

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.06.17

新疆伊犁湿陷性黄土输水渠道湿陷变形特性及影响因素分析

邓洪力¹, 姜海波^{1,2}, 侍克斌², 赵海蛟³

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 3. 新疆伊犁河流域开发建设管理局, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 为探究新疆黄土地区输水渠道建设中的土体湿陷性问题,以新疆伊犁某输水工程所处黄土地区为研究对象,采取室内试验的方法,对渠道横向和纵向的土样进行物理性质试验,分析伊犁黄土的湿陷性特征、变化规律及湿陷性影响因素。研究结果表明:黄土湿陷性沿输水渠道横断面呈现出左侧渠堤湿陷性较右侧强的特点,左侧渠堤在地表以下约13 m处仍具有轻微湿陷性;渠道纵向黄土湿陷性特点主要表现为以桩号里程75 km为界,分界线以东区域黄土湿陷性较强,分界线以西区域黄土湿陷性较弱;孔隙比与湿陷系数呈正相关,含水率和液、塑性指数与湿陷系数呈负相关,黄土的含水率、孔隙比以及液、塑性指数等物理性质指标均会对其湿陷性产生影响。研究成果可为湿陷性黄土地区渠道等输水工程的建设提供参考。

关键词: 湿陷性黄土; 湿陷变形特性; 湿陷系数; 输水渠道; 新疆伊犁地区

中图分类号: TV91

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)06-0139-08

Collapse deformation characteristics and influencing factors of water conveyance channel in Yili collapsible loess, Xinjiang

DENG Hongli¹, JIANG Haibo^{1,2}, SHI Kebin², ZHAO Haijiao³

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3. Xinjiang Development and Construction Administration for Yili River Basin, Urumqi 830000, China)

Abstract: To solve the collapsibility problem of water conveyance channel construction in the loess area of Xinjiang, the loess area in Yili, Xinjiang where a water conveyance project is located was taken as the research object for the indoor physical property test. The transverse and longitudinal soil samples along the channel were collected for the analysis of the collapsibility characteristics, variation rules and collapsibility influencing factors of loess. The research results show that the collapsibility of the left embankment along the transverse section of the water conveyance channel is stronger than that of the right embankment, and the left embankment still has a slight collapsibility up to 13 m below the surface. Moreover, the loess collapsibility along the longitudinal section is mainly manifested as a gradual weakening of the collapsibility from east to west, with the pile No. 75 + 000 as the boundary. Among the influencing factors, pore ratio is positively correlated with the collapsibility, whereas water content, liquid index and plastic index are negatively correlated with it. So the physical properties such as water content, pore ratio liquid index and plastic index can have a certain impact on the collapsibility of loess. The research results can provide some reference for the construction of water conveyance projects such as channels in collapsible loess areas.

Key words: collapsible loess; collapse deformation characteristics; collapse coefficient; water convey-

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769031); 兵团区域创新引导计划项目(青年科技骨干人才培养计划)(2021BB004)

作者简介: 邓洪力(1998—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构工程。

通讯作者: 姜海波(1982—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师, 从事寒旱区岩土体损伤及稳定研究。

表 1 研究渠段黄土的基本物理指标

特征值	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/ %	孔隙比	液限/ %	渗透系数/ $10^{-4} (cm \cdot s^{-1})$	塑限/ %	塑性 指数	饱和压缩 系数/ MPa^{-1}	压缩模量 /MPa
最大值	1.62	15.6	0.99	27.03	9.1	18.5	9.4	0.58	10.05
最小值	1.34	6.7	0.68	20.30	5.2	12.0	7.4	0.15	3.42
平均值	1.43	10.3	0.72		7.1		8.6	0.34	6.70

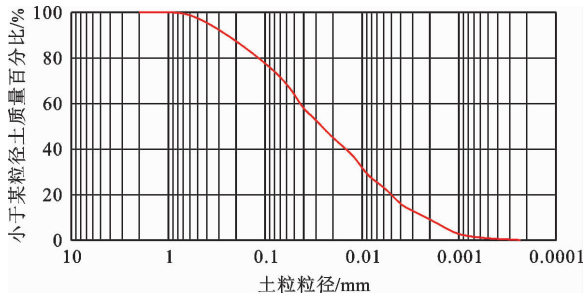
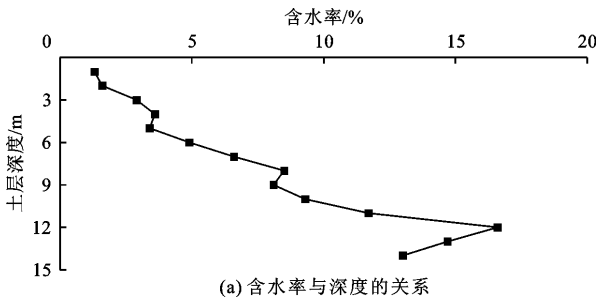


