

# 含水量对加筋膨胀土强度与变形特性的影响\*

汪明元<sup>1,2</sup>, 于嫣华<sup>2,3</sup>, 龚晓南<sup>1</sup>

- (1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027;  
2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010;  
3. 华南理工大学交通与土木学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 对双向格栅加筋膨胀土进行不同含水量下的无侧限压缩和固结不排水剪试验, 研究了含水量对加筋膨胀土强度与变形特性的影响。无侧限试验表明, 含水量显著影响加筋膨胀土的破坏模式, 随含水量增大, 加筋对应力应变曲线的影响减小, 加筋后峰值强度和残余强度的变化减小, 其分别对应应变的变化量减小。固结不排水剪试验表明, 含水量对未加筋与加筋膨胀土的破坏模式并无影响, 其应力应变曲线均呈应变硬化型, 随含水量增大, 加筋土的峰值强度急剧减小, 加筋后峰值强度提高的数值减小, 而含水量对初始屈服应力的影响与加筋层数有关。

**关键词:** 双向土工格栅; 加筋膨胀土; 含水量; 强度与变形特性; 破坏模式; 南水北调工程

**中图分类号:** TU 443 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 06-0138-05

## Effect of Water Content on Strength and Deformation Characteristics of Reinforced Expansive Soils

WANG Mingyuan<sup>1,2</sup>, YU Yanhua<sup>2,3</sup>, GONG Xiaonan<sup>1</sup>

- (1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
2. Key Lab of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;  
3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China )

**Abstract:** Expansive soil samples reinforced with a biaxial geogrid are adopted to carry out a series of unconfined compression, consolidated and undrain tests at different water content. Effects of water content on the strength and deformation characteristics of reinforced expansive soils are studied. Water content has significant effect on the failure model of reinforced expansive soils; With increasing water content, the effect of reinforce on the stress-strain curves decreases, and the change of peak strength and residual strength decrease. Water content has little effect on the failure mode, in which all the stress-strain curves show strain-hardening; With increasing water content, both the peak strength, and increment after reinforcement decrease sharply. The effect of water content on the initial yield stress is related to the layers of reinforce.

**Key words:** biaxial geogrid; reinforced expansive soils; water content; strength and deformation characteristics; failure model; South to North Water Transfer Project (SNWT)

近年土工格栅加筋膨胀土弃料筑堤技术在多个 工程中成功应用, 突破了既有规范的限定。南水北

\* 收稿日期: 2008-11-11

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重大基金项目资助(2006BAB04A10)

作者简介: 汪明元(1972年生), 男, 高级工程师; E-mail: wmy\_90@163.com

调中线膨胀岩土总干渠中,土工格栅加筋膨胀土填筑渠道并加固开挖渠坡的方案正进行研究。该技术可减少耕地占用和水土流失,缩短工期,降低造价,并可有效防治膨胀土地质灾害,具有较大的社会、环保与经济效益,然目前对其研究不足。加筋土试验表明,加筋可使土体的应变软化程度降低、峰值强度提高、峰值后强度的降低减小、达峰值强度的剪切位移增大;随围压增加,加筋的作用可减小;加筋对土体内摩擦角的影响较小,对粘聚力的影响较大<sup>[1-9]</sup>。文献[10]对纤维加筋膨胀土进行试验,认为加筋膨胀土的强度随含水量增加而降低。

粘性填土的力学特性不稳定,受含水量、排水条件、以及大气长期风化作用的影响较大。特别是膨胀土的粘粒含量高,并富含亲水性强的蒙脱石等矿物,其液限和塑性指数均高于一般粘土,且具有特殊的胀缩性。含水量直接影响加筋膨胀土的物理状态与力学特性,以及筋土的相互作用性状,含水量增大可导致加筋膨胀土结构发生工程事故<sup>[11]</sup>。

本文采用 $\phi 101\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的试样,对双向土工格栅加筋压实膨胀土进行无侧限压缩和固结不排水剪试验,研究了含水量对加筋膨胀土强度与变形特性的影响。

## 1 试验方案

聚酯(PET)双向土工格栅由湖北力特土工材料公司生产,其单宽抗拉强度 $65\text{ kN/m}$ ,延伸率 $8\% \sim 10\%$ ,弹性模量 $550 \sim 650\text{ MPa}$ 。填土为南水北调中线新乡渠段的灰白色膨胀泥灰岩风化土,其自由膨胀率约 $65\%$ ,液限约 $56$ ,塑限约 $20$ ,塑性指数 $36$ ,粘粒含量约 $48\%$ ;标准压实的最大干密度 $1.84\text{ g/cm}^3$ ,最优含水量 $16.0\%$ 。

