

双车道公路及立交匝道的曲线段路面加宽研究

骆中斌^{1,2}, 靳媛媛^{1,2*}, 史恒^{1,2}, 刘玮蔚^{1,2}

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 交通安全应急保障技术交通运输行业研发中心)

摘要:为满足日益增加的大型车所需的路面加宽值,该文在分析日本、美国和中国路面加宽计算方法的基础上,分别采用不同的路面加宽计算方法,计算中国5种车型所需的双车道公路及立交匝道的曲线段路面加宽值。同时,假设匝道右侧硬路肩停靠大型客车,慢速通行铰接列车为前提,计算不同类型匝道圆曲线所需要的加宽值。

关键词:高速公路;对向双车道;匝道;路面加宽

1 引言

随着中国公路交通建设的不断发展,汽车外形尺寸也在不断加大,车辆对小半径圆曲线处路面加宽值的要求也不断提高。小半径的圆曲线不能满足大型车转弯的路面加宽值,容易导致车辆占用对向车道以及转弯困难,引发交通事故,降低道路通行能力。

2014年颁布实施的JTG B01—2014《公路工程技术标准》中新增了大型客车和铰接客车两种车型,并将

铰接列车的长度增加4.1 m,总长达到18.1 m,总宽2.55 m。JTG D20—2017《公路路线设计规范》中规定二级公路、三级公路、四级公路的圆曲线半径小于或等于250 m时,应设置加宽,但仅是针对3种车型进行了计算。JTG/T D21—2014《公路立体交叉设计细则》规定了不同类型匝道圆曲线加宽值,但没有说明加宽计算的方法以及考虑的车辆类型。通过检索国内外研究文献,中国对平曲线路面加宽研究较少,仅有部分学者研究了特殊车辆下的平曲线加宽以及平曲线路线加宽过渡方法,对超高及超高过渡的研究较多。美国

参考文献:

- [1] 翁兴中,陈卫星,殷民动. 机场规划建设与场道维修技术[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2011.
- [2] 王亚奇,丁文胜,张金飞,等. MICP修补液与传统混凝土裂缝修补材料的对比研究[J]. 混凝土与水泥制品,2018(5).
- [3] 余阳,夏冬桃,吴伟波,等. 钢纤维橡胶路面混凝土力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品,2016(8).
- [4] 张琳. 水泥混凝土路面快速修补材料的研究与开发[D]. 长安大学硕士学位论文,2009.
- [5] Seehra, S. S., Gupta, Saroj, Kumar, Satander. Rapid Setting Magnesium Phosphate Cement for Quick Repair of Concrete Pavements Characterization and Durability Aspects[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(2): 254—266.
- [6] 韦旭朋,张圆圆,徐以希,等. 混凝土裂缝修补材料改性研究[J]. 混凝土,2019(2).
- [7] 陈湘华,杨立权. 高强快硬镁基材料在桥梁混凝土缺陷修补中的应用[J]. 中外公路,2018(2).
- [8] 林娜. 水泥混凝土路面薄层快速修补材料的研究[D]. 中南大学硕士学位论文,2007.
- [9] 田耀刚,王帅飞,卢东,等. 机场道面浅层高早强快速修补砂浆的性能研究[J]. 航空工程进展,2019(1).
- [10] 叶丹玫,孙振平,郑柏存,等. 聚合物改性水泥基修补材料的研究现状及发展措施[J]. 材料导报,2012(4).
- [11] 李铭,支喜兰,姚爱玲. 矿渣水泥混凝土路面修补材料界面黏结性能试验[J]. 西安工业大学学报,2019(1).
- [12] 张雄,张蕾. 新老混凝土粘结面人造粗糙度表征及性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013(5).
- [13] 叶青,王燕芳,石帅锋,等. 早强型水泥基道路快速修补材料性能研究[J]. 公路,2017(8).
- [14] 扶庭阳,郭保林,罗玉萍,等. 超早强硫铝酸盐水泥混凝土修补材料的应用研究[J]. 混凝土,2018(2).

收稿日期:2020—10—12(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0803907)

作者简介:骆中斌,男,硕士,工程师.

