

DOI: 10.11779/CJGE2016S2019

伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析

张爱军¹, 邢义川², 胡新丽³, 汪海涛³, 郭敏霞¹, 张博¹, 高亚平⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044;

3. 新疆伊犁河流域建设管理局, 新疆 伊犁 835000; 4. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 新疆伊犁河谷的黄土, 在沉积过程中受大西洋西风环流控制, 不同于受东亚季风控制的黄土高原黄土, 需要专门研究。对伊犁一大型渠道工程湿陷性黄土渠基的现场大型浸水试验证明, 伊犁黄土湿陷性强烈, 现场实测自重陷量达到 352 cm, 最大湿陷系数达到 0.18 ($p=200$ kPa), 且湿陷具有沉降发展早、速度快和量值大的特点。为了弄清引起伊犁黄土强烈湿陷的原因, 开展了伊犁黄土沉积历史调查, 及大量的黄土物理、矿物组成和显微结构试验工作, 研究表明: 伊犁黄土形成年代较晚, 沉积过程中气候更为干冷, 也基本未经受湿热气候的影响, 盐分特别是碳酸钙受雨水淋滤的作用小, 是典型的风积黄土样本; 伊犁黄土具有天然密度、含水率和饱和度较小, 易溶盐含量较高的特点, 且其颗粒之间以点接触、架空结构和少胶结形式为主, 结构极不稳定, 这些因素是造成其强烈湿陷的历史原因和内在原因。

关键词: 黄土; 伊犁黄土; 湿陷; 渠道; 现场浸水试验

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0117-06

作者简介: 张爱军(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事水利工程岩土力学问题研究。E-mail: zaj@nwsuaf.edu.cn。

Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess

ZHANG Ai-jun¹, XING Yi-chuan², HU Xin-li³, WANG Hai-tao³, GUO Min-xia¹, ZHANG Bo¹, GAO Ya-ping⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. Administration of Xinjiang Ili River Basin Development and

Construction, Ili 835000, China; 4. Xinjiang Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Urumchi 830000, China)

Abstract: The deposition process of the loess in Ili valley in Xinjiang is controlled by circulation of Atlantic Ocean west wind, which is different from the deposition process of East Asia monsoon-controlled loess in Loess Plateau. Based on the in-situ comprehensive soaking tests on a channel project, it is been proved that Ili loess is a kind of strong collapsible loess. Furthermore, the collapsibility is characterized by early development, fast speed and large value. According to the field measurement, the maximum self-weight settlement reaches a large value of 352 cm, and the maximum collapsibility coefficient is 0.18 ($p=200$ kPa). From the history of sediment, the formation age of Ili loess is young. The deposition process is drier and cooler, and it is not influenced by hot and humid climate. Thus, there is less effect of rainfall-leaching on salinity, especially on calcium carbonate. In consideration of its physical property and mineral composition, the natural density, moisture content and saturation of Ili loess are low, while the dissolved salt content is high. The micro-structure observations indicate that the Ili loess has the characteristics of point contact, aerial structure form and few cementations, which lead to a highly unstable structure and strong potential collapsibility. These are historic and internal factors that cause strong collapsibility.

Key words: loess; Ili loess; collapsibility; channel; field immersion test

0 引言

黄土是第四纪地质年代干旱气候环境下沉积形成的具有显著特征的土类。它具有大孔隙、欠压密和水敏感性等特性。特别是湿陷性黄土, 浸水增湿和饱和条件下在自重或非自重荷载作用下会发生突然的大幅附加沉降, 即发生湿陷变形。黄土的湿陷变形对其上

的工程会造成严重的危害, 是黄土地区工程建设, 特别是像渠道工程这样的行水建筑物必须面对的问题。

以往对黄土湿陷性的研究主要针对黄土高原区, 并按照其湿陷的强烈程度划分为 7 个区域^[1]。其中 I

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51379220, 51279171)

收稿日期: 2016-05-19

区为甘肃陇西地区, II 区为甘肃陇东—陕西北部—山西西部地区, III 区为陕西关中地区; IV 为山西—河北北部等地, V 区为河南地区, VI 和 VII 为其他边缘地区。并根据各区域大量的试验研究资料, 认定由室内试验结果计算场地自重湿陷量的地区修正系数 β_0 值按照分区给定, I 区为 1.50, II 区为 1.20, III 区为 0.9, 而其他各区均设定为 0.5。这些研究主要是依据低阶地黄土区域的试验资料总结取得, 对新疆黄土的资料引用较少。

