

湿陷性黄土地区既有公路路基沉降处治设计 与施工技术规程

Technical specifications for design and construction of existing highway subgrade
settlement treatment in collapsible loess area

2024 - 10 - 08 发布

2025 - 01 - 08 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 调查、勘测及评价 2

5 处治设计 5

6 处治施工与质量验收 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会（SXS/TC37）归口。

本文件起草单位：山西交科公路勘察设计院有限公司、山西省交通科技研发有限公司、山西交通科学研究院集团有限公司。

本文件主要起草人：李智慧、张涛、孔繁盛、王国安、杨文江、燕海兵、刘伟、赵利强、崔伟、张沁、邓亮亮、李赟骁。

湿陷性黄土地区既有公路路基沉降处治设计与施工技术规程

1 范围

本文件规定了湿陷性黄土地区既有公路路基沉降处治设计与施工的术语和定义、符号、调查与评价、处治设计、处治施工与质量验收。

本文件适用于湿陷性黄土地区既有公路路基沉降处治设计与施工，新建（改扩建）公路有关路基工程可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB 50021 岩土工程勘察规范（2009年版）
- GB 50025 湿陷性黄土地区建筑标准
- JGJ 79 建筑地基处理技术规范
- JGJ/T 233 水泥土配合比设计规程
- JTG 3430 公路土工试验规程
- JTG 5210 公路技术状况评定标准
- JTG 5220 公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTG C20 公路工程地质勘察规范
- JTG D30 公路路基设计规范
- JTG H30 公路养护安全作业规程
- JTG/T 3610 公路路基施工技术规范
- JTG/T D31-05 黄土地区公路路基设计与施工技术规范
- JTG/T D33 公路排水设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

既有公路路基沉降

指已通车运营的公路路基在使用过程中，由于各种原因导致的路基垂直方向的下沉变形，一般包括地基沉降、填方路堤沉降、挖方路堑沉降和桥头填料沉降等。

3.2

累计沉降量

指路基现状标高与设计标高的差值，加上历史沉降处治加铺厚度的总和。

3.3

平均沉降速率

沉降路段自开始观测至一个观测周期结束时的沉降总量与观测时间的比值。

3.4

高压旋喷桩

通过钻杆的旋转、提升，高压水泥浆由水平方向的喷嘴喷出，形成喷射流，以此切割土体并与土拌合形成水泥土竖向增强体。

3.5

夯实水泥土桩

将水泥和土按设计比例拌合均匀，在孔内分层夯实形成竖向圆柱形增强体。

3.6

挤密桩

采用石灰土、水泥土或干拌水泥碎石等材料填入孔内分层夯实形成的竖向增强体。

3.7

水泥土搅拌桩

以水泥作为固化剂的主要材料，通过深层搅拌机械，将固化剂和地基土强制搅拌形成的竖向增强体。

3.8

隔水墙

指沿路基坡脚纵向连续开挖基槽后，将填料按设计比例拌合均匀，在规定尺寸坑槽中分层夯实形成竖向墙式增强体，以隔绝浅层地下水横向渗透的隔水设施。

3.9

隔水帷幕

指沿路基坡脚纵向连续搭接设置，对路基沉降部位进行围拢加固，并形成连续墙体以隔绝深层地下水横向渗透的隔水设施。

4 调查、勘测及评价

4.1 调查

4.1.1 既有公路路基沉降调查内容应包括公路建设与养护历史调查、路基现状调查、排水设施和边坡防护现状调查、沿线交通安全设施和公路附属设施调查，主要调查内容见表1。

表1 既有公路路基沉降调查内容

调查项目	具体内容
公路建设资料	工程地质、水文勘察、自然条件资料、平纵线形、路基断面形式、路基填料、地基处理方案、路基填筑方案、路基压实度、设计资料、竣工资料等
养护历史资料	历年路况调查资料、历次沉降时间与处治方案、沉降观测资料、日常养护记录等
路基现状	近5年现状交通量、路基高度、宽度、沉降部位、路基填筑形式、路基填料、路面开裂情况、陷穴调查资料等
排水设施	① 现有地表排水设施设置形式、尺寸、位置、材质、损坏情况、维修养护记录、排水缺陷排查记录等；② 地下排水设施设置形式、尺寸、位置、损坏情况、维修养护记录、排水设施完整性等；③ 地下水情况、邻近灌渠、水源位置、路基易积水路段排除记录等
边坡防护设施	现有边坡防护形式、尺寸、位置、材质、损坏情况、维修养护记录等
沿线交通安全设施	现有护栏设置形式、防护等级、沉降路段护栏变形状况等
公路附属设施	中央分隔带硬化情况、电缆沟老化情况、路肩开裂变形情况等

4.1.2 路基状况调查应按照 JTG 5210 中的规定方法进行评价，可根据实际情况采用人工或数字化自动采集设备调查。

4.1.3 应对路基沉降、路面开裂进行调查，确定沉降范围、沉降量、路面开裂长度、裂缝宽度等，描述病害的发展程度。

4.1.4 既有排水设施状况调查应满足下列要求：

- a) 对路基沉降路段现有的拦水带、截水沟、边沟、排水沟、急流槽、涵洞等排水设施的使用状况进行详细调查，记录病害的位置、规模等；
- b) 根据养护资料和沿线踏勘，对存在路面积水、路基冲刷等情况的路段进行调查，核实积水及冲刷部位并明确影响范围；
- c) 对现有综合排水系统进行评估、分析，列出需要增加和修复排水设施的数量、规格和类型。

4.2 勘察与测量

4.2.1 工程地质勘察

4.2.1.1 路基沉降病害路段工程地质勘察应充分收集和利用历史地勘资料，对于缺少地勘资料或公路运营期沿线自然、地质条件发生较大变化的路段，应进行工程地质补充勘察。

4.2.1.2 工程地质补充勘察工作应编制勘察大纲。当现场地质条件、工程要求、勘察要求等发生变化时，勘察大纲应进行相应调整。

4.2.1.3 工程地质勘察应符合下列基本要求：

- a) 应与既有公路及沿线构造物相结合，为勘探计划和工作量的拟定等提供依据；
- b) 应充分收集、分析勘察区既有的各种地质资料，结合必要的遥感、机械或人工勘探手段进行；
- c) 应沿路线及其两侧的带状范围进行，勘察范围宽度应满足工程方案比选及工程地质分析评价的要求。

