

压实度对加筋土竖向变形影响的试验研究*

周芬[†],周智敏,杜运兴

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:采用两种土工格栅研究了圆柱体加筋土试样在无侧向约束条件下的压缩性能,通过单级加载/卸载的方式测试了压实度为85%,90%和100%的加筋试样的竖向变形规律.试验得到如下结论:1)提高压实度,可以有效增强加筋土抵抗变形的能力,使土体变形更快地进入稳定状态,且土体后期变形速度曲线也更加平缓;2)压实度对加筋土力学性能的影响与加筋材料的拉伸模量、筋土间的有效接触面积有密切的关系,拉伸模量较高的加筋材料对土体的约束更加有效.

关键词:加筋土;压缩试验;竖向变形;压实度

中图分类号:TU 411.5; TU 472.34

文献标志码:A

Experimental Study on Influence of Compaction Degree on Vertical Deformation of Reinforced Soil

ZHOU Fen[†], ZHOU Zhimin, DU Yunxing

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Compaction degree is an important factor that affects the mechanical property of reinforced soil. In this paper, two kinds of geogrids were adopted to study the compression performance of cylinder reinforced soil without lateral confinement. Through a single-stage loading/unloading way, the variation rules of vertical deformation for reinforced specimens with the compaction degree of 85%, 90%, and 100% were tested. The following conclusions can be drawn from the present study. 1) Improvement of the compaction degree effectively enhances the soil resistance to deformation, makes the soil deformation stable faster, and makes the velocity curve of deformation more smooth; 2) The impact of compaction degree on the mechanics performance of reinforced soil is closely related to the tensile modulus of reinforced materials and the effective contact area between reinforced materials and soil. Reinforced material with higher tensile modulus provides more effective restrain on the soil.

Key words: reinforced soil; compression test; vertical deformation; compaction degree

土体加筋技术是岩土工程领域应用于填方工程的填土增强技术.目前已经比较广泛地应用于公路、铁路、水利、港口和建筑工程中.加筋土中的加筋材

料通过与土体之间的相互作用提高土体的力学性能及减少土体的变形.

由于高速铁路、高等级公路的建设需求,工程中

* 收稿日期:2016-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378199, 51108174), National Natural Science Foundation of China(51378199, 51108174)

作者简介:周芬(1973-),女,湖北武汉人,湖南大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail:zhoufen@hnu.edu.cn

对加筋土结构的变形性能提出了更高的要求. 吴景海等^[1]对5种土工合成材料加筋砂土进行了三轴压缩试验,研究了其应力应变特性;Cai等^[2]采用三轴试验研究了聚丙烯纤维和石灰掺合料对黏土力学性能的影响. Jafari等^[3]研究了冻融条件下废轮胎帘线作为加筋材料和石灰掺合料应用于黏土的无侧限强度. WANG等^[4]采用三轴试验和数值仿真研究了玻璃格栅对加筋土的增强作用. 杜运兴等^[5]采用三轴试验对FRP加筋中砂进行了研究;胡幼常等^[6]对不同压实度和加筋层数的土工格栅加筋粉砂土进行了室内回弹模量试验,总结并分析了双向土工格栅加筋层的布设位置、加筋层数、土的压实度等对回弹模量的影响规律;郭小川等^[7]通过室内试验对格栅埋设于底部、中部和顶部等8种工况路堤模型进行竖向加载,对比分析了各工况的总沉降量. 杜运兴等^[8-9]对FRP加筋中砂模型路堤和加筋黏土路堤进行了试验研究,获得了变形情况. Hejazi等^[10]对天然材料和合成材料应用于加筋土的力学性能进行了比较.

加筋土结构选用无黏性填料填筑,其力学性能通常较好. 受取材的限制,国内很多工程采用黏性土作为加筋土工程的填料. 由于黏性土自身性质的复杂性,所填筑的加筋土结构性能更为复杂,其中该体系的变形性能直接影响着这种技术的应用,因此,需要对该体系的变形性能进行研究,特别是随时间的变形发展规律.

