

考虑非饱和土与结构特征的黄土湿陷性讨论

袁中夏^{1,2,3}, 王兰民^{1,3}, 王峻^{1,3}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081; 3. 中国地震局黄土地震工程开放实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:首先从黄土的结构特征认识出发探讨了黄土湿陷性的内在因素;其次通过试验数据分析找出对黄土湿陷性影响最大的因素,并进而研究了黄土湿陷发生的作用机制。由此从内因和外因两方面较好地阐述了黄土湿陷性的实质及其发生机制。

关键词:黄土;湿陷;非饱和土;土微结构

中图分类号: P642.13⁺1; TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)01-0012-06

Discussion Water Collapsibility of Loess Considering Unsaturated Soil and Structure Characteristics of Loess

YUAN Zhong-xia^{1,2,3}, WANG Lan-min^{2,3}, WANG Jun^{2,3}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Haerbin 150081, China; 3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this paper, the internal factors of loess water collapse are discussed from the micro-structure point of view. Then, based on laboratory test, the most determinant factors on loess water collapse are found and the mechanism of water collapse of loess is revealed based on the known facts and theories. Through study from the two aspects, the problem of water collapse of loess and its nature are better explained.

Key words: Loess; Water collapsibility; Unsaturated soil; Soil microstructure

0 引言

对于黄土湿陷性的研究可以说是历史悠久,成果丰硕。虽然在很长时间内黄土的湿陷性一直是土力学的一个研究热点,但是对其认识却是长期百家争鸣,众说不一。上个世纪 60 年代后期以来,新的土力学理论的引入^[1-3],使得对黄土湿陷性的研究获得了许多新的进展,对其认识也逐渐一致。

本文的研究是基于对研究资料的深入分析,并引入这些新的土力学理论来对黄土湿陷问题做一个综合的讨论,以期有助于更好地认识黄土湿陷性问题。

1 研究所用的数据

研究中所采用的数据有两部分:第一部分是兰

州地震研究所历年来对不同地区黄土进行室内湿陷性试验所得到的结果,这些土样的采样深度一般在 5 m 左右,湿陷试验是在 200 kPa 固结压力下进行的;第二部分数据是采用原兰州有色金属建筑研究所廖胜修高工的研究资料,这些数据是对甘肃、山西和陕西三省 6 处场地的自重和非自重湿陷性试验结果,其组内一致性也比较好。考虑到两组数据提供的物理参数并不一致,所以分析一般都是采用组内数据进行。

2 作为黄土湿陷性物质基础的黄土结构特性

国外学者认为黄土之所以具有湿陷性是因为黄

收稿日期:2006-05-12

基金项目:国家自然科学基金(50379049);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20050028

作者简介:袁中夏(1974-),男(汉族),甘肃临洮人,副研究员,主要从事岩土地震工程和 RS/GIS 应用研究。

土的结构是亚稳态(Metastable)的^[4]。所谓亚稳态结构就是条件不变时结构基本是稳定的,即便存在向稳定结构转化的过程,但其进度非常缓慢,如同在空气中钻石向石磨转化一样,在分析中可不予考虑。可是一旦条件变化,亚稳态结构就会快速向稳定结构变化,从而引起原结构的破坏。

对于亚稳态结构的实质,国外学者如英国的 Dijkstra 和 Smalley^[4] 采用了我国苗天德等人的观点,认为是因为黄土中存在随机松散排列(Random Loess Packing)(图 1(a))。这种结构事实上就是国内所称的架空孔隙。在湿陷过程中架空孔隙发生变化,成为随机封闭排列(Random Closed Packing)(图 1(b)),其实就是架空孔隙遭到破坏,形成更加稳定的粒间孔隙。

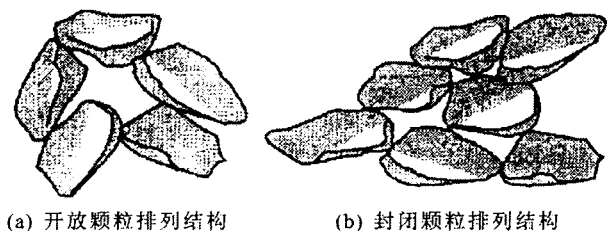


图 1 黄土中的不同颗粒排列结构(据文献[4])

Fig. 1 Different particale arrangements of loess.