邵生俊^[2]的研究认为: 近年来, 随着我国黄土地区基础设施建设的日益发展, 工程建设从黄土低阶地地区不断向黄土塬、黄土高阶地的发展, 并向新疆等边境地区延伸。黄土地基不再是低阶地黄土场地上建筑结构附加应力和自重应力共同作用下有限厚度湿陷性黄土地层的地基, 而是越来越多地面临大厚度湿陷性黄土问题和特殊地区黄土湿陷性问题, 以往人们对黄土地基湿陷变形和强度稳定性的认识已经不能满足实际工程的需要, 这给岩土工程实践带来了巨大的挑战。特定区域黄土湿陷性问题研究已经成为岩土工程急需解决的技术难题^[3-8]。

新疆伊犁河谷位于我国西北边境, 与哈萨克斯坦接壤, 是我国唯一受大西洋气候影响的地区。河谷东、南和北三侧被天山山脉环抱, 山势西高东低, 南高北低, 最高的山峰为托木尔峰, 海拔 7443 m, 主要山脉有婆罗克努山、那拉提山、可古琴山等。谷地中间还分布有东西走向的乌孙山, 海拔在 200~3500 m 之间, 乌孙山将河谷分为南北两个区域: 伊犁河洪冲积平原和昭苏—特克斯盆地。河谷呈西宽东窄的三角形, 东西长约 170 km。河谷多年平均降雨量 417.6 mm, 山区平均降雨量达到 600 mm 左右, 雨量较新疆其他地区较为丰沛, 年平均气温 10.4℃。谷地主要河流为伊犁河, 河流从谷地西南部的哈萨克斯坦境内流入, 绕河谷一周后由西北部流出到哈萨克斯坦境内。河流上游段称为特克斯河, 其支流有阿克牙孜河、库克苏河、巩内斯河; 自巩内斯河和特克斯河交汇处以下称为伊犁河, 其主要支流为喀什河。在河谷南部的昭苏—特克斯盆地特克斯河的各级阶地上均分布有湿陷性黄土, 以特克斯河 VI 级阶地上最多。该区域黄土层与黄土高原地区黄土存在明显差异。

以往学者主要从沉积历史和古气候变化的角度对伊犁黄土进行了初步的研究, 只有汪海涛(2007 年)结合工程对伊犁黄土的工程性质进行了初步的探索, 其他研究成果极少。而随着近年来我国“一带一路”和西部开发建设的发展, 急需要从工程性质的角度对该类黄土进行研究。

本文依托该地区一大型渠道工程开展了大批量的室内试验, 并进行了现场大型浸水试验, 证明伊犁黄土具有强烈的湿陷性, 属于强烈自重湿陷性场地。论文从沉积历史、颗粒组成和显微结构等几个方面, 分析了产生强烈湿陷的原因和影响因素, 成果对于丰富我国黄土力学的研究内容具有重要的意义。

1 伊犁黄土自重湿陷量的现场浸水试验测定

现场浸水试验是研究黄土地基湿陷, 测定场地自重湿陷量的最为直观和有效的方法。本次开展了加速预浸水情况下的大型浸水试验来测定伊犁黄土地场的自重湿陷量。

试验段位于伊犁昭苏县阿克达拉乡的特克斯河 VI 级阶地上, 场地原是当地最好的牧场, 属于土丘陵地貌。场地北部是乌孙山南麓, 南部为特克斯河, 在场地周围地形起伏不大, 最大比高在 20 m 左右。场地第四纪地层分为三层, 即: 表层 Q_4 灰钙土, 厚度约为 0.5 m; Q_3^{col} 风积黄土层, 厚度有 30 m; 底部冰积和洪积砂砾石层。

浸水坑为圆形直径为 30 m, 表层铺设 0.1 m 厚的砂砾石保护层, 在坑内 2/3 区域设置 $\phi 130$ 深 20 m 的注水孔以加速浸水。从 1 km 以外的灌溉渠道引水到试验段, 建设了蓄水前池、扬水泵站、输水管道、试验段高位水池和供水闸阀等设施, 将水储蓄在高位水池内向试验坑内供水。布设四种观测设施: 表面变形观测点、土壤水分观测点、深层沉降观测点和分层沉降观测点, 用来监测浸水过程中土体的表面沉降、分层沉降和水分变化, 试验场地基本情况见图 1 所示。



