

隧道群连接段临界安全行车速度研究

诸文江 潘晓东

同济大学，交通运输工程学院，上海 201804

摘要：在考虑隧道群行车安全的基础上，提出隧道群定义。根据安全行车间距模型提出了停车视距下和跟车状态下的安全行车速度计算公式。分析了隧道群路段摩擦系数、行车速度、反应时间等安全影响要素，给出不同天气、路面条件下各要素的取值，通过理论计算得出了隧道群连接段不同条件安全速度取值，得出不同速度下隧道群连接段的最大安全流量，为隧道群连接段的运营和安全管理提供依据。

关键词：隧道群；交通安全；行车速度；摩擦系数；交通量

中图分类号：U459.2;U491 文献标识码：A

文章编号：1672-4747 (2014) 01-0074-05

DOI:10.3969/j.issn.1672-4747.2014.01.005

Critical Driving Speed Research on

Tunnel Group Connection Segments

ZHU Wen-jiang PAN Xiao-dong

School of Transportation Engineering,

Tongji University, Shanghai 201804, China

Abstract: Considering the traffic safety in a tunnel group, the tunnel group was defined. The formula of critical driving speed in free drive status and car-following status was given according to the safe driving distance model. According to the model, the factors of the tunnel group, such as the coefficient of friction, the speed, the reaction time were analyzed and valued under different weathers and different road surfaces. Then, the critical driving speeds were given in different conditions. The result shows that the critical driving speeds can provide a basis for the safety management in the tunnel group.

Key word: Tunnel group, road safety, driver speeds, friction coefficients, traffic volumes

收稿日期：2013-03-18.

基金项目：国家自然科学基金项目《山区公路高桥墩路桥过渡段行车安全及对策研究》（E0807）。

作者简介：诸文江（1989-），男，福建南平人，同济大学硕士研究生，主要研究方向为道路交通安全与环境工程。

0 引言

近年来,我国的高速公路里程不断增长,隧道里程和交通流量也飞速增加,隧道内行车安全问题已经日益突出。

隧道群连接段是隧道群行车环境突变的路段,也是隧道群事故多发路段。驾驶员驶进和驶出隧道时明暗变化、路面摩擦系数等的剧烈变化导致驾驶员难以及时调整车辆间的安全距离和车速,极易导致追尾事故的发生。对京珠高速公路韶关段 4 个隧道 2003 年和 2004 年的交通事故资料进行分析,其中追尾相撞事故突出,占事故总数的 57.46%^[1]。应用当量事故数和事故率鉴别法确定京珠高速公路韶关段隧道群连接路段是事故黑点之一^[2]。

为确保隧道群行车安全,有必要对隧道群连接段的安全行驶速度进行研究,并提出隧道群连接段的交通安全对策。

1 隧道群定义

现阶段国内外相关领域对于单个隧道分类已经开展了众多研究,然而,国内外关于隧道群的定义未给出一个统一的结论。《公路隧道交通工程设计规范》^[3]从设计施工角度出发,将距离 100 m 内的两隧道定义为隧道群,并指出:在设计时,可将隧道群视为长隧道,其平纵线形技术指标按长隧道考虑。王少飞^[4]根据两隧道之间通风、照明、交通安全、防火安全等因素,提出了隧道群的概念:当两隧道间距 $L \leq 250$ m 时定义为毗邻隧道;当两隧道间距 $250 \text{ m} < L \leq 1\,000$ m 时,定义为连续隧道;毗邻隧道和连续隧道统称为隧道群。但该定义未考虑两临近隧道对驾驶行为的影响。周忠业^[5]等人提出极限距离为驾驶员驶出隧道“明适应”过程中的驶出距离加上驾驶员视点落在下一隧道的距离。

本文从交通安全方面考虑,将隧道群进行定义:若下游隧道入口的车辆对行驶在这 2 个隧道之间的车辆行驶造成影响,则定义为隧道群。驾驶员从上游隧道出口驶出,在明适应过程中看到下游隧道进口的

障碍物能及时停车,则定义为连续隧道,而当隧道群连接段长度小于一个停车视距时,驾驶员从上游隧道出口驶出后看到下游隧道进口的障碍物不能及时停车,此时下游隧道入口的行驶的车辆对上游隧道内部行驶的车辆也造成了影响,则定义为毗邻隧道,两者总称为隧道群。而当驾驶员从上游隧道出口驶出时在明适应过程中不受下游隧道进口的影响,则认为这是两条不同隧道。根据同济大学杜志刚^[6]的研究隧道出口适应时间一般不超过 12 s。由此可以算出基于行车安全的隧道群极限距离。

