

## 不同因素对水泥搅拌桩强度影响的试验研究

曹支才<sup>1</sup>, 王光辉<sup>2\*</sup>

(1. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710000; 2. 中北工程设计咨询有限公司)

**摘要:**为了探究水泥搅拌桩强度的影响因素,该文以陕西吴(起)定(边)高速公路典型湿陷性黄土地基处理为背景,通过水泥搅拌桩不同因素条件下的强度差异,探究水泥粉煤灰加固黄土在不同因素下的力学特性变化规律。结果表明:水泥粉煤灰掺入比越大,水泥搅拌桩强度越高;水泥强度从32.5级提高到42.5级,则试件强度会明显提高,在90 d龄期下,水泥强度等级为42.5级的试件比32.5级的试件强度增加约40%~60%;水泥搅拌桩强度随试件破坏时含水率增加而降低,在水泥粉煤灰掺入比为20%时,水泥搅拌桩强度变化最明显。水泥粉煤灰可以有效地加固湿陷性黄土,可为其他地区的黄土地基加固提供参考。

**关键词:**公路工程;湿陷性黄土;水泥搅拌桩;影响因素;力学特性

湿陷性黄土具有流变性较强以及压缩性较高、承载能力较低等特性,为了尽可能避免湿陷性黄土对公路整体质量的影响,在施工过程中必须加强对湿陷性黄土地基的处理,目前经常采用的处治措施为水泥搅拌桩法,即采用专门的搅拌机械设备对固化剂、软土进行就地搅拌,软土在水泥的作用下变为水泥加固土,水稳性和整体性得到一定程度的提高。

多年来,广大工程师们针对湿陷性黄土及水泥搅

拌桩加固地基进行了大量的研究工作。雒亿平基于湿陷性黄土的工程特性,针对现有湿陷性黄土地基处理方法所存在的缺陷,创新性地提出了灰土垫层与防渗膜相结合的联合地基处理方法,并对该复合地基进行了深入探讨,不仅对复合地基力的相互作用、变形及效应做了研究,而且分析了防渗膜铺设深度对复合地基应力应变的影响;鞠兴华等依托某高速公路工程,通过现场试验检测,确定了水泥粉煤灰搅拌桩处理饱和黄

- \*\*\*\*\*
- [4] 符瑞华,高俊永,梁磊,等.甘蔗渣利用现状及致密成型研究发展[J].甘蔗糖业,2013(2).
- [5] Shaik H M, Pandare K V, Nair G, et al. Utilization of Sugarcane Bagasse Cellulose for Producing Cellulose Acetates: Novel Use of Residual Hemicellulose as Plasticizer [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 6 (1):23-29.
- [6] Hassan M L, Rowell R M, Fadl N A, et al. Thermoplastic Iization of Bagasse. I. Preparation and Characterization of Esterified Bagasse Fibers[J]. Applied Polymer Science,2000,76(4):561-574.
- [7] BRUGNAGO R J, SATYANARAYANA K G, WYPYCH F, et al. The Effect of Steam Explosion on the Production of Sugarcane Bagasse/Polyester Composites [J]. Composites: Part A, 2011, 42(4):364-370.

- [8] RODRIGUES F, MAIA T F, MULINARI D R. Tensile Strength of Polyester Resin Reinforced Sugarcane Bagasse Fibers Modified by Esterification[J]. Engineering Proceedings, 2011, 10: 2 348-2 349.
- [9] 何壮彬,覃峰,黄琼念.蔗渣纤维 SMA 沥青混合料结构参数实验研究[J].新型建筑材料,2011(10).
- [10] 何壮彬,谢春荣,覃峰.路用蔗渣木质素纤维稳定性试验研究[J].新型建筑材料,2012(2).
- [11] 吕鹏.蔗渣纤维沥青混合料抗腐蚀性能试验研究[D].广西工学院硕士学位论文,2012.
- [12] 吕鹏,黄琼念.蔗渣纤维沥青混合料抗腐蚀性能试验研究[J].西部交通科技,2012(2).
- [13] 覃峰.蔗渣纤维沥青混合料超薄路面层抗腐性能试验研究[J].新型建筑材料,2017(2).

