DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210985

考虑坡面排水的公路超高缓和段 坡度组合设计



张驰1,向宇杰1,林宣财2,张昆仑3,周郁茗1

- (1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
- 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075;
- 3. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510627)

摘 要:近年来,受厄尔尼诺等气候现象的影响,因路面积水产生的交通事故频发。在公路几何设计中,超高缓和段易形成较小合成坡度,导致路表积水继而影响车辆行车安全。为研究不同坡度组合设计下的超高缓和段排水能力,考虑道路横坡、纵坡和降雨量等因素,利用 Matlab Simulink 开展可视化仿真模拟。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,引入流体力学中的圣维南方程和曼宁公式,构建了超高缓和段积水深度分布模型。在分析超高缓和段排水能力影响因素的基础上,以道路纵坡、超高横坡和降雨强度为变量设计交叉试验,根据模型确定不同组合下的超高缓和段积水分布状态。以道路网格单元横向径流流速和超高零坡附近的径流深度为评价指标,对不同坡度组合下的路段排水能力进行分析,并提出超高缓和段最佳坡度组合设计。研究结果表明:与道路纵坡相比横坡的设计对超高缓和段路表积水的影响更为显著;在一般暴雨条件下,雨水主要集中在道路边界处,其位置靠近直缓端(缓圆端);当道路纵坡范围为0.3%~0.5%,超高横坡值范围为2%~4%时对超高缓和段道路排水有利。研究结果为超高缓和段坡度组合设计和排水位置选择提供了有效的参考依据。

关键词:公路工程;几何设计;超高缓和段;积水分布;坡度组合

中图分类号: U412 文献标志码: A

文章编号: 1672-7029 (2022) 08-2278-09

Slope combination design of highway superelevation transition section considering slope drainage

ZHANG Chi¹, XIANG Yujie¹, LIN Xuancai², ZHANG Kunlun³, ZHOU Yuming¹

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

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

3. Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510627, China)

Abstract: In recent years, due to the influence of climate phenomena such as El Nino, traffic accidents caused by road surface water occur frequently. In the highway geometric design, the superelevation transition section is easy to form a small composite slope, which leads to road surface water and affects vehicle traffic safety. In order to

收稿日期: 2021-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005); 四川省交通运输厅项目(2019-ZL-12); 中交一公院科创基金资助项目(KCJJ2020-24)

通信作者: 张驰(1981-),男,四川宜宾人,教授,从事道路交通安全研究; E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

study the drainage capacity of the superelevation transition section under different slope combination designs, the visual simulation was carried out by Matlab Simulink considering the transverse slope, longitudinal slope, rainfall and other factors. The finite element method was used to analyze the runoff transfer characteristics and the runoff depth between the road grid elements. The Saint-Venant equation and Manning formula in fluid mechanics were introduced to construct the water depth distribution model of the superelevation transition section. Based on the analysis of the factors affecting the drainage capacity of the superelevation transition section, the cross test was designed with the longitudinal slope, ultra-high transverse slope and rainfall intensity as variables, and the distribution of water accumulation in the superelevation transition section under different combinations was determined according to the model. Taking the lateral runoff velocity of the road grid unit and the runoff depth near the ultra-high zero slopes as the evaluation indexes, the drainage capacity of road sections under different slope combinations was analyzed, and the optimal slope combination design of the superelevation transition section was proposed. The results show that compared with the longitudinal slope of the road, the design of the transverse slope has a more obvious influence on the surface water of the superelevation transition section. Under general rainstorm conditions, rainwater is mainly concentrated at the road boundary, and its position is close to the intersection point of the straight line and transition curve (the intersection point of the transition curve and circular curve). When the road longitudinal slope range is $0.3\% \sim 0.5\%$, and the ultra-high transverse slope range is $2\% \sim 4\%$, it is beneficial to the road drainage in the superelevation transition section. The results provide an effective reference for the slope combination design and drainage location selection of the superelevation transition section.

