

高速公路超高缓和段排水沥青路面空隙率及内部排水设计方法

张同国¹, 张修冬², 姜术荣¹, 任宪富¹, 曹卫东²

¹山东高速潍坊发展集团有限公司, 山东 潍坊

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2022年9月1日; 录用日期: 2022年9月19日; 发布日期: 2022年9月26日

摘要

高速公路超高缓和段由于纵横坡度较小, 极易造成路面积水。为解决超高缓和段路面积水问题, 依托青临高速公路某超高缓和段路面工程, 提出了排水沥青路面设计方案。首先结合工程案例, 给出了无路面积水和水膜厚度小于临界水膜厚度两种工况下的空隙率计算方法。然后, 提出了一种匹配排水沥青路面内部排水的横向排水槽结构, 给出了横向排水槽尺寸与数量的确定方法。案例计算结果表明, 本文给出的排水路面目标空隙率及内部排水设施设计方法是可行与合理的, 可为解决高速公路超高缓和段路面积水难题提供参考。

关键词

排水沥青路面, 超高缓和段, 空隙率, 横向排水槽, 设计方法

Design Method for Air Void and Internal Drainage of Porous Asphalt Pavement at Highway Superelevation Transition Section

Tongguo Zhang¹, Xiudong Zhang², Shurong Lou¹, Xianfu Ren¹, Weidong Cao²

¹Shandong Expressway Weifang Development Co., Ltd., Weifang Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Received: Sep. 1st, 2022; accepted: Sep. 19th, 2022; published: Sep. 26th, 2022

Abstract

The superelevation transition section of the highway is highly susceptible to water on the roadway

文章引用: 张同国, 张修冬, 姜术荣, 任宪富, 曹卫东. 高速公路超高缓和段排水沥青路面空隙率及内部排水设计方法[J]. 土木工程, 2022, 11(9): 1019-1026. DOI: 10.12677/hjce.2022.119111

due to the low longitudinal and transverse slopes. In order to solve the problem of water on the road surface of the superelevation transition section, the design of porous asphalt pavement was proposed based on a pavement project of a superelevation transition section of Qinglin Expressway. Firstly, the calculation method of air void under two working conditions of no road surface water and water film thickness less than critical water film thickness is given with engineering cases. Then, a transverse drainage channel structure matching the internal drainage of the porous asphalt pavement is proposed, and a method for determining the size and number of transverse drainage channels is given. The results of the case calculations show that the target air void of porous asphalt pavement and the design method of internal drainage facilities given in this paper are feasible and reasonable, which can provide a reference for solving the problem of water on the road surface of the superelevation transition section of highway.

Keywords

Porous Asphalt Pavement, Superelevation Transition Section, Airvoid, Horizontal Drainage Trough, Design Methodology

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速公路超高过渡段是指从路线直线段的双向路拱渐变到圆曲线段单向横坡的路面横坡渐变的路段。渐变过程中,内侧车道边缘降低而外侧边缘升高,因此外侧车道的横坡从负变为正会出现一个零坡度断面[1]。当合成坡度小于 0.5% 时,路面就极易出现积水现象,严重影响行车安全[2]。针对超高过渡段的排水问题,目前的解决方法主要有:延长中央分隔带中沟的长度及加密横向排水管[3]、嵌入式横向排水路面[4]、路面切槽构建微型截水沟[1]、振动标线[5]等。上述方法对路面积水有一定的缓解作用,但对于年平均降雨量大于 600 mm 的地区及多车道高速公路,则排水能力很难满足路面排水要求,而且长时间积水影响路面的性能与使用寿命。排水沥青路面由于表面排水功能层(PAC)内部有互相连通的大空隙结构,使路面降水不仅能从路表水平向排走,还能将渗入的雨水直接通过该层横向连通空隙排出[6]。因此排水沥青路面具有良好的排水、抗滑和降噪等路用性能,可显著地提高雨天的行车安全,是解决超高过渡段路面积水一种普遍适用的可行方案。

