

中外规范下缓和曲线长度取值对比分析

陆钰彬,王海珠

(四川公路桥梁建设集团有限公司勘察设计分公司,四川 成都 610041)

摘要: 随着越来越多的中国工程建设企业走向海外,加强国内外规范标准的对比分析研究,对项目的顺利实施至关重要。通过分析确定缓和曲线长度的控制因素,对比分析了中、坦、美三国规范在高速公路路线平面设计时缓和曲线长度取值的差异及原因。并结合项目实例,从驾驶者舒适度、超高渐变段设置、线形顺势美观、司机操作时间、车辆侧向位移5个方面计算分析,得出了各平曲线半径对应的缓和曲线长度的建议取值范围,为国内外高速公路路线平面设计提供借鉴与参考。

关键词: 中国规范;坦桑规范;美国规范;缓和曲线长度;超高渐变;路线设计

中图分类号: U412.34

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)09-0018-05

0 引言

近年来,由于我国“一带一路”、“走出去”等国家战略的持续推进,越来越多的中国基础工程建设企业走向海外。尤其在非洲大部分国家基础设施均处于开发建设前期或者初期阶段,相关技术标准尚未完善或者建立,部分国家虽然考虑了本国环境特点和经济水平,在参考英国、美国、法国等发达国家公路规范的基础上编制了本国的公路设计手册,但是这些手册一般仅实践用于指导本国的低等级公路设计,内容上不够完善,在使用中仍需要参考相应的国外规范。因此,对比分析中外规范异同,深入理解和应用国外标准规范对企业顺利开拓非洲市场至关重要。

坦桑尼亚高速公路设计项目位于非洲东部沿海地区,为典型的平原浅丘地貌。由于坦桑政府要求采用本国《Road Geometric Design Manual (MoWT, 2011)》(以下简称《坦桑规范》)作为项目设计依据,以美国《A Policy on Geometric Design of Highways and Streets》(以下简称《美国规范》)作为项目路线几何设计的补充规范,而中国公路路线设计主要以JTG D20—2017《公路路线设计规范》(以下简称《中国规范》)为主,因此,现以此项目为设计实例,对中、

坦、美三国规范中高速公路缓和曲线长度 L_s 的合理取值进行对比分析研究。

1 缓和曲线定义和作用

在车辆行驶中,汽车从直线段进入圆曲线时,驾驶员需要通过逐渐转动方向盘来改变汽车前轮转向角,以适应前方圆曲线。因此,通过设置一段缓和曲线来实现在进入圆曲线之前完成汽车前轮转向。缓和曲线的设置具有以下四个方面的作用^[1]:

(1)缓和曲线曲率的逐渐变化,便于驾驶员在缓和曲线上的驾驶操作,使汽车能安全舒适地进入圆曲线,提高行车安全。

(2)设置缓和曲线可以使汽车行驶离心力从无到有、从小变大,避免了离心力的突变,提升乘客乘车舒适性。

(3)在缓和曲线内完成超高渐变与加宽渐变,提升行车舒适性。

(4)与圆曲线配合得当,使线形顺势,提升公路视觉美感。

2 缓和曲线长度值的确定

《坦桑规范》规定缓和曲线长度计算需要从驾乘者舒适度、超高渐变过渡段以及线形美观三个方面综合确定,取三者大值。以上规定与中美规范基本相同,只是除此之外中美规范还分别从线形曲率过渡要求和车辆侧向位移等方面对缓和曲线长度进行了要求。下文对三国关于缓和曲线长度的有关规定及要求

