

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.011

李新,马娟,李昊雨,等.深厚淤泥爆破挤淤振动效应[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 71-77. (LI Xin, MA Juan, LI Hao-yu, et al. Analysis of vibration effects to deep and thick silt by blasting compaction[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 71-77.)

深厚淤泥爆破挤淤振动效应

李 新^{1,2}, 马 娟¹, 李昊雨¹, 范 磊³, 周家文⁴

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 中国电建成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;
3. 解放军理工大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007; 4. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 依托某核电站取水明渠超过 30 m 厚淤泥爆破挤淤展开研究, 探索深厚淤泥层爆破振动传播规律、影响因素及其振动效应。首先对振动反射波和折射波的能量分配原理进行了论述, 对深厚淤泥层条件下不同爆破工况振速衰减规律、频率分布进行了分析, 通过高低潮位的对比, 说明厚覆盖海水对能量的传播起到了较好的耗散作用, 炸药能量在两种工况下的利用率没有明显区别, 主频主要集中在低频区间。最后将爆破挤淤与土石方爆破对比分析, 说明爆破挤淤能量转化为地震波的比例更高, 主因是装药结构的差异导致能量转化率存在较大差别。

关 键 词: 深厚淤泥层; 爆破挤淤; 振动; 能量传递

中图分类号: TV542.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)01-0071-07

自 20 世纪 80 年代爆破挤淤技术在连云港西大堤取得成功, 该技术在国内外许多工程得到应用, 如广东珠海 LNG 接卸站码头、漳州开发区南炮台护岸工程等^[1-4]。在《水运工程爆破技术规范》^[5]中提到“爆破挤淤置换的厚度宜为 4~25 m”, 并将覆盖水厚度作为爆破挤淤设计的重要参数。目前对超过规范中厚度的爆破挤淤研究相对较少, 文献[6]提到“围堤外护岸所在区域软土层起伏较大, 淤泥厚度从 5~22 m 变化”, 对爆破挤淤施工工艺、选择的爆破器材、设计参数和药包结构等进行了论述; 文献[7]对淤泥深度 18~21 m 的爆破挤淤振动效应进行测试和分析, 并从单段药量、微差时间、震动波传播方向 3 个方面对振动控制技术开展研究。相关文献中提到覆盖水对爆破效果的影响, 但对不同潮位工况下的研究很少, 文献[8]提到“为了充分利用炸药能量, 在药包上有一定深度的覆盖水情况下起爆”, 未对低潮位(隆起淤泥包基本无覆盖水)工况爆破进行阐述; 另一方面由于爆破挤淤技术在实践中应用的时间较土石方爆破技术短得多, 对二者的关系研究较少, 文献[9]提到“同等条件下, 爆破挤淤引起监测区的爆破振动效应明显高于陆地正、负挖爆破, 说明爆破挤淤炸药能量转化为爆破地震波的比例更高”, 未对相关的机理进一步阐述。

本文依托某核电站扩建工程取水明渠开展研究, 淤泥层最厚达到 34.91 m, 基于爆破挤淤填石筑堤过程中, 在不同潮位工况下, 对爆破振动衰减规律及能量传递原理进行分析研究, 并与土石方爆破进行对比分析, 探索深厚淤泥层爆破振动传播规律、影响因素及其振动效应。另外, 依托工程 500 m 范围内存在核电站取水口、民房等较为敏感的建(构)筑物, 针对深厚淤泥层爆破进行研究具有较强现实意义。

收稿日期: 2015-04-16

基金项目: 中国电力建设集团公司重大资助项目(JJZX-3)

作者简介: 李 新(1983—), 男, 四川南充人, 工程师, 博士, 主要从事水工结构、地基及基础工程、水工爆破方面的研究。E-mail: xinli_2009@qq.com

1 工程概况

某核电二期工程取水明渠堤防工程包括南堤、北堤,均采用爆破挤淤填石法成堤;南堤长 4.1 km,填石 571 万 m^3 ,北堤长 2.6 km,填石 333 万 m^3 ,原泥面标高为 -5 m 左右。南堤堤顶、北堤堤顶、外坡、内坡采用改型方块、扭王字块、四角空心方块等进行护面,爆破后隆起淤泥包平均顶标高为 -1 m,试验阶段未进行清淤。导流堤典型断面见图 1,工程平面布置示意图 2。

