含水率对不同加筋方式黄土强度的影响

彭淑君，谢婉丽，马 闫，王家鼎

（西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室，陕西 西安 710069）

摘 要：通过室内静三轴剪切试验，探讨了 3 种不同加筋方式和 5 种不同含水率作用下加筋黄土的强度特性。试验结果表明，在黄土中布筋能大幅度降低含水率变化对土体强度的影响；含水率相同时试样强度随加筋层数、围压的增大而增大；围压相同、加筋层数相同的试样强度随含水率的增大而明显减小，表明加筋黄土强度具有水敏感性，加筋黄土的水敏感性随加筋层数的增加有增强趋势；在一定含水率范围内，加筋土莫尔—库伦强度指标随含水率的增大而呈线性减小，内摩擦角的下降比黏聚力的下降更明显，在此基础上建立了加筋黄土抗剪强度与含水率之间的关系式，拟合关系较好。

关键词：三轴试验；加筋黄土；加筋方式；含水率；强度

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2013)04-0275-04 **中图分类号**：TU4

Influence of Moisture Content on Strength of Loess with Different Reinforcements

PENG Shu-jun, XIE Wan-li, MA Yan, WANG Jia-ding

(*Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi* 710069, *China*)

Abstract: A series of triaxial test were conducted to test three different reinforced methods and the strength characteristics of the reinforced loess with five different moisture contents respectively. The result indicated that the reinforcement could significantly reduce the influence of the moisture content on the strength of loess; the strength increased with the number of reinforcement layers and the strength of the ambient pressure when the moisture content kept the same, decreased with increase of the moisture content when the ambient pressure and number of the reinforcement kept the same, which demonstrated that the reinforcement loess was of water sensitive and the sensitivity became stronger with the number of the reinforcement layers. Within a certain moisture content limit, the strength index of Mohr—Coulomb decreased linearly with the increase of the moisture content and the internal friction angle reduced much more than the cohesion. Finally an equation was established to link the shear strength of the reinforcement loess and the moisture content, which were well matched.

Keywords: triaxial test; reinforced loess; reinforced methods; water contents; strength

众所周知，黄土是一种特殊土，具有大孔隙、遇水湿陷、强度多变等特点，在黄土地区大规模建设中如何防治这种特殊的岩土工程问题，始终备受关注。而加筋黄土不失为一种增加黄土强度的途径之一。加筋黄土就是在黄土体内部埋设抗拉强度较高的材料，使筋材的抗拉强度和黄土体的抗压强度结合起来，从而提高土体的整体强度、加强土体稳定性的一种土工复合体[1]。在 20 世纪 60 年代初由法国工程师 Henri[2] 提出后，因其具有可预制、柔性好、防震性能强、造价低、对变形适应能力强等特点，在世界大范围内迅速得到推广应用。目前国内外对加筋形式、加筋材料对加筋土强度的影响从室内到工程实践都进行了大量的研究，其中，国外的 Sawicki[3-4] 和 Leschinsky[5] 等对加筋后土体的力学性质、流变性等进行了研究；雷胜友[6] 通过研究涤纶布加筋土，认为加筋土强度随加筋层数增多而增加；谢婉丽[7] 针对土工格栅

收稿日期：2012-11-28 **修回日期**：2013-01-13

资助项目：国家自然科学基金项目“列车长持时振动引起高速铁路路基击实黄土振陷研究”(40972193)；国家大学生创新性实验计划(091069718)；国家基础理科人才培养基金(XDCX09-14)

