

装配式混凝土路面设计关键技术研究

董占宇

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 装配式混凝土路面通过工厂预制、现场装配的方式,省去了现场养护环节,从而实现了大幅缩短工期、降低施工成本,且对环境友好,并能提高路面质量的保障,可广泛应用于城市道路、公路、机场、港口及停车场等多种场景。装配式混凝土路面的关键设计内容包括路面结构组合及板厚设计、板块划分设计、板块构造设计、板块配筋设计与材料设计,对各个环节的主要设计方法、重点考量要素、设计要点、计算方法等关键技术进行了研究与介绍,并以城市道路修复工程为例,对装配式混凝土路面进行了全寿命周期成本分析。从全寿命周期内的直接经济效益上看,装配式路面方案相较于常规沥青路面结构组合方案具有一定优势。

关键词: 路面;装配式;设计;关键技术

中图分类号: U416.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0065-06

Research on Key Technologies of Prefabricated Concrete Pavement Design

DONG Zhanyu

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Through the factory prefabrication and on-site assembly of the prefabricated concrete pavement, the need for on-site maintenance is eliminated so as to greatly shorten the construction period and reduce the construction costs, which is also environmentally friendly and can improve the quality assurance of the pavement, and can be widely used in various scenarios such as urban roads, highways, airports, ports and parking lots. The key design contents of prefabricated concrete pavement include the pavement structure combination and slab thickness design, slab division design, slab structure design, slab reinforcement design and material design. The main design methods, key considerations, design essentials, calculation methods and other key technologies for each part are studied and introduced. Taking an urban road repair and maintenance project as an example, a full life-cycle cost analysis of prefabricated concrete pavements is conducted. From the perspective of direct economic benefits in the full life cycle, the prefabricated pavement scheme has certain advantages compared with the traditional asphalt pavement structures.

Keywords: pavement; prefabricated; design; key technology

0 引言

2016年,国务院办公厅和交通运输部分别发布了《关于大力发展装配式建筑的指导意见》^[1]与《关于实施绿色公路建设的指导意见》^[2],鼓励提高建设工程的预制装配化水平,提升工程品质。装配式混凝土路面与国家积极推行的装配式建筑本质相同,是指把传统施工方式中的大量现场作业转变成工厂预制、现场装配^[3],其显著优势是质量可控、对环境影响小、现场操作时间短,并可实现快速通车。

装配式路面的设计内容与其施工流程密切相

关。其施工流程为:基层处理→板块安装→接缝处理→板底注浆→验收。故其关键的设计内容包括:路面结构组合及板厚设计、板块划分设计、板块构造设计、板块配筋设计、材料设计。其中板块构造设计包含起吊孔设计、调平孔设计、起吊及调平构件设计、注浆构造设计及接缝构造设计。

1 设计标准及技术指标

对于公路和城市道路,路面结构设计工作年限、标准轴载、交通等级、最大温度梯度标准值等设计标准分别按现行行业标准《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)^[4]、《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[5]的规定取用。

为了便于运输,板块的最大宽度不宜超过3.75 m。

收稿日期: 2024-08-13

作者简介: 董占宇(1990—),男,工学学士,高级工程师,从事道路交通工程设计、研究工作。

完工后,两相邻板间的弯沉差宜控制在 0.06 mm 以内。

2 路面结构组合及板厚设计

本文以某城市道路的大修工程为例,板块厚度按《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[5]中的规定计算确定,路面结构组合设计如图 1 所示。

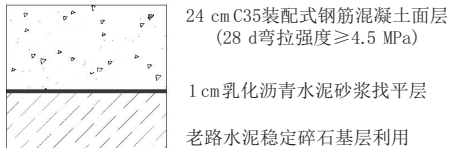


图 1 路面结构设计图

3 板块划分设计

板块划分是确定工程中所需的装配式路面模板类型与数量的基础,根据板块尺寸及接缝布置情况,可对需要使用的模板进行分类。除了应满足《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[5]的相关规定外,装配式路面板块尺寸还应考虑运输要求。此外,在进行板块划分设计时,还应考虑尽可能使用较少的模板类型,以节约工程造价。

