

# 不同能级强夯施工下地表振动衰减规律的探讨

邵 慧<sup>1</sup>, 傅海舰<sup>2</sup>, 康梅林<sup>1</sup>

(1. 山东水利职业学院 建筑工程系, 山东 日照 276826; 2. 日照市公路管理局, 山东 日照 276826)

**摘要:**利用有限差分法对不同能级强夯施工引起的环境振动进行数值模拟研究,分析了不同能级强夯引起的地表振动衰减规律,强夯能级、土层厚度对强夯引起地表振动的影响。得出不同能级强夯施工作用下地表振动衰减规律,地表起伏对地表振动加速度传播的影响。

**关键词:**不同能级强夯;地基处理;振动;数值模拟

**中图分类号:**TU 472.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-2324(2009)04-0598-07

## THE RESEARCH OF VIBRATION FOR DYNAMIC COMPACTION CONSTRUCTION

SHAO Hui<sup>1</sup>, FU Hai-jian<sup>2</sup>, KANG Mei-lin<sup>1</sup>

(1. Shandong Water Polytechnic, Rizhao 276826, China; 2. Highway Bureau of Rizhao, Rizhao 276826, China)

**Abstract:** Use finite difference calculus method to analysis express energy level dynamic compaction. A full analysis was made on the law of vibration with different energy level and the thick of soil. The vibration law of decay was put forward. Present the influence of land form to the vibration of accelerated speed.

**Key words:** Dynamic compaction; foundation treatment; vibrate; numerical analysis

## 0 前言

强夯技术加固效果显著,经济易行,施工快捷,在工程中得到广泛使用,但美中不足的是施工时产生的振动和噪音,尤其是高能级强夯施工时产生的振动影响亟待研究<sup>[1-5]</sup>。施工噪音扰民,振动可能在一定范围内对其它的建(构)筑物和建筑物内安装和使用的设备、仪表仪器等产生不利影响,这也是强夯法进一步发展的瓶颈,强夯施工引起的环境振动污染也是引起纠纷的原因,如何消除和减小影响也是众多岩土工程者关注的问题。以前,针对强夯环境振动的研究主要是关于低能级强夯,随着高能级强夯的不断使用,了解和评价高能级强夯作用下地表振动的衰减规律成为迫切需要。因此本文通过有限差分法进行数值模拟,分析了不同能级强夯引起的地表振动衰减规律,强夯能级、土层厚度和减振沟深度对强夯引起地表振动的影响。针对地表高低起伏的工程问题,分析了高差对强夯振动的影响。为地基处理规范中强夯部分的修订和发展提供实用参数,进而指导不同能级强夯地基处理的工程实践。

## 1 高能级强夯地表振动数值模拟研究

计算采用轴对称的二维模型,计算半径取 200.0 m,单元尺寸为 0.25 m × 0.25 m。土体本构模型采用 Mohr - Coulomb 模型。边界条件为:在远离夯锤的竖向边界,固定水平向位移,由于径向距离取得很大,因此边界处理比较简单,计算表明这样的边界处理对结果影响不大;在土层底部,固定竖向和水平向的位移。

模拟强夯能级分别为 6000 kN · m、10000 kN · m 和 16000 kN · m,各能级的夯锤锤重均为 400 kN,落

收稿日期:2009-04-08

作者简介:邵 慧(1982-),女,助教,在读硕士,主要从事岩土工程教学与研究工作。

\* 通讯作者: Author for correspondence. E - mail: zxniu@sdau.edu.cn

距分别为 15.0 m、25.0 m 和 40.0 m。荷载模式的施加如图 1 所示,假设锤底的应力均匀分布,在锤土接触面上施加三角形荷载。

由于强夯冲击荷载作用时间极短,粘滞力对动力反应的影响可忽略不计,由夯锤运动方程及锤底接触应力  $p$  与夯沉量  $U$  之间的关系可得<sup>[5,6]</sup>:  $m\dot{U} = -\pi r^2 p = -SU, U = u \sqrt{\frac{m}{S}} \sin \sqrt{\frac{S}{m}} t$ , 代入后可得  $p = \frac{u \sqrt{mS}}{\pi r^2} \sin \sqrt{\frac{S}{m}} t$ ; 当  $t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{S}}$  时,锤底接触应力达到最大值,又因加载时间和卸载时间相同,即可得荷载峰值和荷载持续时间。当施加三角形荷载时亦可如此计算,公式如下:

$$p_{max} = \frac{u \sqrt{mS}}{\pi r^2} \tag{1}$$

$$t_N = \pi \sqrt{\frac{m}{S}} \tag{2}$$

式中:  $u = \sqrt{2gh}$ , 为夯锤落至地表时的速度;  $S = \frac{2rE}{1-v^2}$ , 为弹性常数;  $m$  为夯锤的质量(kg);  $r$  为夯锤的半径(m);  $E$  为土的弹性模量(MPa);  $v$  为土的泊松比;  $h$  为落距(m);  $p_{max}$  (kPa) 为锤底的最大接触应力;  $t_N$  (s) 为锤土接触应力的时间。

