

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S2.029

含盐量与布筋方式对纤维加筋土抗压性能的影响

魏 丽¹, 柴寿喜², 姜宇波³

(1. 天津城建大学 理学院 天津 300384; 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室 天津 300384;
3. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384)

摘 要: 纤维与石灰粉煤灰加筋固化土的抗压性能受到含盐量与纤维布筋方式的影响。选择 9 个含盐量 (0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%、5.5%、7%、8.5% 和 10%) 和 6 种布筋方式 (试样整体、上 1/3、上 1/2、中 1/3、下 1/2 和下 1/3), 开展固化土与加筋固化土的无侧限抗压试验。试验结果表明, 随含盐量的增加, 固化土及纤维加筋固化土的抗压强度与破坏应变先减小后增大, 临界含盐量为 7% 左右; 纤维位于试样的中 1/3 处时抗压强度最大, 试样整体、下 1/2、上 1/2、下 1/3 与上 1/3 处布筋时抗压强度依次减小; 固化土与纤维加筋固化土的应力-应变关系均为应变软化型; 试样整体布筋时, 土的抗变形性能最优。纤维加筋作用可抵消高含盐量引起的盐胀与吸湿软化对固化土抗压性能的破坏。选择试样整体布筋或中部布筋时, 加筋效果更为显著。

关 键 词: 加筋土; 聚丙烯纤维; 抗压强度; 含盐量; 布筋方式

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 增 2-0210-07

Effects of salt content and reinforcement mode on compression properties of fiber reinforced stabilized soil

WEI Li¹, CHAI Shou-xi², JIANG Yu-bo¹

(1. School of Science, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300381, China;

2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300381, China;

3. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The compressive strength of the fiber-lime-fly ash-saline soil is affected by the salt contents and reinforcement modes. Unconfined compressive tests are conducted on lime-fly ash-saline soil and fiber-lime-fly ash-saline soil in the condition of nine salt contents (0.5%, 1.5%, 2.5%, 3.5%, 4.5%, 5.5%, 7.0%, 8.5% and 10%) and six reinforcement modes (the whole sample, the top 1/3, the top 1/2, the middle 1/3, the bottom 1/2 and the bottom 1/3 of sample). The results show that both the compressive strength and the failure strain increase with increasing salt content which is less than 7%, and decreases with increasing salt content which is more than 7%. When the fibers are added to the middle 1/3 of the sample, the compressive strength is the largest, which is reduced to the whole, the bottom 1/2, the top 1/2, the bottom 1/3 and the top 1/3 of sample. The compressive strength is basically the same when the reinforcement mode is the bottom 1/2 and the top 1/2, and that of the reinforcement modes is the bottom 1/3 and the top 1/3. The All stress-strain curves of lime-fly ash-saline soil and fiber-lime-fly ash-saline soil are strain softening. The soil has the best deformation resistance when the sample is reinforced entirely. Fiber reinforcement can counteract the damage caused by salt expansion and moisture absorption softening of solidified soil due to high salt content. The deformation resistance of fiber-lime-fly ash-saline soil is best when the whole sample is reinforced fibers.

Keywords: reinforced soil; polypropylene fiber; compressive strength; salt content; reinforcement modes

1 引 言

滨海地区四季分明, 日照强烈, 全年降水量大

且不均匀, 地下水位高等气候和环境地质, 长期遭受海水浸渍与海岸退移的影响, 在蒸发与毛细作用下水中盐分凝聚于地表或地表以下的浅层土中反复

收稿日期: 2017-09-01

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (No. 17JCYBJC22200, No. 17JCZDJC39200); 天津市科技支撑计划项目 (No. 15ZXCXSF00070)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of Tianjin (17JCYBJC22200, 17JCZDJC39200) and the Key Technologies R & D Program of Tianjin (15ZXCXSF00070).

