

高等学校试用教材

压实机械与路面机械设计

陈元基 全建中 陈国兰 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

本书主要讲述压实机械（光轮压路机、振动压路机、振动平板夯以及夯实机械）和路面机械（稳定土拌合机、沥青混凝土路面机械、水泥混凝土路面机械和路面养护机械）的理论与计算，并对这些机种的设计提供理论根据和计算方法，其中对振动压实机械和沥青混凝土路面机械的理论、设计计算方法、基本参数的选择都有比较全面、系统的介绍和深入的分析。

本书作为工程机械专业的教材，也可供从事压实机械和路面机械的设计、研究以及使用人员参考。

压实机械与路面机械设计

陈元基 仝建中 陈国兰 编

*

责任编辑：赵爱宁

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $11\frac{3}{4}$ ·字数 284 千字

1987年6月北京第一版·1987年6月北京第一次印刷

印数 00,001—1,900·定价：2.05 元

*

统一书号：15033·6878

前 言

本书是根据1983年9月工程机械专业教材编审小组长春会议的精神和1984年3月在西安召开的专业会议上确定的《压实机械与路面机械设计》教学大纲而编写的。

本书主要讲述压实的基本知识和理论,压实机械(光轮压路机、振动压路机、振动平板夯和夯实机械)和路面机械(稳定土拌合机、沥青洒布机、沥青混凝土拌合设备、沥青混凝土摊铺机、水泥混凝土摊铺机、水泥混凝土路面修饰机和路面养护机械)的有关理论,总体参数的分析、选择、合理匹配以及工作装置与机构的设计。在本书中着重基本知识的介绍和基本理论的分析,并较详细地介绍了压实机械与路面机械的设计步骤与方法。通过学习,使学生掌握压实和路面机械设计的基本方法,培养学生分析问题和解决问题的实际能力,并具有一定的从事科学研究的能力。

本书为工程机械专业的教材,也可供其他有关专业师生以及从事压实机械与路面机械的研究、设计和科技人员参考。

本书由西安公路学院陈元基(第一、二、三、五、六、七、八、九、十各章),全建中(第十一、十二、十三各章)和建筑机械化研究所陈国兰(第四章)同志编写,由陈元基同志主编。由于主编出国学习,全建中同志承担了本书的部分统稿工作。

本书压实机械部分(第一章~第四章)由西安公路学院孙树仁同志主审,路面机械部分(第五章~第十三章)由交通部公路研究所柴仁栋同志主审。参加审稿的同志对本书进行了详细审阅,并提出了宝贵意见。本书在编写过程中还得到西安筑路机械厂、洛阳建筑机械厂、徐州工程机械厂、交通部公路研究所、建筑机械研究所、建筑机械化研究所及有关厂、所的大力支持和帮助。编者在此表示衷心的感谢。

由于本书编写时间仓促,编者水平有限,书中难免有错漏之处,切望读者批评指正。

编者

一九八五年九月

目 录

第一篇 压实机械	7
第一章 压实的基本知识与理论.....	7
§ 1-1 概述.....	7
§ 1-2 滚压的理论基础.....	2
§ 1-3 振实的理论基础.....	17
第二章 光轮压路机.....	15
§ 2-1 用途与分类.....	15
§ 2-2 主要参数的确定.....	15
§ 2-3 发动机功率计算.....	20
§ 2-4 生产率计算.....	23
§ 2-5 典型零、部件的强度计算.....	23
第三章 振动压路机与振动平板夯.....	28
§ 3-1 振动压路机的用途与分类.....	28
§ 3-2 振动压路机主要参数的选择.....	29
§ 3-3 振动平板夯的用途与分类.....	32
§ 3-4 振动平板夯主要参数的选择.....	33
§ 3-5 振动功率的计算.....	43
§ 3-6 减振器的选择和计算.....	52
第四章 夯实机械.....	61
§ 4-1 用途与分类.....	61
§ 4-2 夯实机械工作机构的传动原理.....	61
§ 4-3 夯实机械的计算.....	63
第二篇 稳定土拌合机械	71
第五章 稳定土拌合机.....	71
§ 5-1 用途与分类.....	71
§ 5-2 铧刀式稳定土拌合机的理论计算.....	71
§ 5-3 一次通行完成作业式稳定土拌合机的理论计算.....	75
§ 5-4 稳定土拌合机的计量系统.....	77
§ 5-5 厂拌稳定土拌合设备简介.....	78
第三篇 黑色路面修筑机械	81
第六章 沥青洒布机.....	81
§ 6-1 用途与分类.....	81
§ 6-2 生产率计算.....	81
§ 6-3 沥青泵的计算.....	82
§ 6-4 沥青洒布机的热计算.....	85
第七章 沥青混合料搅拌设备.....	89
§ 7-1 沥青混合料搅拌设备的用途分类与工作原理.....	89

