

文章编号:1671-8879(2016)03-0102-09

# 振动对冲击压实能力强化的定量研究与评价

王铁庆<sup>1,2</sup>, 杨人凤<sup>1</sup>, 玉山江-伊布拉音<sup>3</sup>, 马雨平<sup>4</sup>

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 新疆维吾尔自治区交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 陕西省建设机械车辆物资总公司, 陕西 西安 710001)

**摘要:**为了揭示振动对冲击压实能力强化的效果和特性,利用压实试验机对黄土进行冲击压实的同时施以振动作用,并与单纯的冲击压实进行对比试验,从压实力和线压力、压实能量、压应力特性、压实深度特性 4 个方面定量研究与评价了振动施加前后冲击压实机的压实能力。研究结果表明:施以振动作用后冲击压实机的压实力和线压力提高了 44%,激振强度提高了 41%;压实均匀性得到提高;随着碾压遍数的增加,各层深处压应力的增长率相当,施以振动作用后压应力的增长率增大;定义了应力能量指数(stress energy index, SEI),SEI 随着层深的增加而减小,施以振动作用后各层深处的 SEI 均增大,上、中、下 3 层 SEI 的增长率分别为 23.1%、32.8%和 51.9%;黄土中各层深处压应力值均得到提高,压应力随碾压遍数增加的幅度更大;上、中、下 3 层的压实度分别提高了 8.92%、9.02%和 12.1%,压实特性曲线的平均斜率提高了 86.2%,说明振动对冲击压实能力的强化作用明显。

**关键词:**机械工程;冲击压实;振动;压实能力;黄土;评价

**中图分类号:**U415.521;U416.1 **文献标志码:**A

## Quantitative research and evaluation on capacity strengthening of vibration on impact compaction

WANG Tie-qing<sup>1,2</sup>, YANG Ren-feng<sup>1</sup>, Yushanjiang-Yibulayin<sup>3</sup>, MA Yu-ping<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology & Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Mechanical & Electronic Engineering, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Xinjiang Communications Construction Administrative Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Shaanxi Construction Machinery Vehicle & Material Cooperation, Xi'an 710001, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to reveal the capacity strengthening effect of vibration on impact compaction, this paper used impact compactor in compaction test of loess, which conducted impact compaction on the loess with vibration effect at the same time. Comparing with the pure impact compaction, this paper quantitatively analyzed and evaluated the impact compactors' compaction capacity before and after the vibration being applied from four aspects of compression strength and line pressure, compaction energy, stress characteristics and compaction depth characteristics. The results show that with the vibration effect, the impact compactors' compression strength and line

收稿日期:2015-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50578017);陕西省科技厅科技项目(06-25K,14-02K)

作者简介:王铁庆(1980-),男,河北文安人,西北农林科技大学讲师,长安大学工学博士研究生,E-mail:wangtieqing8@163.com。

pressure both increase by 44%, and the excitation intensity increases by 41%; compaction uniformity is improved; with the increase of rolling times, growth rates of compressive stress in three deep layers are similar, and increase after applying vibration effect; SEI (stress energy index) decreases with the increase of layer depth; SEI increases in each layer after applying vibration effect, and its growth rates in upper, middle and lower layers are respectively 23.1%, 32.8% and 51.9%; compressive stress improves in the loess layers of all depths, and compressive stress increases more greatly with the increase of rolling times; compaction degrees in upper, middle and lower layers increase by 8.92%, 9.02% and 8.92% respectively; and the average slope of compaction characteristic curves increases by 86.2%. It indicates that the role of vibration is obvious on the impact compaction capacity strengthening. 8 tabs, 7 figs, 21 refs.

**Key words:** mechanical engineering; impact compaction; vibration; compaction capacity; loess; evaluation

## 0 引言

在路基压实施工中,冲击压实机已得到广泛应用,尤其在湿陷性土壤、高填方压实等方面具有显著优势<sup>[1-4]</sup>。为此,研究如何提高冲击压实机的压实能力以及对压实能力进行定量研究与评价具有重要的意义。瑞典压实专家 Forssblad 在 20 世纪 50 年代做过振动对冲击作用影响的试验,结论是在振动环境下,冲击瞬间的减速度大大小于没有振动作用的场合,减速度的变小意味着冲击能量更多地为土壤所吸收。同时指出:振动对冲击有较大的影响,若在冲击的同时施以振动作用,其压实效果远远优于单纯冲击的压实效果<sup>[5-6]</sup>。杨人凤等利用冲击振动复合压实装置进行了压实试验,给出了被压土壤内压应力的变化规律,阐述了在冲击振动联合作用下土被压实的机理,得出了复合压实装置有更好的压实效果和更高的压实作业效率的结论<sup>[7-8]</sup>;蔡同俊分析了黄土在压实过程中的动态特性,从压实度和应力两方面对比分析了静力、振动和冲击 3 种压实工况,得出了冲击较静碾、振动对深层土体作用效果明显的结论<sup>[9]</sup>;张伟等用冲击振动复合压路机模型对黄土路基进行了多种工况的压实特性研究,分析了不同工况下压实度的变化规律以及冲击振动压实机理<sup>[10-11]</sup>;张青哲等通过对振动压实过程中土内压应力时域和频域信号的研究,分析了压应力在黄土各层的分布与传递规律,揭示了黄土在振动压实过程中的能量分布与吸收状况<sup>[12]</sup>;王龙等通过对不同参数组合下振动压实工艺单位时间内输出能量的分析,定义了评价振动压实工艺压实能力的评价指标——激振强度,指出激振强度必须大于 0.35 kJ/s 才能取得好的压实效果<sup>[13]</sup>。综合来看,以往的研究