第一作者简介: 魏丽, 女, 1979 年生, 博士研究生, 副教授, 从事滨海盐渍土的改性固化与加筋研究。E-mail: weilili_79@126.com

经历积盐与洗盐的过程。土中盐的相态与含量随水分与温度的变化而改变^[1-2], 通常以溶液、晶体或两者皆有的形式存在。含盐成分以 NaCl 为主, 孔隙水中含有大量的 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等可溶盐离子^[3], 在土-水-电解质系统的相互作用下具有盐胀、溶陷、腐蚀及吸湿软化等工程特性, 影响道路工程的稳定性与耐久性。

工程中采用石灰、水泥、粉煤灰、液体固化剂等对土进行固化, 或铺设土工格栅、掺加纤维材料以提高土的力学性能^[4-6]。滨海盐渍土对水泥具有一定的腐蚀性, 铺设土工材料使土具有成层性, 易产生分界面, 选用石灰和粉煤灰作固化材料, 同时掺加抗拉强度高且耐腐蚀的聚丙烯纤维, 可以提高土的强度和抗变形性能^[7-8]。

纤维与石灰粉煤灰加筋固化滨海盐渍土的力学性能主要受土的性质, 包括土的含水率、干密度、含盐量、固化材料掺量等和加筋条件, 包括质量加筋率、纤维长度、布筋方式等两方面因素影响。

固化土的强度随含水率的增加而减小, 随干密度的增加而增大, 在一定范围内随固化材料掺量的增加而增强, 这些结论都已达成共识^[9-11]。土中盐对其力学性能影响较为复杂, 改变含盐量和含盐成分, 土的强度与抗变形性能差异较大。刘威等^[12]对罗布泊地区的盐渍土进行三轴剪切试验, 获得了硫酸盐渍土和氯盐渍土在不同干密度条件下的剪切变形和体积变形的变化特征。程寅等^[13]利用无侧限抗压试验、XRD、EDXA 等试验, 研究了碱矿渣固化氯盐渍土的强度变化机制, 证实固化土强度随 Cl 含量的增加而增大, 碱矿渣与氯盐渍土共同作用生成水化产物填充于孔隙中, 提高了固化土的强度。陈炜韬等^[14]分析了不同含盐量和含水率条件下氯盐渍土抗剪强度的变化规律, 认为在含水率达到一定量时, 随 CaCl_2 含量的增加, 氯盐渍土的抗剪强度先减小后增大, 存在一个临界含盐量(为 10.36%)。储诚富等^[15]开展不同含盐量水泥固化土的无侧限抗压试验, 得到临界含盐量为 3.5%。

纤维加筋土的研究多集中于纤维的质量加筋率(纤维与干土的质量比)和纤维长度对土的强度与抗变形性能的影响^[16-18], 而纤维的布筋方式对土的力学性能及筋土作用的影响研究相对较少。李献民等^[19]借助有限元数值仿真计算方法, 研究加筋层数与加筋位置对软土路基力学性能、变形特性的影响。李丽华等^[20]开展了轮胎加筋土结构模型试验, 探讨了不同布筋方式条件下废旧轮胎加筋边坡的应力场特性、变形特性及破坏模式, 认为加筋路堤中

轮胎层距离加载板越近、轮胎加筋层间距越小, 则路堤的沉降越小。李敏等^[21]利用三轴压缩试验, 研究在试样整体、上部和下部 3 个位置的麦秸秆加筋石灰土的抗剪强度特性, 认为布筋方式对加筋土的内摩擦角影响较小而对黏聚力的增长影响较大, 麦秸秆位于试样下部时更能发挥其加筋作用。

在获得纤维与石灰粉煤灰加筋固化土的最适宜加筋条件的基础上^[22], 考虑到干燥路堤的上部土受力大、下部土受力小, 滨海地区的毛细水上升高度大, 下部土体强度和抗变形能力降低, 纤维加筋固化土可用于路基地部、路基中、路床层、路面结构层的底基层等不同位置, 本次设置了 6 种布筋方式即试样整体、上 1/3、上 1/2、中 1/3、下 1/2 和下 1/3, 完成了 9 个含盐量(0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%、5.5%、7%、8.5%和 10%)条件下石灰粉煤灰固化土(以下称固化土)、纤维与石灰粉煤灰加筋固化土(以下称加筋固化土)的抗压试验, 研究含盐量与布筋方式对固化土抗压性能的影响。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