图 1 浸水试验段基本情况

Fig. 1 Fundamental state of immersion test section

浸水试验从 2013 年 8 月 16 日开始到 2014 年 4 月 10 日结束观测, 共计 190 d。注水初期水均流入注水孔内, 引起注水孔周局部塌陷。注水 2 h 时, 有两眼注水孔洞孔口塌陷。注水 7 h 后, 注水孔区域形成约占总面积 1/3 的大范围的塌坑, 坑内最大沉降已超过 1 m。持续注水 2000 m^3 后, 试验段内沉陷面积已接近 60% 左右, 沉陷范围有两处, 最大直径已接近

8 m, 而沉陷最大深度已近 2 m, 且试坑内及边界处土体出现间距不等的环向裂缝。继续注水达 2900 m³ 左右时, 两处沉陷深坑继续发展扩大, 沉陷面积占到试验坑的 80%, 沉陷坑已发展到至试验坑边界, 坑中的裂缝呈阶梯状沉陷且环向裂缝不断交错、贯通、发展, 最大沉陷已经达到近 3 m。之后, 坑内坍塌持续发展, 周边错台严重, 裂缝呈环状持续发展, 最大错台达到 1 m 左右, 最大裂缝宽度达到 0.6 m。沉降坑底部呈锅底状, 表面由于易溶盐的析出与聚集而形成板结层。停水后试坑变形情况见图 2 所示。



图 2 浸水后试坑变形情况照片

Fig. 2 Photo of deformation after injection

试验段浸水后在坑内形成了两个沉降较大的陷坑。其一沉降较大, 在加设注水孔的区域; 其二沉降稍小, 在未加设注水孔的区域。采用高精度水准测得两个沉陷区域最大沉降随时间变化过程线见图 3 所示。从图 3 看出, 该试验段沉降表现为发展早、沉降速度快、沉降量大的特点, 第一个沉陷区注水后 21 d 后的沉降最大值达到 3.52 m, 第二个沉陷区最大沉降达到 2.56 m。按照其他现场浸水试验的分析方法确定, 场地的自重湿陷量等于最大陷坑的最大沉降值, 即 3.52 m。

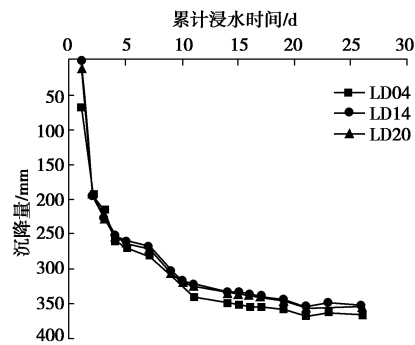


图 3 试验浸水坑内沉降值随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of settlement value in pit with time

与以往兰州、西安等地现场浸水试验测得的自重湿陷量对比见表 1 所示。从表中看出, 伊犁黄自重湿陷量较大, 证明该黄土湿陷性强烈, 场地属于 IV 自重湿陷场地。

表 1 国内自重湿陷量较大的现场浸水试验

Table 1 Large self-weight collapsible immersion tests in China

试验地点	自重湿陷量/cm	湿陷性黄土厚度/m	文献
新疆伊犁	352.0	30.0	本文
兰州连城铝厂	115.2	大于 25.0	文献[2]
兰州和平镇	231.5	36.5	文献[2]
宁夏固原七营	261.1	35.6	文献[2]
宁夏固原	128.8	30.0	文献[2]
陕西华阴县卫峪	160.3	22.5	文献[2]

2 伊犁黄土的沉积历史分析

我国黄土分布最广的黄土高原地区黄土沉积过程主要受到东亚季风(西北东南向)的控制, 因此其黄土的颗粒组成也由西北部向东南部逐渐变细, 有较好的规律性。在沉积过程中受到多次的干冷和湿热气候的交替作用, 形成多层的古土壤层。一般将第一层古土壤顶面以上定义为 Q₃ 黄土(马兰黄土), 其下为 Q₂ 黄土(等同于离石黄土), 在离石黄土中发现多层的古土壤层; 离石黄土以下还分布有午城黄土。古土壤层颜色较深, 一般呈褐红色, 下部常有钙质结核层存在。著名的黄土高原黄土剖面有陕西洛川、甘肃兰州九州台等。