黄土的结构也可以从其粒度组成来认识。黄土的主要颗粒组成为粉粒,再其沉积过程中受较弱的重力的控制,同时各种扰动作用和颗粒之间作用力也会有一定影响。粉粒在重力作用而下降而相互接触。但是由于颗粒之间的作用力已经足以影响重力作用,所以一些颗粒只会停留在最初的接触点上,而不是较稳定的位置。因此颗粒之排列比较松散,当数个处在不稳定的位置的粉粒相互连接就可能形成直径远大于粉粒的孔隙,也就是架空孔隙。在后期固结作用下,架空孔隙会逐渐向稳定结构转化而部分丧失,但是在湿陷性黄土中通常都存在一些架空孔隙。黄土的结构特性是黄土具有湿陷性的物质基础。黄土湿陷性其实就是破坏了黄土亚稳态结构的平衡,从而促使它向新的平衡发展,并因之产生大的结构破坏性变形。

架空孔隙是数个粉粒处于不稳定的初次接触点而形成的尺寸远大于构成此类孔隙的粉粒的孔隙。但是,黄土中经常存在一定的砂粒成分。砂粒由于其颗粒较大,在沉积过程中粉粒容易附着在砂粒周围,形成以砂粒为核心以粉粒和粘粒胶结或吸附的团粒(集粒),这样就不利于架空孔隙的形成。因此,砂粒含量高的黄土其湿陷性一般较低。图 2 表明在

砂粒含量较低的情况下,湿陷性较强;当砂粒含量增高,导致黄土的湿陷性下降。

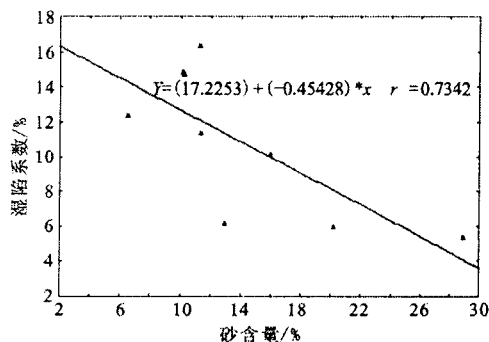


图 2 砂粒含量对黄土湿陷性的影响

Fig. 2 The influence of sand content on water collapsibility of loess.

需要说明的是,图 2 的结果并不是绝对的,它仅是研究范围内数据分析的结果。因为孤立地考虑砂粒的影响还不全面。因为砂粒、粉粒和粘粒三者对形成架空孔隙并决定其强度共同作用,实际上还必须考虑粘粒的含量。粘粒对湿陷性的影响是一个驼峰曲线^[5]。图 3 的结果是在模拟黄土颗粒组成的条件下进行的,因此不存在结构和其它因素的影响,所以得到比较规律的结果。这说明粘粒对黄土湿陷性的影响具有“二分性”:当粘粒含量较低时,粘粒在黄土结构中起到类似“润滑剂”的作用,浸水后粘粒由于其亲水性而发生活动性变化,从而使结构的强度降低,这样随粘粒含量增高,黄土的湿陷性反而增强;但当粘粒含量较高时,粘粒在黄土结构中起到胶结的作用,粘粒含量越高黄土结构的胶结性越强,黄土结构越稳定,湿陷性越小。

出现上述情况,笔者利用实际黄土湿陷试验数据及颗粒组成进行了分析,认为这可能与不同含量时粘粒在黄土中的赋存有关(示意如图 4)。当粘粒含量很低时,粘粒要么独自要么和小粉粒一起附着在大颗粒(砂粒和大分析)的接触点附近,平时起到一定的胶结作用。但是因为粘粒含量较低,在遇水情况下它容易发生活动。而在粘粒含量较高时,它要么以粘粒团要么以粘粒粉粒团的形式存在与大颗粒周围,这时它除了存在于大颗粒接触点附近外,也填充了孔隙,使得结构的凝聚力增强。此时即便浸水,因为相当一部分粘粒处于封闭空间或者被其它颗粒所覆盖,所以它的胶结性仍然存在。在这种情况下,粘粒含量越高黄土的湿陷性也越低。

