

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.018

引用格式: 王宝辉, 陈明, 肖杰, 等. 装配式道路基层路面结构设计方法研究: 以海口市空保北横路工程为例[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 85-89.

Citation: WANG Baohui, CHEN Ming, XIAO Jie, et al. Study on structural design method of base pavement of prefabricated road: taking Beiheng road project of Haikou city as an example[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 85-89.

装配式道路基层路面结构设计方法研究^{*}

——以海口市空保北横路工程为例

王宝辉¹, 陈明¹, 肖杰², 龙腾云³, 王正安¹

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 2. 长沙理工大学
交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100020)

摘要: 以海口市空保北横路新建路面工程为依托, 研究装配式基层路面的组合设计、板块构造与连接结构、单元块吊顶设计, 在此基础上进行装配式基层路面方案设计及装配式基层板块路面施工工艺研究, 同时对拼装完成后板块进行接缝弯沉测量、承载能力和传荷能力分析, 验证装配式基层路面设计方案的可行性。

关键词: 公路; 装配式基层路面; 结构设计; 板块构造与连接结构; 施工工艺

中图分类号: U421

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0085-05

市政道路工程一般存在准备期短、开工急、施工场地狭窄等问题, 增大了工程进度与质量控制难度, 也影响施工路段的环境和交通。另外, 目前许多城市频现道路塌陷, 如何快速解决塌陷问题是当前面临的难题。装配式基层沥青路面的基层由预制混凝土板块拼装而成, 利用早高强水泥砂浆对板块间的接缝进行浇筑填充, 然后加铺沥青面层, 其优点是能快速施工, 延缓或避免开裂的产生, 是一种既经济又环保的路面结构形式^[1]。为达到市政道路施工快速化、规范化及高质量要求, 可采用预制装配式基层作为城市道路基层。本文结合海口市空保北横路新建路面工程, 研究装配式基层路面结构组合设计、板块构造与连接结构及单元块吊顶设计, 探讨装配式基层板块的预制拼装施工技术, 为相关工程提供参考。

1 装配式基层路面结构组合设计

1.1 路面组合设计

采用 ABAQUS 三维有限元软件建立装配式基层路面结构模型(见图 1)。模型采用八节点热耦合六面体结构单元(C3D8T 单元), 各层接触条件为完全连续, 采用 Tie 功能绑定模拟^[2]。装配式基层由 4 块预制混凝土板组成, 预制混凝土板规格为 2 m ×

2 m, 板间缝宽为 3 cm。采用通用静力与顺序热力耦合方法计算应力。

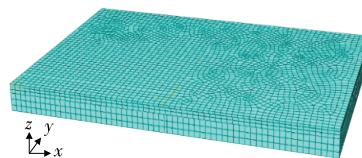


图 1 路面结构有限元模型

为得到温度耦合荷载条件下基层混凝土的抗拉情况, 考虑几种不同面层厚度和基层厚度进行计算分析, 计算温度应力时取 $\Delta T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。在基层底部拉应力满足混凝土抗拉强度经验值的前提下, 基层混凝土强度最低要求见表 1^[3]。

由表 1 可知: 1) 在温度耦合轻载的情况下, 基层厚度为 30 cm 时, 面层厚度分别为 6 cm、8 cm、10 cm、12 cm、15 cm、18 cm 的组合设计中, 混凝土为 C20 时, 面层厚度为 6 cm 和 8 cm 时分别采用 C20 混凝土、C25 混凝土, 基层底部拉应力可满足混凝土抗拉强度要求, 其余面层厚度时采用贫混凝土即可; 在基层厚度为 20 cm 时, 不建议采用面层厚度在 10 cm 以下的组合设计, 面层厚度为 10 cm、12 cm、15 cm、18 cm 的组合设计中混凝土强度须分

^{*} 基金项目: 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司科技项目 (201704)

表 1 混凝土强度要求

| 基层厚度/cm | 路载/kN | 不同面层厚度(cm)下混凝土强度指标 | | | | | |
|---------|-------|--------------------|-----|------|------|------|------|
| | | 6 | 8 | 10 | 12 | 15 | 18 |
| 20 | 100 | — | — | C30 | C25 | C25 | C20 |
| 30 | | C20 | C25 | 贫混凝土 | 贫混凝土 | 贫混凝土 | 贫混凝土 |
| 20 | 240 | — | — | — | — | C25 | C25 |
| 30 | | C30 | C25 | C20 | 贫混凝土 | 贫混凝土 | 贫混凝土 |

