

文章编号: 1000-7598 (2012) 10-3073-08

# 强夯施工振动对海工防渗墙影响试验及安全监控

刘博<sup>1</sup>, 李海波<sup>1</sup>, 冯海鹏<sup>2</sup>, 周青春<sup>1</sup>, 王秒<sup>1</sup>, 宋全杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 中广核工程有限公司, 广东 深圳, 518124)

**摘要:** 结合某核电站地基加固工程, 在强夯试验期间运用多种原位测试方法, 对不同能级强夯下防渗墙的振动强度以及防渗墙的安全状态进行了实时监控。基于试验结果, 分析了各能级强夯振动对邻近的海工防渗墙抗渗性能和各段间搭接面完整性的影响; 结合现场条件, 提出了防渗墙的振动速度控制标准, 并用于指导正式强夯期间的施工。长期监测结果表明, 采用的监控方案合理可行、原位测试方法准确可靠, 为类似工程的强夯振动安全性评价提供了重要参考。

**关键词:** 强夯; 振动; 防渗墙; 环境影响; 安全评价

**中图分类号:** TV 223.4+2

**文献标识码:** A

## Effect of dynamic compaction vibration on cutoff wall and its safety monitoring

LIU Bo<sup>1</sup>, LI Hai-bo<sup>1</sup>, FENG Hai-peng<sup>2</sup>, ZHOU Qing-chun<sup>1</sup>, WANG Miao<sup>1</sup>, SONG Quan-jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China)

**Abstract:** Combining the dynamic consolidation of a nuclear power plant foundation, varieties of in-situ tests are used to monitor the vibration intensity and safety of cutoff wall under dynamic compaction. Through experimental research, dynamic compaction parameters which ensure the cutoff wall safety and the dynamic compaction effect are analyzed; the controlling standard for long-term dynamic compaction is given. The long-term monitoring results show that the adopted monitoring scheme is reliable and efficient so as to provide a very important reference for the similar projects' safety assessment.

**Key words:** dynamic compaction; vibration; cutoff wall; environmental impact; safety assessment

## 1 引言

强夯法亦称动力固结法, 是法国梅那德技术公司提出的一种地基加固方法, 具有设备简单、施工方便、适用范围广、效果显著、经济高效等优点, 已在国内外得到了广泛的应用。在强夯法的应用及发展过程中, 学者针对其加固机制和效应<sup>[1-5]</sup>、设计、施工参数对地基加固效果的影响<sup>[6-10]</sup>等方面进行了深入研究; 同时, 也指出了强夯法施工的重要缺点: 强烈的施工振动会对周边的生活、生产环境及临近构筑物带来许多不利影响<sup>[11]</sup>。

为此一些学者对强夯振动的传播机制和衰减规律以及设计参数、施工过程、地基条件对强夯振动的影响规律进行了研究。例如, 李福民等<sup>[12]</sup>基于强夯振动加速度实测结果, 采用量纲分析方法研究了

振动加速度与夯击能量、地基土特性及传播距离之间的关系; 并指出一定规模的隔振沟具有良好的隔振效果。程祖锋等<sup>[13]</sup>通过对某强夯处理工程振动监测结果的分析, 指出强夯振动速度、加速度随着夯击次数的增大而增大, 而振动位移却相反; 并且, 强夯振动速度、加速度、位移随着深度的增大基本呈反“S”型衰减。邵慧等<sup>[14]</sup>对不同能级强夯的施工进行了数值模拟, 指出在相同场地条件下, 峰值径向加速度约是峰值竖向加速度的2倍, 但径向加速度比竖向加速度衰减更快, 且竖向振动的持续时间大于径向振动持续时间; 竖向、径向加速度衰减几乎不受强夯能级和土层厚度的影响。安惠泽等<sup>[15]</sup>基于某站场地强夯处理工程振动速度的测试结果, 研究了强夯振动在水平方向的衰减规律和主振频率的变化情况; 并以地表振动速度为判别标准, 利用振

收稿日期: 2012-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51174190); 国家杰出青年基金(No. 51025935)。

