

# 含有机质软土水泥配比及掺砂试验研究

韩志方, 邵 俐, 刘志彬, 经 绯

(东南大学岩土工程研究所, 南京 210096)

**摘 要:** 水泥土搅拌桩是目前广泛使用的一种软土地基处理方法, 由于土中有机质的不利影响使得桩身水泥加固土的强度较低。本文通过室内含有机质软土的水泥土不掺砂和掺砂的配比试验, 研究了其无侧限抗压强度与水泥掺入比、水灰比、砂灰比以及龄期的关系, 讨论了掺砂的效果。研究结果表明, 水泥掺入比是影响水泥土强度的主要因素, 水灰比的影响次之, 灰砂比的影响最小; 掺砂能够改善有机质对水泥土强度的不利影响, 采用合理的配比能有效提高水泥土的无侧限抗压强度。通过掺砂试验得到该有机质软土的最优配比是: 水泥掺入比为 15%、水灰比为 0.5、灰砂比为 0.6, 此时其无侧限抗压强度比不掺砂试验有 37% 的提高。

**关键词:** 有机质软土; 水泥土; 掺砂试验; 无侧限抗压强度

**作者简介:** 韩志方(1983—), 男, 湖北老河口人, 东南大学硕士研究生, 从事地基处理方面的研究。

## 0 引 言

水泥土搅拌桩是一种在我国尤其是东南沿海地区广泛使用的经济、有效的地基处理形式。然而由于其地质成因的特殊性, 这些地区的软土中多含有有机质成分。有机质的存在不利于水泥与软土之间的物理化学反应, 从而影响水泥土搅拌桩的桩体强度和地基处理效果<sup>[1]</sup>。如何克服有机质对水泥搅拌桩的强度的不利影响, 对水泥土搅拌桩在含有机质软土地区的使用很关键。兰凯等对水泥土的外掺砂试验也做了一些研究工作, 认为外掺砂是可行有效的<sup>[2]</sup>; 姜鹏等通过添加纯氯化钠来抵消有机质对水泥土强度的不利影响<sup>[3]</sup>; 储诚富等对有机质含量对水泥土强度影响做了室内定量研究<sup>[4]</sup>。本文通过不掺砂和掺砂试验的水泥土的无侧限抗压强度试验, 了解水泥土无侧限抗压强度与水泥掺入比、水灰比、砂灰比以及龄期等的关系, 讨论掺砂的效果; 并对比不掺砂试验与掺砂试验的水泥土无侧限抗压强度, 得到掺砂时的最佳配比。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土样的物理力学性质

本试验土样取自浙江某高速公路, 该地区属于湖沼相沉积软土, 土样的物理力学参数见表 1。

表 1 土样物理力学性质

天然密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.78	液性指数	0.58
天然含水量(%)	44.61	渗透系数(cm/s)	$1.43 \times 10^{-7}$
比重	2.63	无侧限抗压强度(kPa)	41.72
初始孔隙比	1.12	黏聚力(kPa)	9.58
塑性指数	25.1	内摩擦角(度)	21.9

### 1.2 试验设计

现场取回的软土经风干、粉碎和过筛(5 mm)后使用。试验采用普通硅酸盐水泥(强度等级 42.5 R)以及中砂(河砂)。

#### (1) 不掺砂试验方案

含有机质软土的不掺砂情况下的水泥土配比试验采用全面试验的方法, 即将所有水泥掺入比(所加水泥质量与所加湿土质量之比)和水灰比(所加水的质量与水泥质量之比)进行组合设计, 具体试验方案见表 2。

表 2 不掺砂水泥配比试验方案

试验编号	水泥掺入比(%)	水灰比	试验编号	水泥掺入比(%)	水灰比
10A	10	0.4	20A	20	0.4
10B	10	0.5	20B	20	0.5
10C	10	0.6	20C	20	0.6
10D	10	0.7	20D	20	0.7
15A	15	0.4	22A	22	0.4
15B	15	0.5	20B	22	0.5
15C	15	0.6	20C	22	0.6
15D	15	0.7	20D	22	0.7

每种配比分别做 7 天、28 天和 90 天三个龄期的无侧限抗压强度试验,共计 144 个模块。

(2) 掺砂试验方案

这里,对掺砂试验采用了正交设计方法,以评估各因素对水泥石强度的影响程度并选取最优配比方案。正交设计可以把试验安排和数据处理两者紧密结合起来,既能减少试验次数,又可以提供丰富的试验数据,还能得到全面、正确的结论,因此是一种科学的安排试验方案和分析试验结果的方法<sup>[5]</sup>。试验采用三因素四水平  $L_{16}(4^3)$  的正交试验设计方法,表 3 和表 4 分别为试验因素水平表和正交表。