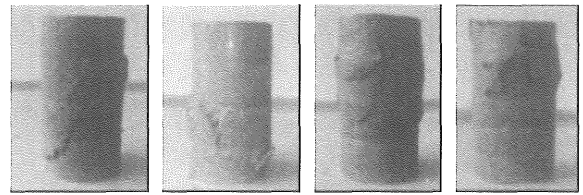
控制干密度 $1.80\text{ g/cm}^3$ ,根据压实曲线,在最优含水量及偏差 $2\%$ 范围选取3个含水量 $14\%$ 、 $16\%$ 、 $18\%$ 。土工格栅沿试样高度均匀布置分层压实对无侧限压缩试验,加筋层数分别为 $0$ 、 $1$ 、 $3$ 、 $5$ ;对固结不排水剪试验,加筋层数分别为 $0$ 、 $3$ 、 $5$ 、 $7$ ,试验围压 $200\text{ kPa}$ ,控制剪切速率 $0.08\text{ mm/min}$ 。

## 2 含水量对无侧限压缩特性的影响

### 2.1 不同含水量时的破坏模式

含水量控制为 $14\%$ 、 $16\%$ 时,未加筋膨胀土具有明显的贯穿剪切破坏面,符合莫尔-库仑线性强度理论,加筋后均未出现贯穿破坏面,土工格栅阻断了破坏面的扩展,改变了土体的破坏模式,从

应力应变曲线反映出峰值强度后加筋土的应变软化程度显著降低。而当含水量控制为 $18\%$ 时,未加筋土与加筋土均未出现贯穿的剪切破坏面,其峰值后的应变软化程度均较小。其中,含水量 $14\%$ 时土体破坏后的形状见图1。



(a) 未加筋 (b) 加1层筋 (c) 加3层筋 (d) 加5层筋

图1 加筋膨胀土的破坏模式  
(无侧限压缩试验,  $w = 14\%$ )

Fig. 1 The failure model of reinforced expansive soils  
(unconfined compression test,  $w = 14\%$ )

### 2.2 含水量对应力应变特性的影响

不同含水量时未加筋及加筋膨胀土的应力应变曲线见图2。

由图2可见,对高液限膨胀性特殊粘土,含水量对加筋前后应力应变特性的影响显著。含水量 $14\%$ 时,加筋后压实膨胀土的应变软化程度显著降低,其峰值强度与残余强度显著提高,峰值强度和残余强度对应的应变增大,加筋层数对应力应变曲线的影响显著。随含水量增大,未加筋土及各层数加筋土的应变软化程度降低,加筋对膨胀土应力应变曲线的影响减小,加筋后峰值强度和残余强度以及其分别对应应变的变化减小。大型拉拔试验表

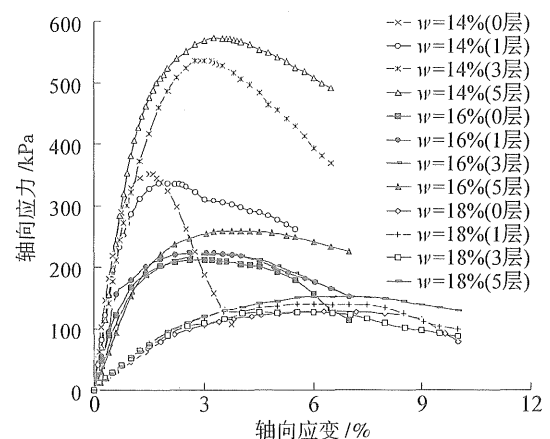


图2 加筋膨胀土的应力应变关系(无侧限压缩试验)  
Fig. 2 Relations between stress and strain of reinforced expansive soils (unconfined compression test)

明, 随含水量增大, 土工格栅与压实膨胀土界面的似粘聚力急剧降低, 含水量对加筋膨胀土强度与变形特性的影响与筋土界面特性相吻合。

各含水量时, 加筋土与未加筋土峰值强度对应的应变之比见图 3。可见含水量较小时, 加筋及加筋层数对峰值强度对应应变的影响程度较大, 即加筋后在较大的轴向应变时膨胀土的峰值强度才得以发挥, 加筋土与未加筋土峰值强度对应应变之比最大接近 2.0。随含水量增大, 加筋对峰值强度对应应变的影响减小。