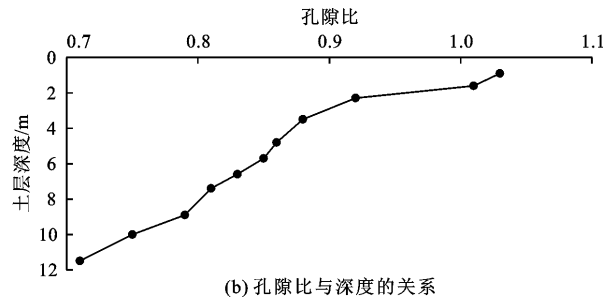
图 2 研究渠段黄土颗粒级配曲线

图 3 为根据室内试验得到的黄土含水率和孔隙比随土层深度的变化情况。由图 3(a)可知,由于该输水工程所处地理位置特殊,导致近地表土层的含

水率较低,而距离地表越深处的土层含水率较高。这是因为伊犁河谷“W”形特殊地貌会导致坡顶和谷底的海拔相差较大,且由于山坡区和洪积区的黄土形成条件不同,土层深度越深,则其含水率随深度的变化幅度也越大。由图 3(b)可知,孔隙比随着深度的增加而减小。孔隙比反映了土体的致密程度,其大小会随着上覆土层的自重应力而变化,一般而言,越接近地表的土层其上覆土层厚度越薄,即自重应力越小,因此越靠近地表土层的孔隙比越大;而上覆土层厚度会随着深度的增加而增大,其自重应力的增大会导致深层土的孔隙比减小,因此深度越深的土层孔隙比越小。



(a) 含水率与深度的关系



(b) 孔隙比与深度的关系

图 3 研究渠段黄土含水率和孔隙比随土层深度的变化曲线

2.3 试验方法

2.3.1 取样点设置 为了研究输水渠道横断面的湿陷性分布情况,在桩号 70+000~80+000 范围内的渠段设置了 20 个取样横断面,在每个取样横断面的渠坡、渠堤和渠底 3 个部位总共设置 5 个取样点,分别对 3、6、9、12、15 m 深度的黄土进行取样,总计进行了 100 组室内湿陷试验以分析渠道横断面的湿陷性分布规律。

为了研究渠段纵向沿线的湿陷性黄土土层厚度以及湿陷性分布情况,在渠道沿线使用人工探井的方法从桩号 63+000 开始每间隔 500 m 设置一个取样点,至桩号 90+000 为止沿渠道纵向共设置 55 个人工探井,每个探井分别对 3、6、9、12、15 m 深度的黄土进行取样(每个深度取 2 个平行土样),总计进行了 275 组室内湿陷试验以分析渠道沿线湿陷性分

布规律。

2.3.2 室内湿陷试验 通过室内湿陷性黄土压缩固结试验、液塑限测定试验和自然含水率测定试验,按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)^[22]计算出湿陷系数及其变化情况,再与沿渠道横、纵断面黄土的含水率、湿陷量、液塑限、孔隙比等基本性质相结合,得出输水渠段的湿陷性分布规律。

压缩固结试验主要分为单线法和双线法,其中单线法需要至少 5 个环刀试样,需控制各试样密度差值不大于 $0.03 g/cm^3$,且与天然湿度保持一致,实施起来相对困难;而双线法只需要 2 个试样即可完成试验,所需材料和工作量较少,使用双线法更加容易控制误差且操作难度更低。

湿陷系数和湿陷起始压力的测定方法说明如下:

(1)测定湿陷系数时^[22],若基底压力小于 300

kPa,则基底下10 m以内的土层应取200 kPa,且每一级增量宜取50 kPa,10 m以下应采用其上覆土的饱和和自重压力,本次试验预设基地压力小于300 kPa,所采用的压力分级为25、50、100、150、200 kPa,共5级。

