

非饱和压实黄土结构特性试验研究

王娟娟, 郝延周, 王铁行

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 对增(减)湿到相同含水率及相同干密度的不同结构性非饱和压实黄土进行土-水特征曲线试验和三轴剪切试验, 研究制样含水率引起的结构变化对非饱和压实黄土基质吸力、应力-应变特征及结构性参数的影响。研究表明: 制样含水率引起的结构性对非饱和压实黄土的土-水特征曲线有明显的影响, 小于塑限时基质吸力随制样含水率的增大而增大, 最优制样含水率时非饱和压实黄土具有均匀小孔隙的团粒凝聚结构使其吸力相对最大; 应力-应变曲线在最优结构状态时位于坐标最上端, 小于最优制样含水率时的结构弱化程度相对较低, 其应力-应变曲线逐渐下移, 大于最优制样含水率时土样的结构弱化程度较高, 其应力-应变曲线位于最下端; 定义的结构性参数 m_{er} 能够合理反映压实黄土的结构性, 弥补了压实土工程中用最优含水率和最大干密度指标无法反映土结构性影响的不足; 屈服结构性参数 m_{er0} 能够合理反映出不同制样含水率压实黄土的结构弱化程度, 结构弱化程度还反映在三轴剪切破坏强度上。

关 键 词: 压实黄土; 制样含水率; 结构性; 基质吸力; 应力-应变曲线; 结构性参数

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)04-1351-08

Experimental study of structural characteristics of unsaturated compacted loess

WANG Juan-juan, HAO Yan-zhou, WANG Tie-hang

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: A series of soil water characteristic curve tests and triaxial shear tests were carried out on different structural unsaturated compacted loess samples after increasing or decreasing moisture to the same water content and dry density. The influence of different structures caused by the change of molding water content on matric suction and stress-strain characteristics as well as the structural parameter was investigated for the unsaturated compacted loess. The results indicate that the structure caused by the molding water content has a obvious effect on the soil water characteristic curve of unsaturated compacted loess. The matric suction increases with the increase of the molding water content when it is less than plastic limit. The compacted loess, which has the agglomerate structure with uniform pore size, results in relatively maximum suction at its best water content. The stress-strain curve of sample with optimum structure state is at the top of the coordinate. The degree of structural weakening is relative lighter when the water content is less than the optimum molding water content, resulting in the stress-strain curve moves downward gradually. On contrarily, when the water content is higher than the optimum molding water content, the degree of structural weakening is relative higher, which makes the stress-strain curve at the bottom. The proposed parameter m_{er} can reasonably reflect the structure of compacted loess, which overcomes the deficiency that the optimum moisture content and maximum dry density indexes cannot reflect the influence of soil structure in compacted soil engineering. The yield structural parameter m_{er0} can reasonably reflect the degree of structural weakening of compacted loess with different molding water contents, and the degree of structural weakening is also reflected in the triaxial shear failure strength.

Keywords: compacted loess; molding water content; structure; matric suction; stress-strain curve; structural parameter

1 引 言

黄土主要分布在中纬度干旱、半干旱地区, 其特殊的成因决定了黄土具有独特的结构特征。土的

结构性对其工程性质的重要性已成为共识, 被认为是 21 世纪土力学的核心问题^[1]。在土的结构性研究方面, 用释放结构势的方法, 对原状土已经建立了结构性的多种量化参数。谢定义等^[2]以综合结构

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(No. 16JK1448)。

This work was supported by Special Scientific Project of Shaanxi Education Department (16JK1448).

第一作者简介: 王娟娟, 女, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事黄土地区工程地质、环境地质方面的教学与科研工作。E-mail: juanjuan0022@163.com

通讯作者: 郝延周, 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 主要从事黄土强度与结构特性方面的研究工作。E-mail: 30010508@hncj.edu.cn

势为土结构性参数,提出一种研究土体结构性的新途径。邵生俊等^[3]用主应力差定义了原状土的结构性量化参数来反映扰动、浸水和加荷作用下土的结构变化;基于初始切线模量定义的损伤比来反映球应力增大和进水增湿作用引起的结构破损变化^[4]。陈存礼等^[5]根据同一压力下原状、重塑及饱和黄土的孔隙比定义了一个结构性定量参数,探讨了结构性参数随压力及含水率变化的规律性。