对于振动作用对冲击压实能力的强化效果缺少定量的研究与评价。鉴于此,本文利用压实试验机对黄土进行冲击压实的同时施以振动作用,并与单纯的冲击压实进行对比,从压实力和线压力、压实能量、压应力特性、压实深度特性 4 个方面,定量研究与评价振动对冲击压实能力强化的效果和特性。

## 1 振动对冲击压实能力强化的试验

为了定量研究与评价振动对冲击压实能力强化的效果和特性,在长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室的土槽实验室内进行了对比压实试验,试验装置为自行设计的能产生振动作用和冲击作用的压实试验机,其具体工作原理见文献<sup>[14-15]</sup>。试验用黄土取自西安地区,为马兰黄土,属于低液限粉质粘土。

对比试验工况为黄土的冲击压实工况和冲击压实的同时施以振动作用工况(以下简称振动冲击压实工况)。试验首先用压力传感器采集黄土中的动态压力信号,压力传感器按照深度方向 3 层埋入,距表面深度分别为 50 mm(上层)、150 mm(中层)和 250 mm(下层),用来测量不同深度处的压应力值,以得到压应力特性;其次,检测 2 种压实工况下不同深度处的压实度数据,以得到压实度特性。

### 1.1 设备参数和试验条件

压实试验机的压实轮重力  $G_a$  为 1.88 kN,压实轮直径  $D$  和轮宽  $B$  均为 500 mm,压实轮内设有冲击机构和振动机构。试验中振动机构激振器的名义振幅  $A$  为 0.45 mm,振动频率  $f$  为 30 Hz(经前期试验得出 30 Hz 为所用黄土的最佳振动压实频率),激振力  $F_0$  为 3 kN。试验段长度  $L$  为 10 m,匀速行驶速度  $v$  为 1.5 km/h。

## 1.2 试验结果

### 1.2.1 冲击压实试验

按上述试验条件,利用冲击机构产生的冲击力和压实轮的静重在被测试验路段上碾压12遍,测得每一遍不同深度处的压应力值,如表1所示。用环

刀法检测碾压12遍后上、中、下3层的压实度,为提高检测结果的准确性,在试验段长度方向上取4个不同的检测位置点,4个检测位置点均取在压实轮宽度中央碾压过的位置,以尽可能消除压实轮的边缘效应,检测结果见表2。

表1 冲击压实试验压应力检测结果

Tab.1 Stress test results of impact compaction test

碾压遍数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上层压应力/MPa	0.136 2	0.147 5	0.108 8	0.144 1	0.152 3	0.162 6	0.141 9	0.181 9	0.188 7	0.177 6	0.178 6	0.189 4
中层压应力/MPa	0.093 2	0.102 3	0.073 5	0.104 7	0.109 8	0.125 0	0.104 8	0.144 3	0.152 0	0.142 1	0.145 6	0.142 6
下层压应力/MPa	0.078 2	0.084 4	0.069 7	0.088 5	0.091 1	0.110 8	0.083 4	0.123 6	0.137 6	0.132 1	0.125 1	0.131 1

表2 冲击压实12遍后压实度检测结果

Tab.2 Compactness test results after impact compaction 12 times

检测点	1	2	3	4
上层压实度/%	88.92	86.71	88.58	87.94
中层压实度/%	87.96	86.05	85.86	86.14
下层压实度/%	83.41	82.12	83.16	83.32

### 1.2.2 振动冲击压实试验

启动激振机构,在冲击压实的同时施以振动作用,依上述试验条件在被测试验路段上碾压12遍,测得压应力情况如表3所示,压实度检测方法和检测位置要求同前面,检测结果如表4所示。

表3 振动冲击压实试验压应力检测结果

Tab.3 Stress test results of vibration impact compaction test

碾压遍数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上层压应力/MPa	0.139 1	0.145 2	0.162 4	0.141 6	0.168 8	0.191 0	0.198 5	0.223 4	0.238 5	0.225 3	0.228 7	0.238 8
中层压应力/MPa	0.121 4	0.121 8	0.128 6	0.112 1	0.134 2	0.148 9	0.178 4	0.183 4	0.202 4	0.194 2	0.192 3	0.199 3
下层压应力/MPa	0.113 2	0.118 5	0.121 4	0.083 5	0.127 6	0.137 9	0.160 7	0.175 4	0.196 2	0.185 1	0.172 3	0.198 0

表4 振动冲击压实12遍后压实度检测结果

Tab.4 Compactness test results after vibration impact compaction 12 times

检测点	1	2	3	4
上层压实度/%	96.21	94.90	96.45	95.98
中层压实度/%	94.35	93.23	94.84	94.79
下层压实度/%	93.32	91.95	93.11	93.85

