

# 水泥混凝土路面的温度梯度研究

曾惠珍

(福建船政交通职业学院道路工程系,福州 350007)

**摘 要:**水泥混凝土路面铺筑前 72 小时的温度场形成的水泥混凝土的早期性状(如收缩开裂、接缝张开量和固化翘曲等),显著地影响着路面服务阶段的长期性能,甚至改变路面在交通荷载下的临界荷位和破坏模式。试验研究发现不同时段铺筑的路面混凝土在水化热和外界气候的共同作用下,路面温度场将呈现明显不同的特征。借鉴国外研究,探讨研究了水泥混凝土路面固化温度梯度、固化翘曲及其对路面早期和长期性能的影响。依据监测数据,给出了水泥混凝土路面一天内不同施工时段时其凝固温度推荐值。

**关键词:**水泥混凝土路面;固化温度梯度;固化翘曲;温度应力

**中图分类号:**U416.216

**文献标志码:**A

## 引 言

水泥混凝土路面(简称路面)从浇筑开始经历了从流态到塑态、再到固态的凝结硬化过程。水泥水化释放的热量以及外部环境如温度、太阳辐射的变化,水泥水化对水的消耗以及路面表面水分散失都会导致路面结构内部的温度场、湿度场不断变化,在水泥混凝土终凝后,路面会产生应力与变形。我国有关施工阶段温度场对路面后期性能的影响研究很少,但国外很多学者<sup>[1-2]</sup>研究表明,水泥混凝土路面铺筑前 72 小时的温度场形成的水泥混凝土的早期性状(如收缩开裂,接缝张开量、固化翘曲等),显著地影响着路面服务阶段的长期性能,甚至改变路面在交通荷载下的临界荷位和破坏模式。Francis 等<sup>[34]</sup>采用表面轮廓仪研究了路面的固化翘曲变形情况,认为这种翘曲是温度梯度和湿度梯度综合作用的结果,并且在大多数情况下呈向上翘曲,甚至会出现路面角与基层脱离的情况,这对路面受荷非常不利。Wellsa 等<sup>[5]</sup>也指出,由于固化翘曲引起的路面对角线方向的曲率可以达到  $1.24 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ (受约束路面)和

$4.08 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ (自由路面)。此外,早期水泥混凝土也易出现表面裂缝和断板现象。国内在固有温度梯度方面的研究还比较少,冯德成等<sup>[6]</sup>研究不同养生方式对路面固化翘曲的影响。

借鉴国外研究,本文探讨研究了水泥混凝土路面固化温度梯度、固化翘曲及其对路面早期和长期性能的影响。试验研究发现不同时段铺筑的路面混凝土在水化热和外界气候的共同作用下,路面温度场将呈现明显不同的特征<sup>[7-8]</sup>。

## 1 影响道路温度梯度的因素

### 1.1 环境因素

各种外界环境因素对水泥混凝土路面温度梯度的影响过程如图 1 所示。影响路面温度梯度的水泥混凝土主要因素包括:外界气温、太阳直接辐射、散射辐射、地面辐射、大气逆辐射、风速、对流热交换、云量和雨雪等,路面温度场的分布与路面结构的内部物理性质也直接相关,如路面结构各层材料的导热系数与导温系数、材料对太阳辐射的吸收率、路表热交换系数等。

收稿日期:2015-06-19

基金项目:福建省教育厅项目(JB12362)

作者简介:曾惠珍(1983-),女,福建福鼎人,讲师,硕士,主要从事路基与路面工程方面的研究,(E-mail)121797922@qq.com

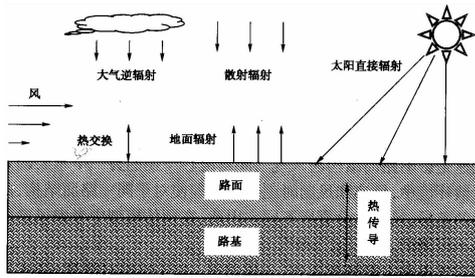


图 1 环境因素对水泥混凝土路面温度场的影响

研究发现<sup>[8]</sup>,气温与辐射是影响道路温度场的最主要因素。路面结构温度随外界环境昼夜变化呈周期性变化,且随着深度增加,温度波动的幅度逐渐减小,波动滞后。