以上对原状黄土的结构性参数研究主要是通过对其原状、重塑及饱和状态的力学特征进行分析得出量化参数,但对于非饱和压实黄土而言,结构性主要是由于土的重塑压实而形成的颗粒空间排列、次生联结和吸力胶结等,其结构性分析无法套用原状土的结构性参数。陈存礼等^[6-7]沿用综合结构势思想,采用比较压实土及饱和压实土的侧限和无侧限抗压强度来定义土的初始结构性参数。压实法是黄土地区进行地基加固和填筑工程时采用的重要处理方法。黄土压实前的初始含水率不同会导致压实后具有明显的结构特征,仅将压实土与饱和压实土的结构性进行定量对比分析只能表示压实土的物理结构状态,对压实土工程的实际指导意义有限。

采用夯实、碾压等方法对黄土地基、路基进行压实,压实功和制样含水率对压实细粒土的结构有显著的影响^[8-9],进而对其力学特性有很大的影响^[10-11]。土压实前的初始含水率引起的压实土结构变化对土-水特征等吸力下非饱和压实黏土的压缩特性及三轴应力-应变特性^[12-15]有明显的影。基于以上分析,对原状黄土的结构性研究已经比较深入,而对于具有一定结构性的非饱和压实黄土的结构性研究的文献还较少,特别是结构性对非饱和压实黄土基质吸力和应力-应变特征影响的文献还鲜有报道;最优含水率和最大干密度是评价压实土工程压实质量的重要物理性指标,但它们无法反映结构性对压实土工程性状的影响。因此,本文通过对不同制样含水率(不同制样含水率,压实到相同干密度,增(减)湿到同一含水率,模拟施工过程中填土含水量不均匀,经压实到相同干密度后经历降水等自然条件,压实土均达到相同含水率)的非饱和和压实黄土进行土-水特征曲线试验和三轴剪切试验来探讨制样含水率导致的结构性对非饱和压实黄土基质吸力和应力-应变特征的影响。

2 试验概况

试验所用土样取自西安市太乙路,属于 Q₃ 马兰黄土,呈黄褐-褐黄色、可塑、局部硬塑、稍湿-湿、孔隙发育,其物理性质指标见表 1。

将原状黄土风干碾碎过 2 mm 孔径筛,分别配制含水率 w^0 为 14%、16%、18%、20% 的试样,压实干密度控制在 1.7 g/cm³,然后增湿(减湿)到相同的含水率 18%,此时土样中土颗粒通过不同联结和排列构成结构性的土体。制备试样采用特制的压样器制备,根据试验所设定的干密度和含水率计算出所需湿土重,分 5 层压实。为减小干密度及含水率差异对试验结果带来的影响,选用土样需满足干密度差值小于等于 0.02 g/cm³,含水率差值小于等于 1%。在保持不同结构性的条件下,测定压实土样的含水率、干密度,严格按照增湿和减湿所需水量计算公式(见土工试验规程)计算出预加和预减水量,采用水膜转移法将低含水率的试样增湿到含水率 18%,采用自然风干法将高含水率试样减湿到同一含水率 18%,用保鲜膜包好放入保湿缸中养护 24 h 以上,使试样中水分均匀分布。

表 1 黄土的主要物理特性指标

Table 1 Indicators of the physical properties of loess						
相对密度	液限	塑限	不同粒径(mm) 颗粒组成/%			
G_s	W_L / %	W_p / %	>0.075	0.075~0.01	0.01~0.005	<0.005
2.71	30.7	18.4	3.2	49.7	16.8	30.3

非饱和和压实黄土的土-水特征曲线试验采用英国 GEO-Experts 应力相关的土-水特征曲线压力板仪系统,采用进气值为 0.5 MPa 的高进气指陶瓷板,试样尺寸为 $\Phi 70$ mm $\times$ 19 mm,每个试样施加 50、100、150、200 kPa 的气压,以制样含水率 w^0 分别为 14%、16%、18%,干密度为 1.7 g/cm³ 制样,然后增湿到相同的含水率 18%后抽气饱和,再进行脱湿试验,在每一级气压下,每 24 h 记录一次数据。三轴剪切试验采用 FSY30 型应变控制式三轴仪,土样尺寸为 39.1 mm $\times$ 80 mm,采用不固结不排水剪切试验,剪切速率为 0.5 mm/min,围压设置为 100、200、300 kPa。试验结束标准为轴向应变达到 19%。

3 试验结果分析

3.1 结构性对非饱和压实黄土基质吸力的影响

由于土-水特征曲线试验的复杂性、数据离散性和耗时性,试验测得的数据仅为土-水特征曲线的一部分,为了得到完整的土-水特征曲线,我们根据 Fredlund-Xing 模型来拟合土-水特征曲线。Fredlund-Xing 方程^[16]为

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right) \right]^n \right\}^m} \quad (1)$$

