文章编号: 1001-7372(2010)02-0122-05

金属颗粒填充桩锤锤击模型的数值分析

胡均平, 郭 勇, 宋光伟, 徐 圆, 陈 伟
(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为分析填充金属颗粒对打桩锤锤击力的影响, 考虑填充金属颗粒的作用, 用集中质量块表示填充的金属颗粒, 用弹簧模拟金属颗粒与锤体相碰处的接触刚度, 用不同的集中质量块表示桩锤、砧座和桩帽, 用并联的弹簧、阻尼器表示锤垫, 用弹簧表示桩垫, 用阻尼器表示桩, 建立了平衡方程。结合状态空间法, 采用量纲一化计算方法分析了各参数对锤击力的影响, 并对金属颗粒填充桩锤与普通桩锤产生的锤击力进行了比较。结果表明: 在锤体内填充弹性模量小的材料制成的细金属颗粒, 使桩锤产生的锤击力有效作用时间更长, 能量传递效率更高。

关键词: 机械工程; 桩锤; 状态空间法; 锤击力; 金属颗粒; 接触刚度
中图分类号: U 415.5 文献标志码: A

Numerical Analysis for Impact Model of Pile Hammer Filled with Metal Particles

HU Jun-ping, GUO Yong, SONG Guang-wei, XU Yuan, CHEN Wei
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to analyze the influence of filled metal particles on impact force for hydraulic pile hammer, analytical solution of mathematic model for pile hammer filled with metal particles (PHFMP) considering effects of metal particles was presented. In the solution, lumped mass were used as metal particles, a spring was used as contact stiffness between metal particles and hammer body, different variable lumped masses were used as pile hammer, the ram and anvil, a spring and a dashpot were used as the anvil cushion and pile respectively. Using non-dimensional calculation, influence of parameter on impact force was analyzed combined with state space method. Then, impact forces generated by common pile hammer and PHFMP were compared. Results show that small metal particles made of low elastic modulus material make the longer valid time of impact force and make the higher energy transfer efficiency.

Key words: mechanical engineering; pile hammer; state space method; impact force; metal particle; contact stiffness

0 引 言

金属颗粒填充桩锤与普通桩锤一样由锤头、桩帽、砧座、锤垫、桩垫等组成, 但其锤体内部有一空腔充满金属颗粒。为分析桩锤的打击力, 各国学者对桩锤的锤击过程建立了数学模型并采用数值方法进行了分析。

对普通打桩锤, Take[1] 用集中质量块表示桩锤、桩帽, 用弹簧表示垫层, 建立了解析模型; 谢永建等[2] 用并联弹簧和阻尼表示锤垫, 用弹簧表示桩垫,

收稿日期: 2009-06-14
基金项目: 湖南省科学技术厅科技计划项目(2008JT1014)
作者简介: 胡均平(1965-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: hujunpingok@sina.com。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

建立了数学模型并得到了锤击力的解析解。对金属颗粒填充桩锤, 杨勇海等[3] 忽略填充的金属颗粒对冲击过程的影响, 将锤头等效为一集中质量, 用弹簧表示锤垫和桩垫, 用集中质量表示砧座和桩帽, 考虑桩的弹性, 用集中质量和弹簧表示桩, 建立了数学模型。

金属颗粒的应用可以增加一次冲击的贯入量, 提高冲击过程的能量转化率。然而为简化模型, 对金属填充桩锤的锤击分析模型往往忽略金属颗粒的影响。本文中笔者考虑填充金属颗粒的作用, 采用接触刚度模拟金属颗粒与锤体的相互作用, 建立了新的模型, 并结合状态空间法, 采用量纲一化计算方法分析了金属颗粒对锤击力的影响。

1　锤击模型的推导

打桩时, 桩顶产生一维纵向波传向桩底, 由波动理论可知, 在任何反射波到达桩顶以前, 桩顶的锤击力 F 与波速 v 成正比[4-5], 即

$$v = F/Z \tag{1}$$

式中: Z 为桩的阻抗, 与桩弹性模量 E_p、横截面积 A_p 和轴向波速 c_p 有关, 即 $Z=\frac{E_pA_p}{c_p}$。基于应力波的阻抗也是结构动力学中的阻尼[6-7], 桩可以用一阻尼器代替。

