

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 09 - 2442 - 07

# 天津滨海新区吹填软土固化试验研究

杨爱武<sup>1,2</sup>, 周 金<sup>3</sup>, 孔令伟<sup>2</sup>

(1. 天津大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300381; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 中交四航工程研究院有限公司, 广州 510230)

**摘 要:**天津滨海新区有大面积吹填软土, 难以直接满足工程建设的要求, 需进行固化处理。现采用主剂水泥和外加剂石膏、NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 FeCl<sub>3</sub>, 通过组合对比对天津滨海新区不同含水率的吹填软土分别进行室内固化试验, 以无侧限抗压强度为指标, 经有效地筛选和对比分析, 确定了适用于不同工程性质的两种固化剂组合配比, 并对固化土的微结构特征进行了分析研究。试验研究表明, 水泥加适量的外加剂加固天津滨海新区吹填软土效果明显好于纯水泥土。微观结构分析表明, 与同一龄期下水泥土相比, 固化土生成的水化物更多, 孔隙含量更少, 表现出更稳定的微结构特性, 也从机制上解释了该现象。

**关 键 词:**吹填软土; 抗压强度; 固化剂; 微观结构

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

## Experimental study of solidification of soft dredger fill in Tianjin Binhai New Area

YANG Ai-wu<sup>1,2</sup>, ZHOU Jin<sup>3</sup>, KONG Ling-wei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin University, Tianjin 300381, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** There is large area of soft dredger fill in Tianjin Binhai New Area, which hard to meet the requirements of engineering construction, needed to be solidified. Through selecting cement as main agent; gypsum, NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, and FeCl<sub>3</sub> as assistant additives, a series of indoor consolidation experiments are performed for soft dredger fill with different water contents in Tianjin Binhai New Area. Using unconfined compression strength as a main factor, analysis of microstructure for solidified soil are made by choosing two kinds of solidification agent which are used for different programs through effective comparison and screening. The results show that solidified soft dredger fill in Tianjin Binhai New Area with cement and appropriate as well as a moderate amount of additional agent has an obvious advantage than solidified with pure cement. Microstructural analysis shows that compared with the same age of cement soil, more hydration and less pore content and more stable microstructure features generated by the solidified soil, which can explain the phenomenon from the mechanism.

**Key words:** soft dredger fill; compressive strength; solidification agent; microstructure

## 1 引 言

目前, 随着人类经济活动和工程活动的快速发展, 土地资源日趋紧张, 特别是对临海城市, 把围海造陆作为获得新的土地资源的重要途径。天津滨海新区位于天津市东部临海地区, 是继珠三角和长三角后又一个重要的经济开发区, 且区位优势, 拥有围海造陆土地资源开发的良好自然条件<sup>[1]</sup>。近年来, 新区大量采用近海新近沉积的海底淤泥作为吹填原料进行围海造陆, 其成分主要以细颗粒为主,

含水率高、孔隙比大以及固结性能差等, 对工程建设非常不利, 采用传统真空预压法进行加固造价高历时长, 因此, 寻找一种合理、经济的加固方法, 使吹填土能尽快从淤泥状态转变成具有一定承载力的地基, 对新区的工程建设具有重要的现实意义。目前, 对于软土的固化及其固化机制方面的研究, 现已取得了一定的成果<sup>[2-10]</sup>, 但由于软土的形成条件和所处的环境不同, 其物理化学成分存在明显差异, 因此, 对于固化材料的种类要求及配比存在着较大的区别。

收稿日期: 2012-07-16

基金项目: 天津市科技发展计划项目(No. 06YFSZSF04000); 国家自然科学基金项目(No. 51179186)。

第一作者简介: 杨爱武, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事软土地基处理及土体微观结构方面的研究工作。E-mail: tulilab@163.com

本文针对上述问题，以天津滨海新区吹填软土为研究对象，选定了几种固化材料，通过室内试验分析，针对不同的工程建设需求，确定了固化剂中各固化材料的最优配比，并对固化土的微结构特征及其固化机制进行了分析。

## 2 试验方案

### 2.1 试验材料

本文所用的土样取自天津滨海新区临港工业区吹填现场未经处理的高含水率吹填软土，土样基本物性指标如表 1 所示，其含水率在 80% 以上，孔隙比大，压缩性高，渗透性低，基本没有强度，根本无法满足工程建设的需求，必须对其进行处理。所用主固化剂为强度等级为 32.5 的矿渣硅酸盐水泥，外加剂为熟石膏粉和工业分析纯 NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 及 FeCl<sub>3</sub> 等。

