

水泥搅拌桩加固软弱地基的室内试验研究

张季超, 陈 燃, 王可怡, 杨作用

(广州大学, 广州 510006)

摘要: 为研究水泥搅拌桩加固广州南沙区软土的工程特性, 开展了室内配合比和超声波波速测试试验。根据试验结果, 分析了水泥掺入比、龄期、掺砂和掺石膏等因素对水泥加固土强度的影响以及超声波波速与水泥土强度的相关关系, 可为南沙区应用水泥搅拌桩提供参考和建议。

关键词: 水泥土; 无侧限抗压强度; 水泥掺入比; 超声波声速

作者简介: 张季超(1956—), 男, 河南郑州人, 教授, 主要从事岩土工程、结构工程方面的教学与研究工作。

0 引言

我国珠江三角洲地区, 特别是广州市南沙区, 由于特定的地质条件和环境背景, 分布着大量的深厚软土层, 此类深厚软土富含有机物、含水率高、压缩性大、强度低。南沙区作为广州市“南拓”的重要区域, 近年来大量工程项目兴建于此, 地基处理在该区的工程建设中的作用突出。鉴于南沙软土的复杂性, 有必要探索水泥搅拌桩加固此类软弱地基的适用及可靠性。为此, 选取了南沙某

工程的土样进行室内配比试验, 同时分析和研究超声波波速在水泥土中传播的特性。

1 室内配比试验

1.1 试验土样工程特性

试验用土取自广州市南沙区某工地, 取回后用塑料袋包装好再放入塑料桶保存。所取土样呈灰-灰黑色, 饱和、流塑, 含有机质, 有臭味; 局部夹少量粉砂及薄层, 夹小贝壳。其物理力学性能指标见表 1。

表 1 软土的物理力学性能指标

土样名称	含水率 ω (%)	天然重度 γ_s (kN/m ³)	比重 G_s	孔隙比 e	液限 W_L (%)	塑限 W_P (%)	塑性指数 I_p	饱和度 (%)
淤泥	70.4	15.6	2.63	1.890	53	33.6	18.9	97

1.2 试验方案

本试验方案见表 2, 每组做 6 个平行试样, 养护龄期为 7 d、15 d、28 d、90 d 及 180 d, 测定各试

件各龄期内的无侧限抗压强度及养护期内的超声波声速。

表 2 室内试验方案

编号	A	AC	ACS I	ACS II	B	BC	BCS I	BCS II	CC	CCS	CCS I
配合比	15%水泥	15%水泥+2%石膏粉	15%水泥+2%石膏粉+10%细砂	15%水泥+2%石膏粉+20%细砂	20%水泥	20%水泥+2%石膏粉	20%水泥+2%石膏粉+10%细砂	20%水泥+2%石膏粉+20%细砂	25%水泥	25%水泥+2%石膏粉	25%水泥+2%石膏粉+10%细砂

1.3 试验仪器

70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的模具、

UJZ-15 砂浆搅拌机、磅秤、分析天平、YEW-300B 型微机控制电子抗折试验机、TICO 混凝土超声检

测仪等。

1.4 试样制备及养护

利用现有砂浆、混凝土试验仪器和土工试验仪器,按照砂浆、混凝土或土工的试验操作规程进行试验。试件的制模尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 规格。考虑到该软土含水量高,试验中不再加水,模拟干法施工。先将称量好的土放入 UJZ-15 砂浆搅拌机中,开动搅拌机,在 30 s 内慢慢将水泥等固化剂加入搅拌桶内,然后搅拌 2~3 min,暂停,将搅拌机叶片和搅拌桶壁和桶底的土刮下,再开动机器搅拌 2~3 min。搅拌完成后,采用分 2~3 层捣实的方法成型,盖上塑料布,防止水分蒸发。试样制备完成后,在室温 20℃ 下养护 1~2 天后,便可进行拆模、编号。将试块放在标准蒸汽养护室养护,养护温度为 20℃±3℃,湿度为 99%。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

水泥土试块达到养护龄期(7 d、15 d、28 d、90 d 及 180 d)后,用试验机测得其抗压强度,剔除偏差较大的数值,取 6 个试件的测定值的平均值作为该组试件的试验结果。其试验结果如表 3 所示。

表 3 水泥土抗压强度试验数据(单位:MPa)

