

延安新区黄土结构性参数对无侧限抗压强度的影响规律

王博¹, 黄睿², 黄雪峰^{1,3,4}, 邱明明⁵, 王寒¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100101;
3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 4. 陆军勤务学院 军事设施工程系, 重庆 401311;
5. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 为研究高填方黄土的结构性在无侧限压缩状态下对其强度与变形特性的影响,以延安新区某高填方场地黄土为研究对象,开展不同试验条件下原状黄土与重塑黄土无侧限抗压强度试验,研究含水率与压实度对黄土结构性的变化规律及其力学特性的影响,并构建原状黄土和重塑黄土的初始结构参数与抗压强度关系的数学模型。结果表明:随着土样含水率的增大或压实度的减小,土体的应力-应变关系曲线由“陡峭”向“平缓”特征过渡,应力峰值减小且后移,结构性参数-应变关系曲线的峰值减小且前移;塑性指标可以作为影响初始结构性参数变化的临界值指标,含水率小于塑限值时,小应变会导致黄土结构性增强,反之则减弱;随着含水率的增大,初始结构性参数呈非线性减小,抗压强度呈线性减小;原状黄土结构性参数-应变关系曲线比相应的重塑黄土曲线分布“陡峭”,含水率增大对原状黄土初始结构性的削弱程度明显大于重塑黄土;初始结构性参数与抗压强度具有非线性关系,可较为精确地表征出原状黄土和重塑黄土基于抗压强度、饱和黄土抗压强度及初始结构性参数的双曲线函数模型。

关键词: 结构性参数; 无侧限抗压强度试验; 初始结构性参数; 非线性模型; 延安新区黄土

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0202-07

Influence of loess structural parameters on unconfined compressive strength in Yan'an New Area

WANG Bo¹, HUANG Rui², HUANG Xuefeng^{1,3,4}, QIU Mingming⁵, WANG Han¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. China Aviation Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Department of Military Installations Engineering, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China; 5. College of Architectural and Civil Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: In order to study the influence of the structure of high fill loess on its strength and deformation characteristics under unconfined compression, taking the loess of a high fill site in Yan'an New Area as the research object, we carried out a series of unconfined compressive strength tests of undisturbed loess and remolded loess under different test conditions. We investigated the influence of water content and compactness on the change law and mechanical properties of the loess structure, and then established a mathematical model that can reflect the interplay between the initial structural parameters and compressive strength of undisturbed loess and remodeled loess. The findings show that with the increase of water content or the decrease of compactness, the stress-strain curve of the loess changes from “steep” to “stable”, the peak characteristic strength decreases and moves back towards the end of the curve; however, the peak point of structural parameter strain curve decreases and moves forward. The plasticity index can be used as a critical value indicator that affects the initial structural parameter change, when the water content is less than the value of plastic limit, a small strain can lead to structural enhancement and vice versa. With the increase of water content, the initial structural parameter decreases non-linearly but the

收稿日期: 2021-12-03; 修回日期: 2022-03-13

作者简介: 王博(1998-),男,陕西蒲城人,硕士研究生,主要从事黄土力学与工程方面的研究。

通讯作者: 黄雪峰(1960-),男,甘肃兰州人,博士,教授,博士生导师,主要从事湿陷性地基处理、桩基工程等方面的研究。

compressive strength decreases linearly. The distribution of structural parameter strain curve of the undisturbed loess is more “steep” than that of the remolded loess, and the initial structural weakening capacity of the undisturbed loess is significantly greater than that of the remolded loess with increased humidity. There is a good non-linear relationship between initial structural parameters and compressive strength of the undisturbed loess and remolded loess, which can be characterized by a hyperbolic function model based on compressive strength, saturated loess compressive strength and initial structural parameters.

Key words: structural parameter; unconfined compressive strength test; initial structural parameter; non-linear model; loess of Yan'an New Area

1 研究背景

黄土是在干旱与半干旱气候条件下风积或水搬运沉积而形成的,具有低密度、低湿度的大孔隙骨架结构特征,黄土塬区存在较多的土柱、直立土壁边坡和土桥等特殊地貌,这与天然黄土较强的结构性紧密相关。由于城市发展的需要,延安、吕梁、兰州等市的黄土区开展了大规模的高填方工程^[1-3],导致大量的原状结构性黄土被破坏重塑成为填方区的填料,而填土材料压实度与含水率的差异造成填土边坡上黄土力学特性的复杂性。因此,探究边坡区下覆原状结构性黄土与上覆重塑填土在不同压实度 K 和含水率 w 下黄土的力学特性规律,成为目前高填方工程上亟需解决的重要课题。