同时考虑砂粒和粘粒的影响,分析得到如图 5 所示的结果。在分析中,为了简便起见将砂粒含量

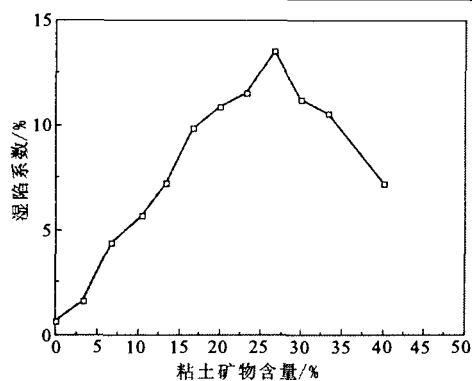


图3 粘土矿物(高岭土)含量对湿陷性的影响
(据文献[5])

Fig. 3 Influence of clay content (Kaolin) on water collapsibility of loess.

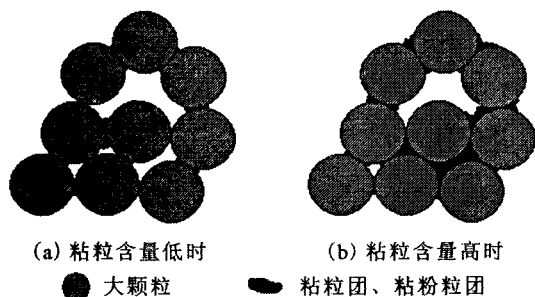


图4 不同粘粒含量情况下粘粒在黄土结构中的
赋存状态示意图

Fig. 4 The richness of clay content influences state
of existence of clay.

与粘粒含量减去 14.8 的绝对值求和作为独立变量进行分析。这样做是因为研究中发现影响湿陷性黄土的黄土粘粒含量驼峰曲线的最高点约为 14.8%。从上面的分析看出,二者对黄土湿陷性的影响都是负相关的。为方便起见,本文将这个值称为砂粒粘粒黄土湿陷影响指数,简称“影响指数”。

图 5 的结果表明,当影响指数较小时(本研究中为 $<20\%$),影响指数增大黄土湿陷性降低比较明显;当影响指数较大时,影响指数对湿陷性的影响不太明显。

不可否认黄土中易溶盐的存在也会对其湿陷性有一定影响。但是一般黄土含盐量在 1% 以下,此时根据苏联学者 Ларионов 和高国瑞的看法^[6-7],即便黄土中含水量在 10% 左右,易溶盐也是以溶解状态存在于溶液之中的,因此多数情况下对湿陷性的影响并不显著。仅当(1)易溶盐含量很高,超出一般黄土易溶盐含量较多;(2)易溶盐为结构胶结的重要组成部分时,才有易溶盐对黄土的湿陷性影响问题。所以,易溶盐对黄土湿陷性有影响,但多数情况下不

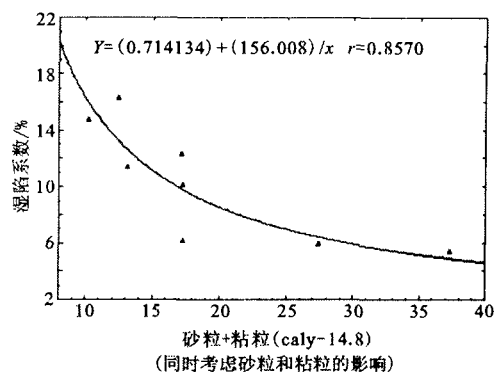


图5 砂粒和粘粒含量对黄土湿陷性的影响

Fig. 5 Influence of sand and clay content on water collapsibility of loess.

