

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.03.010

# 湿陷性黄土冲沟区高填方路基设计方案研究

房增耀

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市200092]

**摘要:**在黄土冲沟地区修建高等级道路、高填方路基时,应重点关注对湿陷性黄土的处理。依托晋中市环城东路北延高填方路基工程,提出“强基、稳堤、固坡、疏水”的设计方案:采用灰土挤密桩处理Ⅱ级自重湿陷性冲沟场地并控制地基承载力不低于250 kPa;采用分层强夯法填筑路基并动态监控路基变形情况;采用分级放坡、设置坡脚墙等措施增强边坡稳定性;在沟底设置双排圆管涵解决雨水横向过路问题。工后两年路基状况良好,可为同类工程的设计提供参考。

**关键词:**湿陷性黄土;高填方路基;灰土挤密桩;强夯

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-7716(2023)03-0044-04

## 0 引言

湿陷性黄土广泛分布于山西、陕西、甘肃、宁夏等地区,实际工程中经常遇到该类地质,如处理不当,则会在降雨或浸水情况下引发沉降、滑坡或崩塌等路基病害,导致工程质量事故。因此,工程上常采用垫层法、挤密法、强夯法、预浸水法等消除或降低黄土的湿陷性<sup>[1]</sup>。

本文依托晋中市环城东路北延高填方路基工程,对采用灰土挤密桩法、分层强夯法处理湿陷性黄土做了研究,提出湿陷性黄土地区高填方路基的综合处理措施。

## 1 概述

### 1.1 项目概况

环城东路北延工程位于山西省晋中市北部,项目场地为典型黄土冲沟地貌。道路等级为城市快速路,路线全线长约4.2 km,红线宽60 m,主线双向6机动车道,辅道双向4机动车道并设人非系统。

本工程经过两处冲沟,路线与冲沟夹角为 $56^{\circ}11'59''$ ,沿道路纵向剖面均呈“U”字型,敞口最大宽度160 m,原状沟底为耕植土地,每年雨季有地表流水经过。冲沟处填方路基最大高度为24.5 m。冲沟距离最近村庄房屋约240 m,工程周边无大型建筑。

### 1.2 方案概述

经前期方案研究,确定采用高填方路基通过上

述冲沟。经计算,冲沟两侧可利用挖方数量与该冲沟填方数量基本平衡。

从经济性和技术可行性分析,按照“强基、稳堤、固坡、疏水”的思路提出动态设计方案:(1)采用灰土挤密桩处理沟底地基;(2)采用分层强夯法填筑路基;(3)采用其他防护措施保证路基的稳定性;(4)在沟底设置横向排水管以解决雨水横向过路问题。

## 2 地基处理方案

### 2.1 场地湿陷性分析

本项目位于湿陷性黄土区Ⅳ区(山西-冀北地区)<sup>[2]</sup>。拟建工程场地内,自上而下,地基土沉积时代及成因类型分别为:第四系全更新统人工堆积层(Q4<sup>2</sup>ml)人工填土;全新统冲洪积层(Q4<sup>al+pl</sup>)湿陷性粉土、卵石、粉土层。

高填方路段范围内地基土为Ⅱ级自重湿陷性黄土,湿陷厚度为4.9~5.3 m,埋深高于地下水位线,沟底地基承载力特征值为130 kPa。基于现状场地地质条件,原状地基无法满足新建快速路对承载力、沉降变形及路基稳定性等技术指标的要求,故需对原状场地进行处理。

### 2.2 灰土挤密桩工作原理

基本原理包括两个方面:第一,物理作用。通过对原状土挤密,降低原状土的孔隙率,从而提高地基承载力。第二,化学作用。石灰与地基土内物质发生化学反应达到加固土体的目的。

