

# 含盐量对 MBER 土壤固化剂加固土性能的影响试验

张少龙<sup>1a</sup>, 高建恩<sup>1,2</sup>, 李兴华<sup>1a</sup>, 娄现勇<sup>1b</sup>, 孙胜利<sup>1a</sup>

(1. 西北农林科技大学 a. 水利与建筑工程学院; b. 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;  
2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为分析 MBER 固化剂在咸水地区、盐渍土地区应用的可能性, 通过试验分析了不同 NaCl 溶液浓度对 MBER 固化土的无侧限抗压强度、应力—应变关系和弹性模量的影响规律。结果表明, 当 NaCl 浓度低于 0.5% 时, 无侧限抗压强度及弹性模量均随溶液浓度的增加而增加, 应力—应变曲线空隙闭合阶段随溶液浓度增加呈减小趋势; NaCl 浓度高于 0.5% 时, 无侧限抗压强度及弹性模量均随溶液浓度的增加而降低, 应力—应变曲线空隙闭合阶段随溶液浓度增加呈增加趋势; 弹性模量与无侧限抗压强度随 NaCl 浓度变化的趋势基本一致, 两者存在较好的线性相关性; 适量浓度的 NaCl 溶液对固化土早期强度的提升效果显著; NaCl 浓度低于 1% 时, 可应用于固化土工程建设。研究成果可指导 MBER 土壤固化剂在盐渍土地区的应用。

**关键词:** NaCl; MBER 土壤固化剂; 加固土; 影响; 抗压强度; 弹性模量  
**中图分类号:** TV41 **文献标志码:** A

## 1 引言

黄土高原地区缺石少砂, 大部分地区水质较差, 限制了混凝土的应用, 而固化剂加固土既可充分利用当地水土资源, 又能满足工程强度要求, 是改善黄土高原工程建设缺砂少水现状的一种有效选择。MBER 土壤固化剂是由水泥熟料和核心原料等混合研磨而成的一种粉末状材料, 在常温下可固结一般土体, 具有固结强度高、耐久性强、变形小、使用范围广等特点, 是一种环保无机胶凝材料。目前, 关于 MBER<sup>[1]</sup> 加固土的研究较多, 樊恒辉等<sup>[2]</sup> 认为黄河中游地区自西北向东南加固土的强度有增大的规律性, 在土—剂—气系统中通过液相、气相向固相的转变及各类水化产物的填充、挤密、胶结等作用, 混合料逐渐形成较致密的整体; 韩信来等<sup>[3]</sup> 认为密度对固化土强度的影响大于含水率; 冀璐等<sup>[4]</sup> 认为固化土的弹性模量随着土壤固化剂剂量、含水率及龄期的增长呈增加趋势, 当含水率达到一定值时, 固化土的弹性模

量呈下降趋势; 张通等<sup>[5]</sup> 认为固化土的劈裂抗拉强度随着剂量、龄期的增加而增大, 劈裂抗拉强度在试件含水率为最优含水率时达到最大值, 龄期相同的条件下, 固化土劈裂抗拉强度略高于水泥土。MBER 在黄土高原的应用已较广泛, 但在海水咸水地区、盐渍土地区的应用研究尚待探讨。鉴此, 本文通过试验研究不同浓度的氯化钠溶液拌合 MBER 固化剂加固土的强度随溶液浓度的变化规律, 以指导土壤固化剂在盐渍土地区的开发利用。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验材料

试样选取陕西省延安市安塞县地表以下 40~200 cm 深度的土壤, 混合风干, 过 5 mm 筛。试样为低液限粘土, 砂粒含量 7%, 粉粒含量 76%, 粘粒含量 17%; 颗粒相对密度 2.68, 液限 30.8%, 塑限 17.9%, 塑性指数 12.9%。土样可溶盐分析结果见表 1。