近年来,在高填方工程实践方面已取得了大量的工程经验,曹杰等^[4]在黄土高填方工程中充分考虑“三面两体一水”等控制因素,通过地基处理、土方填筑、边坡、排水等进行了高填方的工程设计;高建中等^[5]采用强夯置换法对延安市高填方工程中沟壑区的淤泥进行了处理,检测结果满足设计要求并起到加固效果;郑建国等^[6]通过离心试验模拟了高填方地基沉降变形,系统研究了高填方沉降的影响因素;段旭等^[7]对某填方区工后地下水与填方黄土含水率的变化进行了持续监测,发现填筑黄土含水率随土层深度而递增;葛苗苗等^[8]对高填方压实黄土开展了固结蠕变试验,构建了黄土时效变形模型并能较好地预测高填方工后的沉降规律;吴红刚等^[9]结合诸多高填方机场边坡实践资料对变形机理和控制技术进行了深入研究,为高填方边坡的设计与施工提供了相应的参考。在黄土结构性的理论研究与应用方面也取得了较好的成果,邵生俊等^[10-11]提出了湿、剪变形等结构临界状态的概念,考虑结构性参数变化,构建了结构性屈服方程,并基于黄土的沉积年代和力学指标表征出土的构度函数模型;张玉等^[12]对原状 Q_3 黄土进行了轴对称三轴试验和平面应变试验,分析了黄土在两种应力路径

强度的变化特征;陈存礼等^[13]研究了制样含水率对结构性压实黄土在试验含水率下无侧限压缩变形特性的影响,拟合的初始结构性参数与强度有较好的归一化关系;郑方等^[14]通过研究在真三轴仪下重塑黄土的剪切特性,分析了基质吸力与 b 值对土体应力应变的影响;宋陈雨等^[15]对相同干密度的原状黄土与重塑黄土的土水特征曲线进行了试验研究,基于微观结构探讨了两者的土水特征曲线的影响;郝延周等^[16]通过研究干湿循环下压实黄土的结构性本构关系,建立了在三轴剪切下黄土的本构关系模型;陶虎等^[17]将构度指标引入弦线模量表中,采用三层法计算了结构性黄土的沉降变形,预测结果与实际变形具有较好的一致性,提供了地基沉降变形理论新方法。在现有的研究成果中,针对高填方工程已积累了一些有益的成果,但压实度、增减湿、基质吸力与粒度等因素对填方黄土的结构性和力学特性有较大的影响,而填筑黄土边坡的结构性研究课题目前鲜有报道。

黄土的特殊骨架结构影响着其力学特性,研究黄土填筑体在不同条件下(压实度 K 与含水率 w)的力学特性是解决高填方边坡设计与施工的重要基础。因此,本文采用无侧限抗压强度试验,研究结构性黄土物理指标变化对无侧限压缩特性的影响,揭示抗压强度值与结构性参数之间的内在规律,构建原状黄土和重塑黄土结构性参数模型,以期高填方工程中边坡的施工与设计提供参考。

2 试验方案设计

2.1 试验土样

本次试验用土取自延安新区某场地,土质年代为 Q_3 ,呈浅黄色,初始含水率 $w_0 = 13.8\% \sim 15.3\%$ 。依据土工试验规范试验得出本次取样黄土的物理参数指标见表1。基于标准夯击试验测得最优含水率 $w_{op} = 15.3\%$,最大干密度 $\rho_{d\max} = 1.752 \text{ g/cm}^3$ 。对原状黄土的制备先检验其结构是否受到

扰动,将未受扰动的原状黄土采用滴定法或风干法进行目标含水率的制备;重塑土样的制备需进行风干、过筛(2 mm 土筛)、增湿等步骤,配制的试验土样需密封静置至少 72 h,使水分充分扩散均匀。采用制样器分 5 层制备直径为 39.1 mm 和高度为 80 mm 的土柱进行无侧限抗压强度试验。

表 1 试验黄土土样的物理参数指标

塑限 $w_p / \%$	液限 $w_L / \%$	最优含水 率 $w_{op} / \%$	最大干密度 $\rho_{d \max} / (g \cdot cm^{-3})$	相对 密度
18.4	33.1	15.3	1.752	2.71

2.2 试验方案

将试验仪器 SY30-2 型三轴仪改进为应变型无侧限压缩仪,剪切速率为 0.16 mm/s。制备压实度 K 分别为原状($\rho_d = 1.353 g/cm^3$)、80%($\rho_d = 1.401 g/cm^3$)、85%($\rho_d = 1.489 g/cm^3$)、90%($\rho_d = 1.577 g/cm^3$)的黄土试样,每组压实度再制备 6 组含水率 w 分别为 10.3%、13.3%、15.3%、17.3%、20.3% 和饱和状态的试样,饱和土样的初始含水率(10.3%、13.3%、15.3%、17.3%、20.3%)分别对应不同干密度下的土样(记为组 A)。每组需至少制备 3 个土样,通过无侧限压缩试验研究不同压实度与含水率的黄土在无侧限状态下的结构性压缩特性,具体的试验方案见表 2。