试验用土取自天津滨海新区, 为粉质黏土, 由重型击实试验获得土的最优含水率与最大干密度, 土的物理性质指标见表 1。将土风干碾碎, 过 2 mm 筛后备用。

表 1 盐渍土的物理性质指标
Table 1 Physical properties of saline soil

含盐量 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	最优含 水率/%	最大干密度 /(g/cm ³)	风干含 水率/%
3.5	30.9	19.4	11.5	15	1.92	2.5

生石灰粉的有效钙镁成分含量为 70%, 过 2 mm 筛。粉煤灰主要氧化物组成, 包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 CaO 等。二级粉煤灰过 2 mm 筛。聚丙烯纤维直径为 0.02~0.048 mm, 抗拉强度大于等于 350 MPa。试验用盐为海水晒盐, 其离子成分与含量与土中盐分的离子含量基本相同。

2.2 含盐量与离子含量测试

(1) 含盐量

电导法与残渣烘干法相结合测试盐渍土的含盐量, 电导仪型号 LTDS-81, 电极常数为 1.088。电导率小于 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 为非盐渍土。

取风干土 5 g, 按土与水 1:5 的比例配制溶液, 搅拌均匀, 静置 12 h, 取上层清液, 将电极插入到清液中, 读取电导率值。5 次清洗后清液的电导率

小于 $1\,000\ \mu\text{s}/\text{cm}$ 。将所有清液倒入锥形瓶中加热蒸发, 蒸干后称取残渣质量, 计算含盐量为 3.5%。

(2) 离子含量

使用美国戴安公司生产的 ICS-1500 型离子分析仪测试盐分中的离子含量, 其中阳离子包括 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 阴离子为 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 。计算出每 100 g 土中的阳离子与阴离子的含量见表 2。依据公路路基设计规范^[23]判定为中等氯盐渍土。

表 2 盐渍土中盐分的离子含量
Table 2 Ions content of salt in saline soil

离子	Cl^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
含量/g	1.56	0.02	0.46	0.08	0.95	0.24	0.10	0.09

2.3 不同含盐量试样制备条件与方法

2.3.1 试样制备条件

试样直径为 61.8 mm、高 125 mm。以最优含水率为 15% 为基准, 上下各浮动 2%, 即 13%、15% 和 17%。干密度为 $1.84\ \text{g}/\text{cm}^3$ (96% 压实度)。质量加筋率为 0.2%, 纤维长度为 19 mm, 整体加筋。石灰掺量为 6%, 粉煤灰掺量为 12%。含盐量为 0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%、5.5%、7%、8.5% 和 10%。

2.3.2 试样制备方法

按照含盐量测试方法, 洗盐 5 次后将湿土置于温度为 $105\ ^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干, 然后用球磨机磨碎, 过 2 mm 筛。

依据 9 个含盐量分别计算盐的质量, 按 13%、15% 和 17% 的含水率称量所需水的质量, 将盐溶解于水中, 盐水喷洒于土料中, 浸润一昼夜。制样前, 在石灰与粉煤灰中添加一定质量的盐水 (干石灰质量的 30%), 然后立即与土拌合, 再将聚丙烯纤维与土料拌合均匀。

采用双向静力压实法制备试样, 在恒温恒湿养护箱中 (温度 $(20\pm 2)\ ^\circ\text{C}$, 湿度为 95%) 养护 28 d。

2.4 不同布筋方式试样制备条件

本次试验含水率为 15%, 干密度为 $1.84\ \text{g}/\text{cm}^3$, 含盐量为 3.5%。纤维长度为 19 mm, 质量加筋率为 0.2% (掺加纤维的那部分土质量的 0.2%)。石灰掺量为 6%, 粉煤灰掺量为 12%。养护龄期为 7、14、21、28 d。布筋方式为整体、上 1/3、上 1/2、中 1/3、下 1/2 和下 1/3。

试样整体加筋时将纤维与石灰土混合料分 3 次装入制样模具中击实, 挤压成型。试样上 1/2 和下 1/2 加筋时, 先取一半石灰土装入模具中击实, 将纤维添加到另一半石灰土中, 均匀搅拌后装入模具。

