

线形受限地下快速路交通运行特性研究

祁文洋, 王作杰

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 针对苏州独墅湖南隧道接线(NE匝道)大纵坡接小半径不利线形组合及NE与S1匝道合流区“左进”错觉等不利线形条件,采用驾驶模拟试验,建立地下快速路匝道及合流区的模拟场景,继而进行匝道及合流区的速度轮廓、纵向加速度标准差和横向偏移分析。结果表明:NE匝道速度方差较大,存在行驶安全风险;NE与S1匝道合流区存在频繁的加减速操作,可能造成合流区的安全隐患。通过设置减速标线、限速标志及轮廓标可提高行驶安全性,改善车辆横向偏移。

关键词: 地下快速路;驾驶模拟;速度轮廓;纵向加速度;横向偏移

中图分类号: U412.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0037-04

Research on Traffic Operation Characteristics of Restricted Linear Underground Expressway

QI Wenyang, WANG Zuojie

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

Abstract: A driving simulation test is carried out to solve the unfavorable linear combination of large longitudinal slope and small radius in Suzhou Dushu Lake South Tunnel Connection (NE Ramp) and the illusion of "left approach" in the confluence area of NE and S1 ramps. A simulation scenario of underground expressway ramp and confluence area is built to analyze the velocity profile, longitudinal acceleration standard deviation and lateral migration in ramps and confluence areas. The results show that the velocity variance of NE ramp is large, which has a driving safety risk. There are frequent acceleration and deceleration operations in the confluence area of NE and S1 ramps, which may cause the safety risks in the confluence area. The driving safety and lateral migration of vehicles can be improved by setting the deceleration marks, speed limit signs and contour marks.

Keywords: underground expressway; driving simulation; velocity contour; longitudinal acceleration; lateral migration

0 引言

随着驾驶模拟设备和试验技术的不断发展,驾驶模拟环境和场景的真实性不断增强,驾驶模拟成为道路线形安全评价的重要手段和主要发展趋势。研究人员通过驾驶模拟试验研究了驾驶员转向、加速等行为对道路主线车流的影响,分析了车流速度、驾驶员年龄和性别对事故风险的影响^[1];还有学者对超车、跟车、车道变换、事故避险等行为进行了研究^[2]。其他研究显示:地面道路通过衔接地下道路可以对地上交通起到较好的缓解作用^[3];在城市快

速路进出匝道的布置上,受地面道路交通情况和施工可行性制约,常采用左侧布置形式^[4]。对地下快速路左侧匝道的研究目前尚处于车辆安全运行特征研究阶段,研究显示,左侧匝道的冲突频率、冲突严重程度显著高于右侧匝道^[5]。

1 工程概况

苏州独墅湖南隧道西接东方大道-醒湖路路口,受接线条件及建设用地限制,吴中区东方大道方向隧道接线需要在较短的距离内上跨苏申外港,然后下穿尹山河,隧道接线(NE匝道)最大纵坡在5.3%左右,坡长约380 m,且纵坡底部接一处 $R=175$ m的圆曲线半径,属于对行车安全不利的线形组合。此外,在S1匝道和NE匝道合流处,可能产生“左进”的错觉,如图1所示。

收稿日期: 2024-01-24

基金项目: 苏州市住房和城乡建设局科研项目(苏住建科[2018]7号)

作者简介: 祁文洋(1985—),男,博士,高级工程师,从事道路交通设计研究工作。

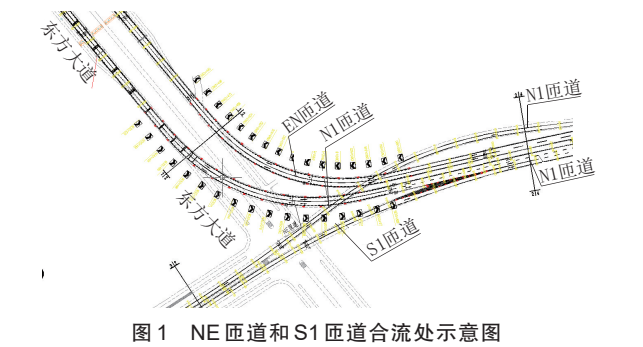


图1 NE 匝道和S1 匝道合流处示意图

2 驾驶模拟试验方法

2.1 试验设备

如图2所示,驾驶模拟器所采用的硬件设备包括:座椅,刹车及油门脚踏板,外接方向盘及操纵杆,显示屏(LED,3块)。LED显示屏可提供的视野角度为135°,确保驾驶感觉更加趋于实际。