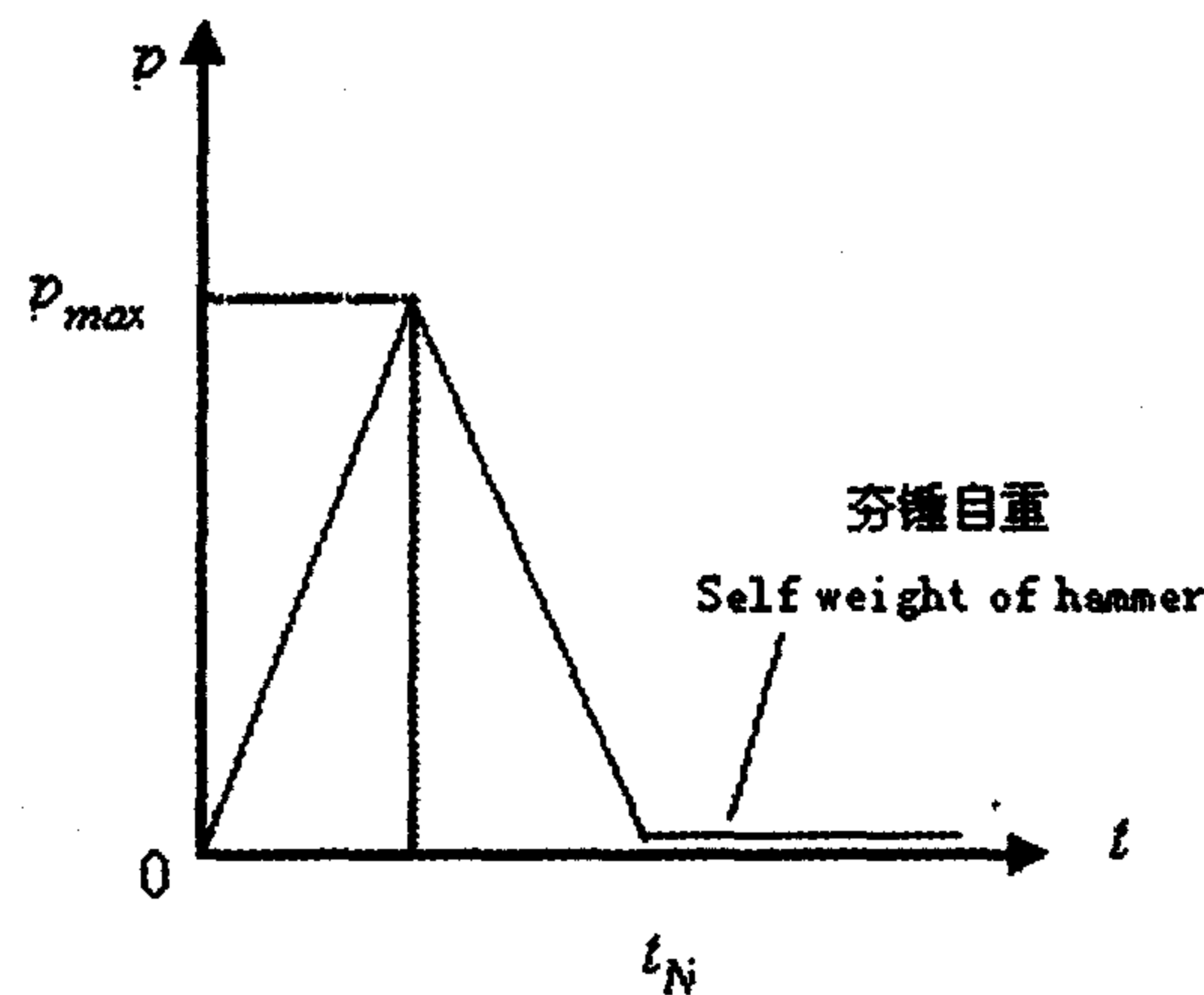


图 1 锤底应力随时间变化示意图

Fig. 1 The stress ~ time curve under hammer

计算土层厚度选取了 3 种情况,分别为 15.0 m、25.0 m 和 35.0 m,不同厚度的土层计算参数如表 1 所示。

表 1 土层参数

Table 1 The parameter of soil

土层 Soil	厚度 Thickness/m	密度 Density/kg/m <sup>3</sup>	Es/MPa	c/kPa	φ/°	泊松比 Poisson ratio
1	9	2000	27	15	33	0.224
2	6	1967	5.5	39	22	0.35
3(1)	10	1900	15	20	20	0.4
3(2)	20	1900	15	20	20	0.4

注:当土层厚度为 15.0 m 时,选用表中 1、2 层参数;当土层厚度为 25.0 m 时,选用表中 1、2、3(1)层参数;当土层厚度为 35.0 m 时,选用表中 1、2、3(2)层参数。

Note: When the soil thickness is 15.0 m, choose 1 or 2 parameter in the table; When the soil thickness is 25.0 m, choose 1, 2 or 3(1) parameter; When the soil thickness is 35.0 m, choose 1, 2 or 3(2) parameter.

## 2 高能级强夯地表振动数值模拟研究结果

### 2.1 强夯作用下地表振动衰减规律

强夯振动传播和衰减的规律是对强夯振动效应进行评价的基础。研究表明,强夯引起的地面振动加速度幅值随着夯点距离增加按负幂指数曲线的形式急剧衰减,可以用式(3)表示<sup>[7]</sup>:

$$a = ke^{-\beta L} \tag{3}$$

式中, $\beta$ 为衰减指数; $k$ 为当量系数; $a$ 为测点最大振动加速度( $m/s^2$ ); $L$ 为测点至夯击点的水平距离(m)。

通过计算不同土层厚度(15.0 m、25.0 m 和 35.0 m)在不同能级(6000 kN·m、10000 kN·m 和 16000 kN·m)强夯作用下地表振动情况,得到了距夯点不同距离处地表的振动最大加速度值,通过线性回归分析得到了各种情况下的衰减指数 $\beta$ 值和当量系数 $k$ 值,分别如表 2、3 和表 4、5 所示。