(2)采用双线法测定湿陷起始压力时,取2个环刀试样,使其中1个环刀试样在浸水饱和后保持自然湿度分级加荷再浸水饱和,另1个环刀试样在浸水饱和后再分级加压,2个环刀试样在浸水饱和后下沉高度差值应小于20%。

3 输水渠道湿陷性分布规律

3.1 渠道横截面湿陷性分布规律

对研究渠段的渠道横断面进行湿陷性分析,其典型横断面如图4所示。根据对渠段内不同深度的湿陷性黄土进行采样试验得到的湿陷系数,分析不同深度湿陷性黄土的湿陷系数变化规律。将整个横断面的湿陷系数随深度的变化绘制成曲线图,可以直观地显示出渠道断面部分和整体的湿陷系数随深度的变化情况,如图5所示。

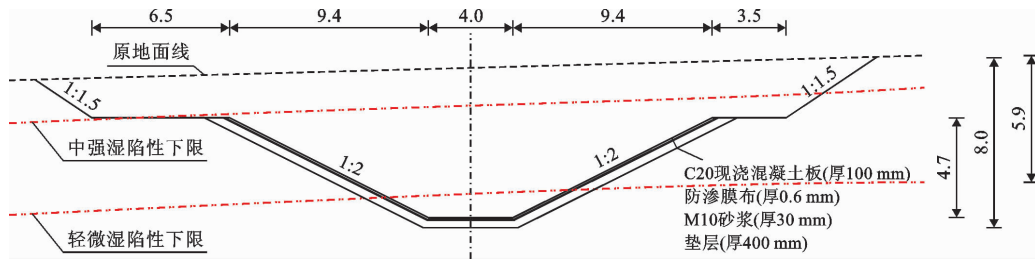


图4 北山坡渠段强湿陷性段渠道横断面(单位:m)

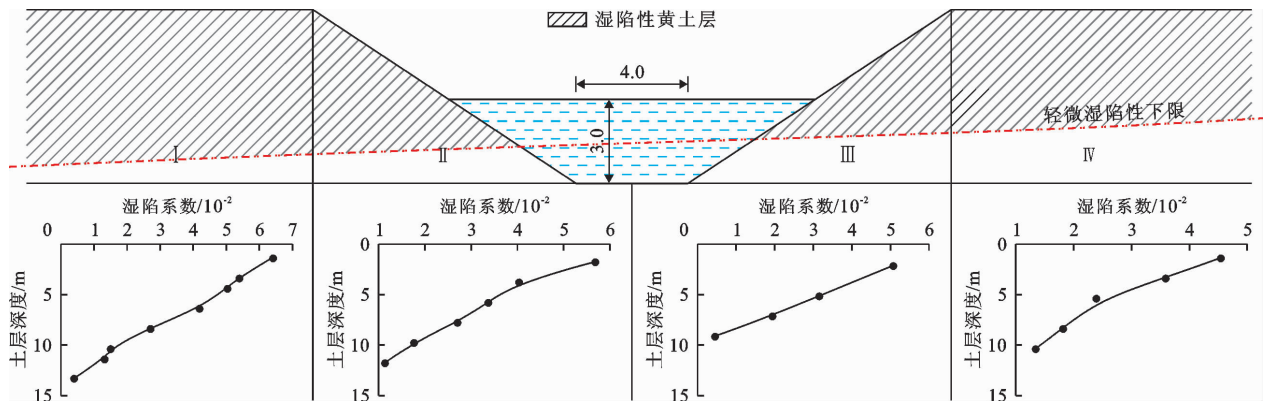


图5 渠道横断面湿陷系数变化曲线(单位:m)

由图5可知,渠道横断面I~IV区黄土在不同渠道位置上的湿陷系数的变化规律大致为:与地表距离越近,其湿陷系数越大,湿陷系数在接近地表时达到最大值;I~IV区黄土的湿陷系数基本呈从左至右逐渐减小的变化规律,I区黄土的湿陷性最强且直至地表以下约13 m处仍具有湿陷性,而IV区黄土的湿陷性最弱,该区至地表以下约10 m处的黄土已失去湿陷性;渠基及渠身地面以下均存在湿陷性,其中具有轻微湿陷性的土层厚度大致为1~3 m,大多位于地表以下5~7 m,具有中强湿陷性的土层厚度大多为1~2 m,基本位于地表以下2~3 m,极少部分位于地表以下3~5 m。

