

城市不同透水铺装结构的透水效率计算及分析

朱浩然^{1,2}, 于明明^{1,2}, 张杨^{1,2}

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112; 2. 新型道路材料国家工程实验室)

摘要: 渗水、蓄水、排水是城市透水铺装结构设计的重要功能。该文针对不同的透水铺装结构,分析其产流机制,提出排水型路面结构排水性能评价指标,建立全透型路面储水—渗透模型和计算方法。研究结果表明:双向四车道、双向六车道的排水型路面,在大雨或暴雨的条件下,不会产生明显的地表径流,单向路幅宽度小于14 m,其渗流时间在2 h以内,具有较优的排水功能;全透型路面土基渗透速度直接影响雨水的下渗能力,路面结构出现最大储水量时间滞后于最大降雨强度发生时间,在整个降雨过程中,全透型路面结构中的最高蓄水水位为192.918 6 mm,未超出级配碎石设计厚度250 mm,满足排水功能要求。

关键词: 排水型路面; 全透型路面; 模型; 评价指标; 数值分析

国家统计局最新数据显示,2018年中国城镇化率达到59.58%。随着城市化进程的不断加快,导致“城市病”日益突出,如今城镇地表越来越多地被沥青和水泥混凝土等“硬化”材料所覆盖。强降雨气候,地表径

流量增大,增加了城市排水管网的负担,引起城市内涝。为了有效解决城市内涝问题,国外开发了一系列城市暴雨径流控制技术,出台了一系列暴雨管理规划和指南。2013年12月以来,中国在总结国外雨水管

(2) 由于集料表面沥青膜脱落增加了路表纹理的粗糙度,在磨耗早期摆值存在一个增长的过程。但是随着磨耗次数的增加,粗集料开始被磨光,抗滑性能开始大幅衰减直至趋于稳定。

汽运,2013(6)。

(3) 加速磨光之后,石灰岩排水沥青混合料抗滑性能的衰减幅度大于玄武岩排水沥青混合料和玄武岩SMA沥青混合料。建议关注石灰岩排水沥青路面抗滑性能恢复问题,或者可将其用于双层排水沥青路面的下排水层。

[6] 任妍妍. 经济型 SMA 粗集料工程特性及技术标准研究[J]. 公路,2015(6).

[7] 熊剑平,刘可,翟龙,等. 石灰岩沥青混合料抗滑性能衰变特性研究[J]. 材料导报,2018(S1).

[8] 禚炜安. 基于石灰岩的沥青混合料抗滑性能评价研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2014.

[9] 曹佳斌. 以石灰岩为粗集料的排水沥青路面结构性及功能性研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2017.

[10] 董昭. 加速磨耗试验与沥青路面材料抗滑性能衰变规律研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2011.

[11] 杨众,郭忠印,侯芸. 沥青混凝土防滑磨耗层防滑性能加速试验方法的研究[J]. 华东公路,2002(2).

[12] 王仕峰,马庆丰,李剑新. 排水路面用高粘度改性沥青的研究与应用进展[J]. 石油沥青,2012(1).

[13] 郑求才,袁迎捷,郑竞友,等. 不同高粘沥青对排水路面性能的影响研究[J]. 中外公路,2008(3).

[14] 尘福涛,李明亮,曹东伟,等. 排水沥青路面表面强化技术[J]. 筑路机械与施工机械化,2017(11).

[15] 段宝东,李明亮,李俊,等. 双层排水沥青路面在高速公路养护工程中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2018(4).

参考文献:

[1] 吴限,钱海涛. 排水性沥青路面长期使用性能的测试分析[J]. 交通科技,2015(5).

[2] 贾理杰. 排水沥青路面长期性能观测[J]. 公路与汽运,2012(1).

[3] 潘琛明. 排水性沥青路面机能衰变规律及功能性养护对策[J]. 交通世界(建养·机械),2011(6).