第一作者简介: 刘博, 男, 1980年生, 博士, 主要从事岩体的动态力学响应方面的研究工作。E-mail: bliu@whrsm.ac.cn

动速度衰减规律拟合公式计算了不同夯能下临近构筑物的安全距离。陆伟东等<sup>[16]</sup>对强夯振动机制及振动特征进行了分析,并对建筑物受振动影响和人体受振动影响的评价标准区分进行了探讨;建议采用天然地震烈度和爆破安全振动速度综合判别强夯振动效应对建筑物影响,以及采用相关城市区域环境振动控制标准来评价强夯振动对人体的影响。褚宏宪等<sup>[17]</sup>根据某强夯处理地基工程的振动监测结果,分析了强夯击数与振动速度之间的关系,并提出了采用振动速度变化来确定有效击数和强夯参数的观点;另外还指出,强夯振动的地震效应以水平径向振动分量为最大。方磊等<sup>[18]</sup>对某强夯处理地基工程的振动加速度进行了监测,基于实测结果回归出了振动加速度衰减公式,依据抗震设计规范确定了临近构筑物的安全距离。与文献[18]类似,倪永军等<sup>[19]</sup>对某强夯工程的振动速度实测结果进行了统计分析,参照烈度分级和爆破安全规程评价了强夯的地震动效应,并给出了不同类型结构的允许安全距离。杨龙才等<sup>[20]</sup>以弹性体理论为基础,研究了强夯的径向和竖向振动量沿地基深度的衰减特性,认为竖向振动量是引发环境安全的主要因素;并基于实测数据,分析了振动加速度及振动速度随距离的衰减规律,以及隔振沟的隔振效果。

本文结合某核电厂强夯加固工程案例,在强夯试验期间运用多种原位测试方法,对不同能级强夯引起防渗墙的振动速度值以及对防渗墙抗渗性能和完整性的影响进行了动态测试;基于试验结果,确定了满足防渗墙安全要求的强夯能级;并结合现场条件,提出了正式强夯期间防渗墙的振动速度控制标准。本案例采用的监控方案和测试方法可为类似工程的强夯振动评价提供重要参考。

## 2 工程概况

某核电厂拟建循环水排水管 GD 的部分段、CC 虹吸井及排水暗涵 CD 区域为碎石回填区,填石主要由微风化花岗岩、微风化流纹岩及微风化熔结凝灰岩等开山碎石组成,块径 2~30 cm 不等,局部含大块填石;填石层颗粒级配极不均匀,密实度差异较大,局部含黏性土较多。由于拟建区域均为松散回填区,回填时间较短且未经分层压实,土含量较少或填石较大,在使用荷载作用下将产生一定变形,对拟建构筑物产生不利影响。根据设计要求,需对该区域进行强夯加固处理,以提高密实度和承载力,保证构筑物的安全使用。

将拟建区域的上部回填层开挖至设计标高后形

成 A、B、C 3 个强夯基坑区,如图 1(a)所示。根据设计要求,B 区拟采用 7 000 kN·m 能级强夯加固,A、C 区拟采用 5 000 kN·m 能级强夯加固。

根据《建筑地基处理技术规范》<sup>[21]</sup>规定,应在待处理地基场地选取试验区域进行强夯试验,并进行必要的测试,以检验设计参数和强夯的实际加固效果。

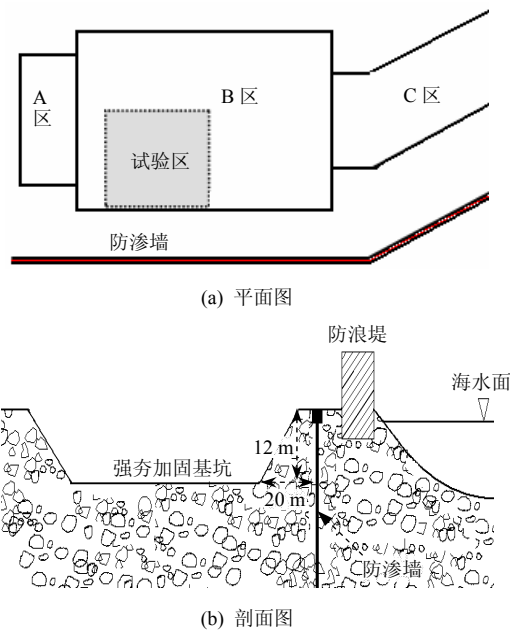


图 1 强夯加固区示意图

Fig.1 Sketch of dynamic consolidation area

在基坑边坡靠海侧 20 m 处的回填区内布置有海工防渗墙,如图 1(b)所示。该防渗墙为掏槽法施工的塑性混凝土防渗墙,设计深入黏土层不小于 4 m 或进入微风化岩层不小于 1 m,墙体深度为 30~40 m,厚度为 0.8 m。防渗墙墙体由水泥、钠基膨润土、黏土、砂石、外加剂、水等材料配比而成,通过试验确定的配合比见下表 1,其 28 d 的物理力学性质指标见表 2。

表 1 塑性混凝土配比 (单位: kg)

Table 1 The mixing proportion of plastic concrete (unit: kg)

水	水泥	膨润土	石屑	外加剂	引气剂
400	140	210	1 250	1.05	0.070

表 2 塑性混凝土 28 d 物理力学性质指标

Table 2 Physico-mechanical properties of plastic concrete with age of 28 days

密度	剪切强度	单轴抗压强度	弹性模量	泊松比	渗透系数	内摩擦角	粘聚力	极限应变
/(g/cm <sup>3</sup> )	/MPa	/MPa	/MPa		/(10 <sup>-7</sup> cm/s)	/(°)	/MPa	%
2.0	0.31	1.8	580	0.32	<7.32	35	0.32	2.2

