

非饱和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究

王 硕, 刘占辉

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:通过直剪试验研究了非饱和重塑黄土在不同含水量、干密度与加荷等级情况下的粘聚力与内摩擦角变化,以确定含水量、干密度与加荷等级分别对非饱和重塑黄土抗剪强度的影响。从黄土矿物成分的微观角度分析了含水量与干密度对黄土抗剪强度造成影响的原因。受颗粒之间的相互作用与粒间水的张力作用,非饱和重塑黄土的粘聚力随干密度的增大而增大,呈指数变化;非饱和重塑黄土的内摩擦角随干密度的增大而少量增大,近似呈线性变化。

关键词:非饱和重塑黄土;含水量;干密度;加荷等级;粘聚力;内摩擦角

中图分类号:TU411 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)03-0086-05

0 引言

黄土作为一种特殊土,它除了具有一般土体的力学特征以外,还具有自己本身的特殊性。含水量是土的基本物理性质指标之一,对于黄土而言,其一系列性质均与含水量相关,由于受自然条件、地质环境或工程建设活动的影响,土体水分常有变化,在这种情况下黄土的物理力学性质也随之变化。如何去认识和研究黄土的抗剪强度特性,这是工程界所关心的。目前,有一些学者致力于用非饱和理论研究黄土的抗剪强度特性,由于黄土本身固有的复杂性,试验和测试都很困难。针对这种情况,采用常规的试验方法来研究黄土抗剪强度特性,即研究黄土含水量、干密度与加荷等级的变化对抗剪强度的影响。

1 试验方案

本试验土样取自山西省太原市,取土深度为1.0 m。抗剪强度参数通过直剪试验获得,试验步骤按照现行规范^[1]进行,采用快剪法,剪切速率为0.8 mm/min。

在含水量与干密度对抗剪强度的影响研究中,法向应力为:50 kPa,100 kPa,200 kPa,300 kPa。含水量分别取为:7%,12%,15%,各组干密度分别为:1.3 g/cm³,1.4 g/cm³,1.5 g/cm³,1.6 g/cm³,1.7 g/cm³。通过直剪试验得到各组的粘聚力与内摩擦角值,从而进行含水量与干密度对非饱和重塑黄土抗剪强度影响的分析。在加荷等级对非饱和重塑黄土抗剪强度的影响研究中,含水量固定为15%,干密度固定为1.6 g/cm³,各组的加荷等级为:一组50 kPa,100 kPa,150 kPa,200 kPa;二组100 kPa,200 kPa,300 kPa,400 kPa;三组50 kPa,100 kPa,200 kPa,300 kPa;四组150 kPa,200 kPa,300 kPa,500 kPa,700 kPa。其中第三组可采用含水量与干密度影响试验中的数据。

2 试验结果及数据分析

2.1 含水量对粘聚力的影响

粘聚力随含水量的变化如图1所示,通过图1可以发现非饱和重塑黄土粘聚力随着含水量的增大发生了显著下降。粘聚力与含水量之间呈指数关系为

$$c(\omega) = ae^{-b\omega} \quad (1)$$

式中, $c(\omega)$ 为不同含水量下的黄土粘聚力; a, b 为试验参数。

收稿日期:2009-10-21

作者简介:王硕 男 1985年出生 硕士研究生

粘土的粘聚力是由粘土颗粒—水—电系统间的相互作用产生的。粘土中的引力包括:静电引力、范德华力、颗粒间的胶结、颗粒间接触点的化合键、表观粘聚力等。目前资料表明:起因于粒间吸力的粘聚力在所有情况下都是非常小的,而属于化学胶结的粘聚力则很显著。水对胶结物质具有溶解作用,随着含水量的增加,溶于水的胶结物质也会增加,土分子间的胶结作用力下降^[2-3]。

对于黄土来说,水使黄土的结构软化,力使黄土的结构破坏,高含水量正是起了软化土结构的作用,使得土样承受作用力的能力减小,而低含水量下的非饱和黄土由于其基质吸力的贡献使得颗粒之间的接触面上法向应力增大,土体的结构稳定性增强,抵抗破坏的能力增强,提高了土的抗剪强度。

