

# 地面撞击模型建模及相关参数确定

叶民镇

(Dresden 工业大学机械系, 德国 Dresden 01069; 南京工业大学机械学院, 南京 21009)

**摘 要:** 在仿真研究机械-地面系统时, 常涉及地面建模问题, 为此有必要对此作深入研究。结合在联邦德国的研究课题, 在分析现有地面模型的基础上给出了地面撞击模型及相关参数的确定方法, 并着重讨论分析了模型质量参数与撞击过程中能量转换之间的关系。模拟结果与试验值比较表明, 该模型及参数确定方法行之有效。它不仅较好地模拟地面本身的动态变形过程, 而且能逼真地仿真机械-地面之间的相互作用。

**关键词:** 地面; 建模; 参数确定; 撞击; 模拟

**中图分类号:** TB124 **文献标识码:** A

## GROUND MODELING IN MACHINERY-GROUND INTERACTION SYSTEM AND PARAMETER DETERMINATION

YE Min-zhen

(College of Mechanical Engineering, University of Technology Dresden, Dresden 01069;

College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China)

**Abstract:** The modelling of ground is often involved in the simulation of the machinery-ground interaction system. It is essential to study the ground model in more detail. In collaboration with the research in Germany, this paper presents a multi-body ground impact model and the method to determine its correlation parameters based on the analysis of existing ground models. The relationship between the model mass parameter and the energy conversion during impact process is discussed in details. The comparisons between the simulated and experimental results demonstrate that the proposed model and the corresponding parameter determination procedure are effective. This model is not only able to satisfactorily reproduce the dynamic ground deformation process but also simulate the interaction of the machinery-ground system.

**Key words:** ground; modelling; parameter determination; impact; simulation

在路面压实、打桩、及车辆行驶引起路面下陷等过程的计算机仿真中, 常涉及地面动力模型问题。特别在冲击载荷下, 地面动特性能否较好地被模拟对上述过程的仿真质量产生大的影响。

土壤仅小变形时表现出一定的线性特性, 在动载荷下其应力-应变关系相当复杂。目前尚不能据土壤基本特性通过计算确定其动态性能<sup>[1]</sup>。在上述机械与地面作用过程中, 一个共同特征是: 地面伴随机械的运动而产生大变形。对机械系统运动过程模拟常采用多体模型, 对系统某部分的变形模拟一般

用有限元模型, 但二者同时运用时, 之间的接口问题较难解决且费时<sup>[2]</sup>, 为此建立一个既能模拟地面变形过程, 又能仿真机械-地面系统相互作用的地面多体模型成为必要。

### 1 地面建模

实验研究表明, 地面多体模型不仅应包括弹簧和阻尼, 还应含有随动质量<sup>[3]</sup>。由于受模拟条件限制, 直到九十年代为了模拟地面的复杂动特性, 还不得不用多个弹簧及质量元件来构造地面模型, 见

图 1。

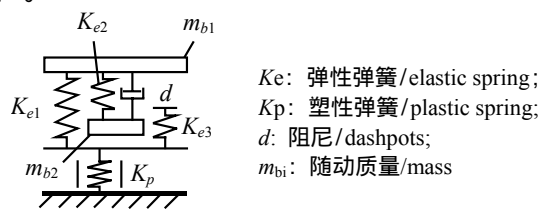
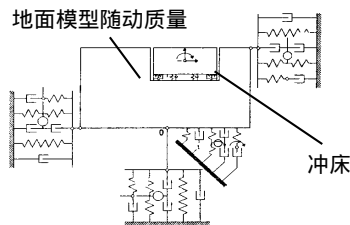
(a) 模拟路基压实过程的地面模型<sup>[3]</sup>(b) 模拟冲床振动过程的地面模型<sup>[4]</sup>

图 1 地面撞击模型

Fig.1 Ground impact model

随着计算机技术的发展,新一代多体动态模拟软件 WORKINGMODEL<sup>[5]</sup>允许所有参数以任意形式变化。这使得地面模型至少在结构形式上变得简单,同功能的元件仅需一个即可,见图 2。