由于海工防渗墙位于松散回填地层中,埋深较

大且上部位于基坑边坡附近，墙体材料力学参数不高；强夯施工振动可能会导致墙体开裂或墙体段间搭接面处开裂；同时，松散边坡在强夯振动下有可能产生不均匀沉降，间接对防渗墙造成破坏，使渗水量增加和基坑水位上升，严重影响整个核电厂的施工进度。因此，合理、准确地评价强夯振动对防渗墙安全的影响是进行强夯施工的前提。

### 3 监控方案及原位测试方法

#### 3.1 防渗墙安全监控方案

由于目前尚未有国家规范明确规定防渗墙的安全允许振动速度值。因此，无法采用控制振动速度值的方法对其进行安全监控。必须结合强夯试验，同步对防渗墙进行抗渗性能、完整性的动态检测，及时掌握施工振动对防渗墙的影响；并基于测试结果，确定强夯能级、振动速度、防渗墙安全状态之间的相互关系；给出保证防渗墙安全的最大允许强夯能级；并进一步提出适合现场条件的防渗墙振动速度控制标准，指导正式的强夯施工。

因此，强夯施工振动对海工防渗墙安全的影响监控工作应包括强夯试验、正式施工两个阶段，其中强夯试验阶段要进行多种原位测试工作，并提出防渗墙的振动速度控制标准，是监控工作的关键。

根据试验目的，在设计强夯能级最高的 B 区选取距防渗墙最近的区域作为试验区（见图 1(a)）。试验区尺寸为 24 m×24 m；设计拟进行 2 遍点夯、1 遍满夯，夯点布置和施工顺序如图 2 所示。强夯试验时，夯点布置参数不变，通过调节落锤（直径 2 m、重 25 t）的高度来改变强夯的能级。

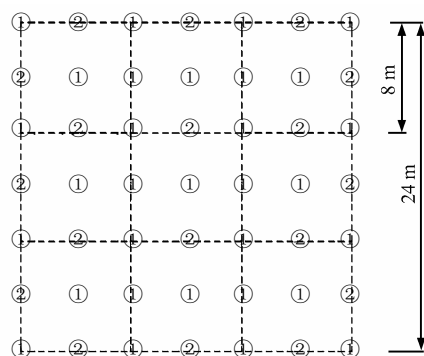


图 2 点夯的夯点布置图

Fig.2 Layout of points of dynamic compaction

通过分析认为，强夯振动可能对防渗墙造成的破坏分为两种情况：①墙体微裂缝扩展或开裂造成的渗透性增大；②墙体段间搭接面开裂造成的渗透

性增大。对于前者，本文采用现场压水试验来测试其渗透系数；对于后者，则采用超声检测的方法来测试。防渗墙安全监控的内容和流程如图 3 所示。

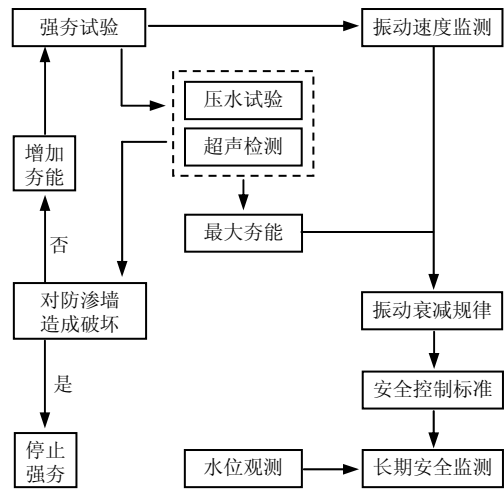


图 3 防渗墙安全监控流程图

Fig.3 Flow chart of security monitoring of cutoff wall

强夯试验前，先通过原位测试获取防渗墙的有关参数值；强夯试验时，从最小能级（3 000 kN·m）开始强夯，每能级按点夯顺序由远及近完成 1 列夯点（见图 2），并同步进行原位测试，记录该能级引起防渗墙的振动速度值，以及该（能级）振动速度强度下防渗墙有关参数的变化情况。通过对比防渗墙夯前、夯后相关参数值的变化情况，确定振动对防渗墙的影响；若没有造成不利影响，则进行下一能级强夯；否则暂停强夯，并持续进行测试，观察后续变化情况。重复上述强夯试验和原位测试工作，直至确定出强夯的最大允许夯能。最后，基于原位测试结果，依据振动速度衰减规律和现场条件，提出防渗墙振动速度控制标准，指导正式强夯期的强夯施工。在正式强夯期间，除进行振动速度值监测外，还利用水位孔观测水位的变化情况，进一步验证以振动速度值为控制特征的监控工作。