本文以两种国内常用的土工合成材料(聚丙烯双向拉伸塑料土工格栅、玻璃纤维土工格栅)为加筋材料,采用无侧限的压缩试验研究压实度对竖向变形的影响,主要目的是研究不同压实度下加筋材料对试件的约束作用. 如果采用有侧限的试验,加筋材料对填料的约束作用得不到发挥,竖向变形主要表现为孔隙率的改变. 通过对圆柱体加筋土试样进行单级加载/卸载的方式探讨不同加筋情况和压实度情况下土体的变形规律,重点关注土体变形随时间的变化情况,分析了其影响机理. 本研究结果有助于进一步认识加筋土的竖向变形规律及其影响机理,对加筋土工程的变形沉降控制具有指导意义.

1 试验设计与方法

1.1 试验装置

试验采用图1所示的加载测试装置,钢梁固定在距离地面1.5 m高度的支墩上. 试样为圆柱体,

其直径为220 mm,截面积为 380.13 cm^2 ,高度为100 mm. 图2、图3是试验装置现场实况图.

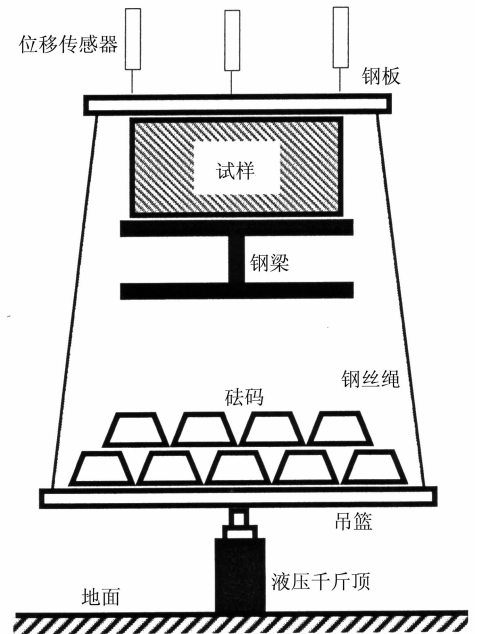


图1 加载测试装置示意图

Fig. 1 Diagram of loading test device

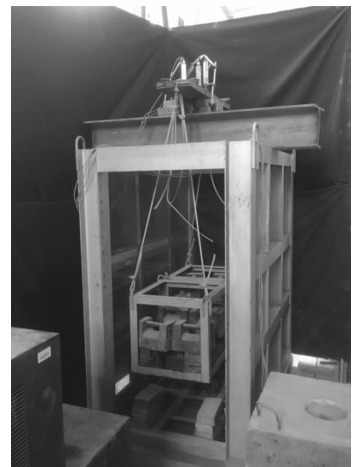


图2 试验装置现场实况图 I

Fig. 2 Apparatus diagram I of test site

1.2 试验材料

加筋材料采用聚丙烯双向拉伸塑料土工格栅(以下简称“塑料格栅”)和玻璃纤维土工格栅(以下简称“玻纤格栅”),物理参数如表1、表2所示. 依据试样的尺寸将其统一裁剪成直径为215 mm的圆形规格,加筋材料布置在试样的中间平面.

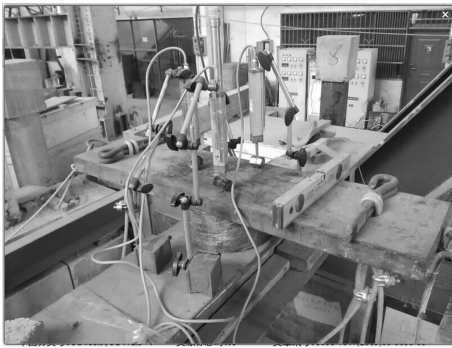


图 3 试验装置现场实况图 II

Fig. 3 Apparatus diagram II of test site

表 1 塑料格栅的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of plastic grid

网格尺寸 /mm×mm	2%伸长率时的 拉伸强度 /(kN·m ⁻¹)	拉伸强度 /(kN·m ⁻¹)	标称伸长率 /%
40×40	15.27	26.81	4.47

表 2 玻纤格栅的物理参数

Tab. 2 Physical parameters of glass fiber grid

网格尺寸 /mm×mm	断裂强度 /(kN·m ⁻¹)	断裂伸长率 /%
19×19	80.20	1.66

试验用土为加筋土工程常见的黏土,其基本物理力学指标如表 3 所示。

表 3 黏土的基本物理力学指标

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of clay

土粒相对密度 <i>d_s</i>	液限 /%	塑限 /%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最佳含水量 /%
2.68	43.1	24.9	1.59	27.90

