

装配式水泥混凝土路面板荷载应力分析与接缝优化

田志昌,孟亚楠*,韩育民,杭美艳

内蒙古科技大学建筑与土木工程学院, 内蒙古 包头 014010

摘要: 本文采用数值分析方法, 分析了水泥路面板内荷载应力与板块尺寸关系, 探讨了企口缝尺寸对板内拉应力、剪应力分布以及接缝处弯沉传递效果的影响。结果表明: 板块尺寸对板内 X、Y 向最大拉应力值影响显著, 同方向最大拉应力可达最小值的 3.5~5 倍; 不同尺寸企口缝的路面板传荷能力差异明显, 并提出相关优化方案。

关键词: 装配式水泥混凝土路面; 荷载; 应力分析; 优化方案

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)05-0753-07

Analysis on Load Stress of Fabricated Cement Concrete Pavement Slabs and Joint Optimization

TIAN Zhi-chang, MENG Ya-nan*, HAN Yu-min, HANG Mei-yan

College of Architecture and Civil Engineering/Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

Abstract: Numerical analysis was adopted to analyze the relationship between pavement slab internal stress and sizes and explore the influence of the sizes of tongue-and-groove joint on pavement slab internal tensile stress and shear stress distribution and deflection transfer effect on joints. The results showed that pavement slab size had a significant influence on the maximum tensile stress of X-direction and Y-direction in the slab, the maximum value was 3.5 to 5 times than the minimum value at the same direction. There was a significant difference in the load transfer ability among pavement slabs with different sizes at tongue-and-groove joints. Therefore optimization objects were proposed.

Keywords: Fabricated cement concrete pavement; load; stress analysis; optimization object

装配式水泥混凝土路面是水泥混凝土路面的一种形式, 其是将预制好的小型水泥混凝土面板装配在已修成的基层上的路面^[1]。装配式水泥混凝土路面除具有水泥混凝土路面的强度高、稳定性好、耐久性好、养护费用少等优点外^[2], 还具有可实现快速通车, 多次循环利用, 实现节约材料、降低造价的特点, 是解决水泥混凝土路面快速维修的重要方法之一^[3-8]。德国、美国、日本、印度等对装配式水泥混凝土路面的研究与应用较多^[9-11], 相比之下, 我国该项研究较少。随着社会节能意识的提高, 尤其是我国公路养护期的到来, 对装配式水泥混凝土路面的研究与优化的意义变得更加重大。

1 模型参数

本文采用 FLAC3D 对路面板在荷载作用下板块内的应力和弯沉进行数值模分析。研究中统一采用较常见的 20 cm 等厚水泥混凝土路面板, 进行荷载应力分析和接缝优化时对基层、压实地基分别建立不同尺寸的模型, 各结构层具体材料和参数见表 1。由于汽车荷载作用下, 路面板内应力较小, 研究时将路面板、基层材料及压实地基看作弹性材料^[12]。

表 1 路面各结构层材料参数
Table 1 Material parameters of each pavement structure

结构层 Structural sections	材料 Materials	材料参数 Parameters	
		弹性模量 E (MPa) Elasticity modulus	泊松比 μ Poisson's ratio
面层	混凝土	30 000	0.15
基层	级配碎石	300	0.2
压实地基		50	0.3

根据现行路面设计规范中标准轴载 BZZ-100 的规定, 取轮胎接触压力 $P=0.7$ MPa 作为汽车荷载。车轮荷载简化为当量的圆形均布荷载, 近似取当量圆当量直径为 30 cm。由于接缝的存在, 路面结构的整体性遭到破坏, 特别是当荷载作用在接缝边缘时, 路面板和地基都将产生较大的应力集中, 因而在实际使用中, 绝大多数的水泥混凝土路面的破坏都从接缝附近开始发生^[11]。因此, 选择装配

收稿日期: 2016-01-16

修回日期: 2016-01-28

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2013MS0731)

作者简介: 田志昌(1961-),男,博士,教授,主要研究方向为土木工程有限元计算与有限元软件开发. E-mail:tianzhch@sina.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail:1244802529@qq.com

