

钢筋混凝土轨枕线路 接头换铺木枕的初步探讨

上海铁路局 管天保

钢轨接头是线路的薄弱环节,这是因为钢轨在接头处中断,用鱼尾板连结其强度不可能与钢轨本身的强度相当。因此,当列车通过接头时由于轨缝的存在和轨面折角的形成,加剧了对线路的打击作用,加速了线路的破坏,这是造成线路接头病害的主要原因,也是接头本身构造所决定的。

在线路上铺设钢筋混凝土轨枕后,由于轨下基础的刚度增加,上述的动力作用进一步加剧,尤其在道床硬结、接头养护不良时,钢轨打坍,接头低叩,轨枕碎裂,道床塌坍、冒浆等接头病害更为突出。为了解决这一问题,从1981年起我段在浙干线 K234—K254, K276—K277进行了接头换铺木枕的试验。其中除K277这1公里中,分别在接头换铺2根和6根木枕外,其余均换铺4根木枕。经过三年的运营实践证明,钢筋混凝土轨枕线路接头改铺木枕后,大大改善了接头的动力特性,接头病害减少,发展也慢,因此接头的养护工作量也比原来大大减少,深受工区的欢迎,认为这是解决钢筋混凝土轨枕线路接头病害的好方法,所以在我段已经全面推广,而且线路大修以及新建线路也都采用了这一办法。

根据实践经验,接头换铺两根木枕,不易稳定,效果不十分理想,而换铺6根木枕则没有必要,因此以换铺4根木枕为佳。

为了进一步阐明钢筋混凝土轨枕线路接头改铺木枕后的受力条件,下面就接头的静力和动力计算作一简单的比较分析。

一、接头的静力计算

为了比较木枕线路、钢筋混凝土枕线路以及钢筋混凝土枕线路接头改铺木枕后,接头在受静力作用方面的差异,下面将分三种情况进行计算。

钢轨接头的静力计算,采用半无限长梁、弹性点支承的计算方法,而鱼尾板的作用,用一个假想的弹性铰来考虑。根据《铁路轨道结构静力计算问题》和《关于钢轨接头强度静力计算的探讨》两文中介绍的公式,半无限长梁求各支点弯矩和挠度的通式如下。

$$Mr = e^{-\alpha r} (A_1 \sin \beta r + A_2 \cos \beta r)$$

$$y_r = \frac{-2\sqrt{6K}}{Da} e^{-\alpha r} [A_1 \sin(\beta r + \theta) + A_2 \cos(\beta r + \theta)]$$

当梁端受一弯矩 M 作用时(图1)

$$A_1 = \frac{(1 - 2\sqrt{6K} \cos \theta - e^\alpha \cos \beta)}{e^{-\alpha} \sin \beta + 2\sqrt{6K} \sin \theta} M$$

$$A_2 = M$$

当梁端受荷载 W 作用时 (图 2)

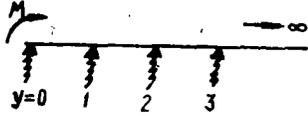


图 1

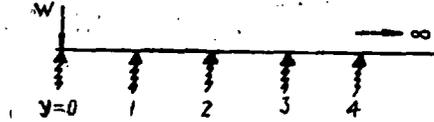


图 2

$$A_1 = \frac{-Ws}{e^{-\alpha} \sin \beta + 2\sqrt{6K} \sin \theta}$$

$$A_2 = 0$$

以上各式中, α 、 β 、 θ 都是与轨下基础刚度 K 有关的常数, 可按下列各式计算:

$$K = \frac{Da^3}{24EJ}$$

式中 D —— 钢轨支点弹性系数

a —— 轨枕间距

E —— 钢轨弹性模量

J —— 钢轨竖向截面模量

$$\alpha = \operatorname{arcch} \frac{\sqrt{4+2K} + \sqrt{6K}}{2}$$

$$\beta = \arccos \frac{\sqrt{4+2K} - \sqrt{6K}}{2}$$

$$\theta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{6}{K} - 1}$$

$$\text{支点上梁的转角 } \phi_r = \frac{\alpha}{2EJ} \sqrt{\frac{2+K}{3K}} e^{-\alpha r} [A_1 \sin(\beta r + \omega) + A_2 \cos(\beta r + \omega)]$$

式中

$$\omega = \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\sqrt{\frac{6}{K} - 1}}{2}$$

