

文章编号:1671-8879(2007)01-0001-06

风积沙振动参数及振动压实机理

陈忠达¹, 李万鹏^{1,2}

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031)

摘 要:利用振动台法,研究了风积沙的振动压实特性,分析了振幅、频率、振动时间、配重、含水量、填料方式等对风积沙振动压实特性的影响和变化规律,并选定主要参数的变化范围,进行了正交试验,以确定这些影响参数对干密度的影响程度和最佳振动参数的组合。在此基础上,利用动态力学分析方法,分析了风积沙的振动压实机理。结果表明,干燥状态和最佳含水量状态下,风积沙的最佳振动频率为 45~50 Hz,风积沙振动压实时,宜采用高频率(45~50 Hz)和小振幅(0.4~1.0 mm)。

关键词:道路工程; 风积沙; 振动台; 振动压实; 压实机理

中图分类号:U416.166

文献标志码:A

Vibratory parameters and vibratory compacting mechanism of eolian sand

CHEN Zhong-da¹, LI Wan-peng^{1,2}

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan 250031, Shandong, China)

Abstract: Through the test of the biggest density by the vibration table in different vibratory-frequency, wing, vibratory-time, compacting-weight, water-content and filling-manner, the rules and the degree that these vibratory parameters influence the vibratory compacting of the eolian sand are studied. Then based on the orthogonal test of the main parameters, this paper analyzes the influencing primary and secondary by the vibratory parameters, and the optimum combination of the parameters is confirmed. Based on the laboratory tests, the vibratory compacting mechanism of eolian sand is analyzed by dynamic mechanics method. The research indicates that the best vibration frequency is 45~50 Hz in dry and the best moisture content state, and it is better to use high frequency(45~50 Hz) and small amplitude (0.4~1.0 mm) when the eolian sand is compacted. 5 tabs, 7 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; eolian sand; vibration table; vibratory compacting; compacting mechanism

0 引 言

振动压实是通过振动压实机械的往复作用,给被压材料连续的冲击力(通常是正弦波动的振动荷载),导致材料强迫振动。振动一方面使材料的内摩

擦力减小;另一方面使颗粒本身产生惯性力来消除颗粒间的粘聚力和内摩擦力,使颗粒重新排列,相互嵌挤,达到最佳密实状态。对于风积沙来说,由于粘聚力基本为 0,振动时易使颗粒处于运动状态,所需的惯性力也较小,从而使得振动压力波波及到较大

的深度,获得较大的有效压实深度和较好的压实效果。另外,根据振动原理,当振动压路机的振动频率接近于风积沙的自振频率时,其颗粒的被迫振幅将增大,同时内摩擦力降低,这是获得良好压实的有效途径^[1]。因此,振动压实是对风积沙进行压实的最有效手段之一。本文对取自新疆古尔班通古特沙漠的风积沙试样^[2],采用振动台法在不同振幅、频率、时间、含水量及填料方式等条件下进行振动试验;并对主要因素(振幅、频率和含水量)进行正交试验;分析最佳的振动参数和振动参数对压实效果的影响及作用效果。在此基础上,利用动态力学分析方法,探讨风积沙的振动压实机理;并分析施工中振动压路机的振动频率和振幅对风积沙压实效果的影响及振动压实适用的频率和振幅组合范围。

1 试验仪器

振动台:频率 0~60 Hz 可调;双振幅 0~2 mm 可调;振动时间任意设置;振动加速度 $a=F/(233+M_{\text{试}})$,其中 F 为振动台的激振力(2 330 kN); $M_{\text{试}}$ 为试样总质量。

