

湿陷系数与黄土宏观结构的关系研究

潘蕾, 张远芳, 陈敬知, 张运海

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探究湿陷系数与黄土宏观结构性的关系,对新疆区域内不同深度的原状黄土和重塑黄土进行了增(减)湿条件下的湿陷性试验,根据试验结果得出新疆黄土的湿陷曲线随初始含水率的变化特征,并从静力势能角度对湿陷系数和结构性关系进行解读:湿陷系数表征了单位厚度原含水率土体与饱和土体之间浸水饱和作用产生的宏观结构性差异。基于湿陷系数对黄土结构“可稳性”及“可变性”进行了探讨,并得出两者随初始含水率的变化规律。湿陷系数更适用于描述黄土结构性的改变,可以分析在不同工况下黄土结构稳定性和可变性的发展趋势。

关键词: 初始含水率; 湿陷系数; 宏观结构性; 可稳性; 可变性; 黄土

中图分类号: TU411.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0220-05

Research on the relationship between loess macro-structure and collapsibility coefficient

PAN Lei, ZHANG Yuanfang, CHEN Jingzhi, ZHANG Yunhai

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to study the relationship between macro-structure of loess and collapsibility coefficient, the loess collapsibility tests of Xinjiang's undisturbed loess and disturbed loess from various depths have been carried out under the condition of adding or reducing moisture. The collapsibility curve's variable features over initial water content have been reached based on the study results, and the relationship between macro-structure and loess collapsibility coefficient has been analyzed from the perspective of static potential energy. Collapsibility coefficient represents the macro-structural differences derived from saturation between original loess and saturated loess of unit thickness. Based on collapsibility coefficient, the paper discussed loess structural "stability" and "variability", and obtain the change rules along with initial water content. Collapsibility coefficient is more suitable at describing the change of the loess structure, and the tendency of loess structural "stability" and "variability" in various conditions could be analyzed.

Key words: initial water content; collapsibility coefficient; macro-structure; stability; variability; loess

1 研究背景

对于黄土结构性的认知最早始于其特殊的湿陷性,为研究湿陷的形成机制,国内外学者对各地区黄土做了大量研究工作,分别提出了相应的湿陷机理。纵观各湿陷机理,其假定成立的前提都是黄土特有的“低密度,大孔隙”的结构特性,在此特定条件下,土体才会发生结构破坏和较大的变形。因此,对黄土结构性的认知途径基本从“大孔隙、架空结构的

失稳破坏”出发,从多个角度进行黄土结构性的论述,而其中最直接有效地反映结构性变化的物理指标应为孔隙比,因孔隙比可以从宏观上对土体骨架的排列状态进行真实地量化反映。

我国学者从变形的角度已建立了诸多黄土结构参数模型,并对黄土结构性进行了量化的表达,极大地加深了对黄土结构性的认知程度。谢定义等^[1]在20世纪末提出了“综合结构势”,通过对比不同状态下土样的压缩变形量得到结构性参数;田堪良

收稿日期:2018-01-30; 修回日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41262012);新疆农业大学研究生校级创新项目(XJAUGR2016-031)

作者简介:潘蕾(1993-),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为土的基本性质。

通讯作者:张远芳(1963-),女,江苏无锡人,硕士,教授,硕士生导师,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。

等^[2]通过压缩变形量差值的对比,得出“静力强度势参数”并区分了联结强度和摩擦强度;陈存礼等^[3]通过压缩曲线得到结构屈服应力,并建立了 $e - \ln p$ 的函数关系式。党进谦等^[4]对含水量与黄土结构强度的关系进行了分析。王丽琴等^[5]、邵生俊等^[6]在得到构度的基础上,得出以孔隙比为变量的结构屈服应力表达式。刘海松等^[7]在大量资料的基础上,对黄土结构强度与湿陷性的关系进行了分析。周茗如等^[8]讨论了湿陷系数与压力、初始含水率、初始结构强度的关系。高凌霞等^[9]通过电镜扫描分析了不同含水率与固结压力对湿陷性的影响差异;胡仲有等^[10]对不同地区黄土的结构性和湿陷性进行了对比分析,发现在超过一定压力后,结构性参数与湿陷系数随含水率的变化规律一致。陈存礼等^[11-12]根据孔隙比定义了一个定量结构性参数,认为湿陷系数受结构性影响的规律是相同的。