*通信作者:靳媛媛,女,大学本科,高级工程师. E-mail: 717222352@qq.com

ASHTO 对不同道路类型下不同车辆所需的路面加宽值进行了研究,但由于美国道路类型、车辆类型以及行车环境与中国不同,不适用于中国。因此,应根据中国 JTG B01—2014《公路工程技术标准》规定车辆类型,结合国内外研究方法,计算适用于中国公路及匝道运行特征的加宽值。

2 国内外公路加宽值计算方法

2.1 日本公路加宽

《日本道路构造令》中认为公路的加宽值主要与车辆类型有关,并根据车辆转向和转动半径、车辆在平曲线转向行驶的几何关系来计算路面加宽值。日本根据国家的车辆类型,分别采用普通机动车、单轴挂车对公路平曲线路段路面加宽值进行研究,具体研究中,根据不同车型在曲线路段遵循的几何线形指标图进行计算。

2.1.1 普通汽车曲线段上车道加宽

根据普通汽车平曲线段路面加宽示意图[图 1(a)],可以得到普通汽车的每一车道加宽值,具体计算方法如下:

$$B = R_w - R_i \quad (1)$$

$$R_i + b = \sqrt{R_w^2 - (a + U_f)^2} \quad (2)$$

转换公式即可得到每一车道加宽值 ϵ 为:

$$\epsilon = B - b =$$

$$\sqrt{\left[\sqrt{R_c^2 - (a + U_f)^2} + \frac{b}{2} \right]^2 + (a + U_f)^2} - \frac{b}{2} - \sqrt{R_c^2 - (a + U_f)^2} - b \quad (3)$$

式中: B 为车辆行驶时的宽度; R_w 为外侧曲线半径; R_c 为车道中心线半径; R_s 为前轴外侧轮的转动半径; L 为车辆长度; R_i 为内侧曲线半径; b 为车辆宽度; a 为前轴外侧轮的转动角度; U_f 为前轴到保险杠之间的距离; a 为前后轴距离。

2.1.2 单轴挂车的加宽

根据半挂车平曲线段路面加宽图[图 1(b)]中的标记,得到 1 个车道的加宽计算方法。

$$B = R_w - R_i \quad (4)$$

$$\left(X_1 + \frac{b}{2} \right)^2 = R_w^2 - (a + U_f)^2 \quad (5)$$

$$X_2^2 = a_s^2 + X_1^2 \quad (6)$$

$$X_3^2 = X_2^2 - a_2^2 = X_1^2 + a_s^2 - a_2^2 \quad (7)$$

则,汽车行驶时的内侧轨迹半径为:

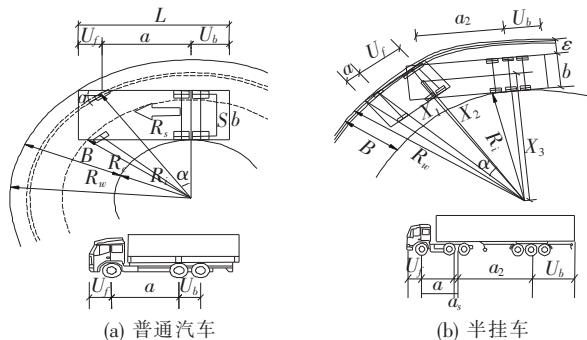
$$R_i = -\frac{b}{2} + \sqrt{R_c^2 - (a + U_f)^2} \quad (8)$$

由此可得到 1 个车道加宽值 ϵ 为:

$$\epsilon = B - b =$$

$$\sqrt{\left[\sqrt{R_c^2 - (a + U_f)^2} + \frac{b}{2} \right]^2 + (a + U_f)^2} - \frac{b}{2} - \sqrt{R_c^2 - (a + U_f)^2} - a_2^2 + a_s^2 \quad (9)$$

式中: a 为货车的轴间距(前轴距); a_2 为挂车转向销到后轴的距离; b 为挂车的车辆宽度; a_s 为挂车转向销到中轴的距离。



注: S 为同轴两车轮的间隔距离; U_b 为后轴到保险杠之间的距离

图 1 不同车型平曲线段路面加宽示意图

2.2 美国公路加宽

AASHTO 于 2011 年出版的绿皮书中指出公路平曲线段路面加宽值与车辆类型、平曲线半径以及设计速度有关。并且认为平曲线段路面加宽值为曲线段路面宽度和直线段路面宽度的差值,即:

$$w = W_c - W_n \quad (10)$$

式中: w 为曲线上行车道的加宽值; W_c 为曲线上行车道宽度; W_n 为直线上行车道宽度。

其中, W_c 的宽度由下式计算:

