

文章编号: 1002-0268 (2004) 08-0029-05

# 沙漠地区高速公路风积沙路基压实方法研究

张生辉<sup>1</sup>, 王新民<sup>1</sup>, 陈忠明<sup>2</sup>

(1. 西安公路研究所, 陕西 西安 710054; 2 陕西省交通厅, 陕西 西安 710004)

**摘要:** 我国乃至世界在沙漠公路的设计、施工、试验、检测等方面没有较为全面的规程和规范, 以指导沙漠路基的施工。本文结合交通部西部交通建设科技项目, 在室内试验研究和理论分析的基础上, 通过榆靖沙漠高速公路、陕蒙沙漠高速公路(半幅)及靖王高速公路(沙漠段)试验路及大型室内试槽试验研究成果的基础上, 提出了沙漠地区风积沙路基施工压实工艺、方法、压路机的参数等。该研究成果已在陕西几条沙漠高速公路上得到应用, 解决了沙漠路基诸多技术难题, 为国内沙漠地区公路路基施工规范的编写积累了非常重要的资料, 同时也取得了显著的社会效益和经济效益。

**关键词:** 沙漠; 路基; 压实工艺; 压路机的参数

中图分类号: U416.1<sup>+</sup>66

文献标识码: A

## Study on Compaction Method for Aeolian-sand Roadbed of Expressway in Desert Area

ZHANG Sheng-hui<sup>1</sup>, WANG Xin-ming<sup>1</sup>, CHEN Zhong-ming<sup>2</sup>

(1. Xi'an Highway Research Institute, Shaanxi Xi'an 710054, China;

2 Shaanxi Communication Department, Shaanxi Xi'an 710004, China)

**Abstract:** There are not comprehensive specifications and criterions for the construction of desert roadbed in respect of design, experiment and test in our country even in the world. Combined with the west region communication construction technology project of the Ministry of Communications, we brought forward combination of construction machine, arts and method of compaction, parameters of road roller in reolian-sand roadbed based on examination studying, theory analysis and study of test-road in Jingyu desert expressway, Shanmeng desert expressway, Jingwang express and in-door experimentation of big trough. The result of studying which has been applied in some desert expressways in Shanxi has resolved a lot of difficult problems in desert roadbed construction, it accumulated very important data for desert road bed, and it also acquired remarkable social benefit and economybenefit.

**Key words:** Desert; Roadbed; Compaction technology; Parameters of road roller

## 0 概述

沙漠地区气候干燥、多风、降雨量相对较少, 而且沙漠中的蒸发量相当大, 经对毛乌素沙漠现场调查, 其表层大约有 10~15cm 长期处于干燥状态, 塔克拉玛干沙漠中干燥状态更为严重。即使风积沙天然状态有一定的含水量, 一般情况下含水量非常小, 但在路基施工中风积沙所含水份也已蒸发, 这给风积沙路基的施工带来很大困难。本文结合交通部西部交通

科技项目的研究成果, 在分析风积沙特性及国内目前施工单位现有的主要路基施工机械的基础上, 选择适合风积沙路基施工的机械, 并通过几条沙漠高速公路试验路段的验证, 总结出沙漠地区高速公路风积沙路基施工机械组合和压实工序及方法。

## 1 风积沙路基施工主要机械

(1) 挖方机械 通常路基挖方的机械设备有推土机、铲运机、挖掘机等, 对于风积沙路基经现场实地

验证,推土机、铲运机效果较好、效率较高。

(2) 装运机械 通常情况下装运路基填料主要采用挖掘机或推土机挖土、装载机配合汽车运输。经工地现场试验,自卸汽车在已经压实的风积沙路基上难以行走,在沙路基上铺筑土工布的情况下起步较为困难,因而自卸汽车不能直接将路基填的材料运至路基表面,只能通过施工便道运至路基两侧,采用推土机从两侧推送风积沙的方式作业。