试筒:重型击实试验试筒,内径 15.2 cm,容积 2 592 cm³。

配重块:4 块,每块质量 6.25 kg,压强 3.45 kPa。

2 风积沙振动压实的影响因素

由于试验可变化的参数很多(7 个),为了减少试验量,在查阅相关资料的基础上^[3-7],缩小了各参数的变化范围。本文把振动频率设置为 30、35、40、45、50 Hz;振幅设置为 0.3、0.5、0.7、0.9 mm;振动时间设置为 1、2、3、4 min;配重块设置为 4 块(质量为 25 kg,压强为 13.8 kPa)、3 块(质量为 18.75 kg,压强为 10.35 kPa)、2 块(质量为 12.5 kg,压强为 6.9 kPa)、1 块(质量为 6.25 kg,压强为 3.45 kPa);填料方式分 3 次填料、1 次填料。

2.1 振动频率

在一定的条件下,材料的干密度随振动频率的变化而变化,当振动频率达到某一数值时,干密度为最大值,此时的振动频率称为最佳振动频率,其值接近于被碾压土壤的固有频率(即自振频率)。

干沙(含水量为 0)和湿沙(含水量 10%)的干密度与振动频率的关系见图 1。振幅设定为 1.0 mm,振动时间为 3 min,4 块配重块,3 次填料方式。

由图 1 可知,两种状态下振动频率与干密度的关系基本一致,振动频率在一定范围内存在一个最

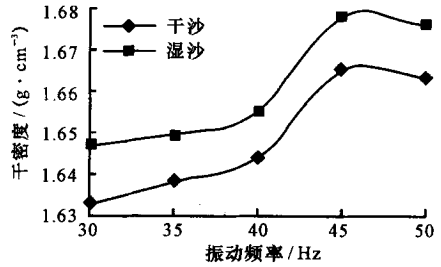


图 1 风积沙振动频率与干密度的关系

佳值,根据趋势线可判断出两种状态下风积沙的最佳振动频率基本在 45~50 Hz 之间。

2.2 填料方式

填料方式有两种:一种是 1 次填料,即 1 次往试筒里填满沙样;另一种是 3 次填料,即分 3 次均匀填料。将振动频率设定为 50 Hz,振幅为 0.9 mm,振动时间为 2 min,含水量为 10%,4 块配重块,对不同振动频率下的两种填料方式的压实效果进行了对比试验,试验结果见表 1 和图 2。

表 1 填料方式对干密度的影响

振动频率/Hz	30	35	40	45	50
1 次填料下的干密度 ρ_0 / (g · cm ⁻³)	1.590	1.592	1.618	1.624	1.615
3 次填料下的干密度 ρ_1 / (g · cm ⁻³)	1.647	1.649	1.655	1.668	1.666
$(\rho_1 - \rho_0) \cdot \rho_0^{-1} / \%$	3.6	3.6	2.3	2.7	3.2

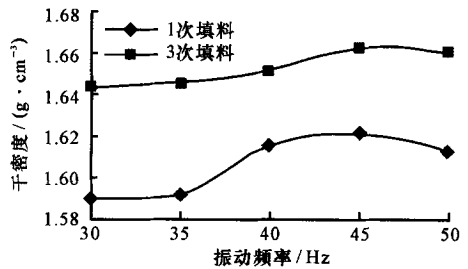


图 2 不同填料方式下干密度与振动频率关系

由试验结果可看出,当其他条件相同时,3 次填料方式风积沙的干密度比 1 次填料方式大 2.5%~3.5%,但两者的趋势是一致的。这主要是因为振动压实有一定的压实厚度,当压实厚度过大时,会影响压实效果。因此,风积沙压实过程中,当压实厚度较大时,应采用分层压实,这与重型击实标准相同。

2.3 配重

配重主要是模拟振动压路机的静压力。为研究配重对压实效果的影响,将振幅设定为 0.9 mm,振动时间为 2 min,频率为 50 Hz,3 次填料方式。风干状态风积沙的配重与干密度的关系见图 3。