假设金属颗粒填满空腔且颗粒间无间隙, 可以将填充的金属颗粒等效为一个以粗糙表面和锤头接触的金属块。不考虑金属颗粒的阻尼作用, 用弹簧模拟金属颗粒与锤体的接触刚度。考虑锤垫的粘弹性, 桩垫的弹性, 分别用不同的集中质量块表示桩锤、桩帽, 用并联的弹簧、阻尼器表示锤垫, 用弹簧表示桩垫, 用阻尼器表示桩, 金属颗粒填充桩锤的锤击模型如图 1 所示。图 1 中, v_0 为桩锤锤击速度; m_f、m_h、m_a、m_p 分别为填充金属、桩锤、砧座、桩的质量; y_1、y_2、y_3、y_4 分别为桩锤、填充金属、砧座、桩的位移; k_{c1}、k_{c2} 分别为锤垫和桩垫的刚度系数; k_f 为填充金属与锤体接触的等效刚度系数; C_{c1} 为锤垫等效阻尼系数。

1.1　填充金属颗粒与锤体接触刚度系数的确定

将金属块粗糙表面上的单个微突体, 即接触处的金属颗粒, 近似等效为球体, 其等效曲率半径为 R。当球体与真实平面在接触点的法线方向受载荷 p 作用时, 将产生法向变形 δ, 若其接触区域半径为 r, 则有[8-9]

$$p = \frac{4}{3}ER^{1/2}\delta^{3/2} \tag{2}$$

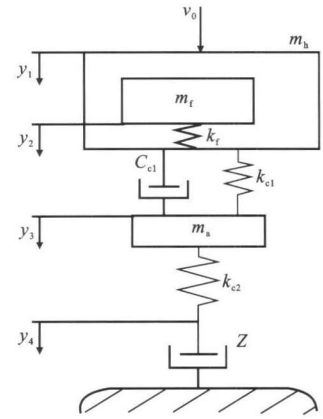


图 1　金属颗粒填充桩锤的锤击模型

Fig. 1　Impact Model of PHFMP

$$r = \left(\frac{3pR}{4E}\right)^{1/3} \tag{3}$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-u_1^2}{E_1} + \frac{1-u_2^2}{E_2} \tag{4}$$

式中: E_1、u_1 为填充金属颗粒材料的弹性模量和泊松比; E_2、u_2 为锤体材料的弹性模量和泊松比。

可见, E 随填充金属颗粒材料弹性模量的减小而减小。

根据式(1)、(2), 单个微凸体与平面接触的法向接触刚度为

$$k_n = 2E\sqrt{\frac{a}{\pi}} \tag{5}$$

金属块与锤体接触刚度为

$$k_f = \int_c k_n n(a)\,\mathrm{d}a \tag{6}$$

式中: a 为微凸体的接触面积; $n(a)$ 为接触面积为 a 的接触点的大小分布函数; l 为最大接触点面积; c 为临界接触面积。

由式(4) ~ (6)得, 金属颗粒材料的弹性模量越小, E 值越小, 法向接触刚度越小, 金属块与锤体的接触刚度也越小; 金属颗粒越细, 微突体的接触面积越小, 金属块与锤体的接触刚度越小。因此, 金属块与锤体接触刚度随填充金属颗粒材料的弹性模量的减小而减小, 随接触面积的减小而减小。

1.2　数学模型

图 1 所示的运动方程组为

$$\left.\begin{aligned} &m_h\ddot{y}_1 + k_f(y_1-y_2) + k_{c1}(y_1-y_3) + C_{c1}(\dot{y}_1-\dot{y}_3) = 0\\ &m_f\ddot{y}_2 + k_f(y_2-y_1) = 0\\ &m_a\ddot{y}_3 + k_{c1}(y_3-y_1) + C_{c1}(\dot{y}_3-\dot{y}_1) + k_{c2}(y_3-y_4) = 0\\ &Z\dot{y}_4 + k_{c2}(y_4-y_3) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.3 模型计算

