

PENGZHANGYAN(TU) SHIYAN YU YINGYONG JISHU YANJIU

# 膨胀岩（土）试验与 应用技术研究

李东森 主编



黄河水利出版社

# 膨胀岩(土)试验与应用技术研究

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 李东森 |     |     |
| 副主编 | 马全力 | 皇甫伟 |     |
| 编 写 | 冯光亮 | 刘建伟 | 颜 猛 |
| 主 审 | 龙振球 |     |     |
| 核 稿 | 张 梅 | 梁 娟 |     |

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书介绍了南水北调中线膨胀岩(土)工程研究现状及技术的最新成果。全书共分六章,主要内容为:渠基土岩体工程地质条件及评价,膨胀岩(土)试验段工程现场试验研究,膨胀岩(土)应用技术研究(施工技术方案研究),渠道混凝土衬砌机械化施工技术,膨胀岩(土)渠道的安全监测及膨胀岩(土)段渠道工程质量检验方法和标准。

本书融理论试验、工程实践于一体,可操作性强,可供从事岩土工程、水利工程和道路工程的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

膨胀岩(土)试验与应用技术研究/李东森主编. —郑州:黄河水利出版社,2011.6  
ISBN 978-7-5509-0064-6

I. ①膨… II. ①李… III. ①膨胀性-岩石试验  
IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 104632 号

---

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:12.25

字数:310 千字

印数:1—1 000

版次:2011 年 6 月第 1 版

印次:2011 年 6 月第 1 次印刷

---

定价:36.00 元

# 前 言

南水北调工程是中华民族史上一项造福当代、惠泽后人的伟大工程,是事关我国未来经济社会发展全局的战略性基础设施。加快工程建设,不仅对优化水资源配置,缓解北方水资源短缺,改善受水区生态环境,促进经济社会可持续发展具有重要而深远的意义。同时,对于应对当前国际金融危机,扩大内需,拉动经济增长具有重要的现实意义。

南水北调中线工程施工过程中,采用了大量新工艺、新方法和新材料。在河南新乡段工程开工之前,为了使膨胀岩(土)地区的工程建设做到技术先进,经济合理,保证建筑物的安全和正常使用,相关单位进行了膨胀岩(土)的试验技术研究,得到了大量工程实践资料,从中分析讨论出最佳施工应用方案。具体领导和组织实施本研究项目的李东森高级工程师等项目参与人员,吃住在试验现场,精心操作,付出了智慧和心血。本书是对该项目研究过程与成果的一个系统总结。

全书突出工程应用,重点是阐述南水北调中线河南新乡段工程中膨胀岩(土)问题的施工方法与新技术。本书由李东森担任主编,由马全力、皇甫伟担任副主编,参与编写的还有冯光亮、刘建伟、颜猛,由龙振球担任主审,由张梅、梁娟核稿。

大型渠系膨胀岩(土)工程是一个正在发展的工程领域,属国内首创,工程项目无论是基础理论、试验方法还是施工新技术均还有待进一步深入研究,加之作者水平有限,书中定会有许多不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2011年1月

# 目 录

## 前 言

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 第一章 渠基土岩体工程地质条件及评价 .....         | (1)  |
| 第一节 渠道工程地质概况 .....               | (1)  |
| 第二节 渠道水文地质概况 .....               | (7)  |
| 第三节 岩(土)体工程特性及危害 .....           | (7)  |
| 第四节 渠基土岩体工程地质条件及评价 .....         | (12) |
| 第五节 膨胀性岩(土)的施工注意事项和施工要点 .....    | (12) |
| 第六节 膨胀岩(土)场地与工程地基的要求 .....       | (14) |
| 第七节 膨胀岩(土)地区建筑与结构的技术要点 .....     | (20) |
| 第二章 膨胀岩(土)试验段工程现场试验研究 .....      | (25) |
| 第一节 项目的目的和任务 .....               | (25) |
| 第二节 项目研究的内容 .....                | (25) |
| 第三节 项目的技术路线 .....                | (27) |
| 第四节 现场试验的实施 .....                | (30) |
| 第五节 现场碾压试验 .....                 | (40) |
| 第三章 膨胀岩(土)应用技术研究(施工技术方案研究) ..... | (52) |
| 第一节 施工导流、降排水 .....               | (52) |
| 第二节 膨胀岩(土)地区建筑物施工的一般规定 .....     | (54) |
| 第三节 渠道土石方开挖施工技术要求 .....          | (55) |
| 第四节 渠道填筑施工技术要求 .....             | (61) |
| 第五节 土工格栅+回填料处理层施工方案 .....        | (66) |
| 第六节 复合土工膜处理层施工技术要求 .....         | (69) |
| 第七节 土工袋处理层施工技术要求 .....           | (74) |
| 第八节 复合土工膜处理层施工方案 .....           | (77) |
| 第九节 混凝土框格+植草处理层施工技术方案 .....      | (79) |
| 第十节 砌石拱处理层施工方案 .....             | (85) |
| 第十一节 干渠护坡喷护处理层施工方案 .....         | (88) |
| 第十二节 改性水泥施工技术简介 .....            | (91) |
| 第四章 渠道混凝土衬砌机械化施工技术 .....         | (93) |
| 第一节 渠道混凝土衬砌机械化施工准备 .....         | (93) |
| 第二节 渠道混凝土浇筑系统的施工设计 .....         | (96) |
| 第三节 渠道混凝土衬砌机械化施工设备的要求 .....      | (97) |
| 第四节 渠道混凝土衬砌机械化施工方法 .....         | (99) |

