

考虑排水的超高渐变率设计

傅兴春

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 为满足规范要求合成坡不宜小于0.5%的规定,以沿路线长度方向 L 为横坐标,距超高旋转轴距离 B 为纵坐标, $i_h=0$ 的断面为原点,建立十字坐标系,用圆面积 S 的大小来表示合成坡小于0.5%的范围,结合不同平面线形和纵断面的组合形式,把公路路面排水分为“有利条件”和“不利条件”,在不同条件下超高渐变率的取值各不同。结果表明:在有利条件下, $0 \leq |i| < 0.5\%$ 时,增大超高渐变率,能减小合成坡小于0.5%的范围, $|i| \geq 0.5\%$ 时, $S=0$,为了能使雨水尽快排出路面范围,建议增大超高渐变率;在不利条件下, $0 \leq |i| \leq 0.5\%$,增大超高渐变率,能减小合成坡小于0.5%的范围, $0.5\% < |i| < 0.8\%$ 时,在超高渐变率 $P < 1/330$ 范围内存在 P ,使得 $S=0$, $0.8\% \leq |i| \leq 0.5\% + P_{\max}$ 时,在超高渐变率 $1/330 \leq P \leq P_{\max}$ 范围内存在 P ,使得 $S=0$, $|i| > 0.5\% + P_{\max}$ 时, $S=0$,为了能使雨水尽快排出路面范围,建议增大超高渐变率。

关键词: 合成坡; 纵坡; 超高渐变率; 有利条件; 不利条件

1 前言

公路路面排水是否顺畅将直接影响行车安全,合成坡是路线设计中评价路面排水的重要指标,JTG D20—2017《公路路线设计规范》规定合成坡不宜小于0.5%,当合成坡小于0.5%时,应采取综合排水措施。合成坡计算公式为:

$$I = \sqrt{i_h^2 + (i + P_b)^2} \quad (1)$$

$$P_b = \frac{b \cdot \Delta_i}{L_c} \quad (2)$$

式中: I 为合成坡(%); i_h 为超高横坡; i 为路线纵坡; b 为距离超高旋转轴的距离; L_c 为路线长度; Δ_i 为路线长度范围横坡差值; P_b 为距超高旋转轴距离为 b 时的超高渐变率(即距超高旋转轴距离为 b 时路面外边缘线的切向纵坡)。

纵坡和超高渐变率都具有方向性,当两者方向相同时,产生正效应;而当两者方向相反时,产生负效应。超高横坡由负(正)变正(负)过程中,必然存在 $i_h=0$ 的断面,在 $i_h=0$ 处及附近范围,由于超高横坡很小,再考虑到纵坡与超高渐变率的方向性问题,可能会造成合成坡不能满足 $I \geq 0.5\%$ 的要求,这时超高渐变率的取值应谨慎,应根据纵坡的大小及方向来决定。规

范规定最小超高渐变率1/330(即路面外边缘切向纵坡约为0.3%),这与最小纵坡不宜小于0.3%的规定一致,其规定的目的都是从利于排水考虑。路面排水应该从两个方面考虑:①水能否排走,即合成坡是否大于0.5%;②满足合成坡要求情况下,水要尽快排出路面范围。所以在基于满足合成坡要求的情况下,对于讨论纵坡和超高渐变率的内在联系在路线设计中显得十分重要。

2 合成坡的几何表现形式

易听用圆面积的几何形式来表现 $I < 0.5\%$ 的范围,方法直观明了,但是没有详细分析纵坡和超高渐变率的内在联系对合成坡小于0.5%范围的影响。其几何方法如下:

以超高旋转轴横坡为0的断面为坐标原点,路面上各点沿路线长度方向 L 为横坐标,距离超高旋转轴距离 B 为纵坐标建立十字坐标系(图1),可以得到如

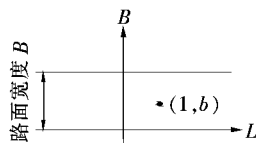


图1 基于合成坡的十字坐标系

收稿日期:2019-03-27

作者简介:傅兴春,男,硕士,工程师.E-mail:fuxc2010@163.com

下公式:

$$i_h = \frac{lP}{B} \quad (3)$$

$$P_b = \pm \frac{bP}{B} \quad (4)$$

式中: $P = \frac{B \cdot \Delta i}{L_c}$, P_b 取值有正负是因为切向纵坡 P_b

和路线纵坡 i 一样都具有方向性。当超高横坡由负变正时 $P_b > 0$, 如果此时 $i > 0$, 两者方向相同, 对增大合成坡有利, 如果 $i < 0$, 两者方向相反, 对增大合成坡不利; 当超高横坡由正变负时 $P_b < 0$, 如果此时 $i < 0$, 两者方向相同, 对增大合成坡有利, 如果 $i > 0$, 两者方向相反, 对增大合成坡不利。为了讨论方便, 对增大合成坡有利, 取 $P_b > 0$ 时, $i > 0$, 简称有利条件; 对增大合成坡不利, 取 $P_b > 0$ 时, $i < 0$, 简称不利条件, 分别讨论即可。

将式(3)、(4)代入式(1)得:

$$I = \sqrt{\left(\frac{lP}{B}\right)^2 + \left(b + \frac{bP}{B}\right)^2} \quad (5)$$

将合成坡 $I = 0.5\%$ 代入式(5)得:

$$\frac{0.5\%B}{P} = \sqrt{l^2 + \left(b + \frac{iB}{P}\right)^2} \quad (6)$$

由式(6)可知: 其为圆心坐标为 $(0, \frac{-iB}{P})$, 半径为 $\frac{0.5\%B}{P}$ 的圆(图2)。由图2知其中阴影部分面积 S 即为合成坡小于 0.5% 的范围。

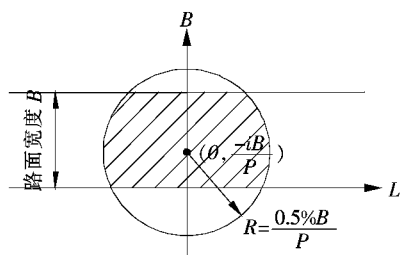


图2 $I < 0.5\%$ 时的范围

3 有利条件下纵坡和超高渐变率关系

3.1 有利条件下路线纵坡对合成坡的影响

在有利条件下, 随着 i 增加, 圆心坐标从原点开始沿着 B 轴逐渐往下移动, 此时 S 从外侧车道开始逐渐缩小, 当 $0.5\% > i \geq 0$ 时, 如图3所示; 当 $i \geq 0.5\%$ 时, 整个圆在 L 轴下方, 此时 $S = 0$, 如图4所示。所以在有利条件下, 路线纵坡增加, 对路面排水有利。

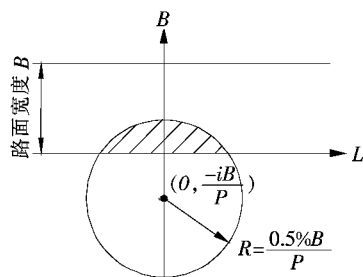


图3 $0.5\% > i \geq 0$ 时, S 大小

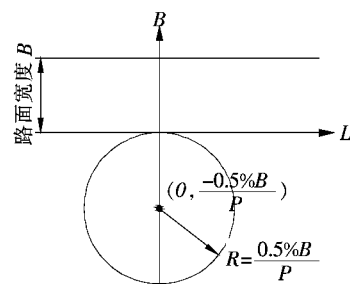


图4 $i = 0.5\%$ 时, $S = 0$

3.2 有利条件下超高渐变率对合成坡的影响

在有利条件下, $i \geq 0.5\%$ 时, $S = 0$, 超高渐变率不影响 S 的大小, 在雨水能排走的情况下, 应使水能尽快排出路面范围, 即超高渐变率应尽量取大值。 $0.5\% > i \geq 0$ 时, 当 $P_2 > P > P_1$, 有 $R_1 > R > R_2$, $|\frac{-iB}{P_1}| > |\frac{-iB}{P}| > |\frac{-iB}{P_2}|$, $R_1 - R > |\frac{-iB}{P_1}| - |\frac{-iB}{P}|$, $R - R_2 > |\frac{-iB}{P}| - |\frac{-iB}{P_2}|$ 。得到如图5、6所示示意图, $0.5\% > i \geq 0$ 时, 超高渐变率越大, S 越小。

