

文章编号: 0451-0712(2007)03-0017-05

中图分类号: U416.1; TU472

文献标识码: A

抵抗有机质对水泥土强度不利影响的有效方法

姜 鹏¹, 方 磊², 贺富强³

(1. 江苏省水文地质工程地质勘察院 淮安市 223005; 2. 东南大学岩土工程研究所 南京市 210096;

3. 南京市公路建设处 南京市 210008)

摘 要: 采用水泥搅拌桩进行地基处理时, 常常因为有机质的存在, 使得采用水泥搅拌法进行地基处理的效果不甚理想, 这是因为有机质能够与水泥矿物发生一系列化学作用, 阻碍水泥水化产物的晶体生长, 从而不利于水泥加固土强度增长。针对有机质对水泥加固土强度的这种不利影响, 进行了一些尝试性试验, 旨在寻求一种添加剂, 用来抵消有机质对强度的这种不利影响。试验结果及化学机理分析表明, 纯氯化钠能够有效抵消有机质对强度的这种不利影响, 可以作为一种既有效又经济实用的水泥土添加剂。

关键词: 水泥加固土; 无侧限抗压强度; 有机质; 氯化钠

我国东部沿海地区广泛分布高含水量、高压缩性软土, 其中部分地区软土中有机质含量较高, 这给高速公路地基处理带来新的课题。《软土地基深层搅拌加固法技术规程》(YBJ 225-91) 规定: 深层搅拌法适用于加固淤泥、淤泥质土、粘土、粉质粘土、粉土等软土地基, 加固深度可达 20 m, 固化剂可选用水泥及其他有效固化材料; 当地下水具有侵蚀性或加固泥炭土时应通过试验确定其适用性; 深层搅拌法特别适于加固含水量大于 30% 的各类软土地基。因此, 采用水泥深层搅拌法进行高速公路软基处理是一种较好的方法, 江苏省近年来在高速公路建设中大量采用水泥土搅拌桩进行地基处理, 取得了良好的社会效益和经济效益。但是, 采用水泥搅拌桩处理高有机质含量软土时, 由于有机质的影响, 常常达不到理想效果。为此, 本文尝试通过一些室内配合比试验, 寻找采用水泥搅拌桩加固高有机质含量软土时, 抵消有机质对桩体强度增长不利影响的对策。

1 试验过程及试验结果分析

1.1 试验方案^[1]

室内试验采用现场取来的土样, 晒干后残留含水量按 3% 考虑, 考虑到现场土的含水量高 (按 60% 考虑), 在室内将含水量配至 60%, 按水灰比 0.5 制

样。对于有机质含量为 3% 的土样, 分别按水泥质量分数为 10%、14%、18% 等 3 种情况制样, 每种水泥质量分数制样时分别加入质量分数为 1%、2%、3%、4%、5% 和 8% 的氯化钠; 对于有机质含量为 6%、9% 和 12% 的土样, 按水泥质量分数为 14% 制样, 分为不加氯化钠和加入 3% 氯化钠两种情况制样。各种配合比试样分成 7、14、28、60、90 和 120 d 龄期在室内人工制成 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 规格的试块, 静置 24 h 后脱模编号, 然后送养护室养护。标准养护室的温度为 20℃ ± 3℃, 相对湿度为 100%。对各个龄期试样进行水泥加固土无侧限抗压强度试验。这里水泥质量分数是指掺入水泥的质量与待加固软土质量的百分比; 氯化钠质量分数是指掺加的氯化钠质量与掺入水泥质量的百分比。

1.2 试验结果及分析

水泥加固土无侧限抗压强度 q_u 按式 (1) 计算:

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: q_u 为试验龄期下的水泥加固土无侧限抗压强度, MPa; P 为破坏荷载, N; A 为试样承载区的面积, m^2 。

取 3 个平行试样测值的算术平均值, 作为该小组试样的无侧限抗压强度值。当单个试样的测值与

平均值之差超过平均值的 $\pm 15\%$ 时,该试样的测值应剔除,按余下试样的测值计算平均值。如一组试样不足两个,则该组试验结果无效,须重做。整理本次试验数据,得出以下几方面结果。