作者简介：彭淑君(1990—)，女(汉族)，云南省昭通市人，硕士研究生，主要研究方向为黄土力学性质与工程应用。E-mail：780853980@qq.com。

通信作者：谢婉丽(1974—)，女(汉族)，陕西省大荔县人，副教授，主要研究方向为岩土体稳定及其数值模拟。E-mail：xiewanli@sina.com。

加筋土进行试验，认为在黄土试样中部加筋效果最好；丁万涛[8]等分析研究了土工格网加筋，认为等间距布筋更合适；马闫[9]等认为存在一个最优加筋位置和最优加筋间距。虽然对加筋土的研究已经非常广泛和深入，但目前对于加筋后黄土的水敏感性较原状黄土是否得到一定改善开展的研究较少。黄土是一种特殊的非饱和土，非饱和土的强度大于饱和土的强度，大多数强度公式，如著名的 Bishop 有效应力强度公式[10]和 Fredlund 的双应力变量强度公式[11]，都是建立在 Mohr—Coulomb 强度准则的基础上，都含有吸力项，反映基质吸力对土强度的影响。基质吸力主要是指土中的毛细作用，与土的饱和度或含水率有关，前人通过试验[12]研究并提出了它们之间的关系。即，对于同一种土体（土的化学组成、颗粒级配、干密度相同），土—水特征曲线是基本稳定不变的，吸力随饱和度的增加而减小。对于某一具体工程而言，土的化学组成、颗粒级配、干密度基本不变，相对而言，土体含水率变化对基质吸力及强度的影响更为显著。同时，凌华[13]、张茂花[14]等对非饱和土的研究也都表明，含水率对土体强度影响剧烈。骆以道[15]对压实填土抗剪强度研究表明，含水率变化对压实填土抗剪强度的影响是非常显著和不容忽视的。丁万涛等[16]研究发现，加筋后膨胀土的强度对含水率的变化比较敏感，筋材的加入削弱了膨胀土结构对其强度的影响。随着黄土地区加筋土工程应用的日益广泛，有必要研究含水率变化对加筋黄土强度的影响。本研究在室内试验的基础上，针对含水率变化对加筋黄土的强度影响进行了研究，以指导黄土地区加筋土工程建设。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验黄土取自西安市某工地。土体液限为 25.1%，塑限为 18.3%，塑性指数为 6.8，最优含水率为 14.3%，定名为粉土。加筋材料使用白色土工网，网格为正方形，网眼大小为 2 mm×2 mm，厚度为0.8 mm（图 1）。

1.2 试验方法

三轴试验采用不固结不排水试验方法，试验仪器为英国 GDS 高级动态三轴测试系统，该仪器具有动、静三轴和测试非饱和土各种试验指标的试验功能模块，可以非常精确地完成动态、静态和小应变三轴试验。本次试验采用静三轴模块，加载速率为 0.5 mm/min，试样直径 $D=7$ cm，高度 $H=14$ cm。

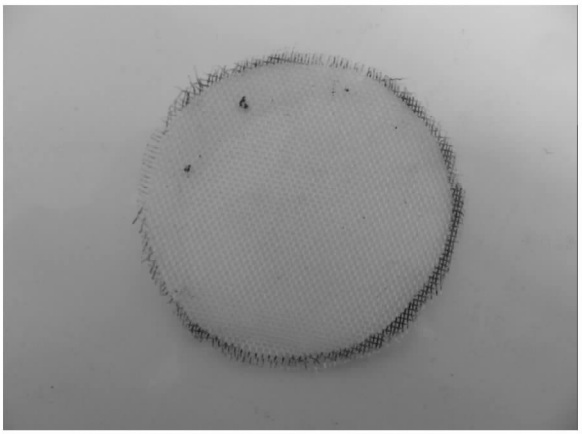


图 1 白色土工网

马闫等[9]利用 GDS 三轴测试系统对 13 种加筋方案下的黄土进行了试验研究。结果表明，黄土加筋存在一个最优的加筋位置，位于土样下 1/4 附近，并得到了 3 种不同层数 $N=1\sim3$ 的最优加筋方案。在此基础上，基于不同层数 $N=1\sim3$ 的最优加筋方案（图 2），先将风干黄土过 5 mm 的筛孔，采用分层击实法，将土样在相同的初始含水率（最优含水率 ω_{op}）下将土样压实到相同的干密度，密实度为 0.99，于分层处刮毛，在相应的加筋位置水平放置筋材。制成重塑样后分别采用烘干法和浸湿法，得到 5 组不同含水率（$\omega_{op}-2\%$，$\omega_{op}-1\%$，ω_{op}，$\omega_{op}+1\%$，$\omega_{op}+2\%$）的试样，进行 50，100，200，300 kPa 等 4 种围压下的静三轴压缩试验[17]。