$r = 0, 1, 2 \dots$ 等任意整数表示各轨枕的序号。

在利用上述公式计算时, 还需利用变位互等定理, 即 W 在悬臂端时, 在支座 0 处所引起的位移 y_0 等于 W 在支座 0 处时在悬臂端所引起的位移 y_w (图 3)。当在支座 0 处作用一个 W , 在支座处所引起的转角 ϕ_0 , 等于在梁端加一弯矩 M , 在该支座处所产生的挠度, 即 $\phi_0 = y_0$ (图 4)。

为了计算方便, 轨枕间距各孔均按 57cm, 钢轨按 50 中新轨 $E = 2.1 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$, $J = 2037 \text{ cm}^4$

下面就按上述公式, 分三种线路, 计算一个车轮通过接头三根轨枕时的挠度,

(一) 木枕线路

假定钢轨支点的弹性系数 $D=15000\text{kg/cm}$, 则 $K=0.02706$, $\alpha=0.6346$, $\beta=36.361^\circ$, $\theta=86.1493^\circ$, $\omega=41.1666^\circ$

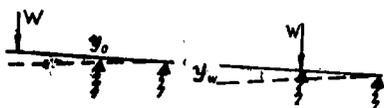


图 3

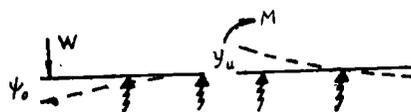


图 4

1. 计算钢轨接头没有鱼尾板联结时, 车轮通过接头时的挠度

(1) 求车轮通过 3 号支座时的钢轨挠度 y_1 , 当钢轨不存在接头时, 车轮在 3 号支座处产生的反力 R_3 和在 1 号支座等处所产生的弯矩均可查表求得 (参考文献 1)

$$R'_3 = 0.3167W$$

$$M_1 = -0.08171Wa$$

$$M'_1 = -0.07695Wa$$

由此得 $y'_3 = \frac{R_3}{D} = 0.2111 \times 10^{-4}W$

$$Q_1 = \frac{M_1 - M'_1}{a} = -0.00476W$$

当钢轨有接头存在时, 将 M_1 和 Q_1 作为外力, 与原方向相反, 加在 1 号支座处, 再用半无限长梁公式计算 3 号支座处的挠度 (图 6)。

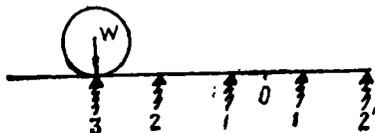


图 5

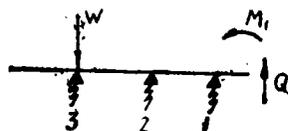


图 6

在 M_1 作用下的挠度: $y''_3 = \frac{-2\sqrt{6K}}{Da} e^{-2\alpha} [A_1 \sin(2\beta + \theta) + A_2 \cos(2\beta + \theta)]$

$$A_1 = \frac{(1 - 2\sqrt{6K} \cos \theta - e^{-\alpha} \cos \beta)}{e^{-\alpha} \sin \beta + 2\sqrt{6K} \sin \theta} M = 2.1615W$$

$$A_2 = M = 0.03171aW = 4.6575W$$

代入后得 $y_3 = 0.9446 \times 10^{-6}W$

求在 Q_1 作用下的挠度 y''_3

此时 $A_1 = \frac{-Q_1 a}{e^{-\alpha} \sin \beta + 2\sqrt{6K} \sin \theta} = 0.2426W$

$$A_2 = 0$$

代入后得 $y''_3 = -0.02317 \times 10^{-6}W$

将 y'_3 、 y''_3 、 y''_3 叠加得

$$y_3 = 0.2203 \times 10^{-4}W$$

(2) 求车轮通过2号支座时的钢轨挠度 y_2

与上述方法相同, 当钢轨不存在接头的时候, 车轮通过2号支座处的挠度 y'_2 和 M_1 、 Q_1 , 如下

$$\begin{aligned} y'_2 &= 0.2111 \times 10^{-4} W \\ M_1 &= 0.0251 W a \\ Q_1 &= 0.10681 W \end{aligned}$$

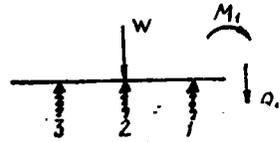


图 7

有接头时在 M_1 作用下

$$\begin{aligned} y''_2 &= \frac{-2\sqrt{6K}}{Da} e^{-\alpha} [A_1 \sin(\beta + \theta) + A_2 \cos(\beta + \theta)] \\ A_1 &= -0.6640W, \quad A_2 = -1.4307W \\ y''_2 &= -0.1044 \times 10^{-8} W \end{aligned}$$

