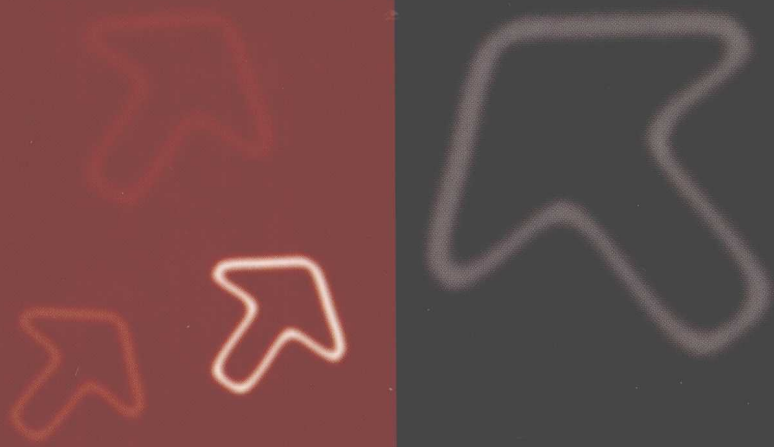


冲击振动

复合压实技术与设备

杨人凤 著 孙祖望 审



中国科学技术出版社

冲击振动复合压实技术与设备

杨人凤 著
孙祖望 审



中国科学技术出版社
·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

冲击振动复合压实技术与设备/杨人凤著. —北京:
中国科学技术出版社, 2003. 9

ISBN 7-5046-3667-3

I. 冲... II. 杨... III. ①土体-压实-技术②压
实机械-基本知识 IV. ①TU472②TU66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 080965 号

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:62179148 62173865

北京市卫顺印刷厂印刷

*

开本:850 毫米×1168 毫米 1/32 印张:5.875 字数:150 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—3500 册 定价:14.00 元

内 容 提 要

本书叙述了压实技术和压实设备发展的历史进程,讨论了各种压实技术和压实设备的特点及适用范围,特别是用于路基压实的各类土石方压实机械的性能特点。提出了一种新的冲击振动复合压实方法,用此原理设计了相应的冲击振动压路机模型,并利用该模型进行了冲击振动压实机理的研究和各种压路机模型的对比试验研究,建立了冲击振动压路机与土壤系统的动力学模型,阐明了冲击振动压路机所特有的冲击与振动优势互补的特点,分析讨论了这种压路机的压实效果、适用范围和市场前景。同时指出了各种复合压实方法是压实技术领域里新的发展趋势,利用复合压实方法是实现强化压实的有效途径。

本书可供工程机械研究部门、设计单位、工程机械制造厂家、道路工程技术人员和有关院校的师生参考。

序

压实是一种古老的技术,早在远古时代,先民们就已经知道利用牲畜蹄足的踩踏、揉搓、捣实来压实河堤和水坝。利用人力和畜力牵引圆石进行滚压的静碾压实以及利用绳索向上抛掷石夯的动态压实也有千年以上的历史。可以说现代静态和动态压实的基本方法都可以在历史上找到自己的渊源。

压实是提高基础材料承载能力和稳定性的一种廉价而有效的手段,这使得压实技术至今仍然充满着发展的活力,人们对提高压实效率、改善压实质量的努力一直未曾间断。20世纪30年代发明的振动压实技术极大地扩展了动态压实的领域,是压实技术发展历史中的一次重大的技术突破。刚刚过去的20世纪最后的20年是压实技术和压实机械领域中技术创新十分活跃的时期,这一领域的科技进步主要沿着两个大方向发展,一方面是新的压实方法、技术、理论和设备的研究和开发,另一方面是现代科技向传统产业的改造和渗透。在前一方向上,出现了一批按全新工作原理工作的压实机械和工艺,例如20世纪80年代出现的振荡压实技术、从70年代初就开始研究而至90年代末才作为一成熟产品面世的非圆形冲击压路机以及90年代末期出现的AMIR和HIPAC压实技术等。在后一方向上,从压实度的实时监测、实时处理开始正在向着压实过程的自动化、智能化、机器人化的方向发展,出现了诸如振幅的无级调节、振动能量的可控输入、压实工程的计算机辅助管理、压实机械运转工况、维修保养和故障诊断的远程通讯和管理等一系列新技术,体现了现代高科技技术在压实机械和压实工程上的应用。

