

# 南水北调中线总干渠永年县段湿陷性黄土地基处理设计

李聚兴, 杨松, 刘晓琪

(河北省水利水电第二勘测设计研究院, 石家庄 050021)

**摘要:** 目前, 水利工程湿陷性黄土地基处理设计规范仅有《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025-2004) 可为参考, 但该规范主要适用于房屋建筑工程。显然, 套用该规范对渠道地基处理进行设计, 处理标准过于苛刻, 没有充分发挥渠道自身具有的适应地基变形的优良性能, 而且投资巨大。本文通过理论分析并结合南水北调中线总干渠永年县实际工程条件, 提出了渠道工程湿陷性黄土地基处理的设计原则和方法, 并经三维应力变形有限元结构分析验证, 认为该处理原则和方法可满足渠道工程安全要求。

**关键词:** 南水北调; 湿陷性黄土; 地基处理设计; 永年县段

中图分类号: TV444

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)03-0193-03

## Design of loess foundation treatment for Yongnian section of middle route project of south-to-north water transfer

LI Juxing, YANG Song, LIU Xiaoqi

(The Second Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** At present, water conservancy project in collapsible loess foundation treatment design has no specification, only "Code for Building Construction in Collapsible Loess Regions" (GB50025-2004) for reference, but the specification is mainly used in building engineering. Apparently, if the specification is applied to the channel foundation treatment design, the processing standard is too high to demand, which can not sufficiently play channel's excellent performance of having good adaptation to foundation deformation, and the investment is huge. Through theoretical analysis and combined with the actual engineering conditions, this paper proposed the design principle and method of channel engineering in collapsible loess foundation treatment and the three-dimensional stress deformation finite element structural analysis verification. The processing principle and method can meet the safety requirements for channel engineering.

**Key words:** south-to-north water diversion; collapsible loess; design of foundation treatment; Yongnian section

## 1 概述

南水北调中线总干渠河北省邯邢段地质条件复杂, 除分布有大量膨胀土、震动液化土外, 尚分布有湿陷性黄土。邯邢段湿陷性黄土分布长度约 6 800 m, 其中: 强湿陷性 (湿陷系数  $\delta_s > 0.07$ ) 1 028 m; 中等湿陷性 ( $0.03 < \delta_s \leq 0.07$ ) 5 800 m。

永年县段桩号 74 + 245 ~ 75 + 905 渠段分布有湿陷性黄土。湿陷性黄土段长 1 660 m, 平均厚度 7.5 m, 最大厚度 12.7 m, 具有中 - 强湿陷性, 属中等湿陷性场地。该段总干渠设计底宽 25 m, 设计流量  $230 \text{ m}^3/\text{s}$ , 加大流量  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 。渠道以半挖半填为主, 局部为挖方渠段, 填方高度 3 ~ 7.5 m, 堤身为均质粘性土梯形断面, 堤顶宽 5 m, 上下游边坡均

1: 2。渠道过水断面采用混凝土全衬砌, 渠底衬砌板厚度 8 cm, 渠坡厚度 10 cm, 混凝土强度指标为 C20W6F150。衬砌板采用机械切割分缝, 伸缩缝与沉降缝间隔布置, 分缝间距 4.0 m。缝内填闭孔泡沫塑料板, 表面 2 cm 采用密封膏封闭。混凝土衬砌板下设有防渗土工膜和保温板。

## 2 湿陷性地质评价

本段湿陷性土为黄土状壤土及壤土, 局部有自重湿陷性, 湿陷性分布极不均匀。根据地层时代及土层湿陷特征, 将场区划分为 4 个工程地质段进行评价。

桩号 74 + 245 ~ 74 + 500 段: 黄土状壤土, 地表以下 5 ~ 12.5 m 具有湿陷性, 自重湿陷系数 0 ~ 0.075, 湿陷系数 0.02 ~ 0.091, 具有轻微 - 强湿陷

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-03-09

作者简介: 李聚兴 (1958-), 男, 河北沧州人, 教授级高级工程师, 从事水利工程勘测设计工作。

通讯作者: 杨松 (1980-), 男, 河北藁城人, 工程师, 从事水利工程规划设计工作。

性。计算湿陷量(10 m 土层范围内)340 ~ 636 mm,其中自重湿陷量 26 ~ 90 mm,属于 I (轻微)级非自重湿陷性场地 ~ II (中等)级自重湿陷性场地。

