

CAT® PAVING PRODUCTS

土壤压实指南

 CATERPILLAR®



SAFETY WARNINGS

- WARNING: Falling Object
- WARNING: Moving Parts
- WARNING: Trenching

OPERATIONAL INSTRUCTIONS

- 1. Engage the parking brake before starting the engine.
- 2. Check the fluid levels before operating the machine.
- 3. Do not operate the machine on a slope greater than 30 degrees.
- 4. Do not use the machine for purposes other than those intended.
- 5. Do not touch the blade or other parts of the machine while it is in operation.
- 6. Do not touch the blade or other parts of the machine while it is raised.
- 7. Do not touch the blade or other parts of the machine while it is moving.
- 8. Do not touch the blade or other parts of the machine while it is being lowered.
- 9. Do not touch the blade or other parts of the machine while it is being retracted.
- 10. Do not touch the blade or other parts of the machine while it is being stored.

STUBBLESS



CAT CS78B

CAT® PAVING PRODUCTS

土壤压实指南

CATERPILLAR®

土壤压实指南由 Caterpillar® Paving Products 出版。我们尽力确保书中包含的技术参数和信息正确无误。性能信息仅用于进行评估。由于单项土壤压实项目具有许多特定的可变因素(土壤类型和特性、添加剂、含水量、工程标准、可用设备、操作员工作效率、用户应用偏好、基层状况、海拔等), Caterpillar Inc. 及其经销商均无法保证机器及本文所述方法会带来预期的效果。设备资料和技术参数如有更改,恕不另行通知,请咨询 Cat 经销商以了解最新产品信息和可供选购的选件。所示机器可能包含可选和/或附加设备。CAT、CATERPILLAR 及其相应徽标、“Caterpillar Yellow”和 POWER EDGE 商业外观以及此处所用的公司 and 产品标识为 Caterpillar 的商标,未经许可不得擅自使用。

注意:有关特定产品信息,请参阅相应的 Caterpillar 《操作与维护手册》。部分所示设备可能包含非 Caterpillar 制造或测试的售后市场选件。

ISBN:978-1-939945-28-0

QCBQ1705

© 2013 Caterpillar Inc. - All rights reserved.

目录

| | | |
|-------|-----------|-----|
| 单元 1: | 土壤压实的基础知识 | 8 |
| 单元 2: | 土壤类型与分类 | 30 |
| 单元 3: | 压实的物理过程 | 38 |
| 单元 4: | 应用和质量控制 | 58 |
| 单元 5: | 智能压实 | 90 |
| | 附录 | 112 |
| | 术语表 | 118 |

前言

土壤材料一直是世界上最丰富的施工材料。从罗马人使用土壤材料筑路到现代的大坝施工，正确的压实操作都与填方的性能以及在填方的上方最终建成的建筑物紧密相关。如今，道路、路堤、大坝、结构性填方和斜坡等项目都需要可控式压实操作以确保符合工程质量标准。施工过程中如果未达到压实质量，使用寿命的整个维修成本会超过初始施工成本。

土壤材料不仅是最丰富的施工材料，也最具可变性。颗粒尺寸和形状、矿物、含水量、混料和时间都影响着土壤材料的可变性。此指南介绍了可变性的来源，并重点介绍了如何选择正确的设备以保持高效的压实操作。选择压实设备的实践和土壤材料铺砌流程主要来源于经验或过去的作业项目。但是，随着施工进程的加快和向以结果为导向的性能规范转变，压实操作虽然只是总施工成本中的一小部分，却对项目的成功越来越重要。

本指南介绍了压实流程的基础知识、高效压实机器的选择和新兴质量评估试验技术，其目的是优化压实时间和控制项目成本。选择机器指导是以材料类型、目标摊铺厚度、生产率需求和质量评估标准要求（即，相对压实度、路基反应模数）为基础。

本指南对于想要在项目开始前收集和使用土壤信息的承包商非常有用，这样他们就可以制定施工现场的具体标价和着重于第一次就正确完成作业的压实流程方案，进而避免高代价的返修工作和施工延迟。

Cat® 压实控制等压实测量技术现在使得在摊铺厚度、碾压覆盖范围、压实仪值 (CMV) 和压实测量值 (MDP) 方面对压实进程进行监控成为可能。CMV 是一个常用参数，是由压路机器充当测量设备，根据机器至地面的双向振动分析来提供的土壤机械参数值（例如，硬度、强度）。MDP 是 Caterpillar 的一项创新技术，该技术进一步提升了各系统的性能。



通过利用 GNSS (全球导航卫星系统) 位置信息实时测量被压实材料的机械值,可生成具有色标的高质量评估地图。可将这些地图与设计值进行关联,以确保被压实材料达到所确定的质量标准。这种压实质量评估方法比“停工”情况下进行目视检查的方法领先很多。压实规范原来以指定流程的方法规范为导向,而以结果为导向的性能规范现在可以通过集成技术实现实时 100% 的覆盖范围。其实,智能压实技术是全球各机构重新考虑压实质量评估的基础。

本指南结合了 Caterpillar 在对改善压实设备和操作的追求中获得的经验和知识。许多执业承包商、工程师、公认机构和研究人员都对本指南做出了贡献。新兴压实技术,特别是集成智能压实监控和预测运行参数的方法将是自 1933 年 Proctor 建立水分控制标准以来压实评估的重大变革。

本指南用户可随时使用关于土壤压实原理的实用资源、有关机器选择的专业信息和如何优化压实操作的知识。利用本指南中的信息可降低风险并提高压实质量。

David J. White, Ph.D.
副教授
Iowa State University





介绍

人们要进行建造就必须进行压实。

Caterpillar很高兴为大家介绍这本土壤压实指南。本指南意在提供土壤压实原理、试验技术和工作程序的指导。本文提供了一种实用方法，能够解决相当复杂的理论问题。本指南是土方工程行业数十年的经验，以及无数与 Caterpillar 合作多年的个人所贡献知识的产物。

无论您是建筑专家、政府官员，还是教育工作者或学生，也无论您是否有意对建筑方法进行更多了解，您都会发现本指南是一个宝贵的资源。

另一个能够提供土方工程或压实应用咨询的宝贵资源是您的本地 Cat 经销商。经销商人员经过 Caterpillar 专家的培训来为您提供帮助，可为您提供设备、服务和知识，以使您保持最高生产效率。



单元 1 土壤压实的基础知识

分析土壤成分的能力对具体制定压实规范和达到所需的承载强度至关重要。



[什么是压实?]

简单来讲,压实是通过机械方式提高材料密度的过程。通过减少土壤颗粒之间所拥有的空隙,土壤变得更加密实。随着时间的推移,松散材料自动下沉并自然压实。通过施加各种机械力,压实所需的时间就会从几年缩短到几个小时。

对于道路、铁路、机场、建筑工地/路基、管道铺设、大坝、沟渠、涵洞等几乎所有的施工项目,压实都是一个

必要的过程。如果需要利用土壤来支撑土层结构,通常需要通过压实来使结构保持稳定。

土壤压实是通过组合多种力来实现:静态压力、冲击、侧挤和振动。





[为什么压实很重要?]

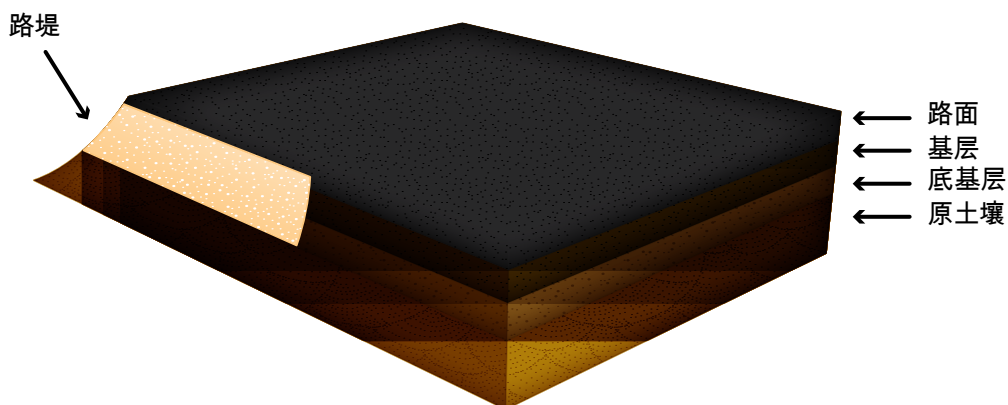
经适当压实的材料可以支撑更重的负载，而不会变形（弯曲、破裂、移动）。支撑重型承载结构时，基底材料必须非常密实，否则会在承载下出现更大程度的压实，造成结构沉降。密实材料具有较低渗透性，可减少渗水的影响。压实还可以使表面变平并发现结构薄弱的区域。

典型道路的各种分层可以很好地说明压实的重要性。道路的各个分层都具有特定的工程用途，还用来支撑分层上面的重量。各分层必须使用合适的材料建成，以达到适当的厚度和硬度。如果某一分层不够牢固，道路将出现问题。

道路施工的所有阶段都会用到压实。压实质量对于道路的使用寿命具有重要影响，对于舒适性也具有深远影响，还可能关系到使用道路的公众的安全。

压实过程是延长道路使用寿命最经济的方法。对于每立方米或每立方码的土壤，在施工过程中增加道路层的密度所产生的成本非常低。达到密度规范可以节省用于未来道路养护和/或重铺的大量成本。

道路典型断面



[什么是土壤？]

土壤是由可能含有有机物质的矿物颗粒组成的松散材料。土壤基本上都是通过物理和化学过程使岩石慢慢破碎分化后的沉淀物。

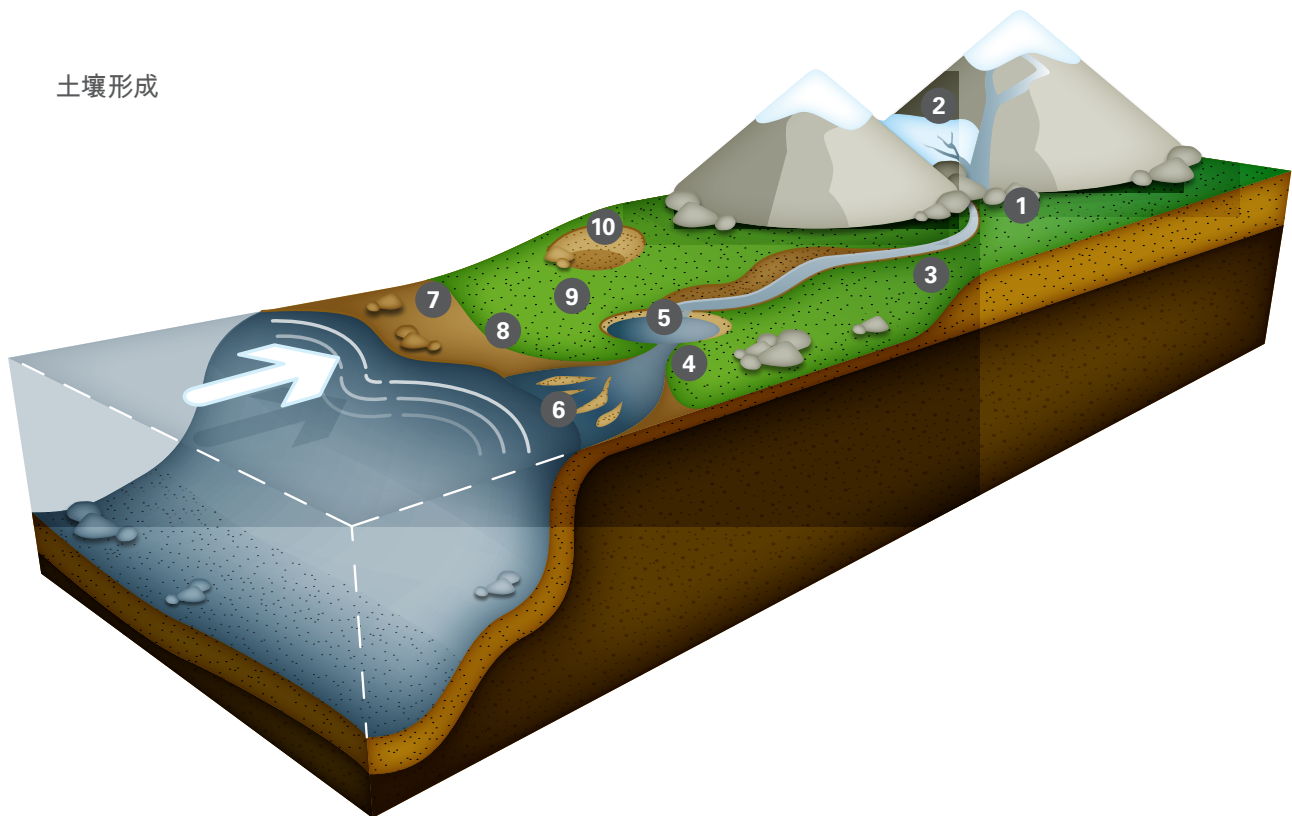
物理过程包括冻融、滚落、碰撞和风蚀。

化学过程形成粘质土壤。长期的风化作用和降雨对于粘质土的形成起着重要作用。粘质土与沙土和砂砾的不

同在于它由细微、扁平颗粒组成而且这些颗粒具有来自于不同岩石的板状结构。

有机物也有助于土壤形成。植物死亡时，其残余物将变成土壤的一部分。土壤含有很高的有机物成分，通常过于多孔、不结实，无法成型。

土壤形成



- ① 残积土
破碎的原有岩石
- ② 冰积土
冰层携带或形成的物质
- ③ 冰川沉淀物
冰层融化水带来的物质
- ④ 河流沉淀物
- ⑤ 湖泊沉淀物
- ⑥ 冲积土
平原及河口处由流水沉积的细粒土壤
- ⑦ 波浪冲刷沉淀物
- ⑧ 风吹沉淀物
- ⑨ 有机土
分解的植物
- ⑩ 人造土
由爆破和破碎形成

[土壤类型]

尽管土壤在物理和化学构成上区别很大,就工程用途可分为六个基本类型:巨砾、卵砾、砂砾、沙土、淤泥和粘土。

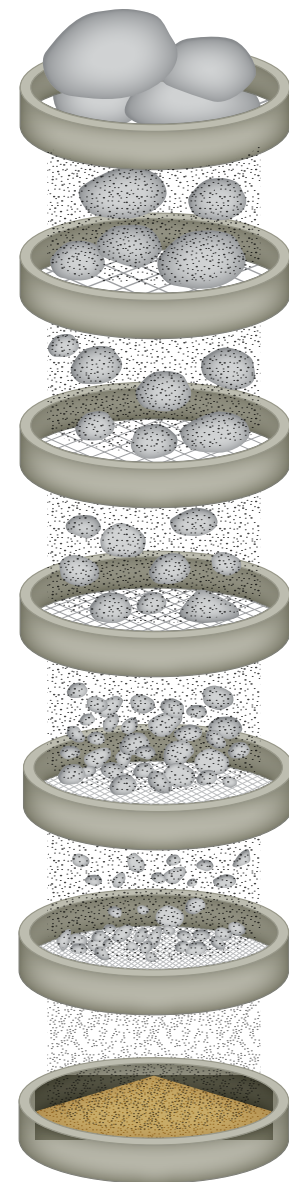
尺寸通常由国际标准化组织 (ISO) [www.iso.org] 或美国材料与试验协会 (ASTM) [www.astm.org]此二者之一的研发体系来确定。这两个体系并不完全相同,但非常相似。对于因过细而无法使用筛网分类的土壤,其百分比是通过比重计测试来确定。(见第 14 页)

这六种土壤类型通常是按照过筛试验确定的颗粒尺寸来划分。尽管工程用途的具体情况因国家而异,但筛网

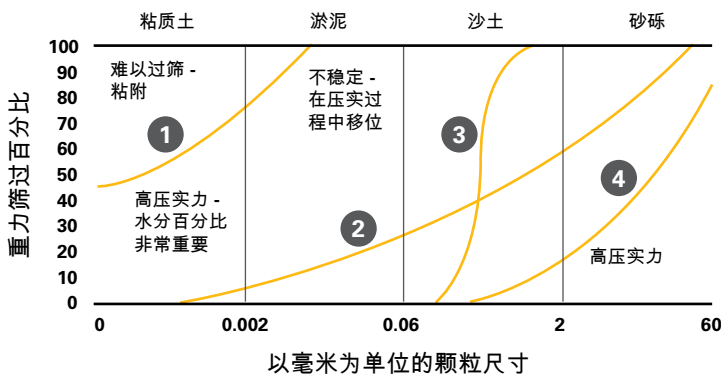
土壤类型



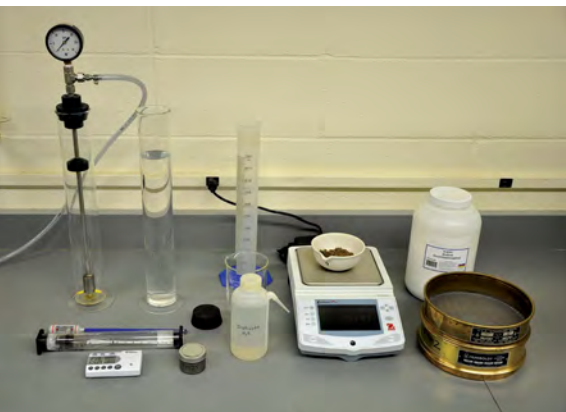
过筛试验



颗粒尺寸分布



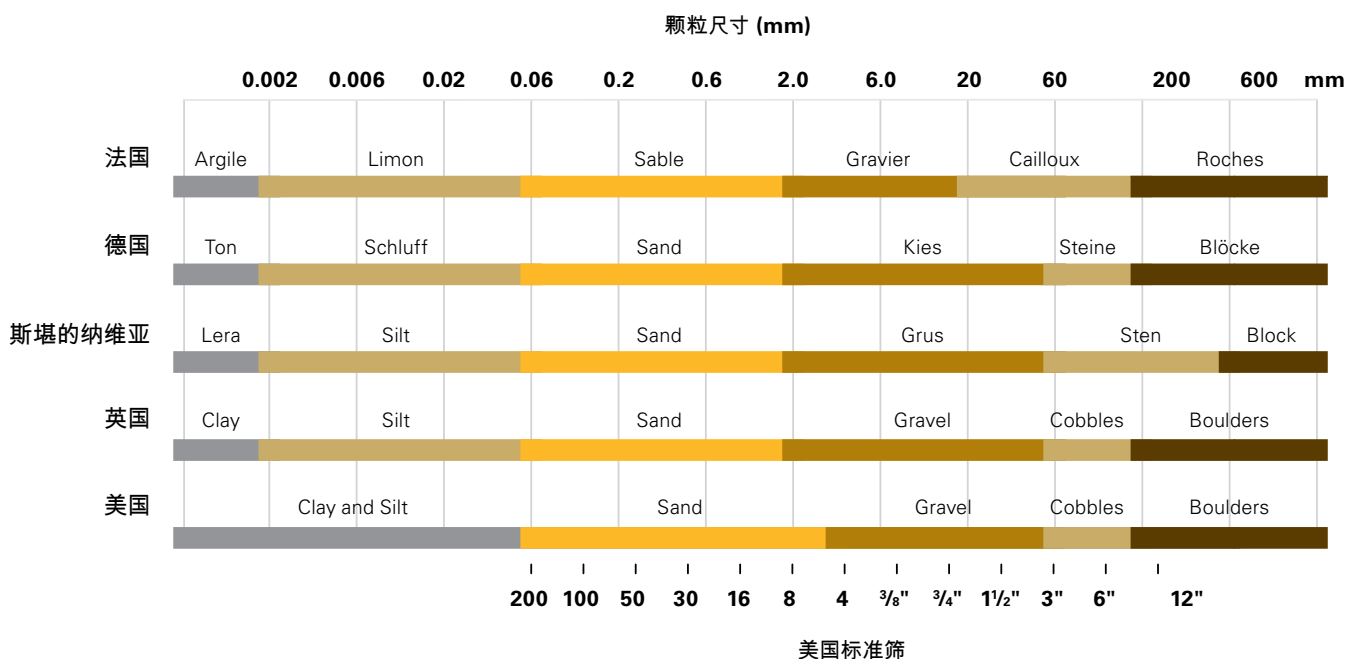
- ① 淤泥质粘土
- ② 砂砾 - 淤泥
- ③ 均匀沙土
- ④ 砂砾 - 沙土



比重计测试

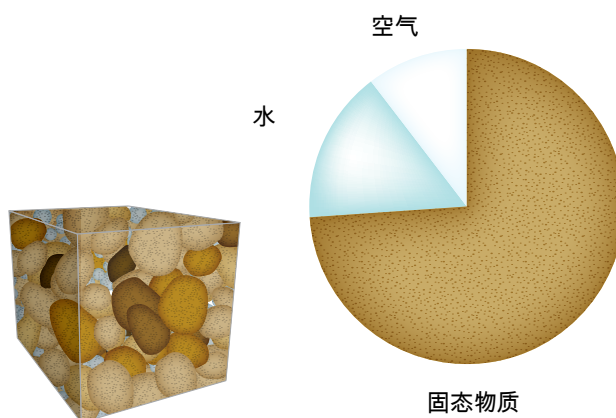
土壤样本分散(漂浮)在量筒内的水中。通过材料沉淀至底部所需的时间来确定不同的颗粒尺寸。悬浮物的比重计读数用来确定具体比重,藉此可计算特定尺寸的颗粒百分比。

土壤差异表



土壤物质基本是由不同比例的上述类型土壤组成的混合物。土壤物质并非只由固态材料组成,了解这一点很重要。土壤物质是固态物质(土壤类型的任何组合)、水和空气的混合物。

土壤混合物

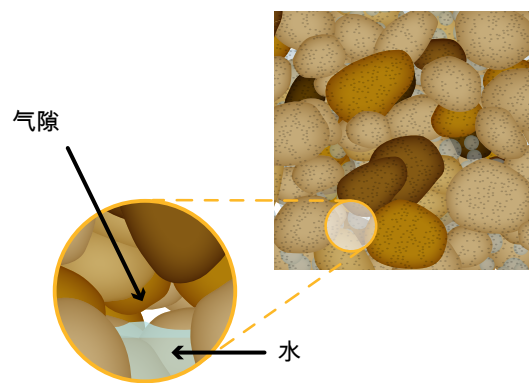


在地面自然沉积的自然或“原”土壤随着地理位置不同而有差异。例如，土壤物质绝不可能是百分百的粘质土或沙土——总是含有较小比例的其他类型土壤。用于施工的最好材料通常是依据所需的施工特性将所选的土壤类型按照特定的比例来混合。

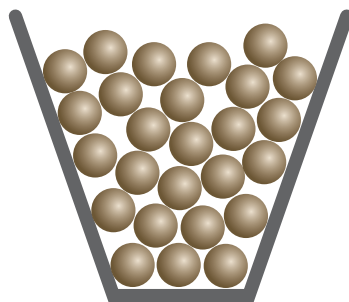
岩土工程师可通过指定各类土壤的比例来设计具有这些特性的土壤混合料。按比例添加原土壤中缺少的土壤类型，并将其与原土壤混合以形成施工所需的土壤。这些需要添加的物质通常是在对附近土壤物质进行成本分析后确定。

近距离仔细观察一份土壤样品时，单个颗粒的尺寸和形状都不同。颗粒之间的空间称为“空隙”。空隙可被空气或水来充满。如果土壤物质因空隙多而吸收过多的空气和水，土壤将不稳定。压实过程能够重新排列土壤颗粒，以最小化空隙的尺寸和体积，使材料更加密实、稳定。

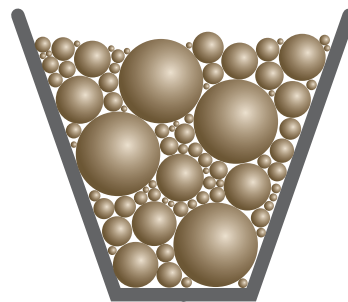
气隙/水隙



级配



级配均匀或不良



级配良好

土壤物质中单个颗粒即使差别很小，其尺寸也不相同。颗粒尺寸范围称为“级配”，有时也称为“颗粒尺寸分布”或“粒度尺寸分布”。理想状态下，所有颗粒尺寸为相对等量，不存在数量上占绝对优势的尺寸。具有此种理想尺寸范围颗粒的材料称为“良好级配”材料。

具有几乎相同尺寸颗粒的材料，例如冲积沙土，称为“均匀级配”或“不良级配”材料。如果材料中缺少一种或多种尺寸的颗粒，则称为“间断级配”材料。由于颗粒尺寸不同，较小颗粒可以很好地填入较大颗粒之间的空隙中，因此良好级配的土壤比不良级配的土壤更易压实。

[土壤物质的四种类型]

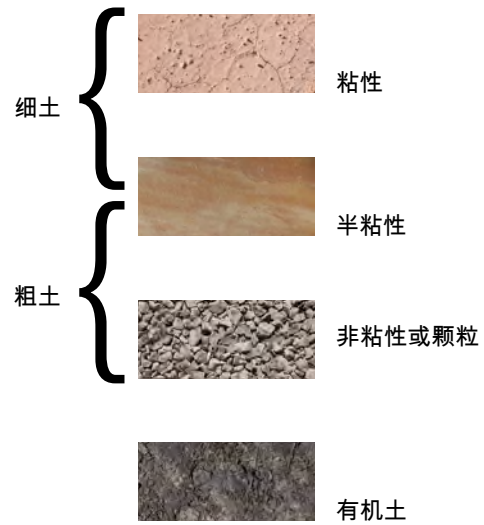
尽管有时了解土壤物质的确切成分很有用,但了解施加各种力量时土壤物质的反应情况却更加实用。为此,土壤专家将土壤物质分为四种基本类型:

1. 粘性
2. 半粘性
3. 非粘性
4. 有机土

加力时各类型的反应不同。各类型受力时的反应情况说明了其在施工中针对各种工程用途的适用性,以及处理各类土壤的方法。如前所述,有机土壤物质不适用于施工用途。

当土壤物质不适用于工程用途时,或将其更换,或使用各种方法改善土壤特性,这个过程称为“稳定”。这些方法包括化学稳定,例如混入硅酸盐水泥、石灰、飞灰或氯化钙,还有机械稳定,这包括添加所选骨料或利用土工合成材料来加固土壤。

材料类型



| 土壤类型 | 外观/触感 | 水分运动 | 受潮 | 干燥 |
|--------------|--------------------|----------------------------|-------------|--------------------------|
| 颗粒土壤、细沙和淤泥 | 可看到粗颗粒。用手指揉搓有沙砾感。 | 在手掌中晃动水和土壤,两者混合。停止晃动,两者分离。 | 塑性很低或无塑性。 | 干燥时粘合力很低或无粘合力。土壤样本容易散落。 |
| 粘性土壤、混合土和粘质土 | 肉眼看不到颗粒。手指揉搓时触感光滑。 | 在手掌中晃动水和土壤,两者不混合。 | 可塑且粘稠。可被卷起。 | 干燥时具有较高的强度。不易散落。在水中浸透缓慢。 |

[含水量的重要性]

水分对于土壤压实过程的重要性再怎么强调都不为过。各类型土壤都具有自身决定土壤对于水分反应的物理特性。各类土壤物质都有在给定压实能量下最大化材料工程特性的含水量。一般而言,颗粒尺寸越小,水分对于压实的影响越大。

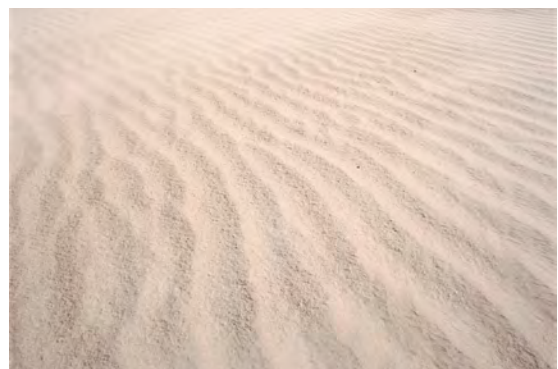
如果土壤含有的水分过少,由于颗粒缺乏使之重新排列以达到更密实状态所需的润滑性,材料将难以处理。并且,颗粒因粘性不足而无法保持在固定位置。

加水可增强粘性和润滑性。水量过多会导致土壤被浸透。土壤被浸透时,空隙内充满水,土壤结构的承载能力被削弱。颗粒也会被过度润滑,容易出现移位。



水如何影响土壤工程特性的简单例子就是试想一下在沙滩上建造沙堡的情形。沙土中的水使其具有筑成厚墙和高塔的足够粘性。现在想象一下在沙漠中建造相同的沙堡。干旱的沙漠土壤缺乏粘性,因此难以处理,最多只能建成低矮的沙土堆。

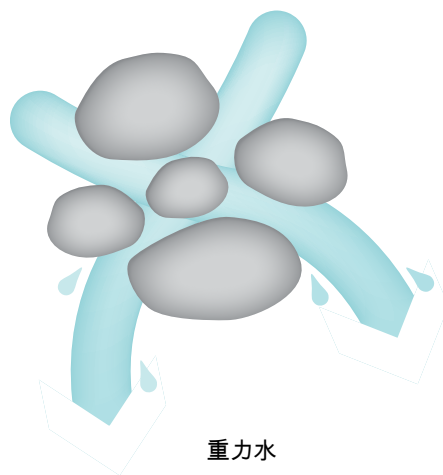
水分还具有其他影响。由于具有抗挤压性,可使土壤物质移位,造成不稳定性。冻水膨胀,会造成周围土壤的移位。冻水融化后,所占空间较小,形成的多余空间会使物质沉降。



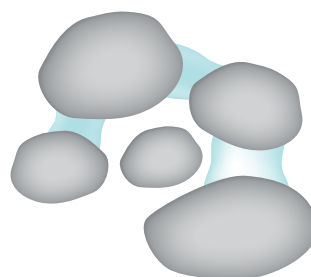
水以其自然状态存在于所有土壤中。以下面三种形式之一出现。

1. 重力水, 因重力自由下降。可从土壤中自然排出。
2. 毛细水, 通过小孔或空隙保留在土壤中。被认为是自由水, 只能通过降低地下水位或蒸发将其去除。
3. 吸附水, 去除重力水和毛细水后土壤中存在的水。单个土壤颗粒以对土壤颗粒具有物理和化学亲和力的薄膜形式来保留这种水分。也称为“风干”水。需要在烤箱中烘烤土壤才能将这种水去除后, 才能确定土壤的真正干重。

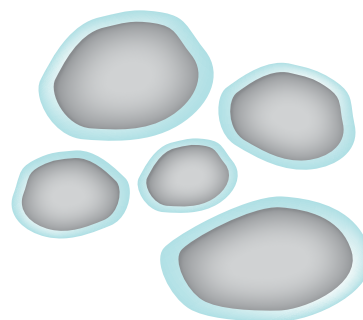
水分过多会使土壤过度润滑, 并造成颗粒的不稳定性, 而水分过少会降低粘性, 颗粒不易重新定位以达到更密实的状态。各土壤类型都有在给定压实能量的情况下实现密度最大化的理想含水量。为此, 发明了普氏试验, 其专用于确定针对选定压实力的最佳含水量。



重力水



毛细水



吸附水



[普氏试验]

对基层和底基层土壤压实后所带来的好处早已被人们所了解。但是直到 1933 年, 洛杉矶水利局的 Ralph R. Proctor 才研发出用于确定最佳含水量和相应最大干密度的标准方法。普氏试验使用手动操作撞锤对密闭筒内土壤的三个分层进行压实。

此标准程序可确定利用给定压实力使材料获得最大干密度的材料最佳含水量。此结果可用于制定工地的压实规范。由于工地条件与实验室中的理想条件不完全相同, 目标压实密度按在实验室中确定的干密度的相应百分比实施。范围为 90% 到大于 100%。