$$W_c = N(U + C) + (N - 1)F_A + Z \quad (11)$$

式中: N 为车道数; U 为设计车型的轨迹宽度(最外侧车轮之间)(m),可以采用下式计算:

$$U = u + \sqrt{R^2 - \sum L_i^2} \quad (12)$$

式中: u 为直线段上的轨迹宽度(最外侧车辆之间)(m); R 为曲线半径或转向半径(m); L_i 为连续轴(或串联轮轴)与铰接点之间的轴距(m); C 为侧向净距,当单个车道宽度分别为 3.0、3.3 和 3.6 m 时,每辆车之间的侧向净距一般假设为 0.6、0.75 和 0.9 m; F_A 为内车道上行驶车辆的前悬宽度(m),可以采用下式计算:

$$F_A = \sqrt{R^2 + A(2L + A)} - R \quad (13)$$

式中: A 为在内侧车道行驶的车辆的轴距(m); L 为单独车辆(或牵引车)的轴距(m); Z 为额外容许宽

度,考虑到在曲线上行驶困难和驾驶员操作不稳定而附加的路面径向宽度。随着行驶速度和曲线半径的不同而变化,可以采用下式计算:

$$Z = 0.1 \frac{V}{\sqrt{R}} \quad (14)$$

式中: V 为公路的设计速度。

由于公路和交叉口车辆运行状态不同,美国分别对公路和交叉口处路面加宽值进行了研究。

2.2.1 公路平曲线处路面加宽

由图 2 可知:双车道公路平曲线处路面加宽值为:

$$\begin{aligned} w = 2U + F_A + F_B + 2C + Z - W_n = \\ 2(u + R - \sqrt{R^2 - \sum L_i^2}) + \sqrt{R^2 + A(2L + A)} - R + F_B + 2C + 0.1 \frac{V}{\sqrt{R}} - W_n \end{aligned} \quad (15)$$

式中: F_B 为后悬宽度,小客车的身比两后轮轮胎外侧之间距离大 0.3 m,此时 $F_B = 0.15$,载重汽车车身宽度与两后轮轮胎外侧之间宽度相同, $F_B = 0$;其他参数意义同前文。

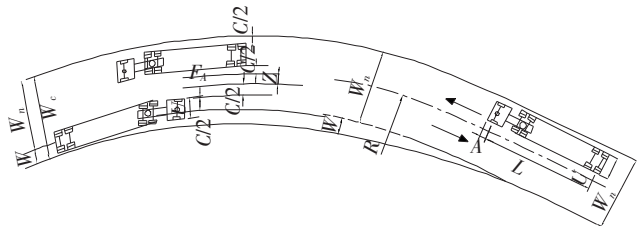


图 2 双车道公路平曲线段路面加宽

2.2.2 交叉口处路面加宽

交叉口处转向道路的路面宽度由交叉口转弯半径、设计车型和期望速度决定。根据交叉口处车辆运行状态,分 3 种情形研究交叉口处路面加宽值,3 种行驶情况的道路结构如图 3 所示。

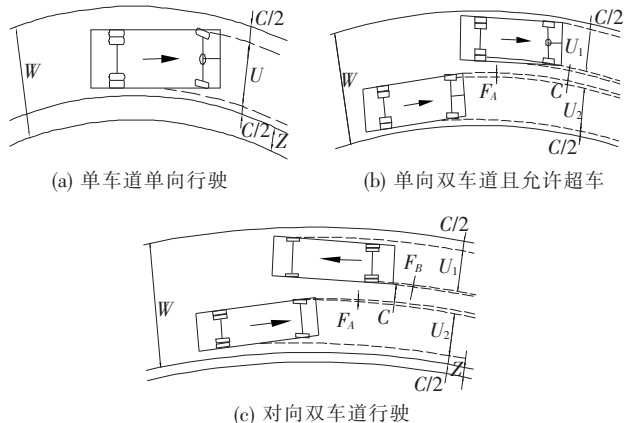


图 3 交叉口处路面加宽示意图

(1) 单车道单向行驶(没有超车)[图 3(a)]

