

⑧

43-48

软土地基加固深层水泥搅拌法及其在水利工程中的应用

黄孟生

张芹

Tu 471.8

(河海大学 南京 210098)

(南京水利科学研究所 南京 210024)

摘要 深层水泥搅拌法是软土地基加固的一种有效的方法,在水利工程中推广和应用该法具有广阔的前景。本文介绍深层水泥搅拌法的原理、优良特性、工程应用实例等。

关键词 软土地基 复合地基 地基加固 深层搅拌 水泥土 掺入比

水利工程、水泥搅拌法

深层搅拌法始于美国,50年代引入日本,1974年由于大型软土地基加固工程的需要,日本港湾技术研究所等部门开发研制成水泥搅拌固化法(CMC法),用于加固钢铁厂矿石堆场地基,加固深度达32m。我国于1977年10月由冶金部建筑研究总院等单位进行深层搅拌法的室内试验和施工机械研制工作,1980年初在上海宝山钢铁总厂的软土地基加固工程中正式采用,并取得了令人满意的效果。1984年开始在国内批量生产成套的深层搅拌机械后,先后在上海、南京、天津、昆明、长沙、深圳等地的工业、民用建筑、市政设施、交通和水利电力等工程的地基加固处理中得到广泛的应用,并取得良好的社会效益和经济效益。

软土地基加固深层水泥搅拌法具有施工速度快、投资省、适应性广、承载力高、防渗性能好、施工时对周围建筑物的影响小等优点,已引起设计人员的充分关注。目前,一些地区的中小型水利工程的软土地基加固处理中也正在积极地应用和推广这种方法。

1 深层水泥搅拌法的原理

文献[1,2]指出,深层水泥搅拌法最适宜加固各种成因的饱和软粘土。国外使用该法加固的土质有新吹填的超软土、沼泽地带的泥炭土、沉积的粘土和淤泥质土等;加固场所从陆上软土到海底软土;加固深度从数米到五六十米。国内目前采用该法加固的土质有淤泥、淤泥质土、粘性土和粉土等,加固场所还限于陆上,最大加固深度可达15m。一般认为含有高岭土、多水高岭土、蒙脱土等粘土矿物的软土,加固效果较好,而含有伊里土、氯化物和水铝英石等矿物的软土,以及有机质含量高(大于1.0%)、酸碱度低(pH值小于5)的粘性土,水泥的水化反应会受到极大的抑制,因此,除采用水泥外,还必须添加外掺剂,才能达到一定的加固效果。为改善水泥土的性能和提高强度,可选用木质素磺酸钙、石膏、三乙醇胺、氯化钠、氯化钙、硫酸钠等外掺剂。结合工业废料处理,还可掺入不同比例的粉煤灰,也可稍微提高水泥土的强度(提高10%左右)。

1.1 施工工艺

深层搅拌法的施工工艺是：起重机（或塔架）悬吊深层搅拌机到指定桩位后，使搅拌机轴的水泥喷口对准设计桩位；启动搅拌机，按一定的速度，边旋转边钻进，使搅拌头边切土、边搅拌边下沉；待搅拌机下沉到设计深度后，开启灰浆泵，将水泥浆压入地基中，并且边喷浆、边旋转搅拌叶片，同时严格按照设计确定的提升速度提升搅拌机。为使软土与水泥浆搅拌均匀，待搅拌机提升到设计加固范围的顶面标高后，再次将搅拌机边旋转边下沉重复搅拌；至设计加固深度后，再次重复搅拌提升至地面。待水泥固化后，就形成水泥与土混合而成的水泥土搅拌桩。

1.2 水泥土加固原理

软土与水泥采用机械搅拌加固的基本原理是基于水泥加固土的物理化学反应过程。包括：水泥的水解和水化反应；粘土颗粒与水泥水化物的作用；硬凝反应和碳酸化作用使软土固化，其化学反应过程见图1^[3]。水泥加固土（简称水泥土）与混凝土的硬化机理有所不同，混凝土的硬化主要是水泥在粗填充料中进行水解和水化作用，所以凝固速度快，而水泥土，由于水泥掺入量很小，仅占被加固土重的7%~20%，水泥的水解和水化反应完全是在具有一定活性的介质——土的围绕下进行，所以硬化速度缓慢，且反应

