

沥青路面智能压实及其关键影响因素研究

朱慧芳,王亮

(浙江省交通集团高速公路衢州管理中心,浙江 衢州 324000)

摘要:智能压实作为一种新型道路施工质量监测与管理技术,在沥青路面压实过程中得到了广泛应用。然而,由于缺乏对压实过程以及沥青混合料颗粒间相互作用机理的了解,实际施工中常出现过压及压实不均匀的问题,这些问题对道路施工质量及服役性能产生了严重影响。该文通过工程现场与室内试验相结合的方法,利用地质统计模型半变异函数分析了沥青混合料压实度随压实次数的变化特征,并讨论了温度对混合料压实度的影响;此外,通过室内旋转压实仪与SmartRock传感器,从细观尺度揭示不同压实温度下混合料颗粒受力及转角特征。研究结果表明:压实度的大小及均匀性并非总是与压实遍数呈正相关。过度压实会导致压实度及其均匀性降低。同时,现场压实温度的变化对混合料压实度具有显著影响。在较高的温度下,沥青混合料的压实度增幅较大,且最终压实均匀性较高。通过SmartRock传感器的受力及转角特征定量研究混合料在压实作用下的细观响应,发现混合料内部的动力响应可直接反映沥青混合料压实度的变化,并发现温度变化与压实效果之间未始终呈现正相关,只有在合适的温度范围内,沥青混合料才能达到最佳压实效果。

关键词:道路工程;智能压实;智能颗粒传感器;旋转压实

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Intelligent Compaction of Asphalt Pavement and Its Key Influencing Factors

ZHU Huifang, WANG Liang

(Zhejiang Transportation Group Expressway Quzhou Management Center, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

Abstract: Intelligent compaction, as a new type of road construction quality monitoring and management technology, has been widely used in the compaction process of asphalt pavement. However, due to the lack of understanding of the compaction process and the interaction mechanism between asphalt mixture particles, the problems of over-compaction and non-uniformity of compaction often occur in the actual construction, which seriously affects the quality of road construction and service performance. In this study, through the combination of the engineering field and indoor tests, the variation characteristics of asphalt mixture compaction with the number of compaction were analyzed by using the semi-variance function of the geostatistical model, and the effect of temperature on the mixture compaction was discussed. Moreover, through the indoor gyratory compactor and SmartRock sensor, the force and rotational angle characteristics of mixture particles were revealed from the fine scale under different compaction temperatures. The results show that the size and uniformity of compaction are not always positively correlated with the number of compaction. Over-compaction may result in lower compaction and uniformity. Meanwhile, the variation of field compaction temperature has a significant effect on the compaction of mixtures. At higher temperatures, the compaction of the asphalt mixture increases faster, and the final compaction uniformity is higher. Through the quantitative study of the fine-scale response of the mixture by considering the force and rotational angle characteristics by SmartRock sensor, it is found that the dynamic response within the mixture can directly reflect the asphalt

收稿日期:2023-02-14

基金项目:武汉理工大学新材料力学理论与应用湖北省重点实验室开放基金资助项目(编号:TAM202201)

作者简介:朱慧芳,女,高级工程师.E-mail:347144155@qq.com

mixture compaction changes, and the temperature change and compaction effect do not always show a positive correlation. Only in the appropriate temperature range, the asphalt mixture can achieve the best compaction effect.

Keywords: road engineering; intelligent compaction; smart particle sensor; gyratory compaction

0 引言

压实是道路施工中最为关键的步骤之一,直接影响道路的服务质量及耐久性,准确、快速、全面的压实质量检测技术是保障压实质量的关键环节之一^[1-2]。然而,传统的压实质量检测方法主要依靠现场的抽样试验来进行,属于“点”控制和“事后”控制,存在较大的随机性和滞后性,难以实现对压实质量的科学检测,从而导致道路服役期间养护成本增高。

为了克服传统压实质量检测方法的不足,发展了一种全面、实时压实质量控制技术——智能压实。智能压实技术是指在压实控制过程中采用精密传感装置(如加速度传感器、温度传感器)、GPS定位系统以及车载报告系统等装置^[3],实时将智能压实值、位置坐标等信息传递到客户端,可实现对施工区域压实质量的全面(100%)检测。近年来,智能压实技术已经成功应用于土方工程和土壤的压实施工中。根据美国联邦公路管理局(FHWA)的智能压实案例研究,智能压实值与落锤式弯沉仪反算的结构模量具有良好的相关性^[4]。然而,在大规模应用智能压实技术之前,仍存在一些需要解决的问题。由于路面材料在空间分布上存在显著的变异性,常导致混合料压实不均匀,进而容易引发早期病害,影响路面的长期服役性能。然而,现有的路面施工规范中并未涵盖对压实不均匀性的检测要求。因此,如何提高压实过程中的均匀性是智能压实技术在应用过程中亟须解决的关键问题之一。与土壤不同,沥青混合料作为一种黏弹性材料,其压实度的大小与混合料的温度、空隙率、级配以及机械参数等因素有关。其中,在施工过程中,沥青混合料的温度变化会直接影响沥青的黏结性能,进而对混合料的压实过程产生显著的影响^[5-6]。已有学者通过数值模拟方法研究不同因素对压实过程的影响。Liu等^[7]采用Abaqus有限元软件模拟路面的振动压实过程,讨论了激振力和压实速度对压实度的影响,发现采用低速、大激振力可获得较好的压实效果;Chen等^[8]、Liu等^[9]通过离散