1.3 试验方法

采用单因素法设计试验,研究加筋情况和压实度对加筋土压缩特性的影响,设计 9 种试验工况。加筋试样内仅布置一层加筋材料,试样外围用 PE 塑料膜包裹,近似于无侧向约束情况,采用统一的加载(单级加载/卸载)和测试方式。

依据不同的压实度要求,通过计算,设定 3 种分层击实方法,具体见表 4。试验土样采用《公路土工试验规程》^[11] 规定制备。所有试样的含水率均为 25%。依据各工况的需要,先在击实器侧模上标示出各层分界线,依次分层加入土样,每层土样的质量和分层数目见表 4,每层击实到对应层分界线的高度,各层接触面用小刀刨毛。对于加筋试样,则在试样中间界面刨毛后布置加筋材料。击实完成后,用推土器

推出试样,并用 PE 塑料膜将试样紧密包裹,增强试样的整体性,防止土粒脱落。图 4 为试样制备过程,图 5 为制作成型的试样。

表 4 试验工况

Tab. 4 Test cases

试样编号	压实度/%	加筋情况	分层击实要求
①	85	素土	1 070g×6 层
②	85	玻纤格栅	1 070g×6 层
③	85	塑料格栅	1 070g×6 层
④	90	素土	1 132g×6 层
⑤	90	玻纤格栅	1 132g×6 层
⑥	90	塑料格栅	1 132g×6 层
⑦	100	素土	944g×8 层
⑧	100	玻纤格栅	944g×8 层
⑨	100	塑料格栅	944g×8 层



图 4 试样制备过程

Fig. 4 Process of specimen preparation



图 5 制作成型的试样

Fig. 5 Test piece

依据试样的截面积大小以及加载需求,在吊篮内添加规定质量的砝码,并通过液压千斤顶提前将吊篮支撑起来,确保在试样上方安装钢板时,试样不受吊篮重物的影响。试样制备完成后,将试样安装在钢梁的指定位置,并根据试样的位置,将钢板居中安装在试样上方,利用钢板上水平尺监测其水平度,确保加载过程中试样受力平衡。

在钢板上对应于试样边界的圆周上,等距布置3个位移传感器,用于记录试样的轴向变形.试验结果取3个位移测试点的平均值,任一测试点的测试结果与它们的平均值误差超过5%时,加载终止,试验结果不能用于最后的分析.

试样和测试仪器安装完成后,启动位移传感器的记录仪(记数频率:1 Hz),测试记录全过程试样的轴向应变.打开液压千斤顶的回油阀,重物缓慢加载到试样上,使试样所受压力达到200 kPa,加载时间持续24 h.加载24 h后,用千斤顶将吊篮提升,使重物从试样上卸载,卸载后36 min结束试验.

2 试验数据分析

2.1 加载后轴向应变分析

加载后36 min和加载后24 h各工况试样的轴向应变值如表5所示.由表可知:

表5 单级加载/卸载下加筋土轴向应变

Tab. 5 Axial strain of reinforced soil under single-stage loading / unloading

试样编号	压实度/%	加筋情况	(a)加载后36 min 轴向应变/%	(b)加载后24 h 轴向应变/%	(c)卸载后36 min 轴向应变恢复量/%	(a) (b) /%	(c) (b) /%
①	85	素土	11.68	12.35	0.80	94.57	6.48
②	85	玻纤格栅	7.28	8.21	0.57	88.67	6.94
③	85	塑料格栅	10.83	12.01	0.97	90.17	8.08
④	90	素土	8.72	9.53	0.84	91.50	8.81
⑤	90	玻纤格栅	4.95	5.88	0.61	84.18	10.37
⑥	90	塑料格栅	5.44	6.18	0.87	88.03	14.08
⑦	100	素土	5.18	6.16	0.54	84.09	8.77
⑧	100	玻纤格栅	2.78	2.94	0.26	94.56	8.84
⑨	100	塑料格栅	4.33	5.10	0.53	84.90	10.39

3)相对于同种压实度情况下素土的轴向应变值,各加筋试样的轴向应变减小幅度见表6.压实度、加筋情况对试样轴向应变的影响程度不一样,从表6可以得出以下趋势:压实度越大,加筋后试样的轴向应变降幅也越大.这说明提高压实度可以更充分地发挥加筋材料的约束作用,可以更有效地控制