如果需要更大承载强度来支撑极重负荷或限制沉陷, 则需要采用改良压实试验。改良压实试验所施加的能量约为标准压实试验的四倍, 通常会得出较低的“最佳”含水量。



普氏实验室试验器具

超过 100% 的干密度

目标密度怎么会超过 100%? 普氏试验确定的最大干密度不是特定土壤可达到的最大现场密度。100% 的普氏干密度代表在实验室特定样本通过特定压实力和理想含水量时所达到的最大密度。标准普氏试验和改良普氏试验对相同样本使用不同的重量, 所达到的干密度值也不相同。在施工现场, 使用大型土壤压路机进行“砸实”操作, 压路机施加力的大小与普氏试验中铁锤施加力的大小不同。施工现场的密度达到普氏最大干密度的 100% 至 115% 是很正常。岩土工程师可根据承载要求和土壤特性来确定, 确保压实密度超过普氏试验的 100%。

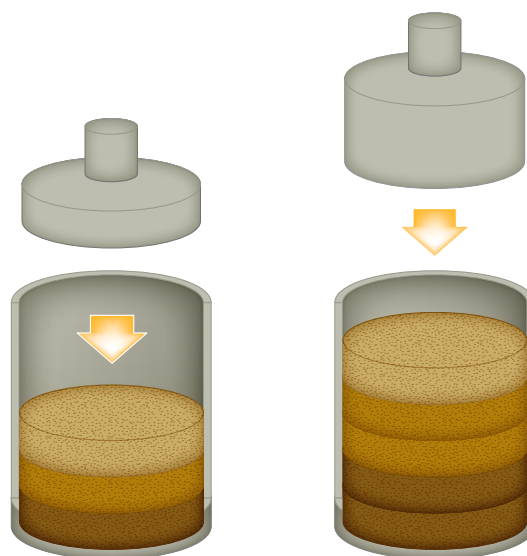
对于给定土壤样本，进行五次标准或改良普氏试验。每次进行试验时都使用相同的程序，而每次得出的含水量不同。

土壤在潮湿条件下进行的系列实验，其结果稍低于可能的最佳含水量。将第一个样本压入筒形容器中后，测量湿重并将部分样本放入干燥箱中。样本完全干燥时，再次称重。计算湿重和干重之差得出以干重百分比表示的含水量。

压实含水量更大的第二份样本，并重复称重和干燥过程。处理含水量更大的其他样本，直至湿单位重量降低或因土壤过湿而无法操作。

将各样本的干密度和含水量值绘制成图表，形成一个平滑的曲线。曲线的最高点代表该土壤样本的最大干密度和最佳含水量。

普氏试验



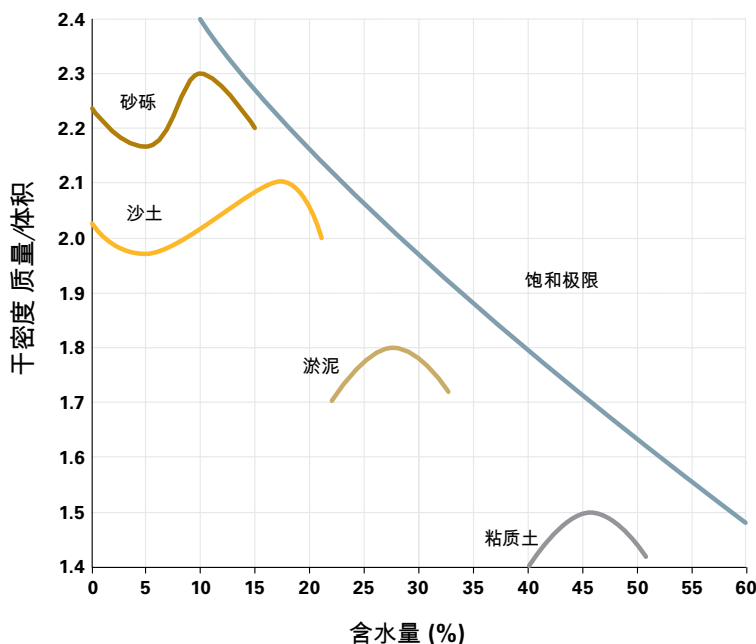
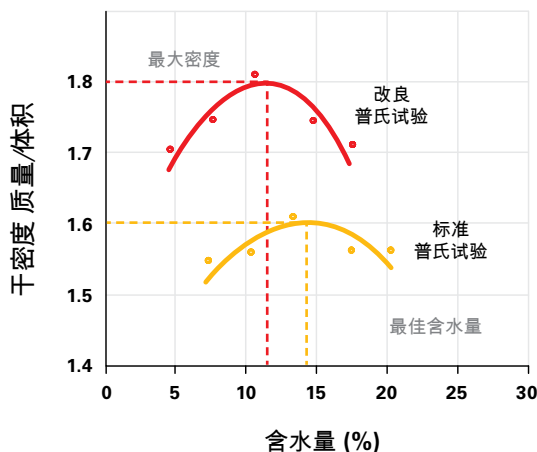
标准

改良

使用 2.5 kg (5.5 lb) 的铁锤以 305 mm (12 in) 的距离对各层砸 25 次。

使用 4.5 kg (10 lb) 的铁锤以 457 mm (18 in) 的距离对各层砸 25 次。

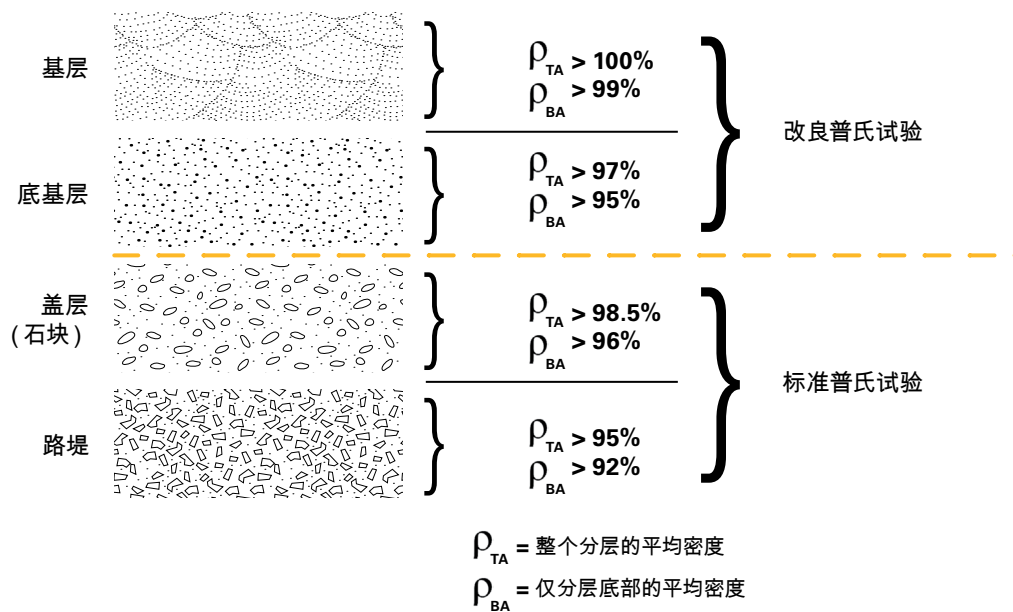
普氏曲线



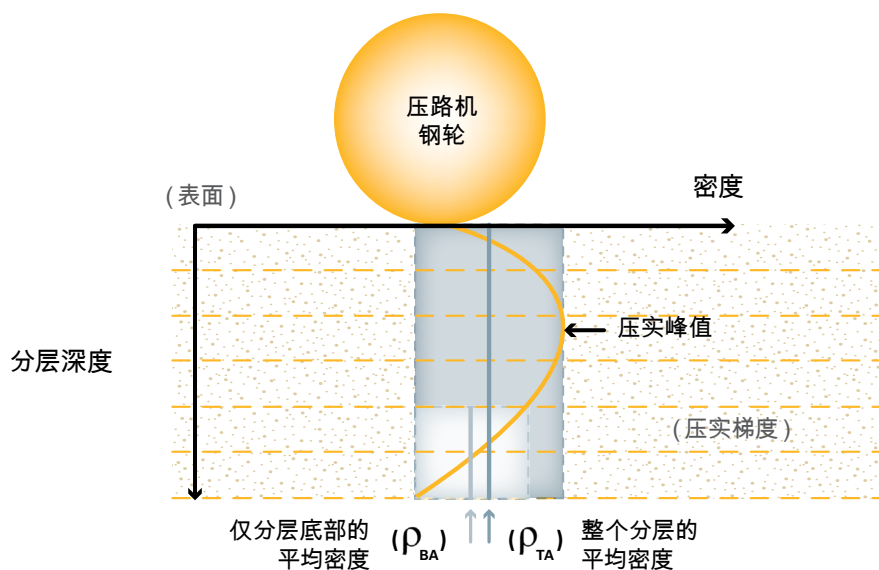
实验室试验可确定特定土壤物质在达到最大干密度时的含水量。施工现场要达到的目标密度实际为实验室最大干密度的特定百分比。一般而言，路堤的所需现场密度为标准普氏试验的 95%，道路结构一般高达改良普氏试验的 95%，道路结构一般高达改良普氏试验的 100%。同样，含水量必须在实验室确定的最佳含水量之内。

密度目标

该示例表明越接近表层的材料，其密度越高。



此压实梯度图将整个分层的平均密度 (ρ_{BA}) 与仅分层底部的平均密度 (ρ_{TA}) 进行对比



[土壤特性]

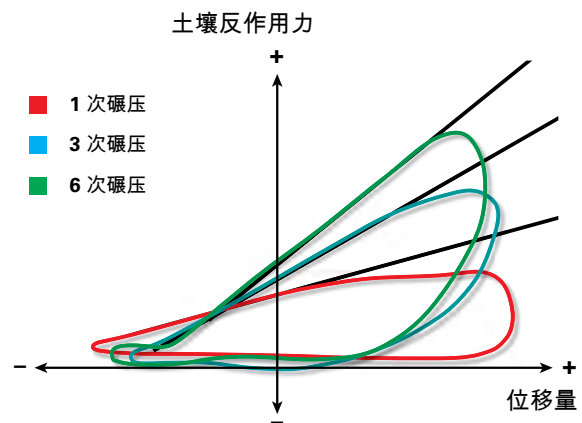
工程师通常使用多个术语来定义各种土壤的特性和属性。理解这些术语是了解土层压实原理和技术的基础。

承载强度是道路结构的关键属性。简而言之，它是土层结构用以支撑负荷的能力。通常是通过使用已装载自卸车进行碾压试验并观察车辙，或通过平板负荷试验来评估承载强度。在道路施工中，模数、硬度和密度等其他特性通常是作业目标的承载强度的参量。



硬度是具有特定形状的材料在负载下的抗挠曲能力，计算公式为应力比除以位移量。硬度与弹性模数不同，不是土壤物质本身的特性。硬度是一定数量和形状的土壤物质成分具有的特性 — 是具有该形状的材料在负载下的挠曲量。因此，硬度被当作评估土壤承载强度的有效方法。

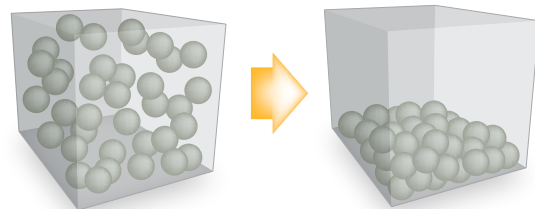
硬度



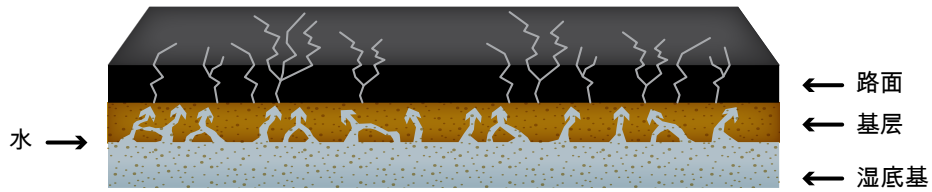
曲线的斜率越大，土壤越硬。

密度的计算公式为物质质量除以物质体积。最大密度是特定物质的质量所占的最小体积。这可以是无空隙的状态，全部为固体。通过压实土壤物质使其体积缩小，土壤物质会更加密实。密度历来是工程师评估承载强度的标准属性；但是，由于高密度与挠曲性无关，并且会导致特定材料破碎或分解，密度作为承载强度主要评估因素的重要性因此下降。尽管如此，它仍然是用于评估道路支撑能力时必不可少的可靠属性。

密度

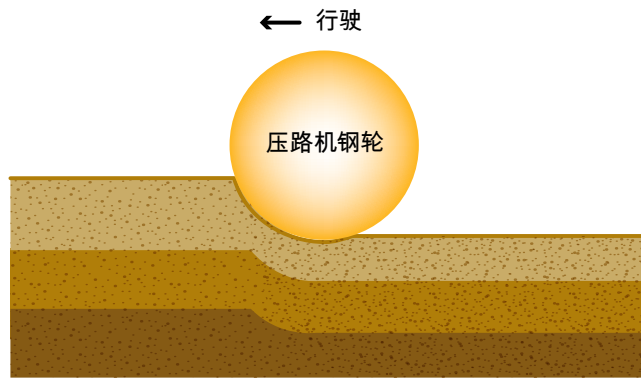


毛细作用



毛细作用是土壤迫使水分上升或横向流动的能力。道路底基层和路面之间的基层材料所需的特性为发挥毛细屏障的作用，防止底基层中的水分出现向上的毛细运动。颗粒基层也可以将水排出底基层。毛细水被保留在土壤中的小孔或空隙中。其被认为是自由水，但只能通过降低地下水位、持续加以重型荷载或蒸发将其去除。基层中如果没有毛细屏障，滞留水分将软化底基层并向底基层纵深发展，导致表面支撑力不足和道路过早损坏。

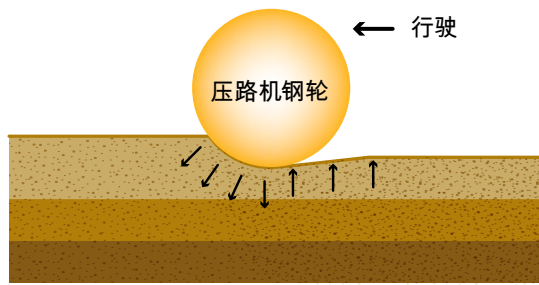
压缩性



压缩性是对土壤施加压力时，土壤体积的缩小率。具有高压缩性的土壤含有容易重新定位以减少空隙或水除空间的颗粒。在潮湿条件下，粘质土壤通常比颗粒土壤具有更高的压缩性。但其渗透性较低，这使得粘质土的排水和压缩过程很缓慢。迅速施加负荷时，例如在移动的车轮负荷下，水的压力在细粒土壤中聚集，导致压缩性提高。

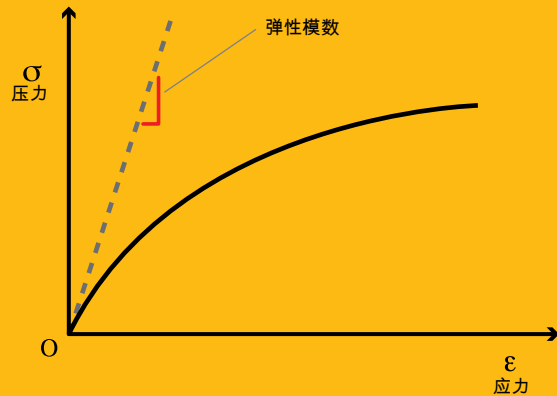
弹性是压缩负荷移除后，土壤变形和恢复原始或近似原始形状的趋势。弹性是土壤所需的一种特性，例如可用于支撑波动负荷而不出现变形的永久积累。但是，如果弹性模数过低，则具有高弹性基层或底基层的道路性能较差，进而导致在摊铺层出现高应力。化学和机械稳定通常用于控制土壤和基层的弹性。有机土壤具有非常高的弹性，但弹性模数低。

弹性

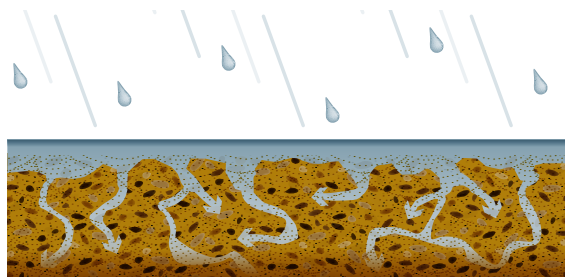


弹性模数：

其是所施压力与土壤物质应力的比值。其被认为是被测的特定土壤样本具有的特性，随土壤物质成分变化而异。该模数通常用于说明土壤物质的负载强度。路面层厚度通常是以底层的弹性模数评估为基础。

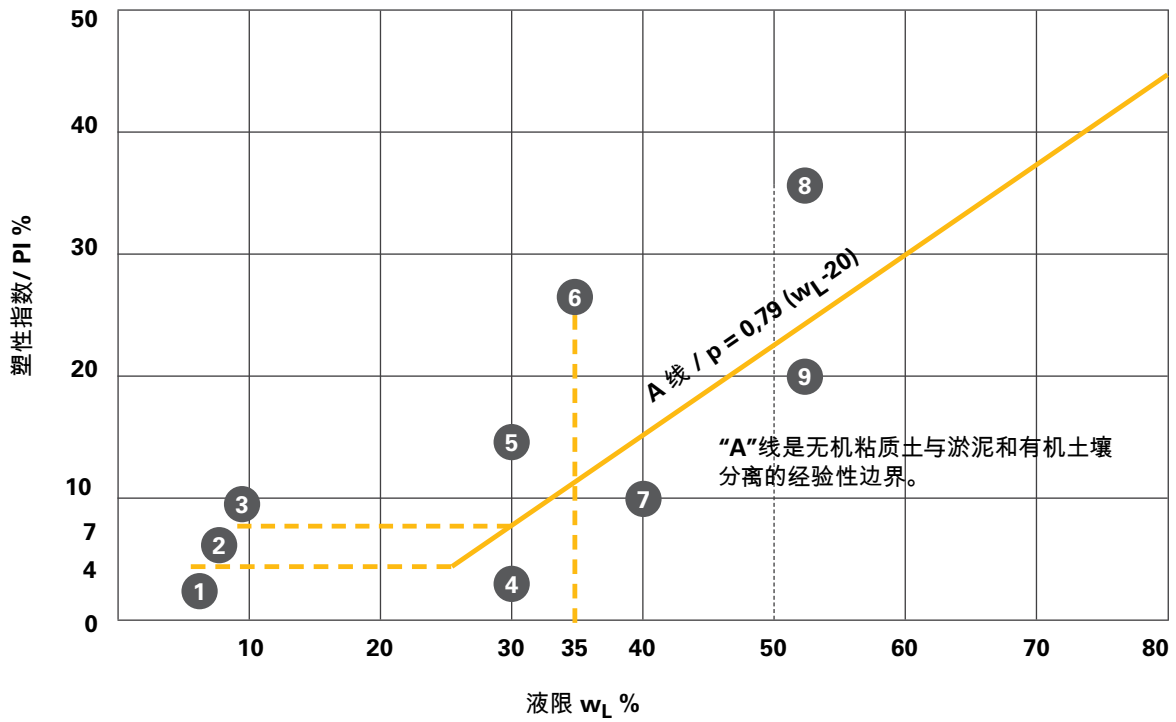


渗透性



渗透性是水流过土壤的难易程度。这与毛细作用不同，毛细作用是土壤吸收水分的能力。土壤纹理、级配和压实程度影响土壤的渗透性。渗透性是最可变的土壤参数，值的变化可超出 10 个数量级。通常，由于粗粒土壤的颗粒之间具有较大的空隙，因此比细粒土壤具有更大渗透性。

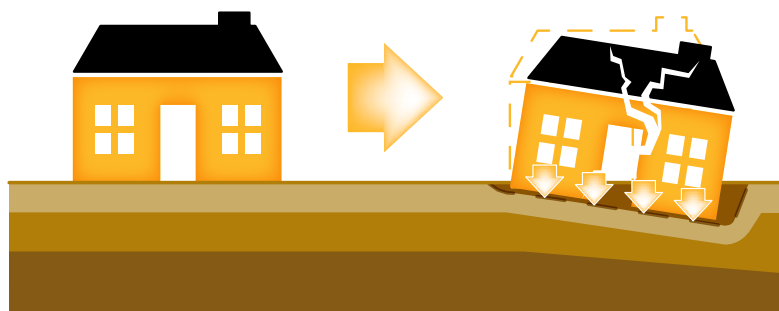
塑性



- ① 沙土淤泥混合料
- ② 中间范围
- ③ 沙土粘质土混合料
- ④ 轻微塑性淤泥
- ⑤ 轻微塑性粘质土
- ⑥ 中等塑性粘质土
- ⑦ 含有有机混合物的淤泥和有机生成的淤泥，以及中等塑性淤泥
- ⑧ 特有塑性粘质土
- ⑨ 含有有机混合物的粘质土和特有压缩性淤泥

塑性指土壤粘结和变形的程度。塑性测量值以塑性指数 (PI) 表示。许多粘性土壤具有较高 PI 值，非常容易压缩且具有高粘性。零 PI 土壤无粘结性或无塑性。土壤的含水量也会影响 PI。

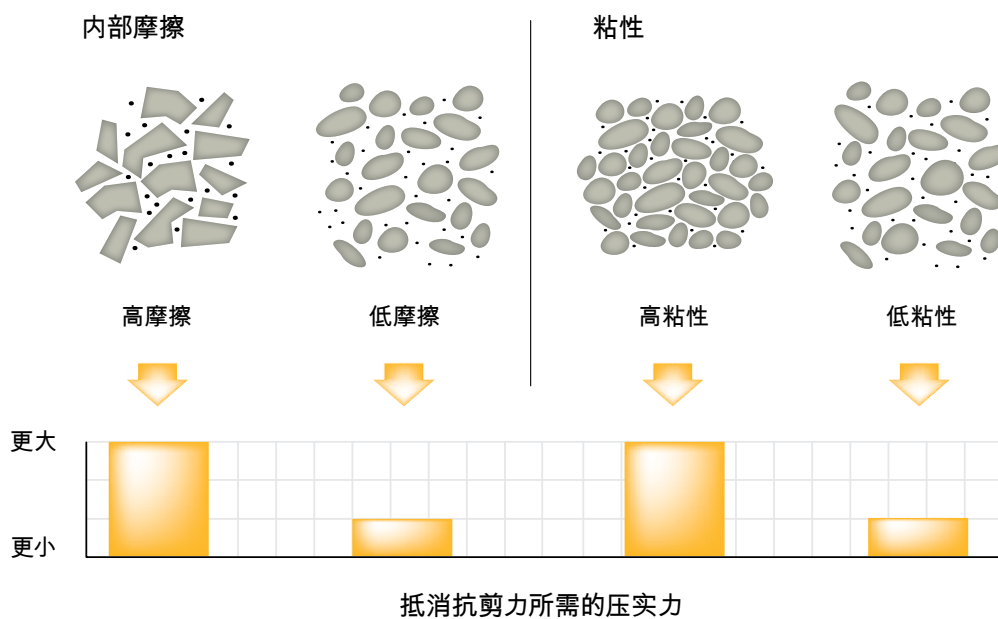
沉降



沉降

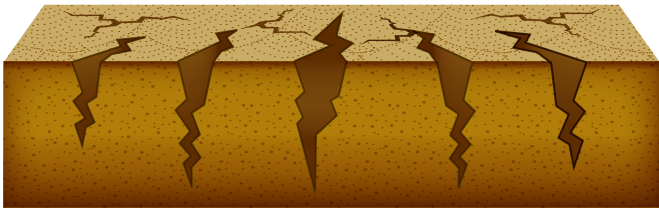
沉降是表面高度因填充材料的加固而降低的过程。沉降通常是压实不足造成的。压实不良的土壤颗粒将随时间重新定位并减少空气或水分的空间。沉降与空隙量的减少有直接关系。

抗剪力取决于 ...



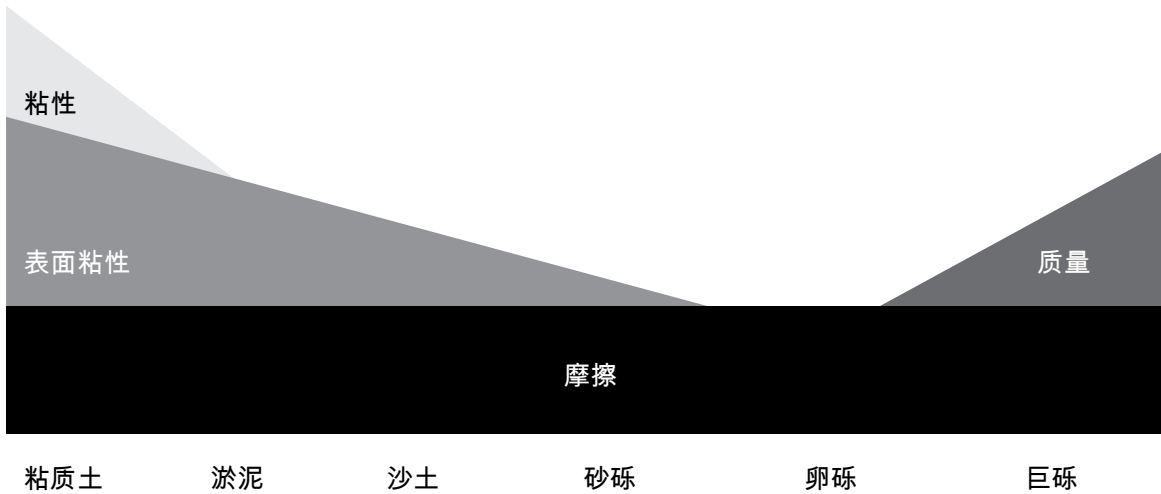
抗剪力是施加振动或压实力等压力时，抵抗土壤颗粒相互滑动的阻力。土壤的抗剪强度产生于内部摩擦（抵抗相互滑动的阻力）和粘性（相互吸引力）。不规则形状颗粒比平滑颗粒具有更高的抗剪力。抗剪力越大，要达到一定密度所需的压实力越大。

收缩



可见收缩或膨胀是细粒土壤的指标，如粘性土。收缩和膨胀循环是土壤内水分释放和聚积的过程。由于体积的不断变化会使需要稳固支撑的建筑或路面出现结构性问题，此类型土壤不适合用作路基。

压实性



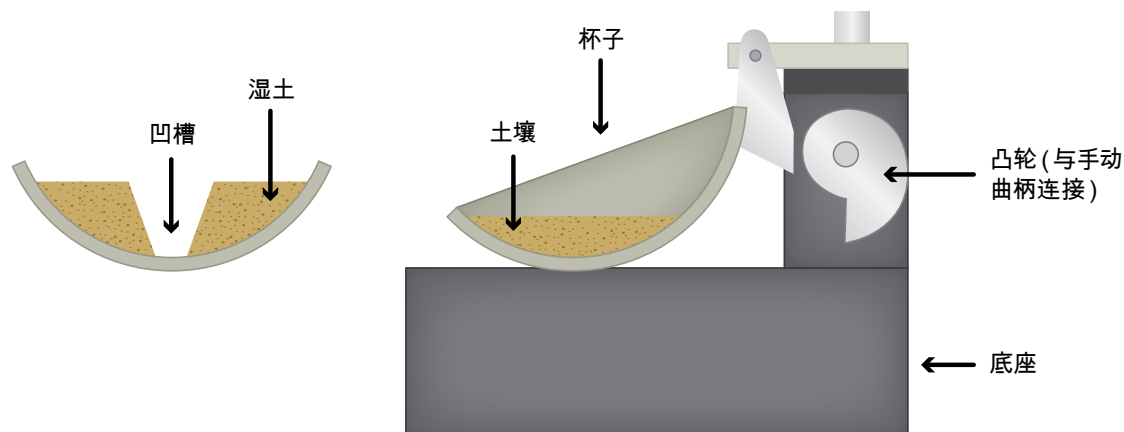
压实性：在使土壤由松散状态变为密实状态的过程中，压实的难易程度或比率通常被称为压实性。压实性量化为，最终密度与初始密度之差除以初始密度得出的比率。压实率越高，在施加压实力的情况下越容易或越快发生密度变化。影响压实性的因素包括土壤级配（良好级配土壤通常比间断级配土壤具有更高的压实性）、含水量、抗剪强度（抗变形性）、压实能量和方法。了解有助于提高压实性的因素可确保选择正确的设备和高效的压实操作。

[土壤极限]

通过测量土壤极限可以更好地了解含水量对粘性(粘质)土壤影响的程度。

瑞典化学家 Albert Atterberg 首次制定了特定土壤极限的统一标准:液限、塑限、塑性指数和缩限。有时也称为 Atterberg 极限,是区分高塑性、轻微塑性和非塑性材料的基础。

液限 (LL) 试验



简单的液限试验装置

液限 (LL)

使土壤由塑态变为液态的含水量称为液限。这表面土壤内有足够的水分可抵消内部摩擦和粘性。

设计的简单试验可确定土壤的液限。取潮湿土壤样本并将其放在小碗中,把样本弄平。在样本中挖出一个凹槽,击打碗的底部 10-30 次,观察凹槽。如果凹槽面以同等距离进行分离,则取出样本,添加更多的水并重复该过程。凹槽面沿 15 mm (1/2") 的长度移动时,样本变为液态并达到其液限。

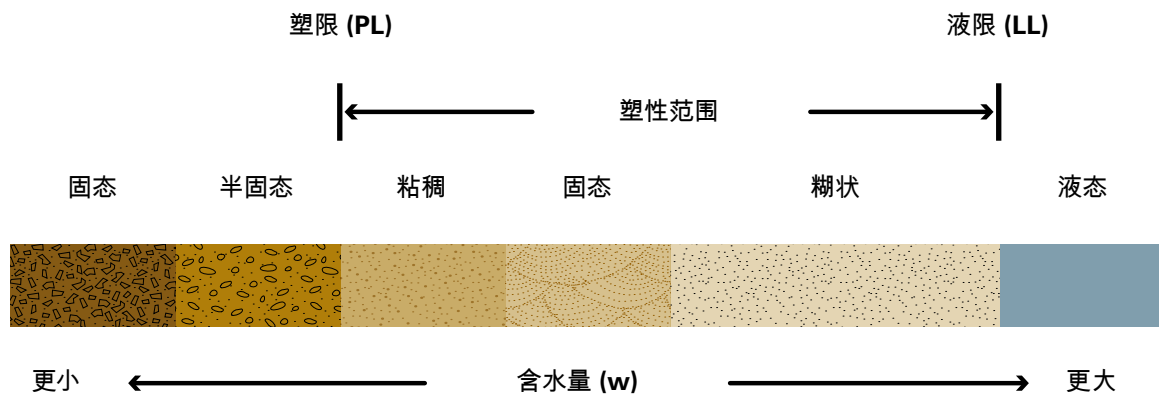
高 LL 值与土壤的高压缩性相关。通常,粘性土具有高 LL 值;沙土具有低 LL 值。

塑限 (PL)

土壤由半固态变为塑态时将出现此状态。土壤含有的水分刚好可以使少量土壤被卷成直径约为 3 mm (1/8") 的线条而不断裂时达到此状态。

由于土壤 PL 值表示颗粒既可相互滑动又具有较大粘性时的含水量,因此非常重要。其为对富含粘质土的土壤进行最佳压实的临界点。含水量增加至塑限以上时,土壤强度将迅速降低。

塑性指数 (PI)



塑性指数 (PI)

其为土壤塑限和液限之间的数值差。具有较高 PI 值的土壤非常容易压缩且具有高粘性。含水量达到液限时，土壤具有较小粘性或无粘性，但是含水量达到塑限时，土壤具有较大粘性。因此，PI 提供了评估土壤压缩性和粘性的方法。