表 2 列出不同情况下地表竖向加速度幅值衰减指数 $\beta$ 值。当强夯能级分别为 6000 kN·m、10000 kN·m 和 16000 kN·m 时,不同土层厚度条件下 $\beta$ 的平均值分别为 0.0732、0.0769 和 0.0769。这表明地表竖向振动加速度随距离的衰减指数 $\beta$ 值基本不受强夯能级和土层厚度的影响。

表 3 列出不同情况下地表径向加速度幅值衰减指数 $\beta$ 值,当强夯能级分别为 6000 kN·m、10000 kN·m 和 16000 kN·m 时,不同土层厚度条件下 $\beta$ 的平均值分别为 0.0827、0.0841 和 0.0846。这表明地表径向振动加速度随距离的衰减指数 $\beta$ 基本不受强夯能级和土层厚度的影响。

比较表 2 和表 3,可以发现,径向加速度幅值的衰减指数 $\beta$ 要大于竖向加速度幅值的衰减指数 $\beta$ ,这表明相同场地条件下,径向加速度比竖向加速度衰减更快。

表 2 不同能级下竖向加速度幅值衰减指数  $\beta$  值

Table 2 Decaying exponential  $\beta$  and energy level

土层厚度 Soil thickness/m	6000 kN·m	10000 kN·m	16000 kN·m
15.0	0.0741	0.0751	0.0749
25.0	0.0731	0.078	0.0780
35.0	0.0724	0.0776	0.0777

表 3 不同能级下径向加速度幅值衰减指数  $\beta$  值

Table 3 Decaying exponential  $\beta$  and energy level

土层厚度 Soil thickness/m	6000 kN·m	10000 kN·m	16000 kN·m
15.0	0.0837	0.0843	0.0843
25.0	0.0831	0.0824	0.0843
35.0	0.0814	0.0855	0.0851

表 4 列出了不同情况下地表竖向加速度幅值衰减公式中的当量系数 $k$ 值,不同土层厚度条件下, $k$ 值相差不大。当强夯能级分别为 6000 kN·m、10000 kN·m 和 16000 kN·m 时,15 m、25 m 和 35 m 土层厚度条件下 $k$ 值的平均值分别为 0.435、0.707 和 0.913。

表 5 列出不同情况下地表径向加速度幅值衰减公式中的 $k$ 值,不同土层厚度条件下, $k$ 值相差不大。当强夯能级分别为 6000 kN·m、10000 kN·m 和 16000 kN·m 时,15 m、25 m 和 35 m 土层厚度条件下 $k$ 值的平均值分别为 3.161、4.278 和 5.175。

以上分析表明地表竖向和径向加速度随距离衰减的当量系数 $k$ 值受土层厚度影响不大,但随着强夯能级的增大而增大。

表 4 不同能级下竖向加速度幅值衰减的当量系数  $k$  值

Table 4 Equivalent parameter  $k$  and energy level

土层厚度 Soil thickness/m	6000 kN·m	10000 kN·m	16000 kN·m
15.0	0.444	0.632	0.729
25.0	0.431	0.762	1.065
35.0	0.429	0.728	0.944

表5 不同能级下径向加速度幅值衰减的当量系数 k 值  
Table 5 Equivalent parameter k and energy level

土层厚度 Soil thickness/m	6000 kN · m	10000 kN · m	16000 kN · m
15.0	3.361	4.358	5.092
25.0	3.135	3.840	5.070
35.0	2.986	4.636	5.364

通过以上分析可以得出,无论是竖向加速度还是径向加速度,衰减指数  $\beta$  与强夯能级和土层厚度关系不大,另外径向加速度的  $\beta$  值大于竖向加速度的  $\beta$  值;当量系数 k 的大小与土层厚度关系不大,但随着强夯能级的增大而增大。

2.2 不同能级时地表振动随距离的衰减

图2是土层厚度15.0 m时,不同能级作用下地表竖向加速度峰值随水平距离的衰减曲线,在距离夯点5.0 m处,能级为6000 kN · m、10000 kN · m和16000 kN · m的竖向加速度峰值分别为10.74 m/s<sup>2</sup>、13.53 m/s<sup>2</sup>和15.17 m/s<sup>2</sup>;随着距夯点水平距离越来越大,竖向加速度峰值迅速衰减,在30 m处已小于0.1 m/s<sup>2</sup>,不同能级的竖向加速度峰值分别为0.062 m/s<sup>2</sup>、0.076 m/s<sup>2</sup>和0.093 m/s<sup>2</sup>。另外,本次研究还计算了土层厚度为25.0 m和35.0 m时,竖向加速度峰值随水平距离的衰减曲线,与15.0 m的情况基本相同。

图3是土层厚度15.0 m时,不同能级作用下地表径向加速度峰值随水平距离的衰减曲线,在距离夯点5.0 m处,能级为6000 kN · m、10000 kN · m和16000 kN · m的径向加速度峰值分别为20.39 m/s<sup>2</sup>、22.23 m/s<sup>2</sup>和30.27 m/s<sup>2</sup>;随着距夯点的水平距离越来越大,径向加速度峰值迅速衰减,在距夯点30.0 m处已小于0.5 m/s<sup>2</sup>,不同能级的径向加速度峰值分别为0.215 m/s<sup>2</sup>、0.263 m/s<sup>2</sup>和0.314 m/s<sup>2</sup>。另外,本次研究还计算了土层厚度为25.0 m和35.0 m时,径向加速度峰值随水平距离的衰减曲线,与15.0 m的情况基本相同。