海域自上而下为第四系全新统海相淤泥层、砂土、第四系全新统冲海积黏土,下伏基岩为云台组第三岩性段二长浅粒岩。其中淤泥呈灰黄色,流塑、土质较纯,局部夹少量贝壳碎屑及薄层粉砂,切面光滑,干强度中等,韧性高,力学参数等指标见表 1。南堤淤泥厚 11.56~34.91 m;北堤淤泥厚 10.63~27.75 m。鉴于工程所处的地质条件,地基土上层存在较厚的软弱土层(淤泥和淤泥质黏土),且局部同时存在可液化的粉细砂层,持力层为黏土层,采取控制加载爆破挤淤对淤泥置换,置换后的泥石混合层厚度小于 1.0 m,泥石混合层以石料为主。民房与一期取水口的振动控制速度分别为 2 和 10 cm/s 。

海域潮汐属正规半日潮,每个潮汐日(约 24.8 h)有两次高潮和两次低潮,潮汐特征为平均高潮 1.92 m;平均低潮 -1.77 m;平均涨潮历时 5.60 h;平均落潮历时 6.83 h;平均潮差 3.69 m。

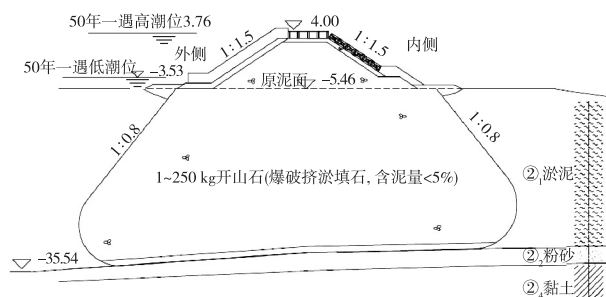


图 1 导流堤典型断面(单位:m)

Fig. 1 Typical section of training jetty (unit: m)

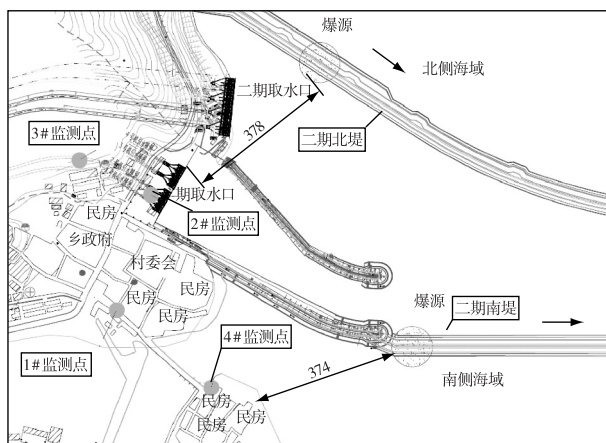


图 2 工程平面示意(含监测点)

Fig. 2 Layout plan of works (including monitoring points)

表 1 力学参数等指标

Tab. 1 Mechanical parameters and other indexes

名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	干重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	塑性指数	液性指数	层厚/m	直剪	
							c/kPa	$\Phi/(\circ)$
淤泥	15.7	0.95	1.76	26.3	1.45	10.63~34.91	5.8	2.3
粉砂	20.1	1.65	0.63	—	—	0.3~7.4	7.2	29.9
黏土	18.4	1.26	1.18	21.1	1.02	4.9~44.4	13.2	7.3

