

# 水泥土搅拌法加固淤泥质黏土的试验研究

秦世伟, 陆小锋\*, 张国军

(上海大学 土木工程系, 上海市 200444)

**摘要:** 针对多因素下水泥土搅拌法加固淤泥质黏土的强度规律及变形差异问题, 对水泥土进行一系列的无侧限抗压强度试验, 对比分析了水泥掺入量与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。试验结果表明: 随着水泥掺入量的增加, 水泥土无侧限抗压强度增大, 但水泥土破坏时的应变变形变小, 脆性增大; 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2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。对于软土养护水泥土试件, 同一水泥掺入量下水泥土强度最小, 但破坏时的强度值近似, 并且其塑性变形大, 脆性低。因此, 可采用改变水泥掺入量或掺入外加剂改善水泥土养护环境, 满足水泥土搅拌法加固淤泥质黏土的设计要求。

**关键词:** 水泥土搅拌法; 淤泥质黏土; 无侧限抗压强度; 水泥掺入量; 养护条件

## 1 前言

水泥搅拌法加固软土是选用一定比例的水泥(添加外加剂)作为固化剂, 通过专门的搅拌机械, 将原状土与固化剂(浆液或粉体)搅拌, 使原状土固化成为具有整体性和抗渗性能等的水泥加固土。由于水泥搅拌法的经济实用、对环境影响小及施工灵活等优点, 该法被广泛用于公路、基坑工程等领域的软土地基加固、止水帷幕及浅基坑围墙支护中。

随着水泥搅拌桩(墙)的广泛应用, 众多学者对其研究也渐渐深入, Chew、曹智国及张本蛟等分析了水泥掺量、围压及养护龄期对水泥土强度的影响规律; 徐晓东等分析不同偏高岭土掺量对水泥土强度的影响, 为水泥土性能的改良提供理论基础; 李建军等利用单轴抗压试验、三轴试验以及水泥土梁的弯曲试验, 分析了水泥土变形模量与抗压强度的关系; 黄雨等从试验土的化学成分与物理微结构等微观角度分析水泥土加固效果差异的微观机理及其形成原因, 加固后的土体在物理微结构上的差异而导致加固土体强度表现的不

- \*\*\*\*\*
- 于道路基层的性能研究[J].筑路机械与施工机械化, 2016(8).
- [2] 纪小平, 曹海利, 刘陵庆. 水泥稳定再生集料的性能及其影响因素研究[J].建筑材料学报, 2016(2).
- [3] 田振. 含建筑垃圾水稳碎石路面基层材料的使用性能[D].湖南大学硕士学位论文, 2016.
- [4] 刘晓娜. 道路基层水泥稳定碎石结构材料的再生利用[D].成都理工大学硕士学位论文, 2007.
- [5] 单双成, 陈满. 废弃水泥混凝土道面在路面半刚性基层中再生利用的试验研究[J].公路工程, 2013(3).
- [6] 李明杰. 水泥稳定碎石振动试验方法研究及应用[D].长安大学博士学位论文, 2010.
- [7] 苏健. 基于振动法的基层材料路用性能研究[D].长安大学硕士学位论文, 2013.
- [8] 胡力群. 半刚性基层材料结构类型与组成设计研究[D].长安大学博士学位论文, 2004.
- [9] 李明杰, 蒋应军, 张俊杰, 等. 半刚性基层材料振动试验方法[J].交通运输工程学报, 2010(1).
- [10] 蒋应军, 杨秀荣, 李宁方, 等. 二灰碎石垂直振动试验方法及评价[J].建筑材料学报, 2015(2).
- [11] 蒋应军, 沈彬, 陈冠希. 垂直振动压实水泥冷再生混合料劈裂强度特性[J].长安大学学报(自然科学版), 2016(2).
- [12] 马融, 陈飞. 成型工艺对水泥稳定再生混合料性能影响研究[J].中国科技论文, 2019(2).