## 2 振动对冲击压实能力强化的定量研究与评价

针对前面的试验,以下从压实力和线压力、压实能量、压应力特性、压实深度特性4个方面,对振动施加前后冲击压实机对黄土的压实能力进行定量研究与评价。

### 2.1 压实力和线压力对比评价

压实力和线压力是影响压实机压实能力和压实效果的重要因素之一,因此,首先对2种压实工况下的压实力和线压力进行定量研究与评价。

#### 2.1.1 冲击压实力和线压力

压实轮内冲击机构平均每次的冲击力为13.2 kN,考虑压实轮的静重后,黄土平均每次受到压实轮的冲击压实力 $F_c$ 为17.1 kN,根据轮宽 $B$ 计算得冲击压实线压力 $q_c$ 为34.2 N/mm。

#### 2.1.2 振动冲击压实力和线压力

振动压路机的压实能力与振动轮的参振质量、振幅、频率及其分配重力有关,单轮振动压路机的当量压力 $P$ 按式(1)计算<sup>[16]</sup>,式中 $K_p$ 为考虑振动作用的超加系数,按式(2)计算

$$P = K_p (G_a + F_0) \quad (1)$$

$$K_p = 1.7 - 0.1F_0/G_a \quad (2)$$

其余参数及取值见前面的设备参数和试验条件。由式(1)计算得单纯振动工况下的当量压力 $P$ 为7.5 kN,根据轮宽 $B$ 计算得振动线压力 $q_z$ 为15 N/mm。

振动冲击压实的最大压实力 $F_{zc}$ 取为冲击压实力和振动压实力的合力

$$F_{zc} = F_c + P \quad (3)$$

按式(3)计算 $F_{zc}$ 为24.6 kN,由此计算得振动冲击压实的线压力 $q_{zc}$ 为49.2 N/mm。

#### 2.1.3 对比评价

由前面的计算,2种压实工况下压实力的比值( $F_{zc}/F_c$ )和线压力的比值( $q_{zc}/q_c$ )均为1.44,即施加振动作用后冲击压实的压实力和线压力提高了44%,这对提高压实机的压实能力具有积极作用。

## 2.2 压实能量对比评价

压实效果的好坏是压实能量施加与吸收的协调问题,只有采用适合土体吸收能量的压实方式,并达到足够的压实功,才能取得好的效果,因此可以用压实能量来表征压实机的压实能力。压实工艺单位时间内输出的能量即激振强度的大小反映了不同压实工艺输出能量的强弱,反映了工艺的压实能力,用来评价压实工艺的压实能力是合理的<sup>[13]</sup>。以下从压实能量角度对振动施加前后冲击压实的压实能力进行定量研究与评价。

### 2.2.1 冲击压实能量

试验机压实轮转动 1 周的平均冲击压实能量为 1 kJ,若不计压实轮打滑,则在试验段  $L$  上冲击压实 1 遍输出的压实能量  $W_{c1}$  为

$$W_{c1} = \frac{L}{\pi D} \times 1 \quad (4)$$

由式(4)计算得  $W_{c1}$  为 6.37 kJ,进而碾压 12 遍总的冲击压实能量  $W_{c2}$  为 76.44 kJ。根据压实 1 遍所需时间  $t$ ,可计算出冲击压实的激振强度  $E_c$ (即冲击压实平均每秒输出的能量)为 0.27 kJ/s

### 2.2.2 振动冲击压实能量

振动压实的激振强度  $E_z$ (即振动压实平均每秒输出的能量)为

$$E_z = 2Af(G_n + \frac{\pi F_0}{4}) \quad (5)$$

按式(5)计算<sup>[13]</sup>得  $E_z$  为 0.11 kJ/s,根据压实 1 遍所需时间  $t$ ,可计算出振动压实 1 遍的输出能量  $W_{z1}$  和压实 12 遍的总能量  $W_{z2}$  分别为 2.64 kJ 和 31.68 kJ

按照能量叠加原理,振动作用施加后的压实能量为振动压实能量与冲击压实能量之和,因此振动冲击压实的激振强度  $E_{zc}$  为

$$E_{zc} = E_z + E_c \quad (6)$$

由式(6)计算得  $E_{zc}$  为 0.38 kJ/s,振动冲击压实 1 遍输出的压实能量  $W_{zc1}$  和压实 12 遍输出的总能量  $W_{zc2}$  分别为 9.12 kJ 和 109.44 kJ。

### 2.2.3 激振强度对比评价

根据前面的计算,振动作用施加后与施加前冲击压实机激振强度的比值( $E_{zc}/E_c$ )为 1.41,即施加振动作用后,冲击压实机的激振强度提高了 41%。由于行驶速度和试验段长度均相同,故每遍压实的输出能量和压实 12 遍的总输出能量均提高了 41%。