表 2 无侧限压缩的试验方案

土样	干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	压实度 $K / \%$	含水率 $w / \%$
原状黄土	1.353		组 A
	1.353	76	组 A
重塑黄土	1.401	80	组 A
	1.489	85	组 A
	1.577	90	组 A

3 试验结果与分析

3.1 物理性质对黄土应力-应变关系曲线的影响

当土样的 ρ_d 相同时,原状黄土与重塑黄土在不同含水率 w 条件下的应力-应变($\sigma - \varepsilon$)关系曲线见图 1,由图 1 可见,黄土 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线表现为软化型,土样承受的轴向压力经历了“上升、平缓、下降”3 个阶段,随着 w 的增大,应力上升阶段和下降阶段的速率减小缓慢,平稳阶段的应变范围增大,曲线峰值强度减小且后移,表明含水率的增大溶解了

结构性黄土颗粒间的胶结物质与晶盐,使土样承受轴向压力的能力减小,导致土样在剪切破坏过程中的可变性提高,反映出含水率与土样承受轴向压力的能力呈负相关,与土样的压缩变形呈正相关。当 ρ_d 一定时,原状黄土在应力上升阶段的速率比重塑黄土快、平稳阶段的应变范围减小、峰值强度增大且提前,反映出在 w, ρ_d 一定时,由于重塑黄土破坏了原状黄土颗粒间的固化联结键,导致土样的抗剪能力削弱,承压过程中重塑黄土颗粒变形程度与平稳阶段的应变范围比原状黄土大。

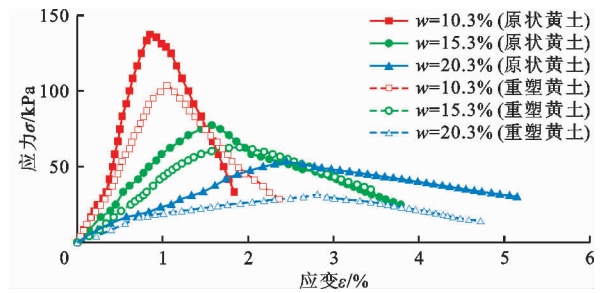


图 1 相同干密度条件下不同含水率的原状与重塑黄土 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线

当土样的 w 分别为 10.3%、15.3% 时,重塑黄土在不同压实度 K 条件下的 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线见图 2。由图 2 可知,黄土的 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线均为软化型,随着重塑黄土 K 的增大,曲线上升阶段的速率逐渐加快,平稳阶段的应变范围减小,峰值强度点所对应的变形增大,下降阶段的速率也呈增大趋势。反映出随着土颗粒的密实,颗粒间的孔隙减小,导致颗粒间的摩擦力承受的抗剪强度增大,抗压强度值的变化速率随之增大,下降段也越快。

不同初始含水率的饱和原状土样及重塑土样的 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线见图 3。由图 3 可见,黄土的 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线为弱软化型,土样 K 的增大致使峰值强度增大且后移,其中原状饱和黄土的峰值强度集中在 8.2 ~ 8.6 kPa,不同压实度的重塑饱和黄土的峰值强度分别集中在 8.0 ~ 8.4 kPa($K = 76\%$)、10.4 ~ 11.2 kPa($K = 80\%$)、16.8 ~ 17.0 kPa($K = 90\%$)。表明在饱和土样中,含水率的饱和彻底溶解了结构性黄土颗粒间的胶结物质成分,颗粒间的黏聚力与吸力丧失,从而使饱和土样在无侧限抗压状况下的 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线受初始含水率的影响较小,不同初始含水率的 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线基本趋于归一化。

