

文章编号:1671-1637(2016)01-0001-07

水泥混凝土路面板湿度翘曲应力计算方法

张 脩^{1,2}, 赵鸿铎², 赵队家¹, 孙立军²

(1. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要:为了分析湿度梯度对水泥混凝土路面力学性能的影响,采用弹性力学的基本分析方法推导了非均匀无限水泥混凝土路面板在完全自由、轴向变形约束、弯曲变形约束、弯曲和轴向变形组合约束下的湿度翘曲应力计算公式,利用弯矩等效原理,推导了基于湿度翘曲应力的等效温度梯度公式,基于连续配筋混凝土路面,采用有限元法计算了非线性湿度分布情形下水泥稳定基层、粒料基层、沥青混凝土基层、沥青稳定基层、水泥土基层和自然土基层下的板顶和钢筋的应力与板的裂缝宽度。研究表明:湿度翘曲应力的大小取决于相对湿度的分布形式;板顶应力随基层刚度的增大而增大,当基层刚度从 $0.08 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$ 增大到 $6.28 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,板顶应力从 4.1 MPa 增大到 6.3 MPa ;基层类型几乎不影响钢筋的应力;裂缝端部水平位移从板底至板顶逐渐增大,大约从 0.0 mm 增大到 2.9 mm 。

关键词:路面工程;湿度翘曲应力;等效温度梯度;连续配筋混凝土路面;有限元;基层类型;板顶应力;钢筋应力;裂缝宽度

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

Calculation method of moisture warping stress for cement concrete pavement slab

ZHANG Xiao^{1,2}, ZHAO Hong-duo², ZHAO Dui-jia¹, SUN Li-jun²

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology of Ministry of Transport in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to analyze the impact of moisture gradient on mechanical properties of cement concrete pavement, the calculation formulas of moisture warping stress for nonhomogeneous infinite pavement slabs subjected to free-rein constrain, axial deformation constraint, bending deformation constraint, bending-axial deformation constraint were derived by using the basic analysis method of elasticity mechanics. The formula of equivalent temperature gradient based on the moisture warping stress was derived by using the equivalent principle of moment. Based on continuously reinforced concrete pavement (CRCP), the stresses and crack widths of concrete slab and steel stresses were computed by using the finite element method based on cement stabilized base, stable aggregate base, asphalt concrete base, asphalt stabilized base, limestone soil base and natural soil base. Research result shows that the magnitude of moisture warping stress depends on the relative humidity distribution; the surface stress at slab middle increases

收稿日期:2015-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51308329);山西省青年科技研究基金项目(2013021028-2);山西省自然科学基金项目(2013011027-1);山西省交通科技项目(2013-1-10, 2013-1-11)

作者简介:张 脩(1980-),男,山西神池人,山西省交通科学研究院高级工程师,工学博士,从事道路工程研究。

with the increase of base stiffness, when the stiffness of base increases from $0.08 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$ to $6.28 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$, the surface stress increases from 4.1 MPa to 6.3 MPa ; the type of base hardly has influence on the stress of steel; the horizontal displacement of crack end gradually increases from 0.0 mm to 2.9 mm from slab bottom to surface. 4 tabs, 10 figs, 22 refs.

Key words: pavement engineering; moisture warping stress; equivalent temperature gradient; continuously reinforced concrete pavement; finite element; base type; top slab stress; steel stress; crack width

Author resume: ZHANG Xiao(1980-), male, senior engineer, PhD, +86-351-7635087, xiaozhang2008@gmail.com.