收稿日期: 2024-03-11

作者简介: 陆钰彬(1986—),男,硕士,高级工程师,从事道路桥梁设计咨询工作。

通信作者: 王海珠(1987—),男,硕士,高级工程师,从事道路桥梁设计咨询工作。电子邮箱: 543791369@qq.com

进行对比分析。

2.1 根据驾乘者的舒适度确定

为了提高驾乘人员的舒适度,使行驶在缓和曲线上的汽车离心加速度变化不至过快,则需要缓和曲线具有足够的长度^[2]。

根据汽车行驶速度 $V(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$,离心加速度变化率为 $\alpha_t(\text{m}\cdot\text{s}^{-3})$ 圆曲线半径 $R(\text{m})$ 可得式(1)^[2]如下:

$$L_s = \frac{0.0214 V^3}{R \alpha_t} \quad (1)$$

我国公路设计离心加速度变化率一般控制在 $0.5\sim 0.6 \text{ m/s}^3$,高速公路及快速路取低值,一般道路及小于 60 km/h 的互通匝道等取高值^[1]。

当 $\alpha_t=0.5 \text{ m/s}^3$ 时,由(1)式可得:

$$L_s = \frac{V^3}{23.3R} \quad (2)$$

当 $\alpha_t=0.6 \text{ m/s}^3$ 时,由(1)式可得:

$$L_s = \frac{V^3}{28R} \quad (3)$$

《坦桑规范》规定对于设计速度小于 50 km/h ,采用公式(3)计算缓和曲线长度,即低等级道路采用较大值 0.6 m/s^3 ,设计速度大于 50 km/h ,采用公式(2)计算缓和曲线长度,即高等级道路采用较小值 0.5 m/s^3 ^[3],与我国公路规范基本一致。

《美国规范》设计原理与《中国规范》相同,只是规定 C 值即离心加速度变化率采用 $0.3\sim 0.9 \text{ m/s}^3$,有时还考虑超高影响进行修正^[2]。

2.2 根据超高渐变率计算确定

行车道从直线上的正常路拱横坡过渡到圆曲线上的单向全超高坡面需要设置超高过渡段。由于《中国规范》要求对于三级及以上公路直线同小于不设超高的圆曲线最小半径径相连接处,必须设置缓和曲线,因此超高过渡一般是在缓和曲线长度范围内完成的^[5],如图 1 所示。《坦桑规范》与《美国规范》相同,对于缓和曲线的使用并无强制要求,当平曲线设有缓和曲线的,超高过渡段在直线与缓和曲线两部分内完成,其中在直线段消除反向路拱横坡,在缓和曲线段实现全超高,当曲线未设置缓和曲线的,超高过渡段在直线段完成,如图 2 所示。因此缓和曲线的设置长度与超高过渡段密切相关,如果缓和曲线长度过短,超高渐变率就会过大,则路面会因变化急剧而产生扭曲,尤其是路面边缘,不利于行车及路容美观;如果超高渐变率过小,则不利路面排水,尤其是超高渐变零坡段。因此,应该通过控制缓和曲线长度

将超高渐变率控制在合理范围内,满足行车安全、路面排水、路容美观的要求。

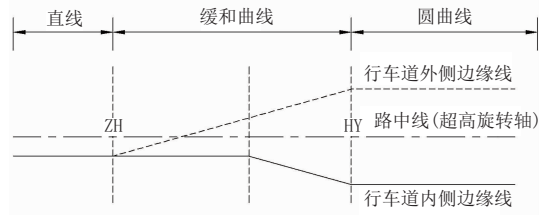


图 1 《中国规范》超高方式图

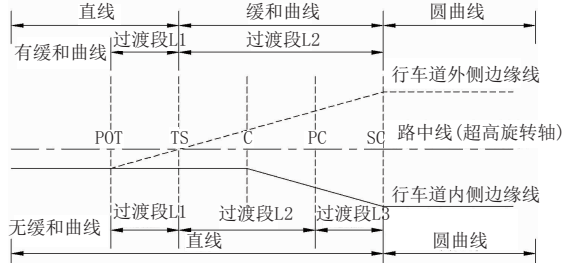


图 2 《坦桑规范》超高方式图

根据《中国规范》,超高缓和段的长度计算如式(4)^[5]。

$$L_c = \frac{\Delta_i B}{p} \quad (4)$$

式中: L_c 为超高渐变段长度, m ; Δ_i 为超高横坡度与路拱横坡度的代数差, %; B 为超高旋转轴至行车道外边缘的宽度, m ; P 超高渐变率, %, 见表 1^[5]。

