

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.04.001

基于多板协同受力的前嫩公路水泥 混凝土路面应力有限元分析

高伟¹, 李秀凤², 崔巍¹

(1. 黑龙江省交通科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江职业学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:公路水泥混凝土路面板的侧面存在着三边约束、四边约束等多板协同受力情况,为此采用有接缝水泥混凝土路面三维有限元分析程序 EverFE 构建9块板的有限元验算模型,对前嫩(前锋农场—嫩江)公路嫩江支线一级公路水泥混凝土路面进行多板协同受力条件下的应力分析。结果表明:在多板协同受力时,面层板的最大弯拉应力与协同受力作用的强弱有关。当横缝设置传力杆后,板块之间的协同受力作用增强,横缝中部加载时,最大弯拉应力下降;纵向自由边中部加载时,最大弯拉应力有小幅度增长,验算条件下其增长幅度为1.3%以下。负温度梯度下,最大弯拉应力出现在面层板的表面,小于正温度梯度时的弯拉应力,同时其发生位置与正温度梯度情况不同,在加载板的荷载位置、面层板的中部都可能出现,且可能同时出现在多块板上;协同受力作用越强,其表现愈明显。板中加载时,协同受力强弱对面层板最大弯拉应力的影响较小。在零温度梯度情况下,基层刚度的下降将导致面层板最大弯拉应力的增大,此规律不受板块之间协同受力强弱的影响;非零温度梯度情况下,适当降低基层刚度对减小面层板的最大弯拉应力有利,且正、负温度梯度下的情况均相同。

关键词:道路工程;多板协同受力;有限元;水泥混凝土路面;应力分析

中图分类号:U416.216

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2019)04-0001-07

Finite Element Analysis on Stress in Cement Concrete Pavement of Qiannan Highway Based on Multi-slab Co-stress

GAO Wei¹, LI Xiu-feng², CUI Wei¹

(1. Heilongjiang Institute of Highway and Transport Research, Harbin Heilongjiang 150080, China;

2. Heilongjiang Polytechnic, Harbin Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Concerning the stress analysis for highway cement concrete pavements, various boundary conditions may apply, leading to multi-slab cooperative bearing scenarios involving 3-side constraint, 4-side constraint, etc. To accommodate these scenarios, a 9-panel FE checking model is established by utilizing 3D FE analysis program “EverFE” for stress analysing the cement concrete pavement on the Class-I branch of the Qianfeng Farm-Nenjiang Highway. The result shows that when multiple panels are co-working under stress, the maximum flexural stress in the pavement panel corresponds to the degree of co-working: (1) The addition of dowel bars in the traverse joints contributes to the degree of co-working, which in turn decreases the maximum flexural stress when the middle of the transverse joint is loaded. (2) For loads amid the longitudinal free edges, a minor increase of the maximum flexural stress is observed, which is below 1.3% under our calculation settings. (3) The maximum flexural stress appears on the surface of the pavement panel under a negative temperature gradient, at a level lower than that of a positive temperature gradient setting and

收稿日期: 2017-10-12

基金项目: 交通运输部科技项目(2009318774052)

作者简介: 高伟(1963-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授级高级工程师。(251688382@qq.com)

at different locations, which could be at either the loading position of the loaded panel, or in the middle of the pavement panel, and might also appear simultaneously on multiple panels. The stronger the co-working effect, the more obvious the phenomenon. (4) When loading at the middle of the panel, the influence of the degree of co-working on the maximum flexural stress in the pavement panel is rather minor. (5) In the case of zero temperature gradient, decrease the stiffness of the base layer will lead to increased level of maximum flexural stress in the pavement panel. This rule is not affected by the degree of co-working between the panels. (6) In the case of non-zero temperature gradient, a slightly decreased base stiffness will benefit the reducing of the maximum flexural stress in the pavement panel. This holds true for both positive or negative temperature gradients.

Key words: road engineering; multi-slab co-stress; finite element; cement concrete pavement; stress analysis

0 引言

水泥混凝土路面是公路路面的主要类型之一, 具有稳定耐久、承载能力强、夜间视线好、环保, 以及无车辙、推移或拥包病害等优点, 20 世纪 90 年代在我国得到了快速发展^[1]。但在黑龙江省以深季冻区为主的高纬度、低海拔环境条件下, 水泥混凝土路面较早地出现了纵横向开裂、断角、错台等病害, 同时平整度、舒适性衰减严重, 正常使用时间不足设计基准期的 50%。结构性病害长期存在, 给维修养护带来极大困难, 而且严重影响路面的使用功能和使用寿命, 已成为制约水泥混凝土路面在高等级公路上发展应用的技术难点^[2-3]。