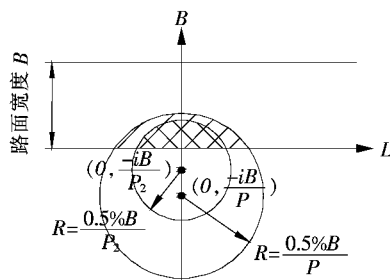
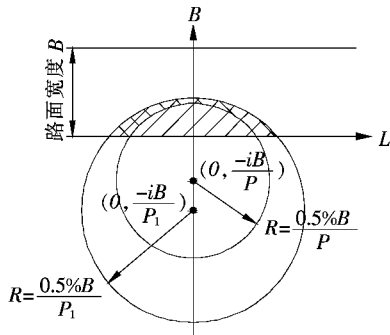


图5 $P_2 > P$ 时, $S > S_2$

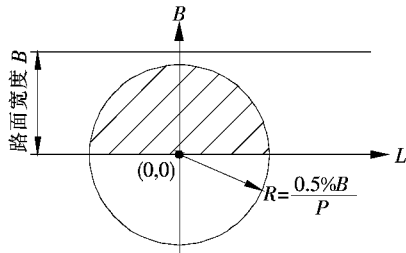
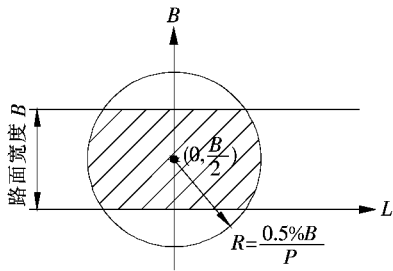
4 不利条件下纵坡和超高渐变率关系

4.1 不利条件下路线纵坡对合成坡的影响

在不利条件下, 当 $0 \leq |i| \leq 0.5\%$ 时, 随着 $|i|$ 增加, 圆心坐标从原点开始沿着 B 轴逐渐往上移动, 此时 S 由内侧车道开始逐渐减小, 由外侧车道开始逐渐增加, 当圆心坐标为 $(0, B/2)$ 时, S 面积达到最大, 此

图6 $P > P_1$ 时, $S_1 > S$

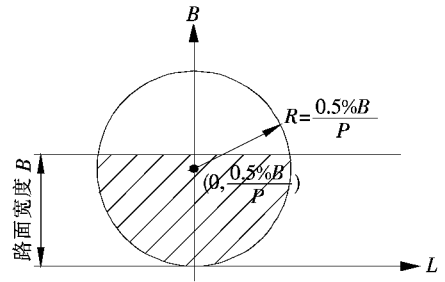
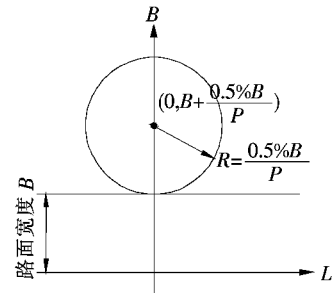
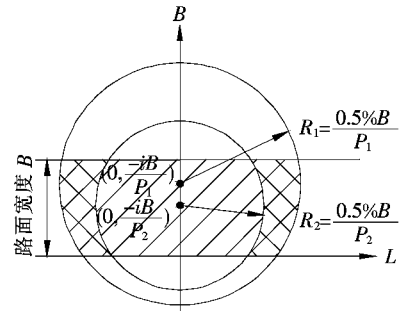
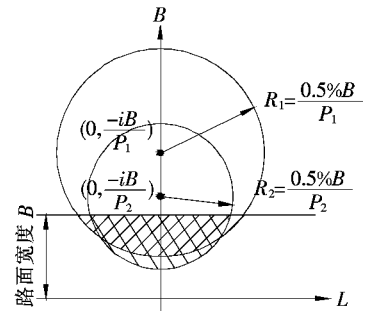
时 $i = -P/2$, S 变化范围如图 7、8 所示;随着 $|i|$ 继续增加, S 逐渐减小,当纵坡达到 $i = -0.5\%$ 时, S 范围如图 9 所示,当纵坡 $i = -(0.5\% + P)$ 时, S 的范围如图 10 所示。从以上几个图示可知: $P/2 > |i| > 0$, S 大小随着 $|i|$ 增加而增加,当 $|i| = P/2$, 即 $P = 2|i|$ 时达到最大,即最不利状态,应当避免。 $0.5\% + P > |i| > P/2$, S 范围逐渐减小,直到 $|i| = 0.5\% + P$ 时, $S = 0$, 即 $|i| - P > 0.5\%$, $S = 0$ 。