3.2 渠道工程沿线湿陷性分布特征

研究渠段位于伊犁河谷,全长26 km有余,再

加上渠线工程沿线河谷特殊的地形地貌分布,使该渠段黄土地基土质性质在纵向分布上存在一定差异。对研究渠段沿线设置断面的土体进行取样和试验,得到的渠道湿陷性黄土轻度湿陷性和中强度湿陷性的沿深度分布曲线如图6所示。

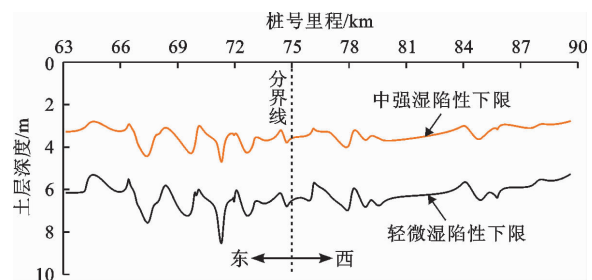


图6 研究渠段黄土湿陷性沿土层深度分布曲线

由图6可以看出,渠道沿线湿陷性黄土的湿陷

性程度随着深度的增加而降低,当深度达到一定程度时,黄土完全丧失湿陷性,且渠道沿线不同位置的湿陷性黄土所呈现的湿陷性分布规律也略有差异。桩号里程 63~66 km 范围内的黄土轻微湿陷性下限平均深度为 5.8 m;桩号里程 66~69 km 范围内的黄土轻微湿陷性下限深度为 5.5~7.5 m;桩号里程 69~72 km 范围内的黄土轻微湿陷性下限深度最大达到 8.5 m,湿陷程度相对较高。以桩号里程 75 km 为分界线,在分界线以西桩号里程 84~87 km 范围内的中强湿陷性下限深度为 2.5~3.0 m。经分析认为,越接近地表的黄土形成的时间越短,土体颗粒之间的孔隙越大,中强湿陷性的黄土也基本位于地表浅层 3 m 深度以上的范围内。从渠段纵向黄土湿陷性分布特点来看,分界线以东区域黄土不仅湿陷性更强、厚度更大,而且湿陷性变化频繁、变幅较大;分界线以西区域黄土无论是轻微湿陷性下限还是中强湿陷性下限的变化均较为平缓,没有较大的起伏点,渠段整体湿陷性程度呈现由西向东逐渐增大的趋势。

3.3 湿陷系数与湿陷起始压力

湿陷系数指标反映了黄土的湿陷程度,根据研究渠段黄土湿陷性室内试验结果得到的湿陷系数与土层深度关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,随着黄土埋深的增加,其湿陷系数呈减小趋势。在 100 kPa 压力条件下,地表以下 0~3 m 的黄土的湿陷系数为 0.024~0.052,基本具有中强湿陷性;地表以下 3~5 m 的黄土的湿陷系数为 0.014~0.024,具有轻微湿陷性;距地表 5 m 以下的黄土湿陷系数均小于 0.015,不具有湿陷性。在 200 kPa 压力条件下,地表以下 0~3 m 的黄土湿陷系数均大于 0.030,具有强湿陷性,地表以下 6 m 处的黄土仍具有一定程度的湿陷性。由 200 kPa 压力下的湿陷系数随深度变化曲线不难发现,具有中强湿陷性的土层埋深基本在 0~3 m 范围内,具有轻微湿陷性的土层埋深基本在 3~6 m 范围内,与前文所述分界线以东渠线的湿陷性土层范围基本一致,100 kPa 压力下测得的黄土湿陷系数变化规律也与分界线以西黄土湿陷性分布情况相同,符合渠线自西向东湿陷性逐渐增强的总体分布规律。

图 8 为黄土湿陷起始压力与土层深度的关系曲线。从图 8 可以看出,随着深度的加深,湿陷起始压力逐渐增大,其中在 0~3 m 深度范围内以 5~12 kPa 为湿陷起始压力,且在 200 kPa 压力作用下黄土湿陷系数在 0.032~0.065 范围内,属于中强湿陷性

