

黄土室内振动压实特性试验

沙爱民¹, 陈开圣^{1,2}, 马 峰¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 贵州大学 土木建筑工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘 要:室内振动压实是室内击实成型试件的一种新方法,能较好地模拟振动压实的特点。研究了静面压力、频率、激振力和振幅等振动压实参数对黄土压实效果的影响规律,提出了一组压实效果好并且与现有振动压路机的技术参数相符的黄土振动压实的推荐参数;对黄土的振动成型方法和成型后的物理、力学性能进行了探讨,并与击实试验做了对比分析。研究结果表明:振动压实黄土得到的最佳含水质量分数、最大干密度均比室内击实的要小,振动压实黄土的回弹模量比室内击实黄土的回弹模量要大;不同成型方式对材料的物理、力学性能影响很大。

关键词:道路工程;黄土;振动压实;重型击实;干密度;回弹模量

中图分类号:U416; TU444 **文献标志码:**A

Indoor test on physical-mechanical properties of loess under vibration compaction

SHA Ai-min¹, CHEN Kai-sheng^{1,2}, MA Feng¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil and Construction Engineering,

Guizhou University, Guiyang 550003, Guizhou, China)

Abstract: Vibratory compaction in room is a new method of forming specimen by compressive force, which can simulate the characteristics of vibratory compaction in real construction of road. The regularities of the influence of the vibratory parameters, such as amplitude, frequency, centrifugal force, intensity on loess compaction are analyzed. The vibration parameters for good compaction are put forward; they are consistent with the parameters of the current vibratory roller. The methods for forming specimen of loess are presented, and the physical-mechanical properties of the specimens are studied, and they are compared with those of heavy rammer test. The results show that the best water content and the largest dry density for vibration compaction of loess are less than those of heavy rammer, the modulus of resilience for vibration compaction of loess is larger than that of heavy rammer. It is proved that the different methods of forming specimen have great effect on the physical-mechanical properties of loess. 7 tabs, 5 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; loess; vibration compaction; heavy rammer; dry density; resilience modulus

0 引言

中国公路、建筑行业常用的确定材料最佳含水质量分数和最大干密度的室内试验方法是击实方法,测定材料技术指标的试件成型方法是静力压实方法。采用击实方法,在室内通过施加冲击荷载对被压材料进行压实,与现场夯实过程一致,与现场静力压路机的作用过程虽不尽相同,但通过对材料产生剪应力使之压实的作用过程却是相似的^[1-2];但与通过高频振动作用使材料产生“液化”而导致密实的振动压实过程是完全不同的。即使动力压实和静力压实的压实功相同,由于两种方法的作用机理不同,形成的被压材料的结构不同,其最佳含水质量分数和最大干密度也不一定相同^[3]。近年来,振动压路机的平均单台质量逐渐增大,

6 t以下的压路机已很少使用^[4-5]。最佳含水质量分数和最大干密度是进行路基压实的重要控制指标,现场压实工艺的变革要求推出新的室内试验方法。室内振动压实是一种新的室内击实成型试件的方法,它能够较好地模拟振动压实的特点。为此,本文研究了黄土的室内振动压实特性。

1 土料基本物理性质

土样采自禹门口—阎良高速公路的 C18 标段 K160+300 左侧土料场。土料所属地层为马兰黄土,所处地形平坦,属一级黄土塬区,地层分布稳定,土质均匀,结构较致密,存在少量虫孔及植物根茎孔洞,颗粒组成以粉质粘土为主,硬塑,级配良好。土料的基本物理性质如表 1、表 2 所示。

表 1 土料物理性质(一)

| 项 目 | 名称 | 砂粒 | 粉粒 | 粘粒 | 不均匀系数 $C_u=8.82$ 曲率系数 $C_c=1.76$ |
|----------------------------|-------|--------|-------------|-------------|---|
| 《公路土工试验规程》 (JTJ 051-93) | 筛孔/mm | >0.074 | 0.074~0.002 | <0.002 | |
| | 通过量/% | 1.85 | 89.85 | 8.30 | |
| 《水利部土工试验规程》 (SDS 01-79) | 筛孔/mm | >0.050 | 0.050~0.010 | 0.010~0.005 | |
| | 通过量/% | 10.12 | 59.81 | 11.98 | 18.09 |

表 2 土料物理性质(二)

| 含水质量分数/ % | 塑限/ % | 液限/ % | 塑性指数/ % | 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) |
|--------------|----------|----------|------------|--|---|
| 14.2 | 18.2 | 32.3 | 14.1 | 2.71 | 1.33 |

