

文章编号: 1000-7598 (2011) 04-1051-06

# 以强度增长率评价麦秸秆加筋盐渍土的加筋效果

李 敏<sup>1</sup>, 柴寿喜<sup>2</sup>, 王晓燕<sup>3</sup>, 魏 丽<sup>2</sup>

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 天津城市建设学院 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;  
3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘 要:** 采用麦秸秆与石灰共同加筋固化滨海盐渍土, 可解决由于盐胀、溶陷和吸湿软化引起的土体强度下降问题。首先, 制备盐渍土、石灰土、麦秸秆加筋盐渍土和麦秸秆加筋石灰土试样 (整体均匀加筋、上部均匀加筋和下部均匀加筋); 进而, 进行  $\phi 50$  mm 试样、 $\phi 152$  mm 重型击实试样和  $\phi 102$  mm 轻型击实试样的无侧限抗压强度试验, 以及  $\phi 61.8$  mm 试样三轴压缩试验; 最后, 分析抗压强度增长率、主应力差比值和黏聚力增长率的变化规律, 以评价麦秸秆的加筋效果。结果表明: ① 麦秸秆加筋增强了土的抗压强度和抗变形能力。② 麦秸秆加筋提高了土的黏聚力, 在试样下部加筋, 加筋效果更好。③ 加筋石灰土的强度由麦秸秆和石灰共同承担, 加筋石灰土的浸水稳定性来源于石灰的固化作用。④ 低围压时, 加筋对土的侧向变形约束较强; 高围压时, 加筋和围压共同限制土的侧向变形。采用麦秸秆加筋是滨海盐渍土的一种有效处理方法。

**关 键 词:** 加筋土; 抗压强度; 抗剪强度; 强度增长; 应力-应变; 麦秸秆; 滨海盐渍土

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

## Examination of reinforcement effect on basis of strength increment of reinforced saline soil with wheat straw and lime

LI Min<sup>1</sup>, CHAI Shou-xi<sup>2</sup>, WANG Xiao-yan<sup>3</sup>, WEI Li<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;  
3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Inferior strength, which is caused by salt expansion, dissolution and water absorption of inshore saline soil, will be prevented with the help of reinforcement with wheat straw and lime. First, some samples are prepared, which including saline soil, reinforced saline soil with wheat straw, lime-saline soil, and reinforced saline soil with lime and wheat straw as the way of reinforcement in whole, upper and lower position respectively. Then, unconfined compressive strength tests of 50 mm, 152 mm (heavy compaction specimen) and 102 mm (lightly compaction specimen), as well as triaxial shear test of 61.8 mm in diameter are carried out. Finally, strength increment, ratio of deviator stress, and cohesion increment are defined to evaluate the reinforcement effect. The results show that: 1. Reinforcement raise the strength and the anti-deformation of soil. 2. Reinforced action increase largely the cohesion of soil, and the reinforcement in lower position can contribute a more effective role. 3. Strength of reinforced soil is contributed mostly by wheat straw and lime; the strength in water depends on chemical reaction of lime. 4. Lateral deformation of reinforced soil is restricted by means of wheat straw within a lower confining pressure, and that is supported jointly by reinforcement and confining pressure within a higher confining pressure. Reinforcement with wheat straw is one of the suitable means for improving strength and anti-deformation of inshore saline soil.

**Key words:** reinforced soil; compressive strength; shear strength; strength increment; stress-strain; wheat straw; inshore saline soil

## 1 引 言

滨海盐渍土存在盐胀、溶陷和吸湿软化所引起的土的强度下降问题<sup>[1]</sup>, 工程应用时需进行处理, 麦秸秆与石灰加筋固化是一种适宜的处理方法<sup>[2]</sup>。

地基和路堤填筑土均要求具有一定的强度和抗变形能力, 尤以强度至关重要<sup>[3-4]</sup>。土的强度问题是土力学的重要研究问题之一, 涉及土的强度影响因素和影响方式<sup>[5]</sup>。工程实践中, 工程师最为关注的是土的抗压强度和抗剪强度, 因为它们直接影响着地

