

基于 Abaqus 的沥青路面摊铺碾压时间分析研究

苏卫国, 何锐烽

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 沥青路面施工中, 摊铺碾压时间是沥青路面质量控制的重要影响因素之一。运用传热学理论并使用 Abaqus 有限元分析软件对沥青路面摊铺碾压温度场在不同大气温度、沥青上面层厚度、初始摊铺温度、风速等条件下进行分析, 计算发现: 前 6 min 内, 沥青路面上面层表面和底部的温度会急剧下降, 而中部温度并没有上面层表面和底部的降温幅度大; 沥青上面层厚度每提高 0.5 cm, 有效摊铺碾压时间可延长 11%; 初始摊铺温度每提高 5 °C, 有效摊铺碾压时间可延长 5.5%; 风速每降低 1.0 m/s, 有效摊铺碾压时间可延长 13.2%; 若能在沥青路面上面层摊铺开始后的前几分钟内做好摊铺场地的保温防风措施, 能有效减缓沥青上面层表面温度的下降速率, 延长有效摊铺碾压时间。

关键词: 温度场; 有限元; 摊铺碾压时间; 传热学

沥青路面开放交通后, 除了车辆超载、行车数量日益增多、后期路面得不到及时养护、各种气候、自然环境等因素影响外, 沥青路面施工期间的摊铺碾压质量对日后路面状况的影响也十分重要。好的沥青路面质量更需要科学的摊铺碾压工艺来支持。然而由于受到施工现场的环境温度、风速、太阳辐射量等诸多因素的影响, 热拌沥青混合料在摊铺过程中的降温规律变得十分复杂。控制摊铺过程完成终压所需的时间对于路面质量来说具有非常重要的意义。

1 基本理论

在传热学中传热是指由于温度差异引起的能量转移, 又称为热传递。由热力学第二定律可知, 只要温度存在差异, 热量就必然会从高温向低温转移。在沥青路面施工过程中, 温度与路面成型后的质量密切相关, 特别是在沥青路面摊铺施工中更能体现其重要性。

传热的过程十分复杂, 不同类型的传热过程称为传热模式, 而热传导、热对流、热辐射是 3 种基本的传热模式。一般情况下, 假设路面的热量平衡是建立在这 3 种基本的传热模式上, 大气温度在一定条件下会呈现周期性的变化特征。如太阳辐射对路面结构温度场的影响可以近似地用周期性变化的边界条件描述。

1.1 太阳辐射

参考文献[6]、[7]的研究成果, 太阳辐射 $q(t)$ 的日变化过程可以用式(1)近似表达:

$$q(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 12 - \frac{c}{2} \\ q_0 \cos[m\omega(t-12)] & 12 - \frac{c}{2} \leq t \leq 12 + \frac{c}{2} \\ 0 & 12 + \frac{c}{2} < t \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_0 为中午最大辐射, $q_0 = 0.131mQ$, $m = 12/c$; Q 为日太阳辐射总量(J/m^2); c 为实际有效日照时数(h); ω 为角频率, $\omega = 2\pi/(24 \text{ rad})$ 。

为避免在使用式(1)计算温度场时出现跳跃间断点, 需要将其展开为级数形式以得到光滑连续的函数表达式。将其展开为余弦三角函数形式的 Fourier 级数如式(2), 当计算阶数到达 30 即可满足工程精度的要求。

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left[\frac{k\pi(t-12)}{12}\right] \quad (2)$$

式中: $a_0 = \frac{2q_0}{m\pi}$;

$a_k =$

$$\left\{ \frac{q_0}{\pi} \left\{ \frac{1}{m+k} \sin \left[(m+k) \frac{\pi}{2m} \right] + \frac{\pi}{2m} \right\}, k=m \right. \\ \left. \left\{ \frac{q_0}{\pi} \left\{ \frac{1}{m+k} \sin \left[(m+k) \frac{\pi}{2m} \right] + \frac{1}{m-k} \cdot \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \sin \left[(m-k) \frac{\pi}{2m} \right] \right\} \right\}, k \neq m \right. \quad .$$

