

滑动层摩擦因数对斜向预应力水泥路面板的影响

韩 森¹,漆 祥¹,韩 霄¹,陈 德^{2,3},张东省⁴,王 飞⁵

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031; 3. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室,四川 成都 610031; 4. 陕西省交通建设集团公司,陕西 西安 710075; 5. 中铁二院西安勘察设计研究院有限责任公司,陕西 西安 710054)

摘 要:滑动层摩擦因数对斜向预应力水泥路面板结构受力及变形的影响较大,设置满足路面结构受力及变形要求的滑动层,是决定斜向预应力水泥路面铺设成功与否的关键因素之一,建立斜向预应力路面结构 1/4 有限元模型,基于此模型分析了斜向预应力水泥路面板在车轮荷载和温度梯度荷载作用下,滑动层摩擦因数对其路面结构受力与变形的影响;运用解析计算法,研究了滑动层摩擦因数对路面板内温度伸缩应力的影响,以及温度应力作用下滑动层摩擦因数对路面板伸缩量的影响;并进行了斜向预应力路面板屈曲验算。研究结果表明:车轮荷载作用下,斜向预应力路面滑动层摩擦因数对路面板内应力及变形影响较小,可忽略不计;温度梯度荷载作用下,斜向预应力路面滑动层摩擦因数在 0.3~1.2 范围内变化时,路面板内最大主应力均小于水泥混凝土抗弯拉强度 5 MPa,不会引起斜向预应力路面板开裂;温度荷载作用下,滑动层摩擦因数小于 1.04 时,路面板内伸缩应力不会引起路面板开裂,且滑动层铺设初期摩擦因数越小越有利于减小路面板内温度应力值;增大滑动层后期摩擦因数,有利于减小斜向预应力路面板端伸缩量,但不应大于 1.04;斜向预应力路面板最不利屈曲临界温度为 48.166 °C,在通常外界环境温度下,斜向预应力水泥路面板不会发生屈曲失稳破坏。

关键词:道路工程;斜向预应力水泥路面;滑动层;摩擦因数;有限元

中图分类号:U411 **文献标志码:**A

Influence of friction coefficient of sliding layer on cross-prestressed concrete pavement slab

HAN Sen¹, QI Xiang¹, HAN Xiao¹, CHEN De^{2,3}, ZHANG Dong-sheng⁴, WANG Fei⁵

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 5. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Coefficient of friction (COF) of sliding layer has significant effects on stress and deformation of panel of cross-prestressed concrete pavement (CPCP). Setting a reasonable sliding layer which can meet the requirements of CPCP structure is a key factor for sustainability of CPCP. In this paper, a 1/4 finite element model of CPCP was built to analyze the influence of

COF of sliding layer on CPCP structure stress and deformation under wheel load and temperature gradient load. The influence of COF of sliding layer on the expansion stress and expansion amount of the CPCP were studied based on analytic calculation method. The buckling failure of CPCP was also checked. The results show that COF of CPCP sliding layer has negligible effects on stress and deformation in CPCP structure under wheel load. Under temperature gradient load, when COF of sliding layer varies from 0.3 to 1.2, the maximum principal stress in panel of CPCP is less than the flexural stress of cement concrete (i.e. 5 MPa), which can not generate cracking in panel of CPCP. At the same time, the stress and deformation made by thermal load will not generate cracking in panel of CPCP when COF of sliding layer is under 1.04. The smaller the short-term COF of sliding layer is, the smaller temperature stress will have in panel of CPCP. Meanwhile, the higher the long-term COF of sliding layer is, the smaller expansion the CPCP panels will have. In the end, the critical temperature of buckling failure of CPCP panel is 48.166 °C. Therefore, panel of CPCP can not appear any buckling failures under normal environmental temperature difference. 13 figs, 24 refs.

Key words: road engineering; cross-prestressed concrete pavement; sliding layer; friction coefficient; finite element

0 引言

减少水泥路面伸缩缝的设置,实现超长水泥混凝土路面板的铺设,可以在很大程度上提高水泥混凝土路面的行车舒适性,延长其使用寿命^[1-4]。但是随着水泥路面单块板长度的增加,在车轮和温度荷载作用下,路面板内应力及板端伸缩量也相应急剧增大。如何减小路面板内应力及板端伸缩量,是斜向预应力水泥路面(cross-prestressed concrete pavement, CPCP)铺设成功的关键。设置具有科学合理摩擦因数的滑动层是解决这一问题的有效途径之一^[5-9]。目前滑动层设置技术主要用于:①房屋建筑工程大面积板式基础的摩擦滑移隔震^[10];②矿井内外层井壁之间减小井壁间摩擦^[11];③铁路无砟轨道中减小桥梁顶面与无砟轨道底座板间摩擦阻力,进而减小梁体伸缩对轨道结构产生的附加力^[12]。在普通水泥混凝土路面及传统纵向预应力水泥混凝土路面结构层中,滑动层主要用于提高水泥稳定粒料基层的抗冲刷能力,预防混凝土面层产生较大的温度翘曲变形和应力,以及阻断基层反射裂缝^[13]。基于已有施工经验,《预应力混凝土路面工程技术规范》(GB 50422—2007)及《预应力混凝土路面设计指南》(美国预应力协会技术委员会 325 技术报告)对纵向预应力水泥路面滑动层的设置也做了相应的规定,并对滑动层摩擦因数的选取给出了相应的推荐值。