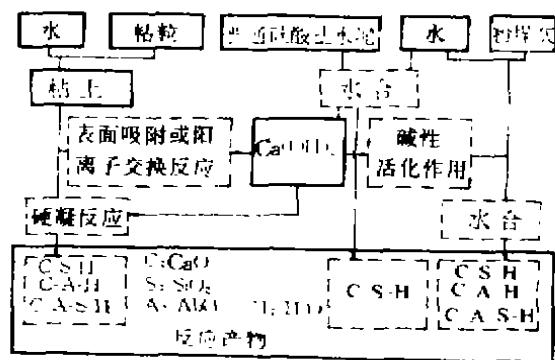


图1 水泥和土的化学反应

复杂，水泥土的固化还需经过土颗粒在水泥水解产物渗透的作用，因此，水泥和土之间的强制搅拌越充分，土块被粉碎得越小，水泥分布到土中的程度越均匀，则水泥土结构强度的离散性越小，其宏观的总体强度也越高；反之，搅拌不充分，水泥土的强度也必然较低。

2 水泥土复合地基的优良特性

水泥土是由水泥浆直接与原地基粘性土搅拌混合而成，因此，它施工速度快，搅拌机吊装就位后，搅拌一根12m长的水泥搅拌桩，仅需二三十分钟的时间；投资也省，它的投资仅是预制桩方案的三分之一，也仅是灌注桩方案的五分之二左右。另外水泥土适用性广、承载力高、防渗性能好、施工时无振动、无噪音、对周围环境及建筑物无不良影响。

深层搅拌法软土地基加固可用于增加地基的承载力，减少沉降量，提高边坡的稳定性。可作为建筑物的地基、厂房内或其它场所堆货荷载的地坪，高填方路堤下的基层；也可以进行大面积地基加固，以防止岸坡、堤坝的滑动、深基坑开挖时的边坡坍塌；还可以作为地下防渗墙以阻止地下渗透水流等。

水泥加固土复合地基可根据上部结构的需要，灵活地设计成柱状、壁状和块状加固的形式。水泥土中掺入的水泥可采用不同品种和标号，工程中采用425号普通硅酸盐水泥和矿渣水泥较多；水泥掺入比（重量比） a_w 可根据要求选用7%~20%不等。经深层搅拌水泥加固后的地基一般自然养护15~30天即可承受上部荷载^[4]。

2.1 水泥土的物理特性

由于采用深层搅拌法拌入软土中的水泥浆的容重与软土容重相近，所以水泥土的容重与天然软土的容重相差不大，试验表明，尽管水泥掺入比 a_w 为25%，水泥土的容重仅

比天然土增加3%^[1,2]。因此,采用该法加固厚层软土地基时,其加固部分对下卧层不致增加过大的附加荷重,故不致产生较大的附加沉降。

2.2 水泥土的力学特性

2.2.1 水泥土的无侧限抗压强度

水泥土的无侧限抗压强度 q_u 与软土的成份、水泥标号、水泥掺入比、龄期等因素有关,一般可达300~4 000kPa,比天然土大几十倍以至数百倍^[1,2]。上海某工程水泥加固土与原状土的强度比较如表1所示^[5]。水泥土的无侧限抗压强度 q_u 随水泥掺入比的增加而增加,当掺入比 $a_w < 5\%$ 时,水泥与土的反应过弱,水泥土的固化程度过低(见图2)^[1,2],实际工程中宜采用水泥掺入比 $a_w > 5\%$ 。

表1 不同水泥掺入比水泥加固土的强度(kPa)

土 层	水泥掺入比(%)				
	0	7	10	15	20
软粘 ⁽³⁾	68.0	305.6	628.3	987.7	1184.2
软粘 ⁽⁴⁾	47.0	291.4	484.1	746.9	853.5

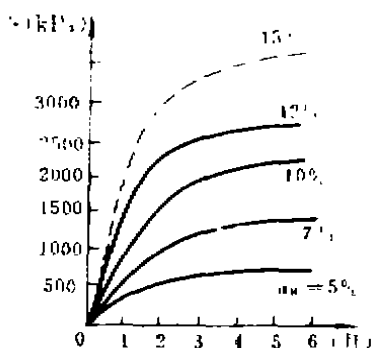


图2 不同掺入比水泥土的龄期与强度的关系

由图2可见,水泥土的无侧限抗压强度随龄期的增长而增大,一般水泥土的龄期超过28天后,强度仍明显增加,当龄期超过三个月后,水泥土的强度的增加才减缓,因此,选用三个月龄期的强度作为水泥土的标准强度较适宜。

