

双频合成振动压实机动态特性仿真研究

姚运仕¹, 李彦伟², 石鑫², 杜群乐³, 冯忠绪¹, 朱伟敏⁴

(1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点试验室, 陕西 西安 710064;

2. 石家庄市交通运输局, 河北 石家庄 050051;

3. 河北省交通运输厅公路管理局, 河北 石家庄 050051; 4. 杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要:为了探讨双频合成振动压实过程的动态响应,建立了“双频合成振动压实机-土壤”2自由度动力学模型,采取仿真研究的方法,分析了双频合成振动压实过程某工况上车和下车的位移、加速度及激振力和压实机对土壤作用力随激振器频率的变化规律.研究表明:双频合成振动压实机-土壤2自由度动力学模型具有2个固有频率;随激振器频率的变化,上车和下车位移和加速度出现一阶和二阶共振峰;与激振力不同,压实机对土壤的作用力除受振动参数影响外,还与土壤参数有关;振幅和频率是影响压实机对土壤作用力的重要参数,振幅比频率的影响更显著,振幅的取值应考虑被压实对象,频率的取值应使低频频率比二阶固有频率稍高.

关键词:机械工程;双频合成振动;振动压实;动态特性;仿真

中图分类号:

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)06-0903-06

压实作业是受压实设备和被压实材料影响的复杂动态过程,不但涉及压实设备各参数,而且与被压实材料密切相关.国内外许多学者将压实设备与被压实材料作为一个整体系统开展相关研究. Dieter Pietzsch 等认为“压路机-土壤”是典型的闭环系统^[1]. K. Tateyama 等以典型的“压路机-土壤”2自由度动力学模型为基础,研究了压路机与土壤间的相互作用^[2]. 针对混沌振动压实技术、仿冲击振动压实技术等新的压实技术,一些学者建立了相应的数学模型^[3-6].

双频合成振动压实技术就是在一个激振器里面设置两个频率和振幅互不相等的激振单元,激振器在任一时刻同时存在两个频率及其对应的振幅,与传统振动压实技术相比,双频合成振动压实技术涉及的参数更多,压实机理更复杂,前期仿真研究给出了较佳的参数匹配关系和取值范围^[7]. 本文拟借助“双频合成振动压实机-土壤”2自由度动力学模型,分析双频合成振动压实过程的动态特性,探讨双频合成振动压实过程中振动系统的基本参数与土壤的压实状况之间的数值关系.

1 “双频合成振动压实机-土壤”2自由度动力学模型简介

根据双频合成振动压实样机的结构和参数优化结果,建立了双频合成振动压实的“压实机-土壤”系统的动力学模型,如图1所示. 与传统“振动压路机-土壤”2自由度动力学模型不同,图1中激振力为 $F_1 \sin(\omega_1 t)$ 和 $F_2 \sin(\omega_2 t)$ 的合成.

根据图1所示的动力学模型,选择模型中各单元体静平衡位置为坐标原点,得到如下方程组:

$$\begin{cases} M_1 X_1'' + C_1 X_1' + K_1 X_1 - C_1 X_2' - K_1 X_2 = 0 \\ M_2 X_2'' + C_1 X_2' + K_1 X_2 - C_1 X_1' - K_1 X_1 + F_v = F_0 \\ F_0 = F_1 \sin(\omega_1 t) + F_2 \sin(\omega_2 t) \\ M_3 X_3'' + C_2 X_3' + K_2 X_3 = F_v \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2011-12-18 修改稿日期:2012-11-25

基金项目:国家自然科学基金 ZIZ 资助项目(51208044);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2010JC140);长安大学基础研究支持专项基金

作者简介:姚运仕(1979-),男,山东费县人,博士后,副教授,主要从事工程机械理论及作业质量控制领域研究.