4.2.1.4 工程地质勘察应包括下列主要内容：

- a) 黄土地层的类型、分布范围、厚度、夹层情况、形态特征、湿陷性；
- b) 处治路段挖方边坡坡顶以外 50 m 范围、路堤坡脚以外 20 m 范围内的陷穴、暗穴进行排查，并记录位置、尺寸、规模，并分析其对路基的影响程度；
- c) 既有工程的现状、路基沉降变形情况及原因；
- d) 原路基建设期处治方案及措施。

4.2.1.5 工程地质勘察应采用物探、挖探、钻探等进行综合勘探。对于湿陷性黄土场地，优先选用挖探方式。

4.2.1.6 应根据路基沉降现场状况选择典型断面布置勘探点。路堤范围内采用钻探方式，对于湿陷性黄土场地，宜在路侧坡脚位置采用挖探方式取黄土原状土样，并测试其湿陷性。

4.2.1.7 路基沉降病害路段的勘探深度、黄土取样、室内试验项目及试验方法应符合 JTG C20 中 8.1 的规定。

4.2.1.8 工程地质勘察应提交文字说明、工程地质平面图、综合地层柱状图、工程地质断面图、照片以及相关调查图表等。

4.2.2 工程测量

4.2.2.1 应对路基沉降病害路段的纵断面、横断面现状进行高程测量。高程测量宜采用水准仪，并辅以其他测量方式。

4.2.2.2 每幅路基应测量不小于 2 道纵断面线，分别布置于中央分隔带路缘石和硬路肩拦水带旁，可根据实际测量条件适当在行车道、超车道位置加密测量。横断面测量宜覆盖整个沉降区域，并与纵断面同步测量。

4.2.2.3 高程测量点位按以下原则选择：

- a) 一般路基段宜间隔 10 m 设置测量点，并每隔 1 km 设置永久观测点；
- b) 桥梁涵洞等构造物处，应在其构造物起终点边缘及中心位置加密观测点；
- c) 横断面测量宜按 5 m 布置测量断面，对于高程突变部位可适当加密。

4.2.2.4 纵断面测量在通车情况开展时，应及时与地方养护部门、路政部门和交警部门进行沟通协商，做好安全防护措施，并严格按照 JTG H30 中有关规定执行。

4.2.3 水文地质勘察

4.2.3.1 路基沉降病害路段水文地质勘察应充分收集和利用历史水文勘察资料，对于缺少水文资料或公路运营期沿线水文条件发生较大变化的路段，应进行水文地质补充勘察。

4.2.3.2 水文地质补充勘察工作应编制勘察大纲。当现场水文条件、工程要求、勘察要求等发生变化时，勘察大纲应进行相应调整。

4.2.3.3 水文地质勘察应符合下列基本要求：

- a) 需探明路基沉降路段地表水、地下水的上游来源和下游去向；
- b) 勘察范围应满足工程方案比选、水文地质分析评价和路基沉降病害原因分析的要求；
- c) 需判明环境水、土的腐蚀性以及土的基本物理性质时，应取样进行相关试验分析。

4.2.3.4 水文地质勘察应包括下列主要内容：

- a) 黄土地区地表水的分布、积聚、排泄条件，洪水淹没范围及水流冲刷作用和影响；地表水系、井、泉、水库、池塘的分布位置，农田灌溉情况等；
- b) 地下水的类型、埋深、季节性变化幅度、升降趋势及其与地表水体、灌溉、开采地下水强度的关系；路基含水率对路基稳定性的影响；
- c) 水流冲蚀、堰塞湖等不良地质的分布、规模和发展趋势。

4.2.3.5 路基沉降病害路段的水文勘探方法、试验项目及试验方法应符合 JTG C20 中有关规定。

4.2.3.6 水文地质勘察应提交文字说明、照片以及相关调查图表等。

4.3 路基沉降稳定性评价

4.3.1 应对路基状况调查结果进行综合分析，按照 JTG 5210 中的规定方法进行路基技术状况评价。

4.3.2 根据工程地质勘察及试验检测结果，应对路基沉降场地黄土湿陷性进行定性、定量评价。黄土湿陷性评价应符合 JTG C20 中有关规定。

4.3.3 以累计沉降量和路基沉降对行车安全性影响情况为依据将路基沉降程度分为轻微、较严重、严重、特别严重四个等级，见表 2。

表2 路基沉降程度划分表

单位为厘米

路基沉降程度	行车条件	累计沉降量
轻微	路基沉降不明显，桥头台背处轻微跳车，车辆可按运营速度正常行驶，对行车安全影响较小	<5
较严重	路基沉降较明显，桥头台背处明显跳车，车辆可按运营速度正常行驶，对行车安全有一定影响	≥5, <20
严重	路基沉降明显，桥头台背处严重跳车，车辆需减速通过，对行车安全影响较大	≥20, <40
特别严重	路基沉降明显，桥头台背处严重跳车，车辆需减速通过，甚至中断交通，行车不安全	≥40

4.3.4 以平均沉降速率作为划分路基沉降趋势的标准，将其分为稳定、基本稳定和不稳定三个等级，见表3。

表3 平均沉降速率与趋势等级

单位为厘米/月

沉降趋势等级	平均沉降速率
稳定	<0.2
基本稳定	$\geq 0.2, <0.5$
不稳定	≥ 0.5

注1：应结合历史养护记录和实测数据综合判断路基沉降趋势等级；
注2：无历史沉降观测数据路段，应在典型沉降断面设置观测点，并连续观测不少于3个月，每月不少于2次。

5 处治设计

5.1 一般规定

5.1.1 应根据路基使用状况调查和工程地质勘察结果，综合分析既有路基沉降原因，判断引起路基沉降的主要因素，重点关注高填方路基、填挖过渡段、半填半挖段、桥头过渡段等部位，以经济、合理、环保、安全等为基本原则，准确评价路基沉降趋势，分类提出可行的路基沉降处治方案。路基沉降的一般影响因素见表4。

表4 路基沉降影响因素一览表

分类	路基沉降影响因素
路基因素	路堤和桥梁台背填料压实度、路基承载能力
地基因素	原地基处理措施、地基承载力、地基黄土湿陷性、不良地质情况等
水因素	排水设施损坏、缺失或排水系统不完善、路面裂缝和中央分隔带渗水、盲沟渗水、路基局部积水、地下水变化、农田灌溉条件变化等