### 1.2 混凝土材料因素

混凝土的热学特性是影响混凝土温度应力的一个重要因素,其中影响最大、最明显的是混凝土绝热温升。由于影响混凝土绝热温升的因素(如水泥品种、水泥用量、混合材料品种及其用量等)复杂多样,不同水泥品种、混合材料品种及其用量等对混凝土绝热温升速率和最终绝热温升值影响很大<sup>[9]</sup>。混凝土在浇筑的初期,水泥在水化过程中释放出大量的水化热,且主要集中在浇筑后的 3~5 d 内,从而使混凝土结构内部温度升高,而结构外部温度相对较低,这样就形成了温度梯度,使结构内部产生压应力,表面产生拉应力,当这种拉应力超过混凝土本身的极限抗拉强度时,混凝土表面就会产生裂缝。

外部环境因素和路面各层材料的内部因素综合在一起,相互耦合作用形成了水泥混凝土路面结构复杂的温度梯度,且各因素对路面温度场特征的形成和影响各不相同。

## 2 路面结构温度梯度特征

在某一瞬间,路面结构中由温度相同的点构成等温面,沿等温面法线方向的温度变化率最大,称之为温度梯度,正温度梯度表示随着深度增加,温度降低;负温度梯度表示随着深度增加,温度升高。研究发现绝大多数时段,温度沿板厚呈非线性分布,越靠近路表面,温度梯度变异越大,整体从上到下是先陡后缓的分布情况,随着深度增加,温度梯度的波幅越来越小。

《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTGD40-2002)在计算面板温度梯度时,将温度沿板厚的分布视为线性分布,并推荐了各地区最大的温度梯度值。

$$\text{温度梯度} = \frac{\text{板顶温度} - \text{板底温度}}{\text{板厚}}$$

## 3 早期固化温度梯度及其影响

研究发现,路面混凝土铺筑 6~10 小时后凝固时,路面此时沿深度会带有明显的温度差,假定此时混凝土凝固时的形状是平坦的,则这个温度差将永久地记忆在混凝土中,日后将会显著地影响路面的翘曲形状和温度应力。国外将这个温度差称为“built-in temperature”,本文称之为“固化温度梯度”。

实际上,水泥混凝土路面凝固时还有徐变、干缩和湿度梯度等影响路面的早期性状,水泥混凝土板在使用阶段的翘曲实际是 5 个非线性分量的综合作用:

- (1) 路面使用阶段由外界环境引起的沿板深的温度梯度。
- (2) 沿板深度的湿度梯度。
- (3) 板凝固时的温度梯度。
- (4) 板硬化时的干缩梯度。
- (5) 徐变。

在分析中可以用总的等效温度梯度  $\Delta T_{tot}$  描述。

$$\Delta T_{tot} = \Delta T_{ig} + \Delta T_{mg} + \Delta T_{bi} + \Delta T_{shr} - \Delta T_{crp}$$

式中:  $\Delta T_{ig}$  为路面使用阶段由外界环境引起的沿板深的温度梯度;  $\Delta T_{mg}$  为固化温度梯度;  $\Delta T_{bi}$  为湿度梯度引起的翘曲效果相同的温度梯度;  $\Delta T_{shr}$  为干缩引起翘曲效果等效的温度梯度;  $\Delta T_{crp}$  为与徐变效果相同的温度梯度。

干缩、徐变、湿度梯度和固化温度梯度国外统一定义为“等效的固化温度梯度”,因为这四个方面与水泥混凝土施工阶段的早期性能均有相关。

如果要准确地进行水泥混凝土路面的温度应力力学分析,除了要得到路面使用时刻的温度场或温度梯度特征,而且还要了解在施工阶段已经“固化”到混凝土板中的另外四个特征量。干缩、徐变、湿度梯度形成的“固化翘曲”评价很复杂,而混凝土凝固时固化的温度场则通过早期监测可以获得一个相对直接的了解。