(1)无侧限抗压强度与水泥质量分数、龄期的关系。

水泥加固土无侧限抗压强度与水泥质量分数之间的关系曲线见图1。由图1可知,水泥加固土强度随水泥质量分数的增加而增加,而且龄期越长,强度增长幅度越大。这与汤怡新^[2]等(2000年)的试验结果是一致的,直到龄期达到90 d以后,强度增幅才会减小。

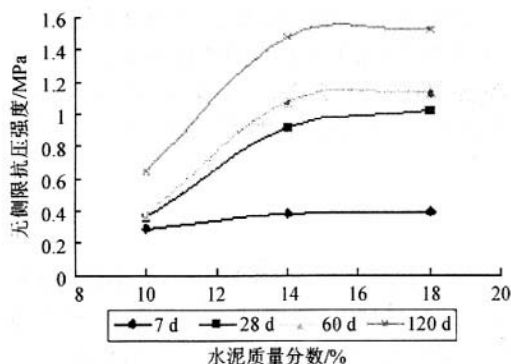


图1 无侧限抗压强度与水泥质量分数的关系
(有机质含量为3%,氯化钠质量分数为1%)

(2)有机质含量对水泥加固土无侧限抗压强度的影响。

有机质含量与水泥加固土无侧限抗压强度的关系见图2。由图2可以看出,随着有机质含量的增加,水泥加固土强度降低,尤其是有机质含量大于7%时,无侧限抗压强度随有机质含量的增加发生陡降。

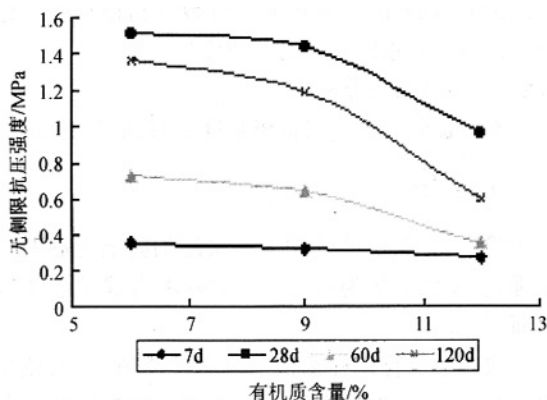


图2 无侧限抗压强度与有机质含量的关系
(水泥质量分数为14%)

(3)分析纯氯化钠对水泥加固土无侧限抗压强度的影响。

分析纯氯化钠对水泥加固土无侧限抗压强度的影响情况见图3~图6。对于高有机质土来说,随着有机质含量增加,其水泥加固土无侧限抗压强度是降低的。但是加入质量分数为3%的纯氯化钠之后,有机质含量为6%的水泥加固土强度最低,有机质含量低于或高于6%的水泥加固土强度反而增大(图3)。可见,氯化钠能够抵消有机质对水泥土强度增长的不利影响。水泥质量分数较低时(10%),水泥加固土强度随着氯化钠质量分数增加而先增后减,大约在氯化钠质量分数为4%左右时强度最高;当水泥质量分数增加到14%时,氯化钠对水泥加固土强度影响不大;水泥质量分数增加到18%时,水泥加固土强度随着氯化钠质量分数增加也呈先增后减的趋势,大约在氯化钠质量分数为7%左右时强度最高。

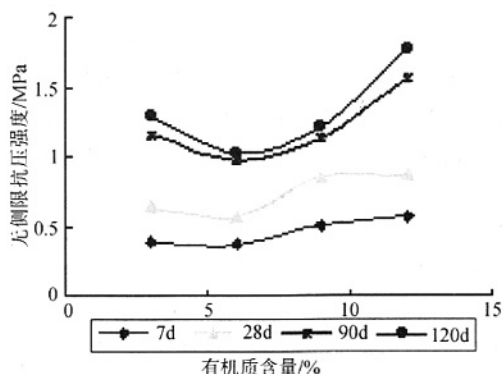


图3 氯化钠对高有机质土无侧限抗压强度的影响
(水泥质量分数为14%,氯化钠质量分数为3%)

