

公路压实和压实标准

沙庆林 编著

人民交通出版社

公路压实和压实标准

沙庆林 编著

人民交通出版社

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，介绍了确定标准干容重的三种方法，着重论证了采用重型击实试验法的必要性和可行性，建议了新的压实标准。

在本书附录中还介绍了五个有关试验的操作方法。

本书可供公路工程技术人员及有关院校师生参考。

公路压实和压实标准

沙庆林 编著

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

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 $\frac{1}{16}$ 印张：3.125 字数：68千

1980年8月第1版

1980年8月第1版第1次印刷

印数：0001—8,600册 定价：0.50元

前 言

路基土及路面结构层材料需要压实，才能具有一定的强度和稳定性，这已是每个道路工作者所熟知的。但是，压实到底重要到什么程度，应该如何来确定压实的标准以及当前国际上处理这个问题的情况如何，等等，这些问题仍有必要予以进一步阐明。笔者根据多年来的工作实践和研究，认为当前对于一切正规施工的道路，都应该采用一种新的压实标准，以适应现代交通的需要，同时与现代的压实机械相适应。它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的要求这两个方面。书中介绍了这两个方面的实践资料，并用大规模生产实践的资料证明，利用国产12~15吨压路机碾压路基土及路面结构层材料，完全可以达到甚至超过所建议的新的压实标准。

在本书附录中，列有所建议的重型击实试验法以及几个其他有关试验法的操作方法，以供参考。

目 录

一、压实的重要意义·····	1
二、影响压实的因素·····	11
三、确定标准干容重的方法·····	25
四、采用重型击实试验法的合理性·····	39
五、采用新压实标准的可行性·····	43
六、国外的压实标准简况·····	52
七、建议的压实标准·····	55
附录一、重型击实试验法·····	57
附录二、水泥稳定土和石灰稳定土混合料的击实 试验法·····	67
附录三、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·····	77
附录四、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·····	84
附录五、粗粒料的比重和吸水量试验法·····	90
附录六、名词定义·····	92

一、压实的重要意义

用某种工具或机械使路基土或路面结构层材料的单个颗粒互相靠近，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。各种细颗粒土、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。碾压得愈密实，单位体积内的固体颗粒愈多，空气愈少。因此，一种土或一种路面材料经过压实后，其密实度增加，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。干容重和湿容重之间的关系可以用下式表示：

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

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。例如，某种土的湿容重为2.04克/厘米³，土的含水量为20%，则利用公式(1)可以算得此土的干容重为

$$\gamma_d = \frac{2.04}{1 + 0.2} = 1.70 \text{ 克/厘米}^3$$

此三相体内固体的体积是用下式计算的：

$$\text{固体体积} = \frac{\gamma_d}{G_s} \quad (2)$$

式中： G_s ——土或材料的比重。

因此，干容重愈大，固体体积也愈大。

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。孔隙率是用下式计算的：

$$\text{孔隙率} = \left(1 - \frac{\gamma_d}{G_s}\right) \times 100 \quad (3)$$

例如，某一土的干容重为1.56克/厘米³，土的比重是2.70，则此土中的孔隙率为：

$$\text{孔隙率} = \left(1 - \frac{1.56}{2.70}\right) \times 100 = 42.2\%$$

此孔隙中的一部分被水所占有，水的体积是 $\gamma_d \cdot W / 100 G_w$ （在此 G_w ——水的比重，通常可取作等于1），另一部分是空气，它的体积用 V_a 表示。由此可得三相体内各自的体积的关系为：

$$\frac{\gamma_d}{G_s} + \frac{\gamma_d \cdot W}{100} + \frac{V_a}{100} = 1 \quad (4)$$

干容重与压实度有区别。由于不同材料的比重可能相差很大，一种级配良好并压实得很好的集料的干容重，可能与另一种级配不佳且压实得不好的集料的干容重相同。如按干容重的大小来选用集料或评定某集料是否被足够压实，就很可能导致选用一种测得的干容重较大的集料或认为它已被压实得很好，而实际上这种集料的级配并不好，也并没有被足够压实。相反地，也可能屏弃一种测得的干容重较小的集料

