

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.01.010

Q₂ 黄土湿陷性影响因素研究

方祥位¹, 欧益希¹, 申春妮², 姚志华³, 李捷¹

(1. 后勤工程学院 土木工程系, 重庆 401311; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331;

3. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 通过单向压缩湿陷试验研究了陕西蒲城地区 Q₂ 黄土的湿陷性, 并分析了其与物质组成、物性指标及微观结构定量参数之间的关系。结果表明: Q₂ 黄土湿陷性随黏粒含量、pH 值、饱和度、干密度、颗粒分布分维和定向度的增加而降低; 随孔隙比、欧拉数、孔隙分布分维和定向度增加而降低; 易溶盐含量对 Q₂ 黄土湿陷性影响不大。Q₂ 黄土的湿陷性受多方面因素制约和影响, 内因主要是由于黄土本身的物质成分和特殊的结构特性, 外因则是压力和水的作用; 架空孔隙的失稳破坏和粒间孔隙的变小消失都可能引起湿陷变形, 对于 Q₂ 黄土后者引起的湿陷变形不容忽视。

关键词: Q₂ 黄土; 湿陷性; 影响因素; 微观结构

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)01-0049-06

Influence Factors Analysis on Collapsibility of Q₂ Loess

FANG Xiangwei¹, OU Yixi¹, SHEN Chunni², YAO Zhihua³, LI Jie¹

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

2. Department of Architectural and Civil Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

3. Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: A large number of experiments about natural Q₂ loess from Pucheng power plant in Shanxi Province were conducted on the relationship between the collapsibility of Q₂ loess and the matter composition, physical index and quantified parameter of soil microstructure. The results showed that the collapsibility of Q₂ loess decreases with the increase of clay content, pH value, degree of saturation, dry density, distribution fractal dimension and orientation degree of particle, whereas increases with the increase of void ratio, Euler value, distribution fractal dimension and orientation degree of pore, and is hardly affected by the soluble salt content. The collapsibility of Q₂ loess is affected by various factors, the internal cause mainly is the matter composition and special structural properties of Q₂ loess, and the main external cause is the pressure and water content. The collapsible deformation can be possibly caused by the destroying of the open work pore and the decreasing even disappearing of the inter-particle pore, the latter one shouldn't be ignored.

Keywords: Q₂ loess; collapsibility; influence factors; microstructure

黄土湿陷机理是黄土工程地质领域尚未很好解决的一个复杂问题。迄今为止, 国内外对黄土湿陷机理提出了各种不同论点, 可以归结为内因和外因两个方面。内因主要是由于黄土本身的物质组成及物性特征(指颗粒组成、易溶盐含量、pH 值、孔隙比、饱和度和干密度等)和特殊的结构特性, 外因则是水和压力的作用。关于黄土湿陷机理的研究, 曾提出

了多种假说或理论^[1-5], 但黄土湿陷是一个复杂的过程, 湿陷机理不是目前已提出的哪一个假说或理论能够完全解释清楚的, 它受多种因素影响。

黄土按地质特征可分为 Q₁、Q₂、Q₃、Q₄ 黄土; Q₂ 黄土为马兰黄土下面的埋藏土层, 其厚度较大, 构成黄土塬的主体^[6-8]。Q₂ 黄土较之上部的 Q₃、Q₄ 黄土质地相对密实, 多年的工程实践认识到 Q₂ 黄土有

收稿日期: 2015-10-03

修稿日期: 2015-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助(11272354, 51479208, 51509257); 总后勤部基建营房部资助项目(CY114C022)

作者简介: 方祥位(1975—), 男, 重庆铜梁人, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土与特殊土力学及岩土微生物技术研究。

E-mail: fangxiangwei1975@163.com

一定的湿陷性,但其湿陷特征、效应与上部 Q_3 、 Q_4 黄土有明显区别,如果完全套用新黄土湿陷性的评判模式,不能充分反映 Q_2 黄土湿陷的特殊性^[9]。影响 Q_2 黄土特殊湿陷特性的因素更为复杂,有待进一步深入研究。