[4] 时正凯,陈锋. 排水性沥青路面抗滑性能测试分析[J]. 北方交通,2016(11).

[5] 张立华. 石灰岩用于路面上面层适用性分析[J]. 公路与

收稿日期:2020-12-02

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFE0108200);江苏省交通科学研究计划项目(编号:2016Y03)

作者简介:朱浩然,男,博士,高级工程师。E-mail:zhr75@jsti.com

理体系的基础上,创新性提出“海绵城市”建设战略方针,相继出台多部海绵城市建设政策方针和指导意见。

道路作为当代人们活动的载体,为响应国家“海绵城市”建设战略号召,透水路面应运而生,在雨天可使路面雨水迅速下渗或存储于路面结构内部。路面的透水效率是衡量透水路面的一个重要方面,也是透水路面结构设计的重要参数。张朝旭在分析透水路面渗流机制的同时,阐述了透水路面的影响因素;朱天同研究结果表明,大孔隙沥青混合料路用性能优异,且具有显著的降噪效果;丁庆军等研究了透水沥青路面的降噪影响因素,并对试验段的长期性能检测进行跟踪观测;程冬扬等基于 Van Genuchten 模型,得到了透水路面非饱和状态下的排水时间数学模型;蒋玮等基于对透水沥青路面的渗流过程进行模型建立,且对其长期性能进行评估;Kuang 等对透水路面材料的空隙特征与渗透速度的关系模型进行研究;Kelly. A. Collins 等选择 4 种不同类型的透水铺装材料,研究各种因素对透水效果的影响;贾刚龙等针对透水铺装在海绵城市建设中常见问题进行探究分析;但汉成等建立了沥青路面的渗流模型,研究路面裂缝对渗流速率的影响。

目前,国内外学者对大孔隙沥青混合料的路用性能和降噪特性进行了大量研究,并对其混合料的长期性能进行了跟踪观测。然而对于不同透水铺装结构透水效率和数值计算鲜有报道。该文针对不同的透水铺装结构,分析其产流机制,提出相应的排水能力评价指标,建立透水路面的储水—渗透模型,并对其透水效率进行计算和分析,为“海绵城市”透水铺装结构的设计提供理论基础。

1 不同透水铺装结构产流机制

参照 CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》,透水路面按照水流路径可分为 3 类:排水型路面、半透型路面和全透型路面,其路面结构如图 1 所示。半透型路面与排水型路面类似,可以看成排水层厚度更大的排水型路面,因此该文针对排水型路面和全透型路面两种类型,分析其产流机制,分别提出相应的评价指标及透水效率计算方法。

1.1 排水型路面产流机制

排水型路面从受到降雨作用开始直至雨水完全排出,会经历以下 3 个阶段:

(1) 雨水的表面浸润。在雨水的作用下,水不断附着在孔隙表面,水膜的厚度增加,浸润排水路面表层

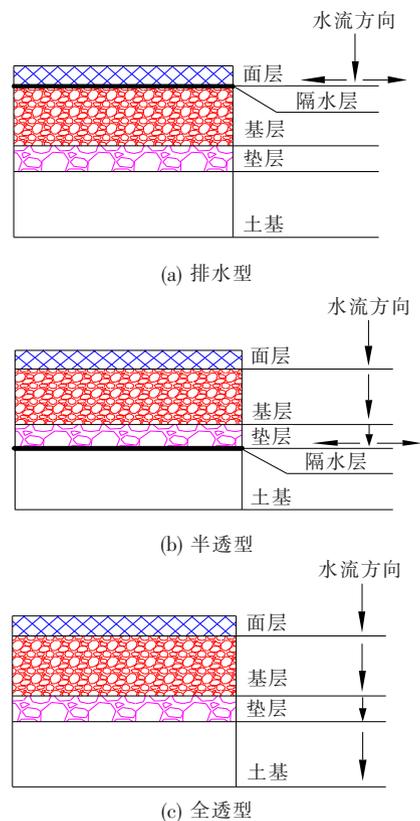


图 1 不同透水路面结构示意图

并逐渐往下渗透,路面结构开始排水。

(2) 饱和和稳定流量状态。随着降雨的持续,排水型路面孔隙完全被雨水填充,排水达到饱和和稳态流量状态。当降雨强度与面层的稳态流量相等,则产生稳态的饱和和流动。当降雨强度大于饱和和稳态流量,除在面层内形成稳态的饱和和渗流外,将会形成地表径流。