## 2.3 压应力特性对比评价

土基材料压实的过程是压实能量不断被材料吸

收并逐渐变密实的过程。压实过程中土压应力与密实度正相关,在有效碾压遍数内,随着碾压遍数的增加,土基吸收能量逐渐增多,压应力值逐渐增大,密实度逐渐增加。当铺层厚度不变时,传递至土基的能量与  $C$ ( $C$  为碾压遍数与压路机速度的比值)成正比<sup>[17]</sup>。以下利用压实过程中压应力与碾压遍数的关系曲线信息来定量研究振动施加前后土基的压应力特性,并进行对比评价。

根据压应力检测结果表 1 和表 3,做出压应力随碾压遍数变化的散点图和回归直线,如图 1 所示。

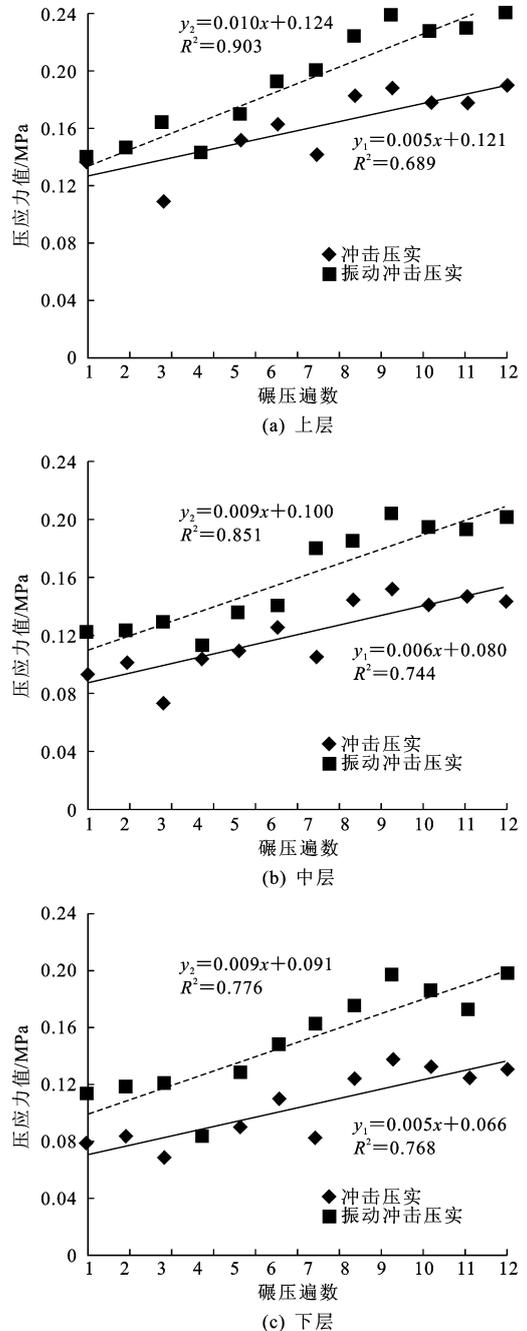


图 1 压应力散点及回归直线

Fig. 1 Stress scatters and linear regression

图1中回归直线方程及判定系数 $R^2$ 见表5,其中 $y_1$ 、 $y_2$ 分别为冲击压实和振动冲击压实的压应力, $x$ 为碾压遍数。

表5 压应力值与碾压遍数的关系

Tab. 5 Correlation of stress values and rolling times

检测位置	压实方式	回归方程	$R^2$
上层	冲击压实	$y_1 = 0.005x + 0.121$	0.689
	振动冲击压实	$y_2 = 0.010x + 0.124$	0.903
中层	冲击压实	$y_1 = 0.006x + 0.080$	0.744
	振动冲击压实	$y_2 = 0.009x + 0.100$	0.851
下层	冲击压实	$y_1 = 0.005x + 0.066$	0.768
	振动冲击压实	$y_2 = 0.009x + 0.091$	0.776

### 2.3.1 判定系数

回归直线的判定系数反映了压实的均匀性。2种压实方式的判定系数对比如图2所示。

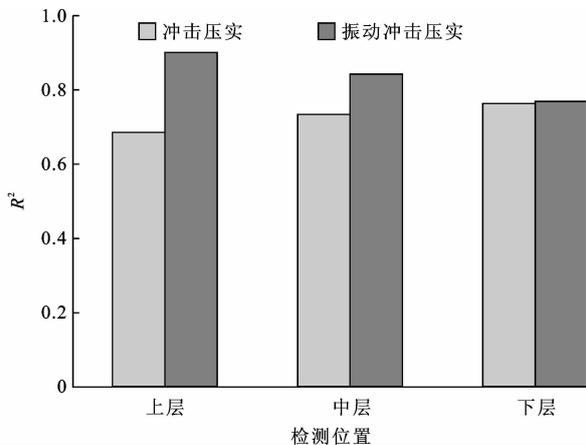


图2 回归直线的 $R^2$ 对比

Fig. 2 Comparison of  $R^2$  of regression line

从图2可看出:冲击压实的判定系数(上、中、下3层的 $R^2$ 平均为0.734)小于振动冲击压实(上、中、下3层的 $R^2$ 平均为0.843)。冲击压实的压应力离散性较大,原因是冲击频率较低,导致压实的均匀性较差,而振动冲击压实下,土壤颗粒几乎处于共振状态,再加上较强的冲击力作用,利于空隙的填充和颗粒势能的减小,压实均匀性较好。