2 振动波能量传递原理

2.1 反射和折射法则

当波遇到某种界面时,它的传播将发生变化,一部分能量在分界面上反射回原介质,余下的一部分能量则折射进入另一介质。这种现象就是弹性波的反射和透射^[10-11]。波的折射情况,用 Snell 定理表示为:

$$\sin i_1 / \sin i_2 = v_1 / v_2$$

其中: i_1 与 i_2 分别为波的入射角和折射角; v_1 和 v_2 则为波在两种介质中的传播速度。

2.2 能量分配原理

入射波在介质分界面处分界为反射波和折射波的现象意味着入射波在反射点进行了能量分配。一般将

波阻抗定义为: $Z = \rho v$, 其中: ρ 为介质密度; v 为介质的波传播速度。

事实上,任何介质对通过它的波都呈现出波阻抗。当遇到两种不同介质的交界面时,阻抗突然改变。在这个位置上,一部分入射波将反射,而剩下的另一部分将折射到阻抗发生变化的区域中去。在波阻抗突然发生改变的边界上,弹性波的传播必须满足如下两个条件^[9]:

(1)几何边界条件:在波阻抗突然变化的边界两侧,介质的位移在任何时刻都应保持相等,因而位移是连续的。

(2)动力学边界条件:在边界点上,横向力具有连续性,所以应保持连续的梯度变化。

本文假定淤泥与陆上岩石的分界面符合上述弹性波传递的条件。设入射部分介质的波阻抗为 $Z_1 = \rho_1 v_1$, 而透射部分介质的波阻抗为 $Z_2 = \rho_2 v_2$, 根据几何边界条件及动力学边界条件,可以推导出振幅的反射和折射系数完全取决于波阻抗之比(限于篇幅,略去推导过程)。根据能量守恒,入射波总能量 e_i 与反射波能量 e_r 及折射波能量 e_t 的系数关系分别为:

$$\text{能量反射系数为:} \quad e_r/e_i = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad (1)$$

$$\text{能量折射系数为:} \quad e_t/e_i = 4Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad (2)$$

3 振动衰减规律及分析

3.1 振动监测及振速衰减回归

振动监测点布置及爆源与监测点相对位置平面示意、断面示意图见图2和3。

采用萨道夫斯基经验关系式作为峰值质点振动速度衰减规律的回归方程:

$$V = K (Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (3)$$

式中: V 为峰值质点振动速度(cm/s); Q 为最大单段药量(kg); R 为爆心距(m); K 为回归系数,与地形地质条件及爆源类型有关; α 为衰减指数; $Q^{1/3}/R$ 为比例药量。

选取北堤垂直向、南堤水平东西向爆破对应的潮位在0 m(海平面平均值)以上及0 m以下的振速峰值数据分别进行整理。将实测振速值及相应的爆心距和单段药量统计,按照式(3)进行回归计算,得到峰值质点振动速度衰减规律,回归结果见表2。本文将0 m以上及以下的潮位分别称为高潮位、低潮位,即爆破时在(-2.5 m, 0), (0, 2.5 m)两个区间对应的实际潮位值。北堤、南堤高潮位平均值分别为1.36和1.17 m, 低潮位平均值分别为-1.25和-1.01 m, 平均潮差分别为2.61和2.18 m。

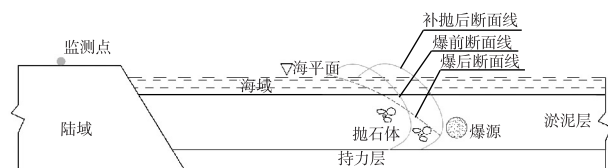


图3 爆源与监测点相对位置断面示意

Fig. 3 Section of relative position of explosion source and monitoring point

表2 回归分析结果

Tab. 2 Results of regression analysis

方向	潮位范围/m	K	α	潮位均值/m
北堤垂直向	(-2.5, 0)	2 562	2.06	1.36
	(0, 2.5)	483	1.7	-1.25
南堤水平东西向	(-2.5, 0)	1 748	1.83	1.17
	(0, 2.5)	516	1.64	-1.01

3.2 振速衰减及能量分析

选取单段药量相同的连续16炮次实测振速进行对比,爆破振速峰值与对应的潮位关系曲线见图4,由图可见潮位与振速曲线的峰谷存在较好的对应关系,即是高潮位对应低振速、低潮位对应高振速。为将潮位对振速的影响进行量化,选取北堤垂直向振速在不同单段药量情况下爆心距的变化进行对比,振速峰值相差比例对比见图5。从图5可以看出,高潮位与低潮位的振速预测数值比例差较大,在药量一定的情况下,北堤垂直向高潮位的振速较低潮位少2.1%~26.5%,平均值为8.87%~18.16%,且药量越大,减少比例越多,其他方向都存在类似规律,说明低潮位爆破工况会使振速峰值有一定的增加。

