

黄土侧向变形的真三轴试验研究

王瑞瑞, 骆亚生, 赵春明, 岳海英

(西北农林科技大学 水资源与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 保持小主应力、中主应力不变, 在大主应力方向加荷是实际工程中存在的一种应力路径, 就该应力路径分别对不同含水率的重塑黄土进行了几组真三轴试验, 对其应力—应变关系及反映侧向变形变化规律的泊松比进行了特定条件下的研究。研究表明, 应力—应变关系的偏差应力和初始切线模量随含水率的增大而减小, 相同的偏差应力下含水率越大侧向应变就越大。在上述应力路径下剪切, 中主应力方向首先压缩, 但表现不明显, 很快就转为膨胀, 小主应力方向膨胀, 泊松比可以大于 0.5, 且小主应力方向膨胀量大于中主应力膨胀量。

关键词: 真三轴; 含水率; 应力路径; 应力应变; 泊松比

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0173-04

中图分类号: TU411

Deformation Characteristics of Loess by True Triaxial Test

WANG Rui-rui, LUO Ya-sheng, ZHAO Chun-ming, YUE Hai-ying

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Keeping minor principle stress and medium principle stress fixed and loading in the direction of maximum principle stress are the potential stress path in practical projects, under which several groups with different water contents of true triaxial tests about remolding loess are studied. Results show that the values of initial elastic modulus and principal deviator stress decrease with water content increasing. In certain defined principal deviator stress, lateral deformation increases with water content increasing. The Poisson's ratio can be greater than 0.5 in the direction of minor principle stress and the expansion in the direction of minor principle stress is greater than that in the direction of medium principle stress.

Keywords: true triaxial test; water content; stress path; stress and strain relation; Poisson's ratio

关于土体的变形, 人们研究比较多的是沉降, 其实侧向变形也是不可小视的^[1], 对土体强度和变形的定量、定性分析都离不开对土体应力—应变关系的研究。广义胡克定理中的泊松比 μ 是反映侧向变形的重要参数, 其实际意义是切线泊松比^[2]。在多数有限元计算中, 不考虑泊松比小于 0 和大于 0.5 的情况^[3], 当泊松比大于 0.5 时, 通常取泊松比等于 0.49。实际工程中的应力状态往往要比轴对称复杂得多, 如土体开挖和蓄水、枯水期中坝体中的应力状态的变化, 较难满足 σ_2 等于 σ_3 这一条件^[4]。即使 σ_3 比较接近 σ_2 的情况, 其应力—应变关系和侧向变形结果是否也会比较相似呢? 对于其它土类, 已有学者进行了一些特殊应力路径的研究^[5-7]。但对于黄土的研究较少, 本试验

对多组重塑黄土进行了特定应力路径下的真三轴试验, 研究侧向变形规律。

1 材料与方法

1.1 试验仪器

试验仪器为日本谷藤机械工业株式会社生产的 TS-526 型多功能三轴试验轴仪, 可做圆柱形试样的常规三轴和方柱形试样的 3 个主应力单独加荷的真三轴试验。方柱形试样的尺寸为 88.9 mm × 88.9 mm × 35.56 mm (图 1)。

试验过程中, 可在水平和垂直方向对试样施加各自独立的应力。采用移动边板对试样进行 K_0 固结, 其位移用位移传感器测出, 水平应力 σ_3 用液压通过橡皮膜加到试样上, 而液压作用在侧板上。水平应力

收稿日期: 2009-08-17

修回日期: 2009-11-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“非饱和其土动力结构强度变形特征研究”(50578134); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-06-0864)
作者简介: 王瑞瑞(1983—), 女(汉族), 山东省济宁市人, 硕士研究生, 主要从事黄土力学与工程方面的研究工作。E-mail: wangrui-001@126.com。

通信作者: 骆亚生(1967—), 男(汉族), 陕西省泾阳县人, 博士, 教授, 主要从事黄土力学与工程方面的生产与科研工作。E-mail: lyas@public.xa.sn.cn。

σ_2 用可移动侧板来施加。这两个水平应力的加载都由应力控制。轴向荷载通过量力环及传压板到试样上,并由轴向加载装置控制,采用应变式加载。

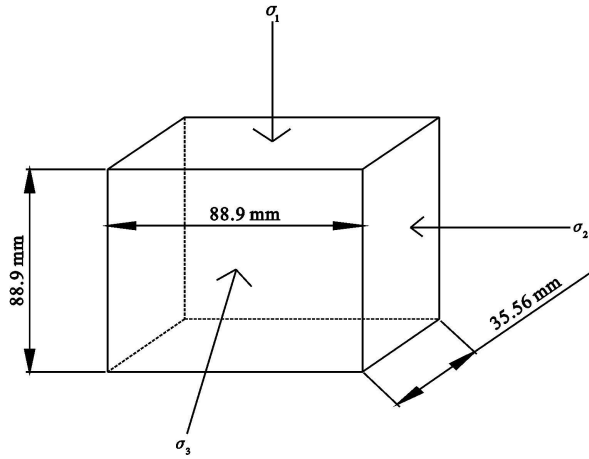


图 1 试样尺寸示意图(单位: mm)