水泥土的无侧限抗压强度随土样中有机质含量的减少而增大,图3^[1,2]表示两种不同有机质含量的淤泥质土的水泥土强度与水泥掺入比的关系,曲线I有机质含量为1.3%,曲线II有机质含量为10.01%,由于有机质使土壤具有较大的水容量和可塑性、显著的膨胀性、过大的压缩性和低渗透性,并使土的酸性增加,这些因素都阻碍水泥水化反应的进行。因此,有机质含量高的软土,单用水泥加固的效果较差。

水泥土的无侧限抗压强度随水泥标号的提高而增加,水泥标号每提高100号,水泥土的强度 q_u 约增大20%~30%。

水泥土的无侧限抗压强度 q_u 随土样含水量的降低而增大,由表2^[1,2]可见,当含水量从157%降到47%时,其强度从260kPa增加到2320kPa。

表2 含水量与无侧限抗压强度的关系

天然土含水量(%)	47	62	86	106	125	157
水泥土含水量(%)	44	59	76	91	100	126
无侧限抗压强度 q_u (kPa) ($a_w=10\%$, 龄期28天)	2320	2120	1340	730	470	260

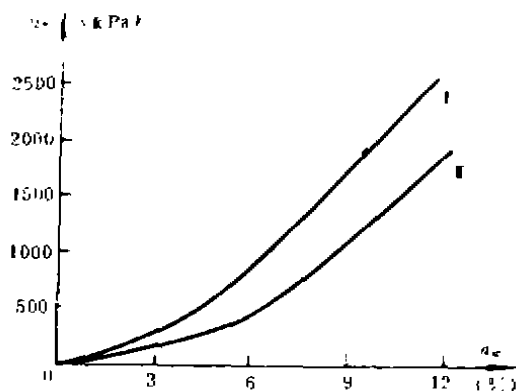


图3 不同有机质含量水泥土强度与掺入比的关系

2.2.2 水泥土的抗拉强度

水泥土的抗拉强度随抗压强度的增加而提高,当水泥土的抗压强度 $q_u=500\sim4\ 000$

kPa 时, 其抗拉强度 $\sigma_t=100\sim 700\text{kPa}$, σ_t 约为 $0.15q_u\sim 0.30q_u$ 。表 3 为上海某工程水泥土的抗拉强度^[5]。

表 3 水泥土的抗拉强度 (kPa)

土 层	水泥掺入比 (%)			
	7	10	15	20
软粘 ⁽³⁾	89.8	142.3	247.1	322.9
软粘 ⁽⁴⁾	80.7	109.1	128.1	249.2

2.2.3 水泥土的抗剪强度

用高压三轴仪进行的剪切试验表明, 水泥土的抗剪强度随抗压强度的增加而提高, 当 $q_u=500\sim 4\,000\text{kPa}$ 时, 其粘聚力 $C=100\sim 1\,100\text{kPa}$, 一般约为 q_u 的 20%~30%, 其内摩擦角 $\varphi=20^\circ\sim 30^\circ$ 。

2.2.4 水泥土的变形模量

水泥土的变形模量与土的特性、水泥标号、水泥掺入比等因素有关, 用不同抗压强度的水泥土的试验表明, 当 $q_u=300\sim 4\,000\text{kPa}$ 时, 变形模量 E_{50} (50% 峰值应力的变形模量) 为 $40\sim 600\text{MPa}$ 。表 4 为上海某工程水泥土与原状土的变形模量^[5]。

表 4 不同水泥掺入比的水泥土的变形模量 (kPa)

土层	水泥掺入比 (%)				
	0	7	10	15	20
软粘 ⁽³⁾	824.5	37\,600	110\,000	201\,000	235\,000
软粘 ⁽⁴⁾	557.3	35\,700	90\,300	169\,000	228\,000

