

柔性路面疲劳与优化设计

Rouxing Lumian Pilao yu Youhua Sheji

叶国锋 编

人民交通出版社

前 言

柔性路面疲劳设计是道路建筑技术的一个重要的组成部分。由于路面里程长，分布的面积广，路上行驶的车辆种类多，各种路面受当地土质、气候和建筑材料等的影响很大。因此路面承受车轮重复荷载的疲劳设计便成为公路工作者急待解决的复杂课题。

50年代以来，随着生产经验的长期积累和科学技术的不断进步，路面设计由纯经验、半经验半理论至纯理论而又趋于理论与经验相结合的途径，逐渐形成了一门综合技术性的学科。它使用了现代量测技术和电子计算技术，把线弹性理论、非线性弹性理论、粘弹性和弹塑性理论及断裂力学理论应用到路面的疲劳设计中，使路面力学参数更加符合实际，路面体系内的应力应变计算更为精确合理。

本书以材料疲劳的观点，阐述了路面设计参数、路面材料和结构特性（线弹性、非线性、粘弹性和疲劳破裂特性）以及各种疲劳试验方法。书中围绕疲劳和变形破坏机理，叙述了流变模型、粘弹性和断裂力学基本原理；围绕路面疲劳和车辙破坏的成因，介绍各种学派的不同观点和设计方法。书中还着重介绍了疲劳与车辙等多指标的综合设计和路面优化设计法。此外，还介绍了几种专有路面（乳化沥青路面、半刚性基层、沥青混凝土铁路路床和飞机场路面）的疲劳设计方法。

为了阅读方便，还刊有附录，以供度量衡单位换算的参考；书末按编号次序列出了参考文献。

本书作为公路与城市道路工程专业及桥梁工程专业的路面工程选修课和道路工程研究生教材，也可供道路设计、科研和生产部门的专业人员参考之用。

柔性路面疲劳与优化设计

叶国铨 编

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：11.75 字数：283千

1989年12月 第1版

1989年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3050册 定价：2.35元

目 录

第一章 路面计算参数	1
第一节 汽车荷载和等效换算.....	1
第二节 路面受荷时间和频率.....	7
第三节 土基和非沥青处治基层的力学参数.....	8
第四节 沥青混合料的弹性参数.....	11
第五节 沥青混合料劲度的测定.....	13
第二章 柔性路面的疲劳和试验	19
第一节 路面的应力应变状态.....	19
第二节 控制应力和控制应变模式.....	20
第三节 沥青路面疲劳的影响因素.....	22
第四节 柔性路面和混合料的疲劳试验.....	26
第三章 路面的疲劳规律	33
第一节 路面应力疲劳规律.....	33
第二节 应力疲劳与应变疲劳的关系.....	37
第三节 多参数应变疲劳规律.....	38
第四节 迈纳尔积累损坏定理.....	45
第五节 路面疲劳概率.....	46
第四章 柔性路面的疲劳设计	50
第一节 路面疲劳的工程简化计算.....	50
第二节 意大利路面疲劳设计法.....	53
第三节 加权劲度(温度)疲劳分析法.....	55
第四节 路面疲劳设计的象限图解法.....	57
第五节 路面劲度频率疲劳分析法.....	59
第六节 沥青路面剪切疲劳寿命的估计.....	63
第五章 几种专用路面结构的疲劳设计	66
第一节 乳化沥青路面的疲劳设计.....	66
第二节 半刚性基层的疲劳计算.....	69
第三节 沥青混凝土铁路路床的疲劳设计.....	73
第四节 飞机场路面的疲劳设计.....	78
第六章 路面断裂力学和能量疲劳设计	84
第一节 路面断裂力学的基本原理.....	84
第二节 路面裂纹扩展规律.....	87
第三节 路面断裂疲劳寿命的估计.....	89
第四节 路面的温度疲劳计算.....	91

第五节	沥青面层反射裂缝的疲劳计算	93
第六节	用消耗能计算路面疲劳寿命	96
第七节	路面断裂能的疲劳计算	98
第七章	沥青混合料的粘弹性质	101
第一节	沥青混合料的流变模型	101
第二节	沥青混合料的复数模量	109
第八章	柔性路面的车辙计算	113
第一节	车辙的土基应变(应力)标准	113
第二节	沥青面层厚度减薄计算	116
第三节	用单轴应力(应变)计算路面各层永久变形	118
第四节	用三轴应力计算路面车辙	120
第五节	用剪应力或应力不变量计算车辙	123
第六节	用应变能计算路面车辙	125
第九章	路面多指标组合设计和最优化设计	127
第一节	路面疲劳和车辙设计	127
第二节	路面疲劳、车辙和低温破裂设计	128
第三节	路面疲劳、车辙和平整度的组合设计	130
第四节	路面疲劳、车辙、平整度和抗滑性能的组合设计	137
第五节	路面最优化设计	140
附录	单位制换算	165
参考文献		168

第一章 路面计算参数

第一节 汽车荷载和等效换算

交通荷载是路面设计的重要参数。标准轴荷载或标准车辆的等效换算是交通荷载分析的关键问题。因此标准轴荷载的确定、考虑车辆换算的原则和进行换算的方法已成为各国所普遍关注和研究应用的主要内容。