试样上 1/3、中 1/3 和下 1/3 部加筋时, 取 1/3 石灰土与纤维拌和, 分 3 次装入模具。每 2 层之间菱形刮毛, 以避免出现分界面。

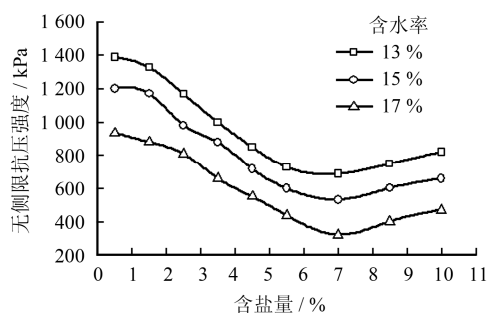
2.5 抗压试验

无侧限抗压仪的量力环系数为 $31.8\ \text{N}/0.01\ \text{mm}$, 试验速率为 $1\ \text{mm}/\text{min}$, 以 $0.5\ \text{mm}$ 变形量为间隔记录百分表读数。

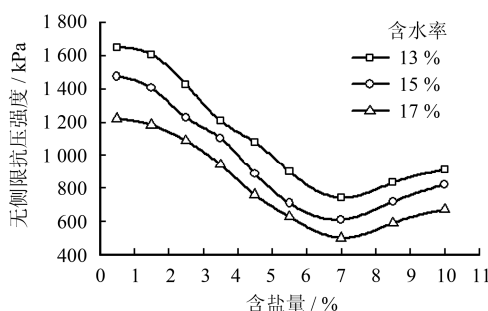
3 不同含盐量加筋固化土抗压性能

3.1 抗压强度

图 1 为养护龄期 28 d、3 个含水率条件下固化土及加筋固化土的抗压强度随含盐量变化曲线。



(a) 固化土



(b) 加筋固化土

图 1 固化土及加筋固化土的抗压强度随含盐量的变化曲线
Fig.1 Change curves of unconfined compressive strength of stabilized soil and reinforced stabilized soil with salt content

图 1(a)与 1(b)的变化趋势基本相同, 随含盐量的增加, 固化土及纤维加筋固化土的抗压强度先减小后增大, 含盐量的界限阈值为 7% 左右。主要原因是当含盐量小于界限阈值时, 盐分充分溶解于孔隙水中, 土颗粒周围溶液的离子浓度增大, 盐溶液在土颗粒相互移动时起到润滑作用减小了土颗粒间的变形阻力, 宏观上表现为土抗压强度的减小。随着含盐量增加, 土颗粒间的溶液达到饱和, 多余的盐分以结晶的形态赋存于土颗粒间, 一部分盐颗粒填充于孔隙中, 另一部分则成为土骨架的一部分, 起到胶结作用, 增大了土的抗压强度。

盐溶液中 Cl^- 浓度较高, 在土中掺加石灰与粉煤灰后石灰与粉煤灰中的 Ca^{2+} 与盐溶液中的 Cl^- 生成极易溶于水的 CaCl_2 , 增大了土颗粒间的离子含量, 使得土颗粒间的结合水膜增厚, 降低土的抗压强度。当 Cl^- 反应完全后, 由于高价离子的置换能力高于低价离子的, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 先与 SO_4^{2-} 发生反应, 生成微溶于水的 CaSO_4 , 填充于土颗粒的孔隙中, 增强了土颗粒间的胶结性, 也使得石灰粉煤灰固化土的抗压强度增大。

图 1 还显示, 当含盐量大于临界值后固化土抗压强度的增幅较为平缓, 而加筋固化土的增幅明显高于固化土的。究其原因, 多余的盐分结晶形成盐颗粒, 起到土骨架作用, 增强了土的抗压强度, 但盐胀作用使试样表面产生了一些微小裂纹, 降低了土的密实度, 而且盐渍土中含有较多的 Na^+ , 含盐量越高, 固化土吸湿软化现象就越严重, 在一定程度上降低了固化土的抗压强度, 两种作用相互抵消后固化土抗压强度略有增加, 也表明盐颗粒的骨架作用对固化土强度的影响较大。