目前国内连续配筋混凝土路面和预应力混凝土路面仍处在试验应用的过程中, 现阶段修筑的水泥混凝土路面以“有限尺寸板”的素混凝土路面(即“有接缝水泥混凝土路面”)最为普遍。对“有接缝水泥混凝土路面”的应力分析, 一般是以弹性地基上的小挠度薄板为模式, 路面结构一般被模型化为弹性地基板或弹性多层体系^[4-6]。由于建模的复杂性和验算工作量的限制, 对多板协同受力(板块间荷载传递状态下应力)的分析, 主要基于单板或者 4 板块的协同作用, 但实际路况下的水泥混凝土路面板存在着 4 边约束、3 边约束、2 边约束等不同的情况, 板块的温度翘曲和承受的车辆荷载, 将会通过接缝向相邻的板块施加力学作用, 对应的应力分析, 需要构建 6~9 块板的有限元分析模型^[7-8]。

国外 20 世纪 30 年代就开始了水泥混凝土路面多板协同受力的研究^[1]。1936 年 L. W. Teller 等人在 Arlington 试验路上通过测量应变和挠度等, 对板块之间的荷载传递进行评定。1966 年 B. E. Colley 等人测定了不同条件下百万次循环荷载作用后板块间

的荷载传递能力, 以评估水泥混凝土路面多板协同受力的耐久性。20 世纪 40 年代, 美国在马里兰州修筑了编号为 U. S. 301 的水泥混凝土路面试验段, 采用直径 19.05 mm 的传力杆连接路面板。1958—1960 年美国修筑的 AASHO 试验路是世界上第一个现代意义上的足尺试验路, 提出了著名的 AASHTO 路面结构设计指南, 对应的试验观测和理论研究表明, 在一般情况下, 水泥混凝土路面板长度超过 4.6~6.1 m 时须采用传力杆; 同时指出在重交通道路水泥混凝土路面上, 省略传力杆可能导致错误的后果。根据 AASHTO 提出的理念, 路面板之间的荷载传递(多板协同受力)对现时服务能力指数 (PSI) 的影响极为显著, 加强板块之间的荷载传递能力能够显著增加混凝土路面的使用寿命, 其效果甚至比单纯增加板厚更为经济有效。

在此依托黑龙江省“前嫩公路嫩江支线”一级公路水泥混凝土路面, 应用华盛顿大学和缅因州大学开发的“有接缝水泥混凝土路面 (JPCP) 三维有限元分析程序 EverFE”^[9-10], 对设置传力杆与拉杆的嫩江支线一级公路水泥混凝土路面进行多板协同受力情况下的应力验算分析。

1 有限元分析验算参数

1.1 依托工程概况

“前嫩公路嫩江支线”一级公路位于黑龙江省嫩江县东南部, 所在区域为平原微丘区, 属中温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 0.5℃, 多年极端最高气温 40.0℃, 多年极端最低气温 -47.3℃, 多年最大日降雨量 105.5 mm, 多年平均年降水量 479.3 mm, 最大冻深 2.52 m。

该段公路的路面设计型式为一级公路双向四车道水泥混凝土路面, 设计基准期内单车道标准轴载

累计作用次数为 $1\,514.72 \times 10^4$, 设计弯拉强度为 5.0 MPa; 采用矩形板块构造, 面层板块的横向分布形式为 (4.5+5.5+5.5+4.5) m, 板块长度 5.5 m。

路面结构为“水泥混凝土板 26 cm+6% 水泥稳定砂砾基层 20 cm+5% 水泥稳定砂砾底基层 20 cm+天然砂砾垫层 20 cm/(30 cm 中潮湿路段)”。

水泥混凝土路面的纵缝结构采用设置拉杆的平缝形式, 拉杆采用 $\phi 16$ mm 的螺纹钢筋, 长度 80 cm, 设置间距 60 cm; 横向缩缝采用设传力杆的预切假缝形式, 传力杆为直径 $\phi 32$ mm, $\phi 28$ mm 的光面圆钢, 其滑动端 30 cm 涂防锈漆后再涂沥青; 传力杆的长度为 50 cm, 间距 30, 40 cm。

1.2 有限元分析验算参数

1.2.1 荷载作用位置

依据《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40—2011 的规定, 以“100 kN 单轴-双轮组荷载”为设计轴载, 取路面右半幅 9 块板为应力验算分析对象, 荷载作用位置包括横向缩缝中部、自由边纵向边缘中部。加载位置及板块编号如图 1 所示。