一、标准轴荷载

各国对公路车辆标准轴荷载等效换算的方法很多，各法首先都要确定一个标准轴荷载，这取决于公路性质、车辆类型和交通强度等内容。

我国考虑到公路汽车运输车辆的现状及发展趋势，路面设计时，三、四级公路采用后轴轴载 60kN 作为标准轴载，表示为 BZZ-60；高速公路和一、二级公路则用后轴轴载 100kN 作为标准轴载，表示为 BZZ-100。有关标准轴载的计算参数如表 1-1。

标准轴的计算参数

表 1-1

标准轴载	BZZ-60	BZZ-100
标准轴载 P_a (kN)	60	100
单轮荷载 P (kN)	15	25
轮胎接地压强 p (MPa)	0.50	0.70
单轮当量圆直径 d (cm)	19.50	21.30
当量圆半径 δ (cm)	9.75	10.65
两轮中心距 R_L (cm)	3 δ	3 δ

美国加利福尼亚州公路设计法对汽车标准轴荷载规定为 45kN。外国使用较多的标准轴载为 82kN，如 AASHO 法、美国地沥青协会路面设计法、波兰、瑞士、英国和南非等。苏联、西班牙、匈牙利、意大利、联邦德国、捷克斯洛伐克、日本和芬兰等国的标准轴载为 100kN。

有的国家还对汽车的标准双后轴作了规定。如标准单后轴轴载 100kN 时，双后轴轴载为：意大利 145kN，联邦德国和瑞士 160kN；标准单后轴轴载为 130kN 的国家有比利时、法国和西班牙等，其双后轴轴载分别为 200kN 和 210kN。

苏联还规定了一个参考轴载为 115kN，在个别情况下，参考轴载可达 445kN。在外国和我国，厂矿专用公路的设计轴载为 300~1000kN。

近年来美国使用一种预测设计法，其标准轴载因路而异，随交通组成的不同而变化，它是根据不同轴类（单轴或串轴）和某轴载的车辆出现频率计算而得，其公式如下：

$$\bar{x} = \frac{\sum f_s x_s + f_t x_t}{\sum f_s + F \sum f_t} \quad (1-1)$$

式中： \bar{x} ——加权平均轴载；
 f_s, f_t ——分别为每级单轴和串轴出现的频率；
 x_s, x_t ——分别为每级单轴和串轴轴载的中值；
 F ——修正系数，是串轴与单轴轴载的比值。

二、按车辙条件确定轴载等效系数

各种轴载等效换算的方法都是以轴载对路面产生的效应为根据的。当路面达到破坏的条件一定时，不同汽车轮轴荷载所需作用的重复次数是不同的。标准轴载作用次数与某一轴载作用次数的比值，便是轴载换算的等效系数。实际使用时只须将每类车辆交通量乘以相应于该类车辆的轴载等效系数，便得到换算的标准轴载车辆的交通量。

路面的破坏标准一般可分为车辙、疲劳和平整度破坏三种类型。按车辙破坏条件，一般假定车辙深度为19或9.5mm，也有取为13或20mm的。美国各州公路工作者协会 AASHO 试验总结了轴载等效系数 EF 与轴载的关系为：

$$EF = \frac{N_0}{N_i} = \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^A \quad (1-2)$$

式中： P_0, N_0 ——标准轴载及作用次数；
 P_i, N_i ——某一轴载和作用次数；
 A ——取 4 ~ 6。

上述关系式应用很广，但各法的 A 值略有不同。如日本道路公团的 A 值为 4.0；南非为 4.2；比利时为 4.0~4.17；英国道路 31 号指示为 3.88~4.55；P.S.帕尔 (P.S.Pell) 的研究为 5.1。图 1-1 示出了两种 A 值时的轴载等效系数曲线图。

美国工兵团采用的轴载等效系数为对数形式，公式如下：

$$EF = \frac{\lg 4.5 N_0}{\lg 4.5 N_i} = \sqrt{\frac{P_i}{P_0}} \quad (1-3)$$

日本小林尧利用路面应力分析提出了下式

$$EF = c \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^a \quad (1-4)$$

式中： a, c 为随路面结构、季节温度和汽车轴距变化的系数。轴距为 122~183cm 时，几种路面的 a 值约为 5.20， c 为 1.0~1.8。

轴载等效系数与轴载关系的另外一种形式为壳牌石油公司的公式：

$$\frac{N}{n} = 2.2 \times 10^{-8} L^4 \quad (1-5)$$

式中： L ——轴载 (kN)；
 N ——换算为 82kN 的标准轴载次数；

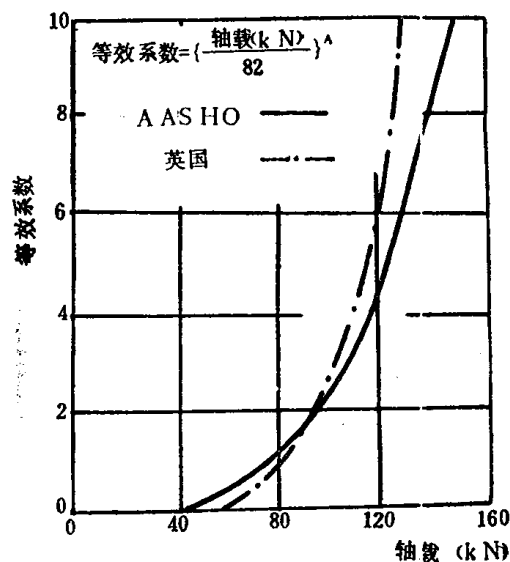


图1-1 轴载等效系数曲线

n ——轴载 L 的作用次数。

轴载等效系数与轴载关系另外还有两种指数函数形式。美国地沥青协会的公式为：

$$EF = \frac{N_{81}}{N_L} = 10^{0.0262(L-81)} \quad (1-6)$$

美国肯塔基州公路局则采用下式

$$EF = \frac{N_{81}}{N_L} = [1.2504] \left(\frac{L-81}{4.5} \right) \quad (\text{单轴}) \quad (1-7)$$

$$EF = \frac{N_{81}}{N_L} = [1.1254] \left(\frac{L-153}{4.5} \right) \quad (\text{双轴}) \quad (1-8)$$

