

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.014

水泥混凝土路面板固化温差对翘曲和应力的影响

魏 亚, 梁思明, 张倩倩

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 实测硬化中水泥混凝土路面板内的温度分布, 确定混凝土的终凝时间, 提出固化温差及有效温差的计算方法, 并计算两种施工环境条件下路面板的固化温差和有效温差, 进行固化温差对板的翘曲和应力影响分析计算。研究表明: 春季和秋季施工在水泥混凝土路面板中产生负的固化温差, 将会导致路面板在 1 d 中的大部分时间处于板中脱空的状态, 在板中临界荷位处板底产生拉应力, 而采用小尺寸板, 相比较大尺寸板更能降低路面板翘曲及耦合应力, 降低疲劳破坏。

关键词: 混凝土路面板; 固化温差; 固化翘曲; 终凝时间; 有效温度梯度

中图分类号: TU416.216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)01-0081-07

Effect of built-in temperature difference on curling and stresses in cement concrete slabs

Wei Ya, Liang Siming, Zhang Qianqian

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: The temperature distributions were measured in hardening concrete slabs, determining final set time of concrete; the calculation methods of built-in temperature difference and the effective temperature difference were provided to determine the corresponding values of the slabs constructed during spring and fall, respectively. Finally, the influence of built-in temperature difference on slab curling and stress were evaluated based on finite element analysis. The results show that negative built-in temperature differences were found in both spring and fall construction which will lead to loss of slab support in the mid-slab position during the most time of a day, and larger tensile stress generates at the slab bottom. However, small size slab will minimize this negative effect from built-in temperature difference and at the same time reduce fatigue damage.

Key words: cement concrete pavement; built-in temperature difference; built-in curl; final set time; effective temperature difference

水泥混凝土路面具有气候适应性好、耐久的特点, 因此在高温、潮湿、严寒等严酷环境下性能表现

优良。特别是随着经济的发展, 在重载交通日益显著的情况下, 水泥混凝土路面以其强度高、整体性好

收稿日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108246); 云南省交通厅科技项目(云交科 2013(A)06, (C)02)

作者简介: 魏 亚(1976-), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事结构材料及道路工程研究, (E-mail) yawei@tsinghua.edu.cn.

Received: 2014-07-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51108246)

Author brief: Wei Ya(1976-), PhD, associate professor, main research interests: building materials & highway engineering, (E-mail) yawei@tsinghua.edu.cn.

的优势成为修筑高等级、重交通路面的首选。水泥混凝土路面板是一种表面与周围环境接触面积较大的结构物,如板顶暴露于大气环境下,因此受外部环境温、湿度的影响较大,而板底与路基或基层接触,其温度和湿度环境保持相对稳定。上述状况引起路面板上下表面的热量和水分交换有所不同,因此在板中沿深度方向形成温度或湿度梯度^[1-3]。

温度梯度对水泥混凝土路面板的翘曲与应力的影响一直是水泥混凝土路面设计和施工中需要考虑的重要因素^[4-5]。通常,白天由于太阳辐射的影响,板顶的温度高于板底,从而在板内沿深度方向形成正的温度梯度,板角向下翘曲,而晚上由于板顶温度低于板底,形成负的温度梯度,板角向上翘曲。无论哪种翘曲方式,皆会在板底形成脱空,在外部交通荷载的耦合作用下,在板中产生较大拉应力,最终导致结构性的疲劳损坏^[6]。

除了上述日常的温度梯度,还有一种温度梯度是在水泥混凝土硬化过程中形成,且受施工环境条件的影响较大,这种温度梯度称为固化温度梯度,其导致的翘曲为固化翘曲^[7-10]。固化温度梯度和固化翘曲较早在国外,特别是北美引起道路工作者的注意,目前已经开展了一些相关的研究,如研究不同铺筑季节对固化温差的影响,对固化翘曲的程度进行量化等^[11]。由于这种翘曲可能会加强或减弱路面板内实际的温度梯度,增大翘曲及相应的板底脱空^[7,12],对路面板的耐久性有着重要影响,因此需要予以关注。

