

压实土壤的理論及机械

Н. Я. 哈尔胡塔 著

4
2

水利出版社

譯者前言

本書作者根据大量的試驗資料，并參閱了有关的文献以后，对于各种压土机作了詳尽的分析与研究。

作者在本書中首先从土壤的物理力学性質出發，着手分析压土机的工作机件和受压土壤間的相互作用。然后研究了各种压实土壤的方法及其所用机器的性能。根据理論分析、試驗研究以及施工經驗的总結，作者导出了决定各种压土机参数的公式。对于設計压土机及在現場从事土方工程施工的技术人員和科学工作者來說，本書还是目前不可多得的参考書。

在本書中，压实土壤的理論分析与計算占去了大量的篇幅。而关于压土机構造的敘述却仅占一小部分。为了使本書的書名更好地反映其內容起見，譯者將書名改譯为“压实土壤的理論及机械”。

此外，在冬季施工时，利用机器压实土壤的問題在本書中沒有敘述。本書出版后，原作者与 Ю. М. 华西里也夫工程师共同对此問題作了研究，其成果發表在 1955 年 11 期“施工机械化”上，（本文已刊登于水利譯叢 1956 年第 6 期上，中譯名为“冬季施工中压实土壤的机械的形式和規格”）。

参加本書翻譯工作的有：曹相云、張宗盛、鐘乐暉、刘瑛珍、王学經、周子夜、張有天等同志。全書由張宗盛和曹相云兩同志审校整理。

原作者序

我国正在进行着的大規模建設，需要在短期內建成規模龐大而
又極其重要的土工建築物。因此，压实土壤的問題就具有特別重大
的意義。

压实是穩定土壤的一種方法，它可以防止工程建築物的可能沉
陷以及減少滲透，因此，它為水工、路工以及其他建設所必須。

現在我國的工業出產着各種壓土機械，其名目日益不斷地在增
加。只有正確地選擇機械的參數時，才能獲得應有的压实效益。在
選擇時必須考慮土壤的物理力學性質。正確地選擇機械的參數，無
論是設計，或使用機械時都是很重要的。然而，有關這類問題的書
籍却極端貧乏。

本書的目的就是在某種程度上彌補這個缺陷，並且使設計者和
建設者們能夠得到有關压实機械方面的必要知識。

書中着重地論述了壓土機的工作機件和受壓土壤間的相互作用。
這個非常重要的問題在文獻中敘述得最少。當然，只有在估計
到土壤的基本物理力學性質以及其特性時才能創立起完全有根據的
相互作用理論。因此，雖然本書的篇幅有限，但仍盡量的闡述了土
壤的基本特性。

本書的讀者對象是設計及使用壓土機的工程技術人員及科學工
作者。

書中引用了作者在道路科學研究院列寧格勒分院(簡稱 Ленфи-
лиал ДОРНИИ)研究的成果。

作者對技術科學博士 Н. Н. 伊萬諾夫教授和技術科學副博士

A. M. 克里維斯基副教授給予的很多寶貴的指示、對 H. A. 烏里揚諾夫和 B. H. 科里舍夫工程師在試驗工作上所給予的幫助致以謝意。

作者將以感激的心情接受所有對本書的批評意見。

作者

目 录

第一章 机械压实土壤的物理理论基础

1. 土壤的物理性质	1
2. 拟方中土壤的必需压实程度	8
3. 土壤含水量的影响。最优含水量	10
4. 压土机械的基本工作示意图	13
5. 循环荷重作用下应力与变形的关系	14
6. 土壤的变形模数	23
7. 机械合理单位压力的选择	26
8. 压实土壤时最优土层厚度选择的基本原则	29
9. 应力状态变化速度的影响	33
10. 重复加荷的影响及机械通过次数的计算	39

