

公路压实和压实标准

Gonglu Yashi he Yashi Biaozhun

(第 二 版)

沙庆林 编著

人 民 交 通 出 版 社

了第十章“现场压实度的评定方法”。此章阐述和比较了现场测定容重的方法，特别着重讨论了如何利用统计方法确定现场容重的最少检查数量以及判定压实度是否符合规定标准，最后讨论了两种试验方法比较中的几个问题。

公路压实和压实标准

(第 二 版)

沙庆林 编著

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 9 字数: 190 千

1980年8月 第1版

1984年9月 第2版 第3次印刷

印数: 12,900—25,180 册 定价: 1.40元

内 容 提 要

本书详细论述了公路路基和路面结构层压实的重要意义，分析了影响压实的一些主要因素，着重论证了采用重型压实标准的必要性和可行性，介绍了试用重型压实标准后取得的重大技术效果，讨论了压实土时的几个特殊问题，并论述了如何利用统计方法评定现场的压实度。

本书附录中还介绍了10个有关试验的操作方法。

本书可供道路工程技术人员及有关院校师生参考。

本书计量单位名称与符号表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备 注
长 度	$l, (L)$	米	m	
		千米(公里)	km	$1\text{km} = 10^3\text{m}$
		厘米	cm	$1\text{cm} = 10^{-2}\text{m}$
		毫米	mm	$1\text{mm} = 10^{-3}\text{m}$
质量, (重量)	m	千克(公斤)	kg	
		吨	t	$1\text{t} = 10^3\text{kg}$
		克	g	$1\text{g} = 10^{-3}\text{kg}$
		秒	s	
时 间	t	分	min	$1\text{min} = 60\text{s}$
		[小]时	h	$1\text{h} = 3600\text{s}$
		日, (天)	d	$1\text{d} = 86400\text{s}$
		立方米	m^3	
体 积	V	立方厘米	cm^3	$1\text{cm}^3 = 10^{-6}\text{m}^3$
		升	L, l	$1\text{L} = 10^{-3}\text{m}^3$
		毫升	mL	$1\text{mL} = 10^{-6}\text{m}^3 = 1\text{cm}^3$
		米每秒	m/s	
速 度	v	牛[顿]	N	$1\text{N} = 0.102\text{kgf}$
		千克力	kgf	$1\text{kgf} = 9.80665\text{N}$
		帕[斯卡]	Pa	
		千克力每平方厘米	kgf/cm^2	$1\text{kgf/cm}^2 = 9.80665 \times 10^4\text{Pa} = 0.098\text{MPa}$
压 强 (压力)	P			$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa} = 10.2\text{kgf/cm}^2$
		千克力每立方米	kg/m^3	
		焦[耳]	J	$1\text{J} = 0.102\text{kgf} \cdot \text{m}$
		千克力米	$\text{kgf} \cdot \text{m}$	$1\text{kgf} \cdot \text{m} = 9.80665\text{J}$
密 度	ρ	牛[顿]每厘米	N/cm	$1\text{N/cm} = 0.102\text{kgf/cm}$ (千克力每厘米)
功	W			
线 压 力	E			
湿 容 重	r_w	克每立方厘米	g/cm^3	$1\text{g/cm}^3 = 10^3\text{kg/m}^3$
干 容 重	r_d	克每立方厘米	g/cm^3	
最大干容重	r_m	克每立方厘米	g/cm^3	
回弹模量	E	兆帕	MPa	$1\text{MPa} = 10.2\text{kgf/cm}^2$

续上表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备 注
容 积	V	(千克力每平方厘米)	(kgf/cm^2)	$1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 0.098\text{MPa}$
渗透系数		立方厘米	cm^3	
		厘米每天	cm/d	

前 言

路基和路面结构层施工时，需采用机械进行认真的压实，以提高路基土和路面结构层材料的强度，增加其稳定性，减少其在行车作用下可能产生的形变。通过压实提高路基、路面的质量，是保证路面达到应有使用期的重要技术措施之一，这是一项经济有效的措施。近年来，在一、二级公路改建中，采用重型压实标准的合理性和必要性，已日益为广大公路工作者所接受和重视。因为重型压实标准既与现代汽车交通相适应，也与现代施工车辆和压实机械相适应；采用重型压实标准施工的路基，可以立即在其上铺筑各种路面，这就为使用机械、按大流水作业法施工路基路面创造了条件，从而大大加快了公路建设的速度。