表 1 不同车速下隧道群的极限距离

Tab.1 The critical distances of the tunnel group at different vehicle speeds

车速/(km/h)	连续隧道极限 距离/m	毗邻隧道极限 距离/m
60	275	75
80	377	110
100	493	160
120	610	210

2 隧道群连接段安全约束分析

2.1 隧道群连接段纵向安全约束条件

车辆在隧道群连接段行驶时的安全约束条件主要是满足当车辆前方出现障碍物或前方车辆突然减速时,驾驶员有足够的距离进行减速。路面摩擦系数的变化是否满足着安全行车的要求造成隧道内事故高发的直接原因之一,是隧道入口两种路面工况(洞外为沥青路面,洞内为水泥混凝土路面)摩擦系数的差异^[7]。由于驾驶员在隧道群连接段行驶时通常会经历隧道内外多次摩擦系数的突变,车辆在刹车过程中受力较为复杂。

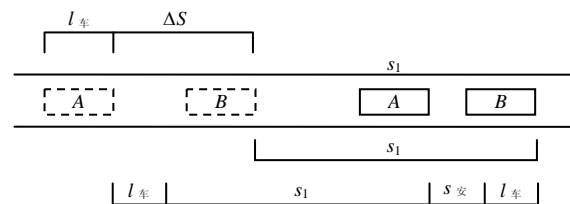


图 1 车辆紧急停车过程示意

Fig.1 Emergency brake process of the vehicles

由图 1 可得安全行车间距 ΔS 的表达式为

$$\Delta S = S_0 + l + S_2 - S_1$$

$$= S_0 + V \times t + \frac{V^2}{2g(\varphi_2 \pm i)} - \frac{V^2}{2g(\varphi_1 \pm i)} \quad (1)$$

式中, ΔS ——行车安全间距 (m);

S_0 ——最小车头间距 (m), $S_0 = S_{安} + l_{车}$, 根据《公路路线设计规范》^[5]对停车视距的计算, 取最小车头间距为 8 m。

l ——后车司机反应时间段内车辆行驶过的距离 (m);

t ——后车司机反应时间 (s), 为后车驾驶员认知反应时间 t_1 时间和制动生效时间 t_2 之和;

S_1 ——后车制动距离 (m);

S_2 ——前车制动距离 (m);

V ——行车速度 (m/s);

φ ——路面摩擦系数, 取值与路面粗糙程度、潮湿泥泞程度、轮胎花纹与轮胎气压、车速、荷载等因素有关;

i ——路段纵向坡度 (%), 上坡为正, 下坡为负。考虑驾驶员突然在看到前方障碍物或车辆急刹车时, 刹车板踩到低, 因此, 减速度为路面摩擦系数与路段纵向坡度之和。

(1) 自由流下的安全速度

自由流条件下, 驾驶员在道路上行驶不受其他车辆的干扰, 此时驾驶员的行车速度只需要满足停车视距要求, 即驾驶员发现前方突然出现障碍物时, 保持车辆不至于撞上障碍物的临界约束条件为:

$$\Delta S = S_0 + V \times t + \frac{V^2}{2g(\varphi_1 \pm i)} \quad (2)$$

则满足充分安全间距的临界行车速度为:

$$V = g(\varphi_1 \pm i) \times \left(\sqrt{t^2 - 2 \frac{S_0 - \Delta S}{g(\varphi_1 \pm i)}} - t \right) \quad (3)$$

(2) 跟车条件下的安全速度

在非自由流情况下, 驾驶员开车受到了前方车辆的影响, 处于跟车状态。驾驶员行车速度应满足跟车状态下的安全行车间距模型, 此时, 为能保证安全停车的基本安全间距, 考虑在最不利情况下驾驶员在隧道群连接段看见前方隧道内的车辆开始减速, 驾驶员在刹车过程中先后经历了两段不同摩擦系数的道路

(隧道外与隧道内):

$$\Delta S = S_0 + V \times t + \frac{V^2 - V_1^2}{2g(\varphi_1 \pm i)} + \frac{V_1^2}{2g(\varphi_2 \pm i)} - \frac{V^2}{2g(\varphi_2 \pm i)} \quad (4)$$

式中: V ——初始行车速度 (m/s);

V_1 ——后车进入隧道时行车速度 (m/s);

φ_1 ——隧道外路面摩擦系数;