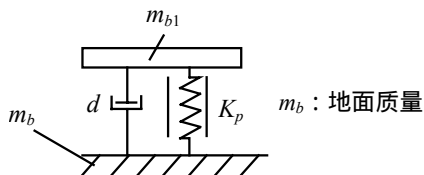


图 2 基于软件 WORKINGMODEL 的地面撞击模型

Fig.2 Ground model based on WORKINGMODEL

## 2 模型参数确定

上述模型仅包括 4 个参数:地面质量,地面模型随动质量,弹簧和阻尼。这其中地面质量为无穷大,实际需要确定的参数仅三个。它们确定了地面在撞击载荷下的行为,因此参数的确定应满足下列要求:较好地模拟地面在撞击载荷下的弹、塑性变形;较好地模拟机械-地面系统在撞击载荷下能量的相互转换。

### 2.1 随动质量

在能查到的资料中还没有较好地确定随动质量的方法,通常的做法是给出一个估计值,然后根据模拟结果与实验值的差异对其进行修正,反复多次才能确定。表 1 给出了不同的研究人员得出的随动质量。在最后的分析讨论中,本文将给出一种据撞击过程中能量的转换来确定随动质量的方法。

表 1 随动质量估计值

Table 1 Ground mass estimation

作者	Lorenz <sup>[6]</sup> 1934 年	Kundt <sup>[7]</sup> 1987 年	Kröber <sup>[8]</sup> 1988 年	Pietzsch <sup>[3]</sup> 1991 年
随动质量	撞击质量 的四至十倍	撞击质量 的 33%	撞击质量 的 10%	撞击质量 的 10.7%

### 2.2 阻尼系数

地面在变形时表现出明显的阻尼特性,特别是在弹性变形时损失的能量完全由阻尼吸收。1996 年 Huber 专门研究了自然土的阻尼参数确定问题,并提出了五种阻尼系数实验确定方法<sup>[9]</sup>。但对大变形情况下的阻尼仍无法确定,因此通常将阻尼省略,它所表现出的动力学特性通过一个所谓的“综合弹性系数”来体现。

### 2.3 弹性系数

由于省略了阻尼,弹性系数成为最重要的参数,地面的动力特性几乎完全由它来表征。静态的、或一定程度上静态的地面弹性系数可由所谓的土壤静压试验来确定,撞击载荷下的弹性系数则必须由专门的撞击试验来确定。通过试验可确定地面的下陷深度与撞击力关系曲线,然后根据弹性系数定义来确定。

对图 2 所示模型下列方程成立:

$$F_s = m_{b1} \cdot a + z \cdot K + d \cdot v^\zeta \quad (1)$$

$F_s$  为作用力;  $z$  为下陷深度;  $v$  为随动质量速度。

由此可推得弹性系数为:

$$K = \frac{F_s - m_{b1} \cdot a - d \cdot v^\zeta}{z} \quad (2)$$

由于阻尼系数不易确定,为此用一综合弹性系数来代替,其为:

$$K' = K + \frac{d \cdot v^\zeta}{z} = \frac{F_s - m_{b1} \cdot a}{z} \quad (3)$$

显然该综合弹性系数也反映了阻尼对地面撞击力-变形特征的影响。

慕尼黑工大通过试验研究了各种土在撞击载荷作用下的动态特性<sup>[10]</sup>。以自然粘土为例,据撞击试验数据可算得自然粘土弹性系数  $K_b$ , 图 3。

从图 3 中可见:其明显依赖于地面下陷深度;其它因素也对弹性系数有明显影响;随着下陷深度增加弹性系数趋于一致;弹性变形较小(在后面的分析中忽略)。借助数据分析软件(STATISTIC),对上述自然粘土弹性系数作多元非线性回归分析,发现其在撞击面积一定的前提下主要依赖于撞击速度  $v_s$ 、撞击物质量  $m_s$  以及地面下陷深度  $z$ , 并可用回