## 4 路面板的固化翘曲

在交通荷载和长期季节气候条件作用下,路面板应力水平增加,固化的翘曲将随后演变为错台和裂缝问题,这将进一步影响路面的翘曲形状和支撑条件。对于凝固时的正温度梯度,路面板将更容易发生板角破坏,对于凝固负温度梯度,路面将更容易出现板中裂缝,干缩导致固化翘曲在板角比板中产生更严重的应力,另外在一定的条件下,固化翘曲将导致更显著的板的翘曲形状,这将影响路面的初始平整度,影响路面的行车舒适性。

早期龄期的温度梯度是环境条件和水化热的函数,

板中凝固时的初期温度梯度影响板的翘曲形状。

混凝土凝固后,由于存在固化温度梯度(理论上讲此时路面板为平整状态无翘曲),在后期的温度场作用下,路面会发生以下情况:

(1)路面正常降温,在干缩、湿度场和温度场作用下,混凝土路面板因翘曲变形受到约束而产生温度翘曲应力,此时早期混凝土强度并没有达到足够强度,如果没有及时锯缝,路面会出现早期开裂。

(2)即使及时锯缝,在随后的混凝土路面增长阶段,如果遇到大幅度的突然降温,温度翘曲应力大于混凝土强度,也会出现早期开裂。

(3)如果以上情况,都通过施工控制(控制铺筑时间、养生、及时锯缝等手段)得以避免,那么路面板在后期的使用阶段的温度应力和翘曲形状就是“等效固化温度梯度”和真实温度梯度的函数。路面板会在不同的时段呈现不同的翘曲形状。

通常情况下,当混凝土凝固,板的整体温度不是均匀的,其往往是气候条件、水化热和养生方式的函数,因为在凝固时存在温度梯度,板在任何时间的翘曲和卷曲将是初始温度梯度、干缩和目前温度梯度的函数,如图2所示。如果温度梯度在时刻*t*时为0,板的形状将只是干缩、板自重和基层约束条件的函数,如果在凝固时温度梯度是顶部比底部热,那么正向温度梯度会使面板倾向于与干缩卷曲相反的方向翘曲,可能也会使面板处于水平的形状,另一方面,如果温度梯度是反向的,板的翘曲会向上,再叠加由于干缩引起的板翘曲,会导致中等程度的向上形状。

理论上水泥混凝土在凝固时路面板为平整状态无翘曲。图2中(a)、(b)和(c)显示凝固时面板处于正温度梯度条件;图2中(d)、(e)和(f)显示凝固时面板处于负温度梯度条件。图2分别讨论了面板在后期温度场的影响下的三种情况,即后期面板处于零温度梯度、面板处于正温度梯度和面板处于负温度梯度时面板的翘曲状态。

图2(a),对于凝固时面板处于正温度梯度,只要受外界环境影响,面板的实际温度梯度变为0时,由于初始凝固的温度梯度的影响,路面就会向上卷曲。这是由于相对于初始凝固温度,面板顶部的纤维冷却收缩,底部混凝土纤维受热膨胀而向上翘曲,又由于干缩引起卷曲,这个影响将被加重,即面板将产生中度向上翘曲。