表6 加筋试样轴向应变降幅比较

Tab. 6 Comparison of axial strain for different test pieces

试样编号	压实度/%	加筋情况	36 min 轴向 应变降幅 /%	24 h 轴向 应变降幅 /%
②	85	玻纤格栅	37.67	33.52
③	85	塑料格栅	7.28	2.75
⑤	90	玻纤格栅	43.23	38.30
⑥	90	塑料格栅	37.61	35.15
⑧	100	玻纤格栅	46.33	52.27
⑨	100	塑料格栅	16.41	17.21

1)在任意压实度情况下,加筋试样的轴向应变值均小于素土,玻纤格栅试样的轴向应变值小于塑料格栅试样.这说明加筋材料能够增强土体抵抗变形的能力.对于不同种类的加筋材料出现的差别,主要由于以下两个方面:一是玻纤格栅的拉伸模量比塑料格栅的拉伸模量大,使得玻纤格栅试样抵抗变形的能力更强;二是玻纤格栅的网格比塑料格栅的网格更密集,玻纤格栅和土体有更多的有效接触面,增强了其对土体的约束作用.

2)不论是素土还是加筋试样,压实度的提高均能有效地减小试样的轴向应变,增强试样抵抗变形的能力.对于素土,压实度越大,说明其内部土颗粒间的紧密程度越高,要使其内部土颗粒发生错动也越难;对于加筋试样,除了前述原因外,压实度的提高还能够增强筋土间的摩擦作用,从而增强了加筋材料对土体的约束.

加筋土的变形,控制加筋土工程填料的压实度具有非常积极的意义.

2.2 卸载后36 min 轴向应变恢复量分析

由表6可知:卸载后36 min试样的轴向应变均有不同程度的恢复.

从绝对值的角度而言,在同种压实度情况下,素土和塑料格栅试样的恢复值基本一致,而玻纤格栅试样的恢复值明显小于前述两者.这是由于素土在受压后的总变形量大,因此卸载后恢复量大;而塑料格栅试样在受压后的总变形量比素土小,但受压时,其内部加筋材料(塑料格栅)发生了受拉变形,所受的外荷载消失之后,加筋材料的变形也会恢复,在筋土界面就会对土体产生指向圆心的作用力,增大了土体的变形恢复量.玻纤格栅的拉伸模量比塑料格栅的大,同等受力情况下,玻纤格栅卸载后恢复的变形量远小于塑料格栅,所以玻纤格栅试样卸载后的

轴向应变恢复量较小。

卸载后 36 min 轴向应变恢复量与加载后 24 h 轴向应变的比值则是从相对值的角度评价各工况试样卸载后的变形恢复,素土和玻纤格栅试样的比值较为接近,而塑料格栅试样的比值则明显高于前述两者,也归因于塑料格栅在试样卸载后产生的可恢复变形导致了试样轴向应变恢复量的增加。

2.3 轴向应变与时间关系曲线分析

试验使用的高速数据记录仪每间隔 1 s 采集一次位移数据,加载后 100 s 内,试样轴向应变变化较为明显,100 s 后变化非常缓慢。以 $\lg t_2 - \lg t_1 = 0.1$ 为

间隔提取部分数据,在半对数坐标系中绘制试样轴向应变与时间关系曲线,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出:

1)若不考虑加载速度(千斤顶回油速度)的影响,各工况试样的曲线走势基本一致,前期的轴向应变变化大,后期越来越稳定,在半对数坐标系中,各工况下试样轴向应变与时间关系曲线在 100 s 后基本呈现直线状态。