2 试验基本情况

2.1 研究区概况

研究区位于新疆昌吉市北部(44°20'42"N, 87°20'43"E,平均海拔高度554 m),地处天山北麓、准格尔盆地南缘,整个地势由南向北呈阶梯状下降,南北高差超过4 000 m,南部主要为山地,中部为冲积平原,北部沙漠属古尔班通古特大沙漠一部分,沙丘为固定和半固定型,丘间地势平坦。该地属中温带区,为典型的温带大陆性干旱气候,降水主要出现在春夏两季,南部山区气候特征明显,北部区域沙漠性气候特征显著,故研究区极其干燥缺水。

2.2 试验土样

试验土样于2017年6月下旬采集,取自研究区内一处新建构筑物地基,该地6月份地下水埋深约25~30 m,20 m深度范围内为黄土层或类黄土层,土层呈淡黄色无层理结构,柱状节理发育,经取样观察发现,4 m内土层中原生闭合斜节理占主要部分。原地表层由杂草、红柳等灌木覆盖,故土体表层1~2 m内根系发育,3 m内土层分布肉眼可见大孔隙,多为树根腐烂后的根洞和虫孔,直径可达14~16 mm。

试验土样共分为2组,分别取自4 m以内不同埋深的土层,根据土工试验规范^[13]对土样的基本物理参数进行了测定,如表1所示。试验测得土体的塑性指数约介于9~10之间,采用朱慕仁^[14]所提出的根据塑性指数的分类方法,可进一步将试验土体划分为轻砂质粉黄土。根据颗分试验结果显示,两组的砂粒占比相同,黏粒含量($d \leq 0.005$ mm)分

别为18%、17%,粉粒含量($0.05 < d \leq 0.075$ mm)分别为73%、74%,可见上述A、B组土样的颗粒组成上仅在粉、黏粒的占比上略微发生变化。

表1 黄土基本参数

组号	取土深度/m	天然干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数
A	1.2~1.5	1.44	17.7	27.6	9.9
B	2.2~2.5	1.51	18.2	28.3	10.1

2.3 试验方法

本次试验主要从湿陷系数变化的角度对黄土体宏观结构进行分析,试验方法为常规的黄土湿陷性试验,试验变量为土体初始含水率。试验在控制同组内重塑土样与原状土样干密度相同的条件下,分别对A、B两组的原状黄土和重塑黄土进行增湿、减湿下的湿陷性试验,初始含水率阶梯设置分别为3%、8%、13%、18%、23%,湿陷试验采用双线法进行。

3 湿陷系数与黄土宏观结构

3.1 湿陷系数对结构性诠释

湿陷系数 δ_s 是指单位厚度的土样所产生的湿陷变形,是判定黄土湿陷性的定量指标,由室内压缩试验测定^[15],可用孔隙比进行表达^[16]:

$$\delta_s = \frac{\Delta h_s}{h_0} = \frac{h_p - h_{pb}}{h_0} = \frac{e_{pb,i} - e_{p,i}}{1 + e_0} \quad (1)$$

式中: h_0 为初始土样厚度,mm; e_0 为初始孔隙比; Δh_s 为浸水饱和与原含水率试样压缩量差值,mm; h_p 为某压力下原含水试样压缩曲线纵坐标,mm; h_{pb} 为某压力下饱和试样压缩曲线纵坐标,mm; $e_{pb,i}$ 为饱和试样在某级荷载压缩后的孔隙比; $e_{p,i}$ 为原含水试样某级荷载压缩后的孔隙比。