图2 驾驶模拟试验设备

2.2 场景建立

参考NE匝道和S1匝道的实际组成建立试验场景,其中两个匝道的设计车速为30 km/h,合并形成主线隧道之后的设计车速为50 km/h,平、纵线形的设计参数及隧道入口相对位置的设置均参照独墅湖第二通道设计资料,并结合相关设计规范进行微调。具体设计参数见表1。根据设计的试验场景,使用SCANeR Studio™ 仿真软件中的Terrain 模块建立试验场景的道路逻辑层。建立的试验场景如图3所示。

NE匝道单向两车道的宽度为3.50 m×2,侧向净宽为0.75 m,建筑限界宽度为8.5 m;醒湖路S1匝道单向两车道的宽度为3.50 m×2,侧向净宽为0.5 m,建筑限界宽度为8.0 m;主线单向3车道的宽度为3.50 m×3,侧向净宽为0.75 m,建筑限界宽度为12.0 m。隧道内模拟场景如图4所示。

在交通模拟中,大型车混入率采用最普遍出现的6%,大型货车与大型客车的比例采用1:3。各种车辆的换算系数按现行规范换算^[6]。当前交通量及10、20 a后的预测交通量见表2。

表1 平、纵线形设计参数

路段	长度/m	终点桩号	线形	坡度/%
NE 匝道	25	NE K0+430	直线	-5
	60	NE K0+490	缓和曲线	-5
	20	NE K0+510	圆曲线 R=175 m	-5
	115	NE K0+625	圆曲线 R=175 m	-2
	60	NE K0+685	缓和曲线	-2
	32	NE K0+717	直线	-2
S1 匝道	125	S1 K0+325	圆曲线 R=800 m	-1
	30	S1 K0+355	圆曲线 R=800 m	-2
主线	78	NE K0+795	直线	-2
	180	S1 K0+600	直线	-2
	60	S1 K0+415	缓和曲线	-2
	185	S1 K0+600	直线	0



图3 驾驶模拟试验场景



图4 隧道内模拟三维场景

表2 预测交通量

路段	单位:pcu/h		
	当前	10 a后	20 a后
S1 匝道	740	1 227	1 495
NE 匝道	1 974	2 799	3 299

2.3 试验人员

试验数据的质量直接影响着试验结果的可靠性,因此选择合适的试验人员进行模拟试验是十分重要的。参加本次试验的驾驶员需要满足以下条件:持有机动车驾驶执照,身体健康、精力充足,无不良驾驶习惯。最终选取了10名驾驶员,其中男性8人、女性2人,年龄在23~31岁。被试者按照设计的场景顺序进行模拟驾驶。每一次试验结束后,驾驶员可进行短时间休息以保证驾驶精力,每个场景重复次数为3次。从NE匝道出发行驶至合流处,从S1匝道出发行驶至合流处,被试者未被明确告知各路段的设计运行速度,被试者以预设起始速度出发,在行驶过程中,不可换道。

3 交通运行特性分析

3.1 NE 匝道驾驶行为分析

NE 匝道驾驶模拟测试得到的速度轮廓如图 5 至图 7 所示。

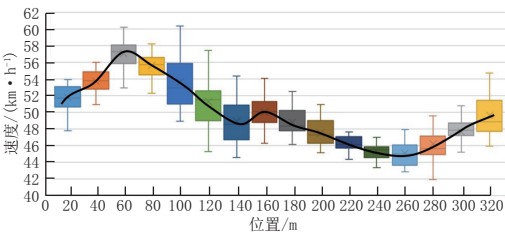


图 5 NE 匝道速度轮廓图(当前交通量)

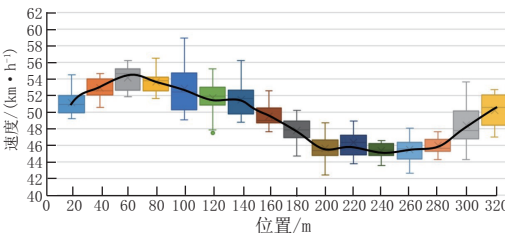


图 6 NE 匝道速度轮廓图(10 a 后交通量)