1.2 气温及对流交换

在太阳辐射作用下,大气温度在昼夜不同时间有明显的差异,并且呈现出周期性变化的特征。由于日最低气温通常出现在黎明前后 04:00—06:00,而日最高气温一般出现在最大太阳辐射出现后 2 h,即下午 14:00 左右,这样从最低气温上升到最高气温时间为 8~10 h,而从最高气温降到最低气温则需要 12~14 h,一般的正弦函数无法模拟这种实际的变温过程。因此,可采用两个正弦函数的线性组合来模拟气温的日变化过程,如式(3):

$$T_a = \bar{T}_a + T_m \{0.96 \sin[\omega(t-t_0)] + 0.14 \times \sin[2\omega(t-t_0)]\} \quad (3)$$

式中: T_a 为大气温度(°C); \bar{T}_a 为日平均气温(°C), $\bar{T}_a = \frac{1}{2}(T_a^{\max} + T_a^{\min})$; T_a^{\max} 为日最高气温(°C); T_a^{\min} 为日最低气温(°C); T_m 为日气温变化幅度(°C), $T_m = \frac{1}{2}(T_a^{\max} - T_a^{\min})$; ω 为角频率, $\omega = 2\pi/(24, \text{rad})$; t_0 为初相位,最大太阳辐射与最高气温的出现时间差加 7 h,一般情况下,设时间差为 2 h,为此,可以取 $t_0 = 9 \text{ h}$ 。

路面表面与大气产生热交换的热交换系数 h_c 主要受风速影响,两者之间呈线性关系,如式(4):

$$h_c = 3.7V_w + 9.4 \quad (4)$$

式中: h_c 为热交换系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]; V_w 为风速 (m/s)。

1.3 路面有效辐射

地面温度、气温、云量、空气的湿度及透明度等诸多因素都会影响路面有效辐射的大小。以往许多研究都是通过适当改变路表面放射系数以修正气温,或者对太阳辐射的幅值进行折减来近似计算路表面有效辐射的释热效果,但这种处理方式会带来很大的误差,为减少误差,采用式(5)实现地面有效辐射的边界条件。

$$q_F = \varepsilon \sigma [(T_1|_{z=0} - T_Z)^4 - (T_a - T_Z)^4] \quad (5)$$

式中: q_F 为地面有效辐射 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]; ε 为路面发射率(黑度),沥青路面取 0.81; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数(黑体辐射系数), $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$; $T_1|_{z=0}$ 为路表温度(°C); T_a 为大气温度(°C); T_Z 为绝对零度值(°C), $T_Z = -273^\circ\text{C}$ 。

2 沥青路面温度场仿真计算

为从复杂的降温过程中找到相关影响因素和变化规律,参考珠三角地区往年气象参数并建立相应的 2D 瞬态温度场模型,模拟各种条件变化对沥青摊铺碾压过程中温度场的变化规律,从而分析出更为合理的有效摊铺碾压时间。

2.1 有限元模型的建立

根据传热学的基本原理建立二维有限元分析模型,利用 Abaqus 有限元分析软件对典型沥青路面摊铺碾压温度场进行数值模拟,借助 Abaqus 用户子程序 DFLUX 和 FILM 引入式(2)、(3)和(4)来定义随时间变化的热流、气温及对流热交换与路面的相互作用。

2.2 结构与材料参数

参考文献[9]中的研究成果,路面结构温度场中最主要的两个热力学参数就是热传导率和热容量。热容量在沥青路面摊铺碾压过程中变化不大所以在模拟过程中可将其视为常数。沥青混合料在碾压过程中,其热属性参数会发生变化,主要原因在于其空隙率变小。假定摊铺后沥青混合料的空隙率为 15%,中国规范一般要求 SMA 压实后的空隙率为 3%~4%,取压实后空隙率为 4%。参考文献[10]的研究成果,采用 Williamson 于 1972 年提出的沥青混合料导热系数公式(6):

$$k_m = k_a^m \times k_b^n \times k_v^p \times k_w^q \quad (6)$$

式中: k_m 为沥青混合料的导热系数; k_a 为骨料的导热系数; k_b 为结合料的导热系数; k_v 为空气的导热系数; k_w 为水的导热系数; m, n, p, q 分别为混合料中骨料、结合料、空气和水的体积百分率,以小数计。