表 1 土样的基本物性指标

Table 1 Basic physical property indices of soil sample						
土的名称	土粒相对密度 $d_s$	含水率 $w/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
淤泥质黏土	2.76	86.8	42.4	21.4	21.0	3.11

### 2.2 试样的制备

各固化材料掺量的定义为

$$\text{掺入量} = \frac{\text{掺入固化材料的质量}}{\text{被加固湿土的质量}} \quad (1)$$

试验制样前，先除去软土中的杂物，再将软土搅拌均匀；按照试验计划，称取一定质量的均匀软土、试验用水和按比例配制好的固化剂，混合搅拌均匀，配制成所需含水率的混合料，然后将混合料放入 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的立方体试模中人工分层捣制成型，每组试验制作 3 个平行试样；试膜内壁先涂上一层脱模油，以便脱模。

### 2.3 试验方案

将吹填软土配制成含水率  $w$  分别为 60%、70% 和 80% 这 3 种土样，对于每一含水率，依次采用水泥单掺试验、水泥加外加剂双掺试验和水泥加多种外加剂正交试验，分别对其进行固化试验。水泥单掺时掺量取 5%、7%、9%、12%、15%、18% 和 20% 共 7 种；在此试验的基础上，优选出水泥最佳掺量，再掺入不同的外加剂，外加剂石膏掺量取 1%、2%、3%、4% 和 5% 这 5 种，NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 FeCl<sub>3</sub> 均选取 0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1.0%，进行水泥加外加剂双掺试验；对试验结果进行有效的筛选和对比，再优选固化材料及各固化材料的掺量范围进行正交试验，以期得到一个最佳的固化剂配合比，

然后对固化剂的掺量进行调整，得到不同固化剂掺量对固化土无侧限抗压强度的影响。

### 2.4 试样的养护

试样制备完成后，自然养护 1 d 脱模，并称重。将试样装入撒水湿润后的塑料保鲜袋中，置于标准养护室内进行养护，养护温度控制在 (25±2) °C，相对湿度 95%，养护至所需龄期。试样在测试前一天均浸水 24 h，水面高出试样约 2.5 cm，到测试时间取出试样，先用软湿布吸去试样表面的可见自由水，然后进行无侧限抗压强度试验。

## 3 试验结果分析

### 3.1 水泥单掺试验

从图 1 可以看出，水泥固化土的无侧限抗压强度随着水泥掺量增加而呈幂数增长，随着养护龄期  $T$  的增加而增大，且随吹填土含水率的增大而减小。28 d 固化的强度约为 7 d 固化土无侧限抗压强度的 2~3 倍；含水率每增加 10%，固化土无侧限抗压强度降低 15%~25%。当水泥掺量小于 9% 时，固化土固化效果差，强度较低，其随水泥掺量变化较小；当水泥掺量大于 9% 时，固化效果较好，特别是当水泥掺量大于 12% 后，固化效果显著，随水泥掺量的增加，固化土无侧限抗压强度大幅增长。本文后续固化剂双掺试验将以水泥含量 12% 为基准配比，以水泥单掺 12% 时固化土的强度为基准强度。

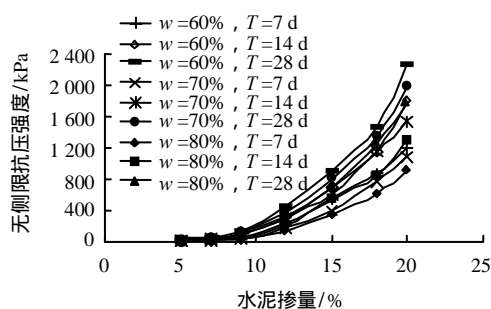


图 1 不同含水率条件下水泥掺量与固化土无侧限抗压强度的关系

Fig.1 Relationships between cement content and unconfined compressive strength of solidified soil under different water contents

### 3.2 水泥加外加剂双掺试验

#### 3.2.1 水泥加石膏固化试验

从图 2 可以看出，随着龄期的增长，各石膏掺量下的固化土无侧限抗压强度均随之提高；随着吹填土含水率的增加，石膏固化土无侧限抗压峰值强度有减小的趋势。在不同含水率条件下，石膏对固化土的强度影响都很大，在一定范围内，随着石膏掺量的增加，固化土无侧限抗压强度随之增长；当