式中: F_0 为系统的总激振力; F_v 为振动轮对土壤的作用力。

土壤压实状态可以分为接地状态和跳振状态。反映在方程组上为: 接地状态时, $X_2 = X_3$, $F_v > 0$; 跳振状态时, $F_v = 0$ 。跳振易使压路机失去方向性, 应当避免, 下面仅对系统的接地状态进行探讨。

由式(1)可解得^[8]:

$$X = \varphi Y = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ B_1 & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y_2 \\ B_1 y_1 + B_2 y_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: X 为位移矩阵, φ 为振型矩阵, B_1 、 B_2 、 y_1 和 y_2 可表示为系统质量、刚度、阻尼、激振力等模型参数的函数。

2 模型参数及仿真结果分析

根据样机设计资料, 振动轮及上车等的质量、减振块刚度及阻尼均由样机设计参数已知, 仅需确定随振土体的参数即可。由于土壤刚度和阻尼随压实遍数的不同而变化, 采取经验法初选、结合试验进行参数识别的方法确定土壤刚度和阻尼^[9]。某工况下模型参数见表1。

根据动力学模型的求解及模型参数, 用 MATLAB 语言进行了不同工况的仿真, 并将仿真信号与试验实测信号进行了对比, 图2是某工况实测信号与仿真信号的对比结果。

由图2可知: 在时域上, 实测信号和仿真信号的形状基本一致, 数值稍有差别; 在频域上, 实测信号和仿真信号包含的两个主要频率成分相同, 二者的各频率成分对应幅值稍有差别, 但各频率成分对应幅值的比值相差不大。说明: 所建的动力学模型基本正确; 仿真结果能反映样机特性, 可以进行系统动态响应分析。

3 压实过程动态特性仿真及结果分析

双频合成振动压实机的动态特性分析就是研究其在不同频率区段工作时, 压实机的上车及下车的振幅、激振力及压实机对地面作用力的变化规律等。某工况激振器高频、低频的频率比为3:1, 对应的振幅比为1:2, 低频频率为1 mm, 以压实3遍时为例分析压实过程的动态特性。

3.1 上下车振幅 - 频率特性

上下车振幅 - 频率特性表示上、下车振幅与激振器高、低频率的关系, 如图3~图4所示。由两图可知:

(1) “压实机 - 土壤”系统有两个固有频率 f_{n1} (约8 Hz) 和 f_{n2} (约19 Hz)。当激振器低频频率或高频频率变化时, 上、下车振幅均出现两次峰值, 分别对应系统的一阶和二阶共振峰, 对应的频率值是系统的一阶和二阶固有频率。

(2) 当低频频率或高频频率等于 f_{n1} 时, 系统处于一阶共振状态, 此时上车振幅大于下车振幅; 当低频频率或高频频率等于 f_{n2} 时, 系统处于二阶共振状态, 此时下车振幅大于上车振幅。

(3) 对上车振幅或下车振幅而言, 低频频率引起的一阶共振峰大于高频频率引起的一阶共振峰, 低频频率引起的二阶共振峰大于高频频率引起的二阶共振峰。这是因为低频振幅大于高频振幅的缘故。

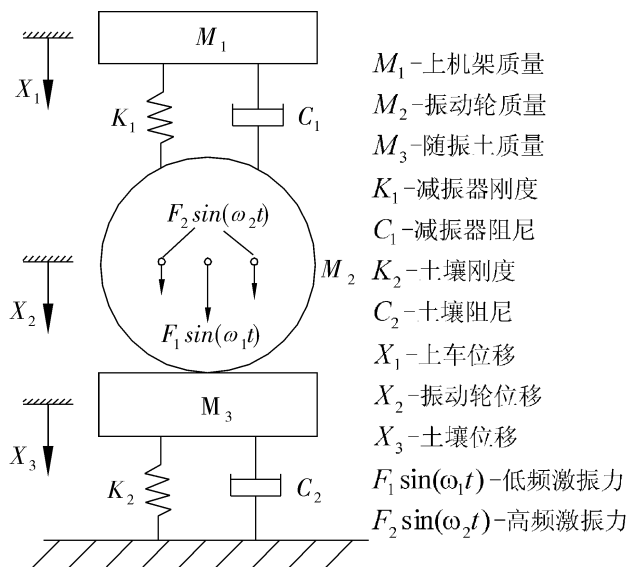


图1 “压实机 - 土壤”系统动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of double-frequency composed vibratory Compactor and soil