采用量纲一化计算方法对模型进行计算。令量纲一的时间 $t^* = Zt/m_h$, 填充颗粒与锤体质量比 $m_f^* = m_f/m_h$, 砧座和桩帽总质量与锤体质量比 $m_d^* = m_d/m_h$, 桩垫量纲一的刚度 $k_{c1}^* = k_{c1}m_h/Z^2$, 填充金属颗粒与锤体接触的量纲一的刚度 $k_f^* = k_f m_h/Z^2$, 锤垫的量纲一的刚度 $k_{c2}^* = k_{c2}m_h/Z^2$, 桩垫的量纲一的阻尼 $C_{c1}^* = C_{c1}/Z$, 量纲一的位移 $y^* = Zy/(m_h v_0)$。由以上可得, $\mathrm{d}t^*/\mathrm{d}t = Z/m_h$, $m_f = m_h m_f^*$, $m_d = m_h m_d^*$, $k_{c1} = k_{c1}^* Z^2/m_h$, $k_f = k_f^* Z^2/m_h$, $k_{c2} = k_{c2}^2 Z^2/m_h$, $y = m_h v_0 y^*/Z$, $C_{c1} = C_{c1}^* Z$, $\dot{y} = v_0 \dot{y}^*$, $\ddot{y} = Z v_0 \ddot{y}^*/m_h$。令 $x_1 = y_1^*$, $x_2 = \dot{y}^*$, $x_3 = y_2^*$, $x_4 = \dot{y}_2^*$, $x_5 = y_3^*$, $x_6 = \dot{y}_3^*$, $x_7 = y_4^*$, $x_8 = \dot{y}_4^*$, 代入式(7), 则有

$$\left.\begin{aligned}
\dot{x}_2 &= \ddot{x}_2\\
\dot{x}_2 &= k_f^*(x_3 - x_1) + k_{c1}^*(x_5 - x_1) + C_{c1}^*(x_6 - x_2)\\
\dot{x}_4 &= \ddot{x}_3\\
\ddot{x}_3 &= \frac{k_f^*}{m_f^*}(x_1 - x_3)\\
\dot{x}_6 &= \ddot{x}_5\\
\ddot{x}_5 &= \frac{k_{c1}^*}{m_d^*}(x_1 - x_5) + \frac{C_{c1}^*}{m_d^*}(x_2 - x_6) + \frac{k_{c2}^*}{m_d^*}(x_7 - x_5)\\
\dot{x}_8 &= \ddot{x}_7 = k_{c2}^*(x_5 - x_7)
\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

在桩锤撞击桩的瞬间, 桩锤锤击速度为 v_0, 对应的量纲一的量 $x_2(0) = \dot{y}_1^*(0) = 1$, 桩垫及桩帽速度、加速度均为 0。因此, 对应的初始条件为

$$\left.\begin{aligned}
&x_1(0) = x_3(0) = x_5(0) = x_7(0)\\
&x_2(0) = x_4(0) = v_0\\
&x_6(0) = x_8(0) = 0
\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

量纲一的锤击力 F^* 为

$$F^* = \frac{F}{Zv_0} = \frac{Z\ddot{y}_1}{v_0} = x_8 \quad (10)$$

2 参数影响分析

由状态空间方程式(8)可知, 桩顶锤击力的大小主要由与填充金属颗粒和垫层相关的 5 个量纲一的参数确定, 即金属块与锤体接触的量纲一的刚度系数 k_f^*, 填充质量比 m_f^*, 锤垫的量纲一的刚度系数 k_{c1}^* 和量纲一的阻尼系数 C_{c1}^*, 桩垫的量纲一的刚度系数 k_{c2}^*。

2.1 填充金属颗粒等效参数

以工程中常用的参数为例对金属块与锤体接触的量纲一的刚度系数 k_f^*、填充质量比 m_f^* 进行研究。取 $m_d^* = 0.2$, $C_{c1}^* = 0.2$, $k_{c2}^* = 4$, $k_{c1}^* = 4$, $k_f^* = 2$, 计算不同 m_f^* 时的锤击力(图 2); 取 $m_d^* = 0.2$, $C_{c1}^* = 0.2$, $k_{c2}^* = 4$, $k_{c1}^* = 4$, $m_f^* = 0.15$, 计算不同 k_f^* 时的锤击力(图 3)。