收稿日期: 2010-01-15

基金项目: 天津市自然科学基金 (No. 07JCYBJC12900); 国家自然科学基金 (No. 40772166)。

第一作者简介: 李敏, 女, 1985 年生, 博士, 主要从事盐渍土和加筋土方面的研究。E-mail: limin-0409@163.com

基的稳定性和基础型式的选取<sup>[6-7]</sup>。

研究麦秸秆的加筋效果,需测试麦秸秆加筋土的抗压强度和抗剪强度。为此,完成了不同质量加筋率和加筋长度的麦秸秆加筋土的 $\phi 50$  mm 试样、 $\phi 152$  mm 重型击实试样和 $\phi 102$  mm 轻型击实试样的无侧限抗压强度试验,同时,完成了 $\phi 61.8$  mm 试样的三轴压缩试验<sup>[8]</sup>。

设立抗压强度增长率、主应力差比值和黏聚力增长率 3 个评价指标,以研究加筋土强度指标的变化规律和变化幅度,评价其加筋效果。试验结果证实,麦秸秆与石灰加筋固化可提高土的强度和抗变形能力。

## 2 试验材料和试验条件

### 2.1 试验材料

#### (1) 滨海盐渍土与试样条件

滨海盐渍土为氯盐渍土类型的粉质黏土,含盐量为 2.64%;盐渍土的液限为 32.6%,塑限为 16.8%,塑性指数为 15.8。风干碾碎后,过 2 mm 筛。

由重型击实试验得到滨海盐渍土的最优含水率为 20%,最大干密度为 1.78 g/cm<sup>3</sup>。鉴于静力挤压制样与重型击实冲击制样的压实能量不同,并考虑到滨海地区路堤的实际干密度值,选取试样的含水率为 20%和干密度为 1.65 g/cm<sup>3</sup>。

#### (2) 麦秸秆和石灰

麦秸秆呈圆管状,直径约为 4 mm。剥掉麦秸秆的表皮,剪成试验所需的长度。石灰为袋装石灰粉,有效钙镁含量为 70%。

### 2.2 试验条件和评价指标

#### (1) 制备试样

制备了盐渍土、石灰土、麦秸秆加筋盐渍土和麦秸秆加筋石灰土的无侧限抗压强度试样和三轴压缩试样。击实试验称重后,选取重型击实试验和轻型击实试验提供的试样。

将混合料装入内壁涂抹黏稠油脂的钢质模具中,使用千斤顶在上下端同时挤压,至试样成型。静置 3 min 后推出试样,放入标准养护箱中。石灰固化土养护至规定的龄期,其他土养护 1 d。

无侧限抗压强度试验的试样制备和尺寸:①静力挤压。试样直径为 50 mm,高为 50 mm。②使用南京土壤仪器厂生产的 DJ 标准电动击实仪制样。锤重为 4.5 kg,落距为 457 mm。分 3 层进行,每层 94 击。试样直径为 152 mm,高为 116 mm。③使用南京土壤仪器厂生产的手动轻型击实仪制样。锤重为 2.5 kg,落距为 305 mm。分 3 层进行,每层 25

击。试样直径为 102 mm,高为 116 mm。

三轴压缩试验的试样采用静力挤压制备,试样直径为 61.8 mm,高为 125 mm。

#### (2) 无侧限抗压强度试验<sup>[9]</sup>

在南京土壤仪器厂生产的 CBR 试验仪上进行无侧限抗压强度试验,试验速率为 1 mm/min。

#### (3) 三轴 UU 压缩试验<sup>[9]</sup>

使用南京电力自动化设备总厂生产的 SJ-1A.G 台式三轴剪力仪进行三轴压缩试验,围压为 100、200、300、400 kPa,剪切速率为 0.828 mm/min。

#### (4) 评价指标

为评价麦秸秆加筋盐渍土的加筋效果,设定抗压强度增长率、主应力差比值和黏聚力增长率 3 个评价指标,具体计算公式见式(1)~(3)。

$$\Delta q = \frac{q_r - q_s}{q_s} \quad (1)$$

式中: $\Delta q$  为抗压强度增长率(%); $q_r$  为加筋土的无侧限抗压强度(kPa); $q_s$  为盐渍土的无侧限抗压强度(kPa)。

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_r}{(\sigma_1 - \sigma_3)_s} \quad (2)$$