在已知 SMA-13 压实后的热传导率时,假定空气的导热系数 $k_v = 1.569 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、SMA-13 压实前和压实后的空隙率 p ,可推算出摊铺后 SMA-13 的热传导率。模型中所用的结构见图 1,压

改性沥青 SMA-13	4 cm
改性沥青 Sup-20	6 cm
重交沥青 Sup-25	8 cm
水泥稳定碎石	40 cm
石灰土	20 cm
土基	

图 1 沥青路面结构

实后路面材料参数见表 1。摊铺后,上面层材料参数见表 2,其余结构层的热属性参数按表 1 取。

表 1 压实后路面温度场分析热属性参数

路面结构	热传导率 $K/[J \cdot (m \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1}]$	密度 $\rho/$ $(kg \cdot m^{-3})$	热容量 $C/$ $[J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$	太阳辐 射吸收 率 α_s	路面 发射 率 ϵ	绝对零 度值 $T_z/^\circ C$	Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma/[J \cdot (h \cdot m^2 \cdot K^4)^{-1}]$
沥青面层	4 680	2 300	924.9	0.90	0.81	-273	2.041×10^{-4}
水泥稳定碎石	5 616	2 200	911.7				
石灰土	5 148	2 100	942.9				
土基	5 616	1 800	1 040.0				

表 2 摊铺后改性沥青 SMA-13 的热属性参数

空隙率/ %	热传导率 $K/$ $[J \cdot (m \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1}]$	密度 $\rho/$ $(kg \cdot m^{-3})$
15	1 578	2 000

2.3 基本假设

为方便问题的分析计算,对路面结构温度场做出以下假设:

- ① 各结构层均为均匀、连续、各向同性的线弹性体;
- ② 路面各层材料之间紧密结合,层间温度和热流连续;
- ③ 不考虑路面温度场的横向变化,假定热流只沿路面垂直方向向下传递;
- ④ 除给定的随温度变化的材料参数外,其他材料参数不随温度的变化而变化;
- ⑤ 模拟的路面结构温度场以 24 h 为一个周期变化。

2.4 气温动态变化模拟

为模拟一天 24 h 大气温度的变化情况,参考珠三角地区一年的气温变化数据,计算出 12 个月的月平均最高温度和月平均最低温度,如图 2 所示。

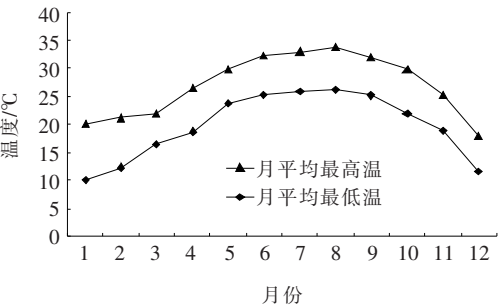


图 2 全年各月份月平均最高温最低温变化曲线

选取月平均最高温度中温度最高的 8 月作为建模的大气温度条件。将 8 月的平均最高温和平均最低温作为该月一天温度状态变化的代表值分别对应日最高气温 T_a^{\max} 和日最低气温 T_a^{\min} ,通过式(3)计算出代表 8 月中一天 24 h 内大气温度的变化情况,并与当地气象

局一天 24 h 实测温度比较,结果如图 3 所示。

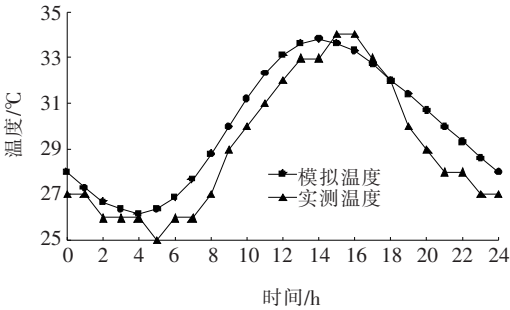


图 3 24 h 温度变化曲线图

3 模拟结果与数据分析

3.1 沥青路面温度场的变化情况

大气温度在一天 24 h 内不断发生着动态变化,沥青路面摊铺过程中的温度场会随着一天气温的变化而变化。选取沥青路面结构模型的上面层表面、中间、底部的中点分别进行温度数据的采集,模拟开始摊铺上面层的时间为 14:00,此时沥青混合料模拟的上面层摊铺初始温度为 160℃,中面层的初始温度为 50℃,大气温度为 33.8℃,风速为 2.0 m/s。对采集好的温度数据进行科学处理和分析,并根据相关数据绘制该时间段内沥青路面结构温度场的变化曲线见图 4。