而事实上我国除了以上受季风控制的区域, 还有受西风环流控制的区域, 典型区域就是新疆伊犁河谷。该地区主要受到大西洋环流风的控制, 降雨量相对于沙漠地区相对丰富。其内黄土沉积的古气候与历史与黄土高原区有很大的不同。主要表现在:

(1) 所受的控制风不同, 因此其物质来源不同。黄土高原地区黄土的颗粒来源主要是西伯利亚荒漠区和蒙古高原区, 也就是来自黄土高原的西北部。而宋友桂^[9]、李传想^[9]研究表明, 伊犁黄土的物质来源主要在中亚, 特别是哈萨克斯坦荒漠区(萨雷耶西克阿特劳沙漠和陶库姆沙漠), 且本地颗粒沉积占有相当大的比例。两者物质来源不同, 其工程性质一定会有显著区别。

(2) 沉积的基底岩层不同。黄土高原黄土主要沉积在第三系红色砂岩上, 局部沉积在湖相地层、古河流冲积层和基岩上; 伊犁黄土主要沉积于冰渍土上, 反映出其沉积开始于末次间冰期。

(3) 沉积年代不同。黄土高原黄土从新黄土到老黄土次序井然, 均可以找到出露剖面。而伊犁黄土从揭示的几个剖面看除东段(新源县附近)发现零星离石黄土外, 绝大部分均为马兰黄土, 也就是其形成年代较晚, 受到古代湿热气候的影响较小, 成岩后受到

水流淋滤等作用小。这些说明伊犁盆地黄土形成于较干冷的气候条件,化学风化作用较弱。

从以上分析看出,伊犁黄土沉积时代较晚,风尘来源很多是本地沉积,颗粒较粗;沉积之后少受到湿热气候的影响,也就是受到水的作用较少,土中的原生矿物和盐分流失淋滤较少,是典型的少受水流作用的风成新黄土,其天然结构破坏较小,湿陷性自然强烈。特定的沉积历史是其湿陷性强的直接原因。

3 伊犁黄土的颗粒组成和显微结构分析

为了分析伊犁黄土的湿陷性产生的原因,在现场试验段附近开挖探井取样,进行了系列室内试验研究。取样采用人工开挖的方式进行,挖取探井5个,最大深度为30 m,编号分别是TK1、TK2和TK3,以及TK1-1、TK2-1。开挖探井发现:场地表层为40 cm厚的腐殖土(灰钙土),含有大量草根,黑色;之下30 m深均为黄土层,白黄色,质地均匀,有大孔隙存在,未发现其中有古土壤存在。在23 m以上土样干燥,含水率小,之下含水率有所增加。10 m深度以上土样中偶有草根存在,之下基本无草根。勘探深度内未见地下水。采用多单位平行试验的方式进行了黄土的物理力学性质试验,保证试验结果的可信性。

3.1 物质组成

黄土的物质组成就是它的矿物成分,也就是组成黄土的矿物种类及其含量。土的矿物成分是决定其物理力学和化学特性的基础。组成黄土的矿物一般分为颗粒物质、黏土矿物、盐类和孔隙水、孔隙气体等几类,另外还有腐殖质、草根和化石(如蜗牛壳)等。不同的物质在黄土中的作用不同。颗粒物质主要是石英和长石等碎屑,是组成土体的骨架成分;黏土矿物主要有蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭土和水云母等,其比表面积大,粒度在0.005 mm以下,包裹于颗粒物质周围,决定着土体对水的敏感性。由于蒙脱石由上下两个硅氧四面体和中间的铝氧八面体组成,晶层间联结弱,结合力小,容易产生晶格取代作用,在水分侵入时会发生膨胀。而伊利石和高岭土由于晶格结构不同遇水发生膨胀的性能较弱。不同的黏土矿物组成和含量就决定了土的水敏感性。盐类分为易溶盐、中溶盐和难溶盐三种:其中易溶盐以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子为主的正离子和以 Cl^- 、 CO_3^{2-} 为主的负离子组成,是形成黄土不稳定胶结的主要成分;中溶盐主要是石膏,其水稳性能稍强;难溶盐主要成分为碳酸盐(主要是 CaCO_3),在黄土中起胶结作用或者骨架作用,是黄土稳定胶结的主要成分,决定着颗粒物质之间的胶结程