式中: $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$  为主应力差比值,无量纲; $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  为加筋土的主应力差(kPa); $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$  为盐渍土的主应力差(kPa)。

$$\Delta c = \frac{c_r - c_s}{c_s} \quad (3)$$

式中: $\Delta c$  为黏聚力增长率(%); $c_r$  为加筋土的黏聚力(kPa); $c_s$  为盐渍土的黏聚力(kPa)。

## 3 加筋效果评价

### 3.1 $\phi 50$ mm 试样的抗压强度增长率

在养护期截止前 1 d,将试样抽气浸水饱和 24 h,完成浸水过程。

盐渍土、不同养护时间的石灰土和麦秸秆加筋石灰土,浸水和不浸水条件下的无侧限抗压强度见表 1,抗压强度增长率见表 2。

表 1、2 显示:①石灰的固化作用主要在前 21 d,尤以前 14 d 较为明显,后 7~14 d 的抗压强度增长缓慢;② 7 d 未浸水加筋石灰土的抗压强度较盐渍土的增长了 219.2%;③ 7 d 未浸水加筋石灰土的抗压强度较石灰土的提高 29.8%;④石灰土的浸水软化系数为 54.2%~57.6%,麦秸秆加筋石灰土的浸水软化系数为 53.4%~57.0%,两组数值十分

相近，表明加筋对提高石灰土浸水稳定性的作用不大，浸水稳定性依赖于石灰的化学反应程度。

**表 1 盐渍土、石灰土、加筋石灰土的抗压强度**  
**Table 1 Compressive strength of saline soil, lime-soil and reinforced lime-soil with wheat straw**

土的类型	养护龄期 /d	无侧限抗压强度/kPa		浸水软化系数 /%
		未浸水	浸水	
滨海盐渍土	1	266	试验破坏	
	7	654	377	57.6
	14	733	411	56.1
石灰土	21	755	419	55.5
	28	778	422	54.2
	7	849	453	53.4
麦秸秆加筋石灰土	14	912	516	56.6
	21	1 110	597	53.8
	28	1 114	635	57.0

注：依据适宜的加筋条件<sup>[10]</sup>，即麦秸秆的加筋长度为 10 mm，质量加筋率为 0.25%，加筋形状为 1/4 圆弧状和质量比为 8% 的石灰掺加量，制备麦秸秆加筋石灰土试样。按 8% 质量比的石灰掺加量，制备石灰土试样。

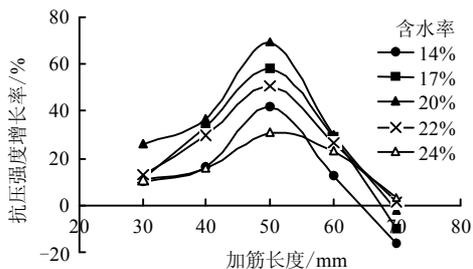
**表 2 石灰土和加筋石灰土的抗压强度增长率**  
**Table 2 Strength increment of lime-soil and reinforced lime-soil with wheat straw**

加筋固化效果的比较	抗压强度增长率/%
7 d 石灰土/盐渍土	145.9
7 d 加筋石灰土/盐渍土	219.2
7 d 加筋石灰土/7 d 石灰土	29.8

7 d 石灰土抗压强度较盐渍土提高 145.9%，石灰的固化作用增强了土颗粒间的联结，石灰固化在土中形成了许多粗大的团粒。7 d 加筋石灰土的抗压强度较石灰土的提高 29.8%，证实麦秸秆很好地发挥了筋-土摩擦作用和交织作用<sup>[11]</sup>，由此增强了加筋土的抗压强度。

**3.2  $\phi 152$  mm 重型击实试样的抗压强度增长率**

将麦秸秆的质量加筋率固定为 0.25%，不掺入石灰。完成了不同含水率、加筋长度的加筋土的重型击实试样的无侧限抗压强度试验。加筋土的抗压强度增长率随加筋长度的变化见图 1。



**图 1 重型击实加筋土的抗压强度增长率随加筋长度变化曲线**

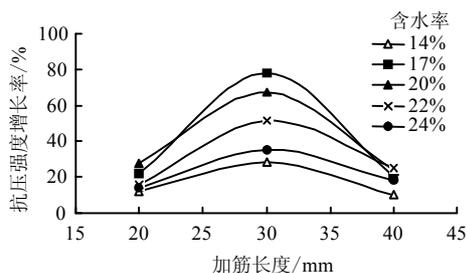
**Fig.1 Curves of strength increment of reinforced soil with wheat straw vs. reinforced length of heavy compaction specimens**