第二章 用碾压方法压实土壤

11. 滚碾的种类	47
12. 平滚碾的工作过程	48
13. 平滚碾基本参数的选择	61
14. 平滚碾的合理工作情况	66
15. 平滚碾的必要通过次数的计算	72
16. 羊足碾的工作	77
17. 气胎碾的工作	86
18. 作用在滚碾鼓筒上的力和必需的牵引力的计算	94
19. 滚碾的构造	97

第三章 用夯击方法夯实土壤

20. 夯实机的工作机件和受压土壤的相互作用	106
21. 工作机件基本参数的选择	109
22. 夯实机的构造	113
23. 有关夯实机设计的几个问题	122

第四章 用振动法压实土壤

24. 用振动法压实土壤的过程.....	125
25. 表面振动器参数的选择及计算.....	127
26. 必要振动时间的选择.....	133
27. 振动器需要的牵引力及其发动机功率的计算.....	134
28. 表面振动器的构造.....	137
29. 論用振动法压实粘結性土壤.....	145
30. 用深層振动法压实土壤.....	146
参考文献.....	151
俄中人名对照表.....	157

第一章 机械压实土壤的物理理論基础

1. 土壤的物理性質

土壤是顆粒組成的体系，顆粒主要是礦物質。土壤顆粒空隙間或多或少地充滿水和空氣。因此，土壤由三相組成：固相、液相和氣相。

通常固相包含大小不同的顆粒，根據粒度，這些顆粒可分為砂粒、粉粒和粘粒。現已確定，絕大多數的土粒具有結晶構造[1]①，而受克斯光照像的研究指出，粘粒中的結晶構造具有離子晶格[2]。土壤也可能含有非結晶顆粒。

最粗顆粒（砂粒）的形狀可能是圓的（河砂），也可能是有稜角的（山砂）。粉粒由各種礦物（大多數情況下是石英和非結晶矽酸）的細層組成，它的形狀接近於球形[3]。最細的粒徑組——粘粒組——包含非常細小的顆粒，其中很大一部分有膠體粒徑。根據間接的資料推測，粘粒的形狀是片狀的或鱗狀的。只是在不久以前，由於電子顯微鏡的應用才証實了這個假說。現已証明，高嶺土顆粒的厚度比其寬度小 $\frac{9}{10}$ ，而微晶高嶺土則小 $\frac{99}{100}$ ，甚至 $\frac{299}{300}$ 。高嶺土顆粒的寬度等於 $0.1-1\mu$ （ $\mu=0.001$ 公厘，下同），而微晶高嶺土顆粒的寬度則更小（有時到 0.001μ ）。粘粒小片具有殘缺不平的邊緣和粗糙的表面。

固體的礦物顆粒和土壤中存在的液相（水）發生相互作用。這

① 見書末參考文獻目錄。

種相互作用的性質是決定土壤物理和力學性質的基本因素。

固相和液相相互作用的強度決定于土壤礦物部分的散布度，也決定于這些顆粒的親水性。土壤中礦物部分的散布度決定了土壤顆粒的比面積。

讓我們來扼要地研究一下在固相和液相分界面上所發生的現象的性質。

首先必須指出，水的性質隨着它與固體表面的靠近急劇地發生變化。在水與固體表面之間發生的物理-化學作用力是引起這種變化的原因。這種力的本質就是電分子力。

由於蘇聯學者們的勞動，這種物理-化學作用現在已研究得相當詳細。

現已證明，直接靠近固體表面的薄膜水與其他部分的水不同，它具有反常的性質[4、5、6、7]。這種反常的性質表現為：薄膜中水的性質與其說接近於液體，還不如說接近於固體。這樣，表層水具有抗切彈性和屈伏極限。在某些情況下，表層水可能表現充分的彈性。固體表面與其鄰近的水層間沒有滑移。B. B. 捷利亞申[8]在最近所作的實驗中曾發現，在邊界層內液體的粘滯性到處都一樣，但是在離開固體表面一定距離外（這個距離決定於固體表面的親水性、外部條件和該表面的大小）粘滯性有急劇的變化，變化後的粘滯性與在大體積水內粘滯性一樣。