§ 7-2 沥青混合料搅拌设备的生产率计算	91
§ 7-3 烘干筒主要参数的确定	92
§ 7-4 烘干筒的驱动功率计算	93
§ 7-5 烘干筒和滚筒式烘干—拌合筒的强度计算	97
§ 7-6 烘干筒的热计算	102
§ 7-7 沥青贮存仓的热计算	111
§ 7-8 沥青加热设备的热计算	116
§ 7-9 输送沥青管道的热计算	116
§ 7-10 火箱计算	117
§ 7-11 除尘—集尘装置的计算	118
§ 7-12 叶桨式拌合器主要参数的确定及其零部件的强度计算	124
第八章 沥青混凝土摊铺机	139
§ 8-1 用途与分类	139
§ 8-2 生产率计算	139
§ 8-3 牵引计算	140
§ 8-4 发动机的功率计算	142
§ 8-5 振捣熨平工作机构的受力和自动找平装置	145
第四篇 水泥混凝土路面修筑机械	149
第九章 水泥混凝土路面摊铺机	149
§ 9-1 用途与分类	149
§ 9-2 周期作业式水泥混凝土路面摊铺机的计算	149
§ 9-3 连续作业式水泥混凝土路面摊铺机的计算	151
第十章 水泥混凝土路面修饰机	154
第五篇 路面养护机械	159
第十一章 清扫机	159
§ 11-1 概述	159
§ 11-2 发动机功率的计算	162
§ 11-3 工作装置主要参数的计算	165
§ 11-4 清扫机的生产率和清扫质量评价指标	167
第十二章 除雪机	168
§ 12-1 雪的物理机械性质	168
§ 12-2 转子式除雪机	170
第十三章 沥青路面加热器	180
§ 13-1 用途与分类	180
§ 13-2 加热器的计算	180

第一篇 压 实 机 械

第一章 压实的基本知识与理论

§ 1-1 概 述

筑路时对路基路面都要进行压实。筑路材料的压实过程是，向被压材料加载，克服原松散多相材料中固体颗粒间的摩擦力、粘着力，排除气体或液体，使各个颗粒发生位移、互相靠近。此材料经压实后，其密实度增加。密实度可用单位体积重量来表示。

对材料的压实，一般都用周期性的加载（图 1-1）。在加载过程中，材料的应力可增加到最大值；卸载时，材料的应力下降，然后经过间歇，重复循环。

压实的方法通常有：滚压、振实和夯实。

滚压（图 1-2 a）是用具有一定重量的滚轮慢速滚过料层，用静压力使被压层获得永久残留变形 h 。随碾压次数的增多，材料的密实度增加，而永久残留变形减小，最后实际残留变形等于零。为了进一步提高被压材料的密实度，必须用较重的滚轮来滚压。滚压的特点是，循环延续时间长，材料应力状态的变化速度不大，但应力较大。

夯实（图 1-2 b）是利用一大块质量为 M 的物体，从某一高度 H 上周期性的自由下落时产生冲击力，把材料压实。夯实的特点是，对材料所产生的应力变化速度很大。在压实土壤时，特别是对粘性土壤有较好的压实效果。

振实（图 1-2 c）是利用固定在质量为 M 的物体上的振动器所产生的高频振动传给被压材料，使其发生接近自身固有振动频率的振动，这样，材料就具有很大的流动性，使颗粒靠近、密实度增加，把材料压实。振实的特点是表面应力不大、过程时间短、加载频率大，可广泛用于粘性小的材料，如砂土、水泥混凝土混合料。

在同一机械中，可以同时采用几种压实的方法，这样能利用每种压实方法的优点，提高压实效果和扩大机械的使用范围。

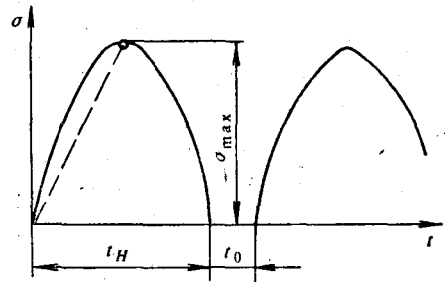


图 1-1 筑路材料周期性加载的变化特点
 σ —材料所受的应力 t —应力作用时间
 t_H —材料所受应力的作用时间 t_0 —材料不受载的间歇时间

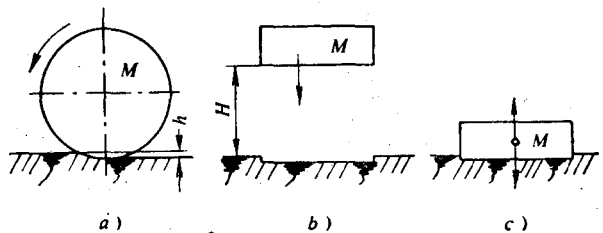


图 1-2 筑路材料压实的方法
a) 滚压 b) 夯实 c) 振实

§ 1-2 滚压的理论基础

一、光滚轮的滚压过程

图 1-3 所示为光滚轮在静止和滚动时接触压应力的分布图。在滚轮静止的情况下，压力图相对于轮轴垂线位于对称的位置，因此最大压应力 σ_{max} 是在轴的垂线上。当滚轮滚动时，在滚轮上除作用有垂直载荷 G 外，还作用有牵引力 T 。由于牵引力的作用，最大压应力向滚轮运动方向移动 Δa 距离。由于土壤具有粘性，其变形往往迟后于应力的变化，产生载荷后效的现象，即当应力达到最大值并开始下降时，变形还要继续发展一段时间。试验证明，位于滚轮轴垂线后的接触表面所受的载荷是较小的。因此，实际上载荷仅分布在陷入土中的轮缘那部分半弧的前半个接触表面上。滚动滚轮的压应力分布图是非对称的，滚轮的压陷总深度 h 可以分为可逆（弹性）变形 h_0 和不可逆（塑性）变形 h_H 两部分。

