

# 番禺区龙湾水闸重建工程水泥搅拌桩室内配合比试验研究

罗素芬 王立华 陈理达

(广东省水利水电科学研究院, 广州, 510610)

摘要: 本文通过水泥土室内配合比试验, 分析了水泥掺量、龄期与水灰比对水泥土试件无侧限抗压强度的影响。

关键词: 水泥土 强度 影响因素

## 1 概述

水泥土搅拌桩是以桩的形式对软土地基补强, 使补强桩体与天然地基共同组成承载力较高、压缩性较低的复合地基。建筑地基处理技术中, 对淤泥、淤泥质土、粉土和含水量较高的软土地基, 常常采用深层搅拌法加固提高地基承载力。水泥土搅拌法是一种经常用的地基加固方法, 根据施工工艺的不同, 向软土中喷出的水泥状态分为水泥浆液和水泥粉体。深层水泥搅拌桩是利用水泥作为固化剂的主剂, 通过特制的深层搅拌机械在地基深部就地将软土和固化剂强制拌和, 使软土硬结而提高地基强度。

复合地基承载力是根据设计要求来确定的, 为了满足设计要求, 必须进行水泥加固土的室内配合比试验, 室内试验时, 应考虑采用的施工工艺以及室内与现场的差异。本文根据番禺区龙湾水闸重建工程设计要求对水泥土室内配合比进行试验, 通过不同水灰比、不同水泥掺量、喷粉与喷浆两种施工工艺进行试验对比, 分析影响水泥土强度的各因素。

## 2 室内配合比试验

### 2.1 原材料

试验所用水泥为广东清远广英水泥有限公司生产的普通水泥, 强度等级为 42.5R; 试验土样含水量 58.9 ~ 62.3%, 平均 61.0%; 土样有机质含量 2.66 ~ 2.76%, 平均 2.73%;  $SO_4^{2-}$  含量 156.81 ~ 191.55mg/kg, 平均 176.21mg/kg; PH 值 7.66 ~ 7.80, 平均 7.72, 呈碱性。根据《岩土工程勘察规范》GB50021-2001 中关于场地土对混凝土结构的腐蚀性评价方法, 本工程环境场地土对混凝土结构没有腐蚀, 所检 3 个土样 PH 值大于 7.0, 呈碱性, 该场地土层对混凝土不具有泛酸型腐蚀;  $SO_4^{2-}$  含量 156.81 ~ 191.55mg/kg, 该场地土层对混凝土不具有硫酸盐型腐蚀; 有机质含量 2.17 ~ 2.48%。试验结果见表 1。

表 1 土样试验结果

试验编号	送样编号	有机质含量 (%)	PH 值	$SO_4^{2-}$ 含量(mg/kg)	含水量 (%)
2604	1#	2.76	7.66	156.81	61.8
2605	2#	2.76	7.71	191.55	58.9
2606	3#	2.66	7.80	180.28	62.3
平均值		2.73	7.72	176.21	61.0

## 2.2 试验设计参数

设计试块 90d 龄期无侧限抗压强度平均值不小于 1.8MPa；

土样：淤泥质粘土；

水泥掺量：14%、17%、20%和 23%；

水泥浆水灰比：0.50 和 0(喷粉)；

试验龄期：7d、14d、28d 和 90d。

## 2.3 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》YBJ255-91 和《粉体喷搅法加固软弱土层技术规程》TB10113-96 相关规定，试验用土样用 5mm 筛筛去其中的夹杂物，拌合均匀，在密封桶内，放置 24h 后进行配合比试验。各种材料的用量按配合比准确称量，采用人工拌和，制模后用塑料薄膜覆盖试件，以防水分蒸发过快。试件 2d 后拆模，拆模后放置于温度为  $20 \pm 2$  的水中养护至试验龄期。

## 3 试验结果及分析

水泥土 7d、14d、28d 和 90d 的无侧限抗压强度试验结果见表 2，影响水泥土搅拌桩抗压强度的因素包括：土样的性质、水泥掺量、水泥强度等级、水灰比、龄期等。

表 2 水泥土室内配合比无侧限抗压强度结果表

项目		无侧限抗压强度(MPa)							
设计强度		90d 试块立方体强度平均值 1.8MPa							
水灰比		0.50				喷粉			
龄期		7d	14d	28d	90d	7d	14d	28d	90d
水泥掺量 (%)	14	0.50	0.61	0.78	1.06	0.76	1.15	1.34	1.74
	17	0.65	0.86	0.99	1.39	1.24	1.68	2.03	2.84
	20	0.84	1.18	1.39	1.90	1.81	2.4	3.02	3.96
	23	0.97	1.43	1.69	2.29	2.51	3.1	4.07	5.42