本文在陕西蒲城电厂 Q_2 黄土湿陷性及影响因素大量试验基础上,重点分析 Q_2 黄土的物质组成、物性指标及微观结构定量参数等对 Q_2 黄土湿陷性的影响规律,初步探讨 Q_2 黄土的湿陷机理,为深入理解 Q_2 黄土特殊的湿陷性和湿陷效应提供基础。

1 研究方法

1.1 试验土样

试验土样取自陕西蒲城电厂三期工程,上部为 Q_3 黄土,下部为 Q_2 黄土,总厚度约 60 m。土层从上到下依次为 Q_3 黄土(包含 L1 和 F1 土层)和 Q_2 黄土(包含 L2、F2、L3、F3、L4、F4、L5、F5、L6、F6 土层),研究深度达到了 40 余米^[6-9]。各土层埋深及主要岩性特征等详见文献[5]。

1.2 研究方案

黄土各土层湿陷性研究采用单向压缩湿陷试验(规范方法的单双线法)进行,试验结果见文献[9]。黄土各土层物质组成及物性指标(包含颗粒组成、易溶盐含量、pH 值、孔隙比、饱和度、干密度)等试验结果见文献[6]。黄土各土层微观结构特征及定量分析(包含颗粒、孔隙的分布分维及定向度、欧拉数等定量指标)结果见文献[10-11]。

由以往的研究可知,影响黄土湿陷性的因素很多,本文将在 Q_2 黄土湿陷特性、物质组成、物性指标、微观结构定量参数研究基础上,重点讨论 Q_2 黄土的湿陷系数与物质组成、物性指标及微观结构定量参数之间的关系,初步探讨 Q_2 黄土的湿陷机理。

2 试验结果分析与讨论

2.1 湿陷系数与黏粒含量的关系

黄土的颗粒组成,由上到下逐渐变细。已有研究表明,随着黏粒含量的增加,黄土由湿陷性过渡到非湿陷性。 Q_2 黄土黏粒含量随深度有增加的趋势,其平均值(22.88%)比 Q_3 黄土(14.47%)大^[6],这与 Q_2 黄土的湿陷性随深度增加逐渐减小相对应。图 1 是各层土的平均湿陷系数与黏粒含量的关系图,从图中可以看出,湿陷系数与黏粒含量总体上呈较好的反相关关系,具体点的变化则不一定完全遵循此规律。当然只根据颗粒组成要去正确判断黄土的湿

陷性还有相当困难,因为黏粒的赋存状态对其有很大影响。黏粒的赋存状态有多种形式^[4-5],包括①由黏性颗粒聚集或通过胶粒状物质胶结而成的集粒,成为结构体系的骨架,在水和压力作用下有可能遭到破坏而发生湿陷;②包裹骨架颗粒的黏粒,遇水后颗粒间的连接强度降低,容易发生湿陷;③存在于孔隙中的黏粒,减小了黄土的孔隙比,降低了黄土湿陷的可能性。

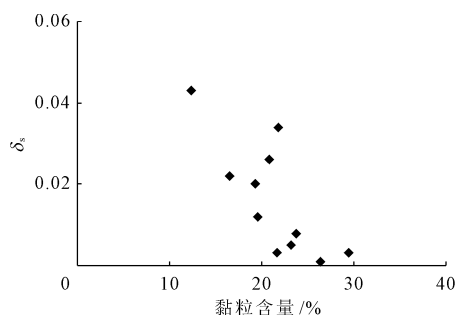


图 1 湿陷系数与黏粒含量的关系

2.2 湿陷系数与易溶盐含量的关系

Q_2 黄土的易溶盐含量在 0.12% ~ 0.71% 之间变化,平均易溶盐含量(0.33%)小于 Q_2 黄土(0.28%)^[6]。当土中易溶盐含量小于 0.5% 时,对黄土的湿陷性影响不明显^[6,12]。图 2 给出了各层土的平均湿陷系数与易溶盐含量的关系图,从图 2 中也反映出其湿陷性与易溶盐含量关系不大。但是黄土层的易溶盐含量大于古土壤层,这一点与黄土层的湿陷性大于古土壤层是一致的。

