



土址压实的计算与检查

В. И. 比魯亞 著

罗雪良译 陈明万校



人民交通出版社

目 录

前 言

第一章 压实是改善土壤性质的方法..... 4

§ 1. 土壤压实计算与检查的主要原理和对压实的要求..... 4

§ 2. 土壤压实程序及其压实度..... 12

§ 3. 压实粘性土壤时计算数值的选择..... 25

§ 4. 压实土壤的强度和水稳定性..... 30

§ 5. 土壤含水量和密度的计算..... 41

第二章 不用专门仪器测定土壤特征的方法..... 52

§ 6. 测定天然土壤特征的方法之理论根据..... 52

§ 7. 用煮骨法测定天然土壤的含水量和
塑性上限..... 54

§ 8. 测定土壤骨架比重的方法..... 60

§ 9. 测定土壤湿容重和干容重的方法..... 62

§ 10. 用有机胶结料处理土壤特性测定法的
理论依据..... 64

§ 11. 工地实验室测定有机胶结料在土壤中的含量和
土壤含水量的方法..... 68

第三章 道路路基土壤压实的计算与检查..... 76

§ 12. 用不同重量的压路机压实亚粘土类土壤的计
算实例..... 76

§ 13. 道路路基土壤压实的检查..... 77

§ 14. 使填土达到规定的密实度取土用量的计算.....	79
第四章 用有机胶结料处治土壤的压实计算与检查.....	81
§ 15. 按塑性上限选择土壤最佳混合料.....	81
§ 16. 用冷法处治土壤时水分和有机胶结料 用量的计算.....	85
§ 17. 压实稳定土壤的检查.....	86
附录	
附录 1 烘干法测定土壤含水量.....	87
附录 2 野外测定粘性土壤的塑性上限.....	87
附录 3 用比色计法测定土壤中的沥青含量.....	89

前 言

本書是作者“路基压实快速检查法”一書（道路出版社，1953年）的改編和續編。

書中叙述的路基土壤的压实和检查方法已广泛用于道路工程中。

不少道路单位和作者在施工中使用各种方法压实土壤的实践，以及許多研究提供了新的資料，使能更精确地使用和发展曾經采用过的野外方法，并拟定了新的方法。

此外，用有机胶結料处治土壤的压实計算与检查也編入本書中，因为近年来广泛采用这种土壤修筑路面。

計算与检查未經处治的和用有机胶結料处治土壤的压实方法，無論是已知的，或者是作者重新拟定的方法均詳述于書中。这些方法中的某些部分——用試驗研究所得出的新方法和原理建議按試驗程序采用。

本書所叙述的實驗室試驗工作系由哈尔科夫公路学院土壤實驗室的З.А.布拉赫、Н.А.加甫利科維奇、М.И.哥列尔科夫等人參加下完成的。

第一章 压实是改善土壤性质的方法

§1. 土壤压实计算与检查的主要原理和对压实的要求

土壤是由固体颗粒、各种形态的水和气体三种成份组成的复杂物质。

固体颗粒——土壤骨架——是各种不同数量和形状的矿物体及有机物质的组合体。土壤骨架的体系是极其分散的，其中对于不同成份的土壤有着不同的固相与其它相（液相和气相）的相互作用。

液相——水——含有被溶解的其它物质，这些物质有时与水发生作用，有时则与水共同或单独和土壤的骨架发生作用。

气相存在于三相土壤中，与大气层相连接，或者具有各种杂质的滞留空气，它的含量多寡决定于土壤最后的密实度和水充满空隙的程度。

液相和气相在土壤的空隙中移动，并取决于土壤中的物理力学作用。其数量可能有很大的变化。在自然条件下，干燥土壤颗粒周围残存着少量的吸着水，被水饱和的土壤仍有少量的空气。土壤骨架单位体积的相对含量，用人工夯实或收缩时便增加，松散或膨胀时则减少。