0 引 言

水泥混凝土路面板除承受交通荷载应力外,还承受由环境荷载引起的翘曲应力。根据成因的不同,翘曲可分为由温度梯度引起的温度翘曲和由湿度梯度引起的湿度翘曲^[1]。长期以来,研究人员对混凝土路面板温度翘曲的研究较多而且认识较为统一。然而,对于湿度翘曲,尽管研究人员已经意识到它对路面板的力学特性与翘曲变形有较大影响,但鉴于混凝土材料本身的复杂性,在湿度与湿度梯度的形成机理和湿度翘曲应力的计算方面尚未有共性的认识^[2-4]。

Davis 等认为混凝土的弹性模量在湿润时比干燥时高 $12\% \sim 30\%$ ^[5]; Johnston 报告了混凝土经空气干燥和烘箱烘干后的抗拉弹性模量有所降低^[6]; Ward 研究表明混凝土湿度从 100% 降低到 30% 后,其弹性模量降低 30% ,降低的原因是由于收缩引起的微裂缝^[7]; Yaman 等发现饱和状态下混凝土的弹性模量和泊松比比干燥状态下高 $6\% \sim 25\%$ ^[8-9]; Wang 等研究表明混凝土弹性模量在饱和状态比在干燥状态下高 $3\% \sim 35\%$ ^[10]; Shoukry 等通过试验研究认为混凝土的弹性模量和抗折强度随湿度的增加而降低^[11]; Liu 等研究认为混凝土在完全饱和状态下的弹性模量比干燥状态下高 30% ^[12]。可以看出,对于湿度对混凝土力学特性的影响,由于混凝土材料本身的复杂性,现有关于混凝土湿度对其力学特性的影响的研究也有所不同,不同试验结果得到的力学指标的变化程度不同。关于混凝土板湿度翘曲应力的研究,魏亚将由湿度梯度引起的弯矩等效为线性温度梯度引起的同样大小的弯矩,以等效温度梯度表征湿度梯度进而计算湿度翘曲应力^[1],但未考虑湿度对混凝土本身力学特性的影响,即未给出非均匀板湿度翘曲应力计算方法。

为正确分析湿度与湿度梯度的形成机理和计算

水泥混凝土路面板湿度翘曲应力,本文系统研究了非均匀无限板内湿度梯度产生的湿度翘曲应力计算方法,以连续配筋混凝土路面为例,分析了板内湿度与湿度梯度对板顶应力、钢筋应力和裂缝宽度的影响。

1 非均匀无限板湿度翘曲应力计算理论

1.1 湿度翘曲应力

考虑图 1 矩形板(O 为板厚的中心点)在 z 向(垂向)由于湿度梯度的存在引起的湿度翘曲应力, x (横向)、 y (纵向)向的应变分量 ϵ_x 和 ϵ_y 分别为

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_0 + \frac{z}{\rho} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为板内应变; ρ 为弯曲引起的中性面处($z=0$)的曲率半径。

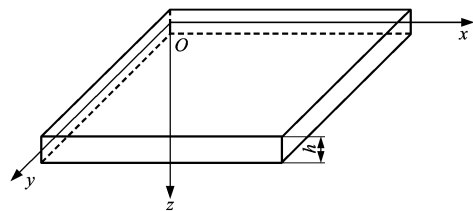


图 1 无限大混凝土薄板

Fig. 1 Infinite concrete thin slab

根据胡克定律,距离中性面 z 处的应变分量 ϵ_x 和 ϵ_y 分别为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) + \alpha_m\theta = \epsilon_0 + \frac{z}{\rho} \\ \epsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \alpha_m\theta = \epsilon_0 + \frac{z}{\rho} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E}{1-\nu} \left(\epsilon_0 + \frac{z}{\rho} - \alpha_m\theta \right) \quad (3)$$

式中: E 为板的弹性模量; σ_x 和 σ_y 分别为 x 、 y 向的应力分量; ν 为泊松比; α_m 为不同温湿环境下的湿膨胀系数; θ 为湿度变化量。

因为矩形板不受任何外力和弯矩,因此,有平衡方程

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz = 0 \quad (4)$$

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz = 0 \quad (5)$$

式中: h 为板的厚度。

将式(3)分别代入式(4)、(5)得到

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha_m}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \theta(z) dz \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{12\alpha_m}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \theta(z) z dz \quad (7)$$