归方程(4)和方程(5)分段描述,回归方程的复相关系数达 92.3%。由于粘土无明显弹性变形恢复,因此撞击结束后粘土弹性系数可根据弹性系数定义按方程(6)确定。

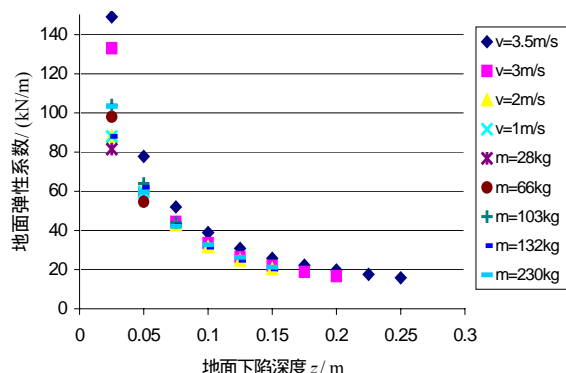


图3 弹性系数随下陷深度变化曲线

Fig.3 Stiffness variations with ground deformation

$$K_{b1} = 4.9 \cdot 10^{-6} \cdot v_s^{18.71} + 75000 \quad (4)$$

$$K_{b2} = 10^3 \cdot 1300 \cdot (10^3 \cdot z)^{-0.736} \cdot 0.89 \left( \frac{m_s \cdot v_s}{100} \right) \quad (5)$$

$$K_{b3} = \frac{9.81 \cdot m_s}{z_{pmax}} \quad (6)$$

图4描述了撞击过程中自然粘土弹性系数随地面下陷深度变化的历程。

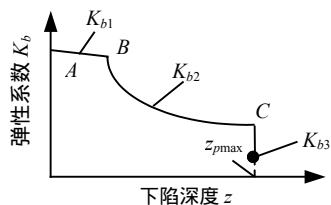


图4 自然粘土弹性系数变化的曲线及回归方程

Fig.4 Stiffness variation curve of nature clayey ground and the regression equation

进一步的试验表明,对处理过的地面,如路基等其弹性系数变化规律更加简单明显,仅取决于撞击速度和下陷深度。

### 3 分析与讨论

根据工程力学<sup>[11]</sup>物体  $m_s$  以速度  $v_s$  撞击地面时的动能损失  $\Delta E_r$  为:

$$\Delta E_r = \frac{1}{2} \cdot v_s^2 \cdot m_s \cdot (1 - k_r^2) \quad (7)$$

$k_r$  为真实撞击恢复因数。

这部分能量消耗在地面变形以及伴随的振动和声音之中。在撞击模拟模型中(见图5),撞击过程仅发生在撞击物与随动质量之间,撞击过程动能损失  $\Delta E_s$  为:

$$\Delta E_s = \frac{1}{2} \cdot v_s^2 \cdot \left( \frac{m_s \cdot m_{b1}}{m_s + m_{b1}} \right) \cdot (1 - k_s^2) \quad (8)$$

$k_s$  为模拟撞击恢复因数。

多体模拟软件并不能完全真实模拟一撞击过程,它只是根据物体之间的距离在时刻  $(n \cdot \Delta t)$  判断两物有撞击,然后根据设定的恢复系数计算出撞击后的速度,在时刻  $((n+1) \cdot \Delta t)$  赋于相撞物体,以继续运动过程,实际具体的撞击过程被省略<sup>[5]</sup>。因此公式(8)确定的动能损失在模拟时并不能转为变形能,而只是湮灭了。地面的变形是由于随后撞击物与随动质量继续向下运动压迫弹簧所至。如果让模拟撞击过程的动能损失,即据公式(8)算得值与真实撞击过程中消耗于振动和声音的能量相同,撞击物在随后的向下运动至反弹脱离地面时损失的动能等于地面变形能,则模拟的撞击过程在能量转化上也基本上符合实际状况。但真实撞击过程中消耗于振动和声音的能量不易确定,在此设为占总能量损失的  $x\%$ ,随动质量为撞击物质量的  $y\%$ ,则:

$$\frac{\Delta E_s}{\Delta E_r} = \frac{\frac{1}{2} \cdot v_s^2 \cdot \left( \frac{y\% \cdot m_s^2}{(1 + y\%) \cdot m_s} \right) \cdot (1 - k_s^2)}{\frac{1}{2} \cdot v_s^2 \cdot m_s \cdot (1 - k_r^2)} = x\% \quad (9)$$