黄土;3~6 m 深度范围内湿陷起始压力为 12~36 kPa,湿陷系数的范围为 0.016~0.032,属于轻微湿陷性黄土;当土层深度大于 9 m 之后,黄土的湿陷起始压力大于 48 kPa,湿陷系数减小至 0.005,属于非湿陷性黄土。

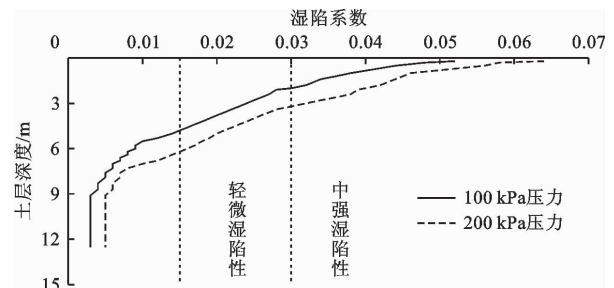


图 7 研究渠段黄土湿陷系数与土层深度的关系曲线

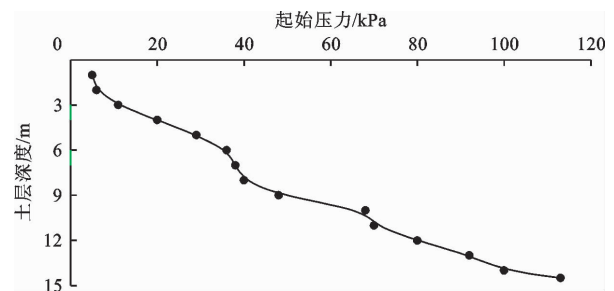


图 8 研究渠段黄土湿陷起始压力与土层深度的关系曲线

4 输水渠道黄土湿陷性影响因素

黄土湿陷的基本机理是在水和外力的作用下土体颗粒之间的黏结物发生溶解,颗粒之间的缝隙产生变化,从而引起土体沉降变形。因此凡是影响土体颗粒间作用力的因素均会对黄土的湿陷性造成一定程度的影响。外界湿度、降水以及土体中存在的植物根系等因素对土体的影响导致天然黄土的含水率不同,天然黄土的含水率决定了土体饱和前吸收水分的能力,是影响黄土湿陷性的重要因素之一;黄土的孔隙比是描述土体颗粒之间间隙的直观物理量,天然黄土的孔隙比直接决定了土体浸水后湿陷的剧烈程度;液限、塑限是衡量土体是否具有强度的指标,塑限决定了黄土是否能够在高含水量的情况下仍然保有一定的强度,是衡量黄土湿陷性强度的一项重要指标。

4.1 含水率对黄土湿陷性的影响

水是土体三相中的重要组成部分之一,含水率是土体三相中水的体积含量大小。在湿陷性评价指标中,含水量是衡量自然状态下土体含水量多少的物质特性指标之一。

通过试验得到的研究渠段黄土湿陷系数随土体天然含水率的变化曲线如图9所示。图9显示,黄土湿陷系数随着其天然含水率的增大而减小。这是因为土体的结构强度受其含水率的影响较大^[26],当黄土的含水率较低时,土体在遇到水和外力作用时会产生较强的反应,而含水率的变化对湿陷性的影响更大,即湿陷性更强;当黄土的含水量较高时,土颗粒间的空隙中存在大量的水分,因此土颗粒间的黏结力减小,导致土体的结构强度变弱,使土体失去湿陷性,土体因受上覆土自重应力的长期压迫而变得更紧密,所以含水率较高的黄土不容易出现较强的湿陷性。

根据上述试验结果与分析,地基处理时应尽量使用土体本身的结构强度,避免更多人为措施造成土体的结构强度降低,所以,为了消除黄土湿陷性对上部建筑的影响,在湿陷性土层不厚的情况下可以通过开挖以获取黄土弱湿陷性或非湿陷性的土层作为基础。