下面研究压陷深度 h 、最大接触压应力 σ_{max} 及其有关的一些问题。

压路机滚轮沿被压筑路材料的运动，可视为刚性轮沿变形介质表面的滚动。

由于压路机沿松散材料第一遍滚压所给出的计算误差是甚小的，所以暂且不考虑表面的弹性变形。此时将得到如图 1-3 c 所示的计算简图。该图中的诸符号表示如下：

G ——滚轮重，包括轮上的载荷；

T ——牵引力（被动轮）；

D ——滚轮直径；

b ——滚轮宽；

h ——由重量和牵引力作用所引起的轮辙压入深度，等于不可逆的变形值；

a ——滚轮与被压材料接触轮迹弧长在水平面上的投影；

N —— ds 弧长和 b 宽面积上的作用力；

ds ——微弧长。

ds 弧长和 b 宽面积上的微力：

$$N = \sigma b ds$$

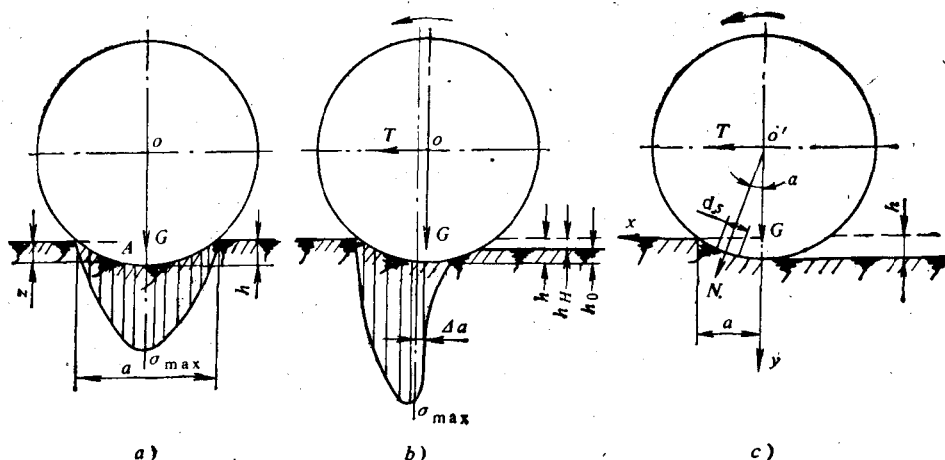


图 1-3 光滚轮的压应力分布

a) 静止状态时 b) 滚动状态时 c) 光滚轮沿变形表面运动时的作用力

式中 σ —— 滚轮表面接触压应力 (MPa)。

微力 N 在 X 、 Y 轴上的投影之和可用下列式子表示:

$$\sum N \cos \alpha = G \quad \sum N \sin \alpha = T$$

此时得

$$\left. \begin{aligned} \int_0^a \sigma b dx &= G \\ \int_0^h \sigma b dy &= T \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

(对静止的滚轮, $G = 2 \int_0^{a/2} \sigma b dx$, 见图 1-3 a)。对被压材料不是线性变形体时, 则变形和应力之间无直线正比例关系, 对大多数筑路材料, 可用指数函数表示:

$$\sigma = C y^{\mu} \quad (1-2)$$

式中 C —— 下陷系数, 相对于滚压下陷 1cm 时的单位压力。对土壤, 可根据图 1-4 选取;

μ —— 材料状况系数。根据试验数据, μ 为 0 ~ 1。

对湿度大于塑性上限时呈流态 (液体稠度) 的土, $\mu = 0$; 对塑态的粘性土以及干燥的砂土, $\mu = 0.5$; 对于 (坚硬) 的粘性土或已被压实的路面, $\mu = 1$ 。

取 o 为坐标原点, 则中心为 o' 点 $\left[0, -\left(\frac{D}{2} - h\right) \right]$ 的圆上, 以任意点坐标 x 、 y 为圆的方程式为:

$$x^2 + \left(y + \frac{D}{2} - h \right)^2 = \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

$$\begin{aligned} y &= h - \frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} - x^2} = h - \frac{D}{2} + \frac{D}{2} \sqrt{1 - 2 \left(\frac{x^2}{D^2} \right)} \\ &\approx h - \frac{D}{2} + \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \frac{x^2}{D^2} = h - \frac{x^2}{D} \end{aligned}$$

将 (1-2) 式代入 (1-1) 式得:

$$\begin{aligned} G &= \int_0^a C b \left(h - \frac{x^2}{D} \right)^{\mu} dx = C b \int_0^a \left(h - \frac{x^2}{D} \right)^{\mu} dx \\ &= C b \int_0^a h^{\mu} \left(1 - \frac{x^2}{Dh} \right)^{\mu} dx \end{aligned}$$

二项式展开

$$\left(1 - \frac{x^2}{Dh} \right)^{\mu} = 1 - \frac{\mu x^2}{Dh} + \frac{\mu(\mu-1)}{2 \times 1!} \frac{x^4}{(Dh)^2} - \dots$$

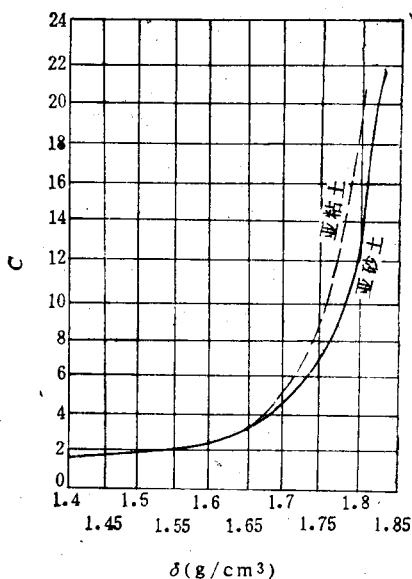


图1-4 土的密实度 δ 与下陷系数 C 的关系曲线

最后得:

$$G \approx Cbh^{\mu} \int_0^a \left(1 - \frac{\mu x^2}{Dh}\right) dx$$

$$G = Cbh^{\mu} \left(x - \frac{\mu x^3}{3Dh} \right) \Big|_0^a = Cbh^{\mu} a \left(1 - \frac{\mu a^2}{3Dh} \right)$$

$$\left[\text{对于静止滚轮, } G = Cbh^{\mu} \left(x - \frac{\mu x^3}{3Dh} \right) \Big|_0^{a/2} = Cbh^{\mu} \frac{a}{2} \left(1 - \frac{\mu a^2}{3Dh} \right) \right]$$