式中： θ 为体积含水率(%)； θ_s 为饱和体积含水率(%)； s 为基质吸力(kPa)； a 、 m 、 n 为模型拟合参数。

根据 Fredlund-Xing 模型方程求得拟合参数见表2，拟合曲线见图1。由表2和图1可知，该模型方程对本次试验数据的拟合具有很高的相关性。

表2 Fredlund-Xing 方程拟合参数
Table 2 Fitting parameters of Fredlund-Xing equation

制样含水率 w^0 /%	干密度 ρ_d / (g/cm ³)	拟合参数				
		θ_s /%	a	n	m	R^2
14	1.7	36.902 6	38.252 2	2.334 3	0.232 9	0.992 9
16	1.7	36.909 4	43.369 2	2.108 2	0.255 9	0.994 0
18	1.7	37.101 8	51.141 6	1.838 1	0.301 9	0.990 9

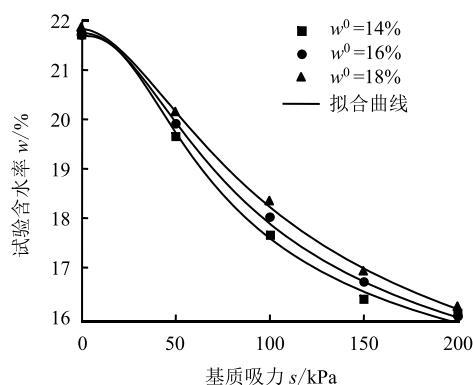


图1 Fredlund-Xing 方程拟合土-水特征曲线
Fig.1 Fitting soil water characteristic curves of Fredlund-Xing equation

从图1可以看出，制样含水率不同，试验获得土-水特征曲线明显不同。随着试验含水率的增大，基质吸力逐渐减小，随着基质吸力的增大，土-水特征曲线的斜率逐渐减小，土样的失水速率逐渐降低。制样差异导致的非饱和压实黄土的结构性对其基质吸力的影响显著。图中 $w^0 = 18\%$ 时土中的基质吸力相对较大。室内击实试验测得该土样的最优含水率为 18.2%，最大干密度为 1.69 g/cm³，制样含水率与最优含水率接近，且与土样的塑限 18.4% 也相近。在制样含水率接近于最优含水率，土样压实（击实）到最大干密度时，土样内部结构处于最优结构状态。最优结构状态下，非饱和压实黄土的基质吸力相对最大，压实过程中土颗粒间孔隙逐渐变小且分布均匀。因此，压实非饱和黄土工程中必须考虑制样含水率的影响，在最优含水率时压实可以使土样的相对基质吸力较大，强度较高，压实功耗较低。

从图2可以明显的得出，同一制样含水率条件下随着试验含水率 w 的增大，非饱和压实黄土的基质吸力 s 减小明显。当 $w^0 = 14\%$ 时， $w = 16.5\%$ 与 $w =$

19.5% 对应的 s 相差 86.5 kPa；当 $w^0 = 16\%$ 时， $w = 16.5\%$ 与 $w = 19.5\%$ 对应的 s 相差 98.1 kPa；当 $w^0 = 18\%$ 时， $w = 16.5\%$ 与 $w = 19.5\%$ 对应的 s 相差 109.6 kPa。制样含水率相差 2%，试验含水率相差仅 1.5% 时基质吸力最大相差达 63.4 kPa。同一试验含水率条件下基质吸力随着制样含水率的增大呈近似线性增大，这是因为制样含水率未超过土样的塑限（18.4%）。由表1可知，土样中粒径小于 0.005 mm 的占 30.3%，黏粒含量较高，说明非饱和压实黄土试样的结构主要以团粒聚集胶结为主，团粒间一般为稳定的镶嵌孔隙。在相同压实度条件下低制样含水率压实土样时，由于土样饱和度较低，土中的水主要以结合水的形式与土颗粒结合，土颗粒表面水膜比较薄，土样中存在较多的气体，持水能力差，相对于接近于塑限含水率时相同压实干密度条件下土样中孔隙尺寸相对较大且不均匀，因此，制样含水率较低时吸力相对较小。当制样含水率接近于塑限时与最优含水率接近，土样一般具有凝聚结构的特征，土样中孔隙尺寸相对较小且分布均匀，使土样的进气值较大，水分不容易排出，具有较好的持水能力，吸力相对较大。当制样含水率高于最优含水率时，水膜增厚，土中水逐渐转化为自由水，在含水率相对较高时，孔隙水势能与自由水势能两者差值相对较小，吸力较低，饱和时为 0。

