

山区公路长隧道路段安全评价及线形优化研究

张烁, 郎君, 鞠永高

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 为提升隧道洞口路段的安全性, 分析路线线形要素对隧道路段行车安全的影响, 基于线形一致性安全评价原理, 结合规范对隧道洞口内外各 3 s 行程范围内平、纵线形的一致性要求, 提出隧道洞口线形一致性评价指标, 并通过运行速度预测模型和安全评价方法, 得出隧道洞口不同安全水平的评价标准; 以甘肃省某山区公路上海甸峡长隧道为实例, 对其工程可行性研究方案进行安全评价, 得出隧道进出口安全水平, 并对不良线形进行优化处理, 提出隧道洞口线形优化方法和安全措施。

关键词: 隧道; 公路线形; 洞口; 一致性指标; 安全评价; 优化措施

中图分类号: U412.32

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)03-0042-04

隧道作为一种特殊构造物, 在山区公路中占比较高。与正常路段相比, 由于地形条件限制, 隧道进出口区域处于照明过渡、线形过渡、空间大小过渡的交替段, 若隧道洞口的公路线形不能连续、顺适过渡, 极易引发追尾、刮擦、碰撞护栏、冲出路外等交通安全事故, 属于事故高发危险路段。虽然 JTG D20-2017《公路路线设计规范》对隧道洞口过渡段线形一致性作了要求, 但仅定性地指出洞口内外各 3 s 设计速度行程长度范围的平、纵面线形应一致, 未指明评价线形一致性优劣的方法及相应标准, 难以运用于实际设计。鉴于此, 该文以甘肃临洮至西寨山区公路为背景, 分析隧道路段的线形设计要素, 基于线形一致性安全评价原理, 提出隧道洞口线形一致性指标, 并对工程可行性研究方案(下称工可方案)中的海甸峡长隧道方案进行安全评价, 提出初步设计阶段隧道洞口线形优化方法和安全措施。

1 隧道路段线形安全性分析

1.1 平面线形分析

道路的平面线形由直线、圆曲线、缓和曲线构成, 车辆从一种线形单元至另一线形单元的过程中, 驾驶人需不断调整方向盘, 尤其是在隧道洞口路段, 洞内外明、暗突变, 导致驾驶人无法快速准确地判断方向而保持固定驾驶操作, 若区段内线形不一致, 则对安全驾驶十分不利。图 1 为不同线形单元下隧道洞口路段的视线透视图。

直线形隧道洞口路段的视线良好, 驾驶人操作空间大, 且驾驶方向盘负荷度低。圆曲线形隧道洞

口路段虽然曲率一致, 不需要不断操作方向盘, 但隧道内外的明、暗突变易导致驾驶人无法快速准确地判断方向而保持固定驾驶操作。在地形及布线制约条件下, 隧道出入口难以避免地设置于缓和曲线路段, 其曲率半径和超高逐渐变化, 需驾驶人快速适应光线的突变并变换方向。此外, 线形要素的不同组合若造成道路线形与车辆行驶轨迹不一致, 车辆较大地偏出所在车道, 操作失误则易引发刮擦、追尾撞击等事故。

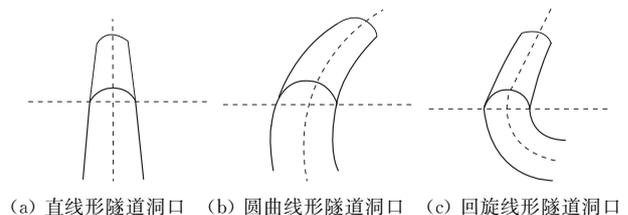


图 1 不同线形单元下隧道洞口路段的视线透视图

1.2 纵断面线形分析

对于隧道洞内外过渡段的纵断面影响行车安全性的问题, 规范通过限定设计指标的取值加以控制, 提出隧道纵坡不大于 3%, 纵坡形式宜采用单向坡, 且变坡点处凹、凸形竖曲线的半径要符合规定要求。但对平、纵组合下的线形一致性未作明确规定。因此, 对隧道洞口路段平、纵组合下线形优劣进行综合定量分析十分必要。