|            |                                   |              |
|------------|-----------------------------------|--------------|
| 第五节        | 渠道混凝土衬砌机械化特殊气候施工与混凝土养护 .....      | (114)        |
| 第六节        | 衬砌混凝土伸缩缝的施工要求 .....               | (117)        |
| 第七节        | 渠道膨胀岩(土)衬砌机械化施工技术混凝土质量控制措施 .....  | (118)        |
| 第八节        | 安全文明生产的要求 .....                   | (123)        |
| <b>第五章</b> | <b>膨胀岩(土)渠道的安全监测 .....</b>        | <b>(126)</b> |
| 第一节        | 安全监测的目的、项目和仪器设备 .....             | (126)        |
| 第二节        | 安全监测的基本要求 .....                   | (131)        |
| 第三节        | 安全监测施工规程的制定 .....                 | (132)        |
| 第四节        | 膨胀岩(土)渠道安全监测仪器设备埋设的技术要求 .....     | (135)        |
| 第五节        | 安全监测的质量控制 .....                   | (143)        |
| 第六节        | 安全监测现场观测技术要求与数据分析 .....           | (145)        |
| <b>第六章</b> | <b>膨胀岩(土)段渠道工程质量检验方法和标准 .....</b> | <b>(149)</b> |
| 第一节        | 组织程序 .....                        | (149)        |
| 第二节        | 基本规定 .....                        | (149)        |
| 第三节        | 各项目单元工程质量标准与检查方法 .....            | (151)        |
| 第四节        | 水泥土施工质量控制 .....                   | (180)        |
| 第五节        | 膨胀土与构造物相互作用的物理模型试验 .....          | (181)        |
| 第六节        | 标准吸湿含水率的试验装置与方法 .....             | (183)        |
| 第七节        | 改进的 CBR 试验方法及其应用 .....            | (184)        |
| 第八节        | 加筋膨胀土挡土结构模拟试验 .....               | (186)        |

# 第一章 渠基土岩体工程地质条件及评价

南水北调中线一期总干渠穿越膨胀岩(土)的渠段有 340 km,处理技术的难度及处理的工程量和投资都比较大,是南水北调中线工程面临的重大技术难题之一,也是国家“十一五”科技支撑项目。

南水北调中线一期总干渠明渠段潞王坟膨胀岩(土)试验段工程开工后,长江水利委员会、长江科学院、南水北调中线工程总干渠膨胀岩(土)试验科研代表处和河南省水利勘测设计研究有限公司、南水北调潞王坟试验段项目部,对潞王坟膨胀岩(土)试验段开展了有关室内和现场的专项试验研究工作。该工作有利于指导和优化膨胀岩(土)段的设计和施工,对于确保南水北调中线一期工程的顺利进行具有重要的意义,同时为今后对大型水利工程所遇膨胀土工程建设的处理技术提供很好的借鉴。

## 第一节 渠道工程地质概况

南水北调中线潞王坟试验段属软岩丘陵地区,该地区内中沟发育,沟深 10 ~ 15 m,沟宽 10 ~ 20 m,另外有人工开挖的深坑一般深 20 m 左右,其长度约 600 m,区内堆集有粉煤灰和垃圾。

地层岩性:区内钻孔揭露深度范围内主要有奥陶系灰岩及上第三系上新统泥灰岩、黏土岩、砂(砾)岩,在沟谷及缓坡处多被第四系上更新统坡洪积成因的黄土状重粉质壤土和中更新统残坡积成因的重粉质壤土所覆盖。

渠段内分布的膨胀岩(土)主要为上第三系潞王坟组滨湖相河湖相,陆源碎屑沉积的软岩,分布连续,所属地貌单元为软岩丘陵。

渠段内上第三系泥灰岩具有弱膨胀潜势,桩号 SY0 + 000—SY0 + 850 黏土岩主要位于一级马道以下,只有中膨胀潜势,局部具弱强膨胀潜势,桩号 SY0 + 850—SY1 + 500 黏土岩主要位于一级马道以下,以弱膨胀潜势为主,局部具中膨胀潜势。

### 一、膨胀土的判别方法

在各类工程建设的勘察、设计和施工中最先遇到的,最迫切需要解决的问题就是对膨胀土的判别问题。其判别结果对于正确选定勘察试验方法以及确定合理的设计、施工方案均有十分重要的意义。

实践证明,认真对待膨胀土的判别,不会造成工程的巨大经济损失。所以,对膨胀土胀缩等级的分类研究极为重要,一直受到广大工程建设者的重视,也是治理膨胀土的重要任务之一,因此准确地判别膨胀土是保证膨胀土地区建筑物修筑质量的关键环节之一。