#### 3.2 防渗墙墙体原位测试方法

在强夯试验期间，对于防渗墙有可能发生的不同破坏类型，采用不同的原位测试手段进行测试。

##### 3.2.1 防渗墙墙体完整性测试

防渗墙墙体质量一般根据钻孔取芯芯样的外观检验、无侧限抗压强度试验及现场渗透系数试验三方面的结果来进行评价。前两种方法费时、费力，不便于测定大规模墙体的局部性损伤，同时对防渗墙的破坏性也较大；因此，宜采用现场渗透系数试验的方法。

在距试验区最近的防渗墙墙体中布设测试孔，强夯试验开始前及每一能级强夯后均进行压水试验，通过对比夯前、夯后渗透系数的变化情况来确定强夯振动对防渗墙的影响。若渗透系数不变，表明施工振动没有对防渗墙造成影响；若渗透系数增加，表明强夯振动对防渗墙造成了影响，从而能够及时地掌控防渗墙的安全状态。

试验共布设了 A、B 两个测试孔，考虑到基坑深度、加固影响深度、夯区与防渗墙间的距离，测试孔深度均为 21 m。由于墙体材料的强度较低且含有人工碎石，测试钻孔孔壁粗糙。直接采用封隔器注浆，效果肯定不理想，需对孔口段进行特殊处理。

如图 4 所示，首先用  $\phi 110$  mm 钻头开孔至 2 m，将钻孔冲洗干净，注入浓水泥浆封死；待水泥浆凝固后，采用  $\phi 76$  mm 钻头在原孔位开孔，并钻孔至预定深度，再将钻孔冲洗干净； $\phi 76$  mm 钻孔水泥浆段的孔壁光滑且具有较高的强度，利用该段作为注浆段，可以达到理想的封隔效果，顺利进行全段压水试验。考虑到测试要求和目的，全段压水试验更能反应大面积墙体渗透系数的变化。

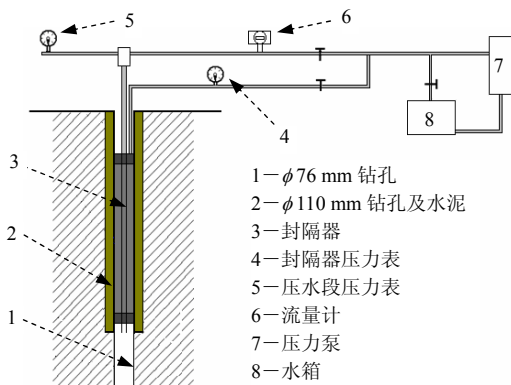


图 4 全孔压水试验示意图  
Fig.4 Water-pressure test of full hole

试验采用的最大水压力为 0.35 MPa。渗透系数按《水利水电工程钻孔压水试验规程》<sup>[22]</sup>推荐公式计算：

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r} \quad (1)$$

式中： $K$  为岩体的渗透系数； $Q$  为压入流量； $H$  为试验水头； $L$  为试验段长度； $r$  为钻孔半径。

### 3.2.2 防渗墙搭接面的完整性测试

海工防渗墙采用分段施工，相邻两段搭接处相对较薄弱，强夯振动可能会导致墙体沿搭接面开裂。若采用压水试验测定其渗透系数变化的方法来评价强夯振动对防渗墙搭接面的影响，费工、费时且获

取结果较慢。根据墙体搭接面的几何分布特点，采用超声跨断面对测法来测定搭接面处纵波波速值，通过纵波波速的变化来评价强夯振动的影响，是一种更为快捷、可靠的测试手段。

如图 5 所示，在  $a$ 、 $b$  段防渗墙的搭接面两侧分别布设 C、D 钻孔，两测试孔孔距为 1 m，深度均为 21 m。在强夯前，用交叉斜测法确定不同深度的跨面纵波波速，在每一能级强夯后进行复测；若强夯振动导致搭接面开裂，该位置对应的纵波波速必然会发生改变；即通过对比夯前、夯后波速值的变化情况，及时掌握强夯振动对防渗墙段间连接处的影响。

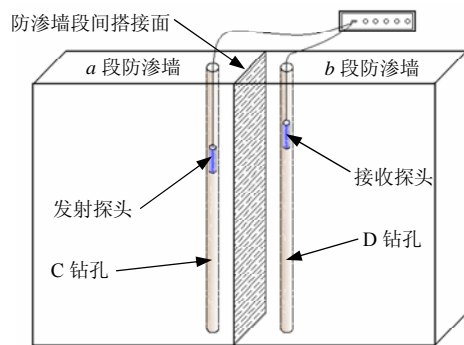


图 5 防渗墙搭接面超声检测示意图  
Fig.5 Ultrasonic testing of lap surface of cutoff

目前，强夯振动对塑性混凝土防渗墙的影响评价尚无规范可循。《水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范》<sup>[23]</sup>中采用岩体声波波速在爆破前、后的变化率来判定爆破荷载作用下岩体的破坏程度：

