

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.010

姚雷, 姚文娟. 高桩码头对邻近爆破的非线性动力响应分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(1): 66-72. (YAO Lei, YAO Wenjuan. Nonlinear dynamic response analysis of blasting to adjacent high-pile wharf[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(1): 66-72. (in Chinese))

高桩码头对邻近爆破的非线性动力响应分析

姚 雷, 姚文娟

(上海大学 土木工程系, 上海 200444)

摘要: 爆破施工会对周围已有的建筑物产生安全隐患, 因此, 预测爆破施工对周边建筑物的影响能有效降低风险, 消除安全隐患。在某港口周边进行爆破施工前, 为保证邻近高桩码头的安全, 先建立爆破位置与高桩码头整个区域的三维非线性有限元数值模型。在爆破荷载及高桩码头在役期间的最不利荷载作用下, 计算分析港口内部结构与土的非线性相互作用动力响应。根据港口结构所能承受的爆破冲击波通过土体传递给结构的动力响应, 并以高桩码头的安全振动速度为衡量标准, 得到爆破点距离码头最近位置时的最大单孔炸药量, 分析此时码头的位移变形、弯矩、剪力以及应变情况, 发现码头的位移受爆破荷载的影响较小, 但码头内部斜桩较直桩承受更大的应力、剪力, 因此在爆破施工时, 斜桩更容易受到破坏。

关 键 词: 爆破; 邻近建筑; 高桩码头; 动力响应

中图分类号: U655.52; U656.113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)01-0066-07

爆破具有很大的破坏性, 在进行爆破施工的过程中, 炸药爆炸会释放出大量可以转换成地震波的能量, 爆破地震波在介质中传播, 当质点传递到邻近的建筑物时, 就可能使建筑物发生某种程度的损害, 例如产生裂缝, 这就会降低建筑物稳定性, 严重的还会导致建筑物倒塌破坏^[1-3]。因此, 研究爆破施工时邻近建筑物的动力响应是非常重要的。国外学者在大量试验的基础上率先提出使用质点最大振速作为评价爆破地震波的标准^[4], 并且从试验结果来看, 建筑物的破坏程度与质点的振动速度呈正比关系, 质点振动速度越大, 建筑物的破坏就越严重; 我国学者对爆破地震的研究也取得了很大的进展, 霍永基等^[5]在研究中也得出与外国学者相似的结论, 提出了质点振速是影响建筑物结构破坏与失稳的主要因素, 并且认为质点的振动速度峰值与爆破振动波所携带的能量可以建立某种关系, 以此来描述建筑物结构的损伤情况。此外, 规范《爆破安全规程》(GB 6722—2014)^[6]也是以质点的振动速度来判断爆破振动对建筑物的影响。因此, 可以认为用质点振动速度来衡量爆破地震对建筑物的影响是可行的。

爆破是一个非常复杂的过程, 研究爆破过程, 首先要确定爆破所产生的动力荷载以及加载方式。在有限元数值模拟中, 以往的做法是先将爆破荷载等效, 一般等效成随时间变化的三角形荷载, 然后再施加在炮孔壁上^[7-9]。国内学者许红涛等^[10-11]在此基础上更进一步, 将作用在炮孔壁上的爆破荷载依据圣维南原理等效, 然后再施加在同排炮孔连心线(面)上, 以模拟中远距离的爆炸作用。

在港口建设过程中, 经常需要进行爆破施工, 本文以某港口工程为背景, 利用有限元软件 ABAQUS 建立爆破位置至高桩码头以及包括之间土体的结构与土相互作用的整体三维非线性有限元数值模型, 施加经圣维南原理等效后的爆破荷载, 采用建筑物的安全振动速度为衡量标准, 分析爆破对高桩码头的整体影响。

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572186)

作者简介: 姚 雷(1991—), 男, 河南信阳人, 硕士, 主要从事爆破对结构影响等方面的研究。

E-mail: 1422850572@qq.com 通信作者: 姚文娟(E-mail: wenjuan@mail.shu.edu.cn)

1 有限元模型的建立

1.1 工程概况与计算模型

某港口工程在建设过程中,拟采用爆破的施工方法,由于邻近区域存在一已建好的高桩码头,需要将爆破对码头的影响控制在安全范围内。由建设管理单位提供的该高桩码头的安全振动速度为 2.5 cm/s 。

