

文章编号: 1002-0268 (2003) 05 0020-05

漫流排水时公路路面及边坡的水流速度计算

陈云鹤¹, 钱国超², 李志刚¹

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 江苏省交通厅, 江苏 南京 210004)

摘要: 探讨雨水在路面及边坡上的运动规律, 对高速公路采用漫流排水时路面及边坡的雨水流速进行了较深入的理论分析, 编制了相关计算程序, 通过计算得到了不同情况下路面及边坡水流的流速规律及有关图表数据, 并得出如下结论: 1) 路面纵坡 $>1\%$ 的情况下路面纵坡对路面及边坡的水流流速的影响明显, 路面纵坡越大, 在路肩及坡脚处的水流速度越大; 2) 当路面横坡为 2% 、纵坡大于 3% 的情况下, 土路肩受冲刷明显; 3) 边坡有草防护时的水流速度比边坡无草防护时降低了 $7\% \sim 14\%$; 4) 在边坡植草的情况下, 路堤高度对边坡流速的影响不明显; 5) 当边坡坡度为 $1:1.5 \sim 1:2.0$ 的情况下, 对边坡流速的影响不明显, 且边坡流速不大。

关键词: 高速公路; 路面; 边坡排水; 流速; 计算

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Calculations of Free Water Drainage Current Velocities over Pavement and Slope

CHEN Yun-he¹, QIAN Guo-chao², LI Zhi-gang¹

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Jiangsu Nanjing 210007, China;

2. The Communications Department of Jiangsu Province, Jiangsu Nanjing 210004, China)

Abstract: The regularity of rain water current moving along pavement and slope are researched in the paper. The free water drainage current velocities over pavement and of slope are analyzed in depth. Relative computation program is also completed. The current velocities over pavement and slope, some figures and tables are obtained from calculations. Some conclusions are also gained as follows: 1) longitude gradient of pavement has evident effect on the current velocity when it is over 1% , the bigger the longitude gradient of pavement, the greater the current velocities; 2) soil shoulder of pavement has obvious erosion when transversal gradient over 2% and longitude gradient over 3% ; 3) the current velocity over the slope with grass is $7\% \sim 14\%$ less than that without grass; 4) the effect of pavement height on the current velocity of slope with grass is not conspicuous; 5) the gradient of slope which is of $1:1.5 \sim 1:2.0$ has no obvious effect on the current velocities over the slope, and the current velocity is not great.

Key words: Highway; Pavement; Slope drainage; Current velocity; Calculation

0 前言

路面排水设计是高速公路路面设计的重要组成部分。一方面, 由降雨形成的路面水膜影响车轮与路表面的接触, 车辆高速行驶时, 易使车轮产生液面滑移(即水漂), 且高速行驶的车辆尾部易形成水雾, 影响

驾驶员的视线, 易发生交通事故, 影响高速行驶安全; 另一方面, 路面水若不能及时排除, 还会透过路面面层渗入到基层, 这样易使基层软化、冲刷和唧浆, 影响路面的整体强度。与此同时, 高速公路边坡因常年暴露于自然环境中, 承受雨水的冲刷, 使边坡发生各种变形、病害甚至破坏。江苏省高速公路地处

长江下游,降雨量较大,雨水对路面及路基边坡的冲刷作用突出。因此尤需重视公路的边坡受冲刷问题研究。

降落在路面表面的雨水对边坡坡面冲刷的作用大小,一定程度上取决于其流速的大小,因此应对公路路肩边缘处的流速以及路堤边坡上任意一点的流速进行计算,携此确定高速公路边坡在不同情况下的冲刷程度。

1 计算原理及方法

1.1 路肩漫流对路面及边坡防护的要求

当路基横断面为路堑时,横向排流的表面水汇集于边沟内,由边沟再沿着路线纵坡排出路外。当路基横断面为路堤时,可采用两种方式排除路面表面水:一种是让路面表面水以横向漫流形式向路堤坡面分散排放;另一种方式是在路肩外侧边缘处设置拦水带,将路面表面水汇集在拦水带同路肩铺面组成的浅三角形过水断面内,然后通过隔一定间距设置的泄水口和急流槽集中排放到路堤坡脚外。