强度编号	龄 期 (d)				
	7	15	28	90	180
$f_{cu, A}$	0.400	0.516	0.887	1.012	1.484
$f_{cu, AC}$	0.547	0.760	1.334	1.907	2.726
$f_{cu, ACI}$	0.847	1.160	1.387	2.014	2.808
$f_{cu, ACII}$	0.948	1.297	1.540	2.281	3.115
$f_{cu, B}$	0.920	1.711	2.056	3.211	3.481
$f_{cu, BC}$	1.024	1.821	2.171	3.318	3.529
$f_{cu, BC I}$	1.117	1.820	2.194	3.456	3.864
$f_{cu, BC II}$	1.275	1.854	2.207	3.611	3.971
$f_{cu, C}$	1.260	2.077	2.705	3.586	4.616
$f_{cu, CC}$	1.430	2.241	2.881	4.391	4.789
$f_{cu, CC I}$	1.448	2.341	2.954	5.042	5.508

2.2 数据分析

根据上述试验数据,将从水泥掺入比、养护龄期、掺细砂和掺石膏等 4 个方面对水泥土无侧限抗压强度的影响进行分析。

(1) 水泥掺入比对水泥土无侧限抗压强度的影响

本试验中,水泥掺入比分别为 15%、20%、25%,水泥土无侧限抗压强度与水泥掺入比的关系如图 1~图 4 所示。

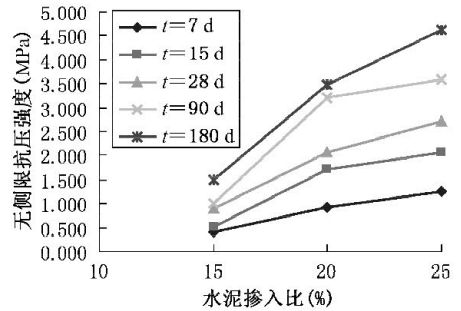


图 1 水泥土强度与水泥掺入比的关系

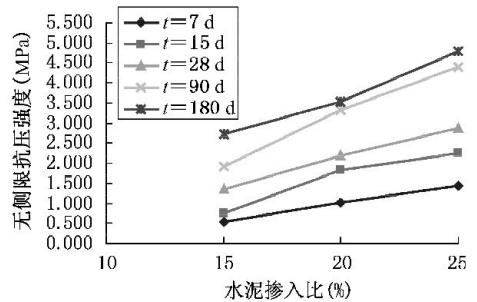


图 2 水泥土强度与水泥掺入比的关系(石膏掺入量为 2%)

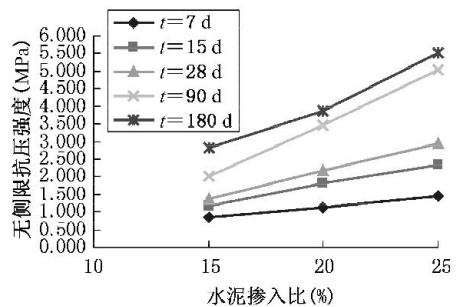


图 3 水泥土强度与水泥掺入比的关系(石膏掺量为 2%,细砂掺量为 10%)

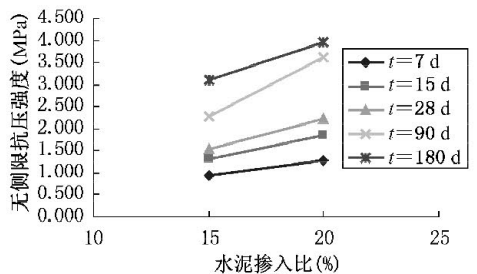


图 4 水泥土强度与水泥掺入比的关系(石膏掺量为 2%,细砂掺量为 20%)

由图 1 可知(其他图亦有相同规律),在试验用土中只掺入水泥,当水泥掺入比从 15% 提高到 20% 时,由两种掺入比的水泥土试块的各个龄期的强度比较可知,在各个养护龄期内的强度的最小增幅普遍达到 130% 以上,90 d 标准龄期的增幅可达到 217.6%;但当水泥掺入比从 20% 提高到 25% 后,虽然水泥土强度亦有所提高,但提高的幅度已大大减小,在各个龄期的强度增长幅度位于 11.68%~32.62% 之间。可见,水泥土无侧限抗压强度随着水泥掺入比的增加而提高,其增长幅度在一定水泥掺入比范围内较大,但当水泥掺入比达到某一比例后,水泥土强度增长幅度明显减小。

对于水泥掺量为 25% 的配比而言,虽然其 90 d 标准龄期强度较高(介于 3.586~5.042 MPa),但由于掺入的水泥较多,在拌和时加固土体的流动性较差,不利于施工。因此,对于加固土体而言,水泥的掺量并非越大越好,而是具有最优的水泥掺入比,该掺入比使加固土具有较高的强度,也可达到良好的经济效益。比较这三种水泥掺入比可知,20% 为最佳掺入比。