2)各工况试样在达到某一应变值之后,其轴向应变与时间关系曲线即由急剧变化段进入平缓上升阶段,我们将此应变值称为该工况的临界应变值。

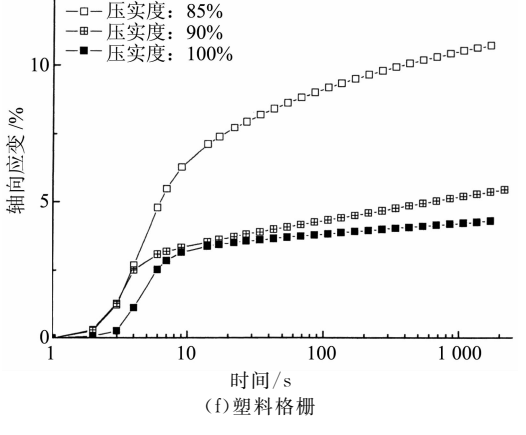
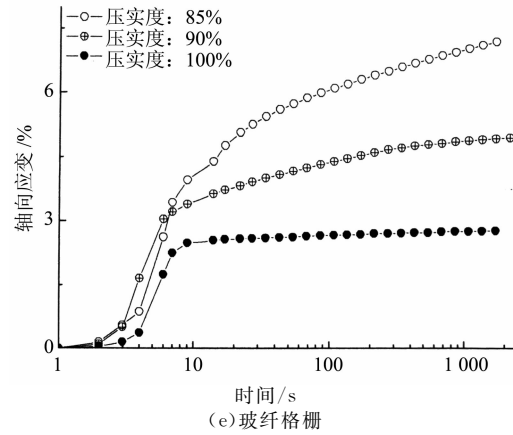
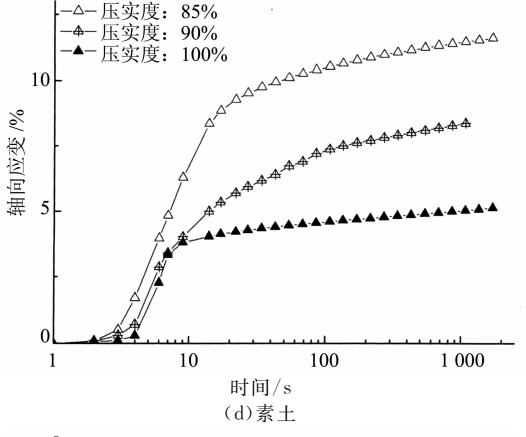
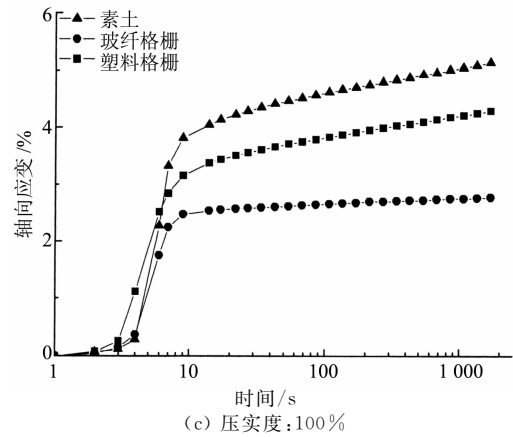
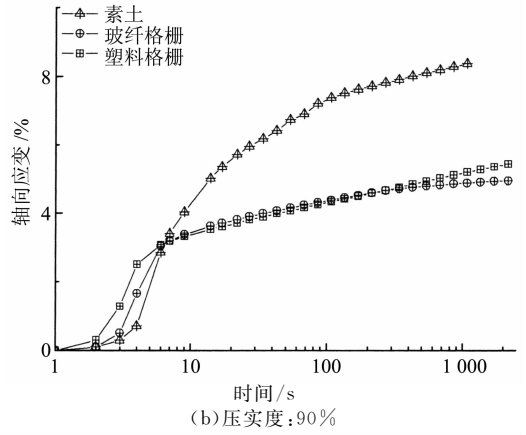
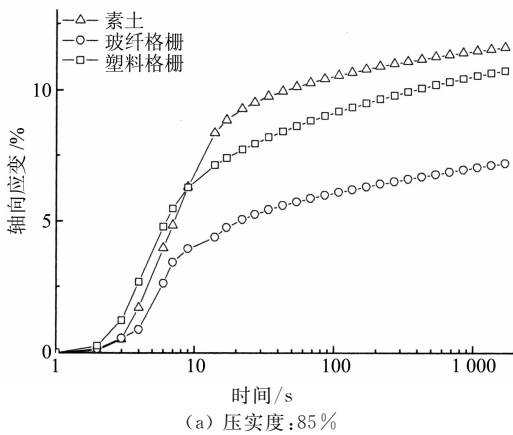


图 6 单级加载下加筋土轴向应变与时间关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of axial strain and time for reinforced soil under single stage loading

各工况的临界应变值如表7所示. 临界应变值的大小表示试样进入稳定受力变形状态所需要达到的应变程度, 临界应变值越小, 说明试样受力后越容易达到稳定状态. 从表7可知: 对试样进行加筋、提高压实度, 均能显著提高试样的稳定性, 不同加筋材料的加筋效果有一定差别, 玻纤格栅的加筋效果比塑料格栅的更好.