(3) 路面结构中雨水的排出。降雨结束,蓄积在路面结构中的雨水从路面结构中或相应的排水设施排出。

1.2 全透型路面产流机制

全透型路面结构中雨水的渗流过程,按时间先后划分为如下 4 个阶段:

(1) 面层结构润湿。降雨初期,降落在面层结构中的雨水在外力作用下,浸入面层结构,在范德华力影响下,在面层结构中生成水膜。

(2) 雨水在路基中渗入。降雨过程持续,路面结构已全部润湿,因路基具有渗透系数,雨水通过路基下渗。

(3) 雨水在路面中储蓄。随着降雨强度的增大,当降雨强度大于路基渗透速率时,路面开始积蓄雨水。且随着雨水强度的增大,路面中储蓄的雨水持续增多,直至降雨强度等于路基渗透系数时,储蓄的雨水量

最大。

(4) 雨水从路面结构中排出。随着降雨强度的衰减,且小于路基的渗透系数时,储蓄于路面结构中的雨水通过路基渗透排出。

2 排水型路面评价指标及计算

分析排水型路面的产流机制,排水型路面排水能力评价包括两个方面:① 无明显地表径流所对应的极限降雨强度或 1 d 的降雨量;② 在饱和和稳定流量状态,计算水从路面排出所需的渗流时间。

2.1 极限降雨强度的计算

根据达西定律,降雨期间路面排水层的水流流量计算公式如下:

$$Q = k_b A i \quad (1)$$

$$A = \frac{h i_h}{i} \quad (2)$$

式中: Q 为排水层的水流流量(m^3/s); k_b 为透水材料的渗透系数(m/s); i 为路面纵横坡的合成坡度; i_h 为路面的横坡坡度; A 为单位长度内垂直于水流方向的过水断面面积(m^2); h 为排水路面的厚度(m)。

根据 JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》,汇

水面积内地表径流流量计算公式如下:

$$Q = 16.67 \varphi q F \quad (3)$$

式中: Q 为地表径流流量(m^3/s); φ 为径流系数; q 为降雨强度,即单位时间内的降雨深度(mm/min); F 为单位长度内汇水面积(km^2), $F = B \sqrt{1 + \frac{i_z^2}{i_h^2}}$ 。

无明显地表径流的极限降雨强度下,认为排水层的水流流量与汇水面积内地表径流流量相同。对式(1)和(3)进行变换,可以得到排水型路面无明显地表径流所对应的极限降雨强度,其计算公式如下:

$$q = \frac{k_b h i_h}{16.67 \varphi F} \quad (4)$$

由式(4)可以看出:排水型路面无明显地表径流所对应的极限降雨强度,其与排水材料的渗透系数、排水层厚度、路幅宽度等参数有关。结合中国排水型路面的应用情况,假定排水沥青混合料的设计空隙率为 20%,渗透系数为 1.0 cm/s,路面横坡和纵坡均取 2.0%,径流系数取 0.90,排水路面厚度分别取 4 cm 和 10 cm,双向两车道、双向四车道、双向六车道单向路幅宽度分别取 4.5、8.5、12 m 时,排水结构层的稳定流量和极限降雨强度计算结果如表 1 所示。