同时用相同的方法制备不加筋的试样与之对比。加筋方案为：1 层筋加筋方案，即把 1 层筋材加在试样的下 3/4 处；2 层筋加筋方案，即分别把 2 层筋材加在试样的 1/2 处和下 3/4 处；3 层筋加筋方案，即分别把 3 层筋材加在试样的 1/4 处、1/2 处和 3/4 处（图 2）。

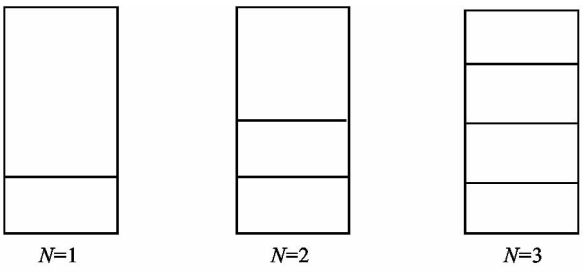


图 2 不同方案的加筋形式示意图

2 结果与分析

2.1 相同含水率的加筋试样强度与围压及加筋层数的关系

按照试验方法，共开展了 3 种加筋方式下 5 种不

同含水率的 80 组静三轴试验，图 3 为典型试验曲线，即三轴压缩试验的应力（σ_1—σ_3）—应变（ε）曲线。由图 3 可以看出，(1) 当轴向应变大于 3%时，在相同含水率、相同的围压下，加筋层数越多，黄土强度提高也就越大。(2) 在相同含水率、相同的加筋层数下，随着围压增大，土体强度越大。当轴向应变在 3%以内时，相同轴向应变下围压大的曲线的主应力差比围压小的低，说明在低围压小应变下筋材发挥作用更快。(3) 随着围压增大和加筋层数增多，低于最优含水率的土体应力应变关系曲线表现出由应变软化转化为应变硬化的趋势；高于最优含水率的土体应力应变关系曲线为应变硬化型。