式中: $\theta(z)$ 为厚度方向湿度的变化函数。

综合式(3)、(6)和(7),湿度翘曲应力分量 σ_x 和 σ_y 可以表示为

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\alpha_m E}{1-v} \left[-\theta(z) + \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \theta(z) dz + \frac{12z}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \theta(z) z dz \right] \quad (8)$$

式(8)为均匀板的仅受内部约束引起的湿度翘曲应力(残余应力)计算公式,是分析非均匀板情形下板顶应力、钢筋应力和裂缝宽度的理论基础。

当考虑板厚方向湿度对矩形板材料力学特性影响时,混凝土的弹性模量、泊松比和湿膨胀系数都可以表示为 z 的函数,即 $E(z)$ 、 $v(z)$ 和 $\alpha_m(z)$,式(3)可表示为

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E(z)}{1-v(z)} \left[\epsilon_0 + \frac{z}{\rho} - \alpha_m(z) \theta(z) \right] \quad (9)$$

将式(9)分别代入式(4)、(5)得到

$$\epsilon_0 \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} dz + \frac{1}{\rho} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) dz \quad (10)$$

$$\epsilon_0 \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz + \frac{1}{\rho} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z^2 dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \quad (11)$$

进而可以得到 ϵ_0 和 $1/\rho$ 分别为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{D} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z^2 dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) dz \right] - \frac{1}{D} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \right] \quad (12)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{D} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \right] - \frac{1}{D} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) dz \right] \quad (13)$$

$$D = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} z^2 dz - \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz \right]^2 \quad (14)$$

将式(12)、(13)代入式(9)可推导非均匀无限矩形板在完全自由、轴向变形约束、弯曲变形约束、弯曲和轴向变形组合约束下的湿度翘曲应力。在完全自由情况下,板的湿度翘曲应力 σ_1 为

$$\sigma_1 = \frac{E(z)}{D[1-v(z)]} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z^2 dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) dz - \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \right] + \frac{E(z)}{D[1-v(z)]} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz - \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) dz \right] - \frac{E(z)}{1-v(z)} \alpha_m(z) \theta(z) \quad (15)$$

在轴向变形受限的情况下,板的湿度翘曲应力

$$\sigma_2 \text{ 为}$$

$$\sigma_2 = \frac{E(z)z}{D[1-v(z)]} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) dz - \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \right] - \frac{E(z)}{1-v(z)} \alpha_m(z) \theta(z) \quad (16)$$

在弯曲变形受限的情况下,板的湿度翘曲应力

$$\sigma_3 \text{ 为}$$

$$\sigma_3 = \frac{E(z)z}{D[1-v(z)]} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z^2 dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) dz - \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)} z dz \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \right] - \frac{E(z)}{1-v(z)} \alpha_m(z) \theta(z) \quad (17)$$

在弯曲变形和轴向变形均受限的情况下,板的湿度翘曲应力 σ_4 为

$$\sigma_4 = -\frac{E(z)}{1-v(z)} \alpha_m(z) \theta(z) \quad (18)$$

1.2 等效温度梯度

为便于分析板内由于外部约束引起的应力,参考非线性温度梯度等效为线性温度梯度的思想^[13-15],可将湿度梯度引起的板的弯矩等效为线性温度梯度引起的弯矩 M_t ^[16-17],即

$$M_t = \frac{E_t \Delta T_e \alpha_t h^2}{12(1-v_t)} \quad (19)$$

式中: α_t 为混凝土热膨胀系数; E_t 为计算温度应力时采用的混凝土弹性模量; v_t 为计算温度应力时采用的混凝土泊松比; ΔT_e 为等效温度梯度。

非均匀板湿度梯度引起的弯矩为

$$M_m = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z) E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \quad (20)$$