从图1同时可以发现含水量对粘聚力的影响随着干密度的增大而增大。特别是当干密度达到 1.6 g/cm^3 以后,粘聚力随含水量的下降非常显著。在实际工程中要特别注意控制压实后黄土的含水量,含水量的增大将会很大的危害工程质量。

2.2 含水量对内摩擦角的影响

内摩擦角随含水量的变化如图2所示,通过图2发现重塑黄土在非饱和范围内,内摩擦角随含水量变化减小,但是幅度不大;由于黄土湿陷性的影响在一定含水量范围内,内摩擦角与含水量的关系呈现跳跃性。随着干密度的增大,内摩擦角与含水量的关系呈现近似线性。随着干密度的增加,内摩擦角随含水量增大而出现的减小量并未出现明显的变化。

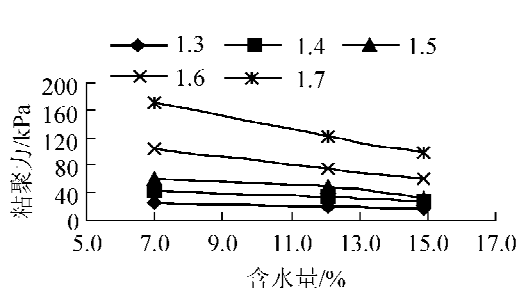


图1 粘聚力随含水量的变化

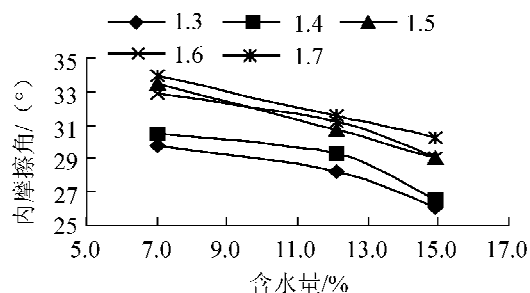


图2 内摩擦角随含水量的变化

通过对比可以发现含水量的增大对黄土内摩擦角的影响小于含水量增大对一般粘土内摩擦角的影响。研究表明,水的非润滑效应对石英、长石和方解石这样的抛光表面表现突出^[3]。石英在黄土中的含量远大于一般粘土,该理论可以较好解释含水量对二者内摩擦角影响的差异。

2.3 一定干密度下非饱和黄土抗剪强度规律

依据莫尔-库仑准则,粘土的抗剪强度规律为 $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 。一定干密度下非饱和黄土的粘聚力随含水量变化,而含水量对内摩擦角的影响较小,这里不予以考虑。非饱和土的抗剪强度规律可表示为

$$\tau_f = ae^{-bw} + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中, τ_f 为土的抗剪强度; σ 为土的法向应力; φ 为土的平均内摩擦角。

式(2)表明黄土的抗剪强度随法向应力与含水量变化。莫尔-库仑破坏包线也将相应的转变为一空间破坏曲面。

2.4 干密度对粘聚力的影响

粘聚力随干密度的变化如图3所示,通过图3可以发现粘聚力随干密度的增大呈指数增长,可拟合为指数函数 $C = ae^{bw}$,其中, a, b 为参数,当含水量为14.9%时, $a = 0.0613, b = 4.3145$;当含水量为12.1%时, $a = 0.0798, b = 4.303$;当含水量为7.0%时, $a = 0.1024, b = 4.3401$ 。可以看出, a 随着含水量的增大而减小, b 的变化较小。

其原因可从以下两方面考虑:一是干密度越大,土粒间的接触越紧,土体的孔隙比减小,故土粒间的咬合作用变大,土粒间的联结作用也变大,故产生的强度有变大的趋势;二是干密度变大,孔隙比减小,土中的水主要以土粒周围结合水膜的形式存在,而结合水膜中的水不能移动,也有利于土中水表面张力的发挥,故干密度的增大,水膜中的水与土颗粒间的强结合力使强度大大得增加。由二者的综合作用的结