收稿日期: 2018-12-12

作者简介: 秦世伟, 男, 博士, 讲师. E-mail: Qin2000\_shu@163.com

\* 通信作者: 陆小锋, 男, 硕士研究生. E-mail: lu\_xf08@163.com

同;闫楠等采用天然海水作为腐蚀介质对水泥土进行浸泡,通过微型贯入试验、SEM 试验等多种手段研究水泥土强度的分布规律和衰减过程,得出水泥土的衰减是由于侵蚀性离子抑制水泥土强度增长和促使水泥土强度降低的共同结果,以  $\text{Ca}^{2+}$  的含量证明水泥土强度。

然而,以上研究均局限于解决水泥土的物理化学性质,且不充分考虑现场施工条件以及设计的要求。而目前相关规范对水泥土搅拌桩的设计要求,水泥土搅拌桩(墙)28 d 无侧限抗压强度不应低于 0.8 MPa。该文通过养护龄期为 28 d 的水泥搅拌法加固淤泥质黏土进行抗压强度试验,探究水泥掺入量、养护条件对水泥土强度及变形特征的影响规律,为水泥土的设计及施工提供依据。

2 试验方案

2.1 试验材料

制备水泥土试块的土样取自上海某基坑的第④1

层淤泥质黏土。土样参照上海市工程建设规范 DGJ 08—37—2012《岩土工程勘察规范》进行试验,上海地区④1 层灰色淤泥质黏土属浅海相沉积,主要由细粒土组成,孔隙比大、高压缩性、灵敏度高。一般埋置在地下 3~20 m,地下水为潜水类型,天然含水量 45%~70%,大于其液限,呈流塑状态,渗透系数  $k=7.05\times 10^{-7}$  cm/s 左右。土中含云母及有机质,该土质地下水对水泥土有微腐蚀性。深度为 6~15 m 淤泥质黏土具有絮状片状结构。结合现场实际勘察数据,土样的基本物理化学性质指标见表 1、2。

试验采用的水泥为上海工程常用 P.O.42.5 级普通硅酸盐水泥作为固化剂。制备的水泥土试块规格为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。

2.2 试验方案

试验操作流程按照 JTJ/T233—2011《水泥土配合比设计规程》进行。淤泥质黏土从基坑现场取回后立即进行配制试验,以免土样含水率发生变化。水泥掺入比根据上海工程施工经验选取,具体  $a_w$  为 10%、12%、14%、16%、18% 以及 20%,制备立方体试块。

表 1 试验土样物理力学性质

含水率/ %	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	孔隙比	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	液性 指数	压缩模量/ MPa
51	16.7	2.74	1.432	24.8	43.2	18.4	1.43	2

表 2 原土中水的化学性质

离子	浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	离子	浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
$\text{Mg}^{2+}$	120.4	$\text{SO}_4^{2-}$	168.7
$\text{Ca}^{2+}$	147.2	$\text{HCO}_3^-$	95.7
$\text{Cl}^-$	89.6		

其中,每一种养护条件下,每个水泥掺入比制备 5 个平行试块。水灰比参考当地施工经验值,取 0.5。配制好的水泥浆液进行人工搅拌,不封闭搅拌,有 5%~8% 的水泥浆液流失,模拟施工中的冒浆。试件在标准养护条件下静置 48 h 后拆模,将试件分 3 种条件养护。标准养护(将试件置于标准养护箱)、水中养护[用塑料薄膜将试件密封浸入( $20\pm 2$ ) °C 的水中养护]、软土养护(将试件养护在恒温室内的淤泥质黏土中)。由于工程工期的限制,设计时以龄期 28 d 的无侧限抗压强度为标准,故养护龄期达 28 d 后进行无侧限抗压强度试验。单轴抗压试验采用 CTM—8050 微机控制电子万能材料试验机,以 0.05 kN/s 的加荷速率连续均匀地

加荷,直至试件压缩变形为 15% 时的荷载为破坏荷载。

3 试验结果与分析

3.1 水泥掺入比对水泥土强度的影响

单轴受力状态下水泥土的强度是课题研究的基础和重要参数,水泥土的单轴抗压强度  $q_u$  是指水泥土在无侧限条件下抵抗轴向压力的极限强度。对 90 个水泥土试件样品进行无侧限抗压强度试验,测得在不同养护条件及不同水泥掺入比的水泥土无侧限抗压强度结果如表 3 所示。