### 2.3.2 截距

此处截距指碾压第1遍(左截距)和第12遍(右截距)时的压应力值,表征2种压实方式在开始和结束碾压时土基中产生压应力的大小,对比如下页图3所示。

从图3可以得出以下结论。

(1)同一深度处右截距比左截距显著增大,说明随着碾压遍数增多,土基密实度增加,压应力值增大。

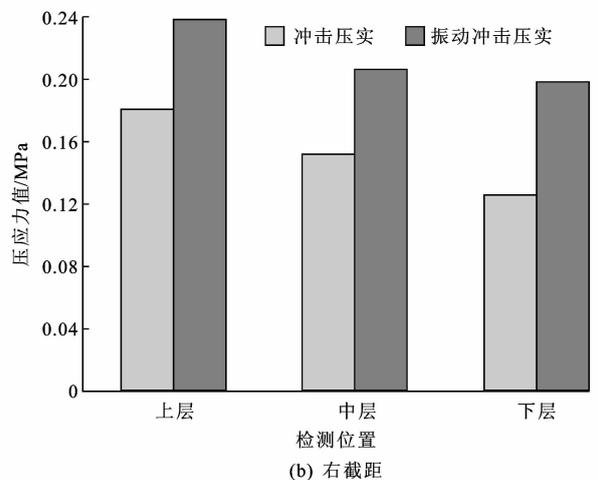
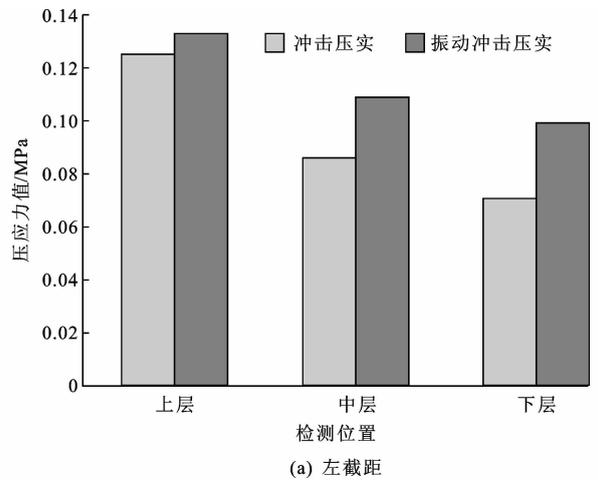


图3 回归直线截距对比

Fig. 3 Comparison of regression line intercept

(2)左、右截距值均随土基深度的增加而减小,即压应力值随着深度增加而减小。

(3)相同深度处振动冲击压实的截距大于冲击压实,右截距更明显,说明施加振动作用后各层深处压应力值得到提高,土基密实度越大效果越明显。

### 2.3.3 斜率

斜率反映压应力增加的速率,表征被压材料吸收压实能量的速率以及对压实工艺的适应性。下页图4为压应力回归直线斜率的对比。

从图4可以得出以下结论。

(1)不同深度处压应力回归直线的斜率相当,冲击压实的平均斜率为0.005,振动冲击压实的平均斜率为0.009,表明不同深度处压应力随碾压遍数的增长速率相当。

(2)振动冲击压实的平均斜率比冲击压实大,即施加振动作用后土基压应力随碾压遍数的增长速率增大,表明压实能量的吸收速率增大,利于土基的快速压实。

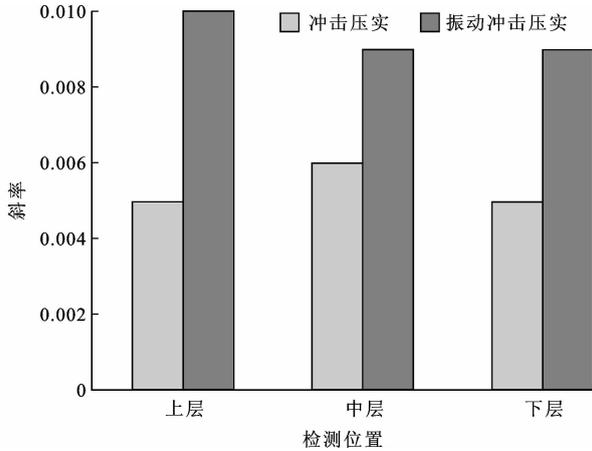


图 4 回归直线斜率对比

Fig. 4 Comparison of regression line slopes

2.3.4 应力能量指数 SEI

为了定量评价压实过程中土基材料吸收的总功或总能量,通过分析土基压应力与碾压遍数关系曲线特征,借鉴 Bahia 等提出的能量指数概念<sup>[18-19]</sup>,提出一个与能量有关的指数——应力能量指数 SEI (stress energy index)。应力能量指数 SEI 为压应力-碾压遍数回归曲线与横、纵轴之间所包围的面积,表示土基材料在不同压实方式施工过程中吸收的总能量,如图 5 所示。