(2) 龄期对水泥土无侧限抗压强度的影响

由于篇幅所限,仅列出水泥掺入比为 20% 时的水泥土无侧限抗压强度与龄期的关系曲线图,如图 5 所示。

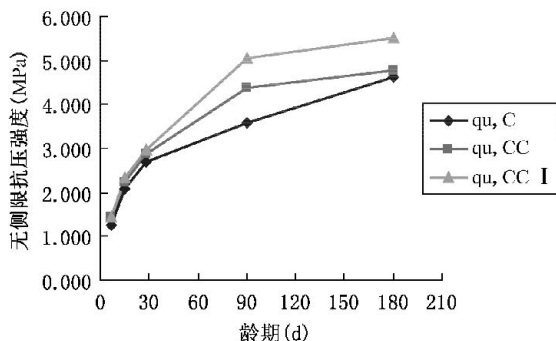


图 5 水泥土无侧限抗压强度与龄期的关系曲线图

由图 5 可知,当水泥掺量为 20% 时,4 种配合比 15 d 的强度增幅为 45.36%~85.93%; 90 d 的增幅为 52.84%~63.60%; 180 d 的增幅为 6.37%~11.82%。水泥土强度随养护龄期的发展而提高,90 d 内提高的较大,180 d 的强度亦有所增长,但增幅较小,其强度发展趋于稳定。规范^[1]定义的水泥土立方体抗压强度以 90 d 为龄期,但 90 d 的时间太长,可通过 28 d 的强度估算

90 d 的强度。通过统计上述试验数据,可得出该水泥加固土的 28 d 和 90 d 的强度具有下列关系:

$$f_{cu,90} = (1.286 \sim 1.425) f_{cu,28} \quad (\text{不掺砂}) \quad (1)$$

$$f_{cu,90} = (1.466 \sim 1.707) f_{cu,28} \quad (\text{掺砂}) \quad (2)$$

(3) 细砂对水泥土无侧限抗压强度的影响

本试验中,除改变水泥的掺入比外,还添加了一定比例的细砂(10% 和 20%),以寻求此类外掺料对水泥土强度的影响规律。

① 当水泥掺量为 15% 时,掺砂量为 10% 的 90 d 龄期强度为 2.014 MPa,是同龄期仅掺水泥的强度的 1.99 倍;掺砂量为 20% 的水泥土 90 d 龄期强度为 2.281 MPa,是同龄期仅掺水泥的强度的 2.25 倍。

② 当水泥掺量为 20% 时,掺砂量为 10% 的水泥土 90 d 龄期强度为 3.456 MPa,是同龄期仅掺水泥的强度的 1.08 倍;掺砂量为 20% 的水泥土 90 d 龄期强度 3.611 MPa,是同龄期仅掺水泥的强度的 1.12 倍。

③ 当水泥掺量为 25% 时,掺砂量为 10% 的水泥土 90 d 龄期强度 5.042 MPa,是同龄期仅掺水泥的强度的 1.41 倍。

由上可知,掺砂后,水泥土强度有不同程度的提高。对于本次试验土样,当水泥掺量为 15% 时,掺入的细砂作用最为明显。通过加入细砂,改变了加固土体的颗粒组成,使得细砂作为细骨料对水泥土强度的形成有较大的贡献。淤泥(质黏土)是一种“黏土基质”结构材料,细砂的存在便可以相对地减少粘粒含量,改善颗粒级配,增强骨架的刚性,使“黏土基质”结构向“粒状骨架”结构转变,大大有利于水泥土强度的提高,这就是含淤泥(质黏土)水泥土性能得到改善的微观机理^[2]。

(4) 掺石膏对水泥土无侧限抗压强度的影响

当水泥掺量为 15%,掺石膏粉的水泥土比不掺的水泥土的 7 d 和 15 d 强度分别提高 36.7% 和 47.3%;当水泥掺量为 20%,掺石膏粉的水泥土比不掺的水泥土 7 d 和 15 d 早期强度分别提高 11.26% 和 6.43%;当水泥掺量为 25%,掺石膏粉的水泥土比不掺的水泥土 7 d 和 15 d 早期强度分别提高 13.49% 和 7.86%。可见石膏粉具有早强的作用,掺入石膏后,通过与水泥水化反应,生成具有膨胀性的水化硫铝酸钙质,它不仅可消耗软

土中自由水,还可填充水泥石复合体中的微孔隙,提高水泥土的密实度。因此,对于南沙地区的软土,由于其含水量较高、孔隙比较大,土颗粒之间的联系比较疏松,适当加大生石膏的掺量,加固的效果会更好。

3 超声波声速传播规律分析

超声波检测的基本原理是基于超声波在材料中传播时,遇到不同的介质,随即产生反射、折射、绕射、衰减等现象,从而使得传播的声时、振幅、频率、波形发生相应的变化,测定这些规律的变化,可以得到材料中的某些性质与内部构造情况^[3~5]。通过使用瑞士生产的TICO混凝土检测仪对水泥土试块在180 d养护期内不定期进行超声波声速测试,寻求超声波声速在水泥土中传播的规律。