式中： L ——轴载 (kN)；

N_{81} 、 N_L ——轴载81kN和 L 的作用次数。

轴载等效系数也有用轮胎与路面的接触压力来表示的。壳牌石油公司和瑞士等根据路面不可逆变形等效原则得出：

$$EF = \frac{N_s}{N_i} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_s} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (1-9)$$

式中： a ——蠕变试验永久变形曲线的斜率；

σ_i 、 σ_s ——分别为 i 级轴载及标准轴载轮胎与路面的接触压力。

H.H.巴尔 (H.H.Behr) 采用轴载等效系数为

$$EF = \frac{N_s}{N_i} = \left(\frac{a_i}{a_s} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1-10)$$

变形系数 a 取决于荷载、温度和路面类型。在试验条件下， a 为 $2.8 \times 10^{-2} \sim 3.4 \times 10^{-2}$ mm， b 为 $0.5 \sim 0.7$ 。

轴载等效系数除了用轴载 P (kN) 和轮胎接地压强 p (MPa) 分别表示外，也有用轮载 P_i 与 p_i 的乘积表示的：

$$EF = \left(\frac{P_i p_i}{P_0 p_0} \right)^a \quad (1-11)$$

捷克斯洛伐克采用 $a = 3.5$ ，匈牙利为 4.0 。两国均用 $p_0 = 0.65 \text{MPa}$ ， $P_0 = 50 \text{kN}$ 。

苏联的车辆等效换算公式为：

$$\text{重车换轻车} \quad \lg N_1 = \frac{a}{b} \left(\frac{p_2 d_2}{p_1 d_1} - 1 \right) + \frac{p_2 d_2}{p_1 d_1} \lg N_2 \quad (1-12)$$

$$\text{轻车换重车} \quad \lg N_2 = \frac{p_1 d_1}{p_2 d_2} \lg N_1 - \frac{a}{b} \left(1 - \frac{p_1 d_1}{p_2 d_2} \right) \quad (1-13)$$

式中： p_i ——轮胎接地压强 (MPa)；

d_i ——轮迹当量圆直径 (cm)；

$a = 0.5$ ； $b = 0.65$ 。

苏联1973年颁布的柔性路面设计规范采用的轴载换算系数列于表1-2。

苏联轴载等效系数

表1-2

轴载 (kN)	40	60	70	80	90	100	120	136
换算系数	0.015	0.1	0.2	0.375	0.5	1	2	2.25

三、用疲劳破裂条件确定轴载等效系数

路面疲劳效应可用弯沉、应力或应变表达，因而轴载等效系数也可分别用弯沉、应力或应变表示。美国阿巴特公路运输局采用弯沉来计算轴载等效系数：

$$EF = \left(\frac{\delta_i}{\delta_o} \right)^c \quad (1-14)$$

式中： δ_i, δ_o ——分别为各级轴载和标准轴载下的路面弯沉 (mm)；
 c ——路面弯沉疲劳曲线的斜率。

对于多轴汽车则有：

$$EF = \left(\frac{\delta_i}{\delta_o} \right)^c + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_o} \right)^c \quad (1-15)$$

式中： $\Delta\delta$ ——双轴间的弯沉差；
 c ——约为3.0。

我国现行柔性路面设计规范的车辆换算方法，就是根据路面弯沉疲劳效应互等原则而建立的，其算式为：

$$\frac{n_1}{n_2} = C_1 C_2 \left(\frac{p_2 d_2^{1.5}}{p_1 d_1^{1.5}} \right)^{5.0} \quad (1-16)$$

式中： C_1 ——后轴数系数，单、双和三后轴分别为1、2和3；
 C_2 ——轮组系数，双轮组为1.0，单轮组为0.25，四轮组为4.0；
 n_1, p_1, d_1 和 n_2, p_2, d_2 ——分别为标准轴载汽车和被换算汽车的作用次数 (次/日)、轮迹压强 (MPa) 和轮迹当量圆直径 (cm)。

对于重型汽车，1980年交通部公路规划设计院提出厂矿公路路面设计暂行草案的车辆换算公式为：

$$\frac{n_1}{n_2} = C_1 C_2 \left(\frac{p_2 d_2^{n'+0.54}}{p_1 d_1^{n'+0.54}} \right)^{5.0} \quad (1-17)$$

式中： $n' = 0.98 - 0.854 \frac{E_0}{E_1}$ ；

E_0, E_1 ——分别为土基和路面材料弹性模量。多层路面时采用泥结碎石的弹性模量 E_1 。
 轴载等效系数也可用应力表示。国外采用的公式有：

$$EF = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_o} \right)^c \quad (1-18)$$