一硬物撞击粘土时恢复因数可近似看作 0,据此从方程(9)可推得:

$$y\% \approx \frac{x\%}{1 - x\%} \quad (10)$$

即地面模型随动质量可以根据撞击过程中消耗于振动和声音的能量大小,据方程(10)确定。如假设一撞击过程的中消耗于振动和声音的能量为总能量损失的 9%,即  $x\% = 9\%$ ,则随动质量应为撞击物质量的 10%左右,这与 Kröber 和 Pietzsch 的估计值相近(表 1)。

但上述结论目前仅为不同的模拟结果所验证,仍缺乏有效的实验证明。通常撞击过程中消耗于振动和声音的能量较小,可忽略不计,而认为所有损失能量完全转化为地面的变形能。此时随动质量可设定为相对撞击质量而言一个非常小的值,其结果是模拟的地面变形比实验值大<sup>[12]</sup>。

### 4 实例与验证

图5为地面撞击试验装置<sup>[10]</sup>和基于其所建立的模拟模型。

试验中,一质量  $m_s$  为 132kg 的撞击物(140mm × 45mm)分别以  $v_s$  (3.5m/s 3.0m/s 2.0m/s 和 1.0m/s)

撞向地面,通过力传感器和位移测量仪记录下撞击过程中的撞击力和地面下沉深度。模拟模型中随动质量  $m_{b1}$  设为撞击质量  $m_s$  的 10%, 综合弹簧弹性系数  $K'_p$  据方程(4)至方程(6)计算。撞击物  $m_s$  与地面模型随动质量  $m_{b1}$  之间的撞击恢复因数定为 0(如此确定是基于以下现象:在撞击粘土过程中,撞击物与地面之间始终保持接触。)

图 6 给出模拟结果与测试结果的比较。显然模拟撞击力  $F_s$  与试验测试值  $F_m$  比较吻合。说明该模型能很好地反映地面在冲击载荷下载荷-变形关系,真实的描述了粘土路面的动态特性。

