

深层搅拌技术在核安全级地基加固处理中的应用

杨荣胜, 王谦

(台山核电合营有限公司, 台山 529228)

摘要: 为了推广复合地基处理加固技术在核电厂核安全级物项地基中的应用, 针对某核电站核安全级物项地基加固处理采取了水泥搅拌加固技术进行了方案设计及现场试验研究。现场试验结果表明: 松散回填土地基采用水泥搅拌桩加固处理后, 地基承载力特征值可由原来的 200 kPa 增至 400 kPa 以上; 核安全物项主要控制指标剪切波速大幅度提升, 由处理前的 200 m/s 提升到 800 m/s 以上, 大大超过设计及规范要求的 400 m/s。因此, 水泥搅拌桩加固技术用于处理松填的回填土层不仅能大幅度提高地基承载力, 更重要的是能大幅度提升核安全物项主要控制指标剪切波速, 满足了核安全物项地基抗震要求, 对今后核安全级地基处理提供很好的参考。

关键词: 水泥搅拌桩; 地基承载力特征值; 压缩模量; 剪切波速; 压缩波速

中图分类号: TU472.3+6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0104-04

Application of Deep Mixing Technique on Reinforcement of Nuclear Safety Foundation

YANG Rongsheng, WANG Qian

(Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd. Taishan 529228, China)

Abstract: This article introduces the application of deep cement mixing method in loose foundation (sand and gravel backfill) treatment and the changing of wave velocity, loading capacity, modulus of deformation and other performance index before and after using this method. The deep cement mixing method is seldom used in loose foundation (sand and gravel backfill) treatment. Its application is even rarer in treating the backfilled foundation with nuclear safety requirement. Therefore, this technique is innovative and serves as a good example for the future foundation consolidation and treatment.

Key words: cement mixing pile; characteristic ground bearing capacity; compression modulus; shear wave velocity; compress wave velocity

深层搅拌法最适宜于加固各种成因的饱和软粘土。国外使用深层搅拌法加固的土质有新吹填的超软土、沼泽地带的泥炭土、沉积的粉土和淤泥质土等。目前国内常用于加固淤泥、淤泥质土、粉土和含水率较高且地基承载力标准值不大的粘性土^[1]。建筑地基处理规范^[2]规定搅拌法用于处理: 正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、素填土、粘性土、饱和黄土以及无流动地下水的饱和砂土等地基。迄今为止, 水泥土搅拌技术在一般砂性

土和碎石土地基加固中应用很少, 且设计上只考虑加固后的复合地基的承载力和变形模量等静态性能指标的要求, 没有对其复合地基动态性能指标进行限制^[2-3]; 而对于抗震性能要求较高的场地, 尤其在核电中的 I、II 类物项需进行地基的抗震等安全性评价^[4-6], 同时在《核电厂抗震设计规范》中对剪切波速等动态指标也提出了要求, 即核电中 I、II 物项的地基处理除了地基承载力和变形模量满足设计及规范要求外, 同时动态指标-剪切波速也需满足抗震验算及规范要求^[4]; 根据设计及规范要求, 核电抗震一类物项对于剪切波速的要求不小于 500 m/s。因此, 在核电 I、II 物项地基处理中, 剪切波速能否达到要求是需要解决的技术难题。

收稿日期: 2016-07-18

作者简介: 杨荣胜(1978), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事核电工程设计管理工作 (e-mail) yangrongsheng@cgnpc.com.cn。

1 核安全级地基概况

某核电厂 HCO 排水廊道位于 HPX 循环水泵房、HPI 重要水泵房及 HCA 虹吸井周边, 连接 HCP 与 HCQ 消能池, 并与 HCP、HCQ 消能池共同组成 SEC 排水系统, 廊道底宽度为 5.5 m, 埋深 3.0 m, 其下部及周边廊道交错复杂。由于 HCO 廊道相对位置较高, 待其下部廊道施工完成后再进行施工。HCO 排水廊道的抗震等级被定为 SC2 级, 属于抗震 I 类物项, 根据《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 的规定, 应同时采用运行安全地震震动(SL-1)和极限安全地震震动(SL-2)进行抗震设计。根据规范和设计要求, 处理后的地基剪切波速不得小于 500 m/s。