表 1 《中国规范》超高渐变率一览表

设计速度 / ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	超高旋转轴位置	
	中线	边线
120	1/250	1/200
100	1/225	1/175
80	1/200	1/150
60	1/175	1/125
40	1/150	1/100
30	1/125	1/75
20	1/100	1/50

根据《坦桑规范》,超高缓和段的长度计算如式(5)^[3]。

$$L_r = \frac{(\omega n_1) e_d}{\Delta_s} (b_w) \quad (5)$$

式中: L_r 为超高渐变段长度, m ; Δ_s 为超高渐变率; e_d 为设计超高率; ω 为一条车道的宽度, m ; n_1 为旋转的行车道数; b_w 为车道调整系数, 见表 2 所列^[3]。

超高缓和段长度的计算随着超高横坡过渡方式不同而异。通常依据地形、车道数、中间带宽度、超高度、排水、路容等因素,超高横坡过渡方式有绕边线

表 2 《坦桑规范》调整系数一览表

旋转车道数 n_1	车道调整系数 b_w	旋转增加长度 (ωn_1)
1	1	1
1.5	0.83	1.25
2	0.75	1.5
2.5	0.7	1.75
3	0.67	2.0
3.5	0.64	2.25

旋转和绕中线旋转两种方式^[6]。《中国规范》根据两种不同旋转方式分别给出了最大超高渐变率,当设计速度 120 km/h 时,绕中线旋转最大超高渐变率为 0.4%(1/250),绕边线旋转最大超高渐变率 0.5%(1/200),见表 1;《坦桑规范》与《美国规范》相同,仅给出了绕中线旋转时的最大超高渐变率,当设计速度 120 km/h 时,最大超高渐变率为 0.38%(1/263),绕边线旋转时可根据超高旋转轴位置的变化进行推算;考虑超高渐变段排水需要,中、坦、美三国规范均要求超高渐变率不小于 0.3%(1/330),见表 3 所列^[3]。

表 3 《坦桑规范》超高渐变率一览表

设计速度 / (km·h ⁻¹)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Δ_s (最大)	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.47	0.44	0.41	0.38
Δ_s (最小)		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

2.3 考虑线形顺势及美观要求

为了使路线线形舒适美观,《坦桑规范》规定如下:

$$L \geq \frac{R}{9} \tag{6}$$

由于当缓和曲线旋转角较小时曲线不易识别,旋转角较大时与圆曲线不甚协调^[2],因此《中国规范》考虑视觉感受规定缓和曲线参数 $R/3 \leq A \leq R$ 。又因 $R \cdot L = A^2$,则有:

$$R/9 \leq L \leq R \tag{7}$$

此外,当圆曲线半径较小或者较大时,会导致回

表 5 《美国规范》规定缓和曲线最小长度表

设计速度 / (km·h ⁻¹)	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20
缓和曲线长度计算值 /m	72.2	66.7	61.1	55.6	50.0	44.4	38.9	33.3	27.8	22.2	16.7	11.1
缓和曲线最小长度 /m	72	67	61	56	50	44	39	33	28	22	17	11

2.5 根据车辆侧向位移计算

《美国规范》除上述之外,还通过控制车辆的侧

旋线长度过短或者过长,因此《中国规范》进一步规定:当 R 小于 100 m, A 宜大于或等于 R ;当 R 大于 3 000 m 时, A 宜小于 $R/3$ ^[5]。

2.4 依据司机操作的反应时间确定

正常情况下,车辆在直线段进行直线行驶、曲线段以固定曲率保持行驶,驾驶者是不需要进行方向盘操作的。但当车辆从直线段进入弯道时,驾驶者需要通过在缓和曲线上操作方向盘来实现转向,因此,缓和曲线必须具有足够的长度,以使驾驶者在高速行驶下能够从容地在缓和曲线上完成操作转向。