在固化土中掺加聚丙烯纤维, 筋土界面的摩擦作用与黏结效应提高了土的抗压强度。纤维在土中随机分布, 形成空间网状结构, 对土颗粒具有空间约束作用, 可以部分抵消盐颗粒结晶引起的盐胀作用, 延缓微裂纹的产生与扩展, 保持土的完整性。与固化土相比, 当含盐量大于界限值后加筋固化土抗压强度的增幅更为显著。

3.2 固化土及加筋固化土应力-应变关系

在养护龄期 28 d、含水率 15%、9 个含盐量条件下固化土及加筋固化土的应力-应变关系曲线如图 2 所示。固化土与加筋固化土的应力-应变关系均表现为应变软化型, 试样发生脆性破坏, 与固化土相比, 加筋固化土的应力达到极值后下降趋势相对平缓, 表明加筋提高了土的抗变形能力。当含盐量小于 7% 时含盐量越大, 溶解于孔隙水的盐分越多, 土颗粒间的结合水膜越厚, 土的破坏应力与破坏应变也就越小; 当含盐量大于 7% 后, 多余的盐分与难溶盐填充于孔隙中起到骨架作用, 在一定程度上抵消了由于高含盐量所引起的盐胀与吸湿软化作用。同时, 纤维加筋进一步增强了固化土的塑性, 使加筋固化土的破坏应变明显提高。

4 布筋方式对固化土抗压性能的影响

4.1 抗压强度

图 3 为 4 个养护龄期条件下布筋方式与固化土抗压强度关系曲线。

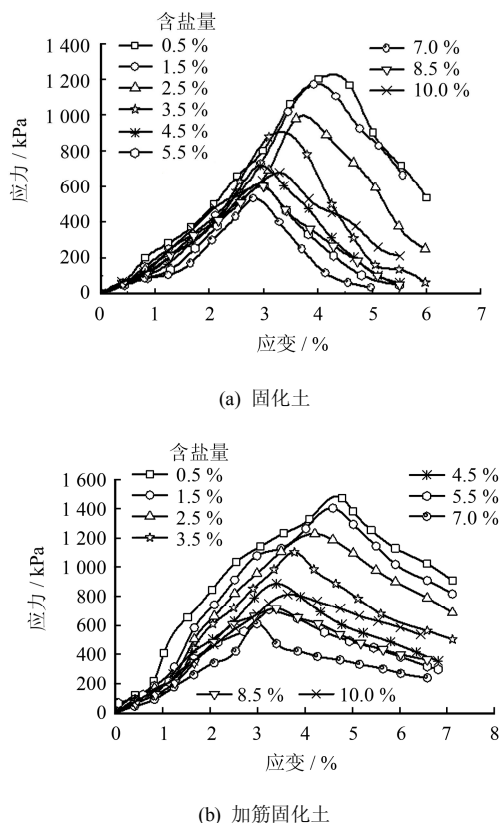


图 2 不同含盐量固化土及加筋固化土的应力-应变关系曲线

Fig.2 Stress-strain curves of lime-fly ash-saline soil and fiber-lime-fly ash-saline soil in condition of nine salt contents

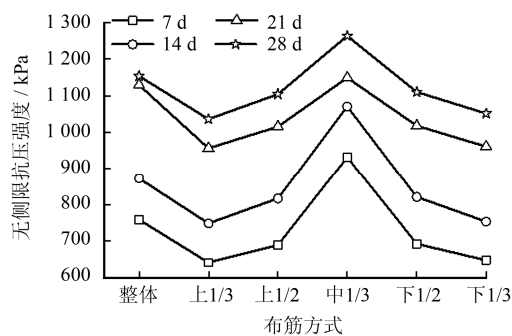


图 3 加筋固化土的抗压强度与布筋方式关系曲线

Fig.3 Relation curves of unconfined compressive strength of fiber-lime-fly ash-saline soil and reinforcement mode

从图 3 中可以看出, 试样的中 1/3 处布筋时加筋固化土的抗压强度最大, 依次减小为试样整体、下 1/2、上 1/2、下 1/3 与上 1/3 处。由于施加荷载时轴向受力均匀, 布筋方式为下 1/2 处, 与上 1/2 处时的抗压强度相差较小、纤维位于试样下 1/3 处与上 1/3 处时抗压强度也基本相同。