每种配比做 7 天、28 天和 90 天三个龄期的无侧限抗压强度试验,共计 144 个模块。其中,表 5 中的灰砂比指水泥与砂的质量比。

表 3 试验因素水平表

水平	A 因素 水泥掺入比(%)	B 因素 水灰比	C 因素 灰砂比
水平 1	10	0.4	0.6
水平 2	15	0.5	0.8
水平 3	20	0.6	1
水平 4	22	0.7	1.5

表 4 正交表

序号	1A	2B	3C	序号	1A	2B	3C
1	1	1	1	9	3	1	3
2	1	2	2	10	3	2	4
3	1	3	3	11	3	3	1
4	1	4	4	12	3	4	2
5	2	1	4	13	4	1	2
6	2	2	1	14	4	2	3
7	2	3	2	15	4	3	4
8	2	4	3	16	4	4	1

1.3 试验方法

试验方法参照规程《软土地基深层搅拌加固法技术规程》YBJ 255—91 和《土工试验规程》SL 237—1999 等相关的规定和说明进行。室内试件尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,采用人工拌和,经振动密实,最后试块表面用刮刀刮平,盖上塑料布,以防水分蒸发。试块成型 1~2 d 拆模,编号、称重后放入标准养护室,分别进行不同龄期的养护,然后进行相应龄期的无侧限抗压强度试验。

表 5 掺砂水泥配比试验方案

试验 编号	水泥掺入 比(%)	水灰 比	灰砂 比	试验 编号	水泥掺入 比(%)	水灰 比	灰砂 比
10A	10	0.4	0.6	20A	20	0.4	1.0
10B	10	0.5	0.8	20B	20	0.5	1.5
10C	10	0.6	1.0	20C	20	0.6	0.6
10D	10	0.7	1.5	20D	20	0.7	0.8
15A	15	0.4	1.5	22A	22	0.4	0.8
15B	15	0.5	0.6	22B	22	0.5	1.0
15C	15	0.6	0.8	22C	22	0.6	1.5
15D	15	0.7	1.0	22D	22	0.7	0.6

2 试验结果分析

2.1 90 天龄期方案分析

不掺砂试验中水泥石试样 90 天龄期的无侧限抗压强度试验结果见表 6。

表 6 不掺砂水泥石试样 90 天强度(MPa)

方案	90 天	方案	90 天
10A	0.702	20A	1.707
10B	0.752	20B	1.262
10C	0.625	20C	1.527
10D	0.602	20D	1.439
15A	0.875	22A	2.213
15B	0.931	22B	2.215
15C	1.242	22C	1.565
15D	0.923	22D	1.850

基于全面试验方案的结果,从表 6 可见,方案 22B(水泥掺入比为 22%,水灰比为 0.5)的无侧限抗压强度最高。实际工程中,可根据设计要求选取合适配比方案,以免造成浪费。

表 7 中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  分别是 A、B、C 三因素对应的 4 个水平的和; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  为 4 水平和的平均值;极差为最大值与最小值之差。根据不同因素的极差得到对水泥石无侧限抗压强度的影响由强到弱依次为:水泥掺入比、水灰比和灰砂比。同时可以得到 90 天龄期的无侧限抗压强度最高方案为  $A_4B_1C_2$ ,即水泥掺入比为 22%,水灰比为 0.4,灰砂比为 0.8。同样,在实际工程也应根据设计要求选取合适配比方案。

表 7 掺砂试验方案分析

序号	A	B	C	90 天强度 (MPa)	100 倍
1	1	1	1	0.517	52
2	1	2	2	0.523	52
3	1	3	3	0.453	45
4	1	4	4	0.621	62
5	2	1	4	0.921	92
6	2	2	1	1.102	110
7	2	3	2	1.419	142
8	2	4	3	1.101	110
9	3	1	3	1.554	155
10	3	2	4	1.652	165
11	3	3	1	1.273	127
12	3	4	2	1.092	109
13	4	1	2	2.052	205
14	4	2	3	1.621	162
15	4	3	4	1.663	166
16	4	4	1	1.696	170
<hr/>					
$K_1$	211	504	459		
$K_2$	454	490	509		
$K_3$	557	481	473		
$K_4$	703	451	486		
<hr/>					
$k_1$	52.85	126.10	114.72		
$k_2$	113.55	122.45	127.15		
$k_3$	139.28	120.18	118.20		
$k_4$	175.78	112.73	121.40		
<hr/>					
极差	122.93	13.37	12.43		
最优方案	A <sub>4</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>		