由图可知：随加筋长度的增加，所有加筋土的抗压强度增长率均呈抛物线型变化，50 mm 加筋长度的加筋效果最好，70 mm 加筋长度的最差。

就加筋效果而言：① 20% 含水率加筋土的干密度最大，筋-土结合最紧密，有利于发挥筋-土摩擦作用，其加筋效果最优。② 低含水率时，土的干密度较小，土颗粒间的联结较差；筋-土界面作用较弱，另外，掺加较长的麦秸秆易在土中弯折，形成不连续面，降低加筋土的完整性。所以，14% 含水率加筋土在 70 mm 长度处的抗压强度增长率出现负值，加筋效果较差。③ 24% 含水率加筋土的抗压强度增长率虽没有负值，但筋-土作用同样较弱，其抗压强度增长率也最低。

**3.3  $\phi 102$  mm 轻型击实试样的抗压强度增长率**

质量加筋率依旧固定为 0.25%，不掺入石灰。完成了不同含水率、加筋长度的加筋土轻型击实试样的无侧限抗压强度试验。加筋土的抗压强度增长率随加筋长度的变化见图 2。



**图 2 轻型击实加筋土的抗压强度增长率随加筋长度变化曲线**

**Fig.2 Curves of strength increment of reinforced soil with wheat straw vs. reinforced length of lightly compaction specimens**

由图可知，30 mm 加筋长度的抗压强度增长率最大。17% 和 20% 含水率的加筋土的抗压强度的增长率较高，加筋效果较好。22% 含水率的加筋土的抗压强度增长率适中。14% 含水率的加筋土的干密度最小，筋-土摩擦作用较弱，其抗压强度增长率较低。含水率达 24% 时，虽然存在加筋作用，但水的作用依然占据主导，水减弱了土颗粒间的联结，使得筋-土间的摩擦系数降低。因此，过多的水导致加筋土的抗压强度增长率很低。

**3.4  $\phi 61.8$  mm 试样三轴压缩试验的黏聚力增长率和主应力差比值**

对比加筋土与盐渍土的内摩擦的变化（表 3），可以发现加筋作用对内摩擦角的影响很小。因此，选择主应力差比值和黏聚力增长率 2 个指标，评价加筋效果。

表3 盐渍土和麦秸秆加筋土的内摩擦角的对比结果

Table 3 Comparison of the frictional angles of saline soil and reinforced soil with wheat straw

试样类别	加筋长度 /mm	加筋率 /%	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	内摩擦角的变化 /( $^{\circ}$ )
盐渍土			11	
	15	0.20	11	0
	15	0.25	13	2
麦	15	0.30	13	2
秸	20	0.20	11	0
秆	20	0.25	12	1
加	20	0.30	12	1
筋	25	0.20	13	2
土	25	0.25	12	1
	25	0.30	11	0

3.4.1 麦秸秆加筋土与盐渍土的比较

质量加筋率固定为 0.25%。盐渍土的黏聚力为 22.3 kPa, 不同加筋长度加筋土的黏聚力及其较盐渍土黏聚力增长率见表 4。不同加筋长度麦秸秆加筋土与盐渍土的主应力差比值随围压的变化见图 3。

表4 加筋土的黏聚力较盐渍土的增长率

Table 4 Cohesion of saline soil and cohesion increment of reinforced soil with wheat straw

加筋长度/mm	黏聚力/kPa	黏聚力增长率/%
15	38.8	74.0
20	41.6	86.5
25	36.2	62.3

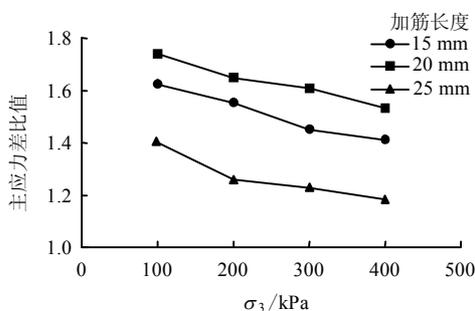


图3 加筋土的主应力差比值随围压的变化

Fig.3 Curves of ratio of deviator stress from saline soil and reinforced soil with wheat straw vs. confining pressure

