

# 含水率对非饱和原状黄土强度的影响

张宁宁<sup>1</sup>, 骆亚生<sup>1</sup>, 沙磊<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国石油长庆油田分公司 第五采气厂, 内蒙古 乌审旗 017312)

**摘要:**黄土地区修建的路堤、河堤和土石坝等工程大都位于地下水位以上, 呈非饱和状态, 且其受力处于平面应变状态。采用 TS-526 真三轴仪改造的平面应变仪, 对非饱和原状黄土在平面应变条件下进行了试验。试验结果表明, 非饱和黄土的变形和强度随着含水率的变化呈显著变化, 含水率越大, 强度越小; 土体的偏应力随着轴向变形的变化曲线皆为硬化或者强硬化型; 但随着体积的变化土体的偏应力曲线出现明显的拐点; 非饱和黄土的抗剪强度参数随含水率的增大而减小。含水率对工程的变形和强度影响比较大。

**关键词:** 平面应变; 含水率; 变形; 抗剪强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0101-04

中图分类号: TU411

## Effect of Water Content on Strength of Undisturbed Unsaturated Loess

ZHANG Ning-ning<sup>1</sup>, LUO Ya-sheng<sup>1</sup>, Sha Lei<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. The No. 5 Gas Production Plant, Petrochina Changqing Oilfield Company, Wushenqi, Inner Mongolia, 017312, China)

**Abstract:** Engineering projects like embankment, riverbank and earth-rock dam in the loess area are mainly built above groundwater level. The loess is in unsaturated state and subject to plane strain. The unsaturated undisturbed loess under the plane strain state is studied by using reformed TS-526 true triaxial apparatus. Results show that deformation and strength of the unsaturated loess vary with water content obviously. The more water content, the less strength of the loess. The deviatoric stress-curves of the loess are hardening and overhardening as axial strain increases and however, there is an obvious inflection point on the deviatoric stress-volume change curves. The shear strength parameter of the loess decreases with increased water content. Water content has a major effect on deformation and strength of the projects.

**Keywords:** plane strain; water content; deformation; shear strength

黄土在世界范围内分布广泛, 分布总面积约为 1 300 km<sup>2</sup>, 占陆地面积的 9.3%, 黄土地区地下水位一般埋藏较深, 因此黄土多处于非饱和状态。非饱和状态的土质地疏松, 孔隙大, 垂直节理发育, 可溶盐含量高, 具有湿陷性<sup>[1]</sup>, 然而随着黄土中含水率的增加, 其强度与稳定性都逐渐降低, 从而给黄土地区的工程建设带来隐患。因此, 合理、全面地掌握非饱和黄土的工程性质, 特别是研究非饱和黄土变形和强度随含水率变化的规律, 对工程建设具有重要的意义与参考价值。

许多工程结构在长度方向断面形状不变, 荷载情况也不变, 如路堤、河堤、土石坝、挡土墙、地下隧道、码头驳岸、机场跑道等, 土体的应力变形状态为平面应变问题<sup>[2]</sup>。采用平面应变试验进行土体变形和强度的研究要比常规三轴试验更符合土体实际受力状

态, 所得的强度也更加接近土体的实际强度。朱思哲等<sup>[3]</sup>采用平面应变试验和常规三轴试验测得同一种土的强度, 试验结果表明平面应变下土体的强度要比常规三轴下的强度要高出 30% 左右。目前有许多学者对平面应变条件下的不同材料进行了试验研究, 其结果均证明平面应变对材料的影响是不可忽视的<sup>[4-10]</sup>。

本文对陕西子洲原状非饱和黄土进行了平面应变试验, 探究了不同含水率下原状非饱和黄土的变形和强度特性, 为实际工程提供一定的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

土样取自陕西省子洲县距“3·10”滑坡现场不远处某坡体断面。取土深度 3 m 左右, 属晚更新世 Q<sub>3</sub> 黄

收稿日期: 2012-11-07

修回日期: 2013-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于土体结构性变化的黄土滑坡灾变机理研究”(51178392)

作者简介: 张宁宁(1987—), 男(汉族), 陕西省清涧县人, 硕士生, 研究方向为黄土的工程性质及应用。E-mail: 1091059707@qq.com。

通信作者: 骆亚生(1967—), 男(汉族), 陕西省泾阳县人, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程方面的研究工作。E-mail: lyas@public.