注:“—”表示在该基层厚度与面层厚度组合设计时基层底部拉应力不满足混凝土抗拉强度要求。

别达到 C30、C25、C25、C20。2) 在温度耦合重载的情况下,基层厚度为 30 cm 时,采用面层厚度为 6 cm、8 cm、10 cm、12 cm、15 cm、18 cm 的组合设计,在混凝土分别为 C30、C25、C20、贫混凝土、贫混凝土和贫混凝土时基层底部拉应力可满足混凝土抗拉强度要求;基层厚度为 20 cm 时,不建议采用面层厚度为 12 cm 及以下的组合设计,采用面层厚度为 15 cm、18 cm 的组合设计,混凝土强度须达到 C25。

根据 2 m×2 m 板块组合设计成果,可按照项目实际路面结构厚度选择适宜的基层混凝土板块强度。

1.2 板块构造与连接结构

在装配式基层路面结构中,接缝是最薄弱之处,且集料嵌锁传递荷载的能力直接影响路用性能。以 30 cm 厚 2 m×2 m 板块为例,综合比较各类构造与连接结构,选择合适的板块构造与连接结构。

(1) 哑铃式接缝。连接构件为哑铃式接缝时,只需制作一种混凝土预制构件,施工时安装便利。灌注的高性能快速修补水泥砂浆镶嵌在板块内部,其作用等价于传力杆,传荷能力极好。板块间水平 x 、 y 方向及垂直 z 方向的约束度足够,稳定性好。图 2 为哑铃式接缝示意图。

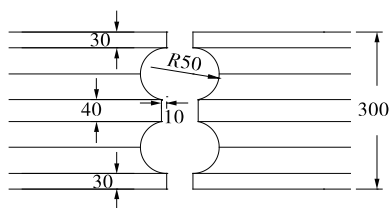


图 2 哑铃式接缝示意图(单位:mm)

(2) 嵌入式吊环。连接构件为嵌入式吊环时,只需制作一种混凝土预制构件。板块侧面构造为圆形凹槽,钢制吊环镶嵌于凹槽内部,利用吊环充当传力杆。板间灌注水泥砂浆,板块间水平 x 、 y 方向及垂直 z 方向的约束度足够,稳定性极好。图 3 为嵌

入式吊环构造示意图。

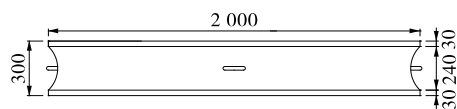


图 3 嵌入式吊环示意图(单位:mm)

(3) 拉链锚固式板块。在板块边缘设置有间隔的锯齿,锯齿间间隙用水泥砂浆填充,砂浆凝固后可像拉链一样连接板块(见图 4)。连接构件为拉链锚固式板块时,制作一种板块构造即可。板块间水平 x 、 y 方向灌注水泥砂浆,受力约束度足够,稳定性较好,且具有较强的抗拉强度,受温缩影响小。但垂直 z 方向约束度不够,稳定性较差。

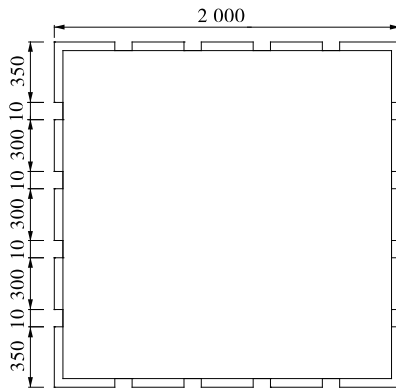


图 4 拉链锚固式板块示意图(单位:mm)

(4) 钢环承插嵌入式板块。侧向环嵌入板块中预留竖向凹槽内,与浇筑的水泥砂浆一同作为传力杆,加强板块的连接性,传荷能力极强;锯齿用水泥砂浆浇筑,可限制板块间的错口及拉开,同时正对连接板块的侧向环,方便板块拼装。板块间水平 x 、 y 方向及垂直 z 方向的约束度足够,稳定性很好(见图 5)。