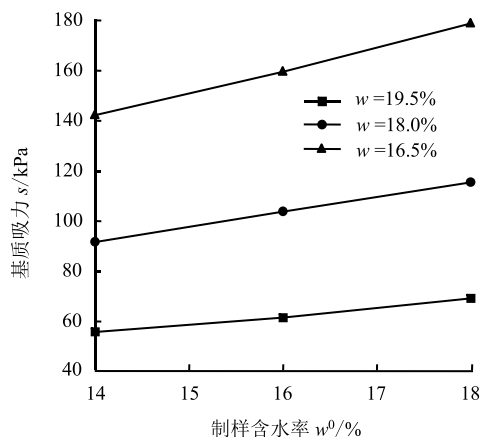


图2 制样含水率与基质吸力的关系曲线
Fig.2 Curves between molding water content and matric suction

3.2 结构性对压实黄土应力-应变特征的影响

将制样含水率 w^0 为 14%、16%、18%、20% 的土样压实到相同干密度为 1.7 g/cm³，然后增湿（减湿）到相同含水率 18%，对试样进行三轴剪切试验，得到应力-应变曲线见图3。由图可以看出：

(1) 不同制样含水率条件下试验得到的应力-

应变曲线差异性很大。制样含水率为 18% 所得到的曲线位于最上方, 其偏应力最大; 制样含水率为 20% 的应力-应变曲线与其余 3 种应力-应变曲线的差异最大, 且偏应力最小。偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 由大到小变化对应的制样含水率分别为 18%、16%、14%、20%。不同制样含水率的土样在不同围压下的应力-应变曲线均表现为塑性破坏, 除围压 $\sigma_3 = 100$ kPa, $w^0 = 18\%$ 对应的应力-应变曲线呈弱软化型外, 其余应力-应变曲线均呈弱硬化型。 $w^0 = 20\%$ 的应力-应变曲线的线性段在 $\sigma_3 = 100$ kPa 条件下不明显, 随着围压的增大, 当 $\varepsilon_a < 1.2\%$ 时偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 呈线性增大。

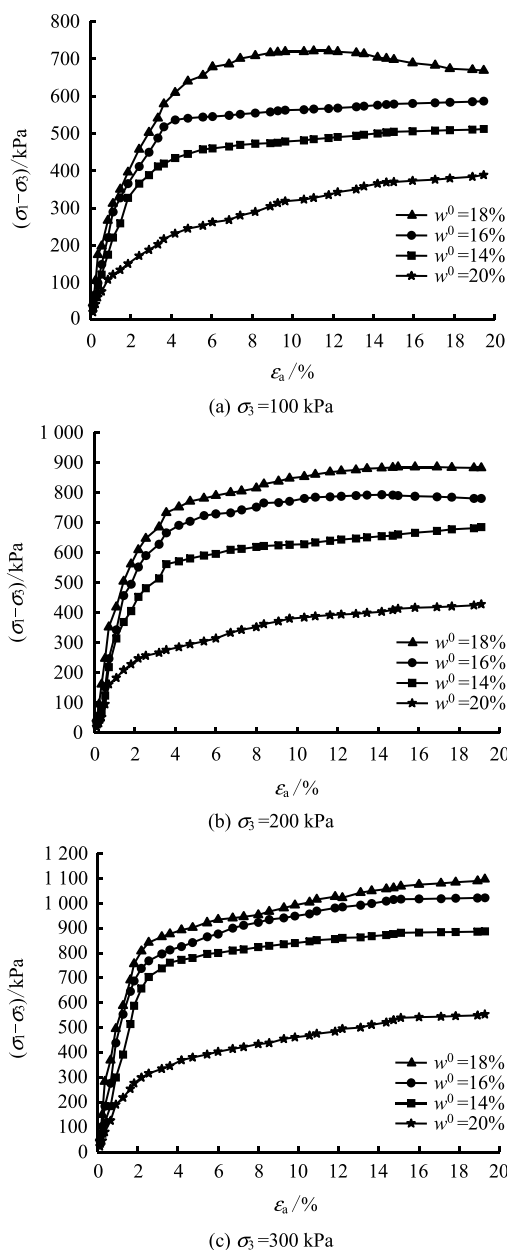


图 3 不同制样含水率非饱和压实黄土应力-应变关系曲线
Fig.3 Stress-strain curves of unsaturated compacted loess with different molding water contents

(2) $w^0 = 14\%$ 、 $w^0 = 16\%$ 、 $w^0 = 18\%$ 的应力-应变曲线在不同围压下, 轴向应变 $\varepsilon_a < 2\%$ 时均呈线性变化, 其斜率则随围压的增大而增大。 $w^0 = 14\%$ 、 $w^0 = 16\%$ 、 $w^0 = 18\%$ 的应力-应变曲线差异性随着围压的增大逐渐减小, 但与 $w^0 = 20\%$ 的应力-应变曲线差异性逐渐增大, 在 $\sigma_3 = 300$ kPa 时, $w^0 = 16\%$ 与 $w^0 = 18\%$ 的应力-应变曲线差异性最小。