3.2 无侧限单轴抗压过程中黄土结构性参数的变化特性

采用谢定义等^[18]提出的释放结构势的思想,通

过扰动、加荷与浸水的方式获取原状黄土的结构性参数,构建原状黄土定量参数;对于重塑土而言,采用陈存礼等^[13]计算压实土的方法来计算重塑黄土的结构性参数。由于重塑黄土已破坏了原状土样稳定的结构骨架,颗粒间重新排列胶结构成了新的构架结构,因此重塑黄土的结构性参数可在原状黄土计算结构性参数的基础上进行计算,无需考虑土颗粒扰动对原始结构稳性的影响,则原状黄土和重塑黄土的结构性参数计算公式如下:

$$\begin{cases} m_{\varepsilon} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{\sigma_0/\sigma_s}{\sigma_r/\sigma_0} \\ m_{\varepsilon 0} = \frac{\sigma_r}{\sigma_{rs}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_{ε} 为原状黄土的结构性参数; σ_0 、 σ_s 、 σ_r 分别为原状黄土、原状饱和黄土、重塑黄土的单轴抗压强度,kPa; $m_{\varepsilon 0}$ 为重塑黄土的结构性参数; σ_{rs} 为重塑饱和黄土的单轴抗压强度,kPa。由式(1)可知,重塑饱和黄土的结构性参数为 $m_{\varepsilon 0} = 1$ 。

结构性参数在单轴抗压过程中的变化能够定量反映出黄土结构性的强弱,因此可根据公式(1)建立不同 w 、 K 条件下结构性黄土的 $m_{\varepsilon} - \varepsilon$ 与 $m_{\varepsilon 0} - \varepsilon$ 关系曲线,结果见图4。

(1)由图4(a)、4(b)、4(c)可知, $m_{\varepsilon} - \varepsilon$ 与 $m_{\varepsilon 0} - \varepsilon$ 关系曲线均随着 w 的减小而上移,结构性参数 m_{ε} 与 $m_{\varepsilon 0}$ 的最大值所对应的应变 ε 随着 w 的减小而后移, m_{ε} 与 $m_{\varepsilon 0}$ 在增大过程中的速率随着 w 的减小而增大。表明 K 一定时,土样中 w 的减小使结构性黄土颗粒间的胶结

强度增大、骨架结构的黏聚力加强,减小了结构性黄土在未受力之前的结构损伤,因而土样在抗压过程中承受的剪切应力所对应的应变增大。 m_{ε} 与 $m_{\varepsilon 0}$ 达到峰值点所对应的应力变化由黏聚力提供,即当结构性参数达到峰值后, m_{ε} 与 $m_{\varepsilon 0}$ 的变化速率随着 w 的减小而加快,造成的结构破坏能力愈强。

(2)由图4(d)、4(e)可知,当土样含水率 $w < w_p = 18.4\%$ 时, $m_{\varepsilon} - \varepsilon$ 与 $m_{\varepsilon 0} - \varepsilon$ 关系曲线皆为“先上升后下降”型曲线,表明 w 较小时土样有一定的结构性,在荷载作用下,随着 ε 的增大,土体的压缩伴随结构性参数的增大而增大。 w 愈小, m_{ε} 、 $m_{\varepsilon 0}$ 增大速率愈快,当 m_{ε} 、 $m_{\varepsilon 0}$ 达到峰值时, m_{ε} 、 $m_{\varepsilon 0}$ 随着 ε 的继续增大而迅速减小, m_{ε} 、 $m_{\varepsilon 0}$ 越大,其减小速率越快。在相同 ε 下, m_{ε} 明显大于 $m_{\varepsilon 0}$,且 $m_{\varepsilon 0} - \varepsilon$ 曲线随重塑黄土 K 的增大而上移, $m_{\varepsilon 0}$ 峰值点也随 K 的增大而后移,反映出天然沉积的原状黄土比重塑黄土的骨架结构更稳定,能承受较大的剪切应力,而重塑黄土土颗粒间的凝聚力随着 K 的增大而增大,达到 $m_{\varepsilon 0}$ 峰值点所对应的 ε 也随之增大,因此,压实度越高的重塑黄土其结构性越强。

(3)由图4(f)可知,当土样含水率 $w > w_p = 18.4\%$ 时, $m_{\varepsilon} - \varepsilon$ 与 $m_{\varepsilon 0} - \varepsilon$ 关系曲线皆为“下降”型曲线,表明较大的 w 削弱了土样自身的结构性,并且其结构性不会因承受小应力作用而增强,随着应变 ε 的增大, m_{ε} 、 $m_{\varepsilon 0}$ 明显下降。在重塑黄土中, K 的增大使 $m_{\varepsilon 0}$ 的减小速率增大,土样的结构损伤在应力作用下发展越为缓慢,造成 $m_{\varepsilon 0}$ 的减小速率降低。