2.2.5 水泥土的抗渗性能

图 4 为水泥土的室内渗透试验结果^[2], 由图可见, 天然软土掺入水泥后, 其渗透性大大降低, 这就意味着止水防渗效果的提高。

3 水泥搅拌桩复合地基的承载力

3.1 单桩承载力

水泥搅拌桩单桩承载力除与桩身材料、桩长、桩径有关外, 还与桩周土的性能有关。

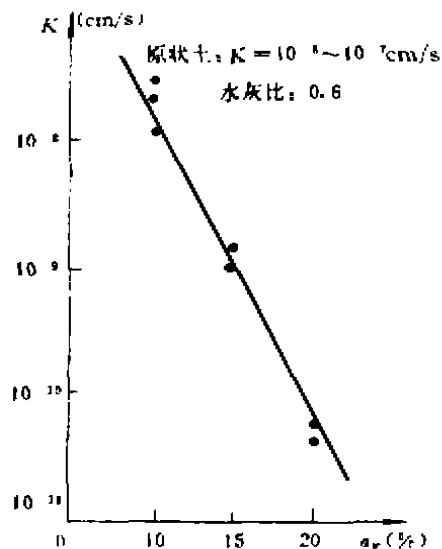


图 4 渗透系数与掺入比的关系

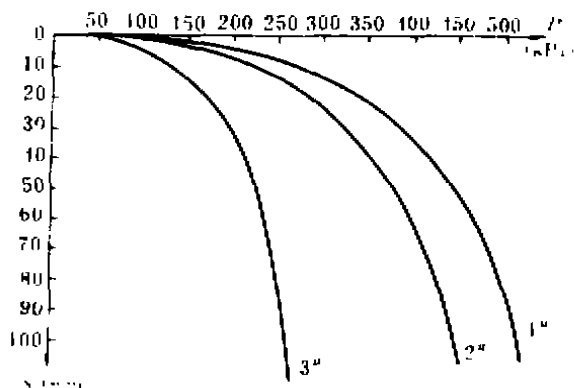


图 5 单桩 $P\sim S$ 试验曲线

图 5 为南京某建筑工地现场测试的承载力 $P\sim S$ 曲线^[2]。其地质条件为: 表面 1.5~3.0m 为人工填土, 容许承载力为 75kPa , 其下为未被钻穿的厚层淤泥质亚粘土, 容许承载力仅 60kPa 。1 号桩的桩身强度 $q_u=890\text{kPa}$ (室内试验推算), 桩长 $l=10\text{m}$, 桩截面的周长为 3.35m , 极限荷载为 500kN , 容许荷载为 250kN (见表 5); 2 号桩的桩身强度为 820kPa , 桩长 $l=7\text{m}$, 桩径相同, 极限荷载为 420kN , 容许荷载为 200kN ; 1 号和 2 号桩的单桩容许承载力分别为 250kN 和 200kN 时, 其相应的沉降均小于 7mm , 侧面摩阻力

表5 试桩规格及试验结果

桩号	搅拌桩截面积 (m ²)	桩截面周长 (m)	桩长 (m)	承台面积 (m ²)	桩身强度 (kPa)	破坏荷载 (kN)	极限荷载 (kN)	容许荷载 (kN)
1	0.71	3.35	10		890	550	500	250
2	0.71	3.35	7		820	450	420	200
3	0.71	3.35	10		250	270	240	120
4	0.71	3.35	10	1.41×1.41	700	650	600	300

平均为8~9kPa。3号桩的桩身强度为250kPa,桩长 $l=10\text{m}$,桩径相同,其容许承载力降到120kN。

3.2 复合地基的承载力

复合地基的承载力是由桩与桩间土共同承担的,根据4号桩的试压结果(见表5),桩长 $l=10\text{m}$,加固置换率 $\alpha_w=36\%$ 的复合地基的容许承载力可达150kPa,比天然地基的容许承载力(60kPa)提高了1.5倍。

4 工程实例

南河闸工程^①是南京市十大防汛重点工程之一,水闸为单孔,闸室净宽10m,设计流量为88.4m³/s;闸底板混凝土方量为670m³,闸墩混凝土方量为360m³;考虑到以闸养闸,以闸养水,闸上还建有870m²的三层综合楼房。

闸址地质条件:闸底板以下10m为高压缩性淤泥质粘土,容许承载力 $[R]=85\text{kPa}$,粘聚力 $C=16\text{kPa}$,摩擦角 $\varphi=7.1^\circ$,压缩系数 $\alpha=0.646\text{MPa}^{-1}$,压缩模量 $E_s=3.04\text{MPa}$;其下为未被钻穿的粉质粘土。