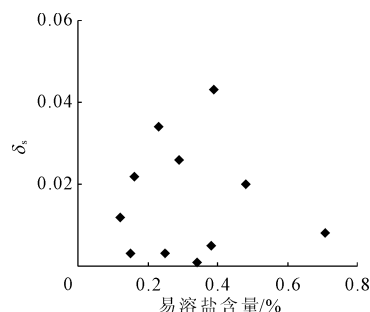


图 2 湿陷系数与易溶盐含量的关系

2.3 湿陷系数与 pH 值的关系

Q_2 黄土 pH 值随深度有逐渐增加的趋势,其值变化范围为 6.84 ~ 8.24,平均值为 7.45,远大于 Q_3 黄土的 pH 平均值 6.80^[6]。图 3 给出了各层土的平均湿陷系数与 pH 值的关系图,它们呈一定的反相关关系,即随 pH 值升高,其湿陷性有减弱的趋势。

2.4 湿陷系数与孔隙比的关系

黄土富含孔隙(大孔隙、架空孔隙、粒间孔隙和

粒内孔隙),正因为有如此多的孔隙才为黄土的湿陷提供了空间。而湿陷的发生主要与黄土中的架空孔隙的存在与否及其多少有关,粒间孔隙对湿陷性也有较大影响。由于孔隙比反映黄土的总孔隙,因此,以孔隙比来评价黄土的湿陷性具有一定片面性。通过前面的微细观结构研究知道,湿陷性的大小不仅与孔隙的总体积有关,也与其大小和形态有关。图 4 是各层土的平均湿陷系数与孔隙比的关系图。从图 4 中可以看出,湿陷系数随孔隙比增加大致呈线性增加趋势。

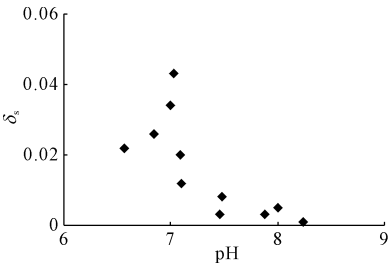


图 3 湿陷系数与 pH 值的关系

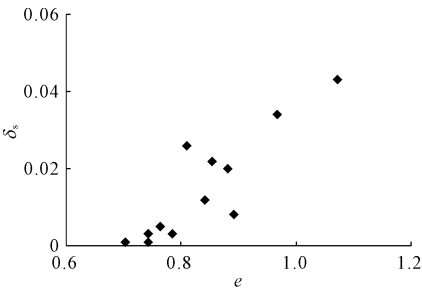


图 4 湿陷系数与孔隙比的关系

2.5 湿陷系数与饱和度的关系

天然含水率越高,饱和度越高,黄土的湿陷性越弱,它们之间呈反相关关系,这已被许多资料所证实。随着饱和度增加,基质吸力、胶结作用力减小,相同压力下的压缩性提高,而土体的变形空间是一定的,即最终的总变形(压缩变形加湿陷变形)是基本相同的,因此湿陷性减弱。图 5 是各层土的平均湿陷系数与饱和度的关系图,较好地反映了这一点。

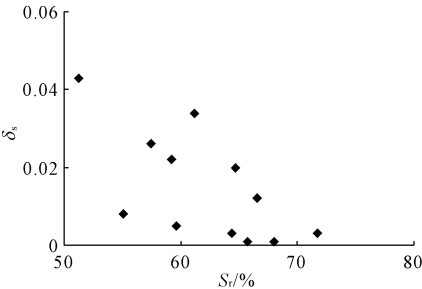


图 5 湿陷系数与饱和度的关系

2.6 湿陷系数与干密度的关系

黄土的多孔性为黄土湿陷提供了空间,因此反映土体结构的重度指标干密度对黄土的湿陷性起着重要作用。在试验初始条件相同的情况下(初始含水率、浸水量、压力等),湿陷系数与干密度呈负相关,即随干密度增大,湿陷系数有减小的趋势。图 6 是各层土的平均湿陷系数与干密度的关系图,呈较好的负相关关系。增加土体的干密度可以降低其湿陷性,在工程上可以利用这一点来降低黄土湿陷对工程的危害,如用强夯法压实地基等。

