DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2023.06.05

暴雨条件下高速公路超高缓和段积水深度

分布模型构建

张 驰1,周郁茗1,张昆仑2,张 敏3

(1.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2.广东省交通规划设计研究院股份有限公司,广东 广州 510635;3.长安大学 运输工程学院,陕西 西安 710064)

摘要:暴雨条件下高速公路超高缓和段积水易造成行车安全问题。研究超高缓和段的积水深度分布情况,能为道路 设计提供理论指导。通过引入流体力学中的圣维南方程和曼宁公式,提取道路几何模型并划分道路网格,利用有限 元方法对道路网格单元间的径流传递特征和径流深度进行分析,构建暴雨条件下的超高缓和段积水深度分布模型, 并对双向四车道高速公路的超高缓和段进行试验分析。结果表明,积水深度分布模型能够客观反应不同道路纵坡、 超高横坡、降雨强度下的超高缓和段积水深度分布状况,研究结果为道路超高缓和段排水不良路段的线形优化设计 提供借鉴与指导。

关 键 词:道路工程;超高缓和段;积水深度分布模型;圣维南方程;曼宁公式;暴雨条件 **中图分类号:**U411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-0696(2023)06-032-08

The Accumulated Water Depth Distribution Model of Superelevation Runoff of Highway under Rainstorm Conditions

ZHANG Chi¹, ZHOU Yuming¹, ZHANG Kunlun², ZHANG Min³

(1. School of Highway, Chang' an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

Guangdong Transportation Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, Guangdong, China;
 School of Transportation Engineering, Chang' an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Under the rainstorm conditions, the ponding in the superelevation runoff of the highway is easy to cause traffic safety problems. The distribution of accumulated water depth in the superelevation runoff was studied to provide the theoretical guidance for road design. By introducing the Saint-Venant equation and the Manning formula in fluid mechanics, the road geometric model was extracted and the road grid was divided. The finite element method was used to analyze the runoff transfer characteristics and runoff depth between the road grid units, build the distribution model of water accumulation depth in superelevation runoff under rainstorm conditions, and conduct experimental analysis on superelevation runoff of two-way four-lane highway. The results show that the accumulated water depth distribution model can objectively reflect the distribution of ponding depth in the superelevation runoff under different road longitudinal slopes, superelevation cross slopes and rainfall intensities. The research results provide reference and guidance for the linear optimization design of road sections with poor drainage in superelevation runoff.

Key words: highway engineering; superelevation runoff; accumulated water depth distribution model; Saint-Venant equation; Manning formula; rainstorm conditions

收稿日期:2021-08-18;修订日期:2022-01-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1512005);中交一公院科创基金项目(KCJJ2020-24)

第一作者:张 驰(1981—),男,四川宜宾人,教授,博士,主要从事交通安全与交通 BIM 方面的研究。E-mail:zhangchi@ chd. edu. cn

0 引 言

路表积水是诱发高速公路雨天交通事故的主要 影响因素之一^[1]。国家统计局数据显示,2018 年我 国共发生道路交通事故 244 937 起,造成 63 194 人 死亡,其中,高速公路交通事故导致的死亡人数占总 死亡人数的 10%,且其中约一半的事故由天气原因 造成。暴雨条件下,汽车轮胎与公路路面之间的附 着系数显著降低^[2-4],车辆稳定性降低,水膜厚度增 加时会出现"滑水"现象^[5]。在超高过渡缓慢、合成 坡度较小、凹形竖线底部等路段,路面排水不良,车 辆易发生侧滑、水漂、刹车不及等交通事故,对行车 安全产生了不利的影响。大量研究表明,高速公路 排水不良路段多分布于超高缓和段^[6],为积水深度 分布模型的研究指明了方向。