由于土壤的内摩阻力和粘聚力决定了土壤的强度，因此骨架和水的相对含量，即土壤的密实度和含水量会影响土壤的强度。所以，修建土工构造物时规定要有系统地检查土壤的密实

度和含水量，以便控制施工。密实度和含水量是按該构造物和某部分的要求情况經過計算确定的。

用下面两个方程式可以說明土壤三种組合体的重量和容重的关系；第一个方程式說明重量的关系，第二个方程式說明单位体积中的容重关系。

$$\gamma = \delta + w\delta; \quad (1)$$

$$1 = \frac{\delta}{\Delta} + \frac{w\delta}{\Delta_0} + v, \quad (2)$$

式中： γ ——土壤容重，克/立方厘米；

δ ——土壤骨架容重，克/立方厘米；

Δ ——骨架比重，克/立方厘米；

Δ_0 ——水的比重，計算时采用 1；

w ——土壤含水量；

v ——孔隙率。

土壤中骨架、水和气体相对含量的改变，都会引起土壤的物理力学性質——含水量、密实度和强度（形变模量）——的改变。由于这种情况，而不能作出和建筑材料一样的标准，因而在設計构造物时便产生实际的困难。因此，构造物在施工过程中必須进行严格的质量检查。

設計土工构造物和进行压实检查时，必須掌握已压实土壤的物理力学性質和水的性質变化的主要規律性。根据土壤骨架的容重便可确定土壤的密实度。各种土壤采用人工压实可以获得不同的骨架容重，其骨架容重的最大值一定要在最佳含水量下压实 w_0 。（采用一定的压实方法）才能得到。土壤骨架容重的最大数值說明路基。土壤已被压实，并能保証路基的稳定性。

花費最少的机械能量获得最好的土壤压实是人们所希望的。压实土壤机械能量的消耗决定于土壤的性质和种类，决定于土壤的含水量与压实的方法。

土方工程施工前，实验室应进行土壤的试验，以确定压实所需要的机械功和求出相适应的最佳含水量。这一试验可根据试验的标准方法(15, 16)进行，它适用于中型压路机压实土壤(图1)。

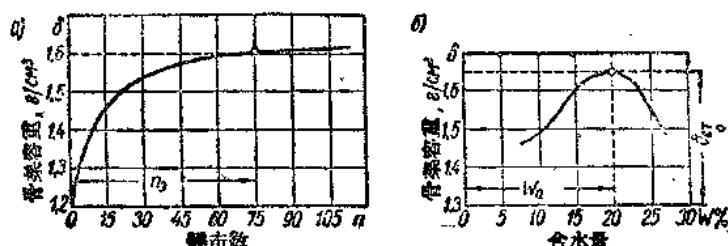


图1 土壤压实曲线a和标准压实条件下骨架容重与含水量的关系曲线b

用标准试验方法求得的最佳含水量和标准密实度 δ_{cr} 的数值可以用来决定土壤的压实程序；根据压实方法和其它条件可以确定施工时的计算密实度（参看 § 5）。

根据公式(2)并按最佳含水量计算，可以求出标准的密实度。

$$\delta_{cr} = \frac{\Delta \Delta_0 (1 - v_p)}{\Delta_0 + w_0 \Delta} \approx \frac{\Delta (1 - v_p)}{1 + w_0 \Delta} \text{ 克/立方厘米 (3)}$$

式中: v_p ——孔隙率。

当研究不同含水量的土壤压实和土壤对外力的抵抗能力时，可以发现各种特征的含水量，它对土壤的物理力学性质会引起很大的变化，使土壤由一种形态转变为另一种形态（土壤稠度的改变）。

土壤具有塑性上限的含水量 F 时，土壤便由流体转变为软塑性形态。 F 值的大小很明显地表明土壤的不同类别、颗粒成份和物理力学性质。塑性上限的含水量也可用来测定土壤湿度的单位，即用相对含水量来表示。相对含水量 w' 等于土壤含水量除以它的塑性上限。

$$w' = \frac{w}{F}。$$

当含水量约为塑性上限含水量数值的0.65~0.75之间时，土壤便由软塑性形态转变为硬塑性形态。

当土壤具有最小压实的含水量 $w_{\text{кр}}$ 时，便由硬塑性形态转变为半固体形态，因为含水量在相对含水量0.35~0.5之间时能保证使土壤颗粒和团聚体之间具有最大的粘聚力。

