

# 强夯施工对塑性混凝土防渗墙的振动测试分析

陆凡东, 方向, 董文, 丁凯, 李栋

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210095)

**摘要:** 提出强夯施工时塑性混凝土防渗墙的振动测试方案。试夯数据表明, 加速度控制指标 0.1 g 比速度控制指标 5 cm/s 更加严格; 给出 5 个不同能级对应第一、二遍点夯的安全保护范围。基于 Hilbert - Huang Transform 信号方法的时频分析可知, 不同夯击能级引起塑性混凝土防渗墙墙体测点的振动主频均小于 20 Hz; 强夯施工对埋深仅为 5 m 的塑性混凝土防渗墙的振动影响, 瑞利波占主导地位, 表现为墙体上端率先振动, 且振动强度最大; 塑性混凝土防渗墙沿墙高的垂向应力分布比较均匀; 瑞利波由于受地基分层的频散影响, 当主频降低时, 波速和波长增加, 最大瞬时能量和主频对应能量小幅增加。

**关键词:** 强夯; 塑性混凝土防渗墙; 振动测试; 时频分析

中图分类号: TV32

文献标识码: A

## Testing and analysis for vibration of a plastic concrete impermeable wall caused by dynamic compaction

LU Fan-dong, FANG Xiang, DONG Wen, DING Kai, LI Dong

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

**Abstract:** A proposal based on vibration test of a plastic concrete impermeable wall caused by dynamic compaction was presented. Test data showed that acceleration control index 0.1g is more stringent than speed control index 5cm/s; safety protection ranges of five different damping energy levels are given. Based on time-frequency analysis of HHT method, it was shown that the dominant frequencies of monitored points of the plastic concrete impermeable wall under different damping energy levels are lower than 20Hz; Rayleigh wave plays a dominant role in the vibration of the plastic concrete impermeable wall buried five meters deep from the land surface, the top of the wall vibrates firstly and has the largest intensity; stress distributes uniformly along the wall in the vertical direction; due to the influence of the layered foundation on Rayleigh wave, when the dominant frequency descends, wave velocity and wave length increase, so do the maximum instantaneous energy and the energy at the dominant frequency.

**Key words:** dynamic compaction; plastic concrete impermeable wall; vibration test; time-frequency analysis

强夯施工时, 夯锤从高处自由落下对地基形成冲击和振动, 除一部分转化为夯锤和土摩擦产生的热能外, 其余大部分动能以纵波、横波和瑞利波的形式向外传播, 其中瑞利波携带能量大、衰减慢, 是构成强夯振动波对周边环境影响的主要原因。文献[1-2]认为瑞利波的有效穿透深度约为一个波长。文献[3]认为强夯振动引起的瑞利波波长在 8 m ~ 12 m 之间, 随着传播深度的增加, 径向振动大幅衰减, 对地基构筑物影响最大的是竖向振动。目前强夯振动波测试与控制的保护对象主要为地表及地表以上的构筑物, 如民房、厂房、办公楼等<sup>[4-5]</sup>; 文献[6]对减振沟的强夯降振效果进行数值模拟, 并提出理论近似公式。

塑性混凝土防渗墙具有低强度、低弹性模量和大应变等特征, 应力应变关系和破坏模式与土料相似, 抗渗抗震效果良好<sup>[7]</sup>。目前, 关于强夯施工对塑性混凝土防渗墙的振动测试研究在国内尚未见到报道。本文提出塑性防渗墙的强夯振动测试方案, 并结合试验数据和希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform)方法给出振动测试结果。

## 1 工程概况

某核电站 1-2 号机组 BOP 区域分别由海域和海岸回填 10 m ~ 17 m 和 3 m ~ 10 m 而成, 地基参数如表 1 所示。机组基坑负挖到地面 10 m 以下, 为保持干施工的需要, 主厂区内设有防渗墙, 墙顶标高 + 3.5 mPRD, 场平标高 + 8.5 mPRD, 主墙体平均高度 21 m, 墙厚 0.8 m。在距防渗墙足够远的区域强夯能级初取