3 地基处理设计

3.1 设计原则

根据文献[1]、文献[2]规范的建筑物分类标准,南水北调中线总干渠渠道工程应属甲类建筑,相应地基处理强制性条款为“甲类建筑应消除地基的全部湿陷量或采用桩基础穿透全部湿陷性黄土层,或将基础设置在非湿陷性黄土上”。显然,对渠道工程,这样的处理标准过于苛刻,不能充分发挥渠道自身适应地基变形的优良性能,而且工期过长、投资巨大。

经过慎重分析和计算,并考虑到工程的重要性、运行条件以及适应地基变形的能力,参考文献[1]确定本渠段湿陷性黄土地基处理设计原则:①对于挖方渠段,鉴于其自重湿陷量较小,且湿陷后次生灾害不大,不再进行处理。②对于填方和半填半挖渠段,在地基压缩层范围内,对地基附加压力与上覆土

饱和自重压力之和大于湿陷起始压力的土层,需要进行处理,处理后剩余湿陷量不大于 50 mm。地基压缩层深度系指地基附加压力等于上覆土饱和自重压力 20% 的深度。

3.2 设计计算

在不同地质段选择单宽代表断面,按照《碾压式土石坝设计规范》(DL/T5395-2007)计算自重压力与附加压力<sup>[3]</sup>,并与湿陷起始压力<sup>[4]</sup>进行比较。

堤基内计算土层面上的最大竖向附加压力:

$$P_{\max} = 2R/(B + 2y)$$
(1)

式中:  $P_{\max}$  为计算土层面上的最大竖向附加压力, kPa;  $R$  为堤身自重合力, kN;  $B$  为堤身底宽, m;  $y$  为计算点位于坝基面下的深度, m。

湿陷量按文献[1]中公式 4.4.4 和 4.4.5 计算。按照上述设计原则和计算方法,对 4 个地质分段分别进行计算,确定出各自的地基处理深度。为了阐述计算过程和方法,以第(1)地质分段(桩号 74 + 245 ~ 74 + 500 段)为例加以说明(表 1)。