但是斜向预应力路面为了实现少接缝的目的,设置有较长的路面板块,在温度和车辆荷载作用下路面板内产生的应力较大,并且板端伸缩量也大,因此斜向预应力水泥路面对滑动层提出的要求与普通素水泥混凝土路面、传统纵向预应力水泥路面及其他领域滑动层的设置大为不同^[14-17]。为此,本文针对滑动层摩擦因数对斜向预应力水泥路面板结构受力及变形的影响,使用有限元建模分析和解析计算 2 种方法对其进行详细深入的研究。

1 分析模型

为了减小计算工作量,提高计算效率,在满足斜向预应力水泥路面结构受力要求的情况下,取试验路实际参数的 1/4,建立有限元计算模型。模型将斜向预应力水泥路面分为 3 层结构:第 1 层为路面板,大小为 50 m×3.25 m×0.25 m;第 2 层为斜向预应力水泥路面的基层,大小为 51.5 m×4.75 m×0.32 m;第 3 层为斜向预应力水泥路面的土基,大小为 53.5 m×6.75 m×5 m。采用 ABAQUS 有限元计算软件建模, x 轴为行车方向(纵向), y 轴为垂直于行车的方向(横向), z 轴正方向为竖直向下。此斜向预应力水泥路面模型整体隶属于弹性问题,采用线性计算方法。装配后的模型如下页图 1 所示。

划分网格时,斜向预应力水泥路面板网格长度取 0.5 m,基层和土基的网格长度均取 1 m。划分网格后的模型如下页图 2 所示。

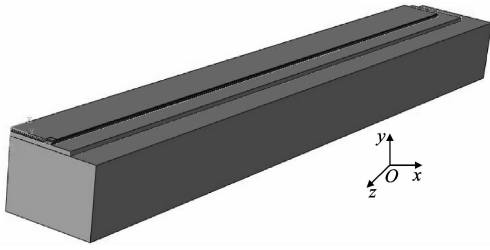


图 1 斜向预应力水泥路面 1/4 模型

Fig. 1 1/4 CPCP model

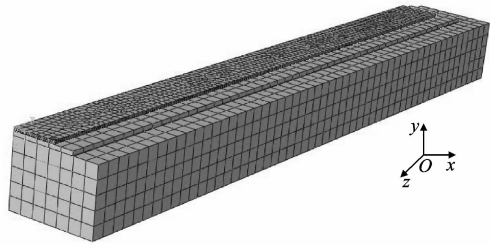


图 2 斜向预应力水泥路面 1/4 模型网格划分

Fig. 2 Mesh generation of 1/4 CPCP model

为了便于施加预应力,本模型将斜向预应力水泥路面板层侧面由上到下划分为 5 个面积相等的等分面。分别在第 2、第 3 个等分面上施加 1.69 MPa 的预应力,预应力的施加方向与路面板纵向成 30° 夹角^[18-21]。为了便于预应力的施加,将斜向预应力分解为沿轴向的均布荷载(press)和沿切向的表面荷载(surface traction),如图 3 所示。

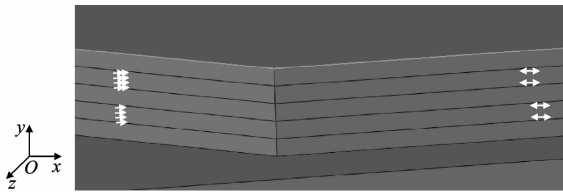


图 3 斜向预应力水泥路面板预应力加载

Fig. 3 Prestress loading of CPCP

为了施加车轮荷载,在路面板最不利位置,即板边缘中部(1/4 模型的路面板角隅处)划分出 1 个 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的区域,在此区域上加载单圆均布荷载(本 1/4 模型为半圆均布荷载),大小为 0.7 MPa,如图 4 所示。

本文试验路为自然区划Ⅲ区,故其最大温度梯度为 $93\text{ }^\circ\text{C/m}$ 。为了研究环境温度梯度对斜向预应力水泥路面的作用,对路面模型加载 $93\text{ }^\circ\text{C/m}$ 的温度梯度,如图 5 所示。

为了真实地模拟斜向预应力水泥路面结构受力,给模型施加边界约束条件如下:斜向预应力水泥路面板暴露在外的侧面(法向量方向沿 y 轴负方向)为自由面,与相邻斜向预应力水泥路面板连接的

