

高压注浆法在提高地基剪切波速中的应用

——以台山核电站废液储存罐厂房地基为例

王谦, 姜宗斌, 吴铭

(台山核电合营有限公司, 台山 529228)

摘要:《核电厂抗震设计规范》要求核电厂核安全抗震物项宜坐落在基岩或剪切波速大于400 m/s的地基上,当地基剪切波速小于400 m/s时,需要对其进行换填素混凝土或者加固处理,以满足设计要求。文中通过对台山核电废液储存罐厂房地基处理方案的介绍,从经济和技术两个方面对比分析了开挖换填素混凝土和高压注浆法的优缺点。通过现场实践证明,对于深厚回填土,砂石含量较高时,采用高压注浆法可以将地基的剪切波速提高至400 m/s以上,避免了换填素混凝土时边坡的开挖和支护,施工安全风险小,造价相对较低。高压注浆法特别适用于以提高地基剪切波速为主要目的的深厚回填土的处理。

关键词: 注浆; 核电厂; 剪切波速; 地基处理

中图分类号: TU472.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0108-04

Application of High-pressure Grouting Foundation Treatment Based on Increasing Shear Velocity in Taishan Nuclear Power Plant

WANG Qian, LOU Zongbin, WU Ming

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

Abstract: To meet nuclear safety criteria and have an anti-seismic function, buildings in a nuclear power plant should locate on bed rocks or rocks with a shear wave velocity greater than 400m/s. Foundation treatment is needed if the rock does not meet the above condition. Through an introduction on the foundation treatment of the liquid waste hold up tanks building in Taishan Nuclear Power Plant, comparison and analysis on the advantages and disadvantages of two methods are made in this article, namely excavation and backfill by plain concrete method and jet-grouting method. Practice has proven that under certain condition, jet-grouting method could efficiently increase the shear wave velocity. By adopting this method, slope excavation and retaining can be avoided, thus with a smaller constructive safety risk and a relatively lower cost. This method is fully fit for foundation with thick backfilled soil layer.

Key words: grouting, nuclear station, shear velo, foundation treatment.

根据《核电厂抗震设计规范》,核电厂抗震Ⅱ类物项宜坐落在基岩或剪切波速大于400 m/s^[1]的岩土上,目前对于不满足此要求的地基,往往采用开挖后换填素混凝土的方式进行处理,此方法存在诸多缺点,比如造价高、施工占用场地大,大体积混凝土浇筑对质量控制和施工组织要求高,开挖土方的弃置需考虑对环境的保护问题,另外对于深基坑

开挖还往往涉及边坡支护,带来施工安全风险。

针对换填素混凝土方式存在的上述诸多缺点,在一些核电子项中采用换填方式进行地基处理代价较大,为此,需要寻求一种新的替代处理方法。高压注浆法^[2]是将水泥浆用压浆泵、注浆管均匀地注入土体中,以填充、渗透、挤密等方式赶走土颗粒间或岩石裂隙间的水分和空气后占据其位置,浆液硬化后将松散的土粒或裂隙胶结为一个整体,形成一个强度大、压缩性低、抗渗性高和稳定性良好的新的岩土体。本文通过对台山核电一期工程常规岛废液储存罐厂房地基处理的工程实例,介绍了高压

收稿日期: 2016-07-18

作者简介: 王谦(1966),男,河北保定人,高级工程师,学士,主要从事核电工程设计管理工作(e-mail) wangq@cgnpc.com.cn。

注浆法对提高核电厂地基剪切波速的实际效果。

1 台山核电站废液储存罐厂房地基条件

台山核电站常规岛废液储存罐 HQL 厂房位于核电厂东平台, 平面尺寸 36.2 m × 26 m, 属于核电厂抗震 II 类物项, 根据岩土工程勘测报告, 该建筑范围内有 8 ~ 10 m 厚度的回填土, 回填土材料为开山碎石, 夹有部分砂土, 回填土下为砂土层和强风化花岗岩, 该区域前期通过强夯处理。由于 HQL 属核电厂抗震 II 类物项, 设计要求剪切波速不小于 400 m/s, 根据强夯检测报告, 现有强夯地基剪切波速不能满足设计要求, 需对该区域地基进行处理。