在 Q_1 作用下, $A_1 = \frac{-Q_1 a}{e^{-\alpha} \sin \beta + 2\sqrt{6K} \sin \theta} = -5.444W, \quad A_2 = 0$

$$y''_2 = 2.2937 \times 10^{-8} W$$

最后得, $y_2 = y'_2 + y''_2 + y''_3 = 0.23299 \times 10^{-4} W$

(3) 求车轮通过1号支座时的钢轨挠度
这时可直接利用半无限长梁的计算公式

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{-2\sqrt{6K}}{Da} A_1 \sin \theta, \quad A_1 = \frac{-W a}{e^{-\alpha} \sin \beta + 2\sqrt{6K} \sin \theta} \\ &= -50.9694W \end{aligned}$$

代入后得: $y_1 = 0.4793 \times 10^{-4} W$

(4) 求车轮通过接头悬臂端处的钢轨挠度 y_0

(甲) 先计算 W 在1号支座上时的 y_{11} 、 ϕ_{11} 及 y_{01}

$$\begin{aligned} y_{11} &= 0.4793 \times 10^{-4} W \\ \phi_{11} &= \frac{\alpha}{2EJ} \sqrt{\frac{2+K}{3K}} A_1 \sin \omega = -0.4996 \times 10^{-8} W \\ y_{01} &= y_{11} + \phi_{11} \frac{\alpha}{2} = 0.621686 \times 10^{-4} W \end{aligned}$$



图 8

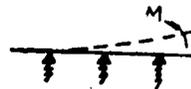


图 9

(乙) 计算 M 作用在1号支座上时的 y_{1M} 、 ϕ_{1M}

$$\begin{aligned} y_{1M} &= \phi_{11} = -0.4996 \times 10^{-8} M \\ \phi_{1M} &= \frac{\alpha}{2EJ} \sqrt{\frac{2+K}{3K}} (A_1 \sin \omega + A_2 \cos \omega) = 0.01576 \times 10^{-8} M \\ y_{01M} &= y_{1M} + \phi_{1M} \frac{\alpha}{2} = -0.9488 \times 10^{-8} M \end{aligned}$$

(丙) 计算车轮在悬臂端 0 处时, 在 1 号支座所引起的 y_{10} 和 ϕ_{10} , 根据变位互等定理:

$$\phi_{10} = y_{01H} = -0.9488 \times 10^{-6} W, \quad y_{10} = y_{01} = 0.621686 \times 10^{-4} W$$

(丁) 计算车轮在悬臂端处的钢轨挠度 y_0

由几何关系
$$y_0 = y_{10} + \phi_{10} \frac{a}{2} + \frac{W a^3}{24 E J} = 0.91015 \times 10^{-4} W$$

(5) 计算接头轨枕间距为 44cm 时的 y_0

同上述的方法步骤一样, 当车轮在 1 号支座上时

$$y_{11} = 0.4793 \times 10^{-4} W, \quad \phi_{11} = 0.4996 \times 10^{-6} W$$

而
$$y_{01} = y_{11} + \phi_{11} \cdot \frac{C}{2} = 0.5892 \times 10^{-4} W$$

当在 1 号支座上施加一力矩 M 时

$$y_{1M} = -0.4996 \times 10^{-6} M, \quad \phi_{1M} = 0.01576 \times 10^{-6} M$$

而
$$y_{01M} = y_{1M} + \phi_{1M} \cdot \frac{C}{2} = -0.8463 \times 10^{-6} M$$

由变位互等定理得:

$$y_{10} = 0.5892 \times 10^{-4} W$$

$$\phi_{10} = -0.8463 \times 10^{-6} M$$

由几何关系:
$$y_0 = y_{10} + \phi_{10} \cdot \frac{C}{2} + \frac{W C^3}{24 E J} = 0.783695 \times 10^{-4} W$$

2. 计算钢轨接头有鱼尾板连结时, 车轮通过接头时的挠度

将鱼尾板作为一个弹性铰, 当它受到外力使铰接处产生角变 θ 时, 它产生抵抗弯矩 M_j , 在 θ 与 M_j 之间有如下的关系:

$$\theta = \frac{M_j}{E J} \xi$$

θ ——弹性铰角变位, 也即所连接的两轨头的相对角变位

M_j ——弹性铰抵抗弯矩, 即鱼尾板所承担的弯矩

$E J$ ——钢轨弹性模量及惯性矩

ξ ——弹性铰角变形系数, 通过试验决定

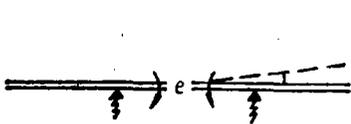


图 10

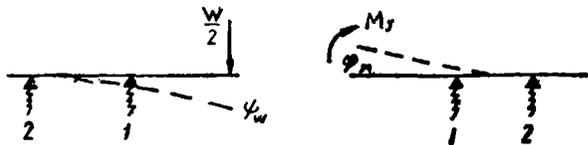


图 11

把弹性铰脱开, 使钢轨成为自由端, 然后在轨端分别加上荷载 $\frac{W}{2}$ 和弯矩 M_j , 这两个力分别使轨端产生转角 ϕ_w 和 ϕ_M (图 11)。

