

基于轨道超静定结构的扣件弹性参数的计算

刘 鑫

中国铁路设计集团有限公司 天津 300251

摘要: 在既有线路中, 由于钢轨、扣件与轨枕等轨道结构连接为一个超静定结构体, 无法直接测量出单个扣件的弹性参数, 基于连续梁理论验证钢轨在轮载作用下, 产生的挠度较小, 而随着测试技术的进步, 测试精度已经达到较高水平, 基于Winkler梁模型确定超静定结构力与位移的关系, 可推算出单个扣件精确可靠的弹性参数。

关键词: 轨道; 超静定结构; 扣件刚度; 有限元

1. 轨道超静定结构力学模型^[4-6]

1.1 基于连续梁钢轨挠度计算^[4]

得到钢轨节点的位移与受力数据, 需研究二者之间的关系, 建立力学模型, 将钢轨与扣件系统简化为连续梁结构, 截取其中一段, 如图1所示, 梁跨中受集中垂向力P, 梁内部受轴向力N, 以梁轴向为x轴, 右为正, 垂直梁为y轴, 向下为正。

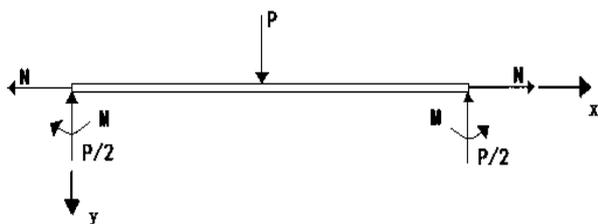


图1 钢轨受力示意图

跨中受集中荷载P, 端点弯矩为M, 温度应力为N, EI为钢轨的抗弯刚度, H为端部抗弯刚度, 根据材料力学理论, 挠曲性方程如下:

$$EIy'' = Ny - \frac{P}{2}x + M \quad (1)$$

假设 $K = \sqrt{\frac{N}{EI}}$, 上式通解为:

$$y = C_1 e^{Kx} + C_2 e^{-Kx} + \frac{P}{2N}x - \frac{M}{N} \quad (2)$$

边界条件为: $y(0) = 0$; $y(\frac{L}{2}) = 0$; $y'(0)H = M$, 利用边界条件可得:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -\frac{1}{N} \\ Ke^{\frac{KL}{2}} & -Ke^{-\frac{KL}{2}} & 0 \\ K & -K & -\frac{1}{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{P}{2N} \\ \frac{P}{2N} \end{bmatrix}$$

求得跨中 $x = \frac{L}{2}$ 的跨中挠度方程:

$$\delta = y(\frac{L}{2}) = \frac{P}{2KN} \frac{2HK(2 - e^{-\frac{KL}{2}} - e^{\frac{KL}{2}}) + N(e^{\frac{KL}{2}} - e^{-\frac{KL}{2}})}{(N - HK)e^{-\frac{KL}{2}} + (N + HK)e^{\frac{KL}{2}}} + \frac{PL}{4N} \quad (3)$$

温度力N对挠度的影响十分小, 可忽略不计, 则跨中挠度公式如下:

$$\delta = y(\frac{L}{2}) = -\frac{PL^3}{96EI} + \frac{HL^4 P + 4EIPL^3}{8EI(8HL + 16EI)} \quad (4)$$

1.2 基于Winkler弹性支撑梁模型推算支点刚度^[5-6]

连续弹性支撑梁模型基于钢轨的抗弯刚度作用, 将轨枕对钢轨的支撑视为连续支撑, K为钢轨支点刚度, d为两轨枕之间距离, $u = \frac{K}{d}$ 表示单位钢轨产生单位下沉所需的分布力。当钢轨距离测点O距离为L处受垂向荷载P, 测点O产生的位移由下式表示:

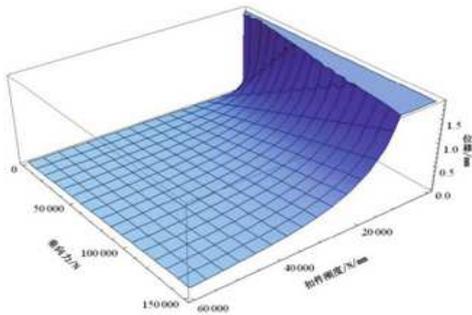
$$\delta = \frac{k}{2u} P \{ e^{-kL} (\cos kL + \sin kL) \} \quad (5)$$