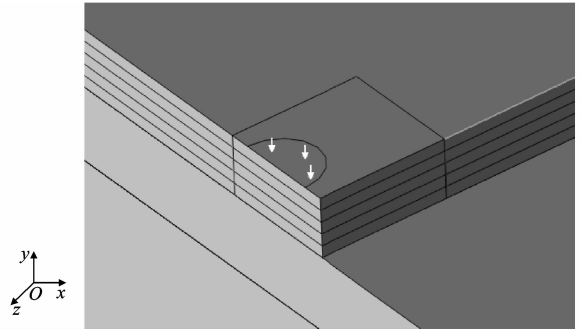


图 4 斜向预应力水泥路面车轮荷载加载

Fig. 4 Wheel load of CPCP

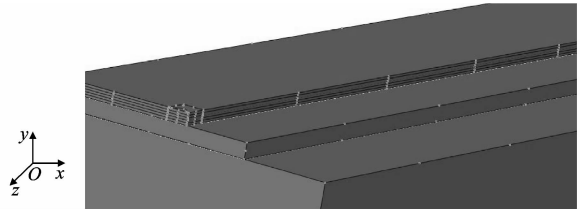


图 5 斜向预应力水泥路面温度梯度应力加载

Fig. 5 Temperature gradient stress load of CPCP

面施加轴向约束(法向量方向沿 x 轴负方向),其余两面均施加沿轴向的对称约束;斜向预应力水泥路面板基层暴露在外的侧面(法向量方向沿 y 轴负方向)为自由面,其余三面均施加沿轴向的对称约束;土基底面施加全约束(限制 x 、 y 、 z 方向的位移与转角),斜向预应力水泥路面土基的 4 个侧面均施加沿轴向的对称约束。

2 车轮荷载作用下滑动层摩擦因数对路面板的影响

运用自主研发的“斜向预应力水泥路面滑动层摩擦因数测试仪”,对现有斜向预应力水泥路面滑动层进行试验研究,得出滑动层摩擦因数的变化范围为 0.3~1.2。取此滑动层摩擦因数范围计算在车轮荷载作用下,斜向预应力水泥路面板内最大主应力随滑动层摩擦因数的变化如下页图 6 所示。

当滑动层摩擦因数分别为 0.3 和 1.2 时,路面板内最大主应力云图如下页图 7 所示。最大主应力出现在车轮荷载作用位置的路面板底沿板长方向(x 轴方向)。

分析图 6、图 7 可得,在车轮荷载作用下,滑动层摩擦因数对斜向预应力水泥路面板内最大主应力的变化影响较小。滑动层摩擦因数每增大 0.1,斜向预应力水泥路面板内最大主应力仅增大 0.000 1 MPa,故滑动层摩擦因数对路面板内车轮荷载作用下的应力影响很小,可以忽略不计。

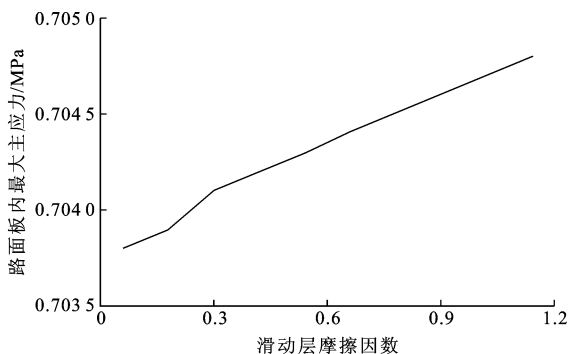
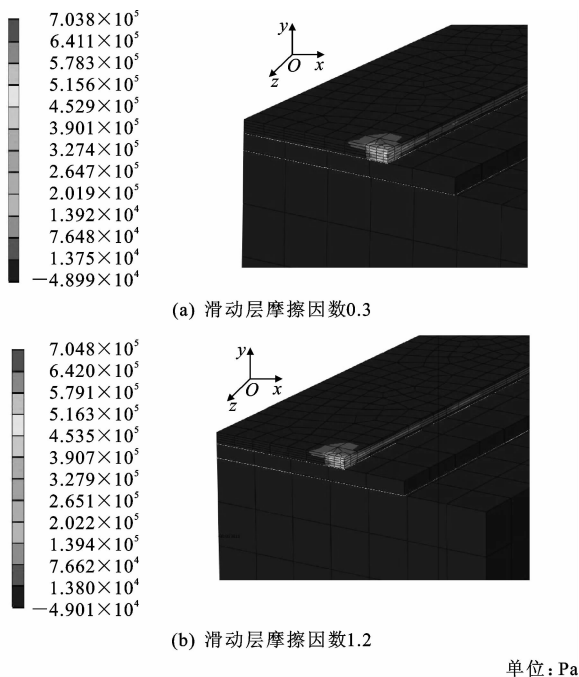