1.2.2 板块接缝形式

水泥混凝土路面板的接缝包括纵缝、横缝。根据路面设计结构, 纵缝为设拉杆的平缝, 横缝分为“无传力杆预切缩缝”和“有传力杆预切缩缝”两种 (如图 2 所示)。

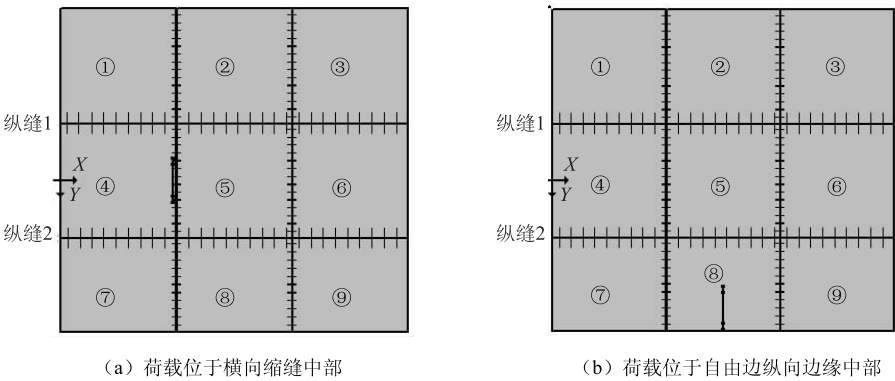


图 1 “单轴-双轮组荷载”加载位置与板块编号
Fig. 1 “Single-axle double-wheel load” loading position and slab number

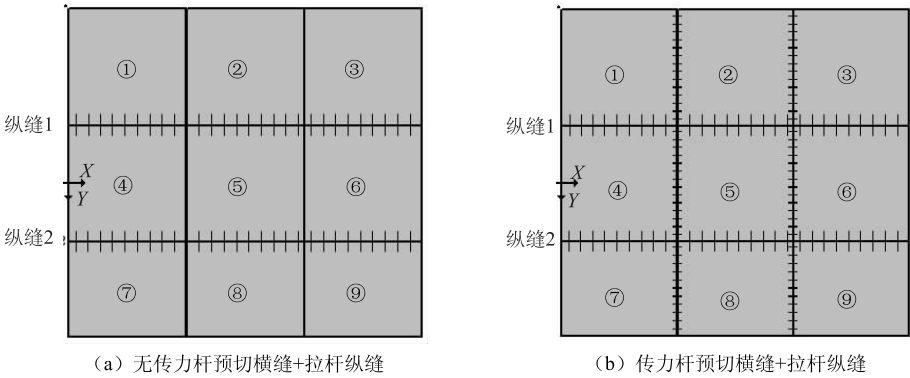


图 2 路面接缝形式
Fig. 2 Pavement joint forms

1.2.3 验算参数

根据嫩江支线一级公路水泥混凝土路面的结构

与材料组成, 路面应力有限元分析的主要参数如表 1 所示。

表 1 水泥混凝土路面验算参数

Tab. 1 Cement concrete pavement checking calculation parameters

混凝土材料参数		面层板尺寸/cm			基层		底基层			地基反应		缩缝宽度/ mm
弯拉模量/ MPa	泊松比	横向宽度	纵向长度	厚度	厚度/cm	泊松比	回弹模量/ MPa	厚度/cm	泊松比	回弹模量/ MPa	模量/ (MPa·mm ⁻¹)	
31 000	0.15	450/550	550	26	20	0.25	1 300	20	0.25	1 200	0.028/0.017	2.0

1.2.4 接缝杆件组合

由于采用9块板的有限元分析模型，板块间的协同受力受纵缝拉杆和横缝传力杆的影响较大^[11-15]。接缝杆件的组合及对应编号如表2所示。

1.2.5 水泥混凝土面层的最大温度梯度

路面温度梯度的现场测试采用 QQL 系列便携式智能巡回检测仪，基本误差小于 $\pm 0.2\% F \cdot S$ ，与 pt100 型铂电阻传感器配合。在昼夜温差较大的 5 月中旬，每 30 min 读取路表面和板底预埋 pt100 传感器的温度，测试结果如表 3 所示。

表 2 接缝杆件组合

Tab. 2 Combination of joint members

编号	路面板尺寸 (长×宽)	横缝传力杆			纵缝拉杆		
		直径/ mm	长度/ mm	间距/ mm	直径/ mm	长度/ mm	间距/ mm
1	①~⑥号板: 5.5 m×5.5 m ⑦~⑨号板: 5.5 m×4.5 m	—					
2		32		300			
3		32		400			
4		28	500	300	16	800	600
5		28		400			
6		25		300			
7		25		400			