本文针对不同的施工环境条件,从浇筑开始即现场测量混凝土板硬化过程中板内的温度分布,给出确定路面板的固化温差($\Delta T_{\text{built-in}}$)的方法,计算有效温差(ΔT_{eff}),并对固化温差的影响进行基于翘曲和变形的有限元分析。

1 水泥混凝土路面板硬化过程中的现场温度测量

1.1 固化翘曲及影响

水泥混凝土硬化过程中沿板深度方向上形成的固化温差是导致固化翘曲的原因。图 1 所示为不同施工环境条件下固化温差及固化翘曲的形成示意图。图 1(a)所示对应于白天气温较高的施工工况,图 1(b)对应于白天气温较低或夜间施工工况。如图所示,新铺筑的混凝土路面板在硬化前处于塑性状态,随着时间的推移而经历初凝和终凝。初凝是混凝土从流动状态到塑性状态的过渡,并在初凝时刻形成初始的固体骨架,但这时尚不具备承载能力;

至终凝时,混凝土强度开始发展,并逐步具有抵抗外部荷载的能力。因此,从铺筑至终凝时刻,水泥混凝土板皆处于平面状态,没有翘曲变形。终凝时刻以后,由于混凝土强度和刚度发展,板会通过产生翘曲变形来响应温度梯度的影响。

由于路面板受到大气辐射、水泥水化、热交换的影响,板内沿深度方向存在不均匀的温度分布。如果铺筑时外部环境温度较高,太阳辐射强度高,则在硬化过程中板顶的温度高于板底,在终凝时形成正温差(图 1(a)),对应着板的无翘曲变形状态,此正温差将永远存在于板中,成为固化温差。以后任何相对于固化温差的温差减小都会引起板角向上的翘曲变形,即使该温差仍然为正温差;对于白天气温较低或夜间的施工工况,终凝时刻由于板表面受环境温度影响较板内部温度低而造成板内存在负温差的情况,形成负的固化温差,则此后任何温差的增加都会引起板角向下的翘曲变形(图 1(b))。

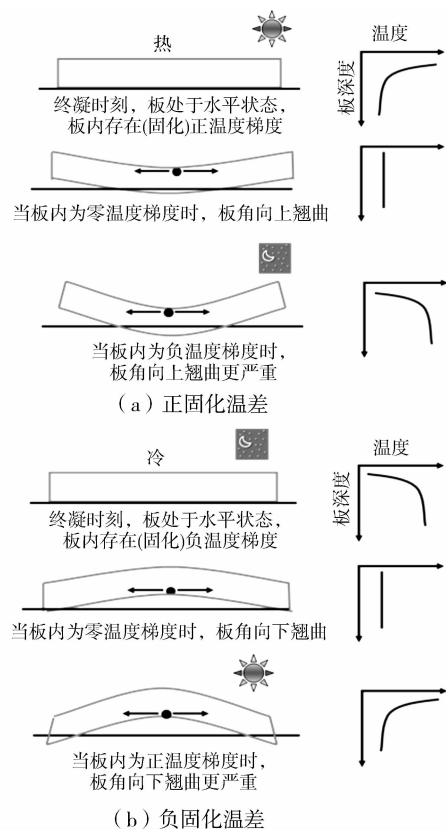


图 1 混凝土路面板内固化温差及翘曲的形成

Fig. 1 Formation of built-in curl in concrete pavement slab

1.2 不同施工季节实测板内温度分布

施工环境对固化温差的影响至关重要,为了量化其影响,对两个不同地区处于硬化过程中的混凝土路面板内温度分布采用埋入式温度传感器进行连续测量,并确定其固化温差,温度采集设备每隔 2 min 采集

存储1次数据。路面施工现场所用混凝土的水灰比为0.52,配合比如表1所示。其中石子为普通石灰岩碎石,最大粒径为31.5 mm,密度2 650 kg/m³;砂子为普通石英砂,细度模数为2.65,密度为2 650 kg/m³;水泥采用P. O. 42.5普通硅酸盐水泥,比表面积为353 m²/kg,水泥熟料的化学组成如表2所示。

