

软土地基水泥深层搅拌加固土物理力学特性研究

宫必宁¹, 李淞泉²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098; 2. 南京长江二桥建设指挥部, 江苏南京 210028)

摘要 通过对水泥深层搅拌桩加固土的各种影响因素和大量物理力学性质的试验研究, 得出如下主要结论: (a) 影响加固效果的主要因素依次为水泥掺入比、含水量、龄期等; (b) 水泥掺入比一般应为 10% ~ 15%, 不宜低于 8%; (c) 土壤含水量较高时宜选用粉喷搅拌工艺, 含水量小于 30% 宜采用浆喷湿搅工艺; (d) 水泥土声波速度与其强度之间有很好的相关关系, 可将声速作为水泥深层搅拌桩检测的重要物理量。

关键词 深层搅拌桩 水泥土 物理性质 力学特性

中图分类号 :TU437.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)02-0101-05

深层搅拌桩是将固化剂通过特制机械在地基深处喷出并就地搅拌成桩, 利用桩-土复合地基共同作用来提高承载力的软基加固技术。固化剂大多采用水泥及少量外加剂。依固化剂分别为浆体和粉体的不同, 搅拌方式一般可分为湿式和干式搅拌。加固后的原土与水泥的混合土(以下简称水泥土)的性状, 直接影响软基加固效果。从水泥搅拌加固土的物理力学特性着手, 研究深层搅拌加固地基的规律, 对于完善设计和工艺, 发展探索适合搅拌桩的质量检测、监控方法, 进而推动深层搅拌加固技术的进步, 是很有必要的。

本文通过对水泥土抗压、抗拉、抗剪强度的力学特性和变化规律的探索以及影响水泥土强度因素的分析, 来揭示水泥加固土的特点。本文所列图表和数据皆为室内制作试样试验所得。试样所采用的水泥分别为 425 # 普通硅酸盐水泥和 425 # 矿渣水泥, 软土取自南京某高速公路软土地基, 样本数 2 000 余个。

1 影响因素分析

影响水泥搅拌桩物理力学指标的因素甚多, 软土本身性质、工程设计、施工机械、施工工艺、养护条件以及施工者的素质等对其都有较大影响^[1,2]。现就水泥土的抗压强度这一主要指标, 考察水泥掺入比、含水量、养护条件、孔隙率、饱和度、粉煤灰掺入比以及应力波传播速度等因素的影响作用。

以灰色理论的关联度 r_i 来描述各因素对目标影响的大小。 r_i 实质上反映了各因素的变化态势与目标函数的变化态势在几何形状上的差别, $r_i \leq 1$, 且 r_i 愈大则说明因数 x_i 对目标函数 y 的影响愈大。

对试验水泥土, 按所有样本、水泥掺入比 $> 8\%$ 的样本、水泥掺入比 $\leq 8\%$ 的样本 3 种情况分述如下:

a. 所有样本, 各因素与抗压强度之间的关联度如表 1 所示。

表 1 各因素与抗压强度的关联度(所有样本)

Table 1 Relation of compressive strength and influencing factors(all samples)

因素	水泥掺入比	粉煤灰掺入比	龄期	含水量	孔隙率	饱和度	波速
关联度	0.824	0.663	0.751	0.782	0.795	0.801	0.837

从表 1 可知, 各因素对抗压强度影响的大小依次为: 波速 $\rightarrow$ 水泥掺入比 $\rightarrow$ 饱和度 $\rightarrow$ 孔隙率 $\rightarrow$ 含水量 $\rightarrow$ 龄期 $\rightarrow$ 粉煤灰掺入比。

b. 水泥掺入比 $> 8\%$ 的样本, 各因素与抗压强度之间的关联度如表 2 所示。

表 2 各因素与抗压强度的关联度(水泥掺入比>8%的样本)

因素	水泥掺入比	粉煤灰掺入比	龄期	含水量	孔隙率	饱和度	波速
关联度	0.812	0.644	0.728	0.778	0.797	0.797	0.829

从表 2 可知,各因素对抗压强度影响的大小依次为 波速→水泥掺入比→饱和度、孔隙率→含水量→龄期→粉煤灰掺入比.

c. 水泥掺入比≤8% 的样本. 各因素与抗压强度之间的关联度如表 3 所示.