假设车辆设计速度为 $V(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$,在缓和曲线上的行驶时间为 $t(\text{s})$,则缓和曲线长度 $L(\text{m})$ 为:

$$L = \frac{V}{3.6} \times t \tag{8}$$

我国通常习惯以设计速度 3 s 行程控制各线元最小长度,因此,缓和曲线最小长度为:

$$L = \frac{V}{1.2} \times t \tag{9}$$

因此,《中国规范》根据(9)式,并按 5 的倍数向上取整后,制定了各级设计速度对应的缓和曲线的最小长度要求,如表 4 所列^[5]。

表 4 《中国规范》规定缓和曲线最小长度表

设计速度 / (km·h ⁻¹)	120	100	80	60	40	30	20
缓和曲线长度 计算值 /m	100	83.3	66.8	50	33.3	25	16.7
缓和曲线最小 长度 /m	100	85	70	50	35	25	20

《美国规范》认为当缓和曲线的长度大于等于行驶中的汽车自然轨迹长度时是最理想的,同时认为对于大多数驾驶员来说 2 s 的运行时间代表了车辆行驶出自然的行驶轨迹所需的时间,所以缓和曲线最小长度为:

$$L = \frac{V}{1.8} \times t \tag{10}$$

因此,《美国规范》根据(10)式,并四舍五入取整后,制定了各级设计速度对应的缓和曲线的最小长度要求,如表 5 所列^[4]。

向位移,分别对缓和曲线的最小长度和最大长度进行了限制。

为了在正常行驶情况下使车辆不会偏出自己的行车道,通过车辆在缓和曲线上的最小侧移值($P_{\min}$)来控制缓和曲线的最小长度,见式(11)^[4]:

$$L_{\min} = \sqrt{24 P_{\min} R} \tag{11}$$

通过车辆在缓和曲线上的最大侧移量 ($P_{\max}$)来控制缓和曲线的最大长度,见式(12)^[4]:

$$L_{\max} = \sqrt{24 P_{\max} R} \tag{12}$$

式中: $L_{\min}$ 、 $L_{\max}$ 分别为根据车辆的容许侧向位移计算的缓和曲线的最小、最大长度; $P_{\min}$ 为驾驶员自然操作车辆所产生的最小侧移量,推荐值为 0.2 m; $P_{\max}$ 为驾驶员自然操作车辆所产生的最大侧移量,推荐值为 1.0 m。

《坦桑规范》考虑到在某些情况下,缓和曲线长度计算值将大于在实际平曲线中可以采用的值,亦规定了缓和曲线的最大长度为^[3]:

$$L_{\max} = \sqrt{24 R} \tag{13}$$

通过对比,发现《坦桑规范》是将式(12)中最大侧移量 $P_{\max}$ 直接按 1.0 取值后得到的简化公式(13),其实质与《美国规范》一致。

3 坦桑项目的计算结果及取值建议

某项目为设计速度 120 km/h 的双向 4 车道高速公路技术标准,路基宽度 28.3 m(0.9 m 土路肩 +3.0 m 右侧硬路肩 +7.0 m 行车道 +0.9 m 左侧硬路肩 +4.7 m 中央分隔带 +0.9 m 左侧硬路肩 +7.0 m 行车道 +3.0 m 右侧硬路肩 +0.9 m 土路肩),正常路拱横坡为 2.5%,土路肩横坡为 4.0%,最大超高 6%。根据《坦桑规范》,该项目最小平曲线半径采用 780 m,不设超高的平曲线半径采用 5 000 m。

根据上述对比分析,分别考虑驾乘者舒适度、超高渐变率、线形顺势美观、司机操作时间以及车辆侧向位移等五个方面后,综合确定该项目各曲线半径范围(780~5 000 m)建议的缓和曲线长度如表 6 所列。其中,因缓和曲线过长、车辆偏移值过大会出现安全问题,所以缓和曲线的最大长度按车辆最大侧移值控制;当曲线半径小于 900 m 时,最小缓和曲线长度是由最大超高渐变率控制的,曲线半径大于 900 m 时,最小缓和曲线长度是由线形美观控制的;当曲线半径大于 2 000 m 时,由线形顺势美观控制的最小缓和曲线长度大于由车辆最大侧移值控制的缓和曲线最大长度,因《坦桑规范》规定,当曲线半径大于 1 000 m 时,由线形美观标准控制的缓和曲线