(3) 路基整平机械 路基整平常用的设备主要是推土机、平地机。经现场试验,在未压实前平地机整平时刮平厚度约为 10~15cm,平地机刮平刀前堆积沙较多时行走困难。因此平地机可在推土机大致整平后再对沙路基整平。推土机整平时受驾驶员操作水平限制速度较慢,特别是在路基顶层需整平允许偏差较小的路拱时所用时间较长。因此施工时应准确计算填方量,推土机小范围整平,最后平地机整平。

(4) 压实机械 常用的路基土方压实设备有钢轮压路机、胶轮压路机、拖式振动压路机等。风积沙路基采用前后轮驱动的自行式羊足振动压路机、前后轮驱动的自行式光轮振动压路机效果较好。拖式羊足碾、拖式振动碾的压实机械,在推土机牵引下前进时压路机轮前有拥沙现象,后退时不能振动且方向难以控制,若原地振动短时间内可产生沙基下沉现象,形成小坑,因此,拖式振动碾不能进行风积沙路基施工。

(5) 洒水设备 洒水车在风积沙基上根本无法行驶,即使在风积沙路基顶面铺筑土工布的情况下行驶也很困难,无法完成在风积沙路基上洒水,所以风积沙路基施工必须在天然含水量状态下进行,一般情况下不需要洒水设备。若采用水坠法稳定路基时,将采用抽水机直接抽水至路基中的方法施工。

路基的压实度是影响路基施工的较为重要的质量控制指标。因此压实机械的选择是保证压实度的关键。经试验研究认为:适合风积沙路基挖运、填筑、整平、压实的设备可归纳如下:①运距较长时,采用自卸汽车通过施工便道将风积沙运至路基两侧,再用推土机从两侧推送风积沙的方式;采用就地取风积沙的方法时,推土机从路基两侧挖运风积沙。②分层碾压时采用推土机稳压,前后驱动的自行式振动压路机振动碾压或采用推土机碾压,路基整形可采用推土机配合平地机进行。

## 2 风积沙路基压实特性分析

### 2.1 推土机

推土机属于静力碾压设备,主要靠自身重力产生的表面静压力来压实风积沙,因此压实效果很有限。经工地现场使用,通过对不同类型推土机和不同分层厚度试验资料的分析,可初步得到如下结论:

(1) 推土机在风积沙天然含水量状态下分层碾压随着压实遍数的增加在一定范围内密度随之提高。在相同的碾压遍数情况下随取样深度的增加干密度减小。

(2) 小型推土机有效压实厚度 20cm,中型推土机有效压实厚度 30cm,大型推土机有效压实厚度 35cm。

(3) 不同类型的推土机在有效压实范围内碾压 6 遍与 8 遍在相同深度处所得干密度代表值相近,建议推土机在有效压实厚度范围内碾压 6 遍即可。

(4) 不同类型的推土机松铺系数范围大致为 1.05~1.13,松铺系数受分层厚度影响较小。

(5) 推土机碾压需要较多的碾压遍数和碾压时间,所得压实度相对偏小,因此建议推土机可作为施工前后的稳压机械。

### 2.2 前后驱动的振动压路机

经对目前各施工企业拥有的主要类型压路机在风积沙路基现场试验研究,前后驱动振动压路机是压实风积沙的主要机械设备,也是效果较好的压实设备。应用前后驱动的振动压路机压实路基时,首先对设备参数进行选择。

#### (1) 表面静压力

大部分压路机给出的均为线压力,为了得到表面静压力,必须求得压路机和风积沙的接触面积,压路机振动轮与地面的接触面近似弧形。

设振动轮的宽度为  $L$ ,接地弦长为  $B$ (如图 1 所示),则振动轮的接地面积为

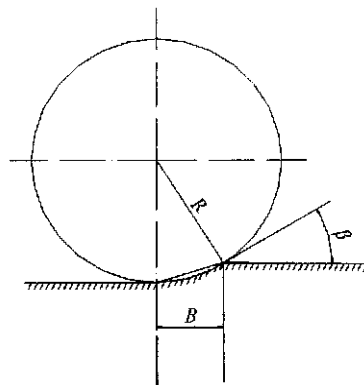


图 1 接地弦长示意图

$$A = BL$$

式中,弦长  $B = R \sin \beta$ ;  $R$  为振动轮半径。

根据压路机的设计要求,  $\beta$  角应小于或等于风积沙的内摩擦角  $\varphi$ , 内摩擦角  $\varphi$  由试验研究可知, 一般在  $30^\circ \sim 35^\circ$  之间, 即