表 1 不同排水路面结构稳定流量和极限降雨强度

排水结构层厚度 h/cm	单向路幅宽度/ m	汇水面积/ m^2	稳定流量 $Q/(\times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	极限降雨强度 $q/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	12 h(24 h)降雨量/ mm
4	4.5	6.364	8	0.084	60.48(120.96)
	8.5	12.021	8	0.044	31.68(63.36)
	12.0	16.971	8	0.031	22.32(44.64)
10	4.5	6.364	20	0.210	151.20(302.4)
	8.5	12.021	20	0.111	79.92(159.84)
	12.0	16.971	20	0.079	56.88(113.76)

由表 1 可以看出:随着路幅宽度的增加,所能承受的无明显地表径流的极限降雨强度逐渐减小。而排水层路面厚度越大,对应的无明显地表径流的极限降雨强度越大,排水效果越好。

典型的单层排水路面即排水结构层厚度为 4 cm 时,双向四车道、双向六车道排水型路面的极限降雨强度分别为 0.044、0.031 mm/min,可满足 1 d、12 h 降雨量为 63.36、44.64 mm 的条件下,不产生明显径流的要求。根据国家气象局颁布的降雨强度等级划分标准(表 2),说明双向四车道、双向六车道的排水型路

面,在大雨或暴雨的条件下,雨水在排水型路面面层内通过渗流形式排出,不会产生明显的径流。

表 2 降雨强度等级划分标准

划分等级	1 d(24 h)降水量/ mm
小雨	0.1~9.9
中雨	10.0~24.9
大雨	25.0~49.9
暴雨	50.0~99.9
大暴雨	100.0~249.9
特大暴雨	≥ 250.0

2.2 饱和渗流排水时间的计算

AASHTO 基于非稳态流量计算的方程有 Barber 和 Sawyer 方程,其计算式如下:

$$T = \frac{\Delta T n_e L_R^2}{kh} \quad (5)$$

$$\Delta T = 2US - S^2 \ln\left(\frac{S+2U}{S}\right) U \leq 50\% \quad (6)$$

$$S = \frac{h}{L_R \sqrt{i_z^2 + i_h^2}} \quad (7)$$

式中: T 为排水时间; h 为排水层厚度; k 为排水结构的渗透系数; n_e 为排水铺装材料的有效空隙率; L_R 为渗流路径长度; ΔT 为时间系数,以基层排出渗入水的 50% 所用时间来评价,即 $U=50\%$,用式(6)计算; S 为排水结构底面的倾斜系数,用式(7)计算。

中国 JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》中,渗入水在排水层内的渗流时间按式(8)计算:

$$T = 0.69 \frac{L_s}{3600v_s} \quad (8)$$

$$L_s = B \sqrt{1 + \frac{i_z^2}{i_h^2}} \quad (9)$$

$$v_s = \frac{1}{n_e} k_b \sqrt{i_z^2 + i_h^2} \quad (10)$$

式中: T 为渗流时间(h); L_s 为渗流路径长(m); B 为单向坡度路面的宽度(m); v_s 为渗流速度(m/s); k_b 为透水材料的渗透系数(m/s); n_e 为透水材料的有效空隙率; i_z 、 i_h 为路面的纵坡和横坡。

比较 AASHTO 与中国 JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》排水时间计算公式可发现,两者基本一致,因此该文认为排水型路面渗入水在排水层内的渗流时间可按式(8)计算。

(1) 饱和渗流排水时间计算示例

该文路面的宽度,考虑常见的双向两车道、双向四车道及双向六车道 3 种情况。由于两侧路面是绝对轴对称的,只选取单幅路面研究即可。将机动车道路面宽度、路缘带与硬路肩的宽度之和作为排水型路面的研究宽度,双向两车道、双向四车道、双向六车道单向路幅宽度分别取:4.5、8.5、12 m。

结合中国排水型路面的实际应用情况,排水型路面的有效空隙率取 15%,排水沥青混合料的渗透系数为 0.01 m/s,路面横坡和纵坡均取 2.0% 时,路面的渗流速度按式(11)计算:

$$v_s = \frac{1}{15\%} \times 0.01 \times \sqrt{0.02^2 + 0.02^2} = 0.0019 \text{ m/s} \quad (11)$$

不同道路的半幅路幅宽度下,渗入水从路面排水层排出所需的渗流时间计算结果如表 3 所示。

表 3 排水时间计算结果

单向路幅宽度 B/m	渗流路径长/ m	单向路幅宽度 B/m	渗流路径长/ m
4.5	6.364	14.0	19.799
8.5	12.021	15.0	21.213
12.0	16.971		
...	...		