收稿日期:2020-03-13(修改稿)

基金项目:陕西省科技计划项目(编号:2018SF-364);陕西省交通科技项目(编号:17-12K,19-10K);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:300102218502,300102318401)

作者简介:曹支才,男,大学本科,高级工程师.E-mail:2376371822@qq.com

\*通信作者:王光辉,男,硕士.E-mail:yalwb@qq.com

土地基的可行性,为地基处理方案提供有效依据;宋修广等通过埋设土压力盒实测桩土应力比,分析了水泥土搅拌桩复合地基中桩土应力比的主要影响因素;秦世伟等分析了养护条件对水泥土搅拌法改善淤泥质黏土强度、变形特性的影响规律,发现在不同养护条件下,同一水泥掺入量下水中养护的水泥土强度值是软土养护试块强度的两倍,并且水中养护试件的变形能力、破坏时的应变以及残余强度等皆强于其余二者。可见,中国国内水泥土搅拌桩复合地基技术已经得到了广泛的应用,目前对有关水泥搅拌固结黄土的工程应用较多,但固结过程涉及的土体受力变化研究较少。

陕西吴定高速公路 K83+905~K85+070 为湿陷性黄土段,地基采用水泥搅拌桩加固处理,该段路基位于 H85 滑坡Ⅱ区影响范围内,且路基左侧地表为虚填土,下部为淤泥质土层,地下水对混凝土盐类结晶及硫酸盐(含岩地层)具有弱侵蚀性。该路段利用水泥和粉煤灰(二灰)成型水泥搅拌桩增强强度。基于此,该文开展水泥搅拌桩实施过程中的力学特性试验,分析水泥粉煤灰掺入比、水泥强度等级、养护方式以及含水率变化对水泥搅拌桩力学性能的影响,阐明吴定高速公路典型湿陷性黄土路基进行水泥搅拌桩加固时的强度变化规律,以便为其他地区类似的地基加固提供参考。

1 材料与试验

相关试验方法依据 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》进行。

1.1 试验材料

(1) 土样

试验所用土样为测试路段地面 1 m 以下的湿陷性黄土。

将所采集的土样经过风干、碾碎、过 5 mm 筛,其物理力学性质如表 1 所示。

表 1 土样的物理力学性能

天然含水量 $w/\%$	孔隙比 $e$	压缩系数 $\alpha_v/(\text{MPa}^{-1})$	无侧限抗压 强度 $f_{cu}/\text{kPa}$
30.29	0.7	0.3	42

(2) 二灰

水泥为普通硅酸盐水泥,强度等级为 32.5 级和 42.5 级。所使用的粉煤灰为某电厂所产。二灰的质

量配比为水泥:粉煤灰=2:1。水泥及粉煤灰的相关指标如表 2、3 所示。

表 2 采用水泥的相关指标

细度/ %	标准稠度用 水量/%	凝结时间/min		安定性
		初凝时间	终凝时间	
4.50	28.70	240	324	合格

表 3 采用粉煤灰的相关指标

细度	需水 量比	三氧 化硫	烧失量	含水量	游离氧 化钙	碱含 量
8.2	93	1.0	2.4	0.1	0	2.19

1.2 试件制备

按水灰比为 0.55,水泥粉煤灰比为 2:1,水泥粉煤灰占黄土的比例(二灰掺入比)为 6%、11%、15%、18%、20%和 25%成型试件。试件为边长 70.7 mm 的立方体。

不同二灰掺入比下水泥与粉煤灰用量见表 4,严格按照规程要求制备试件,每批试件一次搅拌成型。

表 4 不同二灰掺入比下水泥与粉煤灰用量

二灰掺入比 $\alpha_w/\%$	水泥/g	粉煤灰/g
6	30.29	15.14
11	44.85	22.43
15	61.67	30.84
18	68.89	34.45
20	74.04	37.02
25	87.86	43.93