令 $M_t = M_m$, 可得等效温度梯度 ΔT_e 为

$$\Delta T_e = \frac{12(1-v_t)M_m}{h^2 E_t \alpha_t} = \frac{12(1-v_t)}{h^2 E_t \alpha_t} \cdot \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\alpha_m(z)E(z)}{1-v(z)} \theta(z) z dz \quad (21)$$

1.3 湿度膨胀系数

与热膨胀系数类似,湿度膨胀系数 α_m 表征材料在湿度改变时的膨胀(收缩)率。根据 Pickett 模型给出的胶凝材料收缩变形与内部湿度关系^[14,18]有

$$\epsilon_c = \epsilon_p (1 - V_a)^k = 6.15 \times 10^{-3} (1 - \theta) \cdot (1 - V_a)^k \quad (22)$$

式中: ϵ_c 为混凝土的收缩变形; ϵ_p 为胶凝材料(浆体)的收缩变形; V_a 为混凝土中骨料含量的体积率; k 为骨料引起的收缩限制系数,对于混凝土材料取 1.68。

根据湿度翘曲应力的推导过程可知,混凝土的收缩变形为

$$\epsilon_c = \alpha_m \theta \quad (23)$$

进而得到湿度膨胀系数为

$$\alpha_m = 6.15 \times 10^{-3} (1 - \theta) (1 - V_a)^k / \theta \quad (24)$$

湿度膨胀系数是湿度与厚度的函数,因此,湿度膨胀系数最终是厚度的函数,描述了非均匀板的湿度膨胀系数的不均匀性。

1.4 等效温度梯度计算

为理解不同湿度分布与约束条件下混凝土板的湿度翘曲应力计算方法和等效温度梯度的确定,分别考虑如下问题引起的非均匀无限板的湿度翘曲应力: $h = 0.15 \text{ m}$, $v(z) = 0.18$, $v_t = 0.3$, $V_a = 0.75$, $\alpha_t = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 混凝土的弹性模量与湿度的关系为^[11]

$$E(\theta) = 28.835 - 0.0486 \, 53\theta \quad (R^2 = 0.96) \quad (25)$$

式中: R^2 为决定系数。

湿度改变的非线性、线性和常数形式分别为

$$\theta(z) = \begin{cases} \frac{1}{h^5} \left(z + \frac{h}{2} \right)^5 & \text{非线性形式} \\ \frac{1}{h} \left(z + \frac{h}{2} \right) & \text{线性形式} \\ 0.5 & \text{常数形式} \end{cases}$$

前 2 种形式的板顶和板底的湿度均相同,即板底和表面湿度差相同,不同的是第 1 种是非线性形式,第 2 种是线性形式,第 3 种为常数形式。这 3 种分布形式仅为理论分析所用,并不反映实际混凝土板的湿度分布情况。3 种湿度改变情形下弯矩 M_m 和等效温度梯度 ΔT_e 见表 1。

可以看出,相对线性湿度分布,非线性湿度分布造成了额外的等效温度梯度,因此,在混凝土板湿度

表 1 弯矩和等效温度梯度计算结果

Tab. 1 Calculation results of bending moment and equivalent temperature gradient

参数	$M_m / (\text{N} \cdot \text{m})$	$\Delta T_e / ^\circ\text{C}$
第 1 种温度改变形式	-29	-45.40
第 2 种温度改变形式	-39	-59.89
第 3 种温度改变形式	0	0.00

翘曲应力的分析中,需要特别注意非线性湿度分布时应力计算的复杂性。

2 连续配筋混凝土路面湿度翘曲应力计算

考虑了湿度的等效温度梯度对混凝土力学性能的影响,可利用有限元或者其他数值方法进行混凝土路面的湿度翘曲应力分析,也能将温度场、荷载场与湿度场(等效温度梯度)进行耦合,研究混凝土的力学性能。本文计算了湿度非线性分布下的等效温度梯度,采用有限元法分析了 6 种不同基层类型下连续配筋混凝土路面(CRCP)的湿度翘曲应力。