由于 $a = \sqrt{Dh}$ (对于静止滚轮, $a \approx 2\sqrt{Dh}$), 所以最后得通式为:

$$G = Cb \left(1 - \frac{\mu}{3} \right) h^{\mu} \sqrt{Dh} \quad (1-3)$$

而

$$\begin{aligned} T &= \int_0^h Cb y^{\mu} dy = Cb \int_0^h y^{\mu} dy \\ &= Cb \frac{y^{\mu+1}}{1+\mu} \Big|_0^h = Cb \frac{h^{\mu+1}}{1+\mu} \end{aligned} \quad (1-4)$$

压路机牵引力与其重量之比为滚动阻力系数 f :

$$f = \frac{T}{G} = \frac{1}{(1+\mu) \left(1 - \frac{\mu}{3} \right)} \sqrt{\frac{h}{D}} \quad (1-5)$$

从 (1-3) 式中可以求得压路机轮辙的压陷深度 h , 它由滚轮的重量和直径而定

和

$$\left. \begin{aligned} h^{\mu+0.5} &= \frac{G}{Cb\sqrt{D} \left(1 - \mu/3 \right)} \\ h &= \frac{\mu+0.5}{\sqrt{Cb\sqrt{D} \left(1 - \mu/3 \right)}} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

或

$$h = \frac{\mu+0.5}{\sqrt{C\sqrt{D} \left(1 - \mu/3 \right)}} q$$

式中 $q = \frac{G}{b}$ —— 滚轮的单位线压力 (N/cm)。

从上式可以看出, 压路机的重量越重 (线压力越大)、滚轮的直径越小, 则轮辙压陷深度越深。

从 (1-6) 式中还可以引出与压路机的结构尺寸有关的值, 并命名它为压路机滚轮的压实能力系数 ξ :

$$\xi = \frac{G}{b\sqrt{D}} = \frac{q}{\sqrt{D}} \quad (\text{N/cm}^{3/2}) \quad (1-7)$$

对现有结构的压路机, 其压实能力系数为:

小型和中型压路机 $29 \sim 57 \quad \text{N/cm}^{3/2}$

重型压路机 $46 \sim 62 \quad \text{N/cm}^{3/2}$

从 (1-7) 式可以看出, 压路机的线压力越大, 滚轮的直径越小, 则压路机的压实能力系数越高; 但是在线压力不变的情况下, 通过减小滚轮直径的途径来提高压实能力系数, 将导致滚动阻力系数的增加, 所以, 要相应增加压路机的牵引力和发动机功率。此外, 减小压路机滚轮直径还会降低滚压的质量。

在碾压任何材料时,当滚动阻力系数不超出许用值,并保证有正常的牵引力和碾压质量的情况下,则可以确定在压路机最小重量和给定压实能力系数时的滚轮最小许可直径。

令 R 表示所有与被压材料性质有关的系数值,则得: $f = R \sqrt{\frac{h}{D}}$

把 (1-6) 式中的 h 值代入上式得:

$$f = \frac{R'}{\sqrt{D}} \sqrt{\xi^{\mu+0.5}}$$

当不同重量的压路机碾压同种材料时,其滚动阻力系数是相等的,则

$$f = \frac{R'}{\sqrt{D_1}} \sqrt{\xi^{\mu+0.5}} = \frac{R'}{\sqrt{D_2}} \sqrt{\xi^{\mu+0.5}}$$

经整理后得下列关系式:

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\mu+0.5}$$

和

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\mu+1}$$

由试验所知,线压力的增加由碾压工艺条件所限,而滚轮的直径则为结构尺寸所限。如果滚轮的重量过重,线压力过大,则碾压时会把土挤开。当压实塑性较大的土质时,这种现象尤为显著。这种现象被人们称为“挤出”或“波切”。“挤出”或“波切”的倾向越大,土壤的压实效果越差。因此,滚轮的直径、宽度与重量之间存在着密切的关系,必须从总体上考虑适宜的数值。

根据最大数值, $D = 1800 \text{ mm}$, $q = 1100 \text{ N/cm}$ 和 $\mu = 1$, 压路机的滚轮直径可按下式选定:

$$D = 5.43 \sqrt{q} \quad (\text{cm})$$

各种石料在碾压时的许用单位线压力见表 1-1。

表1-1 各种石料在碾压时的许用单位线压力

石料性质	石料名称	压缩强度极限 (MPa)	压路机在碾压石料时的许用单位线压力 (N/cm)
软石料	石灰石, 砂岩石	30~60	600~700
中硬石料	石灰石, 砂岩石, 粗粒花岗岩	60~100	700~800
坚硬石料	细粒花岗岩, 闪长岩石	100~200	800~1000
极坚硬石料	辉绿岩石, 玄武岩石, 闪长岩石	>200	1000~1250