施加轴向荷载的过程中试样未加筋部分先产生裂隙, 随着外力的增加, 裂隙扩展直至贯通, 形成破裂面, 试样破坏。不同布筋方式加筋固化土的破坏形态照片见图 4。

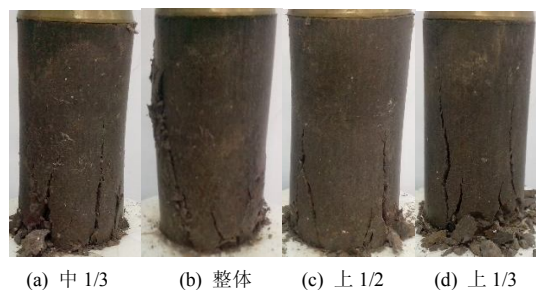


图4 不同布筋方式加筋固化土的破坏形态

Fig.4 Failure forms of fiber-lime-fly ash-saline soil in condition of four reinforcement modes

纤维在固化土中相互交织,形成空间网络结构,抑制裂隙的萌生与扩展,延缓土的破坏。

在加载过程中,试样的下部或上部最先产生裂隙,对于上部加筋和下部加筋固化土,产生初始微裂隙后未加筋部位的裂隙迅速扩展,至布筋位置时试样的大部分已发生破坏。裂隙继续扩展,加筋作用还没有充分发挥,试样就完全破坏了。中部加筋固化土试样上下两端先产生微裂隙,裂隙扩展至中1/3处时,在纤维的阻止下裂隙改变方向或停止发展,很难贯通并形成滑动面,增强了土的稳定性的,有效地约束了土的变形破坏。

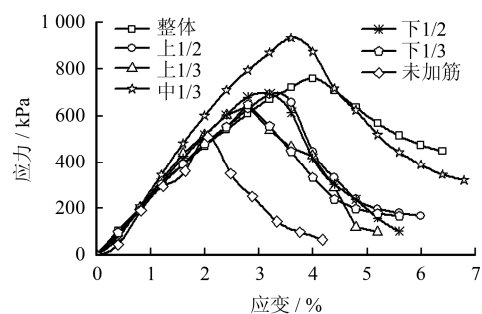
纤维位于试样的下1/2、上1/2、下1/3、上1/3、中1/3处时试样一部分呈现固化土的性质,另一部分具有加筋土的性质,为非均质土。整体加筋试样中的纤维分散相对均匀,试样近似于各向均质,纤维对土的空间约束作用更为突出,有利于发挥纤维的加筋作用,整体加筋试样的抗压强度也相对较高。因此,试样中部和整体加筋时更有利于发挥纤维的加筋作用。

4.2 未加筋土与不同加筋固化土应力-应变关系

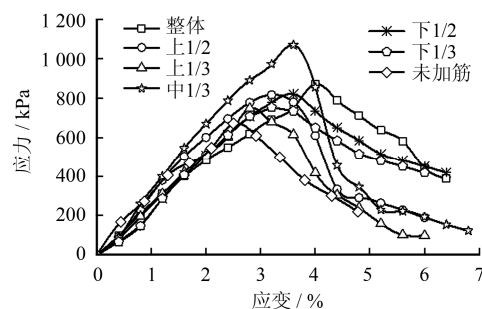
图5为不同养护龄期条件下未加筋土与6种布筋方式加筋固化土的应力-应变关系曲线。不同布筋方式的加筋固化土应力-应变曲线均为应变软化型。随养护龄期的增加,峰值应力增加,破坏应变增大。应变较小时曲线的间距较小,应力增速较快;应变继续增加,应力增速减缓;破坏应变为3%~4.5%;试样破坏后应力降幅较大。应变大于4.5%,纤维对土颗粒的约束作用使得抗压强度降幅减小并趋于稳定。

不同养护龄期条件下整体加筋固化土的破坏应变最大,应力-应变关系曲线的上升与下降趋势也相对缓和,因整体加筋时纤维分布均匀,纤维对土的空间约束作用显著,裂隙在产生与扩展的过程中始终受到纤维的阻止,裂隙的扩展方向多次发生