PI 还与渗透性相关。PI 越高，渗透性越低 — PI 越低，渗透性越高。在许多涉及使用富含粘质土的土壤施工中，其规范都要求材料具有特定级配、最大 LL 和最大 PI。

缩限 (SL)

土壤干燥至塑限以下时将收缩并易碎。含水量达到使样本体积停止变化时，可确定为缩限。缩限是压缩多种非塑性 (沙质) 土壤的最佳含水量。对于含有足够粘质土而使 PI 升高的土壤，实现最佳压实的含水量在 SL 和 PL 之间。



单元 2 土壤类型与分类

在可行的情况下,实验室土壤试验是对土壤进行分类的最佳方法。如果不可行,您可以进行一个或多个现场试验以帮助确定土壤类型,并确定压实方法。



[土壤分类系统]

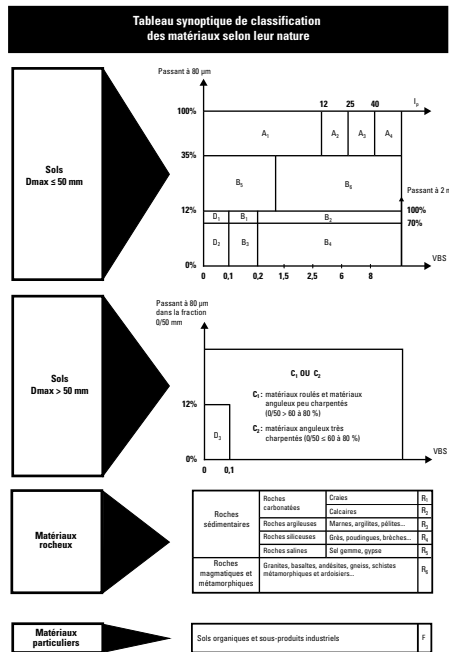
当今世界上有几种不同的现用土壤分类系统。这些系统都使用砂砾、沙土、淤泥和粘质土这些术语，但编号和标注系统稍有差别。土壤分类的目的是建立用以确定土壤工程特性的标准。

AASHTO 土壤分类系统 –被广泛使用的分类系统是美国公路和运输官员协会 (AASHTO) 的土壤分类系统，该系统以高速公路施工现场的土壤性能为基础而创建。该系统将材料分为七个主要组群和几个子组。这些组群被分为两个主要类别：颗粒材料和粉质粘土材料。

| AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups) | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|--------------|---------------------------------|-------|-------|--|--------|--------------|--------|--------|
| General Classification | Granular Materials (35% or less passing #200) | | | | | | Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200) | | | | |
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | |
| Group Classification | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | A-7-5 | A-7-6 |
| Sieve Analysis Percent Passing: | | | | | | | | | | | |
| # 10 | 0-50 | 0-50 | 51-100 | | | | | | | | |
| # 40 | 0-30 | 0-25 | 0-10 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 38-100 | 38-100 | 38-100 | 38-100 |
| # 200 | 0-15 | 0-25 | 0-10 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 38-100 | 38-100 | 38-100 | 38-100 |
| Characteristics of Fraction Passing #40: | | | | | | | | | | | |
| Liquid Limit | | | N.P. | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ |
| Plasticity Index | 0-6 | | | 0-10 | 11+ | 0-10 | 11+ | 0-10 | 11+ | 0-10 | 11+ |
| Group Index | 0 | | 0 | 0 | | 0-4 | | 0-8 | 0-12 | 0-16 | 0-20 |
| Usual Types of Significant Constituent Materials | Stone Fragments Gravel and Sand | | Fine Sand | Silty or Clayey Gravel and Sand | | | Silty Soils | | Clayey Soils | | |
| General Rating as Subgrade | Excellent to Good | | | | | | Fair to Poor | | | | |

附录中有此图的全尺寸图。

法国土壤分类系统 –此系统以对包括颗粒尺寸分布、塑性 and 含沙当量在内的属性进行粒度分析为基础，将材料分为不同种类和子类。



德国土壤分类系统 –DIN18196 以按照 DIN4022 确定的颗粒尺寸、质量比、塑性以及有机成分与钙质成分含量为基础,将用于施工用途的所有材料分为几个组群。一般而言,由于粗颗粒有颗粒尺寸分布标准,细颗粒有塑性标准,粗颗粒和细颗粒的评估方法不同。

| Hauptgruppe | Korngrößenanteil < 0,06 mm | Korngrößenanteil > 2,0 mm | Gruppe (allgemein) | Gruppe (detailliert) | |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|---|--|----------------------------|
| | | | | Gruppe | Kennzeichen, Gruppenzusatz |
| Cobbliniger Boden | < 5 | < 40 | Kies | Enggestufter Kies | GE |
| | | | | Mittelgestufter Kies-Sand-Gemische | EW |
| | | | | Feinmittelgestufter Kies-Sand-Gemische | EL |
| Gesteiniger Boden | 5 bis 40 | < 40 | Sand | Enggestufter Sand | SE |
| | | | | Mittelgestufter Sand-Kies-Gemische | EW |
| | | | | Feinmittelgestufter Sand-Kies-Gemische | EL |
| | | | | 5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm | SU |
| | | | | 15 bis 40 Bew.-% < 0,06 mm | SU* |
| | | | | 5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm | ST |
| Fackeliger Boden | 5 bis 40 | < 40 | Sand-Schluff | 5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm | SU |
| | | | | 15 bis 40 Bew.-% < 0,06 mm | SU* |
| | | | | 5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm | ST |
| | | | | 15 bis 40 Bew.-% < 0,06 mm | ST* |
| | | | | Leichte plastische Ton W_{L50} | SL |
| | | | | Mittelschwere Ton W_{L50} | SLM |
| Fackeliger Boden | < 40 | Ton | Leichte plastische Ton W_{L50} | TL | |
| | | | Mittelschwere Ton W_{L50} | TM | |
| | | | Mittelschwere Ton W_{L50} | TL | |
| | | | Drainierbare Ton W_{L50} | DT | |
| Organischer Boden | < 40 | Nicht brennend und schwer | Erob bis gemäßigter Boden mit humanen Beimengungen | OH | |
| | | | Erob bis gemäßigter Boden mit kalkigen, kesseligen Beimengungen | OK | |
| Organischer Boden | - | Brennend und schwer | Nicht bis mäßig anreichte Torfe | HN | |
| | | | Schwamm Torfe | HT | |
| Aufüllung* | - | - | Mudden (Fackelkamm) | F | |
| | | | Auffüllung aus Fremdstoffen | A | |

* Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

统一土壤分类系统 – USCS 是在施工项目中被广泛应用的土壤分类方法。美国陆军工兵部队和美国垦务局制定了此系统。使用土质作为描述性术语。

| USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM | | | |
|---------------------------------|--------|-----------------------------------|---|
| SOIL FRACTION | SYMBOL | SIZE RANGE | |
| Boulders | None | Greater than 12" | |
| Cobbles | None | 75 mm (3") to 12" | |
| 1- Coarse Grained Soils: | | | |
| Gravel | G | 75 mm (3") to #4 Sieve (4.75 mm) | |
| Course Gravel | | 75 mm to 19 mm | |
| Fine Gravel | | #4 Sieve to 19 mm | |
| Sand | S | #4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm) | |
| Course Sand | | | |
| Medium Sand | | | |
| Fine Sand | | | |
| 2- Fine Grained Soils: | | | |
| Fines | | Less than #200 Sieve | |
| Silt | M | Use Atterberg Limits | |
| Clay | C | Use Atterberg Limits | |
| 3- Organic Soils | | | |
| | O | Use Atterberg Limits | |
| 4- Peat | | | |
| | Pt | Visual Identification | |
| Gradation Symbols | | | |
| Well-graded | W | Liquid Limit Symbols | |
| Poorly-graded | P | High LL | H |
| | | Low LL | L |

英国土壤分类系统 – 英国标准 (BS) 分类系统是一种用以确定土壤成分的规程。首先以颗粒尺寸为基础将土壤分为粗土或细土。以颗粒尺寸分布为基础对颗粒土壤进行分类。以细土的塑性为基础对其划分子组。

| SOIL GROUPS | SUB-GROUPS and in-laboratory classification | | | |
|--|---|------------------|--|--------------|
| | GROUP SYMBOL | SUB-GROUP SYMBOL | FINES % < 0.05 mm | LIQUID LIMIT |
| GRAVELS More than 70% of the material is finer than 4.75 mm | GRAVELS Slightly silty or clayey GRAVEL | GW | GW | 0 to 5 |
| | | GP | GP, GPy | |
| | | G-M | GWM, GPM | 5 to 15 |
| | | G-C | GWC, GPC | |
| | GRAVELS Slightly silty or clayey SAND | GM | GML, etc. | 15 to 35 |
| | | GC | GCL, GCU, GCV, GCS, GSC | |
| | | SW | SW | 0 to 5 |
| | | SP | SP, SPy | |
| | SANDS More than 70% of the material is finer than 0.075 mm | S-M | SWM, SPM | 15 to 35 |
| | | S-C | SWC, SPC | |
| | | SM | SML, etc. | 15 to 35 |
| | | SC | SCL, SCU, SCU, SCE | |
| FINE SILTS More than 70% of the material is finer than 0.075 mm | Gleanly SILT | ML | MCL, etc. | |
| | | FL | FL | < 35 |
| | Gleanly CLAY | CL | CL | 35 to 70 |
| | | CH | CH | 70 to 90 |
| | | VC | VC | 70 to 90 |
| | | CE | CE | > 90 |
| | Sandy SILT | MS | MCL, etc. | |
| | | FS | FL, etc. | |
| | Silty CLAY | CS | CL, etc. | |
| | | FC | FL, etc. | |
| CLAY (M SOIL) | CLAY | M | M, etc. | |
| | | C | CL | < 35 |
| | CLAY | CH | CH | 35 to 70 |
| | | CE | CE | 70 to 90 |
| ORGANIC SOILS | Description letter 'O' suffixed to any group or sub-group symbol | | Organic matter in significant amount e.g. MOC - organic silts of high LL | |
| | PT - consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous) | | | |

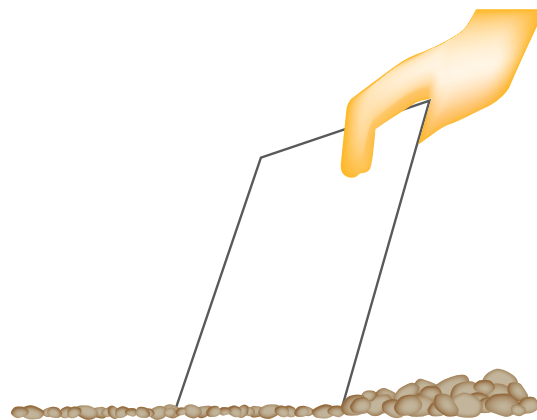
Classification v1.00 Sept 2010
 Primary Letter: G = Gravel, S = Sand, M = Silt, C = Clay, O = Organic Soil, Pt = Peat
 Secondary Letter: W = Well graded, P = Poorly graded, M = With non-plastic fines, C = With plastic fines, L = Of low plasticity (LL < 50), H = Of high plasticity (LL > 50)

[施工现场中的土壤分类]

分类系统需要进行过筛分析或塑性指数试验等实验室测量。但是,在没有整套实验设施的情况下,可使用一些简单的现场试验对不同土壤进行分类。这些试验可用于确定级配、塑性和分散性。

级配/颗粒分布 - 要测试干土级配,在平坦表面撒上土壤样本。使用硬纸或卡纸作为耙子,将较大土壤颗粒分到一侧。评估大于 5 mm (3/16") 颗粒的百分比和细土 (单个颗粒过小,肉眼无法看到) 的百分比。同时,评估较大颗粒是否具有统一尺寸 (不良级配),还是具有大、中、小不同尺寸 (良好级配)。

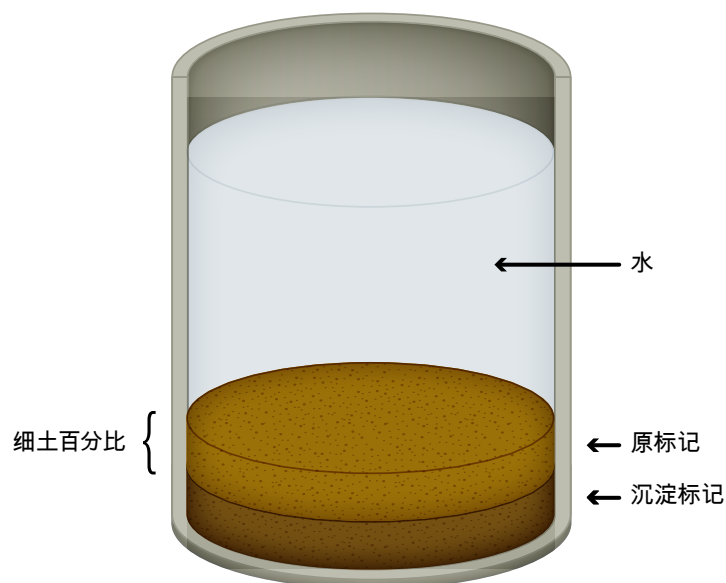
级配试验



如果土壤潮湿,则使用铅笔打碎土块,并使用用于干土的方法进行百分比评估。要得到细土的百分比,在透明玻璃杯中加入 3 mm (1/8") 的水。然后,加入足量土壤使玻璃杯达到 1/4 满。加水直至刚好没过土壤。

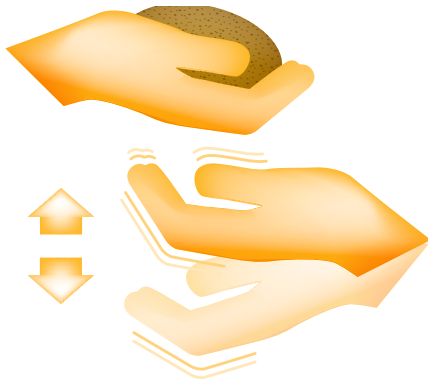
使用橡皮筋标记此水位。在杯子中加水直至杯子达到 3/4 满,然后用力搅拌混合物。使其沉淀约一分半钟,然后标记土壤沉淀后的高度。两个标记之差代表细土的百分比。

细土百分比



细粒土壤的塑性 – 您可以进行一次或多次现场试验以评估土壤的塑性。

振荡试验

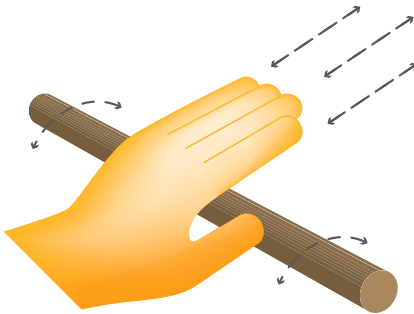


- 振荡试验 – 取一块细粒土壤，并将其揉和在一起，剔除尽可能多的大颗粒。逐渐加水并揉和，直至土壤开始变粘。将土球拿在一只手中，并用另一只手的手指敲击该手的手背。

如果土球表面发光、潮湿，则大多是细沙或淤泥。粘质土对于此试验的反应较小或没有反应，很容易散乱。

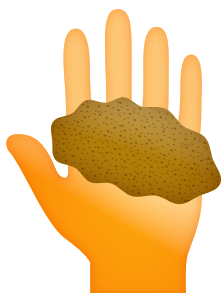
- 韧性试验 – 取大约半个土球，用拇指和食指揉和使其干燥。然后，试着将土壤样本卷成线状或“曲线”，如果根本无法形成曲线，则该土壤肯定是淤泥或细沙。高弹性土壤干燥所需时间较长。会变得坚硬、光滑，需要大量压力才能形成在直径3mm (1/8 in) 时刚好断裂的曲线。
- 干强度试验 – 取另外半个土球并将其揉和成球状。将其放在空气中干燥。土壤干燥时将其压碎并选出粗糙带尖的碎块。使用拇指和食指试着将此碎块压碎。只需用很小的力淤泥即可变成粉末。粘质土就像岩石，几乎无法用手指压碎。

韧性试验



- 洗手 – 处理淤泥和沙土后，手指沾上灰尘，揉搓手指几乎可以将灰尘清除。用水龙头中缓缓流出的水可将土壤冲掉。处理粘质土时，手指上会形成干燥时无法揉搓掉的硬皮。用水无法冲掉。必须在水中揉搓双手才能将其清除。
- 手上试验 – 抓一把土。挤捏，然后把手张开。如果土壤呈粉末状，无法保持用手挤捏时的形状，则土壤过于干燥。如果掉落时散开，则土壤过于干燥。如果土壤可以成形，掉落时只是碎成了几块，则含有适当压实所需的水量。如果土壤在手中具有塑性，手指上留下了水迹且掉落时是一整块，则含水超过压实所需的水量。

手上试验



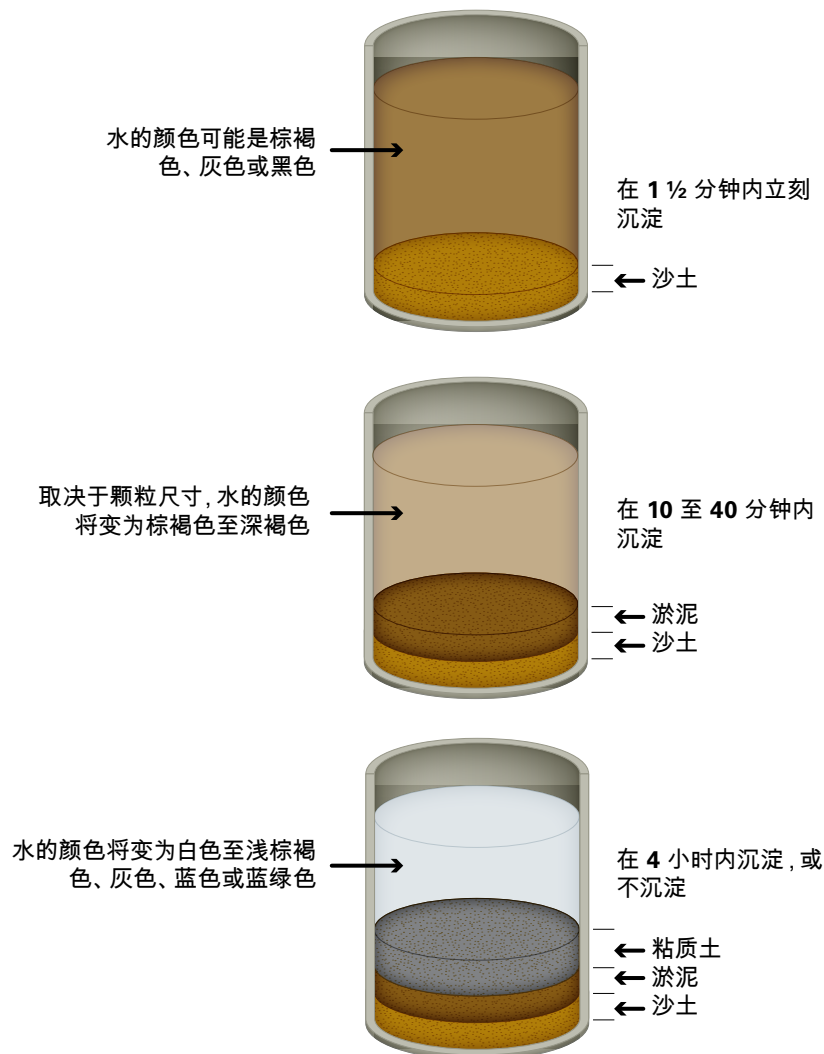
- 分散试验 –除了刚刚说明的现场试验外，分散试验可用于确定土壤颗粒尺寸的百分比，还可用于说明土壤压实的难易程度。此试验只需要一个透明玻璃杯、水和具有代表性的土壤样本。

在玻璃杯中加入 1/4 – 1/3 满的材料。然后，在容器中加水至距顶部 15 mm (1/2 in) 以内的位置。将混合物搅拌均匀，并观察材料的沉淀情况。

材料将沉淀出三个明显的分层。底部是沙土，然后是淤泥，最后是粘质土。除了显示出各种组群，结果还可说明土壤是否具有良好级配或不良级配。尽管淤泥和粘质土颗粒过小，肉眼无法看到，但可通过色差观察级配变化。同样，分层沉淀所需时间越长，颗粒越小。

通过分散试验我们可以了解几个方面的信息。它可显示出各类土壤的基本材料和级配，沉淀时间可说明颗粒的粒度。多数情况下，单一颗粒尺寸（不良级配）和较小颗粒尺寸说明该施工材料与具有各种颗粒尺寸的良好级配混合物相比，具有较低稳定性。由于颗粒在机器作用下会不断移动，因此难以将此种材料压实。

分散试验



[现场试验总结]

| 土壤类型 | 说明 |
|--------------|---------------------------------------|
| 粘质土 | 对振荡试验无反应；干燥缓慢的粗糙曲线；具有难以从手上清除的硬皮干燥残留物。 |
| 淤泥 | 对振荡试验反应快；松软或易碎的曲线；具有容易从手上清除或冲掉的粉末残留物。 |
| 淤泥和粘质土混合物 | 对手上试验出现中等程度或冲突的反应。 |
| 含有细粘质土的沙土或砂砾 | 如果揉和潮湿样本，粘质土足以将手弄脏，但不足以成形粘质土块。 |
| 含有淤泥细土的沙土或砂砾 | 含有灰尘或砂砾细土的任何混合物。 |
| 干净沙土和砂砾 | 在这些土壤中加入的水会立即下沉，不会产生任何泥浆。 |
| 炸采或破碎岩石 | 粗糙材料不含能够填充空隙的足够小的材料。 |





单元 3 压实的物理过程

了解压实不同类型土壤的物理过程、不同机器的作用及其压实功能，这是以最经济高效的方式达到指定土壤密度的关键。



[影响振动压实的因素]

土壤的振动压实是一个复杂的过程。许多不同因素影响整体压实力。必须综合考虑，而不能孤立地考虑影响压实的所有这些因素。压路机和所作用土壤的结合特性决定压实力的程度。并且，项目规范决定压实力是否充足。

影响振动压实的因素或特性可分为三类：

1. 材料和作业现场相关特性
2. 项目规范相关特性
3. 机器相关特性

材料和作业现场相关特性

- 土壤类型 – 给定土壤类型具有独特的压实特性；难以压实的土壤需要使用较重压路机。
- 级配 – 材料级配是颗粒尺寸的范围。理想状态下，所有颗粒尺寸为相对等量，不存在数量上占绝对优势的尺寸。
- 均匀性 – 土壤材料是多种土壤类型和颗粒尺寸的混合物。均匀性可被看作是所有组合材料在土壤中混合和分散的均匀程度。均匀土壤混合物是均质的，可进行一致的压实；缺乏均匀性的土壤将出现压实不一致的情况。

土壤力学中的均匀性系数 (C_u) 是用于描述土壤颗粒尺寸分布 (级配曲线) 的参数。它可提供土壤颗粒尺寸分布均匀程度的信息。在 DIN EN ISO 14688-2:2004 中, C_u 被定义为筛过率为 60% 时的直径 d_{60} 与碾压率为 10% 时的直径 d_{10} 的比率。该比率表示范围在碾压 (通过筛网) 率为 10% 和 60% 之间的颗粒尺寸曲线的斜率。

计算均匀性系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

根据 C_u 的值可以对土壤做出以下描述：

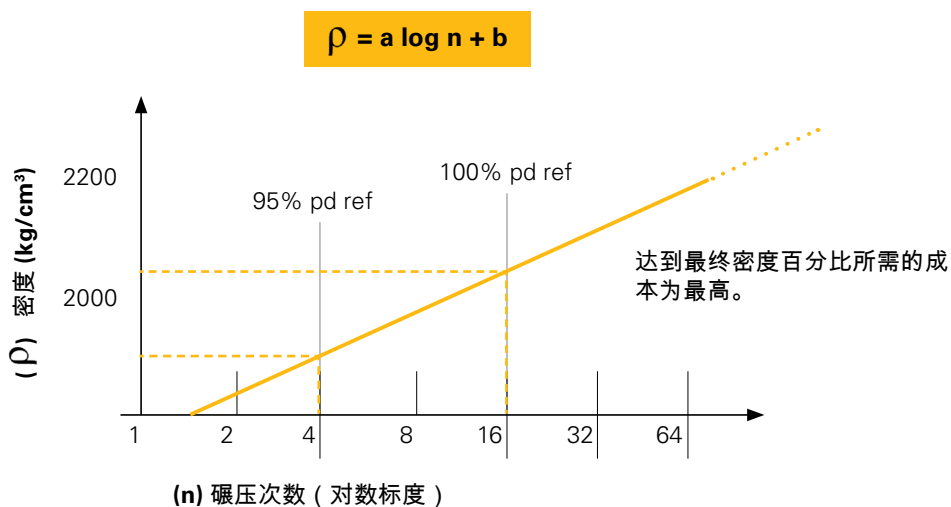
- $C_u < 5$ = 均匀土壤
- $C_u 5-15$ = 不均匀土壤
- $C_u > 15$ = 极不均匀土壤



- **纹理** –单个土壤类型具有影响材料压实特性的不同表面纹理。粗质土壤类型的颗粒之间会产生高摩擦力，需要压路机的更多能量将其打散，以使其以更密实的状态重新定位。平滑纹理颗粒更易相互滑动，需要较小力量即可压实。
- **颗粒形状** –与纹理相似，颗粒形状也会影响土壤压实。粗糙形状容易产生较大的摩擦结合力，需要较大力量进行压实。圆滑形状更易滑动，需要较小的压实力。
- **初始密度** –具有较高初始密度的材料与具有较低密度的材料相比，需要较低压力。由于较低密度的材料需要更多次碾压，这将影响生产率。
- **含水量** –压实土壤时，水分是需要考虑的一个最重要因素。过少水分无法使颗粒相互粘结。过多水分会使颗粒容易出现位移。各土壤类型都有进行最佳压实所需的理想含水量(通过普氏试验确定)。
- **骨料强度特性** –各土壤类型都具有以骨料构成方式为基础的不同压缩强度。
- **底土基层及其支撑能力** –底基支撑的结构只能达到与底基相同的牢固和坚韧程度。如果底土缺乏支撑道路的能力，底基层和基层很可能难以压实。可通过化学或机械稳定改善不适合的土壤。

密度成本

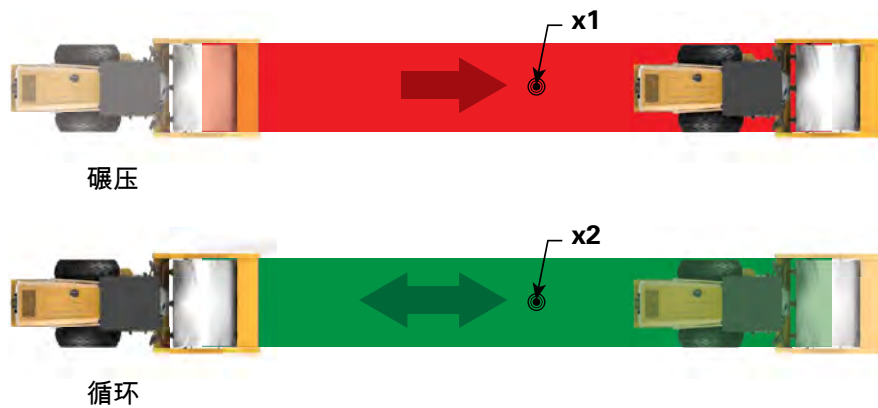
密度随碾压次数的增加而增大



项目规范相关特性

- **压实目标** –通常通过标准普氏试验或改良普氏试验确定，并被指定为试验得出的最大干重密度的特定百分比 — 在该示例中，为标准普氏试验结果的95%。一般而言，压实目标越高，所需碾压次数越多。最终压实百分点始终是最难达到的。
- **摊铺/铺层厚度** –使用给定尺寸的压路机时，铺层厚度将影响生产率。厚层比薄层需要的碾压次数更多。

计算碾压次数



- 碾压次数 - 指压路机碾压地面某一区域的次数。Caterpillar 将一次碾压定义为在某一区域向前进方向或倒退方向的单程行驶，将一次循环定义为在某一区域的两次连续碾压，通常是一次向前进方向，一次向倒退方向。

了解碾压次数非常重要，特别是在某一区域被认定不符合压实规范时。如果作业现场的压实覆盖范围（碾压次数）相同，一个区域不符合规范，而其他区域都符合规范，这可帮助您缩小原因范围。

在采用方法技术规范的情况下，将指定（使用合适尺寸压路机压实具有指定成分和厚度的摊铺层上）碾压次数。在这些情况下，工程师将根据以往经验确定足以达到压实目标所需的碾压次数。

机器相关特性

机器设计对压实动力学非常重要。影响因素包括：机架尺寸、整机重量、轴距、前钢轮至轮胎部分支撑的机器重量比，以及机器左侧至右侧的机器重量平衡性。这些因素还有钢轮直径、钢轮宽度、钢轮质量、减震器、偏心配重质量，以及偏心配重的重心和钢轮轴之间的距离。甚至是燃油和操作员的重量都会影响压路机的性能。制造商在设计每台机器时都要认真考虑所有这些因素。

振动压实还涉及到在非均质材料上快速（频率）上下移动（振幅）和向前移动（工作速度）的钢轮（静态重量）。当然，频率、振幅和工作速度都是操作员可以控制的变量。我们随后会在第 3 单元对其进行探讨。



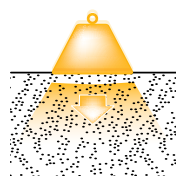
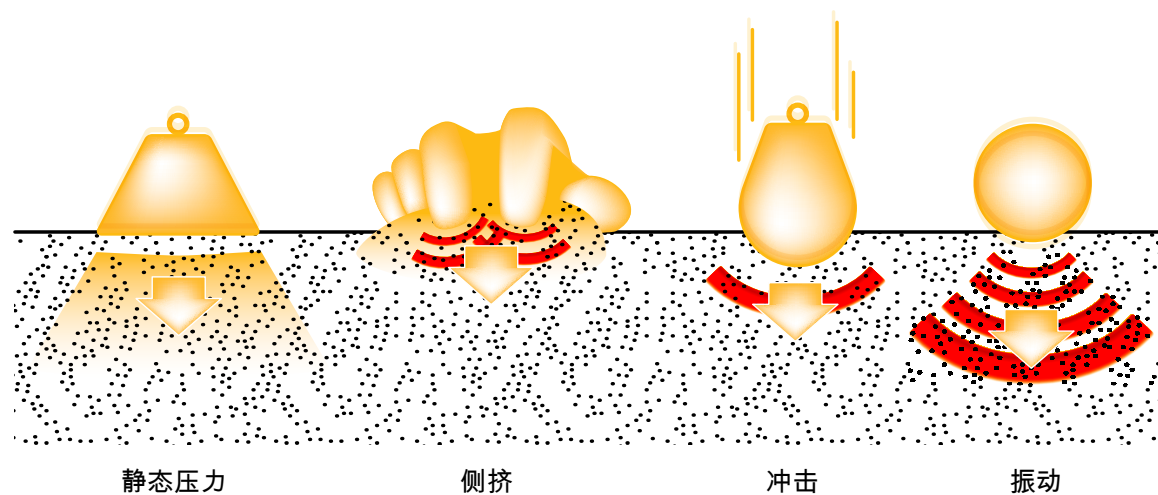
所有这些变量意味着,针对给定作业对压路机进行设置以获得理想压实效果并不总是那么容易。振动压实的目标是找到将力量最大化传输至压实材料的临界点。当所有因素(材料特性、压路机特性、振幅、频率和速度)的组合作用对满足项目规范所需的压实力带来最佳影响时,将达到此状态。

[影响振动压实的因素]

压实是将材料由一定体积压缩至较小体积的过程。这是通过在接触区域加力和移动来实现的,使材料内的颗粒打破其相互之间的自然结合并靠拢。加力和移动的组合作用将颗粒之间(空气、水或二者组合)的空隙排除。