由表 4 看出, 加筋使土的黏聚力增加, 3 种加筋长度加筋土的黏聚力较盐渍土的提高为 62.3%~86.5%, 以长度 20 mm 的黏聚力增长率最大。

图 3 显示, 各级围压下, 不同加筋长度麦秸秆加筋土的主应力差比值均大于 1, 说明加筋提高了土的抗剪强度。随围压的增大, 加筋土的主应力差比值减小、加筋效果减弱。围压较低时, 加筋土膨胀, 加筋对土的侧向变形的限制作用较强, 其主应力差比值较大; 围压较高时, 加筋土的侧向变形较小, 这来源于围压与加筋的共同约束作用, 此时, 加筋本身对土的侧向变形的限制作用较弱, 加筋土

的主应力差比值较小。

3.4.2 麦秸秆加筋石灰土与石灰土的比较

考虑到将加筋土可能填筑在路堤的全部、上部或下部, 因此, 按加筋位置分成整体均匀加筋、上部均匀加筋和下部均匀加筋 3 种。后两种试样, 加筋石灰土和石灰土各占上下一半。

(1) 整体均匀加筋石灰土与石灰土

质量加筋率固定为 0.25%。整体均匀加筋石灰土与石灰土的主应力差比值随围压的变化见图 4。整体均匀加筋石灰土与石灰土的黏聚力及黏聚力增长率见表 5, 表中黏聚力增长率为养护龄期相同时该类型的加筋石灰土相对于不加筋石灰土的黏聚力增长率。

20 mm 加筋长度麦秸秆加筋石灰土的加筋效果最优。养护 7、14 d 的麦秸秆加筋石灰土的黏聚力增长率较大; 随养护龄期的延长, 黏聚力增长率逐渐减小。

随围压的增加, 主应力差比值逐渐降低, 下降的幅度也逐渐减小。100~200 kPa 的加筋效果最好, 但主应力差比值的降幅较大; 300~400 kPa 的主应力差比值最小, 高围压的加筋效果劣于低围压的。

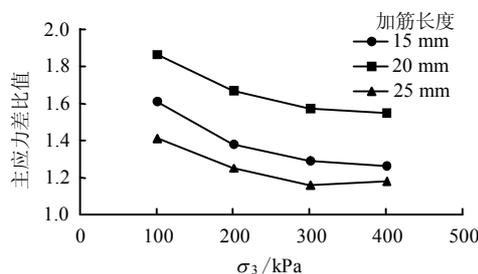


图4 整体均匀加筋石灰土的主应力差比值随围压的变化曲线

Fig.4 Curves of ratio of deviator stress from lime-soil and reinforced lime-soil with wheat straw in whole position vs. confining pressure

表5 整体均匀加筋石灰土的黏聚力及较石灰土的增长率

Table 5 Cohesion of lime-soil and cohesion increment of reinforced lime-soil with wheat straw in whole position

土的类型	加筋长度 /mm	养护龄期 /d	黏聚力 /kPa	黏聚力增长率 /%
石灰土	0	7	140.6	
		14	206.4	
		21	282.1	
		28	290.5	
整体均匀加筋石灰土	15	7	253.2	80.1
		14	287.4	39.2
		21	318.4	12.9
		28	320.8	10.4
整体均匀加筋石灰土	20	7	275.9	96.2
		14	310.3	50.3
		21	346.9	23.0
		28	368.4	26.8
整体均匀加筋石灰土	25	7	257.9	83.4
		14	283.1	37.2

21 327.4 16.1  
28 329.5 13.4

(2) 上部均匀加筋石灰土与石灰土

质量加筋率固定为 0.25%。上部均匀加筋石灰土与石灰土的黏聚力及黏聚力增长率见表 6。上部均匀加筋石灰土与石灰土的主应力差比值随围压的变化见图 5。

表 6 上部均匀加筋石灰土的黏聚力及较石灰土的增长率  
Table 6 Cohesion of lime-soil and cohesion increment of reinforced lime-soil with wheat straw in upper position