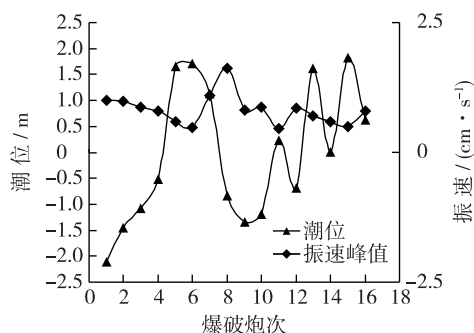


图 4 不同潮位下振速峰值

Fig. 4 PPV under different tidal levels

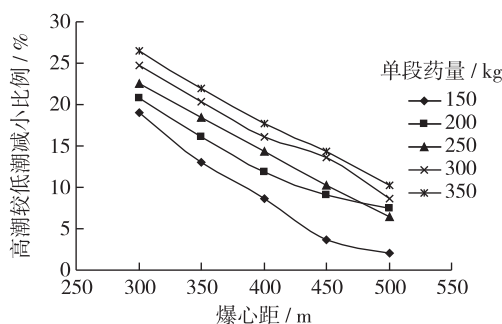


图 5 高潮与低潮振速峰值对比

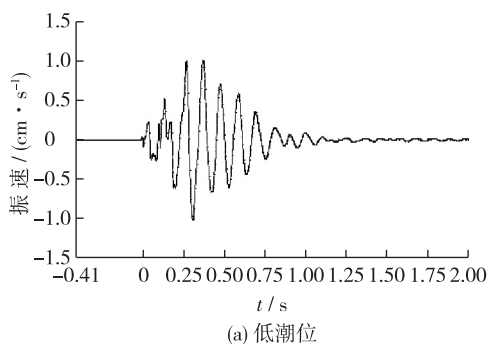
Fig. 5 PPV ratio contrast of high and low tidal levels

就南堤水平东西向振速衰减规律进行允许单段药量计算,区分 2 cm/s 允许振速情况,计算结果见表 3。由表 3 核算的最大单段药量可以看出,高潮位的允许最大药量可以达到低潮位的 2 倍以上,说明高潮位对减小爆破振动的负面影响较为有利。低潮位、高潮位的典型波形曲线见图 6,由图可以看出由于覆盖水的抑制,高潮位对振速存在一定的削峰作用。

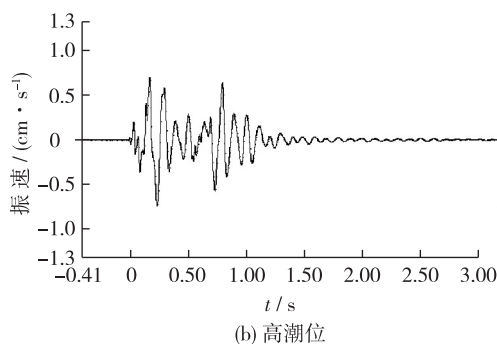
表 3 允许单段药量

Tab. 3 Allowed explosive quantity

爆心距/m	允许单响药量/kg		爆心距/m	允许单响药量/kg	
	低潮位	高潮位		低潮位	高潮位
300	407	1 047	450	1 372	3 533
350	646	1 662	500	1 883	4 846
400	964	2 481			



(a) 低潮位



(b) 高潮位

图 6 高低潮位典型波形曲线

Fig. 6 Typical waveform curves of high and low tidal levels

通过高低潮位的对比,说明高潮位对爆破振动传递起到了一定的抑制作用,主要原因是振动波传播介质为固态介质、液态海水,固态介质为爆源与陆地之间海域内的深厚淤泥、粉砂、粗砂、黏土等软弱地质层,且液态介质与固态介质特性相差较大,波阻抗发生较强突变,厚覆盖海水对能量传播起到了较好的耗散作用。