针对公路路面排水对行车安全的影响,国内外 学者进行了多方面的研究。T. F. FWA 等^[7]采用 Fluent 软件建立了轮胎的三维有限元模型并进行了 滑水分析,得到了完全滑水状态下车速与轮胎花纹 深度、水膜厚度的关系式;周海超等^[8]基于流体力 学计算方法,建立了考虑轮胎接地印痕及花纹变形 特征的滑水分析模型,分析了轮胎花纹、水膜厚度、 水流速度对滑水性能的影响:C. M. CRISTINA 等^[9] 模拟了交通荷载下城市路面降雨量的一维运动流模 型:牟凤云等^[10]利用 SCS 模型进行了降雨径流的多 情景模拟: R.J. CHARBENEAU 等^[11]通过在板面粘 结不同级配粒料模拟不同粗糙度路面方式,制作了 模拟路面,并在室内通过人工降雨方式模拟不同条 件下路面径流数据:J. JEONG^[12]应用扩散波模型, 建模分析了不同降雨条件、道路条件下的路表积水 情况;季天剑^[13]通过路面积水室内模拟试验,建立 了路面积水厚度与路面构造深度、坡面等因素之间 的多元回归模型及人工神经网络模型;张卓等[14]以 力学为基础,采用有限差分的方法,建立了高速公路 超高缓和段流水路径长度与纵坡之间的关系模型: 杨自珍[15]在进行桥面排水设计及优化方面的研究 中,分析了积水对路面与轮胎之间附着系数的影响, 推导了滑水临界车速与水膜厚度之间关系:张理 等^[16]利用曼宁公式推导出水膜厚度的计算公式,并 研究了水膜厚度与横坡、纵坡的关系;李映夏[17]利 用 WRF 模拟气象因子,建立了积水模型:罗京等^[18]

对国内外几种典型路面水膜厚度预测模型进行了试 验对比验证和校核,通过室内大型降雨模拟试验标 定了公路路面水膜厚度计算公式,并从行车安全角 度出发,提出了降雨条件下路面水膜厚度的限制标 准。

目前对道路积水的研究主要集中在路面积水对 道路及行车安全影响、降雨特性及相关模拟、路面流 水特性及其描述和路面积水影响分析等方面。在研 究指标的选取上,多采用水膜厚度、摩擦系数和附着 系数等,对路面积水模型的研究较少;在研究对象 上,多选取轮胎、路面构造深度、排水设施等,对道路 几何线形与路面积水关系的研究较少。相关的研究 结论难以为设计阶段公路超高缓和段的排水有利性 设计优化和排水设施设计提供理论依据和方法。鉴 于此,笔者对暴雨条件下高速公路超高缓和段路面 积水状况进行深入研究,采用有限元分析,引入水力 学中的圣维南方程和曼宁公式,建立积水深度分布 模型,为公路设计阶段的排水不良路段几何线形优 化及严重积水路段排水措施提供重要的理论依据。

1 模型构建

1.1 理论基础

公路超高缓和段的坡面径流是一个非常复杂的 过程,其径流形态不仅与公路纵坡和横坡相关,且路 面摩阻系数对其也有一定的影响,可看作是非均匀 和非稳定的宽浅明渠水流汇集的过程。超高缓和段 附近坡面流动域较为复杂,可能存在横向不连续的 排水路径。而圣维南方程作为明渠非恒定流的一般 描述,在洪水演算、排水设计等诸多二维浅水流动的 研究中广泛应用,且将基于扩散波模型的圣维南方 程用于模拟复杂路面上雨水流动时误差较小^[19]。 此外,曼宁公式在明渠道流量或流速计算时过程较 为简单,在水力学中应用广泛。鉴于此,笔者综合采 用圣维南方程和曼宁公式对超高缓和段的积水深度 分布模型进行构建。

1.1.1 圣维南方程

路表积水径流示意如图 1。针对路表积水径流 在路线长度及路面宽度范围内呈现二维径流分布问 题,二维圣维南方程组能对其进行很好的描述。取 道路纵向为 *x* 方向,道路横向为 *y* 方向,连续性方程 如式(1):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - r = 0 \tag{1}$$