以 8 m×6 m 场地为例,单块预制板块的平面尺寸可采用 3 000 mm×4 000 mm,板块数量共 4 块。根据接缝的布置情况,可将板块分为 2 种类型,板块编号与板块类型的对应关系如图 2 及表 1 所示。

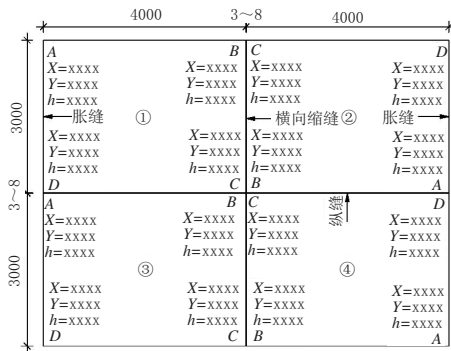


图 2 板块划分设计图(单位:mm)

表 1 板块类型划分表

板块类型	对应的板块编号
I 型	① ④
II 型	② ③

为便于确定板块安装方向,应在板块划分设计图上对各板块角点进行编号,安装时使构造设计图中的角点编号与板块划分设计图对应。

在板块划分完成后,应根据路线设计方案,标注各板块角点的坐标及高程,用于指导施工及验收。

需要注意的是,对于严格限制实施范围的装配式路面工程,在进行板块尺寸设计时还应考虑一定的接缝宽度,接缝宽度应符合《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[5]的相关规定。

4 板块构造设计

4.1 起吊调平孔及起吊调平构件设计

为尽量减少对板块开孔、开槽,推荐采用起吊、调平一体化装置,起吊、调平共用同一孔位。

对钢筋混凝土板块采用四点起吊,选择孔位时主要考虑尽量平衡板块中的正、负弯矩,避免在跨中或吊点处产生过大的弯矩,使板块配筋经济合理,如图 3 和图 4 所示。

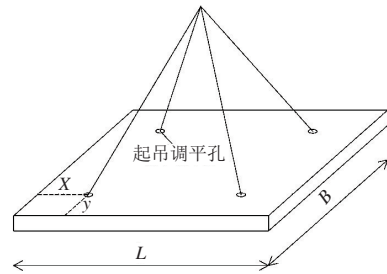


图 3 预制混凝土路面板吊点布置图示



图 4 预制混凝土路面板起吊

将路面板的起吊工况简化为受均布荷载的外伸梁模型,如图 5 所示。经计算比选,并考虑避让板块钢筋网,吊位比 λ ($\lambda = x/L = y/B$) 取值 1/5,纵向及横向正截面参数及弯矩的计算结果如表 2 和表 3 所列。

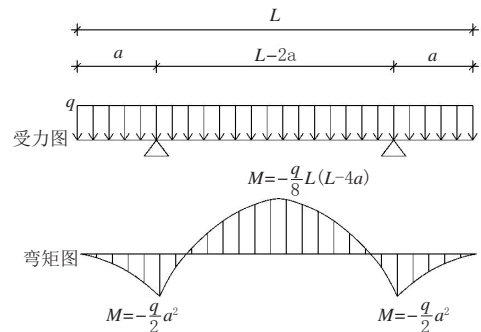


图 5 外伸梁弯矩计算图示(图中 q 表示应力集度, M 表示弯矩)