近20年来,在压实技术和压实机械领域内的技术进步显示了人们认识和改造世界的能力是没有止境的。从上述创造新的压实原理的例子中可以看到的一个共同特点是:通过多种强化手段的综合应用使被压材料吸收更多的压实能量,因而能取得突破性的压实效果。

我和本书作者在1998年就开始了对冲击振动复合压实技术的研究,将大能量的冲击作用与振动作用结合在一起,从机理上来分析,无疑会取得良好效果。冲击作用可以对土壤施加比静压力、振动力大得多的瞬时作用力,从表面传至土层内部的压力波也比振动波更深、更强,而振动作用则可减少土壤颗粒之间的内摩擦和黏性力,从而使土壤更好地吸收冲击作用所施加的巨大能量,两者的复合作用将会大大强化压实过程。研究工作第一阶段的重点首先是构思一种方法和结构来实现使冲击和振动作用能同时施加于同一位置的土壤上,而且冲击必须以尽可能小的间隔连续地进行,以便尽量减小压实的不均匀性和保持能量提供的均衡性。研究工作第二阶段的重点是设计一个试验模型来验证冲击振动复合压实技术原理上的可行性以及实际的压实效果,并通过大量的试验研究来解决冲击和振动作用的合理匹配与参数的优化问题。本书作者在这些方面做了大量的工作,并完成了自己的博士论文,本书的主要内容即为作者在其博士论文的基础上撰写的。尽管使冲击振动复合压实作用成为一种成熟的技术还需在理论和实践上进行一系列工作,但作者已有的研究成果已经显示出这一新技术的明显优势和良好的应用前景。

本书的出版在另一方面的重要意义是为我国的压实机械行业展示了一个在压实机械核心技术方面进行重大技术创新的例子,而加强在核心技术方面的创新研究是提升行业竞争力的必由之路。我想在压实技术领域内从事研究、设计、应用和教学工作的读者都可能会从本书中得到启发和有所裨益。

孙祖望

2003年7月

前 言

随着社会主义建设的持续发展,各种基础设施的建设规模不断扩大,建筑施工、水利堤坝及公路建设中的压实施工作业量连年增加。在公路建设中,压实领域里现代化施工的趋势是道路铺层厚度加大、施工工期缩短而压实标准提高,特别是高速公路进入山区后,填平沟壑带来的大填方压实量剧增。此外,建筑和道路填方材料的种类逐渐扩大,从颗粒小于0.002毫米的黏土,直至1米或更大的石块;从含水量1%的沙漠砂到含水量高达17%的黏土;还有水泥稳定土、矿渣、冻土以及土石混合填料。其中,有些材料是比较难压实的,尤其是形成较大厚度的铺层时,压实就更为困难。这无疑给压实设备提出了更高的要求,迫使研究人员不断探索新的、更有效的压实技术和方法。

本书在分析了冲击技术与振动技术相结合的可行性后,提出了一种全新的冲击振动复合压实技术,并分析预测了这种复合压实装置的压实效果,设计研制了将冲击机构和振动机构结合为一体的专门的试验装置,为了适应大量试验的要求,该装置的振动主参数可在很大的范围内进行连续地调节,考虑到该试验的可比性,该试验装置的尺寸是将压路机原型同步按比例缩小而成,所以该装置既可为研究压实理论所用,又可作为压路机模型进行模型试验。

在压实技术的理论研究方面,重点观察和分析了土壤在冲击与振动联合作用下被压实的机理。在方法上采用了理论与试验相结合的研究方法,以土体弹、塑特性及土体流变特性的理论为基础,在土体中埋放了大量的压力盒,通过测量和观测仪器直接记录土体内部各点在冲击与振动联合作用下的内应力值。用数学手段拟合试验数据,得到土内应力的分布规律和变化规律,揭示了土体在压实过程中的动态特性,并建立了系统的动力学模型。