排水沥青路面作为一种环境友好型路面已逐渐引起公路建设领域的广泛关注。张燕飞[7]将排水沥青路面应用于多车道高速公路超高过渡段,PAC-13 排水沥青路面已成功应用于广州滨江大道、浦东机场北通道全高架、宁波环城南路等工程[8]。沈安琪[9]提出南方多雨地区高速公路“零坡段”PAC-13 排水路面的合理配合比及其碾压工艺,并成功应用于开阳高速公路,结果表明排水沥青路面的应用可显著提升路面的排水能力。在排水沥青路面设计过程中,不仅要满足普通沥青路面的应力(应变)或强度,还应考虑排水能力的设计指标[10]。排水沥青路面的渗透能力与集料的级配、沥青用量、空隙率、空隙结构(形状、连通性、弯曲率)及水力梯度有关,其中空隙率是最关键的因素[11]。肖鑫等[12]建立排水沥青路面的渗透计算模型,依据实际降雨强度来确定排水沥青路面的目标空隙率。马翔等[13]通过求解排水面层渗流模型的数值解,提出空隙率确定的指导思想。汪鸿山等[14]采用 CFD 方法分析了不同结构层孔隙率对透水性沥青路面渗透性能的影响规律,提出不同设计因素下排水沥青混合料的沥青路面结构以及混合料配比设计方法。目前空隙率的确定尚未形成一个比较准确的方法。本文主要依据现行规范,结合青临高速公路

该路段位于山东省潍坊市境内，依据潍坊市气象局公布的潍坊市降雨强度计算公式[15]：

$$q = \frac{4843.466 \times (1 + 0.984 \lg P)}{(t + 19.481)^{0.932}} \quad (1)$$

式中： q 为暴雨强度(L/(S·hm²))； P 为降雨重现期(年)； t 为降雨历时(min)。

根据《公路排水设计规范》(JTGT D33-2012)高速公路的设计重现期为5年[16]，排水路面设计降雨历时取30 min。为统一量纲取：

$$q_{p,t} = \frac{1000 \times 60}{1 \times 10000 \times 1000} = 6 \times 10^{-3} q \quad (2)$$

因此该路段的降雨强度为1.292 mm/min。

3. 目标空隙率确定

雨水从路表面进入排水沥青路面结构内部可分为三个阶段[11]。第一阶段，降雨初始时刻，面层处于干燥状态，雨水降落到路面之后，面层表面被初步浸润。第二阶段，当路表面的含水量大于最大持水量时，雨水开始在重力与毛细管力的作用下向下渗入到空隙当中，逐步填充各种空隙，直至饱和，该过程称之为路表空隙的填充。第三阶段，随着降雨的继续，在满足路面对水分的吸收与蓄积以后，雨水将继续往面层深处渗透，直至排水层底层，并通过中面层开设的沟槽排出路面。因此，只有保证设计空隙率对应的透水系数大于降雨强度才能实现路面基本不积水。下面按照路面无积水与路面水膜厚度小于临界水膜厚度两种情形给出空隙率的计算方法。

3.1. 路面无积水

在《排水沥青路面设计与施工技术规范》(JTGT/T 3350-03-2020) [17]中提出饱和入渗强度与沥青混合料的透水系数存在如下关系：

$$W_{\text{饱}} = \frac{h C_{rw} \sqrt{i_z^2 + i_h^2}}{100L \sqrt{1 + \frac{i_z^2}{i_h^2}}} \quad (3)$$

式中： $W_{\text{饱}}$ ——路面饱和入渗强度(mm/min)；

C_{rw} ——排水沥青混合料透水系数(cm/s)；

h ——排水面层(排水功能层)厚度(cm)；

i_z ——纵坡坡度(%)；

i_h ——横坡坡度(%)；

L ——单向路面宽度(m)，对于高速公路为半幅路面宽度。

当饱和入渗强度等于降雨强度时，路面恰好不出现地表径流，此时对应的透水系数：

$$C_{rw} = \frac{100W_{\text{饱}} L \sqrt{1 + \frac{i_z^2}{i_h^2}}}{h \sqrt{i_z^2 + i_h^2}} \quad (4)$$

式中，路面饱和入渗强度 $W_{\text{饱}}$ 等于前文确定的降雨强度1.292 mm/min；路面宽度 L 取18.75 m；超高缓和段中路面纵坡 $i_z = -0.4\%$ ，路面横坡取其平均值 $i_h = 1\%$ ；排水面层厚度 h 为4 cm，由此计算得排水沥青混合料的透水系数 $C_{rw} = 1.01$ cm/s。