表 3 水泥混凝土路面板的温度梯度测试结果

Tab.3 Test result of temperature gradients of cement concrete pavement slabs

读数时间	传感器编号										温度梯度/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)
	路面板底面/ $^{\circ}\text{C}$					路面板表面/ $^{\circ}\text{C}$					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
12:30	19.2	19.8	17.6	18.7	18.9	19.2	39.4	39.8	39.8	39.9	80.1
13:00	19.4	19.6	17.7	19.0	19.6	19.5	40.4	40.6	40.2	40.1	81.7
13:30	19.9	19.9	18.0	19.5	19.4	20.0	39.9	40.5	39.9	40.6	79.9
14:00	20.3	20.0	18.3	19.6	18.8	20.7	39.7	40.6	39.7	40.4	78.8
14:30	20.8	21.1	18.8	20.0	20.0	21.1	35.4	35.6	36.1	35.9	59.4
15:20	21.5	21.7	19.5	20.6	20.7	22.0	34.1	34.1	35.0	34.6	51.7

根据《公路水泥混凝土路面设计规范》和路线所处自然区划（I₂区），参考现场温度梯度测试结果，该段公路水泥混凝土面层最大温度梯度取 85 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，包括正温度梯度和负温度梯度。多板协同受力情况下，对应的路面温度翘曲变形如图 3 所示。

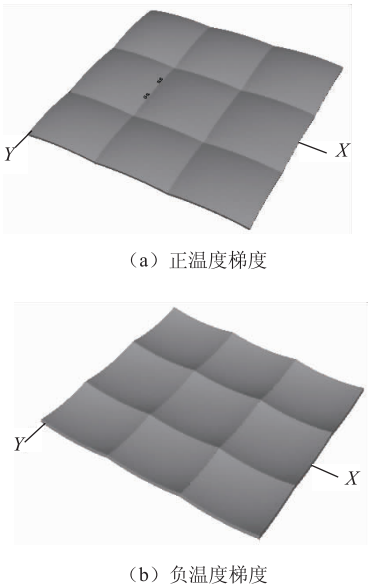


图 3 水泥混凝土路面板温度翘曲变形示意图
Fig. 3 Schematic diagrams of temperature warping deformations of cement concrete pavement slabs

2 路面应力有限元分析

2.1 最大温度梯度下的路面应力

对应以上验算参数，采用三维有限元分析程序 EverFE 对“前嫩公路嫩江支线”一级公路水泥混凝土路面进行有限元应力验算。表 4 为横缝边缘中部加载时的路面弯拉应力有限元验算结果，表 5 为自由边纵向边缘中部加载时的路面弯拉应力有限元验算结果。

根据有限元应力验算结果，横缝设置传力杆后，由于板块之间的协同受力作用增强，横缝边缘中部加载时面层板的最大弯拉应力下降；自由边纵向边缘中部加载情况下，面层板的最大弯拉应力有一定增长，增加幅度在 1.3% 以内。

我国的《公路水泥混凝土路面设计规范》、美国波特兰水泥协会（PCA）、日本建设技术协会等，对水泥混凝土路面传力杆规格尺寸和布设间距的要求不尽相同。根据表 4、表 5，当传力杆的直径和其他条件不变，传力杆的间距由 30 cm 增加到 40 cm，横缝边缘中部加载时的最大荷载应力无明显变化；自由边纵向边缘中部加载情况下，面层板的最大弯拉应力稍有降低。

当传力杆直径减小，由 32 mm 减至 28 mm，

25 mm 时, 板块之间的协同受力效应相应减弱。横加, 但变化量较小; 自由边纵向边缘中部加载情况缝边缘中部加载时, 面层板的最大弯拉应力稍有增下, 面层板的最大弯拉应力稍有降低。

表 4 横缝边缘中部加载时的路面弯拉应力

Tab. 4 Flexural tensile stresses of pavement when loading on middle of transverse joint edge	
加载位置	④号板块, 横缝边缘中部
温度梯度/(℃·m ⁻¹)	+ 85-85
地基反应模量/ (MPa·mm ⁻¹)	0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.028
最大弯拉应力 (MPa)/所在板块	3.26/ 3.21/ 3.14/ 2.62/ 3.14/ 3.14/ 2.99/ 3.14/ 2.99/ 3.14/ 2.99/ 3.14/ 2.99/ 3.14/ 2.99/ 2.28/ 2.09/ 2.39/ 2.36/ 2.35/ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ⑤ ⑤ ⑤
最小弯拉应力 (MPa)/所在 板块	-3.32/-3.25/-3.18/-3.01/-3.17/-3.17/-3.00/-3.18/-3.00/-3.18/-3.00/-3.18/-2.99/-2.28/-2.09/-2.39/-2.36/ -2.35/ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ④ ⑤ ⑤ ⑤
接缝杆件组合	1 1 2 2 3 4 4 5 5 6 6 7 7 1 1 2 3 4