书中建议的重型压实标准，包括用重型击实试验法确定路基土和路面结构层材料的最大干容重以及对各层的压实度要求这两个方面。因此，这个压实标准既针对路基，又针对路面结构层。对路面结构层材料提出明确的压实度要求，对保证路面的质量是绝对需要的。

笔者根据近几年国内不同地区试用重型压实标准的部分经验，论证了采用重型压实标准的可行性。

为了较全面地阐述公路路基、路面的压实问题，本书除对第一版“公路压实和压实标准”的原有章节进行必要的补充论述外，还增加了第六章“采用重型压实标准的重大技术经济效益”和第九章“压实土的特殊问题”。此外，还增加

目 录

第一章	压实的重要意义	1
第二章	影响压实的因素	44
第三章	确定标准干容重的方法	83
第四章	采用重型击实试验法的合理性	101
第五章	采用重型压实标准的可行性	106
第六章	采用重型压实标准的重大技术经济效益	113
第七章	国外的压实标准简况	127
第八章	建议的重型压实标准	130
第九章	压实土时的特殊问题	132
第十章	现场压实度的评定方法	151
附录一	含水量试验法(烘干法)	215
附录二	含水量辅助试验法(酒精法)	218
附录三	含水量辅助试验法(砂浴法)	220
附录四	重型击实试验法	223
附录五	水泥稳定土和石灰稳定土混合料的击实试验法	235
附录六	工地容重试验法——用灌砂法测定细颗粒土和中 颗粒土的容重	246
附录七	工地容重试验法——用灌砂法测定细颗粒土、中颗粒 土和粗颗粒土的容重	252
附录八	容重试验法(浸水称重法)	259
附录九	容重试验法(排水法)	264
附录十	粗粒料的比重和吸水量试验法	271
附录十一	名词定义	274

第一章 压实的重要意义

第一节 概 说

新中国成立以前、甚至在五十年代，我国公路施工部门没有或很少有压路机，在公路路基施工中极少采用人工压实的措施，经常依靠自然沉陷和行车碾压来提高路基的密实度和强度。自然沉陷需要有利的气候条件，在土较干燥的情况下，需要一定数量的降雨，在土很潮湿的情况下，需要较长的干旱气候。行车碾压则只能促使路基上部20cm左右增加密实度。在老的土路上，以及在薄层路面的老路路基上，经常发现的硬层就是在行车碾压作用下形成的。

在没有经过人工压实的新填筑的路基上铺筑路面，经常是徒劳的。因为不管在此种路基上铺筑什么类型的路面都必然遭到破坏。因此，路基施工后，不得不等待一年或两年让其自然沉陷到一定程度再铺筑路面。在依靠自然沉陷的路堤上，铺筑易于恢复的中级路面（如级配砂砾路面），如果说还勉强可行的话，要铺筑价格较高的难于恢复的沥青面层或混凝土面层，显然就不合适了。因此，不得不在完成路堤后等待一年再铺筑一般的粒料基层，然后通过碾压，到第三年再铺筑沥青面层。数十年前，公路上通行的汽车数量不大，也没有重型的汽车通行，在这种情况下，让路基自然沉陷后再陆续铺筑路面，如果说还勉强可行的话，那末在今天，公路上的交通量大了，也避免不了有重型车辆通行，再让路堤

依靠自然沉陷得到一定的密实度就不行了。因为，通过自然沉陷路堤所能达到的密实度，仍然不能满足现代汽车交通对路基密实度和强度的要求。即使是已通过自然沉陷达到了稳定的路堤^①，在大量汽车交通、特别是重型汽车作用下，仍可能产生进一步的压实和沉陷，而且通过自然沉陷后，土基的强度远比经过人工压实的路堤的强度低。因此，为了达到同一强度以满足交通需要，就要铺筑较厚的路面。

这些年来，我国公路建设的质量（主要是路基路面的质量）是不能令人满意的。一些新建和改建的公路，从投资1 km 数万元的补强和铺筑薄沥青面层，到1 km 数十万甚至百万元以上的新建和改建一、二级公路，都有路面过早破坏的现象。有的公路使用不到一年，就损坏近20%。有的地方用“前修后坏”来形容近几年铺筑的路面质量。形成这种现象的原因固然是多方面的，有管理方面的原因，也有技术方面的原因。从技术方面来讲，不重视路基路面的压实，特别是不重视路基的分层压实，在改（新）建一、二级公路的过程中还有依靠自然沉陷的现象，往往是造成路面过早破坏的主要原因之一。