计算模型中爆破点距离码头最近为 50 m ,炮孔深 $H=6 \text{ m}$,孔间距 $a=3.5 \text{ m}$,孔直径 $r_1=0.1 \text{ m}$,装药直径 $r_2=0.08 \text{ m}$,装药长度 $h=4 \text{ m}$ 。炸药选择乳化炸药,密度取 $1\,000 \text{ kg/m}^3$,爆轰速度为 $3\,600 \text{ m/s}$ 。

计算模型中,土体沿 X 轴方向 72 m ,沿 Y 轴方向 6 m ,沿 Z 轴方向 30 m ,土层分为 3 层,土的本构模型选择 D-P 模型,土体参数如表 1 所示。计算域边缘土体四周法向约束,底部完全约束。高桩码头为钢筋混凝土结构,直斜方桩布置,截面尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,混凝土等级采用 C40,桩身伸入土体为 24 m ,模型网格划分见图 1。将第 1 根直桩编号为 1 号桩,第 3 根直桩编号为 2 号桩,第 1 根斜桩编号为 3 号桩。高桩码头断面详图如图 2 所示。静力分析步中地应力平衡时间为 1 s ,分析桩土作用时间为 1 s ,动力分析步中爆破荷载持续时间取为 3 s 。

表 1 土体参数

Tab. 1 Parameters of soil

土层	层厚/ m	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内摩擦角/ $^\circ$	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa
淤泥质土	8	1.58	2.6	7	1.67
粉质黏土	10	1.93	11.3	39	5.08
粉土	12	1.98	17.7	32	7.90

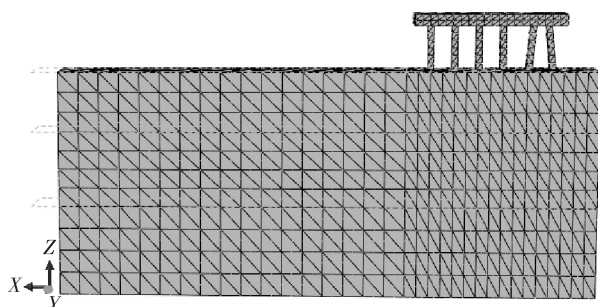


图 1 模型网格划分

Fig. 1 Mesh of computing model

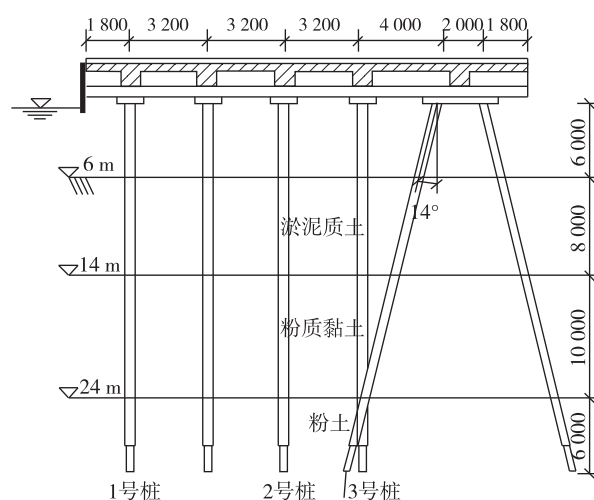


图 2 高桩码头断面(单位:mm)

Fig. 2 Cross section of high-pile wharf (unit: mm)

1.2 爆破荷载

炸药爆炸后,在冲击波和应力波作用下,炮孔周围土体会受到不同程度的破坏,根据破坏程度可以划分为粉碎区、破碎区和弹性区^[12-14]。在模拟爆破荷载时,以往的做法是将爆炸荷载施加在破碎区的外边界,也就是弹性边界上,然后再将荷载直接加载于爆破作用面上。在实际工程中荷载会选用半理论半经验的三角形荷载。本文也将采用三角形荷载曲线,见图 3,其中 P_m 为荷载峰值。

有试验研究指出,炸药爆炸时的冲击波作用持续时间非常短暂,有限元模拟选择三角形荷载曲线时,一般将爆破荷载作用的持续时间取为几毫秒^[7-8,15]。本文升压时间取为 1 ms ,正压作用时间取为 6 ms 。根据 C-J 爆轰理论,可以将作用在炮孔壁上的压力等效为^[14]:

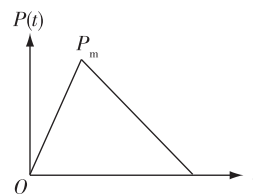


图 3 爆破三角形荷载时程曲线

Fig. 3 The function duration curve of blast triangular pulse load

$$\text{在耦合装药条件下: } P_0 = \frac{\rho_e D^2}{2(1 + \gamma)} \quad (1)$$

$$\text{不耦合装药条件下: } P_0 = \frac{\rho_e D^2}{2(1 + \gamma)} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (2)$$

式中: ρ_e 为炸药密度; D 为炸药爆轰速度; γ 为凝聚态炸药性质和装药密度相关的常数(等熵指数), 一般取为 3; r_1 为炮孔直径; r_2 为装药直径。

1.3 爆破荷载的等效

有限元模拟时, 炮孔的存在会使模型的网格划分较为复杂, 也有可能使模型无法收敛。为解决这一问题, 有些学者利用弹性力学中的圣维南原理将爆破荷载进一步等效。具体做法是建立没有炮孔有限元模型, 依据圣维南原理把爆破荷载时程曲线等效施加在同排炮孔连心线与炮孔轴线所确定的平面, 示意图见图 4。由此得出的等效压力公式为^[10-11]:

$$P_e = \frac{2r_0}{a} P_0 \quad (3)$$

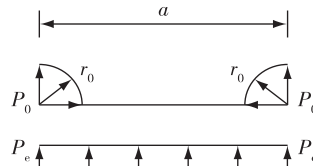


图 4 爆破荷载等效施加

Fig. 4 Schematic diagram of the equivalently exerted explosive load

2 码头在役时典型工况下受力计算

在进行爆破之前, 首先需要计算分析码头在役时最不利工况(典型工况)的受力情况。船舶停靠在码头前时船体对码头建筑物有挤压力, 对码头的承载力会有很大影响, 现将码头受到船舶挤靠力视为典型工况。

2.1 典型工况下模型的建立

依据建设单位提供的资料, 典型工况下最不利挤靠力取 50 kN/m, 作用于码头前沿承台上, 模型的建立、网格划分、边界条件均与前文 1.1 节中的规定相同。

2.2 计算结果

图 5 和 6 分别是在船舶挤靠力作用下各桩沿桩身长度方向剪力及弯矩分布。可以看出最大剪力和最大弯矩都出现在 3 号斜桩上, 最大剪力为 86.4 kN, 最大弯矩为 180 kN · m。

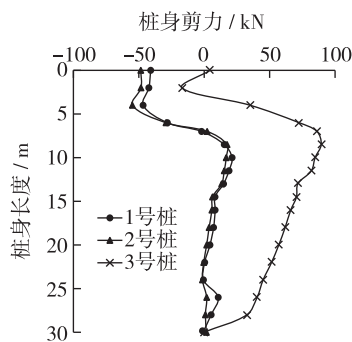


图 5 桩身剪力

Fig. 5 Shear diagram of pile

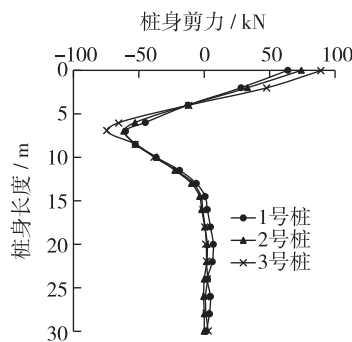


图 6 桩身弯矩

Fig. 6 Moment diagram of pile

3 爆破荷载作用下的瞬态结果分析

3.1 模态分析

采用瞬态方法分析计算时, 要取很短的时间步长, 对于爆破地震波, 逐步积分结构响应时, 增量步 Δt 的选取与模型最高阶自振频率周期 t 有关, 要保证 $\Delta t < 0.1t$, 本文动力增量步步长取 0.001 s。利用 ABAQUS 可

以十分便捷地提取结构的自振频率,模型的前10阶自振频率见表2,图7为振型图中第10阶振型。

3.2 爆破荷载作用下的瞬态结果分析

在工程实践中一般以安全振动速度来评估在爆破荷载作用下结构的安全性。本文结合工程实例,不断改变炸药量来找出安全的炸药用量,分别模拟了28,31,35,38和41 kg炸药时模型的响应情况,由式(2)和(3)可得等效荷载分别为11.00,12.20,13.42,14.64和15.86 MPa。