1.3 试验方案

(1) 二灰掺入比对水泥搅拌桩强度的影响

已有研究发现,在黄土中添加水泥虽然能够增强黄土的强度,但也存在一个临界添加量,当水泥掺量低于 10%时,二者的固化反应较弱,增强效果并不明显,因此一般添加量都为 10%~20%。此外,养护时间以及原状土的不同也是影响黄土强度增强的重要因素,养护龄期不同,黄土强度的增强率不同,原状土不同,增强率也不一样。

为了探究二灰掺入比对水泥搅拌桩强度的影响,将二灰掺入比分别定为 6%、11%、15%、18%、20%、25%进行试验,具体试验方案如表 5 所示。

### (2) 水泥强度等级对水泥搅拌桩强度的影响

水泥强度等级对水泥搅拌桩的强度有一定的影响,为了保证试验结果的准确性,需对 32.5 与 42.5 级两种强度等级的水泥进行水泥胶砂强度试验(ISO 法),用以检验水泥强度。

选用 32.5 和 42.5 级两个强度等级的普通硅酸盐水泥进行无侧限抗压强度对比,黄土含水量为 30%,其详细方案如表 6 所示。

表 5 试验 1 详细方案

二灰掺入比 $\alpha_w/\%$	7 d	28 d	60 d	90 d
6	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$
11	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	$A_{24}$
15	$A_{31}$	$A_{32}$	$A_{33}$	$A_{34}$
18	$A_{41}$	$A_{42}$	$A_{43}$	$A_{44}$
20	$A_{51}$	$A_{52}$	$A_{53}$	$A_{54}$
25	$A_{61}$	$A_{62}$	$A_{63}$	$A_{64}$

注: $A_{11}$  表示  $T=7$  d,  $\alpha_w=6\%$  时试件的无侧限抗压强度。 $A_{ij}$  ( $i=1,2,3,4,5,6; j=1,2,3,4$ ) 所代表的含义与  $A_{11}$  同理。

表 6 试验 2 详细方案

二灰掺入比 $\alpha_w/\%$	28 d	90 d
11	$B_{11}$	$B_{12}$
20	$B_{21}$	$B_{22}$
25	$B_{31}$	$B_{32}$

注: $B_{11}$  表示  $T=28$  d,  $\alpha_w=11\%$  时试件的无侧限抗压强度。 $B_{ij}$  ( $i=1,2,3; j=1,2$ ) 所代表的含义与  $B_{11}$  同理。

### (3) 养护方式对水泥搅拌桩强度的影响

不同的养护方式对水泥搅拌桩的强度也有不同的影响,目前主要的养护方式有 3 种,分别是标准养护、水中养护、软土养护,三者养护温度区别不大,都为 20℃ 左右,主要区别在于养护的地点不同,标准养护是将试件放入塑料袋中密封,水中养护是将试件放在水中养护,软土养护是将试件放在土中养护。

该文采用标准养护和水中养护两种方式,水泥为标号 32.5 级的普通硅酸盐水泥,详细试验方案如表 7 所示。

### (4) 含水率对水泥搅拌桩强度的影响

试件养护时置于不同湿度的条件下,使其内部含水率不同,当试件发生破坏时,测定此时试件的含水率,探究破坏时试件含水率与试件无限侧抗压强度之间的影响关系。

表 7 试验 3 详细方案

二灰掺量/ $\%$	标准养护	水中养护
6	$C_{11}$	$C_{12}$
11	$C_{21}$	$C_{22}$
15	$C_{31}$	$C_{32}$
18	$C_{41}$	$C_{42}$
20	$C_{51}$	$C_{52}$
25	$C_{61}$	$C_{62}$

注: $C_{11}$  表示在  $\alpha_w=6\%$ ,采用标准养护条件时试件的无侧限抗压强度。 $C_{ij}$  ( $i=1,2,3,4,5,6; j=1,2$ ) 所代表的含义与  $C_{11}$  同理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 二灰掺入比对水泥搅拌桩的强度影响