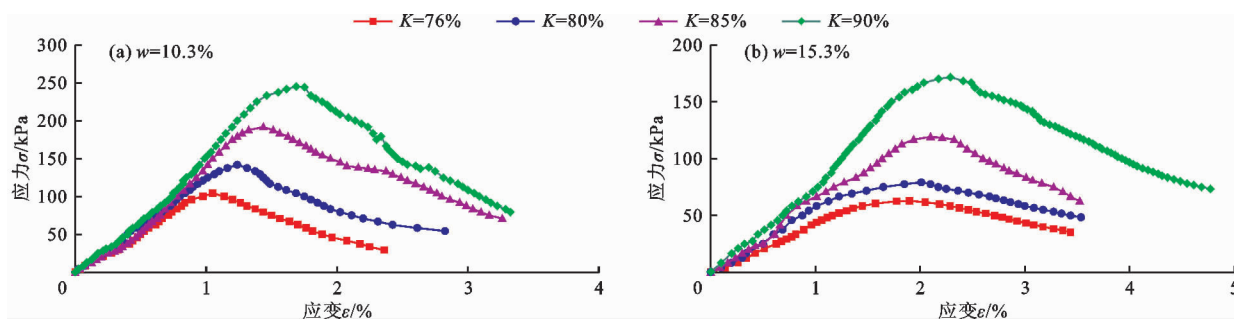


图2 两种含水率条件下不同压实度的重塑黄土 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线

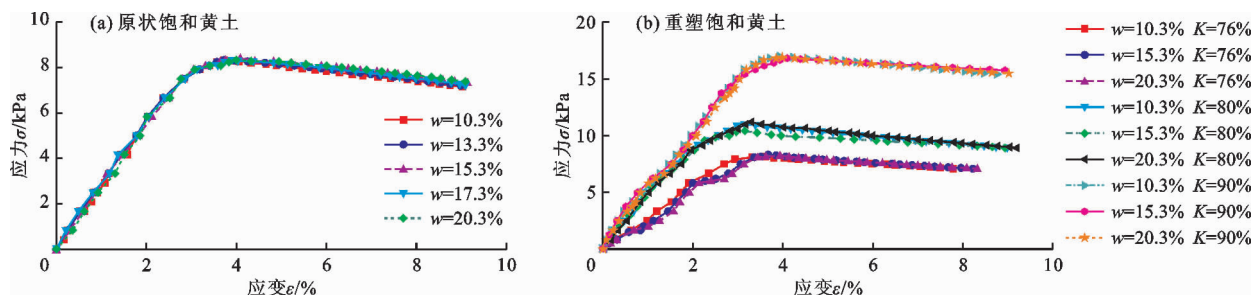


图3 不同初始含水率条件下原状与重塑饱和黄土的 $\sigma - \varepsilon$ 关系曲线

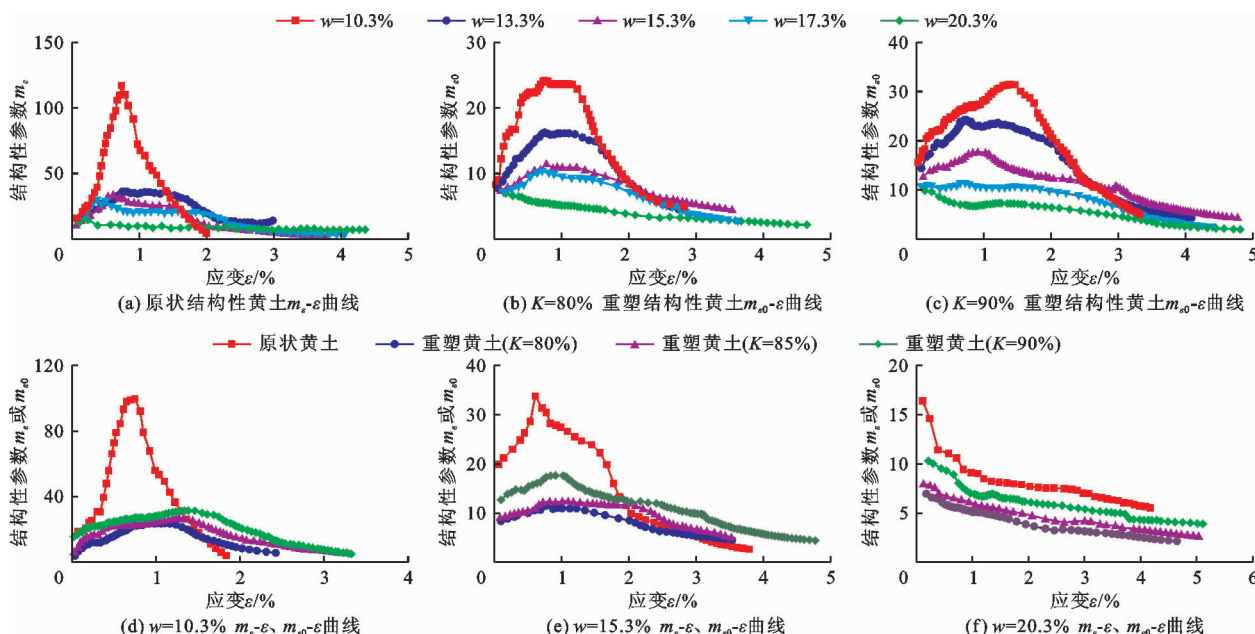


图4 不同 w 、 K 条件下原状与重塑结构性黄土的 $m_e - \varepsilon$ 或 $m_{e0} - \varepsilon$ 关系曲线

上述结果反映出黄土的塑限指标可以影响黄土的初始骨架状态,通过对比土体中的含水率与塑限指标的大小,可以判断黄土骨架结构在承受小变形时自身结构性是否加强。当土样的含水率小于塑性指标时($w < w_p$),土体承受小应变(受荷)会使自身的结构性加强,即黄土的初始结构性参数增大,且含水率愈小,初始结构性愈强;当土样的含水率大于塑性指标时($w > w_p$),土颗粒间的胶结作用对土体自身的约束减弱,自身结构产生损伤,在荷载作用下土体的结构性参数会直接减小。

3.3 黄土的物理指标与初始结构性参数的关系

在无侧限抗压条件下,对于 $w < w_p$ 的结构性黄土, m_e 、 m_{e0} 的变化过程为“先上升后下降”型曲线(图4(d)、4(e)),可采用 m_e 、 m_{e0} 的峰值点分别作为原状和重塑结构性黄土损伤前的初始结构性参数 m'_e 、 m'_{e0} ;对于 $w > w_p$ 的结构性黄土, m_e 、 m_{e0} 的变化过程为“下降”型曲线(图4(f)),其初始结构性参数可基于陈存礼等^[13]得出的压实黄土的“下降”型曲线来获取原状黄土与重塑黄土的初始结构性参数,即以 m'_e 、 m'_{e0} 表示。