公式(1)给出了孔隙比的变化率和湿陷系数之间的关系,式中的孔隙比由3部分组成:初始孔隙比以及某级荷载下浸水饱和土样孔隙比、某级荷载下原含水率土样孔隙比。对于初始干密度相同的同一组土样,初始孔隙比 e_0 为常数,则 $1/(1 + e_0)$ 表示的是初始状态下土颗粒的分布,且一般认为土颗粒不具有压缩性,则湿陷系数的变化仅来自于2种工况在不同荷载下土体孔隙比的差异,孔隙比虽不能直接反映黄土中“开放的亚稳态架空结构”,但在宏观上可以对土体的结构状态加以体现。如上文所述,湿陷系数在工程中已有较成熟的实践经验,且湿陷系数与孔隙比存在上述关系,在此将孔隙比替换

为湿陷系数,可以利用湿陷系数对黄土结构性进行描述。

对此,从静力势能的角度出发对黄土结构性进行解读:湿陷系数表示了压力和浸水饱和共同作用下产生的额外附加变形量,则额外附加变形量是指土体在抵抗相同外力时,由于浸水饱和作用导致土体结构性的削弱或丧失的结果;同时湿陷系数是指

单位厚度土样所产生的湿陷变形,故湿陷系数表征了单位厚度原含水率土体与饱和土体之间浸水饱和和作用产生的结构性差异,这种差异是对土体宏观结构变化上的表达。

3.2 湿陷系数对土体宏观结构的表达

对 A、B 两组的原状样和重塑样进行增湿、减湿下的湿陷性试验,试验结果如图 1 所示。

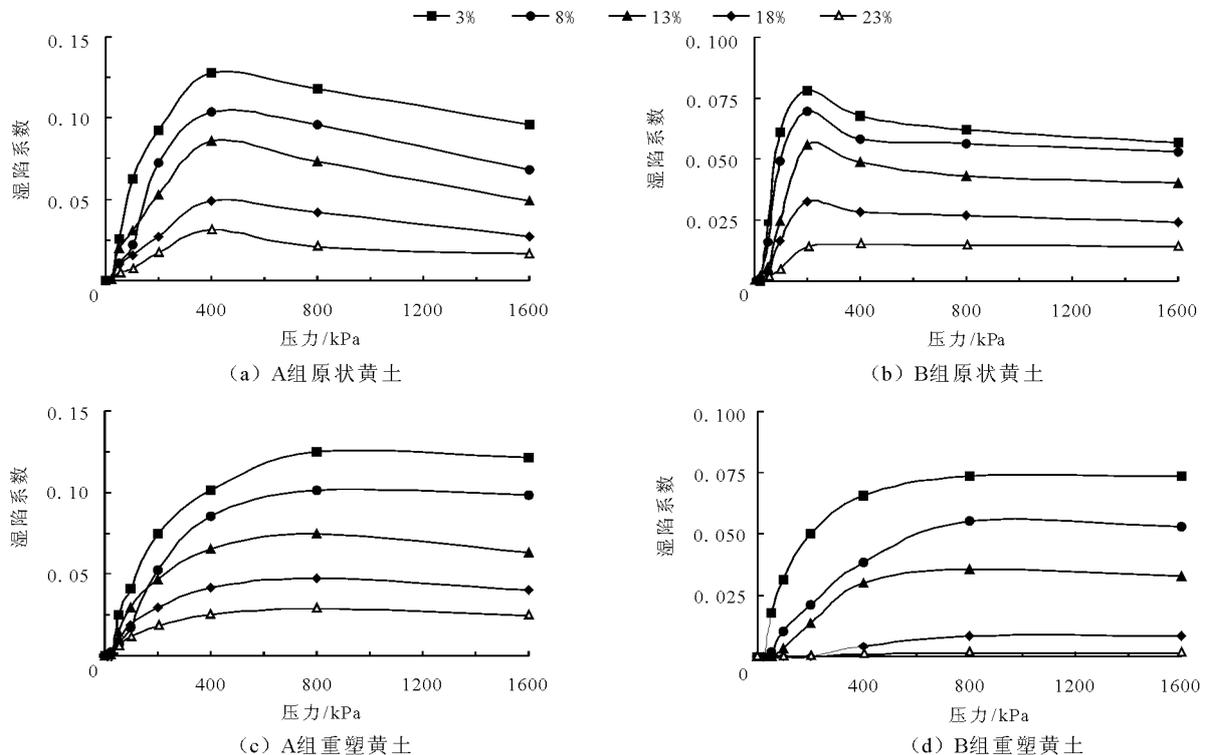


图 1 湿陷系数曲线

原状黄土和重塑黄土都表现出随初始含水率的增大湿陷系数逐渐减小的特征。分析现象产生的原因:当含水率较低时土体粒间水膜较薄,水膜的润滑作用对粒间摩擦力和黏聚力的影响弱,则土体结构抵抗上覆荷载能力较强。同时在黄土骨架颗粒联结部位通常包裹有黏土膜和盐晶膜,共同形成了联接结构强度,在水的作用下颗粒间的接触黏膜被侵蚀,少量的结晶、黏胶颗粒溶解脱落,导致接触联结强度降低。此外随含水率逐渐增加,粒间自由水增多,土颗粒更易发生位移,在水、土、力的耦合作用下导致黄土的湿陷系数降低幅度逐渐增大,当含水率(饱和度)较大后,粒间水膜的润滑作用逐渐削弱。

上述分析表明初始含水率不同,土体原始结构也明显不同:随着含水率的增大,土体的原始结构遭到了削弱,较大含水率土体和浸水饱和土体结构性的差异变小,在湿陷曲线上表现为逐级下降。这进一步验证了湿陷系数可以对黄土宏观结构性进行有

效地表达。