### 3.1 水泥掺量的影响

水灰比为 0.50，水泥土试件无侧限抗压强度与水泥掺量的关系见图 1，由图可见，两者呈线性关系，相关性良好。水泥掺量从 14%增加到 23%时，7d 龄期无侧限抗压强度从 0.50MPa 增大到 0.97MPa，增大 94%；14d 龄期从 0.61MPa 增大到 1.43MPa，增大 134.4%；28d 龄期从 0.78 MPa 增大到 1.69MPa，增大 116.7%；90d 龄期从 1.06 MPa 增大到 2.29MPa，增大 116.0%。

水灰比为 0(喷粉)，水泥土试件无侧限抗压强度与水泥掺量的关系见图 2，由图可见，两者呈线性关系，相关性良好。水泥掺量从 14%增加到 23%时，7d 龄期无侧限抗压强度从 0.76MPa 增大到 2.51MPa，增大 230.3%；14d 龄期从 1.15MPa 增大到 3.1MPa，增大 169.6%；28d 龄期从 1.34MPa 增大到 4.07MPa，增大 203.7%；90d 龄期从 1.74MPa 增大到 5.42MPa，增大 211.5%。

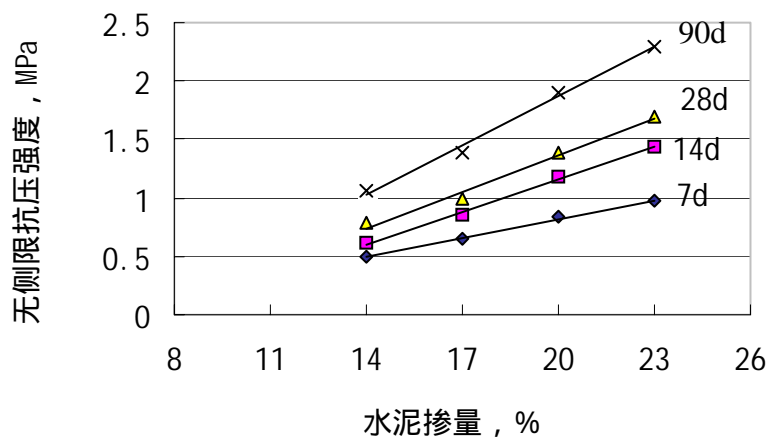


图1 水泥土无侧限抗压强度 - 水泥掺量关系图  
W/C=0.5

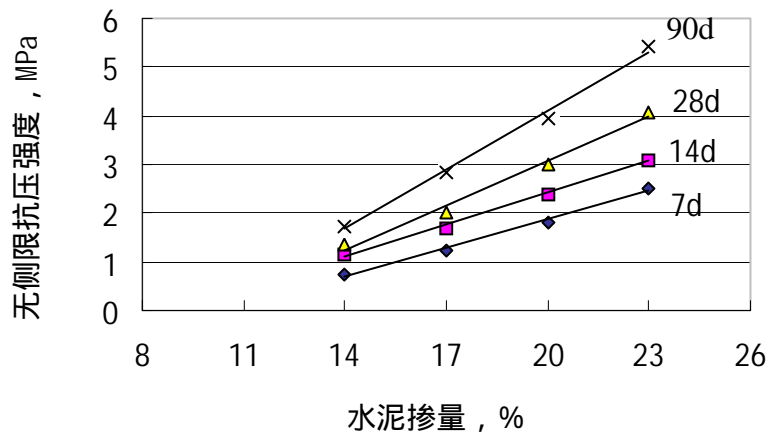