从定性角度来说,在汇水量不大,路堤不高,路线合成坡度不大,坡面耐冲刷能力强的情况下,应优先采用横向漫流分散排放的方式。

在目前所建的高速公路路堤坡面均采用了防护措施,但是不同的坡面防护形式对坡面水流的耐冲抗能力是不同的,工程上常采用容许流速来表示坡面的抗冲刷能力^[1]。因此,在设计过程中,要么先计算坡面流速,从而采取相应的防护类型;要么根据所采用的防护类型,确定坡面容许流速,然后根据计算坡面流速判定采用的防护类型能否满足漫流排水方式的要求。

1.2 漫流的流速计算

1.2.1 公路路肩边缘处的流速 v_1

设高速公路中央分隔带边缘至土路肩边缘的距离为 B ,路面横坡为 i_s ,纵坡为 i_g ,粗度系数为 m_1 。

若以 t_1 表示自中央分隔带边缘至土路肩边缘所需的汇流历时,则雨水质点在合力的作用下,将沿路面的横坡及纵坡的合成坡度进行运动,因此有

$$\text{坡面流的合成坡度 } i_l = \sqrt{i_s^2 + i_g^2} \quad (1)$$

$$\text{坡面流的长度 } L_{sl} = B \times i_l / i_s \quad (2)$$

$$\text{汇流历时 } t_1 = 1.445 \times \left[\frac{m_1 L_{sl}}{\sqrt{i_l}} \right]^{0.467} \quad (3)$$

$$\text{土路肩边缘处的流速 } v_1 = 2 \times \frac{L_{sl}}{60 t_1} \quad (4)$$

由式(3)可得

$$L_{sl} = 0.445 \frac{\sqrt{i_l}}{m_1} t_1^{2.141} \quad (5)$$

需要指出的是,降落在路面上的雨水,首先有部分渗透到路面,然后逐渐形成路面表层水膜并流动。这个由开始降雨到形成路面表面径流的过程很短。降雨强度的大小只表明在同样的时间内的降雨量的多少,不代表雨滴降落速度的大小(降雨强度大只能表明路面形成径流的时间较短)。因此,当降雨在路面开始形成径流后,即使降雨强度不同,但对后续的单个雨滴来说,其在路面表面的流动速度是一致的,也就是说,降雨强度对雨滴在路面上的流动速度基本没有影响,因此,在计算中可以不考虑降雨强度影响因子。

这样,降落在路面上的雨点,其初速度可视为0,从微观上可将其看作为一个质点,该质点在重力的作用下由高处向低处运动,在运动过程中同时还受到周围其它质点及路面的粘滞力的作用。显然,可假设质点在这三个力的共同作用下,其合力不变,因此该质点应作初速度为0的等加速直线运动。

对于初速度为0的等加速直线运动,其时间与距离的关系式为

$$L_{sl} = \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \quad (6)$$

对照式(5),式(5)中有 $t_1^{2.141}$,式(6)中有 t_1^2 ,该两项很接近,若使式(5)和式(6)的右边前一部分一致,则该两式所得的 L_{sl} 就基本一致。且雨滴运动的加速度主要应与路面的粘滞力(由路面的粗糙系数决定)、路面坡度等路面本身的固有性质有关,因此,若设

$$\frac{1}{2} a_1 = 0.455 \frac{\sqrt{i_l}}{m_1} \text{ 或 } a_1 = 2 \times 0.455 \frac{\sqrt{i_l}}{m_1} \quad (7)$$

则将式(7)代入式(6),得到的 L_{sl} 与式(5)中的 L_{sl} 基本相等;且从式(7)可以看出,在这种情况下雨滴的加速度确实与路面的粗糙系数、路面坡度等路面的固有性质有关。这说明,以初速度为0的等加速直线运动来考虑落在路面上雨点运动的假定是合理的。

v_1 与水平路肩线的夹角为

$$\theta_1 = \arcsin \frac{i_s}{i_l} \quad (8)$$

按照式(1)~(7)可以计算各种坡度、路面粗度、路面宽度等情况下在路肩边缘处的速度 v_1 。

1.2.2 边坡上一点 A 点处的流速 v_2

同样,可以假设坡面上的质点在周围其它质点与

坡面的粘滞力、坡面支反力及重力的共同作用下，该质点所受的合力不变。该合力的方向为沿着坡面，且垂直于水平坡脚线（该结论可用立体几何的知识证明），合力所引起的坡面流加速度为 a_2 。为了求出坡面上一点 A 处（对应 t_2 时刻）的流速 v_2 ，可以近似认为雨点在由路肩运动到边坡上时，方向改变但不改变其速度值 v_1 。如图 1 所示（ A 点应落在 F 、 E 点之间，图中未标示）。即有