另一方面,相同最大单段药量及总装药量的情况下,对不同爆破工况的南堤堤身初始下沉影响进行分析,对比数据见表 4。可以发现堤头爆破后,低潮与高潮工况初始下沉量没有明显规律,两者平均下沉的差值存在一定随机性,说明不同工况爆破与堤身初始下沉不存在必然联系,炸药能量在两种工况下用于置换淤泥的利用率没有明显区别,能量利用对振动差异不构成直接影响。

表 4 低潮较高潮平均下沉相差比例

Tab. 4 Average sinking discrepancy ratio compared to low and high tide

工况	最大单段装药量/kg	总药量/kg	平均下沉量/m	低潮较高潮平均下沉相差比例/%
低潮位	150	540	2.59	-3.00
高潮位	150	540	2.67	
低潮位	180	720	2.57	+3.63
高潮位	180	720	2.48	

4 频率分析结果

爆破振动主频是指爆破地振波峰值质点振动所对应的质点振动频率,它反映了爆破振动对建(构)筑物最大作用力的时程特征,是表征爆破振动危害的重要参量。北堤爆破垂直向在低、高潮位情况下频率分布特征见图 7。

由图 7 可以看出,低潮位、高潮位情况下,主频均较为集中在 20 Hz 以内的频率段,最大频率分别为 70 和 87 Hz,如北堤在低潮位、高潮位情况下,20 Hz 以内的频率的比例分别为 72%和 78%。水平东西向、水平南北向与垂直向频谱分布较为一致,频度分布具有一定规律性。说明在深厚淤泥层条件下,爆破挤淤主频主要集中在低频区域。

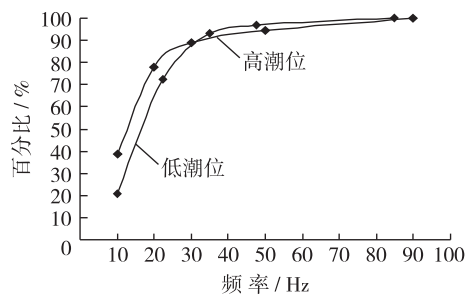


图 7 高低潮位频率累积比例

Fig. 7 Accumulation ratio of low and high tidal frequency

5 与土石方爆破对比分析

影响爆破地震波产生和传播的因素是多方面的,可以归结到爆源、传递介质和传递路径等 3 个方面,从爆破挤淤与土石方爆破的对比角度,选取二者关联性较强的地质条件及装药结构进行论述。

该核电站完建一期取水构筑物采用土石方爆破,其与取水明渠紧接,除振动传递介质、装药结构与爆破挤淤的主要差别外,其他条件相似。选取北堤垂直向高潮位的振速核算值与取水构筑物的相应振速核算值进行对比。爆挤与土石方爆破振速峰值比例对比见图 8。

基于淤泥面与陆上岩石的分界面满足弹性波波阻抗边界条件假定,同时考虑淤泥较为深厚,分界面海域侧的介质均看成是淤泥介质,运用能量分配原理,结合陆上介质岩体的总体状况,可得表 5 中相关参数。

表 5 分界面介质参数及能量分配

Tab. 5 Medium parameters and energy distributing at interface

介质	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	波阻抗/($\text{kPa} \cdot \text{s}^{-1}$)	能量折射率/%	能量反射率/%
淤泥	15.70	1 500	23 550	71.44	28.56
岩石	25.87	3 000	77 610		

通过振动波在介质中的传播规律分析,爆破地震波传播受到介质的阻尼作用产生能量耗散,其强度将逐渐减弱,且爆破挤淤振动波能量在从淤泥传到陆地的分界面位置,能量将进一步折减,由表 5 可见,71.44%