石膏掺量在 3% ~ 4% 之间时, 固化土无侧限抗压强度都达到峰值, 其 28 d 峰值点强度比对应的基准强度提高 65% ~ 80%, 达峰值点后, 固化土无侧限抗压强度反而随石膏掺量的增加而降低, 这说明当石膏掺量超过一定水平时反而对强度增长起负作用。

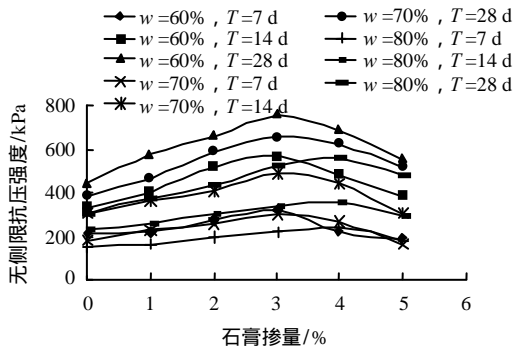


图2 不同含水率条件下石膏掺量与固化土无侧限抗压强度的关系

Fig.2 Relationships between gypsum content and unconfined compressive strength of solidified soil under different water contents

### 3.2.2 水泥加 NaOH 固化试验

不同含水率条件下 NaOH 掺量与固化土无侧限抗压强度的关系如图 3 所示。

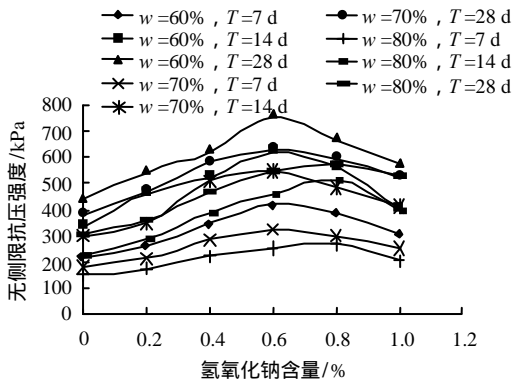


图3 不同含水率条件下 NaOH 掺量与固化土无侧限抗压强度的关系

Fig.3 Relationships between NaOH content and unconfined compressive strength of solidified soil under different water contents

从图 3 可以看出, 随着固化龄期的增长, 各氢氧化钠掺量水平下的固化土无侧限抗压强度均随之提高; 随吹填土含水率的增加, 固化土无侧限抗压强度随之减小。在不同含水率条件下, 一定范围内, 随着氢氧化钠掺量的增加, 固化土无侧限抗压强度都随之增加; 当氢氧化钠掺量达到一定水平时, 固化土无侧限抗压强度达到峰值, 之后再增加氢氧化钠掺量, 固化土无侧限抗压强度反而下降; 固化土的无侧限抗压峰值强度对应的氢氧化钠掺量基本上

在 0.5% ~ 0.7% 之间, 28 d 固化土无侧限抗压峰值强度比对应的基准强度提高 60% ~ 70%。

### 3.2.3 水泥加 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 固化试验

图 4 为不同含水率条件下 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 掺量与固化土抗压强度的关系。由图可以看出, 随着固化龄期的增长, 各碳酸钠掺量水平下的固化土无侧限抗压强度均随之提高; 随吹填土含水率的增加, 固化土无侧限抗压强度随之减小。在不同含水率条件下, 一定范围内, 随着碳酸钠掺量的增加, 固化土无侧限抗压强度随之增加, 碳酸钠掺量存在一个最优范围, 即 0.2% ~ 0.4%, 当碳酸钠掺量在 0.2% ~ 0.4% 之间时, 固化效果最好, 碳酸钠掺量超出最优范围后, 固化土无侧限抗压强度反而随掺量增加而降低; 碳酸钠最优掺量范围对应 28 d 的固化土峰值强度比对应的基准强度提高 50% ~ 60%。

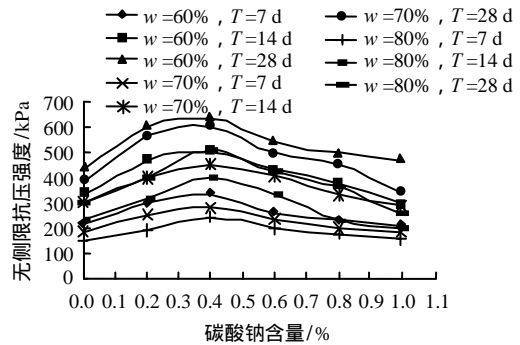


图4 不同含水率条件下 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 掺量与固化土无侧限抗压强度的关系