或认为它压实得不好，而实际上这种集料的级配良好，而且压实得很好。因此，干容重不能作为衡量压实得好坏的指标。实践中常用压实度表示压实得好或坏，或只对土和路面材料提压实度的要求而不提干容重的要求。所谓压实度是指土或路面材料压实后的干容重与该土或该材料的标准干容重之比，并常用百分数表示。对于细颗粒土以及多数路面材料，常用规定的击实试验法确定其标准干容重。用规定击实试验法得到的土或材料的最大干容重通常就是它的标准干容重。因此，压实度是用下式计算的：

$$\text{压实度} = \frac{\text{干容重}}{\text{标准干容重}} \times 100 \quad (5)$$

例如，一种砂砾土压实后的干容重为2.09克/厘米³，通过击实试验得到其最大干容重为2.20克/厘米³，则此砂砾土的压实度为：

$$\frac{2.09}{2.20} \times 100 = 95\%$$

压实使路基及路面各结构层的材料具有足够的密实度，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交通荷载下产生的形变，还可以增加路基土和路面材料的不透水性和稳定性。压实的这几大作用，对于道路路面的使用性能是非常宝贵的。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，也可能使整个路面发生剪切破坏。

1. 压实使土和路面材料的强度大大增加

使用同一种击实试验法，将一种土在相同含水量下制件，并使试件压实到不同的干容重，各个试件的强度就相差很大。试件的干容重愈大，其强度也愈高。例如，一种土在

含水量为20%时制件，当其为最大干容重（1.50克/厘米³）时，土的形变模量等于532公斤/厘米²；当其压实度为95%（干容重为1.425克/厘米³）时，土的形变模量等于467公斤/厘米²；当其压实度为105%（干容重为1.575克/厘米³）时，土的形变模量就增加到626公斤/厘米²。在刚碾压了两遍的路基上，承载板试验测得其形变模量为650公斤/厘米²，在碾压终了（压5遍）的路基上，测得其形变模量为840公斤/厘米²。

对一种液限为60%、塑性指数为28的粘土进行一系列室内形变模量试验后，曾用数学加工法算得形变模量 E 与含水量 W 和干容重 γ_d 之间的回归方程式：

$$E = -1234 \lg W + 866 \gamma_d + 837$$

按此方程式可以绘出一组线图，如图1上的一系列斜向曲线。这些曲线明显地表示了土的干容重对形变模量的影响。

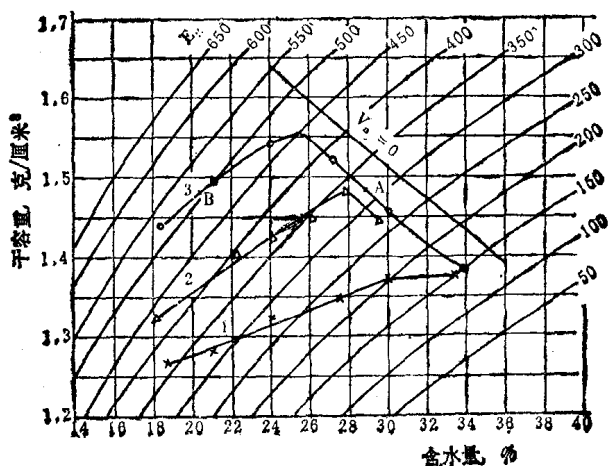


图1 粘土的 E 与 W 和 γ_d 的关系

图上击实曲线：

1-锤重2.5公斤，落高30厘米，3层，每层击15次；2-同上，每层击40次；3-锤重5.0公斤，落高30厘米，8层，每层击40次

在老路基上，测定土的 E 、 W 和 γ_d 后，也曾得出类似的规律性，如（长春市的资料）

$$E = -357 \lg W + 180 \gamma_d - 232$$

试验证明，压实对路面材料强度的影响，比它对土的强度的影响更大。例如，最大粒径为38毫米的一种天然砂砾土（小于0.42毫米的颗粒含量为30%），其干容重为1.875克/厘米³时的承载比为35，其干容重为1.970克/厘米³时的承载比为72，其干容重为2.050克/厘米³时的承载比为90。一种最大粒径50毫米的级配碎石，当其干容重为2.208克/厘米³时，承载比等于206，而当其干容重为2.256克/厘米³时，承载比等于377，即增高了83%。

图2表示石灰土的抗压强度与其压实度的关系。由图2可以看到，当石灰土的压实度从95%增加到100%时，其抗压强度从7公斤/厘米²增加到11公斤/厘米²，约增加60%。

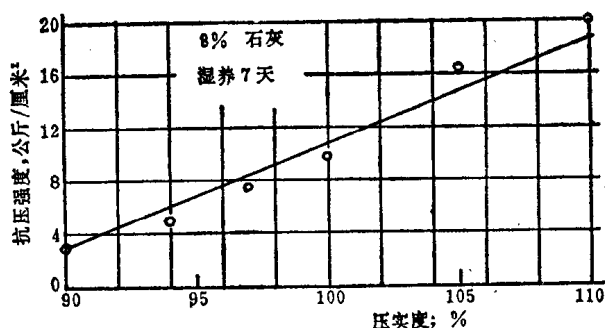


图2 石灰土的抗压强度与压实度的关系

图3所表示的是用5%水泥稳定粉土质细砂的结果。全部试件都是湿气养生6天，浸水1天。 R_7 是7天的无侧限抗压强度（公斤/厘米²）。 r_7 是7天的间接抗拉强度（劈裂试验）（公斤/厘米²）。