压实中使用四种力量:

1. 静态压力
2. 侧挤
3. 冲击力
4. 振动。



静态压力 - 在静态压实中,来自压路机重量的压力会在土壤中产生剪应力,造成单个颗粒的相互滑动。当所施力量使单个颗粒打破其相互之间的自然结合,并在更加稳定的位置重新定位时,便实现了压实。这种压实力对浅表材料具有更大影响。对于较深土壤影响很小。

静线压力是行业用于比较静态、光轮压路机的压实势能的方法。其为钢轮宽度正下方产生压实剪应力的垂直力量。其计算是用钢轮重量(轴负荷)除以钢轮宽度。静线压力表示为千克每线性厘米(kg/cm)或磅每线性英寸(lb/in)。线性压力较高的压路机具有较大的压实势能和影响深度。

静线压力

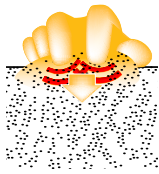


| 静线压力 | |
|-----------|-------------------------------------|
| 振动土壤压路机 | |
| 5 - 8 吨 | 16 - 22 kg/cm (90 - 120 lb/in) |
| 8 - 12 吨 | 20 - 30 kg/cm (100 - 200 lb/in) |
| 12 - 15 吨 | 30 - 45 kg/cm (180 - 250 lb/in) |
| >15 吨 | 45 kg/cm+ (250 lb/in+) |
| 轮胎压路机 | 1000 - 3200 kg/轮 (2200 - 7000 lb/轮) |

对于凸块式静碾压路机、夯脚式压路机和羊脚式压路机,所施尖端压力量随着与地面接触的尖端数量和表面积的改变而不断改变。穿透深度也会影响计算。凸块表面压力表示为千克每立方厘米(磅每立方英寸)。

静态压实可用于因附近建筑、材料不坚固而要求轻缓接触或表面承载强度低的应用。其还可用于过大压力会将自由水引入表面的情况。





侧挤 - 侧挤是通过揉搓过程将颗粒重新排列成更密实物质的压实力。该过程在材料摊铺层表面非常有效。压实分层清晰的土壤时，如粘土型土壤，纵向和横向揉搓操作是必不可少的。羊脚式压路机和交错轮、轮胎压路机特别设计用于传输此类压实力。

充气轮胎产生的侧挤力是两个因素作用的结果：接触压力和车轮负荷。调整任一因素都会影响压路机的性能。

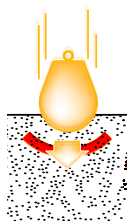
侧挤压实可用于建造密封良好的表面，以帮助材料抵抗水和天气带来的影响



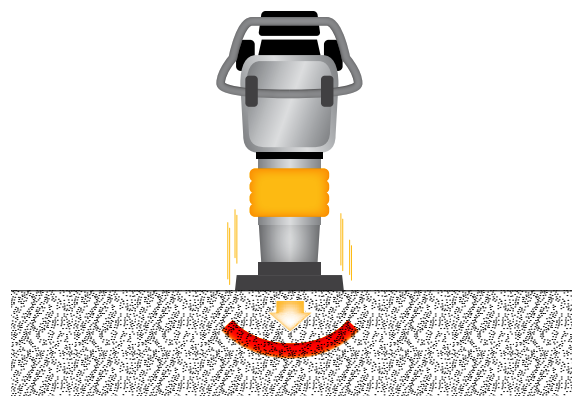
接触压力公式

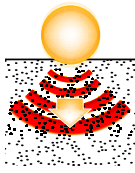
$$\text{接触压力} \quad \text{kg/cm}^2 : \text{巴} = \frac{\text{轮胎负荷 (kg)}}{\text{轮胎接触面积 (cm}^2\text{)}}$$

$$\text{轮胎负荷} \quad \text{kg} = \frac{\text{压路机的工作重量}}{\text{轮胎数量}}$$



冲击 - 冲击比静载重力产生的压实力更大。这是因为运动中的物质是有速度的，在冲击的瞬间速度将转换为能量。冲击可形成从表面传输至地下的压力波。冲击通常为一系列的确实动作。每分钟 50-600 次的冲击确实被认为是低频率范围，用于冲击锤和手动夯实机。每分钟 1,400-3,000 次的冲击确实是高频率，用于振动压路机。





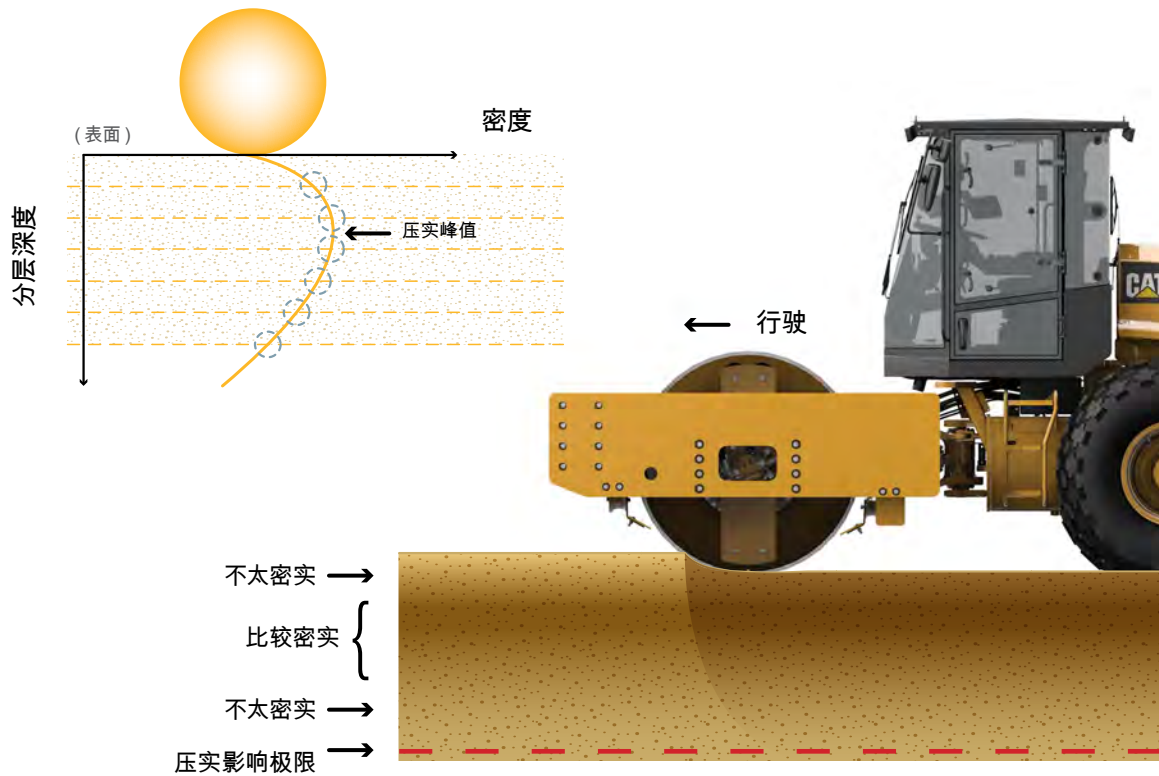
振动 - 振动可能是最复杂和最经济高效的压实力。当今市场在售的 90% 的压路机都是振动型的。这是因为在与三倍以上质量的静碾压路机相比，振动压路机可产生相同的速率。振动能量使振动压路机比尺寸相当的静碾压路机更加高效。

更改运行参数可影响压实区域深度，还可改变压实峰值区域的深度，但这无法改变土壤顶部至底部压实程度不同这一事实。此现象被称为“压实梯度”，此数据可帮助说明用于特定压实应用的特定尺寸压路机或运行设置的适用性。

振动压路机可快速产生一连串扩散至各个方向的压力波。振动压力波可抵消被压实材料的颗粒之间的抗剪力。施加压力时，颗粒容易以更密实（更小空隙）的状态重新定位。要了解振动压路机是如何工作的，必须了解振动压实动力学：振幅和频率、静线压力，以及振动质量和悬挂质量的比率。

压路机工作时，被压实土壤从顶部到底部的被压实土壤量并不均匀。具有特定质量的压路机可将土壤压实至一定深度，但是土壤压实程度从表面到压实影响所达到的最大深度之间各不相同。一般而言，表面土壤不太坚实，中间土壤将达到压实峰值，最大深度土壤也不太坚实。

压实梯度



使用滚式压路机时，表面土壤似乎应该是最密实的—但是，密度峰值实际出现在表面以下，并且密度将随压实的深度而降低。这被称为压实梯度。

[振动压实动力学]

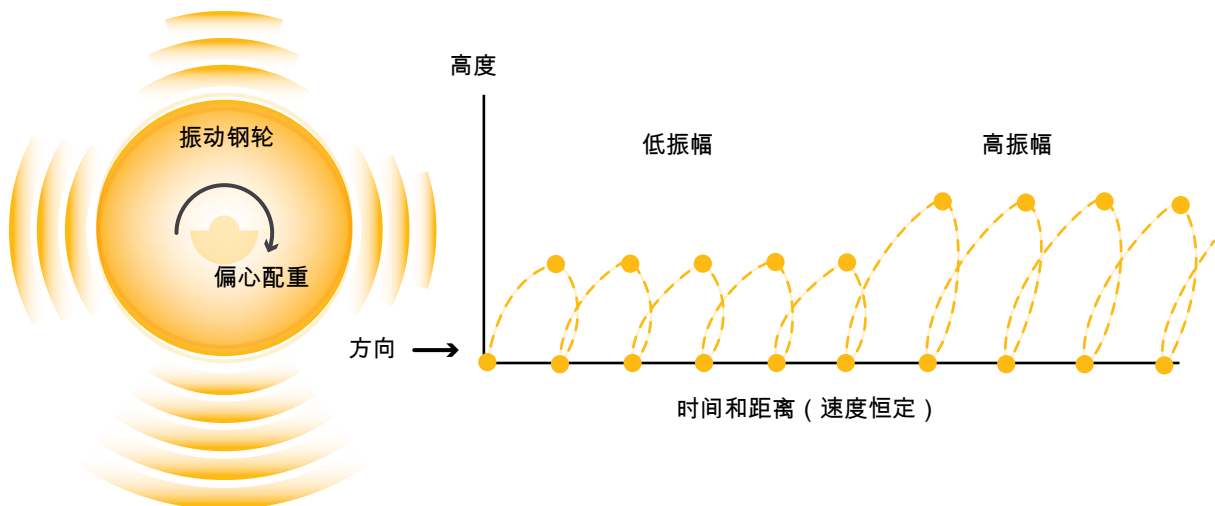
振幅 — 振幅是从振动钢轮静止位置至峰值位置的垂直运动距离的测量值。制造商所宣传的是在悬浮钢轮上测得的标称值。然而，实际的工作振幅是由标称振幅和振幅系数计算得出的，其为传输频率与机器和被压实土壤共振频率的比率。将振幅看作钢轮在移动和压实土壤时压入土壤的距离更加实用。

通过更改振幅，操作员可改变钢轮在材料上的作用力和运动（加速度）。

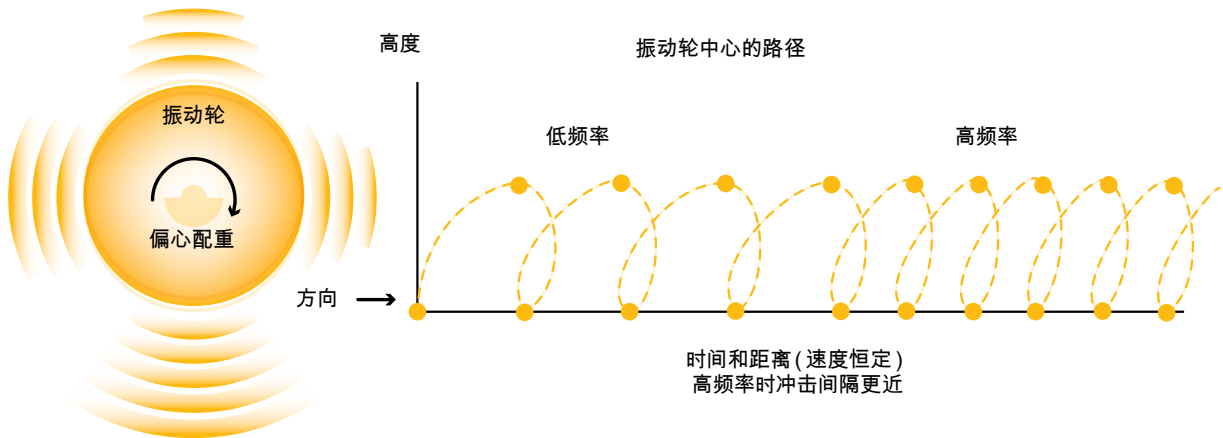
随着土壤接近最大密度，将达到土壤无法吸收振动压路机所传输压实能力的临界点。在这个临界点上，钢轮将在表面上弹跳，钢轮悬于空中时将出现振动循环。此现象被称为“解耦”或“双跳”，伴随影响整台机器的特有非典型剧烈振动。解耦会损坏机器，并对被压实土壤产生不良影响，例如振松。

要停止解耦，操作员只需通过降低振幅减少施加至土壤的压实力，进而降低机器传输至土壤的能量。或者，操作员可以静态模式工作。

振幅



频率



频率和速度 - 频率是偏心配重在给定时长内绕轴旋转的完整循环次数或圈数。频率通常以赫兹 (Hz) 或每分钟振动次数 (vpm) 为单位。通常, 根据材料和振幅设置使用 23-35 Hz (1380-2100 vpm) 之间的频率。

瓦楞纹”(冲击间隔过大), 过慢的工作速度会对机器生产率产生负面影响。各压实应用都有最佳速度和频率, 但可能不是每 25 mm (1 in) 产生一次冲击。保持均匀压实至关重要, 利用自动速度控制功能确保速度和频率的平衡可帮助获得一致性。

频率和工作速度之间的关系有时可被简化成一条经验法则, 即应将频率和工作速度调整为大约每 25-30 mm (1-1.2 in) 产生一次冲击。过快的速度会导致出现“

振动质量与悬挂质量的比率 - 有人可能认为, 具有特定质量和振幅的振动压路机可将特定土壤压实到特定程度, 那么只需利用更大质量和更大振幅即可使压路机在相同土壤上的作业更加高效。这不一定是正确的。

在振动压路机上, 振动质量(钢轮)与悬挂质量(后部框架)是独立的, 两者之间的比率是确定压路机所具有质量和振幅的关键因素。对该比率进行仔细平衡, 以优化机器可安全传输至土壤的能量。



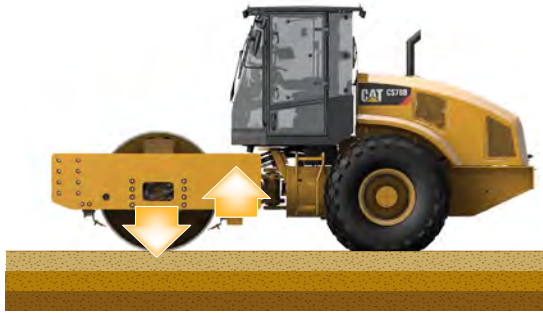
总运行质量



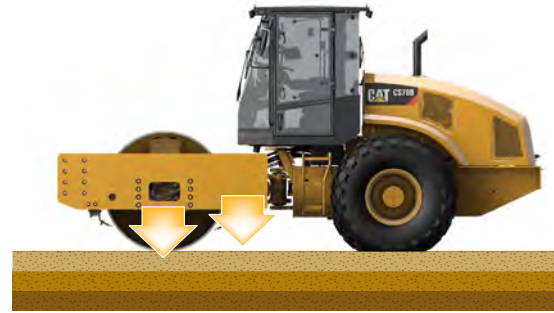
悬挂(非振动)质量



振动质量



抵消压实力的共振



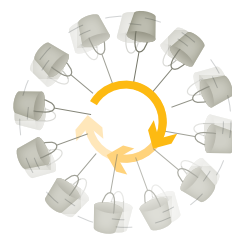
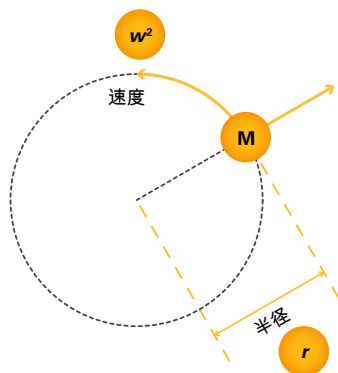
共同作用的共振为谐波汇聚

共振 一对物体所施振动的频率等于物体自然频率时，物体将产生共振。在振动压实中，共振非常重要。

被压实材料和振动机器之间的相互作用使材料和机器产生振动。在钢轮内旋转的偏心配重可使此振动保持与偏心配重轴 rpm 相等的频率。在一些给定频率的情况下，

机器和材料可产生共振。产生共振的情况不仅取决于机器特性，还取决于要压实材料的性质及其达到的压实程度。获得最高效压实传输能量的理想频率比共振频率高约 15%。

偏心力



偏心力 = $M\omega^2 r$

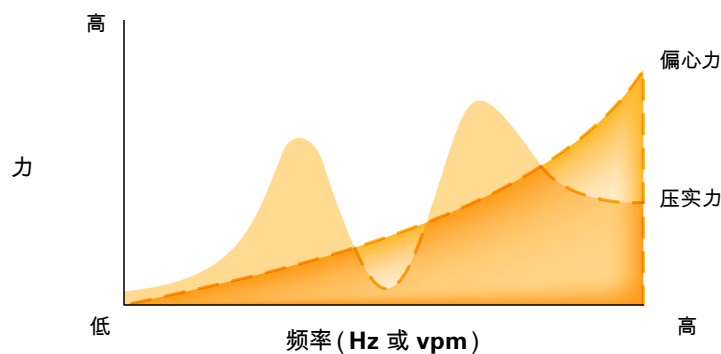
要计算偏心力，用偏心配重的质量 (M) 乘以偏心配重旋转的半径 (r)，再乘以旋转速度的平方 (频率) (ω^2)。此方程式中最重要的因子是频率。

偏心力 一振动压路机通过钢轮内旋转的偏心配重或配重产生偏心力。钢轮产生的离心力与挥动装满水的水桶时的扯拽感类似。配重质量及从旋转中心至重心的偏移距离，以及旋转速度都影响此种力量的产生。偏心力是一个理论计算值，经常用于评估振动土壤压路机的生产率。但是理论偏心力并不是判断机器能力的准确方法。真正的压实力取决于压实材料和振动机器之间的整体相互作用。

作用力和频率

此图显示了理论偏心力是如何随频率增加而增加的。但是，实际传输至土壤的压实力随频率的增加而变化。压实力将显示出多个“波峰”和“波谷”。

通常，第一个波峰表示压实力的最大值，该值迅速降低，接着出现第二个波峰。通常，第二个波峰将产生较高的值，表示机器生产率到达最佳时的状态。



总作用力 (F_{TA})

$$F_{ta} = F_c + F_s$$

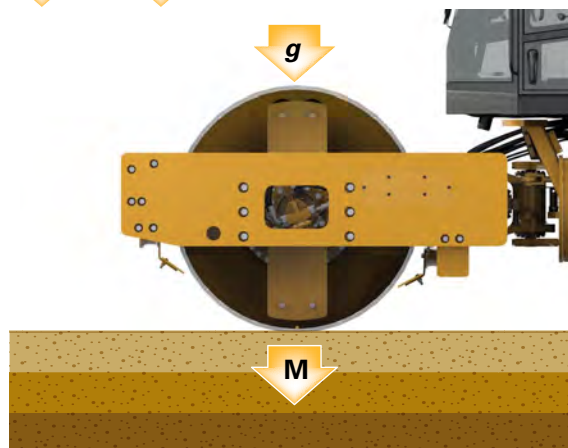
其中： F_c 是偏心力 = 1100

$$\left(\text{M} \right) \left(r \right) \left(\frac{\text{N}}{1000} \right)^2$$

并且： F_s 是静态钢轮所施负荷 =

$$\text{M} \times g$$

- M 偏心配重质量 (kg)
- r 偏心力矩 (m)
- N** rpm
- M 静态钢轮所施质量 (kg)
- g 重力加速度 $\left(\frac{\text{米}}{\text{秒}^2} \right)$



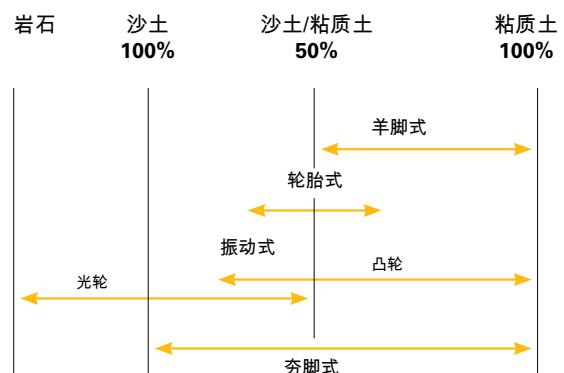
总作用力 –总作用力被认为是压路机可施加至地面的最大振动能量。将压路机的静态质量与偏心力相加得出。在存在偏心力的情况下，使用此计算方法对比压路机的压实功能时应多加注意。

[土壤压实设备]

多种因素影响着压实设备的选择。用于某一项目的设备类型有时是凭借承包商的以往经验,根据土壤类型、方法技术规范或可用设备选出的。另一个考虑因素是机器与牵引和摊铺操作的一致性。气候和牵引条件也很重要。有时,承包商对于设备机组标准化方面的关注也会影响到决策过程。

应用图表提供了将设备与作业可变因素和土壤类型进行匹配的指导原则。没有一台压路机能在所有应用中完成所有任务。每种类型都有最为经济的特定材料和运行范围。在许多情况下,在应用中需要使用不同尺寸和类型的机器达到压实目标;但是选择最合适的机器可因碾压次数、燃油消耗和作业时间的减少而以最经济、高效的方式完成作业。

应用图表



振动压路机 – 振动压路机的工作原理是使颗粒重新排列以减少空隙并增加密度和承载强度。其分为两个类型:光轮和凸轮。为提高多用性,光轮压路机可配备可选凸块外壳套件,尽管性能有限,但可在凸块应用中使用光轮压路机。

光轮振动压路机可产生三种压力:静态压力、冲击和振动。凸轮机可产生相同力量,此外还可产生侧挤力。振动压路机可对摊铺层进行均匀压实。

借助振动钢轮冲击地面产生的力量达到密度值。压实效果是砸实频率和振幅,以及砸实力量和砸实的时间共同作用产生的。

频率/时间关系可说明振动压路机工作速度较慢的原因。由于工作速度可说明压实填料特定部分压实所需的时长,因此非常重要。对于振动压路机,用于岩石和粘质土的 1-2.5 km/h (0.6-1.6 mph) 的速度以及用于砂砾的 2-5 km/h (1.2-3 mph) 的速度可产生最佳效果。

光轮振动压路机是推出的首款振动压路机。其对包含从细沙到大岩石各种大小的颗粒材料最为有效。还可用于粘性土壤含量高达 50% 的半粘性土壤。摊铺厚度因压路机尺寸而异。在填料中使用大岩石时,摊铺层可能非





椭圆形凸块适用于粘性土壤和较厚摊铺层。

常厚 — 高达 1.2 m (4 ft) 都是很正常的。当填料中有大岩石时，应牢记一点：厚度应比最大岩石尺寸厚大约 300 mm (12 in)。这样才可使摊铺层变坚固，表面上不会出现突出的大岩石。

凸轮压路机将材料范围扩大到包含超过 50% 粘土和更高百分比的细土的土壤。凸块穿透摊铺层顶部时，将打破粘性土壤颗粒之间的自然结合，并获得更好的压实效果。凸块离开摊铺层时不会带起土壤，并且呈锥形，以帮助其保持清洁。凸块轮装置在粘性土壤上的通常摊铺厚度在 150-460 mm (6-18 in) 范围之间。



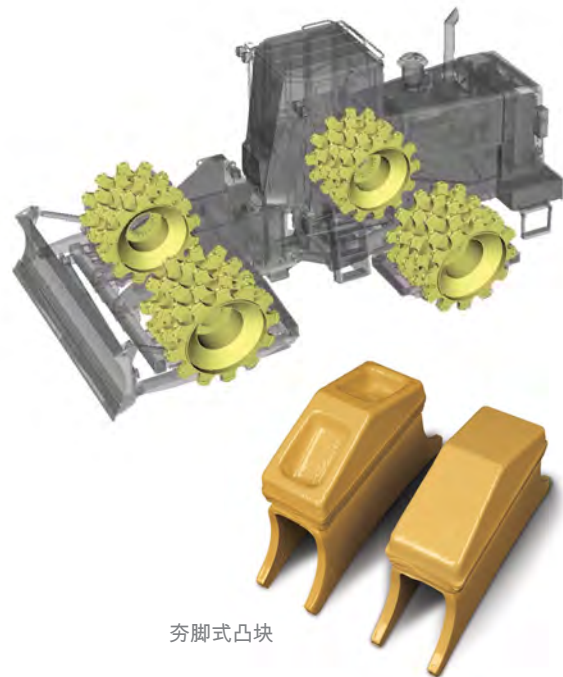
方形凸块最适用于半粘性土壤和较薄摊铺层。

Caterpillar 可提供两种凸块类型：方形凸块和椭圆形凸块。方形凸块在半粘性土壤和小于 150 mm (6 in) 的较薄摊铺层上具有良好性能。方形凸块可以很好地密封表面。

椭圆形凸块比方形凸块的表面面积小，因此比方形凸块施加的接地压力更大。这使得凸块可以更深地穿透摊铺层。椭圆形凸块在粘性土壤和 150-460 mm (6-18 in) 的较厚摊铺层上具有良好性能。椭圆形凸块无法像方形凸块一样很好地密封表面。



Caterpillar 还为光轮压路机提供凸块外壳套件选装件。用螺栓将两件式外壳安装在钢轮上，可以像正常凸轮一样在粘性土壤上使用压路机。也提供方形凸块和椭圆形凸块外壳套件。



夯脚式凸块

夯脚式压路机—夯脚式压路机是高速自行推进式非振动压路机。通常带有四个凸块钢轮，并配有一个推土铲。其凸块呈锥形，具有长方形表面。

夯脚式压路机可对摊铺层底部至顶部进行压实。由于凸块呈锥形，因此可以在离开摊铺层时不带起土壤。因此，摊铺层顶部也会被压实，表面相对平滑、密实。夯脚式压路机可达到 16-32 km/h (10-20 mph) 的速度范围，但通常在 10-15 km/h (6-10 mph) 的范围内运行。

尽管不良级配塑性淤泥或非常细致的粘质土需要 4 次循环，但通常只需 2-3 次循环（4-6 次机器碾压）即可在 200-300 mm (8-12 in) 的摊铺层中达到所需密度。夯脚式压路机对于纯沙土之外的所有土壤都非常有效。

夯脚式压路机可留下相对平滑、密封的表面，因此牵引装置可保持较高速度在填料上行驶。同时，由于配备推土铲的夯脚式压路机可进行摊铺和压实，承包商可减少牵引式摊铺机的数量。

夯脚式压路机最适用于大型项目。其需要进行较长、不间断的碾压才能提高速度，藉此实现高生产力。在厚度大于 300 mm (12 in) 的摊铺层上，夯脚式压路机比单一钢轮振动压路机的生产率高约 2 至 3 倍。应用情况、作业现场规模和决策背后的经济因素将确定最适用的机器。

羊脚式压路机 — 羊脚式压路机的名字来源于一个真实的故事：早期罗马筑路工会在基层材料上来回放羊，直至道路被压实。“羊脚”一词成为了描述所有凸块轮的通称。其实，羊脚式压路机与凸块轮或夯脚式压路机非常不同。

羊脚式凸块是圆柱形的，通常为 200 mm (8 in) 长。凸块是圆形的，直径范围为 76-127 mm (3-5 in)。夯脚或凸块轮上的凸块呈锥形，具有椭圆形或长方形的表面。凸块面的面积小于凸块底部面积 — 这是一个非常重要的差别。



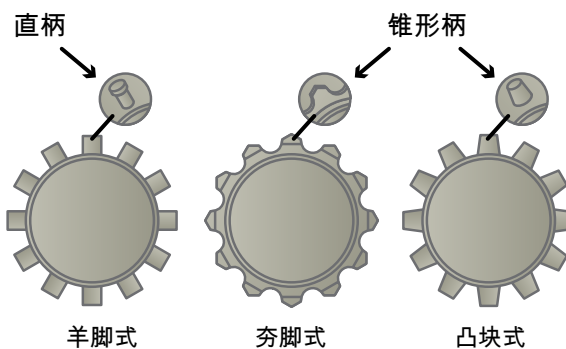
羊脚式钢轮上的凸块可穿透顶部摊铺层，并对下面的摊铺层进行实际压实。凸块离开土壤时，将抬高或带起材料。其结果就是在顶部出现一层松散材料。摊铺填料时，顶部摊铺层将被带起，前面的分层会被压实。羊脚式压路机其实是自下而上进行压实的。

使用羊脚式压路机有一个明显的好处。由于土壤的顶部摊铺层总是会被带起，该过程可帮助进行通风并对潮湿粘质土和淤泥进行干燥。

但是羊脚式压路机有很多缺点。下雨时松散的顶部摊铺材料就会起到海绵的作用，还会减慢压实过程。松散的材料还会减慢释放填充材料的牵引装置的速度，牵引循环时间因此而增加。

此外，羊脚式压路机只能以 6-10 km/h (4-6 mph) 的速度工作，这将抵消冲击和振动的效果。压力和侧挤是施加在土壤上的唯一压实力。通常在 200 mm (8 in) 的摊铺层上需要进行 6-10 次循环 (12-20 次机器碾压) 才能达到目标密度。羊脚式压路机不再被广泛使用。

凸块配置



轮胎压路机 — 轮胎压路机可用于小规模至中规模的土壤压实作业，主要用于有棱角的颗粒基层材料。通常，在振动钢轮压路机完成对摊铺层的压实后，其被用作修整压路机。轮胎压路机最适用于密封表面和特殊应用，例如压实较薄摊铺层或需要达到作业指定特殊要求的情况。

橡胶轮胎产生的压实力（压力和侧挤）自上而下作用于摊铺层，以产生密度。可通过改变轮胎压力（常规方法）或改变压载重量（使用较少）来改变压实力的力度。交错的轮胎花纹所产生的揉搓作用力有助于密实和整平表面。

轮胎压路机可用于土壤和沥青，这一优势可使筑路承包商在施工的多个阶段使用一台压路机。





后部振动板 – 在非黏性材料上，单一钢轮振动土壤压路机可配备后部振动板，藉此获得独立单一钢轮压路机不具有的表面密实功能。这可帮助操作员理解压实梯度：单一钢轮振动压路机可进行较深压实，振动板可压实和密实表面。

由于振动板的重量会使钢轮的线性压力降低，这就意味着需要更多次的碾压才能达到压实目标，因此在不需振动板时，应将其从机器上拆下。

压实深度

假定密度规范为标准普氏密度的 95%，并且其会因土壤条件的不同而大幅变化。

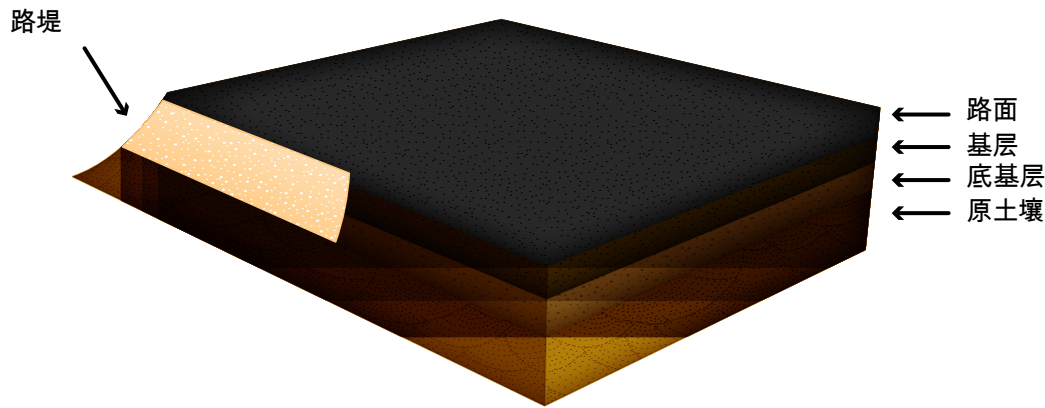




单元 4 应用和质量控制

项目参数对土壤摊铺及其压实有重大影响。了解在多种条件下如何实现效果的最大化将帮助您实现效率最大化并避免返工。久经检验的和新的测量方法也有利于帮助您更好地管理压实项目。





[作业现场结构要素]

与任何类型的结构类似，道路是由具有特定功能的特定组分构成。术语因地域而异，但这些组分是共同作用来支撑其上的交通负荷。

自然土壤或原土壤—有时称为“基底”、“路基”或“底层土壤”，这是路床的基础，由未经人工或化学改性而自然形成的土壤和材料组成。在筑路过程中，表面土壤被移除以形成平坦的，甚至有一定坡度的底层。切面底部的裸露材料是自然土壤。如果这些现有材料不足以支撑路面结构负荷，则要对其改性或使用合适材料更换。改性可以采用机械方式，其中包括压实、使用地工合成物加固或混入骨料；或采用化学方式，其中包括混入水泥等结合料；还可以采用机械和化学结合的方式。目的是改善材料的承载能力。最后，此基础必须为其上的结构提供足够的支撑力。

路堤—路堤是顶部高于接合表面的填方。路床被设计成一定宽度，用于支撑具有设计的标高和坡度上的道路。在一些情况下，自然发生的地面波动可能需要使用填充材料为路床提供足够的路基支撑。路堤是为此目的而建造的，摊铺并压实合适的骨料以加固地面直至其达到所需标高。

底基层—这一分层的主要功能是将所支撑的结构负荷分散至路基，并为其上的基层摊铺提供一个较平坦的分层。但是取决于路基材料成分，底基层还可以提供几个其他功能，例如过滤功能，或毛细水屏障功能。通常，这一分层主要由根据需要经过改性和压实的路基材料组成。如果需要支撑较大负荷，可以添加第二个摊铺层，因此可以有多个底基层。通常，用于底基层的骨料比用于底基层所支撑分层的骨料尺寸要大。

基层—基层的功能与底基层相似。也分散所支撑的负荷，并提供防范水和霜冻影响的保护功能。根据负荷要求，可以有单个或多个基层。基层是按照设计要求由混入颗粒的砂砾混合料组成，混入颗粒的尺寸比用于底基层的颗粒尺寸小。

沥青层被摊铺在这一基础之上。该基础的质量将影响其上沥青层的耐用性。有关沥青层的更多信息，请查阅Caterpillar的“沥青压实指南”。

[土壤压实程序]

作业部署

部署压实作业前,承包商必须要考虑的主要问题是:

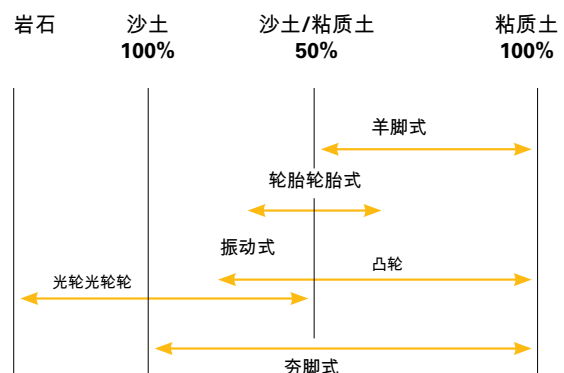
- 土壤级配和分类是什么?
- 最大干密度和最佳含水量是多少?
- 压实要求 (%) 是什么?
- 压路机设置和速度是什么?
- 摊铺厚度是多少?