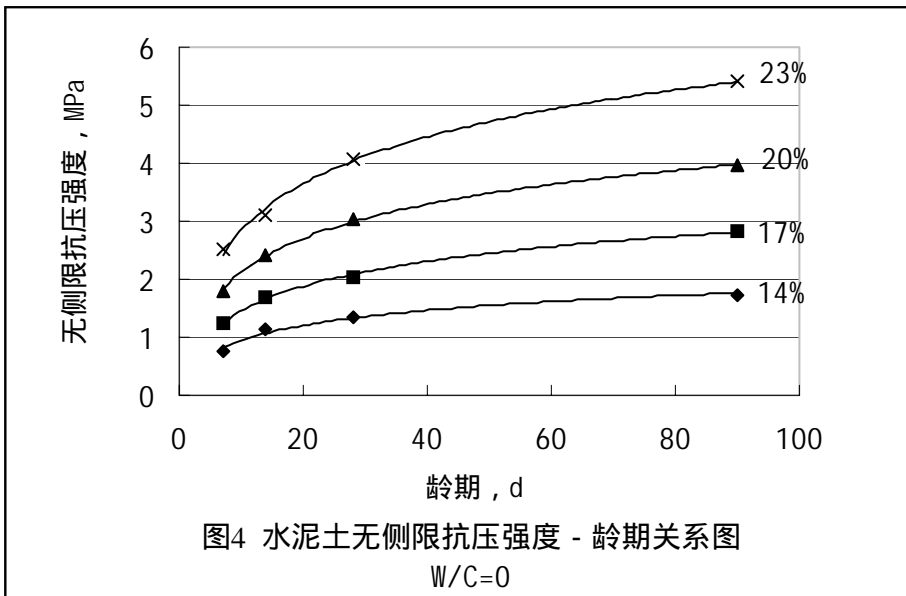
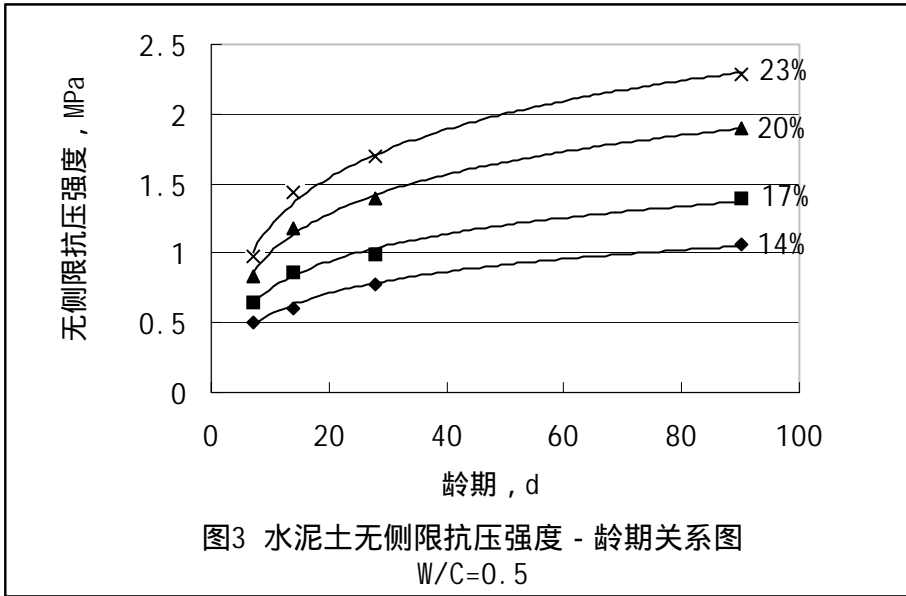
图2 水泥土无侧限抗压强度 - 水泥掺量关系图  
W/C=0

在其它条件相同的情况下，水泥掺量越大，试件的无侧限抗压强度就越大。水泥加固软土主要是由于水泥与土之间相互的物理化学反应，包括水泥的水解和水化反应、硬凝反应、水泥和软土之间的离子交换和团粒化作用。水泥作为加固剂，掺量越大，与软土的物理化学作用进行得越快、程度越深入、加固作用越大、效果越显著。同时，水泥减小了土样的含水量，有利于土样的固结，从而提高水泥土的无侧限抗压强度，改善加固效果。

### 3.2 龄期的影响

在水灰比为 0.50，水泥土试件无侧限抗压强度与龄期的关系见图 3，由图可见，两者呈对数关系，相关性良好。龄期从 7d 增加到 90d 时，水泥掺量 14% 的无侧限抗压强度从 0.50MPa 增大到 1.06 MPa，增大 112.0 %；水泥掺量 17% 的从 0.65MPa 增大到 1.39 MPa，增大 113.8 %；水泥掺量 20% 的从 0.84MPa 增大到 1.90MPa，增大 126.2 %；水泥掺量 23% 的从 0.97MPa 增大到 2.29 MPa，增大 136.1 %。