### 2.3 设计参数

湿陷性黄土地基的类型、等级、沉降和稳定性验

收稿日期:2022-05-06

作者简介:房增耀(1989—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

算应符合相关规范<sup>[2-3]</sup>的要求,本项目按甲类场地处理。

### 2.3.1 处理范围

根据地质情况,湿陷性黄土层厚度为 4.9~5.3 m,因此处理深度按照穿透灰土层设计。灰土桩桩长统一取 6 m,在灰土桩顶面至原地基顶面之间设置 50 cm 厚的灰土褥垫层,总处理厚度为 6.5 m。处理范围按大面积成片处理考虑,纵向沿“U”型沟底全部,横向沿沟冲沟方向均超出坡脚线外 5 m。

### 2.3.2 桩径桩间距设计

#### (1) 桩径

桩径大小对施工及地基处理效果影响显著。桩径过小导致增加打桩和回填的工作量;桩径过大时,挤密效果较差。因此,结合规范要求和现场实际情况拟定桩径  $d=0.4$  m。

#### (2) 桩间距

桩间距应和拟定的桩径相适应,规范<sup>[2]</sup>推荐的直径宜为 0.35~0.45 m。本项目拟定桩间距为  $2d=0.8$  m,梅花形布置,置换率为 0.227。

## 2.4 设计方案

施工前,应根据现场实际情况进行试桩实验,其结果作为大面积施工的指导依据,设计方案见图 1。

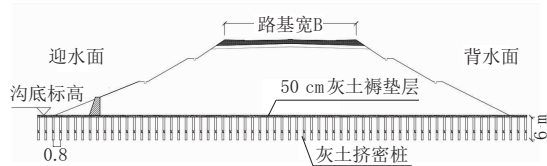


图 1 灰土挤密桩法设计图(单位:m)

(1) 将沟底原状地表杂填土彻底清除至桩顶设计标高。

(2) 根据 2.3 节提供的参数和试桩结果施工灰土挤密桩和褥垫层,且褥垫层压实度应不低于 96%<sup>[4]</sup>。

(3) 处理后,对复合进行地基承载力、桩间土挤密系数和地基湿陷性评价。评价结果见表 1,均满足设计要求。

表 1 灰土机密桩检验结果

检验项目	允许值	实测值	检测方法
桩身压实系数	$\geq 97\%$ (平均)/ $\geq 93\%$ (极小)	97.6/94.3	现场取样
桩间土挤密系数	$\geq 93\%$ (平均)/ $\geq 88\%$ (极小)	94.5/90.2	按规范
复合地基承载力	$f_{spk} \geq 200$ kPa	254 kPa	静荷载试验
复合地基失陷系数	$\delta \leq 0.015$	每层均 $< 0.015$	室内试验

## 3 路基填筑设计

灰土挤密桩复合地基验收合格后方可开展路基填筑工作,本文采用分层强夯法填筑路基。为加强路基顶部的整体性,对路床底及以下 1 m 深度处均采用土工格栅处理。为降低差异沉降,在纵向路基与原状沟壁搭接处设置台阶和土工格栅。

### 3.1 强夯设计方案

#### 3.1.1 强夯加固机理

强夯法通过高能级的外力作用,强制降低土的空隙率,达到地基密实、承载力提高的效果。加固区域分为松弛扰动区、主加固区、次加固区和震动影响区<sup>[5]</sup>,原理和现场分别见图 2、图 3。