Key words: highway engineering; geometric design; superelevation transition section; water distribution; slope combination

水是引起公路病害的主要原因,给行车安全 造成隐患, 高速公路线形设计中应保证路面排水 通畅。由于超高缓和段的设置, 高速公路易出现 零度横向平坡, 形成降雨积水点而引起安全行车 隐患。潘兵宏等"研究表明, 当道路纵坡较小时, 渐变段综合坡度不能满足路表排水需求, 易引发 滑移导致重大安全事故。基于坡面排水对不同超 高过渡段进行坡度组合设计可进一步提高坡面排 水能力,保证行车安全。针对公路超高缓和段的 设计和排水问题,国内外学者的相关研究主要集 中在3个方面。一是对超高缓和段积水分布的模型 构建。任俊雯等四基于运动波方程组描述了地表汇 流过程,对地面粗糙系数和汇流长度径流系数等 进行了敏感性分析; CRISTINA等^[3]模拟了交通荷 载下的城市路面降雨量的一维运动流模型; JEONG^[4]应用扩散波模型,建模分析了不同条件下 的路表积水情况;罗京等57对国内外几种典型路面 水膜厚度预测模型进行验证和校核, 通过降雨模 拟实验标定了公路路面水膜厚度计算公式; RES- SEL等®利用平均水深浅水方程建立了模拟路面径 流二维模型: FWA 等四通过 Fluent 流体力学建立模 型,研究车辆滑水时的临界车速与积水深度和轮 胎花纹深度的关系; 祁颖智图通过建立路面径流过 程仿真模型归纳总结平纵横线形要素、降雨强度 和路侧排水方式等对路面径流行为的影响规律。 二是对超高缓和段排水技术的研究。CHARBE-NEAU等阿通过在板面黏结不同级配粒料模拟不同 条件下路面径流数据; 戚明敏[10]通过对超高过渡段 的几何特性和超高过渡段水流运动路径等变化特 性的分析,提出了超高过渡段的排水改善方案; 季天剑等[[]通过路面积水模拟实验,建立了路面积 水厚度与路面构造深度和坡面等因素的多元回归 模型及人工神经网络模型;杨洋等[12]基于汽车横向 稳定性, 从最大超高值、最大横向力系数、超高 值与曲线半径分配、渐变率和渐变段设置5个方面 对超高设计进行研究; 张爱花等[13]针对已竣工工程 中超高过渡排水不良路段,提出通过路面切槽构 建微型截水沟提高路面排水能力。三是基于坡面

排水的超高缓和段设计研究。潘兵宏等四根据公路 设计中3种超高过渡起点设置方式,从超高过渡段 的排水和车辆行驶舒适性方面对3种方式进行对比 分析;刘琦[15]针对上下坡情况,讨论了纵坡、超高 渐变率与排水不良路段长度的关系, 为超高渐变 率设计提出参考; 张卓等[16]以力学为基础, 建立了 超高缓和段流水路径长度与纵坡之间的关系模型; 周万虎等四分析了超高过渡段设计中超高渐变率和 道路纵坡、合成坡度和路面排水的关系; 张燕飞[18] 研究了超高过渡段路面积水和降雨强度、公路路 线线形和超高过渡方式的关系,提出了降雨条件 下高速公路交通安全保障技术; 王祎祚等[19]采用模 拟降雨实验, 获得水泥混凝土路表水膜厚度回归 方程,表明相同条件下水泥混凝土表水膜厚度值 高于沥青路面。综上可知,在超高缓和段排水设 计的研究中, 多是以缓和段为对象, 进行模型构 建分析影响因素的正向研究。而相应的逆向研究 较为缺乏,即基于不同影响因素及其相互作用, 构建相应的积水分布模型,进行实验设计得出适 宜的超高缓和段的几何设计。本文综合考虑超高 缓和段的坡度组合设计,为研究不同缓和段的最 佳坡度组合设计,通过引入流体力学中的圣维南 方程和曼宁公式,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 超高缓和段积水深度分布模型。并以道路纵坡、 超高横坡和降雨强度为变量,基于超高缓和段长 度或超高渐变率设计实验对最佳坡度组合进行 分析。

基于有限元超高缓和段积水深度 分布模型构建

圣维南方程在洪水演算、排水设计等诸多二维浅水流动的研究中应用广泛,且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^[20],曼宁公式在明渠道流量或流速计算时过程较为简单,且在水力学中应用广泛。鉴于此,本研究综合圣维南方程和曼宁公式构建超高缓和段的积水深度分布模型。