湿陷系数曲线通常会在某一荷载时达到峰值,随后呈下降或平缓趋势。如图 1(a)、1(b)所示,原状黄土的湿陷曲线存在较明显的峰值,随荷载的持续增大湿陷系数逐渐减小,曲线下跌,最后呈平缓状;重塑黄土则无明显峰值出现(图 1(c)、1(d)),在湿陷系数达到峰值后曲线直接进入平缓状态。湿陷曲线的走势实则是湿陷系数增量发生变化的结果,因此从湿陷系数的增量上对湿陷系数曲线进行分析:

如公式(1)所示,湿陷系数 $\delta_s = (h_p - h_{pb})/h_0$, 则湿陷系数的增量 $\Delta\delta_s$ 表示下级荷载对附加变形量的作用大小,对湿陷系数的增量进行推导,为公式的简洁性,此处将湿陷系数 δ_s 简化为 δ 表示,同样代表饱水湿陷系数:

$$\Delta\delta = \delta_{i+1} - \delta_i = \frac{(h_{i+1} - h_i) - (h_{k+1} - h_k)}{h_0}$$

$$= \frac{\Delta h_{si} - \Delta h_{ci}}{h_0} \quad (2)$$

式中: δ_i 为土体在 p_i 荷载下的湿陷系数; h_i 为原含水率土体在 p_i 荷载下稳定后的高度, mm; h_k 为饱和土体在 P_i 荷载下变形稳定后的高度, mm; h_{si} 为饱和土体在 P_{i+1} 荷载下的变形增量, mm; h_{ci} 为原含水率土体在 P_{i+1} 荷载下的变形增量, mm。

由公式(2)可知湿陷系数的变化代表了原含水率土体压缩增量与饱和土体压缩增量的差值, 当湿陷系数增大时, 曲线呈上升状态 $\Delta\delta > 0$, 浸水饱和土体的压缩增量大于原含水率土体的压缩增量, 同时湿陷系数代表浸水饱和作用产生的结构性削弱, 因此当湿陷曲线处于上升阶段时, 两种工况下土体的结构性差异是逐渐增大的, 在达到湿陷系数峰值时表明荷载作用下, 浸水饱和作用产生的结构削弱程度最大。

曲线下降阶段 $\Delta\delta < 0$, 即 $\Delta h_{si} < \Delta h_{ci}$, 表明在达到一定荷载时, 浸水饱和土体的变形增量小于原含水率土体的变形增量, 分析原因: 饱和土体的压缩系数大于原含水率土体, 在前期荷载作用下, 饱和土体已达到较大压缩量, 原含水率土体尚有更大的压缩空间, 压缩系数的改变实则是浸水饱和和对土体结构的削弱效果。