土的类型	加筋长度 /mm	养护龄期 /d	黏聚力 /kPa	黏聚力增长率 /%
石灰土	0	7	140.6	
		14	206.4	
		21	282.1	
		28	290.5	
上部均匀加筋石灰土	15	7	241.4	73.7
		14	248.9	20.6
		21	301.6	6.90
		28	318.1	9.50
上部均匀加筋石灰土	20	7	261.1	85.7
		14	306.0	48.3
		21	316.4	12.2
		28	321.2	10.6
上部均匀加筋石灰土	25	7	250.8	78.4
		14	275.3	33.4
		21	315.8	12.0
		28	322.2	10.9

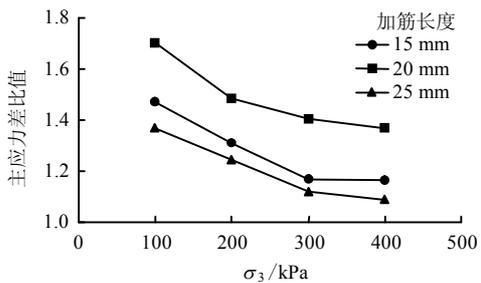


图 5 上部均匀加筋石灰土的主应力差比值随围压变化曲线

Fig.5 Curves of ratio of deviator stress from lime-soil and reinforced lime-soil with wheat straw in upper position vs. confining pressure

表 6 和图 5 显示：20 mm 加筋长度麦秸秆加筋石灰土的加筋效果最优，其主应力差比值较 15、25 mm 加筋长度的高很多。黏聚力增长率和主应力差比值的变化规律均与整体均匀加筋石灰土的一致，但黏聚力数值低于整体均匀加筋石灰土的。

(3) 下部均匀加筋石灰土与石灰土

质量加筋率固定为 0.25%。下部均匀加筋石灰土与石灰土的黏聚力及黏聚力增长率见表 7。

表 7 下部均匀加筋石灰土的黏聚力及较石灰土的增长率  
Table 7 Cohesion of lime-soil and cohesion increment of reinforced lime-soil with wheat straw in lower position

土的类型	加筋长度 /mm	养护龄期 /d	黏聚力 /kPa	黏聚力增长率 /%
石灰土	0	7	140.6	
		14	206.4	
		21	282.1	
		28	290.5	
下部均匀加筋石灰土	15	7	285.7	103.2
		14	323.1	56.5
		21	354.0	25.5
		28	374.5	28.9
下部均匀加筋石灰土	20	7	292.5	108.1
		14	347.7	68.5
		21	362.5	28.5
		28	385.5	32.7
下部均匀加筋石灰土	25	7	281.1	99.9
		14	317.3	53.7
		21	334.6	18.6
		28	351.1	20.9

20 mm 加筋长度的麦秸秆加筋石灰土的加筋效果最优。下部均匀加筋石灰土的黏聚力增长率和主应力差比值的变化规律均与整体均匀加筋石灰土和上部均匀加筋石灰土的一致，但黏聚力数值及其增长率均高于整体均匀加筋石灰土的和上部均匀加筋石灰土的。

下部均匀加筋石灰土的主应力差比值随围压的变化见图 6。

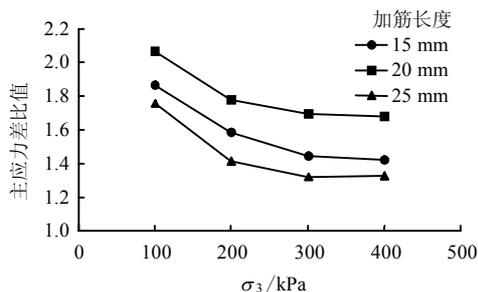


图 6 下部均匀加筋石灰土的主应力差比值随围压变化  
Fig.6 Curves of ratio of deviator stress from lime-soil and reinforced lime-soil with wheat straw in lower position vs. confining pressure

下部均匀加筋的 3 种加筋长度加筋石灰土的主应力差比值曲线，均较另外 2 种加筋位置加筋土的有所抬升，证实下部均匀加筋的加筋效果最好。下部均匀加筋方法中的 3 条曲线较为靠近，说明 3 种加筋长度加筋石灰土的加筋效果差别较小。