式中： σ_i, σ_o ——各级轴载和标准轴载下沥青层底部拉应力；
 c ——应力疲劳曲线的斜率，约为3~6。

D.V.兰三木兹采用应力强度因子来表示轴载等效系数：

$$EF = \frac{h_{k1}^4 + h_{k2}^4}{h_{ko}^4} \quad (1-19)$$

式中： h_{ks} ——80kN单轴荷载下路面应力强度因子的最大值；
 h_{k2} ——双轴荷载下应力强度因子最大值；
 h_{k1} ——双轴荷载下应力强度因子曲线波峰与波谷间的距离。

在国外用应变表示轴载等效系数的方法较多。在机场路面设计时把飞机轮载按路面应变

换算为标准飞机轮载当量（如波音 727 飞机轮载）的计算在不少国家已被正式采用了。应变与轴载等效系数的关系取决于所用应变疲劳关系公式的形式。常用的有：

$$EF = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^c \quad \text{单轴情况} \quad (1-20)$$

$$EF = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^c + \left(K \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^c \quad \text{双轴情况} \quad (1-21)$$

式中： c ——应变疲劳线斜率；

ε_0 、 ε_i ——标准轴载和 i 级轴载在沥青层底部产生的拉应变；

K ——第二与第一轮轴产生应变的比值。

日本东（京）一名（古屋）公路设计使用了下式：

$$EF = \frac{N(\varepsilon_0, t_0)}{N(\varepsilon_i, t)} \quad (1-22)$$

式中： $N = 3.09 \times 10^{-27} \times 1.0268 t^{1.44} \times \varepsilon^{-7.0}$ ；

ε_0 、 ε_i ——分别为 100kN 标准轴载和各级轴载在 $t = 10^\circ\text{C}$ 和 $t^\circ\text{C}$ 产生的沥青层底部拉应变。

埃索石油公司不直接用应变而用疲劳损害率来表示轴载当量系数：

$$EF = \frac{N_s}{N_1} = \frac{\delta_s}{\delta_1} \quad (1-23)$$

其中： δ_s 和 δ_1 分别为标准轴载和各级轴载对路面产生的疲劳损害率，根据疲劳计算而得。

四、用平整度、疲劳和车辙综合确定轴载等效系数

美国各州公路工作者协会于 1962 年完成的大型道路试验得出轴载与等效系数及耐用性指数的关系为*：

$$G = \lg \frac{c_0 - P}{c_0 - 1.5} = \beta (\lg N_t - \lg N) \quad (1-24)$$

式中： c_0 ——路面最初耐用性指数（柔性路面为 4.2，刚性路面为 4.5）；

N ——耐用性指数下降至 1.5 时的轴载次数；

N_t ——使用时间为 t 时的轴载次数；

β ——与荷载和路面结构有关的系数；

G ——时间为 t 时耐用性指数减少量与耐用性指数降至 1.5 时减少量之比的对数；

P ——耐用性指数

$$P = 5.03 - 1.91 \lg(1 + \overline{SV}) - 0.01 \sqrt{c + p} - 1.38 \overline{RD}^2 \quad (1-25)$$

式中： \overline{SV} ——斜率变量（即两轮迹平均纵向坡度偏差）；

$c + p$ ——路面裂缝与修补面积（英尺²/1000英尺²）；

\overline{RD} ——车辙深度。

通过试验发现 N 和 β 与荷载及结构因素有关。对于柔性路面：

$$\lg N = 5.93 + 9.36 \lg(SN + 1) - 4.79 \lg(L_1 + L_2) + 4.33 \lg L_2 \quad (1-26)$$

$$\beta = 0.4 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (1-27)$$

* 为介绍国外常用的 AASHO 法，考虑到方便，未换算法定单位。

对于刚性路面:

$$\lg N = 5.85 + 7.35 \lg(D+1) - 4.62 \lg(L_1 + L_2) + 3.28 \lg L_2 \quad (1-28)$$

$$\beta = 1 + \frac{10^{3.65}(L_1 + L_2)^{5.0}}{(D+1)^{8.46} L_2^{2.52}} \quad (1-29)$$

式中: L_1 ——单轴或双轴荷载 (klbf);
 L_2 ——轴数 (单后轴为 1, 双后轴为 2);
 D ——水泥混凝土版厚度 (in);
 SN ——柔性路面面层结构数

$$SN = 0.44d_1 + 0.14d_2 + 0.11d_3 \quad (1-30)$$

d_1, d_2, d_3 ——分别为面层、基层和底基层厚度 (in)。

若两种车型等效, 轴载为 18klbf 标准车和轴载为 Y (klbf) 的作用次数可使同一路面结构达到同一的 G 值, 则单后轴汽车:

$$\lg \frac{N_{18}}{N_Y} = 4.79 \lg(Y+1) - 6.13 + \frac{G}{\beta_{18}} - \frac{G}{\beta_Y} \quad (1-31)$$

双后轴汽车则有:

$$\lg \frac{N_{18}}{N_{2Y}} = 4.79 \lg(Y+1) - 5.992 + \frac{G}{\beta_{18}} - \frac{G}{\beta_{2Y}} \quad (1-32)$$

式中: Y ——单轴荷载 (klbf)。

对于刚性路面, 单后轴间的轴载等效关系为:

$$\lg \frac{N_{18}}{N_Y} = 4.62 \lg(Y+1) - 5.91 + \frac{G}{\beta_{18}} - \frac{G}{\beta_Y} \quad (1-33)$$