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $c_0$  为岩体爆前声波波速； $c$  为岩体爆后声波波速；当  $\eta > 10\%$  时，判定岩体质量受爆破影响大。考虑到防渗墙墙芯材料为塑性混凝土，参照上述规范规定，采用防渗墙搭接面处声波波速的变化率  $\eta$  来判定振动对防渗墙的影响程度；若  $\eta > 10\%$ ，判定强夯振动对墙体搭接面造成了破坏性影响，若  $\eta < 10\%$ ，说明强夯振动没有对墙体搭接面造成破坏性影响。

### 3.2.3 振动速度监测

强夯施工时，在防渗墙顶部、夯源与防渗墙之间布设振动速度监测点，监测强夯施工引起防渗墙处的振动速度值。每个监测点布设垂直向、水平径向和水平切向 3 个方向的振动速度传感器，实时监测强夯施工引起的振动速度；分析不同能级强夯施

工引起的振动速度大小及衰减特征，为强夯振动对防渗墙的影响评价提供基础数据。

### 4 测试结果分析及安全评价

#### 4.1 防渗墙墙体完整性测试结果及分析

每能级强夯施工完成后，及时利用压水试验孔测定防渗墙的渗透系数，每孔每阶段均进行 2~3 次测试，取均值作为该阶段的渗透系数值。图 6 为强夯试验期间防渗墙的渗透系数变化图。

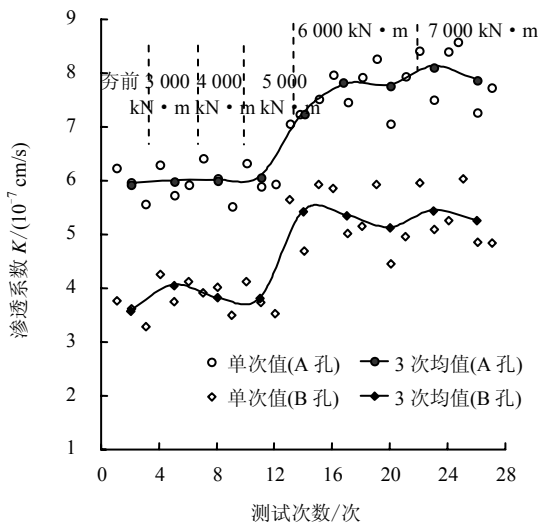


图 6 渗透系数随夯能变化关系图

Fig.6 Attenuation relationships of permeability coefficient with dynamic compaction energy

对于小能级强夯（3 000、4 000 kN·m），两段防渗墙的渗透系数基本不变；随着强夯能级增加，防渗墙的渗透系数有一定程度增加；在 6 000 kN·m 的强夯施工后，两段防渗墙的渗透系数均有明显增加：其中，a 段防渗墙的（A 孔）的  $K$  值从  $3.6 \times 10^{-7}$  cm/s 增加到  $5.4 \times 10^{-7}$  cm/s，增加幅度为 50%；b 段防渗墙的（B 孔）的  $K$  值从  $5.8 \times 10^{-7}$  cm/s 增加到  $7.2 \times 10^{-7}$  cm/s，增加幅度为 24%。因此，暂停强夯施工，并增加该能级强夯后的防渗墙渗透系数测试次数。后续测试结果表明，防渗墙的渗透系数逐渐趋于稳定，并无持续增加的趋势。7 000 kN·m 能级强夯后的测试结果表明，防渗墙的渗透系数与上一能级强夯相比较变化不大，没有呈现继续增加的趋势。

夯后 a 段防渗墙最大平均  $K$  值为  $5.4 \times 10^{-7}$  cm/s，b 段防渗墙的最大平均  $K$  值为  $8.1 \times 10^{-7}$  cm/s，均可以满足设计要求（ $10^{-6}$  cm/s），也表明强夯振动没有对其抗渗性能造成破坏性影响。试验过程中，随着强夯夯能的逐渐增加，防渗墙的  $K$  值呈现先增加

后逐步稳定的变化规律，对这种变化规律进行如下讨论：防渗墙处于松散回填层中，埋深较大且上部位于基坑边坡附近；在强夯（6 000 kN·m）振动下，松散的基坑边坡可能会产生一定程度的不均匀沉降，导致埋置其中的防渗墙产生变形，进而引起防渗墙渗透系数的变化；当边坡不均匀沉降趋于稳定后，防渗墙不再继续产生变形，渗透系数也趋于稳定。

#### 4.2 防渗墙搭接面完整性测试结果及分析

每能级强夯后，采用超声跨面交叉斜测法及时测试防渗墙搭接处的波速值。实际测试过程中发现，各测点单次波速变化率不大。因此，采用波速总变化率来表征强夯振动造成的累积影响；以  $S_{CD}$  表征 C→D 方向的波速总变化率、以  $S_{DC}$  表征 D→C 方向的波速总变化率。不同深度的波速总变化率见图 7。