φ_2 ——隧道内路面摩擦系数;

i ——路段纵向坡度 (%), 上坡为正, 下坡为负。

2.2 计算参数确定方法

2.2.1 反应时间确定

驾驶员认知反应时间 t 为后车驾驶员认知反应时间 t_1 与制动生效时间(抬脚到制动生效时间) t_2 之和, 《公路路线设计规范》^[8]对停车视距计算时, 取正常路段的驾驶员认知反应时间(判断时间)为 1.5 s, 运行时间(抬脚到制动生效)取 1.0 s。根据同济大学杜志刚^[9]的研究, 当车辆高速通过隧道进出口时, 由于剧烈的明暗过渡, 驾驶员瞳孔面积急剧变化, 且瞳孔面积变化率迅速增加; 如果超过驾驶员视觉适应能力, 瞳孔将难以准确聚焦从而难以在视网膜上清晰成像。进而产生瞬时盲期。隧道出口平均视觉振荡时间在 0.2 s, 所以, 隧道群连接段驾驶员反应时间为 2.7 s。

2.2.2 摩擦系数确定

隧道是相对封闭的结构物, 当隧道外受天气影响出现积水、结冰时, 隧道内还处于干燥的状态, 因此, 车辆在隧道群段特别是连接段行驶时, 路面摩擦系数往往发生突变, 导致车辆发生侧滑或侧翻等事故。

根据实验调查与经验总结, 可将路面状况分为六种类型, 其路面摩擦系数的确定方法见表 2^[10]。

表 2 摩擦系数与路面状况的关系

Tab.2 Relationship between the friction coefficients and the road conditions

摩擦系数	对应路面状况
≥ 0.65	常温、干燥、无杂质
0.56~0.64	潮湿、少量积水、低温
0.51~0.55	积水、低温
0.41~0.50	积水、浮雪、霜
0.31~0.40	积雪
<0.30	结冰

根据同济大学胡朋的研究^[11],使用时间较长的沥青混凝土路面,摩擦系数为 0.63;使用时间较长的水泥混凝土路面由于长时间的磨损,表面较光滑,摩擦系数较低,只有 0.53。隧道内因防火考虑多为水泥路面,故计算中设隧道内路面摩擦系数为 0.6。

2.2.3 安全间距确定

在交通密度低的情况下安全间距 ΔS 采用停车视距与能见度的较小值。当交通密度增大,车辆车头间距小于道路的停车视距时安全间距采用车头间距。车头间距难以通过仪器直接测量,但可以通过车速和交通流量计算出车头时距:

$$h_s = \frac{3600V_s}{Q} \quad (5)$$

式中: h_s ——平均车头间距 (m),

V_s ——平均车速 (m/s),

Q ——交通量 (veh/h)。

3 隧道群连接段限速的确定

3.1 车辆行驶制动安全车速分析

根据隧道群连接段安全速度计算公式知安全车速与路面摩擦系数、纵坡、停车视距、反应时间、道路交通情况有关,因此,按照这些因素分类计算安全车速随着不同驾驶状态、摩擦系数和车速的变化趋势。

从图 2 可以看出当驾驶员行驶在隧道群连接段

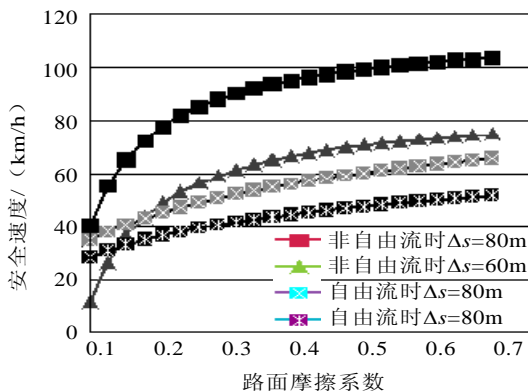


图 2 不同交通状况下的隧道群连接段安全临界车速

Tab.2 The critical speeds on tunnel group connection segment under different traffic conditions

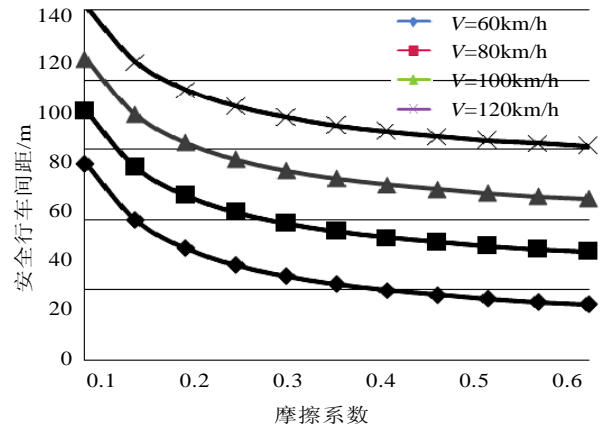


图 3 跟车状态下安全行车间距

Tab.3 Safety driving distances under the car following state

时,安全行车速度随着路面摩擦系数的减小而减小。摩擦系数较大时非自由流情况下的安全车速变化较小,摩擦系数小于 0.3 时安全车速下降较快。摩擦系数较大时能见度对安全的影响大于车流的影响,而当摩擦系数降到一定程度时,车流对安全车速的影响大于能见度下降对安全车速的影响。