承包商需要了解材料、要求和各类设备的应用。一旦了解了这些可变因素,承包商就可以开始考虑最佳作业方法,还可以考虑要采用的可用技术。

压路机应用和尺寸-附图中对各类压路机的运行特性进行了说明。为了进行对比,下图说明了各压路机最有效时的应用范围。各机器可能在这些范围中存在重叠,机器对常规应用范围之外的材料进行作业是很正常的。因此,应将这些图表中提供的信息严格看作一般应用指南。

现场作业和路堤应用 -现场作业指广泛的各类地面施工,包括:基础准备、分级、回填和盆地充填。这可以是一个建筑现场、道路或一些其他表面或结构。

应用图表



土壤压实设备运行特性

仅限自行推进式

| 机器 | 羊脚式 | 轮胎式 (15 吨及以上) | 夯脚式 | 振动式 |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 压实摊铺 厚度 - mm (in) | 150 - 300 (6 - 12) | 150 - 300 (6 - 12) | 150 - 300 (6 - 12) | 150 - 600 (6 - 24)* |
| 平均工作 速度 - km/hr (mph) | 6 - 10 (4 - 6) | 6 - 19 (4 - 12) | 16 - 32 (10 - 20) | 2 - 8 (2 - 5) |
| 循环 (1 次循环 = 2 次机器碾压) | 6 - 10 | 3 - 8 | 4 - 8 | 2 - 4 |

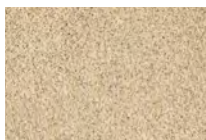
*取决于压路机尺寸和压实目标



岩石填料—岩石越来越多地被用作公路施工中的路堤填料。其还被更广泛地用于大坝、机场、建筑和港口路堤施工。炸采岩通常含有大量细土，如果不对填料进行压实将发生严重的沉降。

摊铺后需要使用较大压力使较大岩石重新定位以提高密度并获得稳定性。此作业可选择最大的光轮振动压路机。即便如此，压路机会在岩石填料上承受很大的应力。钢轮应采用较厚的高级钢结构。如果表面材料出现破碎，可能需要减少碾压次数。或者，如果机器有多个振幅设置可选，则使用较低振幅以减少表层材料变形。

岩石填料通常被摊铺成 450-1200 mm (18-48 in) 的摊铺层。压实前如何摊铺材料非常关键。由于推土铲将在一定程度上使岩石重新排列，履带也会进行一定程度的压实，在分层上使用摊铺机进行摊铺可形成均匀的摊铺层。这样，可为压路机准备一个相对密实、平坦的表面。



沙土和砂砾—使用光轮轮的振动压实对于沙土和砂砾尤为适用且经济高效。在由压路机尺寸决定的摊铺厚度上，只需几次碾压即可达到较高密度。

如果沙土和砂砾的细土含量高于 10%，土壤无法自流排水，并且在含水量高时可能变得富有弹性。此类土壤具有达到最大密度时的最佳含水量。可能需要对潮湿土壤进行干燥才能达到最佳含水量。



特别是在接近饱和的状态下，细土含量低于 10% 的自流排水沙土和砂砾很容易被压实。需要较高密度且摊铺层较厚时，应加水。这些水会在压实

在不良级配沙土和砂砾上，很难达到接近填料表层的较高密度。不良级配土壤具有较低的抗剪强度，顶层容易在钢轮碾压后突起。压实多个摊铺层时这不是问题。对下一个分层进行碾压时，上一个顶层将被压实。但是，在进行密度试验时应考虑到表面压实难度。

过程中排出摊铺层。



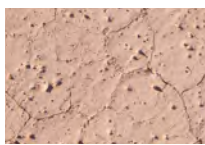
含水量低于最佳值时，可加水以确保获得适当压实效果。



淤泥 -淤泥是非弹性细土，通常使用光轮振动压路机进行压实。淤泥可以经过摊铺后，压实成较厚的摊铺层。

与所有细颗粒土壤类似，其压实性取决于含水量。为了获得最佳压实效果，含水量与最佳含水量不应差别过大。如果水分过多，淤泥会很快

变为液体状态，无法进行压实。这意味着可能需要使用圆盘对摊铺层进行通风，混入较干燥的土壤（高成本方法），或借材料可能需要具有更好的排水性。同时包含粘质土的粉性土可能具有较大的粘性。在这些土壤上，凸轮、夯脚式或轮胎压路机可达到较好效果。



粘质土 -粘质土具有塑性，这意味着压实特性很大程度上取决于含水量。含水量低时，粘质土将变得坚硬、牢固。高于最佳含水量，粘质土将变得更富弹性且难以压实。

通常在粘质土压实中的主要问题是需要调整含水量。通过水车、圆盘或土壤稳定剂来增加水分则非常省时。使水渗入借土坑也是很好的替代方法。即使使用圆盘和土壤稳定剂，对潮湿土壤进行干燥也需要在温暖、干燥的条件下进行。有时使用羊脚式压路机进行长时间碾压以降低含水量。

即使是最佳含水量，粘质土与非粘性土壤相比也需要较高的压实力和较薄的摊铺厚度。由于凸块在穿透土壤时可打破颗粒之间的自然粘性结合，因此凸轮压路机最为有效。轮胎压路机可用于具有中低塑性指数的粘质土。

在要求高生产率且使用粘质土作为填料的项目中，可结合使用夯脚式压路机和振动凸轮压路机以获得良好的效果。配有推土铲的夯脚式压路机在摊铺填料、打破粘质土借材料中常见的大硬块时非常高效。使用这些机器进行前几次碾压。使用振动凸轮压路机实现最终密度。



含水量过高时，对土壤通风可加快干燥时间。

基层和底基层应用-基层和底基层是建造在路堤或自然地面顶部的分层。这些分层用作道路或建筑等这些表面上结构性建筑物的基础。这些分层越靠近施工面,其强度越大。这些分层中所用的材料取决于必须支撑道路或建筑等这些负荷类型。

通常,对于基层和底基层的材料,在摊铺厚度、所需密度和变形模数方面设有非常严格的规范。

自然(原)土壤-从经济角度而言,优先选择使用当地可用的土壤。如果这些土壤适用,则使用时可以不对其进行化学处理或使用添加剂。对这些土壤进行适当压实可大大提高其承载能力,并控制渗透性、毛细作用和收缩与膨胀等其他因素。

压实设备的选择取决于土壤类型。通常,颗粒非粘性土壤被指定为基层和底基层材料。此应用中通常使用光轮或轮胎压路机。

处理土壤(土壤稳定)-在自然或外移土壤中混入化学物质可大大提高土壤的稳定性和承载特性。这称为土壤稳定。

在土壤中混入石灰或水泥后,应使用振动压路机对土壤进行压实。所用压路机的类型取决于土壤原有的、未经处理时的特性;但通常应使用 15 吨(33,000 lb) 或更重的振动压路机。在涉及大量粘性土的情况下,夯脚式压路机比振动压路机更经济高效。可使用轮胎压路机对少量土壤进行压实。



在作业开始时,建议进行稳定适用性试验以确保获得充分的效果。

土壤稳定可改善土壤的工程质量。

碎石-作业规范可能要求使用良好级配的碎石作为基层和底基层材料。通过使用破碎材料,可在破碎过程中控制级配以达到规范。碎石通常比细土更易摊铺和压实。此外,压实效果更具可预测性。但是,这些压实优势被破碎成本和至项目现场的长距离运送成本抵消。

通常使用后卸式拖车将碎石运送至作业现场,并使用平地机或洒布机器将其卸载在平地上。然后基层材料被摊铺成 150-250 mm (6-10 in) 的摊铺层。摊铺后,使用(静态或振动)光轮压路机或轮胎压路机完成压实。

[土壤压实提示]

尽管看似简单，土壤压实对于任何施工项目都是最困难的部分之一。许多制造商都在压实设备上提供各种选项，使操作员便于调整机器振动、频率和振幅以符合作业规范。

根据所压实的材料调整压路机的工作参数时没有一个简单的方法可以使用。反复试验往往是最好的办法。显然，用户需要选择合适尺寸（钢轮宽度、重量等）的压路机以满足生产要求。但是，达到最大压实效果通常是通过操作员可控制的变量（频率、振幅和滚动速度）进行试验，然后分析效果并进行调整来实现的。

制造商们在其机器中采用了更多技术来帮助操作员实现有效性的最大化。但是，即使采用更多技术并进行改进，要达到最佳土壤压实效果，您可能需要了解一些多年来在施工项目中被证实的土壤压实基本原则。下面是一些土壤压实技巧，以为您提供基本指导。

何种类型的压路机适合应用需求？

粘性材料
薄层

单钢轮压路机(凸块式)



细粒材料
水敏性

单钢轮压路机, 光轮或凸块式



摩擦材料
(沙土 0.063-2 mm/0.002-0.07 in)
自流排水 (若细土含量 < 7%)

单钢轮压路机、双钢轮压路机、轮胎压路机



粗颗粒、自流排水
摩擦材料

单钢轮压路机、双钢轮压路机



粗颗粒
(颗粒 2-63 mm/0.07-2.5 in)
自流排水
摩擦材料

单钢轮压路机、双钢轮压路机



粗粒材料
较重颗粒

配有较大平板的大型单钢轮压路机
(>12.7 吨)



| | 渗透性 | 基础支撑 | 路面底基 | 膨胀 | 压实难度 |
|-----|-----|------|------|----|------|
| 砂砾 | 非常高 | 极好 | 极好 | 否 | 非常容易 |
| 沙土 | 中等 | 良 | 良 | 否 | 容易 |
| 淤泥 | 中低 | 差 | 差 | 些许 | 些许 |
| 粘质土 | 无+ | 中等 | 差 | 困难 | 非常困难 |
| 有机土 | 低 | 非常差 | 不可接受 | 些许 | 非常困难 |

摊铺层均匀性、速度和滚动模式 - 建筑和道路结构依靠土壤基层的支撑，土壤基层的压实不仅要符合规范，还应一致。基层密度变化可导致路面上出现深穴或车辙，以及建筑下面的基础沉降。土壤密度变化的最大原因是使用不同土壤类型进行并排摊铺。

由于不同土壤类型的压实度不同，因而产生不同的压实效果，在施工期间应尽量在各摊铺层上使用相似材料。如果需要使用不同类型的材料，应尽量在各摊铺层上使用相同的类型，不要在水平摊铺面上使用不同材料。这对于获得一致的压实效果非常关键。

密度变化的另一个原因是含水量不一致。由于过于干燥或过于潮湿的土壤都难以压实，在对整个作业现场进行压实期间都应以通过普氏试验确定的最佳含水量为目标。这有助于达到最一致、密实的效果。

除路面下方的基层以外，通常不对摊铺厚度进行严格控制。如果含水量和材料类型等所有其他因素保持一致，一致的摊铺厚度可在整个作业现场形成一致的密度。忽略摊铺厚度会导致无法达到作业规范。

影响压实的其它因素是覆盖范围和碾压次数，但这两个因素通常得不到足够重视。碾压次数、压路机速度和振动设置等参数可轻松控制。智能压实技术，例如带有GNSS 绘制功能的 Cat 压实控制可提供可视化参考信息，以确保保持适当的覆盖范围和碾压次数。相对于对材料进行随意压实，一致的覆盖范围可达到更加高效、成功的压实效果。

摊铺厚度-压路机技术不断进步，为压实过程带来了更多选择和变化。但是，即使是使用最先进的压路机施加相等的压实力，较厚的摊铺层也比较薄摊铺层的密度低。此规律也有例外，但应找出在所需密度和最小压路机碾压次数的基础上可实现生产率最大化的摊铺厚度。

上一摊铺层或下方基层的条件也会影响压实。如果下方分层未被彻底压实，则会包含相对松软的部分。进而对下一个摊铺层进行压实将产生多种不良后果。应对各摊铺层进行一致、彻底压实，以确保成功压实后续摊铺层。



压实力—压实力是传输至土壤以重新排列和压实土壤颗粒的能量。可通过更改重量、宽度、轮胎压力、振幅和频率等机器参数来更改压实力。可在单台机器上对部分参数进行更改。宽度等其他参数的更改可能需要另一台机器，以更更改压实力。任何给定项目都需要使用特定的参数级别。



作业速度—通常，行驶速度对于施工生产率起着重要作用；机器行驶越快，作业完成越快。但是，振动压路机不同于所有其他类型，通常降低行驶速度才能提高生产率。压路机具有实现所需压实效果的最佳经济速度。



土壤摊铺和压实的一般规则 —遵循一般规则，您以及您的工作现场管理人员和操作人员都应在压实项目开始时考虑到这些规则。

- 摊铺新的土壤材料摊铺层时，在整个区域均匀摊铺材料。避免摊铺含水量过高的土壤。使用缓慢移动的推土机摊铺材料，并使其形成适当的轮廓。不要使用新材料填埋饱和层。
- 应通过添加具有相同成分的良好级配材料填补表面空穴和离析区域。
- 摊铺完成后，立即压实土壤，从外侧开始，向区域中间推进作业。
- 路堤/路肩也必须压实；从路肩外侧边缘开始，向中间区域推进作业。整平并密封表面。
- 在处理易受天气影响的材料时，所有摊铺土壤都应具有一个 6% 的边坡，以防止表面水积聚。
- 在天气不好的情况下，在单轮宽度的带状区域上对各摊铺层进行压实，直至摊铺层完全压实。然后移至下一个带状区域，重复这个过程并在整个摊铺层上推进，直至整个区域被压实。确保在一天的工作结束时整平并密封表面，以防止水进一步渗透。

- 压实弹性基层时，如果基层具有足够的刚性，使用低振幅和高频率非常有利。与第一个摊铺层一起压实基层时，使用高振幅和中低频率。
- 结合使用静态和振动压实 — 首先使用振动压实，随后使用静态压实 — 可产生最佳效果。

[压实测量方法]

密度是实验室中用于评估土壤压实质量的传统方法，密度也是在现场设定和测评压实要求中最常见的历史方法。实验室试验（例如，普氏试验）可确定达到最大干密度时的含水量。施工现场要达到的目标密度实际为实验室最大干密度的特定百分比。

一般而言，路堤的所需现场密度为标准普氏试验的95%，道路结构一般高达改良普氏试验的100%。同样，含水量必须在实验室确定的最佳含水量之内。

长期以来都需要通过逐点试验确保在整个施工作业中保持目标密度和含水量这两个重要因素符合规范。这些试验也可说明压实设备和所用施工方法的有效程度。最近，机器集成式压实测量方法被更广泛地用作在作业现场确定压实质量的方法。

现在许多机构都要求使用“智能压实”，其为机器集成式压实测量系统与绘图系统的结合，绘图系统将测量与其在现场中的位置联系起来，还可提供随后进行分析和记录的数据。

压实测量的发展历史



历史方法



机器集成式
压实测量



智能压实

- 流程控制/方法规范
- “逐点”试验
 - Troxler核子测定仪
 - 贯入仪
 - 弯沉仪
 - 平板负荷试验

比较准确

样本通常小于总作业面积的 1%

- 加速计
- 压实测量技术 (MDP)
 - 向操作员实时显示硬度或承载强度
 - 难以与历史逐点测量关联
 - 在特定土壤类型或应用中具有测量变化性

- 添加卫星绘图功能
- 将测量和机器数据与准确位置关联，以此与机器集成式压实测量结合
- 提供详细地图，实现已完成作业的可视化
- 提供用于分析和记录的数据

下文对一些最常见方法的特点进行了说明。请记住,各试验方法所测量的土壤性质不同(例如,密度、强度等),因此要在理解这些物理差异的基础上试着建立各试验之间的关联。并且,逐点试验程序的本质要求假定单点试验的结果在整个未试验的相邻区域或整个作业现场均有效。

现场测量方法(历史)-与土壤密度相关的测量:两个基本方法被用于在现场测量土壤密度:

1. 使用 **Troxler** 或“核子密度测定仪”测量土壤对于放射性颗粒的反应。这些设备成为在现场测量土壤密度的最常见方法,但是其缺点是需要获得许可才能使用,并需要定期监控和测试设备内的核辐射源。通常需要文件和许可才能运输设备。

此设备可向被测土壤中分别发射中子和伽马射线,以提供约 50 mm (2 in) 深度上的含水量指标和 300 mm (12 in) 或更小深度上的密度。实验速度快,不会对材料造成干扰。在均匀土壤中可获得最佳结果。

使用核子测定仪测量密度有三个基本方法——直接传输、回散射和“空隙方法”。

直接传输方法最准确,成分误差最低且表面粗糙度误差也最低。其可用于测试 50-300 mm (2-12") 的深度范围。直接传输方法最重要的一个方面,是操作员可直接控制测量深度。

回散射方法可使装置抵靠表面,因此无需在压实土壤上打出入孔。但是,准确性受到影响,成分误差也不准确。此方法在 50-75 mm (2-3 in) 的较浅深度上最为有效。

空隙方法在成分误差上有所改善,可在直接或反射模式下使用。测试设备被提高至测试表面以上,以减少成分误差,但是准确性仍然无法与直接传输方法相比。

核子测试设备存在的一些局限性在于,必须小心处理放射性材料,并且盐分和/或放射性物质含量较高的有机土或材料有时会产生错误读数。施工设备造成的地面振动也是产生测量误差的原因。



Troxler 或核子密度测定仪



沙锥方法具有可靠的准确性。

2. 挖出一定量的土壤并称重，测量从中挖出土壤的孔洞的体积。只要有准确的天平就可以直接对土壤样本称重。测量从中挖出土壤样本的孔洞的体积时无法如此直接进行，可使用几个具有一定准确性的方法进行测量。下文给出了两个示例：

沙锥方法—沙锥方法是一个多步骤方法，比 Troxler 或核子密度测定仪更加耗时，但是具有可靠的准确性。其有时与核子方法结合使用，以对核子密度测定仪进行校准。此方法主要测量填充从中移出土壤样本的空隙所需的沙土体积。沙子很容易流入空隙中，并且具有一致的密度，这意味着将沙土从容器移入土壤空隙时，沙土密度不会出现很大变化。

水球方法—水球方法也称为华盛顿密度计试验。该试验的前三部（挖出样本、称重和干燥）与沙锥方法相同。用这种方式计算含水量。

但是，不使用沙锥测量被挖孔洞体积，而是使用华盛顿密度计。将密度计这个充满液体的装置放在孔洞上方。将连接底板的球体置于孔洞内。打开密度计一侧的阀门，计量液体进入球体中。球体填满时，将占满整个孔洞。密度计进行校准，测试人员可读取液体的体积，也就是孔洞的体积。

密度（湿容重）的计算是挖出样本的重量除以孔洞的体积——仅适用于使用沙锥方法。干容重的计算是湿容重除以（1+含水量）。

水球方法的局限性在于：获得结果所需的时间长，并且准确性取决于球体与孔洞不规则的侧边的贴合情况。



使用中的动态圆锥贯入仪。

与土壤强度和土壤硬度相关的测量 - 土壤密度是土壤压实的历史测量方法,可用于设定标准,也可用于测评结果。但是,使用与工程要求(通常为土壤强度)更直接相关的土壤压实测量方法成为不断发展的趋势。现场使用的有几种不同的强度测量方法,我们将在此指南中对其中一些(而非全部)方法进行说明。用于现场的强度测量分为三个基本类型:

1. 土壤穿透阻力-最常用的土壤穿透性测量方法是动态圆锥贯入仪 (DCP)。该试验测量的是,通过从已知距离上砸落固定重量铁锤使小型圆锥穿透土壤所需的力/能量或抗剪/摩擦强度。此设备可用于评估深度达 1830 mm (72") 上的加州承载比和以牛顿每立方毫米 (磅每立方英寸) 为单位的承载值。落锤使用不当或锤击计数不正确,以及每次锤击(或连续锤击)的深度变化都将导致测量值不正确。在岩石类土壤中使用也会产生错误结果。

所用的常见尺寸圆锥具有 20 mm (¾ in) 底面积和 60° 度的顶锥角。圆锥是通过落锤穿透土壤的,落锤锤击平板,动态力量被传输至圆锥,进而使圆锥穿透土壤。每次锤击的穿透距离都会被记录下来。在较硬土壤中,需要进行数次锤击才可使圆锥穿透土壤,锤击次数和穿透距离被记录下来。

DCP 的优势在于,可在比其他方法更深的深度上测量土壤强度。圆锥可穿透至 1 m (39") 及更深的深度,土壤对圆锥贯入仪轴产生的摩擦力会影响读数,特别是在深度超过一米时。DCP 无法用于特别坚硬的材料,例如经稳定的石灰稳定土。其作业强度大,在重复使用后会使人疲劳。

2. 土壤对于落锤的反应 –基本原理是：土壤越坚硬，重物掉落在表面上产生的反弹越明显。轻型落锤式弯沉仪 (LWD) 就是一个这样的设备。落锤式弯沉仪 (FWD) 是此类中较重工具。

轻型落锤式弯沉仪 (LWD) 将固定重量从已知距离上砸落在配有加速计和其他传感器的基板上，以此测量施工层表面的土壤硬度或弹性模数。通过检测基板的变形或移动量来计算深度达 150 mm (6 in) 以兆帕 (MPa) 为单位的土壤动态弹性模量。使用此方法要求地面光滑、平坦。试验表明，不同制造商生产的弯沉仪会在相同土壤条件下产生不同结果。

落锤式弯沉仪 (FWD) 是上述手持式工具中较大的设备。FWD 安装在拖车上，不易运输，但是采用同样的原理：锤击更大平板，进而产生更大的影响区域并在更深的深度上进行测量。尽管 LWD 可在 150 mm (6") 的深度上测量，但更大型的 FWD 可将能量轻松传输至 1 m (39") 深的土壤，这更接近于振动压路机产生的压力。



轻型落锤式弯沉仪

3. 土壤对于静态重量的阻力–由于是从土壤表面测量土壤硬度，此方法与落锤试验相似，但又由于使用静态压实，而非动态力，因此两者是不同的。由于土壤压实的目的是形成坚硬的土壤，在静态压力下您需要使用较大力量才能使土壤有效弯沉。要测量土壤硬度，需要使用尺寸与所需测量深度大约相同的平板，这意味着需要使用直径接近于 30 cm (12") 的平板，而非尺寸范围在几厘米或几英寸范围内的平板。

平板负荷试验–具有不同平板直径的多个平板负荷试验装置均可用。平板直径越大，形成平板压入土壤的可测向下运动时所需的力量越大。加载平板时，给定力量产生的弯沉量被测量并被绘制成图表。此数据可提供土壤模数(硬度)，还可说明土壤承载能力。大型平板负荷试验需要数千磅的力才能将直径通常为 300 mm (12 in) 的平板向下压入土壤中。可用施工设备通常被用作负荷源。平板负荷试验测量可直接用于路面厚度设计。



准备平板负荷试验



试验压路机

其他现场测量 – 最后, 还有未被归入上述类别的其他现场压实测量方法。这些方法已被单独使用或与其他试验结合使用了数十年, 用来深入评估土壤支撑负荷的能力。其中许多方法至今仍在使用。

1. 试验压路机 – 滚压试验在北美洲被广泛用作抽查的替代方法, 用以直接确定压实表面对于所施负荷的反应。该试验可找到松软的位置点, 并确保负荷支撑能力的一致性。该流程包括在被压实表面上滚动重物, 并测量车辙或弯沉的深度。车辙过深说明压实不当。

滚压试验并不像之前所述的一些方法一样能直接测量土壤强度, 但是在压实目的仅仅是提高道路和停车场等结构的地面硬度的情况下, 这是测量压实质量更直接的方法。假定道路具有良好排水性并长期保持稳定, 如果土壤基层在所承载的试验压路机的重量下未出现车辙, 则在交通负荷下不会出现弯沉。

在所有传统压实测试方法中, 较之抽查单个位置点, 滚压试验可以经济高效地对更大面积进行测试, 因此滚压试验是具有最大试验样本规模的方法。

2. 便携式土壤水分烤箱 – 便携式土壤水分烤箱是用于测量土壤含水量, 并将其与其他装置的承载测量进行关联的装置。在土壤含水量未知的情况下, 此处探讨的其他装置的测量都是无效的。

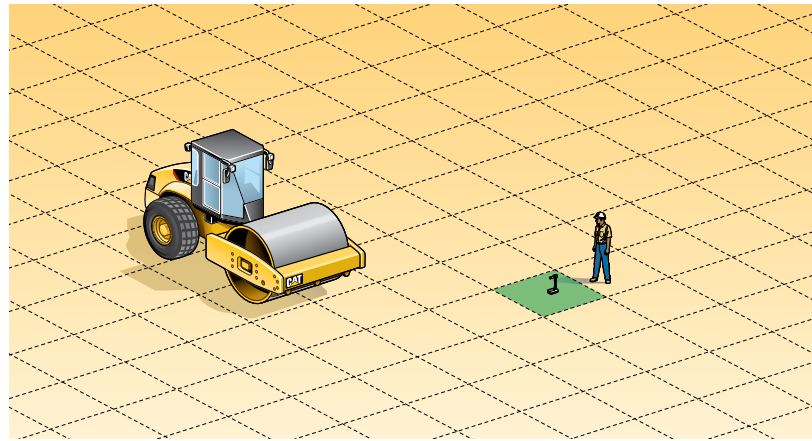


便携式土壤水分烤箱

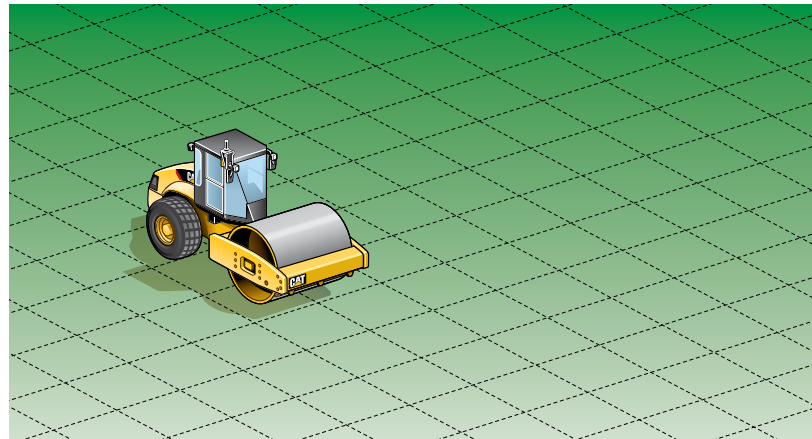
机器集成式压实测量方法—长期以来，压实在很大程度上都是不断试验的过程。在缺乏有关土壤状态的可靠数据的情况下，操作员凭借经验和感觉来判断何时完成压实。方法技术规范也可确保由工程师确定的程序获得满意的效果。然后对预定区域的被压实土壤进行抽查。任何发现压实不足的试验结果都会导致对该区域进行返工。一些区域将试验压路机用作抽查试验的替代方法，试验压路机通常是负载沉重的拖车或自卸车。如前所述，试验压路机被牵引至现场，车辙的深度可显示出压实不良的区域。

无论采用何种方法检查压实质量，操作员都会随着项目进展对作业的质量进行猜测。通过抽查和试验压路机来检验质量，只能对更大的总压实面积中的较小面积进行试验。这样，许多区域就存在压实不足的可能性，如果造成建筑或道路在未来出现问题，则需要付出高昂代价。

机器集成式压实测量系统可为操作员提供有关压实状态的数据，这改变了这种困境。经过培训的操作员可使用机器集成式压实测量来确定压实何时达到规范，或某区域何时出现水分问题。机器集成式压实测量可提示操作员会影响压实质量的地底物体，例如粘土球、树干或较大岩石。