曲线平缓段 $\Delta\delta \rightarrow 0$, 即 $\Delta h_{si} \rightarrow \Delta h_{ci}$, 即在达到较大荷载时, 浸水饱和土体的变形增量与原含水率土体的变形增量近似相等。此时浸水饱和与原含水率土体抵抗同等荷载时所产生的变形增量近似相同, 说明两种工况下的土体结构已具有相似的稳定性, 此时结构性差异达到最小状态。

在相同初始条件下, 湿陷系数会随上覆荷载发生变化, 因此湿陷系数更适用于描述土体结构性的改变, 可以分析出在不同工况下土体结构稳定性和可变性的发展趋势。

4 黄土结构的可稳性及可变性

可稳性是指破坏土体初始结构的难易程度, 可变性是指土结构破坏后土变形增大、强度降低的大小程度^[11]。

由上文分析可知, 湿陷系数表征了浸水饱和作用产生的土体结构性差异。因此, 认为当湿陷系数上升至峰值段为土体原生结构的破坏阶段, 结构性差异逐渐显著, 该阶段代表了土体的“可稳性”, 湿陷系数的峰值大小表示了土体由于浸水饱和作用产生的结构性削弱程度, 则湿陷系数峰值愈大, 土体的

可稳性愈弱。

湿陷系数的下降、平缓段为土体次生结构的愈合阶段, 原含水率土体与浸水饱和土体压缩增量差值逐渐减小, 表明土体结构破坏后的附加变形量减小、土体结构性差异逐渐削弱, 故该阶段代表了土体的“可变性”, 在曲线上表现为: 峰值点后曲线的降低幅度, 降低幅度越大表明原含水率土体在该荷载下的变形越大, 则土体“可变性”越大。

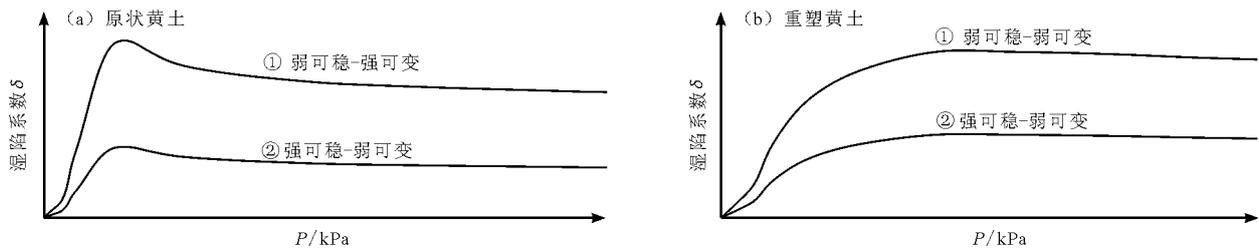
推导如上文 3.2 节中公式(2)。当处于下降阶段时, 浸水饱和土体的压缩量已达较大值, Δh_{si} 开始逐渐减小, 而原含水率 Δh_{ci} 的减缓速率相对慢的多, $\Delta\delta$ 的绝对值开始增大(下降阶段 $\Delta\delta$ 为负值), 总的湿陷值 δ 随之变小, 当上覆荷载达到足够大时, 原含水率土体和饱和土体的压缩增量都趋于稳定, 开始进入平稳阶段。因此, 湿陷系数降低阶段的下降幅度代表了原含水率土体结构破坏后的变形量, 即“可变性”。

原状黄土的湿陷过程包含了上升、下降、平稳 3 个阶段。上升段主要为土体原生结构破坏过程, 随初始含水率的增大湿陷系数峰值减小, 即低含水率下原状黄土的结构性较强, 意味着土体遇水后附加变形量大, 更易失稳, 土体有“弱可稳性”。随着初始含水率的增加湿陷曲线下降, 附加变形量减小, 意味着土体稳定性增强向“强可稳性”发展。