综合比较以上板块构造与连接结构,采用钢环承插嵌入式混凝土板块作为该项目的预制拼装板块。

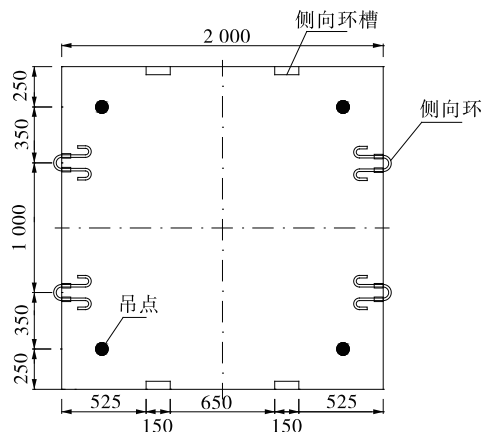


图 5 钢环承插嵌入式板块示意图(单位:mm)

1.3 基层单元块吊点设计

确定板块材料配比、板块构造与连接结构后,对板块进行吊点设计及吊装试验。结合模拟计算结果和钢环承插嵌入式混凝土板块的结构特点布置合适的吊点,在混凝土预制厂预制 30 cm 厚 2 m×2 m 板块,然后进行板块吊装试验。

根据表 1,面层厚度为 12 cm 及以上时,30 cm 厚度的板块采用贫混凝土时基层底部拉应力可满足

混凝土抗拉强度要求。以 C15 和 C20 混凝土为例,板块在结构自质量、起吊(加速度 0.1g)、下放(减速度 0.1g)3 种工况下均未出现裂痕且成功实现吊装运输。

2 装配式基层板块施工技术

2.1 路面结构方案

空保北横路西起云美西二路(北段),东至云美西四路(北段),道路呈东西走向,全长 760.602 m,红线宽度 18 m,设计速度 30 km/h,道路等级为城市支路。根据以上研究成果,结合路面状况及工程概况,提出水稳基层路面和装配式基层路面两种设计方案,并在 K0+510.0—517.6 段南侧车行道铺设装配式基层路面组合设计试验路,预制块规格为 30 cm 厚 1.87 m×1.87 m,缝宽为 3 cm,接缝填料采用高性能快速修补砂浆。预制板块共 12 块,其中 3 块采用 C15 混凝土,其余采用 C20 混凝土。结构方案见表 2。

装配式基层板块拼装的主要步骤为预制水泥混凝土板块、现场调平及吊装拼装^[4]。

表 2 路面结构设计方案

| 路面方案 | 结构层次 | 厚度/cm | 材料类型 | 道路类型 |
|---------|------|-------|-----------------------|---------|
| 水稳基层路面 | 上面层 | 4 | AC-13C SBS 细粒径改性沥青混凝土 | 半刚性基层路面 |
| | 黏层 | — | PA-3 型黏层沥青 | |
| | 下面层 | 8 | AC-25 粗粒式沥青混凝土 | |
| | 封层 | 1 | 改性沥青 | |
| | 透层 | — | PA-2 型透层沥青 | |
| | 上基层 | 16 | 水泥稳定碎石(水泥掺量 5%) | |
| | 下基层 | 16 | 水泥稳定碎石(水泥掺量 5%) | |
| | 垫层 | 18 | 级配碎石 | |
| 装配式基层路面 | 上面层 | 4 | AC-13C SBS 细粒径改性沥青混凝土 | 刚性基层路面 |
| | 黏层 | — | PA-3 型黏层沥青 | |
| | 中面层 | 8 | AC-20C 中粒式沥青混凝土 | |
| | 封层 | 1 | 改性沥青封层 | |
| | 玻纤格栅 | — | 满铺玻纤格栅 | |
| | 基层 | 30 | 装配式预制混凝土基层 | |
| | 调平层 | 2 | 碎石混凝土 | |
| | 垫层 | 18 | 级配碎石 | |

2.2 预制水泥混凝土板块

(1) 混凝土浇筑。浇筑混凝土前,确保模具内不存在任何杂物、积水等,处于洁净状态。采用预拌

混凝土进行浇筑,将混凝土缓慢倒入模具中。浇筑完成后进行平整处理,检查是否存在缺陷或凸起等,同时进行常规养护^[5]。

(2) 吊钩安装。设置路面吊装点,埋设圆形钢筋作为吊环及侧面传力杆。混凝土终凝成型后取出方木,安装吊环。

2.3 板块吊装及拼接

(1) 基底找平。对路基进行压实,铺设碎石垫层并进行初步整平处理。整平后,采用碎石混凝土铺设找平层。

(2) 板块吊装。采用两点吊法吊装板块。试吊时将预制板吊离 2~3 cm 后暂停,检查无碍后方可继续起吊。各板块间放方木支垫,以减少放吊时上板对下板的冲击。采用平板车运输板块,运输中车辆启动应缓慢,以匀速行驶。