表 5 自由边纵向边缘中部加载时的路面弯拉应力

Tab. 5 Flexural tensile stresses of pavement when loading on middle of longitudinal free edge	
加载位置	⑧号板块, 自由边纵向边缘中部
温度梯度/(℃·m ⁻¹)	+ 85-85
地基反应模量/ (MPa·mm ⁻¹)	0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.017 0.028 0.028
最大弯拉应力 (MPa)/所在板块	4.73 4.58 4.77 4.64 4.76 4.76 4.64 4.75 4.61 4.75 4.61 4.75 4.60 1.86/ 1.69/ 1.92/ 1.88/ 1.87 /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ ④,⑥ ④,⑥ ⑤ ⑤ /⑤
最小弯拉应力 (MPa)/所在板块	-4.90 -4.65 -4.93 -4.70 -4.92 -4.92 -4.70 -4.92 -4.67 -4.92 -4.67 -4.91 -4.67 -1.86/-1.69/-1.92 -1.88 -1.87 /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ /⑧ ④,⑥ ④,⑥ /⑤ /⑤ /⑤
接缝杆件组合	1 1 2 2 3 4 4 5 5 6 6 7 7 1 1 2 3 4

与正温度梯度相比较, 在负温度梯度情况下, 面层板的最大弯拉应力发生在水泥混凝土面层板的表面, 但小于正温度梯度情况下的最大弯拉应力。另外, 负温度梯度下面层板的最大弯拉应力出现位置与正温度梯度时的情况不完全相同, 即不完全发生在车轮荷载作用板块的加载位置, 也会出现在面层板的中部范围, 而且此时的最大弯拉应力还有可

能同时出现在多块面层板上(图 4)。这种迹象与板块之间协同受力作用的强弱有关, 协同受力作用越强, 表现就越明显。为此, 对应负温度梯度情况, 将标准轴载作用位置调整为板中, 对 1 和 5 接缝杆件组合情况下的面层板弯拉应力进行验算。对应的验算结果如表 6 所示。

表 6 板中加载情况下的面层板弯拉应力

Tab. 6 Flexural tensile stresses of surface layer when loading on middle of slab	
接缝杆件组合	最大弯拉应力/MPa最小弯拉应力/MPa
	④⑤⑥⑦⑧⑨④⑤⑥⑦⑧⑨
1	1.84 1.89 1.88 1.64 1.63 1.64 -1.87 -1.89 -1.88 -1.64 -1.63 -1.64 (1.97) (1.88) (1.88) (1.32) (1.65) (1.64) (-1.97) (-1.88) (-1.88) (-1.31) (-1.65) (-1.64)
5	1.84 1.90 1.88 1.67 1.71 1.67 -1.87 -1.90 -1.88 -1.67 -1.71 -1.67 (1.97) (1.90) (1.88) (1.32) (1.75) (1.66) (-1.97) (-1.90) (-1.88) (-1.30) (-1.75) (-1.66)

注: 温度梯度: -85℃/m; 加载位置: ④号板中部(括号内为⑦号板中部); 地基反应模量 0.028 MPa/mm

由表 6 可知, 在负温度梯度下, 板中加载时面层板的最大弯拉应力小于横缝边缘中部、自由边纵向边缘中部加载的最大弯拉应力。对于不同的接缝杆件组合(1、5), 内侧车道(④号板加载)和外

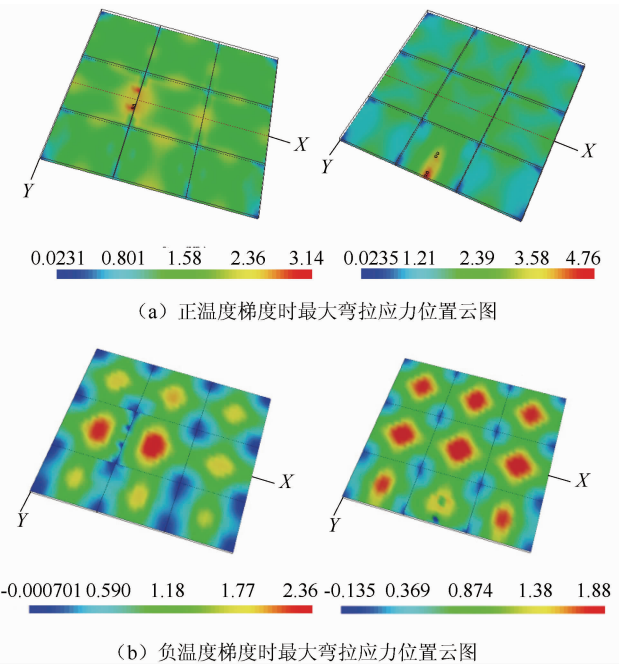


图 4 最大弯拉应力发生位置云图（单位：MPa）

Fig. 4 Nephograms of positions of maximum flexural tensile stresses (unit: MPa)