当考虑弹性变形时,与上述分析相同,可得下列公式:

$$\left. \begin{aligned} G &= Cb \sqrt{D} \left(1 - \frac{\mu}{3} \right) (h^{\mu+0.5} + h_0^{\mu+0.5}) \\ T &= Cb \frac{h^{\mu+1} - h_0^{\mu+1}}{\mu + 1} \\ f &= \frac{T}{G} = \frac{h^{\mu+1} - h_0^{\mu+1}}{(\mu + 1) \left(1 - \frac{\mu}{3} \right) \sqrt{D} (h^{\mu+0.5} + h_0^{\mu+0.5})} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 k ——全部变形值, $h_H + h_0 = k$;

h_0 ——可逆(弹性)变形值;

h_H ——不可逆(塑性)变形值。

可以很明显的看出, 当 $h_0 = 0$, 即不考虑可逆(弹性)变形时, (1-8) 式变为 (1-3)、(1-4)和(1-5) 式。

当压路机滚轮沿同一轮迹往复运行时, 被压材料的密实度随每次滚压都有所增加, 而残留永久变形减小, 然后将发生在该重量压路机滚压下的残留变形为零, 再一次滚压仅能引起弹性变形。

压实深度 h 、牵引力 T 、滚动阻力系数 f 与滚轮碾压次数 n 之间的关系, 可用下列经验公式表示:

$$\left. \begin{aligned} h &= h_1 + \alpha \lg n \\ T &= T_1 - \alpha_0 \lg n \\ f &= f_1 - \beta \lg n \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中 h_1 、 T_1 和 f_1 ——第一遍滚压时的下陷深度、牵引力和滚动阻力系数;

α 、 α_0 和 β ——比例常数;

n ——滚轮沿同一轮迹碾压的次数。

上述各关系式的曲线图如图 1-5 所示。

从 (1-9) 式和图 1-5 中可以看出, 经过一定的碾压次数后, 被压材料不可逆变形的下沉量、牵引力和滚动阻力系数实际上是不变化的, 这意味着压实过程的结束。

实践表明, 被压实的路面完全具有确定的滚动阻力系数, 其值见表 1-2。

因此, 滚动阻力系数可以作为材料压实程度的客观指标。已知该路面在给定的压路机碾压过程中的滚动阻力系数值和由表 1-2 中所得的滚动阻力系数值后, 就可以评价其压实程度。若在碾压过程中的滚动阻力系数值稳定而大于最终被压实的路面滚动阻力系数值, 则表明必须用较重的压路机对路面进行附加的压实。

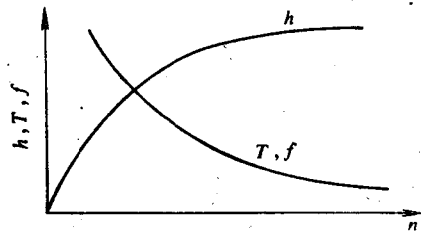


图1-5 下陷深度 h 、牵引力 T 、滚动阻力系数 f 与碾压次数 n 的关系

表1-2 滚动阻力系数

路面名称	滚动阻力系数 f	注
碎石路	0.040~0.050	对新压实的路面, 其值应提高 10%~20%
白色路	0.030~0.050(0.025~0.030)	
黑色路	0.020~0.025	
沥青混凝土路面	0.010~0.020(0.015~0.020)	
水泥混凝土路面	0.010~0.020(0.012~0.015)	

当不再有残留变形, 仅存在弹性变形 $h = h_0$ 时, T 和 f 值将为零。但是, 滚动阻力系数等于零的理想表面, 实际上是不可能存在的。此时, T 和 f 是稳定的, 为一常值。由 (1-8)

式中所得的牵引力和滚动阻力系数值可以分为两部分：第一部分的 T_0 和 f_0 与被压材料的弹性性质有关；第二部分的 f_H 与残留永久变形值有关。此时，滚动阻力系数可用下式表示：

$$f = f_0 + f_H = f_0 + \frac{h^{n+1} - h_0^{n+1}}{(1 + \mu) \left(1 - \frac{\mu}{3} \right) \sqrt{D} (h^{n+0.5} + h_0^{n+0.5})}$$

关于刚性轮与地面挤压的情况，可以应用圆柱体与平面的挤压理论给予解释。

圆柱体与平面挤压所产生的最大接触压应力 $\sigma_{\max}$ 可按下式计算：

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{q}{\pi^2 R (\theta_1 + \theta_2)}} \quad (\text{MPa}) \quad (1-10)$$

式中 q ——线压力， $q = \frac{P}{B}$ ，其中 P 为作用力； B 为圆柱体的宽度；

R ——圆柱体的半径；

θ_1 、 θ_2 ——圆柱体、平面的弹性系数。

弹性系数的一般式为：

$$\theta = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \quad (1-11)$$

式中 ν ——泊桑系数；

E ——牛格模量。

滚轮刚度与土壤刚度相比，可视为无限大，因而 $\theta_1 = 0$ 。此时，从 (1-10)、(1-11) 式中可以得出下式：

$$\sigma_{\max} = k_2 \sqrt{\frac{qE}{R}} \quad (1-12)$$

式中 k_2 ——无量纲系数。

与 (1-12) 式近似的公式还可以从试验中直接得出。压模陷入土中的深度与线压力成正比关系，即：

$$h = \psi q$$

若考虑到压弦 a 近似地等于 $2\sqrt{2Rh}$ ，即 $a \approx 2\sqrt{2Rh}$ ，而线压力可以用平均接触压力 σ_{cp} 表示：

$$q \approx \sigma_{cp} a \quad (1-13)$$

则可得

$$\sigma_{cp} = 0.35 \sqrt{\frac{q}{R\psi}} \quad (1-14)$$

最大接触压力可以按下式求得：

$$\sigma_{\max} = 0.35\beta \sqrt{\frac{q}{R\psi}} \quad (1-15)$$

式中 β ——从平均接触压应力换算到最大接触压应力的系数，可视压模压力分布图的特性而定。

从上述分析可以看出，试验所得的公式相似于理论公式。对静止滚轮，由试验测得 $k_2 = 0.5$ 。因此，对滚动滚轮，其最大接触压应力 $\sigma_{\max}$ 可按下式计算：