在路面结构和自然条件基本相同的两条公路上，用后轴

荷载10吨的黄河牌卡车进行弯沉测量。压实得好、施工质量好的那条公路，绝大部分路段的路面的平均弯沉值介于20~

40($\frac{1}{100}$ 毫米)之间，个别

差的路段的平均弯沉值也只有80。而另一条压实不好、施工质量不好的公路，大部分路段的平均弯沉值

介于30~82($\frac{1}{100}$ 毫米)之

间，约有40%路段的平均

弯沉值在96~198($\frac{1}{100}$ 毫

米)之间。后条路的强度比前条路的强度低得多。

所有这些试验都证明，压实可以大大增加土和路面材料的强度。

2. 压实可以明显地减少土和路面材料的塑性变形

路基或路面结构层的压实度不足，在行车荷载作用下，在路面上会发生辙槽、沉陷等形变。而且密实度愈小，所产生的辙槽等形变就愈大。在现有道路上经常遇到这种情况：有的段落路面很平整，没有什么形变，有的段落路面上辙槽和大波浪形变很严重。虽然引起这些形变的原因很复杂，但压实不足往往是其主要原因。在上述进行弯沉测量的第1条公路上，凡弯沉值在80($\frac{1}{100}$ 毫米)以上的测点，全部有辙槽。在上

述进行弯沉测量的第2条公路上，弯沉值在115($\frac{1}{100}$ 毫米)

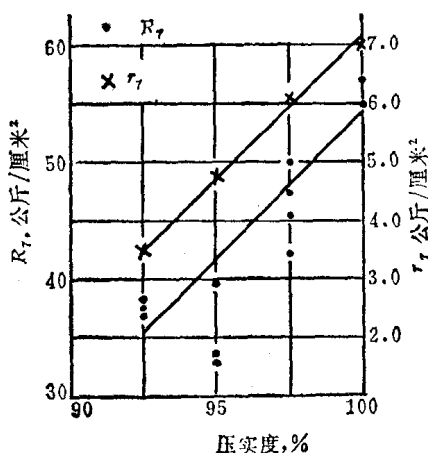


图3 水泥土的抗压强度 R_r 和间接抗拉强度 r_r 与压实度的关系

以上的测点也全部有辙槽。在此两条公路上，辙槽严重的路段一个断面上有4条辙槽（路面上划有中心线，中心线的一侧都是单向交通），槽深达5~7厘米。这些严重变形的路段并不是都处在水文地质不好的地段，其水文地质条件往往与其他路段无多大差别。

室内试验也同样证明了这种情况。对于石灰岩级配碎石和硅质级配砾石，用轻型击实试验法（AASHO T-99）、重型击实试验法（AASHO T-180）和中间法制件后，在三轴试验仪上进行反复荷载试验，以观测压实对塑性形变的影响，试验结果如图4所示。由此图可以看出：

（1）增加密实度可以明显地减少粒料基层的塑性形变；（2）不管在那个密实度，碎石试件的塑性形变比砾石试件的塑性形变小，尤其在高密实时，更要小得多（这是因为碎石的棱角增加了颗粒嵌锁，从而减少了在重复荷载作用下产生的形变）〔1〕。