表1 混凝土材料组成

Table 1 Mixture proportion of concrete kg/m³

材料组成	数值
石子	1 164
砂	684
水泥	365
水	189

表2 水泥熟料矿物组成

Table 2 Mineral composition of cement clinker

矿物组成	含量/%
C ₃ S	59.88
C ₂ S	17.49
C ₃ A	6.22
C ₄ AF	10.55

图2所示为春季和秋季施工的路面板自铺筑后不同深度处的温度随龄期的变化图。路面板厚分别为16 cm(测点深度为0、2、4、9和16 cm)和20 cm(测点深度为0、2、6、10、15和20 cm)。可以看出板内温度变化随昼夜气温变化,其中表面处受外部环境温度影响较大,波动幅度也最大,板底处温度波动幅度最小。由于太阳辐射缘故,即使在春、秋季施工条件下中午时分路表面温度也可达33℃。图2中所测的板内温度分布将用于确定两种情况下路面板内的固化温差。

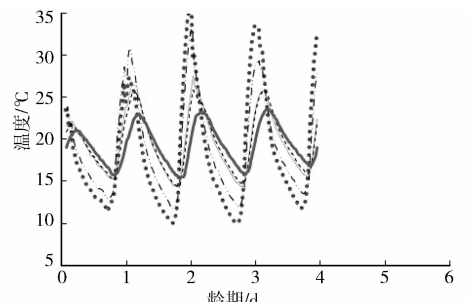
2 板中固化温差的确定

2.1 板内平均温度计算

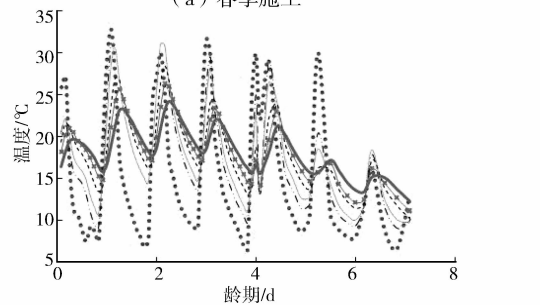
固化温差是水泥混凝土路面板终凝时刻所对应的温差,因此,为确定固化温差需要首先确定现场混凝土的终凝时间。由于混凝土终凝时间通常是在实验室恒定温度情况下测试得到,而现场混凝土温度变化较大,必须将现场混凝土龄期转化为与实验室终凝时间测定条件相同的等效龄期,首先需要确定现场混凝土路面板内的平均温度,可采用式(1)计算得到。

$$T_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i + T_{i+1}) \cdot (h_{i+1} - h_i)}{2H} \quad (1)$$

式中: T_{ave} 为路面板中的平均温度,℃; T_i 为测点*i*处的温度; h_i 为板内测点*i*处距板表面的深度,cm; H 为板厚度。图3所示为计算得到的春季和秋季施工环境下路面板内的平均温度随龄期的变化。可以看出水泥混凝土路面板内平均温度随气温波动变化,但板中平均温度在气温变化范围的高值附近波动,且春季和秋季的板内平均温度较为接近,其原因主要在于两条试验路段同处于低纬度和高海拔地区,受季风气候制约较强,因此春秋温差较小,季节差异不明显。



