

公路技术资料

5

人民交通出版社

公路技术资料

(5)

柔性路面疲劳研究专辑

湖南大学土木系公路工程教研室 译

人民交通出版社

1975年·北京

公路技术资料

(5)

柔性路面疲劳研究专辑

湖南大学土木系公路工程教研室 译

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第006号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 15.875 字数: 352千

1976年1月 第1版

1976年1月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—5000册 定价(科三): 1.25元

(只限国内发行)

内 容 提 要

这本专辑搜集资料十九篇，主要取材于《第三届国际沥青路面结构设计会议论文集》和近年来美英等国有关单位对柔性路面疲劳问题的实验研究报告。

本专辑中介绍了各种类型的柔性路面疲劳问题的试验方法、量测技术设备、资料分析比较、设计体系的确定、计算方法的选择、实际使用效果、目前存在的问题以及今后的研究和发展趋向。可供我国公路部门工程技术干部、材料实验人员以及大专院校公路专业师生参考。

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

洋为中用。

对于科学上、艺术上的是非，应当保持慎重的态度，提倡自由讨论，不要轻率地作结论。

应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

目 录

疲劳能成为柔性路面中的一个问题吗.....	1
路用地沥青混合料的疲劳试验.....	22
地沥青路面材料的疲劳性质.....	38
用于路面设计的沥青混合料的重复弯曲模量和 极限应变.....	96
实验室试验与公路条件下的沥青混合料的性质.....	116
碾压地沥青的实验室疲劳试验及其与交通荷 载的关系.....	130
沥青处治材料在重复荷载下的抗拉性质.....	143
沥青和沥青混合料的疲劳问题.....	172
用脉冲发生器进行路面疲劳试验.....	205
柔性路面的疲劳问题.....	227
实验室的疲劳试验及其与路面性能的关系.....	257
路面的对比研究.....	290
用于柔性路面设计的材料特性.....	316
柔性路面结构中应力与应变的量测值同 计算值之比较.....	343
地沥青混凝土的疲劳性质与混合料设计的关系.....	369
考虑沥青混凝土面层疲劳的路面设计.....	382
以应变和曲率作为预测路面疲劳的因素.....	408
将柔性路面的疲劳、永久变形和收缩破裂的 损害减少到最小的设计体系.....	423
第十四届国际道路会议上的柔性路面设计与 建筑问题.....	468

疲劳能成为柔性路面中的一个问题吗

〔英国〕I.F.Taylor 和 P.S.Pell

引 论

近年来，许多国家的公路工程师都在考虑柔性路面由于疲劳而导致损坏的可能性。这是没有什么怀疑的，由于行车荷载下路面结构的各层都出现连续不断的弯沉，道路遭受疲劳危害的可能性是存在的。

图 1-1 用图解方式说明在运动的单轴荷载下沥青面层中产生的应变。这就表明：路表面上的一点当车轮行近时首先承受拉力，当车轮直接在这一点上时承受压力，当车轮通过后再承受拉力。在这一层的下面将产生符号相反的应变。应变的大小取决于路面结构的整体劲度及其建筑方式。

Monismith¹ 曾用粘贴在路面结构沥青层表面和底面的电阻片所记录的一个 15,000 磅 (6,800 公斤) 轴载在低速经过时的拉伸应变，其数值为 25×10^{-5} 。Klomp 和 Niesman² 曾在结合层底面量测到 12×10^{-5} 的拉伸应变值，英国道路研究