果是干密度变大,粘聚力变大。

2.5 干密度对内摩擦角的影响

内摩擦角随干密度的增大有少量增加,呈现近似线性关系,其关系如图 4 所示。内摩擦角与干密度的关系可以从两点进行分析:一是颗粒间的相互作用,干密度的增大会使颗粒之间的接触更为紧密,从而导致内摩擦角的增大;二是颗粒与粒间水的作用,当干密度较小时孔隙比较大,粒间水多以自由水状态存在,随着干密度的增大,孔隙比相应减小,部分粒间自由水逐步转化为弱结合水,由于自由水的减少水对颗粒相互摩擦的润滑作用也就减弱,从而内摩擦角会有增大。

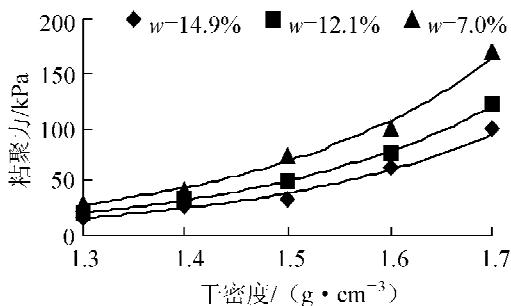


图 3 粘聚力随干密度的变化

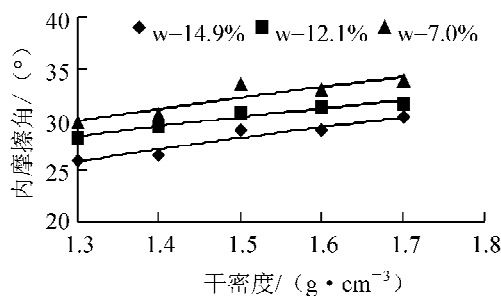


图 4 内摩擦角随干密度的变化

2.6 一定含水量下非饱和黄土抗剪强度规律

依据莫尔-库仑准则,粘土的抗剪强度规律为 $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 。一定含水量下非饱和黄土的粘聚力随干密度变化,而干密度对内摩擦角的影响较小,这里不予以考虑。

图 5 所示为一系列随干密度变化的平行直线(未考虑内摩擦角随干密度的变化),各条直线为不同干密度下的破坏包线,破坏包线的位置随干密度的降低而降低,对于某一应力状态的土而言,当破坏包线位置降低到一定位置之后会与应力圆相切,从而达到应力的极限平衡状态,通过切线与应力圆的几何关系可以得到

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2 + 2ae^{bp} \cot \varphi}$$

整理式(3),可得到临界应力状态时的干密度

$$\rho_{cr} = \frac{1}{b} \ln \frac{\sigma_1 - \sigma_2 - (\sigma_1 + \sigma_2) \sin \varphi}{2a \cot \varphi}$$

2.7 应力应变特性

图 6 为 $w = 14.9\%$ 时不同干密度土样的应力-应变关系曲线。

非饱和重塑黄土的应力-剪切变形关系曲线基本符合双曲线模型。

应变较低时(剪切变形小于 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$),应力随着应变的增加并非符合双曲线模型,这是由于在小应变时,随土体的应力增大,应变以弹性变形为主,这与饱和土的理论相吻合。通过图 6 可以发现以下两点:

(1)在相同含水量与加载级下,非饱和重塑黄土的应力应变关系曲线受干密度的影响较大。随着干密度的增大,试样的应力应变关系曲线由应变硬化转变为应变软化型。对高密度试样而言,在所有法向应力条件下均表现出剪胀性。Mitchell 认为应变硬化与应变软化的差异应归因于孔隙比、膨胀效应和结构方面的差别,其中孔隙比起主导作用^[3]。邵生俊与谢定义通过等效球应力下剪切过程的体缩和体胀揭示了土的剪缩剪胀性,剪缩或剪胀应变增量比与有效剪应力比呈线性关系。并通过实验证明了这种关系在压实黄土中亦存在^[4]。