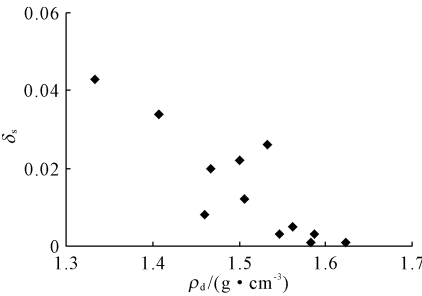


图 6 湿陷系数与干密度的关系

2.7 湿陷系数与颗粒、孔隙分布分维的关系

Q₂ 黄土的颗粒分布分维随深度有逐渐增加的趋势,其值在 2.12~2.18 之间变化,平均值为 2.15,大于 Q₃ 黄土颗粒分布分维平均值 2.11^[11]。颗粒分布分维越大,颗粒分布越集中,集团化程度越高,湿陷系数越小。图 7 给出了各层土的平均湿陷系数与颗粒分布分维的关系图,它们呈较好的反相关关系,即随颗粒分布分维值增大,湿陷性有减弱的趋势。另外,古土壤层颗粒分布分维大于黄土层(L2/F2 除外),古土壤层湿陷性小于黄土层。孔隙分布分维正好相反,即随孔隙分布分维值增大,湿陷性增强,它们呈一定的正相关关系,但相关性不如颗粒强。

2.8 湿陷系数与颗粒、孔隙定向度的关系

Q₂ 黄土的颗粒定向度随深度有逐渐增加的趋势,其值在 0.69~0.75 之间变化,平均值为 0.72,大于 Q₃ 黄土的颗粒定向度平均值 0.68^[11]。Q₂ 黄土的孔隙定向度随深度有逐渐减小的趋势,其值在 0.56~0.64 之间变化,平均值为 0.61,小于 Q₃ 黄土的孔隙定向度平均值 0.66^[11]。颗粒定向度越大,有序性越差,即土体颗粒的排列方向越混乱,湿陷性越弱。图 8 给出了各层土的平均湿陷系数与颗粒定向度的关系图,它们呈较好的反相关关系,即随颗粒定向度增大,湿陷性有减弱的趋势。孔隙定向度正好相反,即随孔隙分布分维值增大,湿陷性增强,它们也呈较好的正相关关系。

