

# 溢洪道基础湿陷性黄土处理方案研究

王天恒

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i2.6814

**[摘要]** 本文对深厚低液限粉土层上的溢洪道地基处理方案进行了分析研究。结果显示,采用强夯法可在一定程度上改善粉土的湿陷性,但未能完全消除其湿陷问题。经过两次强夯后,原地基土体结构已受到扰动,若继续沿用原有强夯方案,难以实现消除湿陷性土目标。为此,研究进一步提出了增加含水率后强夯、砂砾石换填、水泥土换填、挤密桩及混凝土桩等五种处理措施。通过从施工条件、工期、技术优缺点及投资估算等方面进行综合比较,发现在已强夯处理的地基上换填水泥土具有材料可就地获取、施工简便、投资较低、工期较短等优点。因此,本工程最终选用“强夯地基+水泥土换填”方案来处理地基湿陷问题。

**[关键词]** 地基; 湿陷性; 强夯

**中图分类号:** TV223.5 **文献标识码:** A

## Research on the Treatment Scheme for Collapsible Loess in the Spillway Foundation

Tianheng Wang

Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., LTD.

**[Abstract]** This paper analyzes and studies the foundation treatment schemes for spillway on the deep and low liquid limit sandy soil layer. The results show that the strong compaction method can improve the siltation property of the sandy soil to a certain extent, but it cannot completely eliminate the siltation problem. After two rounds of strong compaction, the original foundation soil structure has been disturbed. If the original strong compaction scheme is continued to be used, it is difficult to achieve the goal of eliminating the siltation. Therefore, the research further proposed five treatment measures: increasing the moisture content for strong compaction, replacing with gravel and sand, replacing with cement soil, using compaction piles and concrete piles. Through comprehensive comparison from aspects such as construction conditions, construction period, technical advantages and disadvantages, and investment estimation, it is found that replacing with cement soil on the already strongly compacted foundation has the advantages of readily available materials, simple construction, lower investment, and shorter construction period. Therefore, the final solution for this project is to adopt the "strong compaction foundation + cement soil replacement" scheme to handle the foundation siltation problem.

**[Key words]** Foundation Collapsibility Dynamic compaction

### 引言

湿陷性黄土在中国西北地区分布范围较广,并且危害性极其明显。黄土的湿陷性强弱常常与其微结构特征、土壤含水量、土壤干密度、土壤饱和度等因素有关<sup>[1]</sup>。基于此,本文结合溢洪道工程,提出具体方案,解决地基湿陷性问题。

### 1 项目区工程地质

溢洪道布置在右坝段1+988~2+008处,进口段、控制段和泄槽段位于喀拉河左岸缓坡上,地形平坦,地面高程1060~1123m,地形坡度2°~3°;泄槽段位于喀拉河左岸岸坡,岸坡坡度20°~25°,出口消能段位于河床内,地面高程1052~1054m。

在勘探深度内,地层为第四系上更新统-全新统洪积(Q<sub>3-4</sub><sup>pl</sup>)

层,工程地质条件共分三层,分别如下:①层:腐殖土,厚0.2~0.5m,黑色、灰黑色,稍湿~湿,稍密;有机质含量较高,物理力学性质差,建议清除。②层:低液限粉土,埋深0.2~0.5m,厚1.2~2.0m,土黄色,稍湿~湿,稍密~中密;天然密度1.29~1.89(1.62)g/cm<sup>3</sup>,含水率4.0%~22.2%(11.42%),干密度1.33~1.59(1.45)g/cm<sup>3</sup>,孔隙比0.694~1.319(0.87),压缩系数0.9~1.40(0.68)MPa<sup>-1</sup>,中~高压缩性土,内摩擦角17°,粘聚力4.5~72.4(22.98)kPa,湿陷系数0.001~0.134(0.07),具自重湿陷性,湿陷等级为III级(严重),渗透系数2.3×10<sup>-3</sup>~2.2×10<sup>-1</sup>(1.0×10<sup>-3</sup>)cm/s,中等透水;承载力建议值100kPa,压缩模量1.41~22.17(6.36)MPa。③卵石混合土,埋深1.6m,未揭露,青灰色、杂

色,湿,中密;天然密度 $2.12\text{g}/\text{cm}^3$ ,含水率 $2.2\%$ ,干密度 $2.07\text{g}/\text{cm}^3$ ,孔隙比 $0.299$ ,承载力建议值 $350\text{kPa}$ ,变形模量 $35\text{MPa}$ 。

## 2 地基强夯处理设计方案

溢洪道基础位于深厚的低液限粉土层上,粉土为自重湿陷性土,湿陷等级为III级(严重)。为消除粉土湿陷性,对地基粉土采用强夯处理。

2.1强夯处理深度。根据《湿陷性黄土地区建筑标准》GB50025-2018中强夯能级与夯实厚度对应关系知<sup>[2]</sup>,强夯能级 $8000\text{KN}\cdot\text{m}$ 对应夯实厚度 $8.0\text{m}$ 。结合工程地质情况及工程级别,确定溢洪道地基处理深度为 $8.0\text{m}$ 。