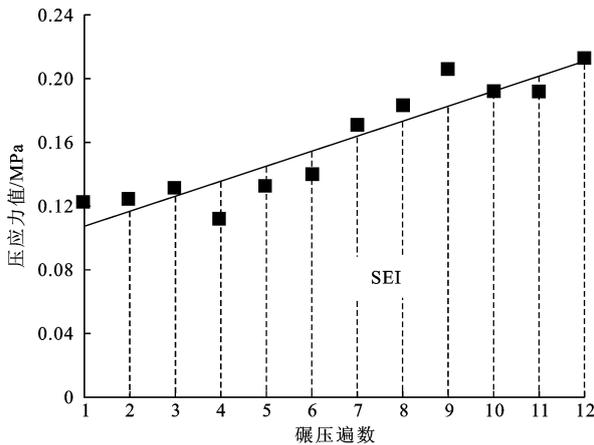


图 5 应力能量指数 SEI

Fig. 5 Stress energy index SEI

按照以上前提和方法,计算图 1 中 2 种压实方式的应力能量指数,如表 6 所示。

表 6 应力能量指数 SEI 的数值

Tab. 6 Values of SEI(stress energy index)

压实方式	SEI		
	上层	中层	下层
冲击压实	1.69	1.31	1.08
振动冲击压实	2.08	1.74	1.64
增长率/%	23.1	32.8	51.9

从表 6 中的数据可以得出以下结论。

(1) 2 种压实方式的 SEI 均随土层深度的增加而减小,表明黄土吸收的压实能量随土层深度的增加逐渐减小。

(2) 各层深处振动冲击压实的 SEI 均大于冲击压实,表明施以振动作用后各层深处黄土吸收的压实能量均有所增加。

(3) 土壤深度越大,施以振动作用后 SEI 增长率越大,下层 SEI 增长率达到 51.9%,表明振动作用对深层土壤压实能量的吸收作用更大。

2.4 压实深度特性对比评价

根据土壤的极限平衡理论,压实机的最大影响深度  $Z$  为<sup>[20]</sup>

$$Z = \frac{p_z}{c \pi \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)} \quad (7)$$

式中: $p_z$  为压实轮对地面的总线压力(N/m); $c$  为土壤的粘聚力(N/m<sup>2</sup>); $\varphi$  为土壤的内摩擦角(°)。

式(7)表明压实最大影响深度由压实轮的线压力和土体类型(土的粘聚力和内摩擦角)决定。根据前面的计算,振动冲击压实线压力是冲击压实的 1.44 倍,若假定 2 种压实方式对同一土体的粘聚力和内摩擦角影响不大,即把式(7)的分母看作常数的情况下,就最大影响深度而言,振动冲击压实要比冲击压实高 44%。然而,振动效应会在一定程度上改变土壤的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ,从而改变压实的影响深度。下面分别从压应力-深度特性和压实机的压实特性方面,对施加振动前后的压实深度特性进行定量研究与评价。

2.4.1 压应力-深度特性

根据表 1、表 3,做出 2 种压实方式下压应力随深度的变化曲线,如下页图 6 所示。

从图 6 可以看出,2 个曲线族的离散性不同,在各检测点处压应力的分布范围也不同。图 6 中应力曲线族在检测点处的最小和最大应力值、极差见下页表 7。图 6(a)中第 3 遍和图 6(b)中第 4 遍压应力曲线的应力值均小于前几遍,这是由于压应力传感器错过了冲击机构冲击力的缘故,在表 7 中未计入该曲线。

从图 6 和表 7 中的数据可以得出以下结论。

(1) 各深度检测点处最小和最大压应力值,振动冲击压实均大于冲击压实,表明施以振动作用后黄土中各层深处压应力值均得到提高。

(2) 振动冲击压实应力曲线族应力值的极差较大,表明施以振动作用后压应力随碾压遍数增加的

表7 应力曲线族检测点处压应力最小值、最大值和极差

Tab.7 Minimum values, maximum values and ranges of stress curve families at detection points

MPa

压实方式	上层			中层			下层		
	最小应力值	最大应力值	极差	最小应力值	最大应力值	极差	最小应力值	最大应力值	极差
冲击压实	0.136 2	0.189 4	0.053 2	0.093 2	0.152 0	0.058 8	0.078 2	0.137 6	0.059 4
振动冲击压实	0.139 1	0.238 8	0.099 7	0.121 4	0.202 4	0.081 0	0.113 2	0.198 0	0.084 8