收稿日期: 2015-01-22, 修回日期: 2015-02-27

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程项目(2013KTDZ03-03-01); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD31B05); 国家自然科学基金项目(41371276); 中国科学院水利部水土保持研究所知识创新工程专项(水土保持工程, A315021304)

作者简介: 张少龙(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程, E-mail: zsl846@126.com

通讯作者: 高建恩(1962-), 男, 博士、研究员、博导, 研究方向为地表径流调控与利用, E-mail: gaojianen@126.com

表 1 土壤可溶盐分析结果

Tab. 1 Soil soluble salt analysis results			
参数	单位	类别	取值
pH			8.87
易溶盐	g/kg	总量	0.52
		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.00
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.32
		Cl <sup>-</sup>	0.07
		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.02
		Ca <sup>2+</sup>	0.08
		Mg <sup>2+</sup>	0.01
		Na <sup>+</sup>	0.02
		K <sup>+</sup>	0.00
中溶盐	g/kg		0.66
难溶盐	g/kg		114.00
有机质	g/kg		10.30

2.2 试验方案

为确定土样的最优含水率和最大干密度,采用轻型击实试验仪进行击实试验<sup>[6]</sup>,单位体积击实功约为 592.2 kJ/m<sup>3</sup>,分 3 层击实,每层 25 击。通过击实试验测得试件最优含水率 ω<sub>op</sub> 为 13.0%,最大干密度 ρ<sub>dmax</sub> 为 1.781 g/cm<sup>3</sup>。为进一步探索含盐量对 MBER 固化土抗压强度、弹性模量的影响,选取不同浓度的 NaCl 溶液(0、0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%)和不同龄期加固土(7、28 d)进行对比研究。在文献[3]的基础上,选取 MBER 土壤固化剂含量为 12%,水量为最优含水率。

2.3 试件制备及养护

采用静力压实法制备 50 mm×50 mm(直径×高)的圆柱体试件。试件制备前按一定含水率将风干土和配制好的不同浓度 NaCl 溶液混合,使土壤处于最优含水率,混合完成后将土样放入封闭容器内浸润 24 h;按混合后土样重量的 12%添加 MBER 土壤固化剂并拌合均匀;拌合完成后的土样在 1 h 内用千斤顶压制成型<sup>[7]</sup>。试件成型后用塑料膜密封 8 h,然后放入养护室内养护。试件标准养护条件为(20±2)°C,相对湿度>95%。

2.4 测定方法

采用 YAW-4206 微机液压万能材料试验机对试件施加荷载,加载速率为 25 N/s,荷载从 10~15 N 开始施加,初期每级荷载为 5~10 N,后期每级荷载为 10 N,直至破坏。