| 表 1 桩号 74 + 245 ~ 74 + 500 渠段地基处理深度计算表 |               |      |                          |                           |                        |                       |        |                        |                      |       |      |      |     | m, mm, kPa |        |        |
|----------------------------------------|---------------|------|--------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|--------|------------------------|----------------------|-------|------|------|-----|------------|--------|--------|
| 勘探孔号                                   | 土样深度          | 计算深度 | 自重湿陷系数<br>$\delta_{zsi}$ | 分层自重湿陷量<br>$\delta_{zsi}$ | 自重湿陷量<br>$\delta_{zs}$ | 湿陷系数<br>$\delta_{si}$ | 湿陷起始压力 | 分层湿陷量<br>$\delta_{si}$ | 计算总湿陷量<br>$\delta_s$ | 堤高或挖深 | 附加应力 | 自重应力 | 合力  | 合力 - 起始压力  | 计算处理深度 | 计算说明   |
| ST06<br>(左堤)                           | 0.50 - 0.72   | 1.27 | 0.001                    |                           |                        | 0.03                  | 92     | 64.8                   |                      |       | 41   | 25   | 65  | -27        |        |        |
|                                        | 1.60 - 1.82   | 2.32 | 0.023                    | 12.1                      |                        | 0.07                  | 19     | 118.1                  |                      |       | 35   | 45   | 81  | 62         |        |        |
|                                        | 2.60 - 2.82   | 3.32 | 0.021                    | 10.5                      |                        | 0.08                  | 32     | 123.0                  |                      | 筑堤    | 32   | 65   | 96  | 64         |        | 地基     |
|                                        | 3.60 - 3.82   | 4.32 | 0.031                    | 15.5                      | 52                     | 0.08                  | 39     | 130.5                  | 628                  | 高度    | 29   | 84   | 113 | 74         | 6.32   | 压缩层    |
|                                        | 4.60 - 4.82   | 5.32 | 0.027                    | 13.5                      |                        | 0.07                  | 56     | 112.5                  |                      | 1.8   | 26   | 104  | 130 | 74         |        | 下限     |
|                                        | 5.60 - 5.82   | 6.32 | 0.007                    |                           |                        | 0.03                  | 153    | 31.0                   |                      |       | 24   | 123  | 147 | -6         |        |        |
|                                        | 6.60 - 6.82   | 7.31 | 0.014                    |                           |                        | 0.04                  | 125    | 48.5                   |                      |       | 22   | 143  | 165 | 40         |        |        |
| MSXK2<br>(渠底)                          | 1.2 - 1.4     | 1.9  | 0.045                    | 42.8                      |                        | 0.07                  |        | 222.3                  |                      |       |      |      |     |            |        | 以下湿陷性量 |
|                                        | 2.2 - 2.4     | 2.9  | 0.045                    | 22.5                      |                        | 0.03                  |        | 53.3                   |                      |       |      |      |     |            |        | <50mm  |
|                                        | 3.2 - 3.4     | 3.9  | 0.045                    | 22.5                      |                        | 0.00                  | 53     |                        |                      | 渠底    | 60   | 10   | 70  | 23         |        |        |
|                                        | 4.2 - 4.4     | 4.95 | 0.045                    | 23.6                      | 174                    | 0.05                  | 60     | 56.0                   | 514                  | 挖深    | 60   | 27   | 87  | 27         | 5.95   | 合力小于   |
|                                        | 5.2 - 5.5     | 5.95 | 0.026                    | 12.9                      |                        | 0.05                  | 63     | 56.0                   |                      | 3.4   | 59   | 51   | 110 | 47         |        | 湿陷起    |
|                                        | 6.2 - 6.4     | 6.9  | 0.026                    | 25.8                      |                        | 0.03                  | 143    | 33.3                   |                      |       | 57   | 70   | 127 | -16        |        | 始压力    |
|                                        | 7.2 - 7.4     | 7.9  | 0.021                    | 10.4                      |                        | 0.02                  | 178    | 22.0                   |                      |       | 54   | 90   | 144 | -34        |        | 不计湿陷量  |
|                                        | 8.2 - 8.4     | 9.3  | 0.02                     | 13.7                      |                        | 0.03                  |        | 42.0                   |                      |       | 50   | 118  | 168 |            |        |        |
| ST06<br>(右堤)                           | 0.60 - 0.82   | 1.42 | 0.01                     |                           |                        | 0.04                  | 18     | 89.5                   |                      |       | 94   | 28   | 122 | 104        |        |        |
|                                        | 1.80 - 2.02   | 2.47 | 0.008                    |                           |                        | 0.04                  | 52     | 75.6                   |                      |       | 87   | 48   | 135 | 83         |        |        |
|                                        | 2.70 - 2.92   | 3.47 | 0.001                    |                           |                        | 0.05                  | 26     | 78.0                   |                      | 筑堤    | 81   | 68   | 149 | 123        |        |        |
|                                        | 3.80 - 4.02   | 4.52 | 0.02                     | 10.5                      |                        | 0.04                  | 51     | 75.6                   | 426                  | 高度    | 76   | 88   | 164 | 113        | 6.5    |        |
|                                        | 4.80 - 5.02   | 5.51 | 0.006                    |                           |                        | 0.03                  | 131    | 53.5                   |                      | 4.5   | 71   | 107  | 179 | 48         |        |        |
|                                        | 5.80 - 6.00   | 6.5  | 0.01                     |                           |                        | 0.02                  | 140    | 26.7                   |                      |       | 68   | 127  | 194 | 54         |        | 以下湿陷性量 |
|                                        | 6.80 - 7.00   | 7.5  | 0.002                    |                           | 11                     | 0.00                  |        |                        |                      |       | 63   | 147  | 210 |            |        | <50mm  |
|                                        | 7.80 - 8.00   | 8.5  | 0.003                    |                           |                        | 0.00                  |        |                        |                      |       | 60   | 167  | 227 |            |        |        |
|                                        | 8.80 - 9.00   | 9.5  | 0.000                    |                           |                        | 0.00                  |        |                        | 27                   |       | 57   | 187  | 244 |            |        |        |
|                                        | 9.80 - 10.00  | 10.5 | 0.007                    |                           |                        | 0.00                  |        |                        |                      |       | 55   | 207  | 262 |            |        |        |
|                                        | 10.80 - 11.00 | 11.5 | 0.007                    |                           |                        | 0.01                  |        |                        |                      |       | 52   | 227  | 279 |            |        |        |
|                                        | 11.80 - 12.00 | 12.5 | 0.014                    |                           |                        | 0.02                  | 226    | 27.0                   |                      |       | 50   | 244  | 294 | 68         |        |        |

表 1 是按中心线断面土层计算的最大附加压力,计算结果偏于安全。

3.3 处理方案

对上述桩号 74 + 245 ~ 74 + 500 渠段,根据计算成果并考虑方便施工,处理深度统一取 6.5 m。通过对强夯、原土翻压、挤密桩、夯扩桩<sup>[5-6]</sup>等不同方案的技术经济比较,选取了处理效果可靠、投资省的强夯处理方案。根据不同夯击能的有效处理深度,选定夯击能为 3000 kN · m,夯击点正方形布置,间距 5m,点夯 2 遍,每遍 10 击;最后满夯 1 遍,夯击能 1000 kN · m。