式中:H为水头高度, m; q_x 、 q_y 为沿x、y方向的水流量, m³; r为降雨密度, mm/h;t为时间, s_o



图1 路表积水径流示意

Fig. 1 Schematic diagram of water runoff on road surface



$$\begin{cases} \frac{\partial q_x}{\partial t} \left(\frac{q_x^2}{h}\right) + \frac{\partial q_y}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h}\right) + gh\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_{f,x} - S_{o,x}\right) = 0\\ \frac{\partial q_y}{\partial t} \left(\frac{q_y^2}{h}\right) + \frac{\partial q_x}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h}\right) + gh\left(\frac{\partial h}{\partial y} + S_{f,y} - S_{o,y}\right) = 0 \end{cases}$$

$$(2)$$

一般来说,为简化圣维南动量方程组,令其惯性 项表示如式(3):

$$\begin{cases} A_x = \frac{1}{gh} \left[\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) \right] \\ A_y = \frac{1}{gh} \left[\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) \right] \end{cases}$$
(3)

简化后,得圣维南方程组如式(4):

$$\begin{cases} S_{f, x} - S_{o, x} + \frac{\partial h}{\partial x} + A_x = 0\\ S_{f, y} - S_{o, y} + \frac{\partial h}{\partial y} + A_y = 0 \end{cases}$$
(4)

式中:h 为路表积水深度, m; $S_{f,x}$ 和 $S_{f,y}$ 分别为沿 x、y 方向的摩擦项, 反映路面径流内部及边界的摩 阻损失; $S_{o,x}$ 和 $S_{o,y}$ 为沿 x、y 方向的重力项, 反映 坡底变化引起的重力作用; $\partial h / \partial x$ 和 $\partial h / \partial y$ 为沿 x、y 方向的压力项, 反映径流深度的影响; A_x 和 A_y 分别 为沿 x、y 方向的惯性项, 反映流体中局部速度和流 速空间分布不均对对流加速度的影响。

笔者考虑到超高缓和段的排水路径不均匀性以 及侧向压力梯度的影响,忽略式(4)中惯性项 *A_x*和 *A_x*,构成曼宁公式的扩散波模型,如式(5):

$$\begin{cases} S_{f, x} - S_{o, x} + \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \\ S_{f, y} - S_{o, y} + \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \end{cases}$$
(5)

1.1.2 曼宁公式

公路排水通常采用曼宁公式与运动波理论的组合^[20]来计算汇水时间。曼宁公式的基础方程如 式(6):

$$V = \frac{K}{n} R^{2/3} \cdot s_1^{1/2}$$
 (6)

式中:V为径流速度,m/s;K为转换常数,国际单位 制中取值为1;n为曼宁系数,是综合反映管渠壁面 粗糙情况对水流影响的一个系数;R为水力半径,为 流体截面积与湿周长的比值;s1为明渠的坡度。

为简化计算及迭代过程,不考虑深度梯度,即 ∂h/∂x 忽略不计,由式(5)可以得到式(7):

$$\begin{cases} S_{f, x} = S_{o, x} \\ S_{f, x} = S_{o, x} \end{cases}$$
(7)

研究过程中,主要考虑积水深度和流量,对曼宁 公式进行单位体积的转化,得到矢量形式表示如 式(8):

$$\vec{q} = \frac{h^{5/3}}{n} \vec{s}_2 \tag{8}$$

式中:*n*=0.015;*s*₂为路面合成坡度。由式(8)可以推导出,曼宁公式非线性扩散系数是关于水深、曼宁系数、摩擦斜率的函数,则曼宁公式的扩散系数如式(9):

$$D = \frac{h^{5/3}}{n\sqrt{s_2}}$$
(9)

扩散系数是表示给定条件下流动的扩散系数的标量值。如果水的自由表面是局部平坦,即合成坡度为0,水不会流动,D为无穷大。但在实际计算中,坡度为零时,扩散系数 D=0。

1.2 暴雨条件界定

中国气象局规定,24 h 降水量为 50 mm 以上的 强降雨称为"暴雨",根据暴雨天气的平均历时计算 出暴雨天气的降雨强度约在 50 mm/h 以上,同时参 考 JTG/T D33—2012《公路排水设计规范》^[21]的规 定,将暴雨条件界定为降雨强度为 50 mm/h 以上的 强降雨。

基于有限元超高缓和段积水深度分布模型 构建

1.3.1 网格划分

道路是空间中长度方向尺寸远大于宽度、高度 的三维几何体,其系统包含路面、路基及路侧设置的 交通标志、标牌等构造物,同时,道路表面的物体也 会在一定程度上对路表积水分布产生影响。若将所 有细节纳入考虑范围,现有资源并不能实现,故对道 路模型进行一定程度的简化。