由试验结果可以看出,干密度随配重块的增加而增加,在 0 块至 1 块时,干密度的增加较大;在 3

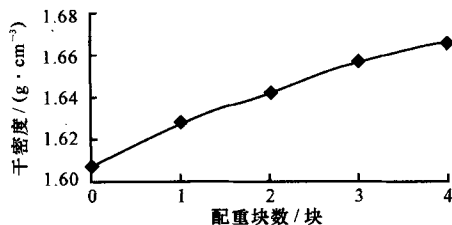


图3 配重块与干密度的关系

块至4块时增加较小。这与实际压路机的工作过程一致。众所周知,土体所受静、动压力的增大与压路机质量成正比,静载荷(线压力)是振动压路机的重要参数之一。因此,考虑目前振动压路机的质量和室内试验情况,在试验中采用总质量为25 kg的4块配重块,作用于试样的压强为13.8 kPa。

2.4 振动时间

根据有关资料及研究成果^[8-10],风积沙的振动时间一般为2~3 min。设定振幅为0.6 mm,频率为47.7 Hz,含水量为10%,4块配重块,3次填料方式,就振动时间对压实效果的影响进行了试验研究,试验结果见图4。

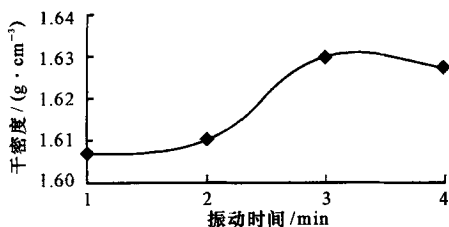


图4 振动时间与干密度的关系

由图4可知,在一定的振动时间内,干密度随振动时间的增加而略有增大,但增大幅度很小。如振动时间为1 min时,干密度为1.606 g/cm³;振动时间为3 min时,干密度为1.630 g/cm³,两者仅差1.5%;而且当振动时间为3 min时,风积沙的干密度基本趋于稳定,故振动时间为3 min比较适宜。另外,根据材料振动理论,如果含有不同大小颗粒的材料进行长时间的振动,则可能出现分层现象,大颗粒都处在下层,这是公路施工中不允许的。因此,振动应该在材料具有最大干密度,即大颗粒之间的空隙由小颗粒料填满时结束,此时分层尚未发生,所需的振动时间可通过室内试验确定。一般来说,风积沙的振动时间为3 min左右,水泥混凝土混合料为30 s,沥青混凝土混合料为1~1.5 min。

2.5 振幅

振幅与干密度的关系见图5。其中振动频率设定为50 Hz,振动时间为3 min,含水量为10%,4块配重块,3次填料方式。

由图5可知,干密度随振幅的增大而增加。另

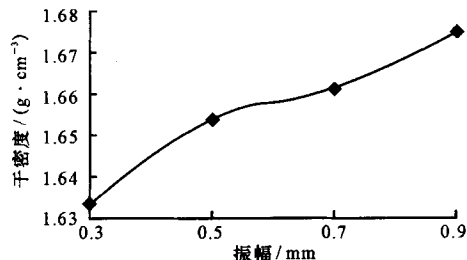


图5 振幅与干密度的关系

外,由于风积沙振动压实试验结果的离散性较大,而且对本试验仪器,当频率达到45 Hz以上,振幅达到1.0 mm后很难再提高,振幅会出现来回波动,很难精确控制。同时,参考施工中的实际情况,当采用高频率和大振幅联合作用时,会引起振动轴承过高的应力和出现其他设计上的困难。振幅过大,振动压实过程中振动轮会出现与地面脱离的现象,称为“跳振现象”。因此,不宜一味地追求较大振幅,而应根据风积沙层厚度和压路机的振幅变化范围合理选择。

2.6 含水量

将振动频率设为47 Hz,振幅为0.7~0.9 mm,振动时间为3 min,3次填料方式,4块配重块,变化含水量(包括风干状态),对风积沙进行了振动试验,试验结果见图6。