传统测量系统只可对压实区域的一小部分进行分析。



机器集成式压实测量可对整个压实区域进行分析。



机器集成式压实测量可预测或说明土壤硬度。

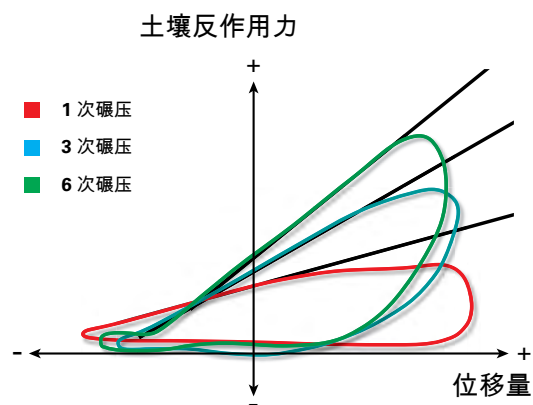
机器集成式压实技术测量的参数是什么?尽管我们在探讨压实效果时频繁使用密度这一术语,但这些系统不会对土壤密度进行测量,了解这一点非常重要。由于压实作业的可变性,这些系统不会直接测量任何数据。所测量的是用于预测或说明土壤硬度的几个因素。如前所述,硬度是具有特定形状和成分的土壤在负荷的影响下抗变形或弯沉的能力。由于密实材料在负荷下可能易碎,硬度比材料密度能更好地说明承载能力。材料需要具有弹性,不易破裂。

有两种不同的测量技术:基于加速计的系统 and 基于能量的系统。它们以两种完全不同的方式进行测量,因此所测量的内容也不同。

基于加速计的测量 - 多数制造商都提供基于加速计的系统。他们利用安装在钢轮上的加速计测量土壤对于振动轮敲击的反应。有两种不同的方法被用于进行这些测量。

一种方法称为力学位移法。使用安装在钢轮轴上的加速计来测量钢轮的位移量。通过测量钢轮的加速度,在了解了钢轮特性、振动器和整机重量与分布的情况下,就可以计算达到一定位移量所需的力量。土壤越坚硬,使钢轮压入地下一定深度所需的力量越大;或者,土壤变硬时,恒力使钢轮向下更少压入土壤。由于冲击地面时钢轮的接地面积会发生变化,此方法只可用作评估,无法用于进行准确测量。

力学位移



曲线的斜率越大,土壤越硬。



加速计测量土壤对于振动轮敲击的反应。



压实仪值 (CMV)

第二种方法称为压实仪值 (CMV)。由瑞典公司 Geodynamik 于 20 世纪 70 年代发明, Caterpillar 和其他几家制造商当前正在使用此方法。安装在钢轮上的加速计不计算钢轮的位移量, 而是对在振动频率下产生的反弹或重力加速度进行测量, 测量两次振动频率下的重力加速度 (这也称为“基谐波”)。将这两个值套入公式来计算可说明土壤硬度的压实值, 该值称为压实仪值 (CMV)。

换句话说, 测量的基本原理在于, 压路机的动态反应随地下硬度增加而变化。与落锤式弯沉仪有些类似, 基于加速计的系统测量的是压路机钢轮离地“弹跳”的程度。未压实土壤容易吸收振动能量, 但是地面随着压路机增加碾压次数而变硬, 能量开始远离表面, 钢轮容易在振动力的作用下更快速地反弹。对增加的反弹量进行的测量可用于说明压实效果。

反弹会随着土壤硬度增加变得更加明显。地面的共振频率与机器的振动频率一致时，土壤达到最大硬度，无法再接收压路机的压实能量。在这一临界点上，机器开始解耦。无论采用何种测量方法，基于加速计的系统都会监控机器临近解耦的程度。此种测量称为共振仪值 (RMV)，被用作说明硬度测量有效程度的仪表，机器越接近解耦，测量有效程度越低。

取决于土壤成分和压路机特性，基于加速计的系统可对约 1-1.2 m (36-48 in) 深的深层土壤进行测量。此读数是“平均值”，因此无法分别说明任何给定深度上的精确硬度。但深层读数有利于找到底基层中对作业质量和结构长期性能产生影响的底物质。

基于加速计的系统存在的一个缺点是，钢轮必须振动才能进行测量。由于粘性和半粘性土壤具有减振效果，这使得基于加速计的系统不适用于这些材料。因此，将基于加速计的系统用于凸块压路机或静态压实应用中是无效的，因为测量无法在没有振动的情况下进行。

基于加速计的系统存在的另一个缺点是测量深度。如前所述，取决于土壤类型和被压实材料的硬度，测量深度可达 1.2 m (4 ft)，这显然比被压实的任一摊铺层更深/更厚。因此，您所获得的是多个摊铺层的硬度平均值，或者这还包括了底基层材料的硬度。

CMV - 如何实现？

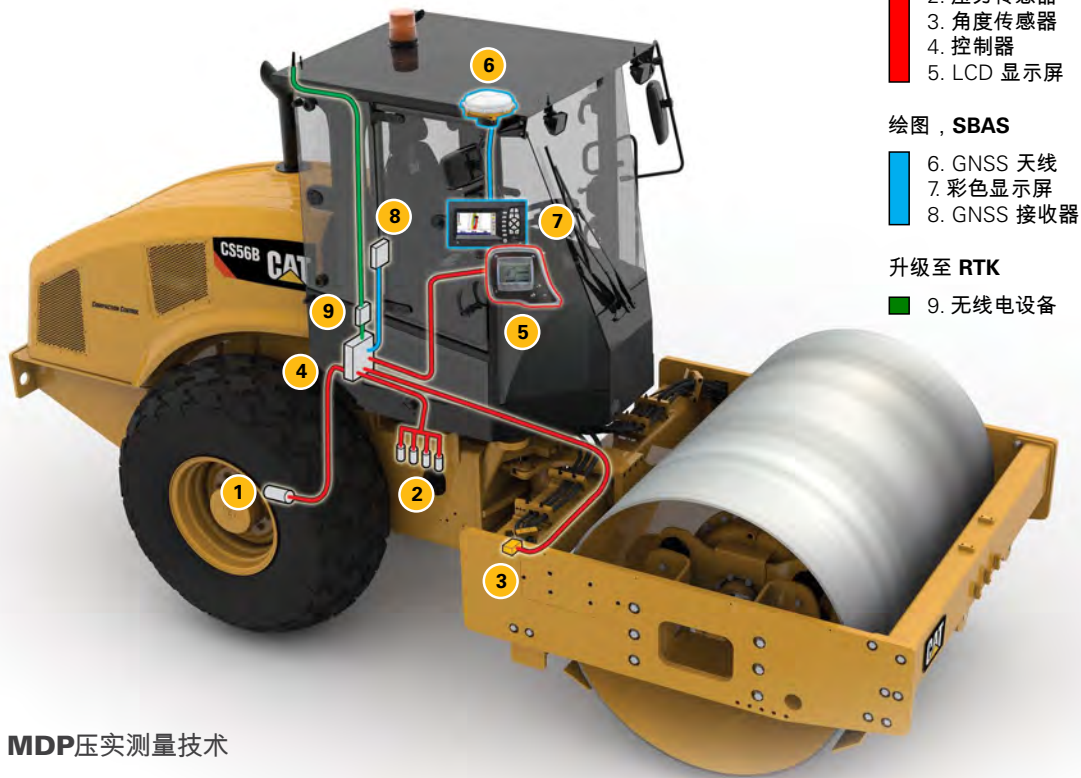


振动能量通过振动轮传到土壤。



土壤中的物质因此产生振动，加速计会监测并记录下来该振动。

CMV 会计算出土壤硬度的理论值。



MDP压实测量技术

基于能量的测量—现今可以使用的另一种测量技术可测量土壤压路机在地面上滚动时遇到的滚动阻力的大小。其工作原理是，克服松软土壤的滚动阻力所需的能量比密实土壤大。随着碾压次数的增加，土壤被压实，硬度和承载强度随之提高。随着材料的阻力逐渐降低，压路机需要较小能量即可通过被压实区域。因此，可以将滚动阻力和克服滚动阻力所需的能量与材料硬度进行关联。目前只有 Caterpillar 可提供基于能量的压实测量技术，此技术称为 MDP 压实测量技术。

基于能量的测量具有多种优势。机器驱动功率与滚压试验相似：车轮陷入地面的程度越浅，车轮在地面上移动所需的能量越低。因此，MDP 和滚压试验中的车辙深度之间具有很大的关联性。MDP 和土壤硬度之间也有很大的关联性，但是基于能量的最大测量优势应该是，它可以更加具体、直接地计算并说明土壤支撑负荷的能力。如果地面的坚硬程度足以将压路机器传输的能量最小化，那么其坚硬程度足以达到土壤压实要求。对于振动和非振动压路机，均可对这种关系进行测评，这种关系是压实土壤的根本原因。

由于基于能量的压实测量方法在土壤硬度计算中不需要测量振动能量，因此可用于包括粘性和非粘性土壤的所有土壤类型。还能够像用于光轮压路机一样用于凸轮压路机。振动系统激活或未激活时均可使用。因此，基于能量的系统比基于加速计的系统更加多用，可用于更多应用。

测量系统

- 1. 速度传感器
- 2. 压力传感器
- 3. 角度传感器
- 4. 控制器
- 5. LCD 显示屏

绘图，SBAS

- 6. GNSS 天线
- 7. 彩色显示屏
- 8. GNSS 接收器

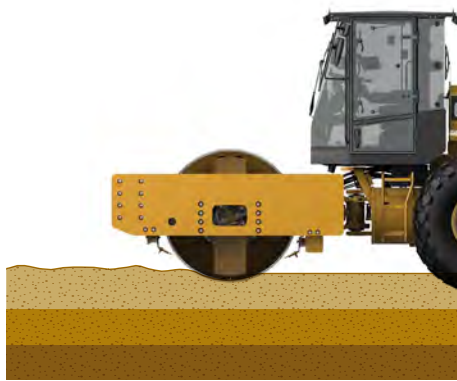
升级至 RTK

- 9. 无线电设备

此外，基于能量的系统无法在与基于加速计的系统相同的测量深度上进行测量，其测量深度约为 30-60 cm (12-24 in)，这取决于土壤成分和压路机特性。此深度接近于典型摊铺层的深度，因此所测量的是正在压实的土壤，而非几个摊铺层和/或被压实的摊铺层下面的底基层材料的平均值。此深度与便携式试验设备的测试深度相当，这使得承包商可以将二者进行关联。

基于能量的系统存在一些缺点。无法在与基于加速计的系统相同的测量深度上进行测量，因此有时无法找到基于加速计系统可发现的地底物体或底基层中压实不良区域。同时，在振动系统启用的情况下运行基于能量的系统时，无法向操作员提供机器接近耦合的警告数据。

MDP - 如何实现？



通过松软地面
所需能量较多。



通过坚硬地面
所需能量较少。

MDP 测量克服滚动阻力所需能量，这是一种更具体、更直接的土壤硬度测量方式。

影响机器集成式压实测量结果的因素—如前所述，振动压实是一个复杂的过程，多种因素会对达到压实/密度目标所需的整体压实力产生影响。相对于使用传统便携式试验装置/方法在不到整个压实表面 1% 的面积上进行试验，操作员使用机器集成式压实测量技术可获得整个压实表面 100% 面积上的数据。这使得操作员能够找到压实不良区域或坚硬的位置点，并采取补救措施，以获得更加均匀的最终效果和更好的质量。

因此，无论使用何种技术，都有一些因素会对机器集成式压实测量结果及其与已知现场测试数据的关联造成影响。必须了解各因素的影响才能最充分地利用机器集成式压实测量技术。了解各因素影响测量的方式可帮助承包商进行一致的测量，产生最少的变量。为此，广泛了解三个主要因素可为您带来帮助：

- 试验现场的正确准备
- 试验方法和数据采集
- 机器参数

试验现场准备

试验现场的正确准备和对试验材料状态的严格控制极为重要。无法确保材料的均匀性以及底基层和原材料的压实一致性将直接影响到质量和试验数据的准确性。

1. 使用多种材料进行底层或基层施工 - 通常,需要使用各种材料进行底层或基层的施工。例如,坚硬的碎石基层可能与使用相对松软的粘质土建成的基层相邻。覆盖一层厚度可能达 1 m (39 in) 的较厚砂砾时,在岩石上测得 CMV 将明显高于在粘质土基层上的测量值。由于便携式试验装置无法在深于表面砂砾的深度上进行测量,因此使用该装置对表面密度进行测试将得出几乎相同的数值。基层硬度对基于加速计的测量具有重要影响,对于基于能量的测量也会产生一定影响。

较硬的基层或底基层可使其上的填充材料更易被压实,并达到更高的压实程度。因此,Caterpillar 建议在运入、摊铺和压实新填充材料之前对最底层挖方进行测绘和滚压试验,以确定其状态。可能需要对硬度明显高于或低于作业现场大部分地区的一些区域进行处理。目标是实现压实的一致性,这需要基层或底基层被均匀压实并具有一致的承载硬度。

2. 土壤类型 - 被压实土壤的类型对于得出的 CMV 或 MDP 具有很大影响。

这是因为细土和颗粒土壤的内部土壤弹率和减振率不同。这将影响土壤对于振动的反应,反过来会影响测量方式。

3. 含水量 - 所有试验和压实均应在地面状态已知且可接受的情况下进行。不建议在潮湿的“绵软”或饱和和材料上进行试验。土壤的含水量是一个对压实效果具有重要影响的变量,在作业现场经常用到此参数。它也是导致相同土壤类型产生 CMV 变化的主要原因。承包商有一些控制此因素的方法,可以使用水车加水,并与土壤进行混合,或者翻耕土壤并使其干燥。每种土壤都有实现最高效压实的最佳含水量。对于沙质土壤,其范围为 4% 至 12%,对于粘土质土壤,其范围为 9% 至 22%。



准备实验现场



使用机器集成式压实测量系统测得的土壤硬度指标会因土壤中的水分填充土壤颗粒之间空隙的方式而受到土壤水分的影响。如果空隙中的空气较多，空气的压缩性会使读数降低。如果水分较多，其相对不可压缩性会使读数升高。在某个临界点上，含水量可作为颗粒之间的润滑剂，使颗粒相互滑动。这也会使 CMV 值降低。

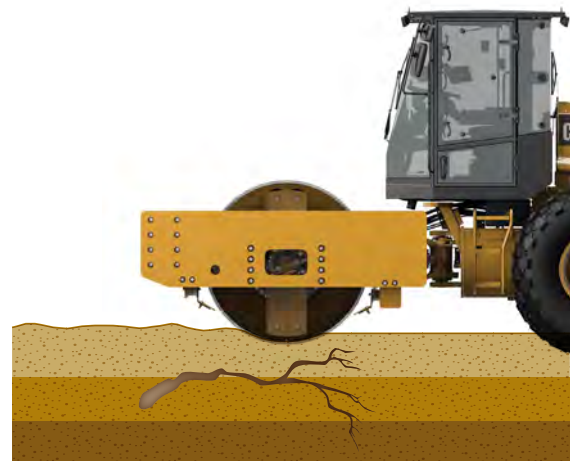
使用机器集成式压实测量技术的一个优势是，可根据土壤的压缩程度间接检测土壤的含水量。例如，随着土壤被干燥，在颗粒土壤上运行的压路机需要进行更多次碾压才能达到目标值：土壤越干燥，需要的碾压次数越多。操作员可在显示屏上目

视跟踪这一状态，可以调遣水车对特定干燥区域进行处理。在潮湿土壤上，压路机的压实力会使水分从较低分层转移到较高分层中，进而导致读数降低。操作员可调遣机器对地面进行翻耕，进而使过多水分蒸发。

4. 埋入土壤的隐藏物体 - 对看似均匀的摊铺层进行压实时，在小区域进行的机器集成式压实测量有时会明显高于或低于周围区域。对此的第一反应是使用核子密度仪或轻型落锤式弯沉仪等表面读数类仪器对该区域进行检查。由于此类装置的测量深度不同，此类检查很少能够得出与集成测量相同的测量值变化。

导致机器集成式压实测量定位读数高的原因很可能是土壤内埋有大块岩石或混凝土，可能就在几英尺以下。定位读数低可能是因为颗粒骨料内埋有粘土球或橡胶轮胎。存在集成式压实测量值的变化时，需要对该区域进行挖掘才能确定具体物体是什么。这可能不具有可行性。

通过长杆插入地面的探针或动态圆锥贯入仪可以在不进行挖掘的情况下帮助我们深入了解异物的性质。如果该变化会导致完工路面在未来使用中出现问题，则必须就此问题做出决定。支撑土壤在承载强度（硬度）上的变化会使路面产生应力，这会缩短路面的寿命周期。



警告：在地下可能埋有未爆炸弹药的现场作业时，建议在挖掘和压实前使用金属探测器进行检查。

试验方法和数据采集

1. 与已知现场试验方法的关联 – 不熟悉机器集成式压实测量系统的承包商自然希望将数据/测量与已知现场压实试验方法联系起来。Troxler (核子) 密度和沙锥密度试验是多年以来的行业标准, 并具有一定关联性, 但它们与机器集成式测量系统测量的土壤性质或土壤深度不同。

所用的现场压实试验方法可直接影响与机器集成式压实测量值的关联程度。机器集成式压实测量技术 (CMV 或 MDP) 所测的有效土壤量远远高于常见现场测量方法所测的土壤量。已知现场压实试验测量装置都无法对相同深度、相同土壤量, 甚至是相同的土壤性质进行测量。

因其便携性和相对易用性, 以下现场试验方法被广泛使用:

- 动态圆锥贯入仪 – 可在较深的深度进行测量, 但是只能间接测量土壤的抗剪强度和摩擦力。
- 轻型落锤式弯沉仪 – 所测的有效材料量约为机器集成式系统所测材料量的 1%。因此, 被测材料的任何不一致性都会因被测材料数量的差别而放大。

取决于试验种类和进行试验的次数, 测量装置与机器集成式测量系统测量数据之间的关联性是可变的。试图将机器集成式试验数据与已知现场试验进行关联时, 使用大型平板负荷试验或落锤式弯沉仪可建立最满意的数据关联性。

使用机器集成式压实测量技术, 需要谨记的最后一点是, 您所测量的土壤硬度指标在您进行测量时会发生变化。



因此，您无法在重新测量时得出与上次碾压完全相同的读数。这为试图使用其他一些已知现场压实试验来验证压实测量值 (CMV 或 MDP) 的机构带来了困扰。

由于使用便携式装置进行的后压实现场试验不会对土壤造成影响和干扰，因此可反复进行。配有集成式压实测量系统的机器在每次碾压时都会因其重量而使土壤发生变化。平板负荷试验对土壤会产生相似影响，土壤结构本身会在测量期间发生变化。

机器集成式压实测量值会随着土壤接近其最终的最大压实状态而更具可复验性。此时，各次碾压之间的压实测量结果只有很小的变化。但是，如果土壤结构易碎，由于土壤结构在碾压中达到一定坚硬程度，而在下次碾压时破碎，压实值就会出现上下波动。这称为“振松”，在一些颗粒土壤类型中经常出现。

2. 记录的试验数据量 – 小范围或有限数量的测量也会影响与机器集成式压实测量技术的关联程度。建议您使用较大范围的现场压实试验结果与集成式试验结果进行对比，避免进行单点关联，单点关联无法提供足够信息进行分析。

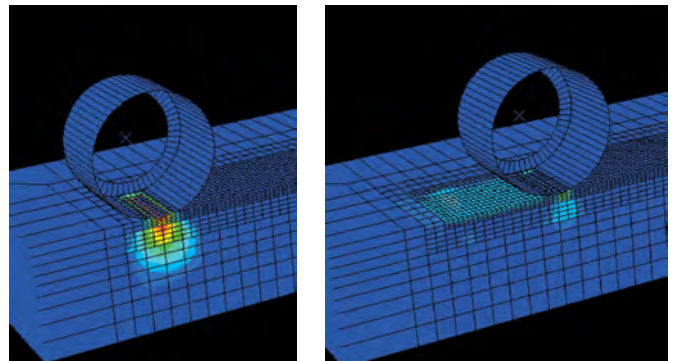
3. 数据采集 – 现场试验结果与机器集成式压实测量值立体匹配的不确定性可导致出现测量变化大和较差的关联性。建议在对相关数据点进行匹配时要格外小心，或使用配有 GNSS 绘图/数据采集功能的压路机正确建立试验现场的位置详情与现场试验数据之间的关联。

机器参数

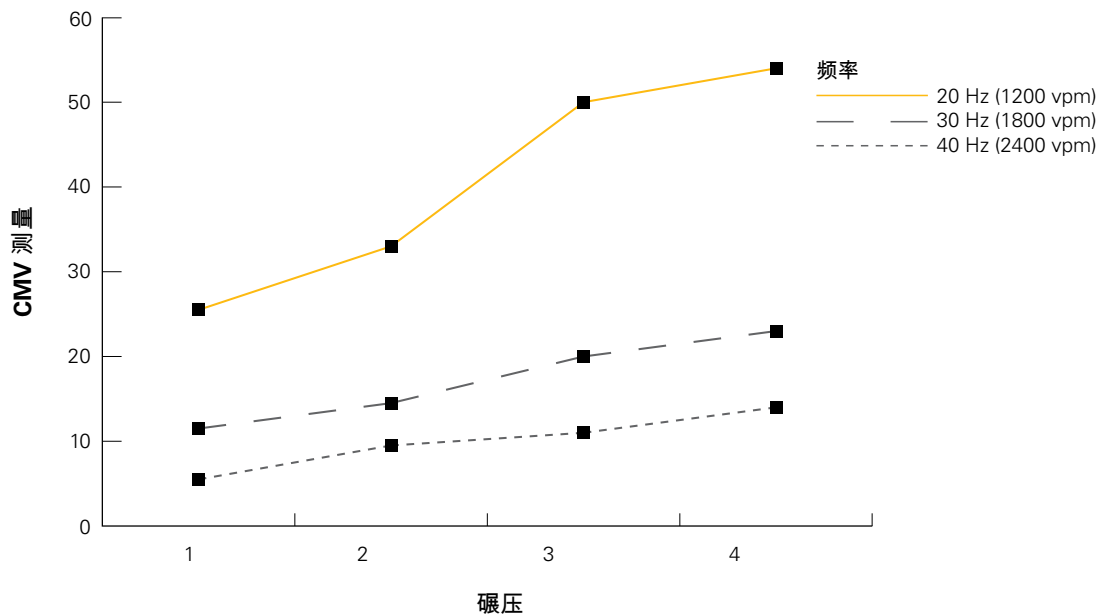
从设计角度以及从现场经验角度而言，机器集成式压实测量技术对于特定机器运行参数很敏感是众所周知的。了解该系统所测量的内容就更容易理解某些因素的不当应用将如何导致出现错误的的数据/输出。

1. 振幅 – 如果钢轮振幅高，则钢轮振动的影响将被更深入地传输至土壤。由于被测土壤量增加，此振动深度可改变机器集成式压实测量。同时，深层土壤更具有不同结构和类型的可能性提高。

如果您需要的是有关深层土壤变化的信息，应使用高振幅。如果您所关注的只是最上面的分层，建议使用较低振幅。即使在低振幅下，CMV 的土壤测量深度也可达到一米或更深。



高振幅可更深入地传输至土壤。



2. 频率-带有 CMV 的 Cat 压实控制使用钢轮振动频率与两次钢轮频率下钢轮对地面频率反应的测值的比值来计算压实值 (CMV)。即使土壤硬度保持不变,更改土壤压路机的振动频率,结果测量值也将随之更改。这是因为在具有给定硬度的土壤上,如果在低频率下进行测量,CMV 测量容易出现较高读数,如果在高频率下进行测量,容易出现较低读数。产生这一现象的原因很复杂,这关系到土壤的自然频率与振动轮频率的比率。

该图表说明了更改频率将如何影响 CMV 测量。如果所有其他机器和土壤参数相同(例如,地面速度、振幅、土壤类型等),每种频率设置下的 CMV 之间都会出现很大差别。您使用的频率将影响 CMV 测量。无论土壤硬度如何,这一点都是不变的。

3. 地面速度-机器集成式压实测量结果在一定程度上会受到地面速度的影响。通常,较慢速度可使振动轮与土壤进行更多的接触,土壤硬度可以更快提高并达到更深的程度,因此只需较少的碾压次数和较短的总时间即可达到压实要求。数据表明,较快的地面速度通常会降低 CMV 结果,但也会增加 MDP 结果。由于土壤类型、含水量和其他因素会在试验期间产生干扰,因此难以准确量化地面速度的影响程度。

需要进行多次碾压以达到最终压实水平(以土壤硬度来表示)时,最高效的方法是使用较慢的地面速度并使振动器作用于钢轮下的土壤。较慢的速度可使振动轮在单位行驶距离上产生更近的冲击间隔和更多次的确实操作,所需碾压次数也更少,因此达到压实要求所需的总时间更短。

还有燃油效率:两次低速碾压所消耗的燃油比六次高速碾压所消耗的燃油量少。一般经验法则:缓慢行驶以进行快速压实,并实现有效性的最大化,但避免达到解耦或振松的缓慢程度。使用机器集成式压实测量技术,建议保持合适的恒速运行,在岩石和粘质土上约为 1-2.5 km/h (0.62-1.5 mph),在沙土和砂砾上为 2-5 km/h (1.2-3.1 mph)。可使用 Cat B 系列压路机的自动速度控制来帮助控制此因素。

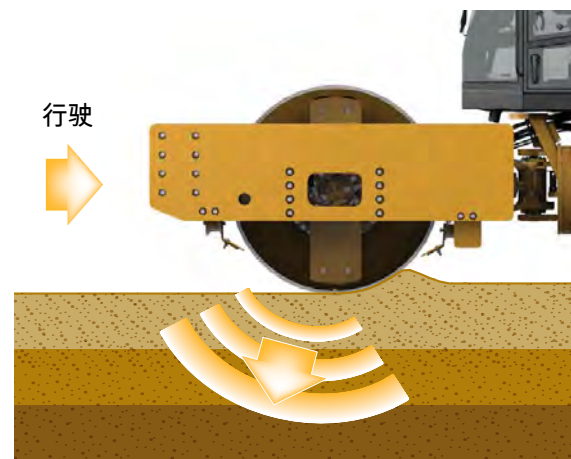
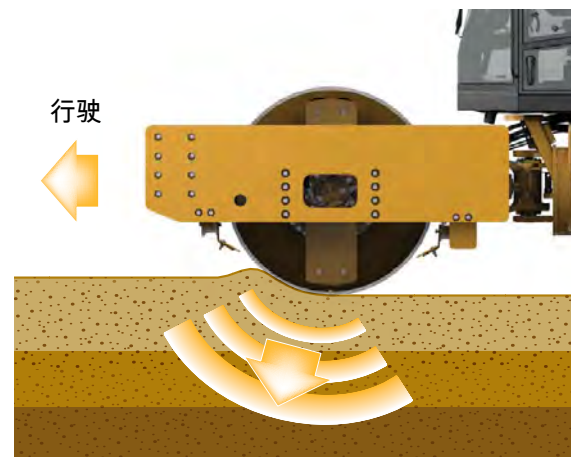
4. 行驶方向 - 对于给定土壤硬度, 前进或后退的行驶方向会对记录的机器集成式压实测量数据值产生影响。前进和后退测量值之间的变化量通常在 5% 至 20% 的范围内, 在极其松软的土壤上变化较大。

机器集成式压实测量结果因行驶方向而不同, 这是因为钢轮通过土壤时, 其内部的偏心配重会增加或减少施加至钢轮的净力矩 (重量平衡、钢轮前/后方的车轮和其他因素也是导致这一现象的原因)。此力矩可影响传输至地面的有效振动的方向, 会导致钢轮对已压实区域或尚未压实的松软区域产生趋向性。

5. 振动状态 - 激活的振动系统也会影响机器集成式压实测量值。这种影响可能很明显, 也可能不明显, 这主要取决于材料。对于试验数据而言, 支持您在振动系统关闭的状态下进行测量, 此技术可产生更加可靠的结果, 这是因为影响测量的变量减少的原因。MDP 等基于能量的技术支持此种测量。

6. 解耦或双跳 - 土壤硬度增加时, 其自然或共振频率将接近钢轮振动频率。发生这种情况时, 钢轮开始在钢轮振动频率下完全弹离土壤表面, 测得 RMV (共振仪值) 将增加。RMV 只是对钢轮解耦程度的测量。机器解耦程度越高, CMV 测量可靠性越低。

行驶方向



偏心力矩与机器行驶方向一致时 (顶部插图), 施加至钢轮的净力矩会使加速计在一定角度上对土壤进行感测。偏心力矩与机器行驶方向不一致时 (底部插图), 扭力改变, 测量角度也随之改变。这会使前进和后退操作产生始终不同的 CMV 读数。

[机器集成式压实测量程序]

采用集成式压实测量技术的土壤压路机可对各种因素进行测量,这些因素可为驾驶室内的驾驶员提供实时土壤硬度指标。许多变量都会影响到此种方法的有效性,并直接影响测量的一致性。因此,通常使用前文所列的方法或其他便携式试验设备对测量进行验证。随着系统越来越先进,其应用更易被大家了解,得出的结果也更可靠。

机器集成式压实测量通常具有两种运行模式:生产模式和试验模式。

生产模式 - 在压实的初始过程中使用生产模式。此种运行模式的目的是尽可能快速、高效地将尽可能多的土壤压实到可接受的程度。在生产模式期间,机器集成式压实测量技术可为操作员提供实时土壤硬度指标,还可确定密度未达规范要求需要进行压实操作的压实不良区域。

在生产模式中,机器振幅设置通常较高,只有在达到标称目标值时地面才能被压实。操作员可通过监控显示屏发现压实不足的区域。最主要的问题是高效地完成作业,对尽可能多的填料进行压实,而不对具有足够硬度的区域进行过度压实。由于机器在高振幅下运行,可能随时会发生解耦。由于各种变量(地面速度、方向、解耦和土壤湿度变化)的影响,在此运行模式下得出的集成式压实测量值通常比实际达到的压实程度具有更大的变化性。这可以被看作是压实测量的粗略方法,在缺乏准确的或低变化性数据的情况对这些区域并不是很重要时采用。

试验模式 - 生产模式压实结束后,可立即将压实测量系统用作试验压路机,以在试验模式中验证作业质量。通常,这一过程比生产模式更加准确。可对包括速度和行驶方向在内的多种变量进行控制并使其保持不变。这样可以帮助确保这些变量不影响测量。

承包商需要能够说明在特定阶段或施工区域具有准确的地面硬度指标的“现场”数据时,可使用试验模式。便于以可控方式在项目的已完成阶段运行压路机时,可在施工阶段定期实施此项程序。

要获得准确结果,操作员需要保持所有变量尽可能不变。这个阶段可被看作是土壤压实的精确阶段。



建议试验过程

1. 立桩标出要试验的作业现场区域，并计划出操作员可以在整个压实试验操作中向前行进的滚动模式。
2. 确定 2.5-4 km/h (1.5-2.5 mph) 之间您可以保持的目标地面速度。越慢越好，使用自动速度控制可实现速度的最佳一致性，这样可得出更准确的数据并进行更好的压实。
3. 设置低振幅。这可使钢轮解耦的几率降低，也不会使测量在土壤中穿透过深。这样可以轻松与其他试验方法建立关联。
4. 开始振动（或 MDP 的静态滚动）和行进，在向前行驶的同时以恒定的地面速度、振幅和频率开始压实测量。
5. 各次钢轮碾压应刚好接触或几乎没有重叠。在末端或回转区域重叠。注意：重叠区域可被看作多次碾压，会导致数据出现不一致性。
6. 手动采集数据非常繁琐，需要尽可能准确地在立桩标出区域内与工作现场的位置准确匹配。如果没有 GNSS (GPS) 选项，多数机器集成式压实测量系统都不支持自动数据保存。使用 Excel 等数据表软件按照行驶方向对数据进行筛选，只将前进数据用于分析。标出您认为对于使用与已知现场压实测量方法相关联进行的检查或实验有足够重要性的位置。
7. 为提高质量，在被测和被压实的整个区域上以网格形状测量土壤的含水量。可根据作业现场规模和承包商的要求调整网格尺寸。这可为压实值的分析提供更多信息，并且网格形状可用于制作土壤含水量等量图。压路机完成某一区域的作业后，应尽快采集用于水分测量的土壤样本。
8. 检查手动记录的数据，并选出您希望与其他类型的压实测量装置相关联的区域。选出读数高、读数中和读数低的区域。在每种读数中选出多个区域。
9. 对之前标出的位置进行关联性试验。由于土壤状态在短距离内存在很大变化，不要进行近似计算。

注意：为充分利用机器集成式测量技术，需要使用 GNSS (GPS) 绘图功能记录所有数据以及作业现场相应的定位详情。请参考此指南后面的章节了解有关“智能压实”的更多详情。

机器集成式压实测量总结 -在压实项目中,质量和成本是人们最为关注问题。高效地达到适用的压实目标最为重要。有很多规范和具有历史基础的现场压实测量方法。机器集成式压实测量方法现在为操作员带来了更好的工具,确保以最低成本达到可能的最佳压实质量。

如果使用得当,机器集成式压实测量是一项非常好的技术,但它也具有有一些局限性。机器集成式压实测量无法说明您正在处理的土壤的类型,也无法说明土壤的含水量或物理特性。

机器集成式压实测量技术对土壤的反应性进行测量,以提供承载能力的简要说明。如果设置和操作得当,带有集成式压实测量功能的振动土壤压路机可为操作员提供通过其他方法无法获得的信息。经过培训的操作员可借助此信息对土壤状态进行推断。该数据是土壤硬度指标,并非保证。只是变量太多。但是,经过培训的操作员可以理解测量所说明的内容和测量规定的操作方法。所用流程通常比技术本身更为重要。



单元 5 智能压实

智能压实是土壤振动压路机所使用的最新技术。准确测量压实程度、将测量值与 GNSS 坐标关联、将其显示在操作员驾驶舱中的现场地图上，以及记录和存储数据以用于归档的功能都是以前无法想象的。只有时间能够说明接下来将出现怎样的技术创新。Caterpillar 将处于此类讨论和探索的前沿。



[什么是智能压实?]