2.1 二维 CRCP 有限元模型与参数

参考 Kim 等建立的用于计算 CRCP 温度应力的有限元模型^[19-21],本文建立的二维有限元模型见图 2,模型建立的要点如下。

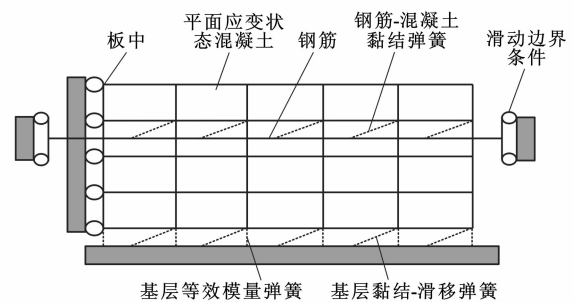


图 2 CRCP 二维有限元模型

Fig. 2 2D finite element model of CRCP

(1)模型对象为 CRCP 路面上 2 条裂缝围成的混凝土板,考虑对称性,为减少运算时间,以板中到一侧裂缝之间的 1/2 混凝土板为研究对象。

(2)钢筋布置于距混凝土面层顶面上 1/3 处。

(3)采用弹簧表示钢筋与混凝土之间的黏结刚度。

(4)用基层顶面的等效模量描述基层对 CRCP 板的支撑作用,用竖向弹簧表示。

(5)用黏结-滑移模型描述基层对 CRCP 板的摩擦影响,用水平向弹簧表示。

(6)考虑到 CRCP 纵向钢筋的连续性,纵向钢

筋可以表示为平面应力问题,因此,在两侧端部只允许钢筋竖向位移且不能旋转。

利用商业软件 ABAQUS 建立的 CRCP 二维有限元模型网格划分见图 3。图 4 为黏结-滑移模型。

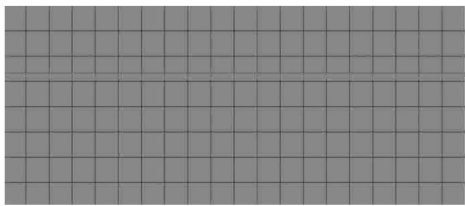


图 3 CRCP 二维有限元模型网格划分
Fig. 3 Mesh generation of 2D finite element model of CRCP

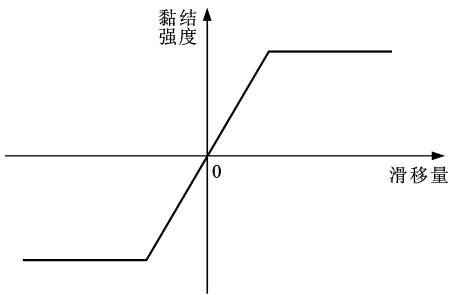


图 4 黏结-滑移模型
Fig. 4 Bonding-slip model

CRCP 二维有限元模型参数、基层黏结-滑移参数^[22]和基层强度分别见表 2~4。

表 2 CRCP 二维有限元模型参数

Tab. 2 Parameters of 2D finite element model of CRCP

参数	取值	参数	取值
裂缝间距/m	1.5	线性等效温度梯度/℃	-45.4
板厚/cm	30	钢筋泊松比	0.3
钢筋位置/cm	10	钢筋-混凝土黏结滑移刚度/(MPa·mm ⁻¹)	190
钢筋模量/GPa	200	混凝土模量/GPa	28.835
钢筋直径/mm	12	混凝土泊松比	0.18
钢筋热膨胀系数/℃ ⁻¹	1.0×10 ⁻⁵	混凝土热膨胀系数/℃ ⁻¹	1.0×10 ⁻⁵