长度会非常大,需要限制缓和曲线的最大长度,此时缓和曲线最大长度亦按车辆最大侧移值控制。另外,当曲线半径大于 1 000 m 时,所确定的全缓和曲线超高渐变率会小于最小超高渐变率,可能导致渐变段路面排水不畅,但是可以通过适当加大超高渐变段的路线纵坡以满足路面排水要求。

表 6 该项目各曲线半径缓和曲线长度建议取值一览表 单位:m

序号	圆曲线半径	缓和曲线取值
1	780~1 100	115~130
2	1 100~1 200	135~160
3	1 200~1 400	160~175
4	1 400~1 600	180~185
5	1 600~1 700	190~200
6	1 700~1 800	200~205
7	1 800~2 000	205~210
8	2 000~2 100	210~215
9	2 100~2 300	215~225
10	2 300~2 600	225~240
11	2 600~2 900	240~250
12	2 900~3 100	250~265
13	3 100~3 300	265~275
14	3 300~3 600	275~285
15	3 600~3 800	285~295
16	3 800~4 000	295~305
17	4 000~4 200	305~310
18	4 200~4 400	310~320
19	4 400~4 600	320~325
20	4 600~4 800	325~335
21	4 800~5 000	335~340

注:表中临界圆曲线半径向下取值,例如半径 1 600 m 应按照 1 400~1 600 m 范围选取缓和曲线长度 180~185 m。

4 结 语

经过对中、坦、美三国缓和曲线长度取值的对比分析,可以发现中外规范在设计理念、计算方法、参数选取上均有不同。

(1)从考虑驾驶者舒适度方面,三国规范设计理念、计算方法相同,但是参数取值范围不同。

(2)对超高渐变段的设置要求,坦桑与美国规范基本一致,与中国规范有较大不同,从超高方式、计算方法到参数选取均有不同,因此缓和曲线的设置长度相对中国较小。

(3)在线形顺势美观方面,美国规范没有做具体要求,中国与坦桑规范均有要求,其中坦桑规范与中

国规范对缓和曲线最小长度的规定相同、对缓和曲线的最大长度规定不同。

(4)从司机操作的反应时间方面,坦桑规范没有具体规定,中美规范在设计理念、计算方法上均相同,只是在参数选取上中国规范采用驾驶者3 s行程长度,美国规范采用驾驶者2 s行程长度。

(5)考虑车辆侧向位移,中国规范没有相关规定,美国规范通过车辆行驶最大、最小侧向位移分别控制缓和曲线的最大、最小长度,坦桑规范亦是通过控制车辆的最大侧向位移来控制缓和曲线的最大长度,尤其是当曲线半径较大时,由线形美观所确定的缓和曲线过长。

(6)各国规范设计理念、计算方法以及参数选取

各不相同,因此海外项目应充分结合当地人文、经济、地理、经验习惯等综合确定设计参数计算选取,使路线平面设计满足项目合同及规范要求、线形平顺、适应地形、安全经济、舒适和谐。

参考文献:

[1] 张金水.道路勘测与设计[M].上海:同济大学出版社,2009.

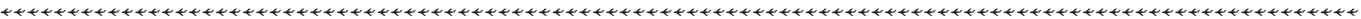
[2] 曾志刚,杜朝阳.中美规范下缓和曲线最小长度对比分析[J].交通科技,2020,303(6):89-92.

[3] Road Geometric Design Manual [M].THE UNITED REPUBLIC OF TANZANIAMINISTRY OF WORKS,2011.

[4] A Policy on Geometrie Design of High-way and Streets[M]. Washington, D. C.: AASHTO, 2011.

[5] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].

[6] JTG B01—2014,公路工程技术标准[S].



《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com