考虑到超高缓和段的排水路径不均匀以及侧 向压力梯度的影响,忽略惯性项即构成曼宁公式 的扩散波模型,如式(1):

$$\begin{cases} S_{fx} - S_{ox} + \frac{\partial h}{\partial x} = 0\\ S_{fy} - S_{oy} + \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \end{cases}$$
 (1)

式中: S_{fx} 和 S_{fy} 为沿x和y方向的摩擦项,反映路面径流内部及边界的摩阻损失; S_{ox} 和 S_{oy} 为沿x和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和y方向的压力项,反映径流深度的影响。

研究过程中,主要考虑径流深度和流量,对 曼宁公式进行单位体积转化,得到矢量形式表示 如式(2):

$$q = \frac{h^{5/3}}{n\sqrt{S_f}} \vec{S}_f \tag{2}$$

其中: h为流动深度; n为曼宁系数(本研究中取值 0.015); S_r 是合成坡度。可以推导出曼宁公式非线性扩散系数是关于水深、曼宁系数和摩擦斜率的函数,则曼宁公式的扩散系数表达式如式(3):

$$D_h = \frac{h^{5/3}}{n\sqrt{S_f}} \tag{3}$$

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_h 为无穷大。但在实际计算中,坡度为0时,扩散系数 D_h 记为0。

对道路模型进行简化后,划分道路网格,并提取网格单元边界的高程、纵坡和横坡。使用三点中心差分和 Crank-Nicolson 法对道路网格间的径流传递进行计算,如图 1 所示为道路网格中第(i,j) 网格,Q 为网格间的流量传递, ξ 和 η 分别为道路纵坡方向和横坡方向,相应的 $\Delta\xi$ 和 $\Delta\eta$ 为网格的长度和宽度。

记网格的面积为 $A_{i,j}$,将上述网格间的流量代入圣维南连续性方程中,可得式(4):

$$\frac{\mathrm{d}H_{i,j}}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{A_{i,j}} (Q_{i,j-1/2} + Q_{i-1/2,j} + Q_{i,j+1/2} + Q_{i+1/2,j}) = r (4)$$

式中: $H_{i,j}$ 为道路网格单元中的水头高度,为主要变量,m; $A_{i,j}$ 为网格单元区域的面积, m^2 ; Q为网格单元向外排除或向内流入的流量, m^3 ; r为恒定的降雨密度,mm/h。

在道路网格中,主要变量H以网格单元为单位计算,而流量Q则在网格单元边界处计算。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(5),其他边界的扩散系数同理可得。

$$D_{i+1/2,j} = \frac{h_{i+1/2,j}^{5/3}}{n\sqrt{(S_f)_{i+1/2,j}}}$$
 (5)

与网格单元(*i*, *j*)相关联的纵向和横向流量离散化如式(6):

$$\begin{cases} Q_{i-1/2,j} = -\frac{2D_{i-1/2,j}}{\Delta \xi_{i-1,j} + \Delta \xi_{i,j}} \Delta \eta_{i,j} (H_{i-1,j} - H_{i,j}) \\ Q_{i,j-1/2} = -\frac{2D_{i,j-1/2}}{\Delta \eta_{i,i-1} + \Delta \eta_{i,j}} \Delta \xi_{i,j} (H_{i,j-1} - H_{i,j}) \end{cases}$$
(6)

式中: Q为网格单元的流量传递, m^3 ; D为扩散系数; H为水头高度,m; $\Delta \xi$ 和 $\Delta \eta$ 为网格单元的长度和宽度,单位:m或mm。

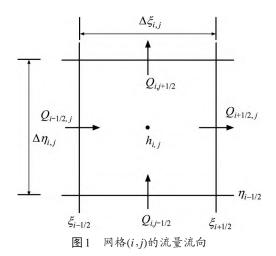


Fig. 1 Flow direction of grid (i, j)