图7 $i = 0$ 时, S 大小图8 $-0.5\% < i < 0$ 时, S 大小

4.2 不利条件下超高渐变率对合成坡的影响

$0 \leq |i| \leq 0.5\%$ 时, 当 $P_2 > P_1$, 有 $R_1 > R_2$, $|\frac{-iB}{P_1}| > |\frac{-iB}{P_2}|$, $R_1 - R_2 > |\frac{-iB}{P_1}| - |\frac{-iB}{P_2}|$, 得到如图 11 所示示意图, 超高渐变率越大, S 越小。

当 $|i| > 0.5\%$ 时, $R_1 - R_2 < |\frac{-iB}{P_1}| - |\frac{-iB}{P_2}|$, 得到如图 12 所示示意图, 这时从图形无法直观地分析出 S_1 与 S_2 的大小。

图9 $i = -0.5\%$ 时, S 大小图10 $i = -(0.5\% + P)$, $S = 0$ 图11 $P_2 > P_1$ 时, $S_1 > S_2$ 图12 $|i| > 0.5\%$ 时, S 大小

为方便讨论,以双向六车道高速公路路基宽度 33.5 m, 半幅路面宽度 15 m, 即 $B = 15$ m 为例进行分析,在不同纵坡下,各超高渐变率所得到的合成坡小于 0.5% 面积的大小见表 1。

由表 1 知: $0.5\% < |i| < P_{\max} + 0.5\%$ 时,随着超高渐变率的增大, S 先增加后减小, S 存在一个最大值 S_{\max} ; 纵坡越大, S_{\max} 对应的超高渐变率 P 也越大; 当

表 1 $0.5\% < |i| < P_{\max} + 0.5\%$ 时, 超高渐变率对合成坡小于 0.5% 面积的影响

超高渐变率	合成坡小于 0.5% 面积 S/m^2						$P_{\max} - 0.5\%$
	-0.55%	-0.6%	-0.65%	-0.7%	-0.75%	-0.8%	
1/650	410.69	155.79	3.02	0	0	0	0
1/550	416.72	207.09	51.01	0	0	0	0
1/400	402.57	265.95	147.15	52.85	0	0	0
1/330	382.67	279.95	186.34	104.64	39.26	0.54	0
1/300	370.61	282.04	199.88	126.06	63.30	16.27	0
1/250	344.5	278.67	215.92	157.25	103.89	57.48	0
1/200	308.5	264.03	220.48	178.35	138.19	100.64	0
1/175	285.3	250.92	216.68	182.99	150.22	118.77	0
1/150	257.33	232.45	207.24	181.94	156.81	132.11	0
1/125	222.14	206.45	189.99	172.98	155.61	138.06	0
1/100	173.41	167.52	160.09	151.55	142.17	132.13	0
P_{\max}	—	—	—	—	—	—	0