图2(b),如果面板的实际温度梯度仍为正温度梯度(与凝固时正温度梯度一致),则面板保持凝固时的水平形状,而由于干缩的影响,则将观测到面板呈现轻微

向上翘曲。

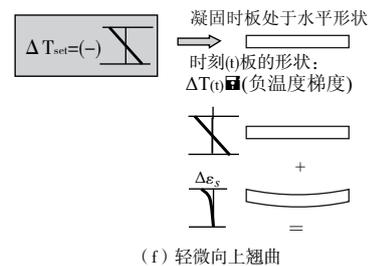
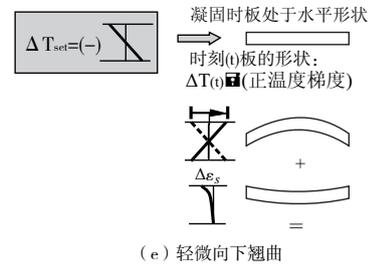
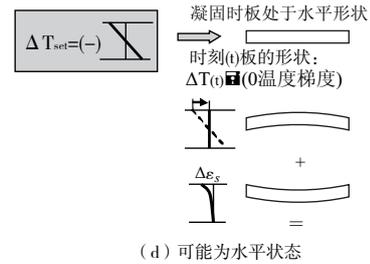
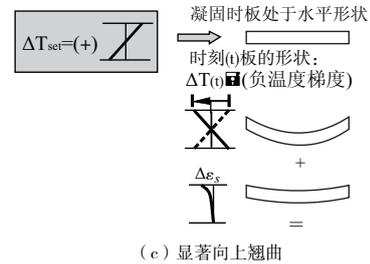
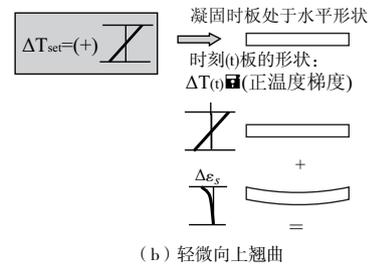
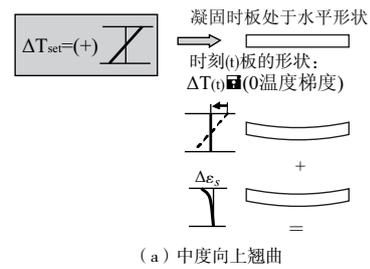


图2 不同温度梯度作用下翘曲变形情况

图 2(c),如果面板的实际温度梯度是反向的,由于凝固时正向梯度和干缩的影响,则将观测到更严重的情况,即产生显著的面板上翘曲。

图 2(d),对于凝固时面板处于负温度梯度,只要面板的实际温度梯度变为 0 时,由于初始凝固的温度梯度影响,路面会产生轻微向下卷曲,又由于干缩引起的轻微向上卷曲,这个影响将被抵消,即面板可能呈水平状态。

图 2(e),如果面板的实际温度梯度为正温度梯度,则面板将产生中度向下卷曲,而由于干缩引起的轻微向上卷曲,这个影响将被抵消一部分,则观测到面板呈现轻微向下翘曲。

图 2(f),如果面板的实际温度梯度仍为负温度梯度(与凝固时负温度梯度一致),则面板保持凝固时的水平形状,而由于干缩的影响,则观测到面板呈现轻微向上翘曲。

对比图 2 中各图,可以看出相比于负温度梯度,当面板凝固时处于正温度梯度条件下,面板变形比较明显,面板更容易由于翘曲而产生裂缝。因此,在铺筑水泥混凝土路面时,面板凝固处于负温度梯度条件下更有利(晚上施工)。

### 5 温度梯度值计算方法

由固化温度梯度和固化翘曲的关系可知,在计算凝固过后的温度应力时,均应当考虑固化温度梯度对路面板的影响。而本文暂不考虑干缩、徐变和湿度梯度影响,重点讨论固化温度梯度与使用阶段路面的温度梯度耦合作用下的路面性状。

温度应力<sup>[10]</sup>包括两个主要部分:一部分是由路面板顶面与底面的温度差引起的翘曲变形受阻而产生的翘曲应力;另一部分是由于路面板整体温度的上升或下降而引起面板的胀、缩变形受阻而在板内产生的热压应力或收缩应力。因此,温度应力计算时所采用的温度梯度应该为:路面的实际温度梯度(取板顶板底温度实际值)减去路面凝固时路面实际的梯度(取板顶板底温度实际值),如图 3 所示。这包括了胀缩 A3(实际温度梯度的温度最小值 A1 - 路面凝固时路面实际梯度的温度最小值 A2), A3 大于零则代表路面均匀膨胀,小于零则代表均匀收缩,由于基层与面板之间的约束,会产生温度应力。另一部分则是现在的板顶与板底温度梯度 B1 与路面凝固时路面实际的梯度 B2 的差值 B3,这反映了路面的温度翘曲。即温度应力计算所采用的温度梯度值应为:(A1 - A2) + (B1 - B2),将其反映在实际计算中为路面实际温度梯度与凝固时路面实际温度梯度的差值,即 (A1 + B1) - (A2 + B2)。