## (一)膨胀土的初判条件

膨胀土初判的条件如表 1-1 所示。

表 1-1 膨胀土初判的条件

| 项目     | 特点                                                 |
|--------|----------------------------------------------------|
| 地貌     | 具垄式地貌景观,常呈垄岗与沟谷相间,地形平坦、开阔,无自然陡坎,且沟槽发育              |
| 颜色     | 多呈棕黄褐色,见夹白,灰绿色条带,或薄膜灰白色、灰绿色,多呈透镜体或夹层出现             |
| 结构     | 多具裂隙结构,方向不规则,裂面光滑,可见擦痕,裂隙中常充填灰白色、灰绿色黏土             |
| 土质     | 细腻具滑感,土中常含有钙质或铁锰质结核或豆石,局部可富集成层                     |
| 自然土质现象 | 坡面常见浅层溜坍、滑坡、地面裂隙,当坡面有数层土时,其中膨胀土层往往成凹形坡,新开挖的坑壁易发生坍塌 |
| 自由膨胀率  | $\delta_{ef} \geq 40\%$                            |

## (二)膨胀土的初判

目前常用的方法现介绍如下。

### 1. 水利、建筑等系统提出的临界判别值

自由膨胀率:  $\delta_{ef} \geq 40\%$ , 液限:  $\omega_L \geq 40\%$ 。

### 2. 利用塑性图判别膨胀土的方法

在我国土分类国家标准 GBJ 145—90 中规定以塑性指数为纵轴,以液限为横轴。因此,运用塑性图联合使用塑性指数与液限来判别膨胀土,不仅能反映直接影响胀缩性能的物质成分,而且能在一定程度上反映控制形成胀缩性能的浓差渗透吸附结合水的发育程度,即在塑性图上膨胀土的集中分布区是  $\omega_L \geq 40\%$  以右, A 线 [ $I_p = 0.63(\omega_L - 20)$ ] 以上。

### 3. 铁路系统的判别值方法

液限  $\omega_L \geq 40\%$ , 自由膨胀率  $\delta_{ef} \geq 30\%$ 。

### 4. 几种常见的膨胀土判别参考指数

(1) 缩性指标:  $I_s = \omega_L - \omega_s$ ,  $I_s \geq 20\%$  为膨胀土。

(2) 总胀缩率:(线总胀缩率)  $e_{ps}(\%)$  是土在 50 kPa 下的膨胀率与可能收缩率之和,  $e_{ps} \geq 0.7\%$  为膨胀土。

(3) 活动性指标:  $K_A = \frac{\omega_L - \omega_P}{A}$ , 当  $K_A \geq 0.8$  时为膨胀土, 式中 A 为小于 0.002 mm 的黏粒含量百分数。

(4) 膨胀性指标:  $K_e = \frac{e_1 - e}{1 + e}$ , 当  $K_e \geq 0.4$  时为膨胀土, 式中 e 和  $e_1$  分别为天然状态与液限状态的孔隙比。

(5) 蒙脱石含量占岩土体的比例大于或等于 7% 时为膨胀土。

(三) 膨胀土的详判

膨胀土的详判介于定性与半定性判别之间,目前膨胀土的详判方法主要有以下三种:

(1) 综合指标判别。自由膨胀率  $\delta_{ef} \geq 30\%$ , 黏粒含量  $A_{0.005} > 8\%$ , 胀缩总率(线总胀缩率)  $e_{ps} \geq 0.7\%$ 。

(2) 判别函数。应用多变量数学分析,建立多因子的判别函数式来判别膨胀土,可提高正判率,即多元线性函数判别法及应用数学地质的主成分和点群分析建立的因子判别函数式。

多元线性函数判别法:采用数学法进行主因子分析与逐步回归分析提出了综合指标的分类。

$$Z = 0.29\omega_L + 0.32\omega_s + 0.38\delta_{ef} + 0.12d_L - 0.33\omega_0 + 10.9e_0 \tag{1-1}$$

式中  $\omega_L$ ——液限(%) ;

$\omega_s$ ——缩限(%) ;

$\delta_{ef}$ ——自由膨胀率(%) ;

$d_L$ ——土中小于 0.002 mm 颗粒含量百分数(%) ;

$\omega_0$ ——天然含水率(%) ;

$e_0$ ——天然孔隙比。

当  $Z > 22$  时为膨胀土。

(3) 应用数学地质的主成分和点群分析建立的因子判别函数式

$$Z = 0.113A_{粉} + 0.195A_{黏} - 1.157I_p + 1.075\omega_L \tag{1-2}$$

式中  $A_{粉}$ ——土中 0.05 ~ 0.005 mm 的粉粒含量百分数(%)。

当  $Z > 28.89$  时为膨胀土。

膨胀土详判:采用自由膨胀率、蒙脱石含量、阳离子交换量三项指标,当符合表 1-2 中的两项指标时,即应判定为膨胀土。

表 1-2 膨胀土的详判指标

| 指 标                           | 数 据                    |
|-------------------------------|------------------------|
| 自由膨胀率 $\delta_{ef}$ (%)       | $\delta_{ef} \geq 40$  |
| 蒙脱石含量 $m$ (%)                 | $m \geq 7$             |
| 阳离子交换量 $CEC(NH_4^+)$ (mol/kg) | $CEC(NH_4^+) \geq 170$ |