用同一种集料做成不同密实度的试件，在同一荷载下进行反复荷载试验，产生的累积塑性形变表示在图5上。图上曲线表明，密实度对累积形变有很大影响〔1〕。

3. 压实可以明显地减小土和材料的渗透系数，减小其饱水量，增加其稳定性

材料经过压实后，其密实度愈大，内部的孔隙就愈小，

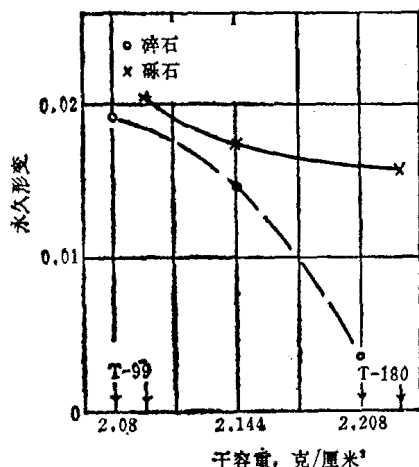


图4 干容重对碎石和砾石材料的塑性形变的影响

从而其渗透系数也大大减小。图 6 所示为碎石和砾石材料的

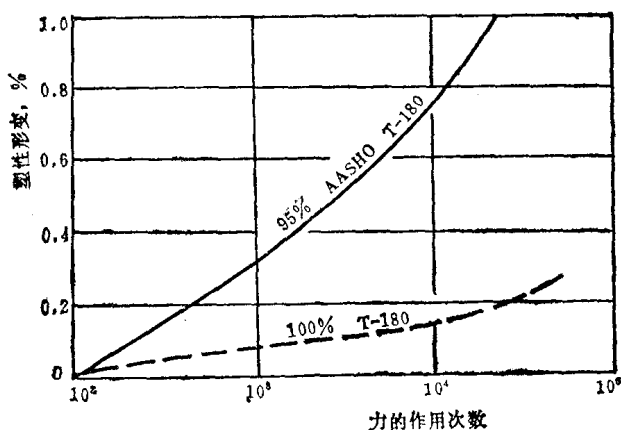


图5 密实度对累积形变的影响

干容重对其渗透系数的影响。由图可以看到,碎石的干容重从2.26克/厘米³增加到2.29克/厘米³时,它的渗透系数从约230厘米/天降低到约31厘米/天。

土经过击实试验后,可以得到一根含水量-干容重关系曲线,或简称击实曲线,如图7上的驼峰形曲线。

将公式(4)改变成以下的形式:

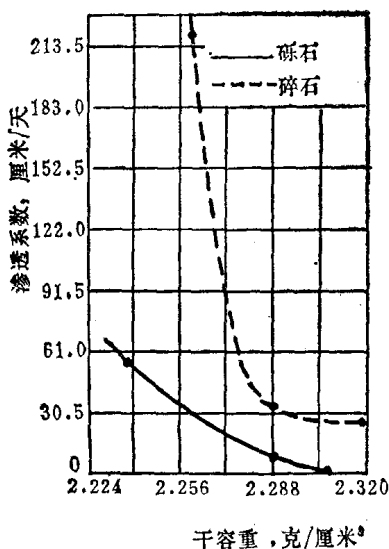


图6 干容重对渗透系数的影响

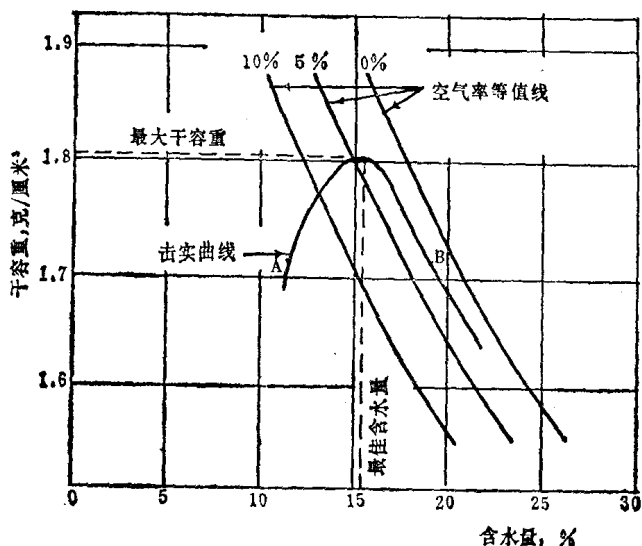


图7 击实试验中所用的一些名词

$$\gamma_d = \frac{1 + \frac{V_a}{100}}{\frac{1}{G_s} + \frac{W}{100}} \quad (6)$$

式中, γ_d ——土的干容重, 克/厘米³;

G_s ——土的比重;

V_a ——土中的空气体积, %;

W ——土的含水量, %。

利用公式(6)可以计算土中空气体积为0、5%、10%等的等值线。图7上的空气率等值线是以土的比重为2.65计算得出的。例如, 在计算空气率为0的等值线时, 先假定公式(6)中的 $V_a = 0$, 然后令 $W = 16\%$ 、 18% 、 20% 、 22% 及 24% 等值, 分别将这些值代入公式(6), 可算得相应的5个 γ_d 值: 1.861克/厘米³、1.794克/厘米³、1.732克/厘米³、

1.674克/厘米³及1.620克/厘米³。利用这5对(1个 W 值与其相应的 γ_d 值组成1对)值,在图7上可点出5个点,连接这5个点成一顺滑的曲线,即得出空气率为0的等值线。用同样的方法可得出空气率为5%、10%等的等值线。土中空气体积为0时,土体只包含固体土颗粒和水分,也就是说,土体被水饱和。因此,空气体积为0的这根线,也就是土的饱和度等于100%的线。