3 试验结果与分析

3.1 NaCl 浓度对固化土抗压强度的影响

图 1 为不同 NaCl 浓度条件下无侧限抗压强

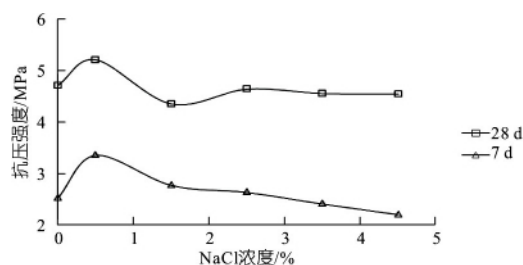


图 1 NaCl 浓度对无侧限抗压强度的影响

Fig. 1 Impact of NaCl concentration on the unconfined compressive strength

度的变化情况。由图 1 可知:①NaCl 浓度相同时,28 d 龄期时加固土的抗压强度比 7 d 时的强度大,这是由于固化土的水化程度随着龄期增长而提高,水化反应更充分,因而强度提升。②7、28 d 龄期条件下,固化土的抗压强度均随 NaCl 浓度的增加呈先增后减的趋势,且在 NaCl 浓度为 0.5%附近出现最大值。这是由于 Cl<sup>-</sup> 与 MBER 水解产生的大量 Ca<sup>2+</sup> 同时存在,CaCl<sub>2</sub> 与水化铝酸钙及 Ca(OH)<sub>2</sub> 发生反应,生成氯铝酸盐和氧氯酸钙,增加了固化土中的固相比例,提高了早期强度,同时液相中 Ca(OH)<sub>2</sub> 浓度减少,加速硅酸二钙、硅酸三钙水化,使固化土早期强度提升,孔隙度下降。但 NaCl 浓度高时会导致固化土开裂,产生新的空隙,强度反而降低,同时 Na<sup>+</sup> 浓度增加,Ca<sup>2+</sup> 浓度降低,根据“质量交换定律”,土壤胶体吸附的交换性钠被 Ca<sup>2+</sup> 转换的效率降低,其交换性钠离子百分比大于 NaCl 浓度低的组别,固化土强度下降<sup>[8]</sup>。③NaCl 浓度低于 1%时,固化土的强度相对较高;NaCl 浓度低于 0.5%时,固化土强度随 NaCl 浓度的提高而大幅度提升;当 NaCl 浓度从 0 提高至 0.5%时,7 d 龄期条件下,固化土强度提升了 32.6%,28 d 龄期条件下,固化土强度提升了 14.2%。

3.2 NaCl 浓度对固化土应力应变的影响

图 2 为 28 d 龄期不同 NaCl 浓度条件下应力应变关系曲线。由图 2 可知,固化土的破坏类型为塑性破坏,其应力—应变曲线分为 4 个阶段:①

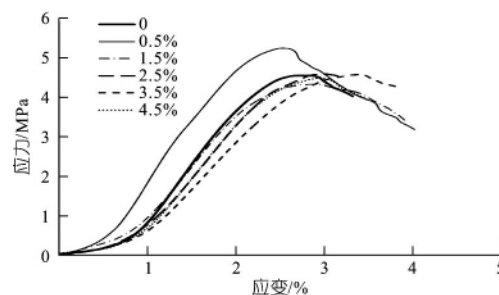


图 2 28 d 时不同 NaCl 浓度下的应力应变关系曲线

Fig. 2 The stress-strain curves with different NaCl concentrations when 28 days' hardening

空隙闭合阶段。内裂隙逐渐被压缩闭合而产生非线性变形,土壤气相减小,固相不变,卸载后变形全部恢复,属于弹性变形,应力等于由于空隙减小而引起的固化土颗粒间相对运动趋势产生的力。含盐量从 0 增至 0.5%,该阶段关系曲线呈减小趋势;含盐量从 0.5%增至 4.5%,该阶段关系曲线呈增大趋势。②线弹性变形阶段。此阶段主要由固相减小所致,且近似直线,卸载后变形可完全恢复。③塑性变形上升阶段。曲线偏离直线,固化土出现平行于最大主应力方向的裂隙,裂隙数量随应力增大而增多,曲线峰值点对应的应变为破坏应变。④材料破坏阶段。裂隙逐渐增多至贯通,应力急剧下降。

### 3.3 NaCl 浓度对弹性模量的影响

以应力应变曲线中近似直线部分(线弹性变形阶段)的斜率为弹性模量<sup>[9]</sup>。图 3 为固化土的弹性模量与 NaCl 浓度的关系。由图 3 可知,同一龄期内,弹性模量随 NaCl 浓度增加而先增后减,在 NaCl 浓度约为 0.5%时达到最大,当 NaCl 浓度从 0 增加到 0.5%时,7、28 d 龄期条件下的弹性模量分别提高了 29.1%、2.0%。