1) 道路结构的简化:路基对路表雨水的流动影 响极小,故仅考虑路面的几何形式进行模型建立及 网格划分。

2)道路构造物的简化:交通标志、标线、标牌等 构造物对路表积水的影响很小,建模时可将其忽略。

3) 道路表面结构的简化:考虑到道路几何模型 范围较大,路面宽度、长度方向均以米为度量单位。 为使中线处降雨能完全流至路基范围以外,并尽量 减少上下游来水影响,道路长度方向取值控制在 100 m 以上。路面材料的几何度量单位为毫米,若 建模中对路面结构进行考虑会出现网格数量过大而 无法完成计算的问题或网格的长宽比过大,网格质 量低,计算发散的问题。因此在建模中,假定道路模 型表面平整,路面的构造深度不作考虑。

4)路表排水设施的简化:文中重点在于超高缓 和段积水深度分布模型的建立,故道路模型不考虑 各类排水设施影响。

道路模型简化后,划分道路网格,以拟划分网格 的宽度生成沿道路纵向的网格边界;以拟划分网格的 长度生成沿道路横向的网格边界,提取网格单元边界 的高程、纵坡和横坡,进行程序开发数值模型方程。 1.3.2 模型构建

使用三点中心差分和 Crank-Nicolson 方法对空 间离散化进行时间差分后,可对所划分的道路网格 间的径流传递进行计算。图 2 为道路网格中网格单 元(i,j)的流量流向。图 2 中: $Q_{i-1,j}$ 为网格单元(i, j)与左侧相邻网格单元的流量传递值,m³;同理, $Q_{i+1,j}, Q_{i,j-1}, Q_{i,j+1}$ 分别为网格单元(i,j)与相邻右 侧、下方、上方网格单元的流量传递值,m³;箭头代 表相邻网格单元的流量传递方向; $h_{i,j}$ 为网格单元 (i,j)网格形心的路表积水深度, $m; l_{i,j}$ 和 $w_{i,j}$ 分别 为网格单元(i,j)的长与宽,m。



将网格间的流量代入式(1),可得式(10):

$$\frac{\mathrm{d}H_{i,j}}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{a_{i,j}}(Q_{i,j-1} + Q_{i-1,j} + Q_{i,j+1} + Q_{i+1,j}) = r \quad (10)$$

式中: $H_{i,j}$ 为道路网格单元中的水头高度,m; $a_{i,j}$ 为 网格单元(i,j)的面积,m²。

除道路边界外,每个网格单元均存在与相邻网 格单元相连接的4个边界。由三点差分中心法,可 得网格单元右边界的扩散系数表达式如式(11):

$$D_{i+1,j} = \frac{h_{i+1,j,r}^{\frac{3}{3}}}{n\sqrt{s_2}}$$
(11)

式中: $D_{i+1,j}$ 为网格单元(i,j)与右侧相邻网格之间 的扩散系数; $h_{i,j,r}$ 为(i,j)网格右边界的路表积水深 度,m。其它边界的扩散系数同理可得。

与网格单元(*i*,*j*)相关联的纵向流量离散化后如式(12),同理,横向流量离散化后如式(13):

$$\begin{cases} Q_{i-1,j} = -\frac{2D_{i-1,j}}{l_{i-1,j} + l_{i,j}} w_{i,j} (H_{i-1,j} - H_{i,j}) \\ Q_{i+1,j} = -\frac{2D_{i+1,j}}{l_{i+1,j} + l_{i,j}} w_{i,j} (H_{i+1,j} - H_{i,j}) \\ Q_{i,j-1} = -\frac{2D_{i,j+1}}{w_{i,j-1} + w_{i,j}} l_{i,j} (H_{i,j-1} - H_{i,j}) \\ Q_{i,j+1} = -\frac{2D_{i,j+1}}{w_{i,j+1} + w_{i,j}} l_{i,j} (H_{i,j+1} - H_{i,j}) \end{cases}$$
(13)