(2)随着干密度的增加,试样的弹性变形区域逐渐增大。其原因与土样的孔隙结构相关,当干密度较大时土样前期固结应力较大,孔隙比较低,试样不易被压缩压密。

2.8 加荷等级对粘聚力的影响

不同加荷等级时的粘聚力与内摩擦角如图 7 所示,通过图 7 中数据的对比可以发现荷载级增大后求

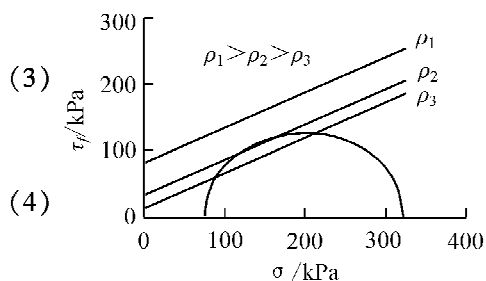
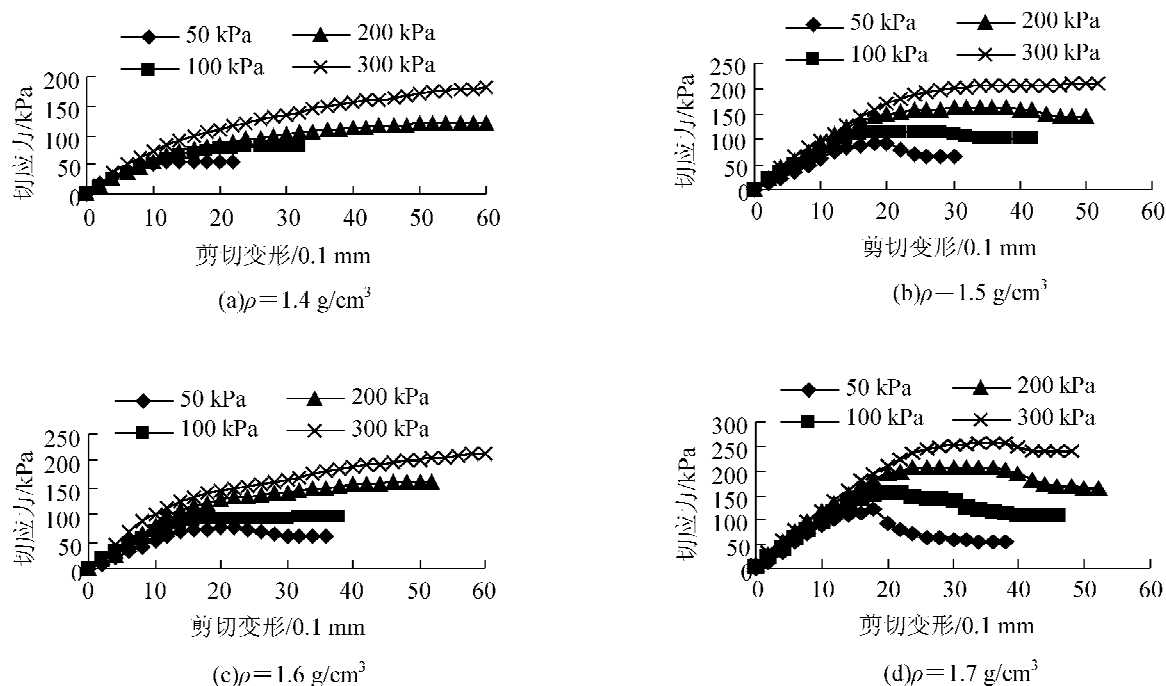


图 5 不同干密度下的 τ - σ 曲线

图6 $W=14.9\%$ 时的应力-剪切变形关系曲线

得的粘聚力较小,而内摩擦角较大。二组的粘聚力为一组的粘聚力的78.7%,二组的内摩擦角为一组内摩擦角的1.4倍。一组与三组数据的对比可以发现在近似的荷载级情况下提高法向应力会使求得的粘聚力增大,内摩擦角增大。当起始法向应力较小,加载级较低时可得到较大的粘聚力;当法向应力较高时得到的粘聚力较大。当加载率较快时得到的内摩擦角较大。