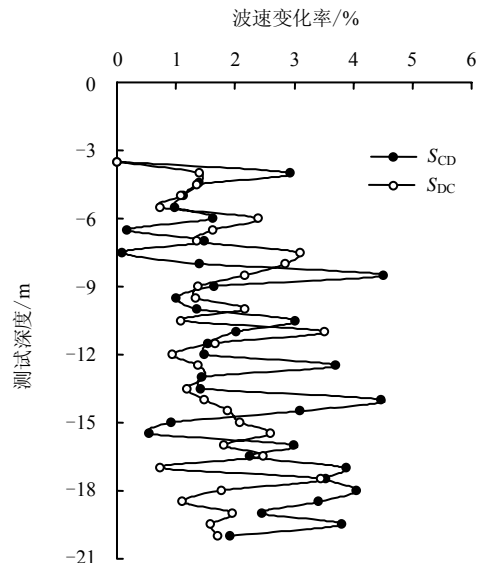


图 7 防渗墙不同深度的波速总变化率

Fig.7 Total change rates of shear wave velocity

试验结果表明， $S_{CD}$  最大值为 4.5%， $S_{DC}$  最大值为 3.4%，两个方向的声波波速总变化率均小于 10%；参考《水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范》<sup>[23]</sup>规定，认为强夯试验的振动没有对防渗墙段间搭接面的完整性造成破坏性影响。

#### 4.3 振动速度监测结果及分析

对某一能级的强夯，振动速度随着夯源距的衰减公式可以表示为

$$V = kD^{-\alpha} \tag{3}$$

式中： $V$  为振动速度； $D$  为夯源距； $k$ 、 $\alpha$  为相关参数。通过夯源与防渗墙之间以及防渗墙顶部测点的振动监测结果，回归出了强夯振动速度的衰减规律公式。表 3 为不同能级强夯振动衰减公式的  $k$ 、 $\alpha$  值。

表3 不同能级强夯的振动衰减公式参数  
Table 3 Parameters of vibration attenuation under different dynamic compaction energies

夯能 (kN·m)	测点方向								
	垂直向			水平径向			水平切向		
	$k$	$\alpha$	$R^2$	$k$	$\alpha$	$R^2$	$k$	$\alpha$	$R^2$
3000	106.37	1.595	0.949	97.79	1.617	0.930	95.68	1.655	0.941
4000	96.19	1.553	0.903	89.95	1.519	0.923	40.86	1.356	0.892
5000	90.50	1.525	0.924	81.76	1.507	0.890	51.19	1.506	0.905
6000	84.24	1.482	0.923	68.02	1.456	0.891	20.17	1.215	0.888
7000	55.43	1.318	0.918	28.05	1.203	0.865	22.64	1.228	0.886

防渗墙顶部振动速度监测点的监测结果表明,对于不同能级的强夯施工,防渗墙处3个方向的振动速度均是垂直向振动速度值最大。图8为防渗墙处垂直向振动速度最大值以及两段防渗墙的渗透系数均值随着夯能的变化图。

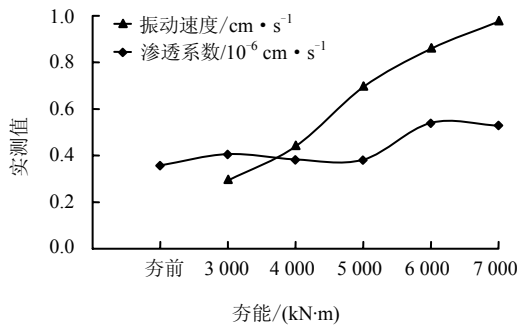


图8 不同能级强夯的振动速度值及渗透系数均值  
Fig.8 Vibration velocity and permeability coefficient under different dynamic compaction energies

图8表明:垂直向振动速度最大值随夯能的增加而增加,在测试范围内基本呈线性关系;而防渗墙的渗透系数呈现先稳定后增加又趋于稳定的变化规律,渗透系数并没有随着振动速度值增加而单调增加,说明防渗墙的渗透系数变化并不是强夯振动直接造成的,也验证了边坡变形导致防渗墙变形和渗透系数变化的讨论结果。

#### 4.4 正式强夯期间防渗墙的安全监控

依据强夯试验期间的原位测试结果,建立了防渗墙振动速度值和防渗墙安全状态之间的联系,可以通过防渗墙振动速度值来评价其所处的安全状态;因此,仅需对正式强夯期间防渗墙处的振动速度值进行监测,通过对比实测振动速度值与振动控制标准之间的关系来间接监控防渗墙的安全状况。