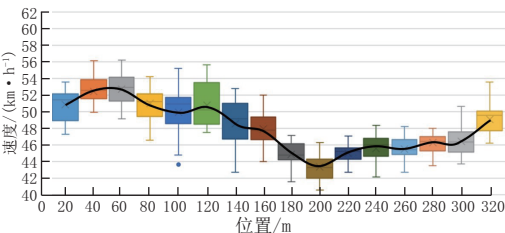


图 7 NE 匝道速度轮廓图(20 a 后交通量)

可以看出:在匝道直线下坡段,速度快速上升;在缓和曲线段,速度迅速下降;由于弯道半径较小,车辆过弯行驶速度维持在 45 km/h 左右;在通过圆曲线后,车辆出现短暂加速行为和一个速度瓶颈期。对于 0~60 m 的加速段,可能的加速原因是 NE 匝道段的纵坡坡度,此处的纵坡坡度为-5%。根据汽车动力学分析,汽车在一定坡度和坡长的下坡路段滑行时,车辆主要动力为自身重力在坡道上的分力,主要阻力为车辆的发动机制动力、空气阻力和滚动阻力^[7]。在纵坡坡度-5%的情况下,在坡道上车辆的重力分力将会提升其速度。在不同交通流量情况下,速度的提升量不同,在当前交通流情况下,车流密度较小,车辆速度为 58 km/h 左右,而 10、20 a 后,由于车流密度增大,其最大速度会有显著下降。之后,当车辆行驶在小半径曲线段时,运行速度较低,在衔接段会发生车速的不连续,造成安全风险。

此外,还可以看出,在缓和曲线段,不同驾驶者的速度差异很大,这会导致额外的行驶安全风险。10、20 a 后的速度方差明显大于当前交通量的方差,

这是由于当前的交通流密度较低,驾驶员选择行驶速度的随机性较大,速度方差较大,20 a 后,由于交通流情况可能存在一定的拥堵,驾驶者出现了较多的加减速行为,所以导致了速度方差增大。

横向偏移的最大值,即车辆在一定时间内偏离道路中线的最大距离,能够直观反应出车辆偏离道路中线的程度,可以较好地反映出车辆的横向稳定性。当前、10 a 后、20 a 后的 NE 匝道横向最大偏移以及 NE 匝道与 S1 匝道合流段的纵向加速度标准差最大值见表 3。

表 3 合流区 NE 匝道偏移与纵向加速度表

指标	当前	10 a 后	20 a 后
最大横向偏移/m	1.40	1.24	1.15
纵向加速度标准差	1.4	2.1	2.7

可见:随着车流量的增加,在 NE 匝道上行驶的车辆,其横向最大偏移逐渐减小,这也在一定程度上验证了驾驶模拟试验的可靠性;在合流区域的车辆,其纵向加速度标准差随着交通流密度增大而增加,表明合流区内的车辆存在频繁的加减速操作,导致车辆合流时产生冲突点隐患。

3.2 NE 匝道限速效果分析

NE 匝道的纵坡坡度为-5%,后接小半径曲线,根据本文第 3 章的速度轮廓分析,车辆在纵坡段行驶时的速度不断上升,在圆曲线段行驶时的速度急剧下降,为了实现速度的平顺,在缓和曲线段添加横向减速标线和限速标志。横向减速标线的坐标为 45、60、75、90、105 m,即在 NEK0+450、NEK0+465、NEK0+480、NEK0+495、NEK0+510 处布设横向减速标线,并添加强制性限速设施。强制性限速设施为限速牌,其上要有明确的限速提示,要求驾驶员按照限速要求控制车速。于坐标 45、90 m 处,即 NEK0+450、NEK0+495 处布设限速牌以及合流标志。安全设施布设如图 8 所示,模拟效果如图 9 所示。

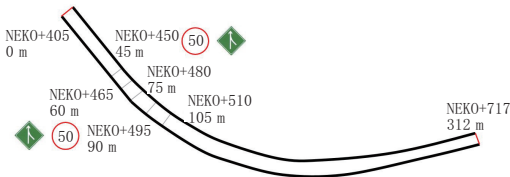


图 8 NE 匝道安全设施布设位置图

设置横向减速标线、限速标志以及合流标志,在不同交通流情况下每位驾驶员分别进行 3 次仿真驾驶模拟,得到当前、10 a 后、20 a 后交通状况下的速度轮廓图(见图 10 至图 12)。