2 振动压实的基本原理

振动在被压实材料内部产生振动冲击,使被压实材料的颗粒在振动冲击的作用下,由静止的初始状态过渡到运动状态,被压实材料之间的摩擦力也由初始的静摩擦状态逐渐进入到动摩擦状态。同时,材料中水分的离析作用,使材料颗粒的外层包有一层水膜,形成了颗粒运动的润滑剂,为颗粒的运动提供了十分有利的条件。被压实材料颗粒之间在非密实状态下存在许多大小不等的间隙,被压实材料在振动冲击的作用下,其颗粒间的相对位置发生了变化,出现相互填充的现象,即较大颗粒形成的间隙由较小颗粒填充,较小颗粒的间隙由水分填充。被压实材料中空气的体积也在振动冲击过程中减少了。被压实材料颗粒间隙的减小,表明密实度增加;被压实材料之间间隙减小使其颗粒间接触面增大,导致被压实材料内摩擦阻力增大,表明其承载能力得到提高。无论是水平振动还是垂直振动,压实材料在振动作用下空隙率减小,使其变得更加密实的原理均是一致的。

3 黄土室内振动压实特性

室内振动压实试验采用作者研制加工的自上而下振动或表面振动的振动压实成型机(图 1)。该设备具有振动压路机的振动压实参数,并且参数可调,采用与振动压路机一致的上下车共同作用的双自由度“压路机-被压材料”振动体系。其静压力的大小是由上下车质量和上下车配重块以及压头的质量组成,由于上下车的质量和压头的质量不可改变,用“上车配重块数-下车配重块数”就能区分静压力的大小;为了使激振力能够有级可调,把振动器的偏心块设计成由固定偏心块和活动偏心块组成,通过花键齿调节活动偏心块和固定偏心块的相对夹角实现激振力的有级可调;选用 Y112m-4 kW 电机作为动力装置,通过变频控制箱连接到振动器的转轴,使振动器的转动频率 0~50 Hz 可调。



图 1 室内振动压实成型设备

根据这些参数可进一步研究黄土的振动成型方法及成型后的性能。

3.1 振动压实成型方法

现行规范^[6]中尚没有振动压实的最佳含水质量

分数及最大干密度的测定方法。本研究中,试验参照击实试验的测定方法,采用内径为 152 mm、高为 120 mm、容积为 2 177 cm³ 的击实筒,同时根据振动压实特点,按两层加料的方法进行振动压实成型,在分层加料时,每次加料前应把上层的料刮毛,以免分层。

3.2 振动参数对振动压实效果的影响

3.2.1 静面压力

在同一激振力、频率和含水质量分数的条件下,改变静面压力值,研究静面压力对振动压实效果的影响。频率为 30 Hz,选取振动器的偏心块夹角为 60°(6 838 N)的激振力。调节上下车配重块数量,取“S0X0”、“S2X3”、“S3X6”、“S5X9”、“S7X12” 5 种配置条件下的静面压力,分别为 81、94、104、117、130 kPa。根据现场达到脱耦工况时停止振动的状态,室内试验以振动器出现回弹跳起的压实状态为达到要求的标准振实状态。试验结果如表 3 所示。

表 3 静面压力对振动压实效果的影响

| 配置条件 | S0X0 | S2X3 | S3X6 | S5X9 | S7X12 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 振幅/mm | 2.47 | 2.16 | 1.90 | 1.70 | 1.54 |
| 静面压力/kPa | 81 | 94 | 104 | 117 | 130 |
| 动静比 | 5.20 | 4.48 | 4.04 | 3.58 | 3.22 |
| 回弹跳起时间/s | 300 | 186 | 145 | 120 | 90 |
| 振实干密度/(g·cm ⁻³) | 1.674 | 1.729 | 1.784 | 1.748 | 1.734 |

由表 3 可看出,静面压力较小时,振实干密度随静面压力的增大而增加。当达到一定静面压力后,振实干密度达到最大值;如果继续增加,振实干密度反而随静面压力的增加而逐渐减小。当配置条件为 S3X6 时,黄土的振实干密度最大,此时对应的静面压力为 104 kPa,动静比为 4.04,振幅为 1.9 mm。当静面压力从 94 kPa 变化到 117 kPa,黄土的振实干密度变化不很明显。因此,考虑一定的变动范围,静面压力可在 94~117 kPa 内取值,推荐采用静面压力为 104 kPa。