8 000 kN · m, 在保护范围内改用 1 000 kN · m 点夯, 600 kN · m 满夯, 其中点夯两遍, 满夯一遍, 夯点呈等边三角形布置, 夯点间距 5 m。

表 1 BOP 区域地基分层参数

Tab. 1 Layered parameters of foundation in BOP area

	第一层	第二层	第三层	第四层
岩性	填石; 微风化花岗岩碎石, 块石组成, 混多量砂质粘土。	细砂; 饱和; 稍密; 成分为石英, 含少量粘粒。	卵石; 松散; 饱和; 成分为花岗岩; 充填有粘性土, 细砂。	粉质粘土; 粘性好; 强度高; 韧性较好, 含少量石英砂。
厚度	9m	1m	1.2m	5.8m

在防渗墙附近进行试夯、正常强夯施工时, 对防渗墙进行振动监测。通过试夯监测数据确定可行保护距离, 确保防渗墙安全。

## 2 振动测试方案

### 2.1 监测仪器与控制标准

采用中国地震局工程力学研究所研制的 G01 通用数据采集仪和 JBT 型井下波速测试仪。防渗墙墙体各测点的质点振动(加)速度峰值不超过 5 cm/s 和 0.1 g。

### 2.2 试夯振动监测

#### 2.2.1 试验目的

- (1) 比较防渗墙不同深度的强夯振动数据, 确定有效控制位置。
- (2) 比较速度和加速度控制标准。
- (3) 根据不同夯击能级确定防渗墙的有效保护范围, 为正常强夯测振任务提供依据。

#### 2.2.2 试验方法

##### (1) 监测断面选择

在 95 m 长的防渗墙上选择墙体较深的两个监测断面: (a)  $A = 6\ 768.452, B = 3\ 171.848$ ; (b)  $A = 6\ 723.529, B = 3\ 174.482$ 。

##### (2) 测点布置

由于在内径 60 mm 的测斜管内同时设置多个拾振器测试难度大、测试效果不佳, 因此在第一个测斜孔两边 0.5 m 处各打一个铅直孔(孔径 110 mm, 孔深为 8 m 和 12 m)。孔间距比夯检距小 1~2 个数量级, 三孔可以近似为同一平面点坐标。获取振动规律后, 在另一测斜孔位置旁打一个铅直孔, 进行验证试验。

在第一个监测断面上选取某一标高同时测试速度和加速度, 其他标高设置速度测点。如图 1 所示: 以墙顶为  $\pm 0$  m 标高, 在 -1 m 标高设置 1# 加速度和 2# 速度测点, 在 -3 m、-5 m 和 -7 m 标高设置 3#、4# 和 5# 速度测点; 根据测试结果, 以 2 m 升降步长调整测点位置。

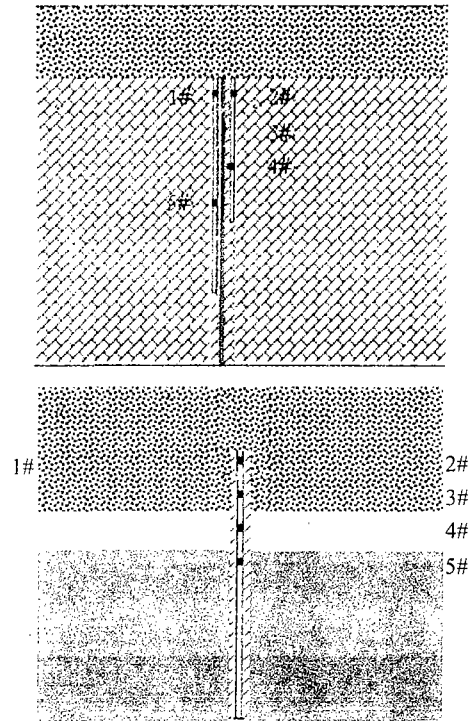


图 1 测点布置空间示意图

Fig. 1 Space distribution of monitor points

### (3) 夯点布置

初选夯击能级 8 000 kN · m, 夯检距 50 m。夯检距由远至近; 两遍点夯分别对待; 当防渗墙测点的振动数据接近严格指标时, 确定安全距离。图 2 为试验夯点布置图。