(a) 春季施工



(b) 秋季施工

图2 铺筑后水泥混凝土板内不同深度处温度变化
Fig. 2 Temperature variation in cement concrete slabs

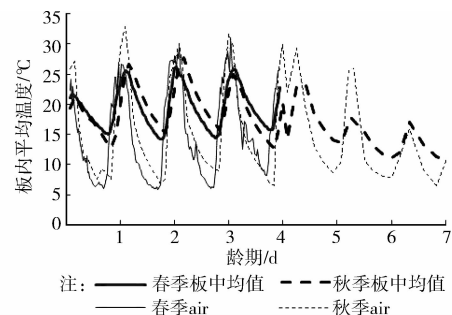


图3 路面板内平均温度和大气温度变化
Fig. 3 Average temperature in slabs and in air

2.2 终凝时间确定

由于温度影响水泥混凝土的水化程度及凝结时间^[13],相同配合比的水泥混凝土在不同养生温度(10、21、30℃)情况下的终凝时间通过贯入度试验

进行确定,结果如图 4 所示。可以看出水泥混凝土的终凝时间随着养生温度的升高而缩短,如在 10 °C 的养生温度下,终凝时间长达 10 h,而在 32 °C 的养生温度下,终凝时间缩短至一半,即 5 h,在 21 °C 养生条件下终凝时间为 5.4 h。终凝时间 $t_{\text{final-set}}$ 与养生温度 T_{curing} 的拟合关系式可表达为

$$t_{\text{final-set}} = 45.123 \cdot T_{\text{curing}}^{-0.658} \quad (2)$$

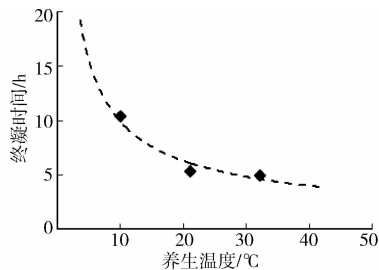


图 4 混凝土终凝时间与养生温度关系

Fig. 4 Relationship between final setting time and curing temperature

由于现场混凝土路面板内的平均温度随时间变化,为计算混凝土实际的终凝时间,采用 21 °C 为确定终凝时间的标准温度,根据图 3 的板内平均温度以及混凝土等效龄期 t_{ea} 表达式可以反算出实际情况下板的终凝时间 t 。等效龄期的具体表达如式(3)^[13]。

$$t_{\text{ea}} = \int_0^t \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{273 + T(t)} \right) \right] dt \quad (3)$$

式中: R 是理想气体常数,其值为 8.314 J/mol · K; T_0 是基准温度,取 21 °C,即 294 K; $T(t)$ 是随龄期变化的混凝土温度,°C,在这里取为板内的平均温度 T_{ave} ; E 是表面活化能,J/mol,取为 42 664 J/mol,可以根据胶凝材料化学组成及物理性能等按照式(4)进行计算^[14]。

$$E = 22\,100 \cdot f_E \cdot p_{\text{C}_3\text{A}}^{0.30} \cdot p_{\text{C}_4\text{AF}}^{0.25} \cdot \text{Blaine}^{0.35} \quad (4)$$

式中: $p_{\text{C}_3\text{A}}$ 为水泥熟料中 C_3A 的质量百分比,%; $p_{\text{C}_4\text{AF}}$ 为水泥熟料中 C_4AF 的质量百分比,%;Blaine 为水泥熟料的比表面积, m^2/kg ,路面所用水泥熟料的比表面积为 353 m^2/kg ; f_E 为活化能的修正因子,反映外加掺和料对活化能的影响,由于所用的混凝土配合比未掺外加掺合料,因此取为 1.0。

为了求解式(3)中的实际终凝时间 t ,可将 $[0, t]$ 等间隔 Δt (取为 10 min)离散化为 N 段,即 $t = N\Delta t$,且 $t_i = i\Delta t$ 。根据 $t_{\text{ea}} = 5.4$ h 的条件由下式确定 N 值即可得到实际终凝时间 t 。

$$t_{\text{ea}} = \sum_{i=0}^{N-1} \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{273 + T(t_i + \Delta t/2)} \right) \right] \Delta t \quad (5)$$

根据式(5)计算出春季施工和秋季施工两种情况下的现场混凝土终凝时间分别为铺筑后 5.6 和 6.7 h,相对于施工时间 15:00(春季)和 12:00(秋季),终凝时间分别对应于晚上 20:30(春季)和 18:40(秋季)。