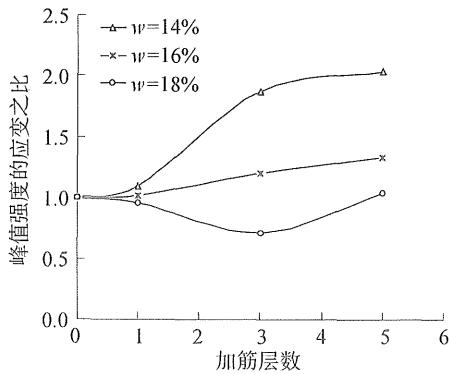


图 3 加筋土与未加筋土峰值强度的应变之比 (无侧限压缩)

Fig. 3 Ratio of strain at peak strength of reinforced expansive soils vs unreinforced soils (unconfined test)

### 2.3 含水量对强度特性的影响

不同含水量时加筋土与未加筋土峰值强度之比见图 4。可见含水量对加筋土峰值强度的影响随加筋层数而异; 随加筋层数增加, 峰值强度提高的比例和数值随含水量的减小剧烈增大, 加筋后峰值强度最大为未加筋土的 1.6 倍。含水量对加筋膨胀土峰值强度的影响可能与筋土界面特性及与其对应的局部应力场有关。

不同含水量时加筋土与未加筋土残余强度之比见图 5。可见含水量较小时, 各层加筋土残余强度提高的比例较大, 且一般随加筋层数增多, 残余强度提高的比例增大。特别是含水量 14% 时, 加筋土的残余强度比未加筋土急剧增大, 最大达未加筋土的 4.5 倍, 与加筋导致膨胀土破坏模式的改变直接相关。

残余强度与其峰值强度之比标示了强度降低及应变软化的程度, 不同含水量时未加筋土、加筋土的残余强度与其峰值强度之比见图 6。

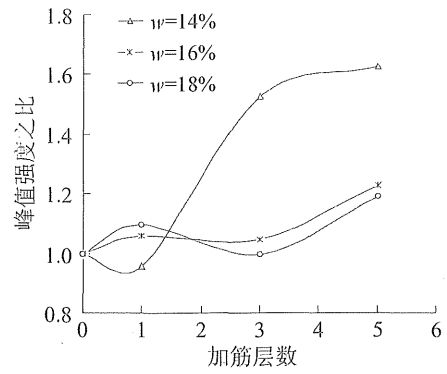


图 4 加筋土与未加筋土的峰值强度比 (无侧限压缩试验)

Fig. 4 Ratio of the peak strength of reinforced expansive soils vs unreinforced soil (unconfined test)

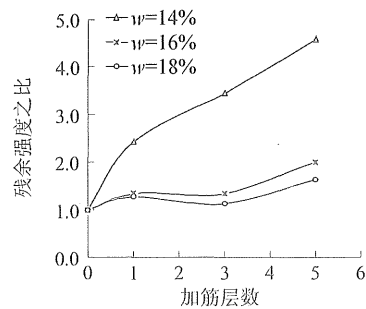


图 5 加筋土与未加筋土的残余强度比 (无侧限压缩试验)

Fig. 5 Ratio of the residual strength of reinforced expansive soils vs unreinforced soil (unconfined test)

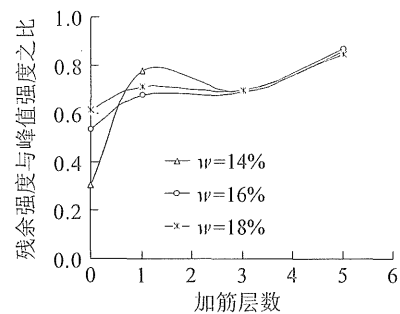


图 6 加筋土的残余强度与其峰值强度之比 (无侧限压缩)

Fig. 6 Ratio of the residual strength vs peak strength of reinforced expansive soils (unconfined test)

可见, 含水量对未加筋土峰值后强度衰减的影响显著, 含水量较小时, 其衰减幅度和衰减值较大。该现象与低含水量时未加筋土出现贯穿破坏面

的破坏模式对应，峰值后有急剧的应变软化。而高含水量时未加筋土呈侧向鼓胀，未出现贯穿破坏面，其应变软化程度较小。随加筋层数增多，含水量对峰值后强度衰减的影响减小，由于加筋后一般未出现贯穿破坏面，其应变软化程度差异不大。