根据前面计算, 如果 M_j 作用在 1 号支座上时, 在该支座上产生的转角及挠度为:

$$\phi_1 = 0.01576 \times 10^{-6} M_j, \quad y_1 = -0.4996 \times 10^{-6} M_j$$

当 M_J 作用于悬臂端时,由几何关系(悬臂梁作为圆弧)

$$\psi_M = \psi_1 + \frac{1}{R} \cdot \frac{a}{2}, \text{ 而其中 } R = \frac{M}{EJ}$$

$$y_M = y_1 - \psi_1 \cdot \frac{a}{2} - \frac{1}{2R} \left(\frac{a}{2} \right)^2$$

代入数值后, $\psi_M = 0.02242 \times 10^{-6} M_J$, $y_M = -1.0437 \times 10^{-6} M_J$

根据变位互等定理,在悬臂端作用 $\frac{W}{2}$ 所引起角变位等于在该处作用 M 所产生的线变位(只需将 M 改成 W 即可),所以在 $\frac{W}{2}$ 作用下所引起的

$$\psi_W = y_0 \cdot \frac{W}{2} = \frac{1.0437}{2} \times 10^{-6} W$$

而

$$\theta = 2(\psi_W - \psi_M) = \frac{M_J}{EJ} \xi$$

将上述数值代入后得:

$$M_J = \frac{1.0437W}{0.00023377\xi + 0.04484}$$

取 $\xi = 80 \text{ rad-cm}$

则 $M_J = 16.4255W$, $\psi_M = 0.36826 \times 10^{-6} W$

$$\theta = 0.30718 \times 10^{-6} W$$

而接头中心处的挠度 y_0 可如下求得,根据前面的结果,在 $\frac{W}{2}$ 作用下 $y'_0 = \frac{W}{2} \cdot$

$$0.91015 \times 10^{-4} = 0.4551 \times 10^{-4} W$$

在 M_J 作用下, $y_0 = 0.17143 \times 10^{-4} W$

$$y_0 = y'_0 - y''_0 = 0.2837 \times 10^{-4} W$$

3. 计算接头孔轨枕间距为44cm时,接头处的转角和挠度按上述同样的公式和步骤,并利用已有的计算结果,可得

$$\psi_M = 0.0209 \times 10^{-6} M_J$$

$$\psi_W = \frac{0.9029}{2} \times 10^{-6} W$$

$$M_J = \frac{0.9029}{0.00023377\xi + 0.0418}, \text{ 取 } \xi = 80 \text{ rad-cm}$$

则 $M_J = 14.923W$, $\psi_M = 0.3119 \times 10^{-6} W$

$$\theta = 0.2791 \times 10^{-6} W$$

而 $y_0 = 0.25715 \times 10^{-4} W$

(二) 钢筋混凝土轨枕线路

假定钢轨支点弹性系数 $D = 60000 \text{ kg/cm}$, 轨枕间距 $a = 57 \text{ cm}$, 则 $K = 0.10823$, $\alpha = 0.8966$, $\beta = 51.407^\circ$, $\theta = 82.281^\circ$, $\omega = 37.417^\circ$

1. 计算钢轨接头没有鱼尾板连接时,车轮通过接头时的挠度,采用与木枕线路同样的方法,可计算得车轮通过3、2、1、0各点处的挠度如下:

$$y_3 = (0.07427 + 0.002717 + 0.000073) \times 10^{-4} W = 0.07706 \times 10^{-4} W$$

$$y_2 = (0.07427 + 0.002057 + 0.008675) \times 10^{-4} W = 0.07720 \times 10^{-4} W$$

$$y_1 = 0.1390 \times 10^{-4} W$$

$$y_0 = 0.3499 \times 10^{-4} W$$

当接头轨枕间距为520mm时, 则

$$y^0 = 0.3099 \times 10^{-4} W$$

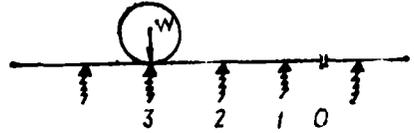


图 12

2. 计算钢轨接头有鱼尾板连接时, 车轮通过接头时的挠度与木枕线路的计算方法一

样, 在接头鱼尾板解开时, 在 $\frac{W}{2}$ 作用下, $\psi_w = 0.1864 \times 10^{-6} W$ 在鱼尾板抵抗弯矩 M_J 的作用下, $\psi_M = \frac{1.2\theta sa}{EJ} M_J$