(2) 排水效果评价

AASHTO(1986)设计指南以排水程度 $U=50\%$ 所需时间(T_{50})作为评价指标,将排水质量分为优、良、中、差和很差 5 个等级,见表 4。JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》指出,渗入水在路面结构内的最大渗流时间,冰冻地区不应大于 1 h,其他地区不应超过 2 h。渗入水在路面结构内的渗流路径长度不宜超过 45~60 m。因此,可以认为水在路面结构内的渗流时间不超过 2 h 时,具有较好的排水效果。

表 4 AASHTO 排水设计评价标准

排水效果	排水时间 (排水 50%)	排水效果	排水时间 (排水 50%)
优	2 h	差	30 d
良	1 d	很差	不排出
中	7 d		

当半幅路幅宽度不超过 14 m 时,水从路面结构排出所需的渗流时间小于 2 h,满足最大渗流时间 2 h 的要求,因此排水型路面用于双向两车道、双向四车道以及双向六车道道路时,具有较好的排水效果。

3 全透型路面透水模型及分析

3.1 模型的建立

全透型路面可视为具有储水—排水的空间,雨水一方面渗入路面结构中,另一方面通过路基渗透作用向外排出,将结构简化成如图 2 所示。

设雨水入渗强度为 $W(t)$,雨水渗出强度 $V(t)$,根据水量平衡,可得到全透型路面储水—渗透模型如式(12)所示,从而计算出各时段路面结构的水位 h_i :

$$A \sum_{\text{base}}^{\text{surf}} n_i h_i(t) = A \int_0^t [W(t) - V(t)] dt \quad (12)$$

$$n_i = n_0 - \eta \quad (13)$$

式中: n_i 为各铺装层材料的设计连通空隙率; i 为全透型路面铺装结构层的个数; t 为降雨历时(s); $h_i(t)$ 为 t 时刻透水路面结构的蓄水高度。

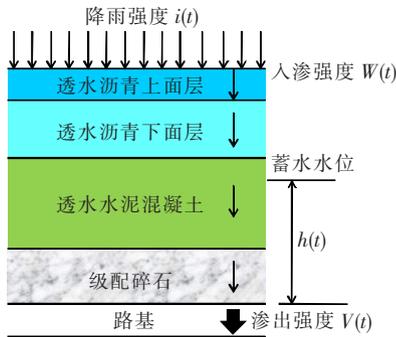


图 2 全透型路面简化模型

3.2 模型参数

(1) 雨水入渗强度 $W(t)$

雨水入渗强度 $W(t)$ 与降雨强度 $i(t)$ 和铺装层材料的渗透系数 k 有关。当降雨强度 $i(t) < k$ 时, $W(t) = i(t)$, 雨水完全下渗; 当降雨强度 $i(t) \geq k$ 时, $W(t) = k$, 部分雨水会在路面表面形成地表径流。一般而言, 铺装层材料具有较高的渗透系数, 远远大于降雨强度, 故取 $W(t) = i(t)$ 。

降雨强度 $i(t)$ 参照 GB 50014—2006《室外排水设计规范》建议的设计暴雨强度公式:

$$i(t) = \frac{a_p}{(t+b)^n} \quad (14)$$

$$a_p = c + d \lg p \quad (15)$$

式中: $i(t)$ 为设计重现期 p 内、降雨历时 t 内的降雨强度(mm/min); t 为降雨时间(min); p 为设计重现期(a); b, n, c, d 为回归系数。