(3) 板块拼装。在指定区域利用吊机将板块初步就位后,利用工具进行精确定位,从内向外进行板块拼装^[6]。拼装时设钢筋环,与对应的凹槽相互配合组装,并按规定设置接缝^[7]。

相比传统路面结构,装配式基层路面具有更高的施工效率和质量,但设计灵活性受限,且需要长期维护和修复,适用范围有限。

2.4 灌注填缝料

采用高性能快速修补水泥砂浆灌注接缝,固结后强度可达到混凝土水平,保证基层为刚性基层。按料水质量比 100:14~15 的配合比拌制水泥砂浆,其强度见表 3。

表 3 水泥砂浆的强度

| 时间/h | 抗折强度/MPa | 抗压强度/MPa | 黏结强度/MPa |
|------|----------|----------|----------|
| 4 | 4.93 | 31.30 | 1.35 |
| 8 | 5.68 | 35.20 | 1.90 |
| 12 | 6.65 | 37.80 | 2.05 |
| 24 | 6.77 | 39.40 | 2.45 |

水泥砂浆通过灌缝工具缓慢灌入接缝中,由低到高,同时观察灌缝是否饱满、密实。

3 装配式基层板块弯沉

3.1 弯沉测试方法

贝克曼梁法适用于测定静止加载或低速加载时路面弹性弯沉,可用于评价路面的总体强度。采用长度为 5.4 m 的贝克曼梁弯沉仪测定水泥混凝土基层板块弯沉。在装配式基层板块接缝两侧同时检测弯沉,根据两侧弯沉的平均值 D 评价装配式基层板块的承载能力,根据两侧弯沉差 ΔD 评价两侧接缝的传荷能力^[8]。公式如下:

$$D = (D_u + D_e) / 2 \quad (1)$$

$$\Delta D = D_u - D_e \quad (2)$$

式中: D_u 为未受荷载侧接缝弯沉(0.01 mm); D_e 为受荷载侧接缝弯沉(0.01 mm)。

装配式混凝土基层路面承载能力和传荷能力评价标准见表 4。 $\Delta D \geq 6$ (0.01 mm) 时,易产生底部脱空或反射裂缝,应采取灌浆填封、增加传力杆、铺设土工格栅等措施,消除垂直、水平方向变形^[9]。

表 4 装配式混凝土基层路面承载能力与传荷能力评价标准

| 项目 | 弯沉值/(0.01 mm) | 评定等级 |
|--------|-------------------|------|
| 板块承载能力 | <20 | 优 |
| | 20~45 | 良 |
| | >45 | 中及以下 |
| 接缝传荷能力 | $\Delta D < 6$ | 优良 |
| | $\Delta D \geq 6$ | 中及以下 |

3.2 弯沉测试结果与分析

对新建路段进行弯沉检测,板块平面分布见图 6。板块 1~3 采用 C15 混凝土,其余板块采用 C20 混凝土。

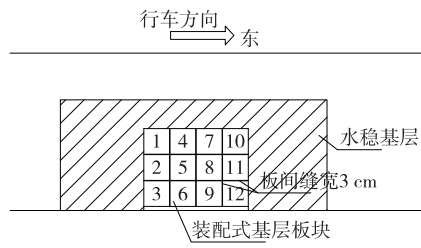


图 6 混凝土板块的平面分布

由西向东,利用弯沉仪检测板块弯沉,结果见表 5。由表 5 可知:板角弯沉大多高于板中弯沉,且相邻水稳基层板块的板角弯沉大于中间板块及其余部位的弯沉。

传荷能力一般针对相邻板块横缝。对相邻板块横缝弯沉进行检测,得到板块承载力和传荷能力(见表 6)。从表 6 可看出:板块接缝弯沉值均小于 0.2 mm,承载能力为优;除板块 2~3、8~9 板角外,其他板块接缝弯沉差均小于 0.06 mm,传荷能力优良。