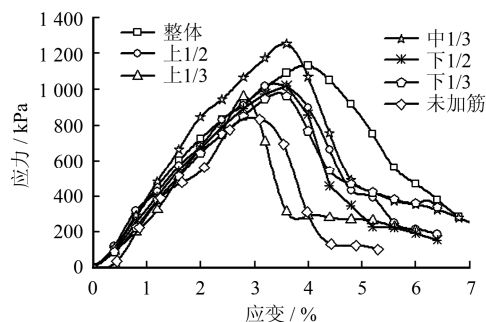
改变,导致破坏应变增大。在路堤填筑或地基处理中,在保证加筋固化土的强度达到规范要求后土的抗变形性能尤为重要,整体加筋方式可作为最佳选择。



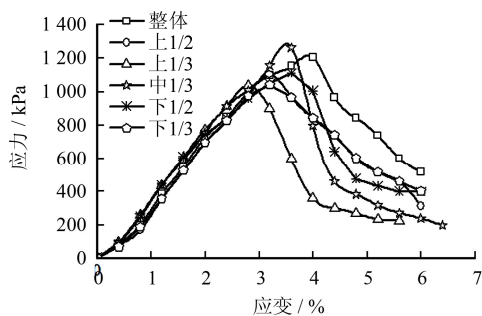
(a) 养护龄期 7 d



(b) 养护龄期 14 d



(c) 养护龄期 21 d



(d) 养护龄期 28 d

图5 不同布筋方式加筋固化土的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of fiber-lime-fly ash-saline soil under condition of five reinforcement modes

5 结论

(1) 随含盐量的增加,固化土及纤维加筋固化土的抗压强度先减小后增大。存在一个临界含盐

量, 为 7%左右。

(2) 含盐量大于临界含盐量后盐颗粒及难溶盐的骨架作用与盐渍土的吸湿软化作用部分抵消, 使固化土抗压强度的增幅较为平缓。纤维对土颗粒的空间约束作用, 在一定程度上抑制了盐颗粒结晶引起的盐胀作用, 使得加筋固化土的增幅明显高于固化土的。

(3) 布筋方式为试样的中 1/3 处时加筋固化土的抗压强度最大, 试样整体、下 1/2、上 1/2、下 1/3 与上 1/3 处加筋时抗压强度依次减小, 布筋方式为试样的下 1/2 处与上 1/2 处、下 1/3 处与上 1/3 处时抗压强度基本相同。

(4) 不同布筋方式的加筋固化土应力-应变曲线均为应变软化型, 随养护龄期的增加, 峰值应力增加, 破坏应变增大。相同条件下整体加筋固化土的破坏应变最大, 即抗变形性能最优。

参 考 文 献

- [1] 魏进, 杜秦文, 冯成祥. 滨海氯盐渍土溶陷及盐胀特性[J]. 长安大学学报: (自然科学版), 2014, 34(4): 13—19.
WEI Jin, DU Qin-wen, FENG Cheng-xiang. Melt sinking and salt-heaving characteristics of coast chlorine saline soil[J]. **Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)**, 2014, 34(4): 13—19.
- [2] ONYEJEKWE S, GHATAORA G S. Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2014, 74(2): 651—665.
- [3] 梁健伟, 房营光, 陈松. 含盐量对极细颗粒黏土强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3821—3829.
LIANG Jian-wei, FANG Ying-guang, CHEN Song. Experimental research on effect of salt content on strength of tiny-particle clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3821—3829.
- [4] 石熊, 张家生, 孟飞, 等. 加筋粗粒土大型三轴试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 52—58.
SHI Xiong, ZHANG Jia-sheng, MENG Fe, et al. Large-scale triaxial test of reinforced coarse-grained soils[J]. **Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)**, 2014, 46(2): 52—58.
- [5] CALIK U, SADOGLU E. Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite[J]. **Natural Hazards**, 2014, 71(3): 1289—1303.
- [6] KUMAR S, DUTTA R K. Unconfined compressive strength of bentonite-lime-phosphogypsum mixture reinforced with sisal fibers[J]. **Jordan Journal of Civil Engineering**, 2014, 8(3): 2014—2394.
- [7] MASOUMI E, FOROOSHANI S M A, NIAN F A. Problematic soft soil improvement with both polypropylene fiber and polyvinyl acetate resin[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2013, 31(1): 143—149.
- [8] CHEGENIZADEH A, NIKRAZ H. Synthetic polypropylene fiber application in soil[J]. **Advanced Materials Research**, 2012, 550—553: 827—833.
- [9] 袁俊平, 詹斌, 陈胜超, 等. 含水率和压实度对路基填土力学特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 98—102.
YUAN Jun-ping, ZHAN Bin, CHEN Sheng-chao, et al. Effects of water content and compaction degree on mechanical characteristics of roadbed[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2013, 11(2): 98—102.
- [10] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347—1351.
SHEN Chun-ni, FANG Xiang-wei, WANG He-wen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1347—1351.
- [11] NASR A M A. Geotechnical characteristics of stabilized sabkha soils from the egyptian-libyan coast[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2015, 33(4): 893—911.