根据图4建立结构性黄土的 w 与初始结构性参数(m'_e 、 m'_{e0})的关系曲线,如图5所示。由图5可以看出,当土样 K 一定时, m'_e 、 m'_{e0} 随着 w 的增大而呈非线性减小,相同 w 下的原状黄土的 $m'_e - w$ 曲线高于重塑黄土的 $m'_{e0} - w$ 曲线,且 m'_e 的减小速率明显

大于 m'_{e0} 的减小速率;在重塑黄土中, $m'_{e0} - w$ 曲线随着 K 的增大而上移,而 K 值一定时, m'_{e0} 的减小速率随着 w 的增大而变缓。表明结构性黄土的 m'_e 、 m'_{e0} 受土样增减湿的影响较大,土颗粒间的连接强度因受水而丧失,致使在应力作用下结构的稳定性破坏提前;天然沉积的原状黄土比重塑黄土的颗粒骨架发育稳定,形成的天然黄土大孔隙构架结构具有较强的初始结构性;重塑黄土土颗粒间的孔隙大小影响其结构连接强度,即重塑黄土的 K 愈大,则其 m'_{e0} 愈大。

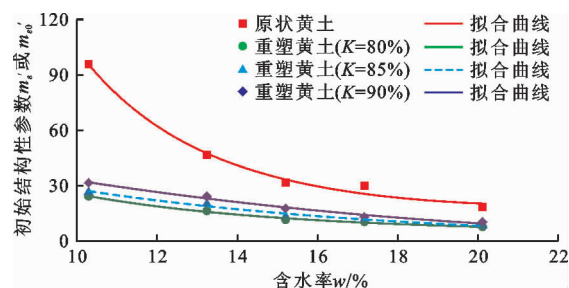


图5 原状、重塑结构性黄土的 $m'_e - w$ 、 $m'_{e0} - w$ 关系曲线

黄土的强度指标是工程设计的重要参考依据,湿度、密度和结构特性等因素影响着黄土的强度^[19]。无侧限压缩状态下 w 和 K 与抗压强度 q_u 的关系曲线见图6。由图6可见,当 K 一定时,抗压强度 q_u 随 w 的增大而呈线性减小,当 w 一定时, q_u 随 K 的增大而增大;在相同 w 下,重塑黄土的 q_u 随 K 的增大而增大; w 愈小,不同 K 值重塑黄土的 q_u 相差愈大。反映出土样的湿度加速了其结构骨架的损伤,从而在抵抗压缩时所