表1 模型参数值

Tab. 1 Parameter values of dynamic model

参数名称	参数代号	单位	数值
上机架质量	M_1	kg	291
振动轮质量	M_2	kg	349
随振土质量	M_3	kg	40
减振器刚度	K_1	N/m	1.21×10^6
土壤刚度	K_2	N/m	5.12×10^6
减振器阻尼	C_1	N · s/m	2252
土壤阻尼	C_2	N · s/m	0.6×10^4

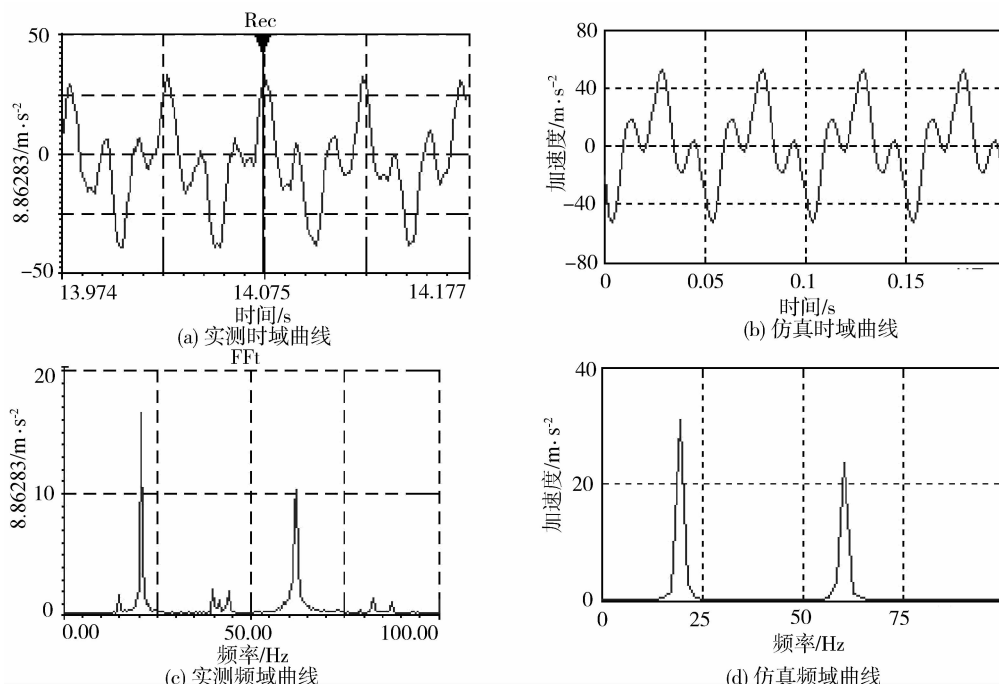


图 2 某工况的实测信号与仿真信号对比

Fig. 2 Comparison of test signals and simulated signals under certain working condition