在道路网格系统中,若以流量 Q 作为网格间的径流传递单位,则需控制网格体积一致,但在实际操作中,道路网格的划分往往难以实现控制网格等体积。为了参数化网格间水流传递,引入在空间和时间上变化的传递系数 C, 定义为相邻网格间单位时间内传递的流量与该 2 个网格所构成区域面积的比值。利用曼宁公式的非线性扩散系数的计算公式,得到网格间传递系数的计算式如式(7):

$$\begin{cases} (C_{\xi})_{i-1/2,j} = \frac{2D_{i-1/2,j}}{l_{i,j}(l_{i-1,j} + l_{i,j})} \\ (C_{\eta})_{i,j+1/2} = \frac{2D_{i,j+1/2}}{w_{i,j}(w_{i,j+1} + w_{i,j})} \end{cases}$$
(7)

式中: C_{ϵ} 为网格沿道路纵向的扩散系数; C_{η} 为网格沿道路横向的扩散系数; $I_{i,i}$ 和 $w_{i,i}$ 为网格单元的长

度和宽度, m。

采用内插值方法计算边界中心处的径流深度和有效非线性扩散系数。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2类因素,结合式(5)~(6)和曼宁公式的非线性扩散波模型,并代入连续性方程简化后得式(8):

$$\frac{dh_{i,j}}{dt} + f(h) + f(z) - r = 0$$
 (8)

其中: f(h)和f(z)分别是考虑径流深度和高程对流速的影响而进行的修正。在实际应用中,水面高度 (H)通常比水深(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,截断误差由水深和表面高度之间的差异 $(h/z=10^\circ)$ 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(9):

$$\frac{h_{ij}^{k+1} - h_{ij}^k}{\Delta t} + f(h) + f(z) - r = 0$$
 (9)

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,即初始路表径流水深为 $h_{i,j}$ =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。为控制得出不同坡度组合对积水深度的影响,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。本研究中,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 模型验证

考虑到道路网格划分的难易程度,可根据道路超高缓和段的实际长度和宽度情况进行网格划分,如图2所示。

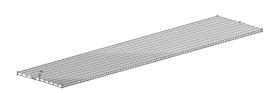


图2 超高缓和段网格划分

Fig. 2 Meshing of superelevation transition section

基于式(9)进行程序设计,流程图如图3所示。 设置时间梯度,实现基于时间梯度公路路表的径 流深度的迭代计算。

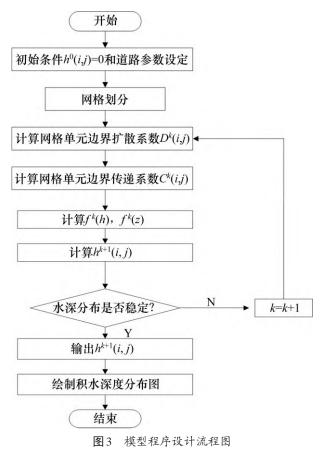


Fig. 3 Model program design flow chart

根据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。 实验对各个时间梯度的路表积水深度分布状况绘 制等高线图,并对所绘制的积水深度分布图进行 对比分析,可知一定时间梯度后超高缓和段的水 深分布不再发生变化,可认为积水深度分布趋近 于稳定。

为对模型的可行性进行验证,不考虑模型生成边缘单元的积水分布。以双向4车道整体式路基公路的单侧为例,超高过渡方式为绕中央分隔带边线旋转。在路拱横坡 i_s =2%的状态下分别控制纵坡i,超高横坡i,和降雨量r进行实验,具体结果如图4所示。

对图4进行分析可知: 1) 纵坡由2%增至3% 或超高横坡由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7 mm,后者为12 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。2)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显著地使路表积水流速的分布发生变化,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)若径流长度较长,如图4(a)和图4(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4(b)和4(c)所示,径流长度变短,流速变大,排水加快。

祁颖智¹⁸¹在各要素对路面径流深度敏感性研究中,通过仿真分析得出降雨强度越大,路面径流深度越大;路拱横坡的增大有利于路面径流深度的减少,相较于纵坡,横坡的增加对于路面积水的快速排出效果更为显著。张理等^[21]在研究路面坡度对水膜厚度的影响时,通过理论推导得出水膜厚度随着横坡坡度的增大而减小,随着纵坡的增大而增大,水膜厚度随着横坡减小而增大的幅度要明显大于水膜厚度随纵坡减小而减小的幅度。