研究了冲击系统与振动系统的合理匹配问题。冲击技术和振动

技术作为单一技术被应用在压实设备上,其压实效果已被大量的压实施工所验证,但当两者相结合,其压实效果是否产生成倍叠加作用还需要试验研究。本文将碾压速度、振动频率、振动幅度、冲击能量等参数进行了要因正交试验,在标准土槽内,以标准级配砂为介质,进行了大量的试验研究,总结分析找出了冲击系统与振动系统的最佳匹配点,同时还分析了各种因素对复合压实效果的影响。

最后本书还进行了四种压路机模型的对比试验,即静碾压路机模型试验、振动+静碾压路机模型试验、冲击+静碾压路机模型试验和冲击+振动+静碾压路机模型试验,采用了宏观测量压实度和微观监测土体内应力变化并用的方法,分析比较了各种模型的作业效果和被作用介质应力的变化规律。并为今后开发研制新型复合压实设备提出了有意义的建议。

本书以压实技术为主线,涉及机械工程学科、土体工程力学学科、现代公路施工技术和测试技术等多学科,既有理论创新与结构创新,又与实际压实施工密切相连,有较大的工程实用价值。

在本书的撰写工作中,孙祖望教授审阅全书并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,恳请与读者进一步共同探讨。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 压实的意义	1
第二节 压实的基本方法	2
第三节 压实技术的概念	4
第四节 影响压实的因素	5
第二章 压实技术和压实设备的发展展望	13
第一节 压实技术和压实设备发展的历史进程	13
第二节 土石方压实设备的结构特点和性能特点	32
第三节 压实方法和压实技术的发展趋势与最新进展	36
第四节 智能压实技术展望	42
第三章 土壤的压实机理与压实特性	46
第一节 土壤的分类与性质	46
第二节 土壤的压实机理与压实特性	56
第三节 土石方压实工艺分析	62
第四章 压实检测与压实标准	67
第一节 击实试验的方法与标准	67
第二节 现场干容重的常规测试方法	71
第三节 压实标准	72
第五章 冲击振动复合压实技术与设备	76
第一节 强化压实过程的方法	76
第二节 冲击振动复合压实技术与设备的新构想	78
第三节 在机器结构上实现冲击振动复合压实技术的可行性	79
第四节 冲击振动复合压实设备的优点和适用范围	81

第六章 冲击振动复合压实技术的试验研究	82
第一节 试验设备与试验仪器	82
第二节 试验方案和数据采集系统	88
第三节 冲击能量与振动能量的合理匹配	91
第四节 冲击振动联合作用下土壤的压实机理研究	104
第七章 机器与地面系统的动力学模型	119
第一节 几点假设	119
第二节 多相连续体力学基本方程	119
第三节 常用的土体本构模型理论	122
第四节 冲击 + 振动 + 静碾压路机动力学模型	127
第八章 压实方法和压实效果的试验研究	131
第一节 静碾压实的试验研究	131
第二节 振动 + 静碾压实试验研究	134
第三节 冲击 + 静碾压实试验研究	143
第四节 冲击 + 振动 + 静碾压实试验研究	152
第五节 综合分析	166
附录 各类仪器标定结果	170
主要参考文献	174

第一章 绪 论

第一节 压实的意义

压实是提高基础材料的强度和稳定性的一种廉价而有效的方法。有效的压实能显著地改善填方的承载能力,提高不渗透性,在多数情况下,可以大大降低由于土壤固结而引起的沉降。因此,压实施工已作为一种最基础的施工方法被广泛应用于公路施工、机场建设、兴修水利和建筑施工之中。可以说,任何一种地基的处理都离不开压实,所以压实设备是工程机械一个应用广泛、需求量大的品种。

压实可以使路基及路面各结构层的材料具有一定的密实度,提高路基土和路面材料的不透水性及强度稳定性,减少路基、路面在行车载荷作用下产生的永久变形,这对于公路的路基、路面具有重要的意义。在公路建设中,由于路基压实不足而造成的车辙、裂缝、沉陷、水毁等各种路面早期破坏已屡见不鲜,一些新建和改建的公路,从投资每公里数十万元的补强路到投资每公里数千万元以上的一、二级公路和高速公路,都有路面过早破坏的现象。有的公路使用不到1年,路面损坏就近20%。形成这种现象的原因固然是多方面的,但不重视路基路面的压实,特别是不重视路基的分层压实,对于新建和改建道路不按照设计要求和施工规范进行认真压实,往往是造成路面局部沉陷或过早破坏的主要原因之一。公路路面的建筑费用一般占公路建设总投资的20%~50%,有时甚至更高。因此,路面过早破坏在经济上造成的损失是十分巨大的;同时,也妨碍了公路交通的正常运行。试验表明:压实对路用材料的强度和承载能力有较大的