5.1.2 处治设计方案的制定应综合考虑防护工程、排水工程和路基加固工程，原则上既要满足削弱基底黄土的湿陷性和提高路基承载力，也要满足沿线防排水要求，避免地表水、地下水等水环境变化对路基的不利影响。

5.1.3 处治方案应综合考虑安全性、可实施性、经济性、环保因素等，择优选定方案。

5.1.4 既有公路路基沉降病害处治设计应实行动态设计，在养护工程实施过程中根据病害发展情况开展必要的优化设计。

5.1.5 既有公路路基沉降病害处治设计宜结合实际情况采用安全可靠、适用耐久、易于实施的技术方案，并积极稳妥地应用新技术、新材料、新设备和新工艺。

5.1.6 在路基沉降病害处治设计阶段应对路面病害、路基防护、排水设施、交安设施等并发病害同时进行修复。

5.1.7 应根据路基沉降病害处治规模、范围和技术方案，同步开展交通组织设计，保障工程实施期间公路交通的安全通行和施工作业区安全。

5.2 处治设计原则

5.2.1 路基沉降病害由路基因素或地基因素引起的，应对路基或地基采取加固措施处治；路基沉降病害由综合排水设施不完善因素引起的，应对现有排水设施采取补充、恢复、改进、完善等方式处治；路基沉降病害由地下水或沿线水环境变化因素引起的，应对水源采取隔离、阻断方式处治。

5.2.2 对于路基沉降仅发生于路堤部位，其地基不作处理，路堤部分可按表 5 中推荐方案处治。

表5 路堤沉降处治方案推荐表

路基沉降原因	沉降趋势等级	推荐处治方案
仅由路基本身压实度不足引起	稳定、基本稳定	直接对路面加铺调平处治。
仅由局部路基浸水引起	稳定、基本稳定	封闭浸水通道，可设置仰斜式泄水孔排除路基积水后，再对路面加铺调平处治。
由路基本身压实度不足或局部路基浸水引起	不稳定	封闭浸水通道，然后对路堤范围内采用高压旋喷桩、挤密桩等加固处理，最后对路面加铺调平处治；路基沉降处治深度应自路床顶面至原地面下不小于2 m。

5.2.3 对于路基沉降仅发生于地基部位，其路堤可不作处理，地基部分可按表 6 中推荐方案处治。

表6 地基沉降处治方案推荐表

地基沉降原因		沉降趋势等级	推荐处治方案
仅由黄土地基遇水湿陷引起	地表水局部积聚、下渗引起的黄土地基湿陷沉降	稳定、基本稳定	完善急流槽、排水沟、边沟、截水沟等地表排水设施，引导地表水流至路基影响范围外。
	对于以地下水、灌溉水下渗或横向渗透引起的黄土地基湿陷沉降	稳定、基本稳定	在路基坡脚设置围箍隔水帷幕或隔水墙等方式来疏导或阻隔地下水渗透。
黄土地基湿陷后承载能力下降或存在软弱层的情况		基本稳定、不稳定	地基范围内设置高压旋喷桩、挤密桩等提高地基承载力、减小湿陷沉降。路基沉降处治宜自原地面上不小于1 m处开始设置，最小处理深度应满足JTG/T D31-05-2017中4.1.2的规定。

5.2.4 对于路基沉降在路堤和地基部位均有发生，应对路堤和地基可按表 7 中推荐方案处治。

表7 路堤和地基整体沉降处治方案推荐表

路基沉降原因	沉降趋势等级	推荐处治方案
	稳定、基本稳定	可仅对地基部分采用高压旋喷桩、挤密桩等加固处治。其路堤部分按照5.2.2处理，地基部分按照5.2.3处理。

路基沉降原因	沉降趋势等级	推荐处治方案
由压实度不足和黄土地基遇水湿陷共同引起，或者由路堤局部浸水和黄土地基遇水湿陷共同引起	不稳定	应对路基和地基同步设置高压旋喷桩、挤密桩等提高承载力、减小湿陷沉降，并在坡脚设置围箍隔水帷幕或隔水墙来隔断路基两侧地表水下渗。 同时应采用新增、补充、改造等方式完善路基排水系统。

5.2.5 对于沉降趋势等级为不稳定时，应综合考虑地基场地湿陷等级、路基沉降程度，以及沿线水环境情况确定处治方案。一般情况可参照表 8 制定处治方案。

表8 湿陷性黄土地区既有路基沉降病害处治设计方案表

路段条件	处治设计方案
场地湿陷等级 \geq 自重 II 且路基沉降程度为严重及以上	一般路基段和桥头台背路堤及基底应进行高压旋喷桩、挤密桩等加固处理，且根据最大含水量所处地层深度，在路基坡脚设置围箍隔水帷幕。
场地湿陷等级 \geq 自重 II 且路基沉降程度为轻微、较严重	①桥头台背路堤及基底进行高压旋喷桩、挤密桩等加固处理，可在相应台背范围路基坡脚处设置围箍隔水帷幕。 ②路侧为水浇地、路基易渗水路段且湿陷等级为自重 III、IV 级的湿陷隐患较大路段，路基坡脚应设置围箍隔水帷幕。 ③路侧为水浇地、路基易渗水路段，在①②之外其余一般路基段坡脚处可设置隔水墙。 ④路侧为旱地或荒地、路基不易渗水路段，路基坡脚可不设置围箍隔水帷幕或隔水墙，仅修复排水设施。
场地湿陷等级为非自重湿陷	沉降程度为严重及以上的路段，应对桥头台背路基进行高压旋喷桩、挤密桩等加固处理。
注：采用旋喷桩支撑板体和返浆填充搭板下脱空的工艺，对台背及搭板脱空等病害进行加固处治。具体为：搭板范围内高压旋喷桩由设计深度旋喷至路床顶面，并继续提升注浆至搭板底面填充脱空体。	

5.3 常用加固措施设计

5.3.1 高压旋喷桩设计

5.3.1.1 高压旋喷桩适用于一般路基段和桥梁台背路堤及地基的沉降加固处治，可处理湿陷等级 II ~ IV 级自重湿陷黄土地基，一般处治深度不宜超过 30 m。