3) 在试样受压的初期, 各工况试样的曲线吻合度较高, 达到某一应变值之后, 各工况曲线才出现明显的分化, 这说明加筋材料需要试样达到一定变形程度才能发挥作用, 和文献[12]得出的结论一致.

表7 各工况试样的临界(轴向)应变值
Tab.7 Critical axial strain of different test specimens

试样编号	压实度/%	加筋情况	临界应变值/%
①	85	素土	8.86
②	85	玻纤格栅	3.43
③	85	塑料格栅	6.28
④	90	素土	7.22
⑤	90	玻纤格栅	3.04
⑥	90	塑料格栅	3.09
⑦	100	素土	3.82
⑧	100	玻纤格栅	2.48
⑨	100	塑料格栅	3.16

4) 在受压的初期, 试样的轴向应变会急剧增加, 这一阶段的轴向应变与时间关系曲线在半对数坐标系中近似直线, 通过对该段曲线进行线性拟合, 求得拟合后直线的斜率如表8所示. 该直线斜率的大小表示试样在受荷后变形的快慢, 斜率越小, 变形越慢. 从表8可知: 在同等受力条件下, 加筋试样的变形发展速度明显比素土试样慢, 加筋有利于试样减缓变形速度, 具有更高的抵抗变形能力.

5) 通过对比图6(a)~(c)可以发现: 压实度为100%的工况曲线明显比其他低压实度工况更加平直, 而且其平直段起点更加靠前. 说明提高压实度, 可以使土体变形更早进入变形稳定状态.

表8 各工况试样轴向应变及时间拟合直线的斜率
Tab.8 The slopes of axial strain and time for different load cases

试样编号	压实度/%	加筋情况	斜率
①	85	素土	12.03
②	85	玻纤格栅	10.41
③	85	塑料格栅	7.87
④	90	素土	12.21
⑤	90	玻纤格栅	8.40
⑥	90	塑料格栅	7.23
⑦	100	素土	12.26
⑧	100	玻纤格栅	7.76
⑨	100	塑料格栅	7.54

2.4 $t=1\ 072\ s$ 轴向应变变化速度分析

由图6可知, 在半对数坐标系中, 各工况下试样轴向应变与时间关系曲线在100 s后基本呈现直线状态. 为了对比各工况轴向应变变化速度, 本文选取各工况在 $t=1\ 072\ s$ 点处曲线斜率(见表9)进行分析.

1) 在压实度较小(85%)的情况下, 素土的斜率最小, 玻纤格栅的次之, 塑料格栅的最大, 说明 $t=1\ 072\ s$ 时素土的轴向应变变化速度比加筋试样缓慢, 抵抗变形能力更强. 造成这种现象的主要原因有两方面, 一方面, 压实度较小的素土试样经历较大的轴向变形后, 其土颗粒靠拢挤紧, 土孔隙体积减小, 抵抗变形的能力随之提高; 另一方面, 加筋材料对土体的约束作用主要通过其与土体的摩擦阻力发挥, 在压实度较小的情况小, 筋土间的摩擦作用比较难以体现.

2) 在压实度较大(90%和100%)的情况下, 玻纤格栅的斜率最小, 塑料格栅的次之, 素土的最大, 说明 $t=1\ 072\ s$ 时加筋试样的轴向应变变化速度比素土缓慢, 加筋材料能够增强土体抵抗变形的能力, 减少土体的变形; 玻纤格栅对土体的约束作用比塑料格栅更加明显.

3) 对于加筋试样, 压实度越大, $t=1\ 072\ s$ 轴向应变变化速度也越小, 这表明压实度的提高能够进一步增强加筋材料对土体的约束作用, 使得其拥有更强的抵抗变形能力.

