

铁路路基基底面动态压力的 概率抽样测定法及其应用

王绳祖 张宗淳

(国家地震局地质研究所, 北京)

提 要

在铁路路基稳定性长期监测研究中, 要求埋设于路堤之下的压力盒具备耐久、可靠、可供长期使用的特点。钢弦式压力盒适用于长期使用, 但通常被认为无法用于动态压力测量。本文提出的概率抽样测定法比较成功地解决了钢弦式压力盒对于列车通过时基底面动态压力测定的问题。根据随机抽样和概率论原理, 通过对列车动载的多次测量, 可绘制出基底面的压力分布概率曲线(频数分布曲线), 近似地表示动态压力的空间分布状况。上述原理和方法, 在青藏铁路盐湖地区路基稳定性的研究中得到了实际应用和检验。

一、引 言

青藏铁路南北横贯察尔汉盐湖, 直接以饱含卤水的厚层岩盐为路基基底。盐湖铁路路基基底稳定性预测的研究^[1-3]表明, 在采取必要措施的情况下, 可以保证铁路有足够长的安全年限。为了检验预测意见和保证铁路安全运行, 在修筑铁路的同时, 建立了监测设施, 对基底面压力分布、下沉以及盐溶发展等进行长期监测^[4]。鉴于测压元件置于路堤下含卤水盐层的表面, 并且从铁路开始施工直至载荷状况趋于稳定, 其间历时数年, 要求具有较高的可靠性。因此, 选用钢弦式压力盒进行测量。

通常认为, 钢弦式压力盒只适用于静态压力测量, 无法用于动态测量。作者根据概率论和随机抽样的原理, 探讨了钢弦式压力盒用于动态测量的可能性, 并在盐湖铁路基底面压力分布的实测中得到了验证。

二、测压装置及静态压力分布

采用钢弦式压力盒(直径120mm)和JD-5型钢弦周期测定仪测定基底面的压力分布, 并经温度校正。压力盒在修筑路堤时埋置于基底面水平, 并按图1所示压力盒位置布置若干横向观测线(JC1-Y101, JC2-Y201, Y202, Y203)。

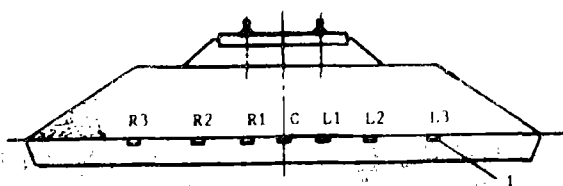


图1 基底面压力观测点布置图

1——压力盒; R3, ..., C, L1, ...——压力盒编号

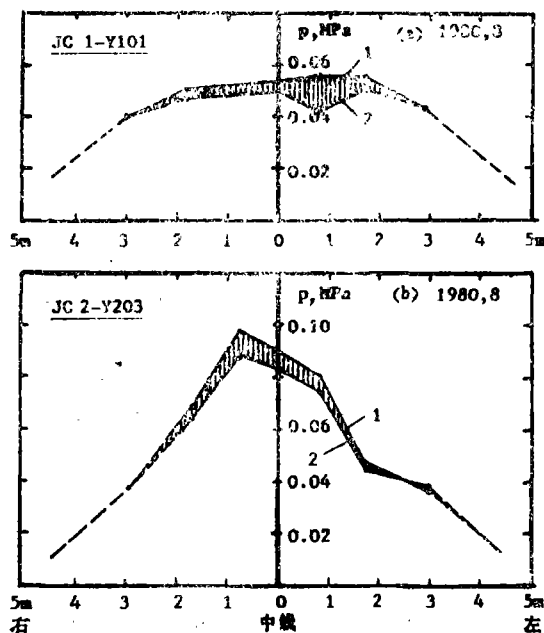


图2 列车静载荷作用下基底面的压力分布

1——车头加载 2——列车中部加载 p——基底面压力

在基底面所受静、动载荷已基本稳定的情况下,对监测点 JC1、JC2 各压力观测线的钢弦式压力盒进行量测。施压的列车由《东方红-4》型内燃机车牵引。该机车轴重23t,牵引车箱27节,每节载重约 55t。观测结果表明:

1.沿铁路中线方向,基底面所受压力是不均匀的,其值因相对于车轮和轨枕的位置而异,以轮轴下方为最大,随着距轮轴距离的增大而减小。就整列车而言,压力呈波浪状分布。

2.如图2所示,沿铁路横截面方向,压力的分布近似地呈三角形和梯形。车轮下方近似呈三角形分布,随着远离车轮,压力分布向梯形过渡。

3.最大静压力为0.081—0.098MPa(车头加载)和0.075—0.089MPa(列车中部加载)。

三、动压测量的概率抽样法原理

列车通过时,基底面所受的压力包括:

- 1.路堤及上部结构的重力造成的静态压力;
- 2.列车活荷载造成的准静态压力,其中包括列车的重力作用和“撞击”作用,后者虽属动力作用,但频率较低,又经道床和路堤的缓冲,故以静力传递的方式施加于基底面,近似于静态压力;
- 3.列车激发的机械振动,以波动的方式传播而造成振动压力,振动压力正负交变,以动力响应方式作用于路基和基底,但它迅速衰减,影响甚微,可以忽略不计。

钢弦式压力盒之所以能适用于列车动态测定,其基础在于压力量测的随机抽样特性以及

由此而形成的压力分布的概率特性。针对列车动载荷多次重复的特点, 可以将其用于列车动态压力的测定。根据随机抽样的原理, 通过对多次列车的量测, 可以绘制出基底面的压力分布概率曲线(频数分布曲线), 以近似地表示压力的空间分布状况或随时间的变化状况。

在基底面上沿中线方向出现某一压力区间 p_i 的“机会”与其分布长度成正比, 出现压力 p_i 的概率为

$$r_i = \frac{B_i}{L} \quad (1)$$

式中 B_i ——压力为 p_i 的基底面纵向总长度; L ——列车长度。考虑到轮组分布的近似均匀和轮组前后压力分布的近似对称, 可以将式(1)改为

$$r_i = \frac{4b_i}{l} \quad (2)$$

式中 l ——车箱(包括机车)的平均长度; b_i ——压力 p_i 在轮组前方或后方一侧的分布长度。

JD-5 型钢弦周期测定仪按一定的时间间隔 ΔT 激发压力盒钢弦起振, 并量测其振动周期, ΔT 的可调范围为 1—10 s。一次量测的延续时间 t_{20} 为 20 个振动周期, 钢弦的实际周期为 500—700 μ s, 故 $t_{20} = 10—14$ ms。因此, 压力的量测具有抽样的特点: 抽样间隔 ΔT , 一次抽样延续时间 t_{20} 。对于一次列车来说, 这种抽样量测的方法, 只能从列车引起的动态压力中等间隔地测取少量数据, 显然不足以全面地反映作用力的分布状况。然而, 对于多次列车来说, 由于对每列车开始量测的起点不同以及量测间隔与车轮间隔的非同步性, 使量测结果具有明显的随机性。通过的列车次数越多, 随机抽样量测的代表性越佳, 所得的压力分布概率曲线越近于真实。

列车通过时, 基底面的压力分布主要地取决于车轮的纵向分布(还有轨枕的分布)。如果忽略轮组内前、后两轮对之间的压力起伏, 则每一轮组在基底面上形成一压力“凸峰”, 相邻轮组之间形成压力“凹谷”。某一应力水平出现的概率取决于它的分布范围, 从而可建立概率 r_i 计算式(1)和(2)。 r_i 既是列车行驶时某一瞬间基底面压力的纵向空间分布概率, 又是列车通过时基底面某一点压力的时间分布概率。因此, 基于概率论, 在随机抽样量测结果与压力的空间、时间分布状况之间建立了对等的联系。

四、应用与检验

(一) 铺轨行车初期的动态压力

1978年9—10月修筑路堤, 1979年5月铺轨并通行列车后, 于1979年8月选择靠近铁路中部的压力盒进行动态压力量测。测试中, 列车速度为 10—30 km/h, 每压力盒列车通过 5 次, 测取数据 27—37 个, 共测数据 128 个。图 3a 表示实测压力分布概率曲线(频数分布曲线)。图中 p_0^* 表示不受动载荷影响的压力上限值, 可根据无列车静态压力实测值以及概率曲线的走向变化加以确定(见表 1)。以 p_0^* 为准, 可由图示曲线确定列车动载荷影响的压力分布概率为 0.65—0.78。