(3) 理想状态下相同干密度、相同含水率的土样在相同围压条件下应力-应变曲线应趋于一致, 上述试验结果明显的差异性主要是由于土样的结构性不同造成的。压实土的结构性是土在重塑压实过程中形成的颗粒空间排列、次生联结和吸力胶结^[7]。孔隙性和联结强度是反映土的颗粒排列特征和联结特征的重要指标。将不同制样含水率的土样增湿到相同含水率 18% 过程中, 土中孔隙水逐渐增多, 由于低制样含水率 ($w^0 = 14\%$) 土样中孔隙含量高, 并且以大、中孔隙为主, 因此, 其颗粒间胶结相对较弱, 吸力相对较小, 土颗粒中黏粒表面的水膜逐渐增厚, 颗粒间引力随之减小, 三轴剪切破坏时抵抗破坏的能力较弱, 偏应力较小。随着制样含水率的增大 (但不超过最优含水率 18.2%), 在压实过程中土中的大、中孔隙的含量逐渐减少, 而微小孔隙的含量特别是稳定的镶嵌孔隙逐渐增多, 相同体积的黏粒含量增多, 颗粒表面水膜面积增大, 水膜变薄, 颗粒间引力随之增大, 以团粒为主的土颗粒排列越来越紧密, 颗粒间胶结逐渐增大, 吸力逐渐增大, 三轴剪切试验时偏应力随之增大。

(4) 当制样含水率接近于最优含水率时, 土样具有凝聚结构特征, 主要以稳定的镶嵌孔隙为主, 孔隙尺寸小且分布均匀, 基质吸力也相对较大, 土中形成的次生联结强度最大, 土颗粒排列的紧密程度达到最大, 此时土样处于最优结构状态, 土样三轴剪切试验达到破坏时的偏应力最大。

(5) 当制样含水率大于最优含水率时, 由于土颗粒表面的水化膜厚度较大, 黏粒间的引力减小, 粒间孔隙较大, 吸力较小, 在脱水过程中团粒间的孔隙逐渐增大, 结构强度大大减弱, 其应力-应变曲线的线性阶段不明显, 偏应力最小。

3.3 非饱和压实黄土三轴剪切过程中结构性参数的变化特征

用释放结构势方法, 对原状土已经建立了结构性的多种量化参数^[2-5], 对压实土也建立了一定的结构性参数^[6-7]。评价压实土压实质量的指标是压实度, 上述试验表明, 不同制样含水率的土样在增(减)湿到接近最优含水率 18%, 且压实到最大干密度

1.7 g/cm³时, 由于结构性的影响土样的应力-应变曲线表现出明显的差异性, 这说明最优含水率和最大干密度无法反映压实黄土的结构性。因此, 参照综合结构势理论^[2], 将土样以制样含水率等于最优含水率压实到最大干密度, 此时压实黄土的结构状态作为最优结构状态, 将最优结构状态时土样三轴剪切偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 与其他制样含水率压实得到相同干密度的土样在同一轴向应变 ε_a 的三轴剪切偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 进行对比, 定义能够反映压实土结构性影响的相对结构性量化参数 m_{er} , 其表达式为

$$m_{er} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_y}{(\sigma_1 - \sigma_3)_r} \quad (2)$$

式中: m_{er} 为相对结构性量化参数; $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 为最优结构状态时土样三轴剪切偏应力 (kPa); $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 为不同制样含水率条件下压实到相同干密度时三轴剪切偏应力 (kPa)。

用式(2)确定三轴剪切过程中压实黄土的相对结构性参数, 它可以综合反映结构性对压实土的影响, 在最优含水率压实到最大干密度的土, $m_{er}=1$ 。

非饱和压实黄土相对结构性参数 m_{er} 与轴向应变 ε_a 的关系曲线见图4。由图可以看出:

(1) 当 $w^0 < 18\%$ 时, 随着 w^0 的减小, $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线逐渐远离横轴, 压实土的结构性与最优结构状态的结构性差异逐渐增大, 主要表现在土颗粒间孔隙大小的差异性和吸力大小的差异性。 $w^0 = 14\%$ 时, 土中孔隙以大、中孔隙为主, 与最优结构状态时的微小孔隙差异明显, 对应的吸力差异见图2, 同体积微观颗粒中黏粒含量的差异导致黏粒间引力的差异较大, 因此, $w^0 = 14\%$ 的 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线相对于 $w^0 = 18\%$ 的 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线(图4的横轴)表现出较大的 m_{er} 值。 $w^0 = 16\%$ 时, 土中孔隙由大、中孔隙向微小孔隙过度, 与最优结构状态时的孔隙大小差异减小, 对应的吸力差异(见图2)较小, 同体积微观颗粒中黏粒含量差异减小, 黏粒间引力的差异减小。因此, $w^0 = 16\%$ 的 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线相对于 $w^0 = 14\%$ 的 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线其 m_{er} 值较小, 靠近与横轴。当 $w^0 = 18\%$ 时, $m_{er}=1$, 其 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线与横轴重合。当 $w^0 = 20\%$ 时的 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线距离横轴上方更远, 土样的结构性与最优结构状态的结构性差异更大, m_{er} 值最大, 这是由于土样脱水的过程中土中孔隙相对增大, 吸力减小所致。三轴剪切试验时土样含水率均为18%, 因此, 土颗粒间的胶结状态相近。

(2) 各制样含水率对应的 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线特征近似, 表现出明显的规律性。当 $\varepsilon_a < 1.2\%$ 时, 随着轴向应变 ε_a 的增大, m_{er} 开始逐渐增大, 达到峰值,

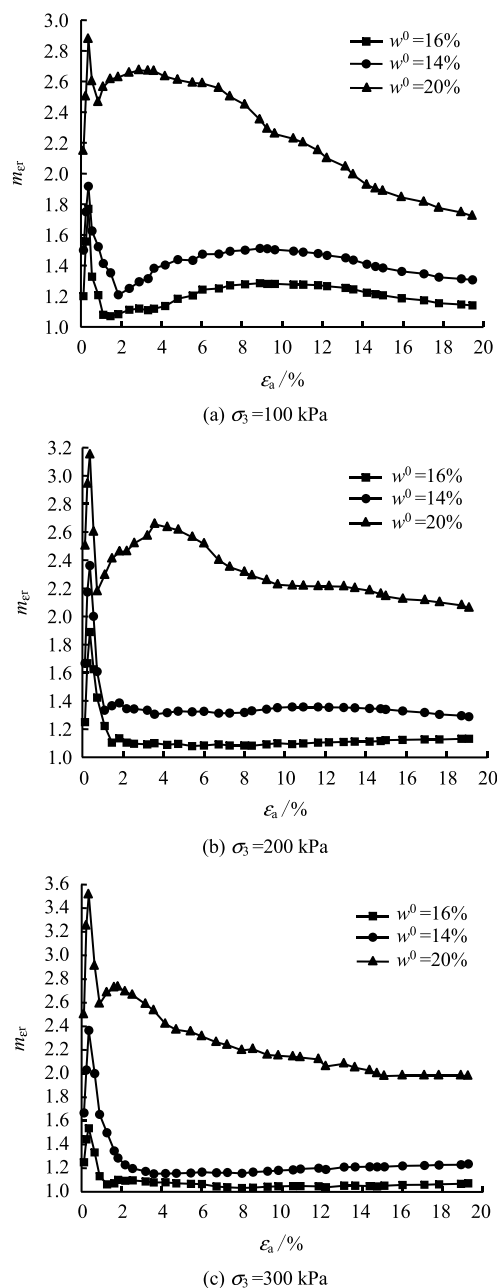


图4 不同制样含水率非饱和压实黄土结构性参数与应变关系曲线

Fig.4 Curves between structural parameters and strain of unsaturated compacted loess with different molding water contents

然后减小。当 $\varepsilon_a \approx 0.5\%$ 时, m_{er} 值最大, 对应的应力-应变关系曲线线性阶段的结构性差异达到最大, 说明此时的压实土表现出的结构性更明显。当 $\varepsilon_a = 1.2\%$ 时, 各 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线由峰值减小到相对最小值, 对应的应力-应变关系曲线线性阶段的结构性差异达到最小。当 $\varepsilon_a = 2.5\%$ 时, $w^0 = 14\%$ 、 $w^0 = 16\%$ 的 $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线为一个较小的峰值, 此时对应的应力-应变关系曲线线性阶段开始向非线性阶段过渡, 对应的 m_{er0} 为屈服结构性参数。当 $\varepsilon_a > 2\%$ 时, $m_{er} - \varepsilon_a$ 曲线趋于平缓。