双后轴与单后轴的等效关系为:

$$\lg \frac{N_{18}}{N_{2Y}} = 4.62 \lg(Y+1) - 5.507 + \frac{G}{\beta_{18}} - \frac{G}{\beta_Y} \quad (1-34)$$

根据路面耐用性指数 $P = 2.5$ 和 2.0 及路面结构状况, 便可对各级单轴和双轴荷载算出相应的标准轴载数 N_{18} 。

美国联邦公路局和瑞士等国根据 AASHO 试验结果, 简化为轴载换算系数表 (表 1-3);

美国地沥青协会还对单轴和双轴荷载画出了轴载等效系数关系图 (图 1-2)。

以上各种方法都是以车辆对路面破坏性相互等效为基础的。然而车辆对路面的破坏并非每月或每日都为一个常数, 它受到路面结构、使用材料、气温和水文条件等因素的影响, 因此, 严格说来车辆完全等效实际上是不可能的。近年来有的设计者把影响路面的因素分为若干个典型情况, 如一年分四季或十二个月份, 对每类车辆分别算出若干个等效系数。有的设计者甚至不用车辆等效换算, 直接计算各类车辆在不同条件下对路面的损害率, 以此来计算路面疲劳寿命和结构厚度。随着科学的发展和

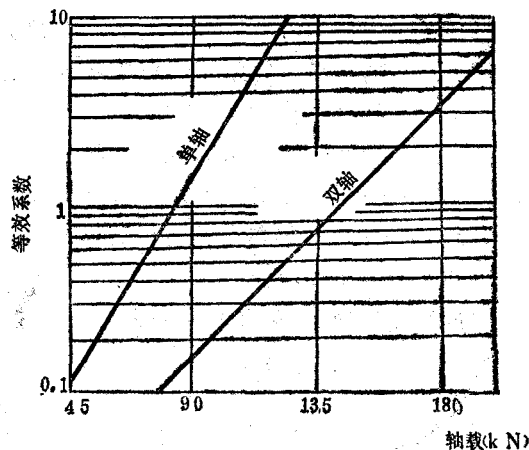


图 1-2 单轴和双轴的轴载等效系数

轴 载 换 算 系 数

表1-3

轴重(kN)	10	20	30	40	50	60	70	82	90	100	110	120	180
系 数	0.0003	0.003	0.02	0.06	0.14	0.30	0.54	1	1.48	2.31	3.47	5.10	7.29

计算技术的进步，在不断总结和丰富路面长期实践经验的基础上，一套简便而又精确的考虑车辆对路面作用的科学方法终将应运而生。

第二节 路面受荷时间和频率

在行驶车辆的作用下，路面中产生变动的应力（应变）反应。沥青面层底部的应力（应变）一般接近于时间的正弦函数（图 1-3）。车轮对路面作用一次的时间以其应力（应变）反应的时间 t 来表示，这种反应历时的多少主要取决于轮重和车速、交通类型和车辆的行驶系列，在一定程度上也取决于路面的性质（材料和厚度等）。

湖南大学和河南省公路局对三层路面体系中沥青混凝土底部应变进行了公路现场实测，画出了黄河 JN150、解放 CA10B 和跃进 NJ130 汽车的车速与路面受荷时间的关系曲线^[175]（图 1-4）。

试验测得解放 CA10B 汽车以中速（48km/h）行驶时，前后轮对沥青层底部的加荷时间为 0.05s 和 0.083s。加荷历时的多少随车速的增高而减少，速度较高时，减少的幅度便较小。