其中 $k = \sqrt{\frac{u}{4EI}}$, P代表施加在测点的垂向力, x代表轮对距离测点的水平距离, δ 代表测点的挠度。根据材料力学可知, 多个垂向力产生的挠度可以叠加计算, 所以对于钢轨测点O产生的挠度可以简化等于若干个轮对作用产生的在O点的挠度的和。通过计算可得知当施加力的位置与测点的距离大于2m时对测点的影响可以忽略不计, 因此计算挠度无需考虑测点相邻转向架的影响^[7-9]。

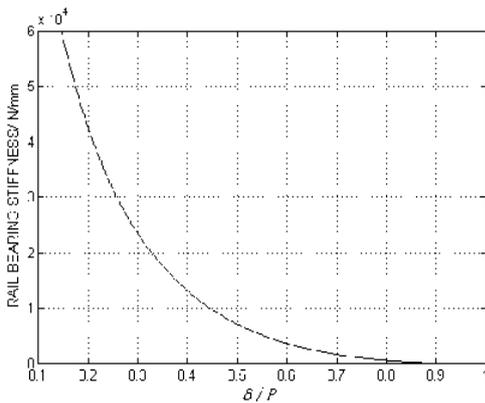
影响钢轨位移的主要因素是扣件刚度K, 图2显示

通讯作者简介: 刘鑫, 出生年月: 1988.4, 民族: 汉, 性别: 男, 籍贯: 山东微山, 单位: 中国铁路设计集团有限公司, 职称: 工程师, 学历: 工学硕士, 邮编: 300251, 邮箱: 691309375@qq.com, 研究方向: 轨道工程。

了扣件刚度与钢轨位移的关系, 其中 (a) 表示扣件刚度、垂向力与位移的关系, (b) 为当垂向力为70kN时, 钢轨支点刚度与位移的关系, 其中横坐标为钢轨位移和垂向力的比值 δ/P 。



(a) 扣件刚度、垂向力与位移的关系



(b) 扣件刚度与位移的关系

图2 扣件刚度与位移的关系

推算出钢轨轮轨力与位移之间的关系, 便可推算出钢轨支点刚度 K , 由于距离待测点处超过2米的力的影响系数已非常小, 可忽略不计, 因此我们只需要考虑单个转向架通过待测点时位移与力的关系, 其中一个轮对位于测点 O 上, 另一个与测点 O 的而距离为 L , 则得出位移与力的关系式如下:

$$\delta = \frac{k}{2u} P \{e^{-kL} (\cos kL + \sin kL) + 1\} \quad (6)$$

根据公式 (6) 便可以推算出钢轨支点刚度 K , 也就是扣件的刚度。

2. 利用轮轨力与钢轨位移求扣件刚度

公式 (6) 表示了列车通过待测点时钢轨位移、轮轨力与钢轨支点刚度, 也就是扣件刚度之间的关系, 利用该公式通过已知的 P 和 δ , 通过计算得到 k 值, 其中 $L=2500\text{mm}$, 而列车低速通过时的垂向轮轨力可以视为 P 值。

2.1 扣件垂向刚度计算

实地测试中, 列车以 5km/h 通过测点, 通过试验

测得的平均垂向轮轨力为 6.1793t , 激光测得的平均垂向位移为 0.680725mm , 根据公式 (6) 求得扣件刚度为 30.61kN/mm , 而该值与扣件的设计垂向刚度 30kN/mm 非常接近, 通过 K 值求得其他速度下的轮轨力如表1所示, 可见垂向轮轨力的计算值与实际测量值误差较小, 是可以信赖的。

表1 垂向轮轨力计算

车速	所测轮轨力	轮轨力计算值	误差
20km/h	57843N	58702N	1.5%
30km/h	59492N	57831N	2.8%
40km/h	57035N	58367N	2.3%

2.2 扣件横向刚度计算

试验所采用扣件并没有提供横向刚度, 我们可以通过公式 (6) 计算得到钢轨的支点横向刚度。而横向力主要是由于车轮对钢轨的撞击和挤压产生, 车速越高横向轮轨力越大, 导致测试所得的不同速度下的横向轮轨力及钢轨横向位移离散型性较大, 当列车以 40km/h 通过测点, 通过试验测得的平均横向轮轨力为 0.5589t , 激光测得的平均位移为 0.132695mm , 求得扣件刚度为 20.07kN/mm , 与其他速度下求得的扣件横向刚度最大有 20% 的误差。