2.2强夯处理范围。强夯处理范围应大于建筑物基础范围,每边超出基础外缘的宽度宜为基底设计处理深度的 $1/2$ 至 $2/3$ ,并不宜小于 $3\text{m}$ ;对可液化地基,扩大范围不应小于可液化土层厚度的 $1/2$ ,并不应小于 $5\text{m}$ 。确定溢洪道地基处理范围为每侧超出基础外缘 $4.0\text{m}$ ,处理宽度 $20.0\sim 23.0\text{m}$ 。

2.3强夯检测合格标准。强夯处理标准:土的湿陷系数 $\delta_s$ 均应小于 $0.015$ ,干密度 $\geq 1.60\text{g}/\text{cm}^3$ ,建基面地基承载力 $\geq 200\text{kPa}$ 。

2.4现场试验情况。2021年6月28日~8月4日,开展了溢洪道桩号 $0+000\sim 0+760$ 段地基强夯处理,强夯后间隔14天完成取样检测,根据检测数据强夯未能完全消除地基土湿陷性。同年8月10日~9月2日,对溢洪道开展了第二轮强夯试验,间隔14天完成取样检测,根据检测数据强夯仍未能完全消除地基土湿陷性。

强夯施工参数如下:

点夯:  $10000\text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能,2遍,每遍8击,锤重 $60.56\text{t}$ ,锤距 $17.0\text{m}$ ,锤直径 $2.35\text{m}$ ,间距 $6.0\text{m}$ ;

满夯:  $2500\text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能,1遍,每遍4击,锤重 $24.98\text{t}$ ,锤距 $10.0\text{m}$ ,锤直径 $2.30\text{m}$ 。

2.5溢洪道强夯试验数据与分析。现场施工强夯完成后按照“对夯击点处和夯点间典型位置同时取样”的原则,完成取样检测并统计如下,共包括施工单位提供的溢洪道桩号 $0+140$ 、 $0+346$ 、 $0+425$ 、 $0+442$ 和 $0+553$ 五个桩号(取样深度间隔 $0.5\sim 1.0\text{m}$ )检测成果。检测数据见下表3.2-1:

表1 溢洪道强夯后检测数据统计表

土样桩号 位置(m)	取样高程	高差 (m)	取样 间距 (m)	含水率 (%)	干密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	孔隙比	湿陷性 系数	地基承 载力 ( $\text{kPa}$ )
	(m)							
0+140	1117.87~ 1112.37	5.5	0.5	5.4~ 10.1(7.9)	1.41~ 1.68	0.598~ 0.917	0.044~ 0.073	180~ 230
0+346	1106.85~ 1100.85	6	1	5.7~18.4 (12.3)	1.39~ 1.67	0.618~ 1.122	0.037~ 0.056	170~23 0
0+425	1104.68~ 1097.68	7	1	4.8~17.2 (10.3)	1.27~ 1.59	0.694~ 1.139	0.016~ 0.074	200~23 5
0+442	1103.61~ 1096.61	7	1	4.5~15.5	1.26~ 1.70	0.561~ 1.122	0.020~ 0.075	155~ 230
0+553	1096.12~ 1089.12	7	1	5.8~15.2	1.36~ 1.67	0.599~ 1.114	0.024~ 0.099	140~ 250
0+820	1069.902 ~ 1076.902	7	1	7.4~22.4	1.31~ 1.81	0.501~ 1.078	0.000~ 0.02	155~ 250

备注:例:含水率 $5.4\sim 10.1(7.9)$ ,括号中为平均值。

通过以上图表中第二轮夯前、夯后数据分析,强夯处理方案对本工程粉土湿陷性的处理效果较明显,但未达到消除湿陷性

的目的。且经过两次强夯,原始土体结构受到破坏,继续采用原强夯方案无法达到消除湿陷性的目的,故需对溢洪道地基处理提出其他方案加以解决。

## 3 溢洪道处理方案

根据目前溢洪道已完成的两轮强夯数据分析,强夯是解决地基土湿陷性的方法之一,但考虑溢洪道进行两次强夯,原始土体结构受到破坏,继续强夯恐难以消除湿陷性。根据《水工建筑物地基处理设计规范》SL/T 792-2020<sup>[3]</sup>、《强夯地基处理技术规程》CECS 279-2010<sup>[4]</sup>、《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025-2018等规范规程,并结合现场施工情况、工程工期和施工条件等因素,提出以下处理方案:增加含水率+强夯、地基砾石换填、地基水泥土换填、挤密桩、混凝土桩。投资采用初步设计阶段单价分析成果。