根据相关研究表明, 排水沥青混合料 PAC-13 的空隙率(n)与透水系数具有如下指数函数的关系[18]:

$$C_{rw} = 0.0372e^{16.379n} \quad (5)$$

因此, 计算得到本路段的设计空隙率为 20.1%。由于式(5)是基于室内试验获得经验性公式, 因此实际采用的空隙率建议通过室内透水系数实测试验进行适当修正。

3.2. 路面水膜厚度小于临界水膜厚度

由于空隙率不仅影响路面排水性能, 而且对沥青混合料的路用性能尤其抗飞散性能有很大的影响, 因此空隙率的确定要平衡排水能力与路用性能之间的关系。当根据路面无积水工况确定的空隙率较大而不能满足路用性能时, 应首先保证路面的水膜厚度小于临界水膜厚度, 否则将会对行车安全造成不利影响[19]。规范中给出的轮迹带水膜厚度与临界水膜厚度计算公式如下:

$$h_{\text{轮}} = 1.3589 \left[\frac{(100WL - kh\sqrt{i_z^2 + i_h^2})nl}{(i_z^2 + i_h^2)^{\frac{1}{4}}} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (6)$$

$$h_{\text{临}} = 1000 \left[\frac{G}{(\sqrt{2} - 1)\rho w v^2 r^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (7)$$

式中: $h_{\text{轮}}$ ——轮迹带水膜厚度(mm);

$h_{\text{临}}$ ——临界水膜厚度(mm);

W ——降雨强度(cm/s);

L ——单向路面宽度(m), 对于高速公路为半幅路面宽度;

k ——渗透系数, 常数;

l ——最外侧车行道右侧轮迹带距离路面左边缘距离(m);

n ——粗糙系数, 经验常数, 排水沥青路面一般取 0.03;

G ——车重(N), 本设计取 500 kN;

ρ ——水的密度(kg/m^3), 取值 1000;

w ——车胎宽度(m), 本设计取 0.2;

v ——车速(m/s), 本设计取 33.3;

r ——轮胎半径(m), 本设计取 0.3。

将上述参数的具体数值代入公式可得临界水膜厚度为 1.301 mm, 若使轮迹带水膜厚度小于临界水膜厚度, 则渗透系数必须大于 1.197。

据相关研究[11], 排水沥青混合料的空隙率与渗透系数具有如下关系:

$$n = 5.6 \sqrt{\frac{k S_{\text{Agg}}^{5.1} \mu}{2\gamma}} \quad (8)$$

式中: μ ——水的动力粘度, 约等于 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;

γ ——水的重度, 当水温为 20°C 时, $\gamma = 9.79 \text{ kN}/\text{m}^3$;

S_{Agg} ——集料的比表面积(mm^{-1})。

若排水沥青混合料集料的比表面积一般取值 6.0 [11], 则当水膜厚度小于临界水膜厚度时空隙率不应

小于 16.1%。很显然，该工况下确定的排水沥青路面空隙率小于路面无积水工况下确定的空隙率。

上述方法为 PAC 设计人员设计孔隙率提供了两种选择，可以实现 PAC 路面在保证排水能力足够的同时，其路用性能也可符合规范要求，从而提高 PAC 路面的功能持久性和使用寿命。PAC 设计时最终采用的目标空隙率取决于公路所处的实际工况与业主要求，但不得小于由临界水膜厚度确定的空隙率。

4. 排水路面内部排水设施设计

一般路段的排水沥青面层通过路线的横、纵坡度将积水及下渗水从面层侧面排入路侧的排水设施。由于超高缓和段横、纵坡度较小，仅依靠排水沥青面层的侧向排水是难以将路面积水及时排出路面结构的。借鉴日本排水沥青路面设计规范，采用在 PAC 层下面的中面层顶部开槽的方式将下渗的积水排出路面，其结构示意图如图 3 所示。