是考虑的主要问题。

因此从微结构角度来看,黄土湿陷性是因为其亚稳态结构遇水后发生了变化,从而引起大的残余变形。而黄土结构的亚稳态特征是因为黄土沉积中形成了不太稳定的架空孔隙结构,同时也与其弱胶结有关。黄土中粉砂粒和粘粒分别对架空孔隙形成的数量和其胶结程度起到一定作用,因此也会对黄土的湿陷性存在重要的影响。

3 黄土自重和非自重湿陷性的特点

以上分析所采用的都是 200 kPa 下的黄土湿陷性数据,因为与自重湿陷相比,200 kPa 下黄土的湿陷性较少受先期应力历史的影响,从而可以得到比较统一的结果。实际中黄土的湿陷分为自重湿陷和非自重湿陷:前者是黄土在无外加荷载条件下发生的湿陷;后者则是在施加一定荷载后发生的湿陷。自然地,前者表征自然土层的湿陷性;后者则可以对有附加荷载或者经过处理的黄土场地的湿陷性予以评价。

结构性对于黄土的自重湿陷性影响比较明显。这样的结果是,在结构性因素无法剔除的情况下其他因素对黄土自重湿陷性的影响难以得到准确的结果。对 7 个分别在甘肃、陕西和山西的场地上黄土自重湿陷的分析发现,多数情况下黄土自重湿陷系数的变化一般随深度而相对应含水量和土层年代有规律发展。具体有如下情况:(1)当场地黄土土质比较均一时,黄土的自重湿陷系数会随着深度而减小。在 7 个场地中兰州连城场地、山西孝义和河津场地均如此。这其实反映了上覆土压力造成的结构差异对自重湿陷性的影响。上覆压力越大,黄土结构性强,自重湿陷系数也小。(2)当土层年代相同,但场地表层土受降雨等水文条件影响较大时,一般近地

表黄土含水量较高,其自重湿陷系数较小;而随着深度增加,含水量降低,自重湿陷系数有所增加。但这种现象只存在于地表数米以内。(3)当土层年代不同时,不同年代土层的黄土湿陷性有明显差异。一般地层年代越老,其自重湿陷性越弱。

对比发现,黄土的自重湿陷系数和深度、土层以及含水量/饱和度的关系比较密切。前者一定程度上表明了黄土结构特征;而后者表明含水量越高的黄土其结构的水敏性越低,因而湿陷系数越小。而200 kPa下黄土的湿陷试验中,因为在加荷过程中原状黄土的结构遭到一定程度的破坏,而弱结构性使得200 kPa下湿陷系数与饱和度相关性要好于自重湿陷系数(图6)。

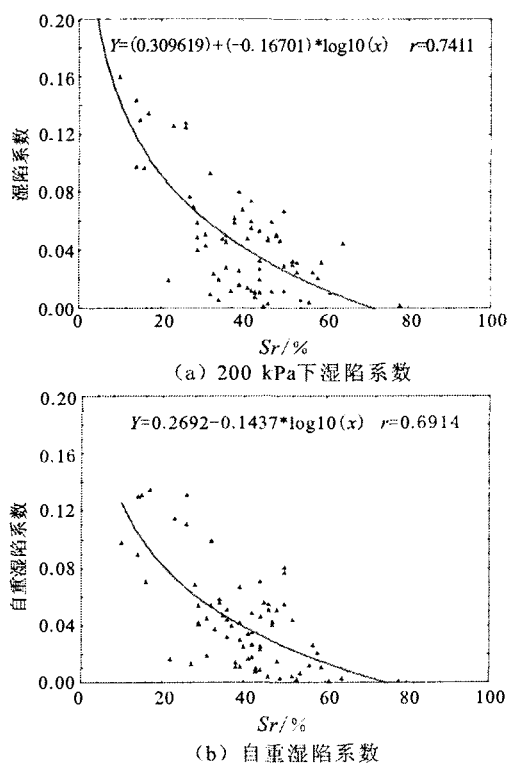


图6 饱和度对黄土湿陷系数的影响

Fig. 6 Influence of saturation on water collapsibility of loess.