二、膨胀土的分类标准

国内外膨胀土的分类方法很多,所选用的指标和标准也不相同。对于膨胀土的分类有三种不同的基本方法:第一种是矿物鉴别法,主要有 X 射线法、差热分析法、染料吸附法、化学分析电子显微镜法等;第二种是间接法,如特性指数法;第三种是直接测定法,主要有液塑限试验、线性收缩试验、自由膨胀试验、胶体含量试验等。

现就国内外具有代表性的分类方法进行简要的介绍。

(一) 美国垦务局的方法(USBR 法)的分类标准

美国垦务局对膨胀土分类的标准如表 1-3 所示。

表 1-3 美国垦务局对膨胀土分类的标准

| 指标试验数据                      |         |         | 膨胀土体变(%) | 膨胀程度 |
|-----------------------------|---------|---------|----------|------|
| 胶粒含量<br>( <0.001 mm ) ( % ) | 塑性指数    | 缩 限     |          |      |
| >28                         | >35     | >11     | >30      | 很高   |
| 30 ~ 13                     | 25 ~ 41 | 7 ~ 2   | 20 ~ 30  | 高    |
| 13 ~ 23                     | 15 ~ 28 | 10 ~ 16 | 10 ~ 30  | 中    |
| <15                         | <18     | >15     | <10      | 低    |

注:表中按膨胀土体变分类标准与我国按体积收缩率分类标准比较接近。

## (二)潜体变仪(PVC)法

利用潜体变仪法测出指标的分级标准如表 1-4 所示。

表 1-4 潜体变仪法测出指标的分级标准

| 潜体变率 | <2  | 2 ~ 4 | 4 ~ 6 | >6  |
|------|-----|-------|-------|-----|
| 分级   | 无危险 | 边缘    | 危险    | 很危险 |

## (三)李生林的模糊数学法分类指标

李生林根据膨胀土的矿物成分、颗粒级配、结构特征等,确定采用指标的上、下限,并分为四种等级:即极高、高、中、低,各等级的指标值见表 1-5。

表 1-5 李生林教授模糊数学法的分级指标

| 分类 | 等级  | 液限<br>(%)      | 胀缩总率<br>(%)    | 塑性指数           | 天然含水率<br>(%)   | 自由膨胀率<br>(%)   | 气候及水文<br>地质条件  |
|----|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|    |     | E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | E <sub>3</sub> | E <sub>4</sub> | E <sub>5</sub> | E <sub>6</sub> |
| 极高 | I   | >55            | >6             | >35            | <15            | >85            | 极差             |
| 高  | II  | 50 ~ 55        | 4 ~ 6          | 25 ~ 35        | 15 ~ 25        | 70 ~ 85        | 差              |
| 中  | III | 45 ~ 50        | 2 ~ 4          | 18 ~ 25        | 25 ~ 35        | 55 ~ 70        | 一般             |
| 低  | IV  | 40 ~ 45        | 0.7 ~ 2        | <18            | >35            | 40 ~ 55        | 较好             |

注:气候及水文地质条件的分级,国内外均没有一个明确的定性指标,故暂时以工程技术人员的经验定性作出判断。

## (四)刘特洪对膨胀土模糊分级指标

刘特洪综合目前水利工程膨胀土分类采用的指标,并考虑水利工程渠道边坡与大坝的稳定问题,选用六个因素作为模糊评判的尝试,确定的各级指标上、下限如表 1-6 所示。

表 1-6 刘特洪膨胀土的分类指标

| 分类 | 等级 | 自由膨胀率          | 胀缩总率           | 膨胀力            | 液限             | 塑性指数           | 残余强度           | 评判值 |
|----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|
|    |    | E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | E <sub>3</sub> | E <sub>4</sub> | E <sub>5</sub> | E <sub>6</sub> |     |
| 强  | Ⅲ  | 17.9           | 17.0           | 14.5           | 13.6           | 11.9           | 10.2           | 85  |
| 中  | Ⅱ  | 13.7           | 18.0           | 11.0           | 10.4           | 9.1            | 7.8            | 65  |
| 弱  | I  | 9.4            | 9.0            | 7.7            | 7.2            | 6.3            | 5.4            | 45  |

## (五) 邓家喜对膨胀土的模糊数学综合法

邓家喜课题组对广西宾南路膨胀土的工程地质分类如表 1-7 所示。

表 1-7 宾南路膨胀土工程地质分类

| 类别 | 等级 | CBR <sub>0.9</sub> (%) | 膨胀量(%) | 液限(%) | 塑性指数  |
|----|----|------------------------|--------|-------|-------|
| 强  | Ⅲ  | <1                     | >6     | >65   | ≥26   |
| 中  | Ⅱ  | 1~2                    | 4~6    | 55~65 | 20~26 |
| 弱  | I  | 2~4                    | 2~4    | 40~55 | <20   |