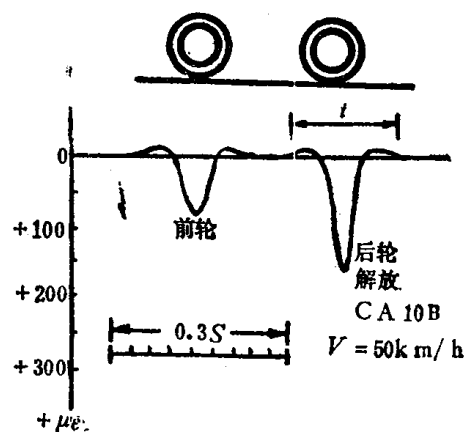


图1-3 沥青层底部应变曲线

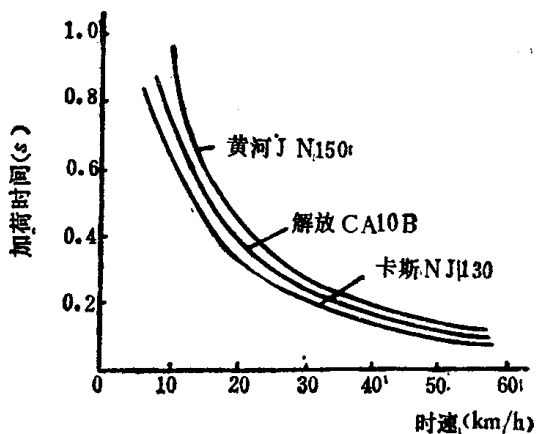


图1-4 不同车型的车速与路面受荷时间的关系曲线

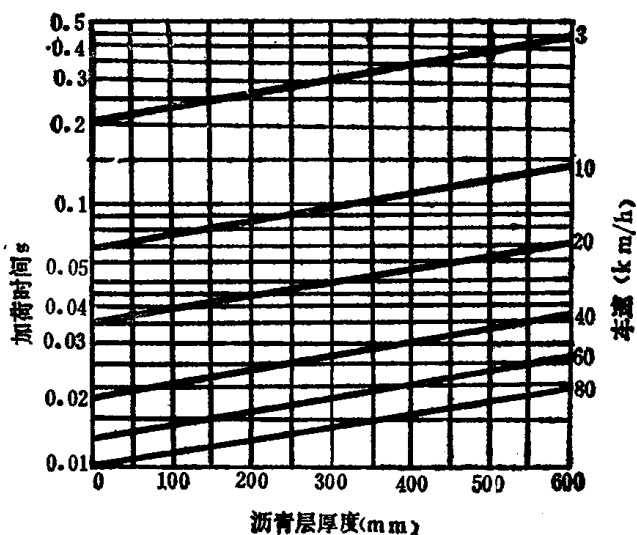


图1-5 路面受荷时间与层厚和车速的关系

国外不少学者研究了加荷时间或频率与车速的关系。英国路面疲劳简化设计法^[71]使用了图解法，按车速和沥青层厚度直接查出加荷时间（图 1-5）。许多研究者多用关系式来表

达车速与加荷时间的关系（表 1-4），设计时可由车速求得加荷时间或频率，从而确定路面的力学特性。

汽车车速与路面受荷时间或频率的关系

表 1-4

作者	国别	车速 V (km/h)	加荷时间 t 或频率 f	文件编号
A.G.克朗普(klomp)	英国	80	$t = 1/[2\pi(0.4V)]$	62
P.S.帕尔(Pell)	英国	V	$t = 1/V$	71
R.I.庆衡(kingham)	美国	V_0	$V_0 = 2.05f$	10
O.T.波恩(Bohn)	丹麦	V	$f = 0.33V$	97
B.C.雪哈德(Céhard)	法国	V	$f = V/\lambda$	84
C.P.华克林(Varkering)	荷兰	V	$V = 0.4d$	133
F.R.济尼尼(Giannini)	意大利	V	$f = 0.4V$	119
M.J.肯尼斯(Kenis)	美国	V_0	$t = rx/0.88V_0$	120
P.R.优力茨(Ullidtz)	丹麦	V	$t = (2r + h)V$	167
三浦裕二	日本	4~80	$t = 0.04 \sim 1.0$	128

注： r ——轮胎接触圆面积半径；
 x ——圆半径的个数；
 h ——沥青层厚度；
 λ ——应力波长；
 d ——应变信号宽度；
 $V_0 = 1.609V$

第三节 土基和非沥青处治基层的力学参数

公路土基和路面材料的弹性模量和泊松比是路面力学的重要参数，它对路面疲劳设计具有决定性的影响。

一、土基和非沥青类材料层的弹性模量

公路土基弹性模量 E_0 可用承载板或汽车车轮来测定。承载板测定 E_0 的公式为：

$$E_0 = (1 - \mu_0^2) \frac{pD}{l} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (1-35)$$

式中： μ_0 ——土基泊松比，一般取为 0.35；

p ——施加的单位压力，可取为 0.1MPa；当土基较弱时，可取土基弹性变形达到 $l = 1\text{mm}$ 时相应的 p 值；

D ——承载板直径；

当用曲率半径 R 或回弹变形 l 与 R 的乘积表示时，则

$$E_0 = (1 - \mu_0^2) \frac{\pi p}{a \left(\frac{1}{R} \right)}$$

或

$$E_0 = (1 - \mu_0^2) p \left(\frac{2R}{l} \right)^{0.5} \quad (1-36)$$

采用汽车车轮测定时，按双圆荷载图式计算可得：

$$E_0 = 0.712(1 - \mu_0^2) \frac{PD}{l} \quad (1-37)$$

受条件限制而弯沉和承载板试验无法进行时， E_0 值也可按经验法估计：

砂性土 $E_0 = 300 K^2 \left(\frac{W}{W_Y} \right)^{-K} \quad (1-38)$

粘性土 $E_0 = 175 K^3 \left(\frac{W}{W_Y} \right)^{-1.8K} \quad (1-39)$

粉性土 $E_0 = 105 K^{2.5} \left(\frac{W}{W_Y} \right)^{-2.8K} \quad (1-40)$

式中： W, W_Y ——分别为土基含水量和液限；

K ——土基的压实度。

土基或路面材料的弹性模量可用 CBR 值来估算。摩洛哥公路采用

$$E_0 = 89 \text{CBR}^{0.85} \quad (1-41)$$

捷克斯洛伐克采用

$$E_0 = 131 \text{CBR}^{0.70} \quad (1-42)$$

美国采用

$$E_0 = 134 \text{CBR}^{0.688} \quad (1-43)$$

一般用关系式为 $E = n(\text{CBR})$ 。 n 为常数，壳牌石油公司取为 100，法国对土基取为 50。

土基弹性模量也可用汽车在双层体系路面上作非破坏性试验，根据弯沉 L 和曲率半径 R 实测值利用双层弹性体系理论计算而得。对于路面厚度大于 10cm 和模量比 $E_1/E_0 < 50$ 的常用情况，可用下式求得 E_0 [217]：

$$E_0 = E_1 / \left(\frac{R \cdot L}{3248} \right)^{\frac{1}{X-Y}} \quad (1-44)$$