$$\psi_M = \frac{1.2\theta sa}{EJ} M_J$$

$$\theta = 2(\psi_w - \psi_M) = -\frac{M_J}{EJ} \tau$$

代入后得: $M_J = \frac{0.7624W\alpha^2}{2.536\alpha + \xi}$ 取 $\xi = 30 \text{ rad-cm}$

$$\text{则 } M_J = 11.031W$$

$$\text{而 } \psi_M = 0.1864 \times 10^{-6} W$$

$$\theta = 0.2063 \times 10^{-6} W$$

接头中心处挠度 $y^0 = 0.11109 \times 10^{-4} W$

当接头孔轨枕间距为520mm时

$$\psi_w = \frac{0.7077a^2}{2EJ} \quad \psi_M = 1.2241 \frac{M_J a}{EJ}$$

$$M_J = 10.473W (\xi = 80 \text{ rad-cm})$$

得 $\psi_M = 0.1708 \times 10^{-6} W, \theta = 0.1959 \times 10^{-6} W$

$$y^0 = 0.09869 \times 10^{-4} W$$

(三) 钢筋混凝土轨枕线路接头四根轨枕改铺木枕

由于钢筋混凝土轨枕与木枕的钢轨支点弹性系数不同, 必须利用抵偿荷载来解决这一问题, 即在换铺木枕处各加上一个抵偿荷载 ($D_{混} - D_{木}$) y 如图13所示, 这样就可利用上述同样的方法来计算车轮通过钢轨接头时的挠度和转角。

1. 计算钢轨接头没有鱼尾板连接时, 车轮通过接头时的挠度

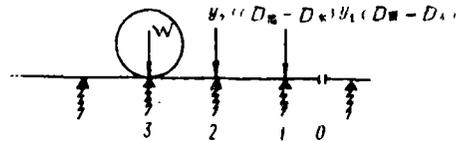


图 13

(1) 计算车轮通过 3 号支座时的挠度在 W 的作用下

$$y_3 = 0.07706 \times 10^{-4} W, \quad y_2 = 0.04444 \times 10^{-4} W,$$

$$y_1 = -0.0021 \times 10^{-4} W$$

在 $y_2 D'$ 作用下

$$y_3 = 0.04444 y_2 D' \times 10^{-4}, \quad y_2 = 0.07719 y_2 D' \times 10^{-4}$$

$$y_1 = 0.04125 \times 10^{-4} y_2 D'$$

在 $y_1 D'$ 作用下

$$y_3 = -0.0021 \times 10^{-4} y_1 D', \quad y_2 = 0.04125 \times 10^{-4} y_1 D'$$

$$y_1 = 0.1390 \times 10^{-4} y_1 D'$$

合计

$$y_3 = (0.07706W + 0.04444y_2 D' - 0.0021y_1 D') \times 10^{-4}$$

$$y_2 = (0.04444W + 0.07719y_2 D' + 0.04125y_1 D') \times 10^{-4}$$

$$y_1 = (-0.0021W + 0.04125y_2 D' + 0.1390y_1 D') \times 10^{-4}$$

$$(D' = 60000 - 15000 = 45000)$$

解上述联立方程得:

$$y_1 = 0.0327 \times 10^{-4} W, \quad y_2 = 0.0773 \times 10^{-4} W, \quad y_3 = 0.09221 \times 10^{-4} W$$

(2) 计算车轮通过2井支座时的挠度

在 $W + y_2 D'$ 作用下

$$y_2 = 0.07720 \times 10^{-4} (W + y_2 D')$$

$$y_1 = 0.04125 \times 10^{-4} (W + y_2 D')$$

在 $y_1 D'$ 作用下

$$y_2 = 0.04125 \times 10^{-4} y_1 D', \quad y_1 = 0.1390 \times 10^{-4} y_1 D'$$

合计

$$y_1 = (0.04125W + 0.1856y_2 + 0.6255y_1) \times 10^{-4}$$

$$y_2 = (0.0772W + 0.3474y_2 + 0.1856y_1) \times 10^{-4}$$

解方程得: $y_2 = 0.17415 \times 10^{-4} W, \quad y_1 = 0.1665 \times 10^{-4} W$

(3) 计算车轮通过1井支座时的挠度

在 $y_2 D'$ 的作用下

$$y_2 = 0.0772 \times 10^{-4} y_2 D', \quad y_1 = 0.04125 \times 10^{-4} y_2 D'$$