(2) 雨水渗出强度 $V(t)$

雨水渗出强度 $V(t)$ 由雨水通过面层、基层到达路基顶面的强度 $W(t)$ 和路基入渗能力 $f(t)$ 来确定。当 $W(t) < f(t)$ 时, $V(t) = W(t)$, 到达路基顶面的雨水完全下渗, 排出铺装结构外部; 当 $W(t) \geq f(t)$ 时, $V(t) = f(t)$, 雨水不能及时下渗, 部分雨水在路面结构中蓄积。一般情况下, 透水铺装层的渗透能力远大于路基的实际渗透能力, 故取 $V(t) = f(t)$ 。

路基渗透能力 $f(t)$ 的衰减可由 Horton 公式表示:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (16)$$

式中: f_t 为 t 时刻路基的下渗速率; f_0 为路基土初始下渗率; f_c 为路基稳定渗透率; k 为路基渗透能力随

时间的衰减系数。

实际工程中, 可以按照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》中土的渗透试验方法(T0129—1993/T0130—2007)对路基的渗透速度进行测定。

(3) 透水路面各结构层的厚度和渗透速度

透水路面各结构层的厚度和渗透系数对雨水的下渗及存储有着重要影响。通常, 各结构层越厚、渗透系数越高, 透水效果越好。

通常透水铺装基层和面层材料具有较高的渗透系数, 而土基的渗透能力较弱, 故土基的渗透能力反映全透型路面对雨水的下渗能力, 是影响路面结构中存储雨水时间的主要因素。

3.3 全透型路面透水功能评价

全透型沥青路面各结构层材料、厚度和设计空隙率等参数, 如表 5 所示。沥青面层采用两层大空隙沥青混合料, 分别为 PAC-13 及 PAC-20; 上基层采用透水水泥混凝土, 下基层采用级配碎石; 路基材料为砂性土, 砂性土路基的渗透速度取 0.000 2 cm/s。

表 5 全透水路路面结构厚度和材料参数

结构层位	材料名称	厚度 h / mm	设计空隙率 n / %
上面层	PAC-13	40	20
下面层	PAC-20	60	20
上基层	透水水泥混凝土	200	20
下基层	级配碎石	250	35
路基	砂性土		

以南京市为例, 按照降雨模型选择降雨:

$$i = \frac{64.300 + 53.800 \lg p}{(t + 32.900)^{1.011}} \quad (17)$$

重现期为 5 年, 降雨历时为 24 h, 计算整个降雨过程中每个时刻路面结构累积的蓄水水位的高度, 如图 3 所示。

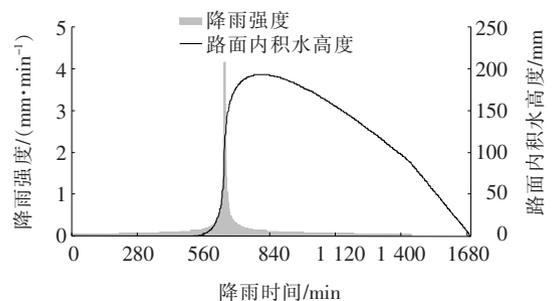


图 3 全透型路面结构降雨强度与蓄水高度随时间变化图

由图 3 可以看出: 在设计降雨重现期为 5 年、降雨

历时 24 h 的降雨过程中,随着降雨强度的变化和时间的推移,全透型路面结构的蓄水水位呈现出先增大后减小的规律。在整个降雨过程中,最大降雨强度为 4.154 5 mm/min,发生在第 648 min;而在整个降雨过程中,路面结构最高蓄水水位为 192.918 6 mm,未超出级配碎石设计厚度 250 mm,达到最高蓄水高度的时间在第 806 min,较最大降雨强度发生时间滞后了 158 min。