土,天然含水率 7.0%,天然干密度 1.45 g/cm<sup>3</sup>,颗粒相对密度 2.70,轻型击实试验测得最优含水率

16.2%,最大干密度 1.70 g/cm<sup>3</sup>,该土样物理性质指标见表 1。

表 1 黄土土样的物理性质指标

取样地点	颗粒相对密度	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	颗粒组成/%			类型	
					>0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm	按颗粒组成 分类	按塑性图 分类
陕西省子洲县	2.70	26.9	17.4	9.5	21.5	70.4	8.1	粉质黏土	低液限黏土

## 1.2 试验装置

对日本谷腾机械工业株式会社生产的 TS-526 真三轴仪进行了改造,用有机玻璃替换真三轴仪压力室的中主应力刚性加压部件,使得该中主应力加压面为零应变面,试样受力状况如图 1 所示。为了在试验过程中能够测试非饱和黄土的孔隙气压力和孔隙水压力,在原真三轴室的试样冒上安装上了管路并在管路末端安装了孔隙气压力传感器;用嵌有陶土板的底座替换了原真三轴室的底座,并在底部安装有孔隙水压力传感器;其孔隙气压力与孔隙水压力装置图如图 2 所示。

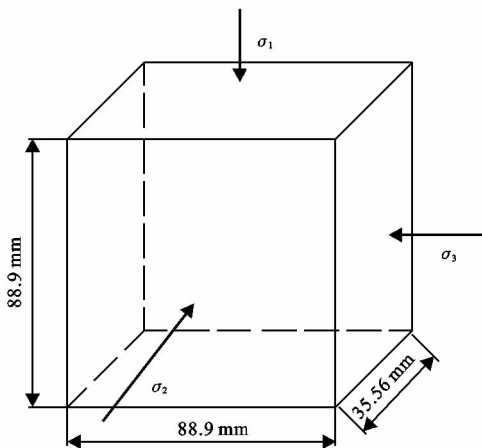


图 1 三轴试验土样受力状况( $\sigma$ 为围压)

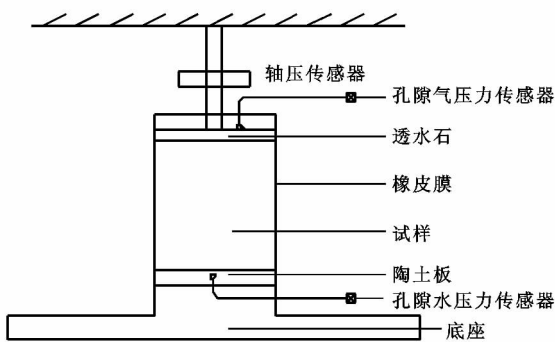


图 2 传感器示意图

## 1.3 试验制备与试验方法

(1) 试样制备。试样制备依据《土工试验规程》

规定的步骤进行,将取回来的大块土样,先用削土刀将土块削成 110 mm×110 mm×50 mm 的小块,分土时要注意土块的原位上下方向,再将土样迅速削成试验所需尺寸 88.9 mm×88.9 mm×35.56 mm,并在制样过程中所有试样的干密度保持一致,其值为 1.45 g/cm<sup>3</sup>,试样制备完成后测量试样尺寸,其误差不能超过 0.1 mm,并称其质量,若二者之一不能满足,则该土样作废。根据试验所需的含水率  $w$  10%, 13%, 16%, 21%, 24%, 27%, 用水膜转移法配制不同含水率的试样,其试样含水率误差不能超过 1%,否则重新配制。

(2) 试验方法。试验中采用初始固结围压  $\sigma_c$  分别为 50, 100, 200 kPa 来模拟土体原位时的应力状态。根据试验目的,试验结束的条件是控制轴向应变达到试样固结后高度的 16%~20%,过程中还要兼顾量力环的最大量程,即量力环变形不超过 2.5 mm,但是在强度特性分析过程中,考虑到土样的应力—应变曲线皆为硬化性曲线,所以选择轴向应变为 15% 作为破坏条件。

根据 Roscoe 平面内应力定义,作以下约定:偏应力  $q=0.5(\sigma_1-\sigma_3)$ ,体应变  $\epsilon_v=(\epsilon_1+\epsilon_3)$ <sup>[11]</sup>。式中: $\epsilon_1$ ——试样的轴向应变(%); $\epsilon_3$ ——试样的侧向应变(%).