$$v_{20}=v_1 \tag{9}$$

式中， v_{20} 为坡面流的初速度。

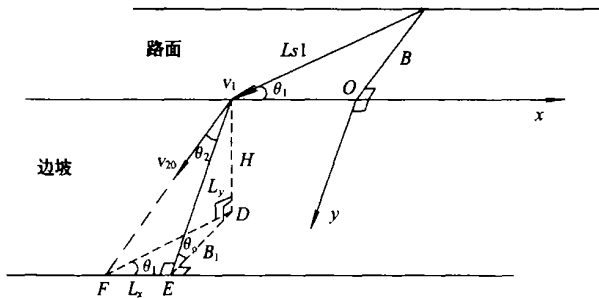


图 1 θ_2 的计算简图

显然， v_{20} 与 a_2 的方向成夹角 θ_2 。这样，坡面流的初速度与其加速度方向不一致，因此，坡面流将作初速度为 v_{20} 的抛物线运动。若设边坡坡面的粗度系数为 m_2 ，坡度为 i_p ，边坡上 A 点至土路肩边缘的坡高为 H ，则由式 (7) 可知

$$a_2=2\times 0.455\frac{\sqrt{i_p}}{m_2} \tag{10}$$

则在 t_2 时刻的坡面流流速 v_2 为

$$v_2=v_{20}+a_2t_2 \tag{11}$$

式 (11) 是一个矢量运算关系，可以写成标量运算形式。为此，设边坡上局部坐标系沿路线纵向为 x 轴，路面横向为 y 轴，则

$$\begin{cases} v_{2x}=v_{20x} \\ v_{2y}=v_{20y}+a_2t_2 \end{cases} \tag{12}$$

式中， v_{20x} 、 v_{20y} 分别为 v_{20} 在局部坐标系 xy 内的分量； v_{2x} 、 v_{2y} 分别为 v_2 在局部坐标系 xy 内的分量。且有

$$\begin{cases} v_{20x}=v_{20}\sin\theta_2=v_1\sin\theta_2 \\ v_{20y}=v_{20}\cos\theta_2=v_1\cos\theta_2 \end{cases} \tag{13}$$

因此，

$$v_2=\sqrt{v_{2x}^2+v_{2y}^2} \tag{14}$$

由于路面的横坡很小，为了确定夹角 θ_2 ，可适当简化问题，即可忽略该路面横坡坡度，认为路面是水平面，这样由图 1 可知

$$L_y=\frac{H}{\sin\theta_p} \tag{15}$$

$$B_1=H\operatorname{ctg}\theta_p \tag{16}$$

其中， $\theta_p=\arctan i_p$ ， θ_p 为边坡坡角。

通过 v_1 以及 v_{20} 所作的平面因垂直于水平面，故该平面与路基底平面的交线 DF 应平行于 v_1 ，这样在三角形 $\triangle DEF$ 中

$$L_x=B_1\operatorname{ctg}\theta_1=H\operatorname{ctg}\theta_p\operatorname{ctg}\theta_1 \tag{17}$$

$$\operatorname{tg}\theta_2=\frac{L_x}{L_y}=\frac{H\operatorname{ctg}\theta_p\operatorname{ctg}\theta_1}{H/\sin\theta_p}=\cos\theta_p\operatorname{ctg}\theta_1 \tag{18}$$

显然，由上式可知，当 $\theta_p=0^\circ$ 时（即路面和坡面在一个平面内），得到 $\operatorname{tg}\theta_2=\operatorname{ctg}\theta_1$ ，即有 $\theta_2=90^\circ-\theta_1$ ；当 $\theta_p=90^\circ$ 时（即路面和坡面相垂直），得到 $\operatorname{tg}\theta_2=0$ ，即有 $\theta_2=0^\circ$ 。因此，本公式完全合理。将式 (8) 代入上式即可求得 θ_2 ，由 θ_2 即确定了水流在坡面的运动方向。