5.3.1.2 在制定高压旋喷桩方案时应参考邻近构造物和周边地下埋设物等资料。

5.3.1.3 高压旋喷桩平面布置需根据加固的目的给予具体考虑，布置形式可采用梅花形、等腰三角形或正三角形，桩间距的设置宜综合考虑加固部位、设计桩径、施工工艺及参数和地基加固后承载力要求，一般为 1 m~2.5 m。

5.3.1.4 高压旋喷桩在黄土中的加固体强度一般为 1.5 MPa~5.0 MPa。

5.3.1.5 高压旋喷桩根据工程需要和土质条件，可分别采用单管法、双管法，湿陷性黄土地区不得采用三管法。当无现场试验资料时，可参照相似土质条件的工程经验或按表 9 进行设计。

表9 高压旋喷桩设计参数表

分类方法	单管法	双管法
喷射方法	浆液喷射	浆液、空气喷射

分类方法	单管法	双管法
硬化剂	水泥浆	水泥浆
常用压力 (MPa)	15.0~40.0	15.0~40.0
喷射量 (L/min)	60~70	60~70
压缩空气 (kPa)	不使用	500~700
旋转速度 (rpm)	16~20	5~16
桩径 (cm)	30~60	60~150
提升速度 (cm/min)	15~25	7~20

5.3.1.6 浆液的用量可以根据已知参数情况按式 (1) 或式 (2) 计算。

$$Q = \pi R^2 H \cdot \alpha (1 + \beta) \quad (1)$$

式中:

Q ——浆液用量 (m^3);

R ——设计的加固半径 (m);

H ——设计桩长 (m);

α ——混合系数, $\alpha=0.6\sim 1.8$, 与加固直径和土质有关;

β ——损失系数, 一般取 $0.1\sim 0.2$ 。

$$Q = qt (1 + \beta) \quad (2)$$

式中:

q ——单位时间的喷射量;

t ——每根桩的喷射时间。

5.3.2 挤密桩设计

5.3.2.1 挤密桩法适用于一般路基段沉降加固处治, 可处理湿陷等级 II~IV 级自重湿陷黄土地基, 一般处治深度不宜超过 15 m。

5.3.2.2 既有公路沉降处治宜采用石灰土挤密桩、水泥土挤密桩或干拌水泥碎石挤密桩。

5.3.2.3 挤密桩法处理既有公路路基沉降病害需揭除原有路面结构后自路床顶面起实施, 宜采用预钻孔挤密法, 预钻孔的直径宜为 0.25 m~0.30 m, 夯扩挤密后成桩直径宜为 0.50 m~0.60 m。干拌碎石挤密桩成桩直径不宜大于 0.30 m。

5.3.2.4 挤密桩的孔位宜按等边三角形布置, 其桩体中心间距宜为桩孔设计直径的 2.0 倍~2.5 倍。且桩间土挤密后的平均挤密系数不宜小于 0.90。

5.3.2.5 挤密桩桩孔填料和压实系数要求应满足 JTG/T D31-05 中有关要求。

5.4 常用隔水帷幕设计

5.4.1 一般规定

5.4.1.1 路基隔水设施宜沿路基坡脚纵向连续设置并覆盖全部路基沉降及渗水风险段落, 其起终点距离沉降、渗水点断面不小于 20 m。

5.4.1.2 应根据地基最大含水率地层深度，综合考虑施工便利性、施工工作面布设、施工安全性和经济合理性选择路基坡脚隔水设施设计方案，隔水帷幕处治深度一般不小于 2 m，隔水墙处治深度应不大于 2 m。

5.4.1.3 隔水帷幕设置前应查明土层厚度、含水量、有机质含量、地下水的腐蚀性等。

5.4.1.4 对重要工程或在缺乏经验的地区，隔水帷幕施工前应按设计要求在现场进行试验。如土性基本相同，试验可在一处进行，如土性差异明显，应在不同地段分别进行试验。

5.4.2 夯实水泥土桩隔水帷幕设计

5.4.2.1 夯实水泥土桩适用于既有公路路基坡脚纵向隔水帷幕处治，处治深度不宜大于 15 m。

5.4.2.2 夯实水泥土桩隔水帷幕根据既有公路路基受水侵蚀可能性及位置进行设计，处治深度宜超过最大含水率土层或过水夹层不小于 2 m。

5.4.2.3 桩孔直径宜为 300 mm~800 mm，可根据所选用的成孔设备或成孔方法确定。桩孔应连续布置，间距应根据设计桩径计算，保证桩体搭接宽度不小于桩径的 1/3。

5.4.2.4 桩孔内的填料应根据工程要求进行配比试验，水泥与土的体积配合比宜为 1:5~1:8。

5.4.2.5 孔内填料应分层回填夯实，填料的平均压实系数不应低于 0.94。

5.4.2.6 夯实水泥土桩隔水帷幕设桩顶部位应采取适当的保护措施，并同步完善地表封水措施。

5.4.3 高压旋喷桩隔水帷幕设计

5.4.3.1 高压旋喷桩可用于既有公路路基坡脚纵向隔水帷幕处治，处治深度不宜大于 30 m。

5.4.3.2 采用高压旋喷桩方式设置隔水帷幕时，应根据勘察结果、施工工艺、经验成桩桩径等对桩体搭接布置间距进行重点设计，以确保形成帷幕后最小搭接厚度不小于桩径的 1/3。

5.4.3.3 高压旋喷桩工艺及设计参数可参照 5.3.1 执行。

5.4.4 水泥土搅拌桩隔水帷幕设计

5.4.4.1 水泥土搅拌桩适用于既有公路路基坡脚纵向隔水帷幕处治，且路基外侧工作面能够满足施工设备及作业面最小布置要求。

5.4.4.2 水泥土搅拌桩的施工工艺分为浆液搅拌法(简称“湿法”)和粉体搅拌法(简称“干法”)，不适用于含大孤石或障碍物较多且不易清除的杂填土、硬塑及坚硬的粘性土、密实的砂类土以及地下水渗流影响成桩质量的土层。当地基黄土的天然含水量小于 25%、大于 70%时不应采用干法。寒冷地区冬季施工时，应考虑负温对处理效果的影响。

5.4.4.3 水泥土搅拌法可采用单头、双头、多头搅拌或连续成槽搅拌形成水泥土加固体。

5.4.4.4 拟采用水泥土搅拌法处理地基的工程，除按现行规范规定进行岩土工程详勘外，尚应查明拟处理土层的 PH 值、有机质含量、地下障碍物及软土分布情况、地下水及其运动规律等。