经模拟发现最大振动速度出现在承台处且沿X轴方向,图8为承台在不同炸药量时的X轴方向的振动速度。可以看出随着炸药量的增加振动速度也随之增大,28,31,35,38和41 kg炸药对应的最大安全振动速度分别为1.67,1.94,2.23,2.50和2.79 cm/s。

根据规范要求,本工程在实际中要求振动速度小于2.5 cm/s,因此爆破药量应小于38 kg,现分析在临界安全状态即炸药量为38 kg以及作用船舶挤靠力时高桩码头各位置的振动速度、位移变形、内力及应力情况。

图9是桩身和承台沿水平方向即X轴方向的振动速度时程曲线。可以发现随着距离的增加,桩身的振动速度逐渐减小,最大振动速度在爆破荷载产生1.4 s后出现在承台处,承台处振动速度大于桩身处振动速度。

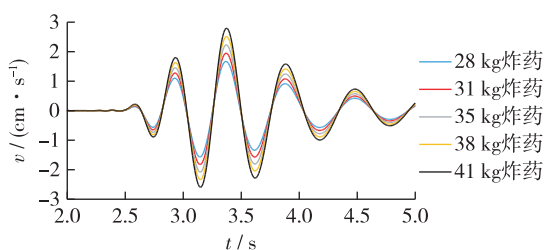


图8 不同炸药量下承台的振动速度

Fig. 8 Vibration velocity of pile caps under different explosives

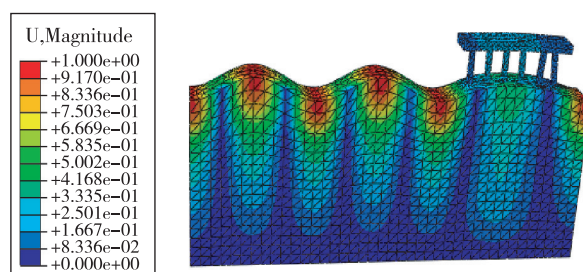


图7 第10阶振型

Fig. 7 Tenth order vibration mode

表2 模型的自振频率

模态阶数	1	2	3	4	5
频率/Hz	1.00	1.36	1.48	1.58	1.79
模态阶数	6	7	8	9	10
频率/Hz	1.93	2.15	2.52	2.94	3.40

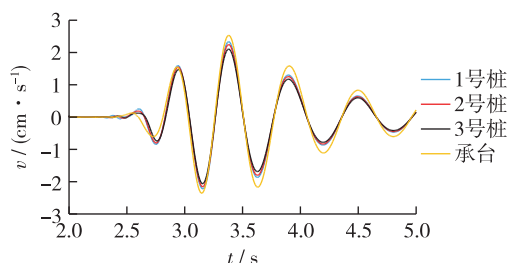


图9 沿X轴方向振动速度

Fig. 9 Vibration velocity along the X axis

图10为桩身和承台沿X轴和Z轴方向的位移。可见码头沿X轴方向的最大位移为-8.8 mm,爆破动力荷载在水平方向的影响小于静力荷载;沿Z轴方向的最大沉降为-22 mm,该部分位移也由两部分叠加,主要由静力作用引起,而爆破动力荷载影响较小,此外可以看出在Z轴方向斜桩的位移比直桩要大。码头在水平方向和竖直方向的位移都较小,处于安全状态。

图11是码头桩沿桩身方向的剪力分布,最大剪力出现在3号斜桩上,为91.4 kN,远大于1,2号直桩剪力;图12为沿桩身的弯矩,各桩时弯矩值相近,最大弯矩也出现在3号斜桩上,为190 kN·m。说明在爆破荷载作用下斜桩承受了更多的剪力、弯矩。