根据振动监测结果、式(3)及表3中的公式参数分析得出:7000 kN·m能级强夯施工引起防渗墙处的振动速度值最大,其振动速度衰减公式为

$$\left. \begin{aligned} \text{垂直向: } V_{\perp} &= 55.43D^{-1.318} \quad R^2 = 0.918 \\ \text{水平径向: } V_{\text{HR}} &= 28.05D^{-1.203} \quad R^2 = 0.865 \\ \text{水平切向: } V_{\text{HT}} &= 22.64D^{-1.228} \quad R^2 = 0.886 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据现场条件,防渗墙距夯区边界最小距离为20 m。根据式(4),计算得到垂直向、水平径向和水平切向的振动速度值分别为:1.069、0.764、0.573 cm/s。因此,将正式强夯期间防渗墙的控制标准取为3个方向振动速度最大值 $\leq 1.0$  cm/s,并取预警值为0.85 cm/s。当振动超过预警值时,及时分析振动速度较大的原因、排除不安全因素,确保施工过程中防渗墙的安全。同时还应该根据防渗墙的振动速度监测结果,在必要时合理调整强夯能级。

#### 4.5 正式强夯期及后续监测结果

在强夯施工过程中,除进行振动速度监测外,还利用水位孔观测水位变化情况,以验证以振动速度值为控制特征的监控工作。

正式施工期间的振动监测结果表明,实测振动速度值没有超过振动控制标准。同时,正式强夯期间及夯后15 d的水位变化情况与长期观测资料相比无明显变化,表明强夯振动没有对防渗墙完整性造成破坏性影响,也说明上述基于原位测试结果的振动速度值监控方法是准确和合理可行的。

## 5 结论

本文在某核电厂强夯加固处理工程中,针对强夯振动对邻近防渗墙影响评价无规范可循的情况:在强夯试验过程中,综合运用压水试验、声波试验等原位测试方法,对防渗墙墙体和段间搭接面的完整性进行了动态测试;结合原位测试结果和防渗墙的振动速度监测结果,提出了正式强夯期间防渗墙的安全控制标准。

(1) 根据压水试验结果:夯能由3000 kN·m增加到7000 kN·m时,防渗墙的渗透系数呈现先增加后保持稳定的变化趋势。表明强夯试验过程中的强夯振动对防渗墙墙体造成了一定程度的影响,但其

抗渗性能仍可以满足设计要求。

(2) 根据声波试验结果: 在强夯试验过程中, 防渗墙段间搭接面的声波波速总变化率均 $<10\%$ 。表明强夯试验过程中的强夯振动没有对防渗墙段间搭接面的完整性造成破坏性影响。

(3) 根据振动监测结果, 回归出了该场地条件下强夯振动速度的衰减规律公式。并结合原位测试结果和现场条件, 提出正式强夯期间防渗墙的安全控制标准为 3 个方向振动速度最大值 $\leq 1.0$  cm/s。

(4) 长期的振动监测结果表明: 正式强夯期间的强夯振动也没有对防渗墙的完整性造成影响; 同时水位观测结果表明, 施工基坑的地下水位无异常变化; 说明本文采用的防渗墙安全监控方案是合理可行的, 采用的原位测试方法是准确可靠, 能够有效地保证海工防渗墙的安全。

本文的监控方案和方法以原位测试试验为基础, 体现了防渗墙的实际受影响情况和安全状态, 更为合理和准确, 可以为类似工程的强夯振动安全性评价提供重要参考。

### 参 考 文 献

- [1] CHOW Y K, YONG D M, LEE S L. Dynamic compaction analysis[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1992, 118(8): 1141—1157.
- [2] 孔令伟. 强夯机制与加固效应研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1997.
- [3] 何长明, 邹金锋, 李亮杨. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 628—632.  
HE Chang-ming, ZOU Jin-feng, LI Liang-yang. Field tests on measurement of dynamic stress of dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(4): 628—632.
- [4] 孟庆山, 汪稔. 强夯法处理层状软基的动态响应分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 23—28.  
MENG Qing-shan, WANG Ren. Dynamic response analysis of stratified soft soil foundation treating with dynamic consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 23—28.
- [5] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 10 000 kN·m 高能级强夯时的地面变形与孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 759—762.  
WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling, et al. Experimental research on the ground deformation and pore water pressure during 10 000 kN·m high energy dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 759—762.
- [6] 李廷, 吴玉山, 程祖锋. 碎石土地基强夯试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 966—968.  
LI Ting, WU Yu-shan, CHEN Zu-feng. Experiment study on rock filling foundation by dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.1): 966—968.
- [7] 高广运, 水伟厚, 王亚凌. 高能级强夯在大型石化工程中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1275—1278.  
GAO Guang-yun, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling. Application of high energy level dynamic compaction to high-capacity oil tank foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1275—1278.
- [8] 杨建国, 彭文轩, 刘东燕. 强夯法加固的主要设计参数研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1335—1339.  
YANG Jian-guo, PENG Wen-xuan, LIU Dong-yan. Research of choosing tamping factors for dynamic consolidation method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1335—1339.
- [9] 吕秀杰, 龚晓南, 李建国. 强夯法施工参数的分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1628—1632.  
LÜ Xiu-jie, GONG Xiao-nan, LI Jian-guo. Research on parameters of construction with dynamic compaction method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1628—1632.
- [10] 田水, 王钊. 夯击方式对强夯加固效果的影响[J]. 岩土力学, 2006, 29(11): 3119—3123.  
TIAN Shui, WANG Zhao. Effect of impact mode on treatment effect of dynamic compaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 29(11): 3119—3123.
- [11] 李建华, 吕淑然. 重锤强夯施工产生的振动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 1): 2197—2200.  
LI Jian-hua, LÜ Shu-ran. Study on vibration resulting from heavy ramming in groundwork construction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.1): 2197—2200.
- [12] 李福民, 孙勇. 强夯加固地基振动影响的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 809—812.  
LI Fu-min SUN Yong. Experimental research on the influence of vibration during improvement of the ground with dynamic compaction[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2002, 32(5): 809—812.
- [13] 程祖锋, 李萍, 谌会芹, 等. 某港口工程地基处理中的强夯振动效应研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 740—744.