本工程中设计的起吊、调平一体化构件由螺母、钢管、钢板及钢筋组成,如图 6 至图 8 所示。钢筋与螺母焊接,并搭接于板块下层的钢筋网之下;钢管与

表2 预制混凝土路面板起吊工况正截面弯矩计算参数表

参数	参数值
板长/m	4
板宽/m	3
板厚/m	0.24
板块重度/(kN·m ⁻³)	24
自重荷载分项系数	1.2
动力系数	1.5

表3 正截面弯矩计算

方向	纵向	横向
吊点距横边/纵边距离/m	0.8	0.6
吊点弯矩/(kN·m)	-9.95	-7.46
跨中弯矩/(kN·m)	12.44	9.33

螺母点焊,接缝处采用热沥青密封;钢板顶面、侧面满布热沥青,钢管与钢板间采用热沥青粘结。

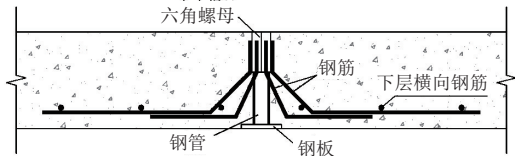


图6 起吊调平构件立面图

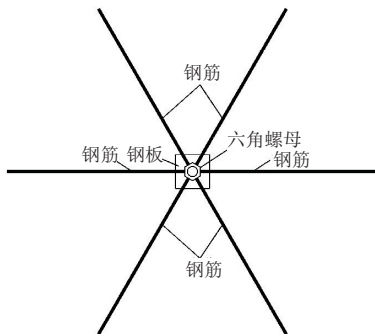


图7 起吊调平构件俯视图



图8 起吊调平构件预埋

该起吊、调平一体化构件的使用方法如下:起吊时,将吊环旋入螺母(见图9),进行吊装作业;板块按设计方位安放后,旋出吊环,旋入螺杆,螺杆在旋入时将钢板顶出(见图10),分别调节螺杆的旋入深度,直至四个板角均达到设计标高,即完成调平作业。

4.2 注浆构造布置设计

在装配式路面板底设置导流槽注浆构造。本工

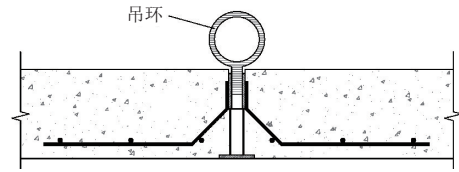


图9 吊环旋入螺母

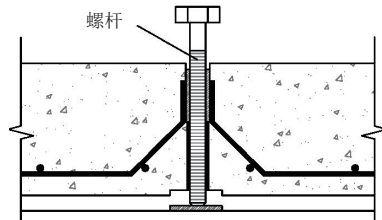


图10 螺杆将钢板顶出

程中导流槽平面布设采用分仓式。导流槽截面采用梯形截面,顶面宽度3 cm,底面宽度5 cm,高度1 cm。在每块板上需设置2个贯穿板厚的注浆孔及2个与注浆孔位置对称、孔径相同的释放孔,注浆孔(释放孔)直径为5 cm,孔位应避让板块内的钢筋网。装配式路面板底边缘应采用密封材料封闭,分仓式导流槽的每仓之间都用密封材料分隔,密封条选用三元乙丙橡胶材料。分仓式注浆构造如图11所示,导流槽如图12所示。

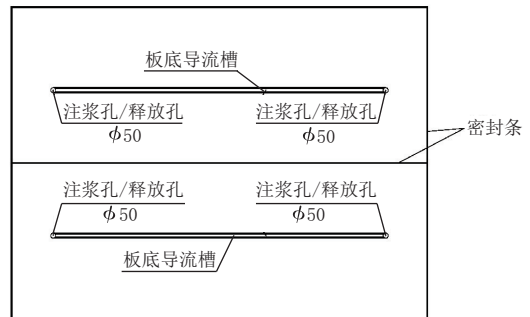


图11 分仓式注浆构造(单位:mm)

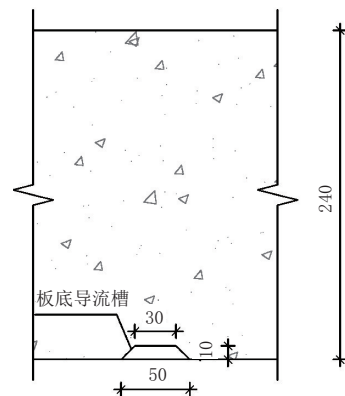


图12 导流槽详图(单位:mm)

4.3 接缝构造设计

本工程设计在II型板块中预埋传力杆与拉杆,传力杆和拉杆的长度、直径及间距按《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[5]中的规定取用;在I型

板块边缘设置与传力杆、拉杆位置对应的下开口式槽口,如图13所示。板块安装时,将II型板块预埋的外露传力杆/拉杆插入I型板块预留的槽口中,再采用灌浆材料填充槽口。

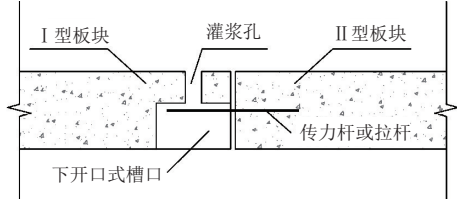


图13 下开口式槽口接缝构造

填缝材料应符合《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[5]的规定。

5 板块配筋设计

装配式路面板块配筋需考虑两方面的力学要求:一是作为路面结构本身,平衡混凝土面层收缩受阻时产生的拉力;二是抵抗起吊调平的过程中,由于钢筋混凝土板块自重而产生的弯矩。下文仍以图2、表1所示的I型和II型板块为例,进行板块配筋设计。