路面宽度 B 取值不同时, 实际上是对图 12 以坐标原点为基点进行比例缩放, S 会以二次方比例缩放, 所以宽度 B 的变化, 不会对 S_{\max} 对应的超高渐变率 P 产生影响, 仅对 S 的大小产生影响。

根据 JTG D20—2017《公路路线设计规范》在不同设计速度时对超高渐变率的规定 ($1/330 \leq P \leq P_{\max}$), 并结合图 10 中公式 $P = -i - 0.5\%$ 可计算出, 在 $1/330 \leq P \leq P_{\max}$ 范围内 $S=0$ 时, 对应 $|i|$ 的范围为 $0.8\% \leq |i| \leq P_{\max} + 0.5\%$, 此时超高渐变率满足规范要求; 当 $|i| \geq P_{\max} + 0.5\%$ 时, 无论超高渐变率怎么取值, $S=0$, 但是在满足合成坡要求的情况下, 水要尽快排出路面范围, 所以超高渐变率应取大值; $0.5\% < |i| < 0.8\%$ 时, 为使 $S=0$, $P < 1/330$, 但超高渐变率不满足规范要求, 所以在此情况下, 规定 $P \geq 1/330$ 是否合理值得商榷。

5 结论与建议

基于合成坡 $I \geq 0.5\%$ 的要求下, 超高渐变率的选择与路线平面与纵断面密切相关。对于对向车道而言, 平面由直线向圆曲线过渡过程中, 同时纵断面为上坡时为有利条件, 纵断面下坡时为有利条件; 平面由圆曲线向直线过渡过程中, 同时纵断面为下坡时为有利条件, 纵断面为上坡时为不利条件; 平面在 S 形曲线范围内过渡时, 无论纵坡怎样均为不利条件。

对于有利条件, 当 $0 \leq |i| < 0.5\%$ 时, 增大超高渐变率 P , 能减小合成坡小于 0.5% 的面积 S ; 当 $|i| \geq$

0.5% 时, $S=0$, 增大超高渐变率 P , 能使水快速排出路面范围; 在有利条件下, 超高渐变率尽量取大值。对于不利条件, $0 \leq |i| \leq 0.5\%$ 时, 增大超高渐变率 P , 能减小合成坡小于 0.5% 的面积 S ; $0.5\% < |i| < P_{\max} + 0.5\%$ 时, 随着 P 的增加, S 先增加后减小, S 存在一个最大值 S_{\max} , $0.5\% < |i| < 0.8\%$ 时, 为使 $S=0$, 超高渐变率 P 必然小于 $1/330$, 不满足规范要求; $0.8\% \leq |i| \leq P_{\max} + 0.5\%$ 时, 超高渐变率在 $1/330 \leq P \leq P_{\max}$ 范围内一定存在 P , 使 $S=0$ 满足规范要求; $|i| \geq P_{\max} + 0.5\%$ 时, 无论超高渐变率怎么取值, $S=0$, 但是在满足合成坡要求的情况下, 水要尽快排出路面范围, 所以超高渐变率应取大值。

针对目前规范规定合成坡不宜小于 0.5% 的规定, 建议用面积指标来控制, 有利条件下, 合成坡不小于 0.5% 相对比较容易满足, 但是在不利条件下, 要想合成坡不小于 0.5% , 纵坡就要增加, 对于山区公路工程量会大大增加。不利条件下, 纵坡在 $0.5\% < |i| \leq P_{\max} + 0.5\%$ 范围内, 最小超高渐变率 $1/330$ 的规定不应受限制。

参考文献:

- [1] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].
- [2] 刘利民, 王智. 三次抛物线与线性超高渐变的对比研究[J]. 中外公路, 2018(3).
- [3] 易昕, 张军华. 浅谈超高渐变段合成坡度设计[J]. 工程与建设, 2016(5).
- [4] 冯阳飞, 张文献. 基于合成坡度的超高缓和段的研究[J]. 黑龙江交通科技, 2006(8).