1.1 工程地质条件

▽ 0 m 地面以下 15 m 范围内为虚填砂石料(未经碾压), HCO 排水管廊边距离 HPX(循环水泵房)北侧约为 1.05 m, 其基底埋深为 3 m; HPX 的基底埋深约为 -29 m, 在 HPX 负挖施工时, 同时将 HCO 区域挖至地面以下约 29 m, 形成厂区最深的基坑; 在 HPX 每层结构施工完成后, 为避免形成较大的汇水坑, 及时对该基坑采用砂石料进行虚填(未碾压), 砂石料粒径配通过现场取样筛分试验得出, 见表 1, 颗粒级配分配曲线见图 1, $C_u = 210$, $C_c = 1.3$ 。埋深 29 m 以下的土层为微风化岩, 施工期间无地下水。

表 1 土粒组成表

Tab. 1 Composition of soil particles

天然状态指标	粒径大小的百分比/%										平均粒径/mm
含水率 w_0 /%	> 60	40	20	10	5	2	0.5	0.25	0.075	<	
土粒比重 G_s /%	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	
	60	40	20	10	5	2	0.5	0.25	0.075	0.005	0.005
	3.2	2.68	9.4	2.3	18.7	27.1	9.4	3.9	9.0	20.2	2.7

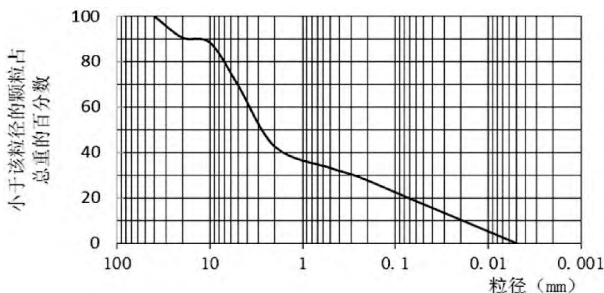


图 1 颗粒级配分配图

Fig. 1 Particle size distribution

1.2 地基处理前各项指标检测数据整理

地基承载力及压缩模量采用浅层平板试验测得, 地基承载力特征值为 200 kPa, 压缩模量为 10 MPa; 剪切波速测试孔布置见图 2。

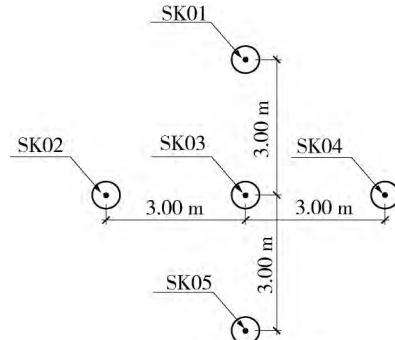


图 2 处理前地基剪切波速测试孔位布置图

Fig. 2 Plan of shear wave velocity test hole before treatment

表 2 地基处理前不同深度的剪切波速汇总表

Tab. 2 Different value of shear wave velocity in different deep position before treatment

深度/ m	跨孔波速测试(发射: SK02; 接收: SK03、SK04)					
	SK2 ~ SK3		SK3 ~ SK4		SK2 ~ SK4	
	$V_s /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_p /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_s /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_p /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_s /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_p /$ ($m \cdot s^{-1}$)
2	225	399	300	174	257	243
3	172	271	182	210	177	237
4	137	231	166	260	150	245
5	166	250	183	252	174	251
6	154	215	142	297	148	249
7	159	239	148	266	153	252
8	192	259	237	333	212	291
9	180	278	161	299	170	288
10	178	266	165	294	171	279
11	193	300	164	324	178	311
12	185	311	241	364	209	335
13	203	308	169	342	185	324
14	207	301	161	325	181	312

1.3 水泥搅拌桩地基处理方案设计

由于设计要求 HCO 处理后的地基剪切波速不小于 500 m/s, 地基特性应达到软质岩以上, 为了实现这一要求, 搅拌桩需采用较高的水泥掺量, 并布置合理的桩径桩距, 使得桩与桩之间相切^[7-8]。现场实际采用的水泥搅拌桩桩径为 600 mm, 按中心间距 600 mm × 600 mm 的梅花形布置, 见图 3,

水泥掺量约 85 kg/m。为使处理后的地基坐落在基岩面上，现场开挖了约 14 m 深的施工作业面，搅拌桩长度 15 m，直达基岩面，搅拌桩施工完成，并检测合格后，采用 C15 素混凝土回填直至 HCO 底板底。

1.4 地基检测

1.4.1 承载力特征值

现场选取三点进行了浅层平板载荷试验，各试验点编号及位置见图 3。各试验点的最大加载量不应小于设计要求的两倍，即 800 kPa，地基承载力特征值采用相对沉降法确定^[1]，确定的地基承载力特征值^[10]见表 3。