## (六) 97 版公路膨胀土分类标准

1997 年我国公路部门制定的公路膨胀土的分类标准如表 1-8 所示。

表 1-8 膨胀土工程地质分类标准

| 分类 | 野外地质特征                                                      | 主要黏土矿物成分        | <0.002<br>黏土(%) | 自由膨胀率<br>(%) | 膨胀总率<br>(%) |
|----|-------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|
| 强  | 灰白、灰绿色黏土<br>细腻滑感特强,网状<br>裂隙极发育,有蜡<br>面,易风化,呈细粒<br>状、鳞片状     | 蒙脱石、伊利石         | >50             | >90          | >4          |
| 中  | 以棕红、灰色为<br>主,黏土中含有少量<br>粉砂,滑感较强,裂<br>隙较发育,易风化呈<br>碎粒状,含钙质结核 | 蒙脱石、伊利石         | 35~50           | 65~90        | 2~4         |
| 弱  | 以黄褐色为主,黏<br>土中含较多粉砂,有<br>滑感,裂隙发育易风<br>化,呈碎粒状,含较<br>多钙质或铁锰结核 | 蒙脱石、伊利石、<br>高岭石 | <35             | 40~65        | 0.7~2       |

(七) 采用标准吸湿含水率的膨胀土分类方法

标准吸湿含水率的膨胀土分类如表 1-9 所示。

表 1-9 采用标准吸湿含水率的膨胀土分类

| 分类指标       | 弱膨胀土    | 中膨胀土    | 强膨胀土 |
|------------|---------|---------|------|
| 标准吸湿含水率(%) | 2.5~4.8 | 4.8~6.8 | >6.8 |

新乡潞王坟段内分布的膨胀岩(土)主要为上第三系潞王坟组,但滨湖相河湖相、陆源碎屑沉积的软岩分布连续,所属地貌单元为软岩丘陵,该段内膨胀岩(土)一般具有如下特征:

(1) 岩性主要为棕黄、棕红杂灰绿色黏土岩(包括砂质黏土岩)和灰白色、灰白杂灰绿色及灰黄色泥灰岩,大部分显露于地表,仅在冲沟及斜坡段上覆第四系松散层。

(2) 膨胀岩的颗粒组成中黏粒含量较高,一般为 25%~50%,局部达 75%,其中胶粒占 15%~40%,局部达 57%。

(3) 膨胀岩(土)中网状裂隙较发育,裂隙面光滑并见有擦痕,裂隙间充填物质含水率大,局部存在层间结构面和软弱夹层至软弱结构面,抗剪强度低,对渠道边坡的稳定极为不利。

(4) 膨胀岩中的矿物成分包括黏土矿物和碎屑矿物,影响岩土膨胀性的主要因素是亲水的黏土矿物蒙脱石(微晶高岭土)和伊利石(水云母),具有吸水量大、快速膨胀与收缩的特性。

湿陷性黄土状土主要为坡洪积成因黄土状重粉质壤土,厚度 1.0~8.0 m,断续分布于地表。试验段为深挖段,该层全部被挖掉。

(八) 按自由膨胀率与胀缩总率进行分类

根据室内试验直接测得胀缩性指标,综合国内有关专家提出划分类别的界限值归纳如表 1-10 所示。

表 1-10 按自由膨胀率与胀缩总率分类

| 类别   | 无荷载下体胀缩总率(%) | 无荷载下线胀缩总率(%) | 线膨胀率(%) | 缩限含水率状态下的体缩率(%) | 自由膨胀率(%) |
|------|--------------|--------------|---------|-----------------|----------|
| 强膨胀土 | >18          | >8           | >4      | >23             | >80      |
| 中膨胀土 | 12~18        | 6~8          | 2~4     | 16~23           | 50~80    |
| 弱膨胀土 | 8~12         | 4~6          | 0.7~2   | 8~16            | 30~50    |

表 1-10 中对于地基土按线胀缩总率  $\delta_{es}$  进行评价时,其膨胀率是在 50 kPa 荷载下获得的。因此,膨胀等级划分标准不一,即强膨胀土  $\delta_{es} > 5\%$ ,中膨胀土  $\delta_{es} = 5\% \sim 2\%$ ,弱膨胀土  $\delta_{es} < 2\%$ 。胀缩总率的计算公式如下:

$$\delta_{es} = \delta_{ep} + \lambda_s(\omega - \omega_{min})$$

式中  $\delta_{es}$ ——线胀缩总率(%)；  
 $\delta_{ep}$ ——土在 50 kPa 荷载下的膨胀率(%)；  
 $\omega$ ——土的天然含水率(%)；  
 $\omega_{min}$ ——建筑场地的最小含水率(%)，即旱季的含水率平均值；  
 $\lambda_s$ ——土的收缩系数， $\lambda_s = \Delta\delta_s / \Delta\omega$ ；  
 $\Delta\delta_s$ ——收缩过程中与两点含水率对应的竖向线缩率之差(%)；  
 $\Delta\omega$ ——收缩过程中直线变化阶段两点含水率之差(%)。