重塑黄土的湿陷过程通常仅包括上升、平缓段, 上升段曲线增长速度相对缓慢, 即重塑黄土比原状黄土在同等上覆荷载下的湿陷系数小, 表明重塑黄土有相对较强的可稳性。无论原状或重塑黄土, 土体的“可稳性”都随含水率的增大而增大。

同时初始含水率的增加会影响湿陷系数下降阶段的发展, 导致原状黄土的“可变性”减小。本次试验中重塑黄土的湿陷系数达到峰值后没有显著的下降阶段, “可变性”对含水率的变化并无明显的相关性, 重塑黄土结构破坏后一直保持着较小的“可变性”。

综上, 原状、重塑黄土的“可稳性”随含水率增大而增强, 原状黄土的“可变性”随含水率增大而减小, 重塑黄土一直保持较小的“可变性”。归纳湿陷曲线进行分类如图 2 所示, 图 2(a) 为原状黄土湿陷曲线示意图, 随初始含水率的增大曲线由①弱可稳-强可变性逐渐向②强可稳-弱可变发展; 图 2(b) 为重塑黄土湿陷曲线示意图, 随初始含水率的增大由①弱可稳-弱可变向②强可稳-弱可变发展。



图中:①含水率大于②

图2 黄土湿陷曲线分类示意图

5 结论

(1)基于湿陷系数从静力势能角度出发对黄土结构性进行解读:湿陷系数表征了单位厚度原含水率土体与饱和土体之间浸水饱和作用产生的结构性差异,这种差异是对土体宏观结构变化上的表达。

(2)对湿陷曲线和土体宏观结构性关系进行了分析,湿陷系数峰值时浸水饱和作用产生的结构性削弱程度最大,湿陷系数下降段表示土体结构性差异的削弱,平缓段时原含水率与饱和土体的结构已具相似的稳定性。

(3)根据湿陷系数与宏观结构性的关系,从湿陷系数对黄土结构“可稳性”及“可变性”进行了探讨。随着初始含水率的增大,原状黄土由“弱可稳-强可变”逐渐向“强可稳-弱可变”发展,重塑黄土由“弱可稳-弱可变”向“强可稳-弱可变”发展。湿陷系数更适用于描述土体结构性的改变,可以分析出在不同工况下土体结构稳定性和可变性的发展趋势。

参考文献:

- [1] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报,1999,21(6):651-656.
- [2] 田堪良,马俊,李永红. 黄土结构性量化参数的探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(s1):3179-3184.
- [3] 陈存礼,蒋雪,杨炯,等. 结构性对压实黄土侧限压缩特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(9):1939-1944.
- [4] 党进谦,郝月清. 含水量对黄土结构强度的影响[J]. 西北水资源与水工程,1998,9(2):17-21.
- [5] 王丽琴,邵生俊. 黄土构度与物理指标之间的定量关系[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(s2):4380-4386.
- [6] 邵生俊,郑文,王正泓,等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学,2010,31(1):15-19+38.
- [7] 刘海松,倪万魁,颜斌,等. 黄土结构强度与湿陷性的关系初探[J]. 岩土力学,2008,29(3):722-726.
- [8] 周茗如,王晋伟,王腾,等. 黄土塬非饱和黄土增湿变形特性及结构性研究[J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(1):99-104.
- [9] 高凌霞,栾茂田,杨庆. 基于微结构参数主成分的黄土湿陷性评价[J]. 岩土力学,2012,33(7):1921-1926.
- [10] 胡仲有,骆亚生,陆鹿. 不同地区黄土湿陷性和结构性综合分析[J]. 水土保持通报,2008,28(2):63-66.
- [11] 陈存礼,胡再强,高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学,2006,27(11):1891-1896.
- [12] 王振刚. 考虑施工过程影响的黄土湿陷性变化特性[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(1):56-59.
- [13] 中华人民共和国水利部. SL 237-1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [14] 朱慕仁. 黄土地基的塑性指数分类[J]. 西北建筑工程学院学报,1995(1):6-8.
- [15] 张苏民. 湿陷性黄土的术语和基本概念[J]. 岩土工程技术,2000(1):42-46.
- [16] 谢定义,邢义川. 黄土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2016.