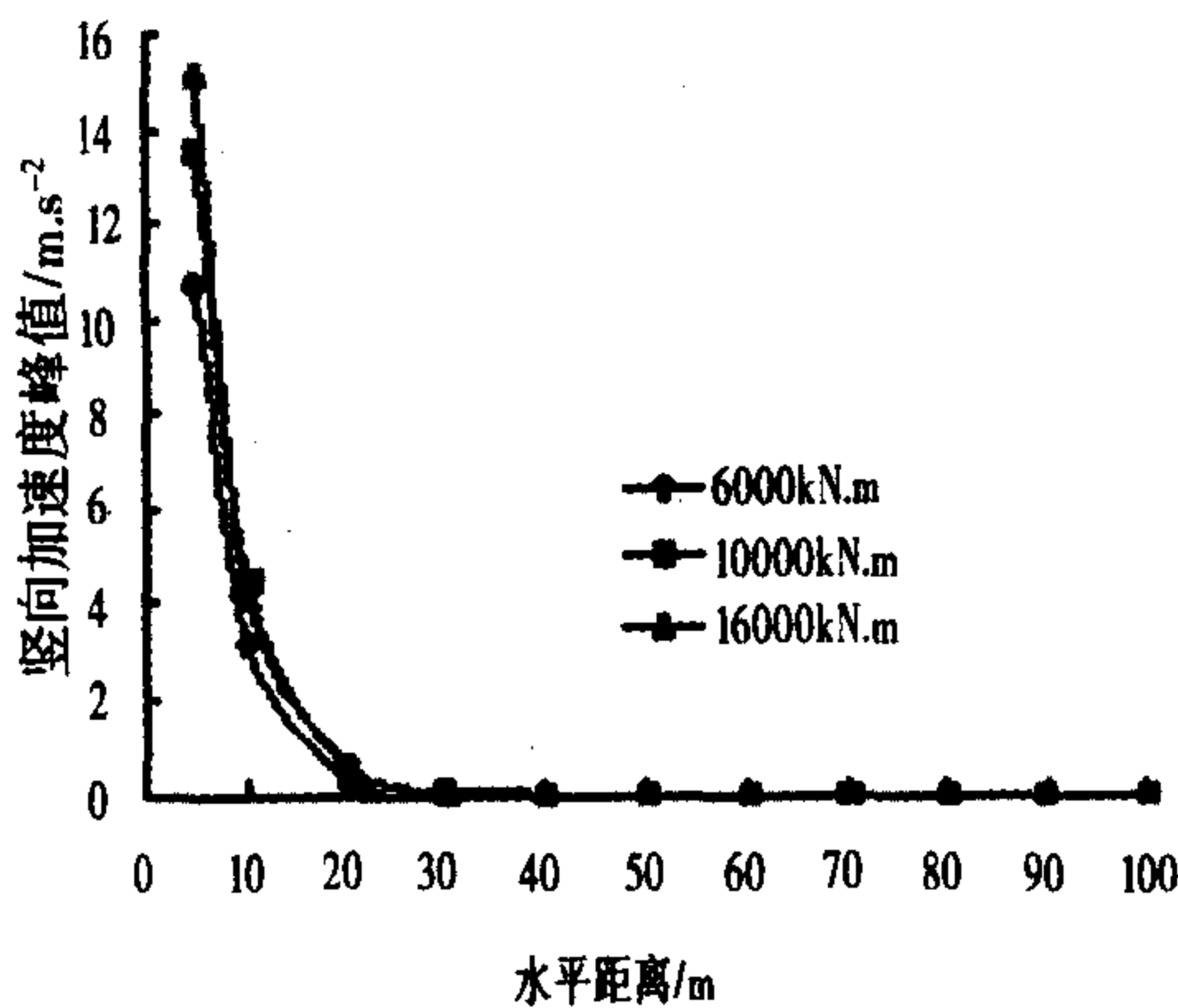


图2 能级变化时地表竖向加速度峰值随距离的衰减曲线  
Fig.2 Decay curve of vertical accelerated speed and distance