## 第二节 渠道水文地质概况

场区地形起伏较大，在勘察期间，多处钻孔在勘探深度范围内见地下水，局部地下水位埋深为 7.5 ~ 12.37 m，高程为 103.89 ~ 109.81 m，赋存于第四系卵石层中，为孔隙潜水，部分以上层滞水的形式赋存于成岩较差的泥灰岩中，水位一般为 103.55 ~ 105.69 m，但分布范围不大，下部黏土岩为相对隔水层，仅在一定范围内有水力联系和统一的水面，水量较大。

区内地下水主要接受大气降水渗入和侧向径流补给，以侧向径流方式排泄。渠段泥灰岩、砂岩、砂砾岩渗透系数为  $1.5 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-2}$  cm/s，属弱中等透水，地下水层为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca} - \text{Mg}$  型水，对混凝土没有腐蚀性。

地下水主要为第四系中上更新统松散岩类孔隙潜水，上第三系碎屑岩孔隙裂隙潜水，地下水埋深较深。

本区划分为三个含水层组，与工程密切相关的主要为浅层地下水，以潜水为主，局部具有微承压性。

## 第三节 岩(土)体工程特性及危害

根据地表渠底板以下 5 m 范围内岩(土)体的岩性组合特征、岩体构造、岩性与结构等因素，新乡潞王坟段渠段多为岩(土)体双层结构类型，上部以黏性土为主，下部多为膨胀岩，部分为砂岩、砾岩等，局部为岩体层状结构，以软弱层膨胀岩为主，下部部分为坚硬厚层灰岩。

### 一、各岩(土)体物理力学性质

(1) 黄土状重粉质壤土：天然含水率为 14.7% ~ 24.0%，天然干密度平均值为  $1.45 \text{ g/cm}^3$ ，液性指数平均值为 0.24，多呈可塑性—硬塑状，压缩系数  $a_{1-2}$  平均值为  $0.435 \text{ MPa}^{-1}$ ，具中等压缩性，标贯击数一般为 3 ~ 17 击，属中硬—硬土。

(2) 重粉质壤土：天然含水率为 11.7% ~ 24.1%，天然干密度平均值为  $1.58 \text{ g/cm}^3$ ，液性指数平均值为 0.06，多呈硬塑状，压缩系数  $a_{1-2}$  平均值为  $0.30 \text{ MPa}^{-1}$ ，多具中等压缩性，标贯击数为 7 ~ 19 击，属硬土。

(3) 卵石：重力触探击数 8 击，属稍密卵石。

(4)泥灰岩①:天然含水率为0.2%~15.0%,天然干密度平均值为1.70 g/cm<sup>3</sup>,自然抗压强度为14.6~79.4 MPa。

(5)泥灰岩②:天然含水率为1.1%~34.7%,天然干密度平均值为1.65 g/cm<sup>3</sup>,自然抗压强度为0.18~3.03 MPa,平均值为0.96 MPa,饱和抗压强度为0.01~0.16 MPa,平均值为0.04 MPa,自由膨胀率 $\delta_{ef}$ =5%~60%,具弱膨胀潜势。

(6)黏土岩:天然含水率为7%~34.3%,天然干密度平均值为1.65 g/cm<sup>3</sup>,干抗压强度为0.1~1.9 MPa,平均值为0.55 MPa,饱和抗压强度为0.004~0.16 MPa,平均值为0.05 MPa,多具弱~中等膨胀潜势,局部具强膨胀潜势。

(7)砂岩:天然含水率为8.4%~22.1%,天然干密度平均值为1.70 g/cm<sup>3</sup>,标贯击数为16~30 击。

(8)砾岩:天然干密度平均值为2.64 g/cm<sup>3</sup>,重力触探击数16~50 击。

岩(土)体的物理力学参数、岩石物理力学性质参数建议值分别如表 1-11、表 1-12 所示。

表 1-11 岩(土)体的物理力学参数

| 物理力学参数   |      | 符号         | 单位                | 黄土状重<br>粉质壤土 | 重粉质壤土 | 卵石 |
|----------|------|------------|-------------------|--------------|-------|----|
| 天然含水率    |      | $\omega$   | %                 | 20.1         | 20.2  |    |
| 天然干密度    |      | $\rho_d$   | g/cm <sup>3</sup> | 1.45         | 1.58  |    |
| 比重       |      | $G_s$      |                   | 2.72         | 2.72  |    |
| 天然孔隙比    |      | $e$        |                   | 0.885        | 0.720 |    |
| 液限       |      | $\omega_L$ | %                 | 32.8         | 35.8  |    |
| 塑限       |      | $\omega_P$ | %                 | 17.9         | 19.0  |    |
| 塑性指数     |      | $I_P$      |                   | 14.9         | 16.8  |    |
| 液性指数     |      | $I_L$      |                   | 0.24         | 0.06  |    |
| 自然<br>快剪 | 黏聚力  | $c$        | kPa               | 26           | 28    |    |
|          | 内摩擦角 | $\varphi$  | (°)               | 19           | 19    |    |
| 饱和和快剪    | 黏聚力  | $c$        | kPa               | 18           | 20    |    |
|          | 内摩擦角 | $\varphi$  | (°)               | 17           | 18    |    |
| 饱和和固结快剪  | 黏聚力  | $c$        | kPa               | 17           | 19    |    |
|          | 内摩擦角 | $\varphi$  | (°)               | 19           | 19    |    |
| 天然休止角    | 水上   | $\varphi$  | (°)               |              |       |    |
|          | 水下   | $\varphi$  | (°)               |              |       |    |