从表 3 可得:水中养护水泥土试件(以下简称水养试件)的水泥土强度值离散性小。软土养护水泥土试件(以下简称土养试件)在低水泥掺入比时水泥土抗压强度值离散性小,水泥掺入比大时离散性大,其原因是在软土养护条件下有较多不可控制的因素。试验研究结果指出,当其他条件相同时,密封后水养水泥土试件

表 3 水泥土的无侧限抗压强度实测值

养护 条件	水泥掺入 比 $a_w/\%$	无侧限抗压强度 $q_u/\text{MPa}$		
		最小值	平均值	最大值
标准养护 箱养护	10	0.449 7	0.489 9	1.017 5
	12	0.472 7	0.572 2	0.633 7
	14	0.421 4	0.796 6	0.890 7
	16	0.876 3	0.942 9	0.995 7
	18	1.113 3	1.223 8	1.300 4
	20	1.226 4	1.376 7	1.449 2
水中养护	10	0.494 4	0.557 3	0.602 3
	12	0.637 1	0.747 0	0.856 9
	14	0.866 3	0.942 8	1.019 3
	16	1.052 3	1.159 2	1.266 1
	18	1.274 2	1.385 2	1.496 2
	20	1.543 1	1.625 6	1.708 1
土中养护	10	0.302 5	0.331 7	0.387 7
	12	0.365 8	0.396 9	0.435 5
	14	0.485 7	0.523 9	0.603 3
	16	0.519 3	0.607 2	0.674 6
	18	0.657 4	0.702 9	0.775 4
	20	0.695 8	0.786 7	0.821 3

的水泥土强度符合 GB/T 50783—2012《复合地基技术规范》中水泥土的抗压强度和水泥掺入比两者间呈幂函数关系,但软土养护的水泥土试件的水泥土强度应乘以折减系数  $\alpha$ 。

$$\frac{f_{cu1}}{f_{cu2}} = \left(\frac{a_{w1}}{a_{w2}}\right)^{1.77\alpha} \quad (1)$$

式中: $\alpha$  在软土养护时取 0.80~0.88,水中养护试件取 1.0~1.1。

3 种养护条件下水泥土的抗压强度变化曲线如图 1 所示。

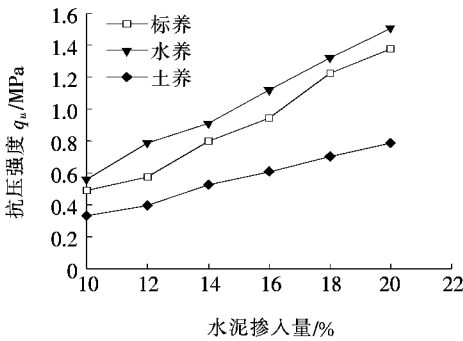


图 1 3 种养护条件下水泥掺入比与水泥土无侧限抗压强度的关系

从图 1 可以发现,水泥土抗压强度随着水泥土掺入比的增加而增加。在标准养护箱养护的水泥土试件(以下简称标养试件),水泥土抗压强度增长速率的变化较多,而水养试件在水泥掺入比较低时,其强度增长较为明显,增长幅度最大,反之,土养试件在水泥掺入比  $a_w \leq 12\%$  时水泥土抗压强度增长幅度最小,且土样试件水泥土抗压强度增长速率相对缓慢。当水泥掺入比  $a_w = 10\% \sim 20\%$ ,对于水养试件和土养试件,水泥土抗压强度和水泥掺入比的关系呈线性关系,并且前者曲线的斜率大于后者,即水泥土的物理化学反应程度更高。

对于标养试件的水泥土抗压强度,其增长速率变化规律不一致,这主要是因为试件养护过程中人为干扰因素较多,水泥土的碳化作用以及结晶作用不一致,导致标养试件的抗压强度离散性较大。