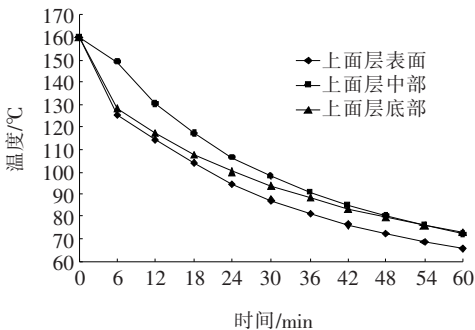


图 4 上面层各部位温度随时间变化曲线图

从图4可知:模拟摊铺沥青路面结构上面层的摊铺温度在急剧下降,在36 min以后逐渐趋于平缓最后随着时间推移稳定在某个温度区间范围内。

在前6 min内,上面层表面温度的平均下降速率为 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,上面层中部温度的平均下降速率为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,上面层底部温度的平均下降速率为 $5.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。上面层表面温度急剧下降的主要原因是大气温度、空气对流和太阳辐射等多重因素的影响,特别是空气对流会加剧沥青混合料与空气的热交换,从而快速将沥青混合料的热量带走。而上面层底部由于直接与温度较低的中面层顶部接触,温度高的上面层底部会通过热传导的方式将自身热量传递到中面层,直接导致上面层底部的温度急剧下降。由于上面层中部不与大气环境和中面层直接接触,周围接触的都是温度较高的沥青混合料,同时上面层表面的热量也通过热传递方式将热量往中部传递,所以其温度下降幅度并没有上面层表面和底部的降温幅度来得剧烈,这段时间内温度也明显高于其他位置的温度。

在6~18 min内,上面层表面温度的平均下降速率为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,上面层中部温度的平均下降速率为 $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,上面层底部温度的平均下降速率为 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。相较于前6 min,上面层表面和底部温度的下降速率均有较大幅度的降低,而上面层中部的下降速率有所提高。上面层表面由于不断向外界传递热量,减少了表面与大气环境的温度差,温度下降速率有所降低。同时由于上面层中部位置的温度一直高于表面与底部,对上面层表面与底部温度下降速率的减缓也起到了一定的促进作用。

在18 min后,上面层3个位置温度的下降速率进一步放缓,而上面层中部温度的下降速率较其他两个位置快,其温度逐渐靠近上面层底部温度并在48 min时基本一致。

3.2 沥青上面层厚度对路面温度场分布的影响

为探究摊铺的沥青上面层厚度对路面摊铺温度场的影响,严格控制除沥青上面层厚度外的其他参数不变,仅改变上面层厚度的数值。选取沥青上面层厚度分别为3、3.5、4、4.5、5 cm,进行仿真模拟分析,其表面温度的平均下降速率如表3所示。

由表3可知:①在前6 min,沥青上面层厚度的增加对沥青上面层中部温度的平均下降速率影响最为明显,对上面层表面和底部的影响并没有中部明显;②在6~12 min,上面层的表面、中部、底部温度的平均下降速率随着沥青上面层厚度的增加均呈现减缓趋势;③