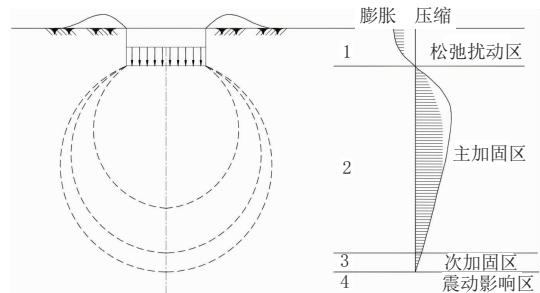


图 2 强夯加固原理图

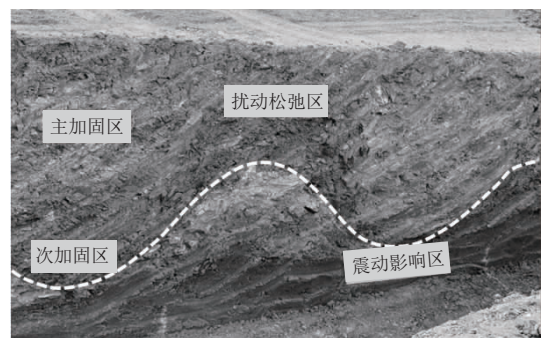


图 3 现场加固效果

#### 3.1.2 强夯参数

##### (1) 夯击能

根据地质状况和规范<sup>[3]</sup>要求,点夯能级为  $3000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,满夯能级采用点夯的 1/2,即  $1500 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

##### (2) 分层厚度

根据规范规定<sup>[2]</sup>,强夯影响深度为 5~6 m,分层厚度取 4 m。为提高压实度,每摊铺 30 cm 厚度后采用震动碾压。

##### (3) 夯点布置

参照相关工程经验,初步拟定,夯点点位按正方形布置,夯点间距为  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,夯锤底面积不小于  $4 \text{ m}^2$ 。

#### 3.1.3 设计方案

分层强夯法对工程地质、施工控制的依赖性强,规范理论滞后于工程实践,所以应充分重视试夯试

验。本项目试夯结果见表2,结合试夯试验制定如下方案,施工现场见图4。

表2 分层强夯试验结果

	强夯指标		震动碾压指标	
	规范值	实测值	规范值	实测值
分层厚度/m	3.5~4	4	0.3~0.4	0.3
夯/压实指标	$\lambda_c \geq 0.96$	0.972	$\lambda_c \geq 0.97$	0.976
平均夯沉量/m	—	1.02	—	—
点夯次数	10~12	10.3	—	—
最后两击平均夯沉量/mm	50	48	—	—



图4 分层强夯法施工现场

(1)在处理后的复合地基上填筑路基,每摊铺30 cm厚度后采用震动碾压,并检测记录压实度不低于97%。每填筑4 m采用强夯加固,强夯参数按3.1.2节的要求取值。

(2)填筑高度达到现状沟底标高以上8 m时,将回填土层反开挖后施工排水过路管涵。

(3)填筑范围内夯击遍数为三遍:前两遍采用点夯,第二遍夯击点位于第一遍夯击点之间;第三遍采用满夯,要求锤印搭接;三遍夯击应间隔7 d。

(4)每遍夯击锤数:按最后两击的平均夯沉量不大于50 mm控制。

(5)施工过程中应对路基的变形进行实时监控和调整。

### 3.2 基顶处理方案

采用分层强夯法填筑至路床底面以下1 m。对0.8 m厚的路床采用三七灰土封层处理;路床底及路床底面以下1 m分别满铺土工格栅,施工现场见图5。



图5 基础顶部土工格栅铺设

### 3.3 纵向搭接设计

为避免路基差异沉降过大导致路面开裂或管线破坏,沿道路纵向与冲沟壁搭接处将原地表土清除后开挖台阶,台阶宽度2.0 m,高度1 m,并在搭接处

设置土工格栅,设计方案详见图6。

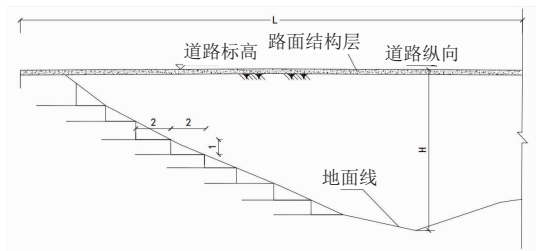


图6 纵向搭接设计图

## 4 路基防护措施

路基防护是保障高填方路基稳定性的关键,如果防护不当,则容易造成水土流失,甚至危及边坡稳定和工程安全。本文采用分级放坡,坡脚、坡面均采用加固措施。

### 4.1 边坡防护

路堤采用阶梯式边坡,由上向下,第一级边坡高度为8 m,坡率1:1.5;第二级高12 m,坡率1:1.75;剩余部分根据实际高差接地,背水面坡率1:2.25,迎水面坡率为1:2.5。每级边坡之间设置宽2.5 m的平台,平台顶采用2%外向坡并设置截水沟。路堤边坡防护采用拱形骨架护坡。设计方案详见图7,现场详见图8。