式中:*D_{i-1,j}、D_{i+1,j}、D_{i,j-1}、D_{i,j+1}*分别为网格单元(*i*, *j*)与相邻左、右、下、上4个方向网格单元之间的扩 散系数。

为了参数化网格间水流传递,在空间和时间上 引入网格单元沿各边的纵、横向传递系数 C,将其定 义为相邻网格间单位时间内传递的流量与该两网格 所构成区域的 1/2 面积的比值。利用曼宁公式的非 线性扩散系数计算公式,计算得到网格 4 个边界的 扩散系数,得到网格间传递系数的计算公式如 式(14)、式(15):

$$\begin{cases} C_{i-1, j} = \frac{2D_{i-1, j}}{l_{i, j}(l_{i+1, j} + l_{i, j})} \\ C_{i+1, j} = \frac{2D_{i+1, j}}{l_{i, j}(l_{i+1, j} + l_{i, j})} \end{cases}$$
(14)

$$\begin{cases} C_{i, j-1} = \frac{2D_{i, j-1}}{w_{i, j}(w_{i, j-1} + w_{i, j})} \\ C_{i, j+1} = \frac{2D_{i, j+1}}{w_{i, j}(w_{i, j+1} + w_{i, j})} \end{cases}$$
(15)

式中:*C_{i-1,j}、C_{i+1,j}、C_{i,j-1}、C_{i,j+1}*分别为网格单元(*i*, *j*)与相邻左、右、下、上4个方向网格单元之间的传 递系数。

网格单元之间边界中心处的径流深度无法直接 计算得到,故考虑采用插值方法,利用网格单元的径 流深度计算网格单元间边界中心的有效非线性扩散 系数,进而求得网格单元边界中心的径流水深。计 算网格单元(*i*,*j*)和(*i*+1,*j*)之间的边界中心处的水 深*h*_{*i*,*i*,*r*},如式(16):

$$h_{i,j,r} = \frac{h_{i,j}l_{i+1,j} + h_{i+1,j}l_{i,j}}{l_{i+1,j} + l_{i,j}}$$
(16)

流体力学中,径流的流速表示为水深的函数,同时也受到坡度的影响,即道路高程变化的影响。考虑以上两类因素,结合式(10)、式(11)和曼宁公式的二维非线性扩散波模型,代入式(1),简化处理后如式(17):

$$\frac{\mathrm{d}h_{i,j}}{\mathrm{d}t} + f(h) + f(M) - r = 0 \tag{17}$$

式中:

$$f(h) = (C_{i-1,j} + C_{i,j-1} + C_{i+1,j} + C_{i,j+1})h_{i,j} - (C_{i-1,j}h_{i-1,j} - C_{i+1,j}h_{i,j} - C_{i,j-1}h_{i,j-1} - C_{i,j+1}h_{i,j+1}) - f(M) = (C_{i-1,j} + C_{i,j-1} + C_{i+1,j} + C_{i,j+1})M_{i,j} - C_{i-1,j}M_{i-1,j} - C_{i,j-1}z_{i,j-1} - C_{i,j+1}M_{i,j+1})$$

其中,f(h)为考虑径流深度对流速的影响进行 的修正函数;M为路表高程m;f(M)为考虑高程对 径流流速影响的修正函数。实际应用中,水头高度 H通常比路表积水深度h大几个数量级。因此,水 深项用作减少截断误差的主要变量,截断误差由路 表积水深度h和路表高程M之间的差异 $\left(\frac{h}{M}=10^{-6}\right)$ 引起。利用 Crank-Nicolson 方法得出时 间阶段性的径流水深的迭代方程组,如式(18):

$$\frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k}}{\Delta t} + f(h) + f(M) - r = 0$$
(18)

1.3.3 初始条件和边界条件

为减少其他环境因素的干扰,假定降雨开始前,

道路路面干燥,不存在积水,即初始路表径流水深为 $h_{i,i}=0$ 。

通过模拟道路倾斜表面确定上游端和下游端的 边界条件。现阶段将道路超高缓和段视为封闭的区 域,直缓端边界网格单元间的传递仅考虑沿道路纵 向和横向的流量流出,不考虑区域外流量的流入;缓 圆端边界网格单元间的传递仅考虑沿道路纵向和横 向方向的流量流入,不考虑区域内网格单元流量的 流出。笔者将公路超高缓和段的径流形态视作宽浅 明渠水流汇集的过程,因此,路边界汇集的水流仅能 沿道路纵向流动。