1.2 试样制备

试验所用黄土来自陕西省杨凌区,取土深度 2

~ 3 m,属于 Q3 黄土。天然干密度为 1.26 g/cm^3 ,孔隙比为 1.05,天然含水率为 16.1%,其物理性质指标如表 1 所示。

重塑黄土试样制备时,按要求配置不同含水率的土,静置 48 h 以上,待水分均匀后,控制含水率之间的差别在 0.02% 之间,用真三轴压样器分 4 次缓慢、匀速压制而成。这样既可以精确地制成试验所需干密度(最大干密度 1.60 g/cm^3)的试样,又可以避免因水膜转移法带来的试样内部含水不均匀带来的试验误差。试样如图 2 所示。

1.3 试验方法

试验采用不排水固结方式,分别对 3 个不同的含水率 15%, 19%, 23% 进行真三轴试验。首先将 σ_3 增加到 100 kPa 等向固结后, σ_1, σ_2 增加到 120 kPa,固定 σ_2 ,只增加 σ_1 剪切。这是一种较特殊的应力路径, σ_2 值较接近 σ_3 的值。增大 σ_1 剪切过程中记录量力环的变形量、轴向位移、两个水平方向的侧向位移,破坏标准取大主应变达到 15%。

表 1 黄土土样的物理性质指标

土样来源	比重	液限 / %	塑限 / %	塑性指数 / %	按塑性图分类	颗粒组成 / %		
						> 0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	< 0.005 mm
杨凌	2.70	28.7	17.5	11.2	低液限黏土 CL	16.5	62.8	20.7

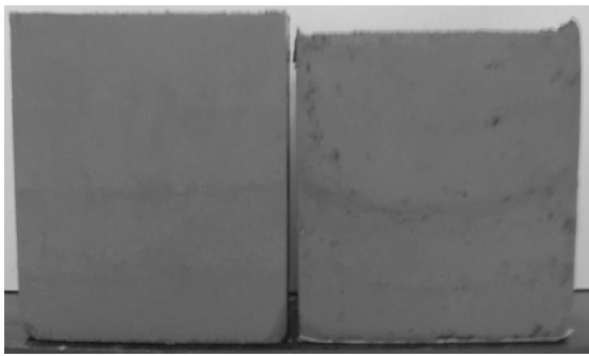


图 2 土样试验前后对比

2 结果和分析

2.1 应力—应变关系

图 3 是不同含水率的重塑黄土的排水剪切试验结果(图 3 为 $q-\Delta\varepsilon_1$ 关系曲线; $q-\Delta\varepsilon_2$ 和 $q-\Delta\varepsilon_3$ 关系曲线略),其中 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 为最大主应力与最小主应力的偏差应力, $\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2, \Delta\varepsilon_3$ 分别是大主应力、中主应力和小主应力方向的应变增量。为保证精度,采用多项式拟合,呈现硬化型特点;应变负号表示膨胀,正号表示压缩。

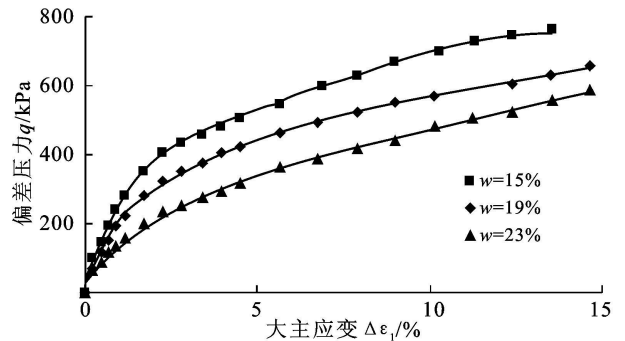


图 3 不同含水率重塑黄土的应力—应变($q-\Delta\varepsilon_1$)关系

由图 3 可知, $q-\Delta\varepsilon_1$ 关系曲线的初始切线模量、偏差应力和破坏时的偏应力差随着含水率的减小而增大,应力应变关系曲线由弱硬化转换为强硬化性。在一定的偏差应力下,中、小主应力方向侧向应变随着含水率的增大而增大;在一定的含水率下,中主应力方向刚开始表现为压缩,但表现不是很明显,很快就转为膨胀,总体上表现为膨胀,小主应力方向始终表现为膨胀,且最终膨胀量大于中主应力方向膨胀量,说明了含水率是影响土体强度和变形的一个主要因素。由于试样为重塑非饱和黄土,因此可以忽略矿

