

不设超高圆曲线路段道路几何设计探讨

胡昌亮, 刘冉, 王贵山

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:现行 JTG B01—2014《公路工程技术标准》及 JTG D20—2017《公路路线设计规范》对采用不同设计速度、不同标准路拱横坡的公路不设超高圆曲线最小半径进行了规定。在道路几何设计过程中,当采用的圆曲线半径大于对应规定值时,一般习惯不设置缓和曲线及超高。该文针对这一设计习惯对行车安全性及舒适性的不利影响进行了分析,并结合某高速公路事故高发路段处治案例,提出在特定情况下,即使圆曲线半径大于不设超高最小半径,也宜设置缓和曲线和超高的设计改进建议。

关键词:不设超高圆曲线最小半径;缓和曲线;路拱横坡;行车安全性;行车舒适性

1 前言

汽车行驶在设置有圆曲线的公路上时,会受到离心力的影响。离心力是影响行车稳定性及舒适性的重要因素。在正常路面条件及轮胎状况下,车辆行驶在圆曲线半径足够大的未设超高路段外侧车道时,通过轮胎与路面之间产生的较小的横向摩阻力即可克服离心力及重力沿路面方向的分力,保证车辆稳定行驶。基于这一认识,为避免超高渐变段局部存在的排水不畅问题,并简化施工,现行 JTG B01—2014《公路工程技术标准》及 JTG D20—2017《公路路线设计规范》(简称《规范》)就不同设计速度、不同标准路拱横坡公路对应的不设超高圆曲线最小半径做出了规定。《规范》要求见表 1。

表 1 不设超高最小圆曲线半径

设计速度/ (km·h ⁻¹)	不设超高圆曲线最小半径/m	
	路拱≤2%	路拱>2%
120	5 500	7 500
100	4 000	5 250
80	2 500	3 350
60	1 500	1 900
40	600	800
30	350	450
20	150	200

按《规范》第 7.4.1 条规定,三级及以上公路的直线与小于表 7.4.1 不设超高最小半径的圆曲线径相连接时,应设置回旋线。但未对直线与大于该表所列半径的圆曲线径相连接时是否设置回旋线进行直接表述。在路线几何设计过程中,当圆曲线半径大于对应规定值时,一般习惯不设置回旋线及超高。

该文通过对在曲线段行驶车辆的轨迹特征及受力特点进行分析,并以中国某高速公路事故路段处治为例,从提高行车安全性及舒适性的角度出发,提出圆曲线半径大于不设超高最小半径时也宜设置缓和曲线和超高的观点,供设计人员参考。

2 车辆行驶轨迹特征

车辆行驶轨迹线受其前轮(转向轮)与车身纵向轴线之间的角度控制,该角度用 ϕ 表示。正常行驶中的车辆,其行驶轨迹线具有线形一致(任一点无转折或错位)、线形曲率一致(任一点曲率唯一)、线形曲率变化率一致(任一点曲率变化率唯一)3 种特征:① 当转向角度 ϕ 为零时,轨迹线为直线;② 当转向角度 ϕ 为固定值时,轨迹线为圆曲线;③ 当转向角度 ϕ 不断变化时,轨迹线为曲率随之渐变的曲线,即缓和曲线。

为了确保行车安全性及舒适性,公路平面线形也应采用与汽车行驶轨迹线相匹配的 3 种基本线形,即“平面线形三要素”:直线、圆曲线、缓和曲线。

3 缓和曲线对适应汽车行驶轨迹的重要作用

路线设计时,在直线与圆曲线之间,或者半径相差悬殊的两圆曲线之间插入缓和曲线,以实现曲率的均匀渐变。常见的缓和曲线形式有回旋线和三次抛物线,按《标准》规定采用回旋线。

缓和曲线的作用体现在以下多个方面:

(1) 使平面线形曲率实现连续、均匀渐变,与汽车行驶轨迹特性相匹配,使汽车可以较容易地保持在当前车道,减少对邻近车道行车的干扰。

(2) 当圆曲线设有超高时,若不设置缓和曲线,需将超高渐变段设置在直线上。在设置有超高的直线上,有时需要向前方曲线的相反方向转动方向盘,才可使汽车保持直线行驶。利用缓和曲线使横坡度实现由标准路拱横坡向超高横坡的连续渐变,驾驶员能够更舒适、从容地控制方向盘,有利于减少事故的发生。