表9 轴向应变与时间关系曲线 $t=1\ 072\ s$ 点处斜率
Tab.9 The slopes of axial strain and time at $t=1\ 072\ s$ for different load cases

试样编号	压实度/%	加筋情况	斜率
①	85	素土	2.85×10^{-4}
②	85	玻纤格栅	3.49×10^{-4}
③	85	塑料格栅	4.31×10^{-4}
④	90	素土	4.09×10^{-4}
⑤	90	玻纤格栅	9.96×10^{-5}
⑥	90	塑料格栅	3.26×10^{-4}
⑦	100	素土	1.63×10^{-4}
⑧	100	玻纤格栅	1.81×10^{-5}
⑨	100	塑料格栅	1.40×10^{-4}

3 结 论

本文采用无侧限土试样的压缩试验获得了如下结论:

1) 压实度是影响加筋黏土竖向变形的重要因素. 提高压实度, 可以有效地增强加筋土抵抗变形的

能力,不仅能减小土体的总变形量、使土体变形更快地进入稳定状态,而且土体变形速度曲线也更加平缓。

2)在土体中布置加筋材料能够提高土体抵抗变形的能力,加筋材料的拉伸模量、筋土间的有效接触面积和土体压实度对加筋效果有重要影响,加筋材料对土体实际提供的摩阻力大小决定着加筋效果的发挥。压实度的提高可以使加筋材料的约束作用更充分地发挥出来,可以更有效地控制加筋土的变形。

3)素土和加筋土在压缩过程中的轴向应变-时间曲线变化趋势相同,经历一定时间后,它们的轴向应变与时间对数基本呈现线性关系。

4)土体卸载后会产生一定的变形恢复,增大加筋材料的拉伸模量、提高土体的压实度均能减小土体卸载后的变形恢复。

参考文献

- [1] 吴景海,王德群,陈环.土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(2):199-204.
WU Jinghai, WANG Dequn, CHEN Huan. Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 199-204. (In Chinese)
- [2] CAI Yi, SHI Bin, NG C W W, *et al.* Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil[J]. Engineering Geology, 2006, 87(3/4): 230-240.
- [3] JAFARI M, ESNA-ASHARI M. Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition[J]. Cold Regions Science & Technology, 2012, 82(8): 21-29.
- [4] WANG Qingbiao, ZHANG Cong, WEN Xiaokang, *et al.* Development and properties of glass fiber reinforced plastics geogrid[J]. Journal of Wuhan University of Technology; Material Science, 2015, 30(3): 520-527.
- [5] 杜运兴,尚守平,周芬. CFRP加筋中砂的试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2005, 32(6): 28-31.
DU Yunxing, SHANG Shouping, ZHOU Fen. Experimental study of medium sand reinforced with CFRP[J]. Journal of Hunan University; Natural Sciences, 2005, 32(6): 28-31. (In Chinese)
- [6] 胡幼常,邓伟,林汉清,等.双向土工格栅加筋土回弹模量试验研究[J].岩土力学,2008,29(3):759-763.
HU Youchang, DENG Wei, LIN Hanqing, *et al.* Experimental study on resilient modulus of soil reinforced by biaxial geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 759-763. (In Chinese)
- [7] 郭小川,刘德富,肖衡林.新型土工格栅加筋土路堤模型试验研究[J].湖北工业大学学报,2014,29(2):5-9.
GUO Xiaochuang, LIU Defu, XIAO Henglin. Model tests on geogrid reinforced embankment[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2014, 29(2): 5-9. (In Chinese)
- [8] 杜运兴,龙述尧,尚守平.预应力加筋中砂路堤模型静力试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2008,35(2):27-30.
DU Yunxing, LONG Shuyao, SHANG Shouping. Static model-test study on reinforced medium-sandy embankment with prest [J]. Journal of Hunan University; Natural Sciences, 2008, 35(2): 27-30. (In Chinese)
- [9] 杜运兴,刘新军,尚守平,等.预应力CFRP加筋粘土路堤模型试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2007,34(7):6-10.
DU Yunxing, LIU Xinjun, SHANG Shouping, *et al.* Model test study of clay embankment reinforced by prestressed CFRP [J]. Journal of Hunan University; Natural Sciences, 2007, 34(7): 6-10. (In Chinese)
- [10] HEJAZI S M, SHEIKNZADEH M, ABTAHI S M, *et al.* A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers[J]. Construction & Building Materials, 2012, 30(5): 100-116.
- [11] JTG E40-2007 公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2007.
JTG E40-2007 Test methods of soils for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (In Chinese)
- [12] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的室内三轴试验研究[J].岩土力学,2007,28(10):2041-2045.
CHEN Changfu, LIU Huaixing, LI Yaping. Study on grass-roots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041-2045. (In Chinese)