总结表 5~7 和图 4~6 认为：① 3 种加筋位置

加筋石灰土的加筋效果均较好, 均对土的黏聚力有明显提高。② 依据黏聚力增长率和主应力差比值, 对 3 种加筋位置的加筋石灰土的加筋效果评价为: 下部均匀加筋的加筋效果最好, 其次为整体均匀加筋, 第三为上部均匀加筋。今后, 宜对下部均匀加筋的加筋土进行重点研究。③ 3 种加筋位置的加筋石灰土, 均为 20 mm 加筋长度的麦秸秆加筋石灰土的加筋效果最优。

## 4 结 论

(1)  $\phi 50$  mm 的加筋石灰土试样, 7 d 未浸水抗压强度较石灰土提高了 29.8%, 加筋效果显著。石灰土和麦秸秆加筋石灰土的浸水软化系数相近, 说明麦秸秆加筋对改善石灰土浸水稳定性的作用不大。

(2) 对于  $\phi 152$  mm 重型击实试样和  $\phi 102$  mm 轻型击实试样, 分别以加筋长度为 50、30 mm 加筋土的加筋效果最优。很显然, 加筋长度与试样尺寸的关联性较强。最优含水率及其附近含水率的加筋土的加筋效果较好。

(3)  $\phi 61.8$  mm 的三轴压缩试验结果证实, 麦秸秆的加筋效果主要表现为土的黏聚力增长。

(4) 3 种加筋位置的加筋石灰土, 以下部均匀加筋的加筋效果最好, 其次为整体均匀加筋, 第 3 为上部均匀加筋。3 种加筋位置的加筋石灰土, 均为 20 mm 加筋长度的加筋效果最优。

(5) 在各级围压下, 麦秸秆加筋盐渍土、3 种加筋位置的不同加筋长度麦秸秆加筋石灰土的主应力差比值均大于 1, 表明麦秸秆加筋可有效地提高了土的黏聚力和抗变形能力。低围压时, 加筋对土的侧向变形的约束较强, 加筋效果更明显; 高围压时, 加筋土的侧向变形由围压与加筋共同约束。

## 参 考 文 献

- [1] 柴寿喜, 王晓燕, 王沛, 等. 含盐量对石灰固化滨海盐渍土微结构参数的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 305—310.  
CHAI Shou-xi, WANG Xiao-yan, WANG Pei, et al. Effect of salt content on microstructure indices of solidified inshore saline soil with lime[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 305—310.
- [2] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲. 麦秸秆防腐评价及加筋滨海盐渍土的补强机制[J]. 工程勘察, 2009, (1): 5—7.  
WEI Li, CHAI Shou-xi, CAI Hong-zhou, et al. Evaluation of anticorrosive measures for wheat straw and strengthening mechanism of reinforced saline soil in littoral area[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, (1): 5—7.
- [3] 中国建筑科学研究院地基研究所. GB 5007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 中交第二公路落勘察设计院. JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] 刘恩龙, 沈珠江. 结构性土的强度准则[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1248—1252.  
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Strength criterion for structured soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(10): 1248—1252.
- [6] 沈珠江. 论技术科学与工程科学[J]. 中国工程科学, 2006, 8(3): 18—21.  
SHEN Zhu-jiang. On the applied sciences and engineering science[J]. *Engineering Science*, 2006, 8(3): 18—21.
- [7] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 1—6.  
GONG Xiao-nan. Generalized composite foundation theory and engineering application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 1—6.
- [8] 李敏. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的击实特性和强度指标研究[D]. 天津: 天津城市建设学院, 2009.
- [9] 南京水利科学研究院. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [10] 杨继位. 麦秸秆加筋条件与加筋滨海盐渍土的抗压强度研究[D]. 天津: 天津城市建设学院, 2008.
- [11] 唐朝生, 施斌, 高玮, 等. 纤维加筋土中单根纤维的拉拔试验及临界加筋长度的确定[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2225—2230.  
TAGN Chao-sheng, SHI Bin, GAO Wei, et al. Single fiber pull-out test and the determination of critical fiber reinforcement length for fiber reinforced soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2225—2230.

---

收稿日期: 2010-01-15

基金项目: 天津市自然科学基金 (No. 07JCYBJC12900); 国家自然科学基金 (No. 40772166)。

第一作者简介: 李敏, 女, 1985 年生, 博士, 主要从事盐渍土和加筋土方面的研究。E-mail: limin-0409@163.com