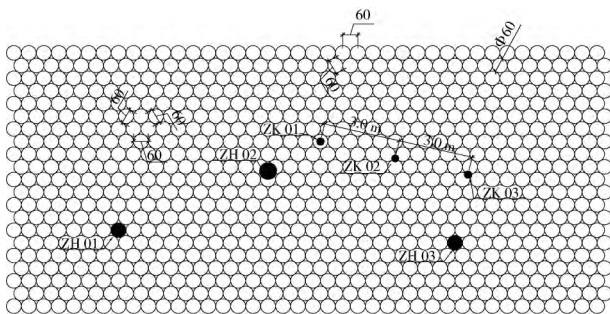


图 3 水泥搅拌桩及检测点布置图

Fig. 3 Plan of cement mixing pile and check point

表 3 地基承载力特征值取值表

Tab. 3 Characteristic value of foundation soil bearing capacity

测点编号	承载力特征值 f_{ak} 取值 / kPa	承载力特征值 f_{ak} 取值方法说明
ZH01	> 400	相对沉降法
ZH02	> 400	相对沉降法
ZH03	> 400	相对沉降法

1.4.2 变形模量 E_0 计算

浅层平板载荷试验的变形模量 E_0 (MPa)，根据试验结果按下式计算^[1]，计算结果见表 4：

$$E_0 = I_0(1 - \nu^2) \frac{pd}{s} \quad (1)$$

表 4 变形模量 E_0 计算成果表

Tab. 4 Calculation result of deformation modulus E_0

测点编号	承压板形状系数 I_0	土的波速比 μ	承压板直径 d /m	压力 p /kPa	相对的沉降 s /mm	变形模量计算值 E_0 /MPa
ZH01	0.785	0.30	0.8	800	1.18	387
ZH02	0.785	0.30	0.8	800	1.70	269
ZH03	0.785	0.30	0.8	800	2.52	181

1.4.3 波速测试

地基处理后的复合地基的波速的检测方法分别采用单孔法和跨孔法进行了测试^[1]，检测孔共 3 个，孔位布置见图 3，波速测试成果见表 5。

表 5 地基处理后的波速测试成果表

Tab. 5 Calculation result of wave velocity after treatment m/s

深度 / m	跨孔波速测试						单孔法波速测试			
	发射孔: ZK01; 接收孔: ZK02、ZK03		ZK01 ~ ZK02		ZK02 ~ ZK03		ZK01 ~ ZK03		ZK01	ZK02
	V_s	V_P	V_s	V_P	V_s	V_P	V_s	V_P	V_s	V_P
1	778	6 020	811	3 344	794	4 300	—	—	—	—
2	826	4 426	897	4 426	860	4 426	—	—	—	—
3	901	4 631	1 013	3 583	954	4 040	823	1 478	908	1 632
4	896	5 473	1 027	3 500	957	4 270	1 042	2 024	1 060	1 615
5	1 309	4 934	998	4 123	1 133	4 493	797	2 815	1 227	2 025
6	1 332	5 375	1 627	3 420	1 465	4 181	959	1 862	1 012	1 534
7	919	5 574	884	3 168	901	4 040	1 268	2 806	1 551	2 435
8	1 155	5 017	1 410	3 716	1 270	4 270	899	2 474	1 801	2 097
9	670	4 855	1 211	3 460	862	4 040	869	3 406	1 146	2 811
10	855	5 788	1 265	3 671	1 020	4 493	935	2 426	1 266	4 258
11	855	5 281	794	4 362	824	4 778	838	2 841	900	2 421
12	782	5 679	1 204	3 583	948	4 394	903	2 431	1 280	2 485
13	743	7 000	846	3 541	791	4 703	716	2 846	782	2 120
14	860	4 934	941	4 123	899	4 493	611	1 920	—	—

1.5 地基处理前后波速对比与分析

为了避免激发延时给测试波速计算带来的误差，波速测试采用跨孔法，一孔为振源激发孔，另外两个孔为信号接收孔，三个孔布置在一条直线上。本次波速对比数据采用信号接收孔之间的波速，相对精度较高，详细数据对比见图 4、图 5 和表 6。