2.3 不同铺筑环境条件下的板内固化温差

春季和秋季施工条件下,混凝土路面板铺筑 1 d 范围内的几个典型时刻(包括终凝时刻)的温度沿深度分布如图 5 所示。可以看出 1 d 内板深度方向的温度为非线性分布,上部温度变化范围较大,下部温度相对较为稳定。固化温差由终凝时刻路面板的温度确定,春季施工情况所对应的终凝时刻(20:30)的固化温差 $\Delta T_{\text{built-in}} = -3.8$ °C。对于秋季施工的情况,对应于终凝时刻(18:40)的固化温差 $\Delta T_{\text{built-in}} = -4.4$ °C。两种施工状况下的固化温差皆为负值,表明任何大于此固化温差的板内实际温差都将导致板角向下翘曲,即板中脱空。

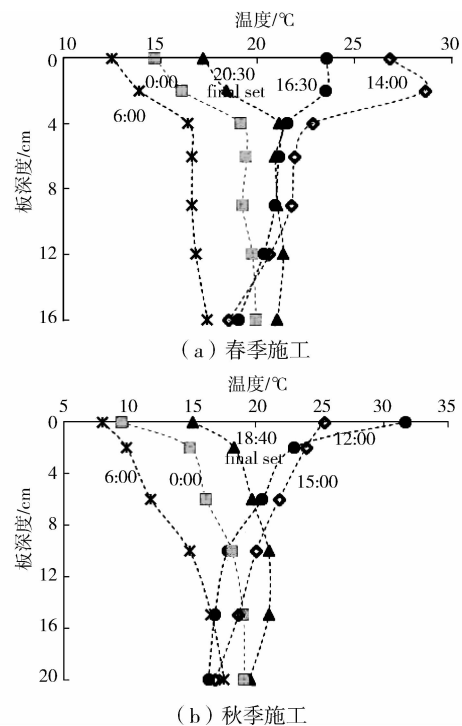


图 5 春季和秋季铺筑后 1 d 内板内温度分布变化

Fig. 5 Temperature distribution within 1 day after placement for spring and fall construction

3 板内有效温差及影响

3.1 有效温差及等效温度梯度

由于施工环境条件导致的固化温差将永远存在

于路面板中。考虑到硬化后水泥混凝土路面板内温差还受到外部环境温度的影响而产生日常温差,而这个温差也是实际能够测量得到。因此本文定义硬化后混凝土板中的有效温差或总温差 ΔT_{eff} 为实际测得温差 $\Delta T_{\text{measured}}$ 与固化温差 $\Delta T_{\text{built-in}}$ 的组合,即

$$\Delta T_{\text{eff}} = \Delta T_{\text{measured}} - \Delta T_{\text{built-in}} = (T_{\text{top-m}} - T_{\text{bot-m}}) - (T_{\text{top-fs}} - T_{\text{bot-fs}}) \quad (6)$$

式中: $T_{\text{top-m}}$ 和 $T_{\text{bot-m}}$ 分别为路面板上表面和下表面实际测量得到的温度; $T_{\text{top-fs}}$ 和 $T_{\text{bot-fs}}$ 分别为路面板上表面和下表面终凝时刻的温度。

图 6 所示为两种铺筑情况下混凝土板内的实际测得温差和有效温差。可以看出,由于两种施工环境下的固化温差为负值,因此板内有效温差皆大于实测温差,板内有效温差在 1 d 内的绝大多数时间内都处于正值,且最大的正有效温差可达 20 °C。这种情况将会导致混凝土板在 1 d 内的大部分时间都处于板角向下翘曲或板中脱空的现象,这对于车轮荷载作用于板中的情况较为不利,易在板底产生拉应力及板底的疲劳开裂。

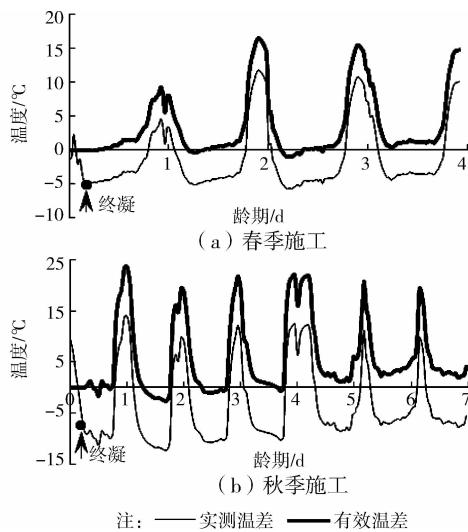


图 6 春季和秋季铺筑路面板内的有效温差
Fig. 6 Effective temperature difference in slab constructed in spring and fall