5.4.4.5 设计前应进行拟处理土的室内配比试验。针对现场拟处理的土的性质，选择合适的固化剂、外掺剂及其掺量，为设计提供不同龄期、不同配比的强度参数。固化剂宜选用强度等级不低于 32.5 级的普通硅酸盐水泥。水泥掺量应根据设计要求的水泥土强度经试验确定；块状加固时水泥掺量不应小于被加固天然土质量的 7%。

5.4.4.6 湿法的水泥浆水灰比可选用 0.45~0.55，应根据工程需要和土质条件选用具有早强、缓凝、减水以及节约水泥等作用的外掺剂；干法可掺加二级粉煤灰等材料。

5.4.4.7 干法的加固深度不宜大于 15 m；湿法的加固深度应考虑机械性能的限制，单头、双头加固深度不宜大于 20 m。

5.5 路基排水、防护设计

5.5.1 湿陷性黄土地区路基排水设施应形成良好的排水体系，使路表面、中央分隔带、坡面、路侧和地下排水设施衔接合理，排水畅通，防止地表水局部积水或下渗引起黄土湿陷沉降。

5.5.2 既有公路路基沉降路段排水设计应结合路基沉降原因综合考虑，一般情况可采用表 10 中推荐方案。

表10 既有公路路基沉降路段排水工程设计方案表

路基排水存在问题	推荐处治方案
排水系统不完善	增设排水沟、边沟、截水沟、急流槽、集中排水管等排水设施；改造集中出水口与自然沟渠、河道、桥涵构造物等衔接；增设路面拦水带；根据汇水量改造现有排水设施断面尺寸等
排水设施损坏	原规格修复破损排水设施、排水设施改造等
路基外侧地貌变化后存在填平区、积水区	增设隔水设施、蒸发池、排水涵洞等
中央分隔带渗水	中央分隔带封水硬化、增设中央分隔带排水设施等

5.5.3 湿陷性黄土地区路基排水沟、边沟、急流槽、截水沟等设施宜采用混凝土现浇，如受条件限制，可经论证后采用浆砌片石或浆砌混凝土预制块砌筑。排水设施下应铺设防渗土工布或设置灰土防水层等方式进行防渗处理。

5.5.4 排水系统出水口宜设置在远离路基的自然沟、河道，距离路基坡脚应不小于 25 m。

5.5.5 对于现有路基排水设施已形成系统，仅存在局部破损等问题的，可按原有排水设施尺寸、材料进行修复处治。

5.5.6 对路基坡脚设置夯实水泥土桩或隔水墙的路段，宜在隔水设施外侧重建混凝土排水沟，且排水沟下部应采取适当的防渗处理。

5.5.7 对路基沉降路段的边坡防护、锥坡和桥台防护破损按原有形式进行修复处理，对涵洞洞口破损混凝土进行修复，涵洞底部进行清淤。

5.5.8 对于发现的黄土陷穴，应采用回填夯实、明挖回填夯实或开挖导洞或竖井回填夯实方式处理。

5.5.9 路基防护、排水设计应满足 JTG/T D31-05 中 5.5 和 5.6 的规定。

5.6 交通组织设计

5.6.1 应在施工图设计阶段同步开展交通组织设计，并在施工图文件中明确交通组织方案。

5.6.2 交通组织设计应综合考虑项目路段交通量、交通组成、施工工期、工程实施时间、周边道路通行条件等因素。有特殊要求的养护工程应进行多方案综合比选。

5.6.3 养护作业控制区应综合考虑机械设备作业条件、对交通通行的影响等因素，结合中央分隔带开口、互通式立体交叉或平面交叉出入口的具体位置，进行合理设置。

5.6.4 交通组织设计、公路养护作业控制区布置、安全设施配备及养护安全作业应符合 JTG H30-2015 中有关规定。

6 处治施工与质量验收

6.1 一般规定

6.1.1 施工前应熟悉设计文件，明确技术标准，并进行现场复核。根据复核后的工程量、工期要求、保通要求和施工条件，合理编制施工组织设计和详细的施工期交通组织方案。

6.1.2 路基沉降处治施工时应做好施工期临时排水，并对出水口采取加固措施，避免施工时地表水下渗导致沉降加剧。临时排水宜结合永久排水设施相关内容综合考虑。

6.1.3 应加强路基范围内的陷穴、暗穴的动态排查，随时发现，随时处理。

6.1.4 合理布置堆料场地和弃渣场地，对于封闭部分车道施工时，需加强返浆漫流、扬尘等控制措施，以减轻施工对行车安全的不利影响。

6.2 原材料

6.2.1 高压旋喷桩原材料应满足下列要求：

- 对于无特殊要求的工程宜采用强度等级为 32.5 级及以上的普通硅酸盐水泥，根据需要可加入适量的外加剂及掺合料。外加剂和掺合料的用量，应通过试验确定；
- 根据湿陷性黄土中含盐情况及其它杂质，选用合适的水泥，对于土中含盐量较大且多为硫酸盐渍土，可采用抗硫酸盐腐蚀的矿渣硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥；
- 高压旋喷桩用水应采用人、畜饮用水；
- 水泥浆液的水灰比应按工程要求确定，可取 0.8~1.2。施工时具体的水灰比应通过稠度、水泥浆比重和桩体强度三个指标确定。

6.2.2 夯实水泥土桩、挤密桩、水泥土隔水墙原材料应满足下列要求：

- 宜采用强度等级为 32.5 级及以上的普通硅酸盐水泥；
- 土料应采用低液限粉土或低液限粘土，塑性指数不大于 20，宜控制在 12 左右，含水率应接近最佳含水率。有机质含量不得超过 5%，不得含有冻土和膨胀土，使用时应过 10 mm~20 mm 筛。
- 干拌水泥碎石配合比宜为水泥：石屑：碎石=1.0：2.6：3.3。水泥强度宜为 42.5 级，石屑粒径宜为 0 mm~5 mm，碎石粒径宜为 5 mm~20 mm，其含泥量不应大于 5%。