2.2 各影响因素与无侧限抗压强度间的关系

(1) 不掺砂试验

不掺砂试验选用龄期 90 天的情况进行讨论, 如图 1 所示保持水灰比不变, 强度随水泥掺入比的增加而增加。从图中可以看到水灰比为 0.4 和 0.5 时, 水泥掺入比高的强度较高, 强度增长比较明显; 水灰比为 0.6 时, 随着水泥掺入比的增加, 强度的增加较缓慢, 其他龄期条件下, 也有这样的

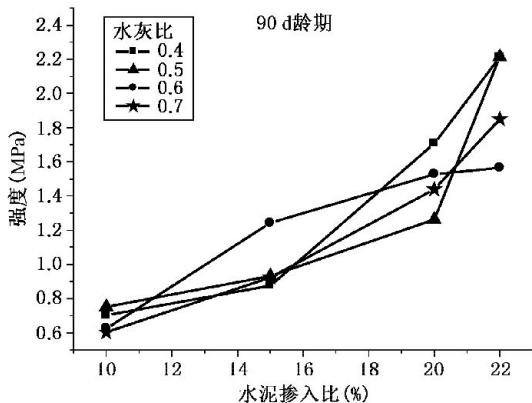


图 1 强度与水泥掺入比的关系

变化趋势。

再选取水灰比为 0.5, 强度与龄期的关系如图 2 所示。保持水灰比与水泥掺入比不变, 水泥土的强度随着龄期的增长而增长, 水泥掺入比高的配比后期强度增长较快。其他水灰比条件下, 同样有这样的变化趋势。

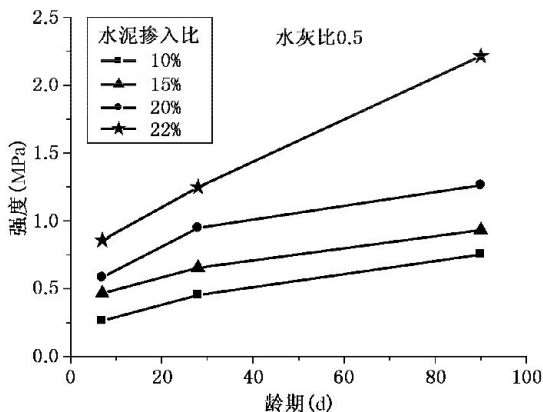


图 2 强度与龄期的关系

无侧限抗压强度与水灰比的关系如图 3 所示, 当水泥掺入比较低时, 无侧限抗压强度随着水灰比的变化不明显; 当水泥掺入比较高时, 无侧限抗压强度随着水灰比变化而显著变化。

试验结果表明, 水泥掺入比对无侧限抗压强度的影响较水灰比影响大。

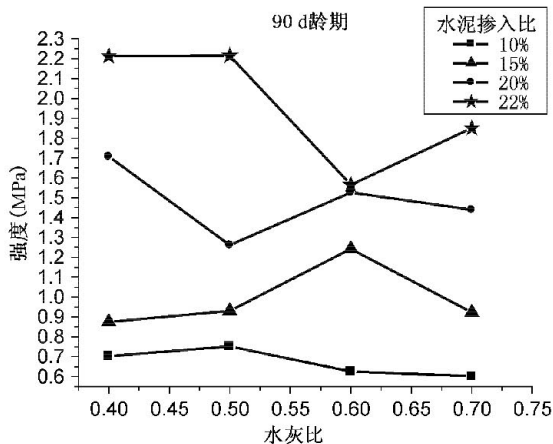


图 3 强度与水灰比的关系

(2) 掺砂试验

掺砂试验结果选取对应情况进行讨论, 图 4 是龄期 90 天时无侧限抗压强度随水泥掺入比的变化, 强度随着水泥掺入量的增加而增加, 7 d 和 28 d 龄期也有这样的趋势。同样都在水灰比为 0.6 时, 在水泥掺入比较高时, 强度变化有所波动。