侧车道（⑦号板加载）的最大应力没有显著差别，说明在板中加载时，多板协同受力作用的强弱，对面层板最大弯拉应力的影响较小。

2.2 零温度梯度下的路面应力

无论沥青混合料路面还是水泥混凝土路面，基础强度的不同都会导致面层最大弯拉应力的改变^[16-19]。由表 4、表 5 可知，适当降低基层刚度能够减小面层板的最大弯拉应力，而且正、负温度梯度情况下均呈现相同的趋势，这一验算结果有别于沥青路面，而且不同于目前对于路面荷载应力影响因素的一般认知。综合分析，初步判断这一现象与温度梯度导致的面层板翘曲变形有关。为此，将温度梯度设置为零进行弯拉应力验算，验算结果如表 7 所示。

表 7 零温度梯度下的路面弯拉应力验算结果

Tab. 7 Checking calculation result of flexural tensile stresses of pavement under zero temperature gradient

接缝杆件组合	荷载位置	地基反应 模量/ (MPa·mm ⁻¹)	最大弯拉应力/MPa						
			板块编号						
			④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
1	横缝边缘	0.028	1.11	0.39	0.01	0.10	0.12	0.01	
1	中部/	0.017	1.18	0.45	0.01	0.12	0.15	0.01	
2	④号板	0.028	0.98	0.44	0.01	0.10	0.12	0.01	
2		0.017	1.04	0.52	0.01	0.12	0.15	0.01	
	自由边纵向	0.028	0.01	0.05	0.01	0.12	1.87	0.12	
2	边缘中部/	0.017	0.02	0.08	0.02	0.19	2.05	0.18	
	⑧号板								

由表 7 可知，在零温度梯度条件下，基层刚度的降低会导致面层板最大弯拉应力的增大，而且此规律不受板块协同受力强弱的影响。其原因在于零温度梯度情况下，水泥混凝土面层板是一块平板，而其他的温度梯度均会使面层板发生翘曲变形，导致面层板与基层接触状态的改变。相对高刚度基层，较低的基层刚度可以在一定程度上适应面层板的翘曲变形，对缓解荷载应力相对有利。

在实际环境中，水泥混凝土路面的非零温度梯度属于常态，零温度梯度可以认为是实际路域环境条件下产生的一种特殊情况。基于这一特点，对半刚性基层的使用以及水泥稳定粒料基层中的水泥掺量，尚有进一步探讨的必要。由此而言，柔性基层、在面层板和基层之间设置一定厚度的沥青混合料中间层，对防止基层冲刷与板底脱空、缓冲，以及减小面层板的弯拉应力有利。

3 结论

根据以上多板协同受力条件下的水泥混凝土路面有限元应力分析，对比不同加载位置、不同接缝状态时，面层板最大应力出现的位置、变化趋势，结论如下。

（1）水泥混凝土面层板的最大弯拉应力与多板协同受力作用的强弱有关。

（2）横缝设置传力杆后，板块之间的协同受力作用增强。横缝中部加载时，最大弯拉应力下降；纵向自由边中部加载时，最大弯拉应力有小幅增长，验算条件下其增长幅度约 1.3% 以下。

（3）传力杆由 $\phi 32$ mm 改为 $\phi 28$ mm， $\phi 25$ mm 时，协同受力效应依次减弱。横缝中部加载时，最大弯拉应力稍有增加；纵向自由边中部加载时，最大弯拉应力稍有降低。

（4）负温度梯度下的最大弯拉应力位于面层板的表面，小于正温度梯度的最大弯拉应力。同时其位置与正温度梯度时不尽相同，在加载位置、面层板的中部都可能出现，且可能同时出现在多块面层板上；协同受力作用越强，其表现愈明显。

（5）板中加载时，多板协同受力作用强弱对面层板最大弯拉应力的影响较小。

（6）零温度梯度条件下，基层刚度的下降会导致面层板最大弯拉应力的增大，此规律不受多板协同受力强弱的影响。

（7）非零温度梯度条件下，基层刚度的适当下降能减小面层板的最大弯拉应力，而且正、负温度梯度均相同。

参考文献:

References:

- [1] 邓学钧,陈荣生. 刚性路面设计 [M]. 北京:人民交通出版社,2005.
DENG Xue-jun, CHEN Rong-sheng. Rigid Pavement Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 孟维平. 哈大高速公路水泥混凝土路面纵向开裂研究 [D]. 西安:长安大学,2012.
MENG Wei-ping. Study on Longitude Crack of Cement Concrete Pavements in Harbin-daqing Expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [3] 高伟. 黑龙江省公路水泥混凝土路面疲劳开裂形态分析 [J]. 公路,2010 (6): 128-131.
GAO Wei. Analyse of Fatigue Crack Shape of Cement Concrete Pavement of Highway in Heilongjiang Province [J]. Highway, 2010 (6): 128-131.
- [4] 董城,郑祖恩,李志勇,等. 基于路基路面协调变形的水泥混凝土路面设计研究 [J]. 公路工程,2012,37 (5): 130-134.
DONG Cheng, ZHENG Zu-en, LI Zhi-yong, et al. Study on Cement Concrete Pavement Design Based on the Coordinate Deformation [J]. Highway Engineering, 2012, 37 (5): 130-134.
- [5] 王汉杰,郭红兵. 小板块水泥混凝土路面荷载应力有限元分析 [J]. 西安文理学院学报:自然科学版,2012,15 (3): 1-5.
WANG Han-jie, GUO Hong-bing. Finite Element Analysis of Vehicles-load Stress for Small Slab Cement Concrete Pavement [J]. Journal of Xi'an University of Arts & Science: Natural Science Edition, 2012, 15 (3): 1-5.
- [6] 李思李,田波,牛开民. 水泥混凝土路面临界荷位研究 [J]. 公路交通科技,2012,29 (7): 1-8.
LI Si-li, TIAN Bo, NIU Kai-min. Research on Critical Loading Position of Cement Concrete Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (7): 1-8.
- [7] 杨斌. 接缝具有传荷能力的混凝土路面有限元分析方法 [J]. 公路交通科技,2002,19 (5): 1-4.
YANG Bin. The Finite Element Analytical Method of Concrete Pavement with Load Transfer Efficiency at Joints [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19 (5): 1-4.
- [8] 王磊. 水泥混凝土路面应力分析模型 [J]. 山西建筑,2013,39 (7): 160-162.
WANG Lei. On Model for Stress Analysis of Cement-concrete Roadbed [J]. Shanxi Architecture, 2013, 39 (7): 160-162.
- [9] DAVIDS B. EverFE Theory Manual [R]. Orono: University of Maine, 2003.
- [10] DAVIDS W, WANG Z, TURKIYYAH G, et al. Three-dimensional Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2.2 [J]. Transportation Research Record, 2003, 1853: 92-99.
- [11] 杨三强,武文秀,刘娜,等. 特重荷载下水泥混凝土路面承载能力有限元仿真分析 [J]. 河北大学学报:自然科学版,2017,37 (6): 561-566.
YANG San-qiang, WU Wen-xiu, LIU Na, et al. Ansys Simulation Analysis of Cement Concrete Pavement Bearing Capacity under Extra Heavy Load [J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2017, 37 (6): 561-566.
- [12] 蔡燕霞,臧芝树,付欣. 设置层间功能层的刚性基层水泥混凝土路面动态响应灰关联分析 [J]. 公路交通科技,2012,29 (11): 35-39.
CAI Yan-xia, ZANG Zhi-shu, FU Xin. Grey Incidence Analysis of Dynamic Response of Cement Concrete Pavement Based on Rigid Base with Function Layer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (11): 35-39.
- [13] 王旭. 承受特重矿用车辆作用的水泥混凝土路面应力分析 [J]. 北方交通,2017 (3): 114-118.
WANG Xu. Stress Analysis of Cement Concrete Pavement with Heavy Mine Vehicle [J]. Northern Communications, 2017 (3): 114-118.
- [14] 姚尧,谈至明,朱唐亮,等. 水泥混凝土路面传力杆应力分析力学模型 [J]. 同济大学学报:自然科学版,2018,46 (2): 195-200.
YAO Yao, TAN Zhi-ming, ZHU Tang-liang, et al. Mechanics Analysis Model of Dowel Bar in Concrete Pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2018, 46 (2): 195-200.
- [15] 彭鹏,田波,权磊,等. 传力杆位置探测与传荷能力影响分析 [J]. 公路交通科技,2015,32 (8): 39-44.
PENG Peng, TIAN Bo, QUAN Lei, et al. Dowel Bar Position Detection and Effect on Load Transfer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (8): 39-44.
- [16] 张云龙,刘寒冰. 连续配筋混凝土路面温度应力的有限元分析 [J]. 公路交通科技,2011,28 (1): 1-6,24.
ZHANG Yun-long, LIU Han-bing. Finite Element Analysis of Thermal Stress for Continuously Reinforced Concrete Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (1): 1-6,24.