(3) 当圆曲线半径 $R \leq 250$ m 时,为给车辆转弯提供合理的附加空间,需要设置加宽,利用缓和曲线可实现路基横断面由标准宽度向加宽后宽度的连续渐变。

(4) 敷设缓和曲线后,可避免在圆曲线与直线径相相接处或半径相差悬殊的圆曲线径相相接处形成明显转折,改善路容,为行车提供良好的视觉效果。

综上所述,缓和曲线在确保公路平面线形及横断面线形实现均匀、连续渐变,缓解行车方向和离心力的急剧变化,避免路线线形、车辆受力和视觉效果上的突变对行车产生不利影响等方面具有重要作用,是提高行车安全性和舒适性的重要线形要素。路线设计时因为平面半径满足不设超高最小圆曲线半径要求就放弃设置缓和曲线的做法,仅仅考虑了缓和曲线在横断面线形渐变(超高渐变)方面的作用,而没有考虑其对平面几何线形渐变的影响,虽然在圆曲线半径足够大时这种影响可能不太明显,但这一设计习惯仍有值得商榷之处。

4 曲线路段行车受力特点

4.1 曲线路段车辆受力种类

曲线路段行驶的汽车,在其行驶轨迹的法线方向受到竖直向下的重力、水平方向的离心力、平行于路拱方向的轮胎与路面之间产生的横向摩阻力 3 种力共同

作用。

(1) 重力 G

$$G = mg \quad (1)$$

式中: G 为车辆及其载荷的总重力(N); m 为车辆及其载荷的质量(kg); g 为重力加速度,9.8 N/kg。

(2) 离心力 C

$$C = m \frac{v^2}{R} = \frac{Gv^2}{gR} = \frac{GV^2}{127R} \quad (2)$$

式中: v 为行车速度(m/s); V 为行车速度(km/h); R 为汽车所处位置平曲线半径(m)。

(3) 横向摩阻力 F

$$F = (G \cos \alpha \pm C \sin \alpha) \mu \quad (3)$$

式中: α 为路面与水平方向的夹角; μ 为横向摩阻系数,与行车速度、路面状况及轮胎状况有关,干燥路面取 0.4~0.8,潮湿路面取 0.25~0.4,积雪冰冻路面取 0.2~0.3,光滑冰面取 0.06;“±”表示曲线内侧半幅为“+”;曲线外侧半幅,设置超高时为“+”,未设置超高时为“-”。

下文以在曲线外侧行驶的车辆为对象进行受力特征分析。

4.2 不设置超高曲线路段车辆受力特征

当圆曲线半径大于等于《规范》表 7.4.1 规定值时,设计中常常将曲线外侧半幅车道做成外低内高的形式,不设超高。

重力与离心力沿路拱方向的分力均指向远离圆心方向,横向摩阻力指向圆心方向,与前两种力形成反力,如图 1 所示。受力表达式为:

$$C \cos \alpha = (G \cos \alpha - C \sin \alpha) \mu - G \sin \alpha \quad (4)$$

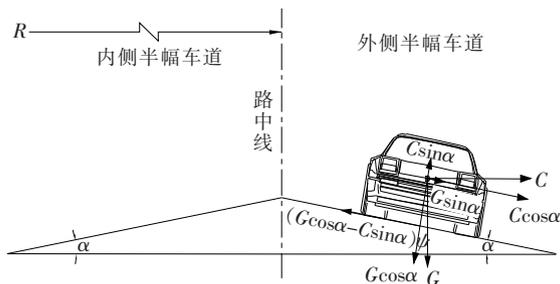


图 1 不设超高曲线路段车辆受力图

4.3 设置超高曲线路段车辆受力特征

当圆曲线半径小于不设超高最小半径时,将曲线外侧半幅车道做成外高内低的形式。

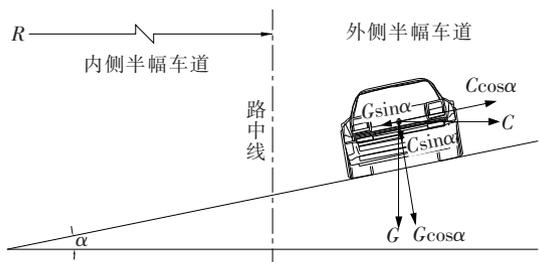
车辆处于横向稳定状态时,重力沿路拱方向的分力、离心力沿路拱方向的分力及横向摩阻力三者之间处于力的平衡状态,受力表达式为:

$$C \cos \alpha = G \sin \alpha \pm (G \cos \alpha + C \sin \alpha) \mu \quad (5)$$