### 3 含水量对固结不排水剪特性的影响

#### 3.1 破坏模式

围压 200 kPa 下未加筋土及加筋土的固结不排水剪试验表明，各含水量时均未出现贯穿试样的剪切破坏面，其应力应变曲线均呈应变硬化型。

#### 3.2 含水量对应力应变特性的影响

200k Pa 围压下不同含水量时未加筋及加筋膨胀土的应力应变关系见图 7。各含水量时加筋土与未加筋土初始屈服应力之比见图 8。

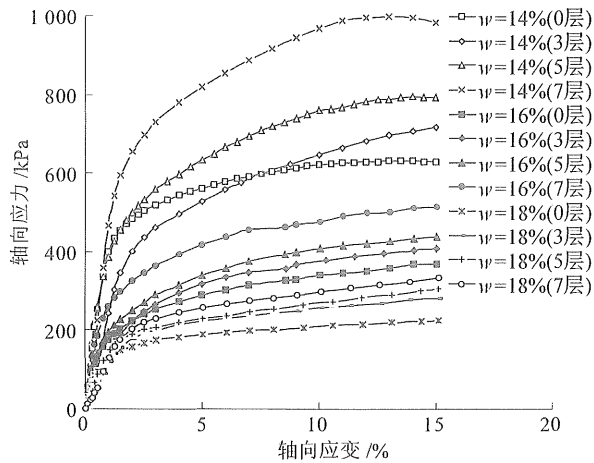


图 7 加筋膨胀土的应力应变关系 (围压 200 kPa)

Fig. 7 Relations between stress and strain of reinforced expansive soils ( $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ )

由图 7 可见，其应力应变曲线呈应变硬化型，加筋后峰值强度（应变 15% 时）提高，初始屈服应力提高；随含水量增大，未加筋土及各层数加筋土的峰值强度急剧减小，加筋后峰值强度提高的数值减小。由图 8 可见，除个别点外，加筋使压实膨胀土的初始屈服应力提高；随加筋层数增多，其提高比例增大；加筋 3 层、5 层时，随含水量增大，初始屈服应力提高的数量减小，但提高的比例增大；而加筋 7 层时其提高比例与含水量的关系不大。此规律可能与筋土界面特性有关，并可能受不同加筋层数时的局部应力状态影响。

#### 3.3 含水量对强度特性的影响

不同含水量时加筋土与未加筋土峰值强度（应变 15% 时）的比值见图 9。可见，各含水量下，加筋均使峰值强度得以提高；含水量较小时，其提高的数值较大；除个别点外，含水量 18% 时，峰值强度提高的比例较大。此规律的发生机理有待进一步研究。

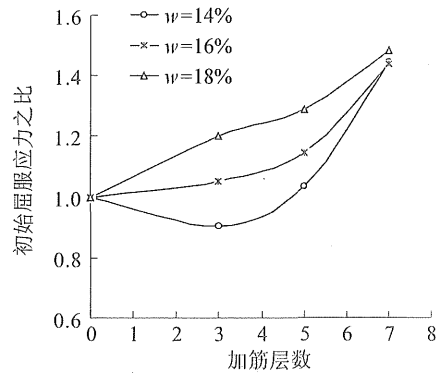


图 8 加筋土与未加筋土的初始屈服应力比 (围压 200 kPa)

Fig. 8 Ratio of the initial yield stress of reinforced expansive soils vs unreinforced soil ( $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ )

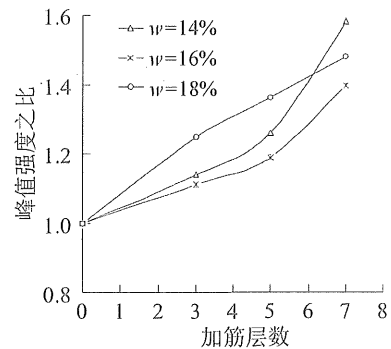


图 9 加筋土与未加筋土的峰值强度比 (围压 200 kPa)

Fig. 9 Ratio of the peak strength of reinforced expansive soils vs unreinforced soil ( $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ )

## 4 结 论

(1) 无限制条件下，最优含水量及小于其值 2% 时，土工格栅加筋可阻断剪切面扩展，改变膨胀土的破坏模式；大于最优含水量 2% 时，未加筋土与加筋土均未出现贯穿剪切面，其峰值后的应变软化程度均较小。