(下转第14页)

- 2011, 23 (5): 542–553.
- [7] 张迪, 方琳, 王建伟. 养生期乳化沥青冷再生混合料强度及疲劳损伤特性 [J]. 公路工程, 2016, 41 (1): 236–241.
ZHANG Di, FANG Lin, WANG Jian-wei. Characteristics of Strength and Fatigue Damage for Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Highway Engineering, 2016, 41 (1): 236–241.
- [8] 吴超凡, 曾梦澜, 钟梦武, 等. 乳化沥青冷再生混合料设计方法试验研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35 (8): 19–23.
WU Chao-fan, ZENG Meng-lan, ZHONG Meng-wu, et al. Experimental Study of the Design Method for Cold Recycled Mixture Using Asphalt Emulsion [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2008, 35 (8): 19–23.
- [9] 魏唐中, 洪锦祥, 林俊涛. 水泥与乳化沥青对冷再生强度的影响及作用机理 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (2): 310–315.
WEI Tang-zhong, HONG Jin-xiang, LIN Jun-tao. Effect and Action Mechanism of Cement and Emulsified Asphalt on the Strength of Cold Regeneration [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20 (2): 310–315.
- [10] 王之怡, 郝培文, 柳浩. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (2): 28–32.
WANG Zhi-yi, HAO Pei-wen, LIU Hao. Study on Fatigue Performance of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (2): 28–32.
- [11] MA T, WANG H, ZHAO Y. Laboratory Investigation on Residual Strength of Reclaimed Asphalt Mixture for Cold Mix Recycling [J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2015, 8 (1): 17–22.
- [12] ZHAO Y, NI F, ZHOU L, et al. Three-dimensional Fracture Simulation of Cold In-place Recycling Mixture Using Cohesive Zone Model [J]. Construction & Building Materials, 2016, 120: 19–28.
- [13] JTG F41—2008, 公路沥青路面再生技术规范 [S].
JTG F41—2008, Technical Specifications for Highway Asphalt Pavement Recycling [S].
- [14] 耿九光, 陈忠达, 李龙. 水泥-乳化沥青冷再生混合料配合比设计 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29 (1): 10–14.
GENG Jiu-guang, CHEN Zhong-da, LI Long. Mixing Design of Cement-emulsified-asphalt-cold-recycle Mixture (CEACRM) [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29 (1): 10–14.
- [15] LIN J, WEI T, HONG J. Research on Development Mechanism of Early-stage Strength for Cold Recycled Asphalt Mixture Using Emulsion Asphalt [J]. Construction & Building Materials, 2015, 99: 137–142.
- [16] 王宏, 刘锋, 余建荣, 等. 乳化沥青冷再生混合料养生方式研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2015 (3): 641–646.
WANG Hong, LIU Feng, YU Jian-rong, et al. Research on Curing Methods of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2015 (3): 641–646.
- [17] 高磊, 倪富健, 罗海龙, 等. 乳化沥青冷再生混合料的透水性及空隙特征 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2015, 45 (3): 581–585.
GAO Lei, NI Fu-jian, LUO Hai-long, et al. Permeability and Air Voids of Cold Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2015, 45 (3): 581–585.
- [18] GRAZIANI A, GODENZONI C, CARDONE F, et al. Effect of Curing on the Physical and Mechanical Properties of Cold-recycled Bituminous Mixtures [J]. Materials & Design, 2016, 95: 358–369.

(上接第7页)

- [17] 谈至明, 姚祖康, 田波. 水泥混凝土路面的荷载应力分析 [J]. 公路, 2002 (8): 15–18.
TAN Zhi-ming, YAO Zu-kang, TIAN Bo. Analysis of Loading Stresses in Cement Concrete Pavements [J]. Highway, 2002 (8): 15–18.
- [18] 李金凤, 田波, 牛开民. 基层开裂状态下水泥混凝土路面结构应力试验分析 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (9): 19–23.
LI Jin-feng, TIAN Bo, NIU Kai-min. Experimental Analysis of Stress of Cement Concrete Pavement with Base Cracking [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (9): 19–23.
- [19] 梁旭, 于伟. 刚性路面柔性联接层有限元分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33 (3): 1–6.
LIANG Xu, YU Wei. Finite Element Analysis of Rigid Pavement Flexible Context Layer [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33 (3): 1–6.