5.1 考虑面层收缩受阻时的配筋计算

考虑平衡混凝土面层收缩受阻时产生的拉力时,面层配筋量按式(1)确定^[5]。

$$A_s = \frac{16L_s h \mu}{f_{sy}} \quad (1)$$

式中: A_s 为每延米混凝土面层宽度方向(或长度方向)所需钢筋面积,mm²/m; L_s 在计算纵向钢筋时,为横缝间距,在计算横向钢筋时,为无拉杆的纵缝或自由边之间的距离,mm; h 为混凝土面层厚度,mm; μ 为混凝土面层与基层间的摩阻系数,本例中取1.8; f_{sy} 为钢筋屈服强度,MPa。

本工程拟采用直径12 mm的HRB400钢筋,屈服强度取400 MPa。故本工程混凝土板块纵向钢筋配筋量 $A_s=16 \times 4 \times 240 \times 1.8 / 400 = 69.12$ mm²/m;采用直径12 mm的钢筋时,钢筋计算间距约为1 630 mm,规范要求不小于350 mm,故取350 mm,则横向钢筋配筋量 $A_s=16 \times 6 \times 240 \times 1.8 / 400 = 103.68$ mm²/m;采用直径12 mm的钢筋时,钢筋计算间距约为1 090 mm,规范要求不小于750 mm,故取750 mm。

5.2 考虑起吊、调平过程的配筋计算

理论上来说,可以通过材料设计,使混凝土自身强度足够抵抗起吊、调平过程中的应力,不至于出现开裂。但考虑到板块在制作、存储、运输及安装过程

中的不确定性,为预防发生安全事故,仍需要根据钢筋混凝土结构设计原理进行考虑起吊、调平过程的板块配筋计算。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[6]中的规定,对板块的起吊工况进行承载能力极限状态计算,对于矩形截面,其正截面的受弯承载力计算图示如图14所示,计算公式如式(2)、式(3)所示。

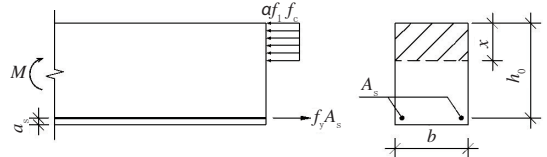


图14 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算图

$$M \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s \quad (3)$$

式中: M 为弯矩设计值,根据表2的计算结果取用,kN·m; α_1 为系数,本例中取1.0; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值,C35混凝土取16.7 MPa; b 为截面宽度,mm; x 为等效矩形应力图形混凝土受压区高度,mm; h_0 为截面有效高度,mm; f_y 为钢筋抗拉强度设计值,HRB400钢筋取360 MPa; A_s 为受拉区纵向钢筋截面面积,mm²。

将各项数据代入式(2)、(3)计算可得,板块所需纵向钢筋截面面积182.52 mm²,配筋率为0.03%;板块所需横向钢筋截面面积145.94 mm²,配筋率0.02%。

同时,考虑构造要求,对于板类受弯构件,在采用C35混凝土、强度等级400 MPa的钢筋时,经计算最小配筋率需达到0.196%^[6]。

由此可见,计算所得配筋率远小于构造要求的最小配筋率,故本工程板块按最小配筋率配筋即可。采用直径12 mm的钢筋时,钢筋计算间距约为240 mm,本工程设计取200 mm。

5.3 板块配筋方案

根据上述两方面力学要求的计算结果,确定本工程混凝土板块的配筋方案:采用直径12 mm、间距200 mm的HRB400双层双向钢筋网片。在实际布置钢筋时,还需考虑避让各类预埋构件及预留槽、孔,板块钢筋及各类构件预埋如图15所示。