公路路面的建筑费用往往占总投资的30~50%，甚至更多些。特别在一、二级公路的改（新）建费用中，路面投资占的比重较大。因此，路面过早破坏在经济上造成的损失是相当大的；同时，也给公路交通运输造成了很大的妨碍。在我国，铺有沥青面层的公路里程越来越多，但在有些省（区），由于沥青面层过早破坏，感到包袱越背越重，每年都需要花费相当一部分人力、物力、财力用于养护和修补过早破坏的

① 这种稳定是有条件性的。遇到某个不利年份，仍可能再产生沉陷或形变。

沥青路面。如何改变这种状况，如何能确保新建或改建沥青路面在使用期间的寿命。这里既有管理方面必须采取的措施，也有技术上应该采取的措施。从技术上讲，保证路基、路面的压实是重要措施之一。从高标准要求路基、路面的压实，是一项最经济有效的技术措施。

依靠自然沉陷和行车碾压建筑公路的方法，是在缺乏碾压机具和交通量小且无重型汽车通行的历史条件下形成的。目前，我国各个大小施工单位都拥有一定的压路机，有的单位还有 12~15t 的重型压路机，已经不是 20 多年前那种没有压路机的情况了。今天，条件变了，要求高了，也已具备压路机了。因此，在新的条件下，必须屏弃这种落后的与现代交通不相适应的施工方法。

为了加速公路建设，为了提高路基路面的强度以及保证路面的使用质量，必须对路基和路面的各个结构层进行人工压实。

压实使路基及路面各结构层的材料具有足够的密实度，这对于公路的路基、路面具有十分重大的意义。压实可以充分发挥路基土和路面材料的强度，可以减少路基、路面在行车荷载下产生的形变，还可以增加路基土和路面材料的不透水性和强度稳定性。压实的这几大作用，对于道路路面的使用性能和寿命是非常宝贵的。路基、底基层、基层或面层材料压实不足，在使用过程中，路面上就可能产生辙槽、裂缝、沉陷，也可能使整个路面产生剪切破坏。

公路施工实践证明，对路基进行必要的碾压，达到要求的密实度后，在公路使用过程中路堤将不再产生沉陷，而且可以立即在这种路堤上铺筑任何类型的路面。例如，国外采用机械施工路基、路面时，通常采用大流水作业的施工方

法。路基在前面施工，相隔一定距离（如1km）在完成的路基上铺筑底基层，再相隔一定距离（如1km）在完成的底基层上铺筑基层，再相隔一定距离在完成的基层上铺筑面层。这样一个工序紧接一个工序向前推进，既能保证工程质量，又加快了工程进度，还可避免不必要的浪费，节约工程投资。因此，采用高标准的人工压实，就可以大大加速公路建设，使公路能尽早正式投入使用。

总之，人工压实的主要任务是，在路堤施工过程中要保证路堤达到要求的密实度，以便可以在路堤上立即铺筑各种路面，而且铺成的路面是高强度的；路基路面在使用过程中不会由于进一步压实而产生有害的形变。

第二节 压实的物理过程

用某种工具或机械对路基或路面结构层材料进行压实时，在压实机具的短时荷载或振动荷载作用下，将产生几种不同的物理过程。

用有粘性的细粒土（不含或含有很少量砾石颗粒的土）填筑路堤时，土通常包括两部分，一部分是由单个土颗粒粘聚在一起形成的大小土团或土块，另一部分是单个土颗粒。在粘性大的土中，往往主要是大小不一的土块。单个土颗粒也是有大有小。因此，在通常情况下对这种路基土进行碾压时，产生的物理现象有：

- （1）使大小土块重新排列和互相靠近。
- （2）使单个土颗粒重新排列和互相靠近。
- （3）使土块内部的土颗粒重新排列和互相靠近。
- （4）使小颗粒进入大颗粒的孔隙中。

多种路面结构层材料通常主要是由各种不同粒径的单个颗粒组成的。在碾压过程中，主要发生的现象是颗粒重新排列、互相靠近和小颗粒进入大颗粒的孔隙中。

产生这些不同物理过程的结果是，增加单位体积内固体颗粒的数量，减少孔隙率，这个过程称做压实。各种细粒土、天然砂砾土、红土砂砾、各种级配集料、填隙碎石以及无机结合料稳定土等路面材料，经过压实后，在单位体积内通常包括固体颗粒、水和空气三部分，常称做三相体。