为了更直观的反映温度应力计算时所采用的温度梯度,以本研究的实测数据<sup>[7,11]</sup>为例,结合本研究在长期监测得到的最大正、负温度梯度,以及在早期施工阶段得到的凝固温度梯度,讨论温度应力计算时所采用的温度梯度值,如图 4 ~ 图 7 所示。

该计算模型凝固温度梯度取值方法:白天施工采用了 8 小时的凝固时间,以 6 月 26 日上午 7:00 点福州马尾路段施工为实例,8 小时后的凝固温度板顶为 58.13 °C,板底为 48.62 °C;晚上施工时取 10 小时的凝固时间,以 6 月 25 日晚上 19:00 点福州马尾路段施工为实例,10 小时后的凝固温度板顶为 35.32 °C,板底温度为 38.25 °C。

该计算模型实际温度梯度的取值方法:最大正温度梯度取福州 316 国道 4 月 21 日中午 13:00 点为其最大值,其板顶温度为 50.2 °C,板底温度为 23.34 °C;最大负温度梯度取福州 316 国道 4 月 20 日凌晨 1:00 点为其最大值,其板顶温度为 14.9 °C,板底温度为 21.58 °C。

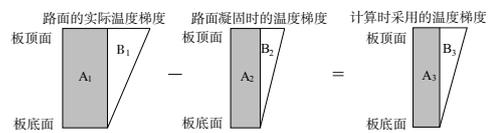


图 3 温度梯度值取值方法

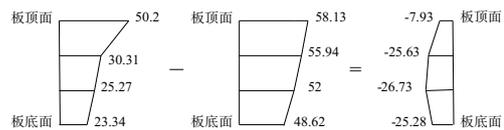


图 4 白天施工温度沿板厚呈非线性变化 (最大正温度梯度)

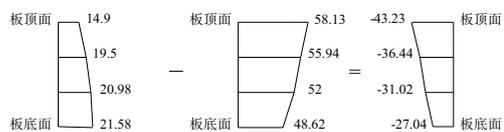


图 5 白天施工温度沿板厚呈非线性变化 (最大负温度梯度)



图 6 晚上施工温度沿板厚呈非线性变化 (最大正温度梯度)



图 7 晚上施工温度沿板厚呈非线性变化 (最大负温度梯度)

## 6 固化温度梯度值

针对福州地区的气候特点,本研究依据 19:00 和 7:00 两个铺筑时间段所采集的监测数据,给出福州地区

2007年6月25日、26日不同铺筑时刻水泥混凝土路面的凝固温度梯度推荐值(表1、表2)。其中假定 3:00 ~ 14:50 为白天施工时段,其凝固所需时间为 6 小时;15:00 ~ 2:50 为晚上施工时段,其凝固所需时间为 8 小时。