在 $W + y_1 D'$ 作用下

$$y_2 = 0.04125 \times 10^{-4} (y_1 D' + W)$$

$$y_1 = 0.1390 \times 10^{-4} (y_1 D' + W)$$

合计

$$y_2 = [0.0772y_2 D' + 0.04125(y_1 D' + W)] \times 10^{-4}$$

$$y_1 = [0.04125y_2 D' + 0.1390(y_1 D' + W)] \times 10^{-4}$$

解方程得: $y_1 = 0.4685 \times 10^{-4} W, \quad y_2 = 0.1964 \times 10^{-4} W$

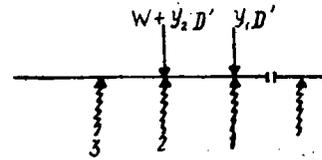


图 14

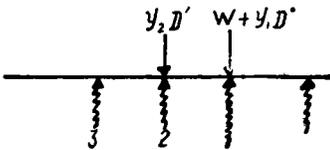


图 15

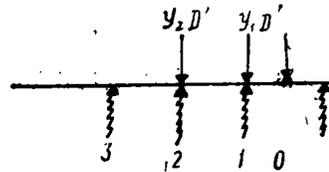


图 16

(4) 计算车轮通过接头中心处的挠度

在 W 的作用下

$$y_2 = 0.01445 \times 10^{-4} W, \quad y_1 = 0.1939 \times 10^{-4} W, \quad y_0 = 0.3499 \times 10^{-4} W$$

在 $y_1 D'$ 作用下

$$y_2 = 0.04125 \times 10^{-4} y_1 D', \quad y_1 = 0.139 \times 10^{-4} y_1 D',$$

$$y_0 = 0.1939 \times 10^{-4} y_1 D'$$

在 $y_2 D'$ 作用下

$$y_2 = 0.07719 \times 10^{-4} y_2 D', \quad y_1 = 0.04125 \times 10^{-4} y_2 D',$$

$$y_0 = 0.01445 \times 10^{-4} y_2 D'$$

合计

$$y_2 = (0.01445W + 0.1856y_1 + 0.3474y_2) \times 10^{-4}$$

$$y_1 = (0.1939W + 0.6255y_1 + 0.1856y_2) \times 10^{-4}$$

$$y_0 = (0.3499W + 0.1939y_1 D' + 0.01445y_2 D') \times 10^{-4}$$

解方程: $y_2 = 0.1972 \times 10^{-4} W$

$$y_1 = 0.6155 \times 10^{-4} W$$

$$y_0 = 0.8998 \times 10^{-4} W$$

2. 计算钢轨接头有鱼尾板连结时, 车轮通过接头时的挠度把接头解开, 并利用前面的计算结果

在 $\frac{W}{2}$ 作用下

$$y_2 = 0.01455 \frac{W}{2} \times 10^{-4}$$

$$y_1 = 0.1939 \times 10^{-4} \frac{W}{2}$$

$$y_0 = 0.3499 \times 10^{-4} \frac{W}{2}, \quad \psi_0 = -0.2895 \times 10^{-6} W$$

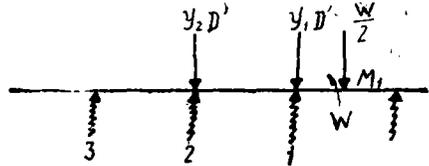


图 17

在 $y_1 D'$ 作用下

$$y_2 = 0.04125 \times 10^{-4} y_1 D', \quad y_1 = 0.139 \times 10^{-4} y_1 D'$$

$$y_0 = 0.1939 \times 10^{-4} y_1 D', \quad \psi_0 = -0.1925 \times 10^{-6} y_1 D'$$

在 $y_2 D'$ 作用下

$$y_2 = 0.0772 \times 10^{-4} y_2 D', \quad y_1 = 0.04125 \times 10^{-4} y_2 D',$$

$$y_0 = 0.01455 \times 10^{-4} y_2 D', \quad \psi_0 = 0.094 \times 10^{-6} y_2 D'$$