3.1 波速与养护龄期的关系

由于篇幅所限,仅列出水泥掺量为15%的试块的波速与龄期关系曲线图,如图6所示。

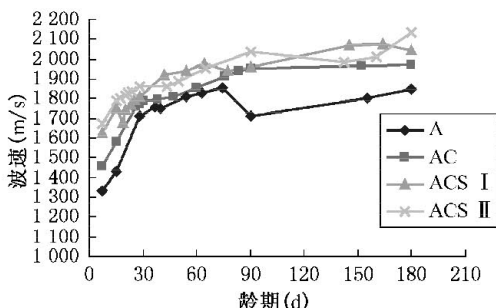


图6 水泥掺入比为15%的试块的波速与龄期关系曲线图

由图6可知,随着龄期的发展,超声波在水泥土传播的速度总的趋势是不断提高的。一般情况下,声速能反映水泥土试块的密实度,而水泥土试块的密实度又与其强度有关,水泥土试块越密实,声波在其中的传播时间越短,声速越大,水泥土试块强度就越高;反之,水泥土试块越疏松,超声波在水泥土试块中的传播时间越长,声速越小,水泥土试块强度也就越低。由前面的研究可知,随着龄期的发展,水泥土强度也随着提高,因此,超声波在水泥土试块中的传播速度也随着提高。

3.2 声速与水泥土无侧限抗压强度的关系

超声波声速与水泥土无侧限抗压强度的关系的散点图如图7所示。由图可见,超声波声速与

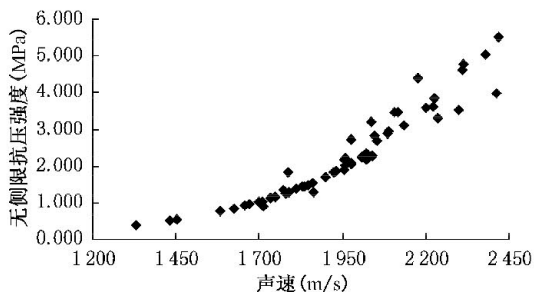


图7 超声波声速与水泥土无测试抗压强度散点图

水泥土强度存在着一定的相关关系。为进一步揭示这种关系,采用数理统计的方法,用线性函数的、多项式函数、指数函数和幂函数拟合上述数据,拟合情况如表4所示。

表4 水泥土试块超声波声速与无测试抗压强度回归结果

回归函数	回归方程	R ²
线性函数	$f_{cu} = 0.0048v - 7.096$	0.8884
多项式函数	$f_{cu} = 3 \times 10^{-6}v^2 - 0.0081v + 5.0993$	0.9332
指数函数	$f_{cu} = 0.0171e^{0.0024v}$	0.9564
幂函数	$f_{cu} = 2 \times 10^{-15}v^{4.5976}$	0.9626

由图7及表4可知,水泥土的弹性波速与其无侧限抗压强度有很好的相关关系。由多种函数拟合情况来看,两者的非线性关系较明显,以指数函数和幂函数拟合情况较好。

4 结 语

(1) 水泥土无侧限抗压强度随着水泥掺入比的增加而提高,其增长幅度在一定水泥掺入比范围内较大,但当水泥掺入比达到某一比例后,水泥土强度增长幅度明显减小。宜通过室内配比试验确定其最优配合比,以达到较好的技术经济效益。

(2) 水泥土无侧限抗压强度在90 d内增长较大,180 d后趋于稳定。可通过水泥土28 d的强度预测90 d的强度。

(3) 通过掺入细砂可改善水泥土的颗粒组成,使其从“黏土基质”结构材料向“粒状骨架”结构转变,从而提高水泥土的强度。在施工中,可考虑通过掺砂来提高水泥土强度。

(4) 对于含水量较高、孔隙比较大的,土颗粒之间的联系较疏松的软土,掺入生石膏的可提高其早期强度,减小含水量。

(5) 超声波在水泥土中传播的速度随龄期的

发展而提高,其与水泥土无侧限抗压强度具有显著的非线性相关关系。

参 考 文 献

- [1] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 曾庆军,莫海鸿,潘鸿,等. 含砂量对水泥土强度影响

的试验研究[C]. 第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集. 昆明,2006.

- [3] 邱平等编. 新编混凝土无损检测技术(应用新规范)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [4] 张季超. 基础工程处理与检测实录[M]. 北京:中国建材工业出版社,1998.
- [5] 高亚成,郑建青. 水泥土的室内试验研究[J]. 河海大学学报,1999,27(5).