3.2 养护条件对水泥土强度的影响

从图 1 还可以看出:不同养护条件的水泥土抗压强度随着水泥掺入比的增加有明显的差别,而且水泥土强度增长速率的变化不一样。相同水泥掺入比条件下,水养试件水泥土抗压强度最大,土养试件强度最小,并且两者间的差值随水泥掺入比的增加而增大,前者大约是后者的 2 倍。根据试验研究结果:在水泥掺入比  $a_w = 10\% \sim 20\%$  范围内,软土养护水泥土试件和密封后水养水泥土试件的水泥土抗压强度的关系为:

$$f_{cu,w} = \beta f_{cu,c} + a \quad (2)$$

式中: $f_{cu,w}$  为水养试件的水泥土强度; $f_{cu,c}$  为土养试件的水泥土强度; $\beta$  为系数,其取值范围为 1.9~2.2,水泥掺入比较低时取下限; $a$  为在一定围压下的取值参数。

水养试件比标养试件的水泥土抗压强度大,两者的差值基本上是一个定值。水养试件在水压条件下,水泥土试件中的黏土颗粒团粒化作用增强,促使水泥土的胶结能力提高。同时,在围压作用下水泥土中的孔隙减少,水泥颗粒和土颗粒间的连接更为紧密,水泥土骨架作用更为明显,从而提高了水泥土抗压强度。

当水泥掺入比  $a_w = 16\%$  时,土养和标养条件下水泥土无侧限抗压强度如图 2 所示,两者的曲线变化趋势相同,但标养试件与土养试件的水泥土抗压强度相差近 2 倍。

对于每一种水泥土,水泥土强度主要来源于下面 5 类物理化学作用:水泥的水解和水化反应、硬凝反应、团粒化作用、结晶作用以及碳化作用。水泥熟料遇水后水化反应生成水化硅酸钙、水化硫铝酸钙和氢氧化

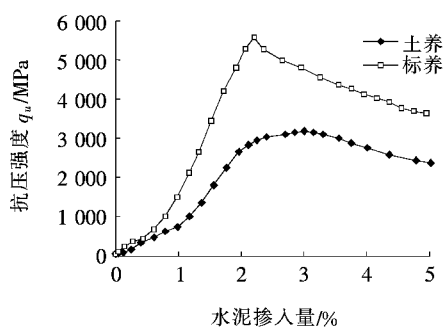


图2  $a_w=16\%$ 时土养和标养水泥土的抗压强度曲线

化钙等水溶液,然后凝结,硬化结晶。同时,水化产物又与土颗粒发生一系列的离子交换、硬凝作用等物理化学反应,进一步生成水化硅酸钙及水化硫铝酸钙等水化产物。此后,水化产物形成凝胶体结晶硬化,由于其具有很高的黏结能力,有效地黏结土粒形成水泥—土结构,从而形成水泥土网状性骨架结构。水泥的水解和水化析出  $\text{Ca}^{2+}$ ,致使土粒周围水溶液中阴离子的原子价位提高,受土粒负电荷所形成电场的静电引力增强,进而平衡土粒负电荷所需阳离子和极性水分子的数量减少,即与土粒表面负电荷构成的双电层变薄,其结果致使土颗粒间及水泥颗粒和土颗粒间的连接增强,颗粒间团粒化,从而减少了水泥土的孔隙。因此,对于标养的水泥土试件,其水化产物数量更多,水泥土的孔隙更少,从而致使标养水泥土试件抗压强度高于土养试件。

### 3.3 水泥土变形特征的影响因素

图3为不同水泥掺入比的水泥土应力—应变关系。

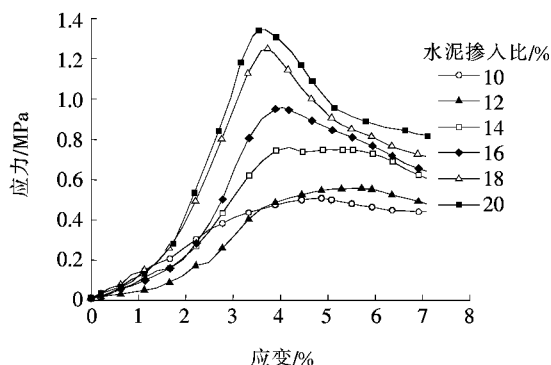


图3 水泥掺入比对水泥土应力—应变关系的影响

从图3可以得出:不同水泥掺入比下,曲线的变化趋势相同,随水泥掺入比增加,曲线上升阶段越陡,屈服后的曲线下降越明显。当水泥掺入比  $a_w=10\%\sim 20\%$ 时,同一养护条件下,随着水泥掺入比增加,水泥土峰值应力越大,破坏时的应变值越小,极限割线模量