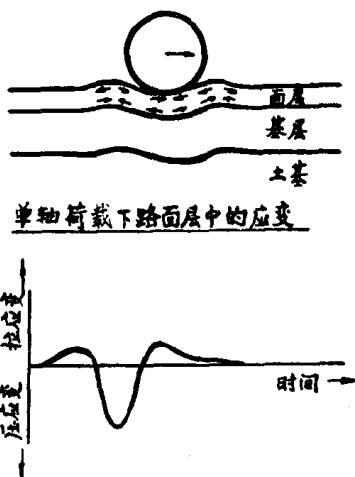


图1-1 在路表面的一点上因单轴荷载而产生的应变随时间的变化

实验室曾在沥青结合基层内对时速 5 英里（8 公里）的三吨荷载观测到 10×10^{-5} 的应变值。

为了使道路在许多年的时期内获得满意的使用情况，就需要对道路建筑中常用的各种混合料的疲劳性质进行研究，俾能对所希望的道路使用寿命作出估计。对金属疲劳方面的研究工作表明，要预估一个组成部分的疲劳寿命是不容易的，而在柔性路面设计中，这个问题或者甚至更为困难。因为除了需要有关每一种混合料的基本疲劳性质的知识和综合荷载（即行车景象）影响的知识以外，还需要有关环境因素如气温和车速变化等的知识，因为沥青混合料表现着粘-弹性性质。

尽管我们对沥青混合料疲劳性质的知识仍然有一个很大的鸿沟，但在过去的四年中，作者们曾对英国所用的道路混合料做过大量的实验工作。关于所研究过的混合料的某些细节和所得结果以及这些结果对路面可能使用情况的关系，都将在本文提出讨论。

试 验 方 法

Monismith³、Pell⁴ 和 Taylor⁵ 曾详细考虑了试验方法对疲劳试验结果的影响。试验方法的选择一般是在控制应力和控制应变（或弯沉）之间进行。如果工作的目的在于研究试验变数，则根据作者们的意见，采用控制应力试验方法有某些好处。Monismith 建议，对于 4 吋或 4 吋以上的沥青层路面，控制应力试验可能更适用于实际道路使用情况。本文中所叙述的一切结果都是在特定试验条件下采用控制应力荷载获得的，所观测的疲劳寿命主要是开始发裂的荷载循环数，而认为裂纹扩展时间是不重要的。

试验机的细节已在某些资料⁶内叙述过,这里只举出试件是在旋转式垂直悬臂机上试验的就够了,荷载的结果使试件任何断面上产生一个按正弦规律变化的恒定幅度的弯应力。

在6吋长的圆形沥青试件的两端直径为 $3\frac{1}{2}$ 吋,逐渐变化到

中间的 $2\frac{1}{2}$ 吋。这些试件都是用精心控制的工艺把热混合料

放在预热的可拆式模子中制成的。先把这个材料用手猛捣,最后放在水压机内压实。冷却一夜以后,将试件脱模,即可放在一个控制温度(控制到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)的水浴中进行试验。

试验机用变速马达(速度范围80~3,000转/分)带动。本文中报告的一切试验都是在1,000转/分(16.7循环/秒)的加载速度下进行的,按照 Klomp 和 Niesman²的意见,对于基层材料来说,此一速度大致相应于行车时速25英里(约40公里)。

在所有试验中,试件都无预兆地破裂,破坏的模式属于在最大应力区内的脆裂,破裂面一般垂直于试件轴线。

疲劳试验结果

试验了数以百计的试件,为了用一个便利的方式来处理这些结果,乃将整个试验计划划分成几个部分。每一部分作为一个独立的试验组,例如试验组 G。表 1-I 列出这些混合料以及试验环境条件和加载条件的细节。磨耗层和基层的混合料都试验过,由于磨耗层混合料的试验结果已经发表过⁷,本文只集中讨论基层的结果。

试验结果分两个部分列出,第一部分是“间断级配”混合料,一般符合英国标准 594 号规定;第二部分是“连续级

研究过的混合料的细节

表 1-1

混合料类型		磨耗层	间断级配基层					连续级配基层				
试验组	C		F	G	H	J	K	M	L	R	S	T
粗集料		砾石	砾石	碎石	碎石	碎石	碎石	碎石	碎石	碎石	碎石	碎石
细集料		沙	沙	沙	沙	沙	沙	沙	沙	碎石	碎石	碎石
填充料		石灰	—	—	—	—	—	石灰	沙	石灰	石灰	石灰
粗集料%(按重量计)		35.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	61.2	62.0	62.0
细集料%(按重量计)		49.7	34.0	34.0	34.0	34.0	不等	不等	不等	29.1	28.6	28.6
填充料%(按重量计)		8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	不等	不等	5.5	4.7	4.7
沥青%(按重量计)		7.2	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	4.2	4.7	4.7
沥青等级		90/110	40/50	40/50	40/50	40/50	40/50	40/50	40/50	90/110	90/110	190/210
平均孔隙率%		4.6	5.8	5.2	4.8	不等	不等	不等	不等	6.2	6.8	6.5
试验条件												
温度 °C		0	+10	不等	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10
应力, 磅/吋²		不等	不等	不等	不等	165	165	165	165	不等	不等	不等