在不久之前和现在,智能压实都是与土壤振动压路机相关的压实测量系统中所用的术语。不同政府机构和设备制造商对于智能压实的定义不同。一般而言,智能压实可被定义为应用于压实过程中通过排除人为臆测来提高工作现场效率的压路机集成式技术。这些技术可为操作人员提供帮助其确定压实进度和/或压实完成时间的实时压实信息。

有了这个定义,我们可以说之前所描述的机器集成式压实测量技术只是智能压实的一种形式。土壤压路机上的集成系统可实时提供有关作业现场压实力的详细信息,使操作员和作业现场负责人得到以前无法获得的信息。

更加复杂的系统还可将数据绘制成图,以提供已完成作业的直观透视,还可存储用于随后进行分析的数据。

美国运输部制定的早期规范的一个示例是:

智能压实 (IC)

此过程涉及到在压实期间使用配有基于加速计的测量系统和全球定位系统的振动压路机进行测量和记录颗粒处理的时间、位置和压实参数。

他们现在对于智能压路机有独立的定义或要求:

智能压实 (IC) 压路机

这种压路机应为配有基于加速计的测量系统且能够记录压实参数测量的压路机。

同时,美国联邦公路管理局 (FHWA) 对智能压实进行了如下描述:

智能压实 (IC) 是指使用配有集成测量系统 (机载计算机报告系统、基于全球定位系统 (GPS) 的绘图功能和可选反馈控制) 的现代振动压路机对土壤、骨料基层或沥青路面材料等道路材料进行的压实。IC 压路机通过集成测量、记录和控制系统,有助于对压实过程进行实时压实监控和及时调整。IC 压路机还可以不断记录色标图,使用户能够查看各色标图中压路机的准确位置、压路机碾压次数和材料硬度测量。

欧盟也制定了一个定义使用智能压实使用的方法。在其“配有连续压实控制 (CCC) 的土壤和沥青压路机评估指南”宣传册中,欧洲建筑设备委员会 (CECE) 创建了一个对采用连续压实控制技术的设备进行分类的矩阵。(参见附录)。



需要注意的是，智能压实的最新定义很明显不仅仅对集成压实测量和实时向操作员显示的功能进行了定义，还定义了记录定位数据以及对数据进行存储以用于归档、日后分析和记录保存的功能。因此，智能压实的定义是不断演变的。

Caterpillar 认为，智能压路机应该能够进行压实测量、将测量与 GNSS 坐标关联、显示测量地图、记录数据和保存结果。这些功能在为操作员、承包商和项目业主控制时间和成本方面具有很多优势。因此，Caterpillar 当前使用如下智能压实定义：

智能压实 (IC)

是可以测量土壤压实、向操作员显示测量结果、使用 **GNSS** 绘图系统记录压实结果并将其绘制成图，并且可以随测量系统来控制或引导机器压实力的系统。

此定义可用于振动和非振动压路机，并且不需要基于加速计的测量系统。如前所述，MDP 是一项新技术，它相对于基于加速计的压实测量技术具有很多优势，而后者却取决于应用。

在下文，此指南中的智能压实仅指压路机配有集成压实测量功能 (CMV 或 MDP)、绘图功能，并且能够记录和保存数据以进行归档和随后非机载分析的情况。

作业现场的压路机定位

机器集成式压实测量技术可与全球导航微型系统 (GNSS) 技术相结合，能够利用天空中的不同卫星群进行作业现场的准确定位。GNSS 技术应用广泛，可实现不同级别的准确性，其中一些应用需要非机载基础设施提供定位校正数据。



有了此类数据和详细信息，现在可以将压实测量技术与作业现场的物理位置匹配，还可对其进行配置，以将包括碾压次数、机器行驶方向和许多其他机器设置在内的各项数值绘制成图。

无论采用何种机器集成式压实测量技术，该系统均可随时提供被压实土壤的实时测量值。能够绘图以及在图上的准确位置记录并标出测量值，藉此使获得的信息数据更加有用。

定位数据是如何实现的？绘图系统利用全球导航卫星系统 (GNSS) 为已记录的各项测量值提供相应的绘图数据。这包括 GPS (由美国国防部运营) 和 GLONASS (由俄罗斯政府运营)，以及未来上线的其他系统，其中包括欧盟伽利略系统和中国的北斗导航系统。

利用这些系统中的已知卫星位置通过三角测量方法将位置绘制成图。卫星系统不够准确，需要进行一定程度的校正才具有实用性。土壤压路机上的绘图系统使用增强技术对卫星信号进行校正，并提供符合要求的准确度。有两种主要增强形式：SBAS 和 RTK。

多数系统利用 SBAS 或基于卫星的增强系统校正卫星定位信号。SBAS 可对多个可作为“定位点”的地面上的站点进行三角测量，以此提供校正测量值。SBAS 系统的精度通常高达 1 m (3 ft)，不需要非机载基础设施的支持。

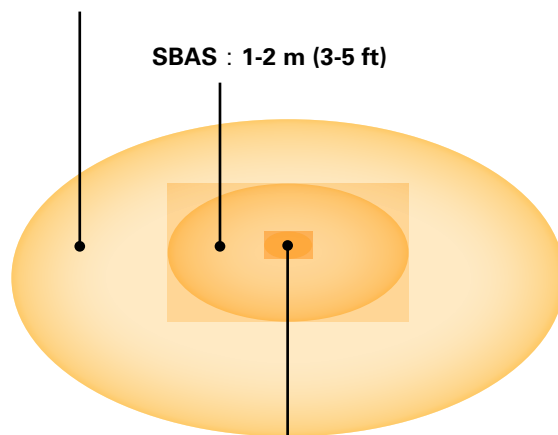
另外，许多制造商使用 RTK 或实时动态定位技术来增强信号以达到校正的目的。此技术需要使用本地无线基站提供校正数据。

其实，最新技术也允许通过手机、调制解调器技术乃至虚拟参考站 (VRS) 来达到 RTK 具有准确度，但这需要更加高级的 IT 系统和支持技术。基站非常昂贵，并且该技术需要部署从压路机上的接收器到基站或移动装置的一系列站点。但是，RTK 比 SBAS 具有更高的准确度，准确度高达几厘米 (英寸)。它还允许系统记录标高数据，这使得压路机也可以将路面标高绘制成图。

由于压路机通常是在土方工程作业现场运行的最后一个机器，此功能具有很大的好处，还可以大大节省用于最终标高测量活动的成本/时间。

卫星系统准确度

自主：10 m (30 ft)
无校正

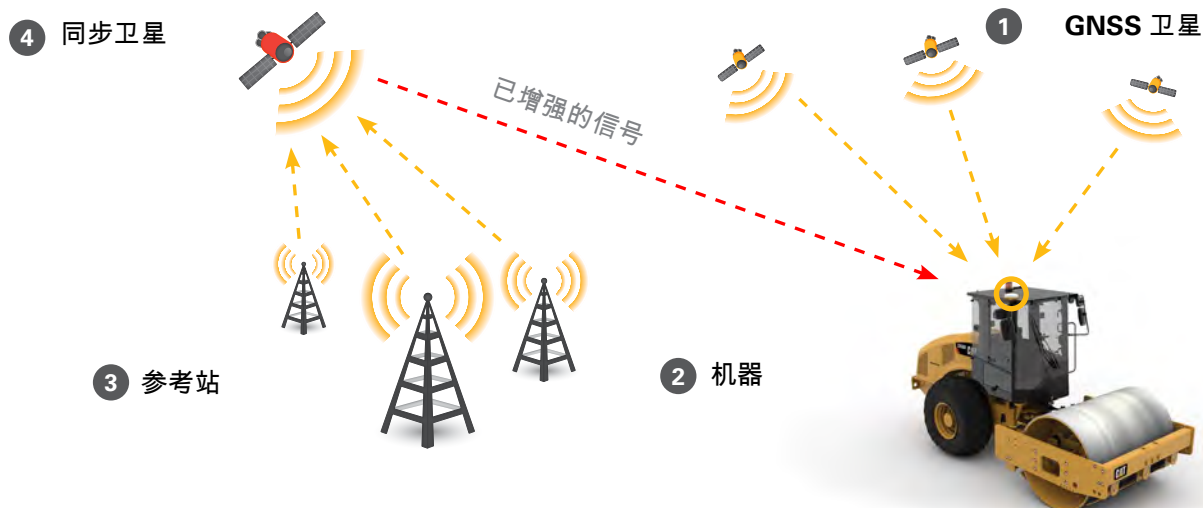


RTK：水平方向为 1 cm (0.4 in)，
垂直方向为 2 cm (0.8 in)
(使用本地基站或使用 VRS)

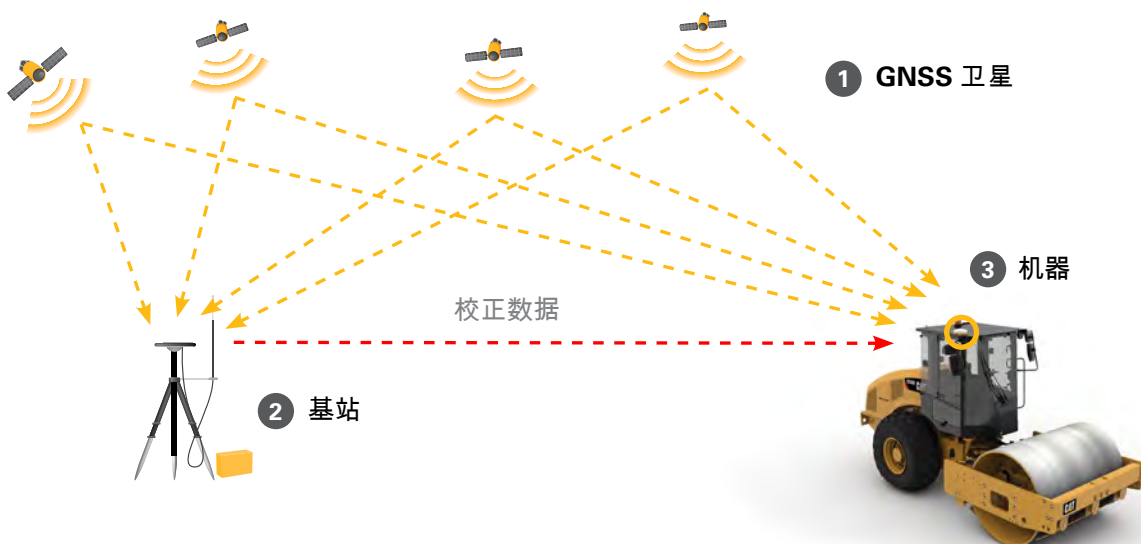
自主



SBAS (基于卫星的增强系统)



RTK (实时动态定位技术)



定位数据的优势

机器集成压实测量自身可以实时揭示有关压实状态的很多信息；但此信息是非常具体的，反应的是瞬间的情况。定位数据使系统不仅可以实时提供进行测量时的单项测量数据，还可提供测量地点背景下的所有测量数据。这使查看瞬时情况变为查看整体情况，并使深入分析成为可能。藉此，操作员和现场管理人员可以查看整个现场压实质量的图片，而非只是瞬时的情况。

此功能是 IC 系统与其他试验方法的一大差别。长期以来，地面人员都是使用便携式试验程序在几个选定位置进行质量试验。如此，此过程即费时又昂贵。这些试验的结果用来说明比实际试验区域更大的区域，两者比例通常为 1 比 100 万，并不具有统计可靠性。IC 可以在碾压的同时对整个现场进行测量。

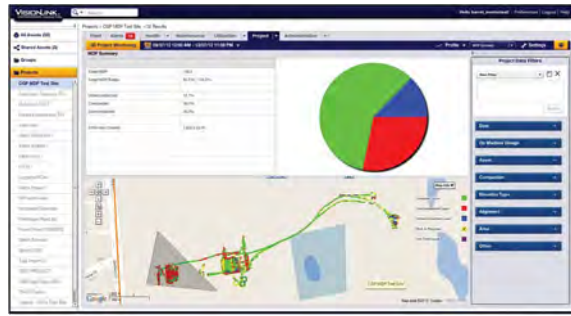
此外，一些系统还可以将工程或建筑 3D 设计导入机载显示器。在已使用无标桩坡度控制的作业现场，或没有坡度标桩和其他地标的作业现场，这是非常有用的。

使用收集的数据

很明显，附加数据为操作员带来了很大的优势，能够在作业现场以更加高效、经济的方式实现高质量压实。许多检查员和道路管理部门需要一些实时的基本现场报告，这些报告是通过驾驶舱内的打印应用程序记录基本压实进程后的文本数据。但是许多机构现在所关注的是更加详细的非机载报告。这需要将记录的所有压实数据从作业现场的机器传输到办公室的电脑上。可通过移动式驱动器手动转移数据，也可通过通讯硬件或软件进行无线转移。

办公室电脑接收到所有数据后，用户就需要对数据进行筛选和排序，以编制检查和道路机构所需的报告文档。如今有很多此类软件程序支持此项任务，包括 AccuGrade Office、SiteVision Office、VisionLink、Veda 等。这些软件解决方案在文件格式类型、功能和价格上各不相同。

VISIONLINK 界面



[智能压实的优势]

质量控制和质量保证记录 – 智能压实可以对已完成的作业进行记录。它还支持过程中控制，能够按日监控或几乎实时监控进程，还具有电子存储和分析结果的功能，这些结果可与作业现场数据的长期或历史记录关联。

提高操作员生产率 – 可向操作员直观显示输出，进而帮助确定土壤是否达到目标硬度。这使得操作员能够获得可据实采取相应措施的实时数据。例如，系统可提醒操作员松软的位置点，显示潜在的含水量问题，并且压路机还可利用 RTK 具有的准确度检查作业现场的最终坡度和标高。

更加高效的作业现场 – 输出的结果可提供整个压实区域的地图，该地图可显示需要进行更多压实的区域或压实已完成的区域。这可将碾压次数和油耗降为最低，还可快速减少作业现场所需的手动压实试验次数，在通过减少需要标记和存储的样本来降低试验成本的同时，将生产保持在恒定水平。

提高对于结果的自信度 – 准确定位可在施工过程中尽早确定存在压实问题的准确位置，支持更加经济的校正，还可降低未来返工的风险。该数据能够以直观、易于理解的格式提供作业整体质量的可靠参考。这可使经过培训的操作员在作业完成后即可推断出压实效果，使其信心百倍地移动至下一区域继续工作，而非等待常规检验的结果。

测量结果



[智能压实的现行规范]

由于政府机构研究并认可了土壤智能压实的优势，并为其使用而制定了规范，因此增加了该技术的应用普遍性。这些规范有助于指定机构在应用该技术时确保能带来可接受结果。

美国联邦公路管理局（FHWA）为土壤智能压实应用制定了一套通用规范。州立运输部可直接按照原样来使用这些规范或按照要求对其进行修改。以下是发布规范的示例：

IC 压路机应符合以下特定要求：

1. IC 压路机应为自行推进式单钢轮振动压路机，配有加速计，其安装在钢轮内或钢轮周围用于测量钢轮和被压实材料之间的相互作用来评估所施压实力。IC 压路机可为光轮式或凸块式。
2. 压路机的输出被指定为智能压实测量值 (IC-MV)，表示以压路机钢轮振动为基础的材料硬度和底层材料产生的反应。
3. IC 压路机上应安装 GPS 无线发射和接收器装置，用以监测钢轮位置和跟踪压路机的碾压次数。
4. IC 压路机应包含能够显示 IC 测量值且具有实时色标地图的集成机载记录系统，这些测量值包括硬度反应值、压路机位置、压路机的碾压次数、压路机速度，以及压路机钢轮的振动频率和振幅。

5. 显示装置应能够通过 USB 端口传输数据。

6. 机载打印机，能够打印压路机标识、测量日期、正在绘制的施工区域、已绘制施工区域的百分比、目标 IC-MV 和不符合 IC-MV 目标值的区域。（打印机选项由各州 DOT 选择）。

其他国家的政府机构围绕各自国家的施工过程制定了各自的规范。尽管与 FHWA 规范不同，但目的却是相似的，都是为设备使用提供标准。

| 规范 | 设备 | 施工现场大小 | 位置规范 | 记录 |
|--|----------------------------------|--------------------------------|---|--|
| Mn/DOT (美国) | 光轮或凸轮振动压路机 (25,000 lbs.) | 100 m x 10 m (基层最小)。最大厚度 1.2 m | 为每种级配材料的类型或来源设定一个校准/控制段 | 压实、硬度、水分、QC 活动和校正操作 (每周报告) |
| ISSMGE (国际岩土学与岩土工程协会) www.issmge.org/ | 根据经验选择压路机 | 现场的宽度为 100 m | 均匀、平坦的表层。履带重叠 ≤ 钢轮宽度的 10% | 滚动模式、压实顺序和测量碾压次数；振幅、速度、动态测量值、频率、跳动操作和相应位置 |
| 土方工程 (澳大利亚) | 建议使用配有橡胶轮和光轮的振动压路机 | 现场的宽度为 100 m | 接近表面的地方不存在不均匀性 (材料或含水量)。履带重叠 ≤ 钢轮宽度的 10% | 压实碾压计划、压实顺序和测量碾压次数、速率、振幅、频率、速度、动态测量值、跳动操作和相应位置 |
| 道路交通研究协会 (德国) | 首选以橡胶轮胎驱动的自由式压路机；可选配有牵引车的牵引振动压路机 | 各校准区域必须覆盖至少 3 个部分现场 ~ 20 m 长 | 平坦，无水坑土壤类型、含水量、分层厚度和支撑分层的承载能力都相似。履带重叠 ≤ 机器宽度的 10% | 动态测量值；频率；速度；跳动操作；振幅；距离；测量时间；压路机类型；土壤类型；含水量；分层厚度；日期、时间、文件名称或注册编号；天气条件；试验履带的位置和滚动方向；应用位置的绝对高度；本地条件和边缘区域的路堤；机器参数和感知偏差 |
| Vägverket (瑞典) | 振动或摆动单钢轮压路机。最低线性压力为 15–30 kN | 最大分层厚度为 0.2–0.6 m。 | 分层应均匀、无冻结。< 0.5 m 的保护层可与底基层一起被压实 | — |

| 压实规范 | 速度 | 频率 |
|---|----------------------------------|---------------------|
| 90% 的压路机压实测量和 (根据 3 次试验得出的) LWD 模数测量的平均值必须达到校准段所确定目标值的 90% | 在校准和生产压实期间相同 | |
| 相关系数 ≥ 0.7 。最小值 $\geq Ev1$ 的 95%，平均值应 $\geq 105\%$ (或在跳动模式期间 $\geq 100\%$)。在 \leq 履带的 10% 时，动态测量值应低于规定最小值。测得的最小值应 \geq 规定最小值的 80%。(平均值的) 标准偏差必须 \leq 一次碾压中的 20% | 恒定 2-6 km/h (± 0.2 km/h) | 恒定 (± 2 Hz) |
| 相关系数 ≥ 0.7 。最小值 $\geq Ev1$ 的 95%，中值应 $\geq 105\%$ (或在跳动模式期间 $\geq 100\%$)。在 \leq 履带的 10% 时，动态测量值应低于规定最小值。测得的最小值应 \geq 设定最小值的 80%。一次碾压中测得的最大值不得超出设定最大值 (确定最小值的 150%)。(中值的) 标准偏差必须 \leq 一次碾压中的 20% | 恒定 2-6 km/h (± 0.2 km/h) | 恒定 (± 2 Hz) |
| 从回归分析得出的相关系数 ≥ 0.7 。单个区域单位 (压路机钢轮的宽度) 的动态测量值必须在相邻区域的 10% 以内才适合校准 | 恒定 | |
| 达到承载能力或压实程度要求。对于路基下方的底基层和厚度大于 0.5 m 的保护层，两个检查位置点的压实平均值 $\geq 89\%$ ；路基的平均值应 $\geq 90\%$ 。两种承载能力比值的所需平均值因分层类型而不同 | | 恒定 2.5-4.0 km/h |

[智能压实操作程序]

与单独使用之前探讨的机器集成压实测量技术相似，支持智能压实的振动土壤压路机具有相似的操作流程，鉴于更加先进的系统可提供其他功能，两者之间稍有差别。有两种运行模式：生产模式和试验模式。

生产模式 –此种运行模式的目的是还是尽可能快速、高效地在前进和倒退方向上对尽可能多的土壤进行压实，直至达到标称目标值。在正常作业参数下进行压实：在岩石填料和粘性土上的行驶速度为 1 至 2,5 km/h (0.6-1.6 mph)，在非粘性沙土和与泥土上的行驶速度为 2-5 km/h (1.2-3.1 mph)，通常设置为高机器振幅。

如果使用具有智能压实技术的压路机，操作员现在可以获得能够说明土壤硬度或承载强度的信息，而非意义模糊不清的简单数据。使用附加的彩色显示、数据收集和存储功能，操作员可获得压路机准确位置的压实快照，还可按照碾压次数、目标压实测量值百分比，乃至逐次碾压的压实目标值变化百分比来对作业现场进行监控（包括充分压实区域和压实不良区域）。操作员还可根据需要对需采取措施以达到压实规范的位置点或区域进行数字标记。可将所有数据从机器转移，以根据需要进行检查、筛选和分析。

在此操作模式中，绘图系统可为操作员提供作业现场压实进程的可视化显示和中等水平的质量保证。但是，由于各种变量（地面速度、方向、解耦和土壤湿度变化）的影响，在此运行模式下得出的压实质量数据仍低于可能达到的水平。但是，它仍可在压实过程中为操作员提供实时数据，以实现效率和一致性的最大化，且排除了猜测的必要性。

当各值接近目标值的范围时，操作员可转移至新的区域继续工作，同时质量控制人员可进行试验以确保作业达到规范或该区域是否已为碾压测试做好准备。



碾压测试模式 – 生产模式压实结束后,可立即将压实测量系统用作试验压路机,以在这个更加精准的运行模式中验证作业质量。承包商需要能够说明特定施工区域中地面硬度的准确性指标文件或地图时,可使用此方法。

此对于各变量的控制和保持其一致性至关重要,因此现在的作业参数为 3 km/h (2 mph) 的恒定行驶速度和低机器振幅设置(或者,如果配备 MDP 的机器出现过度压实、解耦或其他问题,则根据需要将其关闭)。这样可以帮助确保这些变量不对测量和正在收集和存储的用于报告的数据产生影响。

还应注意,在进行试验碾压时,您所测量的土壤压实程度随着进行的测量而改变。随着重型压路机的移动,其静态重力将压力和其他力量传输到土壤下方。因此,操作员在测量时需要注意减少测量时的传输力量。以基于能量的测量系统可以使用静态钢轮(无振动)进行测量,该功能使其成为此类应用的理想选择。



建议试验过程

1. 为操作员规划可以在整个绘制操作中向前行驶的滚动模式。
2. 确定 2.5 至 4 km/h (1.5 至 2.5 mph) 之间您可以保持的目标速度。越慢越好, 使用自动速度控制可实现速度的一致性, 这样可更好地进行数据测量和压实。
3. 设置低振幅。这可使钢轮解耦的几率降低, 也不会使测量在土壤中穿透过深。这样更可能与其他试验方法建立关联。
4. 在显示屏上选择“试验开启”, 并开始振动 (或 MDP 静态滚动) 和行进, 在向前行驶的同时以恒定的地面速度、振幅和频率开始压实测量。
5. 使用 GNSS 定位功能引导机器, 使其在相关区域只进行一次碾压。各次钢轮碾压应刚好接触或几乎没有重叠。在末端或回转区域重叠。注意: 重叠区域可被看作多次碾压, 会导致记录数据的不一致性。
6. 覆盖整个区域后, 在显示屏上选择“试验关闭”。
7. 为提高质量, 在被测和被压实的整个区域上以网格形状测量土壤的含水量。可根据作业现场规模和承包商的要求调整网格尺寸。这可为压实值的分析提供更多信息, 并且网格形状可用于制作土壤含水量等量图。压路机完成某一区域的作业后, 应尽快采集用于水分测量的土壤样本。
8. 检查压实图和数据, 以选出您希望与其他压实测量装置的表格相关联的区域。选出读数高、读数和读数低的区域。在每种读数中选出多个区域。
9. 使用手持式 GNSS 探测器进行关联试验, 以尽可能准确地定位所选试验区域。由于土壤状态在短距离内存在很大变化, 不要进行近似计算。(参见下一章节中对关联试验设备的探讨)。

[使用两台压路机的梯队模式]

多种方法可用于校准压实测量 (CMV 或 MDP) 和所需碾压次数的目标值。承包商会指定其中一些方法, 这可能与本指南中的内容不同。该行业的发展正在向着以将区域均匀压实至可接受水平的实践为重点的方向迈进, 正在放弃对作业现场的所有区域达到特定压实值或密度这一追求。

使用试验段和独立的试验装置进行现场校准

此方法旨在消除测量中尽可能多的变量,并使用与道路或建筑现场实际施工所用的相同的土壤和方法。这种校准非常耗费时间和资源,但却了解流程和对所用技术进行基本了解的最好方式。

1. 选定试验区域,所选区域可在项目进行期间保持完好,并且具有与项目大部分区域相似的土壤、坡度和底土结构。
2. 对试验区域进行挖掘/填充,使其达到一定坡度和水平,以形成试验段的底基层。
3. 驶入振动土壤压路机,并使用智能压实系统在试验模式和低振幅、恒定频率和保持向前方向的 3 km/h (2 mph) 的速度下创建一个基准压实图。
4. 如果压实图显示出较高的变化量 (90% 的值应在平均值变化量的 20% 以内),则试图以较高振幅对基层进行压实,提高松软区域的压实程度,使其更加接近较高值区域。重复步骤 #3。
5. 如果底基层现在已被均匀压实 (符合试验要求:90% 的值在平均值变化量的 20% 以内),则继续步骤 #6。否则,需要选择新的试验段地点 (步骤 #1),或需要对底基层进行补救作业以获得更加一致的地图。补救作业可能涉及到挖掘岩石和粘土球等隐藏物质,或通过石灰或其他添加材料对土壤进行稳定。如果在试验段使用稳定剂,也必须将其用于整个作业现场,试验段才有效。
6. 使用便携式平板负荷试验或轻型落锤式弯沉仪对底基层的压实进行测量,在试验段的整个区域使用一致的试验点模式。由于核子密度或沙锥密度装置所测的土壤特性 (密度) 与振动压路机所测特性 (硬度) 不同,因此应避免使用这两种装置。需要使用准确度可达分米的精准 GNSS 装置对这些试验点进行定位,以便与智能压路机生成的 GNSS 压实图进行正确关联。作为以网格形状进行试验的替代方法,可使用压路机 GNSS 地图并选出几个可代表高、中、低压实值的分散地点。对各范围的值进行至少三次试验 (最少 9 个试验点)。使用更多试验点可获得统计学上更准确的结果。
7. 在各试验点测量含水量。如果含水量显示出较大变化,则关联不会产生一致的结果。

需要注意的是,用于校准压路机的压实测量值的便携式试验装置,其自身测量具有可变性。这就意味着使用该装置多次测量具有相同特性的相同土壤,所得到的结果并非完全形同。例如,使用核子密度测量相同样本可能出现 15% 的变化范围。现行方法是记录读数,将装置旋转 90 度并记录另一个读数。可将两个读数的平均值记作所测量值。

8. 将压实试验值与通过压路机上 GNSS 地图获得的值相关联,并将结果绘制成图,将压实测量值绘制在 y 轴上,便携式现场试验结果绘制在 x 轴上。这称为散射图。
9. 使用曲线适配法确定集成压实测量值和现场试验方法之间的最佳校准曲线。这是仅可用于作业现场土壤类型和底基层压实试验的工具。
10. 获取第一摊铺层的填料,并在特定深度上均匀摊铺。
11. 对材料进行压实,直至压实均匀并且在前进方向上行驶时,集成压实测量值不会出现很大变化。
12. 对这一摊铺层重复步骤 #2 至 #9。此基层摊铺层将拥有其自身的校准曲线,该曲线将应用于整个作业现场的此摊铺层
13. 对填充的所有填料分层重复步骤 #10 至 #12,各分层均拥有其自身校准曲线。
14. 如果地面条件因天气而发生变化,则在试验段重新进行试验碾压,以重新确定达到集成压实测量值可接受水平的要素。



使用土壤压路机(无需独立的现场试验装置)进行集成压实测量结果和碾压次数校准

北欧国家正在使用此流程或相似流程。这种校准更加实用,只需较少时间和资源,提供了一种无需使用其他压实测量即可进行较好的压实控制的方法。其目标是使用压路机确定作业现场材料压实的最大标称水平,并确定达到该水平所需的碾压次数。其目的是使整个作业现场达到一致的压实水平。以下流程使用试验段设定压实基准。由于可以将部分作业现场或整个作业现场作为试验段进行压实,因此试验段是可选项。

1. 选定试验区域,所选区域可在项目进行期间保持完好,并且具有与项目大部分区域相似的土壤、坡度和底土结构。
2. 对试验区域进行挖掘/填充,使其达到一定坡度和水平,以形成试验段的底基层。
3. 驶入振动土壤压路机,并使用智能压实系统在试验模式和低振幅、恒定频率和保持向前方向的 3 km/h (2 mph) 的速度下创建一个基准压实图(试验图)。
4. 检查试验段多个位置的土壤含水量。如果过高或过低,在进行任何随后的压实之前要将其纠正。
5. 如果压实图显示出较高的变化量(90% 的值应在平均值变化量的 20% 以内),则以较高振幅对基层进行压实,直至整个试验段的压实测量值更加一致。重复步骤 #3。