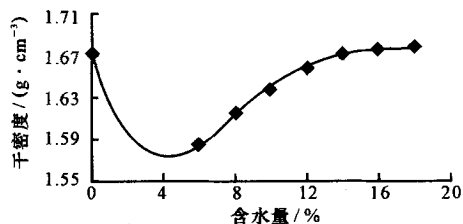


图6 含水量与干密度的关系

由图6可以看出,在风干状态下,风积沙具有较大的干密度,随着含水量的增加,干密度降低;然后继续增大含水量,干密度逐渐增大。当干密度达到一定的值后,即使再增加含水量,干密度基本不再变化。分析认为,对于振动台法,当干密度达到最大时,此时风积沙含水量已经基本饱和,即使再增大含水量,风积沙体内也不会再吸收水分,过多的水分将经过风积沙迅速渗出;正是因为水的下渗,会使风积沙干密度略有增加,但不是很明显。如含水量为13.8%时,干密度为1.671 g/cm³;当含水量增加到16.2%和17.7%时,干密度只增加了0.003 g/cm³和0.007 g/cm³,可见,此时干密度的增幅已经很小。风积沙的含水量与干密度的关系曲线出现了两个峰值,即在最佳含水量状态(一般为13%~16%)和风干状态(含水量一般为0~1%)下,干密度均达到较大值。由此表明,风积沙在风干状态及最佳含

水量状态下均易达到密实状态,具有干压实和湿压实两大特性。

3 风积沙振动压实正交试验

为了分析风积沙的压实效果和确定影响因素对干密度的影响程度,选取含水量、振幅和振动频率等振动压实影响因素进行了正交试验,并将其他的振动压实参数按上述试验得出的最佳值控制,即最大配重为 4 个配重块,振动时间 3 min,3 次填料方式。

3.1 正交试验设计

考核指标:风积沙的干密度(g/cm^3)。
考察的因素和水平:振动频率 A (A_1 为 40 Hz、 A_2 为 45 Hz、 A_3 为 50 Hz);振幅 B (B_1 为 0.5 mm、 B_2 为 0.7 mm、 B_3 为 0.9 mm);风积沙的含水量 C (C_1 为 10%、 C_2 为 14%、 C_3 为 18%)。

正交表:根据选定的因素和水平,采用 $L_9(3^3)$ 正交表。

3.2 正交试验结果及分析

利用可调频调幅的振动台进行振动试验,试验

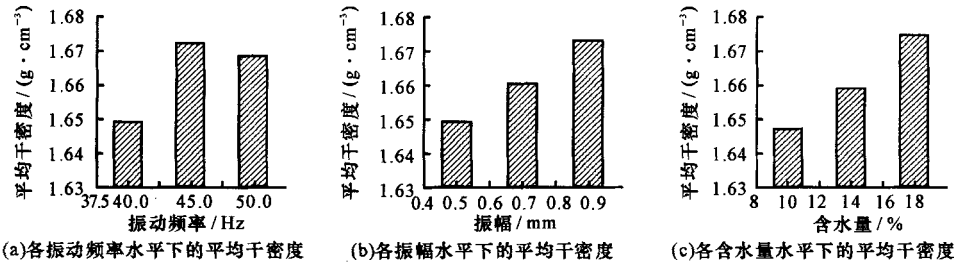


图 7 风积沙振动压实正交试验比较

表 3 风积沙振动压实正交试验极差分析

因 素	振动频率	振 幅	含水量
均值 1/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.649	1.656	1.655
均值 2/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.672	1.663	1.662
均值 3/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.668	1.671	1.672
极差/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.023	0.015	0.017

注:均值 1 为水平 1 下的 3 个试验结果的平均值;均值 2 为水平 2 下的 3 个试验结果的平均值;均值 3 为水平 3 下的 3 个试验结果平均值。

由极差分析可知,振动频率中平均干密度的极差为 $0.023 \text{ g}/\text{cm}^3$,振幅中平均干密度的极差为 $0.015 \text{ g}/\text{cm}^3$,含水量中平均干密度的极差为 $0.017 \text{ g}/\text{cm}^3$,由此说明振动频率对干密度的影响最大,含水量次之,振幅最小,但含水量和振幅的影响程度差别不大。