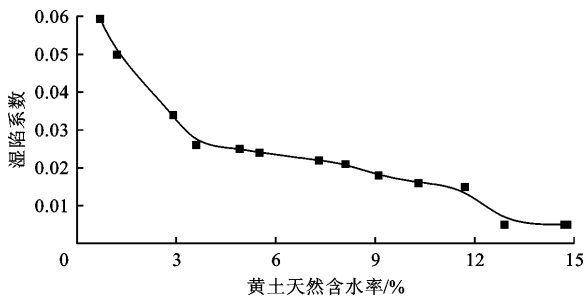
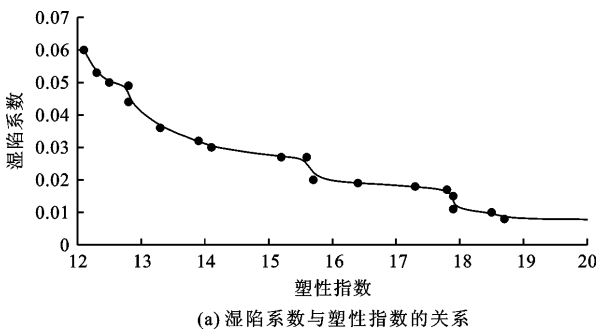


图9 研究渠段黄土湿陷系数与土体天然含水率的关系曲线

4.2 孔隙比对黄土湿陷性的影响

孔隙比是指土壤中的孔隙体积与固体颗粒的体积之比,孔隙比的大小反映了土体的密实度,是反映土体压缩性、湿陷性等物理性质的重要指标。一般



(a) 湿陷系数与塑性指数的关系

情况下,孔隙比越小表明土颗粒之间的距离越近,土体的压缩性就越小;孔隙比越大表明土壤疏松程度越高,其压缩性也相对较高。土体的抗压性越低即压缩性越大,则其结构强度较差。图10中研究渠段黄土湿陷系数随孔隙比的变化曲线也表明,黄土湿陷系数随孔隙比的增大而增大,符合土体孔隙比增大则湿陷性增强的规律。

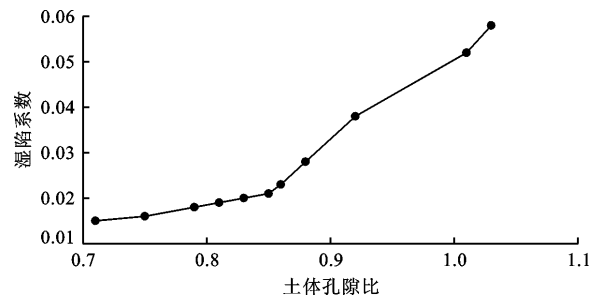


图10 研究渠段黄土湿陷系数与孔隙比的关系曲线

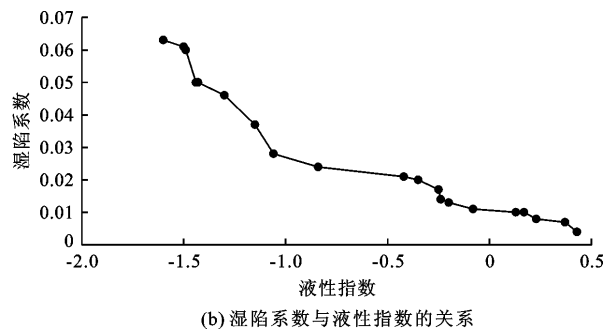
4.3 液、塑性指数对黄土湿陷性的影响

液限、塑限和液、塑性指数反映了土体的颗粒组成、矿物成分等物理性质。塑性指数表示可塑性的强弱,通常土体含水率变化幅度越大则可塑性越好^[27];液性指数是判断土壤软硬状态的指标,可以用来确定黏土的状态以及承受极限的能力。土体塑性指数和液性指数的计算方法见公式(1)、(2),研究渠段黄土湿陷系数与塑性指数及液性指数的关系曲线见图11。

$$I_p = \omega_L - \omega_p \quad (1)$$

$$I_L = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_L - \omega_p} \quad (2)$$