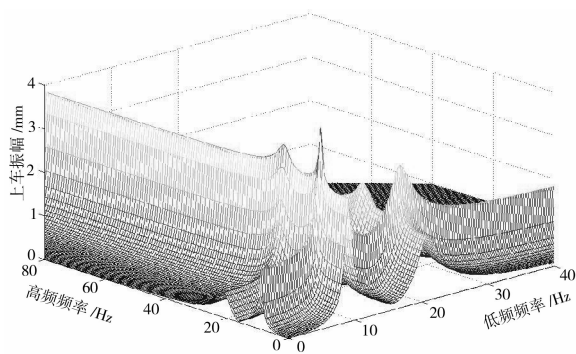


图 3 上车振幅与两频率的关系示意图

Fig. 3 Relations between amplitude and frequencies of the frame

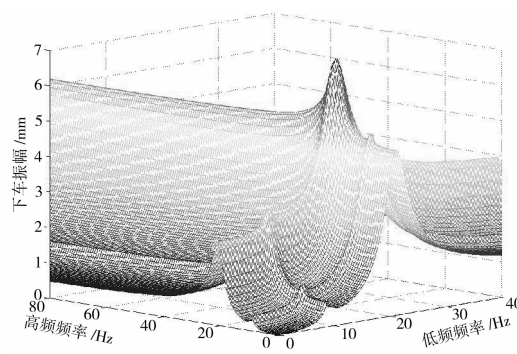
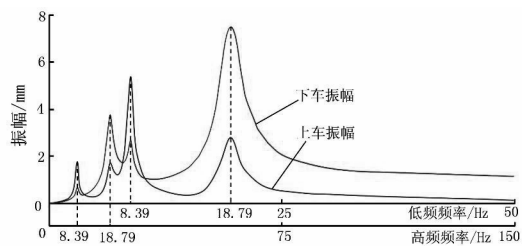
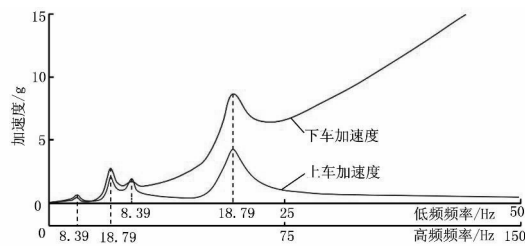


图 4 下车振幅与两频率的关系示意图

Fig. 4 Relations between amplitude and frequencies of the roller

3.2 位移 - 频率和加速度 - 频率曲线

位移 - 频率曲线($x-f$)表示压实机上、下车振幅与频率的关系,见图 5,加速度 - 频率曲线($a-f$)表示压实机上、下车振动加速度与频率的关系,见图 6.

图 5 $x-f$ 曲线Fig. 5 Curve of $x-f$ 图 6 $a-f$ 曲线Fig. 6 Curve of $a-f$

由图5和图6可知:

(1) 在频率 f 变化过程中, 图中各曲线出现四个峰值. 因高、低频率之比 $\frac{f_2}{f_1} = 3$, 当低频频率 f_1 等于 $\frac{f_{n1}}{3}$ 时, 高频频率 f_2 恰好等于 f_{n1} , 系统处于一阶共振状态, 两图中各曲线出现第一个峰值; 当低频频率 f_1 等于 $\frac{f_{n2}}{3}$ 时, 高频频率 f_2 恰好等于 f_{n2} , 系统处于二阶共振状态, 两图中各曲线出现第二个峰值; 当低频频率 f_1 分别等于 f_{n1} 和 f_{n2} 时, 系统相应的处于一阶和二阶共振状态, 对应两图中各曲线的后两个峰值.

(2) 在 $x-f$ 和 $a-f$ 曲线上, 第一和第三峰值与一阶固有频率有关, 为一阶共振峰, 其形状又尖又细, 主要与上车质量、减振块刚度和阻尼有关. 第二和第四峰值与二阶固有频率有关, 为二阶共振峰, 其形状高而平缓, 主要与下车质量和随振土质量、土壤刚度和阻尼有关.

(3) 当低频频率 f_1 低于一阶固有频率 f_{n1} 时, 上、下车振幅变化剧烈, 处于不平稳状态, 且上车振幅较大而下车加速度较小, 不利于机器本身减振和压实作业; 当低频频率 f_1 高于二阶固有频率 f_{n2} 时, 上车振幅及上车加速度急剧下降, 而下车振幅较大且趋于平缓, 下车加速度急剧上升, 较利于上车减振和压实作业.

3.3 激振力-频率和压实机对土壤作用力-频率曲线

激振力-频率曲线(F_0-f)表示激振力 F_0 与频率的关系, 压实机对土壤作用力-频率曲线(F_v-f)表示压实机对土壤的作用力 F_v 与频率的关系, F_v 是衡量压实机对土壤作用的动态力大小的重要指标. F_0-f 和 F_v-f 仿真曲线见图7. 定义 $R_T = F_v/F_0$, 则 R_T-f 曲线见图8.