增大,脆性增大。水泥土破坏时的应变值大致为  $3.5\%\sim 4.5\%$ 。相较于水泥土强度的变化,随着水泥掺入比的变化,其变形特征表现不明显。并且,当水泥掺入比  $a_w=10\%\sim 14\%$ 时,水泥土破坏后的残余强度趋于某个值;同时,当水泥掺入比  $a_w=14\%\sim 20\%$ 时,水泥土破坏后的残余强度也将趋于某一个值。这主要是水泥土颗粒形成的骨架作用,随着水泥含量的增加,水泥土抵抗变形的能力增强。同一养护条件下,水泥掺入比越高,其破坏应变越低,脆性性能越明显。

图4为水泥掺入比  $a_w=16\%$ 时,土养和标养条件下水泥土的应力、应变关系。

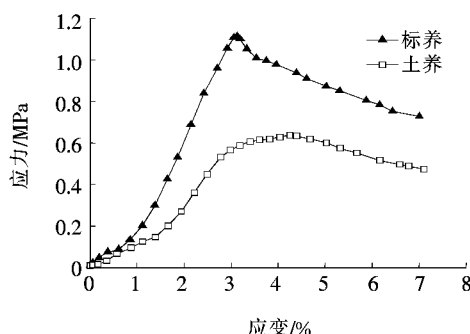


图4  $a_w=16\%$ 时土养和标养下水泥土应力—应变关系

从图4可知:不同养护条件下,曲线的变化趋势基本相同,同一水泥掺入比标养试件的极限抗压强度明显高于土养试件水泥土,但前者上升曲线表现更陡峭,下降阶段的曲线应力值变化更为明显。土养试件水泥土破坏时的曲线表现平缓,破坏应变的变化幅度为  $3.0\%\sim 4.5\%$ ,水泥土屈服后曲线下降不明显,渐渐趋于稳定值,水泥土塑性变形大。并且,根据曲线变化趋势,标养试件和土养试件屈服后的曲线越来越接近,这表明相同水泥掺入比下,水泥土的残余强度值相差不大。标养试件在水泥土抗压强度以及变形特征方面与土养水泥土试件差别较大,标养水泥土试件极限应力值大,塑性变形小,试样破坏表现更硬脆。这主要是由于土养试件在软土的有机质、水分及黏土矿物成分等作用下,破坏了水泥土颗粒以及水泥水解和水化反应,降低了土颗粒团粒化作用,从而水泥土颗粒数量减少,形成骨架的网络状结构不连续,骨架作用能力降低,则土粒间黏聚力作用就较为明显。在淤泥质黏土的养护条件下,有机质的富里酸等微腐蚀性对水泥水化产物进行分解,从而使水泥石骨架含量减少,因此其容许塑性变形较大,脆性破坏减少。同时,淤泥质黏土中含水量相对较多,水泥土试块中黏土颗粒的黏聚力提高,水泥固化淤泥试件脆性减少。故软土中水分和有机质的