土壤完全被薄膜水饱和时，用A.Φ.列别节夫的最大分子持水量 w_m 来表示，它的数值对于各种土壤均在(0.4~0.5) F 之间。只有在最佳含水量的条件下，采用标准压实土壤的方法，才能得到最大密实度的指标。采用中型压路机压实土壤时，最佳含水量决定于土壤颗粒成份、吸收性复合体的数量和特征，其塑性上限介于0.57~0.66之间。

上述特征含水量的平均数值适用于草原土壤复盖层的粘性土（亚砂土、亚粘土、粘土），如图2所示。图中用点虚线表示与 $\frac{w}{F}$ 含义相同的形变模量关系曲线，实线表示 $\delta = f\left(\frac{w}{F}\right)$

的曲线，轴线表示饱和水土壤的形变模量。

$$E_{\text{бор}} = f\left(\frac{w}{F}\right)。$$

最小压实的含水量(4)从理論上說來是在土壤含水量增加至塑性状态时的含水量，它能引起强度和密实度指标有极大的改变。此种含水量的土壤，在压实土壤的外力(夯实、碾压和挤压)作用下，土壤的各个单独的顆粒及

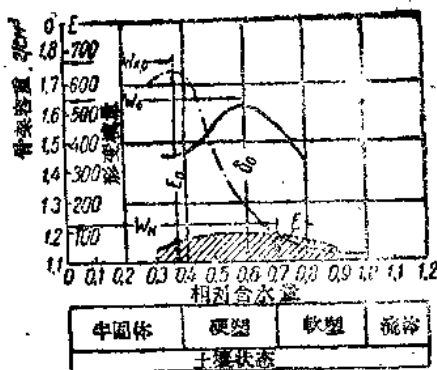


图2 在特征含水量下土壤状态的变化

团聚体便逐渐接近。同时，当土粒发生移动的一瞬间土壤的强度指标(形变模量)便降低。从質量方面來說，由于水份与土粒表面有一种分子吸力牢固地结合在一起，因而提高了它的强度。具有这一含水量的土壤，在外力作用下能产生最大的抵抗力，这是由于被高度粘着力水份薄膜所包围的顆粒，在相互接近时有最大摩阻力和粘結力。

采用此种压实工具的最佳含水量也有同样的特点，因为在这种含水量的条件下能使骨架容重达到最大的指标，同时花费最少的机械能量。

土壤由硬塑性形态轉变为软塑性形态时的含水量不能象特征含水量一样明显地表征出来。但是，这一含水量可以根据实际情况加以决定，在这种情况下，在压实过程中土壤的形变模量已达到接近于饱和水后的模量数值。一般土壤在硬塑性形态时(0.4~0.7)符合施工条件，因为在这种条件下，几乎全部工序(挖土、运输、掺入各种改善拌合料、压实等)均能进行施工。因此，找出这一变化界限是很重要的。

至于软塑性形态轉变为液体形态，从理論上說來含水量已

达到塑性上限，但在土壤性質中不可能出現特別显著的急变。土粒之間粘結力显著减弱，致使含水量增加、流体性能增长、强度受到损失。但一般在塑性上限时其强度不可能完全损失（见图2）。这是因为土壤在流体下限开始的阶段里，气孔中还残留着少量的吸附空气。

用塑性上限作为测定土壤湿度的单位时，可根据相对含水量来比较相同的顆粒成份，或不同顆粒成份土壤所处的状态（稠度）。例如，有三种不同塑性上限土壤（亚砂土为25%，亚粘土为40%，粘土为55%）的含水量均等于20%。若从含水量的绝对数值来看，很难确定土壤的湿度。我們可以借助于相对含水量和根据图2所示的資料决定：当亚粘土土壤 $w = 20\%$ 时处在软塑性状态下

$$\left(\frac{w}{P} = \frac{20}{25} = 0.8 \right),$$

亚粘土土壤在硬塑性状态下 $\left(\frac{20}{40} = 0.5 \right)$ ，粘土在半固体状态下 $\left(\frac{20}{55} \cong 0.36 \right)$ 。这里所指的是已破坏了的天然结构