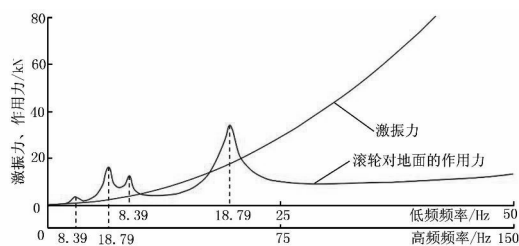


图7 F_0-f 和 F_v-f 曲线

Fig. 7 Curves of F_0-f and F_v-f

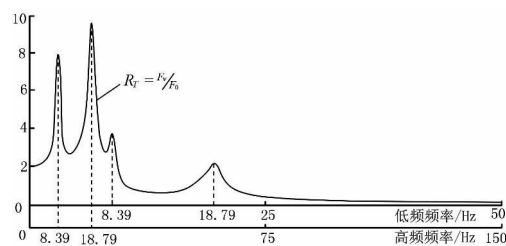


图8 R_T-f 曲线

Fig. 8 Curves of R_T-f

由图7和图8可知:

(1) 压实机激振器的激振力 F_0 与压实机对土壤的作用力 F_v 是性质完全不同的两种力, 因此, 二者随频率 f 变化的规律不同. 由于压实机的激振力 F_0 是频率的二次函数, 所以 F_0-f 曲线呈抛物线形状.

(2) 由 $F_v = M_3 X_3'' + C_2 X_3' + K_2 X_3$ 可知, 压实机对土壤的作用力 F_v 既与压实机本身的频率、频率比、振幅和振幅比等振动参数有关, 又与土壤的参数及其物理性能有关. 所以当压实机激振器的激振力一定时, R_T 值越大, 则 F_v 越大. 而提高 R_T 值的关键在于合理选择激振角频率 ω 和振幅 A . 将 F_v-f 曲线和 $x-f$ 曲线相比可知二者形状十分相似, 都有明显的一阶和二阶共振峰, 说明压实机的振幅和频率是影响 F_v 的重要参数. 分析 F_v-f 曲线的峰值可知, 第一、第二个峰值是高频频率与系统一阶、二阶固有频率相等时引起的; 而第三、第四个峰值是低频频率与系统一阶、二阶固有频率相等时引起的. 但高频频率的振幅小于低频频率的振幅, 故第一和第二个峰值分别小于第三和第四个峰值, 说明振幅比频率更显著的影响 F_v .

(3) 当低频频率 f_1 低于一阶固有频率 f_{n1} 时, 压实机对土壤的作用力 F_v 与激振力 F_0 的比值 R_T 变化剧烈, 压实机处于不稳定工作状态; 在峰值点处, 虽然 R_T 较大, 但由于激振力 F_0 较小, 滚轮对土壤的作用力 F_v 并不大, 且系统处于共振状态, 机器不能稳定地工作. 当低频频率 f_1 介于一阶固有频率 f_{n1} 和

二阶固有频率 f_{n2} 之间时, F_v 处于波谷, 此时压实力也较小. 当低频频率 f_1 高于二阶固有频率 f_{n2} 时, 激振力 F_0 持续增大, 但 F_v 又开始下降, R_T 随之下落, 振动压实效果变差. 分析 F_v-f 曲线可知, 频率取值应使其低频频率尽量靠近振动系统的二阶固有频率, 但考虑到机器工作的稳定性问题, 低频频率应比二阶固有频率稍高.

4 结 语

双频合成振动压实任一时刻同时存在两个频率及其对应的振幅, 与传统振动压实技术相比, 涉及的振动参数更多, 压实机理更复杂. 以双频合成振动压实机为研究对象, 通过求解“压实机-土壤”2 自由度动力学模型, 通过仿真分析探讨了双频合成振动压实过程的动态特性, 认为:

(1) 双频合成振动压实“压实机-土壤”2 自由度动力学模型具有两个固有频率, 分别约为 8 Hz 和 19 Hz; 当激振器低频频率或高频频率变化时, 上下车振幅均出现两个峰值, 分别对应系统的一阶和二阶共振峰;

(2) 双频合成振动压实过程中, 随激振器频率的变化, 上下车位移和加速度随频率变化曲线出现两个一阶共振峰和两个二阶共振峰等共四个峰值. 其中, 一阶共振峰主要与上车质量、减振块刚度和阻尼有关, 二阶共振峰主要与下车质量、随振土质量、土壤刚度和阻尼有关;

(3) 激振器的激振力和压实机对土壤的作用力是性质完全不同两种力, 前者仅与压实机有关, 后者与压实机和土壤参数都有关. 激振器的振幅和频率是影响压实机对土壤作用力的重要参数, 振幅比频率的影响更显著;

(4) 双频合成振动压实的频率、频率比、振幅和振幅比等振动参数取值应考虑试验和仿真结果, 振幅的取值应考虑被压实对象; 频率取值应使其低频频率尽量靠近振动系统的二阶固有频率, 但考虑到机器工作的稳定性问题, 低频频率应比二阶固有频率稍高.