对于粘性细粒土的压实，仅是从孔隙中将空气挤出来，而不是将水挤出来。因为，一般碾压机械的短时荷载或振动荷载是不能将粘性土中的水挤出来的。碾压得愈密实，单位体积内的固体颗粒愈多，空气愈少。这些三相体的压实过程可以一直进行到几乎土中的全部空气被排挤出。因此，某一含水量时，土的理论最大密实度就是土中空气等于零，土接近于两相体。但实际上不可能通过压实完全消除土中的空气。

在砂的碾压过程中，砂颗粒组成的均匀程度对所能达到的密实度起着很大作用。由相同粒径颗粒组成的均匀砂的密实度与互相接触的砂粒的排列位置有关。假定相同粒径的砂粒都是球状颗粒，这些颗粒排列得最疏松时，每个颗粒与其相邻的颗粒有6个接触点，此时有48%的孔隙（见图1）；排列得最紧密时，每个颗粒与其相邻的颗粒共有12个接触点，此时只有26%的孔隙（见图2）〔6〕^①。

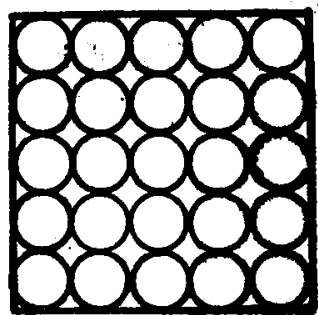


图1 相同粒径颗粒有6个接触点时的排列示意图

① 方括号内的数字表示参考资料的编号。

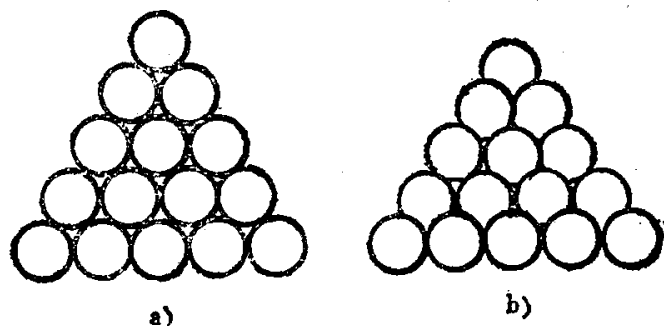


图2 相同粒径颗粒有8个接触点(a)和12个接触点(b)时的排列示意图

实际上砂粒不可能是完全同一个粒径，也不可能是完全球状的。这个假定只是用来说明，单一尺寸的均匀砂在压实过程中可能发生的物理过程。天然的砂常常是由不同粒径的砂粒所组成。在压实过程中，细颗粒填入粗颗粒间的孔隙中，使砂的密实度增加（见图3）。因此，单一尺寸砂的密实度通常最小。

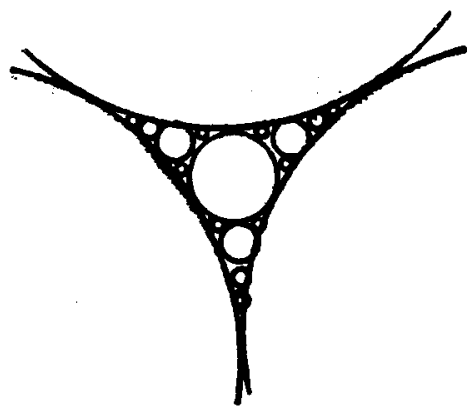


图3 不同粒径颗粒的排列示意图

由各种不同粒径颗粒组成的砂可能达到的密实度经常大于单一尺寸砂的密实度。最佳级配的砂可能达到的密实度最大。

第三节 三相体和密实度的表示法

上节已经说明，一种土或一种路面材料经过压实后，其密实度增加，因而单位体积的重量也增加。所谓密实度是指

单位体积内固体颗粒排列紧密的程度。排列得越紧密，单位体积内的固体颗粒就越多。因此，土或路面材料的单位体积重量或固体体积率可用来表示它的密实度的大小。这个单位体积重量通常称做容重。如单位体积重量中包括所含水分的重量，则称做湿容重，常用 γ_w 表示。如单位体积重量中不包括所含水分的重量，则称做干容重，常用 γ_d 表示。湿容重和干容重的单位（或量纲）通常是 kg/m^3 或 g/cm^3 。因此，土或路面材料的湿容重可以用公式(1)计算：

$$\gamma_w = \frac{Q_w}{V} \quad (1)$$

式中： Q_w ——土或路面材料的湿重，g；

V ——土或路面材料的体积， cm^3 。

知道土或路面材料的湿容重和含水量后，可以用公式(2)计算其干容重：

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{1 + \frac{W}{100}} \quad (2)$$