6. 实现均匀压实后,检查多个位置的含水量并记录结果。

7. 取来第一摊铺层的填料。选择试验图功能并使用高振幅设置和 3 km/h (2 mph) 的恒定低地面速度对填料层进行压实。在未压实材料上进行碾压之前,要在各次行程中完成一次前进碾压和一次倒退碾压。所用土壤或岩石填料的含水量应一致且处于最佳水平。

8. 在整个区域上再次重复压实循环,记录各次压实碾压中最主要的压实测量值水平。



9. 不断重复步骤 #8 直至各次碾压之间的压实水平不再出现大幅变化,或压路机开始解耦。
10. 压实测量开始趋于稳定的平均值即为目标值,达到此压实水平进行的碾压次数即为目标碾压次数。
11. 记录这些结果,并相应设置此摊铺层的显示目标值和碾压次数。
12. 使用新试验图对各新摊铺层重复步骤 #7 至 #11。完成后,您将获得各分层的目标压实测量值和碾压次数。
13. 如果多个分层的值几乎相同,则将单一目标压实测量值应用于所有相应的填料分层。
14. 按照常规方法对作业现场进行压实,使用压实图作为指导,以在整个区域上达到一致的压实水平。
15. 凭借在某一区域的长期经验,熟练的操作员可以在不使用试验段的情况下设定目标压实测量值和碾压次数。
16. 如果需要对最终压实水平进行更加精准的测量,则可在试验模式(低振幅、3 km/h [2 mph] 的恒定速度、恒定频率、仅向前方向)下使用压路机。





在作业现场使用未经校准的智能压实值

此流程最为实用，只需很少时间或者不需要额外的时间。必须要注意的是，此流程最适用于之前所描述的压实的生产模式，需要一定的系统经验，以及对该技术运行方式和土壤压实流程的大体了解。

此流程的目标是使用智能压实技术在逐次碾压的基础上对比压实进程中的相对变化，以了解压实力背后的物理过程何时适用于现有条件。如前所述，使用智能压实和集成压实测量技术无法保证压实效果或密度；通常，在作业现场所用的方法比所用工具和技术更加重要。在特定材料上进行一定次数的碾压后，具有给定特性的压路机不再有效，致使压实目标无法实现并使所有后续碾压都成为浪费。了解这一情况何时出现对于停止不必要的时间和油耗浪费非常有用。

1. 依照压实目标、土壤类型、含水量、摊铺厚度等因素尽可能对配有智能压实功能的振动土壤压路机进行尺寸选择。之前提供的详细信息说明了选择压路机尺寸和压路机配置时需要考虑的一些因素。
2. 在将智能压实显示设置为绘制压实测量值的图和对比一次碾压与下次碾压之间变化百分比的情况下，开始在作业现场进行压实。
3. 可对绘图功能进行设置和定制，使其为一次碾压和下次碾压之间特定百分比的变化范围分配特定颜色。例如，将显示设置为在显示碾压变化百分比为 50-100 的区域绘制红色，在显示碾压变化百分比为 10-49 的区域绘制黄色，最后在显示碾压变化百分比为 0-9 的区域绘制绿色。如有必要，可根据经验或作业现场条件对这些范围进行更改。

4. 进行不断碾压和压实，以将地图变为绿色。
5. 如果存在无法变为绿色的区域（一次碾压和下次碾压之间的变化太小或无变化），则表示该区域的土壤适用性可能存在一定问题，或可能需要解决一些底基层问题。
6. 地图上出现足够多的绿色区域，并且一次碾压和下次碾压的压实测量值之间不再出现进一步变化时，按照示例中的说明使用便携式平板负载试验或轻型落锤式弯沉仪。确保在进行压实/试验的整个区域使用一致的试验点模式，或按说明证实压实符合或不符合项目规定的压实目标。
7. 如果试验表明符合压实水平要求，则根据上述内容在作业现场上继续执行此流程。
8. 如果试验表明未达到压实目标，则存在以下两种情况之一。1) 机器尺寸和工作重量不适用于该土壤类型和摊铺厚度和/或 2) 土壤的含水量不正确（过于干燥或过于潮湿）。无论是哪种情况，如果不对某些情况进行纠正，作业现场的压路机都无法进行进一步压实。



[智能压实结果故障排除]

如前所述,几个作业现场条件和操作因素会影响智能压实系统的结果。操作员可凭借经验分辨特定模式,并理解产生与预期值偏差的可能的原因。以下是一些常见问题及相关原因和解决方案。了解这些信息可帮助您在更短的时间内解决作业现场的问题。

问题: 压实测量值低于预期值

原因: 颗粒土壤过于干燥而无法压实。土壤结构中增加的压实效果使土壤出现破碎和振松。解决方案: 进一步压实之前在土壤中加入水。由于颗粒土壤易于排出水分,因此其可吸收很多水分,而不会变得过于潮湿。添加的水量稍多于干燥和排水所需的理想水量。

原因: 土壤成分为粘质土,而非砂砾或颗粒材料。或,粘质土被埋在表层以下,但仍会影响测量。

解决方案: 如果可行,则去除粘质土,或接受较低压实值。或者,利用 MDP 等基于能量的压路机一体化压实测量技术,该技术不会受到粘性土壤的影响。

原因: 钢轮在地面上最硬的区域出现解耦。钢轮解耦时,RMV 较高且压实测量值(CMV)的读数容易低于地面条件具有的水平。

解决方案: 将振幅降低至较低设置。如果仍出现解耦,则压实完成。在出现解耦时进行进一步压实会导致振松。

原因: 粘质土壤过于潮湿。

解决方案: 使用圆盘、耙子或回转式搅拌机翻挖土壤,以在进行压实前使其干燥。或者,利用 MDP 等基于能量的压路机一体化压实测量技术,该技术不会受到粘性土壤的影响,但要注意含水量仍不适于达到适当的压实水平。

原因: 正在被压实的材料被摊铺在未经压实或不稳固的土壤基层上。因此,其在压实过程中的挠曲量过大,无法被压实。

解决方案: 需要移除土壤的上层,并对土壤下层采取补救措施。这可能涉及到对其进行干燥和重新压实、添加石灰或其他土壤稳定剂,乃至挖出不良土壤并将其更换。

原因: 钢轮频率高于应有频率(这是不太可能出现的)。

解决方案: 钢轮频率应接近 30 Hz (1800 VPM) 才能获得最一致的结果。请技师确定振动速度不正确的原因并对其进行纠正。或者,可以在静态模式下(振动关闭)使用 MDP 等基于能量的压路机一体化压实测量技术,查看是否对压实结果一致性有任何影响。

原因: 存在与周围土壤硬度不同的埋藏物质、是否存在埋有树木或其他生物质的地坑、或者埋藏垃圾或粘土球。这种情况将在地图上显示为相对的局部区域。

解决方案: 如果这一情况严重到有必要对其采取措施,则将材料挖出并用良好土壤对其进行更换。

原因: 行驶速度过快。

解决方案: 降低速度以获得最高效的生产率和较高的压实值。如果压路机配有自动速度控制选项,则可利用此功能。

原因: 行驶方向影响集成压实测量值。

解决方案: 这是正常的;前进和倒退方向上测得的值不同。只在一个方向上行驶,或在分析过程中只接受一个方向上的压实值,除此之外没有其他解决方案。

问题：压实测量值高于预期值

原因：基层或底基层的土壤硬度高于预期硬度。
解决方案：无。使用动态圆锥贯入仪进行试验并检查底土的抗剪强度。如果强度较高，则将结果接受为正常值。

原因：表层下方埋有隐藏物质。可能是岩石、混凝土板、旧路面或建筑地基。
解决方案：将物体挖出以实现一致的压实效果。

原因：行驶速度有时过慢。（这不太可能发生，除非操作员试图使用给定碾压次数进行压实）。
解决方案：保持速度恒定。如果压路机配有自动速度控制选项，则可利用此功能。

原因：地面冻结。
解决方案：无。

问题：压实测量值不稳定

原因：表面处或表面以下的土壤实际条件不同。这比人们所想象的更加常见。隐藏物体、填料的变化和含水量的变化都可影响压路机一体化压实测量值。
解决方案：如果存在大幅变化并且需要对其进行纠正，则先从最简单的解决方案开始。检查土壤含水量并进行调整。如有必要则挖出隐藏物体，如果问题严重，则使用土壤更换。

原因：在前进方向上测得的压路机一体化压实测量值高于/低于在后退方向上测得的该值。
解决方案：这是正常的，并且会因土壤类型和压实水平而变化。通常，差值会随着土壤变得更加密实而变小。



原因：在进行压实时钢轮出现解耦。由于钢轮在较硬的地面上开始解耦时，平均值容易下降，解耦可导致压路机一体化压实测量值出现大幅变化。

解决方案：更改为低振幅。如果在低振幅下出现解耦，则土壤已达到压路机可压实的最大硬度。或者，可以在静态模式下（振动关闭）使用 MDP 等基于能量的压路机一体化压实测量技术，查看是否对压实结果一致性有任何影响。

[智能压实的未来]

如上所述,由于受到所有所涉变量的影响,测量土壤硬度非常复杂。但是,对 IC 的使用越多,您越能深入地了解该技术的功能和缺点。随着您在这方面上经验的增加,以及机器驱动功率等新技术的出现,我们可以获得更多优势,并解决过去技术发展中出现的应用问题。随着时间推移,现有技术的硬件解决方案会更加便宜,使其更易促进土壤压实应用的发展。

由于各项技术具有不同的功能,未来的压路机很可能具有多项可用的测量技术。新的测量技术将出现,其可能是探地雷达、超声波或磁成像。也可以创建记录整个道路结构的三维图像。湿度传感技术可提醒操作员调遣水车或松土机。各压路机操作员均可访问来自作业现场上所有机器的信息(机器到机器通讯)。这可为我们提供实时的作业现场进度信息,多台压路机或测量装置所带来的优势是显而易见的。作业现场负责人每天都可监控和使用该数据以做出最具成本效益的决策。

展望未来,数据越来越重要。有待研发的传感器所提供的数据,以及快速轻松地将数据从作业现场导出并导入其他非机载应用设备(电脑、手持平板电脑和其他应用)的功能将成为特定的发展领域。现代技术已经可以提供更多数据,并可按照对作业现场上的经理和监察员要求的方式轻松排序。非机载式数据筛选和排序的功能,以及创建符合最终用户需求的作业现场报告的功能将具有很大的重要性,并且此领域将出现许多规范。

这是压实科学激动人心的一个时代,时间将说明接下来会出现何种进步和技术,但有一点是肯定的:智能压实带来的成本节约、高质量和高效率使得这些技术越来越被人们所需要,这些技术还将被列入世界各地的作业现场规范。

附录

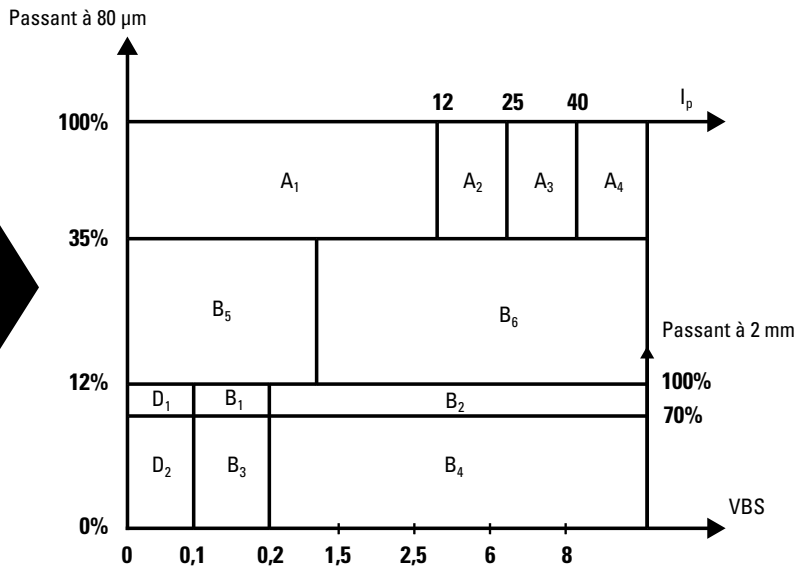
[土壤分类系统]

| AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups) | | | | | | | | | | | |
|--|---|-------|--------------|---------------------------------|-------|--------------|-------|---|--------|--------------|-----------------------|
| General Classification | Granular Materials (35% or less passing #200) | | | | | | | Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200) | | | |
| Group Classification | A-1 | | A-3 | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5 A-7-6 |
| | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | | |
| Sieve Analysis Percent Passing: | | | | | | | | | | | |
| # 10 | 0-50 | | 51-100 | | | | | | | | |
| #40 | 0-30 | 0-50 | 0-10 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 36-100 | 36-100 | 36-100 | 36-100 |
| #200 | 0-15 | 0-25 | 0-10 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 36-100 | 36-100 | 36-100 | 36-100 |
| Characteristics of Fraction Passing #40: | | | | | | | | | | | |
| Liquid Limit | | | | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ |
| Plasticity Index | 0-6 | | N.P. | 0-10 | 0-10 | 11+ | 11+ | 0-10 | 0-10 | 11+ | 11+ |
| Group Index | 0 | | 0 | 0 | | 0-4 | | 0-8 | 0-12 | 0-16 | 0-20 |
| Usual Types of Significant Constituent Materials | Stone Fragments Gravel and Sand | | Fine Sand | Silty or Clayey Gravel and Sand | | | | Silty Soils | | Clayey Soils | |
| General Rating as Subgrade | Excellent to Good | | | | | Fair to Poor | | | | | |

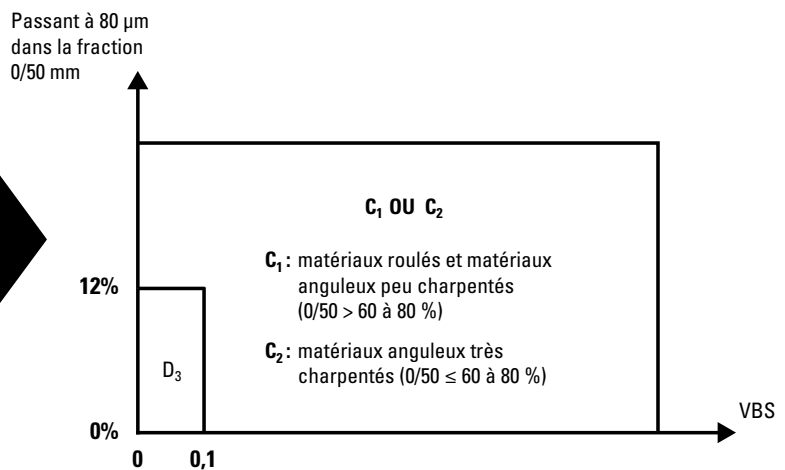
AASHTO 土壤分类系统

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature

Sols
D_{max} ≤ 50 mm



Sols
D_{max} > 50 mm



Matériaux rocheux

| | | | |
|--------------------------------------|---|-------------------------------|----------------|
| Roches sédimentaires | Roches carbonatées | Craies | R ₁ |
| | | Calcaires | R ₂ |
| | Roches argileuses | Marnes, argilites, pélites... | R ₃ |
| | Roches siliceuses | Grès, poudingues, brèches... | R ₄ |
| | Roches salines | Sel gemme, gypse | R ₅ |
| Roches magmatiques et métamorphiques | Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers... | | R ₆ |

Matériaux particuliers

| | |
|--|---|
| Sols organiques et sous-produits industriels | F |
|--|---|

| Hauptgruppe | Korngrößenanteil ≤ 0,06 mm | Korngrößenanteil > 2,0 mm | Gruppe (allgemein) | Gruppe (detailliert) | Kurzzeichen Gruppensymbol |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|
| Grobkörniger Boden | ≤ 5 | < 40 | Kies | Enggestufte Kiese | GE |
| | | | | Weitgestufte Kies-Sand-Gemische | GW |
| | | | | Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische | GI |
| | | | Sand | Enggestufte Sande | SE |
| | | | | Weitgestufte Sand-Kies-Gemische | SW |
| | | | | Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische | SI |
| Gemischtkörniger Boden | 5 bis 40 | < 40 | Kies-Schluff | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GU |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GU* |
| | | | Kies-Ton | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GT |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GT* |
| | | ≤ 40 | Sand-Schluff | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | SU |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | SU* |
| | | | Sand-Ton | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | ST |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | ST* |
| Feinkörniger Boden | < 40 | — | Schluff | Leicht plastische Schluffe $W_L \leq 35$ | UL |
| | | | | Mittelpastische Schluffe $W_L = 35$ bis 50 | UM |
| | | | Ton | Leicht plastische Tone $W_L \leq 35$ | TL |
| | | | | Mittelpastische Tone $W_L = 35$ bis 50 | TM |
| | | | | Ausgeprägt plastische Tone $W_L = 50$ | TA |
| | | | | — | — |
| Organogener Boden | < 40 | — | Nicht brenn- und schwelbar | Organogene Schluffe $W_L = 35$ bis 50 | OU |
| | ≤ 40 | | | Organogene Tone $W_L > 50$ | OT |
| | | | | Grob bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen | OH |
| | | | | Grob bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen | OK |
| Organischer Boden | — | — | Brenn- und schwelbar | Nicht bis mäßig zersetzte Torfe | HN |
| | | | | Zersetzte Torfe | HZ |
| | | | | Mudden (Faulschlamm) | F |
| Auffüllung ¹ | — | — | — | Auffüllung aus Fremdstoffen | A |

1 - Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

德国土壤分类系统

USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

| SOIL FRACTION | SYMBOL | SIZE RANGE | |
|---|-------------|-----------------------------------|----------|
| Boulders | None | Greater than 12" | |
| Cobbles | None | 75 mm (3") to 12" | |
| 1- Course Grained Soils: | | | |
| Gravel | G | 75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm) | |
| Course Gravel | | 75 mm to 19 mm | |
| Fine Gravel | | #4 Sieve to 19 mm | |
| Sand | S | #4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm) | |
| Course Sand Medium Sand Fine Sand | | | |
| 2- Fine Grained Soils: | | | |
| Fines | | Less than #200 Sieve | |
| Silt | M | Use Atterberg Limits | |
| Clay | C | Use Atterberg Limits | |
| 3- Organic Soils | | | |
| | O | Use Atterberg Limits | |
| 4- Peat | | | |
| | Pt | Visual Identification | |
| Gradation Symbols | | Liquid Limit Symbols | |
| Well-graded | W | High LL | H |
| Poorly-graded | P | Low LL | L |

美国土壤分类系统

| SOIL GROUPS | | | SUB-GROUPS | | | | |
|---|---|---|--|------------------|--|--------------|--|
| | | | and in-laboratory identification | | | | |
| GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate | | | GROUP SYMBOL | SUB-GROUP SYMBOL | FINES % < 0.06 mm | LIQUID LIMIT | |
| COARSE SOILS less than 35% of the material is finer than 0.06 mm | GRAVELS More than 50% of coarse material is of gravel size (coarser than 2 mm) | Slightly silty or clayey GRAVEL | G GW GP | GW GPu CPg | 0 to 5 | | |
| | | Silty GRAVEL | G-F | G-M | GWM GPM | 5 to 15 | |
| | | Clayey GRAVEL | | G-C | GWC GPC | | |
| | | Very silty GRAVEL | GF | GM | GML, etc. | 15 to 35 | |
| | | Very clayey GRAVEL | | GC | GCL GCI GCH GCV GCE | | |
| | SANDS More than 50% of coarse material is of sand size (finer than 2 mm) | Slightly silty or clayey SAND | S SW SP | SW SPu SPg | 0 to 5 | | |
| | | Silty SAND | S-F | S-M | SWM SPM | 15 to 35 | |
| | | Clayey SAND | | S-C | SWC SPC | | |
| | | Very silty SAND | SF | SM | SML, etc. | 15 to 35 | |
| | | Very clayey SAND | | SC | SCL SCI SCH SCV SCE | | |
| FINE SOILS more than 35% of the material is finer than 0.06 mm | Gravelly or sandy SILTS and CLAYS 35% to 65% fines | Gravelly SILT | FG | MG | MLG, etc. | | |
| | | Gravelly CLAY | | CG | CLG CIG CHG CVG CEG | | |
| | | Sandy SILT | FS | MS | MLS, etc. | | |
| | Sandy CLAY | CS | | CLS, etc. | | | |
| | SILTS and CLAYS 65% to 100% fines | SILT (M SOIL) | F | M | ML, etc. | | |
| | | CLAY | | C | CL CI CH CV CE | | < 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90 |
| | ORGANIC SOILS | | Description letter 'O' suffixed to say group or sub-group symbol | | Organic matter in significant amount e.g. MHO – organic silt of high LL | | |
| PEAT | | Pt – consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous) | | | | | |

Primary Letter

G = Gravel
S = Sand
M = Silt
C = Clay
O = Organic Soil
Pt = Peat

Secondary Letter

W = Well graded
P = Poorly graded
M = With non-plastic fines
C = With plastic fines
L = Of low plasticity (LL < 50)
H = Of high plasticity (LL > 50)

Classification v1.00 Sept 2010

英国土壤分类系统

[压实要求]

压路机集成装置进行连续压实控制土壤应用

| BASIC/MINIMUM REQUIREMENTS | | | | | |
|---|---|---|---|--|---------------------------------------|
| One of the lower 3 blocks (one value) | At least 2 blocks | 3 top blocks | Top block or 4 lower blocks | 2 lower blocks | At least one block |
| | | Time stamp | Close-loop mode | | |
| Qualitative observation (ex: double-jump...) | | Mapping on board | Actual N passes | Data post-treatment facilities, & additional information | |
| Dimensional bearing capacity (ex: modulus...) | Number of passes (actual vs. target value) | Automatic positioning on board 2D or 3D | Actual frequency | Result by histogram and statistics | Data exchange between machines |
| Dimensional (ex: stiffness...) | Relative evolution (% related to target values D or ND) | Manual positioning 2D + layer (optional) | Actual amplitude A0 | Result by distance or surface | Remote data exchange |
| Non-dimensional value | End of compaction (D or ND) | Distance 1D | Actual speed V | Identification of machine and CCC device | Data exchange from office (USB stick) |
| 1 Behaviour of the material (dynamic response) | 2 Status of compaction (Comparison) | 3 Positioning, traceability during process | 4 Operational information (record and display) | 5 Control report, documentation | 6 Communication, others |

From the pamplet *CECE – Guidelines to evaluate soil and asphalt compactors equipped with continuous compaction control (CCC)*

| | |
|----------------------|--|
| Atterberg 极限法 | 用于说明土壤从固态变为液态时所经七个阶段的特性的一套标准。最重要的阶段是塑限和液限。 |
| 偏心力 | 使旋转的不平衡配重加速偏离其轴心的力量。 |
| 压实仪值 (CMV) 法 | 由瑞士公司 Geodynamik 发明并被 Caterpillar 所采用的表示土壤硬度的方法。 |
| 压实仪值 (CMV) | 通过测量钢轮振动频率和基谐波 (2x 钢轮振动频率) 下的重力计算得出的土壤硬度指标。 |
| 力法/位移法 | 利用钢轮特性和钢轮加速度测量值来计算钢轮位移量以说明土壤硬度的方法。 |
| 压实性 | 土壤材料克服材料特定变形阻力的程度。 |
| 全球导航卫星系统 (GNSS) | 是一个概括性术语,用于描述以卫星为基础的绘图技术(包括 GPS 和 GLONASS)。 |
| 全球定位系统 (GPS) | 由美国控制的全球无线电导航系统,由 24 个卫星组成的卫星群及其地面站组成。 |
| GLONASS | 与 GPS 相似的俄罗斯卫星群。 |
| 压实 | 通过机械侧挤减少材料中的空隙并提高其密度的过程。 |
| 压缩性 | 对材料施加外力后材料体积减小的比率。 |
| 压实梯度 | 在整个压实深度上的不同压实程度。表层土壤不太坚实,大量中间区域土壤比较坚实,最大压实深度的土壤也不太坚实。 |
| 双跳 | 参见解耦。 |
| 坡度 | 表面的倾斜度。 |
| 基层 | 也称为“底层”;建造在底基层上具有规定厚度的指定或选定材料分层,能够提供一种或多种功能,其中包括分散负荷、提供排水性能和最大程度降低冰冻影响。 |
| 冲击力 | 通过将静态压力变为动态压力(例如,掉落重物)而形成的逐渐增大的力量。低频率或不定频率冲击(每分钟 50-600 次冲击)产生的力量被看作冲击力。 |
| 密度 | 单位体积下的质量测量值;是承载强度的传统指标。 |

| | |
|---------------|---|
| 弹性 | 压缩负荷移除后,材料恢复其原始(或近似原始)形状的倾向。 |
| 振幅 | 在一次完整循环中,振动钢轮从峰值到峰值的垂直运动总测量值的二分之一。 |
| 振松 | 因重复施加不必要的压实力而导致的压实被消除。 |
| 承载强度 | 材料支撑负荷的能力。 |
| 摊铺层 | 摊铺的土壤材料的一个分层。可具有不同厚度。 |
| 侧挤 | 将颗粒重新排列成更密实物质的揉和过程。 |
| 含水量 | 某种物质单位体积内所含的液体(水)量。 |
| 晶粒 | 一种矿物颗粒。 |
| 晶粒尺寸分布 | 土壤中不同颗粒尺寸的范围和分布的测量值。 |
| 智能压实 | 一般而言,智能压实为在压实过程中所采用的通过排除人为臆测来提高工作现场效率的压路机集成技术。 |
| 机器集成压实测量 | 使用与执行压实操作的机器相结合的技术进行的压实测量。 |
| 塑性 | 是细粒土壤允许其变形量超出恢复点而不出现破裂或较大体积变化的特性。 |
| 塑性指数 | 土壤液限与塑限之间的差值。可通过此方法确定细粒土壤所需的土壤稳定程度。 |
| 塑限 | 非常重要的 Atterberg 限值;土壤保持足够水分使其变为塑态的临界点。 |
| 不良级配 | 也称为均匀级配;粗粒土壤中尺寸相对均匀的颗粒含量,此含量值的高低是土壤难以被压实的困难程度的表征。 |
| 普氏试验(标准式或改良式) | 是一种实验室试验,用于确定土壤最大干密度以及达到最大密度时的最佳含水量。 |
| 校准 | 调整系统参数以实现其在工地材料条件下使用时的最佳功能。 |
| 毛细作用 | 材料向上或横向吸收水分的能力。 |
| 液限 | 非常重要的 Atterberg 限值;在该点,土壤含有足够水分使其被看作液态的临界点。 |
| 渗透性 | 材料允许气体或液体通过的能力。 |

| | |
|------------|---|
| 整治 | 通过化学或机械方法改变土壤以提高其工程特性的过程。 |
| 共振 | 两种振动物质振动频率的汇聚。 |
| 共振仪值 (RMV) | 钢轮压实时出现解耦的振动程度指标。 |
| 共振频率 | 用于振动压路机时,是指土壤材料的振动导致压路机振动,其足以使压实力超出产生的偏心力(即,输出大于偏心力)的临界点。 |
| 滚动阻力 | 滚动圆形物体通过材料时所需的能量大小。 |
| 沙土 | 具有特定尺寸和形状的非粘性矿物颗粒。 |
| 沉降 | 表层高度因填充材料的加固而降低的过程。 |
| 抗剪力 | 施加压实力时,土壤颗粒阻止颗粒相互滑动的能力。 |
| 淤泥 | 非粘性细粒矿物材料(土壤)。 |
| 土壤 | 由可能含有或不含有有机物质的矿物颗粒组成的松散材料。 |
| 土壤稳定 | 在指定施工过程中,最大化地提高土壤适用性的过程。 |
| 生产模式 | 一种压路机系统设置,优化系统可用性以实现高产量应用,在这种情况下,准确性不是主要目标。 |
| 工作站 | 在施工现场由工程师确定并使用标桩来标记的非标准区域,使用此易管理区域来控制准备工作。 |
| 砂砾 | 粗粒矿物材料;USCS 将其定义为直径小于 75 mm (3 in) 无法通过 #4 筛网的颗粒。 |
| 底基层 | 路基和基层之间的分层。 |
| 硬度(土壤) | 材料(土壤)在负载下的抗挠曲能力;是负载强度的重要指标。 |

| | |
|-------|---|
| 碾压次数 | 压路机通过地面某一区域的次数。有时,会将一次“碾压”定义为前进和后退的一次往返,即在特定区域碾压两次;在其他时候,一次碾压则表示压路机在某一区域的单程碾压。Caterpillar 将一次碾压定义为在某一区域向前进方向或倒退方向的单程碾压。 |
| 总作用力 | 压路机可施加至地面的最大振动能量的计算值。 |
| 均匀性 | 材料和压实作业中的一致性保持程度。 |
| 均匀性系数 | 用于描述土壤颗粒尺寸分布(级配曲线)的参数。 |
| 均匀级配 | 也称为不良级配;粗粒土壤中尺寸相对均匀的颗粒含量,此含量值的高低是土壤难以被压实的困难程度的表征。 |
| 振动 | 产生快速连续压力波的一系列高频率冲击(每分钟 1400-4000 次冲击)。压路机产生的振动可打破被压实材料的颗粒之间的结合力。 |
| 空隙 | 一定量的材料中未被固态矿物材料占据的空间。 |
| 粗粒土壤 | 土壤分类的一种,指含有颗粒(晶粒)且缺乏粘性的土壤类型。将沙土和砂砾归类为粗粒土壤。粗粒土壤可分为良好级配或不良级配,以此来反应土壤的压实性能。 |
| 粘性 | 材料在自然状态下保持其结合强度的能力;即,通过含水量变化或浸没而粘附在一起并保持其形状的能力。 |
| 粘质土 | 利用电化学表面电荷在水分参与下进行良好结合的细粒矿物材料(土壤)。 |
| 级配 | 单个土壤颗粒的尺寸范围。 |
| 纹理 | 用于定义土壤颗粒表面摩擦力的特性。 |
| 细土 | 通常为颗粒尺寸非常小的材料,其颗粒尺寸在过筛试验确定的特定限值以下。细土可通过最小的筛网。全球各组织对于确切的筛网尺寸都有独立定义,但大体相同。 |
| 细粒土壤 | 主要由细土组成的土壤。 |
| 能量法 | 以机器驱动功率(MDP)背后的原理为基础,是 Caterpillar 专有的通过测量推过土壤所需的能量(滚动阻力)确定压实力的方法。 |

| | |
|-----------|---|
| 自然频率 | 物质因其自身特性而振动的频率。 |
| 良好级配 | 粗粒土壤中各尺寸颗粒的含量,此含量值的土壤易于被压实。 |
| 解耦 | 也称为“双跳”,是钢轮在振动作用下反弹,且弹起高度足够使下次振动在钢轮仍悬在空中时出现的现象。 |
| 试验模式 | 一种压路机系统设置,优化系统可用性以实现高准确性应用,在这种情况下,机器生产率不是主要目标。 |
| 质量保证 (QA) | 项目所有者用于记录项目所达到的压实质量的试验方法和数据。 |
| 质量控制 (QC) | 承包商为确保压实作业的规范性而实施的程序。 |
| 路基 | 用于支撑路层结构的土壤。主要用作路层结构的基础,有时称为“底层土壤”或“基础土壤”。 |
| 路堤 | 其顶部高于比邻表面的任何填方。 |
| 静态压力 | 施加在压实力上的重量。 |
| 静线压力 | 行业中用于对比静态光轮压路机压实势能的测量值。 |
| 频率 | 在给定时长内测量到的完整循环(例如,振动)次数。 |
| 颗粒分布 | 参见晶粒尺寸分布。 |
| 骨料 | 道路结构中的颗粒状承重矿物成分,通常为沙土、砂砾、硬壳、矿渣、碎石或细土。 |



SAFETY WARNINGS

- WARNING: Falling Object
- WARNING: Moving Parts
- WARNING: Falling Blade

OPERATOR'S MANUAL

STUBBLESS

STUBBLESS



CAT CS78B



CATERPILLAR