一般认为 $C = 1.2$ m,并且当半径小于 150 m 以下时, Z 为定值, $Z = 0.6$ m,由于该状态下不允许超车,所以不需要考虑前悬宽度 F_A 。交叉口处单车道单向行驶路面宽度值为:

$$\begin{aligned} w = U + C + Z = u + R - \sqrt{R^2 - \sum L_i^2} + 1.2 + \\ 0.1 \frac{V}{\sqrt{R}} \end{aligned} \quad (16)$$

(2) 单向双车道且允许超过停止车辆[图 3(b)]

由于需要超越停止车辆,所以需要考虑一辆车的 F_A 和另一辆车的 F_B ,净距 $C = 0.6$ m,且低速情况下超越停止车辆,不需要考虑因曲线上行驶困难而设置的额外允许宽度 Z 。则交叉口处单向双车道并且允许超越停止车辆时路面宽度值为:

$$\begin{aligned} w = U_1 + U_2 + F_A + F_B + 1.2 = 2(u + R - \\ \sqrt{R^2 - \sum L_i^2}) + \sqrt{R^2 + A(2L + A)} - R + F_B + 1.2 \end{aligned} \quad (17)$$

(3) 对向双车道[图 3(c)]

需要考虑所有宽度。横向净距 $C = 1.2$ m,超越车辆的 $F_B = 0.15$ m,额外容许宽度 $Z = 0.6$ m。则交叉口处对向双车道路面宽度值为:

$$\begin{aligned} w = U_1 + U_2 + F_A + F_B + 2.4 = 2(u + R - \\ \sqrt{R^2 - \sum L_i^2}) + \sqrt{R^2 + A(2L + A)} - R + F_B + 2.4 \\ + 0.1 \frac{V}{\sqrt{R}} \end{aligned} \quad (18)$$

2.3 中国公路加宽

中国在 JTJ D20—2006《公路路线设计规范》中对双车道公路平曲线段的加宽值进行了规定。中国规范平曲线处路面加宽值的影响因素考量与美国绿皮书相似,包括平曲线半径、设计车辆轴间距及车辆外廓尺寸等参数。同时还考虑到驾驶员在平曲线路段的侧向摆动和操作稳定性,需要设置一定的附加宽度。因此,平曲线路段加宽值 e 应该包括几何加宽值 e_1 和转弯车辆侧向摆动加宽值 e_2 ,如图 4 所示。

2.3.1 几何加宽值

对于不同车型,遵循的转弯几何线形关系示意图如图 5 所示。

由图 5 的几何关系,分别得到小汽车、普通载重汽车、大型客车和半挂车、铰接列车、铰接客车的几何加宽值,计算公式如表 1 所示。

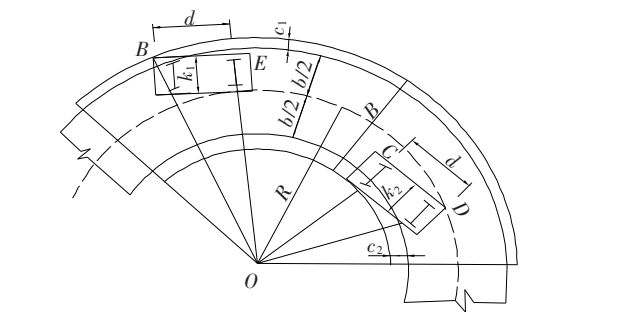


图4 中国双车道公路加宽示意图

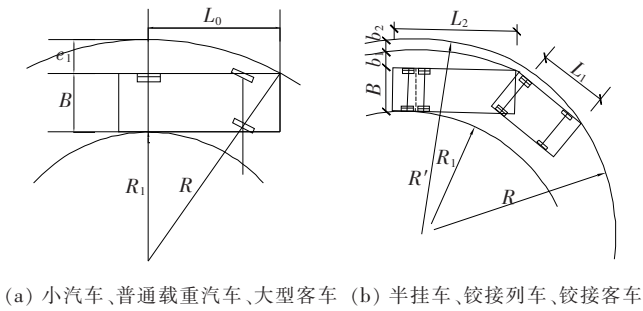


图5 不同车型的转弯行驶几何关系示意图

表1 中国公路不同车型几何加宽值计算公式

小汽车、普通载重汽车 和大型客	半挂车、铰接列车和 铰接客车
$e_2=R'-(R_2+B)$	
$R_1+B=\sqrt{R'^2-L_2^2}$	
$b_2=R'-\sqrt{R'^2-L_2^2}=$	
$R'-\left(R'-\frac{L_2^2}{2R'}-\frac{L_2^4}{8R'^3}-\dots\right)$	
$e_2=\frac{L_2^2}{2R'}\quad e_1=\frac{L_1^2}{2R}$	
$d=2b=\frac{L_1^2+L_2^2}{R}$	