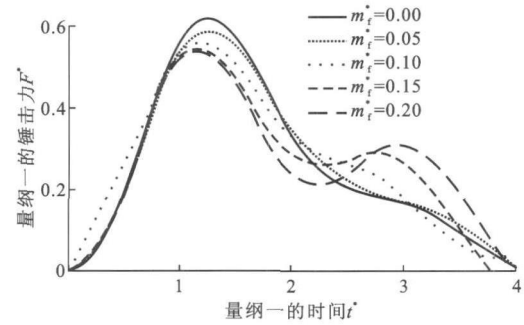


图 2 锤击力随 m_f^* 的变化曲线

Fig. 2 Variations of Impact Forces vs m_f^*

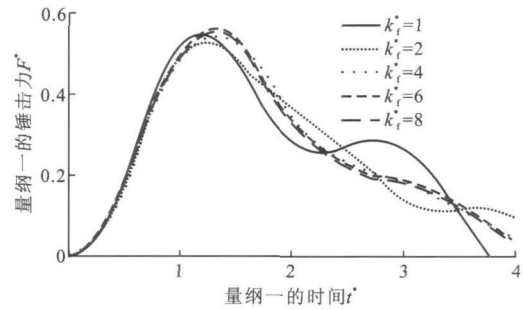


图 3 锤击力随 k_f^* 的变化曲线

Fig. 3 Variations of Impact Forces vs k_f^*

为增加桩锤的工作效率, 理想的锤击力波形应为矩形波[10-11]。图 2 表明: 填充质量比 $m_f^* > 0.1$ 时出现再次冲击现象, 所产生的锤击力波形随着 m_f^* 的增大, 越来越接近矩形; 当 $m_f^* \geqslant 0.15$ 时, 锤击力峰值基本不变; 取 $0.1 \leqslant m_f^* \leqslant 0.15$ 时, 可以获得比较理想的锤击力波形。

图 3 表明: $k_f^* \leqslant 2$ 时, 存在明显的再次冲击现象; k_f^* 越小, 所产生的锤击力波形越接近矩形, 作用时间越长; k_f^* 对锤击力峰值作用不明显。因此, 为提高桩锤的效率, 应选取较小的 k_f^* 值。由 $k_f^* = k_f m_h/Z^2$, 结合式(4)~(6)可得, 弹性模量小的材料制成的细颗粒与锤体接触时, 其 k_f^* 值较小。为提高桩锤的工作效率, 在工程实践中, 填充的金属颗粒应选择弹性模量小的材料制成的细颗粒。

2.2 垫层参数

以工程中通常的参数为例, 对锤垫的量纲一的刚度系数 k_{c1}^* 和量纲一的阻尼系数 C_{c1}^*、桩垫的量纲一的刚度系数 k_{c2}^* 进行分析。取 $m_d^* = 0.2$, $C_{c1}^* = 0.2$, $k_{c2}^* = 4$, $k_f^* = 2$, $m_f^* = 0.15$, 计算不同 k_{c1}^* 时的锤

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

击力(图 4); 取 $k_{c1}^{*}=4$, $m_{d}^{*}=0.15$, $k_{c2}^{*}=4$, $k_{f}^{*}=2$, $m_{f}^{*}=0.15$, 计算不同 C_{c1}^{*} 时的锤击力(图 5); 取 $m_{d}^{*}=0.2$, $C_{c1}^{*}=0.2$, $k_{c1}^{*}=4$, $k_{f}^{*}=2$, $m_{f}^{*}=0.15$, 计算不同 k_{c2}^{*} 时的锤击力(图 6)。