表 3 各因素与抗压强度的关联度(水泥掺入比≤8%的样本)

因素	水泥掺入比	粉煤灰掺入比	龄期	含水量	孔隙率	饱和度	波速
关联度	0.681	0.640	0.706	0.514	0.566	0.616	0.756

从表 3 可知,各因素对抗压强度影响的大小依次为:波速→龄期→水泥掺入比→粉煤灰掺入比→饱和度→孔隙率→含水量.

水泥掺入比的大小,对水泥搅拌桩质量来说至关重要.除物理量声速外,在诸因素中水泥掺入比的影响占第 1 位.事实上,水泥含量的多少将大大改变土壤加固效果.研究表明,从性能-价格比看,水泥掺入比一般控制在 15% 左右较为合适.水泥掺入比≤8% 与 >8% 的加固土所遵循的规律有明显差异.以 8% 为界限,水泥含量太小对软土强度增长作用不甚明显.但此时粉煤灰影响明显增加、含水量影响下降,说明粉煤灰的加入对于低水泥掺入比情况下降低土壤含水量、提高软土性状是有帮助的.

关联度分析表明,孔隙率、饱和度、实测含水量的影响大小一般在同一个数量级上.众所周知,孔隙率、饱和度的大小与土壤含水量关系密切,在实际计算分析时三者中取含水量更为方便.

以水泥掺入比(λ)、龄期(t)、含水量(w)三者为自变量,则它们与室内配制的水泥土强度(R)的关系式为

$$R = 0.234\,173\lambda + 0.021\,948t - 0.053\,688\,7w + 0.154\,353$$

(1)

由关联度分析可知,声波(应力波)传播速度与水泥土强度之间存在很强的相关性.这就告诉我们,以波速来揭示和评价水泥搅拌桩的加固效果,不但切实可行,而且有较高精度.可以应用应力波动测检测搅拌桩质量,评价加固效果.

波速(v_p)与水泥土抗压强度的关系可表示为

线性表达式

$$R = 0.003\,079\,113v_p - 3.217\,98$$

相关系数

$$r = 0.808\,5$$

(2)

指数表达式

$$R = 7.629 \times 10^{-13}v_p^{3.876}$$

相关系数

$$r = 0.812$$

(3)

2 物理力学特性

2.1 抗压强度

抗压强度是反映水泥土加固效果的一项重要指标,它的大小直接影响复合地基的承载能力.现从水泥掺入比、含水量、养护条件、搅拌方式、水泥种类、土质情况、粉煤灰影响及龄期等因素分别进行分析.

2.1.1 水泥掺入比

室内配比试验的水泥掺入比分别取 5%,8%,10%,12%,15%.水泥掺入比的多少对水泥土抗压强度影响很大.在 40% 土壤含水量、空气养护情况下,水泥掺入比为 5%,8%,10%,12% 及 15%,90 d 室内样强度分别为 0.64,1.65,4.12,4.94,5.66 MPa,强度变化很大(图 4(b)),掺入比增长 3 倍,强度增长 8.84 倍.对粘土而言,水泥掺入比小于 8% 软土加固效果不十分明显.水泥掺入过少难以形成水泥石骨架,水泥水化物也难以与软土颗粒进行充分地反应.

2.1.2 含水量

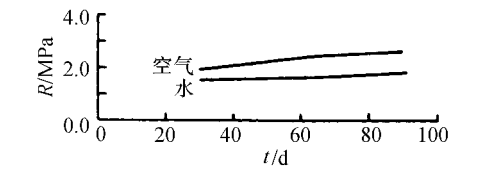
图 1 为含水量影响下水泥土龄期与抗压强度关系曲线.由图 1 可知,软土含水量越高,加固土强度越低.含水量从 30% 增长到 50%,同一掺入比下强度降低约 30%.因此应当根据荷载要求和实际软土含水量调整

设计,对不同地段、不同土质应采用不同的水泥掺入比或改变置换率.

事实上,由于软土中水泥的掺入,软土中的水量为水泥作用吸收,地基含水量将发生改变.在干搅、空气养护条件下水泥掺入比为 λ 的加固土经处理后实测含水量 (w_n) 与原土含水量 (w_0) 之比如表 4 所示.可以看出,随 λ 的增大而 w_n/w_0 减小.