2.3.2 摆动加宽值

车辆遵循的摆动加宽公式如下：

$$e_2=\frac{0.1V}{\sqrt{R}}$$
(19)

由此计算双车道加宽宽度 e ，各车型的计算公式如表 2 所示。

表2 中国公路不同车型摆动加宽值公式汇总

小汽车、载重汽车和大型客车	铰接列车和铰接客车
$e=e_1+e_2=\frac{L_0^2}{R}+\frac{0.1V}{\sqrt{R}}$	
$e=d+e_2=\frac{L_1^2+L_2^2}{R}+\frac{0.1V}{\sqrt{R}}$	

表 2 中各公式参数意义： e 为双车道加宽宽度； e_1 为几何加宽值； e_2 为摆动加宽值； L_0 为汽车轴距加前悬； R 为平曲线半径； V 为设计速度。

综合上述 3 个国家的加宽值计算方法可以看出：中国与日本在计算加宽时的车型划分相似，但计算方法不同。中国与美国加宽计算方法相似，都是考虑了车辆本身转弯时几何尺寸所需要的宽度以及侧向的摆动加宽值。

3 不同国家标准得到的加宽值

中国 JTG D20—2006《公路路线设计规范》规定：二级公路、三级公路、四级公路的圆曲线半径小于或等于 250 m 时，应设置加宽。单车道匝道（Ⅰ型），圆曲线半径小于 72 m 以及单向双车道匝道或对向双车道匝道（Ⅱ型），圆曲线半径小于 47 m 应设置加宽。下文通过采用不同的加宽值计算方法，计算对向双车道公路和不同形式匝道下规定的 4 种车型所需的路面加宽值。

3.1 小半径曲线段加宽

基于上文 3 个国家的公路加宽值计算方法，计算对向双车道公路不同车型所需要的路面加宽值，结果如表 3~5 所示。

表3 日本对向双车道路面加宽值

汽车轴距 加前悬/m	不同圆曲线半径(m)时加宽值/m								
	250~200	200~150	150~100	100~70	70~50	50~30	30~25	25~20	20~15
小客车 4.6	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.8	1.0	1.2	1.6
载重汽车 8.0	0.4	0.4	0.6	1.0	1.2	2.0	—	—	—
大型客车 9.85	0.4	0.6	1.0	1.4	2.0	—	—	—	—
铰接列车 9.05+5.375	0.6	0.8	1.2	1.6	2.2	—	—	—	—
铰接客车 6.7+7.5	0.6	0.6	1.0	1.4	2.0	—	—	—	—

表 4 美国对向双车道路面加宽值(路面宽度 7.5 m)

车型	设计速度/ (km·h ⁻¹)	不同半径(m)对应的加宽值/m									
		15	20	25	30	50	70	100	150	200	250
小客车	30	—	—	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	40	—	—	—	—	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	60	—	—	—	—	—	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0
大型 客车	30	—	—	—	2.1	1.1	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
	40	—	—	—	—	—	0.8	0.4	0.2	0.0	0.0
	60	—	—	—	—	—	—	—	0.3	0.1	0.0
	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.2
铰接 客车	30	—	—	—	2.9	1.5	0.9	0.5	0.1	0.0	—0.2
	40	—	—	—	—	—	1.1	0.6	0.2	0.0	—0.1
	60	—	—	—	—	—	—	—	0.5	0.3	0.1
	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.2
载重 汽车	30	—	—	—	1.6	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
	40	—	—	—	—	—	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
	60	—	—	—	—	—	—	—	0.1	0.0	0.0
	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0
铰接 列车	30	—	—	—	3.5	1.9	1.2	0.7	0.3	0.1	0.0
	40	—	—	—	—	—	1.4	0.8	0.4	0.2	0.1
	60	—	—	—	—	—	—	—	0.6	0.3	0.2
	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.3