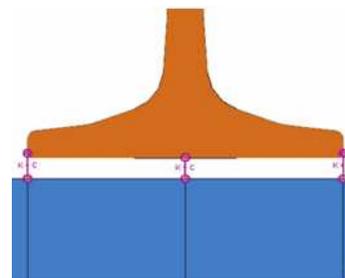
表2 其他速度所求扣件横向刚度

车速	扣件横向刚度	误差
20km/h	16.06kN/mm	20%
30km/h	17.86kN/mm	11%

由上表可以看出, 通过横向轮轨力与钢轨横向位移求扣件横向刚度受列车速度影响较大, 需要通过技术手段得到稳定的钢轨横向力及对应的横向位移, 从而计算出可靠的扣件横向刚度。

3. 扣件弹条弹性参数计算方法探讨

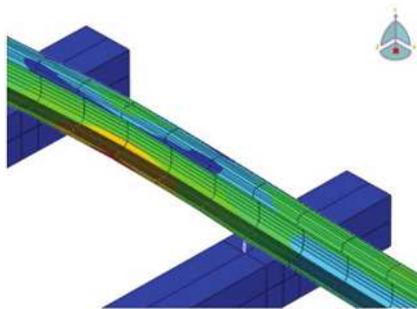
建立有限元模型验证其可靠性, 如图3 (a) 所示, 扣件连接钢轨和轨枕形成轨道框架结构, 通过 ABAQUS 软件设置钢轨与轨枕的弹性连接, 模拟扣件的刚度和弹条的扣压力; 如图3 (b) 所示, 以固定间距的轨枕连接 25m 长的两排钢轨, 形成轨排结构, 从而建立完整的轨道结构有限元模型^[10-11]。



(a) 钢轨与轨枕之间的连接设置



(b) 轨道框架结构



(c) 计算云图

图3 轨道结构有限元模型

设置有限元模型中的相关参数, 弹条的弹性系数为 10kN/mm , 设置为公式 (6) 的弹性性能参数 K_1 , 在有限元模型中的钢轨跨中位置设置垂直力 P_A , 经过计算后得模型的受力云图, 如图3 (c) 所示, 并记录受力点对应的垂向位移 δ_A , 并与公式 (6) 的计算结果作对比, 如图4所示, 二者力与位移皆呈一阶线性关系, 线性系数较接近, 说明公式 (6) 具有一定可靠性。

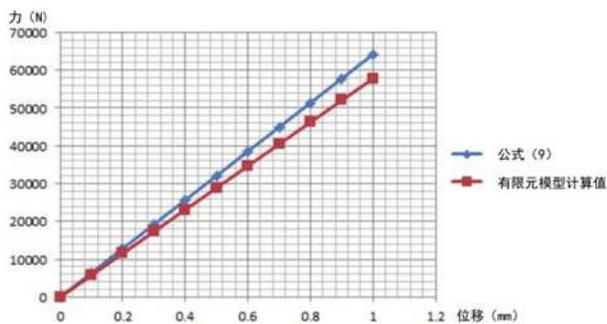


图4 公式 (7) 与有限元模型计算对比

4. 总结和探讨

本文主要探究了在超静定轨道结构中, 通过某一节点的力与位移参数, 推算钢轨的节点刚度及扣件的弹性参数, 理论上只要掌握了力、位移、支点刚度其中的两项, 即可推算另一个参数的值。

实际运用中, 可以通过测量钢轨的垂向及横向位移, 利用已知的钢轨支点刚度, 即扣件刚度参数, 推算垂向及横向轮轨力, 相比传统的轮轨力测量手法简单很多, 无需传统的贴片测量方法测量轮轨力的标定过程。

参考文献:

- [1] 轮轨水平力、垂直力地面测试方法, TB/T 2489-1994
- [2] 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范, 中华人民共和国国家标准 GB5599-85;
- [3] 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准, Tb/T 2360-1993
- [4] 练松良. 铁道工程 (M). 上海: 同济大学出版社, 2006
- [5] 米皓坤, 骆妍, 梁磊. 弹性约束下无缝钢轨受力变形规律研究[J]. 武汉大学学报, 2013.8, Vol.46, No.4: 499-502
- [6] 张永兴, 练松良. 钢轨扭转时的水平位移分析[J]. 上海铁道大学学报, 1997.9, Vol.18, No.3: 18-23
- [7] 雷晓燕. 铁路轨道结构数值分析方法 (M). 北京: 中国铁道出版社, 1998
- [8] 郑阿奇. MATLAB实用教程 (M). 北京: 电子工业出版社, 2012
- [9] Vinay Ingle, Digital Signal Processing Using Matlab, Nelson Engineering, 2011
- [10] 庄茁. 基于ABAQUS的有限元分析和应用 (M). 北京: 清华大学出版社, 2009 作者简介:
- [11] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解 (M). 北京: 机械工业出版社, 2006