式中： E_1 ——路面层弹性模量；

X, Y ——由(1-45)式算出。

非沥青类路面材料的弹性模量可用整层试槽或现场路面试验而得。厚度为 1m 的整层试槽材料用于承载板或汽车车轮试验时， E_1 的计算与 E_0 相同，但此时泊松比 μ_1 常取为 0.25。各类路面材料 μ_1 的变动范围为 0.20~0.30。

公路现场分层测定时，可用双层或三层体系相应的图表求得 E_1 值。双层体系上用汽车车轮试验时，可由测得的弯沉 L 和曲率半径 R 直接算出 E_1 值 [217]。

$$E_1^B = R / 0.056 \times (L / 58000)^A \quad (1-45)$$

式中： $B = 1 - A$

$$A = (1 - X)(1 - Y)$$

$$X = 0.86 \lg h - 0.474$$

$$Y = 0.493 \lg h - 0.410$$

测定土基和路面的弹性模量 E_0 和 E_1 时，如受条件限制，也可用多层换算的弹性半空间综合弹性模量的公式近似估算 E_0 或 E_1 值：

$$(1-\mu_c^2) \frac{pD}{l} = \frac{E_1}{\left[\frac{0.8 \arctg 1.36 \frac{h_c}{D}}{1.1 \sqrt{\frac{E_1}{E_0}}} + \frac{E_1}{E_0} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{h_c}{D} \right) \right] k} \quad (1-46)$$

式中: p, D ——分别为荷载压力和轮迹当量圆直径;

k ——综合系数, 由试验决定;

h_c ——路面厚度;

l ——路面表面弯沉值;

μ_c ——综合当量半空间体的泊松比。

计算时由测得的路面弯沉值, 由已知的 E_0 或 E_1 求得 E_1 或 E_0 值。

路面材料的弹性模量也可用非破坏性试验的声波法测定, 但尚处于研究阶段, 目前在公路上并未得到广泛应用。此法测定的结果可计算动力弹性模量, 公式为:

$$E = Kdv^2 \quad (1-47)$$

式中: v ——声速, $v = f \cdot l$;

f ——频率;

l ——波长;

d ——传播波速的介质密度;

K ——决定于波形和介质的泊松比的系数。

二、土基和非沥青处治基层的非线性效应

土基和非沥青处治基层或路面材料在荷载作用下实际上其应力应变并不呈简单的直线关系, 它具有非线性效应, 应力较大时这种效应更为明显。另一方面, 这些材料也有应力依赖性, 它受到侧向压力的影响, 因此其弹性模量和泊松比并不是一个常数。康德纳等人对土壤的大量三轴试验表明其应力应变接近于双曲线关系(图1-6)。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{e}{a + b\varepsilon} \quad (1-48)$$

式中: σ_1, σ_3 ——分别为最大与最小主应力(压力为负值);

ε ——轴向压应变;

a, b ——实验常数。

土基的切线模量 E_t 和泊松比 μ_t 计算如下:

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 k p_s \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{p_s} \right)^n \quad (1-49)$$

$$\mu_t = \frac{g - f \lg(\sigma_3 - \sigma_1)}{(1 - A)^2} \quad (1-50)$$

式中: R_f ——破坏比, 其值小于 1;

c, φ ——分别为土壤粘聚力和内摩擦角;

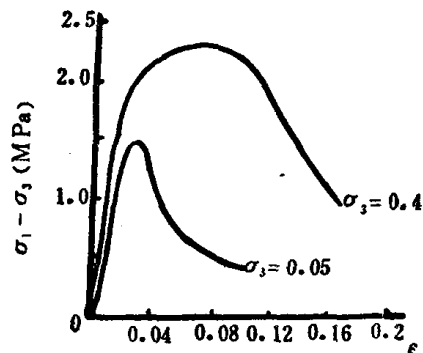


图1-6 土的应力-应变曲线

p_a ——大气压力；

σ_t ——土的抗拉强度， $\sigma_t = -2c \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ ；

k, n, A, g, f, d ——试验确定的常数；

$$A = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)d}{k p_a \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_t}{p_a}\right) \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi}\right]^2} \quad (1-51)$$

对于非沥青类粒状材料，其泊松比和弹性模量的非线性关系式分别为：

$$\mu_t = \alpha_2 \left(\lg \frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)^{\beta_2} \quad (1-52)$$

$$E = k \sigma_z^n \quad (1-53)$$

式中： α_2, β_2 ——实验常数；

σ_z ——压应力。

通常，土壤或非沥青处治基层材料可用下式确定其弹性模量：

$$E_R = k_1 \sigma_d^n \quad (1-54)$$

式中： σ_d ——偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ；

k, n ——试验常数。

砾石基层的弹性模量为：

$$E_R = k'(\theta)^{n'} \quad (1-55)$$

式中： $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 或 $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$