2 地基处理方案分析与选择

根据类似工程经验, 对于核安全相关的抗震物项, 常规地基处理方式换填素混凝土, 以便满足地基剪切波速不小于 400 m/s 的要求。

对于台山核电站废液储存罐厂房地基, 根据勘察报告和现场实际查看, 回填土层多为开山碎石和砂土, 可考虑采用高压注浆法将水泥浆注入土体, 并均匀填充土体空隙, 从而形成碎石、砂和水泥浆三者组成的结石体^[3], 提高土体的强度, 并减小孔隙比, 从而达到提高土体的剪切波速的目的。下面从技术可行性和经济性对地基处理方案进行分析, 见表 1 和表 2。

分析可知: 采用水泥高压注浆方案和换填素混凝土方案在技术上皆可可行。换填素混凝土方案由于需要进行深基坑开挖和支护, 对周边施工条件影响大, 有一定安全风险, 且费用较高。采用水泥高压注浆施工工艺成熟, 对周边环境的影响小, 造价低, 虽然存在上部局部土层仍不满足剪切波速要求的风险, 但可能性较小, 通过重复灌浆或局部换填方式处理的代价小。采用水泥高压注浆费用约 438.93 万元, 采用换填素混凝土约 606.79 万元。因此, 采用水泥高压注浆方案。

3 注浆方案

3.1 试注浆方案

在全面施工之前, 选取 HQL 基础范围内的二块 8 m × 8 m 的区域(A 区、B 区, 见图 2 阴影区域), 进行试注浆。

3.1.1 施工参数^[4-5]

1) 钻孔布置: 本次试灌浆区域分为 A、B 区, 其中 A 区域孔距 1.5 m, B 区域孔距 2.5 m, 呈正方形布置, 其他参数相同。

表 1 地基处理方案对比表
Tab. 1 Comparison of foundation treatment

方案	技术可靠性	施工工艺	施工条件	工期要求
换填素混凝土	常规方法, 能够满足承载力特征值、剪切波速、压缩模量等岩土力学参数要求, 可靠性强。	施工工艺成熟, 涉及大体积混凝土浇筑。	需放坡开挖, 占用西侧通往核岛的主要施工通道, 对周边厂房施工影响大。	需试灌浆并检测, 周期长, 可能出现上部不满足要求而重新注浆或换填的风险, 工期存在不确定性。
高压注浆法	通过注浆能提高地基承载力特征值、减小孔隙比等岩土力学参数, 有效提高剪切波速, 对于局部不能满足要求的地方, 可采用重复注浆或局部换填的方式处理, 技术可靠。	施工工艺成熟。	无需占用周边场地, 施工条件满足要求。	

表 2 经济性分析对比表

Tab. 2 Price comparison table

地基形式	项目名称	工程数量 (元 · m ⁻¹)	单价/万元	合价/万元	方案总费用/万元	综合单价 (元 · m ⁻³)
水泥高压注浆	水泥高压注浆/m	11 018	353	388.94	438.94	362.79
	检验费用	2	250 000	50		
素混凝土换填	基坑土方开挖/m ³	21 666	30	65.00	606.79	513.21
	边坡支护/m ²	2 023.42	170	34.40		
	素混凝土浇筑/m ³	16 913	300	507.39		



图 1 试灌浆区域平面布置图
Fig. 1 Plan of test-grouting area

2) 孔径: $\Phi 110$ mm。

3) 孔深: 根据地质勘察报告和强夯检测报告, 强风化岩层的剪切波速大于 400 m/s, 所以孔深为基底至强风化岩的顶面范围内, 约 $11 \sim 13$ m。

4) 水泥浆配合比: 水泥: 水 = $1:1$ 。

3.1.2 施工技术要求

1) 材料要求: 采用 PO 42.5 普通硅酸盐水泥。

2) 钻孔允许偏差: 水平偏差为钻孔深度的 3% 。

3) 水泥用量: $330 \sim 380$ kg/m, 特殊情况除外。

4) 注浆方法: 采用分段, 多次重复注浆的方式, 每一注浆段长度 50 cm。

5) 注浆压力: $5 \sim 10$ MPa。

6) 注浆速度: 50 L/min。

7) 严格、详细进行施工记录。

3.2 试注浆检测^[6-7]