3.2.2 方差分析法

一般地说,极差分析法可以用每一个因素在各

结果见表 2。

表 2 风积沙振动压实正交试验

试验号	振动频率 A	振幅 B	含水量 C	结 果/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	A_1	B_1	C_1	1.632
2	A_1	B_2	C_2	1.648
3	A_1	B_3	C_3	1.668
4	A_2	B_1	C_2	1.665
5	A_2	B_2	C_3	1.678
6	A_2	B_3	C_1	1.672
7	A_3	B_1	C_3	1.670
8	A_3	B_2	C_1	1.662
9	A_3	B_3	C_2	1.673

分别用直观分析法(极差分析法)和方差分析法对正交试验结果进行分析。

3.2.1 极差分析法

极差分析方法是通过对比较每种因素极差的大小,来判断这些因素中哪些有显著影响。3 种因素的极差分析见图 7 和表 3。

个水平上试验值的平均数,考察该因素对试验结果的影响。而要判断哪个因素对试验结果影响显著,哪个因素影响不显著,极差分析法就有一定的局限性,因此本文又采用方差分析法对试验结果进行了分析,方差分析结果见表 4。

表 4 风积沙振动压实正交试验方差分析

项 目	离 差	自由度	均方离差	F 值
振动频率 A	$Q_A = 0.000\ 906$	2	$S_A = Q_A/2 = 0.000\ 453$	$F_A = S_A^2/S_E^2 = 30.15$
振 幅 B	$Q_B = 0.000\ 390$	2	$S_B = Q_B/2 = 0.000\ 195$	$F_B = S_B^2/S_E^2 = 1.397$
含水量 C	$Q_C = 0.000\ 438$	2	$S_C = Q_C/2 = 0.000\ 219$	$F_C = S_C^2/S_E^2 = 1.761$
误 差 E	$Q_E = 0.000\ 165$	2	$S_E = Q_C/2 = 0.000\ 950$	
总 和	$Q = 0.001\ 899$	8		

给定显著水平 $\alpha = 5\%$,查表得 $F_\alpha(2, 2) = 19$ 。易见 $F_A > 19$,这表明振动频率对干密度有显著的影响;又 $F_B < 19, F_C < 19$,表明振幅和含水量对干密度无显著影响。方差分析结果基本与极差分析结果吻合,都说明振动频率对干密度有显著的影响,而含

水量对风积沙最大干密度的影响较小。研究表明,风积沙在干燥、最佳含水量两种状态下均可以达到密实状态。

通过对正交试验结果的分析,可以发现,在组合 $A_3B_1C_3$ 和组合 $A_1B_3C_3$ 下,风积沙均可以达到较大的干密度。因此,在风积沙的振动压实施工中,可采用大振幅低频率或高频率小振幅的组合。

4 振动压实机理分析

4.1 振动压实动态力学分析

振动压路机在振动压实过程中,振动轮对铺层每冲击一次,被压材料中就产生一个冲击波,同时,这个冲击波在材料内沿着纵深方向扩散和传播。因此,通常要考虑两种基本的动态力学特性:波动效应和惯性效应。

4.1.1 波动效应

在静力作用下,由于荷载作用的时间较长,且不随时间而变化,在达到静力平衡之前,材料结构内部产生的短期效应可不予考虑。但在振动荷载作用下,外力随时间作周期性或非周期性的变化,材料颗粒受到扰动而脱离原来的平衡位置振动起来,它将受到周围颗粒施加给它的回复力。这种颗粒之间的回复力是一种弹性力。在表层颗粒受到周围颗粒的弹性力作用而振动起来的同时,根据力作用的相互性,它也将对周围颗粒提供弹性力的反作用力,使它们离开平衡位置,从而带动周围的颗粒振动起来。这样,振动便以一定的速度由近及远的传播,形成波动。

4.1.2 惯性效应

严格地说,由于材料是固体、气体和液体的混合体,不是单纯的理想固体,所以振动波在材料中的实际传播规律十分复杂,大多数研究者都对其进行了一定程度的简化,得出的规律也有一定的局限性。因此,本文在分析中除考虑波动效应外,还考虑了惯性效应,以期得出材料的动态力学特性。