图6 车轮荷载作用下路面板内最大主应力
与滑动层摩擦因数的变化

Fig. 6 Variation of maximum principal stress in CPCP panel
with sliding layer friction coefficient under wheel load



单位: Pa

图7 车轮荷载作用下路面板内最大主应力云图

Fig. 7 Cloud image of maximum principal stress in CPCP
panel under wheel load

斜向预应力水泥路面滑动层摩擦因数分别为 0.3 和 1.2 时,在 0.7 MPa 车轮荷载作用下产生的路面结构变形放大 100 倍后的效果如图 8 所示。

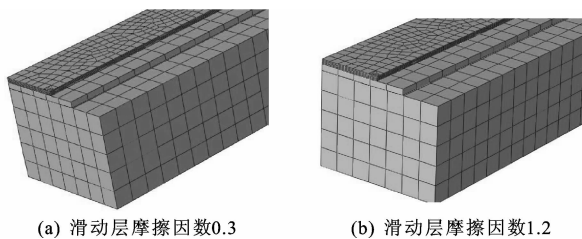


图8 车轮荷载作用下放大 100 倍后的路面板变形效果

Fig. 8 Rendering of CPCP deformation under wheel
load after magnifying 100 times

由图 8 可得,在车轮荷载作用下,斜向预应力水泥路面板变形也很小,即使扩大 100 倍后的效果也不明显。这主要是由于斜向预应力水泥混凝土路面板刚度较大,对车轮荷载的扩散作用明显,因此在车轮荷载作用下,路面板自身及基层和土基的变形均较小。且滑动层摩擦因数为 0.3 和 1.2 的变形效果相差不大,也再次说明在车轮荷载作用下,滑动层摩擦因数对路面板变形的影响较小,可以忽略不计。

3 温度梯度荷载作用下滑动层摩擦因数对路面板的影响

在温度梯度荷载的作用下,路面板内产生翘曲应力。滑动层摩擦因数在 0.3~1.2 之间变化时,路面板内最大主应力随滑动层摩擦因数的变化如图 9 所示。

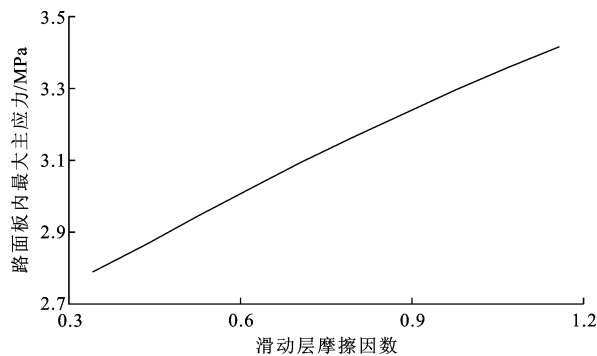
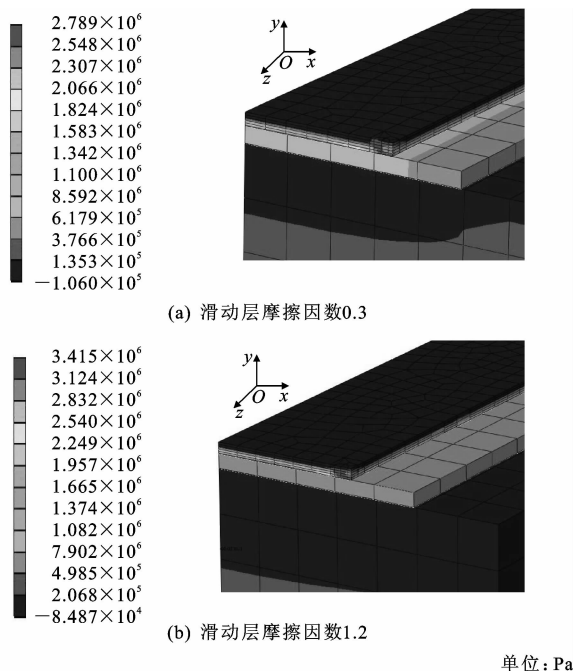


图9 温度梯度荷载作用下路面板内最大主应力
随滑动层摩擦因数变化

Fig. 9 Variation of maximum principal stress in CPCP
panel with sliding layer friction coefficient under
temperature gradient load

当滑动层摩擦因数分别为 0.3 和 1.2 时,路面板内最大主应力云图如下页图 10 所示。最大主应力位于路面板底中央沿路面板长度方向(此处模型施加的温度梯度为路面板表面温度低,底面温度高)。