表 4 加固土含水量与原土含水量之比

Table 4 Ratio of moisture content of agitating strengthening soil and to that of original soil					
λ	5%	8%	10%	12%	15%
w_n/w_0	0.82	0.78	0.75	0.73	0.70



硅酸盐水泥+淤泥质亚粘土,35%含水量,15%掺入比

图 2 不同养护条件下干搅水泥土龄期 ~ 强度关系

Fig.2 Period of time-strength curve of deep dry agitating cement soil under different curing conditions

浆喷.室内湿搅试样所用水泥浆按水灰比 0.5:1 配制.相同情况下湿搅水泥土强度要低于干搅水泥土不少,15%浆喷加固土强度大约仅相当于 5%~8%干搅水泥土.其道理显而易见,水泥浆的掺入增加了原土的含水量,加大了孔隙率.因此,在土壤含水量较高时选用粉喷方式,加固效果将会更好.原状土含水量不高(低于 30%)时,由于水量不足,将制约加固土中固化剂水解、水化反应的充分进行,宜选用湿式搅拌.

2.1.5 水泥种类

试验研究表明,用矿渣水泥作固化剂,无论是干搅还是湿搅,无论何种养护条件、何种水泥掺入比,其加固土强度均高于硅酸盐水泥加固土.硅酸盐水泥加固土的抗压强度约为矿渣水泥的 80%~90%.

图 3 为淤泥质亚粘土、35%含水量、15%水泥掺入比情况下两种水泥的加固效果比较.由于矿渣水泥的价格低于硅酸盐水泥,经进一步论证,用其取代目前通常使用的硅酸盐水泥,不仅能提高加固效果,还可降低工程造价.

2.1.6 土质情况

图 4 对淤泥质亚粘土和粘土的加固效果进行了比较.可以定性地讲,相同条件下,土质性状越差,加固土的强度越低.要达到同一强度,淤泥质亚粘土所需的水泥掺入比要大于粘土的.如果软土中含有较多的有机质、腐植质,加固效果要大打折扣.

从图 4 还可看出,软土性状的不同对加固土强度增长规律也有影响.淤泥质土即便在水泥掺入比为 10%时,其后期强度增长也不太明显,说明加固土后期的物理化学反应受到抑制.

2.1.7 粉煤灰作用

粉煤灰的掺入对加固土强度没有明显的改善.由于粉煤灰中很少存在活性物质,因而固化反应较弱.然而,水泥掺入比较小($\leq 8\%$)时,粉煤灰作用上升(关联度由最小上升到第 3),此时,水泥的水解水化作用减弱,粉煤灰的吸水固化作用增加.粉煤灰填充土颗粒空隙,使其致密度提高,从而强度得到提高.

2.1.8 龄期影响

记 90 d 抗压强度为 R_{90} ,以其为标准强度,室内试样强度随龄期的增长速率如图 5 所示.一般地,掺入比

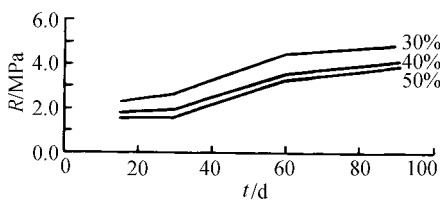


图 1 不同土壤含水量干搅水泥土龄期 ~ 强度关系

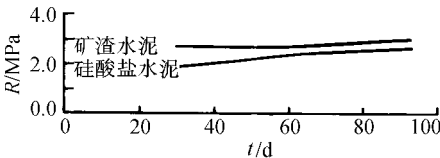
Fig.1 Period of time-strength curve of deep dry agitating cement soil under different moisture contents

2.1.3 养护条件

水中养护的试样强度明显低于空气中养护的试样强度(图 2).前者 30 d 强度为 1.52 MPa,90 d 强度为 1.84 MPa;后者则分别为 1.89 MPa,2.68 MPa.两者 30 d 强度差别不大,90 d 却相差 50%,说明加固土的后期物理化学反应使强度进一步增长,但水泥土孔隙与毛细管对外界水的吸收,将抵消这种增长.应当指出,现场条件介于两种养护条件之间,强度也应在上述两种理想条件下强度值之间.