增加使得水泥水化产物对水泥土强度中的作用能力降低,进而提高水泥土塑性性能。

图 5 为水泥掺入比  $a_w = 16\%$  时水养和标养条件下水泥土的应力—应变关系。

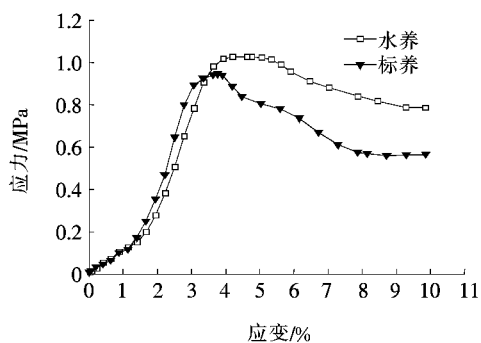


图 5  $a_w = 16\%$  时水养和标养下水泥土应力—应变关系

由图 5 可得:水养和标养水泥土强度、变形关系有较为明显的区别。两曲线的初始阶段变化不大,标养试件的水泥土变形曲线上升趋势更为快速,曲线更陡,峰值应变后曲线急速下降。水养水泥土试件的应力—应变关系表现为峰值应力提高,极限抗压强度增强,破坏时的应变值增大,变形模量减小。这表明水养试件水泥土峰值应变值更大,峰值后曲线变化较为平缓,其变形特征由脆性破坏向塑性破坏发展。并且,水养水泥土试件屈服后,曲线变化相比标养水泥土试件小,水泥土的残余强度大,甚至接近标养水泥土的峰值强度,表明水泥土破坏后还具有抵抗破坏变形的能力。这主要是在水养条件下围压提高了黏土颗粒团粒化作用,水泥土的黏聚力增强。并且水泥土试块孔隙较少,增大了水泥土颗粒间的内摩擦角作用,从而增强了水泥土的残余强度。

综上分析,随着水泥掺入比的变化,水泥土的极限割线模量、破坏应变及残余强度等变化不大,即水泥掺入比对水泥土的变形特征影响较小。

水泥土试样在软土养护时,由于淤泥质土中有机质含量、含水量及黏土矿物成分等因素影响,水泥土试件变形模量较小,水泥土的破坏形式呈塑性破坏。

水泥土试样在水中养护,其物理化学反应过程作用较突出,无论是水泥土的抗压强度,亦或塑性变形、残余强度等,其工程性能优点皆优于土养及标养水泥

土试件。

## 4 结论

(1) 水泥搅拌法加固淤泥质黏土,在水泥掺入比  $a_w = 10\% \sim 20\%$  时,水泥土无侧限抗压强度随水泥掺入量的增加而增大。但水泥掺入量  $a_w \geq 20\%$ ,软土养护水泥土无侧限抗压强度增长速率减缓。

(2) 由于实际工程中,使用水泥土搅拌法加固软土需取样养护及强度检测,其试验结果应乘以折减系数 0.5~0.8,低水泥掺入量取上值。

(3) 在相同养护条件下,淤泥质黏土的水泥土,当水泥掺入比  $a_w = 10\% \sim 12\%$  和  $a_w = 14\% \sim 20\%$  时,水泥土试件的残余强度渐渐趋于同一值,并且水泥土试件的变形特征在软土养护条件下,其变化较小,有利于水泥土的变形破坏。

## 参考文献:

- [1] Chew SH, Kamruzzaman AHM, Lee FH. Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 696—706.
- [2] 曹智国,章定义.水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J].岩土力学与工程学报, 2015(S1).
- [3] 徐晓东,王林浩,刘剑平,等.偏高岭土对水泥土强度影响的试验研究[J].中外公路, 2017(1).
- [4] 张本蛟,黄斌,傅旭东,等.水泥土芯样强度变形特性及本构关系试验研究[J].岩土力学, 2015(12).
- [5] 李建军,梁仁旺.水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J].岩土力学, 2009(2).
- [6] 黄雨,周子舟,柏炯.水泥土搅拌法加固冲填土软土地基的微观试验[J].同济大学学报, 2010.
- [7] 闫楠,杨俊杰,刘强,等.海水环境下水泥土强衰减过程室内试验研究[J].土木工程学报, 2017(11).
- [8] DG/TJ 08—61—2010 基坑工程技术规范[S].
- [9] JTJ/D 30—2004 公路路基设计规范[S].
- [10] DGJ 08—37—2012 岩土工程勘察规范[S].
- [11] JGJ/T 233—2011 水泥土配合比设计规程[S].
- [12] GB/T 50783—2012 复合地基技术规范[S].