因此，在親水表面（包括粘粒表面）上，由於物理-化學作用，堅固地復貼着一層薄膜水。現已證明，除了水與礦物土粒表面間的物理-化學作用外，也發生純粹的化學反應[9]。由於純化學反應的結果，就在顆粒周圍形成了溶劑薄膜，物理粘結水也就散布在此膜上。

膠體粒徑的顆粒被吸附在較大顆粒的溶劑薄膜的表面上，由於物理化學作用，膠體粒徑的顆粒不只是堅固地附着在表面上，而且還相互粘結起來。由於這種情況以及土壤內水和礦物間發生的化學反應便發現了，土壤顆粒的親水表面已經不是被純粹的水膜所遮

蓋，而是被能發生凝膠化作用的膠體溶液的薄膜所包圍[10]。這種膠體溶液就好像漿糊，當各個單獨的土粒接觸時，它起着粘結的作用。

顆粒間的粘結強度不僅取決於其親水性，也取決於其粘結層的厚度[11]。隨着後者的增加，粘結強度下降。現時可以說，下面的情況已被証實：土壤的粘結性（它基本上決定了土壤的物理力學性質）決定於固體顆粒，即其礦物成份的親水性，也決定於含水量。

根據土壤各個顆粒間的粘結強度，土壤可分為粘結性的和非粘結性的。粘土和壤土是粘結性的土壤，砂土和砂壤土是非粘結性的土壤。粘結性土壤在自然界中分布很廣，而在壓實它的時候引起很大的困難。因此，應當以最大的注意力去研究壓實它時所發生的過程。

在一定條件下，粘粒粘着的能力使土壤形成團粒結構。團聚作用取決於被吸附陽離子的本質，它既能促使團粒結構形成，相反的，也可使土壤分散[12]。團聚作用的性質與礦物成分和微晶體的物理化學狀態有關。

指出粘粒與細砂粒和粉粒堅固粘結的可能性是很重要的（只要後者的數量不超過一定的限度）[13]。這種混合物的結構與純粘土的結構沒有什麼區別。當砂粒和粉粒含量過大時，這種結構便消失，而在混合物的各組成部分間表現出明顯的界限。

用機械壓實土壤時，在大多數場合下遇到的都是鬆散的回填土，它們在結構上的完整性已經被填方用的填土機械破壞了。這裡應該注意，在這些機械的工作機件作用的影響下，連續的土體分散成各個顆粒和小土塊；由於薄膜水的楔入作用，分散現象沿着親水性最強的表面發生。而小土塊內部的結構和粘聚性還保持以前的樣子[14]。

因此，礦物對水的不同比例形成土壤不同的粘結程度，從而，也形成土壤的各種極不相同的物理力學性質。礦物成分的影響還在很早以前研究土壤的物理力學性質時就被發現了，但是，因為這個問題比較複雜，到現在研究得還是非常不夠的。

在很多情況下，土壤的散布程度可反映出它們的礦物成分。所以只要知道土壤的散布程度，就可能（那怕是很近似的）估計礦物成分的影響。

目前正全面研究着散布程度對土壤物理力學性質的影響。

已經發現，土壤的塑性（土壤在其連續性不破壞的條件下能夠改變其形狀的性能稱為塑性）決定於土壤中各種不同大小顆粒間在數量上的比例，而首先決定於比面積的大小。散布性越大的土壤，也就是比面積越大的土壤，它的塑性也就越高。土壤的塑性首先決定於它內部的粘粒組的含量[16、17]。