式水泥混凝土路面板的临界荷位处（接缝边缘中部）进行加载分析，并使得荷载当量圆与接缝相切。

2 不同尺寸板块荷载应力模拟结果与分析

国内外的研究资料表明，不同尺寸的水泥混凝土路面板在荷载作用下，其力学表现并不相同，板内的荷载应力存在着差异。

2.1 研究方案

鉴于不同工程要求，共设计 5 种常用尺寸：1.5 m×1.5 m、2 m×2 m、2.5 m×2.5 m、3 m×3 m、3.5 m×3.5 m 板块模型。碎石基层简化为 X、Y、Z 向分别为 8 m、8 m、0.3 m 的长方体模型，压实地基简化为 X、Y、Z 向分别为 8 m、8 m、1.7 m 的长方体模型。采用单板模型加载，加载方案如第 2 章所述，具体模型和坐标设置如图 1 所示。

2.2 最大 X 向拉应力模拟结果分析

1.5 m×1.5 m 的模型板底的最大 X 向拉应力云图如图 2 所示。将求解得到的板内最大 X 向拉应力结果汇总，如表 2 所示。板块尺寸与板内最大 X 向拉应力的相关性，如图 3 所示。当板块边长为 1.5 m 时，板内最大 X 向拉应力最大。当板块边长为 3.5 m 时，板内最大 X 向拉应力最小。上述两块板块的板内最大 X 拉应力差距较明显，后者应力值仅为前者应力值的 20.29%，可见边长变化对板内最大 X 向应力值的影响较明显。

由表 2，可发现最大 X 向拉应力出现的位置相对较为固定。最大 X 向拉应力的 X 坐标皆距离被加载侧板边 1/10 的板块边长；Y 坐标都在板块边长的中间；Z 坐标都是-0.167 m，即距板块表面 1/6 的板块厚度处。

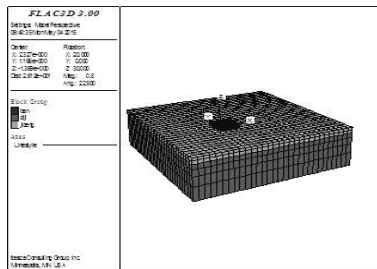


图 1 1.5 m×1.5 m 面板、基层、地基模型及坐标
Fig.1 The model and coordinate of 1.5 m×1.5 m panel, base, foundation

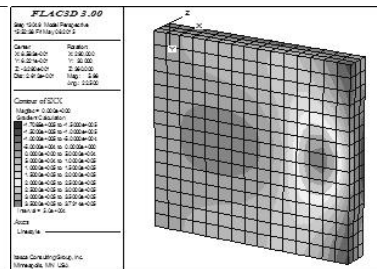


图 2 1.5 m×1.5 m 模型板底最大 X 向拉应力云图
Fig.2 Nephogram of the maximum X-direction tensile stress of the bottom of 1.5 m×1.5 m model slab

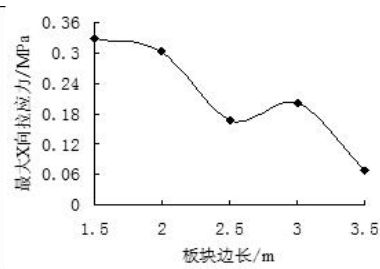


图 3 板块边长与板内最大 X 向拉应力关系图
Fig.3 The relationship between length and the maximum X-direction tensile stress in slabs

表 2 各个尺寸板块的最大 X 向应力值及坐标表

Table 2 Maximum X stress value and coordinate of each size slab

板块尺寸 Sizes	1.5 m×1.5 m	2.0 m×2.0 m	2.5 m×2.5 m	3.0 m×3.0 m	3.5 m×3.5 m
最大 X 向应力值(MPa)	0.329 7	0.301 8	0.167 7	0.200 6	0.066 9
X 坐标(m)	1.350	1.800	2.250	2.700	3.150
Y 坐标(m)	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750
Z 坐标(m)	-0.167	-0.167	-0.167	-0.167	-0.167