24 min后,沥青上面层厚度的增加对上面层表面、中部和底部温度的平均下降速率基本没有太大影响。

表3 上面层表面、中部、底部温度的平均下降速率

位置	上面 层厚 度/cm	不同时间(min)的温度下降速率/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)					
		0~ 6	6~ 12	12~ 18	18~ 24	24~ 30	30~ 36
上面层表面	3.0	6.2	2.9	2.2	1.5	1.2	0.9
	3.5	6.5	2.0	2.1	1.6	1.2	0.9
	4.0	6.6	1.3	2.0	1.5	1.2	1.0
	4.5	6.6	0.9	1.9	1.5	1.2	1.0
	5.0	6.7	0.6	1.8	1.4	1.2	1.0
上面层中部	3.0	3.7	3.7	2.4	1.7	1.3	1.0
	3.5	2.7	3.8	2.3	1.8	1.4	1.1
	4.0	1.9	3.7	2.3	1.7	1.4	1.1
	4.5	1.3	3.5	2.2	1.7	1.4	1.1
	5.0	0.8	3.3	2.1	1.7	1.4	1.1
上面层底部	3.0	6.2	2.3	1.8	1.4	1.1	0.9
	3.5	6.2	1.8	1.6	1.3	1.1	0.9
	4.0	6.2	1.5	1.5	1.2	1.0	0.9
	4.5	6.2	1.3	1.3	1.1	1.0	0.8
	5.0	6.2	1.1	1.2	1.0	0.9	0.8

为了保证路面压实质量,需要在路面温度下降到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前完成终压,以上面层表面温度的下降规律作为研究对象,绘制不同厚度上面层表面温度随时间的变化曲线(图5)。

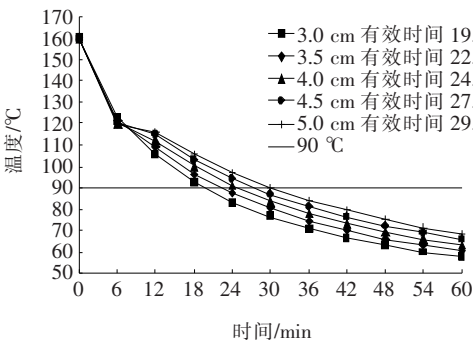


图5 不同上面层厚度上面层表面温度随时间的变化曲线

从图5可以得出:沥青上面层厚度每提高0.5 cm,完成摊铺的有效碾压时间可延长11%。

3.3 初始摊铺温度对路面温度场分布的影响

为探究沥青混合料的初始摊铺温度对路面摊铺温度场的影响,严格控制除初始摊铺温度外的其他参数不变,仅改变初始摊铺温度的数值。选取初始摊铺温

度分别为 160、165、170、175、180 ℃ 进行仿真分析。不同初始摊铺温度时上面层表面、中部和底部温度的平均下降速率如表 4 所示。

表 4 上面层表面、中部、底部温度的平均下降速率

位置	初始摊铺温度/℃	不同时间(min)的温度下降速率/(℃·min ⁻¹)					
		0~6	6~12	12~18	18~24	24~30	30~36
上面层表面	160	6.6	1.3	2.0	1.5	1.2	1.0
	165	6.8	1.5	2.1	1.6	1.2	1.0
	170	6.9	1.8	2.2	1.6	1.3	1.0
	175	6.9	2.2	2.2	1.7	1.3	1.1
	180	7.0	2.4	2.3	1.8	1.4	1.1
上面层中部	160	1.9	3.7	2.3	1.7	1.4	1.1
	165	2.1	3.8	2.4	1.8	1.4	1.2
	170	2.3	3.9	2.4	1.9	1.5	1.2
	175	2.5	3.9	2.5	1.9	1.5	1.2
	180	2.8	3.9	2.6	2.0	1.6	1.3
上面层底部	160	6.2	1.5	1.5	1.2	1.0	0.9
	165	6.4	1.6	1.5	1.3	1.1	0.9
	170	6.7	1.7	1.6	1.3	1.1	1.0
	175	6.9	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
	180	7.0	2.0	1.7	1.4	1.2	1.0

由表 4 可知:① 在前 12 min 内,上面层表面和底部温度的平均下降速率随着初始摊铺温度的上升而有较为明显的加快,说明初始摊铺温度越高前期路面表面和底部温度的平均下降速率越快;② 12 min 后,初始摊铺温度的上升对上面层表面和底部温度的平均下降速率的影响虽然仍呈现上升趋势,但其对温度平均下降速率的影响随着时间推移变得越来越小;③ 上面层中部温度的平均下降速率在前 30 min 内,随着初始摊铺温度的上升而加快。在 30 min 后影响效果越来越小。