又因坡面流在 y 方向的分运动为具有初速度 v_{20y} 的等加速直线运动，因此坡面流在 y 方向的运动距离 L_y 与运动时间 t_2 的关系按照物理知识可知为

$$L_y=v_{20y}t_2+\frac{1}{2}a_2t_2^2 \tag{19}$$

或
$$\frac{1}{2}a_2t_2^2+v_{20y}t_2-L_y=0 \tag{20}$$

可得
$$t_2=\frac{-v_{20y}\pm\sqrt{v_{20y}^2+2a_2L_y}}{a_2} \tag{21}$$

由于时间为正数，故得

$$t_2=\frac{-v_{20y}+\sqrt{v_{20y}^2+2a_2L_y}}{a_2} \tag{22}$$

将式 (10)、(22) 代入式 (12)，就可得到边坡上任意一点的坡面流速度 v_2 。

速度 v_2 求得后，根据边坡所用材料的允许流速指标，可以确定该边坡的冲刷状况。

2 算例

为了便于工程设计应用，编制了简易的 v_1 、 v_2 的计算程序。按照计算，可得常用的几种不同路面纵坡情况下 v_1 的计算值如表 1。

在施工过程中，由于土的允许（抗冲刷）流速小于 0.4m/s ，显然，由表 1 可知，当路面横坡为 2%、纵坡大于 3% 的情况下，在施工期间，土质路肩受冲刷明显。

显然，从表 1 可见，在路堤边坡无草防护时，路面纵坡越大，在坡脚处的水流速度越大，且路面纵坡 $>1\%$ 情况下的影响明显，而当路面纵坡 $<1\%$ 情况下

其影响不明显。同时，表 1 中的 v_2 基本均大于土的允许（抗冲刷）流速 0.4m/s，因此，当路堤边坡无草防护时，边坡存在冲刷危险。

同时，由于实际工程中十分关心边坡植草防护的抗冲刷能力，因此，对边坡有无植草防护漫流排水，在不同的路面纵坡、路堤高度、边坡坡度等情况下的速度 v_2 进行了计算，见表 2~表 4。

从表 2 可见，在路堤边坡有草防护时，路面纵坡越大，在坡脚处的水流速度越大，而种植草皮的允许

流速为 1.2m/s，因此边坡在表中所列情况下不存在冲刷危险。同时，通过表 1 与表 2 的比较可以得知，边坡有草防护时的水流速度 v_2 比边坡无草防护时降低了 7%~14%，这是由于草的作用，使得水流运动受到滞缓，从而降低了水流速度。

从表 3 可见，路堤高度越大，在坡脚处的水流速度越大，但在边坡植草的情况下，路堤高度对水流速度的影响不明显。

从表 4 可见，当边坡坡度变化在 1:1.0~1:2.0

不同路面纵坡下土路肩边缘处水流速度 v_1 及路堤边坡（无草时）坡脚处的水流速度 v_2 计算值 表 1

序号	路面横坡 i_s (%)	路面纵坡 i_g (%)	路面宽度 d (m)	路面粗度系数 m_1	边坡粗度系数 m_2	边坡坡度 i_b	路堤高度 H (m)	路肩边缘流速 v_1 (m/s)	坡脚流速 v_2 (m/s)
1	2	0.0	11.25	0.013	0.10	1:1.5	3.0	0.256	0.399
2	2	0.3	11.25	0.013	0.10	1:1.5	3.0	0.258	0.401
3	2	0.5	11.25	0.013	0.10	1:1.5	3.0	0.264	0.405
4	2	1.0	11.25	0.013	0.10	1:1.5	3.0	0.278	0.414
5	2	2.0	11.25	0.013	0.10	1:1.5	3.0	0.333	0.453
6	2	3.0	11.25	0.013	0.10	1:1.5	3.0	0.401	0.504
7	2	4.0	11.25	0.013	0.10	1:1.5	3.0	0.473	0.561

不同路面纵坡下路堤边坡（有草时）坡脚处的水流速度 v_2 计算值 表 2

序号	路面横坡 i_s (%)	路面纵坡 i_g (%)	路面宽度 d (m)	路面粗度系数 m_1	边坡粗度系数 m_2	边坡坡度 i_b	路堤高度 H (m)	坡脚流速 v_2 (m/s)
1	2	1	11.25	0.013	0.30	1:1.5	3.0	0.355
2	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	3.0	0.399
3	2	3	11.25	0.013	0.30	1:1.5	3.0	0.457
4	2	4	11.25	0.013	0.30	1:1.5	3.0	0.520

不同路堤高度下路堤边坡（有草时）坡脚处的水流速度 v_2 计算值 表 3

序号	路面横坡 i_s (%)	路面纵坡 i_g (%)	路面宽度 d (m)	路面粗度系数 m_1	边坡粗度系数 m_2	边坡坡度 i_b	路堤高度 H (m)	坡脚流速 v_2 (m/s)
1	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	2.5	0.393
2	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	3.0	0.399
3	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	4.0	0.410
4	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	5.0	0.420
5	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	6.0	0.429
6	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	7.0	0.438
7	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	8.0	0.446