2.3 最大 Y 向拉应力模拟结果分析

1.5 m×1.5 m 的模型板底的最大 Y 向拉应力云图如图 4 所示。不同尺寸板块的最大 Y 向拉应力结果如表 3 所示。不同尺寸板块间的最大 Y 向拉应力差异较大，其中最大值是边长为 1.5 m 的板块的最大 Y 向拉应力，而最小值是边长为 3.5 m 的板块的最大 Y 向拉应力，且最小值仅为最大值的 28.22%，如图 5 所示。

由表 3，不同尺寸板块的最大 Y 向拉应力的出现位置相对固定。最大 Y 向拉应力的 X 坐标皆距离被加载侧板边 1/30 的板块边长；Y 坐标都在板块边长的中间位置；Z 坐标都是-0.167 m，即距离板块表面 1/6 的板块厚度处。

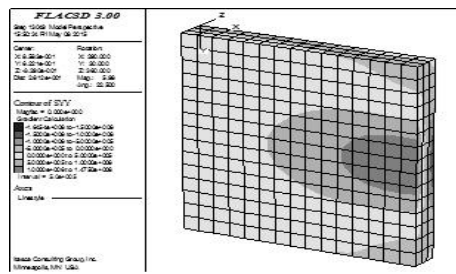


图 4 1.5 m×1.5 m 模型板底最大 Y 向拉应力云图
Fig.4 Nephogram of the maximum Y-direction tensile stress of the bottom of 1.5 m×1.5 m model slab

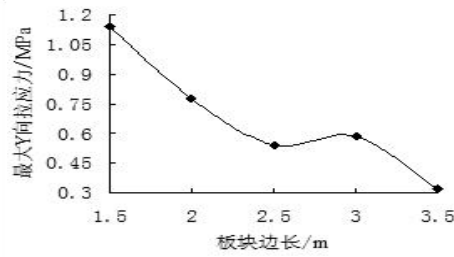


图 5 板块边长与板内最大 Y 向拉应力关系图
Fig.5 The relationship between length and the maximum Y-direction tensile stress in slabs

表 3 各个尺寸板块的最大 Y 向应力值及坐标表

Table 3 Maximum Y stress value and coordinate of each size slab

板块尺寸 Sizes	1.5 m×1.5 m	2.0 m×2.0 m	2.5 m×2.5 m	3.0 m×3.0 m	3.5 m×3.5 m
最大 Y 向应力值 (MPa)	1.141 7	0.778 1	0.541 2	0.583 8	0.322 2
X 坐标(m)	1.450	1.933	2.417	2.900	3.383
Y 坐标(m)	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750
Z 坐标(m)	-0.167	-0.167	-0.167	-0.167	-0.167

综上，边长为 3.5 m 的路面板块的两个方向最大拉应力均为 5 种尺寸板块中最小。荷载最大应力集中出现位置可指导板块配筋，如对最大 X 向拉应力出现位置处的 X 向钢筋进行强度提高或者加密，Y 向亦如此。

3 接缝优化模拟结果与分析

提高和保持接缝传荷能力，是减少混凝土路面病害及提高其整体承载能力的关键^[13]。采用企口搭接法可有效提高接缝传荷能力^[14]，目前普遍采用的企口缝形式主要有圆弧形和梯形两种。由于梯形企口缝两板之间的咬合程度比圆弧形企口缝好，且调查发现实际工程中梯形企口缝应用更广泛，所以本文拟采用梯形企口缝作为接缝。在荷载作用下，不同尺寸企口缝的板块内应力分布、接缝中心处的弯沉必然不同，本文将进行企口缝尺寸最优方案研究。

3.1 研究方案

本文简称带有梯形榫头的路面板为凸板，带有梯形榫槽的路面板简称为凹板。研究按实际工程中企口缝常用尺寸，共设计了九种不同尺寸的企口缝，企口缝尺寸图示如图 6，企口缝尺寸与编号见表 4。采用单因素法分析榫头长度 b 和榫头坡度 i 分别对接缝传荷能力和板内应力的影响。接缝优化分析时，碎石基层简化为 X、Y、Z 向分别为 4 m、3 m、0.3 m 的长方体模型，压实地基简化为 X、Y、Z 向分别为 4 m、3 m、1 m 的长方体模型，建立的是 1 m×1 m×0.2 m 且带有榫头或榫槽的装配式水泥混凝土板模型，具体模型和坐标设置如图 7 所示。加载方案与第 2 章一致。为进行较为全面的对照研究，按被加载板块的不同和单双板模型，分别进行了四种不同方式的加载，分别为双板模型凹板侧加载、双板模型凸板侧加载、单板模型凹板加载、单板模型凸板加载。双板模型图示如图 7 (a) 所示。