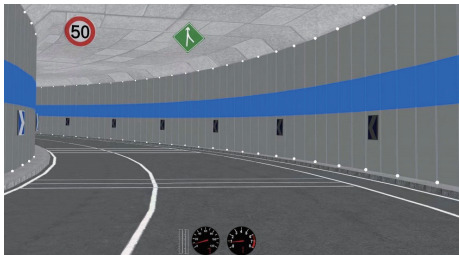


图9 NE 匝道安全设施布设模拟效果图

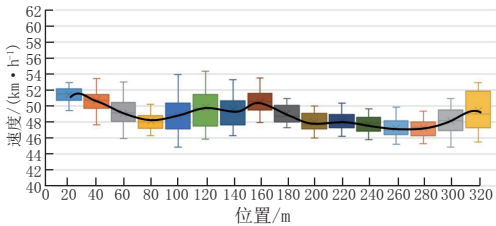


图10 NE 匝道布设安全设施后速度轮廓图(当前交通量)

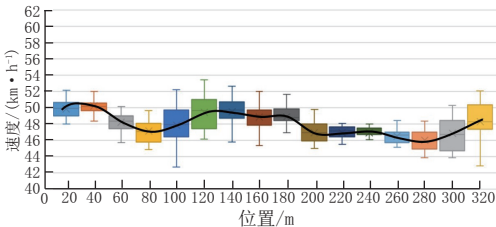


图11 NE 匝道布设安全设施后速度轮廓图(10 a后交通量)

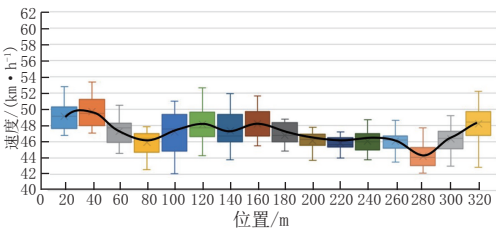


图12 NE 匝道布设安全设施后速度轮廓图(20 a后交通量)

可以看出,弯道段的车辆行驶速度显著下降,实现了速度轮廓的“削峰填谷”,保证了速度轮廓的平顺性,尤其是保证了圆曲线段和邻近合流区段的速度平顺性,显著提高了车辆行驶的安全性。为了控制车辆的横向偏移,采用点线式轮廓标,明确道路线形,轮廓标布设范围为 NEK0+490 至 NEK0+625,即横坐标 85~220 m 范围。轮廓标布设前、后的车辆行驶横向最大偏移见表 4。可见,布设点线式轮廓标后,最大横向偏移明显改善,能减少对邻近车道的侵扰。

表4 NE 匝道横向最大偏移 单位:m

指标	当前	10 a后	20 a后
安全设施布设前	1.40	1.24	1.15
安全设施布设后	1.07	0.93	0.87

综上,通过合理布设横向减速标线、限速标志及合流标志等安全设施,可以有效改善线形受限条件下地下快速路的交通运行状况。

4 结 语

该文基于苏州独墅湖南隧道接线 NE 匝道及其合流区几何特性,建立了地下道路分合流区的驾驶模拟场景,通过驾驶模拟试验,分析了匝道上的速度轮廓,以及纵向加速度标准差、横向偏移等指标。该文提供了一种可靠的仿真分析方法,可为地下快速路的设计和安全评价提供参考。

结果表明:NE 匝道上不同驾驶者的速度差异方差很大,这会导致额外的行驶安全风险,需要布设一定限速设施。根据横向偏移分析,在车流量更小的时候,驾驶员控制车辆横向稳定性的能力有所减弱,更需要注意保持横向稳定。基于对合流区的纵向加速度分析,发现了极大的纵向加速度标准差,说明合流区存在频繁的加减速操作,这可能造成合流区的安全隐患。

参考文献:

[1] 吕能超,王玉刚,周颖,等.道路交通安全分析与评价方法综述[J].中国公路学报,2023,236(4):183-201.
[2] 仲璜.驾驶人避险行为特征分析与避险能力判别研究[D].西安:长安大学,2022.
[3] 白莲森,黎强,李海南,等.特大城市核心区地下道路改造设计实践与思考[J].交通与运输,2023,51(增刊1):48-51.
[4] 黄兰可,徐梦濛.城市快速路左进左出变速车道长度研究[J].现代交通技术,2019,16(6):65-72.
[5] 万晓敏,邵敏华,孙立军.左进地下快速路合流区交通流特征研究[J].交通信息与安全,2016,197(2):117-122.
[6] CJJ 37—2012,城市道路工程设计规范[S].
[7] 刘环.互通式立交匝道纵坡与坡长参数研究[D].西安:长安大学,2013.