6.3 施工工艺及质量验收

6.3.1 高压旋喷桩

6.3.1.1 高压旋喷桩施工应采用的施工工艺流程见图 1：

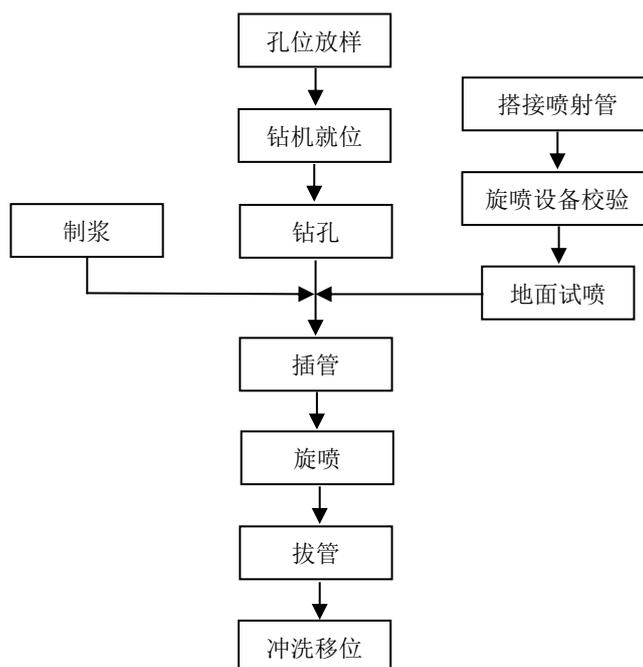


图1 高压旋喷桩施工工艺

6.3.1.2 高压旋喷桩施工应符合 JGJ 79 中 7.4 的规定。

6.3.1.3 高压旋喷桩施工注意事项如下：

- a) 施工前应根据现场环境和地下埋设物的位置等情况，复核高压旋喷桩的设计孔位；
- b) 高压泵应设有安全装置，并经常检查各密封圈、压力表，以防泄露或因超压引起事故；
- c) 冬季施工时高压泵不得在负温下工作，施工完成应及时将泵和管道内的积水排出，以防结冰；
- d) 在旋喷过程中，应对冒浆进行观察，以及时了解土层状况、旋喷的大致效果和旋喷合理性等，对于冒浆量过大或完全不冒浆时应查明原因并采取相应措施；
- e) 对于冒浆过大情况，可通过提高喷射压力、适当缩小喷嘴孔径、加快提升和旋转速度等措施减少冒浆；
- f) 对于地层中有较大空隙引起的不冒浆，可在浆液中掺加适量的速凝剂，缩短固结时间，使浆液在一定范围内凝固，也可在空隙地段增大注浆量，填满空隙后再继续施工；
- g) 因浆液析水、收缩，对固结体顶部出现的凹穴，必须采取措施予以消除；
- h) 对需要局部扩大加固范围、提高强度的部位或者施工间断导致断桩情况发生时，可采用复喷措施；
- i) 施工前应作好场地准备，设置回浆池，喷浆过程中冒出的浆液、泥土必须及时清理。

6.3.1.4 高压旋喷桩施工的各项工艺参数在满足设计要求的基础上，其主控项目应符合表 11 的规定。

表11 高压旋喷桩施工主控项目

主控项目	检验数量	检验方法及要求
高压喷射注浆所用的水泥和外加剂品种、规格及质量	同一产地、品种、规格、批号的水泥和外加剂，袋装水泥每200 t为一批、散装水泥500 t为一批，当袋装水泥及外加剂不足200 t或散装水泥不足500 t时也按一批计。施工单位每批抽样检验1组	检查产品质量证明文件及抽样检验
高压旋喷桩的数量、布桩形式	施工单位每根桩检验	钢尺测量
高压旋喷桩的长度	施工单位每根桩检验	测量钻杆长度，并在施工中检查是否达到设计深度标志。检查施工记录
注浆流量、注浆泵压力、钻杆提升速度、转速等参数	施工单位每根桩施工过程中抽检2次	查看仪表读数，秒表、钢尺测量。检查施工记录
高压旋喷桩每延米水泥浆用量	施工单位抽样检验桩总数的2%，且每处沉降路段不少于5孔	秒表测量，检查施工记录和水泥用量
高压旋喷桩水泥浆密度	水泥浆罐每批次水泥浆检测1次	采用泥浆比重计测定
高压旋喷桩的完整性、均匀性、无侧限抗压强度	施工单位抽样检验桩总数的2%，且每处沉降路段不少于5孔	桩完工28 d后，在每根检测桩桩径中心外侧方向1/4处、桩长范围内垂直钻孔取芯，观察其完整性、均匀性，拍摄取出芯样的照片，结合地层特性取上、中、下不同深度不少于3个试样作无侧限抗压强度试验。钻芯后的孔洞采用水泥砂浆灌注封闭

6.3.1.5 高压旋喷桩施工质量检验标准及频率应符合表 12 的规定。

表12 高压旋喷桩施工质量检验标准及频率

实测项目	规定值或允许偏差	检查方法或频率
桩位 (mm)	±50	丈量, 抽查总桩数的 2%, 且每处沉降路段不少于 5 孔
桩距 (mm)	±100	丈量, 抽查总桩数的 2%, 且每处沉降路段不少于 5 孔
桩长 (m)	不小于设计值	检查 100%, 测量钻杆长度, 查施工记录
垂直度 (%)	≤1.5	检查 100%, 垂直度尺测量, 查施工记录
水泥浆用量 (L/m)	≥240	秒表测量, 检查施工记录和水泥用量, 抽查总桩数的 2%, 且每处沉降路段不少于 5 孔
水泥浆密度 (g/cm ³)	1.45~1.55	泥浆比重计测定
28d 强度 (MPa)	≥1.5	钻芯取样, 抽查总桩数的 2%, 且每处沉降路段不少于 5 孔

6.3.2 挤密桩

6.3.2.1 成孔应按设计要求、成孔设备、现场土质和周围环境等情况, 选用钻孔夯扩等方法。

6.3.2.2 成孔和孔内回填夯实应符合下列要求:

- 成孔和孔内回填夯实的施工顺序, 当整片处理时, 宜从里(或中间)向外间隔 1~2 孔进行, 对大型工程, 可采取分段施工; 当局部处理时, 宜从外向里间隔 1~2 孔进行;
- 向孔内填料前, 孔底应夯实, 并应抽样检查桩孔的直径、深度和垂直度;
- 桩孔的垂直度偏差不宜大于 1.5%;
- 桩孔中心点的偏差不宜超过桩距设计值的 5%;
- 经检验合格后, 应按设计要求向孔内分层填入筛好的填料, 并应分层夯实至设计标高。