3.2.2 频率

振动频率是影响压实效果的重要参数。当振动频率与被压材料的固有频率一致时,便容易产生共振,压实效果较好。黄土属于低液限粘土,参考表 4 中共振响应频率的特性,考虑到在路基施工压实时所用的振动压路机的频率范围,根据表 3 的试验结果,取振动压实条件为 S3X6。对黄土进行不同频率(25、27.5、30、35 Hz)下的振动压实试验,试验结果见表 5。

黄土的振实干密度、回弹模量随频率的增加而增大。在频率为 25、27.5 Hz 时振动未跳起,可认为未达到良好的振动状态;在 35 Hz 时,振动在较短时

表 4 各类粘土的固有频率

| 土壤类别 | 自然频率/Hz |
|-------|---------|
| 固结亚粘土 | 25~29 |
| 松散亚粘土 | 21~23 |
| 湿粘土 | 22 |
| 干粘土 | 28 |

表 5 频率对振动压实效果的影响

| 频率/Hz | 25.0 | 27.5 | 30.0 | 35.0 |
|---------------------------|-------|-------|------|-------|
| 上层回弹跳起时间/s | 240 s | 240 s | 63 | 55 |
| 下层回弹跳起时间/s | 未跳起 | 未跳起 | 36 | 24 |
| 干密度/(g·cm ⁻³) | 1.51 | 1.60 | 1.75 | 1.82 |
| 回弹模量/MPa | 61.9 | 74.8 | 90.6 | 107.8 |

间内跳起,稳定振动时间短,振幅较大,不利于振动成型且设备抖动较大,也不是良好的振动状态。考虑到一定的变动范围,取黄土的振动压实频率范围为 28~32 Hz,推荐采用 30 Hz。

3.2.3 角度激振力

在相同的静面压力、频率和含水质量分数的试验条件下,变化激振力,研究激振力对振动压实效果的影响。根据静面压力、频率对黄土振动压实试验结果的分析,取振动压实条件为 S3X6,偏心块夹角分别取 0°、30°、60°、90°、120°,对黄土进行振动压实,得到相应结果如表 6 所示。

表 6 激振力对振动压实效果的影响

| 偏心块夹角/(°) | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 激振力/N | 7 876 | 7 612 | 6 838 | 5 612 | 4 029 |
| 振幅/mm | 1.97 | 1.90 | 1.71 | 1.40 | 1.01 |
| 振实时间/s | 111 | 120 | 164 | 290 | 480 |
| 振实干密度/(g·cm ⁻³) | 1.776 | 1.748 | 1.750 | 1.688 | 1.521 |
| 振实回弹模量/MPa | 71.9 | 55.8 | 58.5 | 58.6 | 47.5 |

随着角度激振力的增大,振动压实土体的干密度、回弹模量也随之增大,但增加的幅度随着激振力的增大逐渐变小。在激振力达到 6 838 N(偏心块夹角 60°)后,激振力的增大对振实干密度的影响不再显著。考虑一定的变动范围及激振力与振实干密度的关系,激振力可在 6 000~8 000 N 内取值,推荐采用 6 838 N(偏心块夹角 60°)。

3.2.4 振幅

振幅是反映静面压力和激振力综合作用的一个振动参数,是振动压路机的重要技术参数。为了找出振动压实路基土的最佳振幅,根据表 3 和表 6 的试验结果,给出在变化静面压力和变化激振力两种条件下,振实黄土的干密度与振幅之间的关系(图 2)。

由图 2 可看出,当以标准振实状态控制压实时,无论是变化静面压力,还是变化激振力,换算成名义

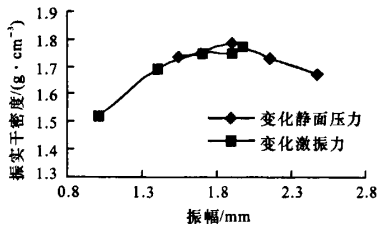


图2 振幅与振实干密度的关系

振幅后,均表现为振幅在 1.5~2.0 mm 内,达到了振实干密度的峰值范围。在这个范围内,振实干密度变化幅度较为平缓。此前,振实干密度随名义振幅的增大而增大;此后,振实干密度随名义振幅的增大而减小。参考两种条件下最佳名义振幅对应的值分别是 1.90 mm 和 1.71 mm。振幅较大,不利于振动成型且设备抖动较大,故推荐采用 1.71 mm。所以,黄土振动压实的最佳名义振幅为 1.5~2.0 mm,推荐采用 1.71 mm,并以振动器回弹跳起的标准振实状态来控制。