3.1增加含水率+强夯方案。分析完成的强夯数据,含水率是影响强夯效果重要因素之一。本工程地基土含水率为 $4.5\%\sim 22.4\%$ ,部分含水率较低,本方案主要是通过注水,提高溢洪道地基土含水率,使其尽量接近最优含水率,达到消除湿陷性土目的。总工期约120天(其中注水浸泡20天,晾晒70天,强夯15天,检测期15天)。本方案概算投资491万元。

该方案利用已施工完成的导流明渠将水引至溢洪道,对溢洪道地基进行浸泡。溢洪道泄槽段设计纵坡 $0.033\sim 0.071$ ,分段按设计纵坡,每隔 $50\text{m}$ 四周设 $1.5\text{m}\sim 3.5\text{m}$ 高土堤,同时在堤坝内布设孔径 $50\text{mm}$ 、深度 $5.0\text{m}$ 的注水花管孔,孔内填充料粒径 $2\text{cm}$ ,布置形式采用梅花状,间距 $2.0\text{m}$ 。浸泡后晾晒,满足施工条件后再次进行强夯试验,达到强夯设计标准为止。

强夯设计参数:

夯击遍数:2遍点夯、1遍满夯;

夯击能量:  $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $2500\text{kN}\cdot\text{m}$ ;

稳定标准:最后两击平均夯沉量不大于 $200\text{mm}$ ;夯坑周围地面不应发生过大的隆起;不因夯坑过深而发生起锤困难;

夯击次数:点夯为8击,满夯为4击。

夯点布置:点夯夯点间距为 $6.0\text{m}$ ,采用直径 $2.52\text{m}$ 的夯锤等边三角形布置;满夯搭接长度为 $1/4$ 夯锤直径。

3.2地基砾石换填方案。本方案对溢洪道底板以下 $2.0\text{m}$ 深度范围内低液限粉土进行砾石换填,提高其地基承载力和整体稳定性。换填指标:①级配连续, $C_u\geq 5$ ,且 $C_c=1\sim 3$ ;②最大粒径 $\leq 80\text{mm}$ ;③含泥量(粒径小于 $0.075\text{mm}$ 的颗粒含量) $\leq 10\%$ ;④相对密度 $D_r\geq 0.75$ ,分层夯实,分层厚度根据现场试验确定。

3.3地基水泥土换填方案。根据《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025-2018)中垫层法的相关规定知,水泥土垫层换填方案可同时提高地基承载力和水稳性,主要控制指标为压实系数,垫层承载力特征值应根据现场原位试验结果结合土层湿陷量综合确定。在现状已强夯的溢洪道地基上,对表层采用 $50\text{cm}$ 厚水泥土换填。参考类似工程经验,水泥土中水泥与土的配合比为 $1:9$ ,压实指标为压实度 $\geq 0.93$ 。

3.4地基挤密桩方案。挤密法根据成孔工艺,分为挤土成孔

挤密法和预钻孔夯扩挤密法。孔内填料宜采用素土、灰土和水泥土,也可用混凝土或水泥粉煤灰碎石拌制料等高强度填料。

本方案主要考虑消除地基粉土湿陷性及提高地基承载力,故挤密桩方案采用挤土成孔挤密法,孔内填料初选现状素土。挤密法施工前,应在工程现场选择有代表性的地段进行生产性试验,确定参数后,再施工。

根据《水工建筑物地基处理设计规范》SL/T 792-2020,振冲碎石桩的处理范围应满足以下要求:超出水工建筑物基底外缘布置1~3排桩;可液化地基,在水工建筑物基底外缘扩大的宽度宜大于可液化土层厚度的1/2,且不小于5.0m。

参照以上规范要求,初拟挤密桩方案:对溢洪道底板以下8.0m深度范围内低液限粉土采用原土挤密桩加固处理,桩直径0.8m,桩芯间距1.5m,桩呈正三角形布置。经挤密桩处理后,地基土湿陷性系数<0.015且地基承载力≥200kPa。

3.5混凝土桩方案。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。孔内填料宜采用素土、灰土和水泥土,也可采用混凝土或水泥粉煤灰碎石拌制料等高强度填料。本次设计采用混凝土桩方案处理后,地基承载力提高,整体稳定性较好。结合混凝土桩方案特点,混凝土桩成型后,将溢洪道结构整体支撑,混凝土桩间的粉土湿陷性未消除,但溢洪道整体结构稳定。