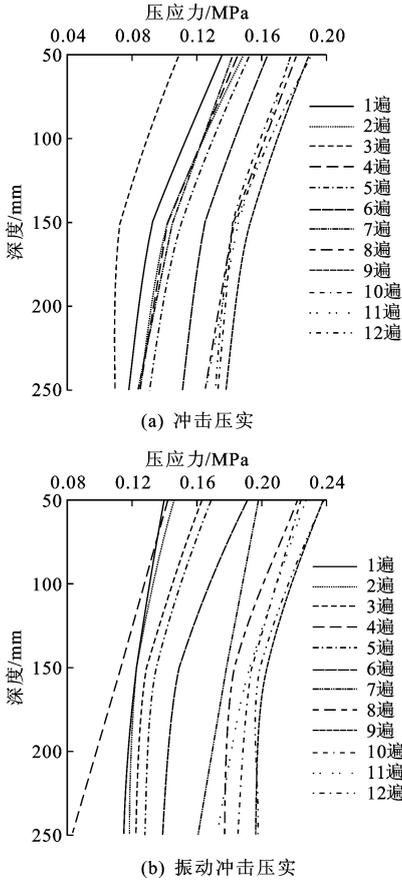


图6 压应力随深度变化曲线

Fig.6 Curves of stress variation with depth

幅度更大,压实效率更高。

2.4.2 压实特性

级配良好的集料(土或路面材料)经一定速度范围压路机的几遍碾压后,被压集料的压实度与压实深度的最佳关系曲线称为压路机的压实特性,压实机械的压实特性对路基的压实度起着非常重要的作用,用压实特性对路基的压实度进行分析是一种有效的方法<sup>[21]</sup>。根据表2、表4,做出2种压实方式下的压实特性曲线,如图7所示。

图7中压实特性曲线在4个检测点处压实度的平均值、压实特性曲线的平均斜率及增长率见表8。

从图7和表8中的数据可以得出如下结论。

(1)振动冲击压实特性曲线族的离散性比冲击压实小,离散性越小表明压实均匀性越好,即施以振动作用后压实均匀性得到提高。

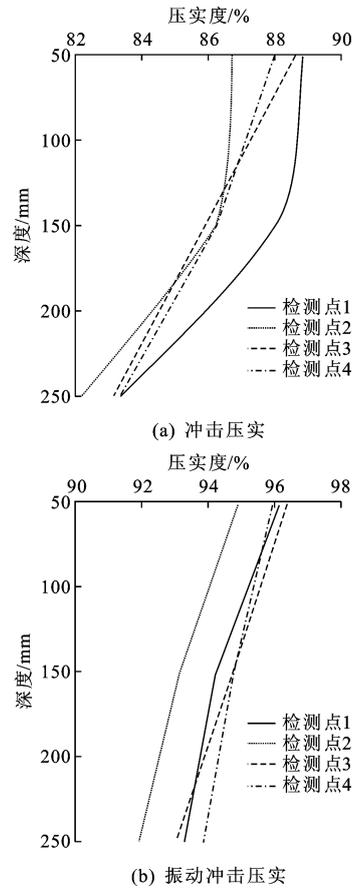


图7 碾压12遍的压实特性曲线

Fig.7 Compaction characteristic curves after rolling 12 times

表8 压实度平均值、特性曲线平均斜率及增长率

Tab.8 Average compactness, average slopes of characteristic curves and their growth rates

压实方式	压实度平均值/%			平均斜率
	上层	中层	下层	
冲击压实	88.04	86.50	83.00	37.8
振动冲击压实	95.89	94.30	93.06	70.4
增长率/%	8.92	9.02	12.1	86.2

(2)振动冲击压实方式下,上、中、下3层的压实度分别比单纯冲击压实提高了8.92%、9.02%和12.1%,表明施以振动作用后冲击压实机对 layers 土壤的压实能力均增强,此外,土壤深度越大,压实度的增长率越大,表明振动对冲击压实的强化作用对于深层土壤更明显。

(3)振动冲击压实特性曲线的平均斜率比单纯

冲击压实提高了 86.2%,表明施以振动作用后压实度随土基深度衰减的更慢,压实影响深度更大。

### 3 结 语

(1)对黄土进行了冲击压实与振动冲击压实对比试验,施以振动作用后冲击压实机的压实力和线压力增加了 44%。

(2)施以振动作用后冲击压实机的激振强度提高了 41%,即提高了冲击压实机压实能量的输出能力。

(3)利用压应力与碾压遍数的关系曲线信息定量研究了 2 种压实工艺的压应力特性。施以振动作用后,提高了压实的均匀性;压应力值随着压实遍数的增加而增大,随着深度的增加而减小,相同深度处振动冲击压实的压应力值大于单纯冲击压实;随着碾压遍数的增加,各层深处压应力的增长率相当,施以振动作用后压应力随碾压遍数的增长率增大,利于土基的快速压实。

(4)为定量评价压实过程中土基材料吸收的总功或总能量,定义了应力能量指数 SEI 的概念。SEI 随着层深的增加而减小,表明土层深度越大吸收的压实能量越少;施以振动作用后各层深处的 SEI 值均增大,上、中、下 3 层 SEI 增长率分别为 23.1%、32.8%和 51.9%,表明振动作用使各层土壤吸收的压实能量均有所增加,对深层土壤压实能量的吸收作用更明显。

(5)对压应力-深度特性曲线进行了分析。施以振动作用后黄土中各层深处压应力值均得到提高,压应力随碾压遍数增加的幅度更大,压实效率更高。

(6)对压实特性曲线进行了分析。施以振动作用后冲击压实 12 遍,土基上、中、下 3 层的压实度分别提高了 8.92%、9.02%和 12.1%,特性曲线平均斜率提高了 86.2%,表明振动作用对冲击压实能力的强化作用明显,压实影响深度更大。