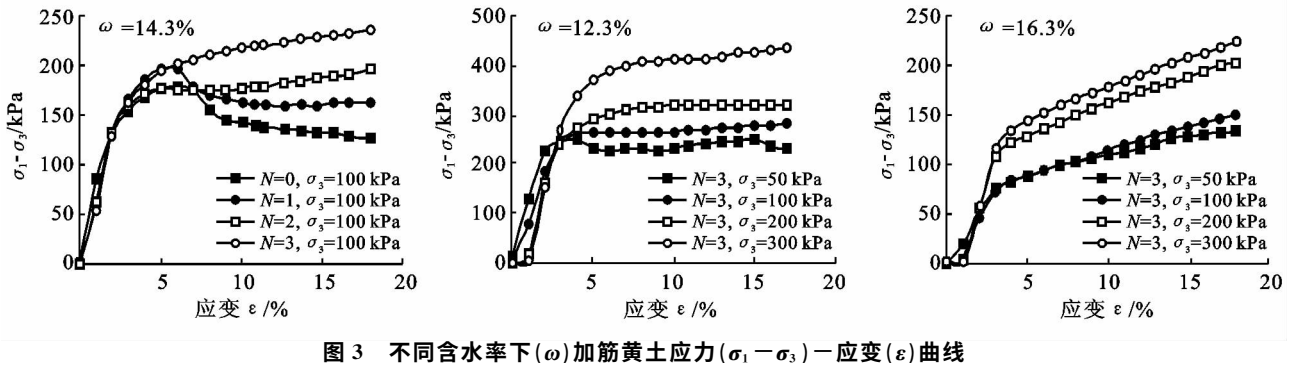


图 3　不同含水率下（ω）加筋黄土应力（$\sigma_1-\sigma_3$）—应变（ε）曲线

2.2　含水率对加筋黄土强度的影响

图 4 为不同加筋方式下试样抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与含水率 ω 之间的关系曲线。由表 1 和图 4 可知，相同含水率时，随着筋材层数增加，土体的黏聚力逐渐增大；内摩擦角表现出减小的趋势，但变化不大。这与国内外大量加筋土试验研究结果是一致的。分析黏聚力变化的原因为随着加筋层数的增多，加筋材料与土颗粒之间的摩擦作用和嵌固作用加强，使得土体黏聚力增大。不同含水率时，随着含水率增加，土体抗剪强度指标 c，φ 同时降低。含水率 ω 每变化 1%，不加筋试样强度指标 c 平均减少 20%，φ 平均减少 8%；加一层筋土体强度指标 c 平均减少 10%，φ 平均减少 11%；加二层筋土体强度指标 c 平均减少 9%，φ 平均减少 13%；加三层筋土体强度指标 c 平均减少 12%，φ 平均减少 13%。可以看出，对不加筋试样来说，含水率的增加对黏聚力的影响比对内摩擦角的影响大得多，而加筋黄土的内摩擦角对含水率的变化较黏聚力更为敏感，且随着加筋层数的增加，水敏感性有加强的趋势。在黄土中加入筋材可降低含水率变化对土强度的影响。

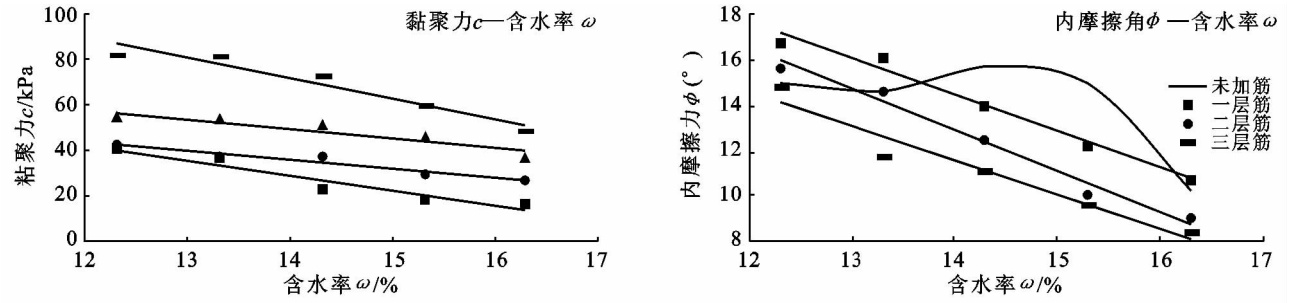


图 4　加筋黄土强度指标与含水率关系曲线

由图 4 中还可以看出，不加筋黄土试样黏聚力与含水率呈线性关系，内摩擦角则与含水率之间存在突变关系；加筋黄土的黏聚力和内摩擦角皆与含水率呈线性关系，且拟合关系较好。运用 Mohr—Coulomb 强度准则，通过拟合加筋黄土强度指标与含水率的关系曲线可得：

$$\tau=c+\sigma\tan\varphi$$

$N=1$ 时，$c=5.7A\times\omega+5.4B$，$\varphi=A\times\omega+B$

$N=2$ 时，$c=2.4A\times\omega+2.9B$，$\varphi=A\times\omega+B$

$N=3$ 时，$c=2.5A\times\omega+2.7B$，$\varphi=A\times\omega+B$

式中：τ——加筋土抗剪强度；A，B——试验参数，与加筋方式有关，可从试验中获得。

对于扰动土体，总黏聚力主要由基质吸力产生的吸附强度构成[16]，在非饱和土中随着含水率增加基质吸力减小，因此黄土的黏聚力对含水率变化十分敏感。又根据等效附加应力原理[18]，将加筋黄土中筋材的作用等效成附加应力沿筋的方向加在土骨架上，即相当于给土体施加了一组附加围压以提高土体强