- [12] 刘威, 张远芳, 慈军, 等. 不同含盐类别和干密度盐渍土的三轴试验变化特征研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3): 11—15.
- LIU Wei, ZHANG Yuan-fang, CI Jun, et al. Research on variation characteristics in triaxial test for saline soil under different salt types and dry densities[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2012, 10(3): 11—15.
- [13] CHENG Y, YU H, ZHU B L. Laboratory investigation of the strength development of alkali-activated slag-stabilized chloride saline soil[J]. **Journal of Zhejiang University(Science A)**, 2016, 17(5): 389—398.
- [14] 陈炜韬, 王明年, 王鹰, 等. 含盐量及含水率对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 1—4.
- CHEN Wei-tao, WANG Ming-nian, WANG Ying, et al. Influence of salt content and water content on the shearing strength parameters of chlorine saline soil[J]. **China Railway Science**, 2006, 27(4): 1—4.
- [15] 储诚富, 刘松玉, 邓永锋, 等. 含盐量对水泥土强度影响的室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 139—143.
- CHU Cheng-fu, LIU Song-yu, DENG Yong-feng, et al. The threshold of salt contents on strength of cement mixed clays: A finding of laboratory tests[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(1): 139—143.
- [16] 唐朝生, 顾凯. 聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊): 5—8.
- TANG Chao-sheng, GU Kai. Strength behaviour of polypropylene fiber reinforced cement stabilized soft soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(Supp.): 5—8.
- [17] KHELIFI H, LECOMPTE T, PETTOT A. Mechanical enhancement of cement-stabilized soil by flax fibre reinforcement and extrusion processing[J]. **Materials and Structures**, 2015, 49(4): 1—14.
- [18] TAJDINI M, BONAB M H, GOLMOHAMADI S. An experimental investigation on effect of adding natural and synthetic fibres on mechanical and behavioural parameters of soil-cement materials[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2017, 1—18.
- [19] 李献民, 梁艳慧. 加筋软土路基动力特性的影响因素研究[J]. 路基工程, 2014, 32(4): 17—21.
- LI Xian-min, LIANG Yan-hui. Study on Factors Influencing Dynamic Characteristics of Reinforced Soft Subgrade[J]. **Subgrade Engineering**, 2014, 32(4): 17—21.
- [20] 李丽华, 肖衡林, 郑俊杰, 等. 废旧轮胎加筋路堤边坡模型试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 79—85.
- LI Li-hua, XIAO Heng-lin, ZHENG Jun-jie, et al. The model test of waste tire reinforced slope[J]. **Engineering Mechanics**, 2015, 32(11): 79—85.
- [21] 李敏, 柴寿喜, 杜红普. 麦秸秆加筋土的合理布筋位置和抗剪强度模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3923—3929.
- LI Min, CHAI Shou-xi, DU Hong-pu, et al. Reasonable reinforcement position and shear strength model of reinforced saline soil with wheat straw and lime[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3923—3929.
- [22] 姜宇波, 柴寿喜, 魏丽, 等. 4 种因素对纤维加筋盐渍土抗压性能的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 233—239.
- JIANG Yu-bo, CHAI Shou-xi, WEI Li, et al. Effect of four factors on compressive property of fiber-saline soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.1): 233—239.
- [23] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- CCCC Second Highway Consultant Co., Ltd. JTG D30-2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.