Fig.4 Relationships between Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> content and unconfined compressive strength of solidified soil under different water contents

### 3.2.4 水泥加 FeCl<sub>3</sub> 固化试验

由图 5 可以看出, 在不同含水率条件下, 随着氯化铁掺量的增加, 固化土无侧限抗压强度都随之降低; 当含水率为 60% 时, 固化土无侧限抗压强度随氯化铁掺量增加而下降最快。相比之下, 含水率为 80% 时, 固化土无侧限抗压强度随氯化铁掺量增加而降低最慢。虽然氯化铁中的铁离子具有很强的交换吸附能力, 能通过离子交换, 取代吸附在黏土周围的低价阳离子 K<sup>+</sup> 和 Na<sup>+</sup>, 从而减薄土颗粒表面的双电层, 促进土壤的自身凝聚, 起到固化作用, 但氯化铁水溶液呈酸性, 会严重阻碍水泥的水解和水化, 对固化土无侧限抗压强度的形成不利, 且后者的影响大于前者; 而土的含水率越大, 其孔隙比就大, 在其他条件相当的情况下, 土孔隙中溶液的离子浓度就相对较低, 氯化铁水溶液酸性降低, 所以随含水率的增大, 固化土无侧限抗压强度随氯化铁掺量增加下降的程度反而降低。随着固化龄期的

增长，各氯化铁掺量水平下的固化土无侧限抗压强度均随之提高。

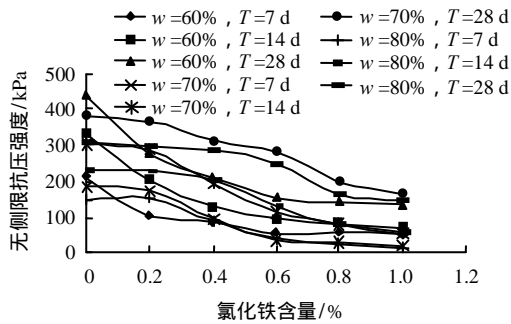


图 5 不同含水率条件下 FeCl<sub>3</sub> 掺量与固化土无侧限抗压强度的关系

Fig.5 Relationships between FeCl<sub>3</sub> content and unconfined compressive strength of solidified soil under different water contents

### 3.3 固化剂正交试验

在水泥单掺及水泥加外加剂双掺固化吹填软土

的试验结果的基础上，选取了 4 种固化材料进行了正交试验，即通过最少的试验次数得到最佳的组合配比<sup>[11]</sup>。对于 60%、70% 和 80% 含水率吹填软土，分别选取水泥掺入量为 7%、9% 和 12%，石膏掺量为 2%、3% 和 4%，NaOH 掺量为 0.4%、0.6% 和 0.8%，Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 掺量为 0.2%、0.4% 和 0.6%，进行正交试验，其正交试验方案及结果如表 2~4 所示。

从正交试验结果表 2 可以看出，3 种含水率下 7 d 和 28 d 固化吹填软土对应的最佳配比组合如下：水泥掺量为 12%，石膏掺量为 4%，NaOH 掺量为 0.6%，Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 掺量为 0.2%。表 3、4 数据显示水泥极差最大，这说明水泥在加固中起主要作用，水泥的变化引起的固化土无侧限抗压强度变化最为显著；在此称之为 CJDS12 型固化剂，此时，固化土 28 d 的强度为基准强度的 2.4~3.0 倍，可作为地基处理中搅拌桩的固化材料。

表 2 不同含水率时的正交试验方案与结果  
Table 2 Orthogonal test schemes and results with different water contents

编号	水泥掺量 /%	石膏掺量 /%	NaOH 掺量 /%	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 掺量 /%	q <sub>u</sub> /kPa					
					龄期为 7 d			龄期为 28 d		
					w=60%	w=70%	w=80%	w=60%	w=70%	w=80%
1	7	2	0.4	0.2	149	124	87	193	217	206
2	7	3	0.6	0.4	126	153	102	235	230	191
3	7	4	0.8	0.6	129	118	97	256	183	215
4	9	2	0.6	0.6	133	132	112	222	214	255
5	9	3	0.8	0.2	292	222	165	478	390	419
6	9	4	0.4	0.4	181	237	188	341	413	492
7	12	2	0.8	0.4	320	345	296	617	617	694
8	12	3	0.4	0.6	355	354	346	496	607	518
9	12	4	0.6	0.2	669	570	531	1160	961	906