2 实例分析

2.1 试验道路模型构建

考虑到道路网格划分的难易程度,笔者选取设 计速度为 80 km/h,双向四车道高速公路直坡段的 某一超高缓和段,缓和曲线长度为 120 m,道路单侧 宽为 10.50 m,其中车道宽为 3.75 m,硬路肩宽为 3.0 m,路拱横坡为 2%,不考虑土路肩和路缘带。公 路超高缓和段纵坡为 2%,超高横坡度为 2%,直缓点 高程为 10 m。

2.2 超高缓和段积水深度分布模型

为简化计算,取网格单元为边长为1 m×1 m 的 正方形,长度不足1 m 处不纳入模型计算,以使网格 间的非线性扩散系数等价于网格边界的径流传递系 数,故道路划分网格数目为10×120 个,如图3。



Fig. 3 Grid meshing of superelevation runoff

假定该高速公路所在地区降雨强度为1 mm/min, 基于式(18)进行程序设计,流程如图4。以1 min 为 时间梯度,实现基于时间梯度公路路表径流深度的 迭代计算。



图4 模型程序设计流程

Fig. 4 Flow chart of model programming design

笔者将超高缓和段作为封闭区域,未考虑道路 纵向边界处的流量流入和流出。由此计算获取该超 高缓和段在假定降雨强度下连续时间梯度的路表径 流深度矩阵。随着时间梯度的推移,路表径流深度 会趋近某个稳定状态。对各个时间梯度的路表积水 深度分布状况绘制等高线图,并对不同时刻绘制的 积水深度分布图进行分析,当前后两时段的水深分 布基本一致时,可认为该时刻积水深度分布趋于稳 定。如图 5 的路表径流已达稳定状态。



图 5 超高缓和段稳定状态的积水深度分布 Fig. 5 Distribution of water accumulation depth in the stable state of the superelevation runoff

由图 5 可以看出,超高缓和路段的积水深度分 布较深处在两端,达 22 mm,中间区域的积水深度较 浅,道路横坡的排水能力较道路纵坡的排水能力更 为显著。此外,积水深度分布沿零坡呈中心对称部 分,与线形设计相符合。 为更进一步分析迭代过程中纵坡、横坡以及降雨 强度对路表积水深度变化的影响,控制纵坡、横坡、降雨 强度等变量单一变化。选取纵坡 s₁为 2%和 3%,其它 条件保持一致;超高横坡度 s_h为 2%和 3%,其它条件保 持一致;选取降雨强度 r 为 1 mm/min 和 1.2 mm/min, 其它条件保持一致。基于以上 3 种条件,进行数据迭代 直至稳定状态,绘制积水深度分布图,如图 6。



基于图 6 对公路超高缓和段径流深度的影响因 素进行分析,有以下特点:

1)比较图 6(a) 与图 6(b)、图 6(c),纵坡由 2% 增至 3%,超高横坡由 2%增至 3%时,道路积水较浅 部分的面积增大,深水区域向横坡较低处缩聚,且水 深稍有增加,水深最大值前者为 23 mm,后者为 24 mm。纵坡与横坡对径流深度的变化影响较大,但横 坡更为显著;其次,随坡度的增加,径流长度变短,流 速增快。

2)比较图 6(a)和图 6(d),降雨强度由 1 mm/ min 增至 1.2 mm/min 时,积水分布状态基本一致, 深度有所增加。降雨强度的增大能够使路表积水流 速的分布发生显著变化,随着降雨强度的增大,路表 积水流速变大,降雨能够更快地流动。

3)分析可知,若径流长度较长,如图6(a)和图6 (d),缓和坡面积水较深,面积较大,且排水相对较 慢;增加横坡或纵坡后,如图6(b)和图6(c),径流 长度变短,流速变大,排水加快。