综上可知,本研究所建立的模型能够较好地 反映坡面径流问题。

3 实验设计

一般来说,纵坡越大越利于排水,在附加坡度的研究中,若纵坡大于1%,则不会因道路外侧抬起而形成坡度少于0.3%的纵坡。道路曲线段的超高值越大越利于坡面排水,但是不利于行车安全,一般地区的道路在设计中曲线超高值取值多为整数,如2%,3%,4%和5%,小半径曲线则会取较大值。纵坡或横坡较大,进行实验意义不大。为简化实验,本研究设定缓和段的超高渐变率为1/330,固定道路宽度,将道路纵坡、超高横坡和超高缓和段长度作为控制变量。道路纵坡坡度控制在0.3%~1%范围内,取值为0.3%,0.5%,0.7%和0.9%;超高横坡常规取值2%,3%,4%和5%,在此基础上进行坡度组合设计实验。

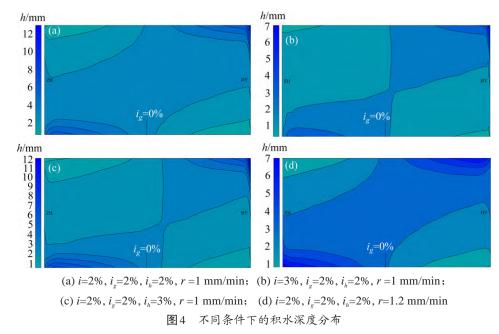


Fig. 4 Distribution map of stagnant water depth under different conditions

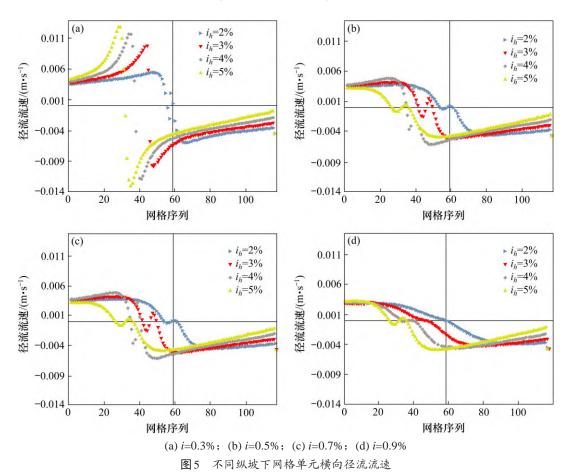


Fig. 5 Transverse runoff velocity diagrams of grid cells under different longitudinal slopes

为研究得到在最利于坡面排水的坡度组合, 按上述实验进行设计,评价得出纵坡临界值。在 评价指标选取方面,需要考虑到在不同坡度组合 下坡面积水的流速和径流在最不利位置的水膜厚度,以分别反映径流汇聚并流出路表的速度和对行车安全的影响。故以坡面径流流速和超高零坡

处的积水厚度为评价指标。

3.1 径流流速

设定道路宽度为10 m,路段长度为120 m,提取道路网格,利用积水分布模型计算坡面各单元的径流深度。以道路横向为研究方向,计算网格单元间径流流速。各道路纵坡下的径流横向流速图如图5。

由图5易知,道路网格单元横向径流速度整体 关于超高零坡呈对称分布,流速基本由两侧向超 高零坡逐渐降低。分析可知:1)在实验的纵坡范 围内,随坡度的增大横向径流流速的变化趋势愈 加稳定,纵坡大于0.5%后,各网格单元间流速变化较小,保持稳定;2)在超高零坡(即各曲线与横轴的交点)及其附近区域,流速基本为0,在距离零坡约20m处,横向径流速度达到最高值;3)在同一纵坡条件下,超高横坡越大,其稳定横向径流速度越大,对比图5(a)和图5(b),易知坡度增大,横向径流速度降幅愈大;4)对比纵坡0.5%,0.7%和0.9%时的径流流速,可以初步确定,纵坡0.3%~0.5%为宜,横坡排水能力优于纵坡。