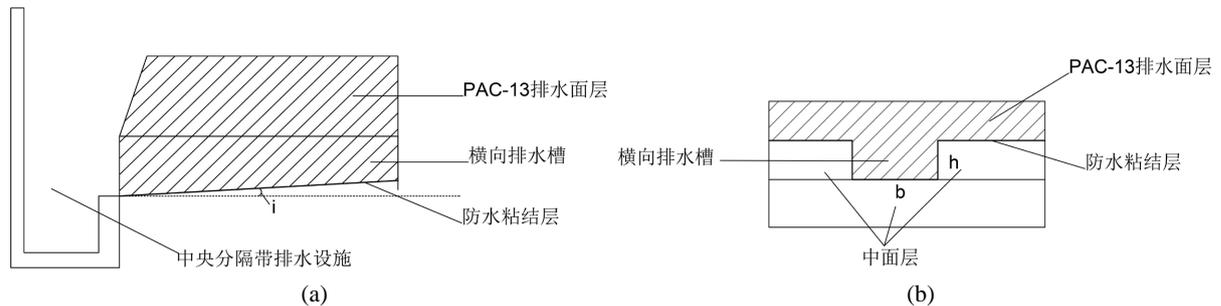


Figure 3. Schematic diagram of the lateral drainage facilities. (a) Longitudinal section; (b) Cross-sectional view

图 3. 横向排水设施示意图。(a) 纵断面图；(b) 横断面图

设计的横向排水槽具有一定的坡度，从而实现快速排出 PAC 下渗的积水。横向排水槽可采用 PAC-13 或级配碎石填充，具体的尺寸和数量应根据横向排水槽的排水能力和降雨强度进行设计。下面通过计算示例给出确定横向排水槽尺寸和间隔距离的方法。

4.1. 设计径流量

根据《公路排水设计规范》，各项排水设施所需排泄的设计径流量如下：

$$Q = 16.67\psi q_{p,t} F \quad (9)$$

式中， Q 为设计径流量(m^3/s)； $q_{p,t}$ 为设计重现期和降雨历时内的平均降雨强度(mm/min)； ψ 为径流系数； F 为汇水面积(km^2)。

规范中，高速公路路面表面排水降雨重现期 P 取 5；沥青混凝土路面径流系数取 0.95。

降雨历时为由汇水区最远点到排水设施处的坡面汇流历时和在沟或管内由入口到控制点的沟管汇流历时之和。对于单向三车道路面表面排水的路面汇水历时取 5 min，沟内由入口到控制点的沟管汇流历时可按下列式计算：

$$t_2 = \frac{l}{60v}, \quad l \text{ 为切槽长度； } v = 20i^{0.6}。 \text{ 所以，降雨历时 } t = 5 + t_2。$$

汇水面积 $F = L \cdot B$ 。其中 L 为积水路段长度， B 为积水路段的宽度。

将上述常量代入式(9)，得到：

$$Q = 15.8365q_{p,t}LB = 95.019 \times \frac{4.843466 \times (1 + 0.9841 \lg 5)}{\left(24.481 + \frac{l}{1200i^{0.6}}\right)^{0.932}} LB = \frac{776.75526}{\left(24.481 + \frac{l}{1200i^{0.6}}\right)^{0.932}} LB \quad (10)$$

式中： l 为切槽的长度； i 为切槽的坡度； L 为积水路段的长度； B 为积水路段的宽度。

4.2. 横向排水槽排水能力

假定路面切槽排水模型为明渠均匀流。当水流全部充满槽时，沟槽的排水能力最强。此时，

过水断面面积： $A = h \cdot b$

湿周： $\chi = b + 2h$

水力半径： $R = \frac{A}{\chi} = \frac{h \cdot b}{b + 2h}$

对于明渠均匀流， $J = i$ 。所以明渠均匀流的流量计算公式为：

$$Q = AC\sqrt{Ri} \quad (11)$$

式中： A 为过水断面面积， C 为舍齐系数， $C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}$

因此，横向排水槽的最大排水能力为：

$$Q = AC\sqrt{Ri} = \frac{(hb)^{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{i}}{n \cdot (b + 2h)^{\frac{2}{3}}} \quad (12)$$