续表 1-11

| 物理力学参数 | 符号        | 单位                | 黄土状重粉质壤土             | 重粉质壤土                | 卵石                 |
|--------|-----------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 压缩系数   | $a_{1-2}$ | $\text{MPa}^{-1}$ | 0.435                | 0.30                 |                    |
| 压缩模量   | $E_s$     | MPa               | 5.05                 | 6.0                  |                    |
| 渗透系数   | $k$       | cm/s              | $8.0 \times 10^{-5}$ | $3.5 \times 10^{-5}$ | $5 \times 10^{-4}$ |
| 承载力标准值 | $f_k$     | kPa               | 130                  | 190                  | 250                |

表 1-12 岩石物理力学性质参数建议值

| 物理力学参数 |        | 符号               | 单位              | 泥灰岩①  | 泥灰岩②     | 黏土岩             |             | 砂岩            | 砾岩    |
|--------|--------|------------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------------|---------------|-------|
|        |        |                  |                 |       |          | 弱膨胀潜势           | 中膨胀潜势       |               |       |
| 天然含水率  |        | $\omega$         | %               | 15.0  | 21.0     | 23.0            | 21.0        | 16.7          |       |
| 天然干密度  |        | $\rho_d$         | $\text{g/cm}^3$ | 1.70  | 1.65     | 1.60            | 1.65        | 1.70          | 2.64  |
| 比重     |        | $G_s$            |                 | 2.73  | 2.73     | 2.75            | 2.74        | 2.70          | 2.73  |
| 抗压强度   | 自然     | $R_{\text{自}}$   | MPa             |       | 0.41     | 0.38            | 0.39        |               |       |
|        | 快剪     | $R_{\text{干}}$   | MPa             |       | 0.81     | 0.65            | 0.55        |               |       |
|        | 饱和     | $R_{\text{饱}}$   | MPa             |       | 0.04     | 0.035           | 0.030       |               |       |
| 泊松比    | 干      | $\mu_{\text{干}}$ |                 |       | 0.30     | 0.30            | 0.30        |               |       |
|        | 饱和     | $\mu_{\text{饱}}$ |                 |       | 0.35     | 0.35            | 0.35        |               |       |
| 抗剪强度   | 自然快剪   | $c$              | kPa             | 50    | 26       | 32              | 29          |               |       |
|        |        | $\varphi$        | (°)             | 23    | 21       | 20              | 18          |               |       |
|        | 饱和快剪   | $c$              | kPa             | 30    | 19       | 21              | 19          | 10            | 25    |
|        |        | $\varphi$        | (°)             | 20    | 18       | 17              | 16          | 30            | 30    |
|        | 饱和固结快剪 | $c$              | kPa             | 50    | 19       | 22              | 20          |               |       |
|        |        | $\varphi$        | (°)             | 22    | 20       | 19              | 17          |               |       |
|        | 残余快剪   | $c$              | kPa             |       | 15       | 16              | 9           |               |       |
|        |        | $\varphi$        | (°)             |       | 18       | 17              | 16          |               |       |
| 边坡坡率   | 一级马道   |                  |                 | 1:1 ~ | 1:2 ~    | 1:2 ~ 1:2.5     | 1:2 ~ 1:2.5 | 1:2.0         |       |
|        | 一级马道   |                  |                 |       | 1:2.25 ~ | 1:2.25 ~ 1:2.75 | 1:2.5 ~ 1:3 | 1:2.5 ~ 1:1.5 | 1:1.5 |
| 承载力    |        | $f_k$            | kPa             | 400   | 350      | 300             | 300         | 350           | 400   |

## 二、膨胀岩(土)的特性

为使膨胀岩(土)地区的工程建设做到技术先进,经济合理,保证建筑物的安全和正常使用,必须根据膨胀土的特性和工程要求,综合考虑气候特点,采取治理措施。

### (一)土的工程特性指标

膨胀土的工程特性指标,应符合下列规定:

(1)自由膨胀率 $\delta_{ef}$ 。人工制备的烘干土,在水中增加的体积与原体积的比,按下式计算

$$\delta_{ef} = \frac{\mu_w - \mu_0}{\mu_0} \quad (1-3)$$

式中  $\mu_w$ ——土样在水中膨胀稳定后的体积,  $m^3$ ;

$\mu_0$ ——土样原有体积,  $m^3$ 。

(2)膨胀率 $\delta_{cp}$ 。在一定压力下,浸水膨胀稳定后,试样增加的高度与原高度之比,按下式计算

$$\delta_{cp} = \frac{h_w - h_0}{h_0} \quad (1-4)$$

式中  $h_w$ ——土样浸水膨胀稳定后的高度,  $mm$ ;