表 5 中国对向双车道路面加宽值

汽车轴距加前悬/ m	不同圆曲线半径(m)对应的加宽值/m								
	250~200	200~150	150~100	100~70	70~50	50~30	30~25	25~20	20~15
小客车 4.6	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.3	1.4	1.7	2.2
载重汽车 8.0	0.5	0.7	0.9	1.3	1.7	2.7	—	—	—
大型客车 9.85	0.7	0.9	1.3	1.7	2.4	—	—	—	—
铰接列车 9.05+5.375	0.8	1.0	1.5	2.0	2.7	—	—	—	—
铰接客车 6.7+7.5	0.8	1.0	1.4	2.0	2.7	—	—	—	—

从表 3~5 可以看出:采用中国 JTG D20—2006《公路路线设计规范》对圆曲线加宽计算方法计算的加宽值与日本较为接近,比采用美国加宽计算方法计算的加宽值偏大。

3.2 匝道路面加宽

匝道上车辆的运行条件与一般公路不同,且速度较低,所以不适用于采用日本和美国平曲线路段的加宽计算方法;但是与美国交叉口处的车辆运行特征相似,且速度均较低,因此,可以采用美国交叉口处的路面加

宽计算方法来计算不同形式匝道下路面的加宽值。

通过计算可知,当不考虑硬路肩停车时,不同形式的匝道断面类型对于不同的车辆类型均不需要加宽。无紧急停车带的单向双车道匝道由于硬路肩宽度为 1.0 m,不能供车辆临时停靠;对于单向单车道匝道,假定硬路肩上停靠车辆为大型客车,铰接列车能慢速通过;对于无紧急停车带的单向双车道匝道,假定为两辆铰接列车慢速并行或错车通过;对于对向分离式双车道,铰接列车能慢速通过。因此,无紧急停车带的双

车道匝道以及考虑硬路肩停车的其他类型匝道圆曲线 路面加宽值计算结果如表 6 所示。

表 6 匝道圆曲线部分路面加宽值(考虑硬路肩停车)

匝道圆曲线半径/m				路面加 宽值/m
单向单车道 (Ⅰ型)	无紧急停车带的 单向双车道(Ⅱ型)	对向分隔式双车道(Ⅳ型)		
		曲线内侧车道	曲线外侧车道	
—	25~<26	25~<26	—	3.50
—	26~<27	26~<27	—	3.25
25~<26	27~<29	27~<29	—	3.00
26~<27	29~<31	29~<31	—	2.75
27~<28	31~<33	31~<33	25~<26	2.50
28~<31	33~<35	33~<36	26~<28	2.25
31~<33	35~<38	36~<40	28~<31	2.00
33~<36	38~<40	40~<45	31~<35	1.75
36~<40	40~<45	45~<50	35~<39	1.50
40~<45	45~<50	50~<58	39~<45	1.25
45~<50	50~<57	58~<68	45~<52	1.00
50~<56	57~<65	68~<80	52~<65	0.75
56~<67	65~<75	80~<110	65~<80	0.50
67~<80	75~<88	110~<136	80~<107	0.25
≥80	≥88	≥136	≥107	0

注:对向分隔式双车道的圆曲线半径为中央分隔带中心线的半径,其余为车道中心线的半径。

4 结 论

(1) 首先详细介绍了日本、美国和中国公路圆曲线加宽计算方法,分析了中国公路圆曲线加宽计算方法与日本和美国加宽计算方法的异同。

(2) 分别采用日本、美国和中国公路圆曲线加宽计算方法计算对向双车道公路下中国《标准》中规定的 5 种车型所需的加宽值,对比发现采用中国公路圆曲线加宽计算方法计算的加宽值与日本方法计算的加宽值基本相似,比美国加宽方法计算的加宽值偏大。

(3) 假定匝道右侧硬路肩停靠大型客车,铰接列车能够慢速通行,计算出的不同类型匝道所需的加宽值与 JTG/T D21—2014《公路立体交叉设计细则》中对应匝道类型的加宽值稍大,主要是考虑了匝道车辆运行的最不利组合情况。

(4) 提出的双车道公路小半径曲线段、互通式立交匝道路面加宽值可为执行新标准的工程设计提供指导。

参考文献:

[1] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].

[2] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S].

[3] JTG/T D21—2014 公路立体交叉设计细则[S].

[4] 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).

[5] 杨永前,黄红明. S 形曲线超高过渡设计方法研究[J]. 中外公路,2017(6).

[6] ADDENSA. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [Z]. Fourth Edition, 2013.

[7] 日本道路协会. 道路构造令的解说与应用[M]. 东京:日本东京丸善株式会社出版社,2004.