2.1.4 搅拌方式

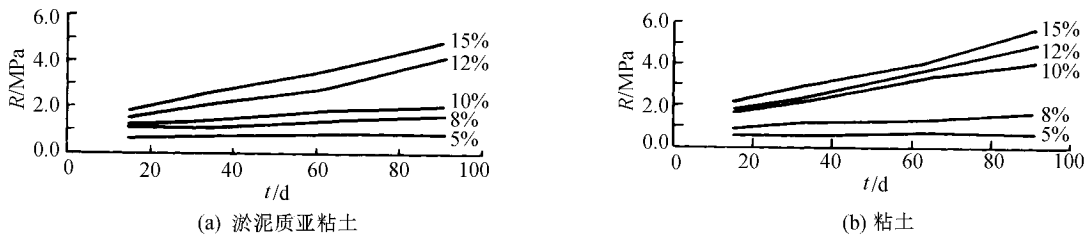
现行水泥深层搅拌方式一般分为干搅和湿搅,即所谓粉喷和



水泥+淤泥质亚粘土,35%含水量,15%掺入比,空气养护

图 3 不同水泥种类干搅水泥土龄期 ~ 强度关系

Fig.3 Period of time-strength curve of deep dry agitating cement soil for different cement varieties

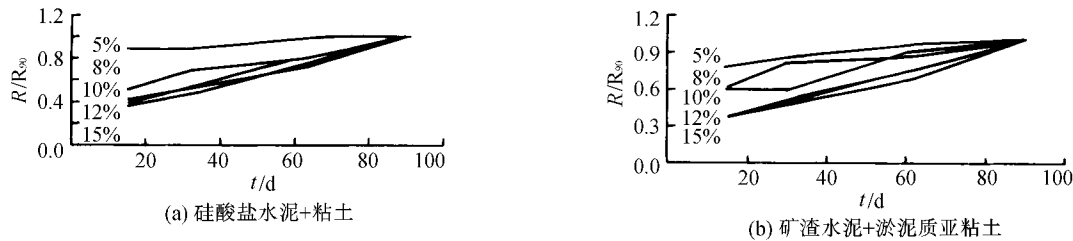


硅酸盐水泥,40%含水量,空气养护
图 4 不同软土类别干搅水泥土龄期~强度关系

Fig.4 Period of time-strength curve of deep dry agitating cement soil for different ooze varieties

低,早期强度接近原土强度,后期强度增长亦很小,而水泥含量越高,水泥与软土之间的反应则需要较长时间才能稳定.15%掺入比情况下,15 d 强度约为 90 d 强度的 35%,30 d 为 45%~50%,60 d 约为 70%,90 d 后强度趋于稳定,180 d 仍有少量增长.

水泥土强度增长速度大大缓于混凝土,且增长规律也有所不同.这一现象在对其强度评价和质量检测时应予以注意.



40%含水量,空气养护
图 5 不同土壤含水量干搅水泥土强度增长率

Fig.5 Strength rising ratio of deep dry agitating cement soil under different moisture contents

2.2 抗拉强度

抗拉试验试块用 8 字模制作.由统计可知,以上各配比 800 个试块的抗拉强度的最小值为 0.06 MPa,最大值为 0.35 MPa,为抗压强度值的 0.08~0.16 倍,一般约为 0.14 倍.抗拉强度的影响因素和变化规律同抗压强度一致,其变化趋势与抗压强度类同,只是变化幅度较小.

2.3 抗剪参数

从抗剪参数分析可知,粘聚力随着掺入比的增加而增大.淤泥质土中掺入矿渣水泥时,粘聚力为 0.33~0.69 MPa.粉质粘土中加入硅酸盐水泥时,粘聚力变化范围为 0.19~1.071 MPa,较原状淤泥质土的粘聚力(0.008~0.04 MPa)和粉质粘土(0.008~0.092 MPa),加固水泥土分别增长 17.25~41.25 倍和 11.64~23.75 倍.水泥土内摩擦角变化规律不明显,但也从原状土的 5°~23°提高到 22.6°~46.2°,内摩擦角增长 2.01~4.52 倍.

水泥土较原状土的粘聚力和内摩擦角增大,说明水泥土的抗剪强度远大于原状土.这是水泥掺入土体后的硬凝作用引起的.水泥水化物硬凝物质的生成增加了加固土的糙度,从而加大了剪切面的摩擦系数,提高了抗剪强度.水泥掺入比 $\leq 8\%$ 时,加固土体的拉压强度虽然提高得不多,但对抗剪参数的改变则作用明显.其根本原因在于拉、压破坏与剪切破坏的方式不一样.抗压、抗拉依靠土颗粒之间的联结力和结构支撑力起主导作用,而抗剪时土颗粒间粘聚力和土颗粒的摩擦力起主导作用.另外抗压、抗拉破坏面不是一个规则的面,如果土体中土颗粒不是完全被水泥石骨架包围,破坏可以沿土颗粒之间软弱面发生.抗剪破坏截面则是一个相对平整的面,土体在剪切时,破坏面不能绕过水泥石颗粒,水泥石颗粒起了抗剪切作用.