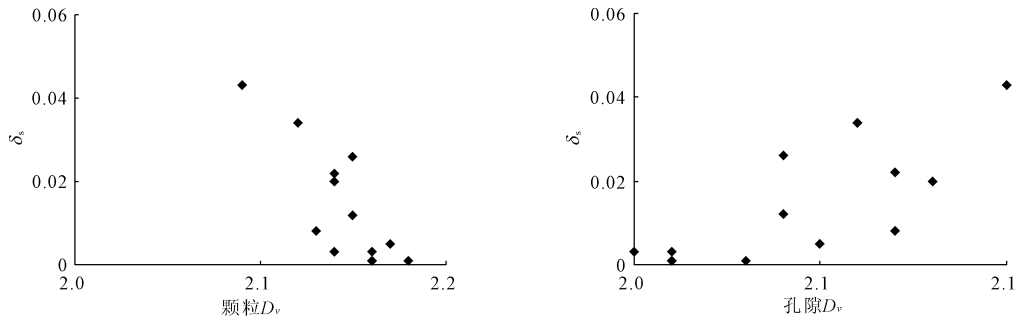


图 7 湿陷系数与分布分维的关系

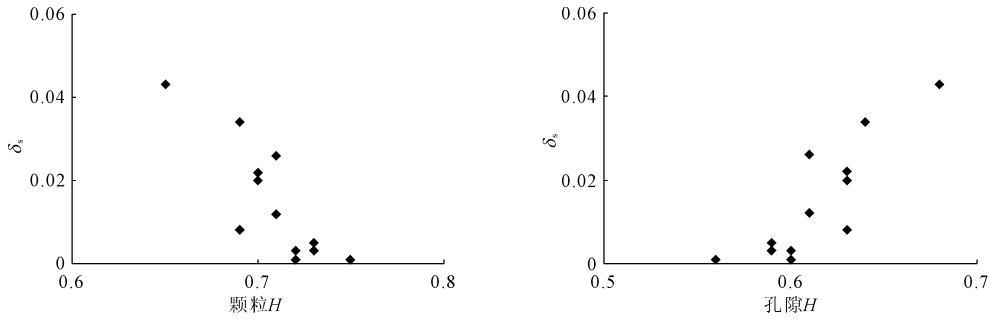


图 8 湿陷系数与定向度的关系

2.9 湿陷系数与欧拉数的关系

Q_2 黄土的欧拉数随深度有逐渐减小的趋势, 其值在 0.38 ~ 0.47 之间变化, 平均值为 0.43, 小于 Q_3 黄土的欧拉数平均值 0.50^[11]。图 9 给出了各层土的平均湿陷系数与欧拉数的关系图, 它们呈较好的正相关关系, 即随欧拉数增大, 湿陷性有增大的趋势。

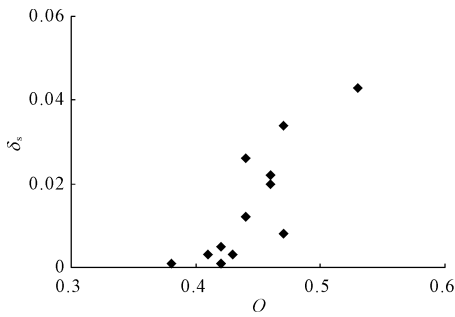


图 9 湿陷系数与欧拉数的关系

2.10 Q_2 黄土湿陷机理探讨

黄土的工程危害主要是湿陷变形, 因此对浸水湿陷变形的机理研究一直受到关注, 对其研究亦有很多成果。

从已有的研究结果看, 湿陷的发生与黄土中的架空孔隙的存在与否及其多少有关, 这里的架空结构不包括超大孔如鼠洞、虫洞、植物根系腐烂后造成的再生孔洞, 而是在黄土堆积过程中形成的。文献 [10] 通过湿陷前后微观图片孔径变化的分析表明湿

陷的过程除了部分粒内孔隙等细小孔隙外, 大部分孔隙都在发生变化, 大孔隙变成中、小孔隙, 中、小孔隙则变为更小的孔隙, 而仅把湿陷归结为架空孔隙的存在与否及其多少的结论是片面的。笔者认为, 压缩和湿陷的发生与文献 [11] 介绍的黄土四类孔隙中的大孔隙、架空孔隙和粒间孔隙都有关系, 与粒内孔隙关系较小; 由于鼠洞、虫洞等大孔隙不是孔隙的主体, 占孔隙总体积的比例一般并不大, 在深部 Q_2 黄土中更是少见, 故主要讨论由架空孔隙和粒间孔隙引起的压缩和湿陷变形。

孔隙结构的稳定受诸多因素的影响^[13]: ① 外力, 包括外加荷载和自重力两部分。在天然状态下, 这种外力可使土体中的骨架颗粒调整而处于平衡状态。如果这种外力不大, 骨架的调整不影响土体中孔隙的稳定, 则土体在卸荷后变形可能产生全部和部分回弹。如果这种外力较大, 则可能导致部分架空孔隙塌陷, 粒间孔隙变小或被填满, 因此当压力足够大时, 湿陷性将部分甚至完全消失。② 水的作用。因为天然状态下的黄土常处于非饱和状态, 含水率相对较低, 且多富集于集粒 (含黏块) 孔隙和粒间接联结物 (胶结物) 中的孔隙内, 少部分分布在各种颗粒的表面, 特别是在粒状颗粒直接接触的点、线、面周围形成一种弧形弯月面, 这种弯月面非饱和和土力学称之为收缩膜, 收缩膜受到的表面张力的反作用力相当于颗粒间的相互吸引力。在集粒内, 特

别是表面部分,也有这种吸力存在。在一定温度下,单位表面张力的作用是恒定的,但是表面张力的作用方向主要取决于两个因素,一是基质吸力的大小,二是土粒的排列情况。在土粒排列情况一定时这种力可以归结为非饱和土中的基质吸力,是一种内力,图 10 给出了收缩膜表面张力和吸力示意图。③ 胶结作用力。它是土体微结构稳定的基石,可以抵抗外力的作用,是一种内力。④ 粒间摩擦力。粒间接触面上存在的摩擦力,将阻碍颗粒的相对移动。