## 2 结果与分析

### 2.1 不同含水率下非饱和黄土的应力应变曲线特性

不同含水率在围压  $\sigma_3=50$  kPa 下的偏应力与轴向应变的关系曲线如图 3 所示,以及围压  $\sigma_3=50$  kPa 下的偏应力与体应变的关系曲线如图 4 所示。

(1) 由图 3 可以看出,土体的偏应力与轴向应变的关系曲线均表现为硬化或者强硬型,在剪切初期,剪应力增加很快但变形发展较慢,曲线较陡;随着轴向应变的继续增加,土体剪切应力也随之增加,曲线的斜率变缓。含水率( $w$ )对偏应力的影响规律较为明显,表现为随着含水率的增加达到同一轴向变形所需的偏应力值越小;在围压为  $\sigma_3=100$  kPa,  $\sigma_3=$

200 kPa,土样含水率从 10%变化到 21%时,其含水率对土体强度的影响不明显,达到同一轴向应变时所需的偏应力没有明显变化,而在含水率为 24%,27%时,土样的强度显著减少,规律性较好。为了便于观察将不同含水率下土样破坏时的偏应力值列于表 2 中。

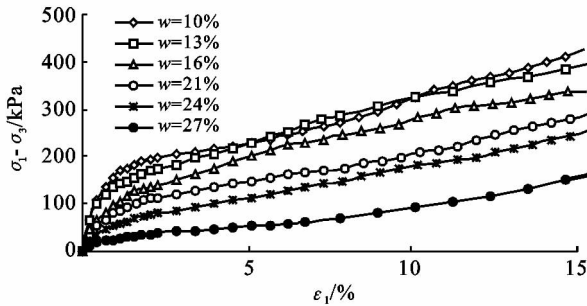


图 3 偏应力与轴向应变  $\varepsilon$  的关系曲线  
注:  $\sigma_3 = 50$  kPa,  $w$  为土样含水率。

表 2 破坏偏应力与含水率关系

含水率/%	破坏偏应力/kPa		
	$\sigma_3 = 50$	$\sigma_3 = 100$	$\sigma_3 = 200$
10	423	495	759
13	393	538	750
16	342	545	742
21	285	460	774
24	249	288	545
27	157	380	436

(2) 由图 4 可以看出,土体的偏应力与体应变的关系曲线存在明显的拐点,拐点之前土体表现为压缩,拐点之后土体则表现为剪胀。在围压  $\sigma_3 = 50$  kPa 下,随着含水率从 13%增加到 21%,曲线出现拐点的趋势越来越早,即随含水率增大,土体越容易向两侧膨胀挤出。为更直观地看到含水率对曲线拐点出现早晚的变化规律,将不同围压下曲线拐点处所对应的体积应变值和偏应力列在同一表中(表 3)。在  $\sigma_3 = 50$  kPa,  $\sigma_3 = 100$  kPa 时,随着含水率的增加,拐点处的体积应变值在含水率小于 21%之前呈现减小趋势,而在含水率为 24%时曲线拐点的体积应变值增大,当含水率为 27%时土样的压缩量减小;在  $\sigma_3 = 200$  kPa 时,土样的压缩量随着含水率的增加略呈上升趋势,在含水率为 27%时土样的压缩量显著降低,而相应的偏应力随含水率的增加呈下降趋势。

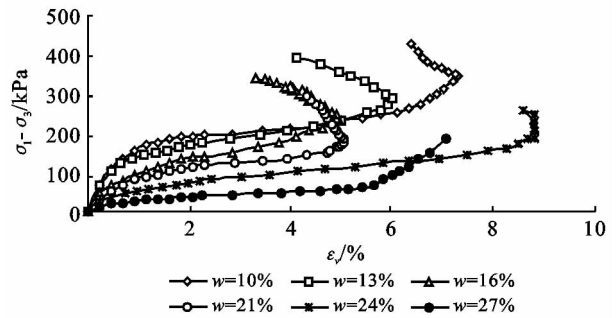


图 4 偏应力与体应变关系曲线( $\sigma_3 = 50$  kPa)

表 3 土体剪胀时含水率、偏应力、体变之间的关系

含水率/%	$\sigma_3 = 50$ kPa		$\sigma_3 = 100$ kPa		$\sigma_3 = 200$ kPa	
	折点体变/%	偏应力/kPa	折点体变/%	偏应力/kPa	折点体变/%	偏应力/kPa
10	6.35	2.58	8.55	4.10	10.62	6.64
13	5.79	2.56	6.90	3.83	10.53	6.16
16	5.03	2.27	6.09	3.47	11.30	6.91
21	4.73	1.47	5.06	3.99	11.25	7.24
24	8.30	1.56	9.42	2.36	11.90	4.93
27	5.68	0.68	4.25	1.52	8.14	2.83

## 2.2 原状非饱和黄土的抗剪强度

不同含水率下原状非饱和黄土的工程特性参数如表 4 所示。

表 4 非饱和黄土的工程特性参数

含水率/%	饱和度/%	总凝聚力/kPa	内摩擦角/(°)
10	31.3	20.5	40.7
13	40.7	20.3	40.6
16	50.1	17.4	40.5
21	65.8	13.3	39.0
24	75.2	10.6	34.4
27	84.6	4.9	33.4