1.3 横断面分析

隧道洞口内外过渡段路基宽度不一致时, 若直接接至隧道检修道、洞口端墙位置, 将导致路基过渡段产生突变, 对路侧行车安全影响严重。为保证洞

口路段路基的衔接, 解决横断面不一致问题, 规范要求要求在隧道进口外设置宽度不小于 3 s 设计速度行程长度的过渡段, 且最小长度不小于 50 m。

2 隧道洞口路段线形一致性安全评价

2.1 隧道洞口线形过渡指标

实际工程中, 横断面的影响主要体现在路基宽度过渡方面, 对隧道洞口公路线形一致性评价的影响极小, 故忽略横断面因素。

平面线形的影响因素主要包括路线曲率、曲率变化率及转角。平曲线弯曲程度以曲率 $1/R$ 表征, 车辆方向盘变化快慢以曲率的方差表征, 即曲率的离散程度。隧道洞口路段平面线形过渡指标 P_0 按下式计算:

$$P_0 = \xi + \lambda \left\{ \exp \left[mv \sqrt{\int_a^b \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \frac{dl}{L}} + nv \sqrt{\frac{1}{R_0} - 1} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: ξ 为偶然事故发生参数, 一般取 0.1; λ 、 m 、 n 为组合参数, 分别取 0.28、0.67、0.25; v 为运行速度 (km/h); a 为曲线起点桩号; b 为曲线终点桩号; l 为计算长度 (m); L 为行程长度 (m)。

纵断面线形优劣取决于纵坡坡度和竖曲线半径大小。在行车安全性方面, 因竖曲线半径设计时已考虑了满足停车视距的要求, 纵断面的影响主要在于纵坡大小。为综合考虑平、纵线形的影响, 在平面线形指标模型的基础上, 以纵坡修正的方式体现纵断面的影响, 纵断面线形过渡指标按下式计算:

$$Z(i) = 0.16(i^2 - 1) + 1.042 \quad (2)$$

式中: i 为平均纵坡 (%)。

将平面线形指标和纵断面线形指标进行耦合, 得到路线线形过渡指标 F :

$$F = P_0 Z(i) \quad (3)$$

在隧道洞口范围内的每个 F 值均对应该断面的线形指标, F 值越小, 道路线形越好, 影响驾驶者的信息量越少。

2.2 隧道洞口线形一致性安全评价

2.2.1 隧道洞口线形一致性指标

根据规范, 隧道洞口线形一致性安全评价主要与洞口前 3 s 车程内的线形特征和洞口后 3 s 车程内的线形特征有关, 以隧道洞口为分界, 隧道洞口内外行车情况见图 2。

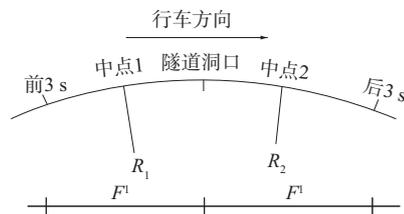


图 2 隧道洞口行车示意图

采用 F_{3s}^1 表示入洞前 (或出洞前) 3 s 行程内的线形指标、 F_{3s}^2 表示入洞后 (或出洞后) 3 s 行程内的线形指标, 则隧道进出口 6 s 行程内的线形一致性情况可采用洞口前后 3 s 的线形指标差值 ΔF 来表征, 计算公式如下:

$$\Delta F = F_{3s}^2 - F_{3s}^1 \quad (4)$$

ΔF 表明隧道洞口前后道路线形之间的差别。 $\Delta F > 0$, 说明隧道洞内后 3 s 行程的线形优于洞外前 3 s 的线形; $\Delta F < 0$, 说明隧道洞外前 3 s 行程的线形优于洞后 3 s 行程的线形; ΔF 的绝对值越大, 表明洞口前后线形指标的差距越大, 隧道洞口路段线形一致性越差。

2.2.2 隧道洞口线形安全评价标准

依据 JTG B05—2015《公路项目安全性评价规范》中各级公路线形一致性不同安全水平下的运行速度差范围, 将进洞时线形安全情况分为好、中、差 3 个等级 (见表 1); 出洞时由于加速较安全, 而减速对行车安全不利, 主要考虑是否造成减速, 将线形安全水平分为好、差 2 个等级 (见表 2); 车辆在隧道段各处的运行速度预测模型见表 3, 其中 v_{in} 为距离驶入隧道洞口 200 m 衔接路段单元的速度。

表 1 隧道入口线形安全性评价标准

安全等级	运行速度差 $\Delta v / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
好	≤ 10
中	10 ~ 20
差	> 20

表 2 隧道出口线形安全性评价标准

安全等级	运行速度差 $\Delta v / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
好	≥ 0
差	< 0

表 3 隧道路段运行速度预测模型

特征点	运行速度 $v / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
隧道外	$v_1 = 0.99v_{in} - 11.07$
隧道内	$v_2 = 0.81v_{in} + 8.22$
驶出隧道后 100 m	$v_3 = 0.74v_{in} + 16.43$

将运行速度代入式(1)~(4),计算得到不同安全等级下线形一致性指标 ΔF_{in} 和 ΔF_{ou} (见表4、表5)。

表4 进洞时线形安全评价标准

运行速度 $v_1 /$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	各安全水平下 ΔF_{in}		
	好	中	差
60	≤ 6.46	6.46~17.76	> 17.76
70	≤ 5.51	5.51~16.81	> 16.81
80	≤ 4.56	4.56~15.86	> 15.86
90	≤ 3.60	3.60~14.91	> 14.91
100	≤ 2.66	2.66~13.95	> 13.95
110	≤ 1.70	1.70~13.01	> 13.01
120	≤ 0.75	0.75~12.05	> 12.05