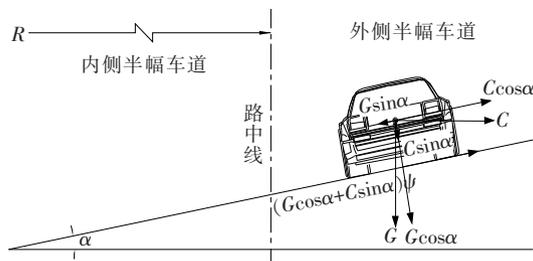
式(5)共包括3种受力情况,如图2所示。

(1) 当离心力沿路拱方向的分力等于重力沿该方向的分力时,车辆与路面之间没有相对运动或相对运动的趋势,车辆不受横向摩擦力作用[图2(a)]。此时取 $(G \cos \alpha + C \sin \alpha) \mu = 0$,则汽车在道路横截面方向的受力表达式为:

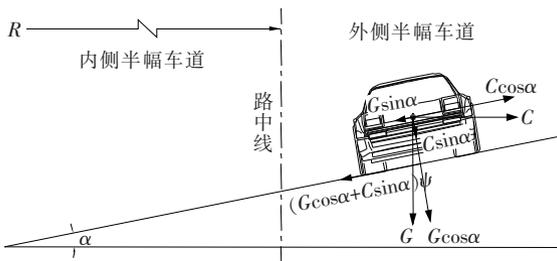
$$C \cos \alpha = G \sin \alpha \quad (6)$$



(a) $C \cos \alpha = G \sin \alpha$



(b) $C \cos \alpha < G \sin \alpha$



(c) $C \cos \alpha > G \sin \alpha$

图2 设超高圆曲线路段车辆受力图

(2) 当离心力沿路拱方向的分力小于重力沿该方向的分力时,车辆受到远离圆心方向的横向摩擦力作用[图2(b)]。此时汽车在道路横截面方向的受力表达式为:

$$C \cos \alpha = G \sin \alpha - (G \cos \alpha + C \sin \alpha) \mu \quad (7)$$

(3) 当离心力沿路拱方向的分力大于重力沿该方向的分力时,车辆受到指向圆心方向的横向摩擦力作用[图2(c)]。此时汽车在道路横截面方向的受力表达式为:

$$C \cos \alpha = G \sin \alpha + (G \cos \alpha + C \sin \alpha) \mu \quad (8)$$

当离心力 C 在平行于路拱方向的分力大于重力 G 在该方向的分力与车轮所能提供的最大横向摩擦力之和时,车辆向弯道外侧发生横向滑移。因此,受力情况(3)涵盖了车辆出现横向滑移时的临界状态。

4.4 不设置超高与设置超高横向滑移临界状态车辆受力对比

以设计中常采用的路拱横坡 $i = 2\%$ 为例,分别对不设超高与设置超高时车辆横向滑移临界状态的离心力进行计算,不设超高时临界状态的离心力用 C_1 表示,设置超高时临界状态的离心力用 C_2 表示。

$$\text{由式(4)可得: } C_1 = G \frac{\mu \cos \alpha - \sin \alpha}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha}$$

$$\text{由式(8)可得: } C_2 = G \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}$$

当 $i = 2\%$ 时, $\alpha = 1.146^\circ$, $\sin \alpha = 0.02$, $\cos \alpha = 1$ 。以最不利路面条件考虑, μ 选取光滑结冰路面时的0.06,则 $C_1 = 0.04G$, $C_2 = 0.08G$, $C_2/C_1 = 2$ 。

根据受力计算可知:当设置2%超高时,相同半径圆曲线上行驶的车辆在光滑结冰路面上维持平衡状态下所能承受的最大离心力,相较于未设置超高时可提高100%,车辆侧向滑移风险降低,行车安全性提高。