土壤的稠度。在实际施工中，可用这种稠度的土壤修筑土工构造物。

用土壤建筑道路构造物的工艺过程，首先破坏了土壤的天然结构，即由于材料被松散而减低了土壤骨架的容重。其次，路基填土后在修建基层和路面时，必須将土壤压实至要求的强度。尽管采用各种方法，这点要求都是可以达到的。以人工压实土壤为例，土壤在压实过程中由于土粒間的距离縮短，致使它們之間內摩擦的接触面增大，因而粘結力增大，結果土壤在

荷重作用下变形，抵抗能力则加强。

在較良好水份的地区，用土壤修筑路基时，可采用人工压实增加强度。若用土壤作为建筑材料修建基层和路面而要求較好的改善土壤的物理力学性質时，采用各种方法亦可以改善它。例如，在土壤中掺入有机或无机胶結料的混合料，并用人工压实。

由于粘性土壤经过压实后提高了强度和水稳定性，减弱了毛细水上升，以及降低了水的毛细管上升的高度，因而，压实的土壤大大地減低了气候条件变化的反应和土壤物理力学性質較为稳定。

因此，在任何情况下，土壤作为建筑材料使用时，必須进行人工压实。压实土壤应遵守施工程序，并按照文件和指示所規定的准则与說明进行工作。遵守这些准则和要求能够保証道路結構建筑物的稳定性，这种結構的力学性質在一年四季中改变最小。

“稳定性”这一名詞說明了在道路結構中（土壤同时受到活載和恒載作用下）受压和受剪的抵抗能力。在这些力的作用下，土壤所产生的容許变形不取决于温度和水份的变化条件。

修筑公路路基的准则和选择土壤类别的主要要求在有关章程和技术规范[21]中有所說明；确定計算土壤密实度的規則叙述在專門文件[15]中。确定計算密实度 δ_p 时，采用骨架的标准容重作为标准，这种标准容重由标准压实的試驗方法来决定。最好将标准压实度与施工时用中型（約5~9吨）鉄滾筒压路机压实土壤的密实度进行比较。

按下式求出計算密实度：

$$\delta_p = k \delta_{cr}, \quad (4)$$

式中: k ——土壤計算密實度係數, 高級路面和次高級路面的道路採用0.95~0.98; 過渡式路面的道路採用0.90; 高于路槽底部深度在0.3米以上的上部填土採用不小于0.95; 高于路槽深度0.3米處的高級路面道路的挖方及零點標高處採用不小于0.9。

壓實有機膠結料處治的土壤時, 技術規範[12]規定含水量的數值應為土壤在松散時能將土壤和膠結物拌合, 必須遵照濕土與膠結物組成的混合物的壓實規程, 並規定每一地點用6或8噸壓路機壓實的遍數(表12, §175~176和表14)。

這樣, 土壤壓實的技術要求的實質, 根據現有的規程和研究資料可簡述如下。

對於不用膠結料處治的土壤, 壓實後的土壤含水量必須接近於最佳數值, 每層土壤的壓實係數應接近於1

$$k' = \frac{\delta_n}{\delta_p} \approx 1, \quad (5)$$

式中: δ_n ——已壓實土壤的骨架容重, 克/立方厘米;

δ_p ——按公式(4)求得的土壤計算密實度。

每一地點的碾壓遍數必須接近於有效數值。

對於用有機膠結料並以冷法處治土壤, 在壓實土壤中水與有機膠結料的含量必須接近於設計數值, 而其數值的總和應接近於最佳含水量。

用有機膠結料處治的土壤的壓實係數, 應接近於1 (公式5), 同時, 計算密實度必須接近於標準密實度。

每一地點的碾壓遍數, 必須保證達到膠結料處治土壤的密實度, 即等於設計數值。

§2. 土壤压实程序及其压实度

各种压实土壤的机械和工具（各种类型的压路机、板、夯压工具），主要用不同的方法（冲击，静力，联合作用力）将其施于土壤上，但按其实质说来，压实土壤的物理含义都是相同的。在各种情况下，压实初期气体从土壤空隙中很快被挤出，其体积便大大减小。因此，土粒和被水膜包围的土组便相互紧密，在施力继续作用下，土粒及团聚体便愈来愈紧，若是用某种工具继续施加压力，土壤的密实度亦不会增加，主要引起弹性变形；而成为无效的功。事实上，从压实土壤至有效作用时起（16, 6），超过有效作用的每次重复作用，系弹性变形恢复后（荷重取消后）所测定的密实度指标仍有极小的变化（从0~0.03克/立方厘米）。这种现象不仅在压实时具有接近于最佳含水量的粘性土壤，而且在土壤含水量小于或大于最佳含水量时亦能发现。