表1 白天施工时段温度随深度变化值/°C

施工时间	3:00	3:10	3:20	03:30	3:40	3:50	4:00	04:10	4:20
凝固时间	9:00	9:10	9:20	9:30	9:40	9:50	10:00	10:10	10:20
0 cm	30.09	30.36	30.8	31.28	35.8	36.93	37.62	38.37	38.99
9 cm	29.31	29.39	29.7	30.12	34.72	35.95	36.28	36.98	37.65
17 cm	28.85	28.75	28.95	29.27	33.78	35.39	35.13	35.58	36.11
23 cm	28.78	28.58	28.58	28.8	33.08	34.89	34.26	34.6	35.18
施工时间	4:30	4:40	4:50	05:00	5:10	5:20	5:30	05:40	5:50
凝固时间	10:30	10:40	10:50	11:00	11:10	11:20	11:30	11:40	11:50
0 cm	39.39	39.8	40.9	42.65	43.29	44.07	45.23	46.31	47.23
9 cm	37.98	38.49	39.61	41.35	41.99	42.84	43.84	44.81	46.17
17 cm	36.38	36.93	37.89	39.39	39.85	40.54	41.37	41.97	44.05
23 cm	35.25	35.8	36.71	38.03	38.18	38.85	38.99	39.61	41.87
施工时间	6:00	6:10	6:20	06:30	6:40	6:50	7:00	07:10	7:20
凝固时间	12:00	12:10	12:20	12:30	12:40	12:50	13:00	13:10	13:20
0 cm	48.24	49.18	50.44	51.46	52.35	53.14	53.97	54.67	55.22
9 cm	46.78	48.31	48.71	49.36	49.93	50.65	51.46	51.95	52.56
17 cm	43.84	46.2	45.61	46.24	46.74	47.42	48.12	48.36	48.94
23 cm	41.28	42.87	42.63	43.01	43.55	44.17	44.78	44.9	45.7
施工时间	7:30	7:40	7:50	08:00	8:10	8:20	8:30	08:40	8:50
凝固时间	13:30	13:40	13:50	14:00	14:10	14:20	14:30	14:40	14:50
0 cm	55.92	56.1	56.75	57.12	57.19	57.85	57.81	57.97	58.13
9 cm	53.23	53.35	54.07	54.46	54.55	55.48	55.34	55.62	55.94
17 cm	49.43	49.43	50.18	50.37	50.42	51.35	51.14	51.6	52
23 cm	46.03	46.24	46.83	47.18	47.14	47.91	47.77	48.15	48.62
施工时间	9:00	9:10	9:20	09:30	9:40	9:50	10:00	10:10	10:20
凝固时间	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	16:10	16:20
0 cm	58.31	58.43	58.41	58.27	58.13	57.19	56.31	55.29	54.32
9 cm	56.31	56.56	56.61	56.61	56.75	56.75	57.05	56.84	56.56
17 cm	52.44	52.79	52.93	53	53.21	53.42	53.88	54.02	54.14
23 cm	49.13	49.34	49.69	49.71	50	50.25	50.84	51.09	51.26
施工时间	10:30	10:40	10:50	11:00	11:10	11:20	11:30	11:40	11:50
凝固时间	16:30	16:40	16:50	17:00	17:10	17:20	17:30	17:40	17:50
0 cm	53.53	52.79	51.95	51.19	50.6	46.86	46.31	45.89	45.47
9 cm	56.15	55.66	55.18	54.67	54.35	51.56	51.02	50.72	50.25
17 cm	54.14	53.95	53.77	53.6	53.7	52.35	52	51.88	51.63
23 cm	51.42	51.26	51.19	51.19	51.42	50.91	50.7	50.67	50.51
施工时间	12:00	12:10	12:20	12:30	12:40	12:50	13:00	13:10	13:20
凝固时间	18:00	18:10	18:20	18:30	18:40	18:50	19:00	19:10	19:20
0 cm	45.09	44.79	44.69	44.26	43.91	43.6	43.23	42.77	42.5
9 cm	49.86	49.63	49.38	49.12	48.56	48.17	47.73	47.2	46.76
17 cm	51.33	51.02	50.72	50.58	50	49.76	49.48	48.94	48.52
23 cm	50.32	50.47	50.16	49.99	49.46	49.48	49.31	48.78	48.39
施工时间	13:30	13:40	13:50	14:00	14:10	14:20	14:30	14:40	14:50
凝固时间	19:30	19:40	19:50	20:00	20:10	20:20	20:30	20:40	20:50
0 cm	42.16	42.04	43.72	43.74	43.65	43.57	43.45	43.35	43.21
9 cm	46.32	46.06	47.54	47.44	47.27	47.15	47	46.83	46.64
17 cm	48.05	47.75	49.18	49.04	48.85	48.73	48.57	48.4	48.1
23 cm	47.95	47.73	49.29	49.12	48.99	48.9	48.8	48.58	48.29