按照设计要求, 分别对两个试验区域做了跨孔剪切波速检测、钻芯法检测和平板载荷试验检测。

3.2.1 跨孔剪切波检测结果

跨孔剪切波检测波速平均值见图 2, 对于孔距 1.5 m 的试验区域, 地面至地下 7.0 m 范围内剪切波速小于 400 m/s, 7.0 m 以下深度大于 400 m/s, 孔距 2.5 m 的试验区域, 地面至地下 9.0 m 范围内剪切波速小于 400 m/s。

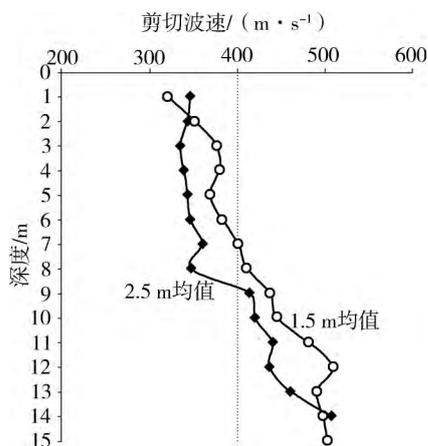


图 2 剪切波检测波速平均值

Fig. 2 Average value of shear velocity

3.2.2 钻芯法检测结果

芯样完整性一般, 芯样侧面表面粗糙, 肉眼能看到泥沙, 胶结效果不好。建议后续注浆处理时, 优化施工工艺和参数, 增大水泥浆扩散的范围, 提

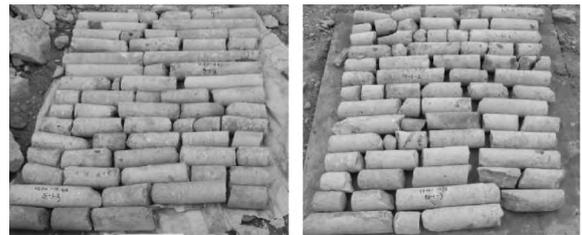
高胶结效果。

3.2.3 平板载荷试验检测结果

各测点承载力特征值均大于 200 kPa, 满足设计要求。

3.3 正式注浆方案的确定

根据试注浆检测结果, 跨孔剪切波速和钻芯检测结果均没有达到预期要求, 但从检测结果可知, 剪切波速随注浆孔间距、注浆压力和土层深度变化而变化, 注浆孔间距越小、注浆压力越大、土层越深, 则剪切波速越大, 因此, 在制定正式注浆方案时对注浆孔布置和注浆压力进行了合理调整:



(a) 5#桩 (注浆孔间距1.5 m) (b) 10#桩 (注浆孔间距2.5 m)

图 3 5#和 10#桩钻芯试样

Fig. 3 Core Sample of 5# and 10# Plies

1) 注浆孔的布置采用正三角布置, 间距 1.50 m, 以保证处理后地基连成一体。考虑浆液的均匀渗透, 按梅花型布孔。

2) 注浆压力调整为 $10 \sim 15$ MPa。

3) 注浆施工的施工顺序为, 先外圈施工, 逐步向内圈过渡, 外圈的两排注浆加水玻璃以加速水泥浆的凝结。

4) 浆液配置: 外圈采用混合浆液, 即水泥—水玻璃双液快凝浆液, 水泥采用 PO42.5R 普通硅酸盐水泥, 水灰比为 $1:1$, 水玻璃用量为 2.0% ; 其他区域采用水泥浆, 水泥采用 PO42.5R 普通硅酸盐水泥, 水泥用量为 $270 \sim 300$ kg/m; 水灰比为 $1:1$ 。

5) 根据本工程基础标高, 将注浆区域分为 A、B、C 三个区, 其中 A 区注浆顶标高为 $\nabla -1.40$ m, B 区注浆顶标高为 $\nabla -1.60$ m, C 区注浆顶标高为 $\nabla -5.60$ m (标高为相对标高, $\nabla 0.00$ m 相当于 $\nabla 8.80$ m), 注浆底标高为强风化岩顶面, 注浆深度约为 $11 \sim 13$ m。