土壤的含水量，對其物理力學性質，其中包括對變形的性能，有極大的影響。

A. Ф. 列別捷夫曾研究過土壤中水的分類和它對土壤物理力學性質影響的理論[18]。以後很多學者又進一步改進和發展了這個理論。

粘結性土壤的含水量逐漸增大的時候，土壤就由整塊的，很結實的，但卻是脆性的狀態逐漸進入塑性狀態，而後進入流動狀態。

用機械壓實土壤時，所加的荷重經常是快速的重複荷重。在這種情形下，有些土壤在其一定的狀態下根本改變了它的性質。這種性質上的變化是由於觸變現象而發生的。所謂觸變現象就是在擾動時土壤的稀化。擾動時土壤顆粒的膠質薄膜轉變成以不規則的結構形式和很低的粘結性為特徵的另一種狀態（溶膠體）。在這以前，土壤顆粒在靜止狀況下形成膠結體（凝膠體），不是處在懸浮狀態，而是和水互相粘結在一起，形成空間結構。懸膠體穩定性較小，並容易隨時間變化，因此觸變過程是可恢復的，也就是說，經過或長或短的靜止狀態以後，土壤能夠部分地恢復其原來的性質。觸變稀化以後，只可以說能夠部分地恢復其原來性質，特別是對體系的強度說來更是這樣，因為大多數的連系被破壞以後是恢復不回来的[20]。在其他條件不變時，恢復程度決定於固相與液相的相互比例，同時，這裡有個最合適的比例[21]。

如土壤中含有大量的水，以及某一部分顆粒的尺寸小于 5μ ，那末触变現象就可能在這種情況下發生。砂土中含有的粘粒大于2%時，就已經發現其触變性質[19]。

要正確地理解機械壓土時產生的一系列現象，必須分析土壤變形的機械作用。

土壤在被壓實時所發生的變形由兩部分組成：可恢復的和不可恢復的變形。

在材料力學中，把可恢復的變形叫做彈性變形，它進行的速度通常接近於音速。土壤變形時，一部分可恢復變形的變形速度是很慢的。為了與純粹的彈性變形區別起見，把這部分變形稱為條件彈性變形。其他條件相同時，純粹彈性變形和條件彈性變形在數量上的相互比例決定於土壤的種類和它所处的狀態。例如，粘結性土壤變形時，如它所处的狀態是不可恢復的變形部分相當大，那麼幾乎全部可恢復的變形部分進行的速度就很快；如它處的狀態是不可恢復的變形部分相當小，那麼差不多所有可恢復的變形進行的速度就很慢，也就是說，是條件彈性變形。

如果變形時土壤的連續性不發生破壞，則不可恢復的變形部分可以叫做塑性變形。塑性變形是由於顆粒與團粒互相靠近的結果而發生的，它可以使土壤的體積變化，塑性變形也可不引起體積的變化——只是招致形狀的變化。

已經發現，結構未被破壞的土壤的強度大於結構已被破壞的土壤的強度[22]。根據這種情況，土壤的內部內聚力可分為兩部分：破壞後能恢復的內聚力和不能恢復的內聚力。H. Я. 捷尼索夫把能恢復的內聚力叫做初生內聚力，而把不能恢復的內聚力叫做固化內聚力[23]。試驗證明，如果有外力作用在結構未被破壞的土壤上時，那末土壤的變形（就是說顆粒的相對位移）只有在克服了固化內聚力後才可能發生。

下面將要指出，結構已被破壞的土壤，在由於循環荷重的多次作用而發生變形的條件下，還可以得到和固化內聚力相同的內

聚力。

初生內聚力反映出在分子力的影响下土壤顆粒有相互作用的性能，而固化內聚力反映出更复杂的过程——如反映出土壤存在的地質历史〔24〕。

因此，如果通过剛性压板在土壤表面上慢慢加荷重，那末在沒有固化內聚力的情况下，变形將會立刻發生。在土壤具有固化內聚力的情况下，只有在外加荷重达到相当于該內聚力的某一数值时，变形才开始發生。