试样不同养护龄期下,不同二灰掺入比的水泥搅拌桩强度变化规律如图 1 所示。

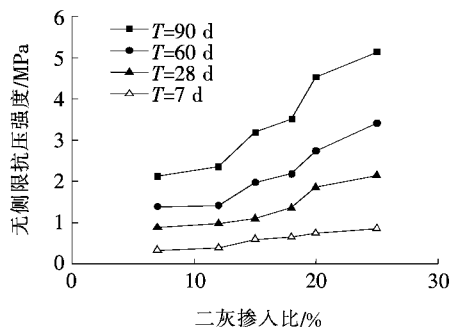


图 1 二灰掺入比与水泥搅拌桩强度关系图

从图 1 可以看出:二灰的掺入能够有效地增强水泥搅拌桩的无侧限抗压强度,当二灰掺入比小于 10% 时,水泥固化反应较弱,强度增强十分有限,当掺入比为 10%~20% 时,由于水泥量的增加,固化反应变强,强度增长十分明显,且当掺入比大于 20% 后,水泥搅拌桩强度增长速率变缓,但仍持续增强。在试验的 4 个龄期中,龄期越长,强度越大。

分析图 1 的数据,显然二灰掺加得越多,水泥搅拌桩的强度越高,但是在实际工程中,如果二灰掺入比过高,那么经济效益将会降低,且实际工程中往往不需要过高的强度,因此,在实际工程中,需要综合考虑强度以及经济的关系,从而确定实际的掺入量。

### 2.2 水泥强度等级对水泥搅拌桩强度的影响

#### 2.2.1 水泥强度校验结果

水泥分别为 32.5 和 42.5 级的普通硅酸盐水泥,为测试水泥是否合格满足试验要求,现进行水泥胶砂

强度试验,测试其 3 d 和 28 d 的抗压和抗折强度,结果如表 8 所示。

表 8 水泥各龄期强度值

水泥等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
32.5 级	13.0	34.1	3.6	6.0
42.5 级	17.1	43.9	3.8	6.8

将表 8 中的试验结果与规范值进行对比,强度均满足要求,说明所用水泥合格,能够满足试验要求。

### 2.2.2 结果分析

将 42.5 级普通硅酸盐水泥搅拌土与 32.5 级普通硅酸盐水泥搅拌土进行无侧限抗压强度试验对比分析,图 2 为养护龄期分别为 28 d 和 90 d 时,不同强度等级水泥搅拌黄土强度对比。

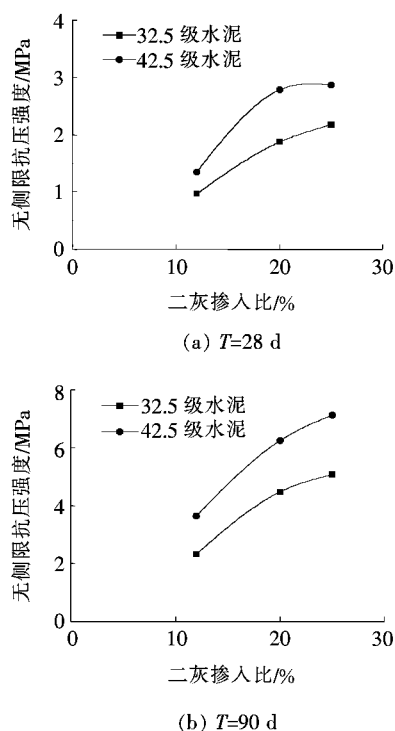


图 2 不同强度等级水泥搅拌桩强度对比

由图 2 可以看出:42.5 级的水泥搅拌桩强度明显要好于 32.5 级的水泥搅拌桩强度。

(1) 当养护龄期为 28 d 时,32.5 级的水泥搅拌桩随着二灰掺入比的增大,强度也持续增大,且基本成正比。42.5 级水泥搅拌桩随着二灰掺入比的增大,当掺入比为 10%~20% 时,强度增长较快,当掺入比到达 20% 以后,强度增长速度急剧下降,强度基本平缓到达稳定。