基于有限元超高缓和段积水深度分布模型的构 建,引入水力学中的圣维南方程和曼宁公式,其结果 与实际相符,能够较好地呈现公路超高缓和段的积 水深度分布形态。该模型较好地反映降雨过程中路 表径流深度随时间递进而变化的过程,有一定的适 用性,并验证了道路纵坡、横坡及降雨强度等因素对 路表积水深度有一定程度的影响。

3 结 语

1) 在引入了水力学中的圣维南方程和曼宁公式 的基础上,基于有限元对道路几何模型简化、提取并 进行网格划分,对网格单元进行流动分析,考虑径流 速度和道路高程对径流深度的影响,建立道路超高 缓和段的积水深度分布模型,并进行了实例分析,客 观地反映实际的坡面水流状况。

2)针对超高缓和段积水深度分布模型的实例分 析可知,在1mm/min的暴雨条件下,雨水主要集中 在道路边界处,积水深度最大值约为2cm,其位置 靠近直缓端(缓圆端),因此在确定道路泄水孔位置 时,可根据边界积水深度分布进行判断。此外,在道 路设计阶段,为利于排水,在控制纵坡的基础上,可 适当的增大超高横坡。

3)笔者将公路的超高缓和段视为封闭区域,对 区域外流入和流出边界的水未作考虑,存在一定的 不足,后续的研究将边界的流入和流出纳入进行分 析,并调整纵坡与横坡,寻找公路超高缓和段最佳的 坡度组合,以及对不同线形组合的超高缓和段进行 积水模型构建。

参考文献(References):

 [1] 管朝鹏. 基于 DPM 及 EWF 模型的积水分布研究[D]. 重庆:重 庆交通大学,2015.
 GUAN Zhaopeng. Study on the Distribution of Ponding Water Based

on DPM and EWF [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.

- [2] 季天剑,黄晓明,刘清泉. 部分滑水对路面附着系数的影响
 [J].交通运输工程学报,2003,3(4):10-12.
 JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan. Part hydroplaning effect on pavement friction coefficient [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4):10-12.
- [3] 李长城,刘小明,荣建.降雨条件下高速公路车辆行驶速度特性
 [J].北京工业大学学报,2015,41(3):412-418.
 LI Changcheng, LIU Xiaoming, RONG Jian. Characteristics of vehicle speed for expressway under rain weather condition [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(3): 412-418.
- [4] 王露,陈肖欣,李华恩. 大风雨雪气象条件下高速公路车辆稳定 行驶的临界车速研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021,40(4):34-40.
 WANG Lu, CHEN Xiaoxin, LI Hua'en. Critical speed of vehicles

running stably on expressway in the weather of rain and snow under strong wind [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(4): 34-40.

- [5] ARON M, BILLOT R, EL FAOUZI N E, et al. Traffic indicators, accidents and rain: Some relationships calibrated on a French urban motorway network [J]. *Transportation Research Procedia*, 2015, 10: 31-40.
- [6] 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]. 西安:长安大学,2020. ZHANG Yanfei. Study on Traffic Safety Assurance Technology for Superelevation Transition Section of Multi-lane Expressway under Rainy Condition [D]. Xi'an: Chang'an University,2020.
- [7] FWA T F, KUMAR S S, ONG G P, et al. Analytical modeling of effects of rib tires on hydroplaning [J]. Transportation Research Record ,2008, 2089(2068):109-118.
- [8] 周海超,陈磊,翟辉辉,等. 基于 CFD 的轮胎滑水及其性能影响 因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(1): 110-116.

ZHOU Haichao, CHEN Lei, ZHAI Huihui, et al. Research on flow field and influencing factors of tire hydroplaning based on CFD method [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University* (*Natural Science*), 2017, 36(1): 110-116.

- [9] CRISTINA C M, SANSALONE J. Kinematic wave model of urban pavement rainfall runoff subject to traffic loadings [J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(7): 629-636.
- [10] 牟凤云,龙秋月,余情,等. 基于 SCS 模型的巫山县降雨径流多

MU Fengyun, LONG Qiuyue, YU Qing, et al. Multi-scenario simulation of rainfall runoff in Wushan county based on SCS model [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(2): 118-125.