承受的荷载减小,而低湿度、低孔隙重塑黄土的颗粒间黏聚力增大,抵抗压缩变形所需的应力也会提高,即低湿度重塑黄土的 K 愈大,则 q_u 愈大。

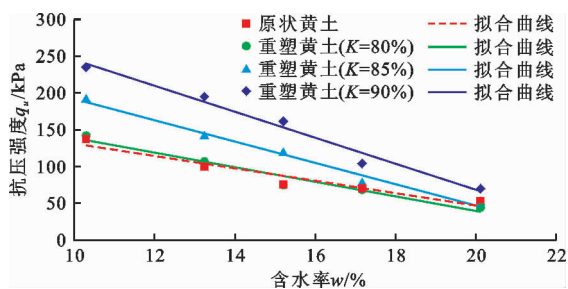


图 6 原状、重塑结构性黄土的 $q_u - w$ 关系曲线

黄土的物理性质(土质年代、湿度、粒度、吸力、密度等)影响着其结构的复杂性^[20],不同的物理性质造成了黄土抗压强度的差异性,从而对高填方黄土施工与设计中的抗压强度的取值带来困难。由图 5、6 可转换为黄土的抗压强度 q_u 与其初始结构性参数(m'_e 、 m'_{e0})的关系曲线,拟合过程可根据非饱和和重塑黄土压缩曲线的双曲线模型^[21]进行表征,得到的 $q_u - m'_e$ 、 $q_u - m'_{e0}$ 关系曲线见图 7。

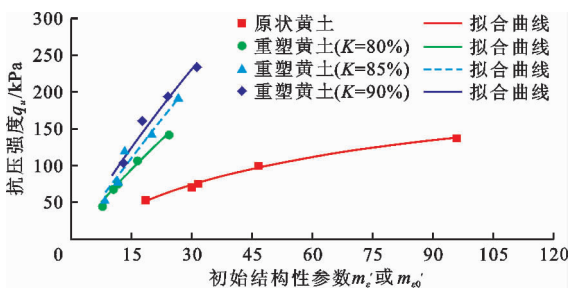


图 7 原状、重塑结构性黄土的 $q_u - m'_e$ 、 $q_u - m'_{e0}$ 曲线

由图 7 可以看出,在同一初始结构性参数 m'_e 或 m'_{e0} 下,原状黄土 $q_u - m'_e$ 关系曲线低于重塑黄土 $q_u - m'_{e0}$ 关系曲线, q_u 随 m'_e 、 m'_{e0} 的增大呈非线性增大,且重塑黄土 q_u 的增大速率明显大于原状黄土;重塑黄土 $q_u - m'_{e0}$ 关系曲线随 K 的增大逐渐上移。在原状与重塑黄土中,抗压强度 q_u 为初始结构性参数 m'_e 或 m'_{e0} 的单值函数,表明初始结构性参数 m'_e 或 m'_{e0} 可以反映出含水率与压实度的变化对黄土强度参数的影响。

对图 7 中结构性黄土的 $q_u - m'_e$ 及 $q_u - m'_{e0}$ 函数关系进行非线性拟合,其表达式为:

$$\begin{cases} q_u = q_{ur} + \frac{m'_e - 1}{a + b(m'_e - 1)} \\ q_u = q_{ur} + \frac{m'_{e0} - 1}{c + d(m'_{e0} - 1)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为结构性黄土的试验参数; m'_e 和 m'_{e0} 分别为原状黄土和重塑黄土的结构性参数; q_u 和 q_{ur} 分别为无侧限状态下结构性黄土和饱和黄土的抗压强度, kPa。

公式(2)适用于 $m'_e > 1$ 、 $m'_{e0} > 1$ 的结构性黄土,且 $a > 0$ 、 $b > 0$ 。由于原状和重塑饱和黄土的 q_{ur} 随初始含水率的变化趋于归一化(图 3),因而 q_{ur} 值取各峰值点的平均值,即 8.4 kPa(原状黄土)、10.8 kPa(重塑黄土, $K = 80\%$)、12.4 kPa(重塑黄土, $K = 85\%$)、16.9 kPa(重塑黄土, $K = 90\%$)。公式(2)的各试验参数取值及拟合优度见表 3。

表 3 结构性黄土 $q_u - m'_e$ 、 $q_u - m'_{e0}$ 关系
非线性拟合参数取值及拟合优度

参数	原状黄土	重塑黄土		
		$K = 80\%$	$K = 85\%$	$K = 90\%$
a 或 c	0.3224	0.1620	0.1479	0.1287
b 或 d	0.0043	0.0006	0.0004	0.0003
R^2	0.993	0.987	0.954	0.966

由表 3 可知,上述表征结构性黄土初始结构性参数与抗压强度的函数模型的拟合优度均大于 0.95,拟合结果与试验数据吻合度较高;重塑黄土随着 K 的增大,其参数 a 、 b 逐渐减小,即初始结构性的增大使得所需的抗压强度提高。