表 3 基层黏结-滑移参数

Tab. 3 Bonding-slip parameters of bases

基层类型	黏结强度/MPa	最大滑移/mm	黏结-滑移刚度/(MPa·mm ⁻¹)	有限元弹簧刚度/(MPa·mm ⁻¹)
水泥稳定基层	0.106	0.025	4.240	36.343
粒料基层	0.023	0.500	0.046	0.394
沥青混凝土基层	0.021	0.600	0.035	0.300
沥青稳定基层	0.015	1.000	0.015	0.129
水泥土基层	0.012	0.300	0.040	0.343
自然土基层	0.008	1.300	0.006	0.051

表 4 基层强度

Tab. 4 Strengths of bases

基层类型	回弹模量/MPa	基层顶面等效模量/(MPa·mm ⁻¹)
水泥稳定基层	3 000	6.279 1
粒料基层	350	0.732 6
沥青混凝土基层	1 200	2.511 6
沥青稳定类基层	800	1.674 4
水泥土基层	550	1.151 2
自然土基层	40	0.083 7

2.2 湿度翘曲应力计算结果分析

2.2.1 板顶水平应力

采用有限元法计算的板顶各单元的水平应力分量和米赛斯应力随距板中水平距离(图 5)的变化关

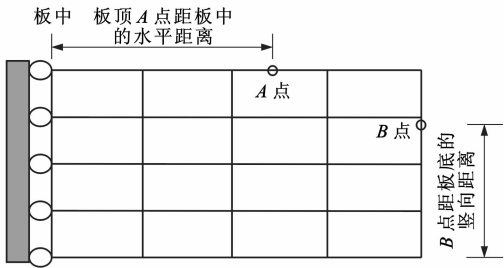


图 5 应力计算点
Fig. 5 Computation points of stress

- 系分别见图 6、7,结果分析如下。
- (1)对于所有基层类型,板顶的应力都是从板中至裂缝处呈下降趋势,不同的是水平方向的应力为压应力,米赛斯等效应力为拉应力。
- (2)基层对板顶应力的影响随距板中距离的增

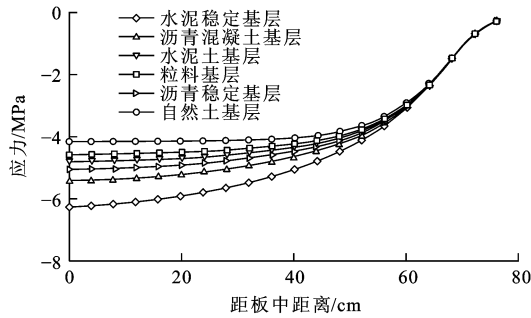


图6 板顶水平拉应力曲线

Fig. 6 Horizontal tensile stress curves at top of slab

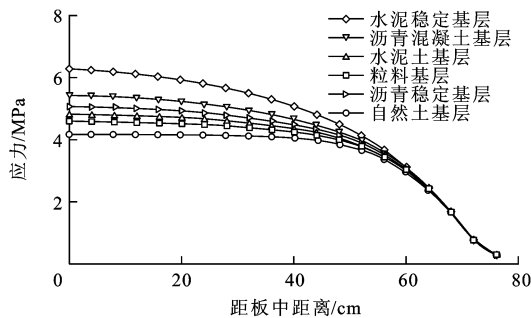


图7 板顶米赛斯应力曲线

Fig. 7 Mises stress curves at top of slab

大而降低,在板中位置,水稳基层的板顶应力最大,约为 6.3 MPa,自然土基层的板顶应力的最小,约为 4.1 MPa,二者相差约 2.2 MPa;在裂缝位置处,水稳基层和自然土基层的板顶应力均为 0.2 MPa,二者几乎相等。

(3)基层对应力水平分量和米赛斯应力的影响的大小顺序为:水泥稳定基层、沥青混凝土基层、沥青稳定基层、水泥土基层、粒料基层与自然土基层,表明基层刚度的增大会引起板顶应力的增大。