为了保证路面压实的质量,需要在路面温度下降到 90 ℃ 之前完成终压,以上面层表面温度的下降规律作为研究对象,绘制不同摊铺温度时上面层表面温度随时间的变化曲线(图 6)。从图 6 可以得出:若初始摊铺温度每提高 5 ℃,完成摊铺的有效碾压时间可延长 5.5%。

3.4 风速对路面温度场分布的影响

为探究不同风速对路面摊铺温度场的影响,严格控制除风速外的其他参数不变,仅改变风速的数值。

选取风速分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 m/s 进行仿真分析。不同风速时上面层表面、中部和底部温度的平均下降速率如表 5 所示。

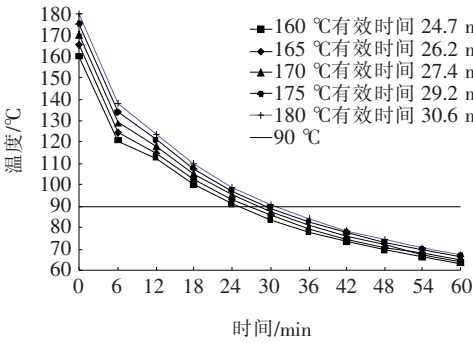


图 6 不同摊铺温度上面层表面温度随时间变化曲线图

表 5 上面层表面温度的平均下降速率

位置	风速/(m·s ⁻¹)	不同时间(min)的温度下降速率/(℃·min ⁻¹)					
		0~6	6~12	12~18	18~24	24~30	30~36
上面层底部	1.0	6.0	1.2	2.0	1.5	1.2	1.0
	2.0	6.6	1.3	2.0	1.5	1.2	1.0
	3.0	6.8	1.8	2.0	1.5	1.2	0.9
	4.0	7.1	2.2	2.0	1.5	1.2	0.9
	5.0	7.4	2.4	2.0	1.5	1.1	0.9
上面层中部	1.0	1.7	3.5	2.2	1.7	1.4	1.1
	2.0	1.9	3.7	2.3	1.7	1.4	1.1
	3.0	2.2	3.6	2.3	1.8	1.4	1.1
	4.0	2.5	3.6	2.4	1.8	1.4	1.1
	5.0	2.7	3.7	2.5	1.9	1.4	1.1
上面层表面	1.0	6.2	1.4	1.4	1.2	1.0	0.9
	2.0	6.2	1.5	1.5	1.2	1.0	0.9
	3.0	6.1	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9
	4.0	6.0	1.9	1.6	1.3	1.1	0.9
	5.0	6.0	1.9	1.7	1.4	1.1	1.0

由表 5 可知:① 在前 6 min 内,上面层表面和中部温度的平均下降速率随着风速上升而有明显加快。风速的上升对上面层底部温度的平均下降速率影响并不明显;② 12 min 以后,风速变化对上面层各部位温度的平均下降速率已没明显影响;③ 前 12 min 风速变化对于上面层表面摊铺温度场的影响非常明显。风速是影响空气对流十分重要的因素,而风速的上升会加速空气对流,从而加速沥青混合料表面热量的散失。风速对沥青温度的影响很有可能会让其表面产生硬壳

面,对沥青路面摊铺碾压质量造成严重影响并导致沥青路面使用年限大大减少。

为了保证路面压实的质量,需要在路面温度下降到 90°C 之前完成终压,以上面层表面温度的下降规律作为研究对象,绘制不同风速上面层表面温度随时间的变化曲线(图7)。

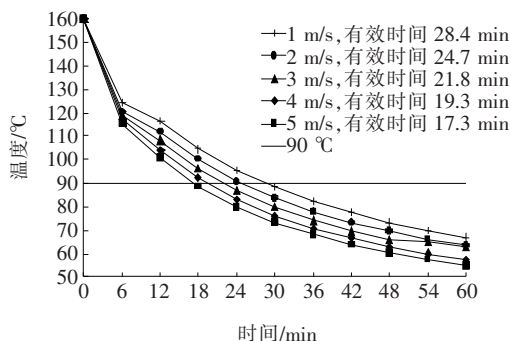


图7 不同风速上面层表面温度随时间的变化曲线

从图7可以得出:风速每降低 1.0 m/s ,完成摊铺的有效时间可延长 13.2% 。

3.5 实测结果与模拟结果的比较

为验证模型的可靠性,依托深圳市华富路试验段,通过红外线热成像仪观测沥青上面层表面在摊铺碾压过程中的温度变化情况,运用Abaqus模型计算相应条件下路面摊铺碾压过程的温度,将实测数据与模拟分析得出的数据进行比较,如图8所示。

