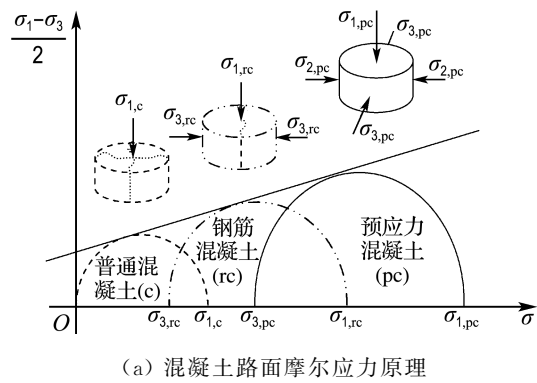
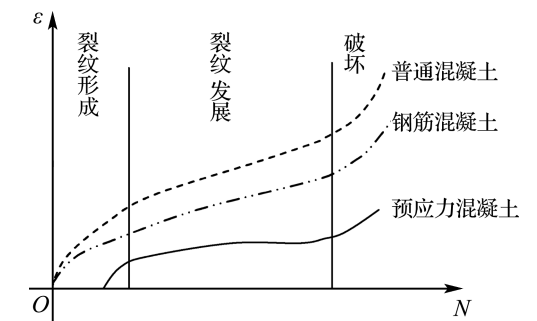




(a) 混凝土路面摩尔应力原理



(b) 混凝土疲劳裂纹扩展原理

图 1 混凝土路面抗疲劳原理

Fig. 1 Concrete pavements anti-fatigue theory

力,疲劳裂纹开展速率比普通混凝土低. 预应力混凝土路面中由于交叉预应力筋对混凝土的主动压力作用,即摩尔应力圆中 $\sigma_3>0$, $\sigma_2>0$,使得混凝土初始裂纹的出现滞后于普通混凝土和钢筋混凝

土的,同时,预应力筋的抗拉强度高于普通钢筋,能够有效抵抗由于重轴载引起的路面拉应力,保证路面在正常使用情况下处于三向受压状态,因此,疲劳开展速率比钢筋混凝土低.

2 斜向预应力混凝土路面破坏准则

重轴载交通下斜向预应力混凝土路面结构的受力分析如图 2 所示. 已有研究成果表明,斜向预应力水泥混凝土路面应满足如下破坏准则^[6-7]:

$$\sigma_t + \sigma_p \geq \sigma_{\Delta} + \sigma_f + \sigma_l \tag{1}$$

式中: σ_t 为混凝土容许弯曲应力; σ_p 为预应力; σ_{Δ} 为温度应力; σ_f 为摩擦力; σ_l 为荷载应力. 但是,重轴载交通下水泥混凝土路面结构不能用最大温度应力、最大荷载应力、摩擦力进行简单的组合^[10]. 因为在路面实际使用中,50 a 一遇的最大温度应力和 30 a 一遇的最大荷载应力同时存在的概率几乎为零,而且,温度应力是不断变化的,最大值仅产生于夏季午后的 1~2 h 内,而预应力是恒定抗力,说明式(1)中的荷载组合在回归周期上不统一,结果相当保守. 本次研究根据实际工况提出 3 种荷载组合:

$$\sigma_p \geq \sigma_{ps} \tag{2}$$

$$\sigma_p \geq \sigma_{\Delta} + \sigma_f \tag{3}$$

$$f_r + \sigma_p \geq \sigma_{\Delta,m} + \sigma_{pm} + \sigma_f \tag{4}$$

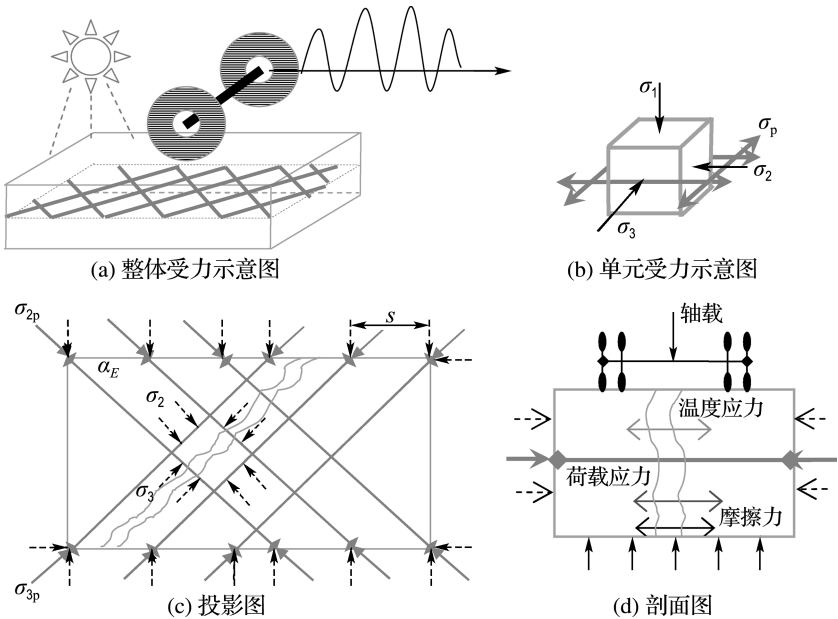


图 2 斜向预应力水泥混凝土路面结构受力分析图

Fig. 2 Diagram of force analysis for CTCP structure

式中: σ_{ps} 为标准轴载在四边自由板临界荷载处产生的最大荷载应力; σ_{pm} 为极限轴载在四边自由板临界荷载处产生的最大荷载应力; f_r 为混凝土抗弯拉强度. 式(2)、(3)保证路面在常规车辆荷载和温度应力作用下处于三轴受压状态; 式(4)保证路面在承受最大温度应力、最大荷载应力、摩擦力同时作用下不发生一次性破坏.

3 路面结构受力分析

斜向预应力混凝土路面主要承受车辆荷载应力、温度应力、预应力、摩擦力.

3.1 车辆荷载应力计算

车辆荷载应力采用规范中的单层弹性板理论进行计算:

$$\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps} \quad (5)$$

$$k_f = N_c^\lambda \quad (6)$$

$$\sigma_{ps} = 1.47 \times 10^{-3} r^{0.7} h_c^{-2} P_s^{0.94} \quad (7)$$

$$\sigma_{pm} = 1.47 \times 10^{-3} r^{0.7} h_c^{-2} P_{\max}^{0.94} \quad (8)$$

$$r = 1.21 \left(\frac{D_c}{E_t} \right)^{1/3} \quad (9)$$

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1 - \nu_c^2)} \quad (10)$$

$$E_t = \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^\alpha E_0 \quad (11)$$

$$\alpha = 0.86 + 0.26 \ln h_x \quad (12)$$

$$E_x = \sum_{i=1}^n (h_i^2 E_i) / \sum_{i=1}^n (h_i^2) \quad (13)$$

$$h_x = \sum_{i=1}^n h_i \quad (14)$$

式中: σ_{pr} 为设计轴载在面板临界荷载处产生的荷载疲劳应力; k_r 为考虑接缝传荷能力的应力折减系数, 混凝土路肩取 0.87; k_f 为考虑设计基准期内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数; k_c 为考虑计算理论与实际差异以及动荷载等因素影响的综合系数; λ 为混凝土疲劳指数, 取 0.057; P_s 为设计轴载的单轴重; $P_{\max}$ 为极限轴载的单轴重; h_c 、 E_c 、 ν_c 为面层板厚度、弯拉弹性模量和泊松比; r 为面层板的相对刚度半径; D_c 为面层板截面弯曲刚度; E_t 为板底地基当量回弹模量; α 为与颗粒层总厚度 h_x 有关的回归系数; E_x 为粒料层当量回弹模量; h_i 为粒料层厚度.

3.2 温度应力计算

温度应力采用规范的方法进行计算:

$$\sigma_{\Delta t} = k_t \cdot \sigma_{\Delta t, m} \quad (15)$$

$$\sigma_{\Delta t, m} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_g}{2} B_L \quad (16)$$

$$B_L = 1.77 e^{-4.48 h_c} C_L - 0.131(1 - C_L) \quad (17)$$

$$C_L = 1 - \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sin t}{\cos t \sin t + \sinh t \cosh t} \quad (18)$$

$$t = L/3r \quad (19)$$

$$k_t = \frac{f_r}{\sigma_{\Delta t, m}} \left[0.828 \left(\frac{\sigma_{\Delta t, m}}{f_r} \right)^{1.323} - 0.041 \right] \quad (20)$$

式中: $\sigma_{\Delta t, m}$ 为最大温度梯度时沿线路纵向面层板最大温度疲劳应力; k_t 为温度疲劳系数; α_c 为混凝土的线膨胀系数; T_g 为公路所在地 50 a 一遇的最大温度梯度; B_L 为综合温度翘曲应力和内应力作用的温度应力系数; C_L 为混凝土面板的温度翘曲应力系数; L 为板长.