列车动载荷影响下的峰值压力分两种情况。列车正常行驶过程中的峰值压力称为一般峰

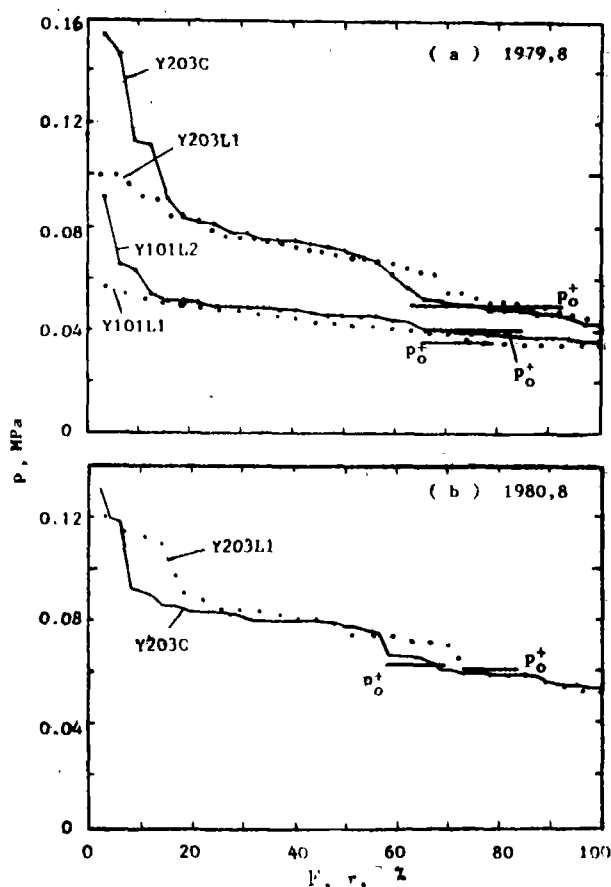


图3 列车动载荷作用下基底面沿线路纵向压力分布

(a) 1979年8月量测; (b) 1980年8月量测;

p —基底面压力; F, r —不同压力值出现的相对累计数和概率
(相当于沿列车纵向的长度分布)。

由式(2)可得概率 $r_{p > p_o^+} = 0.81$, 与抽样量测概率0.65—0.78(见表1)相接近。

值压力。各压力盒测得的接近一般峰值压力的值(MPa)为: Y203C—0.1125, 0.1107; Y203L1—0.0998, 0.0998; Y101L2—0.0648, 0.0624; Y101L1—0.0560。按其中最大值估计, 取一般峰值压力 p_{max} 为0.120MPa。列车进入或者离去时测得的偏高的压力, 称为高峰压力。共计测得三次, 即: Y203C—0.1534(列车离去), 0.1460(列车进入); Y101L2—0.0912(列车进入)。按其中最大值估计, 取高峰压力 p_{max} 为0.160MPa。

随机抽样和概率论原理之所以能用于列车动载荷测定, 还可由以下实例得到验证:

例1 车箱平均长度 $l = 13\text{m}$, 轮组内两轮对的轴距按1.7m计, 路堤高1.4m, 道床厚0.4m, 车轮经轨道和轨枕加荷的影响线按45°斜角伸展, 则在基底面上的影响范围为

$$b_{p > p_o^+} = \frac{1.7}{2} + (1.4 + 0.4)\tan 45^\circ \\ = 2.65\text{m}。$$

表1 p_o 值与压力分布概率

压力盒 编 号	无列车静态压力(MPa)			p_o^+ (MPa)	大于 p_o^+ 的压力分布概率	
	实 测 值	平均值 p_o	置信范围 (置信度0.95)		由图3a 确定	由式(2) 估计
Y101L1	0.0325, 0.0330	0.0328	0.328 ± 0.045	0.0365	0.75	0.81
Y101L2	0.0380, 0.0366	0.0363	0.0363 ± 0.0054	0.0410	0.65	
Y203C	0.0437, 0.0446, 0.0465	0.0449	0.0449 ± 0.0064	0.0510	0.70	
Y203L1	0.0465, 0.0465, 0.0465	0.0465		0.0510	0.78	