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{qE_0}{R}} \quad (\text{MPa}) \quad (1-16)$$

式中 q ——线压力;

R ——压路机滚轮半径;

E_0 ——土壤形变模量。

压路机滚轮压入土中的压弦值还可以从 (1-13) 和 (1-16) 式中求得:

$$a = \beta \sqrt{\frac{qR}{E_0}} \quad (1-17)$$

当 $\beta = 4$ 时, 可得到与试验相同的结果。

在滚压时必须遵循的总准则是, 最大接触压应力小于材料的强度极限, 其表示式为:

$$\sqrt{\frac{qE_0}{R}} < \sigma_p \quad (1-18)$$

式中 σ_p ——强度极限。

土壤压实终了时的强度极限值列于表 1-3。

表1-3 在最佳含水量时土的强度极限

土 壤 种 类	强 度 极 限 σ_p (MPa)		
	滚 压		夯 实 (夯板直径 70~100cm)
	光 滚 轮	气 胎 轮	
低粘性土(砂土、亚砂土、粉土)	0.3~0.6	0.3~0.4	0.3~0.7
中等粘性土(亚粘土)	0.6~1	0.4~0.6	0.7~1.2
高粘性土(重亚粘土)	1~1.5	0.6~0.8	1.2~2
极粘性土(粘土)	1.5~1.8	0.8~1	2~2.3

在计算压路机的主要参数时, 最佳含水量和压实终了时的粘性土的形变模量 $E_0 = 15 \sim 20 \text{MPa}$; 非粘性土, $E_0 = 10 \sim 15 \text{MPa}$ 。

碎石和砾石路基的形变模量, 在压实开始时取 30MPa ; 压实终了时取 100MPa 。

由于沥青混凝土混合料摊铺层较薄, 在压实时, 不但其本身形变, 而且路基也发生形变。因此, 在计算应力时, 应采用当量形变模量, 其值将小于路基的形变模量, 但大于热沥青混凝土的形变模量。当量形变模量值, 在压实开始时取 $5 \sim 10 \text{MPa}$, 而在压实终了时取 $50 \sim 80 \text{MPa}$ 。

当 $\sigma_{\max} = (0.8 \sim 0.9) \sigma_p$ 时, 能达到最好的压实效果。

为了高质量地压实路面, 其接触压应力不应大于许用值。对光滚轮压路机, 许用接触压应力列于表 1-4。

表1-4 许用接触压应力 (MPa)

被 压 材 料 种 类	压 实 开 始 时	压 实 终 了 时
碎石路基	0.6~0.7	3~4.5
砾石路基	0.4~0.6	2.5~3
热沥青混凝土	0.4~0.5	3~3.5
土、水泥稳定土	0.3~0.4	4~5
沥青稳定土	0.3~0.4	1~1.5

图 1-6 所示为光滚轮碾压时沿垂直方向的压力分布。从图中可以看出，滚轮的滚压力集中在表面，因此滚压的压实深度较浅。

滚压时有效的压实深度（土壤均匀形变的深度），近似地等于两倍的压模直径或两倍的压路机与土壤接触表面最小的横向尺寸。压路机具有很大的滚轮宽度，因而接触面的最小边长常为滚轮压入土中所形成的压弦长。因此，为了确定有效的压实深度，可以应用压弦长的计算公式（1-17）。若考虑形变模量，则可得到计算有效压实深度的简单公式：

$$\text{对粘性土} \quad h_0 = 0.1 \frac{W}{W_0} \sqrt{qR} \quad (\text{cm})$$

$$\text{对非粘性土} \quad h_0 = 0.13 \frac{W}{W_0} \sqrt{qR} \quad (\text{cm})$$

式中 W 、 W_0 ——土的实际含水量和最佳含水量。

从上两式中可以看出，有效的压实深度和最佳的压实层厚度（在最小机械功消耗和最大碾压生产率的情况下，被压土壤达到所需密实度时的压层厚度）无异视压力压力和压路机的滚轮半径而定。因此，滚轮应尽可能取最大尺寸。但如前所述，由于滚轮制造工艺上的问题及使用条件所限，半径大于 80~90cm 的滚轮是不合理的。线压力的极限值由最大接触应力小于被压材料强度极限的条件〔见（1-18）式〕所限。这就是土壤碾压时的压层厚度要比其它压实方法的压层厚度小的原因。

此外，当碾压热拌沥青混合料时，在近表层的部分上还可发现如图 1-7 所示的现象。

当滚轮进入料层压实时，轮的前下方挤压料层，产生第一次松弛。当滚轮通过料层上面时，料层受到垂直载荷而压实。当滚轮通过以后，料层受到滚轮的反向作用力，在表层产生第二次松弛。这种情况随料层的性质、滚轮的线压力和路基的刚性不同而变化。

由上可知，滚压时材料的表层表面是不密实的。

二、光轮压路机主、被动滚轮对压实材料的作用

主、被动滚轮对压实材料的作用是不同的。当压路机在稳定状态下运动时，其被动轮上作用有以下数力（图 1-8）：垂直载荷及其轮重 G_1 ，机架的水平推力 T_1 ， G_1 、 T_1 总称作用

