附录 D 轻量土换填减重消减黄土地基湿陷的方法

D.1 应用条件

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

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

D.1.3 设置轻量土换填层后，减小的地基自重湿陷量可用下式计算。

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

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

$\Delta_{\text{换填层的原湿陷量}}$ ——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。

D.2 轻量土换填材料

D.2.1 轻量土材料应符合下列规定。

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

D.2.2 水泥发泡型轻量土的配合比设计应符合下列规定。

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

2 根据场地地基处理原则，按需选择泡沫混凝土强度等级，进行配合比设计。

D.2.3 轻质材料混合型轻量土的配合比设计应符合下列规定。

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

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/708015052034006027>