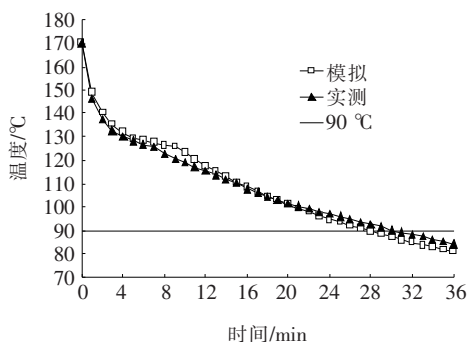


图8 上面层表面温度模拟值与实测值比较

由图8可得:运用Abaqus有限元模型所模拟的结果基本能反映实际路面摊铺碾压温度的变化情况,模拟温度与实测温度下降到 90°C 所用的时间分别为28和30 min,两者所耗时间相差不大,证明模型模拟结果具有一定的可靠性。

4 结论

在传热学理论分析的基础上,通过Abaqus有限元

分析软件建立了典型沥青路面结构的温度场分析模型,并通过用户子程序DFLUX和FILM定义随时间变化的热流、气温以及对流热交换与路面的相互作用。通过控制单一变量的方法,对各种因素影响下的典型沥青路面结构温度场进行了模拟分析和计算。通过观察沥青路面上面层表面、中部、底部温度的平均下降速率并分析沥青路面摊铺温度场的下降规律,得出以下结论:

(1) 沥青路面上面层在摊铺开始时的前6 min内,沥青路面上面层表面和底部的温度会急剧下降,而中部温度降温幅度并没有上面层表面和底部大;在6 min后,3个位置温度的下降幅度基本相似,随着时间的推移,温度下降幅度越来越小。

(2) 沥青路面上面层摊铺温度的平均下降速率随着沥青上面层厚度增加而降低;而随着初始摊铺温度和风速的升高而加快。增加沥青路面上面层的摊铺厚度和初始摊铺温度、降低沥青路面摊铺时的风速能有效延长沥青路面上面层完成终压所需的时间。

(3) 沥青上面层厚度每提高 0.5 cm ,有效摊铺碾压时间可延长 11% ;初始摊铺温度每提高 5°C ,有效摊铺碾压时间可延长 5.5% ;风速每降低 1.0 m/s ,有效摊铺时间可延长 13.2% 。

(4) 在沥青路面上面层摊铺开始的几分钟内做好摊铺场地的保温隔风措施,可有效减缓沥青上面层表面温度的下降速率,延长有效摊铺碾压时间。

参考文献:

- [1] 徐邱彬,高英. 沥青路面摊铺碾压温度场分析[J]. 中外公路,2008(4).
- [2] 姜小琴. 沥青混合料摊铺时温度场的影响因素分析[J]. 湖南交通科技,2005(4).
- [3] 王孙富. 沥青路面结构温度场与温度应力的数值模拟分析[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文,2010.
- [4] 赵岩荆,倪富健. 环境温度周期变化下沥青混凝土路面粘弹性力学响应[J]. 交通运输工程与信息学报,2010(4).
- [5] 许彪. 沥青路面摊铺温度场及离析研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2016.
- [6] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报,1984(6).
- [7] 廖公云,黄晓明. Abaqus有限元软件在道路工程中的应用[M]. 2版. 南京:东南大学出版社,2014.
- [8] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [9] 石鑫,李彦伟,张久鹏. 沥青路面碾压温度场与有效压实时间分析[J]. 公路交通科技,2013(6).
- [10] 冯德成,李兴海,郭大进,等. 基于热物理特性的沥青混合料的研究[J]. 公路交通科技,2010(3).