综上,板块的板角承载能力弱于板中的承载能力,尤其是相邻水稳基层板块,刚性、柔性基层衔接处须铺设土工格栅;板块的板角传荷能力弱于板中

表 5 混凝土板块弯沉检测结果

| 相邻 板块 | 板块 编号 | 弯沉/(0.01 mm) | | |
|----------|----------|--------------|----|----|
| | | 板角 | 板中 | 板角 |
| 2~3 | 2 | 10 | 4 | 6 |
| | 3 | 18 | 6 | 4 |
| 5~6 | 5 | 8 | 6 | 4 |
| | 6 | 8 | 4 | 6 |
| 8~9 | 8 | 6 | 8 | 2 |
| | 9 | 8 | 6 | 8 |
| 11~12 | 11 | 2 | 6 | 10 |
| | 12 | 6 | 8 | 12 |

表 6 板块的承载能力

| 相邻 板块 | 弯沉平均值/(0.01 mm) | | | 弯沉差/(0.01 mm) | | |
|----------|-----------------|----|----|---------------|----|----|
| | 板角 | 板中 | 板角 | 板角 | 板中 | 板角 |
| 2~3 | 14 | 5 | 5 | 8 | 2 | 2 |
| 5~6 | 8 | 5 | 5 | 0 | 2 | 2 |
| 8~9 | 7 | 7 | 5 | 2 | 2 | 6 |
| 11~12 | 4 | 7 | 11 | 4 | 2 | 2 |

的传荷能力;板块的承载能力及传荷能力都基本符合要求。

4 结语

本文以海口市空保北横路为依托,研究装配式基层的最优预制结构类型及组合设计方案,探讨预

制基层底面与垫层的贴合措施及板块构造与连接结构。通过对拼装完成后板块进行接缝弯沉检测、承载能力和传荷能力分析,证实了装配式基层路面的可行性。

参考文献:

[1] 马健生,孙大伟,余地,等.装配式道路基层结构填缝材料配比设计及性能分析[J].公路,2017,62(10):17-21.

[2] 陈明,肖杰,杨和平,等.装配式基层沥青路面接缝温度应力分析[J].中外公路,2021,41(1):31-36.

[3] 中交公路规划设计院有限公司.公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[4] 贺凯涵.混凝土快速预制拼装技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.

[5] 梁斌.水泥砼路面养护维修措施及养护决策矩阵研究[J].公路与汽运,2021(2):90-92.

[6] 杨超.预制装配式混凝土结构绿色施工若干关键技术研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.

[7] 向雅贤.施工现场装配式绿色道路路面板设计及关键结构研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.

[8] 朱学兵,张文琰,楼康年,等.贝克曼梁法测试水泥砼路面弯沉及路面持荷能力评价[J].城市建筑,2013(10):290-291.

[9] 刘溪溪,谢海巍,刘尊青,等.不同材料土工布防治反射裂缝效果试验研究[J].公路与汽运,2022(2):77-79+83.

收稿日期:2023-06-19

(上接第 84 页)

参考文献:

[1] 徐世法,季节,罗晓辉,等.沥青铺装层病害防治与典型案例[M].北京:人民交通出版社,2005.

[2] 曹明明,陈金蓉,张洲洋,等.高速公路沥青路面技术状况评价指标分析[J].公路与汽运,2021(2):155-160.

[3] 曹明明,岳建洪,陈金蓉,等.沥青路面预防性养护决策指标体系分析[J].公路与汽运,2021(1):140-143+147.

[4] 郭力.纳米注浆材料初探[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2012,22(1):9-12.

[5] 张捷.聚氨酯化学灌浆材料危害性浅析[J].中国建筑防水,2007(5):6-9.

[6] 沙川.新型填缝料的制备与性能研究[D].西安:长安大学,2012.

[7] 余自森.不发泡型高聚物注浆材料力学特性试验研究[D].郑州:郑州大学,2020.

[8] 庞绮玲.沥青混凝土路面裂缝修补技术研究[D].长沙:中南大学,2013.

[9] 周怀恩.半刚性基层沥青路面裂缝处治技术研究[J].城市道桥与防洪,2021(8):291-295.

[10] 潘友强,詹从明,李款等.耐水型聚氨酯注浆材料性能研究及工程应用[J].新型建筑材料,2021,48(2):114-119.

[11] LI S, NIU Y, WANG B, et al. Research on mechanical response of polymer grouting repair for longitudinal cracks in reconstructed and expanded expressway pavement[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-8.

[12] 李昀泽.大孔隙聚氨酯混合料水稳定性改善研究[D].北京:北京建筑大学,2021.

收稿日期:2023-06-14