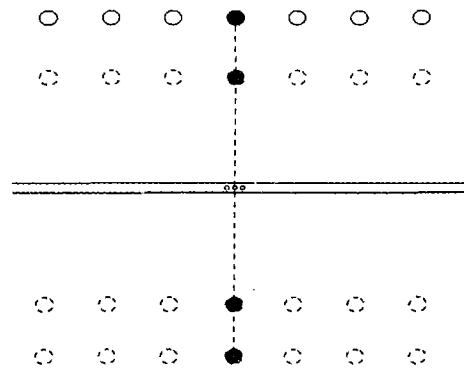


图 2 试验夯点布置图

Fig. 2 Layout of test tamping points

### (4) 拾振器固定

胶囊充气后使三向拾振器与孔壁或孔底紧密接触, 振动信号通过屏蔽电缆线接至地面信号采集分析仪, 如图 3 所示。

### 2.3 正常强夯振动监测

采用无人值守模式: 现场布置监测仪器和电脑主机, 通过开机自动运行软件启动监测仪器, 当监测数据超过预警值时, 由无线收发硬件 GPRS 和手机卡向用户端报警。用户端同时接收现场设备的状态报告。

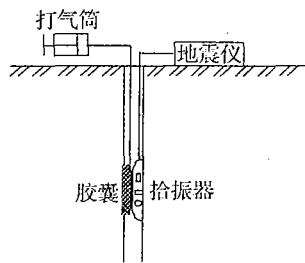


图3 拾振器固定示意图

Fig. 3 Fix of vibration pick-up

### 3 测试结果及分析

#### 3.1 试夯结论

由表2可知:

(1) 强夯施工引起塑性混凝土防渗墙的质点振动强度最大峰值集中在墙体上端,并随着测点标高的降低呈衰减趋势。

(2) 加速度指标 0.1 g 比速度指标 5 cm/s 更严格。

表2 1#监测断面不同能级对应最大振动监测结果

Tab. 2 Vibration monitor results of 1# profile at different energy levels of dynamic co MPaction

8 000kN · m 能级						
遍数	夯检距/m	-1m 标高	-1m 标高	-3m 标高	-5m 标高	-7m 标高
第一遍	45	0.092g	1.25cm/s	1.04cm/s	1.03cm/s	0.78cm/s
第二遍	50	0.084g	1.16cm/s	1.05cm/s	1.01cm/s	0.79cm/s
3 000kN · m 能级						
遍数	夯检距/m	-1m 标高	-3m 标高	-1m 标高	-3m 标高	-5m 标高
第一遍	30	0.093g	0.083g	1.02cm/s	0.89cm/s	0.81cm/s
第二遍	35	0.088g	0.077g	0.87cm/s	0.80cm/s	0.76cm/s
2 000kN · m 能级						
遍数	夯检距/m	-1m 标高	-3m 标高	-1m 标高	-3m 标高	-5m 标高
第一遍	25	0.095g	0.085g	1.07cm/s	0.86cm/s	0.69cm/s
第二遍	30	0.094g	0.087g	0.97cm/s	0.89cm/s	0.81cm/s
1 500kN · m 能级						
遍数	夯检距/m	-1m 标高	-1m 标高	-3m 标高	-5m 标高	-7m 标高
第一遍	20	0.091g	1.33cm/s	0.85cm/s	0.88cm/s	0.59cm/s
第二遍	25	0.089g	1.31cm/s	0.83cm/s	0.80cm/s	0.55cm/s
1 000kN · m 能级						
遍数	夯检距/m	-1m 标高	-3m 标高	-1m 标高	-3m 标高	-5m 标高
第一遍	15	0.094g	0.083g	1.57cm/s	1.15cm/s	0.91cm/s
第二遍	20	0.092g	0.081g	1.37cm/s	1.07cm/s	0.93cm/s

(3) 8 000 kN · m、3 000 kN · m、2 000 kN · m、1 500 kN · m、1 000 kN · m 对应第一、二遍夯击的安全距离分别为 45 m、30 m、25 m、20 m、15 m 和 50 m、35 m、30 m、25 m、20 m。