3 结 论

a. 影响加固效果的主要因素依次为 水泥掺入比、含水量、龄期等.由大量试验分析计算的水泥土强度公式,对设计和施工有重要参考价值.本文所给公式是从室内试样归纳得出的,在现场环境使用时,应作进一

步研究和修正.

b. 软土中水泥的掺入改善了加固土的物理性质,加强了土颗粒之间的联结作用,降低了孔隙率和原土含水量,使得颗粒间隙减小、结合水膜变薄,提高了软土密度,使加固土的致密程度提高,因而强度提高,声速也随之提高. 各项物理指标的提高,是水泥土力学性质改善的原因. 水泥掺入比对水泥土强度影响很大,粉煤灰的加入对其却没有明显的改善. 不同土质、不同地质条件、不同搅拌方式下,软基处理需采用不同的水泥掺入比或置换率. 水泥掺入比以 8% 为界限,一般控制在 10% ~ 15% 较为适宜,太小对软土强度增长作用不明显,太大则加大了成本.

c. 软土含水量明显地影响加固体强度. 含水量高,一般加固土的强度低. 由于固化剂含水量的缘故,相同水泥掺入比情况下,浆喷深层搅拌加固体的强度要比粉体搅拌低得多. 因此,在原土含水量较高时,若机械、施工工艺可以保证,原则上应选择粉体喷射搅拌技术. 如果软土本身含水量较低(一般小于 30%),选择浆喷方法更利于水泥的物理化学反应,并使水泥土的搅拌更均匀.

d. 选用同标号的矿渣水泥取代常规的硅酸盐水泥作为加固剂,其加固效果更好. 这对于降低工程造价有现实意义,值得进一步研究、论证.

e. 土质性状对加固效果有一定影响. 土质性状差,加固土强度低. 试验证明,淤泥质亚粘土较之粘土加固效果差,应当适当提高水泥掺入比. 对不同土质采用相同的掺入比和置换率,这在设计中是不恰当的.

f. 水泥加固土的强度增长比较缓慢,一般 100 d 左右趋于稳定. 水泥掺入比大于 12%,15 d 强度大约为标准强度的 35%,30 d 约为 50%. 掺入比越高,强度增长趋于稳定所需的时间越长.

g. 水泥土中声波(应力波)传播速度与水泥土的强度之间存在很好的相关关系,这使得利用声速这一物理量检测和评价水泥土加固效果可能并可行,值得重视和研究.

h. 对于各种条件下水泥土的物理、力学特性还应当进行更全面、更深入的研究,以上观点还需经实践进一步验证.

参考文献:

[1] 阮善发,宫必宁,吴梅英等. 深层搅拌桩施工质量模糊控制[A]. 见 孙钊,夏可风主编. '98 水利水电地基与基础工程学术交流会论文集[C]. 天津:天津科学技术出版社,1999. 500 ~ 505.

[2] 吕民康,宫必宁,罗增益等. 水泥深层搅拌桩化学分析、热分析质量检测方法[J]. 公路,1998,(8) 31 ~ 37.

Study on Physical and Mechanical Characteristics of
Deep Jet Mixing Strengthening Soil for Soft Foundations

GONG Bi-ning¹, LI Song-quan²

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Nanjing 2nd Yangtze River Bridge Construction Headquarters, Nanjing 210028, China)

Abstract Experimental study of the physical and mechanical properties of deep agitating strengthening soil with cement and analysis of affecting factors indicate : (a) The sequence of factors influencing soil strengthening is cement participating ratio, moisture content and period of time. (b) Cement participating ratio should be 10% ~ 15%, no less than 8%. (c) Dry jet mixing method is better when soil moisture is higher, and wet jet agitating method should be used when soil moisture is less than 30%. (d) There is a good relationship between strength and sound velocity through agitating cement soil. The wave-speed through agitating cement soil could be used as an important physical factor for deep agitating pile with cement in quality control.

Key words : deep jet mixing pile ; deep agitating strengthening soil with cement ; physical characteristics ; mechanical property