对于板深方向温度呈线性分布的路面板,其温度梯度可由有效温差除以板厚得到。但对于温度呈非线性分布的路面板,可根据翘曲等效原则的方法来确定其的有效温度梯度^[15]。

对于长宽相差不大的路面板,可假定长宽方向的曲率相等,则在线性温度梯度作用下,路面板的弯矩可表达为

$$M_{\Delta T_0} = \frac{E\alpha\Delta T_0 h^2}{12(1-\nu)} \quad (7)$$

式中: E 为混凝土的弹性模量; α 为混凝土的线膨胀系数; ΔT_0 为路面板上下表面温度之差; ν 为混凝土的泊松比; h 为路面板的厚度。

由非线性分布温度引起路面板的翘曲弯矩可表达为

$$M_{\text{non}} = \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma(z) z dz = \frac{E}{1-\nu} \int_{-0.5h}^{0.5h} \varepsilon(z) z dz = \frac{aE}{1-\nu} \int_{-0.5h}^{0.5h} T(z) z dz \quad (8)$$

其中: $\sigma(z)$ 为路面板深度方向 z 处的应力; $\varepsilon(z)$ 为路面板深度方向 z 处的应变; $T(z)$ 为路面板深度方向 z 处的温度,可用多项式来表示; z 为沿路面板厚度方向位置,其中板中位置 $z=0$,上表面 $z=0.5h$,下表面 $z=-0.5h$ 。

根据式(7)和式(8),由 $M_{\Delta T_0} = M_{\text{non}}$ 则可得非线性温度分布的路面板的等效温度梯度表达式(9)。

$$\Delta T_0/h = \frac{12}{h^3} \int_{-0.5h}^{0.5h} T(z) z dz \quad (9)$$

3.2 对翘曲和应力的影响

固化温差影响有效温差进而影响板的翘曲和应力。本文对有效温差引起的翘曲进行现场测量,并通过有限元软件 ABAQUS 来分析其对应力的影响。图 7 所示为秋季施工($\Delta T_{\text{built-in}} = -4.4\text{ °C}$)情况下大小板($5\text{ m} \times 4.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 和 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.16\text{ m}$)沿纵边方向的实际测量翘曲和模拟计算翘曲,图中的点为实测数据,实线为模拟计算曲线。翘曲测量设备为行走式断面仪,其分辨率为 0.08 mm/m 。测量时间为一个春季的 12:00—14:00 点之间,对应于一天中温度最高,太阳辐射最强的时间段。由图 7 可以看出,两种尺寸的路面板皆处于板角向下翘曲,板中脱空的状态。大板的翘曲由于尺寸较大而较为显著,板中拱起幅度范围为 $2\sim 5\text{ mm}$,而小板拱起幅度范围为 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$ 。注意到同尺寸的板块拱起幅度存在差异,其影响因素是多方面的,比如路基模量的差异、施工工艺导致路面板的厚度以及表面平整度的差异、翘曲测量时间的不完全相同等均会对翘曲的测试值造成影响。模拟曲线则通过有限元软件计算路面板在温度梯度作用下的翘曲变形得到,温度梯度越大,则翘曲变形越大,模拟曲线与实测值吻合时所对应的温差即为路面板的有效温差。根据模拟结果,板中的有效温差范围在 $15\sim 30\text{ °C}$ 之间,尽管不同板块的翘曲变形存在差异,但是翘曲反算结果基本符合图 6 关于板中有效温差的计算结果。