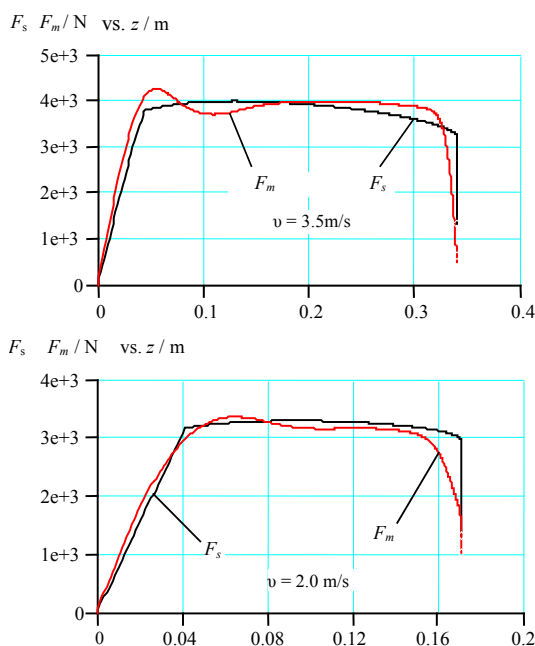


图 6 模拟与测试载荷-变形曲线比较

Fig.6 Comparisons of experimental and simulated load – deformation curves

## 5 结论

本文所建地面模型结构简单,参数确定方法可行且易掌握,适用于目前通用的系统多体模型分析软件,因而具有良好的适用性。它不仅能较好地模拟地面自身的动态变形过程,而且能逼真地仿真机械-地面之间的相互作用。基于其的车辆翻滚过程仿真结果与试验结果也非常吻合<sup>[12]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Studer J A. Bodendynamik [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997. (in German)
- [2] Böhler H. Traktormodell zur simulation der dynamischen belastung bei transporten [D]. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001. (in German)
- [3] Pietzsch D. Untersuchungen zum schwingungsverhalten und zur verdichtungswirkung von vibrationswalzen [D]. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991. (in German)
- [4] Wolf P J. Foundation vibration analysis using simple

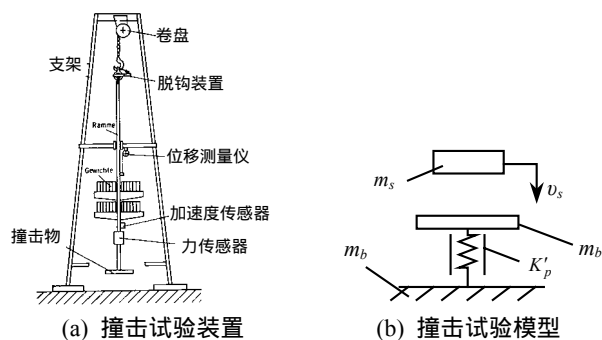
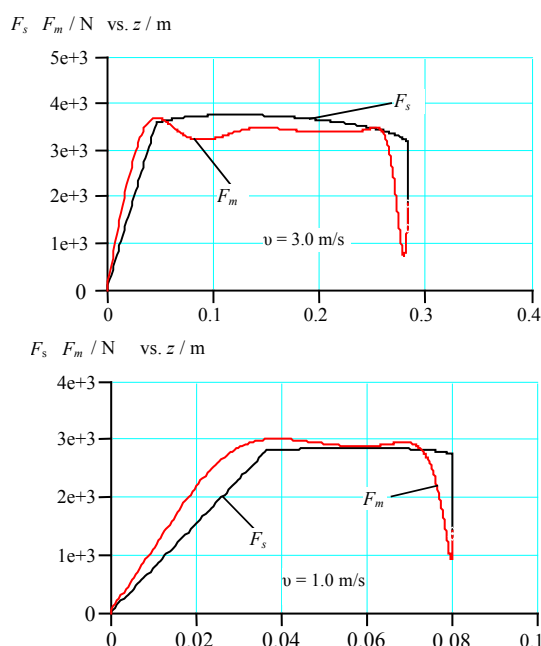


图 5 地面撞击试验装置及撞击试验模型

Fig.5 Ground impact experimental equipment & impact model



physical models [M]. Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice Hall, 1994.

- [5] MSC. Software. WORKINGMODEL [EB]. <http://www.workingmodel.com/2004>.
- [6] Lorenz H. Neue ergebnisse der dynamischen Baugrunduntersuchung [J]. Düsseldorf: VDI-Z, 1934, 78 (12): 379~385. (in German)
- [7] Kundt M. Zur Optimierung der veränderlichen maschinenparameter und schwingungstechnischen auslegung von vibrationswalzen [D]. TU Magdeburg, 1987. (in German)
- [8] Kröber W. Untersuchungen der dynamischen vorgänge bei der vibrationsverdichtung von böden [D]. TU München, 1988. (in German)
- [9] Huber H. Untersuchungen zur materialdämpfung in der bodendynamik [D]. TU München, 1996. (in German)
- [10] Schwanghart H. Umsturzverhalten von traktoren und auswirkungen auf die schutzvorrichtungen und die sicherheit [D]. TU München, 1979. (in German)
- [11] Hardtke H J. Lehr- und übungsbuch technische mechanik [M]. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 1997. (in German)
- [12] Ye Minzhen. Methode zur rechnerischen bestimmung von äußeren belastungen an schutzaufbauten mobiler arbeitsmaschinen bei sonderergebnissen [D]. TU Dresden, 2005. (in German)