3.3 面层板摩擦力计算

斜向交叉预应力面层板的预应力筋除了在施工和使用过程中有损失, 还要克服与基层的摩擦力, 最大值在板中部, 计算公式如下:

$$\sigma_f = \mu \gamma L / 2 \quad (21)$$

式中: μ 为面层板与基层间的摩擦因数, 其值因面层板与基层之间设立了聚氟乙烯夹甘油的滑动层可以取为 0.5; γ 为上层斜向预应力混凝土板的密度.

3.4 预应力计算

假定预应力筋在面层内引起的应力是沿着截面高度均匀分布的, 则对于受力单元的预加应力可以按下式计算:

$$\sigma_{2p} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{loss}) A_p}{h_c \cdot s \cdot \sin \alpha_E} \quad (22)$$

$$\sigma_{3p} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{loss}) A_p}{h_c \cdot s \cdot \cos \alpha_E} \quad (23)$$

式中: σ_{2p} 、 σ_{3p} 为受力单元沿 2、3 方向的预加压应力; σ_{con} 为预应力筋张拉控制应力; A_p 为预应力筋截面积; α_E 为预应力筋与路面纵向之间的夹角; s 为预应力筋沿路面纵向间距; σ_{loss} 为施工阶段预应力损失值, 包括以下两部分^[11]:

(1) 锚具变形和预应力筋回缩引起的预应力损失

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_s \quad (24)$$

式中: a 为张拉端锚具变形和无黏结预应力筋内缩值; l 为张拉端至锚固端之间的距离; E_s 为预应

力筋弹性模量.

(2) 预应力筋与周围接触套管之间摩擦引起的预应力损失

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con}(1 - e^{-kx}) \tag{25}$$

式中: k 为管道每 m 长度局部偏差的摩擦因数; x 为张拉端至计算截面的水平距离.

$$\sigma_{loss} = \sigma_{l1} + \sigma_{l2} \tag{26}$$

3.5 接地压力计算

接地压力是斜向交叉预应力路面板受力单元的竖向主应力,是对受力单元进行分析的关键,本次研究采用如下经验公式进行计算^[12]:

$$A = 200P_s + 15\,200 \pm 7\,000 \tag{27}$$

$$p = P_s/2A \tag{28}$$

式中: A 为接地面积, mm²; $\pm 7\,000$ 为保证率达到 95% 的离差范围,考虑到国内超载情况建议取用“—”值.

4 实例分析

为了验证本文所提出理论的实用性,选择某具有代表性的重轴载交通工程进行分析. 交通量调查及路面结构设计参数如表 1 所示.

表 1 交通量调查及路面结构设计参数

Tab. 1 Traffic survey and pavements structure design parameters

交通调查		交通量分析		路面结构		材料属性		应力	
车型	占总交通量/%	符号	参量	符号	参量	符号	参量	符号	参量/MPa
112	0.36	AADT	1 364 辆	L	100 m	f_r	5 MPa	σ_{ps}	−1.37
115	69.89	P_s	100 kN	B	6 m	E_c	27.6 GPa	σ_{pm}	−4.45
117	0.04	P_{max}	350 kN	h_c	0.20 m	α_c	$1.0 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	σ_{pr}	−3.20
122	0.04	t	30 a	h_1	0.20 m	ν	0.15	σ_{2p}	2.37
125	0.22	g_r	3%	h_2	0.20 m	Φ	15.2 mm	σ_{3p}	2.37
1127	1.01	N_e	2×10^7	h_3	0.20 m	σ_{con}	1 395 MPa	$\sigma_{\Delta r}$	−0.71
1157	0.07			s	0.50 m	E_1	2.4 GPa	$\sigma_{\Delta r, m}$	−1.60
12	13.85			α	45°	E_2	2.2 GPa	σ_f	−0.64
12 客	2.33					E_3	0.5 GPa	p_{cs}	2.00
15	1.69					E_0	0.08 GPa	p_{cm}	4.47
127	0.29								
157	10.23								

路面单元三向应力组合如下.