影响,如砂的压实度在 100% 以上时每增加 1%,弹性模量增加 24.5MPa。石灰土的压实度从 95% 增加到 100% 时,其抗压强度从 0.7MPa 增加到 1.1MPa,约增加 60%。一种天然砂砾土,其最大粒径为 38mm,且小于 0.42mm 的颗粒含量为 30%,当干密度为 1.875g/cm^3 时的承载比为 35;干密度为 1.970g/cm^3 时的承载比为 72;干密度为 2.050g/cm^3 时的承载比为 90。沥青混凝土压实度为 100% 时,稳定度约 7.15kN;压实度为 96% 时,稳定度降低 50%;压实度为 95% 时,稳定度不足 3kN。所以采用高标准对路基、路面进行有效的压实是增强路基路面强度、提高路面承载能力并保持公路整体稳定性的一种最经济有效的技术措施。虽然压实费用在整个建设费用中所占的比例很小,但其所起的作用却十分巨大。

第二节 压实的基本方法

压实就是通过专门的机构或设备给被压材料施以作用力,强迫被压材料内部颗粒产生移动,重新排列得更加密实的过程。不同的机构或设备,由于其工作原理的不同,会产生不同的作用力。作用力的性质不同,又会引起被压材料变形的巨大差异。为了追求好的压实效果和高的压实效率,人们一直在孜孜不倦地探讨新的压实方法和压实技术。到目前为止,现代压实技术所采用的压实方法可以归纳为以下四种。

一、静力压实

将重物置于被压材料的表面,利用重物的重力,对被压材料施加垂直压力作用,使被压材料内部产生相应的法向应力和剪切应力,当剪切应力达到材料的抗剪强度时,材料的颗粒之间就会发生相对滑动,重新排列而变得更加密实。由于受重物尺寸的限制,静力的大小是非常有限的,因而,有限的静力只能引起被压材料较小的变形,获得较低的压实度。

二、搓揉压实

在搓揉压实中,搓是利用对被压材料表层施以水平方向的反复交变的作用力,使被压材料表层颗粒产生相对滑移,重新排列而变得致密;揉是一种压入作用,它依靠对被压材料局部施加很大的垂直压力,使压头直接剪切侧面材料,破坏压头下方局部材料与被作用材料整体之间的联系,使之受到很大压缩而变得密实。总的来说,这种搓揉作用力的作用深度较浅,仅在表层某一范围内传递,但其可获得较高的表面压实度和表面平整度。

三、振动压实

利用专门的设备可对被压材料施加一系列的激振作用,以激起被压材料颗粒之间的相对运动,在垂直压力的作用下,使它们重新排列而变得更为密实。振动作用能大幅度地减少被压材料内部颗粒间的摩擦,而对减小内聚力的作用则相对较小。振动能量以压力波的形式传向被压材料深部,同样可激起下部材料颗粒的振动,因而它比同样自重的静作用压路机能达到更好的压实效果和压实深度。由于振动压实的机理是在于激起被压材料颗粒的相对运动,而并不是依靠振动来压实被压材料,因而它的振幅通常只有 $0.3 \sim 2\text{mm}$,而频率则接近被压材料的自振频率,这样可以使被压材料的颗粒处于共振的状态下,从而获得最佳的压实效果。振动压实不仅作用深度较大,而且能获得较大的压实度。

四、夯实和冲击压实

夯实和冲击在原理上都是利用动能转化为冲击能来压实土壤,只是在冲程和频率上有所不同。夯实的冲程约为 $5 \sim 30\text{mm}$,频率约为 $8 \sim 20\text{Hz}$,冲击的冲程可高达数米,而频率则极低,为单个的脉冲。冲击压实的特征是巨大的动能在很短时间内转化为冲量,而形成瞬时作用的巨大冲击力,它可在土壤中产生很大剪切应力和法向应力,