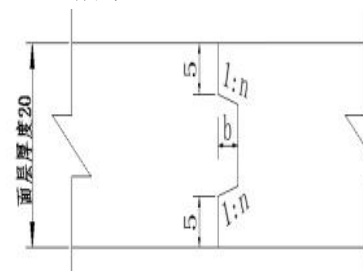
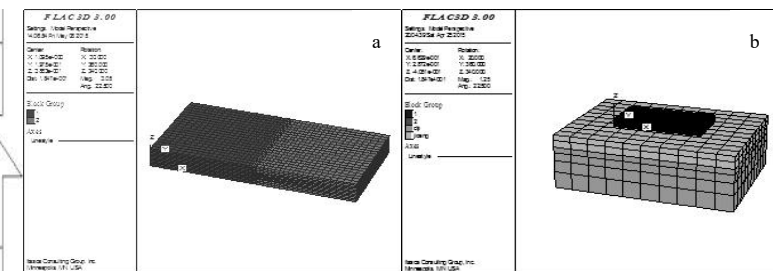


图 6 企口缝尺寸图(单位:cm)
Fig.6 The sizes of tongue and groove joint (Unit:cm)



(a) 双板模型及坐标轴图示 (b) 面层、基层、压实地基三者模型及坐标轴图示

图 7 模型及坐标轴设置图示
Fig.7 Schematic diagram of model and coordinate axes

表 4 不同尺寸企口缝的模型编号表

Table 4 Model numbers for tongue and groove joints of different sizes

模型编号 No.	榫头坡度 <i>i</i> Tenon slope	榫头长度 <i>b</i> (cm) Tenon length
I	1:2	2
II	1:3	2
III	1:4	1
IV	1:4	2
V	1:4	3
VI	1:4	4
VII	1:4	5
VIII	1:5	2
IX	1:6	2

3.2 拉应力数值模拟结果分析

水泥混凝土抗拉强度比抗压强度小是导致路面裂缝类和接缝类病害的重要原因, 本文针对拉应力对接缝的数值模拟结果进行了分析。采用企口缝的双板模型加载产生的拉应力一般都比不采用企口缝的单板模型加载产生的拉应力小 0.9 MPa 左右, 板块是否设置企口缝进行连接的两种状态下对应的最大主拉应力差值与未设企口缝的板块最大主拉应力值的百分比约为 7%, 最大达 9.24%。由此初步认为设置企口缝可一定程度上对受荷板的荷载起到传递作用, 从而减小受荷板最大拉应力。

研究发现企口缝尺寸不同, 双板之间的传荷效果也不同。由表 5, 本次数值模拟的榫头尺寸中当 $b=2\text{ cm}$ 时, 坡度 i 为 1:3 时传荷效果最好; i 小于 1:3 时, 应力传荷系数 K_0 随 i 的减小而减小, 如图 8 所示。由表 6, 本次数值模拟的榫头尺寸中当 i 为 1:4 时, $b=4\text{ cm}$ 时传荷能力最好; 当 b 小于等于 4 cm 时, 应力传荷系数 K_0 随 b 的增大而增大, 如图 9 所示。此外, 在 9 种尺寸企口缝中, 双板模型在凹板侧加载对应的应力传荷系数普遍大于凸板侧加载对应的应力传荷系数。由企口缝构造知, 双板模型在凹板侧加载主要依靠榫头的上部分表面进行传递荷载, 而在凸板侧加载主要依靠榫头的下部分表面进行传递荷载。

表 5 当榫头长度 $b=2\text{ cm}$, 榫头坡度 i 不同时, 不同板块最大主拉应力汇总表

Table 5 When the tenon length $b=2\text{ cm}$ and tenon slope is different, summary of the maxi principal tensile stress of different slabs