$$\beta \leq \varphi$$

取  $\beta = 30^\circ$ , 则振动轮的接触面面积为

$$A = RL \sin \beta = RL \sin 30^\circ = \frac{1}{2} RL$$

则表面静压力  $p = Q/A$ , 其中  $Q$  为压路机的质量。

以 YZ18C 型振动压路机为例, 计算所产生的表面静压力。压路机的参数如表 1 所示。根据表中所示数据可知, 振动压路机前后轮产生的表面静压力分别为

$$p_{\text{前}} = 12\,500 / 1.6 / 2 \times 4 \approx 140 \text{ kPa}$$

$$p_{\text{后}} = 6\,300 / 1.6 / 2 \times 4 \approx 70 \text{ kPa}$$

表 1 YZ18C 型振动压路机主要技术参数

|           |       |
|-----------|-------|
| 工作质量/kg   | 18800 |
| 前轮分配质量/kg | 12500 |
| 后轮分配质量/kg | 6300  |
| 振动轮直径/m   | 1.6   |
| 振动轮宽度/m   | 2.17  |

由计算结果可以看出, 振动压路机产生的表面静压力, 超过风积沙最大干密度试验时采用底部振动试验方法配重所产生的表面静压力, 因此风积沙路施工时, 只要选用的压路机的型号大于等于 YZ18C 型振动压路机是完全可以达到压实的目的。

### (2) 振动压路机振动加速度的选择

机械振动加速度是振动频率和振幅的函数。对于近似属于简谐振动的振动压路机, 其振动加速度可以表示为

$$a = A\omega^2$$

式中,  $a$ 、 $A$ 、 $\omega$  分别代表压路机的振动加速度、振幅和振动频率。

振动频率对压实是有影响的, 主要是因为频率变化对振动力有一定的影响。如果振动力不变而增大频率, 传递至风积沙体的能量将会增加。这时每单位能量的压实作用力可以近似地用下式表示

$$\text{压实作用力} = f_1(I) + f_2\left(\frac{A \times \omega}{v}\right)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_2$  为函数;  $\omega$  为频率;  $I$  为静线压力;  $A$  为振幅;  $v$  为压路机速度。

高频对振动压实有益, 但过高的频率反而会降低压实效果, 这是因为在振动运动时, 振动轮在太强的振动作用下脱离了地面的缘故。另外, 过高的频率还会引起压路机机架的振动, 导致振动轮与底架之间的

橡胶元件发生严重的系统破损。根据综合分析和压路机的实际情况, 一般振动压路机选择振动频率为 30Hz。

相比振动频率, 振幅变化对压实效果的影响比频率带来的影响大。这是因为振幅增大, 沙的颗粒运动的位移增加, 振动轮对沙作用的冲击能量增大, 振动冲击波在沙中传播的距离更远, 因而风积沙路基的压实效果更好。振幅的变化受压路机本身能力的限制, 过大的振幅将导致振动压路机整机振幅增加, 引起司机疲劳和机械零部件过早的损坏; 过大的振幅也将造成被压实路基出现过压现象, 形成压实后的路基疏松、材料级配失调等现象, 降低了路基的压实效果。

根据室内试验结果, 对于风积沙路基的压实, 要求振动设备的振动加速度在  $4g$  以上, 考虑压路机的实际工作能力, 设定压路机的工作加速度为  $4 \sim 7g$ 。

根据加速度和振幅、频率的计算公式, 可以得到压路机的振幅范围为  $1.2 \sim 2\text{mm}$ 。

### (3) 压路机工作速度的确定

工作速度是指振动压路机在进行振动压实作业时的碾压速度。与静压力相比, 振动压路机的工作速度对压实效果的影响特别明显。因为在振动压实过程中, 沙的颗粒由静止状态变化为运动状态要有一个过渡过程。过渡过程持续的时间长短与沙的颗粒之间粘聚力、吸附力的大小有关; 也与振动压路机的线荷载有关, 线荷载越大, 过渡过程所需的时间越短。