2.2.2 钢筋应力

钢筋各单元的水平应力分量和米赛斯应力随距板中距离的变化关系分别见图 8、9,分析结果如下。

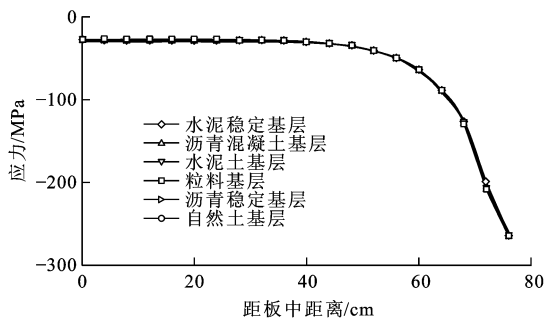


图8 钢筋水平应力曲线

Fig. 8 Horizontal stress curves of steel

(1)对于所有基层类型,钢筋的应力都从板中至裂缝处呈上升趋势,不同的是水平方向的应力为压

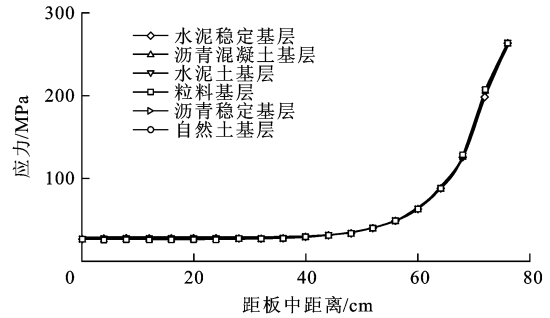


图9 钢筋米赛斯应力曲线

Fig. 9 Mises stress curves of steel

应力,米赛斯等效应力为拉应力。

(2)基层对钢筋的应力的影响几乎为 0,这说明基层刚度的增大与钢筋的应力变化几乎无关。

2.2.3 裂缝宽度

右侧混凝土各单元的水平位移分量随距板底距离(图 5)的变化关系见图 10,分析结果如下。

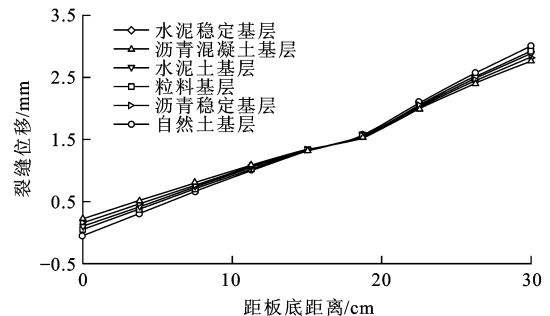


图10 裂缝水平位移曲线

Fig. 10 Horizontal displacement curves of cracks

(1)对于所有基层类型,裂缝端部的水平位移从板底至板表面均从 0.0 mm 增大到 2.9 mm,说明板表面的裂缝宽度最大,而板底的裂缝宽度最小,这与实际情况相符。

(2)对于所有基层类型,裂缝水平位移与其距板底距离基本呈线性关系。

(3)自然土基层的板表面裂缝宽度最大,约为 3.00 mm,沥青混凝土基层的板底裂缝宽度最大,约为 0.25 mm。

3 结 语

(1)混凝土板内存在的湿度梯度产生湿度翘曲应力的的大小取决于湿度的分布形式。

(2)在同样等效温度梯度下,基层对 CRCP 板顶应力的影响随距板中距离的增大而降低,在板中位置,水稳基层的板顶应力最大,约为 6.3 MPa,自然土基层的板顶应力最小,约为 4.1 MPa,二者相差约 2.2 MPa;在裂缝位置,水稳基层和自然土基层的

板顶应力均为 0.2 MPa,二者几乎相等。

(3)基层类型对 CRCP 板顶应力的影响的大小顺序为:水泥稳定基层、沥青混凝土基层、沥青稳定基层、水泥土基层、粒料基层与自然土基层,表明基层刚度的增大会引起板顶应力的升高。