加载方式 Loading way	双板模型凹板侧加载 Loading on the concave of double slabs			双板模型凸板侧加载 Loading on the convex of double slabs			最终传荷系数 K_0^* (100%)
项目 榫头坡度 i	凹板最大主拉应力 $\sigma_1(\text{MPa})$	凸板最大主拉应力 $\sigma_2(\text{MPa})$	传荷系数 K_0 (100%)	凹板最大主拉应力 $\sigma_2(\text{MPa})$	凸板最大主拉应力 $\sigma_1(\text{MPa})$	传荷系数 K_0 (100%)	
1:2	1.175 4	0.844 8	71.87	0.807 1	1.167 4	69.14	69.14
1:3	1.186 8	0.838 3	70.64	0.810 3	1.165 8	69.51	69.51
1:4	1.191 2	0.836 3	70.21	0.809 8	1.166 2	69.44	69.44
1:5	1.195 0	0.835 2	69.89	0.808 4	1.167 1	69.27	69.27
1:6	1.197 6	0.833 1	69.56	0.807 2	1.166 6	69.19	69.19

表 6 当榫头坡度 i 为 0.25, 榫头长度 b 不同时, 不同板块最大主拉应力汇总表

Table 6 When tenon slope $i=0.25$ and the tenon length b is different, summary of the maxi principal tensile stress of different slabs

加载方式 Loading way	双板模型凹板侧加载 Loading on the concave of double slabs			双板模型凸板侧加载 Loading on the convex of double slabs			最终传荷系数 K_0^* (100%)
项目 榫头长度 b	凹板最大主拉应力 $\sigma_1(\text{MPa})$	凸板最大主拉应力 $\sigma_2(\text{MPa})$	传荷系数 K_0 (100%)	凹板最大主拉应力 $\sigma_2(\text{MPa})$	凸板最大主拉应力 $\sigma_1(\text{MPa})$	传荷系数 K_0 (100%)	
1 cm	1.194 2	0.716 6	60.01	0.729 0	1.194 7	61.02	60.01
2 cm	1.191 2	0.836 3	70.21	0.809 8	1.166 2	69.44	69.44
3 cm	1.156 9	0.885 4	76.53	0.848 4	1.140 9	74.36	74.36
4 cm	1.094 6	0.858 0	78.38	0.870 4	1.122 7	77.53	77.53
5 cm	1.060 0	0.831 0	78.40	0.845 1	1.131 3	74.70	74.70

表中用以应力表示的传荷系数 $K_0=\sigma_1\div\sigma_2\times 100\%$ 代表企口缝的传荷效果, 并认为两传荷系数中的

最小值为最终应力传荷系数 $K\omega^*$ [11]。

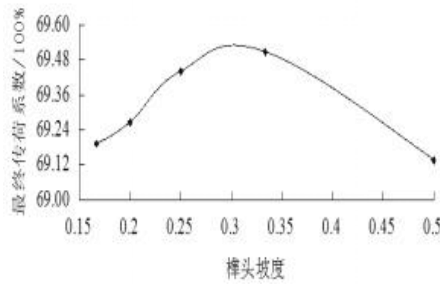


图 8 榫头长度 $b=2\text{ cm}$ 时, 榫头坡度 i 与以应力表示的最终传荷系数的关系图

Fig.8 When the tenon length $b=2\text{ cm}$, the relationship between tenon slope i and the final stress load-transfer coefficient

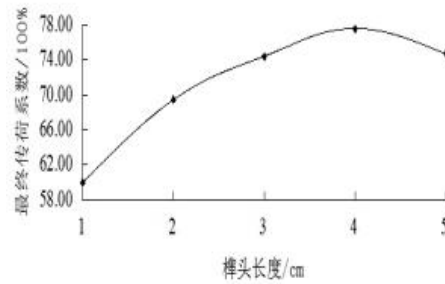


图 9 榫头坡度 i 为 0.25 时, 榫头长度 b 与以应力表示的最终传荷系数的关系图

Fig.9 When tenon slope $i=0.25$, the relationship between the tenon length b and the final stress load-transfer coefficient

3.3 接缝中心 Z 向位移数值模拟结果分析

采用企口缝的双板模型加载接缝中心处产生的位移一般都比不采用企口缝的单板模型加载产生的位移小 0.060 mm 左右, 板块是否设置企口缝进行连接的两种情况对应的接缝中心 Z 向位移之差与未设置企口缝的板块所产生的接缝中心 Z 向位移的百分比约为 18%, 最大达 21.94%, 可见采用企口缝对板块接缝处的挠度起到了一定传递作用。