对于风积沙, 假设为了克服颗粒间的粘聚力、吸附力, 必须多次有效的强迫振动, 才足以使风积沙颗粒处于运动状态。

根据上述原则, 可以算出振动压路机的工作速度。如图 2 所示, 图中振动轮与地面的接触面为弧形, 那么振动轮通过弦长所需时间内, 振动轮应对同一点施加多次有效的振动, 否则就不足以使风积沙的颗粒由初始的静止状态进入运动状态。当然也很难克服风积沙颗粒间的粘聚力、吸附力。振动压路机的工

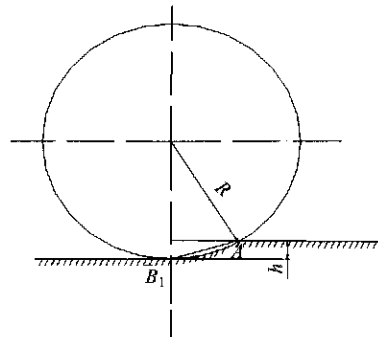


图 2 振动轮接触地面示意图

作速度应符合下列关系式:

振动压路机接地弦长

$$AB = \sqrt{R^2 - (R-h)^2} = \sqrt{h(2R-h)}$$

振动压路机每振动一次所需的时间  $T$

$$T = 60/n$$

如果振动压路机满足通过  $AB$  弦长的时间内振动轮至少对同一点施加不少于  $x$  次的有效振动, 振动压路机的工作速度应满足下式的要求

$$v \leq \sqrt{h(2R-h)} / (xT)$$

式中,  $R$  为振动轮半径, m;  $h$  为沙的沉陷量, m;  $T$  为运动周期, s;  $n$  为振动轴转速, r/min。

分别取  $R = 0.8\text{m}$ 、 $h = 0.1\text{m}$ 、 $T = 1/30\text{s}$ 、 $x = 3$ , 则可求得压路机的工作速度为

$$v \leq \sqrt{0.1(2 \times 0.8 - 0.1)} / 0.1 = 3.87\text{m/s} = 13.9\text{km/h}$$

由上式计算所得结果对振动压路机来说是很大的。压路机工作速度的提高固然可以提高生产率, 但同时还要兼顾压实效果, 当铺层厚度不变时, 压路机速度较快时降低传递至填方的能量, 根据这个原理, 当压路机速度加倍时, 碾压遍数也要加倍, 因此压路机应有一个最佳碾压速度, 根据经验, 压路机的碾压速度应在  $4 \sim 6\text{km/h}$  之间。选择  $6\text{km/h}$  作为风积沙路基的碾压速度。

#### (4) 摊铺厚度的确定

摊铺厚度是由振动压路机的表面静压力和振动能量在风积沙中的衰减情况决定的。根据弹性半空间体的布辛氏课题理论, 得表面静压力随风积沙深度变化公式为

$$\sigma_z = -p \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{\delta}{Z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

式中,  $p$  为表面静压力;  $\delta$  为振动轮的宽度, 此处取  $2.17\text{m}$ ;  $Z$  为垂直方向的长度。

振动能量在风积沙中的衰减按下式计算

$$E = \frac{C}{r} e^{-\beta r}$$

式中,  $C$  为积分常数;  $\beta$  为能量损耗系数, 与材料性质、类别有关;  $r$  为与振动源的距离。

实践证明: 振动能量在风积沙中的衰减是比较快的, 摊铺厚度不宜设置过厚, 试验结果表明, 摊铺层厚度为  $50\text{cm}$  时, 可以保证风积沙路基的压实效果, 此时经过计算, 表面静压力为最大值的  $92\%$ 。