表 3 不同含水率时的正交试验极差计算结果 (7 d)  
Table 3 Extreme difference of orthogonal test with different water contents (7 d)

w=60%	q <sub>u</sub> /kPa						w=60%	w=70%	w=80%	极差 R			最优方案
	均值 1			均值 2						均值 3			
	w=70%	w=80%	w=60%	w=70%	w=80%	w=60%				w=70%	w=80%	w=60%	
135	132	95	202	197	155	448	423	391	313	291	296	3	
201	200	165	258	243	204	327	308	272	126	108	107	3	
228	238	207	310	285	248	247	229	186	81	47	41	2	
370	305	261	209	245	195	206	201	185	164	104	76	1	

表 4 不同含水率时的正交试验极差计算结果 (28 d)  
Table 4 Extreme difference of orthogonal test with different water contents (28 d)

w=60%	q <sub>u</sub> /kPa						w=60%	w=70%	w=80%	极差 R			最优方案
	均值 1			均值 2						均值 3			
	w=70%	w=80%	w=60%	w=70%	w=80%	w=60%				w=70%	w=80%	w=60%	
227	210	204	347	345	389	758	728	706	531	518	502	3	
344	349	385	403	409	376	586	525	538	242	176	163	3	
343	418	405	538	468	450	450	396	443	195	72	45	2	
610	523	510	397	426	459	324	206	206	286	220	305	1	

### 3.4 固化剂掺量变化对加固土强度的影响

#### 3.4.1 固化剂总量变化对固化土无侧限抗压强度的影响

以 CJDS12 固化剂为标准，保持固化剂中各组

成分质量百分比不变，水泥取 5%、7%、9% 这 3 个水平基准，对应固化剂总量分别为 7.0%、9.8%、12.6% 这 3 种方案，分别对 3 个含水率的吹填土进行固化试验，并测定其 7、14、28 d 的无侧限抗压

强度，结果如表 5 所示。

表 5 不同配比各龄期的固化土试验结果  
Table 5 Test results of different mixture ratios and different ages of solidified soil

编号	含水率 /%	水泥含量 /%	外加剂含量 /%	$q_u$ /kPa		
				7 d	14 d	28 d
S-1	60	5	2.0	25.2	57.2	81.8
S-2	60	7	2.8	87.0	151.6	203.2
S-3	60	9	3.6	151.2	265.8	265.7
S-4	70	5	2.0	19.8	42.0	72.3
S-5	70	7	2.8	72.3	135.6	186.6
S-6	70	9	3.6	142.2	235.6	298.5
S-7	80	5	2.0	17.1	42.3	67.9
S-8	80	7	2.8	65.8	163.1	166.4
S-1-9	80	9	3.6	137.9	209.0	265.3

由表 5 结合图 1 可以看出，掺入不同固化剂含量的固化土无侧限抗压强度与纯水泥土无侧限抗压强度相比都有大幅提高，前者强度基本为后者强度的 2.0~3.0 倍；随着固化剂总量的增加，固化土无侧限抗压强度随之也大幅提高。当固化剂总量为 9.8% 时，固化土无侧限抗压强度为固化剂总量为 7% 时的 2.0~3.5 倍；固化剂总量为 12.6% 时，固化土无侧限抗压强度为固化剂总量为 9.8% 时的 1.5~2.0 倍，这说明固化剂强度与固化剂总量呈非线性关系。

3.4.2 水泥外加剂总量变化对固化土无侧限抗压强度的影响

采用水泥含量为 7%，保持外加剂内部配比不变，变化外加剂总量，分别对不同含水率条件下的吹填土进行了固化试验，试验结果如图 6 所示。

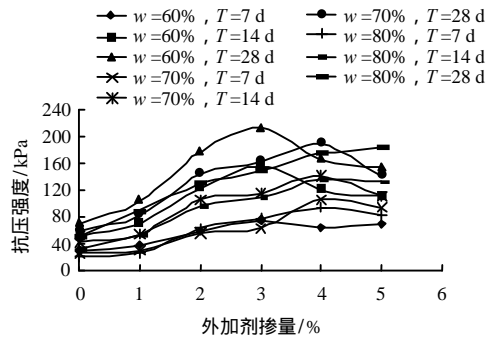


图 6 不同含水率条件下固化土无侧限抗压强度随龄期和外加剂总量变化图

Fig.6 Strength of solidified soil changes with age and admixture amount under different water contents