(2) 当养护龄期为 90 d 时,32.5、42.5 级的水泥搅拌桩均随着二灰掺入比的增大,强度持续增大。42.5 级的水泥搅拌桩强度比 32.5 级的水泥搅拌桩强度增加 40%~60%。

在实际工程中,更高强度的要求可以通过提高水泥搅拌桩中水泥的等级来实现,具有减少水泥用量,利于加固土体流动的优点。

### 2.3 养护方式对水泥搅拌桩强度的影响

水泥强度等级为 32.5 级,二灰掺量为 6%、11%、15%、18%、20%、25%;养护龄期均为 28 d 时,标准养护和水中养护试件的无侧限抗压强度如图 3 所示。

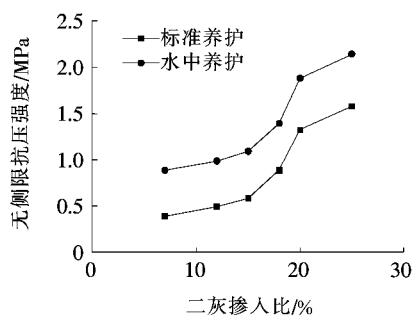


图 3 不同养护方式的水泥搅拌桩强度对比

由图 3 可知:标准养护条件下的水泥搅拌桩试件整体上强度要低于水中养护的试件,但二者增长的速率几乎一致。水中养护试件抗压强度比标准养护试件抗压强度平均高 50%~90%。

对 7 d 水中养护水泥搅拌桩与 28 d 标准养护下的试件无侧限抗压强度进行对比,结果见图 4。

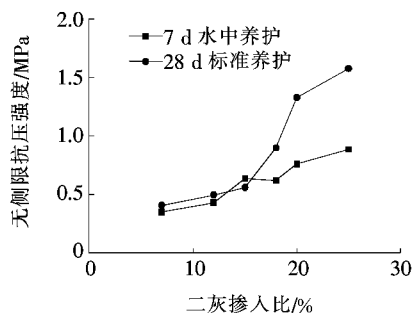


图 4 不同养护方式、龄期无侧限抗压强度交叉对比

由图 4 可以看出:① 当二灰掺量为 6%~15% 时,水泥搅拌桩试件 7 d 水中养护的强度与 28 d 标准养护的强度相差不大;② 当二灰掺量为 18%~25% 时,水泥搅拌桩试件 28 d 标准养护的强度相当于 7 d 水中养护强度的两倍。

由此可得:当二灰掺入比较小时,不同的养护方式对搅拌桩的强度影响较大,而随着掺入比的增大,养护

时间的长短对搅拌桩强度影响变大。

#### 2.4 含水率对水泥搅拌桩强度的影响

水泥搅拌桩进行标准养护,在养护龄期  $T=28\text{ d}$  的条件下,不同含水率  $w=25\%$ 、 $30\%$  的无侧限抗压强度如图 5 所示。

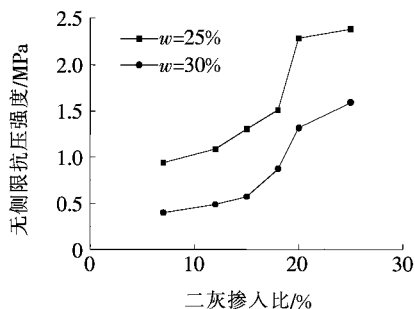


图 5 不同含水量对强度的影响

从图 5 可看出:当二灰掺入比为 15% 以下时,含水率为 25% 和 30% 的水泥搅拌桩强度增长趋势基本相同,含水率为 25% 的水泥搅拌桩强度大约为含水率为 30% 的水泥搅拌桩强度的两倍,当二灰掺入比为 20% 左右时,强度增长变快,此后增长变缓。水泥搅拌桩含水率越高,密度越小,强度越低。