#### (5) 碾压遍数的确定

利用能量理论来计算碾压遍数。由试验可知, 为保证压实效果, 应使单位压实功大于  $1.2\text{J}$ , 由于压路

机产生的表面静压力很大, 取单位压实功为  $1\text{J}$ , 以  $1\text{min}$  为例, 此时压路机走过  $100\text{m}$ , 铺层厚度为  $0.5\text{m}$ , 振动轮宽度为  $2.17\text{m}$ , 压实时半幅重叠, 即相当于压路机对体积  $V = 0.5 \times 2.17 \times 100 \times 0.5 = 54.25\text{m}^3$  的风积沙进行了碾压, 则需要的能量为

$$W = V \times 1 \times 10^6 = 5.4 \times 10^7 \text{J}$$

取压路机的功率为  $133\text{kW}$ , 则每分钟产生的功为  $2.2\text{kJ}$ , 通过换算可得压路机  $1\text{min}$  产生的功为

$$W_{\text{压路机}} = 0.8 \times 10^7 \text{J}$$

则可计算碾压遍数为

$$n = \frac{W}{W_{\text{压路机}}} = \frac{5.4}{0.8} \approx 7$$

考虑到压路机并不是将功全部用于压实风积沙路基的压实, 还有部分功用于其它消耗, 因此将碾压遍数定为  $8$  遍, 并采用如图 3 所示的碾压方式, 以保证压实质量, 这一结论与现场试验结果基本一致。

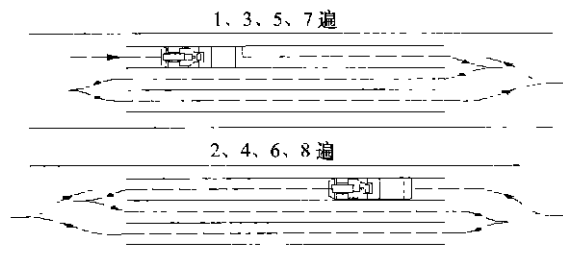


图 3 压路机碾压方式示意图

### 3 压实工艺

现场试验发现, 无论压路机碾压多少遍, 风积沙路基表面总有  $10\text{cm}$  左右的松散层不能压实, 经分析: 首先沙漠中干旱少雨, 风积沙路基表面为干燥状态, 沙颗粒间的粘聚力很小, 因此压路机进行碾压时前轮有拥沙现象, 导致表层的沙被推来推去, 无法压实; 二是压路机振动时, 风积沙表层的沙颗粒会随着振动轮的振动而跳动, 导致无法压实。因而振动压路机完成碾压遍数后, 必须使振动压路机以较小的振动加速度振动碾压  $1$  遍, 然后推土机对路基表层进行稳压。

试验段内各段填料均采用推土机从路基两侧将风积沙推至路基范围内, 推土机整平后并稳压规定的遍数, 稳压时从路基边缘向路基中线逐轮碾压, 轮迹间相互重叠宽度不应小于  $1/2$  单侧轮迹宽度。振动压路机碾压时采取示意图所示的碾压方式, 碾压时轮迹重叠不低于  $1/3$  轮迹宽度。当振动压路机碾压完成  $8$  遍后, 对部分试验段采用振动压路机以较小加速度碾压  $1$  遍, 中型推土机终压  $2$  遍。天然含水量状态下风积沙分层碾压压实工艺, 如图 4 所示。此种施工工艺适

用于振动压路机在天然含水量状态下分层碾压或在洒水状态下分层碾压,也适用于雨后风积沙的压实。

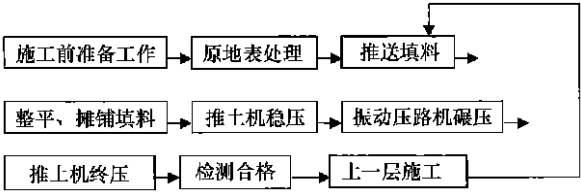


图4 施工工艺流程图

(1) 施工前准备工作。包括放样、清除填方路段原地表杂草、树根及借方位置原地表面杂草、树根等。

(2) 原地表处理。对填方路段填前原地表杂草、树根清除后应对原地表进行填筑前压实,采用振动压路机碾压不少于8遍,碾压时轮迹重叠不应小于1/3,轮迹布满1个作业面为1遍。碾压后取样检测应达到规定的压实标准,不合格时应补压直到合格为止。