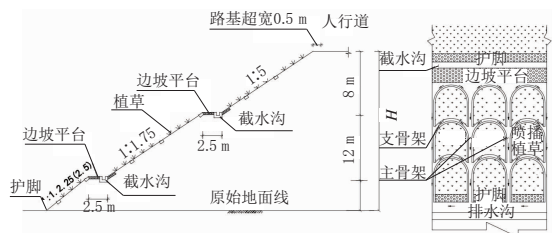


图7 拱形骨架边坡防护设计图(单位:m)



(a)护坡施工中 (b)工后2年护坡状态

图8 现场拱形骨架边坡防护

为巩固坡脚,在迎水面坡脚处设置浆砌片石重力式截水墙,墙高6 m;在背水面坡脚处设置码砌石笼护脚。

### 4.2 路基排水

本文研究对象位于天然冲沟内,冲沟或路基排水不畅时,极易导致路基发生水损害。为解决高填方路基底部横向过水问题,在路堤下设置双排过水圆管涵,管涵断面为2×φ2000(壁厚14 mm)。施工需严格按照下文要求执行,方案见图9。施工时应动态

监测钢管状态,不允许破坏钢管,现场见图 10。

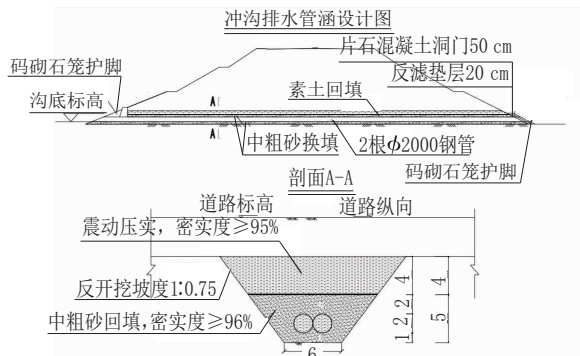


图9 基底过水设计图(单位:m)



图10 基底过水管涵施工现场

首先,分层强夯填筑路基至管道底标高以上 8 m,再按照 1 : 0.75 的坡率反开挖至管道外底标高以下 1 m,按照相关要求施工管道,并及时用中粗砂回填至管道外顶标高以上 2 m,回填范围内密实度不应小于 96%。在回填顶部铺设聚苯板减震材料。

其次,减震聚苯板以上部分回填素土,采用振动碾压,压实度应不低于 95%。反开挖面以上第一层 4 m 深度范围内路堤施工时采用低能级夯实功(2 000 kN·m)夯实。

最后,按照道路路堤填筑方案,每填筑 4 m 后进行一次强夯处理。

## 5 路基稳定性分析

高填方路基处理不当易引发路基病害,直接影响道路的使用功能,严重时导致安全事故。本文采用动态设计方法,设计阶段进行稳定性分析计算,施工及工后应对路基稳定性进行严格监控,根据计算、监测结果动态调整设计方案。

### 5.1 路基稳定性验算

采用圆弧法对高填方路基边坡稳定性验算,计算应重点考虑降水对边坡稳定的影响<sup>[6]</sup>。计算结果见表 3,在三种工况下均满足规范要求。

表3 边坡安全系数表

边坡安全系数	允许值	计算值
天然工况	1.3	1.67
暴雨工况	1.15	1.52
暴雨+地震工况	1.05	1.42

高填方路基(填高不小于 20 m)应根据工后沉降量预留基顶加宽值;根据规范<sup>[7]</sup>要求,本项目总沉降控制不大于 20 cm,路基两侧各预留 50 cm 宽度。