### 3 结论

(1) 水泥搅拌桩的强度随水泥、粉煤灰掺量的增加而增大,水泥、粉煤灰的适宜掺量为 12%~20%,此时水泥搅拌桩的强度增加明显。当两者掺入比分别为 12% 和 20%,养护龄期为 90 d 时,水泥搅拌桩强度分别是原状土的 40 倍和 80 倍,对湿陷性黄土的处理效果明显。

(2) 通过提高水泥的强度等级,能够明显提高水泥搅拌桩的强度,且增长率超过 50% 以上,因此,实际施工中可以通过提高水泥强度等级来有效提高水泥搅拌桩的强度,进而有效提高湿陷性黄土的处理效果。

(3) 水泥、粉煤灰掺入量较小时,养护方式对水泥搅拌桩的强度影响较大,标准养护条件下的水泥搅拌桩强度明显低于水中养护条件下的水泥搅拌桩强度;水泥、粉煤灰掺入量较大时,养护龄期的长短对水泥搅拌桩的强度影响较大;水泥、粉煤灰掺入比相同时,含水率较低的试件在受到破坏后,相对含水率较高的试件仍然具有较高的强度,因此,施工过程中应重视水泥、粉煤灰的掺入量和水泥搅拌桩的养生环境,确保湿陷性黄土地基得到有效处理。

#### 参考文献:

- [1] 庞琦. 吴定高速公路黄土滑坡稳定性分析与评价[D]. 西安科技大学硕士学位论文, 2016
- [2] 袁文俊, 蔡梓淇, 谢松, 等. 基于强度试验的水泥土搅拌桩施工综合参数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018(S1).
- [3] 王驰, 徐永福, 庞建国, 等. 路堤荷载下砾芯水泥土搅拌桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013(5).
- [4] 齐秀廷. 夯扩挤密桩改良强湿陷性黄土地基试验研究[J]. 中外公路, 2015(2).
- [5] 倪洁, 陈永辉, 毛斌. 深厚软土区过渡段软基处理方式现场试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019(4).
- [6] 蔡清芬, 黄鼎雄. 水泥土搅拌桩在基础处理中的应用[J]. 四川水泥, 2019(10).
- [7] 房建宏, 王振, 徐安花, 等. 青海黄土工程特性及公路修筑对策研究[J]. 中外公路, 2017(6).
- [8] 韩红. 水泥搅拌桩在高速公路软基加固中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014(12).
- [9] 邝龙年, 谢永华. 水泥搅拌桩技术在公路施工中的应用[J]. 交通世界, 2019(28).
- [10] 赵春风, 邹豫皖, 赵程, 等. 基于强度试验的五轴水泥土搅拌桩新技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014(2).
- [11] 雒亿平, 言志信, 龙哲. 灰土垫层—防渗膜—湿陷性黄土复合地基力学作用及其效应[J]. 中外公路, 2017(4).
- [12] 鞠兴华. 水泥粉煤灰搅拌桩处理饱和黄土地基试验研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2010.
- [13] 宋修广, 宋文义, 苏公灿. 水泥搅拌桩桩土应力比研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2003(4).
- [14] 秦世伟, 陆小锋, 张国军. 水泥土搅拌法加固淤泥质黏土的试验研究[J]. 中外公路, 2019(5).
- [15] 于春亮, 张爱军, 赵庆玉, 等. 透水桩与不透水桩组合型复合地基固结解析分析[J]. 岩土力学, 2017(11).
- [16] 杨涛, 李超. 刚性基础下组合渗流碎石桩—不排水桩复合地基固结分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018(11).
- [17] 胡师远. 水泥土搅拌桩室内强度试验及其施工技术研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2015.
- [18] Qian Zhai, Harianto Rahardjo. Estimation of Permeability Function from the Soil—Water Characteristic Curve[J]. Engineering Geology, 2015, 199.
- [19] 朱云飞, 寇盼盼. 水泥搅拌桩配合比设计[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(9).
- [20] 陈页开, 艾建文, 周检平, 等. 土工格栅和水泥搅拌桩加固软基数值分析研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017(4).