度。因此在土体中布筋只是改变土体的力学性能，并不能从本质上改变土体的组成成分，加筋后的黄土随含水率增大吸力仍会下降，只是由于附加应力的作用，加筋黄土的吸力下降的不如未加筋试样那么明显，但抗剪强度同样降低，此时的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 是由筋材和土体共同作用表现。另外当含水率增大时，筋材层数越多的试样，聚集在筋材周围的水膜相对也越厚，一定程度上削弱了筋材对土体强度的贡献，但相比于不加筋试样，加筋黄土的抗剪强度仍然较大。

3 结 论

(1) 相同含水率时试样强度随加筋层数、周围压力的增大而增大；相同围压，相同加筋层数的试样强度随含水率的增大而明显减小，表明含水率对强度的影响较大。

(2) 含水率对黄土强度的影响非常显著且不容忽视。含水率的变化对黄土黏聚力的影响比对内摩擦角的影响更大。在黄土中加入筋材能大幅度降低含水率变化对土强度的影响。

(3) 在一定含水率范围内，加筋黄土强度指标随含水率的增大而线性减小，内摩擦角的下降比黏聚力的下降更明显，且加筋黄土的水敏感性随加筋层数的增加有增强趋势。

(4) 本次加筋黄土的室内三轴试验结果已在山西高速公路北张沟高填方坝中成功应用，对实际高填方加筋黄土墙的设计与施工有重要的参考价值，拟在黄土区高速公路、机场跑道等填方坝中加以应用，可望取得良好成果。

[参 考 文 献]

[1] 谢婉丽，王家鼎. 加筋黄土体稳定性分析[M]. 陕西 西安：陕西科技出版社，2006.

[2] 雷胜友. 现代加筋土理论与技术[M]. 北京：人民交通出版社，2006.

[3] Andrzej S, Marek K. Pre-failure behaviour of reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1994, 13(4): 213-230.

[4] Aadrzej S. Rheological model of geosynthetic-reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17(1): 33-49.

[5] Dov L, Volk J C, Reinschmidt A J. Stability of geotextile-retained earth railroad embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1986, 3(2/3): 105-128.

[6] 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.

[7] 谢婉丽，王家鼎，王亚玲. 加筋黄土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 地球科学进展，2004，19(S)：334-339.

[8] 丁万涛，雷胜友. 加筋膨胀土不同布筋型式三轴试验研究[J]. 岩土力学，2010，31(4)：1147-1150.

[9] Ma Yan, Xie Wanli, Peng Shujun. Study on Reinforced Scheme of Reinforced Loess by Triaxial Tests[C]. Inner Mongolia: 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011: 6147-6151.

[10] Bishop A W, Alpan I, Blight E, et al. Factors controlling the shear-strength of partly saturated cohesive soils [C] // University of Colorado: ASCE Conference on Shear of Cohesive Soils, 1960: 503-532.

[11] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. Shear strength of an unsaturated soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(2): 313-321.

[12] 王钊，骆以道，肖衡林，等. 运城黄土吸力特性的试验研究[J]. 岩土力学，2002，23(1)：51-54.

[13] 凌华，殷宗泽. 非饱和土强度随含水率的变化[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(7)：1499-1503.

[14] 张茂花，谢永利，刘保健. 增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J]. 岩土力学，2006，27(7)：1195-1200.

[15] 骆以道. 考虑饱和度的压实填土抗剪强度研究[J]. 岩土力学，2011，32(10)：3143-3147.

[16] 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.

[17] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京：中华人民共和国建设部，1999.

[18] 李广信，陈轮，蔡飞. 加筋土体应力变形计算的新途径[J]. 岩土工程学报，1994，16(3)：46-53.