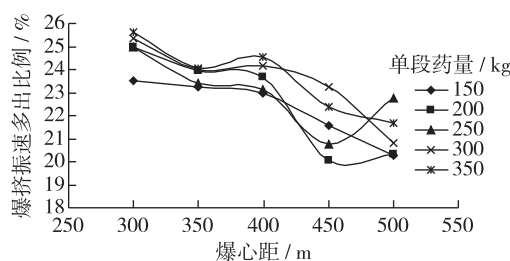


图 8 爆挤与土石方爆破振速峰值比例对比

Fig. 8 Comparison between PPV ratio of blasting compaction and soil-rock blasting

的能量发生了折射,28.56%的能量发生了反射。

随着传播介质的密度和均匀性增加,地震波的传播速度将增大^[12],理论上会出现土石方爆破振动速度较淤泥中衰减更慢的现象。本工程中,由图 8 可以发现相同装药量的情况下,在距离爆源 300~500 m 处,爆破挤淤引起的质点振动大于土石方爆破的 20.05%~25.61%,出现此种现象有两种可能:一是爆破挤淤炸药能量转化为地震波的比例更高,二是爆破震动在岩石中衰减速度更快。根据前述可排除第二种可能。

理论分析^[13]表明,不管不耦合装药的耦合介质是空气还是水,爆生气体均要在炮孔中膨胀并压缩介质和降低压力。爆轰产物膨胀后的波阻抗和水压缩后的波阻抗均小于炸药的波阻抗,这在一定程度上降低了炸药的能量折射率。对爆破挤淤较土石方爆破炸药能量转化率更高的原因进行分析,可以发现前者炸药包在淤泥层下埋深达到 10 m 以上,且在淤泥层以上覆盖有一定深度海水,可以认为炸药与淤泥绝对耦合,而土石方爆破为钻孔装药,炸药耦合程度不及淤泥,加之存在一定堵塞段,二者装药结构的差异导致能量转化率存在较大差别。因此爆破挤淤能量转化为地震波的比例较土石方爆破更高,主因是二者装药结构的差异导致能量转化率存在较大差别。

6 结 语

(1)高潮位对减小爆破振动负面影响较为有利,低潮位工况爆破会使振速峰值有一定增加,说明厚覆盖海水对能量传播起到了较好的耗散作用,炸药能量在两种工况下的利用率没有明显区别,实际工程中选择高潮位爆破对振动控制较为有利。

(2)在深厚淤泥层条件下爆破挤淤,主频主要集中在低频区域。

(3)能量传递原理表明,地震波传播受到介质的阻尼作用产生能量耗散,其强度将逐渐减弱;工程试验表明,能量在从淤泥传到陆地的分界面,将进一步折减,绝大部分能量发生了折射,小部分发生了反射。

(4)工程对比分析表明,爆破挤淤能量转化为地震波的比例较土石方爆破更高,主因是二者装药结构的差异导致能量转化率存在较大差别。

参 考 文 献:

- [1] 冯谦,徐学勇,黄强. 复杂环境下爆破挤淤软基处理技术应用研究[J]. 爆破,2013,30(2): 150-153. (FENG Qian, XU Xue-yong, HUANG Qiang. Research on engineering technology of squeezing silt by blasting in complex environment[J]. Blasting, 2013,30(2): 150-153. (in Chinese))
- [2] 王正义,荆雷. 爆破挤淤在护岸工程地基处理中的应用[J]. 水运工程,2013(10): 244-248. (WANG Zheng-yi, JING Lei. Application of blasting compaction for foundation treatment of revetment works[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(10): 244-248. (in Chinese))
- [3] 徐学勇,汪稔,吴京平,等. 特殊地形条件下爆破挤淤震动效应测试与分析[J]. 振动与冲击,2009,28(1): 182-185. (XU Xue-yong, WANG Ren, WU Jing-ping, et al. Monitoring and analysis of vibration effects due to squeezing silt by blasting at a special terrain[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(1): 182-185. (in Chinese))
- [4] 李雷斌. 含夹砂层复杂软基爆破挤淤填筑护岸及防波堤施工技术研究[J]. 中国水运:下半月,2014,14(4): 368-372. (LI Lei-bin. Study on complex soft soil compaction filling embankment and construction technology of breakwater with sand layer[J]. China Water Transport, 2014,14(4): 368-372. (in Chinese))
- [5] JTS 204—2008 水运工程爆破技术规范[S]. JTS 204—2008 Technical code of blasting for port and waterway engineering[S]. (in Chinese))
- [6] 金伟,何维维. 爆破挤淤法处理深厚软基的典型试验研究[J]. 中国港湾建设,2012(5): 39-42. (JIN Wei, HE Wei-wei. Typical test and research on blasting toe-shooting method in deep soft subgrade[J]. China Harbour Engineering, 2012(5): 39-42. (in Chinese))
- [7] 徐学勇,汪稔,孟庆山,等. 深厚淤泥爆破挤淤震动效应测试与控制技术[J]. 岩土力学,2008,29(12): 3256-3260. (XU Xue-yong, WANG Ren, MENG Qing-shan, et al. Monitoring and controlling technology for vibration effect due to deep and thick