由图 6 结合图 1 可以看出，在不同含水率条件下，外加剂掺量为 2% 左右时，固化土抗压强度增长均较快，其 28 d 无侧限抗压强度为 7% 水泥土无侧限抗压强度的 2.4~2.8 倍，且高于 9% 水泥土的无侧限抗压强度。综合上述试验结果的分析，得到另外一种固化剂，其组成成分为：主剂水泥掺量为 7%，外加剂掺量石膏为 1.67%，氢氧化钠为 0.25%，碳酸钠为 0.08%，并命名此组合为 CJDS07 型固化剂，可作为路基填料的固化材料。

### 4 固化土微观结构分析

本文选取 70% 含水率吹填土掺入 7% 水泥后和掺入 CJDS07 型固化剂后的固化土进行电镜扫描试验，扫描电镜照片见图 7、8。

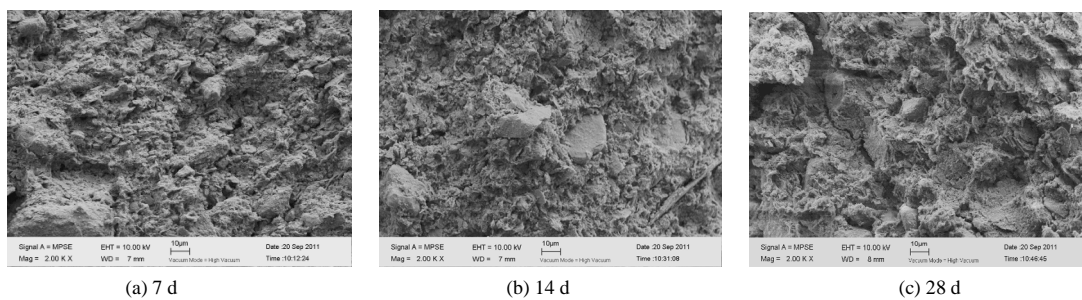


图 7 不同龄期水泥土 SEM 照片  
Fig.7 SEM photos of cement soil with different ages

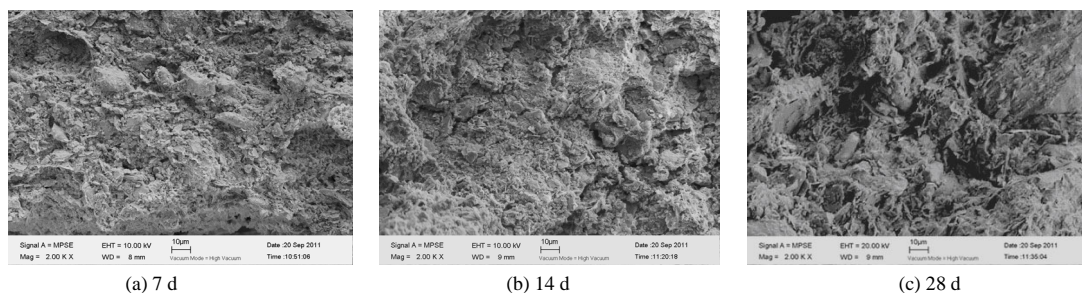


图 8 不同期龄 CJDS07 型固化剂固化土 SEM 照片  
Fig.8 SEM photos of solidified soil of CJDS07 solidification agent with different ages

#### 4.1 固化土微结构特征分析

由水泥固化土的 SEM 照片可以看出, 7 d 时的纯水泥土中的水泥凝胶体填充了部分土颗粒间的孔隙, 有些直接粘附在土颗粒的表面, 且部分土颗粒周围存在少数针状的水化硅酸钙结晶萌芽, 将土颗粒胶结住; 14 d 时水泥土中开始出现较多呈纤维状的生成有利于加强土颗粒间的连接; 28 d 时水泥土中的纤维状水化硅酸钙晶体进一步长大, 数量进一步增多, 呈链状分布, 将土颗粒胶结住, 颗粒间的孔隙进一步减少, 结构更加紧密。但从不同龄期的水泥土中并没有发现普遍存在的水化物, 只是在土团和孔隙之间的空穴中发现有针状或纤维状的结晶体, 这说明当水泥掺量较小时, 水泥土中水泥颗粒水化所生成的  $\text{Ca}^{2+}$  和黏粒表面的离子进行交换吸附, 而剩余的  $\text{Ca}^{2+}$  不足以生成大量的纤维状水化物, 导致水泥土强度并不高。

而从 CJDS07 型固化剂固化土的 SEM 照片中也发现了针状或纤维状的水化硅酸钙结晶体, 各龄期的固化土与对应龄期的纯水泥土相比, 土颗粒的排列更加紧密, 大孔隙在尺寸和数量上都有明显的减少, 说明适量外加剂的加入提高了水泥土的密实度。