5 某高速公路事故高发路段处治

某高速公路采用80 km/h设计速度,标准路拱横坡 $i = 2\%$,根据《规范》,其不设超高圆曲线最小半径为2500 m。

该高速公路某隧道右线起讫桩号为YK44+260~YK45+380,长度1120 m;左线起讫桩号为ZK45+348~ZK44+253,长度1095 m。大桩号侧隧道洞口圆曲线半径为2500 m,未设置缓和曲线及超高。右线行车方向为上坡,左线行车方向为下坡。隧道段线形见图3。

隧道范围采用“沥青混凝土路面+水泥混凝土路面”的组合形式,沥青混凝土路面位于洞口向内300 m范围,其他为水泥混凝土路面。

5.1 事故概况

2013年12月,该高速公路建成试运行。2014年2月,当地进入雨季,隧道内随即频繁发生交通事故,在第一轮降雨期的12 d内共发生交通事故17起。管理部门随即采取了处治措施,事故率明显下降,但事故仍时有发生。至2014年10月,隧道共发生交通事故

竖曲线半径/m	R-40 000 T-183.96 E-0.42			R-12 000 T-264 E-2.9		
坡度/%	1.68	3.45	2.60	2.60	2.60	-1.80
坡长/m	145(720)	339.30	915.00	363.00	363.00	140(895)
直线及平曲线	R-∞			JD9 I-17°34'00.4"(Y) R-2 500		
隧道起讫桩号	YK44+200 ~ YK44+260			YK45+380 ~ YK45+400		
里程桩号	3	4	5	6	7	8
超高	-2%			-2%		

(a) 右线线形

竖曲线半径/m	R-50 000 T-229.95 E-0.53			R-12 000 T-264 E-2.9		
坡度/%	1.68	3.45	2.60	2.60	2.60	-1.80
坡长/m	145(720)	339.30	920	363.27	363.27	135(890)
直线及平曲线	R-∞			JD2 I-18°41'08.9"(Y) R-2 500		
隧道起讫桩号	ZK44+200 ~ ZK44+253			ZK45+348 ~ ZK45+400		
里程桩号	3	4	5	6	7	8
超高	-2%			-2%		

(b) 左线线形

图 3 隧道段线形

50 余起。根据安评单位对事故数据进行的分析,事故形态主要为侧滑失控后发生碰撞。事故的发生具有以下特征:

(1) 速度特征:侧滑前车辆超速行驶,且有制动动作,制动后车辆随即失控。

(2) 天气特征:事故发生时均为雨天。

(3) 空间特征:事故集中在隧道内圆曲线与直线相接处附近的水泥混凝土路面路段,多数失控起点位于超车道上。

(4) 车型特征:大车和轻型小车(面包车)为主。大车占 53%、面包车占 27%、轿车占 20%。事故大车多为空载,重心较高,车速偏快,具有易失稳的特点。

5.2 影响运营安全的不利因素

初期发生的 17 起事故具有较强的代表性和较高的分析价值。在这 17 起事故中,右洞发生 10 起,占总数的 59%,左洞发生事故 7 起,占事故总数的 41%。

根据对隧道事故路段道路环境进行的调查,不利因素及其对行车安全的影响如下:

(1) 车道分隔线画设不规范。现场实测车道宽度约 4.1 m,而两侧路缘带宽度不足。因行车道过宽,导

致部分司机下意识超速行驶。

(2) 水泥路面刻槽深度不足。为提高平整度,施工单位在刻槽后对路面进行了打磨处理,最终刻槽深度达不到施工技术规范要求的 3~5 mm 深度标准。因路表过于光滑,在空气湿度大、洞外路面雨水被带至洞内等因素共同作用下,易形成路表水膜,路面摩擦系数严重降低。

(3) 视觉上的不协调、突兀感对驾驶员的操作造成干扰。弯道线形未设置缓和曲线、隧道洞口“白洞”效应、洞内排水沟井盖破损等不良视觉因素影响部分驾驶员的判断,出于“避害”心理下意识地变道或制动,增大了事故发生的概率。

(4) 左洞位于弯道外侧,圆曲线半径为 2 500 m,未设置超高,采用 $i = -2\%$ 的标准横坡,横坡度与车辆克服离心力的需求不一致。原设计虽满足设计速度 80 km/h 的规范要求,但对于超速行驶的车辆,未设置超高也是降低行车安全性的不利因素之一。