分析图 9、图 10 可得,滑动层摩擦因数对温度梯度荷载作用下路面板内最大主应力的影响较大。滑动层摩擦因数在 0.3~1.2 变化时,路面板内最大主应力从 2.789 MPa 增大到 3.415 MPa,但均小于水泥混凝土的最大抗拉强度 5 MPa(虽然斜向预应力水泥路面可承受的最大抗拉强度高于普通水泥混凝土路面,但是考虑到计算可能存在一定误差,从安全的角度出发,本文依旧选取普通水泥混凝土的最大抗拉强度作为斜向预应力水泥路面的最大抗拉强度),所以滑动层摩擦因数在 0.3~1.2 范围内变化时,不会由于温度梯度荷载的作用,引起斜向预应力



单位: Pa

图 10 温度梯度荷载作用下路面板内最大主应力云图

Fig. 10 Cloud image of maximum principal stress in CPCP panel under temperature gradient load

水泥路面板内最大主应力过大,造成路面板开裂。

滑动层摩擦因数分别为 0.3 和 1.2 时,在 93 °C/m 的温度梯度荷载作用下产生翘曲变形,原变形及扩大 100 倍后的效果如图 11 所示。

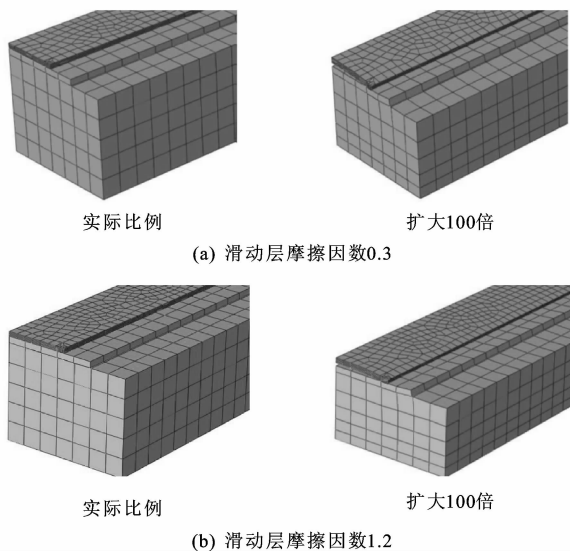


图 11 温度梯度荷载作用下路面板在不同滑动层摩擦因数下的变形

Fig. 11 Deformation of CPCP slab under temperature gradient load with different sliding layer friction coefficients

分析图 11 可知,虽然在温度梯度荷载作用下,路面板的翘曲变形较大,但是滑动层摩擦因数由 0.3 增大到 1.2 时,路面板在温度荷载作用下的翘曲变形差别不大,说明滑动层摩擦因数对斜向预应力水

泥路面由于温度梯度荷载作用产生的翘曲变形影响不大。

4 滑动层摩擦因数对路面板内温度伸缩应力的影响

对于普通水泥混凝土路面板内温度伸缩应力,翁兴中等对其进行了较为系统的研究,得出路面板与基层之间的摩擦阻力相当于作用在路面板底的偏心力,故可将此摩擦阻力平移至路面板厚度中央,此时摩擦阻力等效于拉(压)力与弯矩之和^[22]。在此等效摩擦阻力作用下,路面板中部最大缩(伸)应力 σ_T 为

$$\sigma_T = 2L\gamma f \quad (1)$$

式中: L 为普通水泥混凝土路面板长度(m); γ 为水泥混凝土重度(MN/m^3); f 为普通水泥混凝土路面板底摩擦因数。

对于斜向预应力水泥路面,通过对路面板平均温差 ΔT 折减来反映斜向预应力对路面板沿板长方向伸缩应力的影响。沿斜向预应力水泥路面板长度方向预应力分量与平均温差的换算关系为

$$\Delta T_y = \frac{(1-\mu)\sigma_y}{\alpha E} \quad (2)$$

式中: ΔT_y 为预应力引起的平均温差 ΔT 的折减值(°C); μ 为水泥混凝土泊松比; σ_y 为所施加的沿路面板长度方向的预应力分量(MPa); α 为水泥混凝土线膨胀系数(°C); E 为水泥混凝土弹性模量。

由于施加的预应力分量 σ_y 需要克服摩擦阻力传递至路面板中央,所以需要对 ΔT_y 进行修正。摩擦阻力与平均温差的换算关系为

$$\Delta T_z = \frac{2L\gamma f(1-\mu)}{\alpha E} \quad (3)$$

式中: ΔT_z 为 ΔT_y 由于摩擦阻力引起的修正值。

预应力引起路面板换算平均温差 ΔT 的实际折减值 ΔT_{ys} 为

$$\Delta T_{ys} = \Delta T_y - \Delta T_z \quad (4)$$

而预应力在板内产生压应力,当温度变化时,路面板内部产生拉(压)应力,故斜向预应力水泥路面板内最大伸缩应力 σ_{yT} 为

$$\sigma_{yT} = \sigma_T \mp E\alpha\Delta T_{ys} / (1-\mu) \quad (5)$$

为了排除其他因素的影响,本文只考虑滑动层摩擦因数的影响,其余计算参数依据试验路选取固定值。滑动层摩擦因数在 0.3~1.2 之间变化时,考虑和未考虑斜向预应力水泥路面板内最大伸缩应力值的变化如下页图 12 所示。