在水灰比为 0(喷粉)，水泥石试件无侧限抗压强度与龄期的关系见图 4，由图可见，两者呈对数关系，相关性良好。龄期从 7d 增加到 90d 时，水泥掺量 14% 的无侧限抗压强度从 0.76MPa 增大到 1.74MPa，增大 128.9%；水泥掺量 17% 的从 1.24MPa 增大到 2.84MPa，增大 129.0%；水泥掺量 20% 的从 1.81MPa 增大到 3.96MPa，增大 118.8%；水泥掺量 23% 的从 2.51MPa 增大到 5.42MPa，增大 115.9%。



当其它条件相同时，水泥石的无侧限抗压强度随龄期增长而增大。水泥作为一种水硬性材料，在有水的条件下，其熟料矿物与水发生水化反应，形成水化产物，水化产物凝聚产生强度。水泥早期的水化非常迅速，当水泥颗粒与水接触后，水化反应立即开始。首先水化的是水泥颗粒的外层，当水化进行到一定程度后，水化产物包裹其表面，内部未水化的水泥核心进一步水化变得困难，水化速度大大降低，水泥完全水化需要相当长的时间，由此可见，水泥水化是一个长期的过

程，随着水泥的不断水化，水泥石的强度不断增长。

水泥加固软土的基本原理是基于水泥加固土的物理化学反应。在水泥土中，由于水泥的掺量较少，水泥的水解和水化反应是在具有一定活性的介质的土的围绕下进行的，所以硬化速度缓慢且作用复杂，因此水泥土强度增长的过程比较缓慢。硬凝反应、水泥和软土之间的离子交换和团粒化作用也是一个长期的过程，水泥土的强度随这些物理化学反应的发展而不断增长。根据以往试验，一般情况下，7d 龄期时水泥土强度可达标准强度(90d 龄期)的 30%~50%；30d 龄期可达标准强度的 60%~75%；90d 龄期约为 180d 的 80%，不同水泥土随着龄期增长的百分率不同，以上数值供参考。

### 3.3 水泥强度等级

水泥土试件各龄期的无侧限抗压强度随水泥强度等级提高而增加。

### 3.4 水灰比的影响

当土样含水量较大时，拌和用的外加水量对水泥土试件的无侧限抗压强度影响较小。水泥浆的拌合用水一方面满足水泥水化的需要，另一方面满足施工所需的流动性。通常水泥的掺入量较少，软土中的水分足以满足水泥水化的需要，水泥浆中的水分主要是为了满足施工要求。水灰比越大，加入的水越多，水泥土的含水量就越大，越不利于土颗粒的凝聚固结，不利于水泥土强度的增长，影响加固效果。因此在满足施工要求的前提下，选用较小的水灰比有利。但是水灰比过小，以致水泥浆不能满足施工要求，不能充分地拌合被加固土，水泥形成团块，分散不均匀，部分水泥土中的水泥含量就会大大少于掺入量，从而影响整体的施工质量和效果。

### 3.5 软土本身的影响

由于土样本身含水量、有机质含量和 PH 值等因素的影响，水泥对土的加固效果存在明显差异。当水泥土配合比相同时，其强度随土样天然含水量的降低而增大。研究表明，当土样含水量在 50~85%范围内变化时，含水量每降低 10%，强度可提高 30~50%；有机质含量少的水泥土强度比有机质含量高的水泥土强度高得多。由于有机质使土层具有较大的含水量和塑性，较大的膨胀性和低渗透性，并使土层具有一定的酸性，阻碍水泥水化反应和土样的固结，影响水泥土强度增长。

## 4 结论

通过本试验分析，得出如下结论：

4.1 影响水泥土搅拌桩抗压强度的因素包括：水泥掺量、水泥强度等级、水灰比、龄期和土样性质等。

4.2 水泥土无侧限抗压强度随水泥土水泥用量增加而增大，两者呈线性关系；

4.3 水泥土无侧限抗压强度随龄期增长，两者呈对数关系。

4.4 按照《建筑地基处理技术规范》JGJ79-91 规定，水泥土无侧限抗压强度现场取样值与室内试验比值为 0.35~0.5；因此，水灰比与水泥掺量的选择应满足设计强度要求，并适宜施工，保证水泥土强度的均匀性。本次配合比试验得出，水灰比为 0.5 时，按 20%的水泥掺量进行施工；水灰比为 0（喷粉）时，按 17%的水泥掺量进行施工；满足设计强度要求。

## 参考文献

- [1] 软土地基深层搅拌加固法技术规程 YBJ255-91
- [2] 粉体喷搅法加固软弱土层技术规程 TB10113-96
- [3] 建筑地基处理技术规范 JGJ79-91