5.3 事故治理

2014 年 7 月至 12 月,根据设计及安评单位对事故特征和现场不利因素的整理分析,主管部门采取了

有针对性的处治措施。事故治理可划分为两个阶段。

(1) 初期治理阶段

初期治理阶段主要从减小车辆离心力及增强路面摩阻系数入手,以提高运营安全性。

① 限速:加强行车速度管控,限制速度与设计速度一致,控制在80 km/h以内,并设置限速监控装置。

② 增加水泥混凝土路面摩阻系数:一是对刻槽深度不足的地方进行重刻,二是对刻槽中断的空白带进行刻槽。

在采取上述措施之后,事故的发生得到了较大程度抑制,右洞未再发生事故,左洞仍有新增事故,但左洞事故率也明显下降。

(2) 综合治理阶段

考虑到限速及对水泥混凝土路面补刻槽后左洞仍有事故发生,且刻槽会随着时间的推移而逐渐趋于光滑,为彻底解决安全隐患,设计、施工单位配合主管部门进一步采取了以下综合措施:

① 左洞增设超高:对左洞设置横坡度 $i=2\%$ 的超高,增加车辆抵抗离心力的能力,减少侧向滑移发生。

② 进一步增加隧道路面摩阻系数:右洞原水泥混凝土路面拉毛,加铺10 cm抗滑阻燃沥青混凝土面层;左洞挖除现有路面,按增设2%超高后的断面设计高程重新铺设抗滑阻燃沥青混凝土路面。疏通隧道内排水设施存在的拥堵,避免排水不畅,加大通风力度,提高隧道路面干燥程度。

③ 加强交通安全设施:设置“隧道路段、严禁超速/变道”、“雨天湿滑、提前减速”等警示标志;按规范宽度重新画设车道边缘线和中心分界线。

④ 改善行车视觉:加强视线诱导措施、全面修复中心排水沟和侧沟检查口盖板,缓解给驾驶员造成的视觉紧张感,减少不必要的制动或变道行为。

经过系统性的综合治理后,该隧道运营至今再无事故异常情况发生。

6 结论

现行《规范》列明了不同设计速度对应的不设超高最小圆曲线半径。研究认为,此“不设”非“不宜设、不应设”,理解为条件良好时“可不设”更为恰当。

超高排水安全问题仅存在于降雨排水不畅时段,

宜通过科学的路面排水设计来解决;而离心力对所有汽车的横向稳定性均存在不利影响,影响面更广。因此,从更大程度提高行车安全性和舒适性考虑,即使圆曲线半径大于不设超高最小半径,也宜设置超高,避免各种不利因素叠加导致事故发生。

综上所述,并结合工程实践经验,对采用大于《规范》不设超高圆曲线最小半径的路段,提出以下设计建议:

(1) 从确保平面线形实现均匀、连续的变化,使平面线形与汽车行驶轨迹相适应,为安全、舒适行车提供更好的条件考虑,宜设缓和曲线。

(2) 从提高汽车抵抗侧向滑移的极限能力考虑,宜设超高。

(3) 隧道段行车条件复杂,当需要设曲线时,宜提高一个设计速度档次采用不设超高的圆曲线,并设缓和曲线。

(4) 加强超高路段排水设计。双向六车道及以上公路,由于横断面宽度较宽,为减小汇水排放行程,宜在行车道中间增设路拱线。其中,双向八车道及以上高速公路、一级公路,宜结合分车道限速设计,在内侧高速车道与外侧低速车道之间设置路拱线。应尽量缩短“0%”坡前后路段长度,并可考虑在该路段采用排水路面,最大程度改善排水条件。

参考文献:

- [1] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S].
- [2] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].
- [3] 孙家驹,李松青,王卫花.道路勘测设计[M]. 4版. 北京:人民交通出版社,2018.
- [4] 交通部第一公路勘察设计院,等译. AASHTO 公路与城市道路几何设计[M]. 西安:西北工业大学出版社,1988.
- [5] 湖南省交通科学研究院. 火炭湾隧道交通安全技术分析报告[R],2014.
- [6] 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(3).
- [7] 傅兴春. 考虑排水的超高渐变率设计[J]. 中外公路,2019(5).
- [8] 冷慧康,黄兵,程起光,等. 高速公路平曲线半径设置合理性数值仿真[J]. 中外公路,2020(6).
- [9] 王贵山,柳银芳,林宣财,等. 公路缓和曲线应用探讨[J]. 中外公路,2021(1).