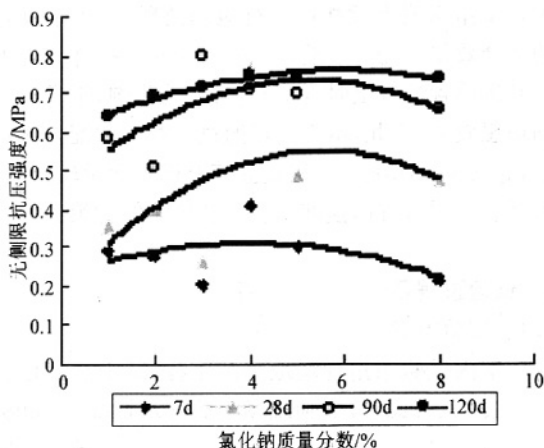


图4 有机质存在下氯化钠对无侧限抗压强度的影响
(水泥质量分数为10%,有机质含量为3%)

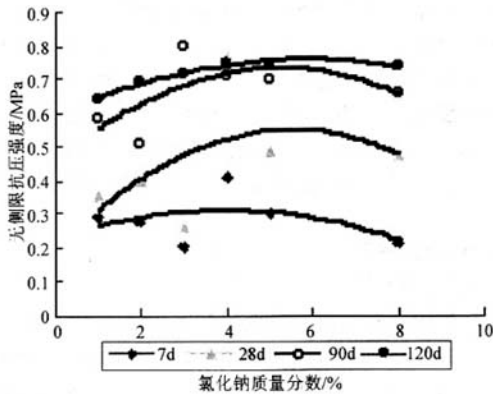


图5 有机质存在下氯化钠对无侧限抗压强度的影响
(水泥质量分数为14%,有机质含量为3%)

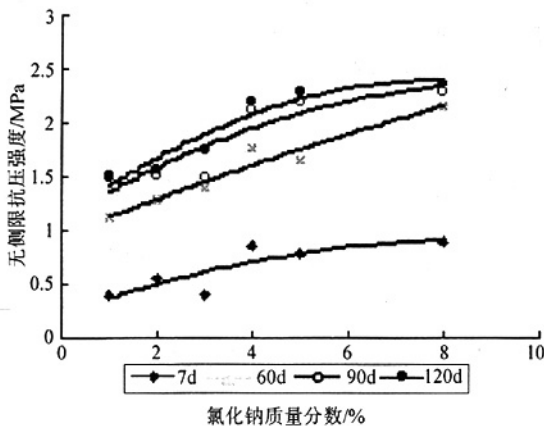


图6 有机质存在下氯化钠对无侧限抗压强度的影响
(水泥质量分数为18%,有机质含量为3%)

2 氯化钠抵抗有机质对强度不利影响的讨论

2.1 氯化钠作用机理及其有效性论证

(1) 无侧限抗压强度随着水泥含量、龄期变化的化学机理。

从水泥加固土化学反应机理分析,随着水泥质量分数增大、龄期增长,生成各种水化反应产物的晶体越多,各种颗粒间接触越紧密,宏观上表现为强度越大。在水泥质量分数不大时,颗粒有足够的空间供水化产物的晶体生长,因而晶体并不能充分占据颗粒间孔隙;当水泥质量分数较大时,水化产物增加,而孔隙有限,因而各种晶体就会交错生长,彼此填充相互之间空隙。所以,水泥质量分数越大,随着龄期增加,强度增长幅度越高。