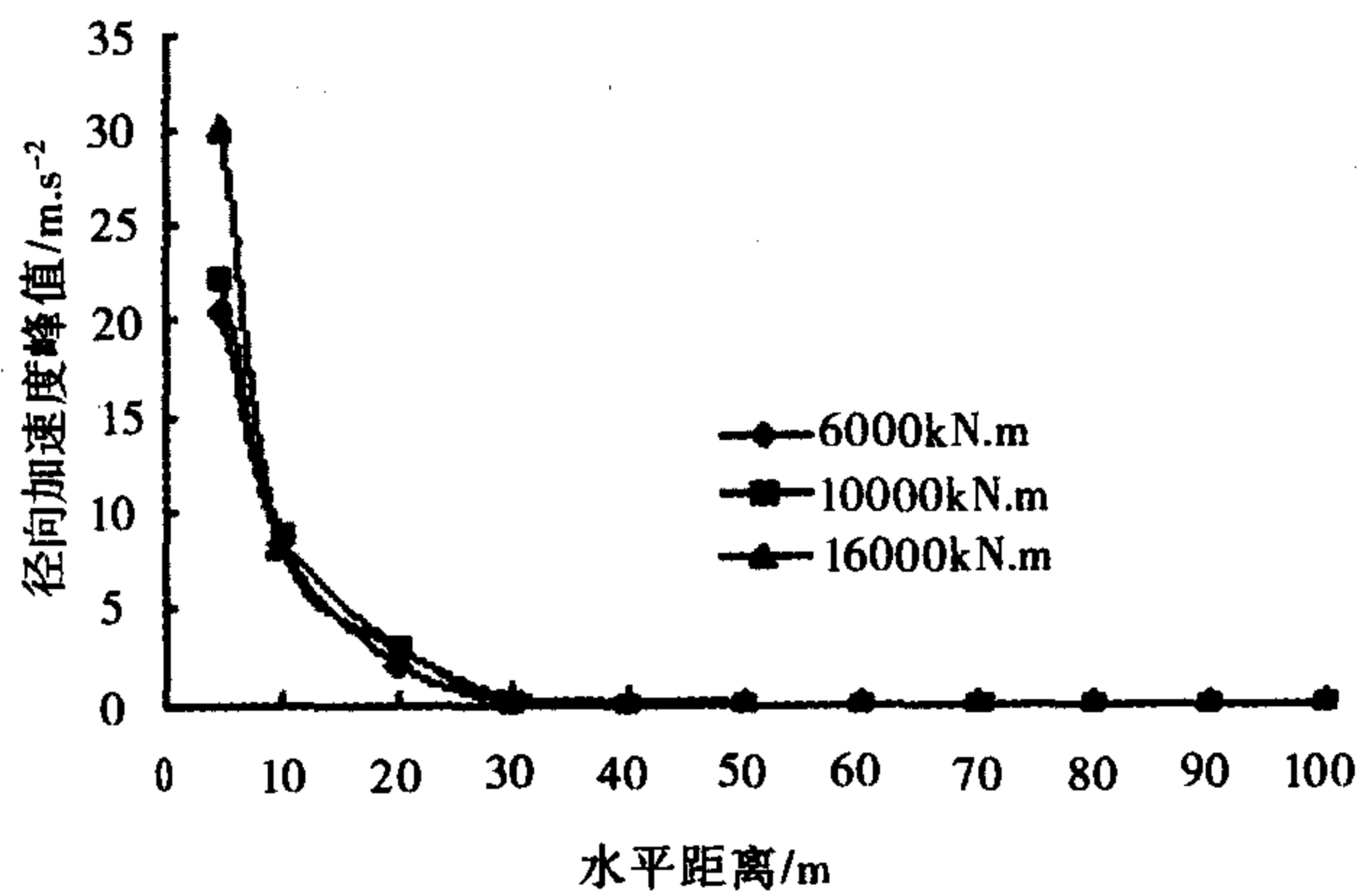


图3 能级变化时地表径向加速度峰值随距离的衰减曲线  
Fig.3 Decay curve of radial accelerated speed and distance

图4是以10000 kN · m强夯为例,分析土层厚度对地表加速度衰减的影响,从图中可以看出,无论是竖向加速度还是径向加速度,不同土层厚度的3条曲线基本重合,可见土层厚度的变化对地表振动加速度的衰减几乎没有影响。

2.3 地表起伏对地表加速度传播的影响

图5为地表起伏时竖向加速度的时程曲线,图5(a)为距夯点7.0 m处的地表竖向加速度随时间的变化,当强夯在远处进行时,曲线变化较为剧烈,而当强夯在低处和当地表没有起伏时,曲线随时间变化较为平缓。当强夯在远处进行时,竖向加速度的最大值为43.15 m/s<sup>2</sup>;而当强夯在低处进行时,竖向加速度的

最大值为  $0.02 \text{ m/s}^2$ ;当地表没有起伏时,竖向加速度的最大值为  $6.83 \text{ m/s}^2$ 。可见,当地表存在起伏时,距夯点  $7.0 \text{ m}$  处地表竖向加速度会有所变化:当强夯在低处硬质场地进行施工时,低处场地的地表竖向加速度比地表没有起伏增大了 5 倍多;而当强夯在低处填土场地进行施工时,高处岩质地基的地表竖向加速度比地表没有起伏时减小了 99%,可以忽略。