图 8 所示为根据实测数据画出的大板翘曲 3D

示意图,更为直观地反映了板中脱空,板角向下翘曲的正有效温差情况下板的变形情况。

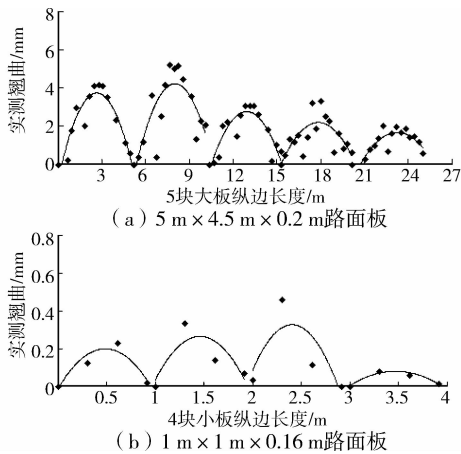


图 7 路面板实测翘曲及计算翘曲对比

Fig. 7 Comparison of measured and calculated slab curling

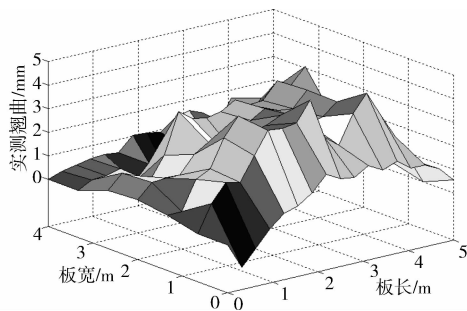


图 8 实测大板翘曲 3D 图

Fig. 8 3D plotting of large-size slab curling

板中脱空在车辆荷载作用于板中的情况下成为不利的变形,对混凝土路面板的危害更为严重,因为板中脱空基本出现在交通量较为繁重的白天时段。图 9 所示为两种尺寸板在有效正温差情况下的临界荷载位置图:对于大板,临界荷载为轴载,临界荷位为板中沿纵边布置,对于小板,临界荷载为轮载,临界荷位沿板中纵边布置。

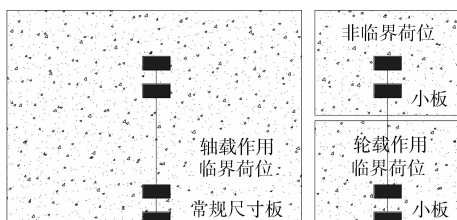


图 9 正温差下路面板临界荷载位置

Fig. 9 Critical loading condition under positive temperature difference

有限元计算中把路面结构简化为文克尔地基上板的模型进行应力计算,用路基反应模量表征路基

性质。板块的划分单元采用 C3D20 单元^[16],C3D20 单元是一种 20 结点的六面体等参单元,可以较好地反映板的弯曲作用,计算精度比较高。路基采用非线性的弹簧单元进行模拟,在弹簧单元的压缩阶段,其承受的荷载与其变形呈线性关系,在弹簧单元的拉伸阶段,弹簧单元只有变形而不能承受荷载,以反映路面板与路基发生脱空的特征。板模型如图 10 所示。由于接缝传荷对翘曲影响不大,本文在建模计算时不考虑相邻板块间的荷载传递,同时这种处理方法也会使计算结果偏于安全。计算所需的参数包括混凝土的弹性模量(25 GPa)、泊松比(0.15)、线膨胀系数(10×10^{-6} m/m/°C)、路面板尺寸、路面板厚度、路基反应模量(80 MPa/m)、交通轴载(100 kN)以及温差(+20°C)。

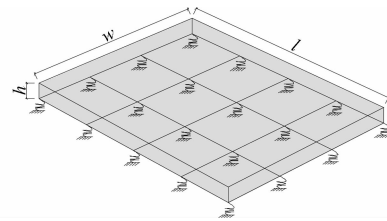


图 10 文克尔地基上的板模型

Fig. 10 Slab on Winkler foundation in FEM

图 11 所示为两种尺寸板(5 m×4.5 m×0.2 m 和 1 m×1 m×0.16 m)的计算结果,可以看出在相同正温差及板中荷载情况下,大板的板中最大应力要大于小板的板中最大应力,约为两倍左右。因此可以看出,采用小尺寸的板不仅可以减小板的厚度,节约建设资金,还可以有效降低路面板由于温差和荷载耦合作用情况下的应力,从而降低路面板的疲劳破坏。