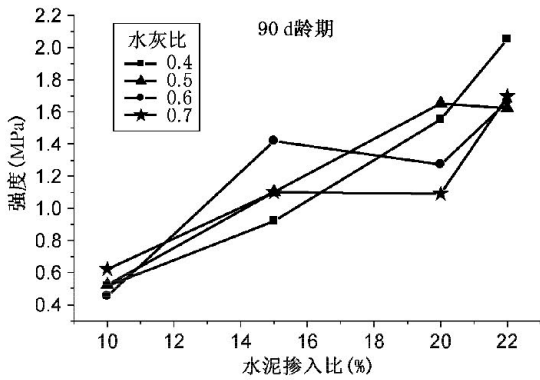


图4 强度与水泥掺入比的关系

从图5中可知,水泥掺入比为20%和22%的无侧限抗压强度基本一致,是因为前者的灰砂比为1.5,后者的为1,灰砂比是水泥与砂的比值。此时水泥掺入量与土、水以及砂三者和的比值实际上是比较接近的,分别为17.65%和18.03%,从而导致其强度基本一致。其他三个水灰比的强度趋势一致,同时由于外掺砂使得水泥所占固相比例有所变化,导致强度有所交叉。

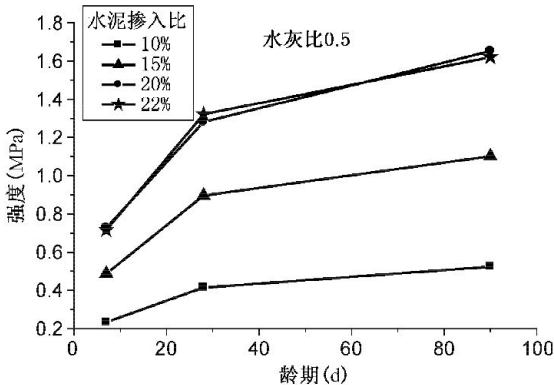


图5 强度与龄期的关系

如图6为无侧限抗压强度与水灰比的关系,

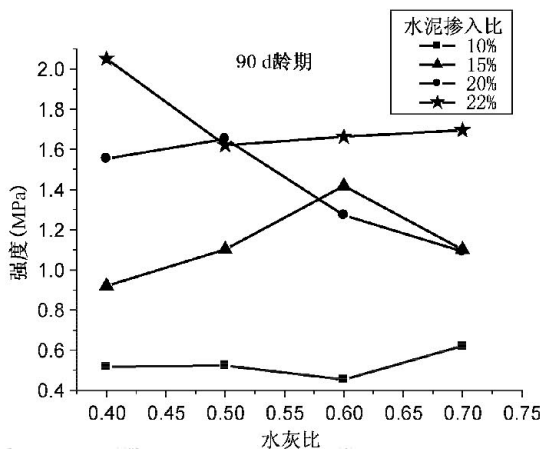


图6 强度与水灰比的关系

在低水泥掺入比时,随着水灰比的变化强度变化不显著;在高水泥掺入比时,强度随着水灰比的变化而波动。在7 d和28 d龄期时,同样有这样的关系。

### 2.3 掺砂与不掺砂强度对比分析

这里,定义水泥土掺砂后的无侧限抗压强度( $q_1$ )较不掺砂的无侧限抗压强度( $q_2$ )提高百分比为 $\Delta(\%)$ 。其中:

$$\Delta = [(q_1 - q_2) / q_2] \times 100$$

表8 掺砂无侧限抗压强度较不掺砂提高百分比 $\Delta(\%)$

	7 d			28 d			90 d			
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	
10A	-9.50	-16.70	-26.31	10C	-2.23	-21.72	-27.61			
15A	-0.92	28.13	5.18	15C	15.54	31.79	14.22			
20A	-19.34	-10.27	-8.95	20C	-3.11	-8.27	-16.59			
22A	-16.66	-12.51	-7.26	22C	-18.58	-4.56	6.26			
10B	-10.69	-8.26	-30.41	10D	5.93	-16.72	3.10			
15B	4.88	37.00	18.32	15D	2.05	23.45	19.29			
20B	24.69	35.16	30.90	20D	1.00	-9.32	-24.13			
22B	-16.58	5.88	-26.82	22D	-10.53	-6.98	-8.32			