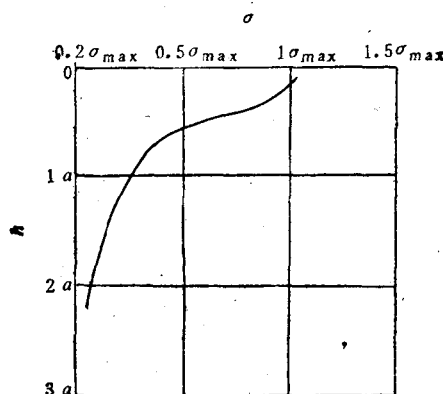


图 1-6 滚轮垂直方向的土压分布
a——滚轮与土壤接触表面最小的横向尺寸

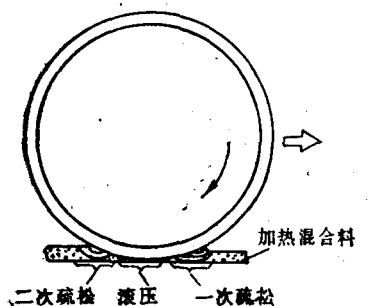


图 1-7 碾压热拌沥青混合料时
表层的疏松状况

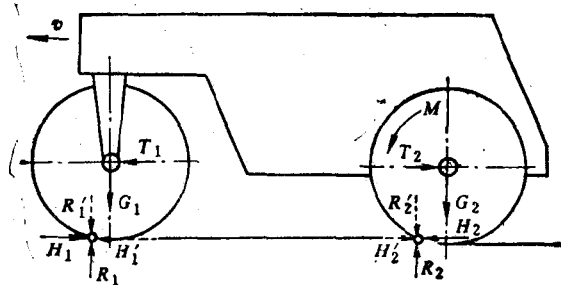


图 1-8 光轮压路机主、被动滚轮上的作用力

力；被压实材料对滚轮的垂直反力 R_1 ，被压实材料对滚轮的水平反力 H_1 ， R_1 、 H_1 总称反作用力。

力 H_1 和 R_1 是由作用力 T_1 和 G_1 所引起的被压材料的反力，其值与作用力相等而方向相反（图中用虚线表示作用力 H_1 和 R_1 ）。

根据垂直轴与水平轴上的诸力各等于零的平衡条件得：

$$T_1 = H_1 \quad G_1 = R_1$$

垂直力 R_1 对材料进行压实，而水平力 H_1 对材料实行剪切作用，向前推挤材料紧实，使其形成波浪形。当材料的抗剪力大于 H_1 时，则滚轮才能滚过挤压实的料堆向前移动，从而促成波浪形表面的过程又重新开始。

因此，被动轮（或拖式压路滚）不可能使压实层保持平坦表面，而只是形成波纹面。

在主动轮上作用有以下数力：轮重及其上面作用的垂直载荷 G_2 ，压路机机架的反作用力 T_2 ，转矩 M ， G_2 、 T_2 、 M 称为作用力；材料对滚轮的水平反力 H_2 ，材料对滚轮的垂直反力 R_2 ， H_2 、 R_2 称为反作用力。

从力的平衡条件得：

$$R_2 = G_2 \quad H_2 = T_2$$

反作用力 H_2 的方向是向前顺着压路机的行驶方向，与机架反作用力 T_2 的方向相反。

按照类似上述研究被动轮相互作用力图时的情况来分析，可知主动轮对被压材料作用的力有 $H_2 = H_2$ 和 $R_2 = R_2$ 。垂直力 R_2 对材料进行压实，而水平力 H_2 则力图使材料向压路机行驶的反方向往后移动。这种移动将受到位于主动轮之后经过压实的材料的反抗，使移动的材料颗粒落在接近滚轮垂直轴线的高压区域内，从而压紧。因此，在主动轮前是不会造成波浪形表面的，被压实材料的表面将相当地平坦。

如上所述，在压路机被动轮前，会经常造成波浪形而影响到所滚压路面的平坦。波纹大小取决于压路机重量在主、被动轮上的分配和被动滚轮的尺寸。显然，被动滚轮下陷越多，形成的波纹将越大。

从 (1-6) 式中可以看出，压路机越重及其滚轮的直径越小，材料被压陷得越深，而牵引力和推移被动滚轮所需的功率也随之增加。因此，为了减小波纹，必须降低分配在被动滚轮上的重量而力求加大其直径。例如三轮二轴压路机，后轮（主动轮）的单位线压力 q_2 要比前轮（被动轮） q_1 大 1.5~2 倍，即 $q_2 = (1.5 \sim 2)q_1$ 。

为了路面的平坦，某些压路机设计成全驱动轮型式，它名之为无波纹压路机，在实际使用中，它能保证所压路面非常平坦。

具有一个主动滚轮和二个被动滚轮的三轮三轴压路机，也属于无波纹压路机。该压路机的工作示意图如图 1-9 所示，其所有滚轮都装在一个刚性机架上，因此可随着所压路面的不平度而重新分配压路机各滚轮上的重量，使不平处逐渐被碾平。