3.4 注浆检测结果

跨孔剪切波速检测、钻芯法检测、平板载荷试验检测三项检测结果均满足设计要求。

跨孔剪切波速检测结果见表3,跨孔剪切波速平均值均高于400 m/s。

表3 注浆后剪切波检测波速平均值

Tab. 3 Average value of shear velocity after grouting m/s

深度/m	测点1	测点2	测点3	平均值
1	403.6	397.5	405.4	402.2
2	402.8	407.4	396.5	402.2
3	413.6	402.9	413.6	410
4	420.9	413.8	449.5	428.1
5	416.5	437.9	426.1	426.8
6	434.3	426.1	435.6	432
7	472.2	452.4	463.8	462.8
8	482.9	490.7	482.9	485.5
9	476.2	506.9	511.6	498.2
10	459.6	531.4	528.2	506.4
11	490.8	520.3	548.6	519.9
12	517.6	549.8	536.7	534.7
13	538.9	542.1	552.6	544.5
14	529.7	569.2	576.4	558.4
15	579.6	587.2	594.3	587

钻芯法检测结果见图4,芯样胶结效果较好,芯样较完整。

平板载荷试验检测结果表明,各测点地基极限承载力大于400 kPa,承载力特征值均大于200 kPa,满足设计要求。



图4 注浆后钻芯试样

Fig. 4 Core sample after grouting

4 结论

用高压注浆法提高核安全物项地基的剪切波速,属首次应用,相对于传统的开挖换填方式,该方法充分利用了原有土层,不需要进行大面积开挖和边坡支护,特别对于回填土层较厚的砂类土层地基,具有较大优势。通过本工程的实践,可得出以下结论,供后续类似工程参考:

1) 高压注浆法可以有效地提高地基剪切波速,同时通过调整注浆压力、注浆孔间距等注浆参数,可得到不同的剪切波速值,从而满足不同的设计要求。

2) 对于回填土层较深的地基,高压注浆法相对于常用的开挖换填方法,占用的施工场地小,对周边环境的影响小,施工安全风险小。

3) 高压注浆法造价相对较低。

4) 提高地基剪切波速为目的高压注浆法处理地基,被处理的土中砂、石含量要高;如果砂、石含量低,应予以特别的重视,必要时,应在施工之前多做几组试验,以确定其适应性及合适的施工参数。

参考文献:

[1] GB 50267—97, 核电厂抗震设计规范 [S].
 [2] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范 [S].
 [3] 杜嘉鸿, 谢量流. 注浆技术在城镇建设和整治中的应用 [J]. 探矿工程, 1996(2): 8-12.
 [4] 殷跃平, 于文贞, 陈宝荪, 等. 三峡移民安置区松散堆积体灌浆加固试验研究 [J]. 土木工程学报, 2000(8): 101-104.
 [5] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 365-409.
 [6] GB 50021—2001, 岩土工程勘察规范(2009年版) [S].
 徐华, 李天斌. 岩土体注浆技术初探及展望 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009(1): 38-42.

(责任编辑 林希平)

(上接第103页 Continued from Page 103)

参考文献:

[1] 天津市海岸带工程有限公司. 台山核电厂取水工程明渠、防波堤工程地质勘察报告 [R]. 天津: 天津市海岸带工程有限公司, 2008.
 [2] NB/T 25002—2011, 核电厂海工构筑物设计规范 [S].
 [3] GB/T 51015—2014, 海堤工程设计规范 [S].
 [4] 赵简英, 王建, 吴京平. 控制加载爆炸挤淤置换法在工程中的应用 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 332-335.

[5] 李秀英, 王培楠, 吴京平. 控制加载爆炸挤淤置换法在宁德核电厂一期工程厂区分护岸中的应用 [J]. 中国港湾建设, 2008(6): 24-28.
 [6] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范 [S].
 [7] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
 [8] 汤旭明. 某变电所堆载预压监测及分析 [J]. 工程质量, 2001(11): 16-19.
 [9] JTS 147-1—2010, 港口工程地基规范 [S].

(责任编辑 林希平)