6 材料设计

装配式混凝土路面所用的水泥混凝土原材料、钢筋、传力杆、拉杆及填缝料的技术要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[6]和现行行业标准《城镇道路路面设计规范》



图15 板块钢筋及构件预埋

(CJJ 169—2012)^[5]、《城镇道路工程施工与质量验收规范》(CJJ 1—2008)^[7]的相关规定。

起吊、调平装置可采用已有使用经验的成品装置,构件所采用的钢材等级不宜低于Q345B级,其质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)^[8]的规定,并做好镀锌等防腐处理。

板底注浆材料应选用具有较好流动性和流动性维持能力的材料,浆液的流动度不得小于340 mm,可工作时间不得少于30 min。

板底注浆材料在各时期的抗压强度应符合下列规定:

(1)撤去调平螺杆时,板底注浆材料的抗压强度不应小于0.35 MPa;

(2)开放交通时,板底注浆材料的抗压强度不应小于2.0 MPa。

装配式混凝土路面槽口的灌浆材料宜采用水泥砂浆类材料,水泥、砂、外加剂等原材料应符合国家现行标准《砌体结构工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011)^[9]的相关规定。

7 全寿命周期成本分析

以某城市道路修复工程为例,对装配式混凝土路面进行全寿命周期成本分析。如图16所示,某城市支路车行道为沥青混凝土路面,拟进行排水管道的翻排,沟槽长度为400 m,宽度为3.5 m,影响一条机动车道,该道路在日常高峰时段较为繁忙,需尽快恢复交通,完成修复。为合理推进修复工程,对三种路面结构方案的全寿命周期成本进行对比分析。

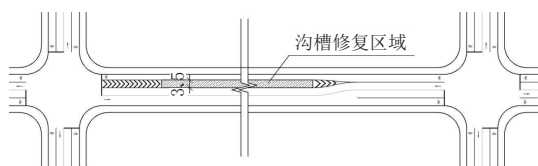


图16 修复范围平面示意图

方案一:采用常规沥青路面结构组合,路面结构由上至下为4 cm AC-13C(SBS改性)+8 cm AC-25C+

0.6 cm 稀浆封层+30 cm 水泥稳定碎石+15 cm 级配碎石。

方案二:采用目前有快速恢复交通需求项目的常用做法,即基层采用现浇水泥混凝土,设计阶段将水泥混凝土强度提高,以便浇筑混凝土后1~3 d内即可达到所需强度,然后加铺沥青面层;同时在混凝土基层中部设置一层连续钢筋网片,以控制反射裂缝。具体路面结构方案由上至下为:4 cm AC-13C(SBS改性)+8 cm AC-25C+聚酯玻纤无纺土工织物+热沥青黏层+25 cm C50 水泥混凝土(中部放置一层直径12 mm、间距200 mm的双向钢筋网片)+15 cm 级配碎石。

方案三:基层采用装配式水泥混凝土。具体路面结构方案由上至下为:4 cm AC-13C(SBS改性)+8 cm AC-25C+聚酯玻纤无纺土工织物+热沥青黏层+25 cm C35 装配式钢筋混凝土(设置直径12 mm、间距200 mm的双层双向钢筋网片)+15 cm 级配碎石。

路面结构全寿命周期中,本次分析主要考虑的现金流出项包括:工程费用、日常养护费用、翻修费用以及施工期由于拥堵、绕行、延误产生的社会车辆油耗增加费用。

各方案的工程费用单价如表3所列。

表3 各方案工程费用单价

方案	方案一	方案二	方案三
工程费用/(元·m ²)	446	545	830

各方案的日常养护费用均按每年20元/m²计。

方案一采用常规沥青路面结构组合,设计工作年限为10 a;方案二、方案三采用水泥混凝土基层,工作年限可达20 a。故以20 a为周期进行分析,方案一需在第10 a和第20 a各进行一次翻修,方案二、三需在第20 a进行一次翻修。方案一的路面翻挖费用为147元/m²;方案二的翻挖费用为133元/m²;方案三的基层可在切割拉杆及传力杆后,利用原有的起吊、调平构件,直接整板起吊,翻挖费用为122元/m²。