研究发现接缝榫头尺寸不同, 双板之间的接缝中心 Z 向的位移传递效果也不同。由表 7, 本次数值模拟的榫头尺寸中当 $b=2\text{ cm}$ 时, 坡度 i 为 1:4 时的位移传递效果最好, 如图 10 所示。由表 8, 本次数值模拟的榫头尺寸中当 i 为 1:4 时, $b=4\text{ cm}$ 时的弯沉传递能力最好; 当 b 小于等于 4 cm 时, 弯沉传递系数 $K\omega^*$ 随 b 的增大而增大, 如图 11 所示。综合表 5、6、7、8 可发现 i 为 1:4 时, $b=4\text{ cm}$ 时的企口缝最终传荷系数最大。

表 7 当榫头长度 $b=2\text{ cm}$, 榫头坡度 i 不同时, 不同板块接缝中心 Z 向位移汇总表

Table 7 When the tenon length $b=2\text{ cm}$ and tenon slope i is different, summary of the joint center z-direction displacement of different slabs

加载方式 Loading way	双板模型凹板侧加载			双板模型凸板侧加载			最终传荷系数 $K\omega^*$ (100%)
	凹板接缝中心 Z 向位移 ω_1 (mm)		传荷系数 $K\omega$ (100%)	凸板接缝中心 Z 向位移 ω_2 (mm)		传荷系数 $K\omega$ (100%)	
1:2	-0.300	-0.218	72.67	-0.204	-0.287	71.08	71.08
1:3	-0.310	-0.217	70.00	-0.203	-0.286	70.98	70.00
1:4	-0.301	-0.217	72.09	-0.203	-0.285	71.23	71.23
1:5	-0.301	-0.202	67.11	-0.202	-0.286	70.63	67.11
1:6	-0.301	-0.216	71.76	-0.202	-0.286	70.63	70.63

表 8 当榫头坡度 i 为 1:4, 榫头长度 b 不同时, 不同板块接缝中心 Z 向位移汇总表

Table 8 When tenon slope $i=0.25$ and the tenon length b is different, summary of the joint center z-direction displacement of different slabs

加载方式 Loading way	双板模型凹板侧加载			双板模型凸板侧加载			最终传荷系数 $K\omega^*$ (100%)
	凹板接缝中心 Z 向位移 ω_1 (mm)		传荷系数 $K\omega$ (100%)	凸板接缝中心 Z 向位移 ω_2 (mm)		传荷系数 $K\omega$ (100%)	
1 cm	-0.294	-0.186	63.27	-0.203	-0.295	68.81	63.27
2 cm	-0.300	-0.218	72.67	-0.204	-0.287	71.08	71.08
3 cm	-0.298	-0.232	77.85	-0.212	-0.279	75.99	75.99
4 cm	-0.281	-0.227	80.78	-0.217	-0.274	79.20	79.20
5 cm	-0.279	-0.222	79.57	-0.212	-0.275	77.09	77.09

表中用以挠度表示的传荷系数 $K\omega = \omega_2 \div \omega_1 \times 100\%$ 代表企口缝的传荷效果，并认为两传荷系数中的最小值为最终弯沉传荷系数 $K\omega^*$ [11]。

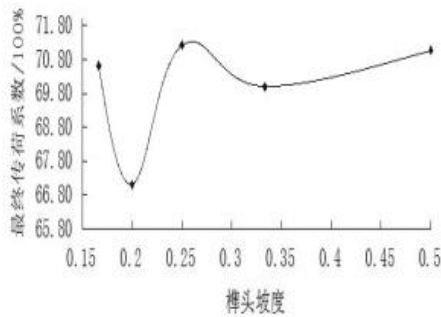


图 10 榫头长度 $b=2$ cm 时，榫头坡度 i 与最终弯沉传荷系数的关系图
Fig.10 When the tenon length $b=2$ cm, the relationship between tenon slope i and the final direct deflection ratio