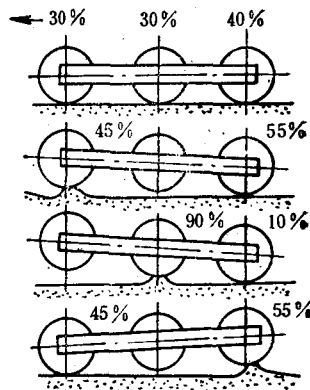


图 1-9 无波纹滚压三轮三轴压路机的工作示意图

§ 1-3 振实的理论基础

在压实水泥混凝土路面时, 振实法得到了最广泛的应用。但是, 振实法还可以用来压实碎石路面和沥青混凝土路面。

当振动时, 在被压材料层中有内力和外力作用。内力包括料粒间的粘结力和摩擦力, 以及料粒自身的重力。外力包括, 由于振动作用使被压材料颗粒产生的惯性力, 以及上层材料的重力。

材料受强迫振动后, 由于各料粒的质量及所处的位置不同, 因而所产生的惯性力也截然不同。此时, 料粒之间的粘结膜发生张紧的现象。若惯性力不大, 不足以克服料粒间的粘结力和摩擦力, 则各颗粒仍处于原始位置。如果惯性力很大, 达到足以克服上述各阻力, 在此情况下, 料粒在自重和其上层料重的作用下相互离发生位移, 力图占据最低稳定位置, 排除气相和液相, 互相吃紧或挤紧达到密实。

料粒的惯性力可按下述确定。料粒在强迫振动时的位移近似地按正弦曲线规律进行,

$$x = a \sin \omega t$$

式中 x ——位移;
 a ——振幅;
 ω ——角频率;
 t ——振动时间。

速度和加速度为:

$$\dot{x} = a \omega \cos \omega t$$

和

$$\ddot{x} = -a \omega^2 \sin \omega t$$

料粒质量为 m 时的惯性力是:

$$I = -ma \omega^2 \sin \omega t$$

振动振幅 a 并非为常值, 它视被压层的深度而定, 离振源越远越小, 按以下规律变化:

$$a = a_0 e^{-\gamma h}$$

式中 a_0 ——振动器振动的振幅;
 e ——自然对数底;
 γ ——系数, 视材料性质而定;
 h ——材料至振源 (振动器) 的垂直距离。

在压实砂土时, 系数 γ 为

$$\gamma = 0.39 \frac{\omega}{v} - \frac{1}{kl} \ln \frac{l\omega}{2v \sin \frac{w}{v} lk}$$

式中 ω ——振动器的角频率 (s^{-1});
 v ——振波传播速度, 对于砂, 可取为 $v = 150 \sim 200 m/s$;
 $h = 2 \sim 3$ ——系数;
 $2l$ ——振波源底面宽 (m)。

由此可见,材料相邻颗粒的质量差别越大,以及它们之间的粘结力越弱,则它们的相对位移越大。当用振实法压实水泥混凝土混合料时,在颇大程度上将出现混合料的触变性质。尤其在振动开始时,此混合料就稀释,根据其性质近似液体或半干液体。在振动终了时,各颗粒间的粘结力被恢复。随着混合料被压实,由于湿度降低,其触变性质也减小。

这样,具有较大质量的大粒料,在振动时得到较大的惯性力,首先脱离相邻的料粒,向下移动。如果含有不同大小颗粒的材料进行长时间的振动,则可出现分层现象,大颗粒料都处在下层,这是不容许的。因此,振动应该在材料具有最大密实度和大颗粒之间的孔隙由小颗粒填满时结束,此时分层还未发生,所需的振动时间视材料而定:

水泥混凝土混合料	30 s
沥青混凝土混合料	1~1.5min
粘土	1.5min

上述关于振动压实的说法,是一种内部摩擦减小学说的振动压实理论,其论点可概括为,由于振动作用使被振压材料的内部摩擦急剧减少,剪切强度降低,抗压阻力变得很小,因而在重力作用下易于压实。试验表明,粗砂的抗剪阻力减少到几十分之一;粘性土壤在振动加速度很大时,内摩擦显著减少;沥青混合料大约平均减少到1/5以下。

除上述理论外,还有共振学说和反复载荷学说两种振动压实的理论。

共振学说的主要论点是,当激振频率与被振压材料的固有频率一致时,振动压实最为有效。在实际工作中,共振效果是显著的,说明了这一理论的正确性。然而,由于材料的固有频率是变化的,要求激振器的频率作相应的变化是困难的,但利用共振现象来进行压实是比较容易的。为了解释这些现象,应当测定材料粒子的振幅和加速度,并进行分析。

反复载荷学说认为,由于振动所产生的周期性压缩运动的作用,而达到振动压实的效果。在低频范围内,它具有一定的现实性,而在高频范围内(共振频率达到1000Hz以上),并无充足的理论根据。试验表明,在高频范围内,振动作用的效果远远超过反复载荷的效果。

现以定向振动的振动平板为例,分析说明振实时内、外作用力的主要关系。在被压材料上作用有振动器的激振力(离心力)(图1-10)。

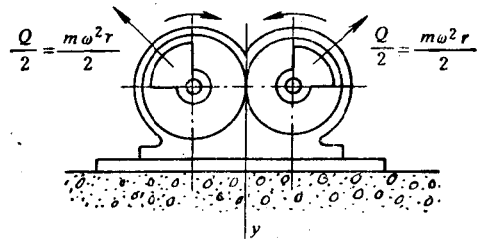


图1-10 振动平板简图

$$Q = m\omega^2 r$$

式中 m ——偏心块的质量;
 r ——偏心距;
 ω ——偏心块的转动角速度,

$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

式中 n ——偏心块每分钟的转速。

激振力在垂直轴上的投影为:

$$R = Q \sin \omega t = m r \omega^2 \sin \omega t$$

激振力在水平轴上的投影,当偏心块质量和偏心距相等,而转动方向相反时,总等于零。