从而有效地克服黏性土壤的内聚力,压缩土体并排出土中的空气和水分。冲击能量所形成的冲击波可传至很深的深度,因而在压实深度上有很大的优势。此外,由于冲击作用的时间很短,往往在被压材料还来不及发生“流动”之前,冲击已经结束,因而可减少由土壤“流动”而导致的不稳定,可有效地用于对较大含水量的黏土和干砂的压实。由于冲击压力波较振动压力波能传至更深的层面,所以,冲击压实能获得最大的压实深度。

第三节 压实技术的概念

压实技术是集被压材料、压实设备及压实工艺为一体的综合技术,在压实技术发展的初期,人们往往仅注意压实设备的改进和发展,而忽略了压实工艺和被压材料的研究,直到振动压路机出现后,在研究振动压路机的振动参数优化时,人们才开始注意到被压材料和压实设备之间是有关联的,应该把它们作为一个整体考虑,只有将振动压路机的振动频率选择在压实设备与被压土壤系统的共振频率附近,才能获得最佳的压实效果,从此人们开始注意到被压材料在压实技术中有着不容忽视的作用。

紧随其后的系列研究表明,不同的被压材料对于同种压实设备所反映出的压实特性是不一样的,级配砂的压实特性较好,而单一颗粒尺寸的砂、细粒的粉土和黏土压实特性较差;即使是同一种土壤,其含水量对压实也有很显著的影响,在某一含水量附近,可获得较好的压实特性,含水量高于或低于这一值,压实性能均变差,所以说,被压材料的性质与压实特性密切相关。

通过对被压材料更深入的研究,学者们还发现材料的压实特性不仅与压实设备的压实力有关,还与压实工艺有关,不同的土壤对各种压实工艺所呈现的压实特性是完全不同的。这里以对松砂碾压为例。第一种压实工艺是:碾压开始就用强档振动碾压,其结果可能是被压砂不断向碾轮两侧翻壅,不仅导致被压表面平整度很差,而且导

致整体压实度降低。第二种压实工艺是:开始先静碾 1~2 遍,再以弱振档碾压 1~2 遍,然后再以强振档压实,最后再封层碾压。实践证明后一种压实工艺能获得很好的压实度,且表面平整度也较好,由此可知:压实工艺对压实效果有至关重要的影响。

压实设备对压实效果有很大的影响,这已是无争的事实。不同的压实设备由于其工作原理不同,所产生的压实力的特性不同,必然导致不同的压实效果;同种压实设备,工作质量(即吨位)不同,产生的压实效果也不同。

所以,研究压实技术必须结合被压材料、压实设备及压实工艺通盘考虑,才会获得理想的压实效果。

第四节 影响压实的因素

因为压实技术是一项综合技术,包含内容较多,涉及面较广,因而影响压实的因素必然较多,下面我们就以被压材料、压实设备及压实工艺为序,逐一讨论。

一、被压材料对压实的影响

被压材料的组成、物理化学性质及物理机械性质等都对压实有一定的影响,在路基压实中,较多涉及的是各类土壤,由于土的成因有别,物理化学成分各异,导致土的性质极为复杂多变,这里仅讨论对压实而言较为重要的几点。

1. 土壤的含水量

在压实过程中,我们习惯用密实度或土壤的干容重来反映土壤被压实的程度。通过对土壤压实过程的研究,我们知道:被压土壤的含水量对其压实度有很大的影响,土的含水量较小时,土颗粒间的内摩阻力大,压实到一定密实度后,若压实功不能再克服土的内力,密实度就不可能再增加;当土的含水量逐渐增加时,水在土颗粒间起着润滑作用,使土的内摩阻力减少,因此,同样的压实功就可得到较大的密实

度。但当含水量继续增加到超过某一限度后,虽然土的内摩阻力还在减少,但单位土体中的空气体积已减至最小限度,而水的体积却在不断增加,由于水是不可压缩的,因此,在同样的压实功下,土的密实度反而逐渐减小,这对压实是不利的。由此可知:土壤在压实过程中,存在着一最佳含水量值,只有在最佳含水量下碾压才易于获得好的压实效果。一般而言,不同类型的土壤,由于其组成成分不同、土颗粒间的内摩阻力不同,最佳含水量也不同。土壤最佳含水量一般是在实验室通过击实实验测得的,那么,需要说明的是:同种土壤,对应的击实功不同,所得的最佳含水量也将不同,总的来讲,随着击实功的增加,对应于最大干密度的土壤最佳含水量将减小,最大干密度值提高,图 1-1 表示了在不同击实功下,土壤含水量和土壤干密度的关系。