表2 方案综合对比表

方案名称	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
	增加含水率+强夯	地基砂砾石换填	现状已强夯的地基+换填水泥土	挤密桩	砼桩
		换填2m	水泥土厚0.5m	深度8m	深度8m
方案设计	分析目前已完成的强夯数据,根据相关规范及查阅相关湿陷性处理方案论文,含水率是影响强夯效果重要因素之一。本工程地基土含水率整体偏低,故考虑提高现状地基土含水率(尽量接近于最优含水率)后继续强夯。	溢洪道地基采用2.0m厚砂砾料换填,指标:①级配连续,Cu≥5,且Cc=1~3;②最大粒径≤80mm;③含泥量(粒径小于0.075mm的颗粒含量)≤10%;④相对密度Dr≥0.75,分层夯实,分层厚度根据现场试验确定。	对已采用强夯处理的溢洪道地基,表层采用50cm厚水泥土处理。夯实指标为压实度≥0.93,水泥土中水泥与土的配合比为:1:9。	对溢洪道底板以下8.0m范围内黄土采用挤密桩加固处理,桩直径0.8m,桩芯间距1.5m,桩呈正三角形布置	对溢洪道底板以下8.0m范围内黄土采用混凝土桩加固处理,桩直径1.2m,桩芯间距2.4m,桩呈正矩形布置。
施工条件	强夯机械在场,具备条件	施工条件简单,增加临时占地及水保措施	施工条件简单,需控制好现场水泥与原土比例	需调迁机械	需调迁机械
施工工期	准备期主要包括增加地基土含水率需20天,晾晒需70天,强夯工期15天,检测周期15天	施工期14天,检测周期1天	准备期5天,施工期10天,检测周期5天	准备期25天,施工期25天,检测周期5天	准备期25天,施工期25天,检测周期5天
	总工期120天	20天	20天	60天	60天
新增概算投资(万元)(与最低比较)	491	328.49	271.27	741.13	2364.52
	277.3	57.22	0	601.13	1873.52
	排序(小→大)3	2	1	4	5

混凝土桩方案:对溢洪道底板以下8.0m范围内低液限粉土采用混凝土桩加固处理,桩直径1.2m,桩芯间距2.4m,桩呈正矩

形布置。在砼桩深度为8.0m且采用以上布置方案时,地基承载力可达220.94kPa,远大于自重101.3KN,但结合《水工建筑物地基处理设计规范》SL/T 792-2020桩基的相关规定:“桩应穿透湿陷性土层,极端持力层宜选择中、低压缩性土层或岩层。”参照溢洪道地质情况,8.0m以下地基土湿陷性仍存在,但其压缩性相对较低,故混凝土桩深度取8.0m。

3.6方案综合比较。

通过以上方案对比表知:

方案一:增加含水率+强夯方案,优点:现状强夯机械在场,施工条件便利,便于开展强夯工作;缺点:施工工期较长。

方案二:地基砂砾石换填方案,优点:常规方法,施工条件简单,便于开展工作;缺点:材质为砂砾石,透水率较大,后期在该处形成渗漏通道,对大坝非常不利,且须增加临时占地及水土保持措施,施工手续较繁琐。

方案三:现状已强夯的地基+换填水泥土方案,优点:施工材料可就地取材,水泥可统一购买,施工场地和设备均具备条件;缺点:施工中执行水泥土与原土的配比需严格控制。

方案四、五:挤密桩方案,优点:常规方案,地基处理可靠程度较高,缺点:需调迁施工机械,投资略高。

综上所述,从方案施工条件、施工工期、方案优缺点和投资概算等方面综合对比知,现状已强夯的地基+换填水泥土较优,为本次推荐方案。

4 结论

本文通过研究分析深厚低液限粉土上层溢洪道基础处理方法可知,强夯处理方案对粉土湿陷性的处理效果较明显,但未达到消除湿陷性的目的。且经过两次强夯,原始土体结构受到破坏,继续采用原强夯方案无法达到消除湿陷性的目的。因此进一步提出:增加含水率+强夯、地基砂砾石换填、地基水泥土换填、挤密桩、混凝土桩等五种方法,从方案施工条件、施工工期、方案优缺点和投资概算等方面综合对比可知,采用现状已强夯的地基+换填水泥土具有施工材料可就地取材,施工简单、投资小、施工周期短等优势。因此本工程采用强夯地基+换填水泥土方法解决地基湿陷性问题。

【参考文献】

- [1]基于数理分析模型的湿陷性黄土试验研究及处理措施探讨[J].山西水利科技.2023(03):38-40.
- [2]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50025-2018湿陷性黄土地区建筑标准[S].中国建筑工业出版社,2018.
- [3]中华人民共和国水利部.SL/T792-2020水工建筑物地基处理设计规范[S].中国水利水电出版社,2020.
- [4]中国工程建设标准化协会.CECS279-2010强夯地基处理技术规程[S].中国标准化出版社,2010.

作者简介:

王天恒(1995--),男,汉族,新疆乌鲁木齐市人,本科毕业,工程师,现从事水利试验检测。