(3) 围压对 $m_{er}-\varepsilon_a$ 曲线特征影响明显。 $\varepsilon_a \approx 0.5\%$ 对应的峰值 m_{er} 随着 σ_3 的增大而增大, $\sigma_3=100、200、300$ kPa 时 m_{er} 分别为 2.88、3.18、3.50。当 $\varepsilon_a > 0.5\%$ 时, m_{er} 随着 σ_3 的增大而减小, $m_{er}-\varepsilon_a$ 曲线随着 σ_3 的增大逐渐向 ε_a 轴靠近。压实黄土的结构性随着周围压力的增大而减小。

(4) $m_{er}-\varepsilon_a$ 曲线越接近 ε_a 轴, 表明其结构性越接近最优结构状态, 压实土的压实质量越高。 $m_{er}-\varepsilon_a$ 曲线能够反映不同 w^0 时应力-应变曲线线性阶段的结构性特征, 特别是从线性到非线性的过渡在 $m_{er}-\varepsilon_a$ 曲线上反映明显, 这说明结构性参数 m_{er} 能够很好地反映不同制样含水率引起的结构性变化对压实黄土应力-应变关系的影响。

3.4 制样含水率对压实黄土屈服结构性参数和破坏强度的影响

邵生俊等^[4]根据土的无侧限抗压强度定义了原状土的初始结构参数。将各制样含水率压实黄土样三轴剪切偏应力-应变关系曲线的线性向非线性过度时(开始屈服)对应的结构性参数定义为屈服结构性参数 m_{er0} , 屈服结构性参数与制样含水率的关系曲线见图 5。以偏应力-应变关系曲线的峰值点或应变 $\varepsilon_a=15\%$ 对应的偏应力作为非饱和和压实黄土的破坏强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$, 可得到破坏强度与制样含水率的关系曲线见图 6。由图 5、6 可以看出:

(1) 制样含水率 w^0 的变化对 m_{er0} 和 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 皆有明显影响, $m_{er0}-w^0$ 和 $(\sigma_1-\sigma_3)_f-w^0$ 曲线皆有一个共同的转折点, 即 w^0 为最优含水率, 此时土样处于最优结构状态, 土样的 m_{er0} 最小, 三轴剪切破坏强度最大。 $m_{er0}-w^0$ 曲线逐渐减小至 $m_{er0}=1$, 再逐渐增大; $(\sigma_1-\sigma_3)_f-w^0$ 曲线逐渐增大达到峰值再逐渐减小。

(2) $w^0 < 18\%$ 时, 屈服结构参数 m_{er0} 随着 w^0 的增大而减小, 压实的黄土样含水率越低, 即越干时, 土样的结构状态越差, m_{er0} 值越大。 $w^0 > 18\%$ 时, 屈服结构参数 m_{er0} 随着 w^0 的增大而增大, 压实的黄土样含水率越高, 即越湿时, 土样的结构状态越差, m_{er0} 值增大。 $w^0 > 18\%$ 时的曲线较陡, 其斜率明显比 $w^0 < 18\%$ 时的曲线斜率大, 说明黄土样压实越湿时, 其结构弱化越快; 反之, 当黄土样压实越干时, 其结构弱化相对缓慢。围压对屈服结构参数有一定影响, 围压越大, $w^0 < 18\%$ 的曲线斜率越小, 说明 m_{er0} 随着围压的增大而减小, 围压使压实黄土的屈服结构性增强; 而 $w^0 > 18\%$ 的曲线斜率越大, 说明 m_{er0} 随着围压的增大而增大, 围压使压实土的屈服结构性弱化。

(3) 当 $w^0 < 18\%$ 时, $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 随 w^0 的增大而逐渐增大, 即随着 w^0 减小, 其强度逐渐减小, 减小幅度比 $w^0 > 18\%$ 时的 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 减小幅度小; $w^0 > 18\%$ 时由于压实黄土样的结构状态弱化较快, 其强度减小越快。围压的增大使压实黄土三轴剪切破坏时抵抗破坏的结构强度增大, 因此, $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 随着围压的增大而增大。

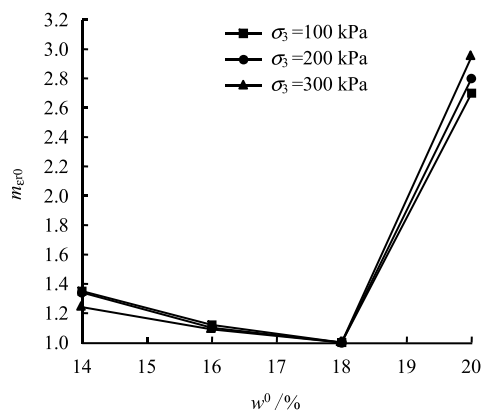


图 5 制样含水率对屈服结构性参数的影响
Fig.5 Effect of molding water content on yield structural parameters