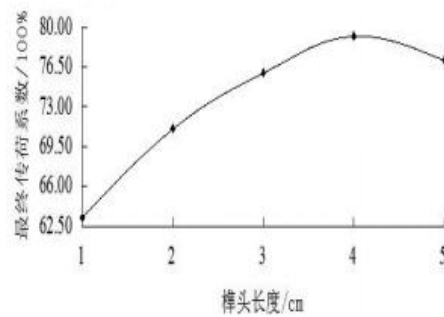


图 11 榫头坡度 i 为 0.25 时，榫头长度 b 与最终弯沉传荷系数的关系图
Fig.11 When tenon slope $i=0.25$, the relationship between tenon slope b and the final direct deflection ratio

3.4 剪应力数值模拟结果分析

路面板通过企口缝进行连接，两块板之间必然产生剪力。研究规定剪应力方向与坐标轴的正方向平行的为最大剪应力，与坐标轴的负方向平行的最小剪应力。

根据结果发现，板块榫头尺寸的不同与板块内最大值剪应力的变化并无直观联系，但相同条件下榫头长度变化对最值剪应力大小产生的影响大于榫头坡度变化对最值剪应力大小产生的影响。综合两种不同加载方式下板块的最值剪应力位置，可将最值剪应力位置信息汇总成表 9 和表 10。

表 9 不同加载方式下，凹板最值剪应力信息汇总表

Table 9 Summary of the mini/maxi shear stress information of concave slabs under different loading conditions

加载方式	双板模型凹板侧加载		双板模型凸板侧加载	
Loading way	Loading on the concave of double slabs		Loading on the convex of double slabs	
类别	最大剪应力	最小剪应力	最大剪应力	最小剪应力
剪应力方向	τ_{YZ}	τ_{YZ}	τ_{XZ}	绝大部分为 τ_{XZ}
单元 X 坐标	距离榫槽底部 1.7 cm 左右	距离榫槽底部 1.7 cm 左右	均略大于 1 m，且超出部分小于各个尺寸榫头所对应的长度	均略大于 1 m，且超出部分小于各个尺寸榫头所对应的长度
单元 Y 坐标	出现在与接缝方向平行的边长的 27/40 位置处	大部分出现在与接缝方向平行的边长的 1/3 附近	出现在与接缝方向平行的边长的 19/40 ~ 21/40 范围内	大部分出现在与接缝方向平行的边长的 21/40 ~ 39/40 范围内
单元 Z 坐标	出现在板厚度的 21/40 ~ 13/20 范围内	出现在板厚度的 21/40 ~ 13/20 范围内	出现在板厚的 1/5 ~ 1/4 范围内	集中出现在板厚的 7/8 附近

表 10 不同加载方式下，凸板最值剪应力信息汇总表

Table 10 Summary of the mini/maxi shear stress information of convex slabs under different loading conditions

加载方式	双板模型凹板侧加载		双板模型凸板侧加载	
Loading way	Loading on the concave of double slabs		Loading on the convex of double slabs	
类别	最大剪应力	最小剪应力	最大剪应力	最小剪应力
剪应力方向	绝大部分为 τ_{XZ}	τ_{XZ}	τ_{YZ}	τ_{YZ}
单元 X 坐标	均略大于 1 m，且位于榫头上	均略大于 1 m，且位于榫头上	基本都为 0.911 m，即距榫头与板块主体的分界面 9 cm 附近	基本都为 0.911 m，即距榫头与板块主体的分界面 9 cm 附近
单元 Y 坐标	与接缝方向平行的边长的 3/8 ~ 23/40 范围内	与接缝方向平行的边长的 19/40 ~ 21/40 范围内	都在与接缝方向平行的边长的 27/40 位置处	与接缝方向平行的边长的 13/40 处
单元 Z 坐标	板厚度的 27/40 ~ 7/10 范围内	板厚度的 11/20 ~ 7/10 范围内	大部分都为 0.108 m，即板厚的 27/50 附近	板厚度的 23/50 ~ 27/50 范围内