分析图 12 可得,考虑及未考虑预应力时,滑动

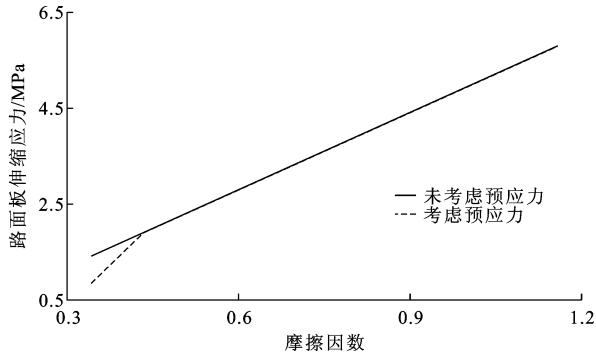


图 12 考虑与未考虑预应力时路面板内温度
伸缩应力随摩擦因数的变化

Fig. 12 Changes of deformation of CPCP slab expansion stress
with sliding layer friction considering prestress and no prestress

层摩擦因数增大到 1.1, 路面板伸缩应力值为 5.28 MPa, 此时路面板内的伸缩应力值已大于水泥混凝土的最大抗拉强度值, 不满足设计要求。由内插法可得, 当滑动层摩擦因数为 1.04 时, 路面板伸缩应力等于混凝土的最大抗弯拉强度 5 MPa, 因此斜向预应力水泥路面的滑动层摩擦因数取值不应大于 1.04。

当考虑 1.97 MPa(试验路的预应力张拉值)的斜向预应力值时, 预应力与温差的换算值为 5.6 °C。当滑动层摩擦因数增大到 0.5 时, 计算得到的滑动层摩擦阻力对预应力的折减温差为负值, 即滑动层摩擦阻力的影响过大, 致使预应力在传至路面板中央时, 已衰减为 0。因此当滑动层摩擦因数增大到 0.5 及以上时, 可以不考虑预应力对路面板伸缩应力的影响, 此时取预应力的换算温差值为 0。图 12 中, 在滑动层摩擦因数增大到 0.5 以后, 路面板内伸缩应力的 2 条曲线发生重叠, 这也说明在滑动层铺设初期, 即二次张拉预应力之前, 其摩擦因数越小越有利于减小路面板内温度伸缩应力。

5 温度应力作用下滑动层摩擦因数对路面板伸缩量的影响

翁兴中等研究得出, 路面板的伸缩量受到路面板翘曲变形、伸缩变形和干湿变形的共同影响^[23]。此处也通过对路面板内平均温差 ΔT 进行折减, 来反映预应力对路面板沿长度方向自由端伸缩量的影响。预应力路面板总伸缩量 ΔL 为

$$\Delta L = L(\alpha T + C_1 \epsilon) - C_2 \frac{\gamma f L^2}{4E} + C_3 \left[L - \frac{2h}{\alpha \Delta T} \sin\left(\frac{L \alpha \Delta T}{2h}\right) \right] \quad (6)$$

式中: T 为环境温度(°C); ϵ 为水泥混凝土干缩系

数, 一般为 1.5×10^{-4} ; h 为路面板厚度(m); C_1 为路面板干湿修正系数, 稳定类基层取 0.6, 粒料类基层取 0.8; C_2 为路面板伸缩变形修正系数, 稳定类基层取 6.0, 粒料类基层取 2.5; C_3 为路面板的翘曲修正系数, 稳定类基层取 0.4, 粒料类基层取 0.7。

在不同温差(浇筑路面板时的环境温度与年最低月气温均值的差)下, 滑动层摩擦因数在 0.3~1.2 之间变化时, 考虑预应力时路面板端的最大伸缩量变化如图 13 所示。

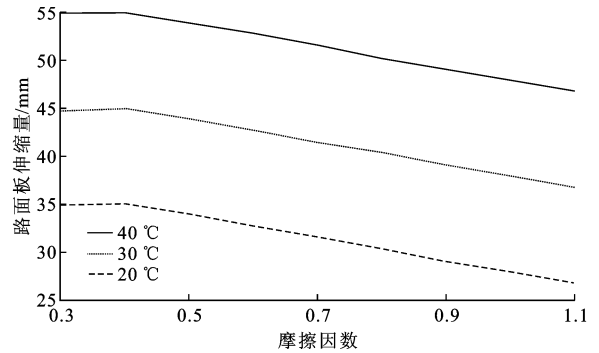


图 13 不同温差时路面板端伸缩量随滑动层摩擦因数的变化曲线
Fig. 13 Deformation curves of CPCP slab flex quantity with sliding
layer friction coefficient under different ranges of temperature