组合一(预应力+标准荷载应力)

$$\sigma_1 = p_{cs} = 2.00 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{2,3p} + \sigma_{ps} = 1.00 \text{ MPa}$$

组合二(预应力+温度应力+摩擦力)

$$\sigma_1 = p_{cs} = 2.00 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{2,3p} + \sigma_{\Delta r} + \sigma_f = 0.13 \text{ MPa}$$

组合三(承载极限组合)

$$\sigma_1 = p_{cm} = 4.47 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{2,3p} + \sigma_{\Delta r, m} + \sigma_{pm} = -3.68 \text{ MPa}$$

由此可知,预应力筋对混凝土路面施加的侧向压力 $\sigma_{2,3p}$ = 2.37 MPa, 约是混凝土抗压强度 f_c (= 23.43 MPa) 的 1/10. 从混凝土三向受压静载试验表 2 可知, 在 $0.1f_c$ 定侧压作用下混凝土静抗压强度是无侧压混凝土的 2 倍.

表 2 混凝土三向受压静载试验

Tab. 2 Concrete static triaxial compression test data

侧压 等级 R	极限强度/MPa					均值/ MPa
	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	
0	24.49	22.33	23.42	24.86	22.05	23.43
0.1	47.99	50.21	51.31	52.95	51.64	51.62

注:表 2 数据来自文献[1], $R = \sigma_{2p,3p}/f_c$

由表 3 可回归出混凝土在 $0.1f_c$ 定侧压下,最大应力水平 S_{max} 与疲劳寿命 N 之间的关系式:

$$S_{max} = 2.305 - 0.1056 \lg N \tag{29}$$

由式(29)可知, 在 $0.1f_c$ 定侧压, 预计使用寿命 $N_e = 2 \times 10^7$ 时 $S_{max} = 1.53$, 由此得出混凝土疲劳应力最大值可以提高到最大静抗压强度的 1.5 倍.

表 3 0.1 f_c 定侧压下混凝土疲劳试验
Tab.3 Concrete fatigue test data under 0.1 f_c

S_{max}	疲劳寿命 N/次					均值/次
	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	
2.0	295	380	574	620	1 515	565
1.9	1 850	4 850	5 550	9 725	36 500	7 071
1.8	43 000	180 000	194 000	230 945	245 000	153 426
1.7	412 000	920 800	1 031 428			731 476
1.6	$>2\times10^6$	$>2\times10^6$				$>2\times10^6$

注:表 3 数据来自文献[1], $S_{max}=\sigma_{max}/f_c$

5 结 语

本文针对重轴载交通下普通水泥混凝土路面抗疲劳性能较差、容易产生裂纹的问题,将斜向预应力混凝土路面结构引入到重轴载交通中.通过摩尔应力原理,并结合混凝土疲劳裂纹扩展的三阶段理论,分析了普通混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土路面三者之间在抗疲劳机理上的区别和联系,得出了预应力混凝土路面抗疲劳强度提升的原因.在此基础上,提出了分步张拉预应力筋的方法.初次张拉阻止混凝土初始裂纹形成;二次张拉保证混凝土始终处于三向受压状态,并阻止裂纹的发展.通过上述两次张拉过程,最终达到了提高混凝土路面结构抗疲劳强度的目的.

在上述理论研究的基础上,结合实例针对重轴载交通下斜向预应力混凝土路面的车辆荷载应力、温度应力、摩擦力、预应力、接地压力进行分析,并进行科学组合,得到了斜向预应力混凝土路面的受力状态.研究表明:此结构中所设置的斜向预应力筋能够较好地改善混凝土路面的受力状态,提高混凝土路面抗疲劳强度,适合于在重轴载交通中的应用.