#### 3.2 不同夯击次数引起的振幅变化规律

图4(a)、图4(b)分别表示 8 000 kN · m 能级对应夯检距 50 m 以及 1 000 kN · m 能级对应夯检距 20 m 时,不同标高测点对应同一夯点不同夯击次数的振动强度峰值变化规律,前 8 次夯击属于第一遍点夯,后 8 次夯击属于第二遍点夯。随着夯击次数的增加,振动强度不断提高,回填土后,在第 9 次夯击时有所回落,继续夯击时振动强度逐渐增加,曲线趋于水平。

#### 3.3 不同夯击能级的主频统计

强夯振动波由多种不同频率、相位和振幅的简谐振动叠加而成。主频指振幅最大的谐波分量对应的频率。表3列出不同夯击能级引起塑性混凝土防渗墙墙体振动的主频范围。

表3 不同夯击能级的主频统计

Tab. 3 Dominant frequency statistics under different damping energy

8 000kN · m	3 000kN · m	2 000kN · m	1 500kN · m	1 000kN · m
加速度信号 5.7 ~ 16.3Hz	6.3 ~ 1.5Hz	6.8 ~ 15.3Hz	6.6 ~ 14.8Hz	6.0 ~ 13.9Hz
速度信号 5.0 ~ 18.2Hz	5.7 ~ 18.0Hz	6.1 ~ 17.6Hz	5.3 ~ 16.2Hz	7.1 ~ 14.9Hz

由表3可知:强夯施工不同能级引起塑性混凝土

防渗墙的振动主频较低,均小于 20 Hz;5 个夯击能级的主频分布有差异,表现为小能级集中、大能级分散;加速度信号的主频分布比速度相对集中。

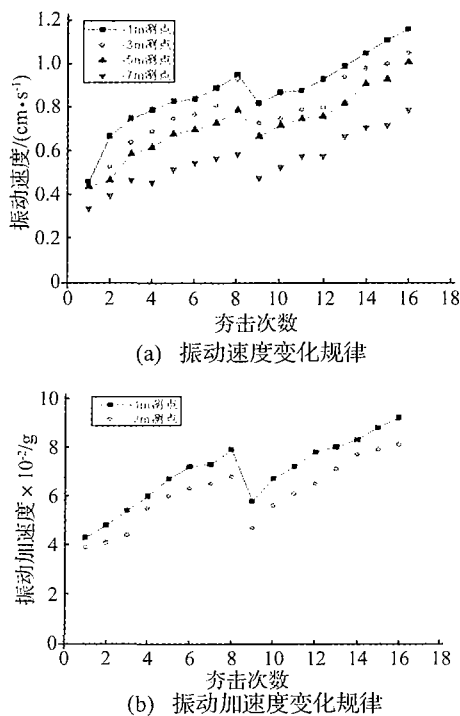


图 4 不同夯击次数的振动强度变化规律  
Fig.4 Change law of vibration amplitude under different damping times

当强夯振动主振频率接近防渗墙的自振频率时,可能引起共振破坏。文献[7]给出塑性混凝土防渗墙土系统的初始自振频率在 1.81 Hz ~ 4.85 Hz 之间,认为其抗压强度和极限应变随着围压的增加近似呈直线增大,导致自振频率随着应变变化呈下降趋势,除非地震强烈到使墙土系统各单元的动模量降到最低,否则不易发生共振。

### 3.4 同一夯击不同标高测点的能量分布

以规律性较好的振动速度为研究物理量,选取 8 000 kN·m 能级、夯检距 50 m、第一遍第五次夯击作为研究对象,通过 Hilbert - Huang Transform 信号方法获得 -1 m、-3 m、-5 m 和 -7 m 标高测点速度信号对应三个振动方向的 Hilbert 能量谱和瞬时能量谱,如图 5、图 6 所示,三列信号的振动方向由左向右依次为水平垂直于防渗墙墙体(V 向)、竖直平行于防渗墙墙体(R 向)和水平平行于防渗墙墙体(T 向)。

由图 5 和图 6 可知:

(1) 对于防渗墙墙体的振动输入能量,平行于墙体的方向显著高于垂直于墙体的方向。对于墙体振动的先后次序,V 向和 R 向在 -1 m 标高率先振动,T 向在 -3 m 标高测点和 -1 m 标高测点先后发生振动。说明强夯施工对该防渗墙的振动作用主要来自于

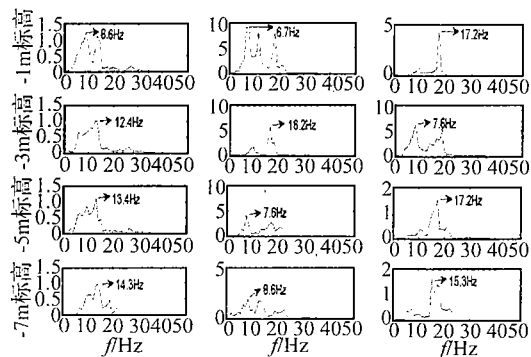


图 5 不同测点各振动方向的 Hilbert 能量谱  
Fig.5 Hilbert energy spectrum of monitor points at different vibration directions

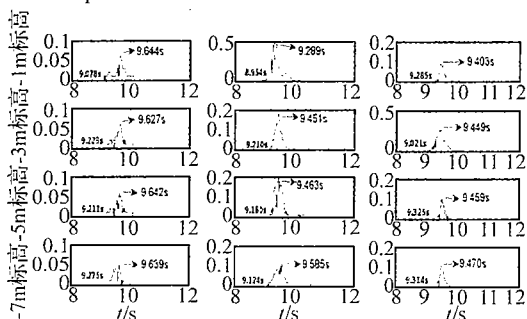


图 6 不同测点各振动方向的瞬时能量谱  
Fig.6 Instantaneous energy spectrum of monitor points at different vibration directions

地表浅层传播下来的瑞利波。

(2) 在 V 向,各标高测点最大瞬时能量以及主频对应能量峰值相差不大。结合弹性力学理论可知,结构受到振动时产生的应力与振动速度呈正变关系。说明防渗墙墙体沿墙高的垂向应力分布比较均匀。

(3) 在 R 向,-1 m 标高测点对应 6.7 Hz ~ 12.4 Hz 的频谱成分在 -3 m 标高大大幅衰减,-5 m 和 -7 m 标高测点的频谱成分分别在 7.6 Hz 和 8.6 Hz 处占主导。随着测点标高的降低,最大瞬时能量出现的时刻往后推迟,对应能量分别为 0.47、0.18、0.21 和 0.11。

在 T 向,防渗墙墙体在 -3 m 标高测点率先振动,其次是 -1 m、-7 m 和 -5 m 标高。-3 m 标高测点在频域 7.6 Hz 处含有较多频谱成分,对应最大瞬时能量也是各测点中最大的,为 0.28,高于 -1 m 标高的 0.09、-5 m 标高的 0.10 和 -7 m 标高的 0.12。

-1 m 和 -3 m 标高测点在土基第一层,-5 m 标高测点在第二层和第三层的交界处,-7 m 标高测点在第四层,比较发现:主频的降低导致相应能量峰值的增加。这是由于土基分层导致瑞利波发生频散效应,当主频降低时,瑞利波波速和波长增大所致。

## 4 结 论

结合本工程场地土情况,分析得到以下四点结论:

(下转第 166 页)