- CHENG Zu-feng, LI Ping, CHEN Hui-qin, et al. A study on vibration effect of dynamic compaction in groundwork treatment of a harbor engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 740—744.
- [14] 邵慧, 傅海舰, 康梅林. 不同能级强夯施工下地表振动衰减规律的探讨[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 598—604.
- SHAO Hui, FU Hai-jian, KANG Mei-lin. The research of vibration for dynamic compaction construction[J]. **Journal of Shandong Agricultural University**, 2009, 40(4): 598—604.
- [15] 安惠泽, 许兆义, 冯瑞玲. 某站场地基强夯振动影响范围研究[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 50—53.
- AN Hui-ze, XU Zhao-yi, FENG Rui-ling. Study on the ground vibration zone during dynamic compaction for site improvement of a railway station and yard ground[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2010, 34(1): 50—53.
- [16] 陆伟东, 韩晓健, 杨放. 强夯施工环境振动影响的评价方法[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(5): 65—68.
- LU Wei-dong, HAN Xiao-jian, YANG Fang. Evaluation method of the environmental vibration effects caused by dynamic compaction[J]. **Journal of Nanjing University of Technology**, 2002, 24(5): 65—68.
- [17] 褚宏宪, 史慧杰. 强夯施工振动影响评价[J]. 岩土工程界, 2004, 7(11): 78—80.
- [18] 方磊, 经纬, 刘松玉. 强夯振动影响与构筑物安全距离研究[J]. 东南大学学报, 2001, 31(3): 29—32.
- FANG Lei, JING Fei, LIU Song-yu. Influence of vibration caused by dynamic compaction and safe distances for buildings[J]. **Journal of Southeast University**, 2001, 31(3): 29—32.
- [19] 倪永军, 滕忻利, 张雪峰, 等. 强夯地振动统计分析与评价[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(4): 78—82.
- NI Yong-jun, TENG Xin-li, ZHANG Xue-feng, et al. Statistical analysis and assessment of ground vibration due to dynamic compaction[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2008, 32(4): 78—82.
- [20] 杨龙才, 王炳龙. 强夯施工对环境振动的影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(2): 16—20.
- YANG Long-cai, WANG Bing-long. Analysis for the environmental vibration effects caused by dynamic compaction[J]. **Journal of East China Jiaotong University**, 2007, 24(2): 16—20.
- [21] 中国建筑科学研究院. JGJ79—2002 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [22] 水利部东北勘测设计研究院. SL31—2003 水利水电工程钻孔压水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [23] 中国水利学会施工专业委员会爆破学组. SL47—94 水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

---

上接第 3012 页

- [13] 蒋明镜, 李秀梅, 孙渝刚, 等. 考虑颗粒抗转动的砂土双轴试验离散元模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30, (增刊 2): 514—517.
- JIANG Ming-jing, LI Xiu-mei, SUN Yu-gang, et al. Discrete element simulation of biaxial compression test considering rolling resistance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30, (Supp.2): 514—517.
- [14] 李伟. 不连续散粒体的离散单元法[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(1): 85—91.
- Li Wei. Discrete element method of discontinuous granular media[J]. **Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics**, 1999, 31(1): 85—91.
- [15] THORNTON C. Numerical simulations of deviatoric sheara deformation of granular medial[J]. **Geotechnique**, 2000, 50: 43—53.
- [16] BELHEINE N, PLASSIARD J P. Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36: 320—331.
- [17] 杨贵, 肖杨, 高德清. 粗粒料三维颗粒流数值模拟及其破坏准则研究[J]. 岩土力学, 2010, 31, (增刊 2): 402—405.
- YANG Gui, XIAO Yang, GAO De-qing. Study of three-dimensional particle flow numerical simulation and failure criterion for coarse-grained soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31, (Supp.2): 402—405.