表 2 晚上段施工时段温度随深度变化值/°C

施工时间	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	16:10	16:20
凝固时间	23:00	23:10	23:20	23:30	23:40	23:50	0:00	0:10	0:20
0 cm	31.38	31.36	31.31	31.33	31.38	31.43	31.6	31.62	31.72
9 cm	33.66	33.66	33.54	33.63	33.73	33.75	33.97	34.02	34.04
17 cm	35.06	35.15	35.25	35.49	35.58	35.63	35.85	35.85	35.87
23 cm	35.2	35.2	35.3	35.27	35.27	35.2	35.01	35.01	35.18
施工时间	16:30	16:40	16:50	17:00	17:10	17:20	17:30	17:40	17:50
凝固时间	0:30	0:40	0:50	1:00	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50
0 cm	31.58	31.89	32.01	32.23	32.42	32.69	33.03	33.39	33.56
9 cm	33.92	34.33	34.53	34.77	35.13	35.42	35.83	36.14	36.19
17 cm	35.8	35.99	36.16	36.38	36.74	36.91	37.27	37.62	37.58
23 cm	35.25	34.4	34.67	35.27	35.51	35.68	36.11	35.49	36.14
施工时间	18:00	18:10	18:20	18:30	18:40	18:50	19:00	19:10	19:20
凝固时间	2:00	2:10	2:20	2:30	2:40	2:50	3:00	3:10	3:20
0 cm	33.83	33.97	34.21	34.48	34.67	35.1	35.2	35.25	35.25
9 cm	36.59	36.62	36.79	36.98	37.03	37.65	37.65	37.72	37.79
17 cm	37.91	37.94	38.08	38.22	38.22	39.18	39.11	39.11	39.16
23 cm	36.69	36.28	36.35	35.15	36.57	38.18	37.17	38.08	38.15
施工时间	19:30	19:40	19:50	20:00	20:10	20:20	20:30	20:40	20:50
凝固时间	3:30	3:40	3:50	4:00	4:10	4:20	4:30	4:40	4:50
0 cm	35.46	35.51	35.51	35.68	35.7	35.7	35.83	35.8	35.66
9 cm	37.96	38.01	38.01	38.15	38.13	38.13	38.2	38.2	38.06
17 cm	39.32	39.35	39.37	39.51	39.49	39.49	39.59	39.61	39.44
23 cm	38.32	38.25	38.25	38.32	38.53	38.51	38.58	38.63	36.16
施工时间	21:00	21:10	21:20	21:30	21:40	21:50	22:00	22:10	22:20
凝固时间	5:00	5:10	5:20	5:30	5:40	5:50	6:00	6:10	6:20
0 cm	35.32	35.18	34.96	35.78	35.78	35.9	35.97	35.99	36.04
9 cm	37.72	37.53	37.36	38.15	38.1	38.18	38.2	38.15	38.13
17 cm	39.11	38.96	38.77	39.54	39.54	39.56	39.56	39.51	39.51
23 cm	38.25	38.06	37.94	38.77	38.82	38.75	38.56	38.7	38.56
施工时间	22:30	22:40	22:50	23:00	23:10	23:20	23:30	23:40	23:50
凝固时间	6:30	6:40	6:50	7:00	7:10	7:20	7:30	7:40	7:50
0 cm	36.19	36.35	36.4	36.5	36.62	36.76	36.88	37.24	37.46
9 cm	38.18	38.3	38.32	38.34	38.27	38.37	38.32	38.53	38.56
17 cm	39.56	39.68	39.7	39.56	39.54	39.68	39.56	39.75	39.68
23 cm	39.13	39.25	39.35	39.16	39.16	39.49	39.27	39.51	39.42
施工时间	0:00	0:10	0:20	0:30	0:40	0:50	1:00	1:10	1:20
凝固时间	8:00	8:10	8:20	8:30	8:40	8:50	9:00	9:10	9:20
0 cm	37.77	38.25	38.65	39.06	39.42	39.94	40.25	40.37	39.97
9 cm	38.58	38.87	39.01	39.2	39.23	39.61	40.06	39.97	39.42
17 cm	39.56	39.75	39.85	39.9	39.7	39.97	40.35	39.97	39.35
23 cm	39.18	39.49	39.56	39.59	39.97	39.66	37.89	39.08	37.46
施工时间	1:30	1:40	1:50	2:00	2:10	2:20	2:30	2:40	2:50
凝固时间	9:30	9:40	9:50	10:00	10:10	10:20	10:30	10:40	10:50
0 cm	40.13	41.37	42.34	42.96	43.01	42.82	42.06	41.35	40.97
9 cm	39.61	40.73	41.59	42.04	41.92	41.73	41.49	41.09	41.04
17 cm	39.49	40.51	41.32	41.7	41.44	41.11	40.94	40.42	40.32
23 cm	38.65	—	42.04	41.01	40.56	40.35	40.32	39.51	39.35