(2) 有机质对水泥加固土无侧限抗压强度影响的化学机理。

试验中所掺加的有机质是一种腐殖酸,为有机高分子物质,其主要成分为富里酸和胡敏酸。溶于水的腐殖酸为胶体分散系,具有很大的比表面积,通过氢键、配体交换表面配位、疏水作用以及金属离子桥键作用^[5]的方式对土中粘粒产生很强的吸附作用,从而阻止粘土颗粒与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之间发生化学反应;腐殖酸胶体分散体系周围发达的双电层结构能吸附 Ca^{2+} ,阻止其在土壤溶液中自由迁移,抑制 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的结晶成核作用,从而不利于水泥加固土强度增长。那乌莫娃^[3](俄)等研究表明,腐殖酸分子中存在的含共用电子的多共轭缩合结构,具有给一受电子性和离子交换性的结构;腐殖酸分子中有羟基、酚羟基、醇羟基、甲氧基和羰基等含氧官能团,其中羟基和酚羟基中的氢能进行置换反应,这些基团的存在使腐殖酸具有酸性及交换容量,可以与金属离子进行离子交换和络合作用^[4]。不饱和键的存在使得腐殖酸具有很强的还原性,水泥矿物水化过程中, Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ,并与腐殖酸形成络合物,从而阻止水泥矿物继续水解,不利于强度增长。胡敏酸分子对粘土颗粒的分散作用很大^[6],抑制离子交换和团粒化作用,从而不利于水泥加固土强度增长。有机质中的富里酸与水泥矿物的吸附作用所形成的吸附层会延迟水泥水化的进程,富里酸的分解作用会使已生成的水化铝酸钙、水化硫酸钙及水化铁铝酸钙晶体等水化产物解体,破坏了水泥加固土结构的形成,呈现出一种化学风化的特征。增加腐殖酸盐的含量会使金属的吸着率上升^[7],这样水泥和粘土矿物中的 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 被吸着的比例增加,从而使得水泥水化产物减少、抑制硬凝反应,不利于水泥加固土强度增长。由此可见,有机质能够通过多种方式延缓水泥水化反应的进程,延缓和减少各种晶体的生长,不利于水泥加固土强度的提高,因此软土中有机质含量增加,水泥加固土强度降低。

(3) 分析纯氯化钠对水泥加固土无侧限抗压强度影响的化学机理。

腐殖酸高分子溶液在适当条件下,溶质分子之间相互联结成立体网架结构,充满于网眼的溶剂不能自由流动,使原溶液变成保持原有几何形状的半固体形态,称为胶凝;在一定条件下,胶体分子通过联结而聚合、沉淀,明显地分为固一液两相,称为絮凝。腐殖酸溶液中加入一定量的电解质即可发生胶凝和絮凝现象,当加入电解质浓度处于某一范围时发生胶凝,低于某一浓度时发生絮凝,浓度过高时

也会发生絮凝^[8]。加入质量分数为3%的氯化钠时,溶液中的 Na^+ 会导致胶凝或絮凝现象的发生,有机质含量较低时(3%),3%的氯化钠形成的溶液浓度相对过高,因而直接发生絮凝;有机质含量增加至6%时,3%的氯化钠形成的溶液使有机质胶凝;有机质含量继续增加时,3%的氯化钠形成的溶液浓度变得相对较低,又会发生絮凝现象。有机质在水泥加固土体内絮凝,有利于水泥加固土强度增长,而发生胶凝不利于强度增长,因此造成氯化钠质量分数为3%时软土的水泥加固土强度随有机质含量增大先降低后增大的现象。对于有机质含量不高(3%)的软土,加入少量或较多氯化钠,则形成的 Na^+ 浓度就低于或高于使有机质胶凝的浓度范围,从而发生絮凝,除此之外则发生胶凝,因而会发生水泥加固土强度随含盐量的增加先增后减的现象(如图4、图6)。图4、图6相比较,发生强度降低的峰值向后移动,是因为水泥质量分数提高,土中 Ca^{2+} 浓度提高, Ca^{2+} 作用增强的缘故。

由前面的化学机理分析可知,氯化钠作为一种添加剂用于水泥搅拌桩,应用于有机质含量高的软土中,用来抵消有机质对桩体强度增长的不利影响,有其内在的必然性,从化学机理上证明了氯化钠的作用能够有效地促进有机质含量高的软土水泥搅拌桩强度增长,试验结果进一步验证了氯化钠可以作为水泥搅拌法处理高有机质含量软土的增强剂。