元模拟沥青压实过程,研究了振动压实下沥青混合料的空隙率变化,其结果与试验结果较吻合。然而,由于沥青混合料内部颗粒间的相互作用非常复杂,并且材料的温度会在压实过程中发生变化,很难通过理论模型研究它们之间的作用机理。因此,有必要通过工程现场以及室内试验对这些因素展开研究。

本文旨在通过工程现场和室内试验,采用地统计模型半变异函数,研究压实过程中温度变化对压实度大小及其均匀性的影响。此外,采用旋转压实仪和SmartRock传感器,研究不同温度条件对沥青混合料的旋转压实过程的影响,从细观尺度解释不同压实温度下颗粒的转角及受力特征,对提高沥青路面压实工艺及施工质量具有重要的工程意义。

1 背景与方法

1.1 项目背景

本次研究试验段位于山东省枣庄市新泰一台儿庄高速公路,试验路段全长200 m,宽度11.25 m,如图1(a)所示。本项目采用BOMAG双钢轮振动压路机,型号为BW203AD,振动轮直径1 236 mm,宽度1 235 mm,整机工作质量13 000 kg,振动频率为40~50 Hz,激振力大小为126~81 kN,额定振幅为0.69~0.29 mm。采用高振幅进行压实施工,图1(b)、(c)为



(a) 试验段位置



(b) 项目压实现场



(c) 智能压实压路机

图1 智能压实试验段

Figure 1 Intelligent compaction test section

本项目的位臵及采用的压实设备。智能压路机装备有加速度传感器、红外温度传感器、定位系统及压实度显示装置。

1.2 智能压实指标

早在1974年,瑞典的Heinz Thumer第一次提出智能压实值的概念,并在DYNAPAC(戴纳派克)光轮振动压路机和粒状土上进行了试验。试验结果表明:在基频下的振幅比与压实效果和土石料的刚度密切相关。随着智能压实技术的发展,一些压路机厂家提出了多种不同的智能压实值来评估材料的压实状态。1976年,瑞典Geodynamik公司与DYNAPAC共同开发了基于CMV法的压实度计量指标,该指标通过加速度传感器获取压路机在振动激励下的响应信号,提出了以二次谐波与基波的比值来判定压实质量的方法。具体计算公式如下^[10]:

$$V_{CMV} = C \times \frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}} \quad (1)$$

式中: V_{CMV} 为一种具有代表性的智能压实质量控制指标; C 是一个常数,一般取值为300; $A_{2\Omega}$ 为加速度的二次谐波; A_{Ω} 为加速度的一次谐波,即基波。

压实度指标作为一种具有代表性的智能压实质量控制指标,根据振动轮振动波形的畸变程度与填料压实程度之间的相关性来检测路面的压实度值,工作原理如图2所示。

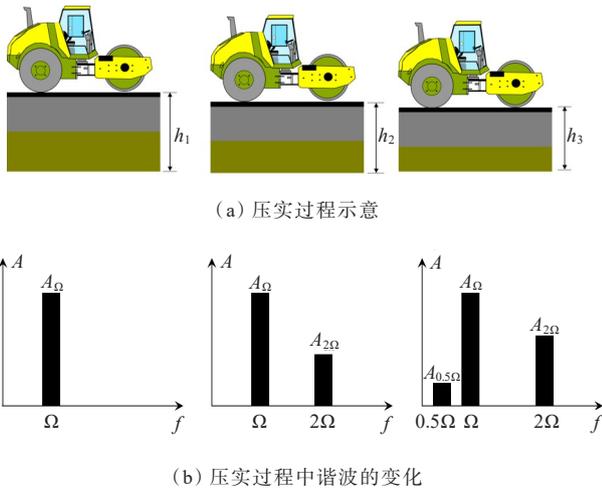


图2 压实度指标工作原理

Figure 2 Compaction index working principle

1.3 半变异函数模型

基于地质统计学的半变异函数模型,既可以描述连续压实检测参数的结构性变异,又可以描述其随机性变异性,其定义为在一定距离下数据之间平

均方差的一半^[11]。计算公式如式(2)所示:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i+h) - z(x_i)]^2 \quad (2)$$

式中: $\gamma(h)$ 为相距 h 位置的压实度的变异性; $n(h)$ 为某一压实面上相距为 h 的连续压实监测点的对数; $z(x_i)$ 与 $z(x_i+h)$ 分别为连续压实检测参数在空间位置 x_i 和 x_i+h 上的实际观测值。