不同边坡坡度下（有草时）坡脚处的水流速度 v_2 计算值 表 4

序号	路面横坡 i_s (%)	路面纵坡 i_g (%)	路面宽度 d (m)	路面粗度系数 m_1	边坡粗度系数 m_2	边坡坡度 i_b	路堤高度 H (m)	坡脚流速 v_2 (m/s)
1	2	2	11.25	0.013	0.30	1:0.5	4.0	0.424
2	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.0	4.0	0.412
3	2	2	11.25	0.013	0.30	1:1.5	4.0	0.410
4	2	2	11.25	0.013	0.30	1:2.0	4.0	0.412
5	2	2	11.25	0.013	0.30	1:3.0	4.0	0.416

(下转第 30 页)

有一定的变化，某一天的位移速率可能已经超过了控制标准，而平均位移速率可能还低于控制标准。当预测时间较短时，平均位移速率跟实际每天的位移速率将会比较接近，这时平均位移速率起到了一定的参考作用。事实上，若不考虑针对砂井地基沉降速率的放宽值，第 4 堆载段预测的路基中心地面平均沉降速率已超过 10mm/d 的标准。

松尾方法在日本的应用比较广泛，但在中国软土路基进行稳定性预测的适用性还有待于继续探讨。

本文提出的路基内部最大的水平位移增量与路堤中心地面垂直位移增量的比值 $\Delta \delta_{\max}/\Delta S$ 在杭甬高速公路建设中得到了成功应用。由于该比值在路基失稳以前每一堆载阶段都保持了一种近似的线形关系，因此更适用于路堤工程信息化施工计算程序的变形控制标准。至于 $\Delta \delta_{\max}/\Delta S$ 的大小应与土性及其分布有关，不同的土性和分布该比值是不一样的。

4 结论

信息化施工为路堤工程的设计和施工提供了一个

新的思路，是今后路堤工程施工的发展方向。鉴于变形控制标准是信息化施工的一个关键环节，本文结合软土地区路堤工程实例分析了几种代表性的变形控制标准，认为信息化施工中路基稳定性预测采用路堤坡脚处最大水平位移增量与路堤中心沉降增量之比值 $\Delta \delta_{\max}/\Delta S$ 作为安全控制标准比较可靠，该值适于判断软土路基的稳定性。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通部. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范 (JTJ 017-96) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
[2] E Wakita, M matsuo. Observational Design Method for Earth Structures Constructed on Soft Ground [J]. Geotechnique, 1994, 44 (4) 747—755.
[3] 蔡体楞, 主编. 杭甬高速公路软土地基处理 [M]. 杭州: 杭州出版社, 1998.
[4] 陈建峰. 基于遗传算法的反分析方法及其在路堤工程中的应用研究 [D]. 同济大学博士学位论文, 2001.

(上接第 23 页) 之间时，边坡坡度对在坡脚处水流速度的影响较小，这也是现行边坡常采用 1:1.5 或 1:2.0 的原因之一。但当边坡坡度不在此范围内时，出现了使边坡流速增大的现象。这种现象比较合理的解释为：当边坡坡度陡于 1:1.0 时，雨滴所受的重力可能起主要作用，使得流速加快；而当边坡坡度缓于 1:2.0 时，雨滴的运动惯性可能起主要作用，因此随着运动距离的加大，其流速也加快了。

3 结论

(1) 路面纵坡>1%的情况下路面纵坡对路面及对边坡的水流流速的影响明显，路面纵坡越大，在路肩及坡脚处的水流速度越大。

(2) 在路面横坡为2%、纵坡大于3%的情况下，施工期间土路肩存在受冲刷的问题，应采取导流或适当防护措施，防止雨水的冲刷。

(3) 边坡有草防护时的水流速度比边坡无草防护时降低了 7%~14%，边坡植草能大大改善边坡抗冲

刷的性能。

(4) 在边坡植草的情况下，路堤高度对边坡流速的影响不明显。

(5) 当边坡坡度采用 1:1.5~1:2.0 的情况下，对边坡流速的影响不明显，且边坡的流速不大。因此，在公路建设征地有限的情况下，尽可能采用此坡度范围值。

本文提供的路面及边坡流速的计算方法，对于边坡采用其它防护类型也同样适用，也可以通过比较流速计算值与各种防护类型的允许流速值的大小，来确定不同防护类型的边坡抗冲刷的能力与效果。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通部. 公路设计手册——路基 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
[2] 中华人民共和国交通部. 公路排水设计规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.