该路段现状双向交通量7 800 pcu/d,第10 a预测双向交通量达到9 500 pcu/d,第20 a预测双向交通量达到10 500 pcu/h。假设施工期间由于拥堵、绕行、延误等原因,车均油耗增加0.1 L,油价按7.5元/L计,各方案在各阶段对交通的影响时间及油耗增加费用如表4所列。

方案二、三中的钢筋可在翻修时回收,计为计算期末的现金流入项,钢筋回收价格按2 000元/t计算。

表4 各方案影响交通时间及诱增社会成本

方案	方案一	方案二	方案三
建设期影响交通时间/d	12	5	3
建设期油耗增加费用/元	70 200	29 250	17 550
第10 a翻修影响交通时间/d	15	0	0
第10 a翻修油耗增加费用/元	106 875	0	0
第20 a翻修影响交通时间(仅考虑老路翻挖时间,新建路面时间计入下一周期)/d	3	3	2
第20 a油耗增加费用/元	23 625	23 625	15 750

综上所述,则各方案现金流量图如图17至图19所示。

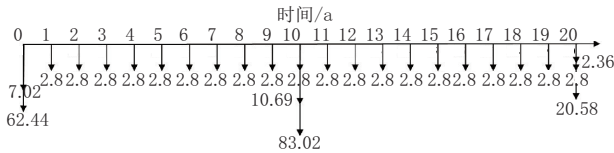


图17 方案一现金流量图(现金流量单位:万元)



图18 方案二现金流量图(现金流量单位:万元)



图19 方案三现金流量图(现金流量单位:万元)

以净现值表征各方案的全寿命周期成本,计算公式如式(4)所示。

$$NPV = \sum_{t=0}^n (CI - CO)_t (1 + i)^{-t} \quad (4)$$

式中:NPV为净现值,万元;n为计算期期数;CI为现金流入量,万元;CO为现金流出量,万元;i为折现率。

结合现阶段我国的经济的发展情况,折现率*i*取5%。经计算,各方案的全寿命周期成本如表5所列。

表5 各方案全寿命周期成本

方案	方案一	方案二	方案三
全寿命周期成本/万元	170.53	121.09	158.01

由上述计算结果可知,在道路修复工程中,相较于常规沥青路面结构组合方案,装配式路面方案在全寿命周期内能够展现出一定的直接经济效益优势。尽管与其他装配式建筑类似,装配式路面工艺的直接经济成本目前仍略高于现浇工艺,但其在施工过程中却显著减少了对环境与社会的负面影响,这部分难以货币量化的正面效果也不容忽视。并且,在未来,通过优化项目管理、改进施工工艺、加强新型材料及专用设备的研发,装配式路面的成本还有望进一步降低。

8 结 语

装配式混凝土路面在设计过程中,除了需要满足普通水泥混凝土路面的相关要求外,还需要特别关注板块在制作、运输及安装过程中的构造与力学要求。由于其构造及配筋设计更为复杂,且相互影响,需要设计人员进行全面而细致的协调与整合。

需要指出的是,本文举例的应用场景较为简单,对于涉及平曲线段、竖曲线段以及路面附属构筑物等复杂场景的装配式路面设计,仍需紧密结合路面的预制与安装工艺,进行深入的研究和探讨。在未来,针对大规模的工程应用,可以进一步开发计算机辅助设计程序,结合BIM技术,使装配式路面的设计、预制及装配更加智能、高效。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅.关于大力发展装配式建筑的指导意见:国办发[2016]71号[EB/OL].(2016-09-27)[2024-08-13]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-09/30/content_5114118.html.
- [2] 交通运输部.关于实施绿色公路建设的指导意见:交公路发[2016]93号[EB/OL].(2016-05-16)[2024-08-13]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202006/t20200623_3312476.html.
- [3] Tayabji S, Ye D, Buch N. Precast Concrete Pavements: Technology Overview and Technical Considerations[J].PCI Journal, 2013, 58(1): 112-128.
- [4] JTG D40—2011,公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [5] CJJ 169—2012,城镇道路路面设计规范[S].
- [6] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- [7] CJJ 1—2008,城镇道路工程施工与质量验收规范[S].
- [8] GB/T 700—2006,碳素结构钢[S].
- [9] GB 50203—2011,砌体结构工程施工质量验收规范[S].