当振动压路机以一定的频率对材料作用时,接触的材料就会出现共振,被压实材料的颗粒以相同的频率开始振动。对每个颗粒来说,由于受到变化的外力作用,其受力并不处于平衡状态,而是有微小的运动。这些微小的运动由于颗粒本身质量的存在便产生惯性力 F 。

从振动的角度看,颗粒在被迫振动时的位移近似为正弦曲线,即

振幅 $B=M\sin(\omega t+\beta)$

加速度 $a=B''=-M\omega^2\sin(\omega t+\beta)$

则惯性力 F 表示为

$F=ma=-mM\omega^2\sin(\omega t+\beta)$ (1)

式中: M 为幅值; t 为振动时间; ω 为振动角频率; β 为初相位角; m 为颗粒的质量; a 为颗粒的加速度。

由式(1)可知,惯性力与被压实材料颗粒的质量成正比。材料在被迫振动后,由于各颗粒的质量和所处的位置不同,因而各自的惯性力也就不同。如果惯性力的相差超过颗粒间的内摩擦力或粘聚力时,颗粒就要相对移动,重新调整其相对位差,填充其间空隙,从而使被压材料达到密实。

4.2 振动对压实材料抗剪强度的影响

由于风积沙的结构是单粒结构,粘聚力基本为 0,因此在压实过程中形成的剪阻力主要是颗粒间的内摩擦力。一般来说,颗粒间的摩擦力是由颗粒的滑动摩擦、咬合摩擦、颗粒破碎效应和重新排列效应所组成。对于风积沙来说,振动压实中的剪阻力主要是由颗粒间的滑动摩擦引起的。滑动摩擦力是由于颗粒接触表面粗糙不平而形成的微细咬合作用。由于颗粒很小,颗粒间距离微弱的增长,都会使微细咬合作用产生很大的衰减。由动态力学特性分析可知,每个风积沙颗粒的 F 如式(1)所示。

若令振动强度

$e=M\omega^2$ (2)

则惯性力 F 可改写为

$F=-mesin(\omega t+\beta)$ (3)

由式(3)可知,每个颗粒受到的 F 与 m 和 e 成正比,而 e 只与振动机械的振幅和频率有关。对于有一定级配的风积沙,相邻颗粒的粒径不同,即它们的颗粒质量不同,因此相邻颗粒在具有相同的 e 时,它们受到的 F 的大小是不同的。这种差别必然导致颗粒质点间距离发生微小的变化,使颗粒间的微细咬合作用产生很大的减小,导致内摩擦角 φ 减小,即内摩擦力 $\sigma\tan\varphi$ 减小,从而使抗剪强度 τ_i 减小。不同颗粒级配风积沙的振动压实试验结果(表 5)可充分证明这一点。

表 5 不同级配风积沙振动试验结果

沙 样	小于下列孔径(mm) 的沙质量百分比/%		振动最大干密度/ (g·cm ⁻³)	
	孔径 0.15 mm	孔径 0.075 mm	干燥状态	最佳含水量
I	52.48	5.17	1.675	1.678
II	96.76	39.48	1.652	1.616

注:I取自古尔班通古特沙漠(北疆);II取自塔克拉玛干沙漠(南疆)。

风积沙颗粒质量 m 较大,当其颗粒受强迫振动后,由于惯性力的作用,可以显著减小颗粒的滑动摩

擦,使抗剪强度减小。当振动强度很大,使风积沙颗粒承受的最大剪切应力大于其抗剪强度时,颗粒在其自重和惯性力的作用下相互脱离,发生位移,力图占据最稳定的位置,排除气相,相互嵌挤,达到密实,特别是振动压实对颗粒不均的风积沙的压实效果更加明显。