- [11] CHARBENEAU R J, JEONG J, BARRETT M E. Highway Drainage at Superelevation Transitions [R]. Austin: Center for Transportation Research, 2008.
- [12] JEONG J. A Hydrodynamic Diffusion Wave Model for Stormwater Runoff on Highway Surfaces at Superelevation Transitions [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2008.
- [13] 季天剑. 降雨对轮胎与路面附着系数的影响 [D]. 南京: 东南大 学,2004.

JI Tianjian. The Influence of Rainfall on the Tire and Road Adhesion Coefficient [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.

[14] 张卓,高建平.考虑水流路径长度的S型曲线超高段纵坡研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(4): 594-596, 691.

ZHANG Zhuo, GAO Jianping. Longitudinal slope at superelevation sections of s curve considering flow path length [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(4): 594-596, 691.

[15] 杨自珍. 基于行车安全的桥面排水设计及优化措施研究 [D]. 重庆:重庆交通大学,2014.

YANG Zizhen. Bridge Deck Drainage Design Theory and Optimization Measures Based on Road Safety Theory [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.

[16] 张理,张卓. 路面坡度对水膜厚度的影响分析[J]. 重庆交通大 _____

(上接第31页)

[17] 刘晓春,卫军,李沛,等.一种基于相对位移的铰缝传力性能评 估方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3377-3383

LIU Xiaochun, WEI Jun, LI Pei, et al. Load-transmitting performance evaluation method for hinge joint based on relative displacement [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3377-3383.

- [18] 葛素娟,李静斌. 虚拟横梁单元法在小箱梁桥建模中的应用 [J]. 河南城建学院学报, 2009, 18(4): 1-3. GE Sujuan, LI Jingbin. Application of virtual beam element method in small box-girder bridge model building [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2009, 18(4): 1-3.
- [19] 汉勃利 E C. 桥梁上部构造性能[M]. 郭文辉,译. 北京:人民交 通出版,1982.

HAMBIY E C. Bridge Deck Behavior [M]. GUO Wenhui

学学报(自然科学版),2013,32(3):404-406,423.

ZHANG Li, ZHANG Zhuo. Impact of road slope on water film ${\rm thickness}[\ J\].$ Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(3): 404-406, 423.

- [17] 李映夏. 江苏冬季高速公路路面干湿状态判别及积水模型应用 [D]. 南京:南京信息工程大学,2016. LI Yingxia. Dry and Wet State Discrimination and the Application of Water/Snow Accumulation Model on the Road Surface of Jiangsu Expressway in Winter [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.
- [18] 罗京,刘建蓓,戈普塔,等,路面水膜厚度检验评价方法[J].交 通信息与安全,2016,34(6):54-59,82. LUO Jing, LIU Jianbei, Pramod Kumar GUPTA, et al. An inspection and evaluation method of thickness of water film on road surface [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34(6): 54-59, 82.
- [19] SINGH V P, ARAVAMUTHAN V. Errors of kinematic-wave and diffusion-wave approximations for steady-state overland flows [J]. CATENA, 1996, 27(3/4): 209-227.
- [20] BROWN S A, STEIN S M, WARNER J C. Urban Drainage Design Manual (HEC-22) [M]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, U.S., 1996.
- [21] 中交路桥技术有限公司. 公路排水设计规范: JTG/T D33-2012[S].北京:人民交通出版社,2012. CCCC Road & Bridge Technology Co., Ltd. . Specifications for Drainage Design of Highway: JTG/T D33-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

(责任编辑:罗素琴)

Translate. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 1982.

- [20] 张颖周,夏修身,韦性涵.梁式桥板式橡胶支座的合理计算模型 研究 [J]. 世界桥梁, 2017, 45(4): 56-60. ZHANG Yingzhou, XIA Xiushen, WEI Xinghan. Study of rational calculation model for beam bridge with laminated rubber bearings [J]. World Bridges, 2017, 45(4): 56-60.
- [21] 刘泽佳,陈溢涛,周立成,等.桥梁长期健康监测大数据温度与 应变特征及关联性分析 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 72-79.

LIU Zejia, CHEN Yitao, ZHOU Licheng, et al. Analysis of characteristics and correlation for temperature and strain based on long-term bridge health monitoring big data [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(35): 72-79.

(责任编辑:田文玉)