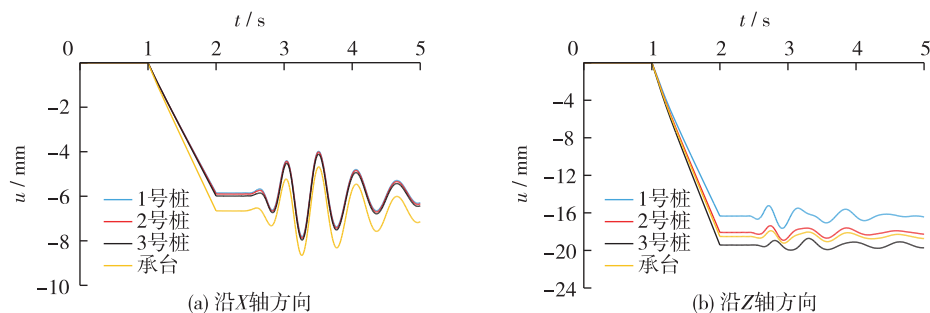


图 10 高桩码头位移时程曲线

Fig. 10 Displacement duration curve of high-pile wharf

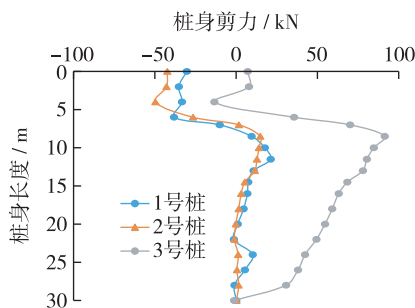


图 11 桩身剪力

Fig. 11 Shear diagram of pile

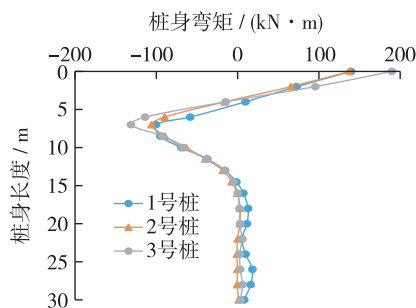


图 12 桩身弯矩

Fig. 12 Moment diagram of pile

图 13 为码头桩身和承台处 Mises 应力的时程曲线。最大应力 2.39 MPa 出现在 3 号桩, 1 号桩、2 号桩最大应力分别为 2.38 和 1.88 MPa, 应力随距离的增大而减小, 在 3 号桩出现突变, 因为 3 号桩为斜桩, 承载力不如直桩, 所以在地震或爆破荷载作用下高桩码头的斜桩往往破坏最严重, 符合实际情况。从整体来看, 桩身部分比承台承受更大应力, 承台的最大应力只有 0.75 MPa。需要注意的是, 3 号斜桩和 1 号直桩的最大应力接近混凝土标准抗拉强度 (2.39 MPa), 在实际工程中需防范出现这种情况。

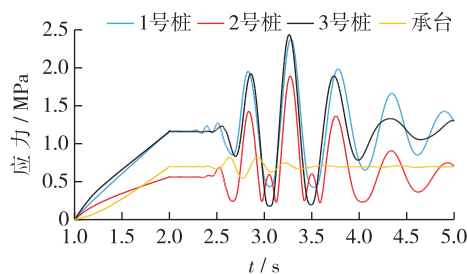


图 13 码头的应力时程曲线

Fig. 13 Stress duration curve of wharf

4 爆破荷载对在役码头的影响分析

对比分析典型工况下与施加爆破荷载之后的码头位移、剪力以及弯矩的变化, 由图 5 和图 11 可知施加爆破荷载之后, 桩身最大剪力增加了 5 kN, 由图 6 和图 12 可知桩身最大弯矩增加了 10 kN·m, 可见相应于码头在役工况下的荷载, 爆破荷载对码头的内力影响相对较小; 综合高桩码头的位移分析, 爆破荷载对码头位移的影响也小于在役工况下的影响, 在竖直方向的位移上体现得尤为明显。

5 结 语

在爆破荷载作用下, 高桩码头的振动速度随着炸药量的增加而增大。在本港口工程中为保证高桩码头

的安全,建议单孔爆破药量不超过 38 kg,才能将振动速度控制在安全振动速度 2.5 cm/s 以下。

高桩码头的位移与应力大小主要受控于在役工况的荷载;而爆破荷载对码头应力、位移大小的影响是次要的。在实际工程中第一需要控制振动速度,第二需要考虑由于爆破荷载对码头结构应力的影响,第三考虑爆破对结构位移的影响。

斜桩在高桩码头中是抵抗水平位移和承受水平力的主要结构,在爆破施工时,斜桩更容易破坏,从而影响高桩码头整体的稳定性。

在爆破荷载以及船舶挤靠力作用下,高桩码头斜桩的应力、剪力都要大于直桩,因此斜桩更容易破坏。在实际监测过程中要注意斜桩力学行为的变化。

参 考 文 献:

- [1] SINGH P K, ROY M P. Damage to surface structures due to blast vibration[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2010, 47(6): 949-961.
- [2] KHANDELWAL M, SINGH T N. Evaluation of blast-induced ground vibration predictors[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(2): 116-125.
- [3] 张袁娟, 黄金香, 袁红. 缓冲爆破减震效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(5): 967-973. (ZHANG Yuanjuan, HUANG Jinxiang, YUAN Hong. Study of shock absorption effect of buffer blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(5): 967-973. (in Chinese))
- [4] GOSH A, DAEMEN J K. Statistics-a key to better blast vibration predictions in research and engineering applications in rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomechanics*, 1985: 1441-1449.
- [5] 霍永基. 爆破工程概论[J]. *爆破与冲击*, 1983, 3(3): 89-96. (HUO Yongji. General considerations on blasting engineering [J]. *Explosive and Shock Waves*, 1983, 3(3): 89-96. (in Chinese))
- [6] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. (GB 6722—2014 Safety regulation for blasting[S]. (in Chinese))
- [7] 张正宇, 张文煊, 吴新霞. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (ZHANG Zhengyu, ZHANG Wenxuan, WU Xinxia. *Modern water conservancy and hydropower engineering blasting*[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2003. (in Chinese))
- [8] 夏祥, 李俊如, 李海波, 等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2005, 26(1): 50-56. (XIA Xiang, LI Junru, LI Haibo, et al. Udec modeling of vibration characteristics of jointed rock mass under explosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 50-56. (in Chinese))
- [9] TRIVIÑO L F, MOHANTY B, MILKEREIT B. Seismic waveforms from explosive sources located in boreholes and initiated in different directions[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 87(12): 81-93.
- [10] 许红涛, 卢文波, 周小恒. 爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2008, 41(1): 67-71, 103. (XU Hongtao, LU Wenbo, ZHOU Xiaoheng. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2008, 41(1): 67-71, 103. (in Chinese))
- [11] 张玉成, 杨光华, 刘鹏, 等. 爆破荷载在数值计算中的等效施加方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(1): 56-64. (ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, LIU Peng, et al. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic numerical simulation of blasting vibration[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(1): 56-64. (in Chinese))
- [12] 陈士海, 王明洋, 赵跃堂, 等. 岩石爆破破坏界面上的应力时程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1784-1788. (CHEN Shihai, WANG Mingyang, ZHAO Yuetang, et al. Time-stress history on interface between cracked and uncracked zones under rock blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1784-1788. (in Chinese))
- [13] 段克信. 用巷帮松裂爆破卸压维护软岩巷道[J]. *煤炭学报*, 1995, 20(3): 311-316. (DUAN Kexin. Maintenance of roadways in soft rocks by distress blasting of roadway-RIB[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(3): 311-316. (in Chinese))
- [14] ESEN S, ONEDERRA I, BILGIN H A. Modeling the size of the crushed zone around a blast hole[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(4): 485-495.

- [15] CHEN S G, ZHAO J, ZHOU Y X. UDEC modeling of afield explosion test[J]. *Fragblast*, 2000, 4(2): 149-163.

Nonlinear dynamic response analysis of blasting to adjacent high-pile wharf

YAO Lei, YAO Wenjuan

(*Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

Abstract: The blasting construction may cause potential risk to adjacent buildings. In order to reduce the risk effectively or even eliminate it, the accurate prediction of the influence of blasting construction is of much importance. Therefore, to ensure the stability of an adjacent pile wharf, a three dimensional nonlinear finite element model for the whole area of the blasting location and the high-pile wharf is established before the blasting construction around the wharf. Afterwards, under the effect of the blast loading and the most unfavorable load of high-piled wharf during service, the dynamic response of the nonlinear interaction between the internal structure of the harbor and the soil is calculated and analyzed. In line with the dynamic response which caused by the shock wave and delivered through soil that the wharf structure can withstand, and taking safety vibration velocity of the high pile wharf as the measuring standard, the biggest dosage of the single blast hole closest to the wharf is obtained. In the mean time, the displacement, bending moment, shear force and strain of the wharf are analyzed. According to the result, the displacement of the wharf under blasting load is of little influence, while the inclined piles inside the wharf bear more stress and shear force than the vertical piles. In conclusion, inclined piles are more vulnerable in the blasting construction.

Key words: blast; adjacent building; high-pile wharf; dynamic response