有些地段,强夯对周边房屋及村民影响较大,采用了土挤密桩方案<sup>[4]</sup>;受高压线及既有建筑物限制,强夯及挤密桩不能实施的,采取了原土翻压处理。各工程段处理方案汇总见表 2。

表 2 湿陷性黄土处理方案汇总表 m, kN · m

| 分段                  | 长度  | 部位 | 处理方案      | 处理深度    | 夯击能  |
|---------------------|-----|----|-----------|---------|------|
| 74 + 245 ~ 74 + 500 | 255 | 左堤 | 强夯        | 6.5     | 3000 |
|                     |     | 渠底 | 强夯        | 6.5     | 3000 |
|                     |     | 右堤 | 强夯        | 6.5     | 3000 |
| 74 + 500 ~ 75 + 095 | 595 | 左堤 | 挤密桩/翻压    | 8.5/4.0 |      |
|                     |     | 渠底 | 挤密桩、翻压    | 4.0     |      |
|                     |     | 右堤 | 挤密桩、翻压    | 6.0/5.0 |      |
| 75 + 095 ~ 75 + 670 | 575 | 左堤 | 强夯、翻压/挤密桩 | 6.5/5.0 | 3000 |
|                     |     | 渠底 | 强夯、翻压/挤密桩 | 5.0     | 2000 |
|                     |     | 右堤 | 强夯、翻压/挤密桩 | 4.0     | 1000 |
| 75 + 670 ~ 75 + 905 | 235 | 左堤 | 强夯/挤密桩    | 8.5     | 5000 |
|                     |     | 渠底 | 强夯/挤密桩    | 4.0     | 1000 |
|                     |     | 右堤 | 强夯/挤密桩    | 6.5     | 3000 |

4 有限元结构分析验证

由于南水北调工程特别重要,而且本渠段湿陷性土层厚度、湿陷系数变化剧烈,为了保证工程安全,对该段渠道进行了三维应力变形有限元结构分析。通过模拟填筑、蓄水和三轴湿化过程,建立了考虑不同应力比、球应力等应力变量对黄土体积变形、剪切变形的经验关系,为计算分析提供准确的三维应力变形模型。计算模型见图 1。

模型长度(沿渠道走向)100 m,模型宽度 140 m,基底高程 40 m,渠底高程 82 m。有限元计算网格共包括 16 600 个六面体等参单元,19 574 个节点。

通过模型计算分析,在自然地基条件下,由于湿陷变形不均匀,会产生最大沉降差 22 cm,最大变形倾斜度 2.72%,远超过倾斜度 < 1% 的公认安全判定标准,因此对湿陷性黄土地基进行处理是完全必要的。

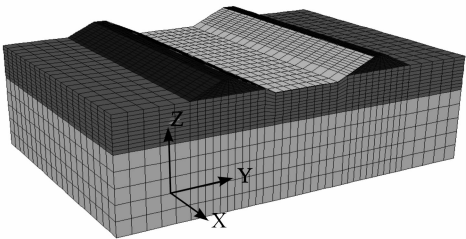


图 1 三维应力变形模型图

考虑到强湿陷性黄土多集中分布在地表下 6 m 范围内,将上部 4 ~ 8 m 土层进行处理,则沉降差会大大降低,变形倾斜度均小于 1%,可避免因湿陷变形发生裂缝,保证渠道安全。

5 结 语

对于渠道湿陷性黄土地基处理,在参考文献[1]的基础上,可适当放宽处理标准,以充分发挥渠道自身适应地基变形的优良性能,达到既保证工程安全又节约投资缩短工期的目的。

对于湿陷性黄土地基,通过翻压(即挖除后,利用原土再回填并分层压实)处理,可以消除其湿陷性,但应高度重视翻压回填施工质量。否则,其沉降得不到有效控制,达不到翻压处理的设计意图。

参考文献:

[1] 陕西省建筑科学研究设计院. GB50025 - 2004. 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004.

[2] 中国建筑科学研究院. JGJ79 - 2002. 建筑地基处理技术规范[S]. 2002.

[3] 中国水电工程顾问集团西北勘测设计研究院. DL/T5395 - 2007. 碾压式土石坝设计规范[S]. 2008.

[4] 张苏民. 湿陷性黄土的术语和基本概念[J]. 岩土工程技术, 2000(1): 42 - 46.

[5] 姜有生. 土挤密桩在湿陷性黄土地基中的设计与检测[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2006, 24(4): 48 - 51.

[6] 穆胜利. 湿陷性黄土工程特性及其地基处理[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(5): 70 - 72.