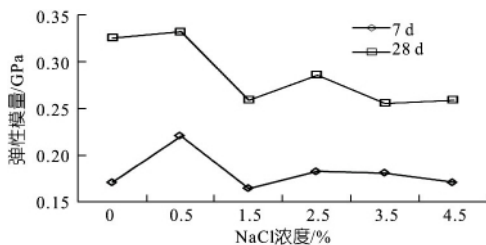


图 3 弹性模量与 NaCl 浓度关系曲线

Fig. 3 Relation curves of elastic modulus and NaCl concentration

对各 NaCl 浓度下的弹性模量及无侧限抗压强度结果进行拟合,结果见图 4。由图 4 可知,弹性模量、无侧限抗压强度随 NaCl 浓度的变化趋

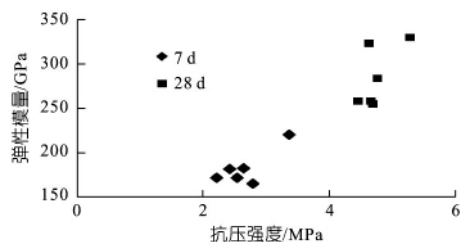


图 4 抗压强度与线弹性模量的关系

Fig. 4 Relationship of compressive strength and elastic modulus

势基本一致,弹性模量  $E$  与无侧限抗压强度  $\sigma_u$  的关系式为:

$$E = 50.642\sigma_u + 47.702, R^2 = 0.884 \quad (1)$$

## 4 结论

a. NaCl 浓度低于 1%时,固化土强度保证率高;NaCl 浓度低于 0.5%时,溶液浓度的提高可显著提升固化土的早期强度及弹性模量。NaCl 浓度低于 1%时,可应用于固化加固中。

b. 盐分对土壤固化剂固结土壤的无侧限抗压强度、弹性模量等力学性能有先提升后削弱的作用,在 NaCl 溶液浓度达到 0.5%时,提升作用达到峰值。

c. 含盐量对应力—应变曲线空隙闭合阶段的影响较大,当含盐量从 0 增至 0.5%时,该阶段呈减小趋势,当含盐量从 0.5%增至 4.5%时,该阶段呈增加趋势。

d. 固化土的弹性模量及无侧限抗压强度随 NaCl 浓度的变化趋势基本一致,两者存在较好的线性相关性。

### 参考文献:

- [1] 高建恩,孙胜利,吴普特.一种新型土壤固化剂:中国,CN200410073273.52005-06-29[P].2005-06-29.
- [2] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等.水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J].岩土力学,2010,31(12):3741-3745.
- [3] 韩信来,高建恩,樊恒辉,等.黄土高原不同地区固化土强度变化规律研究[J].人民长江,2009,40(22):76-78.
- [4] 冀璐,高建恩,郝连安,等.MBER 固化土弹性模量的试验研究[J].水土保持通报,2012,32(5):261-264.
- [5] 张通,高建恩,李兴华,等.影响 MBER 固化土劈裂抗拉强度的因素试验[J].水土保持通报,2013,33(1):49-52.
- [6] 南京水利科学研究院,铁道部第一勘测设计院,中国科学院兰州冰川冻土研究所.土工试验方法标准(GB/T 50123-1999)[S].北京:中国计划出版社,2007.
- [7] 交通部公路科学研究院.公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51-2009)[S].北京:人民交通出版社,2010.
- [8] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等.基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J].岩土力学,2011,32(7):1996-2000.
- [9] 尤明庆,苏承东.岩石的非均质性与杨氏模量的确定方法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):757-761.

(下转第 139 页)

表 2 不同处理下 72 h 内抑制剂的平均阻蒸发效率  
Tab.2 The average hindered evaporation efficiency of the inhibitor within 72 h under different treatments

试验池	抑制剂剂量 /mL	平均风速 / $(m \cdot s^{-1})$	有无漂浮网格	平均阻蒸发效率/%
# 1	0	0	无	0
# 2	24	0	无	36.0
	24	0	有	36.6
# 3	0	1.5	无	0
	0	3.0	无	0
# 4	24	1.5	有	29.6
	24	3.0	有	25.8
# 5	24	1.5	无	12.0
	24	3.0	无	8.6