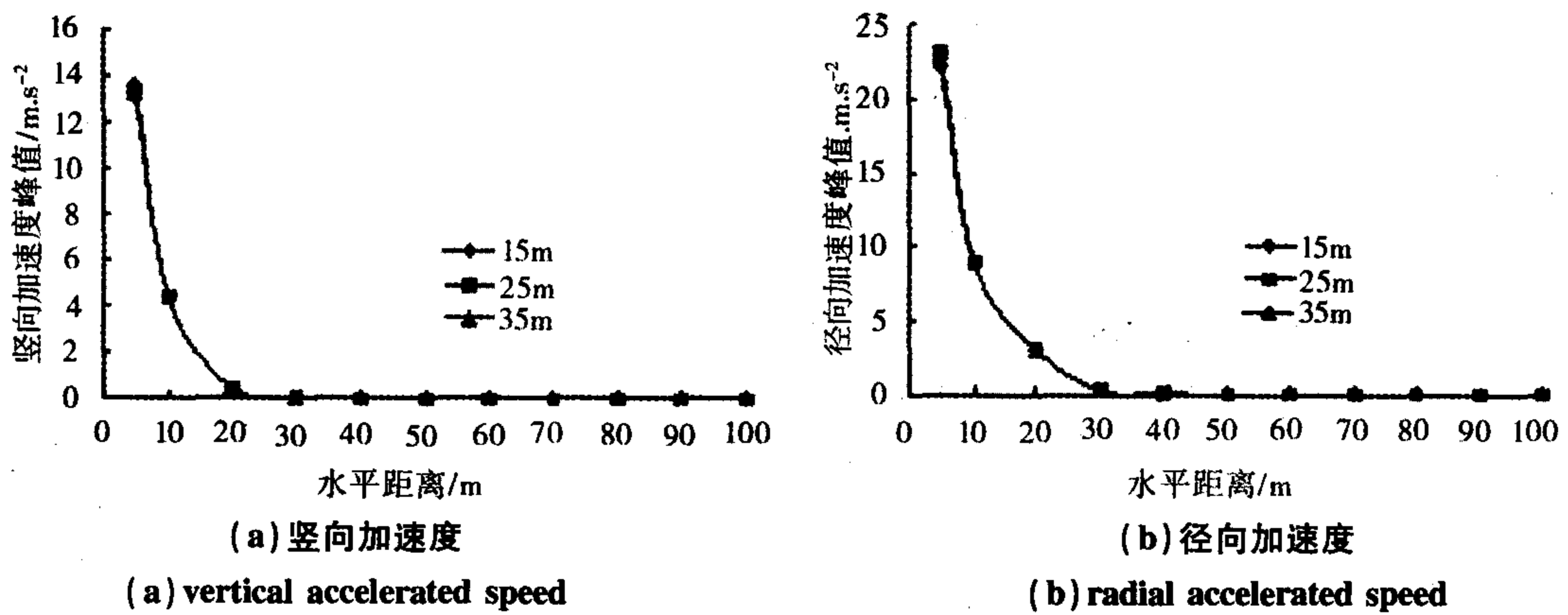


图 4 能级变化时地表径向加速度峰值随距离的衰减曲线

Fig. 4 Decay curve of radial accelerated speed and energy level

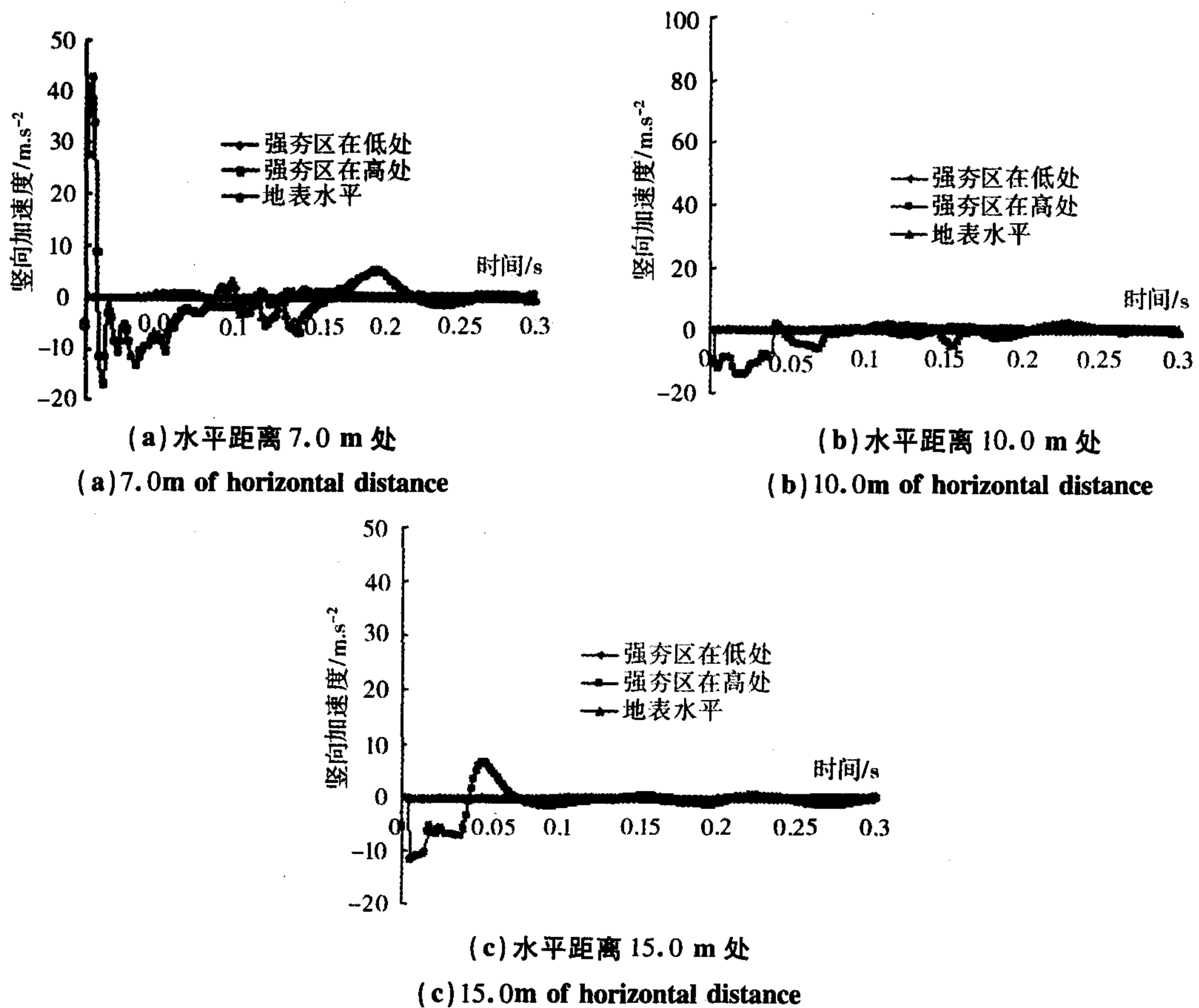


图 5 地表起伏时竖向加速度的时程曲线

Fig. 5 Vertical accelerated speed curve of land form

图 5(b)为距夯点  $10.0 \text{ m}$  处的地表竖向加速度随时间的变化。当强夯在高处进行时,竖向加速度的最大值为  $13.90 \text{ m/s}^2$ ;而当强夯在低处进行时,竖向加速度的最大值为  $0.29 \text{ m/s}^2$ ;地表没有起伏时,竖向加速度的最大值为  $4.41 \text{ m/s}^2$ ;可见,当地表存在起伏时,距夯点  $10.0 \text{ m}$  处地表竖向加速度会有所变化:当强夯在高处硬质场地进行施工时,低处场地的地表竖向加速度比地表没有起伏增大了 2.15 倍;而当强夯

在低处填土场地进行施工时,高处岩质地基的地表竖向加速度比地表没有起伏时减小了90%以上。

图5(c)为距夯点15.0 m处的地表竖向加速度随时间的变化,当强夯在低处进行时,竖向加速度最大值为7.23 m/s<sup>2</sup>;当强夯在低处进行时,竖向加速度的最大值为0.11 m/s<sup>2</sup>;当地表没有起伏时,竖向加速度的最大值为1.11 m/s<sup>2</sup>。可见,当强夯在低处硬质场地进行施工时,低处场地的地表竖向加速度比地表没有起伏增大了5.51倍;而当强夯在低处填土场地进行施工时,高处岩质地基的地表竖向加速度比地表没有起伏时减小了90%。