4 结 论

(1) 当黄土土样压实度 K 一定时,其应力 - 应变曲线分布随着含水率 w 的增大而“平缓”,应力峰值强度减小且后移;原状黄土应力 - 应变曲线比相应的重塑黄土曲线分布“陡峭”且上移,峰值强度增强且提前;重塑黄土的应力 - 应变曲线随 K 的增大而上移,峰值强度点所对应的应变增大;相同 K 值的不同初始含水率的饱和土样应力 - 应变曲线趋于归一化。

(2) 黄土土样 K 相同时,随着 w 的减小,其结构性参数 - 应变曲线上移,同时结构性参数峰值增大且后移;塑限可以作为影响土样结构性参数 - 应变曲线的临界值,当 $w < w_p$ 时,含水率 w 愈小,则结构性参数随应变增长愈快,达到峰值后下降也愈迅速,当 $w > w_p$ 时,结构性参数 - 应变曲线呈“下降”型,随着应变的增大,原状黄土结构性参数减小速率比重塑黄土更快,重塑黄土 K 值的增大也会使其结构性参数的减小速率加快。

(3) 原状黄土的初始结构性参数远大于重塑黄土的相应参数,含水率增大对原状黄土初始结构性削弱的影响程度明显大于重塑黄土;原状黄土和重塑黄土的抗压强度 q_u 随含水率 w 呈线性变化。

(4) 黄土的抗压强度 q_u 与初始结构性参数 m'_e 、 m'_{e0} 间呈非线性关系,根据非饱和黄土的双曲线模型可较为准确地表征出抗压强度与初始结构性参数间的函数模型。由于试验样本的局限性,后续将开展模型的验证与工程的适用性研究。

参考文献:

- [1] 张沛然,黄雪峰,扈胜霞,等. 非饱和填土侧限压缩变形特性试验研究及应用初探[J]. 岩土力学,2018,39(2): 437-444.
- [2] 朱才辉,李 宁,袁继国. 黄土冲沟中高填方土压力量测及分布规律探讨[J]. 岩土力学,2015,36(3):827-836.
- [3] 杨校辉,朱彦鹏,周 勇,等. 山区机场高填方边坡滑移过程时空监测与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3977-3990.
- [4] 曹 杰,张继文,郑建国,等. 黄土地区平山造地岩土工程设计方法浅析[J]. 岩土工程学报,2019,41(S1):109-112.
- [5] 高建中,黄 玮,梁永辉,等. 强夯置换法在高填方工程淤积土处理中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(S1):329-334.
- [6] 郑建国,曹 杰,张继文,等. 基于离心模型试验的黄土高填方沉降影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(3):560-571.
- [7] 段 旭,董 琪,门玉明,等. 黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(9): 1753-1758.
- [8] 葛苗苗,李 宁,郑建国,等. 考虑黄土时效变形特性的高填方工后沉降预测[J]. 土木工程学报,2015,48(S2): 262-267.
- [9] 吴红刚,冯文强,艾 挥,等. 山区机场高填方边坡工程实践与研究[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(2):385-400.
- [10] 邵生俊,陶 虎,许 萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学,2011,32(S2):42-50.
- [11] 邵生俊,王丽琴,邵 帅,等. 黄土的结构屈服及湿陷变形的分析[J]. 岩土工程学报,2017,39(8):1357-1365.
- [12] 张 玉,邵生俊,陈 菲,等. 不同应力路径条件下原状 Q_3 黄土的强度特性及破坏方式试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(S2):99-106.
- [13] 陈存礼,蒋 雪,苏铁志,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.
- [14] 郑 方,邵生俊,王松鹤. 复杂应力条件下冻融作用对黄土强度的影响[J]. 岩土工程学报,2021,43(S1):224-228.
- [15] 宋陈雨,霍继伟,高宇甲,等. 三门峡黄土结构性对土水特征曲线的影响[J]. 中外公路,2020,40(5):245-248.
- [16] 郝延周,王铁行,程 磊,等. 考虑干湿循环影响的压实黄土结构性本构关系[J]. 岩土力学,2021,42(11): 2977-2986.
- [17] 陶 虎,邵生俊,王正泓,等. 结构性参数在黄土地基沉降计算中的应用研究[J]. 地震工程学报,2020,42(6):1604-1608+1631.
- [18] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报,1999,21(6):651-656.
- [19] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [20] 王丽琴,邵生俊,王 帅,等. 原状黄土的压缩曲线特性[J]. 岩土力学,2019,40(3):1076-1084+1139.
- [21] 高登辉,陈正汉,郭 楠,等. 干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(3):736-744.