半变异函数曲线是半变异函数值 $\gamma(h)$ 对距离 h 的函数图,它有3个特征参数:基台值、变程和块金值,如图3所示。半变异函数一般用变异曲线表示,横坐标为步长,纵坐标为半变异函数值。由图3可知:当距离越近,半变异函数值越小,相关性越大。当距离 h 趋于0时, $\lim \gamma(0) = C_0$,这种现象称为块金效应, C_0 称为块金常数,反映了连续压实检测参数的随机性变异程度。当距离越远,半变异函数值越大,说明两点的属性值相关性越小,当 h 趋于无穷时, $\lim \gamma(\infty) = C_0 + C$, C 称为偏基台值,反映了连续压实检测参数的结构性变异程度,即被压实材料的不均匀性。

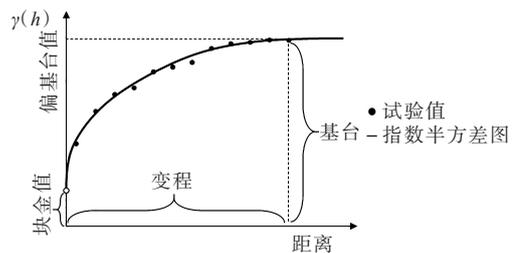


图3 半变异函数图

Figure 3 Semi-variance function

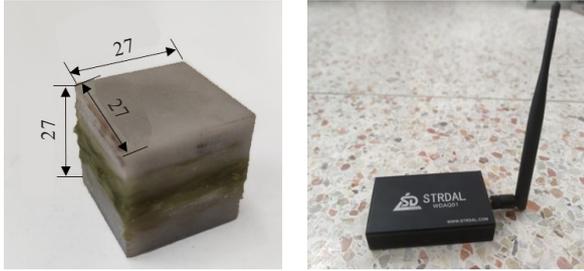
本研究利用半变异函数探讨不同压实遍数及温度下沥青混合料的均匀性。由于计算所得的散点难以直接描述连续压实参数的空间变异特征,为了定量给出变程 a 、块金值 C_0 及偏基台值 C ,需要对半变异函数进行拟合。本研究采用指数函数拟合连续压实检测参数的半变异函数计算结果,其公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right], & h > 0 \end{cases} \quad (3)$$

1.4 SmartRock传感器的组成及特征

SmartRock是一款多功能的无线传感器,其内置多种类型的传感模块,包括陀螺仪、磁力计、加速度计、应变片和温度计,可实时感知周围介质的受力、运动及温度变化特征。此外,SmartRock的外部结构

采用高强度、耐高温的材料丙烯腈-丁二烯-苯乙烯制作而成,温度监测范围 $-20\sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图4(a)所示,并可根据实际需求3D打印外部形状^[12-13]。SmartRock内置有低功耗蓝牙通讯模块,可将采集的数据实时传输给外部接收端口,如图4所示。



(a) SmartRock传感器(单位:mm) (b) 无线通讯天线

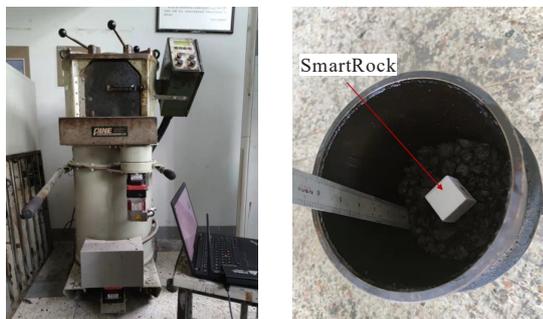
图4 SmartRock

Figure 4 SmartRock

智能骨料传感器由全局坐标系 $x-y-z$ 和固连于传感器的局部坐标系 $x'-y'-z'$ 组成。初始状态时,局部坐

$$R(\psi, \theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \cos \theta & \sin \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta \\ -\cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \cos \theta & -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \cos \theta & \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \psi \sin \theta & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(x', x) & \cos(x', y) & \cos(x', z) \\ \cos(y', x) & \cos(y', y) & \cos(y', z) \\ \cos(z', x) & \cos(z', y) & \cos(z', z) \end{bmatrix} \quad (5)$$

混合料在最佳油石比和最佳拌和温度下拌和,为了更好地监测温度变化对混合料压实过程的影响,本研究将SmartRock传感器埋置于混合料内部,如图5所示。已有研究成果表明:试件中间位置处的混合料具有较好的压实效果,同时可避免模具边界效应的影响。首先在模具内填入一半拌和好的沥青



(a) 旋转压实及SmartRock监测装置 (b) SmartRock的位置

图5 室内旋转压实试验

Figure 5 Indoor gyratory compaction tests

标系与全局坐标系重合,3个方向的欧拉角度为0,即为传感器旋转的“基准点”^[12-14]。智能骨料传感器可实时记录旋转压实过程中颗粒欧拉角的变化情况,并描述颗粒相对于全局坐标系的方向及位移变化。局部坐标与全局坐标之间的转换关系可用式(4)表示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: (x, y, z) 、 (x', y', z') 分别为全局坐标系与局部坐标系中的坐标点; R 为全局坐标系与局部坐标系间的转换矩阵,具体表达如式(5)所示^[12,15], ψ, θ, φ 为3个方向的欧拉角度。