表5 出洞时线形安全评价标准

运行速度 $v_1 /$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	各安全水平下 ΔF_{ou}		运行速度 $v_1 /$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	各安全水平下 ΔF_{ou}	
	好	差		好	差
60	≤ 11.82	> 11.82	100	≤ 6.35	> 6.35
70	≤ 10.36	> 10.36	110	≤ 4.98	> 4.98
80	≤ 9.08	> 9.08	120	≤ 3.61	$> .61$
90	≤ 7.72	> 7.72			

3 工程应用

3.1 工程概况

甘肃省临洮至西寨公路起于定西市临洮县 G212 线与 Y173 相交处,终于渭源县峡城乡门楼寺村。地处陇西黄土高原西缘,路线沿途地势起伏较大,河流水系发达,地形复杂,山势陡峭。路线推荐线全长约 32 km,采用二级公路标准,设计速度 60 km/h,路基

宽度 10 m,共设置大桥 7 座、中小桥 8 座、长隧道 1 座。该项目沿线特殊结构物多,隧道长,施工和运营风险高,在设计阶段对隧道洞口路段进行安全评价,进而提出科学、合理、安全的路线方案至关重要。

3.2 隧道洞口路线安全评价与优化

3.2.1 工可方案中隧道安全评价

该项目 K23+625—K26+275 地势陡峭,水系发达,左侧离海甸峡水库较近,且现有老路指标极低,难以利用其走廊带,工程可行性研究报告中拟设置海甸峡隧道通过。隧道全长 2 650 m,最大埋深约 300 m,进出口均采用端墙式洞门,隧道左右侧共设置 4 处紧急停车带。该隧道为单孔隧道,左右幅线形一致,选取右幅隧道进行分析。

隧道入口范围平面线形依次为 $R=\infty, L_s=100 \text{ m}, R=700 \text{ m}$,纵坡为 2.382% 和 -0.5%;出口范围平面线形依次为 $R=1\ 100 \text{ m}, L_s=150 \text{ m}, R=\infty$,纵坡为 -0.5% 和 2.82%。隧道路段路线方案见图 3 (原方案),纵断面见图 4。

依据上述评价方法对该隧道路段洞口内外 3 s 行程范围的线形进行安全评价,由式(1)~(4)计算得到线形指标值 ΔF ,评价结果见表 6。

由表 6 可知:工可方案中隧道入口处线形安全水平差,这是由于洞口处于缓和曲线段,且纵向处于竖曲线范围内,坡差较大,线形连续性较差,驾驶者需不断调整方向以保证不偏离原道路;隧道出口线形安全水平好,虽然出洞口也为缓和曲线段,但驾驶者视野好,可继续保持加速状态。

3.2.2 海甸峡隧道线形优化

初步设计阶段在综合考虑线形指标、环境保护及工程造价的前提下,对工可方案中隧道线形进行优化。优化后隧道起讫里程桩号为 K23+770—

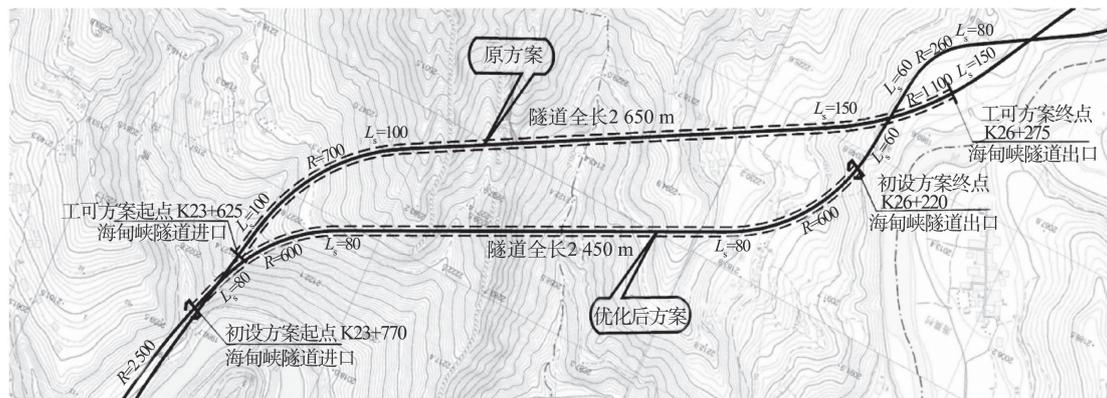


图3 海甸峡隧道优化前后路线方案(单位:m)