物的胶结对土体强度影响,随含水率的增加,土体强度的降低实际上可以用非饱和土的强度机理进行解释。随着含水率的增加,破坏了土体颗粒连接处的收缩膜,收缩膜的作用降低,进而使得土体吸力的降低,宏观上就表现为土体强度的降低。

2.2 主应变间的关系

图 4—5 是含水率为 15% 和 19% 条件下的 $\Delta \varepsilon_2$ ($\Delta \varepsilon_3$)— $\Delta \varepsilon_1$ 关系曲线和 μ_{21} (μ_{31})— $\Delta \varepsilon_1$ 关系曲线($w = 23\%$ 条件下的关系曲线图略),其中 μ_{21} , μ_{31} 是直接对 $\Delta \varepsilon_2$ — $\Delta \varepsilon_1$, $\Delta \varepsilon_3$ — $\Delta \varepsilon_1$ 关系拟合后的拟合函数求取一次导数的结果。由图中可知,不同含水率的泊松比

具有相似的变化规律。中主应力方向在 σ_1 增大的过程中总体表现为膨胀, μ_{21} 大于 0, 且随着 $\Delta \varepsilon_1$ 的增大而逐渐减小, 说明 $\Delta \varepsilon_2$ 变化越来越慢。小主应力方向也随着 σ_1 的增大而膨胀, μ_{31} 大于 0, 且随着 $\Delta \varepsilon_1$ 的增大逐渐增大, 说明 $\Delta \varepsilon_3$ 的变化越来越快。由图中数值可以看出, μ_{31} 渐渐大于 0.5。从侧向变形对比来看, 小主应力方向最终变形量要比中主应力方向最终变形量大, 且随着 σ_1 的增大 $\Delta \varepsilon_3$ 变化越来越快, 到达某一值时变化值大于 $\Delta \varepsilon_2$ 变化。由 $\Delta \varepsilon_2$ 和 $\Delta \varepsilon_3$ 曲线在数值上和变化规律上不同, 说明重塑黄土在侧向变形上存在各向异性。

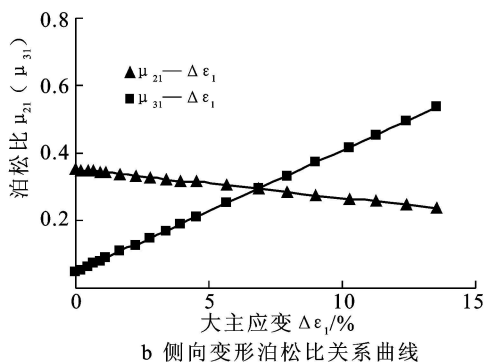
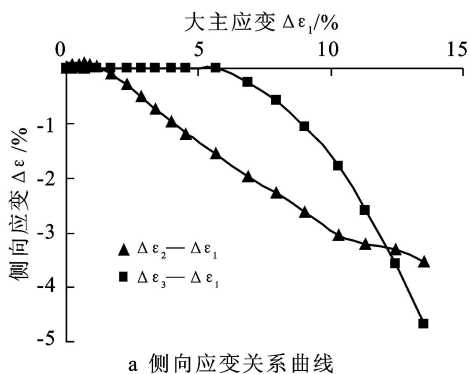


图 4 含水率 15% 条件下侧向应变、侧向变形泊松比关系

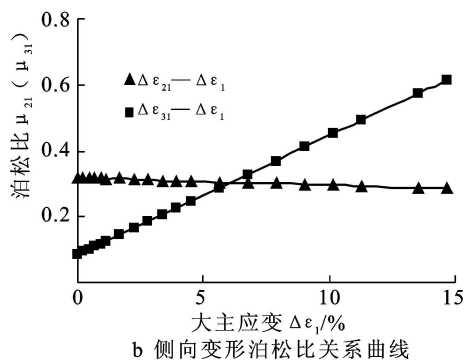
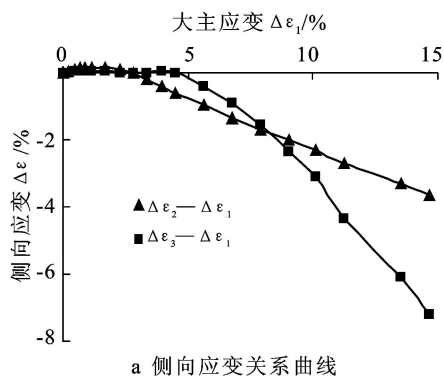


图 5 含水率 19% 条件下侧向应变、侧向变形泊松比关系

3 结果分析

室内真三轴试验是对土体三维受荷比较真实的再现,而常规三轴试验只能研究轴对称的应力状态,在反映土体强度和变形的应力—应变关系上也存在较大差异,尤其是侧向变形的特性。对于本次真三轴试验所研究的重塑黄土,影响侧向变形的因素主要是加载历史或应力路径产生的影响。