例2 车轮位于轨枕上方时, 其下基底面压力接近或等于一般峰值压力, 分布宽度为

b_f , 令 b_f 近似于轨枕底宽 0.3m。每轮组经压 2 次。由式 (2) 得概率 $r_f = 0.092$ 。同时, 抽样量测共 128 次, 其中近似一般峰值压力值者 7 次, 概率为 0.055。二者相近。

例 3 列车速度 10—30 km/h (2.78—8.33 m/s), 每次进入或离去时, 出现近似高峰压力的延续时间为 $0.3 / (2.78—8.33) = 0.108—0.036$ s。实际量测间隔 $\Delta T = 3—5$ s, 平均按 4s 计。则测得近似高峰压力的概率为 $r_{ff} = (0.108—0.036) / 4 = 0.027—0.009$ 。实际测得近似高峰压力值 3 次, 列车进入、离去共 40 次, 概率为 0.075。二者具有相同或相近的数量级。

(二) 载荷基本稳定情况下的动态压力

经加厚道床及铁路上部结构和列车运行基本正常的情况下, 基底面受压状况趋于稳定。1980 年 8 月的量测结果反映了这种运行情况下的动态压力 (图 3b), 同 1979 年 8 月测定结果 (图 3a) 相比较, 出现以下的变化:

1. 不受动载荷影响的部分, 也就是相当于无列车时路堤和上部结构作用下压力值 p_0^* 为 0.064—0.062 MPa, 比 1979 年测定值 0.051 MPa (压力盒 Y203C、Y203L1) 增大 0.013—0.011 MPa。

2. 大于 p_0^* 值的压力, 其纵向分布范围占列车长度的 0.68—0.74, 稍小于 1979 年测定值 (0.70—0.78)。可能是由于道床加厚, 列车动载荷对基底的影响范围缩小的缘故。

3. 列车行驶速度虽有所提高, 但因道床的缓冲作用加强, 列车进入和离去时造成的高峰压力 p'_{max} (1979 年测定, 此值高达 0.146—0.153 MPa) 不再出现。

4. 一般峰值压力 p_{max} 为 0.132 MPa, 高于 1979 年测定值 0.113 MPa, 显然同道床加厚和车速加快有关。

综上所述, 列车通过时, 基底面压力分布的情况大致如图 4 所示 (忽略细部起伏): 沿横向呈三角形或梯形分布; 沿中线方向呈波浪状, 动载荷影响范围占列车全长的 0.65—0.78 (1979 年) 和 0.68—0.74 (1980 年); 平均压力为 0.084 MPa, 与预测计算^[1]中采用值 (0.079—0.084 MPa) 基本一致。

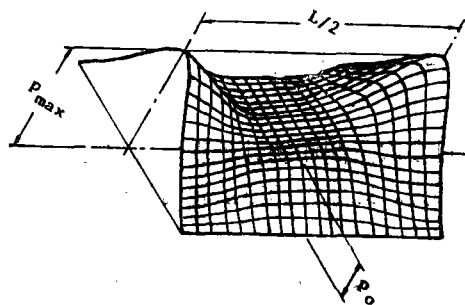


图4 基底面压力分布示意图

l——车箱平均长度; p_0 ——不受列车动载荷影响的压力; p_{max} ——峰值压力

五、关于振动压力的影响

设路堤面处振幅为 A_0 , 传播距离为 d 处振幅衰减至 A , 传播速度为 c , 频率为 f , 衰

减系数为 α ，根据应力波传播原理，可以有

$$A = A_0 e^{-\alpha d}, \quad (3)$$

$$p_m = 2\pi \rho c f A \quad (4)$$

式中 p_m —距离为 d 处的最大振动压力，Pa； ρ —介质密度，kg/m³。

作为粗略估计，取^[5] $A_0 = 0.00038\text{m}$ ， $\alpha = 0.9\text{m}^{-1}$ ， $\rho = 2000\text{kg/m}^3$ ， $c = 300\text{m/s}$ ， $f = 30\text{Hz}$ ，则在 $d = 1.40\text{m}$ 处（相当于基底面位置）， $A = 0.00011\text{m}$ ， $p_m = 0.012\text{MPa}$ ；在 $d = 2.40\text{m}$ 处（深 1 m 的盐体内）， $A = 0.00004\text{m}$ ， $p_m = 0.005\text{MPa}$ 。可见，即使不计及界面处的能量损耗，当传播至基底面以下 1 m 时，振动对于基底稳定性的影响也可以忽略。