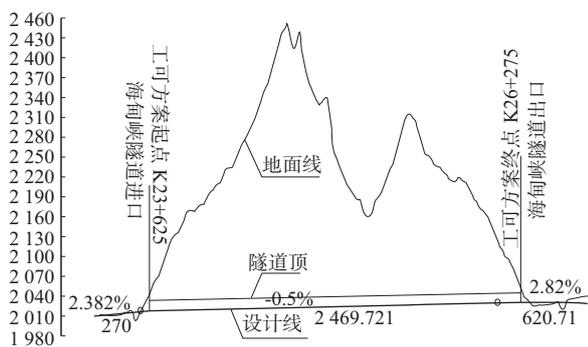


图4 工可方案中海甸峡隧道路段纵断面示意图(单位:m)

K26+220,长2 450 m,隧道平面线形依次为 $R = 2\ 500\text{m}$ 、 $L_s = 80\text{m}$ 、 $R = 600\text{m}$,纵坡为1.7%和-2.1%。优化后隧道路线平面方案见图3,纵断面见图5。

对初步设计隧道方案进行安全评价,结果见表6。优化后海甸峡隧道进出口路段均处于安全性好的状态,路线一致性好,连续性强,平面通视良好,纵面无突变,可大大增强隧道路段的行车安全性;隧道长度缩短近200 m,在增加安全性的同时可节省工程造价。

表6 海甸峡隧道进出口线形安全评价结果

方案	位置	前3 s行程范围的线形		后3 s行程范围的线形		$v_1 / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	线形指标差 ΔF	安全水平
		R_1 / m	坡度/%	R_1 / m	坡度/%			
工可方案	入口	∞	2.382	700	-0.50	49.37	18.51	差
	出口	1 100	-0.50	1 417	1 417	1 417	4.75	好
初步设计方案	入口	∞	2.382	700	-0.50	49.37	18.51	差
	出口	1 100	-0.50	1 417	1 417	1 417	4.75	好

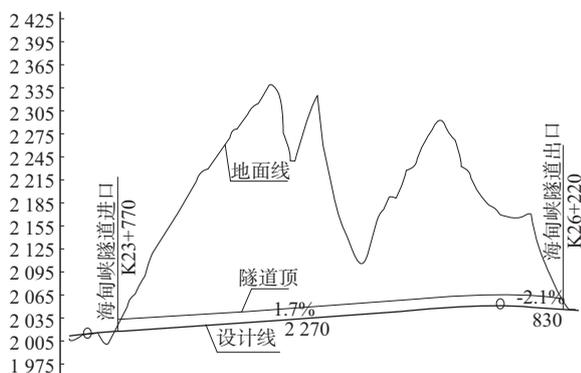


图5 初步设计方案隧道路段纵断面示意图(单位:m)

4 结语

隧道路段线形不安全因素是交通事故多发的深层次技术原因。在设计阶段对长大隧道路段线形进行安全评价,既可了解隧道路段的线形状况,进而指导合理选线和取值,避免设计中相对粗放和定性式地考虑安全问题。

针对线形处于“中”和“差”水平的隧道路段,应综合考虑平、纵组合情况增大洞内圆曲线半径或后移缓和曲线,避免洞口范围纵断面线形突变,使洞口6 s行程范围线形连续,改善隧道洞口安全性。此外,若由于地质、地形、环境保护等条件导致隧道洞口线形难以改善,可适当采取设置洞外限速标志、隧道遮光棚、诱导警示灯及减速带等措施。

参考文献:

- [1] 李雪玲,金年生,林森.山区公路长隧道进出口段运行车速分析[J].公路与汽运,2011(4).
- [2] JTJGD 20-2017,公路路线设计规范[S].
- [3] 许金良.道路勘测设计[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [4] 杨华仕,许有俊.公路隧道线形设计[J].公路,2007(4).
- [5] 郭忠印,苏东兰.基于运行速度的高速公路隧道出入口安全设计[J].公路工程,2013,38(5).
- [6] 董城,周轮,张瑞蕾,等.隧道进出口线形一致性安全评价及其提升技术[J].湖南交通科技,2018,44(4).
- [7] 阎莹,张宇辉,郭忠印.基于运行速度的隧道进出口线形安全性评价[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(4).
- [8] 杜博英,孙鹏,刘凯丰.基于运行安全的公路隧道线形设计[J].公路,2018(3).
- [9] JTJGD B05-2015,公路项目安全性评价规范[S].
- [10] 王琰,孔令旗,郭忠印,等.基于运行安全的公路隧道进出口线形设计[J].公路交通科技,2008,25(3).
- [11] 方守恩,郭洪波,廖军洪,等.山区高速公路隧道群路段安全评价[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(5).
- [12] 王苏林.山区高速公路多隧道路段线形安全性评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [13] 杨轸,唐莹,唐磊.隧道出入口平面线形一致性[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(4).