(7)本文未对碾压每 1 遍的压实度数据和不同压实方式下压实机的能耗量等进行检测,进一步研究将增加这些数据对冲击压实机的压实能力进行定量研究与评价。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 景宏君,张 斌. 黄土地区公路路基冲击压实试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):25-29.  
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Experiments of high-

way subgrade impact compaction in loess region[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 25-29. (in Chinese)

- [2] 姚运仕,申宝成,冯忠绪. 仿冲击压实机的试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(2):58-60.  
YAO Yun-shi, SHEN Bao-cheng, FENG Zhong-xu. Experiment study of impact-like roller[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(2): 58-60. (in Chinese)
- [3] 赵炼恒,罗 恒,李 亮,等. 冲击压实技术在高速公路高填方路基中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增2):4191-4197.  
ZHAO Lian-heng, LUO Heng, LI Liang, et al. Research on application of impact compaction technology to high embankment of highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4191-4197. (in Chinese)
- [4] 黄海松,胡庆峰,张 伟,等. 冲击压实法在软基处理中的应用[J]. 现代交通技术,2013,10(4):21-23.  
HUANG Hai-song, HU Qing-feng, ZHANG Wei, et al. Application of impact compaction method in soft subgrade treatment[J]. Modern Transportation Technology, 2013, 10(4): 21-23. (in Chinese)
- [5] FORSSBLAD L. Investigation of impact on a ground surface[J]. Acta Polytechnica Scandinavian Civil Engineering and Building Construction, 1965, 43(32): 86-99.
- [6] FORSSBLAD L. Investigation of soil compaction by vibration[J]. Acta Polytechnica Scandinavian Civil Engineering and Building Construction, 1965, 34(185): 231-239.
- [7] 杨人凤,张永新,杨云岭. 冲击振动联合作用下土的压实机理试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(3):64-66.  
YANG Ren-feng, ZHANG Yong-xin, YANG Yun-ling. Test for soil compaction principle by impactation and vibration[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 64-66. (in Chinese)
- [8] 杨人凤,孙祖望,张永新. 新型复合压实技术和装置的试验研究[J]. 长安大学学报:自然科学版,2002,22(4):75-77.  
YANG Ren-feng, SUN Zu-wang, ZHANG Yong-xin. Test study of a new composite compaction technique[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 75-77. (in Chinese)
- [9] 蔡同俊. 黄土路基压实特性研究[D]. 西安:长安大学,2005.

- CAI Tong-jun. Study on compaction characteristics of loess subgrade[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [10] 张伟. 黄土压实机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- ZHANG Wei. Study on the loess compaction principle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [11] 邸俊峰. 冲击振动压路机模型对黄土压实试验的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
- DI Jun-feng. Study on the loess compaction experiment of impact vibratory roller model [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [12] 张青哲, 杨人凤, 戴经梁. 黄土振动压实特性分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(5): 27-30.
- ZHANG Qing-zhe, YANG Ren-feng, DAI Jing-liang. Analysis on compaction property of loess by vibrating roller [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 27-30. (in Chinese)
- [13] 王龙, 解晓光. 振动压实能力与道路基层材料可压实性评价[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 203-207.
- WANG Long, XIE Xiao-guang. Evaluation of vibration compaction ability and road-base materials compaction performance[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(2): 203-207. (in Chinese)
- [14] 杨人凤. 冲击、振动复合式压路机: 中国, 02224615. 0 [P]. 2003-04-02.
- YANG Ren-feng. Composite roller of impact and vibration; China, 02224615. 0 [P]. 2003-04-02. (in Chinese)
- [15] 杨人凤. 冲击振动复合压实技术与设备[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- YANG Ren-feng. Impact vibration composite compaction technology and equipment [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [16] 尹继瑶. 单轮振动压路机技术性能参数计算——单轮振动压路机压实能力的评价与分析[J]. 工程机械, 2006, 37(9): 72-76.
- YIN Ji-yao. Evaluation and analysis of compacting capability for single drum vibratory compactors [J]. Construction Machinery and Equipment, 2006, 37(9): 72-76. (in Chinese)
- [17] 张奕. 智能压路机控制系统设计及关键技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.
- ZHANG Yi. Intelligent vibratory roller control system design and key techniques research [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)
- [18] BAHIA H U, FRIEMEL T P, PETERSON P A, et al. Optimization of constructability and resistance to traffic: a new design approach for HMA using the superpave compactor [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1998, 67: 189-232.
- [19] 张争奇, 袁迎捷, 王秉纲. 沥青混合料旋转压实密实曲线信息及其应用[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 1-6.
- ZHANG Zheng-qi, YUAN Ying-jie, WANG Bing-gang. Information of gyratory compaction densification curve of asphalt mixture and its application [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 1-6. (in Chinese)
- [20] 杨士敏. 压路机作用下土应力分析及对压实效果的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 1994, 11(6): 10-13.
- YANG Shi-min. The stress analysis of soil acted with rollers and influence to compaction effect [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 1994, 11(6): 10-13. (in Chinese)
- [21] 车胜创. 压路机的压实特性对公路压实度的影响分析与研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2004, 21(1): 37-39.
- CHE Sheng-chuang. Analysis and study of influences of compaction characteristics of roller on highway compaction [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2004, 21(1): 37-39. (in Chinese)