6.3.2.3 施工过程中, 应有专人监理成孔及回填夯实的质量, 并应做好施工记录。如发现地基土质与勘察资料不符, 应立即停止施工, 待查明情况或采取有效措施处理后, 方可继续施工。

6.3.2.4 雨季或冬季施工, 应采取防雨或防冻措施, 防止填料受雨水淋湿或冻结。

6.3.2.5 成桩后, 应及时抽样检验挤密地基的质量。对一般工程, 主要应检查施工记录、检测全部处理深度内桩体和桩间土的干密度, 并将其分别换算为平均压实系数和平均挤密系数。对重要工程, 除检测上述内容外, 还应测定全部处理深度内桩间土的压缩性和湿陷性。

6.3.2.6 挤密桩施工质量检验方法与标准应按照 JGJ 79 中 7.4 的规定执行。

6.3.3 夯实水泥石桩

6.3.3.1 夯实水泥石桩成孔方式一般有长螺旋钻成孔和机械洛阳铲成孔两种, 具体根据现场实际情况来定。当路基坡脚两侧空间有限, 无法采用长螺旋钻成孔, 可采用机械洛阳铲成孔。

6.3.3.2 夯实水泥石桩施工应采用的施工工艺流程见图 2:

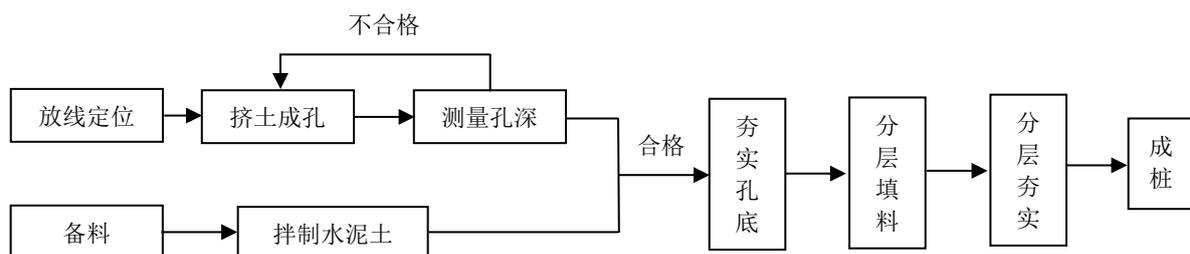


图2 夯实水泥土桩施工工艺

6.3.3.3 夯实水泥土桩施工应符合 JGJ 79 中 7.6 的规定。

6.3.3.4 夯实水泥土桩施工注意事项如下：

- a) 在设计加固深度范围内存在管道或洞穴等地下障碍时，首先采用人工或挖掘机将地下障碍清除，然后人工修整为阶梯状，采用分层回填方法至原标高，控制回填密实度，达到与原地基土承载力相近后，再按原设计布桩重新成孔成桩；
- b) 雨期、冬期施工的处理应满足下列规定：
 - 1) 雨期施工时，孔已挖成，未填料前快要下雨时，要及时覆盖，避免雨水灌入孔内造成塌坍。雨期施工防止雨水流入孔内，施工面不宜过大，按逐段逐片分期施工，重点做好材料防水工作，设引水沟集水井；
 - 2) 冬期施工应采取有效的冬季施工方案，采取保温措施防止混合土料结合，水泥土入孔温度不得低于 5℃，对桩头应覆盖以免受冻；
 - 3) 当气温高于 30℃时，要在已搅拌好的水泥土拌和料上覆盖两层湿草袋，每隔一段时间洒水湿润，以防水分蒸发过快，使拌和料含水率降低。
- c) 已施工完的夯实水泥土桩，避免铲车等大型车辆上去碾压，以免造成断桩，同时也易造成桩间土的扰动，桩顶应留 200 mm~300 mm 高以保护桩顶，清土时采用人工清除，手推车清运，不可用铲车清运；
- d) 施工过程中，应有专人监理成孔及回填夯实的质量，并应做好施工记录。如发现地基土质与勘察资料不符，应立即停止施工，待查明情况或采取有效措施处理后，方可继续施工。

6.3.3.5 夯实水泥土桩施工的各项工艺参数在满足设计要求的基础上，其主控项目应符合表 13 的规定。

表13 夯实水泥土桩施工主控项目

主控项目	检验数量	检验方法及要求
夯实水泥土桩所用的水泥和外加剂品种、规格及质量	同表11高压旋喷桩水泥和外加剂检验数量要求	检查产品质量证明文件及抽样检验
水泥土拌合后含灰量	抽取拌合站拌合好的水泥土，每批次检测1次	采用EDTA滴定法进行检测
夯实水泥土桩的数量、布桩形式	施工单位每根桩检验	钢尺测量
夯实水泥土桩的长度	施工单位每根桩检验	在施工中采用垂尺测量成孔深度。检查施工记录
夯实水泥土桩的完整性、均匀性、无侧限抗压强度	施工单位抽样检验桩总数的2%，且每处沉降路段不少于5孔	28 d钻取芯样（上、中、下三层各取一处），如无法钻取芯样或钻芯困难，可在夯实水泥土桩外侧开挖至预定深度后人工切割取样，加工成70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的试件（不少于6个）后进行无侧限抗压强度试验；或者抽取拌合站拌合好的水泥土，放入70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的试模中制备试件，养生28 d后进行无侧限抗压强度试验，28 d强度应≥2.0 MPa

主控项目	检验数量	检验方法及要求
施工完毕后夯实水泥土桩的压实度	施工单位抽样检验桩总数的2%，且每处沉降路段不少于5孔	所抽取的桩体混合料的压实度不小于93%，每3 m检测一点。对于桩顶，直接采用环刀法进行压实度检测，对于桩中间及底部，在建立轻型动力触探锤击数与压实度的相关关系后，采用轻型动力触探方式进行检测；或者在夯实水泥土桩外侧开挖至预定深度后，人工挖取试样，并用环刀法检测其压实度
夯实水泥土桩的抗渗性	施工单位抽样检验桩总数的0.2%，且每处沉降路段不少于5孔	采用JTG 3430中T 0130-2007变水头渗透试验方法或者JGJ/T 233中附录B.5的方法进行水泥土抗渗性检测
夯实水泥土桩桩体干密度	施工单位抽样检验桩总数的2%，且每处沉降路段不少于5孔	质量检查时需检查桩的干密度和施工记录，干密度的检验方法可在成桩24 h内采用取土样测定或采用轻型动力触探击数 M_{60} 与现场试验确定的干密度进行对比，以判断桩身质量，要求成桩2 h内锤击数 $M_{60} \geq 40$ 击/30 cm