对于基层， k' 和 n' 分别为 1.4×10^7 和 0.7 ；对于副基层，则分别为 1.7×10^7 和 0.6 。

壳牌石油公司在决定无机结合料基层的弹性模量 E_1 时，考虑应力依赖性而取为其厚度 h 和土基模量 E_0 的函数：

$$E_1 = 0.2 h^{0.45} E_0$$

第四节 沥青混合料的弹性参数

沥青路面在弹性理论计算中被假定为匀质和各向同性的线弹性体。沥青混合料的弹性模量可对试件测定求得。测定抗压弹性模量的试件为圆柱体 $\phi 7 \times 14$ 或 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ ，用单轴压力试验。若用三轴压力试验时，抗压弹性模量 E 和泊松比 μ 可分别按下列两式计算：

$$\mu = \frac{\sigma_1 \varepsilon_3 - \sigma_3 \varepsilon_1}{2\sigma_3 \varepsilon_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \varepsilon_3} \quad (1-56)$$

$$E = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (1-57)$$

式中： σ_1, ε_1 ——轴向压应力与应变；

σ_3, ε_3 ——侧向压应力与应变。

沥青混合料的压弯弹性模量可用直立梁式试件进行测定，并用下式计算：

$$E = \frac{P a L^2}{2 I Y} \quad (1-58)$$

式中： I, P, Y ——分别为惯性矩、荷载和挠度；

L 、 a ——试件悬臂和曲臂长度。

应用很广的是弯拉弹性模量。梁式试件可分为小梁（ $5 \times 5 \times 24\text{cm}$ ）、中梁（ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ）和大梁（ $15 \times 15 \times 55\text{cm}$ ）三种。试验采用三分点加载（图1-7），并按下式计算弹性模量：

$$E = \frac{\sigma_{0.5P}}{\varepsilon_{0.5P}} = \frac{0.5Pl}{bh^2\varepsilon_{0.5P}} \quad (1-59)$$

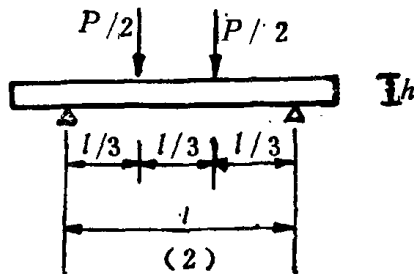
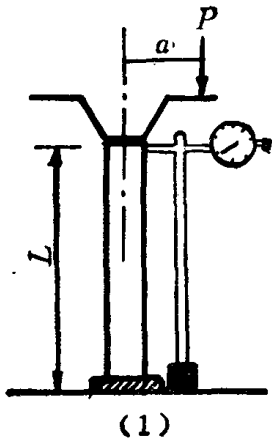


图1-7 梁的弹性模量试验
1-压弯试验 2-弯拉试验

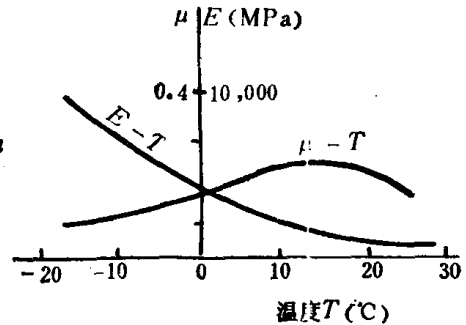


图1-8 温度对 μ 和 E 的影响

式中： P ——破坏荷载；

b 、 h 、 l ——分别为梁的宽、高和跨度；

$\varepsilon_{0.5P}$ ——一半破坏荷载作用下梁的应变值。

沥青路面混合料在外力作用下并不表现为纯弹性性质。它的力学性质受到温度、加载时间和频率等因素的影响。试验表明，沥青混合料的泊松比随温度和作用时间而稍有变化（图1-8和图1-9），但变化的幅度不大，一般为 $0.15 \sim 0.35$ ，为简化起见，可取 μ 值为 0.25 或 0.30 。

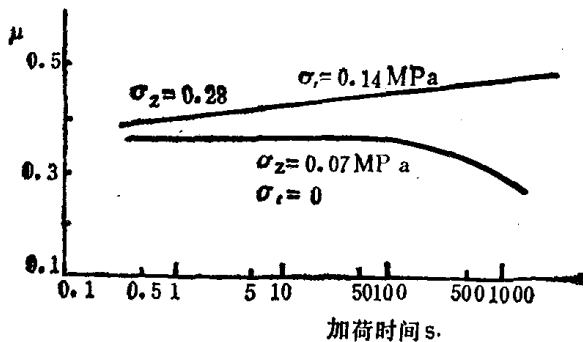


图1-9 加荷时间对泊松比 μ 的影响

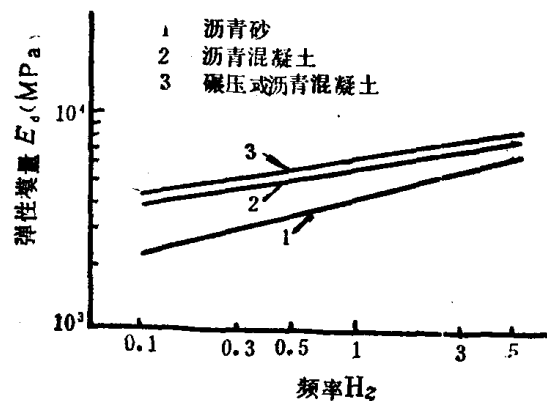


图1-10 弹性模量与频率的关系

沥青混合料的弹性模量受加荷时间、作用频率和温度的影响很大。加荷时间越短，频率越大，弹性模量便越高（图1-10）；温度升高，弹性模量显著下降。在一定频率和加荷时间下，某种沥青混合料的弹性模量可表示为温度的函数：

$$E_T = 10^{3.83 - 0.0258T} \quad (\text{MPa})$$

或

$$E_T = 3.6 \times 10^2 e^{0.0317T} \quad (\text{MPa}) \quad (1-60)$$