度。

通过X射线衍射试验、微观电子扫描测定和离子测定等多种方法试验得出:

(1)该黄土的颗粒状物质主要为石英、方解石和钠长石。其中:石英含量在26.1%~29.4%之间,方解石含量在16.4%~22.6%之间,钠长石含量在12.6%~21.6%之间,其他颗粒物质含量较少。颗粒物质的平均含量占总重量的49%左右,其粒径属于粉粒。

(2)该黄土的黏土矿物主要为伊利石、绿泥石、高岭石和伊—蒙混层,其中以伊利石为主,其含量在17.1%~19.7%之间,绿泥石含量在7.3%~9.5%之间,高岭石含量在3.0%~3.5%之间,蒙脱石含量在0.0%~0.6%之间。黏土矿物的平均含量占总重量的31%左右,且以伊利石为主,遇水膨胀的可能性不大,有产生湿陷的物质基础。

(3)通过216组试验得出:该黄土易溶盐以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 正离子和 Cl^- 、 CO_3^{2-} 负离子为主,含量最大为19.2 g/kg,大值平均值为7.53 g/kg,小值平均值为2.18 g/kg,平均值为4.48 g/kg。而陕西关中黄土易溶盐含量一般在1~2 g/kg之间。《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)规定,土中易溶盐含量大于0.3%(3 g/kg)并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特性时应判定为盐渍土。这说明该地区黄土易溶盐含量较高,已经可以归入盐渍土类别中。

(4)该黄土的中溶盐含量与其他地区基本一致,主要是石膏,平均含量为11.45 g/kg;难溶盐成分为碳酸钙,平均含量为174.8 g/kg。难溶盐含量较黄土高原区黄土稍大,但是差别不大。

(5)试验同时表明,不同取样深度黄土样的矿物成分基本上相同,不随着深度的变化而变化,说明该处黄土具有同一的成土条件,质地均匀,且未受到古代湿热气候的影响。

高含量可溶盐和黏土矿物是该土产生强烈湿陷性的重要物质基础。

3.2 显微结构

从显微结构看,骨架颗粒形态、连接形式和排列方式三个方面是影响土体性质的主要特征。采用电子扫描方法测定得出该黄土的显微结构汇总于表2。试验得出以下基本结论:该黄土的骨架颗粒形态均为粒状,几乎不存在凝块颗粒;颗粒连接形态之间均为点接触,面接触很少,颗粒之间少有胶结物存在;不同深度的原状土样除个别土样外均呈现架空结构形式,很少有镶嵌形式。以上试验说明,本黄土结构具有点接触、架空排列和少胶结的特征,结构极不稳定,具有较强的湿陷潜势。

表 2 微观试验土样基本特性表
Table 2 Basic micro-structure properties of Ili loess

序号	取样 深度/m	含水 率/%	干密度 /(g·cm ⁻³)	微观结构			
				颗粒	连接	排列	湿陷 潜势
#1	3.5~4	10.0	1.21	粒	点	架空	强
#2	11.5~12	8.5	1.42	粒	点	架空	强
#3	19.5~20	8.4	1.35	粒	点	镶嵌	中
#4	29.5~30	15.0	1.27	粒	点	架空	强

3.3 物理性质

对该黄土开展了 71 组颗分试验得出:该黄土的粗粒含量在 0.5%~13.8%之间,粉粒含量在 63.7%~84.5%之间,黏粒含量在 19.2%~34.5%之间,胶粒含量在 7.0%~13.5%之间,属于低液限黏土 (CL)。以粉粒含量为主,符合一般黄土的特性。该黄土的颗粒组成曲线如图 4 所示。从图 4 中看出,颗粒组成分布较窄,说明土体上下均匀。