抑制剂的阻蒸发效率仅能够达到 7%~12%。在水体设置漂浮网格能有效消减风浪对单分子膜阻蒸发效率的影响,可将抑制率提高 19%。可见采用漂浮网格法消减风浪的措施是提高大面积水体单分子膜抑制剂阻蒸发效率的有效方法。

### 6 结论

本文提出的采用漂浮网格的方法不仅能有效消减风浪对单分子膜的破坏,且使单分子膜阻蒸

发效率显著提高。可见漂浮网格法消减风浪的措施是提高大面积水体单分子膜抑制剂阻蒸发效率的有效方法。

### 参考文献:

[1] 胡顺军,王举林,宋郁东,等.塔里木盆地水面蒸发量的实验研究[J].干旱区资源与环境,2003,17(6):95-98.

[2] 李新,杨德刚.塔里木河上游水资源利用效率分析[J].干旱区研究,2002,19(1):23-26.

[3] 严新军,侍克斌,诸葛伍荪.干旱区平原水库防蒸发节水试验初探[J].新疆农业科学,2004,41(4):228-232.

[4] 吴邦信,陈天祥,孙海健.单分子膜水面阻蒸发技术的绿色化学[J].环境保护,2003(11):11-13.

[5] 康绍忠,许迪.我国现代农业节水高新技术发展战略的思考[J].中国农村水利水电,2001(10):25-29.

[6] 周益人,陈国平,黄海龙,等.透空式水平板波浪上托力分布[J].海洋工程,2003,21(4):41-47.

[7] 滕斌.波浪对三维浮体的二阶作用[J].水动力学研究与进展:A辑,1995,10(3):316-327.

[8] 王献孚,熊鳌魁.高等流体力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2003.

## Efficiency Test of Hindering Evaporation Preparations Based on Floating Grid of Mitigate Wind and Waves in Nanjiang Area

YANG Kun, YE Han-chun, XIAO Rang, LI Lin, YAO Bao-lin

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

**Abstract:** To solve the problem that the monomolecular film of high chain fatty alcohol is affected by wind and waves greatly and can not be applied to a large area of water bodies, this paper proposes the method of reducing the impact of wind and waves with floating grid. Combined with the climatic characteristics of the Tarim Basin, it presents the materials and structures of floating grid. After testing in the experimental area, the results show that the method of floating grid can effectively reduce wind and waves damage to the monomolecular film in the average wind speed of 1.5 m/s and 3.0 m/s, and improve the efficiency of hindering evaporation.

**Key words:** floating grid; mitigating wind and waves; hindering evaporation; hindering evaporation preparations; efficiency; experiment

\*\*\*\*\*  
(上接第 135 页)

## Impact Experiment of Salinity on the Stabilized Soil Properties with MBER Soil Stabilizer

ZHANG Shao-long<sup>1a</sup>, GAO Jian-en<sup>1, 2</sup>, LI Xing-hua<sup>1a</sup>, LOU Xian-yong<sup>1b</sup>, SUN Sheng-li<sup>1a</sup>

(1a. College of Water Resources and Architectural Engineering; 1b. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to analyze the possibility of application and research of MBER in saltwater area and saline soil area, experiment method was used to study the influence of different NaCl concentration on unconfined compressive strength and stress-strain relationship and elastic modulus of MBER compacted soil. The results show that when the NaCl concentration is less than 0.5%, unconfined compressive strength and elastic modulus increase, and stress-strain curves in void closing stage appear downward trend; when the NaCl concentration is higher than 0.5%, unconfined compressive strength and elastic modulus decrease, stress-strain curves in the void closing stage appear upward trend. The variation trend of unconfined compressive strength and elastic modulus is consistent with the change of the NaCl concentration, which is linear correlation. An appropriate concentration of sodium chloride solution significantly enhances the early strength of stabilized soil. Studies suggest that in the actual project it can be used in the construction of stabilized soil when concentration of sodium chloride in water is below 1%.

**Key words:** NaCl; MBER soil stabilizer; compacted soil; impact; compression strength; elastic modulus