4 吸力丧失——黄土湿陷性的主要作用机制

黄土发生湿陷性的物质基础或者说内在因素是其亚稳态结构。但是无论是黄土的自重湿陷还是非自重湿陷,在不排除其它因素的影响情况下,都与饱和度和有较好的相关性,这说明黄土湿陷的发生还有一个很重要的外因,即浸水后非饱和黄土吸力的丧失^[8]。

黄土是一种非饱和土,在其结构强度中吸力的贡献不容和忽视。图7表示了饱和黄土和非饱和黄土强度包络线的差异。根据扈胜霞等的研究,在含水量10%左右时,黄土的吸力可以达到100 kPa以上,而大时可以达到400 kPa^[9]。此时吸力对黄土抗剪强度的贡献已经相当大了。反过来,如果非饱和黄土的含水量增加,吸力丧失而使黄土抗剪强度的损失也是很大的。

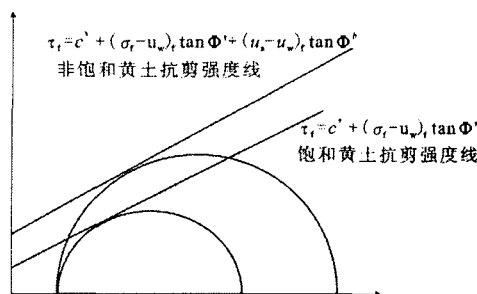


图7 饱和与非饱和黄土抗剪强度差异

Fig. 7 Difference on shear strength of saturated and unsaturated loess.

虽然非饱和土力学研究中土—水特征曲线多用饱和度/重力含水量—吸力关系来表示,但是作者认为用液性指数来表示吸力变换也有一定的特点甚至优点。其一,从物理意义上讲,液性指数为1时表示土处于完全流态,此时当然不会存在负孔隙压力,而应该是一个正值,液性指数可以很好地表示孔隙压力从负到正的变换。而饱和度是孔隙中充满水时的含水量,从物理意义上讲它在较高端和孔隙压力不一定有密切的联系。其二,实际试验表明,黄土吸力的丧失一般在较低的含水量范围内(20%左右),更接近液限含水量。利用液性指数可以比较准确的反映黄土土—水特征。而饱和度值的范围过大,应用起来对非饱和土吸力无多大意义的盲值范围也就较大。其三,液限含水量相对于100%饱和含水量的比例对于不同孔隙比的黄土,该值并不相同(图8)。孔隙比越高,该数值越低。这是因为许多封闭小孔隙是不能进水的,而理论饱和含水量假设所有孔隙都进水,这点与实际也有一定差异。因此采用液性指数来表示黄土吸力随含水量的变化有一定的优势,本文后面的研究将采用液性指数作为相对吸力变化的指标。

因为液性指数可以用来表示吸力的大小,因此湿陷性黄土试样的液性指数越低,其吸力越大,而黄土湿陷时由于吸力丧失而产生的强度丧失也越大,相应地湿陷系数也越大(图9)。图9中采用200

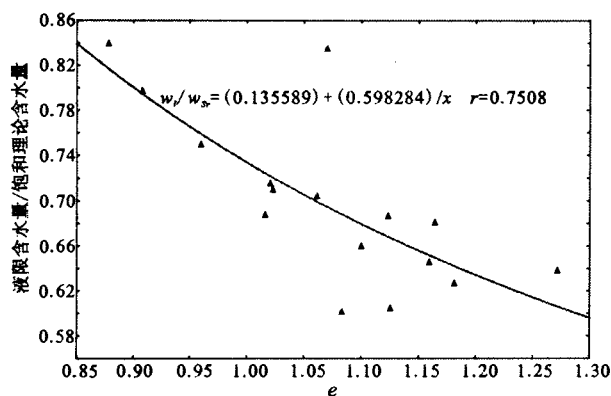


图8 不同孔隙比时液限含水量相对于100%
饱和含水量的比例

Fig. 8 Ratio of liquid limit to saturation water content for loess with different pore ratio.