(3) 推送填料。推土机从路基两侧或短距离内纵向调配风积沙推运至填方路段。

(4) 摊铺填料。对推运至填方路段内的填料采用推土机摊铺并整平,或采用推土机配合平地机整平。

(5) 推土机稳压。推土机稳压时按照一般土方路基的压实工艺,从路基边缘向内侧逐轮碾压,碾压时轮迹重叠宽度不小于1/2单轮宽度,单侧轮迹布满一个作业面为1遍,稳压2遍,稳压时也可采用纵向、横向交错的碾压方式。

(6) 振动压路机碾压。压路机碾压时应按下列规定进行:①振动压路机一般碾压6~8遍。碾压时轮迹不应小于1/3,轮迹布满1个作业面为1遍。②采用15t以上前后轮驱动振动压路机进行碾压。碾压时先慢后快,采用强振进行振动碾压。频率30Hz;振幅1.9mm(保持加速度4~7g范围内)。③压路机的碾压行驶速度开始时不超过4km/h;正常工作速度为6km/h,确保达到无漏压、无死角,确保碾压均匀。

(7) 推土机终压。推土机终压压实工艺与推土机稳压相同,轮迹应重叠单轮宽度1/2以上,终压2遍。

(8) 检测。压实质量以压实度控制,压实度应达到规程规定的标准,若不符合要求时应进行补压,直到合格为止,方可进行下一道工序的作业。检测取样位置、深度应符合规程有关条款之规定。

#### 4 干密度检测

在修筑试验路时现场干密度检测每10m为一断

面,分别在距路基(路基宽度24m)中线5、10m和距边线1m的位置进行测定,每层每个测点分上下各取样一个,上层取样位置距该层表面5cm,下层取样位置距该层底部5cm。资料整理时依据《公路工程质量检验评定标准》中路基压实度评定方法,公式如下

$$\rho_d = \bar{\rho}_d - t_{\alpha} s \sqrt{n}$$

式中, $\rho_d$ 为相同碾压遍数干密度的代表值; $\bar{\rho}_d$ 为相同碾压遍数干密度的平均值; $t_{\alpha}$ 为t分布表中保证率为95%的保证率系数;s为干密度的均方差;n为测量点数。

取样时,若填土高度较高或试验段较长,干密度样本较多,分别计算各层相同位置的干密度值代表值,以不同位置干密度代表值的平均值作为该试验段干密度的代表值。若分层数较少,样本数量不多时,将各层不同位置试验资料汇总,计算干密度的代表值。试验结果见表2。

表2 试验段干密度评定表

| 取样位置/cm | 干密度代表值/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 压实度代表值/% |
|---------|---------------------------------------|----------|
| 0~20    | 1.66                                  | 96.2     |
| 20~30   | 1.63                                  | 94.4     |
| 30~40   | 1.65                                  | 95.6     |
| 40~50   | 1.66                                  | 96.2     |

注:最大干密度取1.726g/cm<sup>3</sup>。

#### 5 结束语

通过室内试验研究及压实机械理论分析,在实体试验路验证基础上,提出了风积沙路基的压实工艺、方法、工序等,并对路基压实后的检测方法进行了试验研究。采用所取得的研究成果成功地指导了陕西境内多条沙漠公路路基的施工,特别是解决了沙漠路基压实工艺问题,充分利用风积沙作为路基填料,解决了沙漠地区缺乏公路路基填筑材料问题,采用此成果已建成国内第一条榆靖沙漠高速公路,与常规施工工艺相比较,取得了显著的经济效益和社会效益。

#### 参考文献:

[1] 张生辉,等.沙漠地区公路路基压实标准及方法研究[M].西安公路研究所,2003

[2] 李志勇,梁乃兴.风积沙压实特性及压实机理研究[D].重庆交通学院,2003

[3] 陈忠达.塔克拉玛干沙漠风积沙工程特性[M].长安大学,1994.