4.3 振动频率和振幅对压实效果的影响

振动频率和振幅对压实效果的影响很大,由式(2)可以看出,频率和振幅的增大,均会引起振动强度的增大;而振动强度增大必然引起惯性力的增大。

对于振动压路机来说,其振动参数(振动频率、振幅等)的最佳值可从试验中获得。增加频率和振幅可以提高振动强度,但超过某一振动强度后,反而会降低压实效果。另外,如果要求的压实深度不大,就无需采用过大的振动强度,因为过大的压实能量不仅不能被压实层的材料吸收,反而会使已压实的薄层产生松散现象;而且被压材料颗粒受到无规则的严重蹦跳冲击,引起过度碾压而使密实度降低,压路机机架和振动轮与底架之间的橡胶元件也会发生严重损坏。因此,不易采用大振幅和高频率的联合作用。对于风积沙来说,由于其良好的振动压实特性,可采用大振幅(1.2~1.8 mm)低频率(30~40 Hz)或高频率(45~50 Hz)小振幅(0.4~1.0 mm)的组合,一般情况下,常采用高频率(45~50 Hz)和小振幅(0.4~1.0 mm)。

前面分析的振动压实原理都没有考虑水分的影响,对于风积沙来说,振动压实能取得很好的压实效果。由于粘聚力基本为0,当风积沙内含有大量的水分时,使其颗粒更容易分散开来,因此可以减小颗粒之间的滑动摩擦力,在振动作用下,颗粒更易于发生移动,取得最佳的压实效果。

5 结 语

(1)由于风积沙颗粒质量 m 较大,粘聚力 c 很小(基本为0),振动压实可以显著减小其滑动摩擦,对抗剪强度 τ_f 影响很大,特别是级配良好的风积沙较颗粒均匀的风积沙,振动压实效果更加明显。对于振动压实风积沙,可采用大振幅(1.2~1.8 mm)低频率(30~40 Hz)或高频率(45~50 Hz)小振幅(0.4~1.0 mm)的组合,一般情况下,常采用高频率(45~50 Hz)和小振幅(0.4~1.0 mm)。

(2)增大频率和振幅可以提高振动强度,但超过某一振动强度时,反而会降低压实效果;对于振动压路机来说,其振动频率和振幅的最佳值可通过

室内振动试验确定。振动频率对风积沙振动压实影响最显著。对于风积沙,一般当振动压实机械的振动频率接近材料的自振频率时,最易压实。干燥状态和最佳含水量状态下风积沙的最佳振动频率基本为45~50 Hz。

参考文献:

References:

- [1] 陈忠达,张登良. 风积沙路基压实技术的研究[J]. 中国公路学报,1999,12(2):13-17.
CHEN Zhong-da, ZHANG Deng-liang. Research on the compaction technology of eolian-sand-subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(2):13-17.
- [2] 新疆交通科学研究所,西安公路学院. 中国西部沙漠地区细沙振动压实性能报告[R]. 乌鲁木齐:新疆交通科学研究所,1993.
- [3] 沙庆林. 公路压实与压实标准[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [4] 胡长顺,黄辉华. 高等级公路路基路面施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [5] 李万鹏. 风积沙的压实特性及应用研究[D]. 西安:长安大学,2004.
- [6] 江晓霞. 高等级公路施工控制力学问题研究[D]. 西安:长安大学,2001.
- [7] 陈忠达. 沙漠公路施工质量控制与评价标准报告[R]. 西安:长安大学,1993.
- [8] 杨振茂,侯永峰,孔 恒,等. 风积沙的压实特性与循环荷载下变形性状的试验研究[J]. 中国公路学报,2002,15(2):8-10.
YANG Zhen-mao, HOU Yong-feng, KONG Heng, et al. Compaction property of eolian sand and its deformation behavior under cyclic loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002,15(2):8-10.
- [9] 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 highway subgrade impact compaction in loess region[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(1):25-29.
- [10] 段丹军,查旭东,张起森. 应用便携式落锤弯沉仪测定路基回弹模量[J]. 交通运输工程学报,2004,4(4):10-22.
DUAN Dan-jun, ZHA Xu-dong, ZHANG Qi-sen. Subgrade resilience modulus measuring by portable falling weight deflectometer(PFWD)[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(4):10-22.