因此，压实的有效作用是在施加荷载与土壤相互作用过程中；在外力与土壤内摩阻力和粘结力之间产生比较稳定的平衡时间。确定压实有效的作用方法，现按实际情况叙述如下：

1) 在压实土壤的曲线 $\delta = f(n, N, P)$ 上，可以看出土壤在施加荷载作用下，密实度 δ 几乎达到最大数值（我们称为有效作用），若继续施加荷载，则 δ 便产生很小的变化（每次新的作用后不大于0.03克/立方厘米）；

2) 施加荷载于土壤的有效作用，必须是在曲线转变为直线阶段上；

3) 进行压实时，碾压有效次数 N ，应增加一遍，这是考虑到在压实过程中土壤可能发干，以及某些地方在实际压实时的

含水量小于最佳含水量，因此，

$$N_s = N'_s + 1.$$

施加荷載于一定顆粒成份土壤的有效作用或者是施加荷載的附加重复遍数都与土壤的含水量成一反比关系。这一规律性，当在靜力加荷作用下较为明显，而当进行标准压实或碾压土壤时則不明显。

但是，这些规律性在技术文献中是不可能找到应有的回答的，因为人工压实土壤时，都是在較小的含水量范围内（接近于最佳含水量）进行的，而在实际中，只有在碾压具有很小数值的天然含水量 w_e （按其数值小于最佳含水量）的土壤时才能出現这些规律性。

当土壤的含水量由最大分子含水量至标准压实的含水量数值变化时，实验室和現場压实土壤的结果說明：压实有效作用数值主要决定于土壤的顆粒成份。这种关系不仅对于靜力压縮土壤是正确的，而且对于加荷在被压实土壤的断續或瞬时的作用也是正确的。例如，在实验室中用标准錘的击落（重 2.5 公斤，高度 30 厘米），而在施工中則用某种压路机重复压实土壤。

现举例分析压实黑土类亚粘土的结果，并以压实曲线形式繪于图 3。压实土壤采用重 10 吨或 8.7 吨的鉄滾筒压路机和重 7.5 吨的气輪压路机（气輪压路机簡称为 ПЛК）。哈尔科夫公路学院的試驗性气輪压路机是双軸、9 个气輪，并帶有可变加荷 5.5 吨和 7.5 吨。

压实土壤时的相对含水量介于 0.55~0.67 之間，压实时的起初厚度为 9 厘米至 30 厘米，长度单位压力 $q = \frac{P}{b}$ ，其在 58

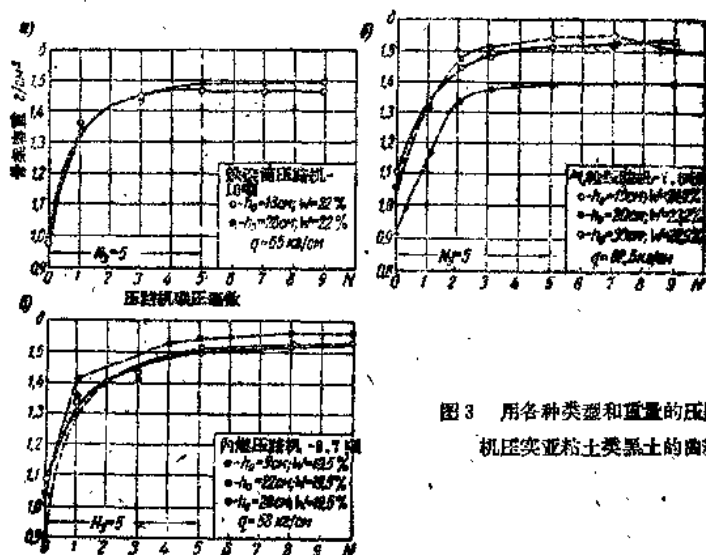


图3 用各种类型和重量的压路机压实亚粘土类黑土的曲线

~65公斤/厘米之間变化，式中 P ——压路机或汽輪压路机的压力，公斤； b ——压路机或汽輪之宽度，厘米。

必須指出，采用汽輪压路机的长度单位压力指标能够分析比較各种压路机压实各类土壤的压实度。必須按汽輪压路机的复辙宽度进行計算，在某些方面汽輪与鉄滾筒相似。

被压实的土壤有如下特点：塑性上限为37~38%；标准方法压实的最佳含水量为22~23%；最佳密实度为1.54~1.57克/立方厘米；土壤骨架的平均比重 $\Delta_{cp}=2.6$ 克/立方厘米。