### 5.2 路基稳定性监测

路基稳定性监测是保障路基稳定的重要工作,应贯穿整个建设周期,包括施工阶段的监测和工后稳定性监测。如发现异常应及时向设计反馈,根据异常结果动态调整设计、施工方案或采取工后处置措施。

#### 5.2.1 位移沉降控制

分层填筑时应严格控制路堤填方速率及路堤变形沉降和边坡滑移,路堤施工时必须控制每昼夜的垂直沉降在 10 ~ 15 mm 之间。当垂直沉降量超过 10 mm 时应及时提出预警,超过 15 mm 时应停止施工。

每昼夜的水平位移应小于 5 mm。当水平位移超过 4 mm 时应及时提出预警,超过 5 mm 时应停止施工。高填方路基段纵向每隔 25 m 设置一个观测断面,一个观测断面为三组沉降板、三组浅层观测桩和两组位移观测边桩,设计方案见图 11。

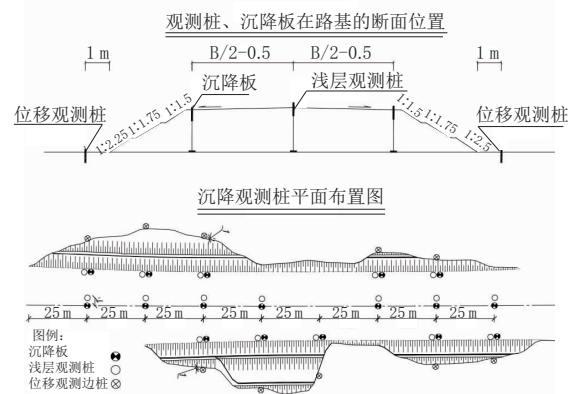


图11 路基监测设计图(单位:m)

#### 5.2.2 监测频率

施工过程中监测频率:每填筑 1 层观测 1 次,路堤填筑高度大于 4 m 后,1 d 观测 1 次,中途若有停工,则每 3 d 观测 1 次;

施工完成后监测频率:第一个月内每 3 d 观测 1 次,中间两个月每 7 d 观测 1 次,从第四个月开始每 15 d 观测 1 次,直到开始路面铺装工作。

施工单位应及时向设计单位反馈检测、监测记录结果,内容包括但不限于本文要求的强夯过程数据、路基沉降、滑移监测数据等。

## 6 结语

本文依托晋中市环城东路北延高填方路基工  
(下转第 67 页)

在辅助墩设计时,选用厚度为2 m、横向宽为10 m的柔性薄壁空心墩。辅助墩在施工及运营期间会出现拉力,因此需设置双向受力支座。具体为在辅助墩内锚固2根PES(FD)7-199拉索,每根拉索施加的预压力为4 000 kN。另为抵消拉索产生的拉应力,在墩身内配置80根精轧螺纹钢筋。

边墩设计时,选用双柱式桥墩配双悬臂式盖梁。墩身采用矩形截面,断面尺寸为1.6 m(纵向)×2.5 m(横桥向)。

#### 4.4 斜拉索设计

全桥设置42对共84根斜拉索。拉索为单索面(双排索)扇形布置,桥面处拉索间距分别为6 m和3 m,塔上拉索间距1.8 m。在本次设计中,选用扭绞形平行钢丝斜拉索,由 $\phi 7$  mm高强平行钢丝组成。

拉索两端锚具选用张拉端冷铸锚锚具,采用塔上单端张拉。

### 5 结构计算

#### 5.1 计算模型

基于空间有限元分析软件Midas/Civil,采用静力计算分析方式,对桥塔、桥墩以及主梁选用梁单元模拟,斜拉索则采用只受拉桁架单元模拟<sup>[3]</sup>,桥塔和主梁以及桥墩之间采用刚性连接。全桥共划分为267个单元和403个节点,其中梁单元有183个,而只受拉桁架单元有84个。全桥有限元计算模型见图6。