参考文献:

[1] 曹 伟,宋玉普. 混凝土三轴受压等幅疲劳力学性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(10):1355-1359.
CAO Wei, SONG Yu-pu. Research on fatigue properties of concrete under triaxial compressive constant-amplitude cyclic loading [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2005, **37**(10):1355-1359. (in Chinese)
[2] 朱劲松,宋玉普. 混凝土双轴抗压疲劳损伤特性的

超声波速法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(13):2230-2234.
ZHU Jin-song, SONG Yu-pu. Research on fatigue damage of concrete under biaxial compressive loading using ultrasonic velocity method [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, **23**(13):2230-2234. (in Chinese)
[3] 朱劲松,肖汝诚,宋玉普. 混凝土双轴抗压疲劳累积损伤规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(6):104-109.
ZHU Jin-song, XIAO Ru-cheng, SONG Yu-pu. Experimental study on the cumulative fatigue damage of plain concrete under biaxial compression [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, **38**(6):104-109. (in Chinese)
[4] 曹 伟,宋玉普,刘海成. 混凝土三轴变幅拉-压疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2006, **23**(3):111-117.
CAO Wei, SONG Yu-pu, LIU Hai-cheng. Fatigue properties of plain concrete under triaxial variable amplitude tension compression cyclic loading [J]. **Engineering Mechanics**, 2006, **23**(3):111-117. (in Chinese)
[5] 吕培印,李庆斌,张立翔. 混凝土拉-压疲劳损伤模型及其验证[J]. 工程力学, 2004, **21**(3):162-166.
LYU Pei-yin, LI Qing-bin, ZHANG Li-xiang. Damage model for tension-compression fatigue loading of concrete and its certification [J]. **Engineering Mechanics**, 2004, **21**(3):162-166. (in Chinese)
[6] Hossain M, Hancock J, ZHONG Wu. Cross tensioned concrete pavement [J]. **Journal of Transportation Engineering**, 2003, **129**(4):427-433.
[7] 中交规划设计院有限公司. JTG D40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTG D40-2011 Specifications for Design of Highway Cement Concrete Pavements [S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
[8] American Concrete Institute. ACI 325.7R-88 Recommendations for Designing Prestressed Concrete Pavements [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2000.
[9] 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 pre-stressed concrete pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [10] 王选仓, 于伟, 冯治安, 等. 重载水泥混凝土路面极限轴载计算方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5):21-27.
- WANG Xuan-cang, YU Wei, FENG Zhi-an, *et al.* Calculation methods for ultimate axle load on cement concrete pavement under heavy load [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(5):21-27. (in Chinese)
- [11] 中国建筑科学研究院. JGJ 92—2004 无粘结预应力混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- China Academy of Building Research. JGJ 92-2004 Technical Specification for Concrete Structures Prestressed with Unbounded Tendons [S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)
- [12] 孟岩, 郭林泉, 谭至明. 路面载重车辆的荷载特征[J]. 公路交通科技, 2007, 24(4):1-6.
- MENG Yan, GUO Lin-quan, TAN Zhi-ming. Loading characteristics for trucks operating on highway [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(4):1-6. (in Chinese)

Research on application of cross tensioned concrete pavements
to heavy axle loading traffic

GUO Chao^{*1}, ZHANG Min-jiang¹, LU Zheng-ran^{1,2}, YU Bao-yang¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
2. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130117, China)

Abstract: To improve the poor anti-fatigue performance and easily cracking characteristics of plain cement concrete pavements, cross tensioned concrete pavements (CTCP) were proposed to suit the heavy axle loading traffic conditions, and their anti-fatigue mechanism was deeply analyzed combining with existing concrete fatigue location survey data. Furthermore, the step-by-step tensioning method of prestressed reinforcement was put forward according to the development process of concrete fatigue damage. Firstly, 24 h later after finishing concrete pouring, the prestressed reinforcement was tensioned to 30% of design axis force, which could decrease concrete initial cracks effectively. Then, while reaching the design age of concrete, the prestressed reinforcement was tensioned to the full design axis force, which could counteract the temperature load and part pavements tensile stress caused by heavy axle load, ensuring the concrete pavements in 3D compression state under normal working situation. Thus, the objective of increasing concrete anti-fatigue performance in the second stage was reached through preventing concrete cracks from arising and extending. Finally, a practical instance testifies that the CTCP are appropriate for heavy axle loading traffic.

Key words: heavy axle loading traffic; cross tensioned prestress; concrete fatigue; cement concrete pavements