在 M_j 的作用下

$$y_2 = 0.094 \times 10^{-6} M_j, \quad y_1 = -0.1925 \times 10^{-6} M_j,$$

$$y_0 = -0.5791 \times 10^{-6} M_j, \quad \psi_0 = 0.0169 \times 10^{-6} M_j$$

假定 $W = 10t$ 代入后合计得:

$$y_2 = 0.00728 + 0.1856y_1 + 0.3474y_2 + 0.094 \times 10^{-6} M_j,$$

$$y_1 = 0.09695 + 0.6255y_1 + 0.1856y_2 - 0.1925 \times 10^{-6} M_j,$$

$$y_0 = 0.1750 + 0.8726y_1 + 0.06548y_2 - 0.5791 \times 10^{-6} M_j,$$

解上述方程

$$y_1 = 0.3066 - 0.5153 \times 10^{-6} M_j$$

$$y_2 = 0.09835 - 0.00255 \times 10^{-6} M_j$$

在 $\frac{W}{2}$ 、 y_1D' 和 y_2D' 的作用下

$$\begin{aligned} \psi_w &= -0.2895 \times 10^{-2} - 0.86625 \times 10^{-2} y_1 + 0.423 \times 10^{-2} y_2 \\ &= -0.5135 \times 10^{-2} + 0.4475 \times 10^{-2} M_j \end{aligned}$$

在 M_j 作用下, $\psi_M = 0.0169 \times 10^{-6} M_j$

按照前面同样的方法, 并取

$$\xi = 80 \text{ rad-cm}$$

则解得: $M_j = 167123 \text{ kg-cm}$

$$\theta = 0.3125 \times 10^{-2} \text{ rad}$$

$$y_1 = 0.220 \text{ cm}$$

$$y_2 = 0.098 \text{ cm}$$

$$y_0 = 0.2766 \text{ cm}$$

(四) 静力计算结果汇总

根据前面的计算结果可绘出图来如图

18所示。

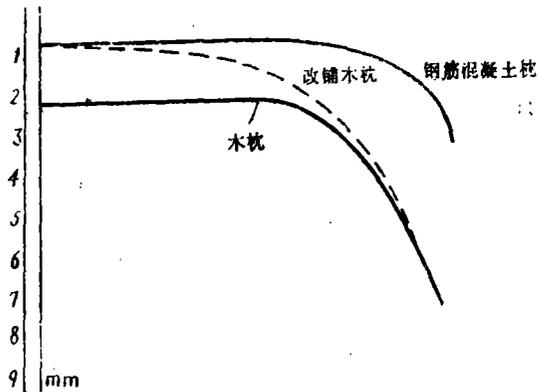


图 18

二、车轮通过钢轨接头时碰撞计算

车轮通过钢轨接头时所产生的撞击作用, 主要是轨缝和轨面线折角所引起, 要精确分析这种撞击作用是比较复杂的。为了比较木枕、钢筋混凝土枕线路以及接头改铺木枕后三种钢轨接头对车轮撞击作用的影响, 这里采用一种较为粗略和简单的办法, 只考虑一个车轮通过接头时的撞击作用, 假定在车轮撞击前接头的折角与静力作用下的折角一样, 根据角能量守恒定理, 可以算出车轮通过接头后的动能损失, 而这些动能损失又全部转化成钢轨的弹性变形能, 从而求得车轮碰撞后的接头附加动挠度。公式具体推导如下:

设, 车轮在碰撞前速度为 V , 碰撞后的速度为 V'

根据角动量守恒定律

$$mV \cdot R \cos \vartheta + \frac{V}{R} MR^2 = V' R + \frac{V'}{R} mR^2$$

$$V' = \frac{1 + \cos \vartheta}{2} V = \cos^2 \frac{\vartheta}{2} V$$

由此可得列车轮通过接头时的动能损失 E

$$E = \frac{1}{2} m(V^2 - V'^2)$$

上述的动能损失转变为接头弹性变形能时, 则

$$E = \frac{1}{2} Ky^2 \quad K \text{ —— 钢轨接头的刚度系数}$$

所以 $y = \sqrt{\frac{2E}{K}}$

在碰撞过程中, 不计钢轨及轨下基础的质量, 只计机车车辆簧下部分质量 δ (在算例中

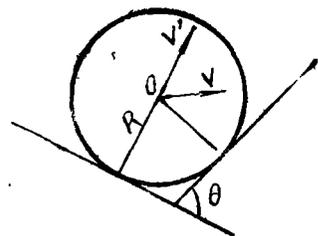


图 19

取机车动轮的簧下质量 $\delta = 2728\text{kg}$ 。

按照上述公式，计算得三种情况下，钢轨接头附加动挠度如下表所列：

$V = 60\text{km/h}$

线路类别	δ (rad)	V (km/h)	E (kg-cm)	K (kg/cm)	Y (cm)	$P_{\text{附}}$ (kg)
木枕线路	307×10^{-8}	59.9963	18.5578	3548.5	0.03245	1144
钢筋混凝土枕线路	200×10^{-8}	59.9836	8.351	90017.1	0.01362	1226
改铺木枕	3125×10^{-8}	50.99854	19.0217	56153.3	0.03244	1173