从表 4 可以看出,非饱和原状黄土的抗剪强度参数受含水率的影响较为明显,随着土体含水率的增大其总凝聚力与内摩擦角均降低。在含水率为 27% 时,土样的凝聚力为 4.9 kPa,内摩擦角为 33.4°,较含水率在 10% 情况下的凝聚力和内摩擦角均降低 15.6 kPa 和 7.3°,这可以更进一步地说明非饱和黄土的强度要高于饱和土的强度。平面应变试验下得到的内摩擦角均比较大,这是因为在土体处于平面应变状态时始终限制  $\varepsilon_3$  的变形为零,在实际工程中土体多处于平面应变状态,因此得出的参数能较好地反映土体真实的强度。随着含水率的增加,土体抗剪强度  $c$ ,

$\varphi$  值依次降低,这也说明了土体含水率的变化对其强度有很大的影响,对于不同含水率的土样,土样抗剪强度的凝聚力和内摩擦角均有不同的变化。原因是含水率的增加,使土样中流动的水增加,流动的水促进了土颗粒之间的滑动,降低了土颗粒之间的摩擦力和机械咬合力,进而使得土体强度降低。因此,分析不同含水率下的非饱和黄土的抗剪强度对于研究非饱和黄土的工程性质十分重要。

### 3 结论

(1) 在不同含水率下非饱和黄土的偏应力随着轴向应变的变化的曲线皆为硬化或者强硬化型,偏应力与体变关系曲线存在明显的拐点,在拐点之前土样表现为受剪压缩,拐点之后土样表现为受剪剪胀,其原因是在拐点之前土样随压力的增大而处于压密状态,而在拐点之后土样开始破坏,所以呈现剪胀变化。

(2) 非饱和黄土的抗剪强度随含水率的变化呈明显的变化,随着含水率的增大,凝聚力与内摩擦角均降低;非饱和黄土的强度要高于饱和黄土的强度。在实际工程要充分考虑土体含水率的变化。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.

- [2] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [3] 朱思哲, 刘 虔, 包承纲, 等. 三轴试验原理与应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 邓楚键, 郑颖人, 朱建凯. 平面应变条件下 M-C 材料屈服时的中主应力公式[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 310-314.
- [5] 华承博. 新型土工平面应变仪的开发与研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [6] 黄茂松, 钱建固. 平面应变条件下饱和土体分叉后的力学性状[J]. 工程力学, 2005 22(1): 48-53.
- [7] 李福林, 彭芳乐, 雷亮, 等. 平面应变条件下砂土局部化剪切带的有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 851-857.
- [8] 李刚, 谢云, 陈正汉. 平面应变状态下黏性土破坏时的中主应力公式[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3174-3177.
- [9] 李广信, 张其光, 黄勇男. 土体平面应变方向上的主应力[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 358-361.
- [10] 刘爱华, 王思敬. 平面坡体渐进破坏模型及其应用[J]. 工程地质学报, 1994, 2(1): 1-8.
- [11] 赵锡宏, 张启辉. 土的剪切带试验与数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

(上接第 91 页)

- [5] 张建锋, 邢尚军. 环境胁迫下刺槐人工林地土壤退化特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1086-1091.
- [6] 夏江宝, 许景伟, 陆兆华, 等. 黄河三角洲滩地不同植被类型的土壤贮水功能[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 79-83.
- [7] 王群, 夏江宝, 张金池, 等. 黄河三角洲退化刺槐林地不同改造模式下土壤酶活性及养分特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 133-137.
- [8] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soil: a review [J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.
- [9] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1299-1305.
- [10] 刘振花, 陈立新, 王琳琳. 红松阔叶混交林不同演替阶段土壤活性有机碳的研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1098-1103.
- [11] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [12] 程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [13] 李玲, 肖和艾, 苏以荣, 等. 土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解性有机碳含量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 122-128.
- [14] Linn D M, Doran J W. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48(4): 1267-1272.
- [15] Saner T, Cambardella C, Brandle J. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar scotch pine shelterbelt[J]. Agroforestry Systems, 2007, 71(3): 163-174.
- [16] 秦娟, 上官周平. 白榆/刺槐不同林型生长季土壤呼吸速率的变化特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 91-98.
- [17] 秦娟, 上官周平. 白榆—刺槐互作条件下叶片养分与光合生理特性[J]. 生态科学, 2012, 31(2): 121-126.
- [18] 孙文义, 郭胜利. 天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2611-2620.
- [19] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 南方森林土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(10): 119-123.