3.2 隧道群连接段限制车速确定

3.2.1 自由流情况下隧道群安全限速

自由流条件下,驾驶员在道路上行驶不受其他的车辆的干扰,此时,驾驶员的行车速度只需要满足停车视距要求,安全间距应为道路停车视距和能见度两者取小值。

根据式 (3),选取不同天气、路面摩擦系数、能见度计算临界安全车速(如表 3 所示)。

表 3 隧道群连接段不同停车视距下的安全临界车速

Tab.3 The critical speeds on tunnel group connection segment with different stopping sight distances

安全间距/m	路面摩擦系数					
	干燥	潮湿	积水	积雪	结冰	
>200	118	109	97	97	83	62
200~150	97	90	81	81	69	52
150~100	73	68	61	61	53	40
100~50	41	39	36	36	32	25
50~30	25	24	22	22	20	16

注:限速值不能超过高速公路设计速度。

从表3可以看出,当能见距离降低时,限制车速的下降速率较快;其次当路面摩擦系数较大时,临界车速的下降速率较慢;路面摩擦系数较低时,临界车速的下降速率较快。综上所述,在能见度低时,车速的高低对道路安全的影响较大,进行车速限制对提高行车安全具有重要的作用。在冰雪路面行车,即使视距很好,路面车辆很少,时速也应控制在50 km/h以下。

3.2.2 跟车状态下隧道群流量车速关系

根据式(4)、(5)计算隧道群连接段在不同限速下的最大流量,用于隧道群连接段的安全管理中和不同通行能力下行车安全速度管理(见表4)。

4 结论

(1)本文主要分析了隧道群连接段对道路交通安全的影响。采用数学公式的方法,以跟驰模型得出了基于安全距离的高速公路最高车速限制值计算公式,和隧道群连接段对应不同能见距离、摩擦系数的安全车速。据此分别给出隧道群连接段对应不同摩擦系数、视认距离的车速限制取值建议。

参考文献

[1] 张生瑞,马壮林,徐景翠.高速公路隧道内交通事故分布规律[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(4).

[2] 张生瑞,马壮林,石强.高速公路隧道群段交通事故分布特点及预防对策.长安大学学报(自然科学版),2007,27(1):63-66.

[3] 重庆交通科研设计院.JTG/T D71-2004公路隧道交通工程设计规范[S].北京:人民交通出版社,2005.

[4] 王少飞.公路隧道分类及公路隧道群概念探讨[J].公路隧道,2009,(2):10-14.

[5] 周忠业,廖志高,柳本民等.高速公路隧道群行车特性及安全性分析[J].交通与计算机,2008,26(1):27-30.

表4 在跟车状态和不同车速的安全临界交通量

Tab.4 The critical car traffic volumes in the car following state at different speeds

行车速度/ (km/h)	路面摩擦系数					
	干燥	潮湿	积水	积雪	结冰	
	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
120	1 304	1 280	1 246	1 192	1 098	887
110	1 293	1 267	1 231	1 174	1 074	857
100	1 280	1 252	1 213	1 152	1 048	823
90	1 265	1 235	1 192	1 127	1 017	786
80	1 246	1 213	1 167	1 098	981	744
70	1 222	1 186	1 136	1 061	938	696
60	1 192	1 152	1 098	1 017	887	641
50	1 152	1 108	1 048	961	823	577
40	1 098	1 048	981	887	744	501

(2)摩擦系数较大时能见度对安全的影响大于车流的影响,而当摩擦系数降到一定程度时,车流对安全车速的影响大于能见度下降对安全车速的影响。

(3)当视认距离降低时,限制车速的下降速率较快,是车速下降的主要因素,当路面摩擦系数较大时,限制车速的下降速率较慢,路面摩擦系数较低时,限制车速的下降速率较快。

[6] 杜志刚.面向驾驶员视觉信息加工的行车安全评价模型研究[D].上海:同济大学,2007

[7] 中交第一公路勘察设计研究院.JTG D20-2006公路路线设计规范[S].北京:人民交通出版社,2006.

[8] 葛敏莉,孙璐.山区高速公路隧道交通安全研究[J].交通运输工程与信息学报,2013,(1):59-67.

[9] 杜志刚,潘晓东,杨轸等.高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究[J].中国公路学报,2007,20(5):101-105.

[10] 谢静芳,吕得宝,王宝书.高速公路路面摩擦气象指数预报方法[J].气象与环境学报,2006,22(6):18-21.

[11] 胡朋,潘晓东.不同状态下路面摩擦系数现场试验研究[J].公路,2011,(2):006.

(中文编辑:吴继屏)