#### 4.2 固化土微结构特征定量参数分析

分别对水泥固化土和 CJDS07 型固化土 7、14、28 d 的电镜扫描图像进行处理和分析, 取得了固化土的微结构参数, 分析成果见表 6。

表 6 固化土孔隙微观结构参数统计表  
Table 6 Pore microstructure parametric statistics of solidified soil

固化土名称	龄期 /d	孔隙数量 /个	平面孔隙含量 /%	孔隙等效直径 / $\mu\text{m}$	孔隙形态比	孔隙充填比
水泥固化土	7	982	0.56	0.913	2.082	0.853
	14	925	0.54	0.894	2.044	0.868
	28	887	0.51	0.828	1.971	0.874
CJDS07 型固化土	7	948	0.54	0.898	2.034	0.863
	14	876	0.52	0.861	1.952	0.875
	28	845	0.49	0.832	1.927	0.883

从表中可以看出, 随着龄期的增长, 两种固化土平面孔隙数量和平均孔隙含量都随之逐渐减少, 孔隙等效直径和孔隙的形态比也随之减小, 而孔隙充填比有增大的趋势; 在相同龄期下, 与水泥土相比, CJDS07 型固化土的平面孔隙含量相对较少, 孔隙等效直径和形态比相对较小, 而孔隙充填比相对较大。这进一步说明随着时间的增长, 固化土中孔隙量在逐渐减小, 其中狭长的孔隙被填充分割, 孔隙有被压缩的趋势, 促使土体得到了密实, 工程

性质得到了提高, 而 CJDS07 型固化土在这方面表现出更好的趋势。

## 5 结 论

(1) 分别采用水泥单掺、水泥+石膏、水泥+氢氧化钠、水泥+碳酸钠及水泥+氯化铁双掺 5 种固化方式对 3 种典型含水率的吹填土进行固化试验, 得到了各种固化材料对吹填土固化效果的影响。

(2) 通过有效的对比和筛选, 选择了水泥、石膏、氢氧化钠、碳酸钠 4 种固化材料, 并确定了各固化材料的掺量范围; 通过正交试验确定了各含水率条件下各固化材料的最佳配比: 主剂水泥掺量为 12%, 石膏掺量为 4%, 氢氧化钠掺量为 0.6%, 碳酸钠掺量为 0.2%, 在此命名组合为 CJDS12 型固化剂, 可作为地基处理中搅拌桩用固化材料。

(3) 通过改变固化剂的掺量, 分析了不同固化剂掺量对固化土无侧限抗压强度的影响, 得到了水泥低掺量水平下的最优固化方案。其组成成分为: 主剂水泥掺量为 7%, 外加剂掺量石膏为 1.67%, 氢氧化钠为 0.25%, 碳酸钠为 0.08%, 并命名此组合为 CJDS07 型固化剂, 可作为路基填料的固化材料。

(4) 与水泥土相比, 同一龄期下, CJDS07 型固化土生成的水化物更多, 孔隙含量更少, 固化土整体性更强, 表现出的微观特性更好。

## 参 考 文 献

- [1] 杜东菊, 杨爱武, 刘举, 等. 天津滨海吹填土[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 黄新, 胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 72 - 76.  
HUANG Xin, HU Tong-an. On stabilization of soft soil with waste gypsum and cement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(5): 72 - 76.
- [3] 杨爱武, 杜东菊, 赵瑞斌, 等. 水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1823 - 1827.  
YANG Ai-wu, DU Dong-ju, ZHAO Rui-bin, et al. Experimental study of cement and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1823 - 1827.
- [4] 杨爱武, 闫澍旺, 杜东菊, 等. 碱性环境对天津海积软土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2930 - 2934.  
YANG Ai-wu, YAN Shu-wang, DU Dong-ju, et al. Experimental study of alkaline environment effects on the strength of cement soil of Tianjin marine soft soil[J].



- Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2930 - 2934.
- [5] 刘莹, 王清. 水泥与生石灰处理吹填土对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(3): 424 - 429.  
LIU Ying, WANG Qing. Laboratory model tests on consolidation of hydraulic fill treated with lime or cement additives[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2006, 14(3): 424 - 429.
- [6] 谢海澜, 王清, 李萍, 等. 生石灰和水泥混合处理吹填土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2003, 11(1): 49 - 53.  
XIE Hai-lan, WANG Qing, LI Ping, et al. Consolidation test and study on the treatment of dredge fill with cement and lime[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2003, 11(1): 49 - 53.
- [7] 董邑宁, 张青娥, 许日庆, 等. ZDYT-2 固化软土试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(3): 82 - 86.  
DONG Yi-ning, ZHANG Qing-e, XU Ri-qing, et al. Experimental study on strengthened soft clay with stabilizer ZDYT-2[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35(3): 82 - 86.
- [8] 郭印, 徐日庆, 邵允铖. 淤泥质土的固化机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1072 - 1075.  
GUO Yin, XU Ri-qing, SHAO Yun-cheng. Study on mechanism of muddy soil stabilization[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2008, 42(6): 1072 - 1075.
- [9] 孟庆山, 杨超, 邵允铖, 等. 武汉东湖淤泥早强固化试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 707 - 712.  
MENG Qing-shan, YANG Chao, SHAO Yun-cheng, et al. Experimental study of early solidification of sludge in East Lake, Wuhan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 707 - 712.
- [10] 程寅, 李战国, 邓晓轩, 等. 一种新固化材料固化滨海氯盐渍土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1240 - 1245.  
CHENG Yin, LI Zhan-guo, DENG Xiao-xuan, et al. Experimental study on a new stabilizer for stabilizing coastal chlorine soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(8): 1240 - 1245.

(接第 2441 页)

《岩土力学》2013 年第 6 期被 EI 收录论文 (42 篇, 收录率 100%) (2)

序号	论文题名	作者	页码
19	隧道围岩全长黏结式锚杆界面力学模型研究	文竞舟, 张永兴, 王 成	1645 - 1651
20	基于残余强度修正的岩石损伤软化统计本构模型研究	曹瑞琅, 贺少辉, 韦 京, 等	1652 - 1660
21	砂柱排水真空阻滞效应的试验和动力学解释	董 佩, 王旭升, 万 力, 等	1661 - 1667
22	非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究	张 抒, 唐辉明	1668 - 1674
23	温州浅滩淤泥固结系数与固结应力关系研究	吴雪婷	1675 - 1680
24	吹填泥浆中土颗粒沉降-固结规律研究	张 楠, 朱 伟, 王 亮, 等	1681 - 1686
25	考虑残余体应变的土石坝地震永久变形分析	刘汉龙, 费 康	1687 - 1695
26	充气锚杆极限承载力计算方法	彭文祥, 张 旭, 曹佳文	1696 - 1702
27	隧道洞顶围岩竖向全位移量测及变化规律研究	李又云, 张志耕, 谢永利, 等	1703 - 1708
28	新型抗滑结构围桩-土的耦合效应分析	郑明新, 孔祥营, 刘伟宏	1709 - 1715
29	基于微震信息的硬岩新生破裂面方位特征矩张量分析	明华军, 冯夏庭, 张传庆, 等	1716 - 1722
30	条形荷载作用下梯度饱和土的动力响应分析	周凤玺, 赖远明	1723 - 1730
31	可液化地基上地铁车站结构地震反应特征有效应力分析	龙 慧, 陈国兴, 庄海洋	1731 - 1737
32	天然软土地基路堤临界高度一种计算方法研究	朱 福, 战高峰, 佘 磊	1738 - 1744
33	广东核电站地应力测量及其应用	丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等	1745 - 1752
34	边坡稳定可靠度分析的广义可行方向法	裴 亮, 吴震宇, 陈建康, 等	1753 - 1759
35	考虑应变软化的巷道交叉段稳定性分析	曹日红, 曹 平, 张 科, 等	1760 - 1765
36	上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究	王卫东, 王浩然, 徐中华	1766 - 1774
37	冲击作用下的压头破岩机制研究	杨岳峰, 梁正召, 唐春安	1775 - 1785
38	大宁水库防渗墙受墙侧回填施工影响的数值模拟	刘光明, 袁鸿鹄, 黄卫红, 等	1786 - 1790
39	摩擦型岩土材料土拱效应微观机制颗粒流模拟分析	韩高孝, 宫全美, 周顺华	1791 - 1798
40	筑坝粗粒料力学特性的缩尺效应研究	王永明, 朱 晟, 任金明, 等	1799 - 1806
41	基坑开挖对邻近不同刚度建筑物影响的三维有限元分析	李志伟, 郑 刚	1807 - 1814
42	脉冲压缩方法检测岩石弹性波速度	李长征, 张碧星, 师芳芳	1815 - 1821