各超高横坡下的径流横向流速如图6。

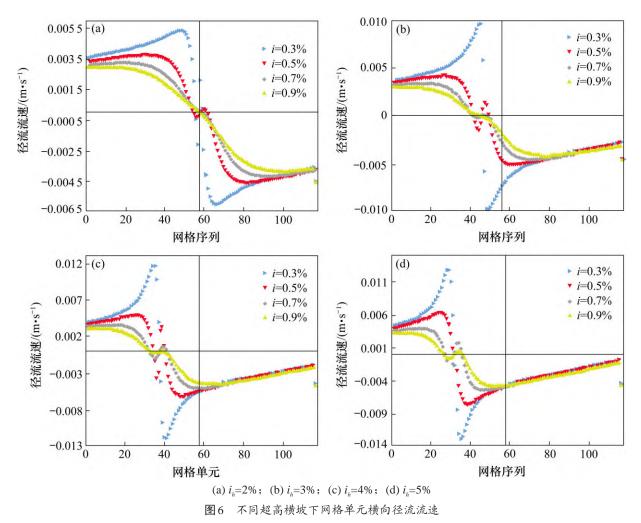


Fig. 6 Transverse runoff velocity diagrams of grid cells under different superelevation cross slopes

不同超高值条件下,流速最大值分别为5.5,10,12和13 mm/s,显然,超高横坡值的增大明显导致坡面流速的增大,且超高值在达4%后,径流速度趋于稳定。较图6相比,控制横坡不变时,不同纵坡间网格单元流速差距均小于控制纵坡时不

同横坡间网格单元流速差距,可进一步验证道路 横坡的坡面排水能力优于纵坡。初步可以确定, 超高值取2%~4%间为宜。

3.2 径流深度

坡面积水深度对行车安全影响较大,为进一

步研究超高缓和段的最佳坡度组合,需对超高零坡处的积水深度进行评价分析。计算获取各超高零坡处的径流深度值,具体如表1所示。

表1 不同坡度组合下超高零坡处积水深度均值

Table 1 Average depth of water accumulation at superelevation zero slope under different slope combinations

纵 坡/%	超高 值/% 径流深度 值/mm	2%	3%	4%	5%
0.3%		4.850 6	4.894 5	5.074 7	5.189 0
0.5%		4.853 2	4.957 3	5.077 6	5.188 3
0.7%		4.999 6	5.054 4	5.075 8	5.289 8
0.9%		4.999 6	5.054 3	5.078 0	5.290 3

根据表1可知,在一定的超高下,纵坡小于1%时,其坡面径流在超高横坡为0附近区域的积水深度变化较小,均约在5 mm,变化幅度约为-0.1~0.1 mm。易知,超高零坡附近区域的积水深度受纵坡和横坡影响均较小。在对横向径流流速研究时,初步确定适宜坡度为0.3%~0.5%,超高横坡适宜值为2%~4%。结合径流深度值的分析,纵坡临界值以0.3%~0.5%为宜,超高横坡值范围为2%~4%。

4 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,客观地反映实际的坡面水流状况。
- 2) 实例分析验证了道路纵坡、横坡及降雨强度对路表积水径流深度有一定程度的影响。较道路纵坡相比,横坡对坡面排水的影响更为显著。在一般暴雨条件下,雨水主要集中在道路边界处,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。在道路设计阶段,在控制纵坡的基础上,为利于排水可适当增大超高横坡。
 - 3) 超高缓和段因附加坡度的存在易造成较小

的合成坡度,等距选取纵坡范围 0.3%~1% 内的纵坡值进行差异性分析。实验验证了在一般暴雨条件下横坡对道路坡面排水的影响更显著,以道路网格单元横向径流流速和超高零坡附近的径流深度为评价指标,表明道路纵坡为 0.3%~0.5%,超高横坡值为 2%~4% 时对超高缓和段道路的排水有利。

4) 本研究在假设封闭区域情况下分析坡度组合对坡面排水的影响,后续的研究可将边界的流入和流出纳入进行分析。本实验调整纵坡与横坡,得出不同超高横坡下的临界纵坡值,但对纵坡值的研究范围缺乏一定的广度,在后期的研究将进行进一步的考虑。

参考文献:

- [1] 潘兵宏,赵一飞.基于路面排水要求的公路几何设计 [J]. 中南公路工程, 2005, 30(3): 109-112.
 - PAN Binghong, ZHAO Yifei. Highway geometric design with consideration of pavement drainage[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(3): 109–112.
- [2] 任俊雯,梁小光,陶涛,等.基于运动波方程的地面集水时间计算及参数研究[J].中国给水排水,2019,35(1):118-122.
 - REN Junwen, LIANG Xiaoguang, TAO Tao, et al. Calculation and parameter analysis of time of concentration based on kinematic wave equation[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(1): 118–122.
- [3] CRISTINA C M, SANSALONE J J. Kinematic wave model of urban pavement rainfall-runoff subject to traffic loadings[J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(7): 629-636.
- [4] JEONG J. A hydrodynamic diffusion wave model for stormwater runoff on highway surfaces at superelevation transitions[D]. Texas: The University of Texas at Austin, 2008.
- [5] 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, GUPTA P K, 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.
- [6] RESSEL W, WOLFF A, ALBER S, et al. Modelling and simulation of pavement drainage[J]. International Journal

- of Pavement Engineering, 2019, 20(7): 801-810.
- [7] FWA T F, KUMAR S S, ONG G P, et al. Study of effect of rib tire on hydroplaning by analytical modeling[C]. Washington, D. C.: Transportation Research Record, 2008: 109–118.
- [8] 祁颖智. 基于道路线形组合的路面径流行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
 - QI Yingzhi. Effect of road alignment combination on pavement runoff characterisrics[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [9] CHARBENEAU R J, JEONG J, MARRETT M E, et al. Highway drainage at superelevation transitions[R]. Austin, Texas: Center for Transportation Research at the University of Texas at Austin, 2008.
- [10] 戚明敏. 降雨对山区高速公路行车安全影响与保障技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
 - QI Mingmin. Study on the safety & security of freeway in mountainous area under rainy condition[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [11] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 等. 道路表面水膜厚度预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 1-3.

 JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan, et al. Prediction model of rain water depth on road surface[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,
- [12] 杨洋, 李莉莉. 国内外公路超高设计对比分析及其应用研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 7-13.

4(3): 1-3.

- YANG Yang, LI Lili. Comparative analysis and application research on super elevation design for highways at home and abroad[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(3): 7–13.
- [13] 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.
 - ZHANG Aihua, NIU Xiao. Study on water treatment measures for super-high transition section of expressway in rainy area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology), 2020, 16(8): 32–33, 39.
- [14] 潘兵宏,周海宇,刘斌,等.基于CarSim 仿真的超高过渡起点位置对比研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(3):637-644.
 - PAN Binghong, ZHOU Haiyu, LIU Bin, et al.

- Comparative study of superelevation starting position based on CarSim simulation model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 637–644.
- [15] 刘琦. 考虑纵坡影响的超高渐变率及排水设计研究[J]. 交通科技, 2019(6): 22-25.
 - LIU Qi. Research on ultra-high gradation rate and drainage design considering the influence of longitudinal slope[J]. Transportation Science & Technology, 2019(6): 22–25.
- [16] 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 super-elevation sections of S curve considering flow path length[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(4): 594–596, 691.
- [17] 周万虎, 李大维. 基于路面排水的高速公路超高过渡段设计探讨[J]. 华东公路, 2013(4): 23-25.

 ZHOU Wanhu, LI Dawei. Discussion on design of superhigh transition section of expressway based on pavement drainage[J]. East China Highway, 2013(4): 23-25.
- [18] 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 multilane expressway under rainy condition[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [19] 王袆祚, 李光元, 张泽垚, 等. 雨天公路水膜厚度模型验证及行车安全性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29): 128-132.
 - WANG Yizuo, LI Guangyuan, ZHANG Zeyao, et al. Verification of water film depth model and highway traffic safety in rainy day[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(29): 128–132.
- [20] SINGH V P, ARAVAMUTHAN V. Errors of kinematicwave and diffusion-wave approximations for steady-state overland flows[J]. CATENA, 1996, 27(3/4): 209–227.
- [21] 张理, 张卓. 路面坡度对水膜厚度的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 404-406, 423. ZHANG Li, ZHANG Zhuo. Impact of road slope on water film thickness[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(3): 404-406, 423.

(编辑 阳丽霞)