从表8可知,同一水泥掺入比、水灰比条件下,掺砂后无侧限抗压强度的增加主要集中在水泥掺入比为15%的情况;另外,对于低水泥掺入比和早期强度没有提高。掺砂7天龄期强度大部分比不掺砂强度低,水泥掺入比为15%和20%时有个别增加的配比;掺砂28天龄期强度的增加比较明显,最高增加达到37%;掺砂90天龄期强度主要是水泥掺入比为15%的增加比较明显,最高增加达到31%。试验结果表明掺砂对提高水泥土试块的后期强度更加有利。另外,15B、20B、15C和15D的三个龄期的强度都是增加的,对比这四种配比,考虑水泥土的早期强度与后期强度的设计要求,15B配比方案(水泥掺入比为15%,水灰比为0.5,灰砂比为0.6)增长最为均匀,为掺砂的最佳配比。

再对掺砂与不掺砂的90天龄期无侧限抗压强度进行比较,在同一水泥掺入比下,掺砂试验的水泥土的无侧限抗压强度与不掺砂试验的随水灰比的变化见图7。

图7中,水泥掺入比为15%时,掺砂后水泥土的无侧限抗压强度均比不掺砂高,同时,在水泥掺入比为10%、20%和22%时,掺砂后有个别水泥土的无侧限抗压强度比不掺砂高。究其原因,这里砂作为骨架材料,改善了水泥土的颗粒组成,从而可以减小有机质对水泥土强度增长的不利影

响,使得水泥土的无侧限抗压强度得到增加。

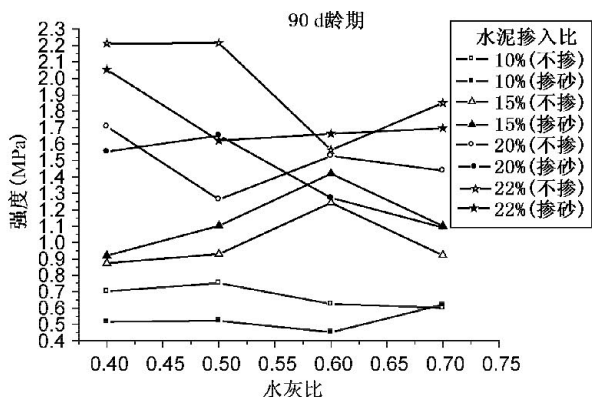


图7 同一水泥掺入比下强度对比

从图7可以看出,无论掺砂或者不掺砂,对应同一水灰比条件下都是水泥掺入比高的无侧限抗压强度较高,说明水泥掺入比是影响水泥土无侧限抗压强度的主要因素。同时在水泥掺入比为10%、20%和22%时,试验结果中大部分掺砂后强度较不掺砂的低。由于水泥掺入比是影响水泥土无侧限抗压强度的主要因素,并且水泥土无侧限抗压强度同时由水泥掺入比、水灰比以及灰砂比决定,存在一个合适的配比使掺砂后水泥土无侧限抗压强度增加最多。试验结果中,15%为这一合适水泥掺入比,高于15%或者低于15%的水泥掺入比时掺砂后对水泥土的无侧限抗压强度提高的作用不大。

### 3 结论

(1) 不掺砂与掺砂两种试验方案得到的水泥土无侧限抗压强度与龄期、水泥掺入比以及水灰

比的关系基本一致:保持水泥掺入比和水灰比不变,水泥土的无侧限抗压强度随着龄期的增长而增长;同一水灰比条件下,强度随着水泥掺入比的增大而增大;同一水泥掺入比条件下,低水泥掺量的水泥土强度随水灰比改变变化不大,高水泥掺入比条件下低水灰比的水泥土强度较高,且强度随水灰比的变化波动较大;水泥掺入比是影响无侧限抗压强度的主要因素。

(2) 掺砂对于抑制有机质成分对水泥土强度的劣化是有作用的,但并非一定是有利的,只有在充分考虑水泥与砂的合理用量即在合适的配比方案下,方可取得较不掺砂水泥配比方案更好的效果。通过试验得到,水泥掺入比为15%,水灰比0.5以及灰砂比为0.6时为最佳配比,此时水泥土无侧限抗压强度较不掺砂的提高37%。

### 参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 兰凯, 黄汉盛, 鄢秦宁. 软土型水泥土掺砂试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 113~115.
- [3] 姜鹏, 方磊, 贺富强. 抵抗有机质对水泥土强度不利影响的有效方法[J]. 公路, 2007, (3): 17~21.
- [4] 储诚富, 邵俐, 刘松玉, 等. 有机质含量对水泥土强度影响的室内定量研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1613~1616.
- [5] 现代应用数学手册编委会. 现代应用数学手册——概率统计与随机过程卷[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.