kPa下湿陷试验数据,这样可以降低黄土结构性的影响。因为所用的试样来自甘肃、陕西、山西等不同省份,而且试验不是同一次进行,所以其结果具有一定的代表性。

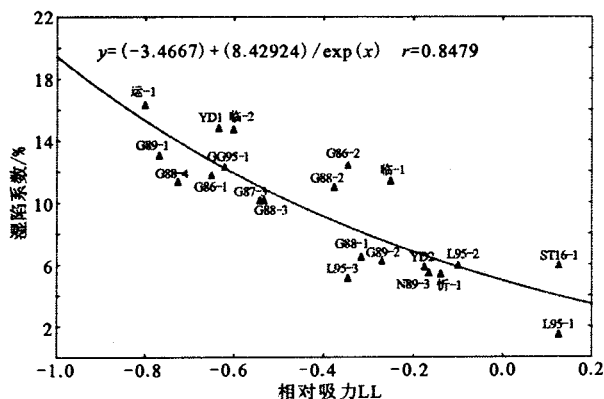


图9 液性指数对黄土200 kPa下湿陷系数的影响
(20个试样)

Fig. 9 Influence of liquidity index on water collapsibility of loess under 200 kPa.

但仅仅考虑液性指数还只是考虑了相对吸力。根据土-水特征曲线趋势,液性指数的大小可以间接表示基质吸力的大小。但是因为不同的黄土其土-水特征曲线和变化梯度不同,所以液性指数表示的吸力大小应该只是相对吸力的大小,即相对于真实吸力值的吸力大小的比例。

不同的黄土绝对吸力还与其结构等因素相关,其中孔隙性和颗粒大小对绝对吸力的大小有着重要影响。孔隙比越高,一定液性指数下非饱和土的吸力越高;非饱和土的平均粒径越大其非饱和吸力越小。因为黄土中粉粒占多数,其粒径变化范围较小,因此砂粒的含量对平均粒径的影响更为显著,所以

砂粒含量可以作为间接衡量黄土平均粒径的一个指标。如果考虑这两方面,增加绝对吸力因子可以更加明确吸力对黄土湿陷性影响。

而另一方面,孔隙比和砂粒含量也表征了黄土湿陷的内在因素。孔隙比和架空孔隙的多少有关,孔隙比越高架空孔隙的数量也应该越多。如前面已经提到,砂粒的含量对架空孔隙的形成起到负面影响。砂粒含量越高,粉粒更可能围绕砂粒分布和粘结,不易生成架空孔隙。考虑砂粒的含量一定程度上影响架空孔隙的相对数量。

考虑它们的不同效果,用孔隙比除以砂粒含量作为绝对吸力因子,进而用此进行吸力对黄土湿陷性影响的分析。事实上这样做是相对吸力(饱和度或者液性指数)的一种校正,让不同黄土试样之间具有更好的可比性。利用包含绝对吸力因子的吸力表达来拟合吸力同湿陷系数之间的关系得到如图10所示的结果。显然吸力同黄土湿陷性之间的相关性有所增加。图10中试样同图9。

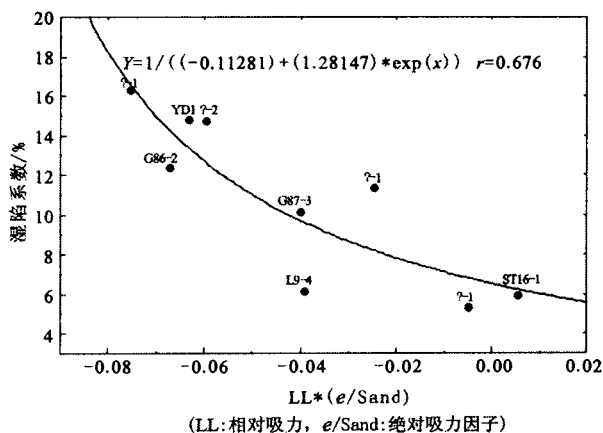


图10 湿陷前吸力指标和黄土湿陷系数之间的关系
Fig. 10 Influence of suction index on water collapsibility of loess.