1.5 试验材料及方法

为进一步研究混合料温度变化对压实效果的影响,本文选取了AC-20级配混合料开展室内旋转压实试验,具体级配见表1。

混合料,将SmartRock传感器放置于混合料中间位置;再将剩余混合料填入模具中;然后将混合料放入烘箱中保温2 h,试验中烘箱的温度分别设定为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。老化完成后采用旋转压实成型SGC试件。根据试验规程要求,最大旋转压实次数设定为140次,垂直压力为600 kPa,旋转速度为30 r/min,压实偏转角度为 1.25° 。

2 结果与讨论

2.1 压实遍数与压实度指标之间的关系

表2统计了沥青混合料在不同压实遍数下压实度指标的数理统计与地质统计指标。由表2可知:随着压实次数的增加,压实度指标的平均值并没有持续递增的趋势,在第6遍压实完成后,压实度指标的平均值出现了小幅度降低,这可能是由于过度压实破坏了骨料间的平衡状态,导致颗粒之间的嵌挤状态发生松散。在压实过程中,不仅要关注压实度大小,还要关注压实均匀性对路面压实质量及其长期

表1 AC-20矿料级配

Table 1 AC-20 mineral grading

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.75
设计级配	100.0	99.5	85.6	70.4	56.8	38.0	28.6	19.8	12.4	9.2	7.5	6.0
级配上限	100.0	100.0	90.0	82.0	70.0	46.0	36.0	28.0	22.0	16.0	12.0	7.0
级配下限	100.0	90.0	74.0	62.0	50.0	32.0	22.0	16.0	10.0	6.0	4.0	3.0

表2 不同压实次数下材料均匀性评价参数

Table 2 Evaluation parameters of material uniformity under different compaction times

压实遍数	数理统计学评价结果		地质统计学评价结果	
	均值 μ	标准差 σ	块金值 C_0	偏基台值 C
1	26.09	13.49	5.92	39.53
2	56.40	11.24	4.33	35.32
3	86.94	9.72	7.24	32.84
4	100.43	7.24	3.81	31.80
5	116.31	5.82	3.98	28.92
6	114.15	6.56	2.49	30.66

服役性能的影响。为探讨压实过程中压实均匀性的变化情况,本研究进一步分析了压实指标的标准差、变异系数以及偏基台值 C 。由表2可知:在第5遍压实完成后,沥青混合料压实度指标的标准差和偏基台值均达到最小值,结合压实度指标的均值与压实遍数的变化情况可知,第5遍压实完成后混合料压实度指标的平均值和均匀性达到最佳水平。因此,压实度的大小和均匀性并不会与压实遍数总呈正相关,应通过智能压实技术监测压实过程中混合料的压实度及其均匀性的变化情况,确定最佳压实遍数。此外,块金值 C_0 与压实遍数之间并没有呈现出显著的相关性,这主要是由于 C_0 反映了连续压实检测参数随机性的变异程度,该部分的变异性主要是由系统误差等因素决定的,与沥青混合料的压实均匀性并无直接关联。

2.2 材料温度对 V_{CMV} 的影响

在沥青混合料压实过程中,温度的变化会对沥青混合料的动态模量造成显著影响,从而导致压实度产生变化^[16-17]。在相同的路面结构及机械参数的情况下,研究不同压实温度对压实过程中压实度指标大小及均匀性的影响。图6为试验段第1遍压实与最后一遍压实过程中沥青混合料的温度及压实度指标分布情况,通过线性相关分析,发现压实度指标与温度之间存在一定相关性。其中,在第1遍压实过程中,高温区域的压实度指标比较低,而高压实度指标

主要分布在低温区域,如图6(a)、(b)所示;而在最后一遍压实过程中,温度较高区域的沥青混合料由于沥青的润滑作用使得颗粒发生持久的位移和转动,导致混合料的压实度较高,因此呈现出了较高的 V_{CMV} 。

为了定量描述压实过程中温度的变化与压实度指标之间的联系,本研究将温度的范围分为3个等级,分别为:Class I, 180~150 °C; Class II 150~120 °C; Class III 120~90 °C,不同温度区间所对应的路面区域定义为C-I、C-II和C-III,分别研究压实过程中温度变化对压实度指标的影响,结果如图7所示。由图7(a)可知,尽管在第1次压实过程中只有少数压实区域的沥青混合料的温度低于120 °C,但该区域的压实度指标与其他压实区域却没有较大的差距,这主要是因为初始压实过程中温度较低区域的沥青混合料模量较高,导致压实度指标较大。然而,在最后一遍压实过程中,温度较高区域沥青混合料的压实度指标出现了显著增加,其压实度指标远高于温度较低区域监测的压实度指标,如图7(b)所示。这是由于在温度较高和外部压实荷载作用下,沥青的黏度较低,且沥青对骨料的运动起到一定润滑作用,导致沥青混合料容易被压实,模量增幅较大,智能压实所监测到的 V_{CMV} 较大;反之,当沥青混合料温度较低,沥青黏度较大,集料间发生相对位移或转动时,需要克服较大的阻力,导致混合料较难被压实, V_{CMV} 的增幅较小,导致沥青混合料不易被压实。此外,为了更加直观地了解温度差异对沥青混合料压实均匀性的影响,本研究基于半变异函数对最后一遍压实完成后C-I、C-II和C-III区域内的沥青混合料的压实均匀性进行评价,结果如图8所示。在温度较高的C-I区域内,偏基台值 C 为11.79,表明该区域内压实度指标的结构变异程度较低,被压实沥青混合料的均匀性较高;由于C-III区域内温度较低,导致沥青黏度增高,在一定程度上也造成了压实均匀性变差。