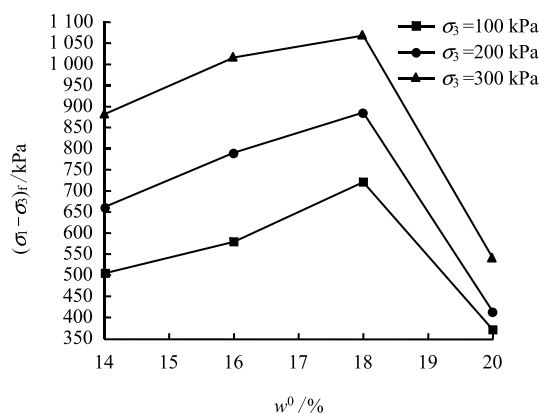


图 6 制样含水率对三轴剪切破坏强度的影响
Fig.6 Effect of molding water content on triaxial shear failure strength

4 结 论

通过对增(减)湿到相同含水率及相同干密度的不同结构性非饱和压实黄土样进行土-水特征曲线试验和三轴剪切试验, 研究结构特性对非饱和压实黄土的影响, 得出以下结论:

(1) 制样含水率引起的结构性对非饱和压实黄土的土-水特征曲线有明显的影。低吸力时, 基质吸力随制样含水率的增大而增大。在最优制样含水率时, 非饱和压实黄土具有均匀小孔隙的团粒凝聚结构, 吸力相对较大。

(2) 不同制样含水率压实黄土样在不同围压条件下的应力-应变曲线呈弱硬化型。应力-应变曲线受结构性影响差异较大, 最优结构状态的土样应力-应变曲线位于最上端, 制样含水率小于最优制样含水率时的结构弱化程度相对较低, 其应力-应变曲线逐渐下移; 制样含水率大于最优制样含水率时土样的结构弱化程度较高, 其应力-应变曲线位于最下端。

(3) 根据综合结构势理论, 以最优制样含水率压实的黄土结构状态作为最优结构状态, 定义相对结构性量化参数 m_{er} , 试验结果表明, 该参数能够合理反映压实黄土的结构性, 弥补了压实土工程中用最优含水率和最大干密度指标无法反映土结构性影响的不足。

(4) 将各制样含水率压实黄土样开始屈服时对应的结构性参数作为屈服结构性参数 $m_{\text{er}0}$, $m_{\text{er}0}-w^0$ 曲线能够合理反映出不同制样含水率压实黄土的结构弱化程度, 结构弱化程度还反映在三轴剪切破坏强度上。

(5) 不同制样含水率条件下压实得到相同干密度的黄土, 在降水等自然因素影响下达到同一含水率, 其结构性非常显著, 严重影响压实土工程质量。因此, 在实际工程中应对压实处理一段时间后的土层取样进行三轴剪切试验, 将得出的偏应力与室内击实试验确定最大干密度试样的三轴剪切试验得出的偏应力进行对比, 得出 m_{er} , 以 m_{er} 是否接近于 1 来评价压实黄土的工程质量。

参考文献

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. The mathematical model for the structured soils—the key problem of soil mechanics in the 21st century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [2] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性参数及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651—656.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [3] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531—536.
SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 531—536.
- [4] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15—19.
SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 15—19.
- [5] 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.
CHEN Cun-li, HU Zai-qiang, GAO Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1891—1896.
- [6] 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.
CHEN Cun-li, JIANG Xue, YANG Jiong, et al. The influence of structure on the confined compression characteristics of compacted loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1939—1944.
- [7] 陈存礼, 蒋雪, 杨炯, 等. 结构性对压实黄土无侧限压缩特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2539—2545.
CHEN Cun-li, JIANG Xue, YANG Jiong, et al. The influence of structure on unconfined compression characteristics of compacted loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2539—2545.
- [8] SEED H B, CHAN C K. Structure and strength characteristics of compacted clays[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 1959, 85(5): 87—128.
- [9] BARDEN L, SIDES G R. Engineering behaviour and structure of compacted clay[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 1970, 96(4): 1171—1201.
- [10] GENS A. Constitutive modeling: application to compacted soils[C]//Proceedings of the 1st International Conference of Unsaturated Soils. Paris:[s. n.], 1995: 1179—1200.
- [11] SIVAKUMAR V, WHEELER S J. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 1: wetting and isotropic compression[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(4): 359—368.
- [12] SIVAKUMAR V, TAN W C, MURRAY E J, et al. Wetting, drying and compression characteristics of compacted clay[J]. **Geotechnique**, 2006, 56(1): 57—62.