实际上，在压实土壤时，最常遇見的是松散土壤，因此就应針对这种情况去研究土壤变形的机械作用。

因为团粒內部的內聚力比团粒之間的內聚力要大得多〔24〕，所以在变形的最初阶段，基本上只是团粒在移动，以后才是团粒內部的各个顆粒的移动。

顆粒或团粒互相靠近时，首先接触的是它們周圍的薄膜。接触后薄膜受到挤压〔25、24〕，从而薄膜發生变形。挤压时，处在接触地方的薄膜厚度减小，而在其他未受应力的地方，薄膜的厚度就增加。挤压强度很大时，在这些經受应力地方的薄膜厚度將超过这样的尺寸，在这种尺寸时，薄膜仍可为物理化学的相互作用力所支持。由此而产生的多余的水就流向顆粒中間，最后將它从上面或四周逸出。

顆粒外圍的薄膜發生变形时，顆粒本身和团粒也产生相对位移，这些位移的方向基本上是向着它們相互接近的方向。

試驗已查明〔17〕，由于这种性質的相对位移的結果，顆粒便进行重新分布，它們由紊乱的状态进入稳定的状态。后者使空隙的大小均匀，使超应力消失。因此，由于在荷重下变形的結果，土壤便获得一定的結構。

当然，与顆粒相对位移的同时，还發生顆粒本身的变形。然而在压实时所發生的內力下，这种变形是很小的。这样，我們可以認為整个的土壤体积变化仅仅是由于顆粒的相对位移引起的。

假如研究一下处在相对位移状态中的土壤颗粒和团粒，那末就会发现：随着颗粒位置的不同，颗粒四周的薄膜可能承受压缩变形、剪切变形，在某些情况下，还会承受拉伸变形。

当然，因为薄膜有相当大的粘滞性，在荷重作用下，它发生的变形只能随着时间而进展。这样，应力传递的机械作用，亦即土壤体积的变形，因而也就不十分完全。这里还应注意，变形的土壤是个极不均匀的体系。这种不均匀性表现在土壤内包含有各种大小不同、形状不一及矿物成分互异的颗粒。在大多数情况下，这些颗粒的相对位置都是偶然的。由于这样的不均匀性，那怕是在很小的外荷重作用下，土壤内的应力分布也是很不均匀的。其结果，各组颗粒与各组团粒所受应力的程度也就不同；在同一时间，有些团粒已达到不可恢复的变形阶段，而有些团粒却还处在可恢复的变形阶段。但是一切团粒都是相互粘结的，这就大大地阻滞了土壤整体变形的过程。与金属及其他非晶体相比较，土壤变形的速度是较小的。因此土壤可以认为是弹性——塑性——粘滞性的材料，也可以认为是属于粘滞性显著的材料。因此，加荷重的速度和其作用的时间具有非常重大的意义。在进行各种实际的计算时，必须考虑这些因素。

上面分析变形的基本机械作用，主要是针对粘结性土壤而言的，对那些含有或多或少数量的粘粒的非粘结性土壤也是适合的。粘粒很少的非粘结性土壤，特别是砂，虽然在很小的程度上，但总是可以发现粘滞性的。应当设想，这里发生的变形的机械作用是另一种形式。这种变形的基础，已不是薄膜形状的变化，而是土壤的内摩擦力，它大大地阻碍变形的进展。变形随着时间的断断续续的进展性质表明了这样的设想是正确的。

土壤的塑性变形，亦即土壤颗粒和其团粒相互切动时不产生土壤连续性破坏的不可恢复的变形，是和弹性变形同时进行的。

除了这个好像直接得到的塑性切动之外，有些土壤在一定的状态下，也可以通过较复杂的方式经受塑性变形。如上所述，在土壤上加荷重以后，土壤内部发生不均匀的、非常复杂的应力情况。因

此，變形的增長經常落后於應力的增長。這裡每個時間內好像都有多餘的外加荷重，它被彈性應力所平衡。這種彈性應力在土體內的大多數地方是超過彈性限度的。隨著時間的延長，儲存在諸受彈性應力的微體中的能量就發揮作用，而引起塑性切動。因此，土壤的應力情況變均勻了。這樣，就發生彈性變形向塑性變形的過渡。這種過渡可以叫做鬆弛。