注：表中 K 由 $1/y$ 求得

在钢轨存在接缝的情况下：对于一定直径的轮子通过接头时，当与接头折角所对应的圆弧值小于轨缝时，撞击点就在轨端处，此时折角就可按轨缝值来计算。例如，对于解放型机车的动能 $D = 137\text{cm}$ 来说，相当于6mm轨缝的折角

$$\delta = 0.433 \times 10^{-2} \text{rad,}$$

而相当于17mm轨缝的折角

$$\delta = 1.241 \times 10^{-2} \text{rad.}$$

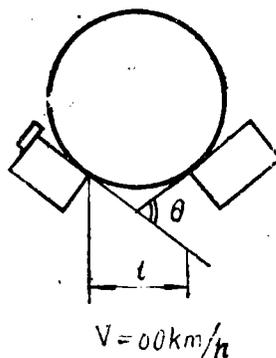


图 20

在上述轨缝下三种接头的附加动挠度和力列于下表。

线路类别	轨缝 6 mm		轨缝 17 mm	
	Y (mm)	R (kg)	Y (mm)	P (kg)
木枕线路	0.4683	1617	0.9197	3258
钢筋混凝土枕线路	0.2872	2585	0.5755	5180
改铺木枕	0.4531	1638	0.9081	3283

三、计算结果的初步分析

(一) 从静力计算结果可以看到，接头的影响范围对木枕线路来说，在接头两侧各三根轨枕的范围内，而对钢筋混凝土轨枕来说，则在接头两侧各二根轨枕的范围内。因此无论从实践的结果，还是从理论分析，钢筋混凝土轨枕线路，接头改铺四根木枕是可以了。

(二) 静力和动力计算结果说明，钢筋混凝土轨枕线路接头改铺四根木枕后，在受力性质上与木枕线路接头相当。原来担心接头改铺木枕后，由于轨下基础刚度不同，将在接头处引起新的动力不平顺。从计算结果以及图18上可以看出，改铺木枕后接头不平顺的深度不超过木枕，而轨面折角与木枕接头相当（比木枕接头大1.8%），因此完全可以当作木枕线路接头来对待。

(三) 车轮通过钢轨接头时形成的折角，木枕线路要比钢筋混凝土轨枕线路大。但是由

于轨缝的存在,当轨缝超过一定数值后,接头折角实际上就由轨缝所决定。在这种情况下,由于木枕线路的轨下基础刚度比较小,因此产生的附加动力作用将比钢筋混凝土轨枕线路减少47%左右,这对改善线路接头的受力条件是大大有利的。由此也可看出,为了减少车轮通过接头时的动力作用,尽量减小轨缝也是很有必要的。

(四) 接头轨枕的间距以及鱼尾螺栓的上紧程度,对接头的挠度和折角影响较大。对木枕线路,当接头轨枕间距从570mm减少到440mm时,挠度减少14%。对于钢筋混凝土轨枕线路,当接头轨枕间距从570mm减少到520mm时,挠度减少12%,同样在鱼尾螺丝全部松弛的情况下,相对于同一的弹性铰角变系数 $\zeta = 80 \text{ rad-cm}$ 时,木枕线路的接头挠度要增加2.2倍,钢筋混凝土轨枕线路增加1.79倍。所以在平时线路养护维修中保证接头轨枕位置正确和鱼尾螺栓达到要求的扭力矩,对改善受力条件是很有好处的。

(五) 由于钢轨接头本身构造的关系,车轮通过接头时的钢轨挠度要比大腰大,轨面线也不平顺。为了克服这种现象,设想在接头处适当做高,以抵消接头处不平顺。根据前面的计算结果,木枕线路接头做高3—4mm,钢筋混凝土轨枕接头做高2—3mm,这样可能对行车的平顺性更为有利,当然效果如何有待实践来进一步检验。

(六) 线路接头受力情况复杂,前面的计算,尤其是动力计算是比较粗糙的,不能精确反映接头的实际受力情况,只能作为三种线路的比较作用。因此下一步到现场进行测定还有大量工作要做,由于本人水平有限,文中的计算与分析有错误和不足之处,欢迎批评指正。

参 考 文 献

关于钢轨接头强度静力计算的探讨
铁路轨道结构静力计算问题
铁路轨道及路基

长沙铁道学院赵方民
谢天渝
上海铁道学院