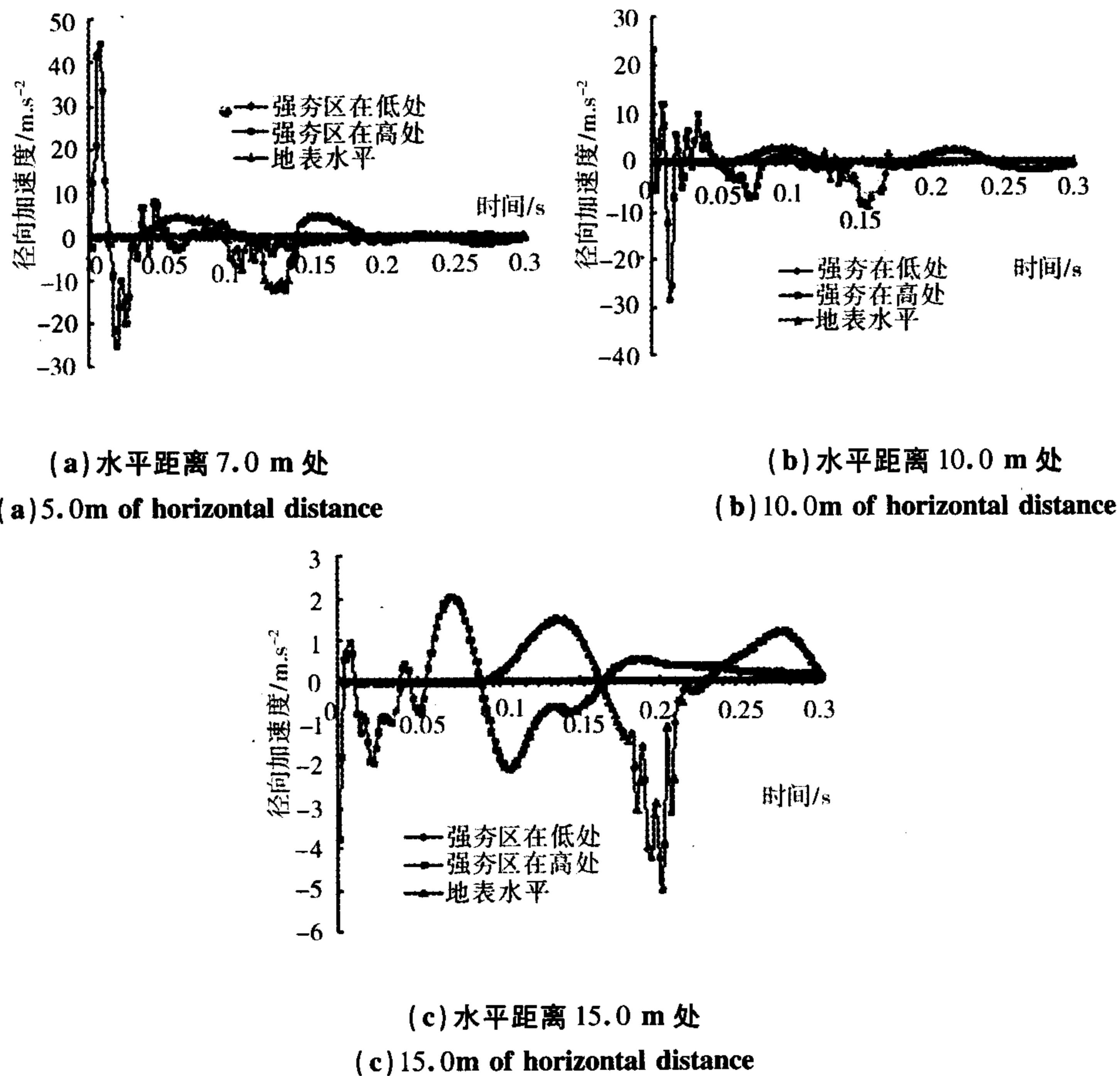


图6 地表起伏时径向加速度的时程曲线

Fig.6 Radial accelerated speed curve of land form

图6为地表起伏时径向加速度的时程曲线,图6(a)为距夯点7.0 m处的地表径向加速度随时间的变化,可以看出,当强夯在高处进行时,曲线变化较为剧烈,而当强夯在低处进行和当地表没有起伏时,曲线随时间变化相对较为平缓。当强夯在高处进行时,径向加速度的最大值为44.60 m/s<sup>2</sup>;而当强夯在低处地表进行时,径向加速度的最大值为0.05 m/s<sup>2</sup>;地表没有起伏时,径向加速度的最大值为12.30 m/s<sup>2</sup>;可见,当地表存在起伏时,距夯点7.0 m处地表径向加速度会有所变化:当强夯在高处硬质场地进行施工时,低处场地的地表径向加速度比地表没有起伏增大了2.63倍;而当强夯在低处填土场地进行施工时,高处岩质地基的地表径向加速度比地表没有起伏时减小了99%。

图6(b)为距夯点10.0 m处的地表径向加速度随时间的变化。当强夯在高处进行时,径向加速度的最大值为28.60 m/s<sup>2</sup>;而当强夯在低处进行时,径向加速度的最大值为0.59 m/s<sup>2</sup>;地表没有起伏时,径向加速度的最大值为8.94 m/s<sup>2</sup>;可见,当强夯在高处硬质场地进行施工时,低处场地的地表径向加速度比地表没有起伏增大了2.2倍;而当强夯在低处填土场地进行施工时,高处岩质地基的地表径向加速度比地表没有起伏时减小了90%以上。

图6(c)为距夯点15.0 m处的地表径向加速度随时间的变化,当强夯在高处进行时,径向加速度的最大值为2.03 m/s<sup>2</sup>;而当强夯在低处进行时,径向加速度的最大值为0.02 m/s<sup>2</sup>;地表没有起伏时,径向加速

度的最大值为  $4.96 \text{ m/s}^2$ ;可见,当强夯在远处硬质场地进行施工时,低处场地的地表径向加速度比地表没有起伏减小了 60%;而当强夯在低处填土场地进行施工时,高处岩质地基的地表径向加速度比地表没有起伏时减小了 99%。

由以上分析可以看出,当地表高差为 10.0 m 时,地表振动的传播受到影响;当强夯在高处的硬质场地进行施工时,低处地表的加速度比地表无起伏时放大 2~5 倍;当强夯在低处填土场地进行施工时,高处地表的加速度比地表无起伏时减小 90% 以上。