因此，一部分塑性變形可能是由於鬆弛現象而發生的，但塑性切動的主要部分好像還是直接發生的。土壤的密實度越小，經鬆弛而發生的塑性切動的比重也就越低。

2. 填方中土壤的必要壓實程度

在很多情況下，鋪填土壤後，填方中填土的密實度是不夠的，從而填土的承載能力也是不夠的。因此，建築在鋪填土壤上的工程建築物要避免不均勻沉陷，通常應該把這些土壤壓實。在修建各種類型的堤壩及其他類似的水工建築物時，為了降低土壤的透水性也必須壓實土壤。

用機械壓實的填土土壤的密實度決定於鋪填填方的施工方法及施工組織。在使用鏟運機、自卸卡車及在一定條件下使用推土機的情況中，只要合理地組織這些機械的工作，土壤在鋪填填方的過程中，就可以壓實到最優密實度值的80~95%。用擺揚挖土機、橫向工作的推土機、平土機、自動平土機及各種不同的傳送設備和其他類似的工具堆築填方時，土壤的密實度通常不超過最優值的60~70%。因此，如果說第一種情況只要求進一步再壓實土壤，那末在第二種情況下就得耗費大量的功去壓實土壤。

填方中土壤的必要壓實程度根據這些填方的用途由相應的技術規範加以確定。作為判斷壓實程度的基本標準是土壤容重的數值。容重是在工作地點確定的，即單位體積內固相(骨架)的重量。假設 δ ——土骨架容重， γ ——濕土容重， W ——重量比的土壤含水量，則，

$$\delta = \frac{\gamma}{1+W} \cdot \quad (1)$$

土壤的重量比含水量就是水重与土重(即骨架重)之比:

$$W = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}, \quad (2)$$

式中 Δ_1 ——土壤中的水重;

Δ_2 ——土壤骨架重。

填方中土壤的密实度标准是经过一系列长期的和艰巨的研究以后而拟定的。H.H. 伊万诺夫及 M.Я. 帖列巾的工作具有决定性的意义[26]。最近,以量得的经历五十年、一百年、甚至一百多年的古老填方中土壤的容重作为密实度的标准。古老填方的长期工作能在一定程度上保证不致沉陷。如果利用人工压实使新堆筑填方的土壤密实度和古老填方中土壤的密实度相等,那末新堆筑的填方也可以保证不致沉陷。

由于 H.H. 伊万诺夫及 M.Я. 帖列巾研究的结果,标准压实法得到很大的发展,并且在实际上得到应用。

这种方法的实质[26]就是在尺寸一定的钢容器内利用落锤的下击力把土壤分层压实。锤重、下落高度及锤击次数都是标准化的。在無旁脹可能的情况下,土壤在容器内被压实,同时各种不同的含水量情况下,重复进行这种操作。最后作出土壤骨架容重与含水量的关系曲线,根据这个曲线决定最大的容重数值(标准压实时土壤的最大密实度)及其相应的含水量(最优含水量)。

经过多次试验的结果,选定这样大小的容器、锤重及下落高度,使其得到的土壤密实度,一方面接近于古老填方内土壤的密实度,另一方面,用中型压土机械进行压实时,实际上也是能达到的密实度。

视填方的功用,按技术规范规定土壤密实度的标准,此标准以标准压实时土壤最大密实度的小数表示。例如,对于水利工程的土工建筑物,为了避免渗透起见,规定其土壤的密实度在(0.97~1.0)

δ_{MAXC} 的範圍內，而 δ_{MAXC} 是標準壓實時土壤的最大密實度。對於公路中的填方，則填方的土層密實度隨着土層高度的不同，應當在 $(0.85 \sim 0.95) \delta_{\text{MAXC}}$ 之間。對於鐵路填方的密實度的要求可以小一些。