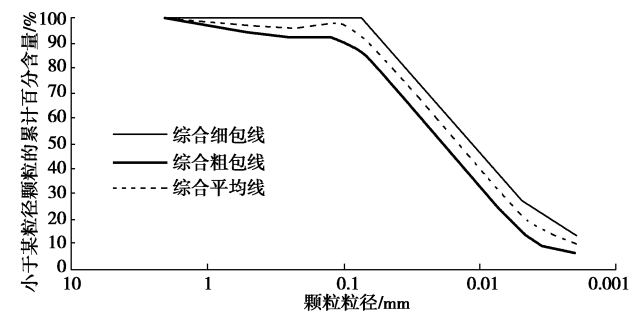


图 4 土样颗分曲线

Fig. 4 Curves of grain composition of Ili loess

试验得出黄土含水率与干密度随埋深分布曲线见图 5 所示。该黄土的密度较小,浅层 8 m 之内平均干密度为 1.22 g/cm³, 8~22 m 深度内平均干密度为 1.37 g/cm³, 22 m 以下平均干密度为 1.29 g/cm³;天然含水率低,常年稳定含水率为 8.7%左右。土质基本均匀,无土壤层分布。含水率小,密度低也是湿陷性强烈的诱因之一。

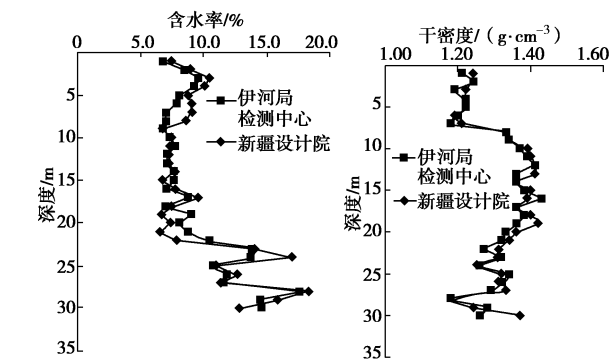


图 5 探坑深度内含水率、干密度分布图

Fig. 5 Distribution of water content and dry density at different depths

3.4 湿陷系数随深度的变化规律

通过不同压力下黄土压缩试验 (单线法和双线法均有),得出该黄土的湿陷系数随深度的变化曲线如图 6 所示。从图 6 可知:该黄土浅层土层的湿陷性较大,深层土层的湿陷性较小,但是湿陷系数均大于 0.015 (湿陷与非湿陷的界限值)。10 m 深度以上的土层湿陷系数均大于 0.07,最大湿陷系数 ($p=200$ kPa) 达到 0.18,说明该黄土属于强湿陷性黄土。

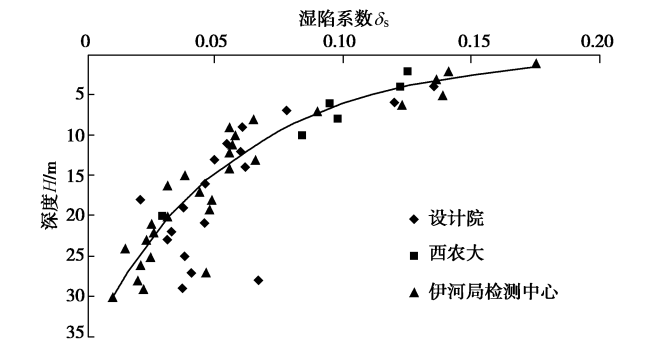


图 6 湿陷系数沿深度分布图 (上覆压力为 200 kPa)

Fig. 6 Distribution of collapsible coefficient with depth (overburden pressure of 200 kPa)

3.5 伊犁黄土地区修正系数计算

采用黄土规范^[1]规定的方法对该黄土地点进行自重湿陷量计算,计算中自重湿陷系数通过室内试验得出,计算结果见表 3 所示。表中计算了地区系数取 0.5、1.0 和 1.5 三种情况下的自重湿陷量值,从表 3 看出,不论地区系数取值多少该地基场地均为 IV 级自重湿陷性场地,湿陷等级较高。同时也说明,黄土规范将伊犁黄土划归“其他地区”,取地区系数值为 0.5 不尽合理,较为准确的值应该在 1.64。