以上说明,黄土湿陷的主要作用机制是浸水后吸力而引起的黄土强度降低而亚稳态结构破坏引起的较大残余变形。跟外力作用下黄土的残余变形不同,此时吸力丧失作用发生在黄土结构内部,相当于施加了一个与有效应力作用相反的结构剪切作用,其对黄土结构的破坏效果较之外力作用更为明显,破坏性更强。这就好比一个充气的气球,从外面施加力使之变形和从内部放气使之变形相比较为困难一样。

5 从颗粒作用力角度对黄土湿陷性的讨论

自从上个世纪以来,将土看作一种颗粒材料,从研究颗粒间作用进而认识土的力学性质的研究取得了一些进展。美国的 J. S. Santamarina 将土的颗粒间力分为三类:边界荷载(通过土骨架传递,成为骨架力),颗粒作用力(重力、浮力和水动力)和接触作用力(毛细力、电力和胶结作用)。粗粒土的性质主要由骨架力所决定,而土颗粒越细,接触作用力(如毛细力和电力)的作用越明显^[10]。

对黄土而言,其骨架不是完全由大颗粒的砂粒构成的,而是由砂粒—粗粉粒构成的。除了在出现架空孔隙的部位以外,这种土骨架相对而言还是比较稳定的。黄土基质吸力是一种接触作用力,但是其强度不如粘土颗粒间电性作用那么强,而且对含水量比较敏感,在含水量增加时这种接触作用力会逐渐减弱以至丧失或者其作用力方向发生变化。外部荷载作用下黄土发生残余变形时其作用力主要通过骨架传递。因为黄土的砂—粗粉粒骨架强度较高,它承担了大部分外部荷载引起的应力增量,而只传递很少一部分应力增量给颗粒而产生的剪切力。同时外部荷载对黄土变形的作用效果还同时受到围压的影响,围压越大,其作用效果越低,因此外部荷载作用小黄土不容易发生变形。而黄土湿陷时吸力丧失效应主要相当于增加了很大的内部颗粒间剪切力,而且围压对这种吸力丧失效果的影响不大或者是正效应,因此黄土结构较之外力作用更容易发生变形。因此黄土湿陷过程主要是颗粒接触作用力发生了内部变换,相对外部荷载作用下的黄土结构变化这种变化更容易发生,当发生时变形量更大。这就是黄土发生湿陷的颗粒作用力实质。

6 结论

综上所述,作者认为:

(1) 黄土湿陷的内在因素是因为它具有特殊的亚稳态结构,这种结构的形成主要与架空孔隙的存

在有关。这是一种由黄土颗粒特征和沉积条件下生成的一种孔隙结构,遇水容易失稳,但在上覆压力作用下一般具有较高的强度。

(2) 黄土中不同颗粒对黄土的湿陷性具有一定影响:高粉粒含量下黄土容易发生湿陷,因为此时黄土中的架空孔隙也相对较多;高砂粒含量可以降低黄土的湿陷性,因为当粉粒依附粒径较大的砂粒而结聚时,不利于架空孔隙的成生;而粘粒对黄土湿陷性具有“二分性”的影响,当粘粒含量较低时(本研究中试样数据分析得到临界值为 14.8%)粘粒含量的增加将增大黄土的湿陷性,而高粘粒含量条件下粘粒含量的增加将降低黄土的湿陷性。作者认为在低粘粒含量的情况下,粘粒一般以薄层形式附着在大颗粒的接触点周围,当含水量增加时粘粒活性增强,其胶结性变弱,黄土结构稳定性降低;在高粘粒含量情况下,相当一部分粘粒充填了大颗粒接触空间形成胶结,而水膜不会影响到内部粘粒的胶结,所以在含水量增加时虽然外部聚结粘粒受到影响,但是其充填粘粒的胶结性基本不受影响,所以粘粒含量越高,充填大颗粒孔隙越多,黄土的结构稳定性越强。

(3) 黄土的自重湿陷性受结构和土层条件影响较大,而黄土的非自重湿陷性特别是较高压力下的湿陷则受原状结构和赋存条件影响较小。因此较高压力下黄土的湿陷性数据可以利用来研究其它条件对黄土湿陷性的影响。

(4) 造成黄土发生湿陷的作用机制是吸力的丧失,当黄土浸水时吸力丧失,孔隙水压力由负值逐渐变成正值,从而引起黄土亚稳态结构的破坏。

(5) 既然黄土湿陷性的内因是其成因复杂的亚稳态结构,而黄土发生湿陷的主要作用机制是吸力丧失,那么在考虑黄土湿陷性处理时,应该根据实际情况,选择对这两方面进行改良以降低或者消除黄土的湿陷性。

(下转 39 页)

[参考文献]