3.3 黄土振动压实推荐参数

根据以上试验结果,并参考有关资料,在避免振幅过大、振动时间过短的情况下,考虑一定的变动范围,黄土压实效果较好的振动压实条件为:静面压力为 94~117 kPa,激振力为 6 000~8 000 N,频率为 28~32 Hz,振幅为 1.5~2.0 mm。推荐参数:频率为 30 Hz,静面压力为 104 kPa,激振力为 6 838 N (偏心块夹角为 60°),振幅为 1.71 mm,动静比为 4.04,以黄土在振动跳起开始后 10 s 或者土料挤出开始时作为振动压实的最佳标准状态。

4 振动压实与重型击实对黄土的影响

文献[7]对高速公路粉土、水泥稳定碎石等材料的振动成型方法及成型后的力学性能分析后认为,振动压实粉土的最大干密度小于重型击实粉土的最大干密度,但振动压实试件的回弹模量却不比重型击实粉土的回弹模量小。

采用重型击实和推荐的振动压实参数对黄土进行振动压实,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可得,重型击实条件下黄土的最佳含水质量分数为 12.3%,最大干密度为 1.938 g/cm³。推荐条件下振动压实黄土的最佳含水质量分数为 11.7%,最大干密度为 1.856 g/cm³。因此,利用推荐参数和满足压实条件下,振动压实黄土的最佳含水质量分数和最大干密度都略小于室内击实方法确定的最佳含水质量分数和最大干密度。

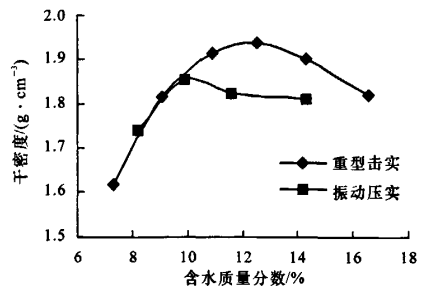


图3 含水质量分数与干密度的关系

为了分析振动压实和重型击实对回弹模量的影响,限定干密度不变,分别采用击实成型和推荐条件下振动压实成型的方式配置不同含水质量分数下的试样,进行回弹模量试验,结果如图 4 所示。

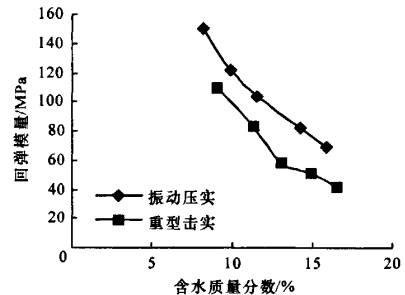


图4 回弹模量与含水质量分数的关系

由最佳含水质量分数-最大干密度试验可知,振动压实得到的最佳含水质量分数、最大干密度都比室内击实的小;回弹模量试验结果表明,振动压实黄土的回弹模量比室内击实黄土的回弹模量大(图 4)。其原因是:振动压实主要是通过材料受迫振动完成材料颗粒的重新排列,形成骨架-密实结构;室内击实主要是通过对材料施加剪应力,达到压实效果。击实要克服的摩擦力较振动压实大。因此,要达到最佳的压实效果,击实对土中水的润滑作用依赖性高,故最佳含水质量分数一般较振动压强大。在振动压实作用下,集料的占有量理想的极限状态是骨架密实状态;而静力压实下基本上是呈悬浮密实结构^[8]。振动压实黄土的微观结构表面土颗粒或团粒堆叠分布均匀,架空孔隙少;室内重型击实黄土样的微观结构表面形态较松散,孔隙明显(图 5)。振动压实对黄土的微观结构的改变比击实对黄土的改变程度要大,表现为架空孔隙更少,微、小孔隙更多(表 7),孔隙和颗粒分布均匀。由于外力的挤密,使得结构向紧密集粒的方向发展,形成所谓的骨架密实结构,摩擦作用和嵌挤作用加大,因而相同干密度情况下,振动压实黄土在强度上较室内重型击实的要大。理论和实践证明,这两种结构的力学