(2) 无侧限条件下, 小于最优含水量 2% 时, 加筋后膨胀土的应变软化程度显著降低, 其峰值强度与残余强度显著提高, 2 种强度对应的应变增大; 随含水量增大, 未加筋土及加筋土的应变软化程度降低, 加筋对膨胀土应力应变曲线的影响减小, 加筋后峰值强度和残余强度的变化减小, 其分别对应应变的变化量减小。

(3) 无侧限条件下, 含水量较小时, 加筋后残余强度提高的比例较大。特别是小于最优含水量 2% 时, 加筋土的残余强度比未加筋土急剧增大, 与加筋导致膨胀土破坏模式的改变有关。

(4) 无侧限条件下, 含水量显著影响膨胀土峰值后强度的衰减, 含水量较小时, 其衰减值较大, 与不同含水量时的破坏模式吻合, 即低含水量时出现贯穿剪切面, 导致急剧的应变软化; 而较高含水量时, 试样呈侧向鼓胀, 未出现贯穿破坏面, 其应变软化程度较小。随加筋层数增多, 含水量对加筋土峰值后强度衰减的影响减小。

(5) 200kPa 围压下固结不排水剪表明, 未加筋土及加筋土的应力应变曲线均呈应变硬化型。从小于最优含水量 2% 增大到大于其 2%, 未加筋土及加筋土的峰值强度急剧减小, 加筋后峰值强度提高的数值减小; 而含水量对初始屈服应力的影响程度与加筋层数有关。

#### 参考文献:

- [1] 保华富, 龚涛. 土工格栅加筋碎石土的强度和变形特性[J]. 水利学报, 2001(6): 76-79.  
BAO Huafu, GONG Tao. The effects of reinforcement on strength and deformation of soil-gravel material[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(6): 76-79.
- [2] 魏红卫, 喻泽红, 尹华伟. 土工合成材料加筋粘性土的三轴试验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(5): 107-113.  
WEI Hongwei, YU Zehong, YIN Huawei. Triaxial shear tests on clayey soil reinforce with geosynthetics[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(5): 107-113.
- [3] 王琛, 雷运波, 刘浩吾等. 加筋红土大型三轴试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(4): 14-16.  
WANG Chen, LEI Yunbo, LIU Haowu. Large-scale triaxial tests on reinforced red soil[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition. 2003, 35(4): 14-16.
- [4] 赵川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 420-422.  
ZHAO Chuan, ZHOU Yitang. Experimental study on polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 420-422.
- [5] 雷胜友. 加筋黄土的三轴试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 1-5.  
LEI Shengyou. Study on reinforced loess by triaxial tests[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(2): 1-5.
- [6] 吴景海. 土工合成材料与土工合成材料加筋砂土的相关特性[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 538-541.  
Wu Jinghai. Behavior of geosynthetics versus geosynthetic reinforced sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 538-541.
- [7] 黄仙枝, 白晓红. 土工带加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 124-128.  
HUANG Xianzhi, BAI Xiaohong. Experimental study on geobelt reinforced gravel by largescale triaxial test[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 124-128.
- [8] 喻泽红, 魏红卫, 邹银生. 加筋红砂岩风化土强度和变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2770-2779.  
YU Zehong, WEI Hongwei, ZOU Yinsheng. Characteristics of shear strength and deformation of reinforced red sand silty clay with geosynthetics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2770-2779.
- [9] 彭芳乐, 平川大贵, 龙冈文夫, 等. 加筋砂土中土工格栅配置形状与刚性效果试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 604-609.  
PENG Fangle, HIRAKAWA Diki, TATSUOKA Fumio, et al. Experimental study on effects of geogrid reinforcement shape and rigidity in reinforced sand[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(5): 604-609.
- [10] 丁万涛, 雷胜友. 含水率对加筋膨胀土强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 391-394.  
DING Wantao, LEI Shengyou. Influence of water contents on strength of reinforced expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 391-394.
- [11] 石名磊, 徐飞, 饶建辉. 某合成材料粘性土加筋挡墙失稳原因分析[J]. 华东公路, 2000(1): 51-55.  
SHI Minglei, XU Fei, RAO Jianhui. Unstability causes of clay retaining wall reinforced with synthetic materials: A case study[J]. Huadong Road, 2000(1): 51-55.