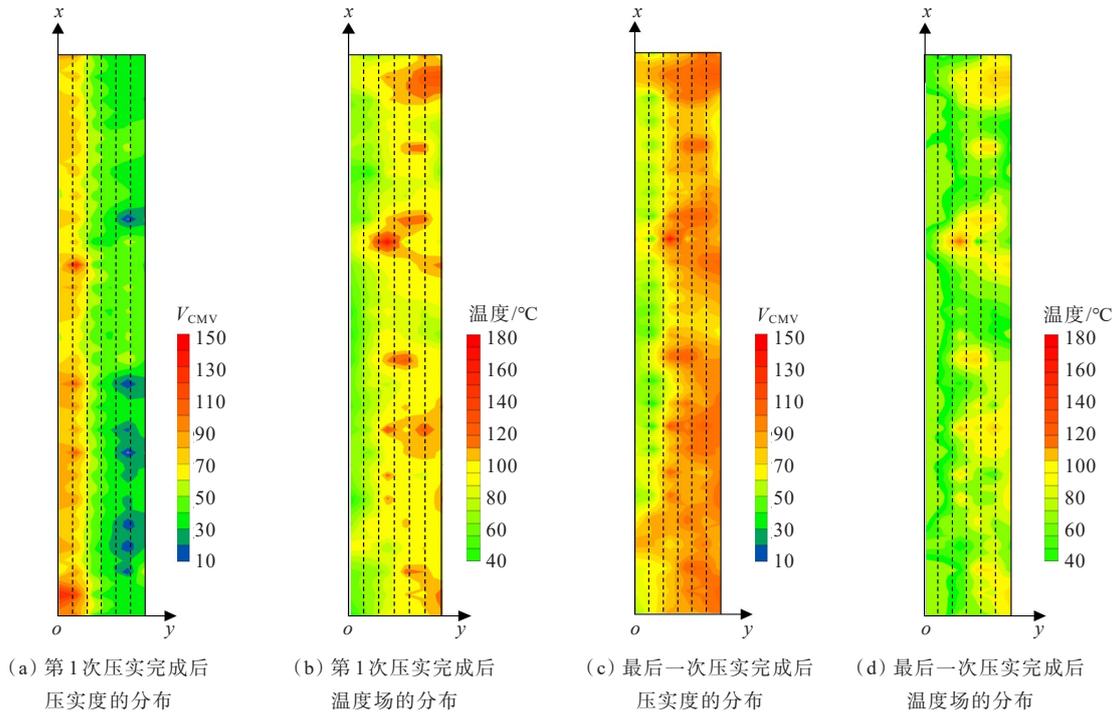


图6 压实完成后压实度和温度场的分布

Figure 6 Distribution of compaction and temperature fields after compaction

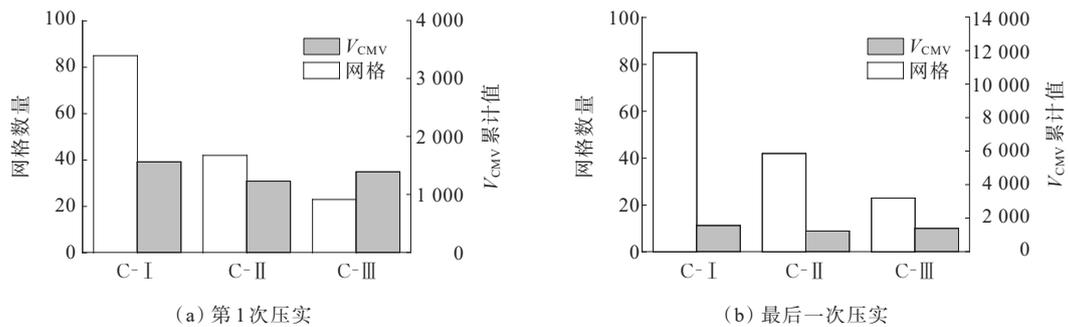


图7 压实后不同区域的压实度指标

Figure 7 Compaction index in different areas after compaction

2.3 室内试验结果

在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温条件下,沥青混合料在旋转压实过程中试件高度以及 SmartRock 传感器监测的应力、转角及温度随着压实次数的变化情况如图 9 所示。由图 9(a)可知: SmartRock 测得的 x 、 y 、 z 方向的力随着压实次数的增加而逐步提高,而在 x 和 y 方向所受力的大小远低于 z 方向的力,这是因为在旋转压实过程中,混合料在正应力和剪应力的共同作用下,提高了混合料的密度,而竖向正应力是压实度提高的主要因素。同时,在旋转压实过程中,试件高度的变化可用来表征混合料的压实状态,在初始压实阶段,混合料间的空隙较大,骨料间的嵌挤力较弱。因此,试