式中: I_p 和 I_L 分别为土体的塑性指数和液性指数; ω_p 和 ω_L 分别为土体的塑限和液限,%; ω 为土体的天然含水率,%。



(b) 湿陷系数与液性指数的关系

图11 研究渠段黄土湿陷系数与塑性指数及液性指数的关系曲线

从图11可以看出,研究渠段黄土湿陷系数与液、塑性指数的关系表现出相同的变化规律,即黄土湿陷系数在总体上随着液、塑性指数的增大而减小。

这是由于黄土中黏粒的含量或亲水性矿物质的含量越多土体的湿陷性越弱;液性指数的大小反映的是土体的物理状态,即软硬程度,液性指数越大的同一

结构黄土,其物理状态与液态越接近,而越软的土体湿陷性越弱。

5 讨论

新疆伊犁黄土具有横向范围分布广、纵向分布深的特点,并且与其他地区的黄土具有一定差异,这是伊犁天然的河谷地形以及特殊的地理位置等因素造成的,如何针对伊犁地区黄土的特点制定合理的湿陷性处理方案是新疆伊犁地区输水工程建设重点技术问题之一。许多学者也对新疆黄土进行了研究^[6-9],本研究结果显示,新疆伊犁黄土的湿陷性仍遵循随着埋深的增加而逐渐减弱的规律,这是由于随着上覆土自重压力的增大,黄土的孔隙比减小,从而导致黄土湿陷后的沉降量减小。这一特点增大了处理黄土湿陷性的难度,如何在工程中完全消除新疆伊犁黄土的湿陷性仍是一大难题。

黄土湿陷性的影响因素众多^[10-13],很难判定是某一种因素还是多种因素的耦合对湿陷性产生的影响,因此,在后续的研究中还需要对多种影响因素进行分析,判断出影响黄土湿陷性的主要因素,从根源上解决黄土的湿陷性问题。

综上所述,新疆伊犁地区湿陷性黄土的分布厚度大、范围广且影响因素多,同时伊犁湿陷性黄土成型的时间较短,成因和湿陷程度仍然处于发展阶段。因此,本研究对伊犁地区某输水渠道工程黄土湿陷性的分析结果,可以丰富新疆湿陷性黄土地区的工程资料,在判断黄土性质对湿陷性的影响等方面起到一定作用,但是如何针对性地对新疆伊犁黄土地区的工程建设提供有效的处理方案仍然是后续研究的重点和难点。

6 结论

本研究通过分析新疆伊犁地区某输水渠道工程的现场实测数据,以及对工程所在地区的黄土土样进行湿陷性试验分析,得出以下主要结论:

(1)该输水渠道横、纵断面不同方向的湿陷性分布规律为:渠道横截面的湿陷性总体呈现由左及右逐渐减弱的特点,左侧渠堤在地表以下约13 m处仍具有轻微湿陷性,而右侧渠堤地表以下约10 m处的黄土已失去湿陷性;该渠段以桩号里程75 km为分界线,分界线以东区域黄土湿陷性较强,分界线以西区域黄土湿陷性较弱。本文对渠道工程湿陷性规律的研究可为后续黄土湿陷性的处理奠定基础。

(2)由输水渠段黄土的孔隙比、含水量以及液、

塑性指数3种不同物理性质指标与湿陷性的关系的研究结果可以发现,黄土的湿陷性随着含水率和液、塑性指数的增大而减弱,随着孔隙比的增大而增强,新疆伊犁地区黄土的湿陷性受上述3种因素的影响较大。

(3)本文对新疆伊犁地区输水工程黄土的湿陷性和影响因素进行剖析,可以判断出场地湿陷性的强弱和分布规律,从而加深对新疆伊犁地区黄土特性的了解。

参考文献:

- [1] 张爱军,邢义川,汪海涛,等.基于增湿变形的渠道工程黄土渠基湿陷性评价方法[J].水利学报,2017,48(1):41-51+60.
- [2] 陈正汉,刘祖典.黄土的湿陷变形机理[J].岩土工程学报,1982(2):1-12.
- [3] PAN Lei, ZHU Jungao, ZHANG Yuanfang. Evaluation of structural strength and parameters of collapsible loess[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(6):04021066.
- [4] 张登飞,陈存礼,杨炯,等.侧限条件下增湿时湿陷性黄土的变形及持水特性[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):604-612.
- [5] 张瑜,张兴明,周志军.黄土湿陷性及其影响因素分析[J].公路,2020,65(8):69-75.
- [6] 张婉,张爱军,陈佳玫,等.含水率和密度对伊犁黄土湿陷系数的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(5):211-220.
- [7] 牛丽思,张爱军,王毓国,等.湿度和密度变化下伊犁黄土的压缩和湿陷特性[J].水力发电学报,2021,40(2):167-176.
- [8] 李传想,宋友桂,王乐民.新疆伊犁黄土研究[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(1):145-152.
- [9] 张爱军,邢义川,胡新丽,等.伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J].岩土工程学报,2016,38(S2):117-122.
- [10] 牛丽思,张爱军,赵佳敏,等.易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性的影响规律[J].岩土工程学报,2020,42(9):1705-1714.
- [11] 蔺广花,刘百来,张爱军.易溶盐对伊犁黄土湿陷性的影响[J].西安工业大学学报,2019,39(2):167-171.
- [12] 王毓国,张爱军,赵庆玉,等.易溶盐含量对伊犁黄土持水特性的影响研究[J].岩土工程学报,2018,40(S1):212-217.
- [13] 赵庆玉,张爱军,王毓国,等.易溶盐含量对原状非饱和伊犁黄土强度的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(4):146-154.
- [14] 武小鹏,赵永虎,徐安花,等.黄土湿陷性与其物理力学