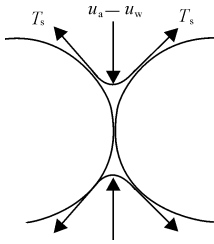


图 10 收缩膜表面张力和吸力示意图

上述基质吸力、胶结作用力、粒间摩擦力都将因为含水率的变化而变化。含水率越低,土样饱和度也越低,基质吸力就越大,基质吸力产生的表面张力将引起粒间滑动摩擦力阻碍颗粒的相对移动,当然,也有可能引起粒间滑动力;在集粒内(含黏块)或粒间胶结物中的孔隙中基质吸力引起的表面张力主要起吸引力作用。土中水越少,胶结物质间距离缩小,产生的分子黏结力就越大,胶结作用力越大。土中水越少,粒间吸附水膜越薄,粒间凝聚强度就越高,粒间摩擦系数就越大。当颗粒产生的摩擦力足以抵抗各种荷载传递到颗粒上使其滑动的作用力时,结构稳定。

当土中浸水时,土中含水率增加,外力(外加荷载和自重力)传递到颗粒上的有效应力因孔隙水压增加而减少;基质吸力迅速减小直至消失(粒间孔隙最易吸水,基质吸力最先消失,然后是粒间胶结物和集粒内孔隙缓慢吸水);胶结物质间由于水膜楔入距离增大,分子黏结力变小,水溶液电解质浓度降低,粒间斥力增大,这些都削弱了粒间连接强度,即胶结作用力减小;粒间吸附水膜变厚,粒间摩擦系数变小。所有这些力的变化,将可能使颗粒产生的摩擦力不足以抵抗各种荷载传递到颗粒上使其滑动的作用力,土颗粒将失去稳定;同时,部分集粒(含黏块)中的细粒状颗粒或胶结物在力和水作用下将可能变形,使粒间孔隙减小或填满。下面分别对架空孔隙和粒间孔隙的变形过程做进一步的说明。

架空孔隙是由一定数量的骨架颗粒堆积形成的

孔隙,其孔径远比构成孔隙的颗粒大,颗粒之间通过直接接触、直接面接触、间接点接触、间接面接触四种连接形式连接^[11]。由于架空孔隙的特殊结构和孔径大的特点,只要构成孔隙的某个颗粒受到的摩擦力不足以抵抗各种荷载传递到颗粒上使其滑动的作用力时,该颗粒就有可能因平衡被破坏而垮落或滚落到架空孔隙中,进而引起附近颗粒受力不平衡的可能,这样土体就产生了变形。如果是因为外加荷载的作用使土颗粒失去平衡,就是压缩变形,如果是在一定压力作用下浸水使土颗粒失去平衡,就引起湿陷变形。一般情况下,直接接触特别是直接接触点接触,本身的稳定性不如有一定柔性特点的间接接触,当受到外加荷载后,微小的位移就可能使土颗粒失去稳定,容易产生较大的压缩变形。而间接接触,粒间胶结物相对颗粒有一定的柔性,受到外加力作用后,微小的位移不致使土颗粒失去稳定;一旦浸水,削弱了粒间胶结物的胶结强度,在一定压力下就会失去稳定,形成湿陷^[11]。当然,即使不浸水,如果压力足够大,也会破坏粒间间接连接,特别是间接点接触而引起压缩变形。颗粒间四种连接中以间接接触的两种形式为主,因此,小压力下多数架空孔隙都能维持稳定;在一定压力下浸水后才有可能失去稳定;当压力足够大,大到足以破坏其连接处的胶结强度时,即使没有水的浸入,架空孔隙同样会破坏。这些观点较好的说明了压缩和湿陷变形的关系,对于同一土体,压缩性弱,湿陷性强,压缩性增加,湿陷性减弱,但最终的总变形是基本相同的。