- 12(4):454-459.
- [10] 丁康,钟舜聪. 通用的离散频谱相位差校正方法[J]. 电子学报,2003,31(1):142-145.
- [11] 丁康,朱小勇,谢明,等. 离散频谱综合相位差校正法[J]. 振动工程学报,2002,15(1):114-118.
- [12] 高云鹏,滕召胜,温和,等. 基于Kaiser窗相位差校正的电力系统谐波分析与应用[J]. 仪器仪表学报,2009,30(4):767-763.
- [13] 丁康,杨志坚. 改变窗长相位差校正法的改进与抗噪性能分析[J]. 华南理工大学学报,2007,35(10):210-213.
- [14] 丁康,钟舜聪,朱小勇. 离散频谱相位差校正方法研究[J]. 振动与冲击,2001,20(2):52-55.
- [15] 丁康,朱小勇. 适用于加各种窗的一种离散频谱相位差校正法[J]. 电子学报,2001,29(7):987-989.
- [16] 谢明,张晓飞,丁康. 频谱分析中用于相位和频率校正的相位差校正法[J]. 振动工程学报,1999,12(4):454-459.
- [17] 汤宝平,陈建波,章国稳. 基于相位差校正法的全息谱研究[J]. 振动与冲击,2009,28(8):99-102.
- [18] 黄云志,徐科军. 基于相位差的频谱校正方法的研究[J]. 振动与冲击,2005,24(2):77-80.
- [19] 张强,张频,张明童. 加三角窗的频谱校正[J]. 振动与冲击,2009,28(2):96-98.
- [20] 陈奎孚,王建立,张森文. 短记录加汉宁窗的频谱校正[J]. 振动与冲击,2008,27(4):49-51.
- [21] 段虎明,秦树人,李宁. 离散频谱的频率抽取校正法[J]. 振动与冲击,2007,26(7):59-62.
- [22] Cruz S M A, Cardoso A J M. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extend Park's vector approach [J]. Electric Machines and Power systems, 2000,28(3):289-299.
- [23] Cruz S M A, Cardoso A J M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach [J]. IEEE Trans. On Industry Applications, 2001,37(5):1227-1233.
- [24] Cruz S M A, Cardoso A J M, Toliyat H A. Diagnosis of stator, rotor and airgap eccentricity faults in three-phase induction motors based on the multiple reference frames theory[C]. Conference Record of The 2003 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Salt Lake City, USA, 2003, II:1340-1346.
- [25] 刘振兴,尹项根,张哲. 基于Hilbert模量频谱分析的异步电动机转子故障在线监测与诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):158-161.
- [26] 马宏忠,姚华阳,黎华敏. 基于Hilbert模量频谱分析的异步电机转子断条故障研究[J]. 电机与控制学报,2009,13(3):371-376.

.....

(上接第71页)

(1) 针对强夯施工的塑性混凝土防渗墙振动监测方案有效可行,为类似工程提供参照。试夯数据表明:加速度控制标准 0.1 g 比速度控制指标 5 cm/s 更严格,同时给出 5 个不同能级对应第一、二遍点夯的安全保护距离。

(2) 强夯施工对塑性混凝土防渗墙的振动影响与防渗墙本身的埋深有很大关系。分析表明:塑性混凝土防渗墙墙体上端率先产生振动,并且振动强度最大。说明强夯振动对埋深仅为 5 m 的防渗墙而言,瑞利波的振动影响占主导地位。

(3) 不同夯击能级引起塑性混凝土防渗墙墙体的振动主频小于 20 Hz,且主频最小值比较靠近塑性混凝土防渗墙的自振频率。由于塑性混凝土防渗墙在外界振动荷载的作用下有良好的非线性协调能力,只要将振动强度控制在一定范围内,不易产生共振破坏。

(4) 基于 Hilbert-Huang Transform 信号方法的时频域能量变化规律表明:塑性混凝土防渗墙墙体沿墙

高的垂向应力分布比较均匀;由于分层介质对瑞利波传播特征的影响,当主频降低时,最大瞬时能量和主频对应能量小幅增加。

参 考 文 献

- [1] 牛志荣,路国运. 土体受冲击时 Rayleigh 波作用机制探讨[J]. 岩土力学,2009,30(6):1583-1590.
- [2] 柴华友,吴慧明,张电吉,等. 弹性介质中表面波理论及其在岩土过程中应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [3] 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):16-21.
- [4] 褚宏宪,史慧杰. 强夯振动监测应用分析[J]. 物探与化探,2005,29(1):88-92.
- [5] 尹坚,张良涛. 地基强夯振动测试分析及防振动措施[J]. 铁道工程学报,2009,127(4):17-22.
- [6] 淳庆,潘建伍. 减振沟在强夯施工时的减振效果研究[J]. 振动与冲击,2010,29(6):115-120.
- [7] 王清友,孙万功,熊欢. 塑性混凝土防渗墙[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.