2.2 氯化钠用于水泥搅拌桩的可行性及实用性讨论

(1) 可行性。

实验结果表明,对于有机质含量为3%的软土,在水泥质量分数为10%的情况下加入质量分数为4%的氯化钠,水泥质量分数为18%的情况下加入质量分数为7%的氯化钠,即可达到最佳加固效果。对于更高有机质含量的软土,可通过类似的室内配合比试验,确定达到最佳加固效果的氯化钠质量分数。在工程实践中,这个方法操作简单,只需根据室内试验确定达到最佳加固效果的氯化钠掺入量,施工中按照这个质量分数把氯化钠掺入水泥浆中,进行水泥搅拌桩施工即可。因而,采用氯化钠作为添加剂,抵消有机质对水泥土桩强度增长不利影响的方法是可行的。

(2) 实用性。

通常情况下,水泥加固土无侧限抗压强度随着水泥质量分数增加而增大。刘松玉、储诚富^[9]的研究表明:如果经过试验求得有机质含量为 y_0 的软土加

固后的无侧限抗压强度为 q_{uy0} ,则可通过式(2)对有机质含量为 y 的软土加固后的无侧限抗压强度 q_{uy} 进行预测。

$$\frac{q_{uy}}{q_{uy0}} = \frac{q_{uy}/q_{uy5.5}}{q_{uy0}/q_{uy5.5}} = \frac{-0.065y + 1.35}{-0.065y_0 + 1.35} \quad (2)$$

文献[9]给出了强度比 $q_{uy}/q_{uy5.5}$ (指含水量、水泥质量分数和龄期都相同,而有机质含量不同的土加固后的强度之比)与有机质含量 y 之间的关系曲线,见图7(每单个龄期)。由图7可见,随着有机质含量增加,强度比线性递减,这说明随着有机质含量增加,相同水泥质量分数的水泥加固土无侧限抗压强度递减的幅度增大。这和本文的试验结果是类似的。基于试验结果可以得出:采用水泥搅拌桩加固有机质含量为 a 和 $b(a>b)$ 的软土,如果其水泥加固土能够达到相同的强度,那么对于有机质含量高的软土,需要掺入更多的水泥;对于有机质含量更高的泥炭土,可能掺入很多的水泥甚至不能达到预期加固效果,而要采取另外的需要更大代价的地基处理方法才能达到效果。因此,对于有机质含量很高的软土,如果不加入合适的添加剂,来消除有机质对桩体强度增长的不利影响,对于工程建设投资方来说,将会大大增加投资。

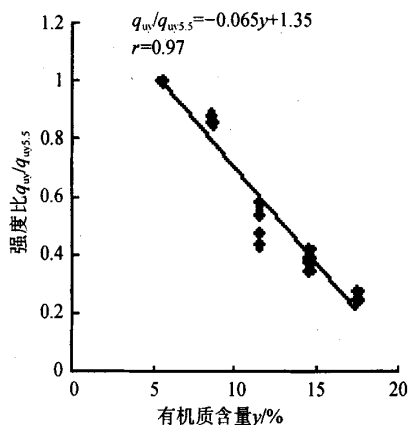


图7 强度比 $q_{uy}/q_{uy5.5}$ 与有机质含量 y 的关系

基于已有的试验成果,对于有机质含量高的软土,采用水泥搅拌桩进行地基处理时,加入适量的氯化钠,就能够抵消有机质对强度增长的不利影响。因而对于有机质含量更高的软土,不需要增加水泥质量分数,只需加入适量氯化钠,即可达到更好的加固效果,从而能够节省巨大的投资。例如,对于某高速公路,路基处理宽度为42 m,设计水泥搅拌桩桩间距为1.5 m,桩长为10 m,那么单位长度路基共有搅拌