施加 σ_3 并使之稳定于 100 kPa 固结,这一过程并没有扩大试样各向异性的倾向,但当 σ_1 和 σ_2 同时增至 120 kPa 时,就造成 σ_2 和 σ_3 方向变形倾向的差

异,也就进一步造成 σ_1 , σ_2 和 σ_3 方向变形的各向异性,在各向不均等的压力作用下反映出次生各向异性。因此,当把 $\sigma_3 = 100$ kPa, $\sigma_1 = \sigma_2 = 120$ kPa 应力状态当做相对的初始应力状态,增大 σ_1 受剪时,实际上已经是各向异性条件下的剪切过程。由于 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, 土颗粒受力不平衡,因 σ_3 最小,此方向只能表现出膨胀, σ_1 最大,此方向一直表现为压缩。而 σ_2 介于 σ_1 和 σ_3 之间, $\Delta \varepsilon_2$ 的正负号要取决于偏差应力 q 的大小,初始 q 为 120~100 kPa, 等于 20 kPa, 比较小,故中主应力方向刚开始剪切时表现出很小的压缩,随着偏差应力的增大很快就转为膨胀。在 σ_1 增

大的过程中,最终导致土粒开始反方向的挤压、滚动,宏观上表现为土颗粒沿 σ_2 和 σ_3 膨胀。

因此,增加 σ_1 试样受剪过程中,试样内部土粒的移动,实际上是 3 个主应力方向的“合运动”,是大、中、小主应力耦合作用的结果。

4 结论

(1) 应力—应变关系曲线的偏差应力和初始切线模量随着含水率的增大而减小, $\Delta\varepsilon$ 和 $\Delta\sigma$ 变化随着含水率的增大而增大,相同含水率下的 $\Delta\sigma$ 变化比 $\Delta\varepsilon$ 变化大。

(2) 最小主应力方向始终是膨胀的,由于中主应力的影响,反映在切线泊松比上,有大于 0.5 的情况。

(3) 在上述应力路径下,中主应力方向可以表现出一定压缩,然后转为膨胀。

(4) 对于黄土这种弹塑性材料,弹性模量和泊松比不再具有物性参数的意义,而是一种随应力状态及加荷方式变化的状态参量。

(5) 对于黄土这种弹塑性材料,在进行有限元计算时,在某些应力路径下,仅仅调整泊松比接近 0.5,有可能出现较大的误差,甚至导致严重错误。

反映侧向变形的泊松比的计算,依赖于对试验数据的拟合,尽管拟合所采用的函数表达式不是惟一的,但拟合后的函数几何形态及其一阶导数的值应是一致的,拟合结果可依据均方差之和、置信度等来优

化选择。如何寻求和采用最佳的数值拟合方法,也是研究侧向变形的关键问题之一。本试验选用了多项式拟合的方法,对其它的拟合方法未做深入探讨。

现在对于黄土的研究很多并不考虑初始应力状态、加荷方式以及中主应力对土体侧向变形的影响,这与工程实际有较大的差异。而真三轴试验也由于试验仪器、试验方法等多方面的条件限制,要反映所有的工程实际也存在一定的困难,因此真三轴试验的深度和广度也有待进一步的深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 殷宗泽. 土体的侧向变形[C]//第三届全国青年岩土力学与工程会议论文集. 南京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 江苏: 中国水利水电出版社, 1995: 57-60.
- [3] 殷宗泽, 朱俊高, 卢海华. 土的弹塑性柔度矩阵与真三轴试验研究[C]//第七届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994, 139-144.
- [4] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 4-14.
- [5] 徐志伟. 砂土侧向变形的真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 371-374.
- [6] 徐志伟, 陈瑜瑶. 淤泥土应力—应变矢量增量的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 343-349.
- [7] 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究[J]. 河海大学学报, 1995, 23(6): 29-33.
- [11] 张进虎, 贺康宁, 段玉玺, 等. 毛乌素沙地西南缘不同植被下的土壤水分时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 96-102.
- [12] 吕贻忠, 胡克林, 李保国. 毛乌素沙地不同沙丘土壤水分的时空变异[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 152-154.
- [13] 王鸣远, 关三和, 王义. 毛乌素沙地过渡地带土壤水分特征及其植物利用[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(2): 37-44.
- [14] 王志, 王蕾, 刘连友, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘水分的时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 61-65.
- [15] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1985: 31-52.
- [16] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.
- [17] 王葆芳, 杨晓晖, 江泽平, 等. 不同地区土地沙漠化过程中土壤退化演变规律[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 2-9.
- [18] 齐雁冰, 黄标, 顾志权, 等. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(1): 50-56.
- [19] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(8): 928-934.

(上接第 172 页)