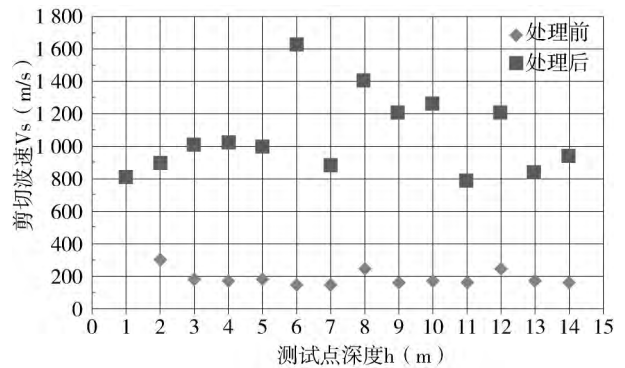


图 4 地基处理前后剪切波速对比图

Fig. 4 Shear wave velocity value before and after treatment

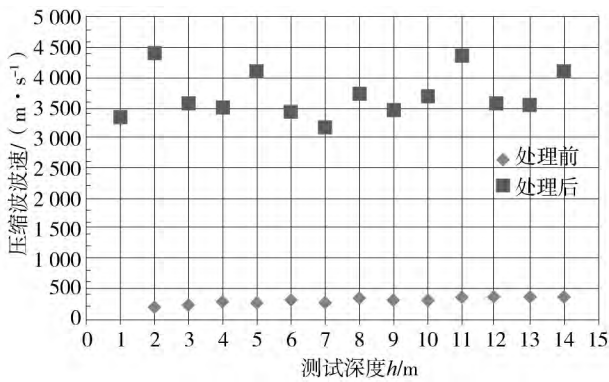


图5 地基处理前后压缩波速对比图

Fig. 5 Compressive wave velocity value before and after treatment

表6 地基处理前后波速对比

Tab. 6 Wave velocity value before and after treatment

深度/ m	跨孔波速测试					
	处理前: 接收孔: SK02, SK03;		处理后: 接收孔: ZK02, ZK03		处理后前波速比	
	SK03 ~ SK04	ZK02 ~ ZK03				
$V_s /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_p /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_s /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_p /$ ($m \cdot s^{-1}$)	λ_{V_s}	λ_{V_p}	
2	300	174	897	4 426	3.0	25.4
3	182	210	1 013	3 583	5.6	17.1
4	166	260	1 027	3 500	6.2	13.5
5	183	252	998	4 123	5.5	16.4
6	142	297	1 627	3 420	11.5	11.5
7	148	266	884	3 168	6.0	11.9
8	237	333	1 410	3 716	5.9	11.2
9	161	299	1 211	3 460	7.5	11.6
10	165	294	1 265	3 671	7.7	12.5
11	164	324	794	4 362	4.8	13.5
12	241	364	1 204	3 583	5.0	9.8
13	169	342	846	3 541	5.0	10.4
14	161	325	941	4 123	5.8	12.7

根据波速测试数据结果, 不同深度的剪切波速在深层搅拌处理前大部分在 200 m/s 以内, 处理后剪切波速大幅度提高, 最低达到 846 m/s。地基处理前, 不同深度的压缩波波速大部分在 300 m/s 附近波动, 地基处理后, 压缩波速同样有大幅度的提升, 最低点可达 3 168 m/s。

2 结论

1) 采用深层搅拌技术处理砂石回填土地基, 桩体施工质量均匀, 桩身较完整, 单轴抗压强度较高, 复合地基承载力及压缩模量大幅度提升, 极易达到设计及规范要求。

2) 采用深层搅拌技术处理砂石回填土地基, 根据测试结果, 地基波速大幅度提升。其中处理后的地基剪切波速达到 800 m/s 以上, 最高达到 1 627 m/s, 远高于设计要求的 500 m/s, 满足设计及相关规范的要求。同时根据《建筑抗震设计规范》, 场地类别可判别为 I₀ 类。

水泥深层搅拌技术在回填砂石地基中应用较少, 尤其是对核安全物项, 该技术应用于提高剪切波速的试验和研究更少, 因此具有技术的创新性, 对核安全物项的地基加固处理具有参考价值。

参考文献:

- [1] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范 [S].
- [3] DL/T 5024—2005, 电力工程地基处理技术规程 [S].
- [4] GB 50267—201x, 核电厂抗震设计规范(征求意见稿) [S].
- [5] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范 [S].
- [6] GB 50267—1997, 水工结构抗震设计规范 [S].
- [7] 胡贺松, 彭振斌, 杨坪, 等. 软土水泥搅拌桩复合地基沉降特性试验研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009(3): 265-269.
- [8] 刘健伟. 水泥搅拌桩在高层建筑地基处理中的设计与应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009(6): 64-66, 80.
- [9] 孙发平. 水泥搅拌桩加固软粘土地基模型试验和有限元分析 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2012(4): 90-94.
- [10] 陈富强, 杨光华, 刘惠康. 水泥搅拌桩复合地基强度参数取值方法探讨 [J]. 地下空间与工程学报, 2013(S1): 101-105.

(责任编辑 林希平)