计算结果表明:该厚度设计下的全透型路面能够满足设定区域和给定降雨条件下的透水和排水功能,不会出现由于暴雨在路面结构中来不及排出而导致的路面积水现象。

4 结论

针对不同透水铺装结构,在分析其产流机制的基础上,提出排水型路面和全透型路面排水性能评价指标,并对全透型路面储水—渗透模型及计算方法进行研究,得出以下结论:

(1) 排水型路面排水能力评价包括两个方面:① 无明显地表径流所对应的极限降雨强度, $q = \frac{k_b h_i}{16.67 \varphi F}$; ② 在饱和和稳定流量状态,水从路面排出所需的渗流时间,即饱和渗流排水时间, $T = 0.69 \times \frac{L_s}{3600 v_s}$ 。

(2) 排水型路面评价结果表明:路幅宽度越小、排水路面厚度越大,所能承受的无明显地表径流的极限降雨强度越大,排水效果越好。根据国家气象局颁布的降雨强度等级划分标准,典型的双向四车道、双向六车道排水型路面可满足在大雨或暴雨的条件下,不产生明显径流的要求,排水效果较好。

(3) 建立了全透型路面储水—渗透模型计算公式, $A \sum_{base}^{surf} n_i h_i(t) = A \int_0^t [W(t) - V(t)] dt$, 从而可以计算得出整个降雨过程中各时段路面结构的水位 h_i , 其中土基的渗透速度直接影响全透型路面雨水的下渗能力,透水铺装结构层材料的渗透速度越大、结构层厚度越厚,抑制暴雨产生的地表径流效果越好。

(4) 典型全透型路面透水功能评价结果表明,在

整个降雨期间,路面结构最高蓄水水位为 192.918 6 mm,未超出级配碎石设计厚度 250 mm,能够满足设定区域和给定降雨条件下的透水和排水功能要求。

参考文献:

- [1] Nelson E J, Booth D B. Sediment Sources in an Urbanizing, Mixed Land-Use Watershed[J]. Journal of Hydrology, 2002, 264(1): 51-68.
- [2] Debo T N, Reese A. Municipal Storm Water Management [M]. United States: The Chemical Rubber Company (CRC) Press, 2002.
- [3] 张朝旭. 透水性沥青路面渗透机制及其影响因素分析[J]. 交通世界(中旬刊), 2016(12).
- [4] 朱天同. 大空隙降噪沥青混合料的路用性能研究[J]. 城市道桥与防洪, 2015(7).
- [5] 丁庆军, 沈凡, 刘新权, 等. 透水型沥青路面材料的降噪性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010(2).
- [6] 程冬扬, 黄立葵, 沈庆. 透水路面非饱和状态排水时间数值分析[J]. 公路工程, 2018(1).
- [7] 蒋玮, 沙爱民, 肖晶晶, 等. 透水沥青路面的储水渗透模型与效能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013(1).
- [8] Kuang X, Sansalone J, Ying G, et al. Pore-Structure Models of Hydraulic Conductivity for Permeable Pavement[J]. Journal of Hydrology, 2011, 399(3-4): 148-157.
- [9] Kelly A, Collins, William F. Hunt, Jon M. Hathaway. Hydrologic Comparison of Four Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(12): 1146-1157.
- [10] 贾刚龙, 彭汝江, 刘爱花. 透水铺装应用于海绵城市建设中的若干问题探究[J]. 价值工程, 2018(16).
- [11] 但汉成, 李亮, 杨小礼, 等. 基于渗流理论的沥青路面渗入率计算与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010(2).
- [12] CJJ/T 190-2012 透水沥青路面技术规程[S].
- [13] 赵飞, 陈建刚, 张书函, 等. 透水铺装地面降雨产流模型研究[J]. 给水排水, 2010(5).
- [14] 关彦斌. 大孔隙沥青路面的透水机理及结构设计研究[D]. 北京交通大学博士学位论文, 2008.
- [15] AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structure[M]. Washington D. C. AASHTO, 1993: 1-15.
- [16] JTG/T D33-2012 公路排水设计规范[S].