## 7 结 论

对夏季高温条件下早期施工阶段水泥混凝土路面温度场的监测研究,得到了如下结论:

(1) 气温与辐射是影响道路温度场的最主要因素。路面结构温度随外界环境昼夜变化呈周期性变化,且随

着深度增加,温度波动的幅度逐渐减小,波动滞后。混凝土的热学特性是影响混凝土温度应力的一个重要因素,混凝土在浇筑的初期,水泥在水化过程中释放出大量的水化热,使结构内部产生压应力,表面产生拉应力,当这种拉应力超过混凝土本身的极限抗拉强度时,混凝土表面就会产生裂缝。

(2) 路面板会在不同的时段呈现不同的翘曲形状, 得到相比于负温度梯度, 当面板凝固时处于正温度梯度条件下, 面板变形比较明显, 面板更容易由于翘曲而产生裂缝。因此, 在铺筑水泥混凝土路面时, 面板凝固处于负温度梯度条件下更有利(晚上施工)。

(3) 结合国外资料, 提出路面板在后期的使用阶段的温度应力和翘曲形状是等效固化温度梯度和真实温度梯度的函数。以福州马尾温度场长期监测得到的最大正、负温度梯度, 以及在早期施工阶段得到的凝固温度梯度, 得到温度应力计算时所采用的温度梯度值。

(4) 依据 19:00 和 7:00 两个铺筑时间段所采集的监测数据, 给出了 2007 年 6 月 25 至 6 月 26 日福州地区水泥混凝土路面一天内不同施工时段凝固温度推荐值, 得到早上 8:00~9:00 施工时, 其路面结构凝固温度达到最大值。

#### 参考文献:

- [1] Jacob E H, Jeffery R R. Determination of Critical Concrete Pavement Fatigue Damage Locations Using Influence Lines[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(8):599-607.
- [2] Shreenath R S, Jeffery R R. Characterizing Effective Built-In Curling from Concrete Pavement Field Measurements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(4):44-53.
- [3] Francis N H. Slab warping affects pavement joint performance[J]. American Concrete Institute, 1951, 47(6):797-808.
- [4] Francis N H, Bailey T. Some factors influencing shrinkage of concrete pavements[J]. American Concrete Institute, 1957, 53(2):781-789.
- [5] Wells S A, Phillips B M, Vandenbossche J M. Quantifying built in construction gradients and early-age slab deformation caused by environmental loads in a jointed plain concrete pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(4):275-289.
- [6] 冯德成, 权磊, 田波, 等. 水泥混凝土路面固化翘曲实验研究[J]. 建筑材料学报, 2013(5):812-816.
- [7] 胡昌斌, 曾惠珍. 福建省水泥混凝土路面结构温度场监测试验研究[J]. 公路, 2007(8):69-77.
- [8] 胡昌斌, 曾惠珍, 阙云. 湿热地区水泥混凝土路面温度场与温度应力研究[J]. 福州大学学报, 2011(5):727-737.
- [9] 桑伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [10] 杨和平, 张谨, 尹金涛. 加铺和未铺开级配磨耗层水泥路面的温度梯度与翘曲应力[J]. 中外公路, 2013, 33(6):75-79.
- [11] 曾惠珍, 吴梅容. 福州水泥路面的温度预测及气象要素分析[J]. 四川理工学院学报, 2013, 26(5):51-55.

## Study on Temperature Gradient of the Cement Concrete Pavement

ZENG Huizhen

(Department of Road Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Early characteristics of cement concrete, such as shrinkage cracking, joint open and built-in warping, made by the temperature field of 72 hours early before the construction of cement concrete pavements, affect the long-term performance of the pavement service stage dramatically, and even change the critical load and failure mode of pavement under traffic load. The test results indicate that the pavement temperature field is different evidently in the combined action of hydration heat and external climate condition during different times. By an analysis of the effect of the "built-in temperature" and the "built-in warping", the temperature gradient during construction has greatly affected the working status of concrete pavement during using stage. Based on the monitoring data, the recommended setting temperature of cement concrete pavement during different construction period of one day is given.

**Key words:** cement concrete pavements; built-in temperature gradient; built-in warping; temperature stress