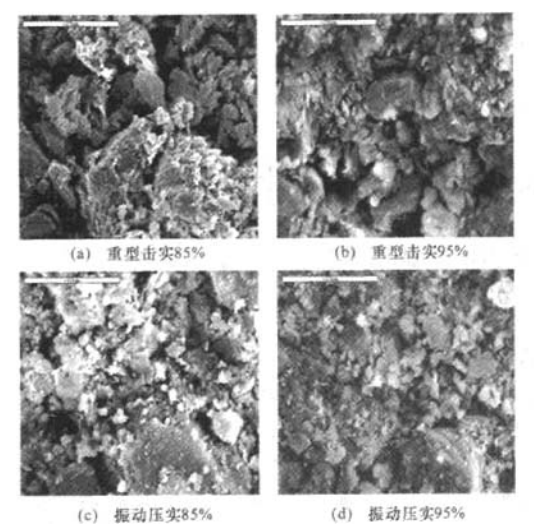


图 5 重型击实与振动压实下黄土的微观结构

表 7 压实黄土微观结构的定量指标

| 项目 | 压实度/ % | 面孔 隙比 | 平均孔径/ μm | 不同孔隙(μm)的分布/% | | | |
|----------|-----------|----------|-------------|---------------|------|------|-----|
| | | | | <1 | 1~4 | 4~16 | >16 |
| 重型 击实 | 85 | 23.5 | 5.759 | 5.9 | 27.3 | 60.5 | 6.3 |
| | 95 | 16.4 | 4.410 | 9.8 | 68.2 | 21.1 | 0.9 |
| 振动 压实 | 85 | 22.7 | 3.850 | 7.7 | 50.5 | 37.3 | 4.5 |
| | 95 | 15.8 | 3.280 | 10.4 | 72.1 | 16.7 | 0.8 |

性能相差甚远。这说明对同一种材料,不同的成型方式对其物理、力学性能影响很大。

5 结 语

(1)《公路土工试验规程》(JTJ 051-93)尚没有振动压实的最佳含水质量分数和最大干密度的测定方法。本研究中,试验时参照击实试验的测定方法,采用内径 152 mm、高 120 mm、容积 2 177 cm³ 的击实筒,同时根据振实特点按照两层加料的方法进行振实成型。在避免振幅过大、振动时间过短的情况下,考虑一定的变动范围,黄土压实效果较好的振动压实条件为:静面压力为 94~117 kPa,激振力为 6 000~8 000 N,频率为 28~32 Hz,振幅为 1.5~2.0 mm。推荐参数:频率为 30 Hz,静面压力为 104 kPa,激振力为 6 838 N(偏心块夹角为 60°),振幅为 1.71 mm,动静比为 4.04,以黄土在振动跳起开始后 10 s 或者土料挤出开始时作为振动压实的最佳标准状态。

(2)在利用推荐参数和满足压实条件下,黄土振动压实的最佳含水质量分数和最大干密度都略小于室内击实方法确定的最佳含水质量分数和最大干

密度,但振动压实黄土的回弹模量比室内击实黄土的回弹模量要大,说明对同一种材料,采用不同的成型方式对其物理、力学性能影响很大。

(3)试验所用振动成型压实机能较好地模拟振动压路机的工况,可作为室内开展筑路材料振动压实特性以及振动压实机械参数研究的试验设备。

参考文献:

References:

[1] 景宏君,张 斌. 黄土地区公路路基冲击压实试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004, 24(1):25-29.
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Experiments of highway subgrade impact compaction in loess region [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2004, 24(1):25-29.

[2] 刘保健,支喜兰,谢永利,等. 公路工程中黄土湿陷性问题分析[J]. 中国公路学报,2005, 18(4):27-31.
LIU Bao-jian, ZHI Xi-lan, XIE Yong-li, et al. Analysis of problems on loess hydrocompaction in highway engineering[J]. China Journal of Highway and Transport,2005, 18(4):27-31.

[3] 李美江. 对压实度标准和室内成型试件方法的几点看法[J]. 公路,2001,(12):81-83.
LI Mei-jiang. Opinions to standard of compactness and method of inside molding [J]. Highway, 2001, (12):81-83.

[4] 徐世强,折学森,刘怡琳,等. 公路黄土坝式路堤稳定性计算方法[J]. 交通运输工程学报,2006,6(3):42-46.
XU Shi-qiang, SHE Xue-sen, LIU Yi-lin, et al. Stability computation method of highway loess dam-like embankment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(3):42-46.

[5] 沙庆林. 公路压实与压实标准[M]. 北京:人民交通出版社,1999.

[6] JTJ 051-93,公路土工试验规程[S].

[7] 李美江. 道路材料振动压实特性研究[D]. 西安:长安大学,2002.

[8] 马松林,王 龙,王哲人. 土石混合料室内振动压实研究[J]. 中国公路学报,2001,14(1):5-8.
MA Song-lin, WANG Long, WANG Zhe-ren. Study of compacting properties of soil-aggregate mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1):5-8.