参考文献 References

- [1] DIETER Pietzsch, WOLFGANG Poppy. Simulation of soil compaction with vibratory rollers[J]. Journal of Terramechanics, 1992, 29(6): 585-597.
- [2] TATEYAMA K, ASHIDA S, FUKAGAWA R, et al. Geomechanics - Interaction between ground and construction machinery and its application to construction robotics[J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(3): 341-353.
- [3] 杨 勇, 龙运佳. 土壤塑性变形的混沌振动压路机动力学仿真研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 44-46.
YANG Yong, LONG Yun-jia. Simulation of Plastic Dynamics with Chaotic Vibratory Roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 44-46.
- [4] 刘本学, 冯忠绪, 赵 侃, 等. 仿冲击振动压实机动力学模型的建立及压实试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 121-126.
LIU Ben-xue, FENG Zhong-xu, ZHAO Kan, et al. Establishment and compaction experiment of dynamics model for impact-imitated vibratory roller[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 121-126.
- [5] 吴敏哲, 张 柯, 胡卫兵, 等. 地铁行车荷载作用下饱和黄土的累积塑性应变[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(2): 316-322.
WU Min-zhe, ZHANG ke, HU Wei-bing, et al. Cumulative plastic strain of saturated loess due to metro traffic loading[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(2): 316-322.
- [6] 韩 伟. 风化岩路基填料沉降观测试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(2): 178-182.
HAN Wei. Observation and research of weathered rock subgrade settlement[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(2): 178-182.
- [7] 钟春彬, 冯忠绪, 朱伟敏, 等. 双频双幅合成振动压实的动力学仿真[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 99-102.
ZHONG Chun-bin, FENG Zhong-xu, ZHU Wei-min, et al. Dynamic simulation of double-frequency and double-

- amplitude composed vibrating compaction[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 99-102.
- [8] 姚运仕. 双频合成振动压实方法的试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [9] 张玉红, 汤卓文, 王长林. 移动荷载作用下土体动力响应的参数影响分析 IV: 粘弹性半空间[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(5): 621-624.
- ZHANG Yu-hong, TANG Zhuo-wen, WANG Chang-lin. The effect analysis of dynamic response of soils by moving load[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(5): 621-624.

Dynamic characteristics analysis for double-frequency composed vibratory compactor

YAO Yun-shi¹, LI Yan-wei², SHI Xin², DU Qun-le³, FENG Zhong-xu¹, ZHU Wei-min⁴

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shijiazhuang Bureau of Transportation, Shijiazhuang 050051, China; 3. Road Bureau of Traffic Department of Hebei Province, Shijiazhuang 050051, China; 4. Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In order to discuss the dynamic effects on the process of double-frequency composed vibration, the two DOF (degree of freedom) dynamic model of double-frequency composed vibratory compactor and soil was built. With the help of dynamic simulation, the relations of frequencies and some parameters, as between the upper and lower chassis displacements, acceleration, vibrating force and effect force on the ground caused by compactor (EFOG), were analyzed. It was shown that the dynamic model of double-frequency composed vibratory compactor and soil had two natural frequencies, and with the change of vibrating frequencies, the upper and lower chassis displacements and acceleration presented 1st order and 2nd order formats. Different from vibrating force, EFOG was affected synchronously by vibrating parameters and soil. As important factors, the amplitudes had more actions on EFOG than the frequencies. It was pointed out that the amplitudes should be adapted to the soil and the lower frequency should be a little higher than the 2nd order natural frequency.

Key words: *mechanical engineering; double-frequency composed vibration; vibrating compaction; dynamic characteristics; simulation*