桩18 648根/km,使用氯化钠作为增强剂,假设可节省水泥10 kg/m,那么共可节省水泥1 864 800 kg/km,按30元/100 kg计算,则可节省造价559 440元/km。由此可见,采用氯化钠作为水泥搅拌法处理高有机质含量软土的增强剂,能够产生巨大的经济效益,是一种简单实用的方法。

3 结语

(1)水泥加固土强度随水泥质量分数的增加而增加,而且龄期越长,强度增长幅度越大。随着有机质含量的增加,水泥加固土强度降低,尤其是有机质含量大于7%时,强度随有机质含量的增加发生陡降。

(2)对于高有机质土来说,随着有机质含量的增加,水泥加固土无侧限抗压强度是降低的。但是加入3%分析纯氯化钠之后,有机质含量为6%时的水泥加固土强度最低,有机质含量低于或高于6%的水泥加固土强度反而增大。

(3)水泥质量分数较低时(10%),水泥加固土强度随着氯化钠质量分数增加而先增后减,大约在氯化钠质量分数为4%左右时强度最高;当水泥质量分数增加到14%时,氯化钠对水泥加固土强度影响不大;水泥质量分数增加到18%时,水泥加固土强度随着氯化钠质量分数增加也呈先增后减的趋势,大约在氯化钠质量分数为7%左右时强度最高。

(4)氯化钠与水泥土相互作用化学机理分析表

明,采用氯化钠作为水泥搅拌桩加固有机质含量高的软土的增强剂有其必然性。试验结果表明,采用氯化钠是有效的增强剂;工程经济性分析表明,采用氯化钠作为增强剂,能够为有机质含量高的高速公路软土地基处理节省巨大的投资,因而是一种实用的方法。而此方法操作起来简便易行,因而可以作为一种抵消有机质对水泥搅拌桩强度不利影响的新方法推广应用。

参考文献:

- [1] JTJ 051—93,公路土工试验规程[S].
- [2] 汤怡新,刘汉龙,朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2000,(5).
- [3] [俄]那乌莫娃,等. 成绍鑫,译. 腐殖酸分子结构与生物活性的关系[Z].
- [4] 贺婧,颜丽,等. 不同来源腐殖酸的组成和性质的研究[J]. 土壤通报,2003,34(4).
- [5] 吴宏海,等. 高岭石和硅铝氧化物对腐殖酸的吸附试验研究[J]. 岩石矿物学,2003,22(2).
- [6] 兰叶青,胡琼英,薛家骅. 胡敏酸对土壤和矿物粘粒分散的影响[J]. 土壤学报,1998, 35(2).
- [7] 李虹. 从煤炭中提取的腐殖酸吸附金属物质的研究[J]. 中国煤炭,2001,27(3).
- [8] 郭晓峰,愈惠. 腐殖酸溶液胶凝现象初探[J]. 腐殖酸,1998,(4).
- [9] 储诚富. 水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[D]. 东南大学岩土工程研究所,2005.

An Effective Method for Reducing Disadvantageous Effect of Organic Matter on Cement-Soil Compressive Stress

JIANG Peng¹, FANG Lei², HE Fu-qiang³

(1. Jiangsu Provincial Institute of Hydro-Geology and Geo-Technology Reconnaissance Engineering, Huai'an 223005, China;

2. the Institute of Geotechnical Engineering of Southeast University, NanJing 210096, China;

3. Department of Highway Construction of NanJing, NanJing 210008, China)

Abstract: When using cement mixing pile to treat soft ground, the ground treatment effect becomes not so good because of the existence of organic matters. It is because series of chemical reactions occurs between the organic matters and cement minerals, and it restrains the growth of the cement hydrate crystals, as a result, it is disadvantageous for the increase of cement-soil compressive stress. Aiming at finding a new cement additive to reduce the disadvantageous effect of the organic matters on cemented-soil compressive stress, the series of tentative experiments are carried out. Experiment data and chemical mechanism analysis show that sodium chloride can effectively reduce this disadvantageous effect on cement-soil of the organic matters, and it can be used as a kind of effective, economical and practical cement additive.

Key words: cement-soil; unconfined compressive stress; organic matters; sodium chloride