经多种方案比较,底板采用整底板方案,设计计算地基最大沉降量为45cm,超过容许值,因此,需对地基进行加固处理,地基沉降要求控制在10~15cm以内。对多种方案比较后,决定采用水泥搅拌桩方案。

水泥搅拌桩方案采用直径为500mm的圆形桩,桩位按上部结构的重量分布情况布置,在闸墩和翼墙底部的桩的间距为1000mm,其它部位采用2000mm的间距,桩长

自底板底部至-10m高程,采用425号普通硅酸盐水泥,水泥掺入比 $\alpha_w=15\%$;总桩数为517根,桩的总进尺为6960m,其中施工保护层钻孔(空进尺)为430m,搅拌方量1300m³。地基加固费用约25万元,与灌注桩方案相比较,地基加固费用约为灌注桩方案的五分之二。

5 展 望

软土地基加固深层水泥搅拌法具有投资省、施工速度快、适应性广、承载力高、施工时不受气候条件的影响、无弃土、对周围的建筑物及环境无影响等优点,已引起越来越多的设计部门的关注。该法在江苏省首例水利工程中的应用——南河闸的地基处理的成功,对该法在中小型水利工程地基加固处理中的应用和推广,将起积极的推动作用。

水泥搅拌桩与桩间土的紧密结合,受力变形协调一致,在软土地基的加固效果会优于刚性桩(钢筋混凝土桩)和柔性桩(碎石桩或砂桩)。

水泥土的防渗性能好,其形状具有可设计性等优点,深层水泥搅拌法也可用于地下、土坝中连续的防渗墙结构。

深层水泥搅拌法是中小型水利工程中软土地基加固处理的一种有效方法。对于具有较大水平推力的结构,在采用深层水泥搅拌法进行地基处理时,可采用加筋水泥土,即

① 南京水利勘测设计院. 南河闸地基处理设计与施工说明. 1993. 5

在搅拌好的水泥土中,插入一定数量的钢筋或毛竹条,以增强水泥搅拌桩的抗剪和抗弯能力。

参考文献

- 1 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册.北京:中国建筑工业出版社,1988
- 2 周国钧等.地基处理技术——深层搅拌法.北京:冶金工业出版社,1991
- 3 叶伯荣等.水泥深层搅拌桩支护结构的研究和应用.见:龚晓南主编.第三届全国地基处理学术

讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1992.27~32

- 4 周国钧等.深圳机场联络道软土地基深层搅拌法工程.见:龚晓南主编.第三届全国地基处理学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1992.126~131
- 5 曹正康,钱玉林.水泥加固上海软土性能试验研究.见:龚晓南主编.第三届全国地基处理学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1992.148~153

(收稿日期:1994-08-26)

· 国际会议消息 ·

会 议 名 称	地 点	时 间
第3届国际水污染大会:模型技术和预报	希腊	1995年5月1~3日
第21届国际海岸水动力学大会	比利时	5月8~12日
持续开发流域管理研讨会	南非	5月14~16日
水管理的环境影响评价研讨会	比利时	5月15~17日
国际地下水水质大会:保护、评估、公共卫生	捷克共和国	5月15~18日
第12届国际臭氧大会	法国	5月15~19日
开发项目对环境、社会经济产生后果研讨会	俄罗斯	5月15~20日
第7届国际计算方法和实验测定大会(CHEM'95)	意大利	5月16~18日
城市暴雨排水新技术研讨会——95技术革新	法国	5月30~6月1日
管理人类活动对地下水影响效果大会及展示会	加拿大	6月4~10日
沿海地区环境保护大会——黑海地区	保加利亚	6月13~15日
东南亚地质地貌学家协会国际地质地貌大会	新加坡	6月18~23日
第7届国际降雨流域系统大会	北京	6月18~23日
环境科学与脆弱的生态系统研讨会	丹麦	6月25~28日
水中环境污染物危害评价及控制大会:环境工程与环境科学界面	丹麦	6月29~30日
第21届国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)全会暨国际水力学研究协会研讨会和国际水文科学协会研讨会、国际水力学研究协会与国际水文科学协会联合研讨会	美国	7月3~14日
国际低成本污水处理工程研讨会	英国	7月18~21日
非稳定性、风险及瞬变污染事故交叉学科研讨会:对水环境的实际危害	英国	7月24~26日
污染扩散(非点源)研讨会	捷克	8月14~18日
大面积水体长期变化国际大会	瑞典	8月22~25日

(熊莉芸 供稿)