振动压力的频率为 30Hz，周期 $T_{s0} = 33\text{ms}$ ，已知压力盒一次量测的延续时间 $t_{s0} = 10\text{—}14\text{ms}$ ，因此，每次量测是截取一周期中的部分波段，测出的振动压力近似于这一时段的平均压力。有三种可能，即全部为正压，全部为负压，或正负压兼有。第三种情况正、负抵消，平均值很小，趋于零，在量测的压力值中基本上得不到反映。而全正压或全负压得到反映的概率为

$$q(+) = q(-) = \frac{T_{s0}/2 - t_{s0}}{T_{s0}} = 0.5 - \frac{t_{s0}}{T_{s0}} = 0.20\text{—}0.08 \quad (5)$$

因此，在动载荷影响范围内，1979年实测压力值中，振动压力得到反映的概率为

$$r_{p>p_0^+} q(+) = r_{p>p_0^+} q(-) = 0.052\text{—}0.156$$

相当于每压力盒所测各压力值中的 1—6 个。可见，是有反映的。

在一般峰值压力值中，反映振动压力的概率为 $r_f q(+) = r_f q(-) = 0.007\text{—}0.018$ 。在全部 128 个数据中，可能遇到 1—2 个。可见，实测的近似一般峰值压力的最大值（0.1125 MPa）不一定包括波动压力。在估计一般峰值压力时，应适当加大。

在高峰压力值中，反映波动压力的概率为 $r_{gf} q(+) = r_{gf} q(-) = 0.0007\text{—}0.0054$ 。在全部 40 次量测中，可能遇到 0.028—0.216 次，也就是说，在实测的近似高峰压力值中，振动压力得到反映的可能性几乎不存在。因此，实测值也有所偏低。

六、结 论

1. 根据概率抽样原理，通过多次量测和统计处理，可以运用钢弦式压力盒量测列车通过时铁路路基基底面所受的动态压力。此原理和方法也可用于其它领域中类似载荷条件下的动态压力测量。

2. 列车运行时，其下方基底面所受压力呈串联的马鞍形分布：沿横向呈三角形或梯形，沿中线方向呈波浪起伏状。

3. 路基基底稳定性计算中，按横向三角形分布，纵向均匀分布的平均载荷状态考虑，可以满足安全要求。

本研究系作者在中国科学院青海盐湖研究所工作期间完成的。白鹿堤、李国良、冷如勤、杨波、吴建宁等同志参加了筹备和测试工作，特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院青海盐湖研究所, 青藏铁路察尔汉盐湖地区路基基底稳定性预测的研究, 科学技术文献出版社, 1979。
- [2] 王绳祖、孙家乐, 多层介质变形模量的计算方法, 北京工业大学学报, 第7卷, 第3期, 1981, pp.11—20。
- [3] 王绳祖, 盐湖岩盐变形破坏的试验研究与数学模拟, 岩土工程学报, 第4卷, 第4期, 1982, pp.17—28。
- [4] 张宗淳、王绳祖, 青藏铁路察尔汉盐湖地区路基稳定性的长期监测, 岩石力学与工程学报, 第5卷, 第4期, 1986, pp.396—403。
- [5] 杨灿文、龚亚丽, 列车通过时路基的动应力和振动, 土木工程学报, 第9卷, 第2期, 1963, pp.49—57。

Probability-sampling Measurement and Its Application to Dynamic Pressure on Railway Subbase Surface

Wang Shengzu Zhang Zongchun

(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing)

Abstract

The pressure cell installed under road is required to have the properties of durability and reliability for long-term monitoring of the stability of railway subbase. The string-type pressure cell is suitable for long-term usage. Usually it is considered unable to measure dynamic pressure, the distributions of dynamic pressures on railway subbase surface excited by train can be measured by the string-type pressure cells with a frequency detector by means of the probability-sampling method suggested in this paper. According to the philosophy of probability-sampling the probabilistic distribution (frequency distribution) curves of dynamic pressures are plotted to show the dynamic pressure distribution along the longitudinal direction of the railway approximately. The principle and method were successfully used and examined in the research on long-term monitoring of subgrade stability of the Qinghai-Tibet Railway in the Qarhan Salt-Lake region.