- 指标的关系及评价方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 75-80.
- [15] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 965-978.
- [16] 纪风兰. 长距离明渠输水渠道变形分析[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(1): 25-27.
- [17] 王正中, 江浩源, 王羿, 等. 旱寒区输水渠道防渗抗冻胀研究进展与前沿[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 120-132.
- [18] 于云飞. 新疆某水电站引水渠道变形处理技术措施[J]. 小水电, 2018(5): 62-66+74.
- [19] 金松丽. 基于“可能湿陷变形”的黄土渠道地基湿陷性评价方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [20] GIOMI I, FRANCISCA F M. Numerical modeling of the oedometrical behavior of collapsible loess[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(5): 2501-2512.
- [21] WANG Yuan, WEI Zhijian, REN Jie, et al. A new evaluation model of a water conveyance channel based on Bayesian theory by integrating monitoring and detection information[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 8914.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 湿陷性黄土地区建筑标准: GB 50025—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [23] LIU Zhen, LIU Fengyin, MA Fuli, et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 673-686.
- [24] WANG Zhiwei, HE Yanping, DUAN Zhongdi, et al. Effects of rolling motion on transient flow behaviors of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipes[J]. Ocean Engineering, 2022: 255: 111482.
- [25] 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 537-546.
- [26] 陈香凤, 徐建军. 浅谈含水量对黄土湿陷性的影响[J]. 中国建材科技, 2020, 29(2): 66+124.
- [27] GARAKANI A A, HAERI S M, KHOSRAVI A, et al. Hydro-mechanical behavior of undisturbed collapsible loessial soils under different stress state conditions[J]. Engineering Geology, 2015, 195: 28-41.

(上接第 129 页)

- [26] 杨耀天. 细颗粒泥沙静水沉降实验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [27] 张宇卓, 张根广, 李青, 等. 基于电解质浓度参数的泥沙流速公式研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(3): 1-7+45.
- [28] 史志鹏. 非离子聚丙烯酰胺(NPAM)对絮凝体沉降特性的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [29] 李文杰, 杨胜发, 张帅帅, 等. 基于图像灰度的非均匀粉砂沉速试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2012, 27(6): 696-703.
- [30] PARK S, MOON Y, KIM J O. Evaluation of the image analysis method using statistics for determining the floc size and settling velocity in ballasted flocculation[J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 99: 220-227.
- [31] 宋迪迪, 张根广, 张宇卓, 等. Image-pro plus 软件在泥沙絮凝体结构特征分析中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 156-161.
- [32] CAO Zhendong, WOFRAM P J, ROWLAND J, et al. Estimating sediment settling velocities from theoretically guided data-driven approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(10): 04020067.
- [33] MORUZZI R B, BRIDGEMAN J, SILVA P A G. A combined experimental and numerical approach to the assessment of floc settling velocity using fractal geometry[J]. Water Science and Technology, 2020, 81(5): 915-924.
- [34] 马林. 泥沙静水絮凝沉降规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [35] 孟若霖. 黏性细颗粒泥沙絮凝沉降规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [36] 毛艳丽, 张延风, 罗世田, 等. 水处理用絮凝剂絮凝机理及研究进展[J]. 华中科技大学学报, 2008, 25(2): 78-82.
- [37] 佟瑞利, 赵娜娜, 刘成蹊, 等. 无机、有机高分子絮凝剂絮凝机理及进展[J]. 河北化工, 2007, 30(3): 3-6.