現行技術規範只確定了堆築填方內土壤必須達到的密實度。上面已經指出過，壓實土壤時，不只發生顆粒與團粒的互相靠近，而且還有新型結構的形成。很顯然，這種新型結構應該尽可能地堅固。試驗證明，容重並不是在任何時候及任何地方都能決定結構強度的。已經發現，如以各種不同的壓實方法得到同樣的密實度，那它們的變形性能可能是不一樣的。後者與機械工作的情況也有關係。因此，除了密實度以外，還應當估計到土壤的變形性能。壓實機械不但應把土壤壓到必要的密實度，同時還應當使土壤在變形的過程中形成堅固的結構。

很遺憾，評定壓實後所得土壤結構的方法，到現在研究得還是不夠的。

3. 土壤含水量的影響。最適含水量

土壤的含水量是影響其壓實效果的重要因素之一。研究過含水量影響的有 А.Ф. 列別捷夫[27,28]、Н.Н. 伊萬諾夫、М.Я. 帖列申[26]、В.А. 朴里克朗斯基和 И.В. 科洛緬斯基[25]、В.В. 奧霍亭[16,17]等人。最近幾年，А.К. 維魯利亞和 В.И. 維魯利亞兩人在哈爾科夫公路學院進行了確定土壤含水量影響程度的工作[29]。

上述研究的結果表明，每種土壤都有這樣的含水量，在這種含水量的情況下，花去等量的機械功去壓實土壤時，可以得到最大的密實度。這個含水量就叫做最適含水量。

試驗確定出，最適含水量的數值決定於壓實時的壓力大小。壓力增加，最適含水量減小。

В.В. 奧霍亭根據他作過的試驗，認為，作壓縮試驗時，使外加荷重等於壓實機械（例如滾轆）的單位壓力，這時土壤內能夠保持

的水量就相當於土壤的最優含水量。需要指出，在現有的幾種壓實機械所具有的压力範圍內，最優含水量的變化是很小的。根據A.K.維魯利亞的研究[29]和我們的試驗，在滾軋的單位長度上的压力增加到5~6倍時，土壤的最優含水量才減少五分之一。

上面已經說過，在每種具體情況下，土壤的最優含水量常標準擊實法求得。常見的土壤最優含水量的大概的數值列在表1^①中。表中也給出土壤的最大密實度的大概數值，它是由標準擊實得來的。

表 1 標準擊實時土壤的最大密實度和最優含水量的大概數值

土 壤 名 稱	最優含水量 $W_0, \%$	標準擊實後土壤的最大骨 架容重 克/立方公分
砂土	7~11	1.60~1.95
砂壤土	9~14	1.65~1.95
壤土	13~19	1.60~1.85
重壤土和粘土	18~24	1.55~1.70

土壤壓實的過程通常就是土中的氣相(空氣)被擠出的過程。土壤各個顆粒和團粒的接近，基本上是靠空氣縮小至最小程度而發生的。壓到最大標準密實度的土壤的空氣含量不超過其體積的3~5% [29]。以後實際上只有依靠內部水分的被擠出，才可能進一步壓實土壤，這樣在用機械壓實粘結性土壤的情況下，一般是不可能的。因此，以人工方法壓實土壤時，土壤由以三相體為特征的不同的松散狀況轉變到接近於兩相體的状态，即接近於飽和體。與此轉變過程發生的同時，各個土壤團粒發生分散，而後形成了單團粒體系。此處除了發生有體積變化的塑性變形之外，不可避免地也要發生無體積變化的塑性變形。因為薄膜水具有楔入作用和潤滑作用，所以薄膜水層厚的地方，亦即土壤含水量大的地方，這種塑流也就較容易。可以說，為了將土壤導至飽和體状态，土壤的每個含水量都相

① 此表系取自 A. M. 克里維斯基的材料 [30]。