- [1] 全佳,王玲珍,黄成敏. 基于信息扩散理论的云南省地震风险评估及管理研究[J]. 西北地震学报,2006,28(2):180-183.
- [2] 武安绪,吴培稚,张丽芳. 基于模糊 Modular 神经网络的官厅水库及邻区的地震危险性评估[J]. 西北地震学报,2005,27(增刊):65-71.
- [3] 谢礼立. 城市防震减灾能力的定义及评估方法[J]. 西北地震学报,2005,27(4):296-30.
- [4] 陈情来. 模糊综合评判地质灾害的危险性[J]. 油气储运,2000,19(5):38-43.
- [5] 王新民,段瑜,彭欣. 采空区灾害危险度的模糊综合评价[J]. 矿业研究与开发,2005,25(2):83-85.
- [6] 于远祥,杨梅忠,孙学阳. 黄陵矿区滑坡的稳定性评价与防治[J]. 矿业安全与环保,2004,31(4):4-7.
- [7] 闫满存,王光谦,李保生,等. 基于模糊数学的广东沿海陆地地质环境区划[J]. 地理学与国土研究,2000,16(4):41-48.
- [8] 曹恺,孟高头,陈亮. 浙江省仙居县地质灾害调查与区划[J]. 地球科学,2002,27(2):217-221.
- [9] 钟敦伦,谢洪,韦方强. 长江上游泥石流危险度区划研究[J].

山地学报,1994,12(2):65-70.

- [10] 杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法案例精选[M]. 北京:清华大学出版社. 2005:34-61.
- [11] 杨淑贤,刘俊英,周明礼,等. 湖北及邻区的斜坡类型及变形、破坏机理[J]. 西北地震学报,2006,28(3):258-262.
- [12] 郑国东,徐胜,郎煜华,等. 日本富山县中田浦滑坡滑带内的黄铁矿[J]. 地球化学,2006,35(2):201-210.
- [13] 郑国东,徐胜,郎煜华,等. 滑坡面粘土中铁元素的化学种变化[J]. 科学通报,2002,47(24):1889-1893.
- [14] 王学究,梁收运. 212 国道陇南段滑坡分布特征及主要因素探讨[J]. 西部探矿工程,2005,5(9):96-98.
- [15] 李金华,刘涛. 公路滑坡的稳定性评价与治理措施[J]. 西部探矿工程,2005,9:212-214.
- [16] 余宏明,袁宏成,唐辉明. 巴东县新城区冲沟泥石流危险度评价[J]. 水文地质工程地质,2004,增刊:47-49.
- [17] 金德山. 滑坡裂缝的识别与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2002,6(2):50-52.
- [18] 王君国,梁收运. G212 线陇南段玉皇滑坡的基本特征及成因探讨[J]. 西部探矿工程,2005,9(9):224-225.

(上接 17 页)

[参考文献]

- [1] E L Matyas, H S Radhakrishna. Volume change characteristics of partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1968, 12(4):432-448.
- [2] V Escario, J Sáez. Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction[A]//Proc. 3rd International Conference on Expansive Soil[C]. Haifa, Israel: [s. n], 1973:195-200.
- [3] A Lloret, E E Alonso. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior[J]. Geotechnique, 1980,30(4):449-477.
- [4] Dijkstra I J Smalley, C D F Rogers. Particle packing in loess deposit and the problem of structure collapse and hydroconsolidation[J]. T. A. Engineering Geology, 1995, 40:49-64.
- [5] A M Assallay, I F Jefferson, C D F Rogers, et al. Fragipan

formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis[J]. Geoderma, 1998,83:1-16.

- [6] A A 穆斯塔伐耶夫. 湿陷性黄土土地基与基础的计算(中译本)[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [7] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报,1990,12(4):2-10.
- [8] D G Fredlund, H Rahardjo. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐,张在明,等译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [9] 扈胜霞. 吸力对原状黄土强度、变形和水分变化的影响及其应用[D]. 西北农林科技大学,2002:30-32.
- [10] J Carlos Santamarina. Soil behavior at the microscale: particle forces[A]//Proc. Symposium on Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd[C]. Massachusetts Institute of Technology, 2001.