分析图 13 得出, 预应力路面板端总伸缩量受路面板所处环境温差的影响较大, 当温差在 20 °C~40 °C 变化时, 路面板端总伸缩量在 55 mm 以内变化。同时, 3 种环境温差下, 随着滑动层摩擦因数的增大, 路面板端总伸缩量均呈现出逐渐减小的趋势, 说明增大滑动层摩擦因数有利于减小路面板端总伸缩量。所以从路面板端总伸缩量的角度考虑, 应增大斜向预应力路面滑动层后期摩擦因数, 但结合本文研究可知, 其滑动层摩擦因数不应大于 1.04。

6 斜向预应力水泥路面板屈曲验算

对于路面板的屈曲失稳问题, 程选生等进行了详细研究, 给出的钢筋混凝土路面板屈曲的临界温差 ΔT_{cr} 为^[24]

$$\Delta T_{cr} = \frac{H^2 \pi^2}{12(1+\mu)\alpha} \left(1 + \frac{1}{\lambda^2}\right) + \frac{K(1-\mu)a}{EH\alpha\pi^2} \frac{1}{1+1/\lambda^2} \quad (7)$$

式中: H 为厚宽比, 即相对厚度; λ 为长宽比; K 为机床系数(N/mm³); a 为混凝土板的宽度(m)。

通过计算可得, 上述模型在最不利情况下的屈曲临界温度 ΔT_{cr} 为 48.166 °C, 大于正常外界环境下可能出现的最大温差值, 所以该模型的斜向预应力水泥路面板不会发生屈曲失稳破坏。

7 结 语

(1) 车轮荷载作用下,滑动层摩擦因数对斜向预应力水泥混凝土路面板内的应力及变形影响很小,可以忽略不计。

(2) 温度梯度荷载作用下,滑动层摩擦因数对斜向预应力水泥混凝土路面板内的应力及变形影响较大,但是当滑动层摩擦因数在试验所得范围(0.3~1.2)内变化时,路面板内最大主应力均小于混凝土抗弯拉强度5 MPa,所以温度梯度荷载的作用不会引起路面板开裂。

(3) 滑动层摩擦因数增大到1.04时,斜向预应力路面板内伸缩应力等于水泥混凝土的最大抗拉强度5 MPa,所以当考虑滑动层摩擦因数对路面板伸缩应力的影响时,其值不能大于1.04,且滑动层铺设初期摩擦因数越小越有利于减小路面板内的温度应力。

(4) 增大斜向预应力路面滑动层后期摩擦因数,有利于减小路面板端伸缩量,但不应大于1.04。

(5) 斜向预应力水泥路面板的最不利屈曲临界温度为48.166℃,大于在正常外界环境下可能出现的最大温差,所以路面板不会发生屈曲失稳破坏。

(6) 在本文的研究基础上,下一步可进行斜向预应力水泥混凝土路面滑动层的摩擦机理,新型斜向预应力水泥混凝土路面滑动层材料类型和结构参数等研究。

参考文献:

References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 1-36.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research: 2013 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 1-36. (in Chinese)
- [2] 延西利, 樊延刚, 李新波, 等. 水泥路面板芯样的压缩试验及流变特性[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 1-9.
YAN Xi-li, FAN Yan-gang, LI Xin-bo, et al. Compression test and rheological analysis of concrete cored in cement pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 1-9. (in Chinese)
- [3] 胡昌斌, 孙增华, 王丽娟, 等. 水泥混凝土路面早龄期温度场性状与控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(5): 1-9.

- HU Chang-bin, SUN Zeng-hua, WANG Li-juan, et al. Characteristic and control method of early-age temperature field for cement concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(5): 1-9. (in Chinese)
- [4] 邓学钧, 黄晓明. 路面设计原理与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
DENG Xue-jun, HUANG Xiao-ming. Principles and design methods of pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 陈德, 韩森, 张东省, 等. 斜向预应力水泥路面滑动层研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2015, 38(2): 213-218.
CHEN De, HAN Sen, ZHANG Dong-sheng, et al. Research on sliding layer of cross-tensioned prestressed concrete pavement[J]. Journal of Hefei University of Technology, Natural Science, 2015, 38(2): 213-218. (in Chinese)
- [6] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [7] 钱振东, 黄卫, 牛赫东. 预应力混凝土路面设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 22-26.
QIAN Zhen-dong, HUANG Wei, NIU He-dong. Research on prestressed concrete pavement design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 22-26. (in Chinese)
- [8] 韩光义, 钱振东. 滑动层设置对预应力砼路面结构的影响[J]. 公路与汽运, 2007(5): 71-73.
HAN Guang-yi, QIAN Zhen-dong. Influence of sliding layer on the structure of prestressed concrete pavement[J]. Highways & Automotive Applications, 2007(5): 71-73. (in Chinese)
- [9] CHUPIN O, CHABOT A, PIAU J M, et al. Influence of sliding interfaces on the response of a layered viscoelastic medium under a moving load[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(25/26): 3435-3446.
- [10] 刘凯. 摩擦滑移减震技术在村镇砌体房屋结构中的应用可行性研究及减震效果分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
LIU Kai. Research on friction sliding isolation technology for masonry structure in rural regions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [11] 赵坤. 沥青块滑动层与可缩板复合井壁的应用[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(1): 12-13.