$h_0$ ——土样的原始高度,  $mm$ 。

(3)收缩系数 $\lambda_w$ 。原状土样在直线收缩阶段,含水率减少1%时的竖向线缩率,按下式计算

$$\lambda_w = \frac{\Delta\delta_s}{\Delta\omega} \quad (1-5)$$

式中  $\Delta\delta_s$ ——收缩过程中与两点含水率之差对应的竖向线缩率之差(%) ;

$\Delta\omega$ ——收缩过程中直线变化阶段两点含水率之差(%)。

(4)膨胀力 $P_l$ 。原状土样在体积不变时,由于浸水膨胀产生的最大内应力。

### (二)膨胀岩(土)的工程特性

膨胀岩土的工程特性主要有以下几个方面。

#### 1. 膨胀岩(土)具有湿胀干缩的特性

干燥的土质膨胀性岩层,岩质较硬,易脆裂,具有明显的垂直和水平的断开裂隙,裂隙发育和宽度随深度减少,以至消失。但被水浸湿后,裂隙回缩变窄或闭合强度迅速降低。

膨胀岩(土)土颗粒含量较多,塑性指数较大,土的结构强度较高,多为中等压缩土,矿物成分主要是由大量的蒙脱石黏土、伊利石(云母石)和多水高岭矿物所组成,主要化学成分有 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 。这种矿物成分具有吸水显著膨胀和软化失水收缩及硬化的特点。

#### 2. 膨胀岩(土)具有潜在应力的特性

在软质膨胀性岩(土)如页岩、蒙脱石质岩、泥质凝灰岩、变质安山岩、黏板岩、蛇纹岩

及有地热效应的土质地层等具有膨胀特性,特别是这些软层岩层经过断裂褶皱作用,而产生的开挖暴露后受风化和吸水的影响,便发生体积膨胀而产生膨胀压力。当膨胀性岩土破碎,节理裂隙中含有活动性矿物成分的黏土充填物时,在开挖暴露后即行膨胀,尤其是吸水后膨胀力增长很快。

但也有膨胀性围岩土中不含或很少含活动性矿物成分,也不受水的影响,却也会产生强大的膨胀性压力,这是由于强烈的地质构造作用使得破裂中聚集了潜在的应力(以剪应力为主),并且随着开挖潜在应力被释放而产生强大的膨胀性地压力。

由于上述膨胀土层具有干收缩、湿膨胀软化的特性,因此在施工开挖过程中常有初期岩土变形大、发展迅速等不良现象,使岩土压力增大。膨胀土产生较大的塑性变形,特别是膨胀地压力,对增大岩土压力起叠加作用,所以膨胀岩(土)的湿膨胀压力或干收缩压力都将破坏土壤和支护的稳定性。

### 三、膨胀性围岩对渠道施工的危害

由于膨胀性岩(土)的特殊地质性质及其所具有的压力特性使渠道坡度及建筑物开挖后不久即产生膨胀压力,岩土迅速发生风化软化,坡面及基础普遍开裂,向内挤压坍塌和膨胀隆起,开挖面变形快,延续时间长,整治较困难,并随着时间的增长使支护衬砌发生严重的变形和破坏。膨胀性岩(土)对渠道及水工建筑物施工的影响简述如下:

(1)普遍开裂。由于渠道或建筑物基础开挖后,开挖面上膨胀土体的原始应力释放而产生开裂,又因表层土体外露风干而失水产生收缩裂缝,这两种原因促使膨胀土裂缝宽度扩大,容易产生张拉裂缝与上述裂缝贯通形成局部变形区一脱离区。

(2)下沉。膨胀岩(土)体的承载力较低,在开挖暴露的岩土出现风化膨胀产生较大的收缩地压力,再加上下沉变形都会使支护过度变形或折断失效破坏,从而引起坍塌挤压和膨胀变形等。

(3)工作面膨胀凸出和坍塌。在工作面开挖过程中和开挖后,岩土产生膨胀变形,周边膨胀土体向内部膨胀凸出,造成开挖断面缩小,在膨胀土体丧失支撑(护)或支护失效及支护力度不够的状态下,由于膨胀土压力和膨胀压力的叠加作用,使膨胀岩(土)体产生局部破坏出现坍塌现象。

(4)局部隆起。工作面开挖后膨胀岩(土)上部竖向压力解除,在尚无支护体约束时,由于膨胀地压力释放产生卸荷膨胀,又因雨水库水等使土体产生浸水膨胀,因此造成工作面隆起变形。

(5)衬砌变形和破坏。在整体式(模筑混凝土)衬砌中,常发生下列影响:

①在先衬砌完拱石这段时间,由于膨胀岩(土)压力应力作用拱脚内移,同时发生不均匀下沉,拱脚支撑受力大,发生向上扭曲变形或折断现象。

②拱顶受挤压下沉也有向上凸起,拱顶外缘经常出现纵向贯通张拉裂缝而出现鱼鳞状开裂脱皮掉块现象。

③在拱腰部位出现纵向裂缝,这些裂缝有时可逐渐发展到断开错台。