(4)在所有基层类型下,钢筋应力从板中至裂缝处均呈上升趋势,约从 25 MPa 增大到 275 MPa,不同基层类型下钢筋应力几乎相同,表明基层类型与钢筋的应力变化相关性很小。

(5)在所有基层类型下,裂缝端部的水平位移由板底至板顶均逐渐上升,从 0.0 mm 增大到 2.9 mm,板顶裂缝宽度最大,板底裂缝宽度最小。

参考文献:

References:

- [1] 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 Ya. Mechanism of moisture warping and deformation calculations in concrete pavements[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 266-271. (in Chinese)
- [2] BUCH N, ZOLLINGER D G. Preliminary investigation on effects of moisture on concrete pavement strength and behavior[J]. Transportation Research Record, 1993(1382): 26-31.
- [3] JANSSEN D J. Moisture in portland cement concrete[J]. Transportation Research Record, 1987(1121): 40-44.
- [4] JEONG J H, ZOLLINGER D G. Environmental effects on the behavior of jointed plain concrete pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(2): 140-148.
- [5] DAVIS R E, TROXELL G E. Modulus of elasticity and Poisson's ratio for concrete and the influence of age and other factors upon these values[C]//American Society for Testing Materials. Proceedings of American Society for Testing Materials 1929. West Conshohocken: American Society for Testing Materials, 1929: 678-710.
- [6] JOHNSTON C D. Concrete and its constituent materials in uniaxial tension and compression[D]. Belfast: Queen's University of Belfast, 1967.
- [7] WARD M A. The mechanism of tensile creep in concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1969, 21: 151-158.
- [8] YAMAN I O, AKTAN H M, HEARN N. Active and non-active porosity in concrete Part II: evaluation of existing models[J]. Materials and Structures, 2002, 35(2): 110-116.
- [9] YAMAN I O, HEARN N, AKTAN H M. Active and non-active porosity in concrete Part I: experimental evidence[J]. Materials and Structures, 2002, 35(2): 102-109.
- [10] WANG Hai-long, LI Qing-bin. Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(5): 1370-1379.
- [11] SHOUKRY S N, WILLIAM G W, DOWNIE B, et al. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 688-696.
- [12] LIU Bao-dong, LU Wen-juan, LI Lin, et al. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 69: 133-142.
- [13] MOHAMED A R, HANSEN W. Effect of nonlinear temperature gradient on curling stress in concrete pavements[J]. Transportation Research Record, 1997(1568): 65-71.
- [14] WEI Y, HANSEN W. Characterization of moisture transport and its effect on deformations in jointed plain concrete pavement[J]. Transportation Research Record, 2011(2240): 9-15.
- [15] IOANNIDES A M, KHAZANOVICH L. Nonlinear temperature effects on multilayered concrete pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(2): 128-136.
- [16] BRADBURY R D. Reinforced Concrete Pavements[M]. Washington DC: National Academy of Sciences, 1938.
- [17] WESTERGAARD H M. Analysis of stresses in concrete pavements due to variations of temperature[C]//UPHAM C M, STEINBERG S S. Proceedings of the Sixth Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington DC: Highway Research Board, 1927: 201-215.
- [18] PICKETT G. Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1956, 56: 581-590.
- [19] KIM S M, WON M C. Horizontal cracking in continuously reinforced concrete pavements[J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(6): 784-791.
- [20] KIM S M, WON M C, MCCULLOUGH B F. Mechanistic modeling of continuously reinforced concrete pavement[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(5): 674-682.
- [21] KIM S M, WON M, MCCULLOUGH B F. Numerical modeling of continuously reinforced concrete pavement subjected to environmental loads[J]. Transportation Research Record, 1998(1629): 76-89.
- [22] ZHANG J, LI V C. Influence of supporting base characteristics on shrinkage-induced stresses in concrete pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(6): 455-462.