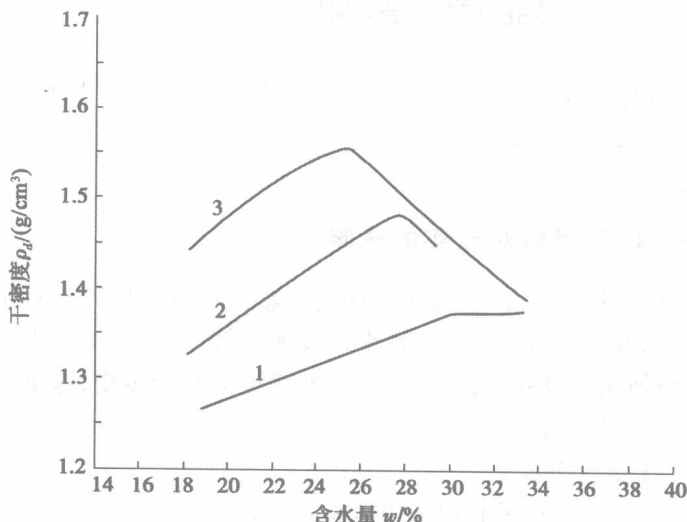


图 1-1 不同击实功下,土壤含水量和土壤干密度的关系

- 1—击实功为 331J,在此击实功下土的最大干密度为 $1.385g/cm^3$,最佳含水量为 32%;
2—击实功为 882.6J,在此击实功下,土的最大干密度为 $1.480g/cm^3$,最佳含水量为 27.7%;
3—击实功为 1765J,在此击实功下,土的最大干密度为 $1.569g/cm^3$,最佳含水量为 25.3%

表 1-1 以轻亚黏土为例给出了击实功、含水量及最大干密度的变化情况,虽然击实功的确定是以国家击实试验标准为依据的,不能随意变化,但这种变化趋势对现场压实施工有一定的指导意义。

表 1-1 随击实功能而变的最佳含水量和最大干密度

最佳含水量 (%)	最大干密度 (g/cm ³)	单位击实功 J(kgf ^① ·m)	干密度每增加 0.01g/cm ³ 所消耗的击实功, J(kgf ^① ·m)
23.6	1.64	0.056(0.0057)	
19.3	1.66	0.084(0.0086)	0.142(0.00145)
17.6	1.80	0.42(0.0429)	0.0228(0.00233)
12.4	1.89	3.14(0.3200)	0.1233(0.1257)
11.1	1.93	3.70(0.3771)	0.1256(0.1281)

注:1kgf 约等于 9.8N。

2. 土壤的类型

土壤的类型不同,所体现的压实特性也不同。一般来讲,级配土具有较好的压实性能,易于获得理想的压实度,而细粒粉土或黏土以及单一颗粒尺寸的干砂压实性能较差,详细资料请参阅本书第三章。以压实性能为标准的分类中,I、II类土壤的压实性能较好,而III、IV类土壤的压实性能较差,不易压实,为了改善某些难以压实的材料的压实性能,有时不得不加入一些其他的添加剂,如在黏土中加入一定量的石灰或水泥以改变其压实特性。此外,不同类型的土壤对于各种压实作用方式,其敏感性是不同的,如黏性土壤对于常规的振动压实几乎没有什么变化,即使对于很强的振动,黏土仅呈现整体的变形,而土壤颗粒间不产生相对运动,因而不可能有好的密实效果。但其对于冲击压实较为敏感,故此冲击对于黏性土壤可获得较好的压实效果。

3. 土壤的级配

压实的过程就是土壤颗粒进行重新排列,趋于密实的过程。因而级配良好的土壤,在压实过程中,除了各种颗粒在外力作用下,逐渐互相靠近趋于密实外,大小颗粒互相镶嵌,小颗粒自动进入大颗粒的缝隙之中,使总体空隙体积减小,密实度提高,所以呈现了较好的