式中： W ——土或路面材料的含水量，%。

含水量通常是以土或材料的干重的百分数表示的，并用公式(3)计算：

$$\text{含水量}(W) = \frac{\text{水重}}{\text{干土重}} \times 100, \% \quad (3)$$

例如，一份湿土的重量是0.4kg，该湿土的体积是0.0002 m^3 (200 cm^3)，利用公式(1)可以算得该土的湿容重是：

$$\gamma_w = \frac{0.4}{0.0002} = 2000 \text{kg/m}^3 \text{ 或 } 2.0 \text{g/cm}^3$$

将该土在温度 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 的烘箱内烘干后，称得其干重为

0.33kg, 利用公式(3)可以算得该土的含水量是:

$$W = \frac{0.40 - 0.33}{0.33} \times 100 = 21.2\%$$

然后, 利用公式(2)可以算得该土的干容重是:

$$\gamma_d = \frac{2.0}{1 + \frac{21.2}{100}} = 1.65 \text{ g/cm}^3$$

土体或路面材料体内的固体体积是用公式(4)计算的, 并通常用百分率表示。因此, 常称为固体体积率:

$$\text{固体体积率} = \frac{\gamma_d}{G_s} \times 100, \% \quad (4)$$

式中: G_s ——土或材料的比重。

由于某种土或路面材料的比重是个定值, 因此, 土或路面材料的干容重愈大, 其固体体积率也愈大。

单位土体内固体颗粒多了, 颗粒与颗粒间的孔隙必然缩小, 也即土体的孔隙率缩小。孔隙率是用公式(5)计算的, 并以百分率表示:

$$\text{孔隙率} = \left(1 - \frac{\gamma_d}{G_s} \right) \times 100, \% \quad (5)$$

假如, 上述土的比重是2.70, 用公式(4)可计算得此土的固体体积率为:

$$\text{固体体积率} = \frac{1.65}{2.70} \times 100 = 61.1\%$$

用公式(5)计算得此土的孔隙率为:

$$\text{孔隙率} = \left(1 - \frac{1.65}{2.70} \right) \times 100 = 38.9\%$$

或孔隙率 = 100 - 固体体积率。

此孔隙中的一部分被水所占有，水的体积用公式(6)计算，也以百分率表示：

$$\text{水的体积} = \frac{\gamma_d \times \frac{W}{100}}{G_w} \times 100, \% \quad (6)$$

式中： G_w ——水的密度，通常可取作等于 1g/cm^3 。

上述土中水的体积为：

$$\text{水的体积} = \frac{1.65 \times \frac{21.2}{100}}{1} \times 100 = 35.0\%$$

孔隙中的另一部分是空气，它的体积 V_a 也用百分率表示。因此

$$\frac{\gamma_d}{G_s} \times 100 + \gamma_d \times \frac{W}{100} \times 100 + V_a = 100$$

$$\text{或} \quad \frac{\gamma_d}{G_s} + \frac{\gamma_d \cdot W}{100} + \frac{V_a}{100} = 1 \quad (7)$$

用公式(7)算得上述土中的空气体积为：

$$\begin{aligned} V_a &= 1 - 0.611 - 0.350 \\ &= 0.039 \text{ 或 } 3.9\% \end{aligned}$$

水的体积(%)与孔隙率的比值，称为土体的饱和度和。当两者的比值等于1(即100%)时，土中的孔隙全部被水占有，土体的饱和度等于100%。此时土中的空气体积等于零。

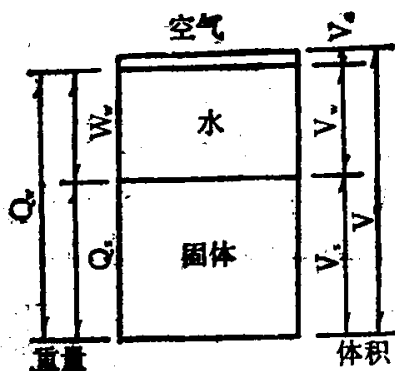


图4 三相体土各组成部分的示意图