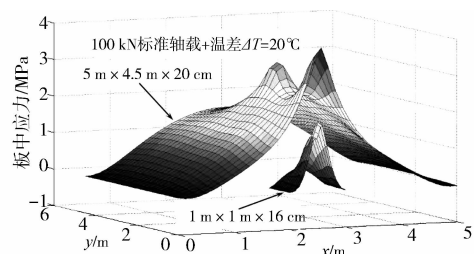


图 11 等效温差和荷载作用下板底的耦合应力

Fig. 11 Combined stress from effective difference and loading in large and small size slabs

4 结论

1) 水泥混凝土路面板在浇筑后的硬化过程中受施工气候条件、水泥水化热、热传导边界条件等的影

响,从而在板中产生固化温差;此时的固化温差对应于板无翘曲状态,可以通过混凝土终凝时刻对应的路面板内的温度分布来确定固化温差。

2) 固化温差能够加强或减弱日常温差对水泥混凝土路面板中温度分布的影响。春季和秋季施工较易在路面板中产生负的固化温差,从而使板在一天中的大多数时间处于板角向下翘曲、板中拱起的脱空状态,如与板中受荷情况耦合,会在路面板板底产生较大拉应力。

3) 采用小尺寸的板可以有效降低温度与荷载在板中产生的耦合拉应力,减小固化温差及固化翘曲的影响,降低疲劳损坏,同时又能减小板的厚度从而节约建设资金。

参考文献:

- [1] Poblete M, Garcia A, David J, et al. Moisture effects on the behavior of PCC pavements [C]//Proceedings, 2nd International Workshop on the Design and the evaluation of Concrete Pavements, Sigüenza, Spain, 1990.
- [2] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 余定选, 齐诚. 译. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [3] Wei Y, Hansen W. Characterization of moisture transport and its effect on deformations in jointed plain concrete pavement [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2240(1): 9-15.
- [4] 姚祖康. 公路设计手册——路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [5] 谈至明, 周玉民, 刘伯莹. 水泥混凝土路面板温度翘曲应力[J]. 公路, 2005(11): 63-67.
Tan Z M, Zhou Y M, Liu B Y. Temperature curling stress in concrete pavement [J]. Beijing: Journal of Highway, 2005(11): 63-67. (in Chinese)
- [6] Darter M I, Hall K T, Kuo C M. Support under Portland cement concrete pavements [R]. Transportation Research Board, 1995.
- [7] Rao S, Roesler J R. Characterizing effective built-in curling from concrete pavement field measurements [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(4): 320-327.
- [8] Hansen W, Wei Y, Smiley D L, et al. Effects of paving conditions on built-in curling and pavement performance [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(4): 291-296.
- [9] 涂慕溪, 林国仁, 胡昌斌. 福建省公路水泥混凝土路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [10] 冯德成, 权磊, 田波, 等. 水泥混凝土路面固化翘曲试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 812-816.
Feng D C, Quan L, Tian B, et al. Study of built-in curl in concrete pavement [J]. Building Materials, 2013, 16(5): 812-816. (in Chinese)
- [11] Hansen W, Wei Y, Smiley D L, et al. Effects of paving conditions on built-in curling and pavement performance [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(4): 291-296.
- [12] Hiller J. Field evaluation of built-in curling levels in rigid pavements [R]. Research Report MN/RC, 2011.
- [13] Mehta P K, Monteiro P J M. Concrete: microstructure, properties, and materials [M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [14] Schindler A K. Effect of temperature on hydration of cementitious materials [J]. ACI Materials Journal, 2004, 101(1): 72-81.
- [15] 魏亚. 水泥混凝土路面板湿度翘曲形成机理及变形计算[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 266-271.
Wei Y. Mechanism of moisture warping and deformation calculations in concrete pavements [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 266-271. (in Chinese)
- [16] 曾攀. 有限元分析及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(编辑 王秀玲)