用同样的方法可以在图1上划一根 $V_a=0$ 的等值线。从图1可以看到,在与曲线3顶点相应的干容重,即最大干容重(1.56克/厘米³)时,土的饱和水量为28%^①。如土的压实度为95%,则其干容重为1.48克/厘米³,此时土的饱和水量将是31.7%。如土的压实度更小,则土的饱和水量将更大。含水量对土的强度影响很大,超过干容重对强度的影响;含水量越大,土的强度越低。因此,土的压实度越小,水越容易渗透到土中,同时能在土中存留的水分也越多,土的强度也就降得越严重,也就是土的稳定性越不好。就上述图1的例子而言,土压实到最大干容重然后被水饱和,其强度从450公斤/厘米²降低到400公斤/厘米²。如土只压实到95%的最大干容重,然后被水饱和,则其强度可能从510公斤/厘米²(图上B点)降到265公斤/厘米²。

一切含土的集料也都有这种特性。

(注:在此假定水的比重为1)。

①从顶点划一水平线与 $V_a=0$ 的线相交,与该交点相应的含水量即饱和水量。

二、影响压实的因素

在工地碾压细颗粒土的路基时，影响路基能达到的压实度的主要因素有：土的含水量、碾压层的厚度、压实机械的类型和功能以及碾压遍数。

在工地碾压级配集料时，影响集料能达到的压实度的主要因素，除上述因素外，还有集料的特性（包括质量、颗粒形状、级配的均匀性和细料的塑性指数）以及下承层的强度。

现将几种因素的影响简述于下。

1.含水量

在压实过程中，土或材料的含水量对所能达到的密实度起着非常重大的作用。锤击或碾压的功能需要克服土颗粒间的内摩阻力和粘结力，才能使土颗粒产生位移并互相靠近。土的内摩阻力和粘结力是随密实度而增加的。土的含水量小时，土颗粒间的内摩阻力大，压实到一定程度后，某一压实功能不再能克服土的抗力，压实所得的干容重小。当土的含水量逐渐增加时，水在土颗粒间起着润滑作用，使土的内摩阻力减小，因此同样的压实功能可以得到较大的干容重。在这个过程中，单位土体中空气的体积逐渐减小，而固体体积和水的体积则逐渐增加。当土的含水量继续增加到超过某限度后，虽然土的内摩阻力还在减小，但单位土体中的空气体积已减到最小限度，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能下，土的干容重反而逐

渐减小。土的干容重与含水量的这样一种紧密关系,就形成了图7上的驼峰形击实曲线。因此,细颗粒土以及天然砂砾土、红土砂砾、级配碎石、级配砾石、石灰稳定土和水泥稳定土等多种路面材料,都只有在一定的含水量下才能压实到最大干容重。这个与最大干容重相适应的含水量,通常称做最佳含水量。最佳含水量是通过击实试验求得的。击实试验后,在含水量-干容重关系图上与最大干容重相应的含水量就是最佳含水量。例如,图7上与最大干容重相应的含水量为 $15.8\% \approx 16\%$,即此土的最佳含水量为 16% 。但是,某一种土或某一种路面材料的最佳含水量和最大干容重不是固定不变的,它随压实功能而变。在室内进行击实试验时,它随所用的击实功能而变。在工地碾压时,它随所用压路机的重量或功能而变。

图1上的三条击实曲线是对同一种土用不同击实功能进行击实试验后得出的。此图表明,击实功能愈大,土的最大干容重也愈大,而土的最佳含水量愈小。图上曲线1的总击实功能为 $3375 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$,单位击实功能为 $3.375 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$,在此击实功能下土的最大干容重为 1.385 克/厘米^3 ,最佳含水量为 32% ;曲线2的总击实功能为 $9000 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$,单位击实功能为 $9 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$,在此击实功能下土的最大干容重为 1.480 克/厘米^3 ,最佳含水量为 $27.7\% \approx 28\%$;曲线3的总击实功能为 $18000 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$,单位击实功能为 $18 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$,在此击实功能下土的最大干容重为 1.560 克/厘米^3 ,最佳含水量为 $25.3\% \approx 25\%$ 。可以预言,如击实功能继续增加,土的最大干容重也将继续增大,而最佳含水量将继续减小。

在工地用压路机碾压时,同样是这种规律。压路机的重量或功能愈大,达到最大干容重的最佳含水量就愈小。