件在外部荷载的作用下其高度下降较快。经过约 70 次旋转压实后,试件高度的变化趋于稳定,此时 SmartRock 监测的接触力增速也逐步平缓,说明此时混合料间的空隙率减小,混合料处于相对稳定的压实状态。

在旋转压实过程中,骨料在外部荷载的作用下发生位移和转动,导致混合料空隙率降低,压实度增高。如图 9(b)所示, SmartRock 在监测沥青混合料绕 x 轴和 y 轴的竖向转动时,发现其与混合料高度的变化呈现一致的趋势。在初始压实阶段,相对旋转角度较大,但随着压实次数的增加,旋转角度相对减小,直至达到一个平稳期,此时的旋转角度较低且稳定,这标志着混合料达到稳定压实状态。此外,这也

进一步说明骨料在垂直方向的位移和转动是导致混合料压实度增高的主要原因之一。

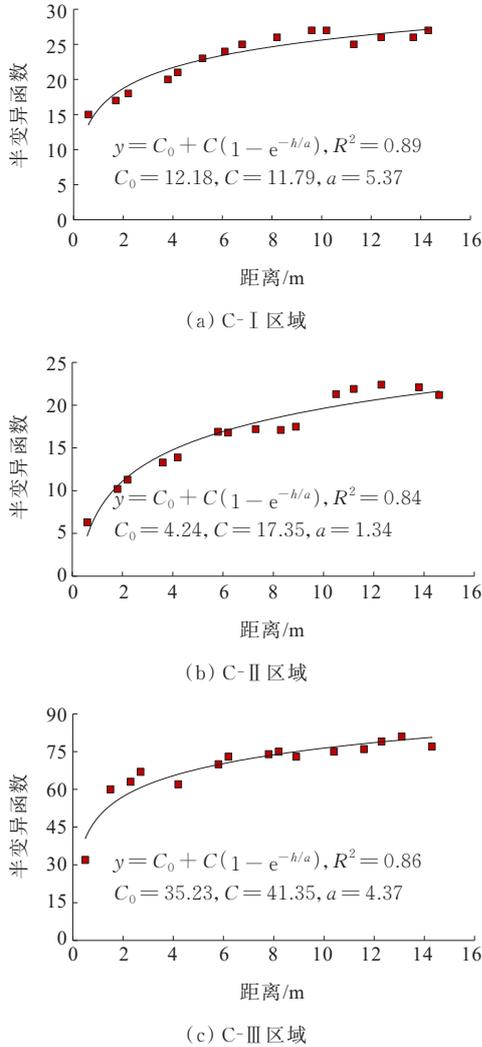


图8 各区域的地质统计分析结果

Figure 8 Results of geostatistical analyses in different regions

由于沥青混合料的特性(如黏度、和易性、刚度等)对温度变化非常敏感,因此,工程技术人员十分关注压实过程中沥青混合料温度的变化。实时获取沥青混合料在压实过程中的温度变化,尤其是内部温度,对于实时调整压实方式、提高压实质量具有至关重要的作用。将SmartRock埋置于沥青混合料中,实时记录旋转压实过程中混合料内部的温度变化。由于SmartRock传感器外部结构采用耐高温涂层,初始埋入混合料时存在缓慢的热传导过程,因此采用数字式温度计实时采集相同沥青混合料的温度变化。如图9(c)所示,在初始压实阶段,SmartRock测得的温度持续升高,并压实到60次时与电子温度计记录的温度相吻合,随后的压实过程,SmartRock可真实反映混合料的温度变化。

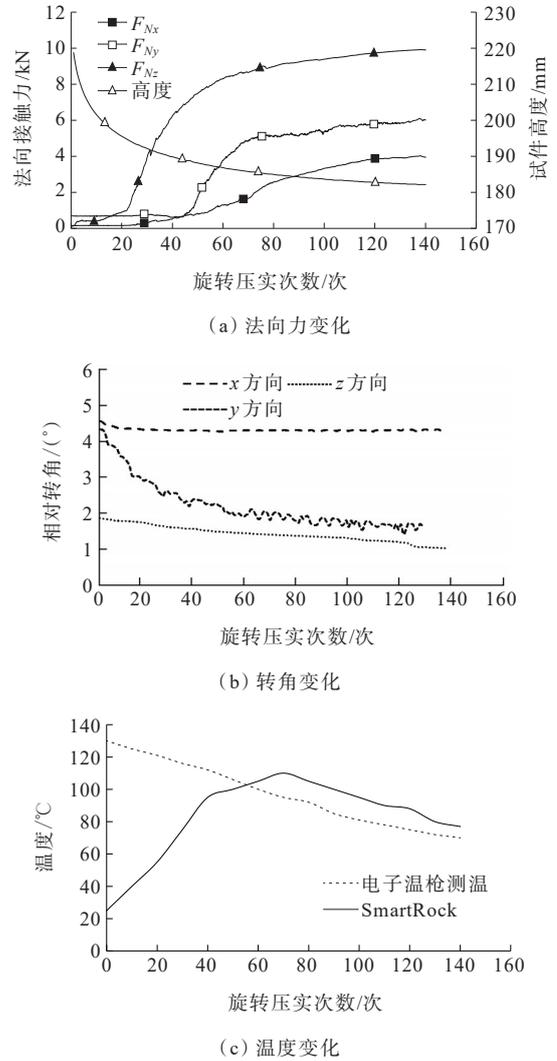


图9 压实过程中传感器监测指标随旋转压实次数的变化规律

Figure 9 Variation of sensor monitoring indexes with gyratory compaction times during compaction