- ZHAO Kun, Application of asphalt block sliding layer in composite wall panels[J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(1): 12-13. (in Chinese)
- [12] 赵体波, 牛 斌, 胡所亭, 等. CRTS II 型板式无砟轨道滑动层性能试验研究[J]. 施工技术, 2011, 40(9): 45-47.
- ZHAO Ti-bo, NIU Bin, HU Suo-ting, et al. Research on sliding layer of CRTS II slab ballastless track[J]. Construction Technology, 2011, 40(9): 45-47. (in Chinese)
- [13] 黄 卫, 钱振东, 牛赫东. 预应力混凝土路面的荷载分析及试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 88-92.
- HUANG Wei, QIAN Zhen-dong, NIU He-dong. Load analysis and experiment of prestressed concrete pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1): 88-92. (in Chinese)
- [14] 常伟高, 陆春奇, 翁兴中. 机场大尺寸水泥混凝土道面板伸缩应力的分布[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(5): 13-16.
- CHANG Wei-gao, LU Chun-qi, WENG Xing-zhong. Day and year distribution of shrinkage and tension stress on large size cement concrete slab[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2007, 8(5): 13-16. (in Chinese)
- [15] 黄 卫, 钱振东, 牛赫东. 预应力混凝土路面结构模型与数值分析(一)[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(3): 11-15.
- HUANG Wei, QIAN Zhen-dong, NIU He-dong. Stress numerical analysis of prestressed concrete pavement (part I)[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(3): 11-15. (in Chinese)
- [16] 张东省, 韩 森, 韩微微, 等. 斜张法双向预应力水泥混凝土路面关键设计参数研究[J]. 公路, 2010(11): 70-73.
- ZHANG Dong-sheng, HAN Sen, HAN Wei-wei, et al. Research on key design parameters of two direction cross-tensioned cement prestressed pavement concrete[J]. Highway, 2010(11): 70-73. (in Chinese)
- [17] 郭 超, 张敏江, 陆征然, 等. 重轴载交通下斜向预应力混凝土路面应用研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(3): 286-291. (in Chinese)
- GUO Chao, ZHANG Min-jiang, LU Zheng-ran, et al. Research on application of cross tensioned concrete pavements to heavy axle loading traffic[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(3): 286-291. (in Chinese)
- [18] GB/T 5224—2003, 预应力混凝土用钢绞线[S]. GB/T 5224—2003, Steel strand for prestressed concrete[S]. (in Chinese)
- [19] 李 娜. 斜向预应力混凝土路面研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- LI Na. Study on cross-tensioned prestressed concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [20] 李 娜, 张东省, 徐希娟, 等. 斜向预应力混凝土路面数值模拟[J]. 公路工程, 2014, 39(2): 27-30, 36.
- LI Na, ZHANG Dong-sheng, XU Xi-juan, et al. Stress numerical simulation of cross-tensioned prestressed concrete pavement[J]. Highway Engineering, 2014, 39(2): 27-30, 36. (in Chinese)
- [21] 李 娜, 赵卫东, 张东省. 斜向预应力混凝土路面施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(5): 57-60.
- LI Na, ZHAO Wei-dong, ZHANG Dong-sheng. Construction technology of obliquely prestressed concrete pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(5): 57-60. (in Chinese)
- [22] 翁兴中, 蔡良才. 机场道面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WENG Xing-zhong, CAI Liang-cai. Design of airfield pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [23] 翁兴中, 胡栓科. 机场水泥混凝土道面板缩缝的窄缝设计方法[J]. 宁夏工程技术, 2003, 2(2): 184-185.
- WENG Xing-zhong, HU Shuan-ke. Design method of shrinkage narrow slit on airport cement concrete road surface[J]. Ningxia Engineering Technology, 2003, 2(2): 184-185. (in Chinese)
- [24] 程选生, 杜永峰, 张贵文, 等. 三边简支一边自由混凝土矩形薄板的热弯曲[J]. 应用力学学报, 2013, 30(1): 37-42.
- CHENG Xuan-sheng, DU Yong-feng, ZHANG Gui-wen, et al. The thermal bend of concrete rectangular thin plate with three simply supported sides and one free side[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(1): 37-42. (in Chinese)