6.3.3.6 夯实水泥土桩施工质量检验标准及频率应符合表 14 的规定。

表14 夯实水泥土桩施工质量检验标准及频率

实测项目	规定值或允许偏差	检查方法或频率
桩位 (mm)	±50	丈量，抽查总桩数的 2%，且每处沉降路段不少于 5 孔
桩距 (mm)	±100	丈量，抽查总桩数的 2%，且每处沉降路段不少于 5 孔
桩径 (mm)	不小于设计值	丈量，抽查总桩数的 2%，且每处沉降路段不少于 5 孔
桩长 (m)	不小于设计值	检查 100%，垂尺测量，查施工记录
垂直度 (%)	≤1.5	检查 100%，查施工记录
水泥土含灰量	不小于设计值	每批次检测 1 次
水泥土压实度 (%)	≥93%	抽查总桩数的 2%，且每处沉降路段不少于 5 孔
48h 内锤击数 M_{60} (击/30cm)	≥40	抽查 0.5%，且每处沉降路段不少于 5 孔
渗透系数 (cm/s)	≤ 2.5×10^{-7}	抽查 0.2%，且每处沉降路段不少于 5 孔
28d 强度 (MPa)	≥2.0	抽查总桩数的 2%，且每处沉降路段不少于 5 孔

6.3.4 水泥土搅拌桩

水泥土搅拌桩复合地基施工及质量验收按照JGJ 79中7.3的规定执行。

6.3.5 水泥土隔水墙

6.3.5.1 水泥土隔水墙施工工艺流程见图 3:

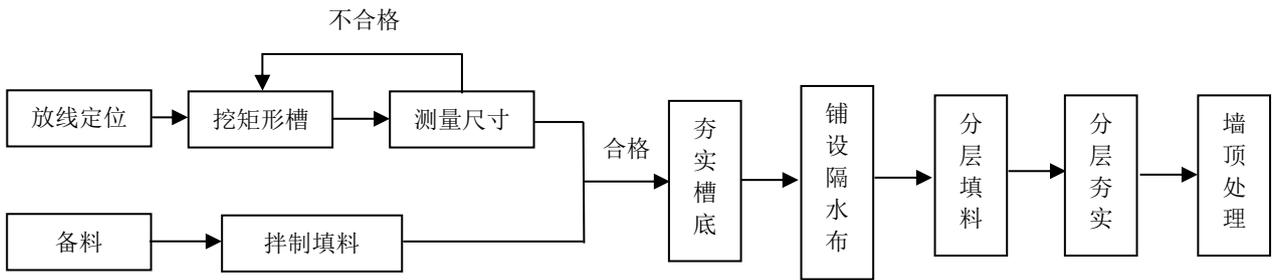


图3 混凝土隔水墙施工工艺

6.3.5.2 混凝土隔水墙施工应满足下列要求:

- a) 按照施工中隔水墙的设计段落，采用挖掘机在路基坡脚处开挖矩形槽，清理完基底后采用蛙式打夯机夯实基底，压实度不小于 90%；
- b) 将填料分层回填到矩形槽中，松铺厚度不得大于 20 cm，采用蛙式打夯机分层夯实，压实度不小于 93%；夯实必须掌握好夯实遍数，要求一夯压半夯，夯夯相连，不得漏夯；
- c) 填料夯实施工如需停顿，必须挖成台阶状，宽度不得小于 50 cm，二次接茬处虚土应清除干净，适当洒水湿润；
- d) 雨季施工时，应做好基坑周围防水措施，并挖好排水沟、集水坑等；
- e) 隔水墙在施工完成后不得遭受雨水浸泡、日晒，应做好临时遮盖或及时回填素土加以保护；
- f) 土工布应连续铺设在隔水墙基底、右侧槽壁和墙顶，中间不得有接缝。

6.3.5.3 混凝土隔水墙施工的各项工艺参数在满足设计要求的基础上，其主控项目应符合表 15 的规定。

表15 混凝土隔水墙施工主控项目

主控项目	检验数量	检验方法及要求
隔水墙所用的水泥和外加剂品种、规格及质量	同表11高压旋喷桩水泥和外加剂检验数量要求	检查产品质量证明文件及抽样检验
混凝土拌合后含灰量	抽取拌合站拌合好的混凝土，每批次检测1次	采用EDTA滴定法进行检测
隔水墙墙底及墙体分层压实时各层压实度	错开层位每隔50 m抽查1点	采用灌砂法或环刀法
隔水墙的抗渗性	每250 m抽查1点	采用JTG 3430中T0130-2007变水头渗透试验方法或者JGJ/T 233中附录B.5的方法进行混凝土抗渗性检测
隔水墙的完整性、均匀性、无侧限抗压强度	每50 m抽查1点	28 d钻取芯样，加工成70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的试件后进行无侧限抗压强度试验

6.3.5.4 混凝土隔水墙施工质量检验标准及频率应符合表 16 的规定。

表16 混凝土隔水墙质量检验标准及频率

实测项目	规定值或允许偏差	检查方法或频率
墙体高度 (mm)	不小于设计值	查施工记录
墙体厚度 (mm)	不小于设计值	查施工记录
水泥土含灰量	不小于设计值	每批次检测 1 次
28d 强度 (MPa)	≥ 2.0	每 50m 抽查 1 点
水泥土压实度 (%)	$\geq 93\%$	每 50m 抽查 1 点
墙底压实度 (%)	$\geq 90\%$	每 50m 抽查 1 点
渗透系数 (cm/s)	$\leq 2.5 \times 10^{-7}$	每 250m 抽查 1 点

6.4 试桩

6.4.1 路基沉降处治施工前，应根据地质情况、布桩形式选取代表性地点开展工艺性试桩，试桩参数应在设计范围内选取，并提出不少于 3 种工艺参数组合，每种工艺参数组合平行试桩数量不宜少于 3 根。

6.4.2 试桩完毕后，应对成桩质量进行检验，并根据检验结果编写试桩总结报告，明确施工工艺参数。

6.4.3 经论证、批准后的试桩总结报告可作为施工控制依据和操作规程，施工时应严格以试桩总结报告确定的工艺参数执行。