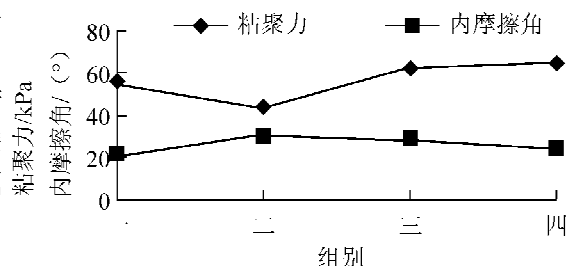


图7 不同加荷等级时的粘聚力与内摩擦角

3 结论

(1)非饱和重塑黄土的粘聚力随干密度的增大而增大,呈指数变化。其原因主要在于颗粒之间的相互作用与粒间水的张力作用。

(2)非饱和重塑黄土的内摩擦角随干密度的增大而少量增大,近似呈线性变化。其变化原因在于颗粒之间的受力影响与粒间水的润滑作用。但是由于内摩擦角随干密度增加的变化范围很小,在抗剪强度计算中可以忽略干密度的影响。

(3)当起始法向应力较小,加荷等级较低时可得到较大的粘聚力;当法向应力较高时得到的粘聚力较大。当加载率较快时得到的内摩擦角较大。

参 考 文 献

- [1]铁道第一勘察设计院. TB10102—2004 铁路工程土工试验规程[S]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [2]李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [3]JAMES K. MITCHELL. 岩土工程土性分析原理[M]. 南京:南京工学院出版社,1988.
- [4]谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):3-13.

(下转第93页)

面设计时回弹模量设计值建议为 1 300 ~ 1 700 MPa,劈裂抗拉强度设计值建议为 0.5 ~ 0.8 MPa。

(4) 钢渣粉煤灰路面基层材料的温缩、干缩系数均优于别材料(二灰碎石、水泥碎石、二灰土等)。

参 考 文 献

- [1] 林宗寿. 钢渣粉煤灰活化方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001(1): 24-26.
- [2] 黎宁. 钢渣混凝土的制造[J]. 混凝土与水泥制品, 2005(2): 37-40.
- [3] 谢产庭. 石灰粉煤灰稳定首钢钢渣基层材料的研究与应用[J]. 市政技术, 2003(1): 34-37.
- [4] 黄涛. 水泥粉煤灰钢渣桩复合地基承载力与沉降特性试验研究及应用[J]. 建筑结构, 2003(4): 13-15.

Performance Test Analysis of Steel Slag Admixed with Fly-ash as Pavement Base Course

Yan Zhanyou¹, Shu Yu¹, Liu Hongfeng²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. The Third Engineering Co. Ltd. of China Railway 17th Bureau Group, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Steel slag and fly ash, as a kind of industrial waste and ecological building material, can be used as road base material to reduce the exploitation of natural stone. The performances of steel slag and fly ash admixture in pavement are studied, mainly including the mixing ratio, unconfined compressive strength, split tensile strength, resilient modulus and other commonly used performances. It is proved through experimental comparison that the admixture of steel slag and fly ash is acceptable to be used as road pavement base course.

Key words: steel slag; fly ash; compaction properties; unconfined compressive strength; resilient modulus; splitting tensile strength

~~~~~  
(上接第 89 页)

## Test Study on Influence Factor of Shear Strength of Unsaturated Remolded Loess

Wang Shuo, Liu Zhanhui

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Changes of cohesion and internal friction angle of unsaturated remolded loess are obtained with different water content, dry density and load grade through direct shear test. The reason for the influence caused by water content and dry density on the loess's shear strength is analyzed from the microcosmic angle of loess's mineral composition. The cohesion of unsaturated remolded loess will increase with the increment of dry density due to the influence of reciprocity of particles and tension action of inter-granular water, showing an index change. Internal friction angle of unsaturated remolded loess gets a little increase with the increment of dry density, approximately showing a linear variation.

**Key words:** unsaturated remolding loess; water content; dry density; load grade; cohesion; internal friction angle