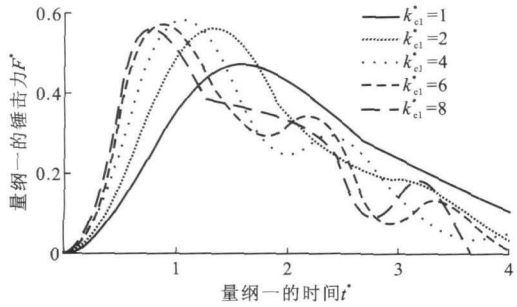


图 4　锤击力随 k_{c1}^{*} 的变化曲线

Fig. 4　Variations of Impact Forces vs k_{c1}^{*}

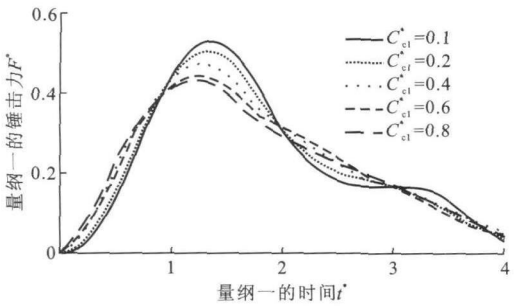


图 5　锤击力随 C_{c1}^{*} 的变化曲线

Fig. 5　Variations of Impact Forces vs C_{c1}^{*}

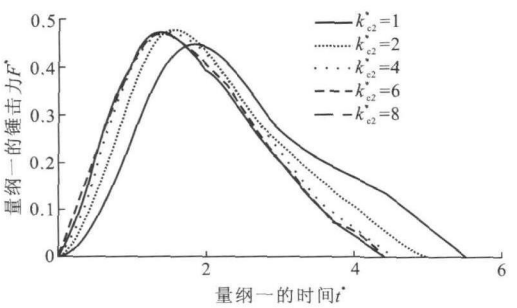


图 6　锤击力随 k_{c2}^{*} 的变化曲线

Fig. 6　Variations of Impact Forces vs k_{c2}^{*}

图 4~ 6 表明: 增大 k_{c1}^{*} 可使锤击力峰值增大, 但锤击力的作用时间减短; k_{c2}^{*} 对锤击力峰值的影响不明显, 但若减小 k_{c2}^{*}, 可使锤击力作用时间增长; C_{c1}^{*} 对锤击力的作用时间影响不明显, 但若增大 C_{c1}^{*}, 可使锤击力的峰值减小。

3　工程算例

为比较金属颗粒填充桩锤与普通桩锤的打桩效果, 将金属颗粒填充桩锤的桩顶计算锤击力与普通桩锤桩顶产生的锤击力波进行比较。桩采用预应力高强混凝土管(PHC)桩, 外直径 600 mm, 壁厚 105 mm, 长 15 m, 弹性模量约为 36.0 GPa。普通桩锤采用 ZCY70 所配备的液压锤, 参数见表 1[12-13]。金属颗粒填充桩锤质量为 7 000 kg, 填充的细小铅粒质量为 1 000 kg, 其他部分与普通桩锤相同。波在桩身中传播的速度为 3 800~ 4 000 m·s^{-1}。金属颗粒填充桩锤与普通桩锤产生的锤击力如图 7 所示。由图 7 可见, 金属颗粒填充桩锤产生的锤击力比普通桩锤产生的锤击力峰值要小, 作用时间更长, 锤击力波形更接近矩形。

表 1　ZCY70 液压锤参数

Tab. 1　Parameters for ZCY70 Hydraulic Pile Hammer

锤体质量/kg	砧座和桩帽质量/kg	锤垫刚度/(10^9 N·m^{-1})	桩垫刚度/(10^9 N·m^{-1})	桩锤落高/m
7 000	1 500	4.24	2	1.1

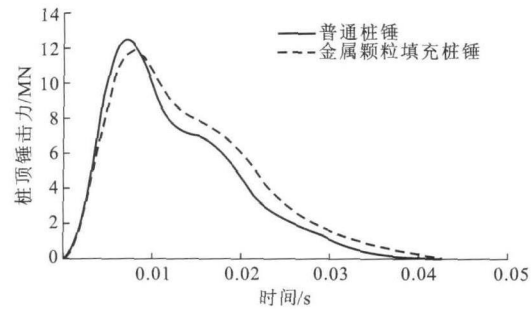


图 7　金属颗粒填充桩锤与普通桩锤的锤击力

Fig. 7　Impact Forces of Common Pile Hammer and Hammer Filled with Metal Particles