- silt by blasting compaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3256-3260. (in Chinese))
- [8] 陶松垒,李未材. 防波堤基础的爆炸处理方法及应用[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 475-480. (TAO Song-lei, LI Wei-cai. Blasting method for the breakwater groundwork and its application[J]. Explosion and Shock Wave, 2003, 23(5): 475-480. (in Chinese))
- [9] 陆凡东,方向,高振儒,等. 防波堤爆破挤淤施工对在建核设施的振动影响分析[J]. 工程爆破, 2010, 16(2): 66-69. (LU Fan-dong, FANG Xiang, GAO Zhen-ru, et al. Influence analysis of blasting vibration on nuclear facility under construction by blasting toe-shooting of breakwater[J]. Engineering Blasting, 2010, 16(2): 66-69. (in Chinese))
- [10] 胡德绥. 弹性波动力学[M]. 北京:地质出版社, 1989. (HU De-sui. Elastic wave dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. (in Chinese))
- [11] 李洪涛,卢文波,舒大强,等. P波作用下衬砌混凝土的爆破安全振动速度研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(1): 34-39. (LI Hong-tao, LU Wen-bo, SHU Da-qiang, et al. Study on the safety velocity for concrete lining under P wave loading[J]. Explosion and Shock Wave, 2007, 27(1): 34-39. (in Chinese))
- [12] 林大超,白春华. 爆炸地震效应[M]. 北京:地质出版社, 2007. (LIN Da-chao, BAI Chun-hua. Explosion seismic effect[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [13] 宗琦,孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641-645. (ZONG Qi, MENG De-jun. Influence of different kinds of hole charging structure on explosion energy transmission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 641-645. (in Chinese))

Analysis of vibration effects to deep and thick silt by blasting compaction

LI Xin^{1,2}, MA Juan¹, LI Hao-yu¹, FAN Lei³, ZHOU Jia-wen⁴

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China; 2. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 3. College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 4. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Since the blasting compaction technology has been successfully applied to the civil engineering in the 80s of the last century in China, there are very few in studies of the deep and thick silt blasting compaction, such as the energy transfer theory and the tide level under the blasting working conditions in comparison with soil-rock blasting. When there are sensitive buildings or structures in the blasting area, making studies of the vibration effects of blasting has a practical significance. This paper, depending upon a nuclear power station, carries out researches of thick silt over 30 m in the intake channel by blasting compaction, including studies of propagation rule of vibration, influence factors and vibration effects by blasting. Firstly, the analysis of energy distribution of the vibration induced reflected wave and refracted wave has been done in this paper; secondly, analysis of the damping laws of vibration rates and frequency of the north and south banks has made under the different blasting conditions. Compared with the high and lower tidal levels, the analysis results show that the thick seawater covering the silt has a positive effect on the energy dissipation, and there are no great differences between the explosive energy utilization under two working conditions. The main frequency mainly concentrates at the low frequency area. Finally comparing the blasting compaction with the soil-rock blasting, and it is found that the energy ratio of the blasting compaction which transfers to a seismic wave is higher, the main reason is the discrepancy of the explosive structure which leads the energy transfer ratio having remarkable differences.

Key words: deep and thick silt; blasting compaction; vibration; energy transfer