从 Q₂ 黄土的微观图片看^[5,11],其架空孔隙数量明显少于 Q₃ 黄土,且随着深度的增加,架空孔隙数量更少。但是 Q₂ 黄土有一定的湿陷性,在压力较大时,湿陷性更明显。如果仅从架空孔隙的破坏来看,是得不到 Q₂ 黄土具有湿陷性这一结论的。一是因为 Q₂ 黄土架空孔隙数量较少;另外,当压力较大时,部分架空孔隙已经被破坏而不会引起显著的湿陷变形。因此,Q₂ 黄土在较大压力下的湿陷变形还应考虑其它因素。从前面 Q₂ 黄土较高压力下湿陷前后微观孔隙的变化来看,各种孔隙都在发生变化,包括粒间孔隙,下面简单探讨粒间孔隙的变形。随着水的浸入,集粒(含黏块)内孔隙也会缓慢吸水,这部分孔隙的浸水,一方面集粒(含黏块)内部的各组构单元间的相互连接逐步弱化(比如消除了基质吸力,表面张力引起的吸力随之消失等),另外由于黏粒中含有一定的蒙脱石等特殊膨胀矿物,集粒(含黏块)开始会产生一定的体积膨胀。由于这两方面的

原因,在较大压力的作用下,集粒(含黏块)会压缩变形,挤向周边孔隙;如果压力足够大,极少部分集粒(含黏块)甚至会发生溃散而填满附近的粒间孔隙。浸水初始,如果集粒(含黏块)的膨胀力克服了基质吸力的损失和上部荷载应力的话,它就会使结构产生膨胀。但是由于架空孔隙等的作用,这种膨胀性一般体现不出来。随着水的进一步浸入和压力的增大,结构进一步软化,膨胀力的作用进一步削弱,当它弱化到不足以抵抗外力作用时,它将变形产生新的湿陷。

根据上述讨论,笔者认为架空孔隙的失稳破坏和粒间孔隙的变小消失是引起湿陷变形的两种形式^[5,8],并结合微观结构特征探讨了这两种变形的原因和本质。以上阐述的湿陷变形的原因和机理能较好地解释 Q_2 黄土的湿陷特性和规律。

3 结 论

(1) Q_2 黄土的湿陷性受多种因素影响,随黏粒含量、pH 值、饱和度、干密度、颗粒分布分维和定向度的增加湿陷性降低,随孔隙比、欧拉数、孔隙分布分维和定向度增加湿陷性增加,易溶盐含量对 Q_2 黄土湿陷性影响不大。

(2) Q_2 黄土的湿陷是一个复杂的过程,受多种因素的影响。架空孔隙的失稳破坏和粒间孔隙的变小消失都可能引起湿陷变形,对于 Q_2 黄土后者引起的湿陷变形不容忽视。

参考文献:

- [1] Dudley J H. Review of collapsing soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., 2014,97(3):925-947.
- [2] 高国瑞.黄土湿陷变形的结构理论[J].岩土工程学报,1990,12(4):1-10.
- [3] 汤连生.黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论[J].工程地质学报,2003,11(1):30-35.
- [4] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科技出版社,1996.
- [5] 方祥位. Q_2 黄土的微细观结构及力学特性研究[D].重庆:后勤工程学院,2008.
- [6] 方祥位,成培江,申春妮,等.陕西蒲城 Q_2 黄土物质组成试验研究[J].后勤工程学院学报,2012,28(1):1-6.
- [7] 方祥位,申春妮,李春海,等.重塑 Q_2 黄土微观结构研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1231-1237.
- [8] 李春海,方祥位,汪 龙,等. Q_2 黄土力学性质的研究进展与展望[J].地下空间与工程学报,2013,9(S1):1788-1793.
- [9] 方祥位,申春妮,李春海,等.陕西蒲城 Q_2 黄土湿陷变形特性研究[J].岩土力学,2013,34(S2):115-120.
- [10] 方祥位,申春妮,汪 龙,等. Q_2 黄土浸水前后微观结构变化研究[J].岩土力学,2013,34(5):1319-1324.
- [11] 方祥位,申春妮,李春海,等.陕西蒲城黄土微观结构特征及定量分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1917-1925.
- [12] 钱鸿缙,王继唐,罗宇生,等.湿陷性黄土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1985.
- [13] 谭罗荣,孔令伟.特殊岩土工程土质学[M].北京:科学出版社,2006.