式中， Q 为切槽的最大流量； h 为切槽的深度； b 为切槽的宽度； i 为切槽的坡度； n 为切槽的糙率。

上述横向排水槽的最大流量应大于排水面层的设计径流量。设计过程中即可根据上述公式确定横向排水槽的尺寸和间距。

4.3. 工程案例

将上述排水设施应用于青临高速公路超高缓和段的路面排水，根据横向排水槽排水能力计算公式确定横向排水槽尺寸。利用公式(12)计算，宽度为20 cm，平均深度为5 cm，坡度为2%的横向排水槽的排水能力为0.00586 m³/s。而根据公式(10)确定的设计径流量为0.02588 m³/s。因此，在该路段需开设宽20 cm、深5 cm、坡度为2%的横向排水槽共6条，相邻两处横向排水槽间隔23.3 m。

中面层横向排水槽的设置解决了在超高缓和段由于横向坡度不足无法及时疏导路面积水的问题，保证了排水沥青路面在超高缓和段应用时的排水能力，有效缓解路面积水问题，从而为行车安全提供保障。

5. 结论

1) 通过工程案例给出了排水沥青路面目标空隙率的确定方法，即按照路面无积水与路面水膜厚度小于临界水膜厚度两种工况计算，最终采用的空隙率取决于公路所处的实际工况与业主要求。

2) 提出了匹配超高缓和段排水沥青路面内部排水设施，即在中面层顶部开设横向排水槽。横向排水槽的尺寸可根据设计径流量和排水能力的计算模型合理设计。

3) 结合青临高速工程案例，具体阐述了PAC空隙率和横向排水槽设计方法，对解决超高缓和段路面积水难题具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 张爱花, 牛肖. 多雨区高速公路超高过渡段路面积水处理措施研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(8): 32-33, 39.
- [2] 祁颖智. 基于道路线形组合的路面径流行为研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [3] 杨梦, 汤天乐, 胡琦. 排水沥青路面处治超高渐变段路面积水问题的应用研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(3):

58-62.

- [4] 张锋, 刘永旭, 杜晓博. 高速公路超高渐变段排水技术研究[J]. 华东公路, 2019(1): 44-48.
- [5] 余军, 余晓敏. 超高过渡段上的积水和其振动标线的设置[J]. 江西建材, 2013(5): 230-231.
- [6] Chen, J.-S. and Yang, C.H. (2021) Porous Asphalt Concrete: A Review of Design, Construction, Performance and Maintenance. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **13**, 601-612.
<https://doi.org/10.1007/s42947-020-0039-7>
- [7] 张燕飞. 降雨条件下多车道高速公路超高过渡段交通安全保障技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [8] 于良溟. 排水性沥青路面防水粘结层研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006.
- [9] 沈安琪. PAC-13 排水路面在南方多雨地区高速公路“零坡段”的应用[J]. 广东公路交通, 2021, 47(5): 5-10.
- [10] Kuruppu, U., Rahman, A. and Rahman, M.A. (2019) Permeable Pavement as a Storm Water Best Management Practice: A Review and Discussion. *Environmental Earth Sciences*, **78**, Article No. 327.
<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8312-2>
- [11] 肖鑫. 排水沥青混合料微观结构及排水特性研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [12] 肖鑫, 张肖宁. 排水沥青路面排水能力分析及其目标空隙率确定[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 49-53.
- [13] 马翔, 倪富健, 李强. 排水面层渗流模型及参数[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 381-385.
- [14] 汪鸿山, 冯德成, 解晓光. 孔隙率对透水性沥青路面渗透性能的影响规律[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 464-468.
- [15] 潍坊市气象局. 关于发布潍坊市中心城区暴雨强度公式(修订)的通告[EB/OL].
http://csglj.weifang.gov.cn/SZDT/TZGG/201511/t20151112_1613002.htm, 2015-11-12.
- [16] 中交路桥技术有限公司. JTG/T D33-2012, 公路排水设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [17] 交通运输部公路交通研究院. JTG/T 3350-03-2020, 排水沥青路面设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [18] 纪洋洋. 排水路面渗流模型分析与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [19] Luo, W. and Li, L. (2019) Development of a New Analytical Water Film Depth (WFD) Prediction Model for Asphalt Pavement Drainage Evaluation. *Construction and Building Materials*, **218**, 530-542.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.142>