4　结　语

(1) 提出了金属颗粒填充桩锤的解析模型, 用集中质量块表示填充的金属颗粒质量, 用弹簧模拟金属颗粒与锤体相碰处的接触刚度; 将桩锤、桩帽和砧座用集中质量块表示; 用一弹簧表示桩垫; 用一并联的弹簧和阻尼表示锤垫。考虑了填充的金属颗粒、桩锤、锤垫、桩帽和砧座、桩垫的相互作用, 较好地模拟了打桩的锤击机理。

(2) 金属颗粒填充桩锤产生的锤击力比普通桩锤产生的锤击力产生的锤击力作用时间更长, 锤击力波形更接近矩形。

(3) 为获得更好的能量传递效率, 在金属颗粒的选择上, 应选择材料弹性模量小的细颗粒, 金属颗粒填充的质量比应取 $0.1 \leqslant m_{f}^{*} \leqslant 0.15$。

参考文献:

References:

[1] TAKE W A, VALSANGKAR A J, RANDOLPH M

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

F. Analytical Solution for Pile Hammer Impact[J]. Computers and Geotechnics, 1999, 25(2): 57-74.

[2] 谢永建, 朱合华, 王怀忠, 等. 打桩锤击模型的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 171-176.
XIE Yong-jian, ZHU He-hua, WANG Huai-zhong, et al. Analytical Solution for Model of Pile Hammer Impact[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 171-176.

[3] 杨永海, 吕景忠, 隋 振, 等. 加速下落冲击式液压桩锤设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 150-152, 143.
YANG Yong-hai, LU Jing-zhong, SUI Zhen, et al. Design of Accelerated Impact Hydraulic Pile Hammer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 150-152, 143.

[4] 冯振宇, 王忠民, 樊丽俭. 粘弹性点支承粘弹性桩的动力稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 67-70.
FENG Zhen-yu, WANG Zhong-min, FAN Li-jian. Dynamic Stability Analysis of Visco-elastic Pile with Point Visco-elastic Supports[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 67-70.

[5] CHEN Ren-peng, WANG Shi-fang, CHEN Yun-min, et al. Study on Pile Drivability with One Dimensional Wave Propagation Theory[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2003, 4(6): 683-693.

[6] 林耀雄, 陈 燊. 基于弹性波动力学理论的结构阻尼[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(增 1): 40-44.
LIN Yao-xiong, CHEN Shen. Structural Damping Coefficient Based on Elastic Stress Wave Theory[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(S1): 40-44.

[7] 屠毓敏, 俞洪良. 负摩擦桩非线性分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 31-34.
TU Yu-min, YU Hong-liang. Nonlinear Analysis of Negative Pile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 31-34.

[8] 张学良, 黄玉美, 韩 颖. 基于接触分形理论的机械结合面法向接触刚度模型[J]. 中国机械工程, 2000, 11(7): 727-729.
ZHANG Xue-liang, HUANG Yu-mei, HAN Ying. Fractal Model of the Normal Contact Stiffness of Machine Joint Surfaces Based on the Fractal Contact Theory[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(7): 727-729.

[9] CHEHAB A G, EL NAGGAR M H. Design of Efficient Base Isolation for Hammers and Presses[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(2): 127-141.

[10] 李夕兵, 刘德顺, 刘爱华. 冲击机械合理加载波形的研究[J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(2): 116-119.
LI Xi-bing, LIU De-shun, LIU Ai-hua. Study on Reasonable Loading Stress Waveforms for Impact Machines[J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 29(2): 116-119.

[11] 雷林源. 桩基动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 35-41.
LEI Lin-yuan. Pile Dynamics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 35-41.

[12] 王 进, 马军星. 液压高速夯实机及其应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(1): 51-53.
WANG Jin, MA Jun-xing. Hydraulic High-speed Compactor and Application[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(1): 51-53.

[13] 刘永跃, 蒋璐璐, 高雁北. 冲击压实在高填方施工中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(2): 55-57.
LIU Yong-yue, JIANG Lu-lu, GAO Yan-bei. Application of Impact Compaction in High-filled Embankment Construction[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(2): 55-57.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net