通过上述分析可知,利用在压实过程中SmartRock监测的受力、转角、温度以及试件高度的变化,可较准确地表征沥青混合料在旋转压实过程中压实状态的变化。因此,在以下分析中采用该方法来研究不同温度对沥青混合料压实过程的影响。

图10为不同温度条件下SmartRock监测的 x 、 y 、 z 方向的转角变化。由图10可知:随着压实次数的增加,转角大小逐渐趋于平稳,这一稳定且数值较小的转角是沥青混合料达到压实稳定状态的重要标志之一。其中, x 和 y 方向的相对转角表现出相似的变化趋势,从较高的初始转角逐渐降低至稳定的平台期,与压实过程中试件高度的变化呈现出一致的规律。不同温度条件下, z 方向的转角并未呈现出显著的差异,这可以解释为骨料在垂直方向的转动和位移是

压实度增加的主要原因。通过对比不同温度条件下 SmartRock 监测的 x 与 y 方向转角进入平台期所需的压实次数可以发现,在 $90\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,随着温度的升高,转角进入平台期所需的压实次数逐渐减小,并在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现了最小值,然后出现了明显上升,如图 11 所示。这是因为当温度较低时,混合料中沥青的黏度较大,导致沥青结合料与矿料颗粒之间的黏聚力增强,因此需要更多的压实功来克服抗剪力,从而降低了沥青混合料的可压实性;其次,黏度大的结合料流动性差,不能在矿料颗粒表面形成一层完整的沥青膜,阻碍了热态沥青在压实过程中对混合料颗粒的润滑作用,不利于形成良好的密实效果。

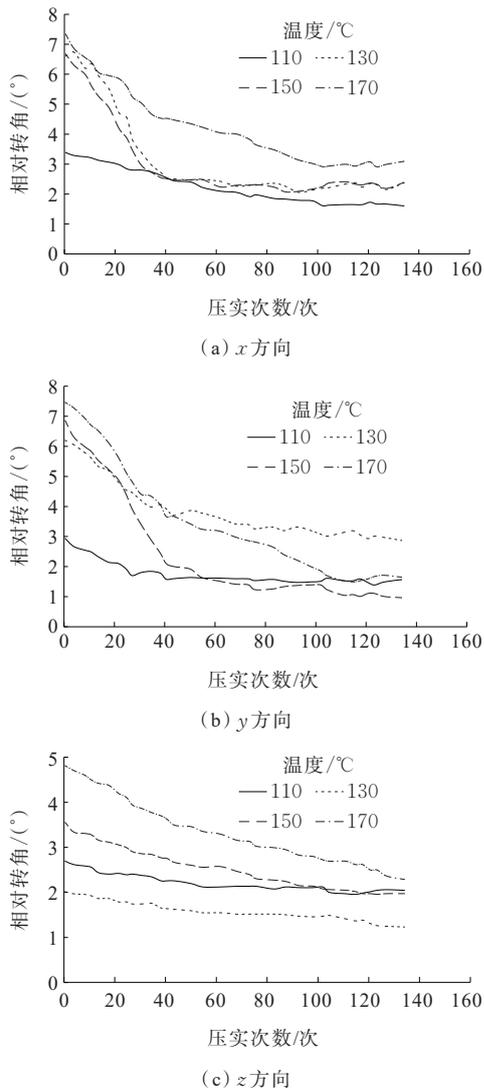


图 10 不同压实温度下传感器监测的转角变化
Figure 10 Variation of rotational angle monitored by sensor at different compaction temperatures

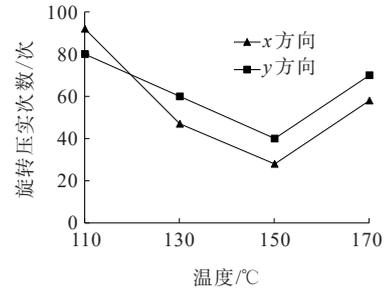


图 11 不同温度下达到压实稳定期所需的压实次数
Figure 11 Number of compaction times required to achieve compaction stability at different temperatures

当沥青混合料的温度继续增大时,结合料的黏度逐渐降低,使其在矿料颗粒周围形成完整的沥青薄膜。由于结合料的润滑作用,混合料颗粒的位移和转动变得更容易,所需的压实功也减小,混合料也更容易被压实。然而,过高的温度会明显降低沥青的黏结作用,不利于骨料间形成良好的嵌挤结构,进而降低混合料的压实效率。因此,沥青混合料在不同温度下会表现出不同压实特性,但并非温度越高,压实效果就越好,只有在合适的温度范围内,当沥青结合料的润滑作用和黏结作用达到合理的匹配时,才能取得最佳的压实效果^[15]。

3 结论

本文结合智能压实现场施工及室内旋转压实试验,研究了温度变化对沥青混合料压实过程的影响,主要结论如下:

(1) 通过分析智能压实监测值的空间分布特征,引入半变异函数来评估沥青混合料压实过程中的均匀性。研究发现压实度的大小及均匀性并不一直与压实遍数呈正相关,过度压实会导致压实度及其均匀性降低。因此,在压实过程中,实时监测压实度及其均匀性的变化至关重要,以避免出现过压现象。

(2) 研究现场压实过程中不同温度范围内沥青混合料压实度大小及均匀性的变化规律,发现温度的变化对混合料压实性有显著影响。温度较高的沥青混合料,在压实过程中压实度增幅较大,且最终压实均匀性较高。

(3) 利用 SmartRock 传感器与旋转压实设备,从细观尺度研究了不同压实温度下颗粒的受力及转角特征,以揭示温度变化对沥青混合料压实度的影响。研究发现,并非温度越高混合料越容易被压实。只

有在合适的温度范围内,沥青混合料的压实效果才能达到最佳。

参考文献:

References:

- [1] 林锦腾,祝轩. 沥青路面压实过程均匀性评价与影响因素分析[J]. 中外公路,2021,41(2): 48-53.
LIN Jinteng, ZHU Xuan. Uniformity evaluation and influence factor analysis of asphalt pavement in compaction process[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2): 48-53.
- [2] 王玉林,徐宁,卢东. 提升沥青路面抗水损害能力措施综述[J]. 中外公路,2022,42(1): 66-72.
WANG Yulin, XU Ning, LU Dong. Summary of measures to improve water damage resistance of asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(1): 66-72.
- [3] 黄国卿,严筱,杨永刚,等. 智能压实间接指标试验分析与压实度预测[J]. 中外公路,2020,40(2): 24-28.
HUANG Guoqing, YAN Xiao, YANG Yonggang, et al. Intelligent compaction indirect indicators test analysis and compactness prediction[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(2): 24-28.
- [4] 黄克峰,廉杨,王景辉,等. 高速公路粉土路基填料结构特性三轴试验研究[J]. 中外公路,2022,42(1): 206-210.
HUANG Kefeng, LIAN Yang, WANG Jinghui, et al. Triaxial compression test study on structural characteristics of powdered road base fillings[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(1): 206-210.
- [5] DAN H C, YANG D, LIU X, et al. Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading[J]. Construction and Building Materials,2020,247: 118592.
- [6] XU Q W, CHANG G K, GALLIVAN V L, et al. Influences of intelligent compaction uniformity on pavement performances of hot mix asphalt[J]. Construction and Building Materials,2012,30: 746-752.
- [7] LIU H, DUAN G, WANG F, et al. Numerical simulation of effect of reclaimed asphalt pavement on damage evolution behavior of self-compacting concrete under compressive loading[J]. Construction and Building Materials,2023,395: 132323.
- [8] CHEN J S, HUANG B S, SHU X, et al. DEM simulation of laboratory compaction of asphalt mixtures using an open source code[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015,27(3): 04014130-04014139.
- [9] LIU D H, LI Z L, LIAN Z H. Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology[J]. Automation in Construction,2014,44: 234-246.
- [10] FOSU-SAAH B, HAFEZ M, KSAIBATI K. A review of accelerated pavement testing applications in non-pavement research[J]. Civileng,2021,2(3):612-631.
- [11] 马涛,马源,黄晓明. 基于多元非线性回归的智能压实关键参数最优解[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(7):2067-2077.
MA Tao, MA Yuan, HUANG Xiaoming. Optimal combination of key parameters of intelligent compaction based on multiple nonlinear regression[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2023,53(7):2067-2077.
- [12] WANG X, SHEN S H, HUANG H, et al. Characterization of particle movement in superpave gyratory compactor at meso-scale using SmartRock sensors[J]. Construction and Building Materials,2018,175:206-214.
- [13] FU L L, TIAN Z K, ZHOU S H, et al. Characterization of ballast particle's movement associated with loading cycle, magnitude and frequency using SmartRock sensors[J]. Granular Matter,2020,22(3): 63.
- [14] WANG X, SHEN S H, HUANG H, et al. Towards smart compaction: Particle movement characteristics from laboratory to the field[J]. Construction and Building Materials,2019,218:323-332.
- [15] 张争奇,边秀奇,杜群乐,等. 沥青混合料压实特性影响因素研究[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(6): 36-41.
ZHANG Zhengqi, BIAN Xiuqi, DU Qunle, et al. Study on factors effecting on compaction property of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012,34(6): 36-41.
- [16] 臧芝树,赵宾,申爱琴. 半温拌泡沫沥青混合料水稳定性及压实特性研究[J]. 中外公路,2019,39(1): 261-266.
ZANG Zhishu, ZHAO Bin, SHEN Aiqin. Study on moisture resistance and compaction characteristics of foamed asphalt mixture based on half-warm mix technology[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1): 261-266.
- [17] 谭波,杨涛. 基于振动旋转压实制样方式骨架密实型大粒径级配碎石性能研究[J]. 中外公路,2022,42(5): 161-167.
TAN Bo, YANG Tao. Research properties of skeleton-density large graded macadam based on gyratory and vibration compaction[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(5): 161-167.