从图3可以看出：

- 1) 施工压实土壤的过程及其物理性能如同上述相似；
- 2) 压实土壤从压实作用 ($N=1$) 到有效作用 (N_0)，其結果当土壤的密实度达到某一极限数值时，其变化是很小的

(超过有效作用的每一次的碾压由0~0.02克/平方厘米)；

3)除了用汽輪压路机压实起初厚度为30厘米的土层时得到較小的密实度外(图3,6),当其数值从15至28厘米的起初土层厚度的压实所得到的土壤密实度并无什么影响;

4)压实层的起初厚度为9厘米时,可发现密实度明显的增大(图3,8),其增大值与在必要情况下采用最薄层压实土壤所得到的最大密实度[4,7]是相一致的;

5)当土壤含水量接近于最佳数值(0.55~0.67),并且其单位荷重的变化由58~65公斤/厘米时,压实有效数值的大小都是一样的,且等于5次;

6)在各种情况下都可知道碾压压实土壤超过有效作用时所化費的无效功能,即超过四次,若考虑到附加作用时,每一地点的碾压遍数应为5次。

我們研究中,用塑性上限来表征土壤顆粒組成时,在施工中 N_0 数值的可靠稳定性可以預先确定各种压实机械有效作用的大概次数。这样对于压实土壤的机械数量、燃料需用量和完工日期是十分必要的。

作者所編制的以及部分发表于文献[7]中的許多試驗公式都可用来作近似的計算。其中H.H.伊万諾夫教授[16]建議的經驗公式,我們會利用它来确定中型鉄滾筒压路机的有效作用遍数。这一公式是經過某些假定和分析了解击的有效次数以后用土壤塑性上限作出如下的形式

$$N_0 = \frac{36 + 1.9F}{20} \quad (6)$$

表1所列举的 N_0 数值是按这一公式求得的,当采用中型(5~9吨)鉄滾筒压路机压实含水量接近于最佳含水量的各

种颗粒组成的草原地区粘土类土壤时，我們可以用它来作預算。必須指出，修筑路基时須用試压的方法确定比較准确的 N_0 数值。

表 1

土 壤 名 称	F 的变化 数值, %	F_c°	N_0
亚 砂 土	16~26	21	4
亚 粒 土	26~42	34	5
粘 土	42~62	52	7

图 4 和图 5 是按表 2 数据繪制的，图中表明 ($F=37\sim38\%$) 的各类土壤压实度与压实机具的类型和重量的关系。这些土壤具有接近于标准最佳含水量 ($22.0\sim24.9\%$)，其压实层的起初厚度为 $18\sim20$ 厘米 (曲线的编号与表 2 编号顺序相符)。

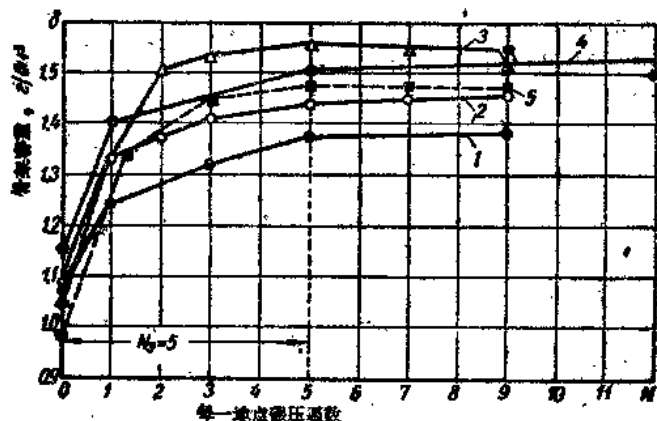


图 4 用不同重量的压路机压实土壤的曲线