### 3 结论

通过数值计算和现场实测结果,对不同能级、不同土层厚度、地表高差对地表土体振动衰减规律的影响进行了分析,得到以下主要结论:

(1) 径向加速度幅值的衰减指数  $\beta$  要大于竖向加速度的衰减指数  $\beta$ ,这表明相同场地条件下,径向加速度比竖向加速度衰减速度更快。

(2) 无论是竖向加速度还是径向加速度,衰减指数  $\beta$  几乎不受强夯能级和土层厚度的影响;当量系数  $k$  的大小与土层厚度关系不大,但随着强夯能级的增大而增大。

(3) 在距离夯点 10.0 m 处的地表,能级越高,加速度峰值也越大;径向加速度的峰值大约是竖向加速度峰值的 2 倍;土体竖向振动的持续时间要大于径向振动持续时间。随着距夯点水平距离的增加,土体持续振动的时间变长。

(4) 在碎石回填土地基上,当土层厚度为 15.0~35.0 m 时,土层厚度的变化对地表振动的传播衰减影响不大。

(5) 当地表高差为 10.0 m 时,地表振动的传播受到影响;当强夯在高处的硬质场地进行施工时,低处地表的加速度比地表无起伏时放大 2~5 倍;当强夯在低处填土场地进行施工时,高处地表的加速度比地表无起伏时减小 90% 以上。

(6) 三向振动速度越大,则相应的加速度及振动位移也越大;并且随测点与夯点距离的增大,振动明显减小。在相同距离处监测时,同一个夯点振动加速度、速度和位移随锤击数的增加而增大,幅值增量逐渐减小。

(7) 对于不同的工程地质场地,不同的回填材料,不同的基岩埋深,强夯对一般建(构)筑物影响的安全距离为 15.0~40.0 m。

### 参考文献

- [1] 何立军,水伟厚,刘波.强夯施工引起的环境振动监测分析.岩土工程界[J],2006,9(7):87-90
- [2] 褚宏宪,史慧杰.强夯振动监测应用分析[J].物探与化探,2005,(29):88-92
- [3] 邹立华,赵建昌,陈全红.湿陷性黄土强夯加固振动试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3393-3397
- [4] 蒋鹏,李荣强,孔德坊.强夯振动影响的数值分析[J].地下空间,2001,21(12):544-548
- [5] 谢能刚,王璐,邱晗.强夯动接触力的碰撞分析与并行优化求解[J].岩石力学与工程学报,2004,23(13):2172-2176
- [6] 王四轶,刘松玉,方磊.强夯冲击作用的能量问题[J].岩土工程学报,2002,24(3):290-293
- [7] 夏瑞良,龚小平,沈小七.强夯引起地面振动的衰减特征[J].地震学刊,2001,21(2):41-44