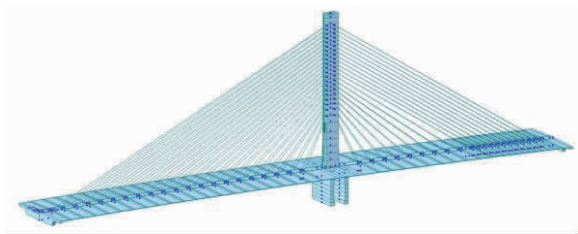


图6 全桥有限元计算模型

(上接第47页)

程,以“强基、稳堤、固坡、疏水”为原则,提出了湿陷性黄土地区高填方路基动态设计方法。

目前,晋中市环城东路北延工程已经正常通车运行两年多,路基路面状况良好,边坡稳定,排水设施功能完备。本项目周边存在大量类似场地,本文期望通过该案例为相似工程设计提供参考和借鉴。

#### 参考文献:

[1]《工程地质手册》编写委员会.工程地质手册-5[M].北京:中国建筑

#### 5.2 静力计算结果

(1)施工阶段,主梁截面所产生的最大压应力为11.2 MPa,满足规范<sup>[4]</sup>要求。

(2)长期效应组合截面下缘最大正应力为13.2 MPa,最小正应力为1.3 MPa;截面上缘最大正应力为10.0 MPa,最小正应力为0.5 MPa。各截面未出现正拉应力。短期效应组合截面下缘最大正应力为14.8 MPa,最小正应力为0.8 MPa;截面上缘最大正应力为14.4 MPa,最小正应力为0.5 MPa。各截面未出现拉应力。

(3)按荷载标准值组合,主梁截面最大正应力为15.6 MPa,主梁截面最大主压应力为15.6 MPa,满足规范<sup>[4]</sup>要求。

(4)主梁活载所产生的最大挠度值为49.6 mm,索塔活载最大位移值为0.5 mm,不大于计算跨径的 $1/600 \times L = 232$  mm,满足规范<sup>[4]</sup>要求。

### 6 结语

梅州市广州大桥结合桥位处地形、地貌,根据梅江的通航要求,主桥采用了139 m+106 m的独塔单索面不对称斜拉桥。主塔采用“一”字形桥塔,简洁实用。主梁采用宽幅大挑臂近似三角形斜腹板整体预应力混凝土箱梁,使得结构外观轻盈优美,富于动感,张力十足。大桥于2015年建成后,不仅有利于缓解梅州市交通压力,同时对落实梅州市整体城市规划、完善区域中心城市建设,推动梅州市区扩容提质,提升城市品位作出了应有贡献。

#### 参考文献:

- [1]莫增模,王卫锋,王步高,等.混凝土斜拉桥主塔温度效应及风速影响因素分析[J].科学技术与工程,2013,13(25):7591-7595.
- [2]郭文华.高赞大桥主梁挂篮设计分析[D].广州:华南理工大学,2006.
- [3]王瀚.板桁结合斜拉桥钢桥面板支撑体系受力分析及构造优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
- [4]JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

工业出版社,2018.

- [2]GB 50025—2018,湿陷性黄土地区建筑标准[S].
- [3]GB 51254—2017,高填方地基技术规范[S].
- [4]谢健生,刘浪涛.灰土挤密桩在处理高速公路湿陷性黄土中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(9):24-26.
- [5]侯振斌,陈虎.高填方路堤强夯加固模式及有效加固范围初探[J].西南公路,2017(1):14-20.
- [6]陈星.黄土填方边坡界面效应及稳定性研究[D].西安:长安大学,2019.
- [7]CJJ 194—2013,城市道路路基设计规范[S].