3.5 优化建议

为对受荷板的荷载和挠度进行传递,保持路面整体性,本文认为有必要将装配式水泥混凝土路面接缝设置成企口缝形式。若板块为正方形,建议优先选择榫头坡度 i 为 1:4,长度 b 为 4 cm 的企口缝。基于凹板侧加载对应的应力传荷系数普遍大于凸板侧加载对应的应力传荷系数的发现,从传荷能力考虑应把凹板作为重车道进行设计^[15]。在进行企口缝设计时应应对榫头的上部分进行局部加强优化,可采取与下表面不同的坡度。

板块设计时,应重视板块 τ_{YZ} 、 τ_{XZ} 两方向的抗剪强度。对于板块 X 方向距离接缝 10 cm 范围内, Y 轴正向上 1/3 边长的部分,必要时可配置抗剪钢筋。

4 结论

(1) 5 种常用尺寸板块中 X、Y 向最大拉应力随尺寸变化的趋势总体相同,边长为 3.5 m 的路面板块两个方向最大拉应力均为最小,条件允许时建议优先采用。

(2) 不同尺寸板块内最大 X、Y 向拉应力的出现位置相对固定,在板块设计时对这些位置的抗拉强度注意加强。

(3) 9 种常用尺寸的企口缝中,凹板侧加载对应的传荷系数普遍大于凸板侧加载对应的传荷系数,设计时可把凹板作为重车道。企口缝设计时,应当对榫头的上部分进行局部优化,可采取与下表面不同的坡度。

(4) 设置企口缝对板块内的最大拉应力和接缝处挠度均有较好的传递作用,本次模拟中 i 为 1:4、 $b=4$ cm 的企口缝传荷能力最好。

(5) 榫头尺寸大小与板内最值剪应力的变化并无直观联系,但相同条件下榫头长度变化对最值剪应力大小产生的影响大于榫头坡度变化对最值剪应力大小产生的影响。

(6) 不同尺寸企口缝的板在不同加载方式下,板内的剪应力最值出现的方向和位置均较固定,必要时可在上述部位配置抗剪钢筋。

参考文献

- [1] 邓学钧.路基路面工程[M].第三版.北京:人民交通出版社,2008
- [2] 刘卫东,田波,侯子义.混凝土路面预制拼装快速修复关键技术研究[J].中外公路,2016,36(1):63-66
- [3] Chang LM, Chen YT, Lee S. Using precast concrete panels for pavement construction in Indiana[R]. Purdue University West Lafayette: Joint Transportation Research Program, 2004
- [4] Kohler E, Harvey JT, Plessis LD, et al. Comparison of precast and cast-in-place concrete pavements responses under heavy vehicle simulator loads[C]. California: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields 8th International Conference, 2009
- [5] 尹锦明,姜毅,韩光毅.装配式水泥混凝土路面板块吊装应力分析[J].施工技术,2015,44(z):393-396
- [6] 范小响,罗翥,傅智,等.水泥混凝土路面预制拼装快速修复技术研究[J].公路交通科技:应用技术版,2006(1):25-27
- [7] 王俏.水泥混凝土路面预制拼装快速修复技术研究[J].长沙交通学院学报,2007,23(4):33-38
- [8] 罗翥,傅智,范小响.水泥混凝土路面 12 小时内通车快速修复技术研究[J].西部交通科技,2006(3):11-16,22
- [9] 刘山洪,张朋民.预制预应力混凝土复合路面板的应用研究[J].公路,2006(10):75-79
- [10] Tayabji S, Buch N, Kohler E. Precast Concrete Pavement for Intermittent Concrete Pavement Repair Applications[C]. St. Louis Missouri: National Conference on Preservation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Pavements, 2009:317-334
- [11] 蔡芳芳.企口板水泥混凝土路面的有限元分析[D].武汉:华中科技大学,2006
- [12] 韩辉,王彩霞.低交通量道路水泥混凝土路面的荷载应力分析[J].公路交通技术,2009(Z):19-22
- [13] 胡伟.水泥混凝土路面三维数值分析及轴载换算[D].成都:西南交通大学,2005
- [14] 吴德芬,罗翥,彭鹏.预制拼装技术在水泥混凝土路面快速养护中的应用研究[J].公路交通科技:应用技术版,2011(2):1-4
- [15] 卢正宇,张起森.水泥混凝土路面企口接缝的应力分析[J].长沙交通学院学报,1994,10(3):68-76