表 3 自重湿陷量计算值汇总表

Table 3 Statistics of self-weight collapsible amount				
序号	方 法	自重湿陷量 /mm	总湿陷量 /mm	湿陷 等级
1	规范方法计算 $\beta_0=0.5$	1070.3	2219.3	IV 自重
2	规范方法 $\beta_0=1.0$	2140.5	2711.3	IV 自重
3	规范方法 $\beta_0=1.5$	3210.8	3203.3	IV 自重
4	现场浸水测定	3520.0		IV 自重

总体看来,伊犁黄土密度小、初始含水率小,含大量可溶盐,且颗粒之间以点接触、架空结构和少胶结形式为主,结构极不稳定。室内和现场浸水试验均表明其湿陷性强烈,场地属于强自重湿陷性 IV 级场地。其特殊的颗粒组成和显微结构是伊犁黄土强烈湿陷性产生的内在原因。

4 结 论

(1) 伊犁黄土湿陷性强烈。最大湿陷系数达到 0.18 ($p=200$ kPa), 现场浸水试验测得其自重湿陷量达到 352 cm, 并具有湿陷沉降发展早、速度快和量值大的特点。比较现场实测自重湿陷量和计算自重湿陷量得出, 伊犁黄土的地区修正系数应该在 1.64。

(2) 伊犁黄土湿陷性强烈是其特定的沉积历史决定的。其内在原因是黄土密度小、初始含水率小, 并含有大量可溶盐; 且其颗粒之间以点接触、架空结构和少胶结形式为主, 结构极不稳定。

(3) 鉴于伊犁黄土与黄土高原黄土的颗粒来源不同、沉积历史不同, 工程性质不尽一致, 它实质上是中亚黄土的一部分, 因此应该将伊犁黄土单独划分为一个特殊区域进行专门研究。同时, 伊犁黄土具有典型的风积黄土的特征, 建议将新疆伊犁河谷的黄土定名为“伊犁黄土”, 作为风积黄土的典型样本, 也可作为中亚黄土的代表样本之一。

致 谢: 感谢新疆水利水电勘测设计研究院勘察总队对本论文试验成果的贡献。

参考文献:

- [1] GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004. (GB 50025—2004 Code for building construction in collapsible loess zone[S]. 2004. (in Chinese))
- [2] 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. (SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 965 - 978. (in Chinese))
- [3] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 998 - 1006. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. New recognition of collapsibility evaluation and remnant collapse of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 998 - 1006. (in Chinese))
- [4] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 382 - 389. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion

tests on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 382 - 389. (in Chinese))

- [5] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋势[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3 - 13. (in Chinese))
- [6] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土(Q_3)的增湿变形特性[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 12 - 31. (ZHANG Su-min, ZHENG Jian-guo. Collapsible loess(Q_3) of humidification deformation characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 12 - 31. (in Chinese))
- [7] 张爱军, 邢义川. 黄土非饱和增湿的湿陷过程特性[C]// 湿陷性黄土研究与工程. 罗宇生, 汪国烈. 北京: 中国建筑出版社, 2001: 123 - 126. (ZHANG Ai-jun, XING Yi-chuan. The collapsible characteristics of unsaturated loess during humidifying process[C]// Research and Engineering of Collapsible Loess. LUO Yu-sheng, WANG Guo-lie. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001: 123 - 126. (in Chinese))
- [8] 刘保健, 谢永利, 于友成. 黄土非饱和入渗规律原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 23(24): 4156 - 4160. (LIU Bao-jian, XIE Yong-li, YU You-cheng. In-situ testing study on infiltration in unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 23(24): 4156 - 4160. (in Chinese))
- [9] 宋友桂, 史正涛, 方小敏, 等. 伊犁黄土的磁学性质及其与黄土高原对比[J]. 中国科学:地球科学, 2010(1): 61 - 72. (SONG You-gui, SHI Zheng-tao, FANG Xiao-min, et al. Loess magnetic properties in the Ili basin and their correlation with the Chinese loess plateau[J]. Science China Earth Science, 2010(1): 61 - 72. (in Chinese))
- [10] 李传想, 宋友桂, 千琳勃, 等. 中亚昭苏黄土剖面粒度记录的末次冰期以来气候变化历史[J]. 沉积学报, 2011(6): 1170 - 1179. (LI Chuan-xiang, SONG You-gui, QIAN Lin-bo, et al. History of climate recorded by grain size at the Zhaosu loess section in the central asia since the last glacial period[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011(6): 1170 - 1179. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)