配”混合料，一般是密实沥青碎石类型。即使按“马歇尔法”设计的混合料也试验过。

采用了两种粗集料，一种是特兰德河的不整齐的石英质河砾石，另一种是从莱斯特州采集的斑岩碎石；细集料不是用特兰德河的天然河砂就是用打碎的斑岩石屑；填充料通常用从马特洛克取得的石灰石粉。所用粗集料的最大尺寸都是 $\frac{3}{4}$ 吋。

(a) 间断级配混合料

试验组 C——沥青等级对磨耗层混合料的影响

这种混合料基本上是英国标准 594 号磨耗层混合料，但不同于此标准的是它用一种比较软的沥青（针入度 $\frac{90}{119}$ ）来代替比较常用的沥青（针入度 $\frac{40}{50}$ ），其结果示于图 1-2。

从图中可以看出，在 $\log \sigma_{\text{最大}}$ 和 $\log \bar{N}_s$ 之间存在如下式的直线关系（最符合这条线的坡度因素 n 为 5.3）。

$$\bar{N}_s = K \left(\frac{1}{\sigma_{\text{最大}}} \right)^n$$

式中： $\bar{N}$ ——导致破坏所需的加载循环平均次数；

K ——常数；

$\sigma_{\text{最大}}$ ——所加拉伸应力最大值；

n ——坡度因素，由应力-寿命或应变-寿命疲劳图上得出。

为了比较起见，在图 1-2 中还示出了试验组 B 的混合料（与 C 组相同，只是采用针入度 $\frac{40}{50}$ 的沥青代替 $\frac{90}{110}$ 的沥

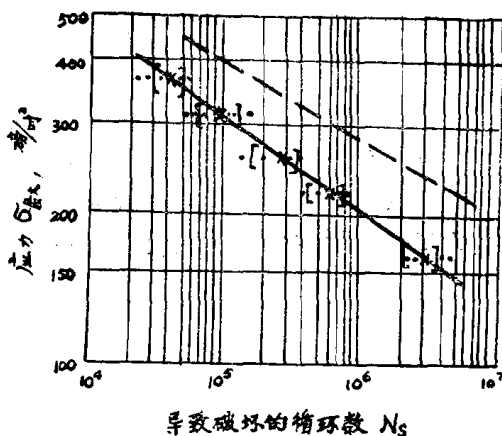


图1-2 C组试件的疲劳试验结果

试验温度	0°C	速 度	1000转/分
试验机	老式 № 2	空隙率范围	3.5~6.5
平均空隙率	4.6	个别结果	•
平均结果	×	95%可靠性范围(平均值)	[]
B 试验组结果 - - - -			

青)的平均线。

试验组 F——符合英国标准594号的砾石基层混合料

试验结果(图 1-3)再次表明,当将结果 log-log 尺度点绘出来时,在所加应力值和疲劳寿命之间存在着直线关系,其坡度因素为 5.9。应当注意,在这些结果中其分散程度比磨损层混合料的为大,但是从材料的增大孔隙率及其不均匀性质来看,对这类试验不可能抱过大的期望。

试验组 G——符合英国标准594号的碎石基层混合料

这种混合料是作全部分析用的基本控制混合料,它在试验温度 +10°C 和加载速度 1,000 转/分时的试验结果示于图 1-4,再次形成坡度因素为 5.9 的一条直线关系。也曾得出试验温度为 0°C、+20°C 和 +30°C 的疲劳结果,在每一种温度时符合得最好的线示于图 1-5。这些关系线表明寿命结果

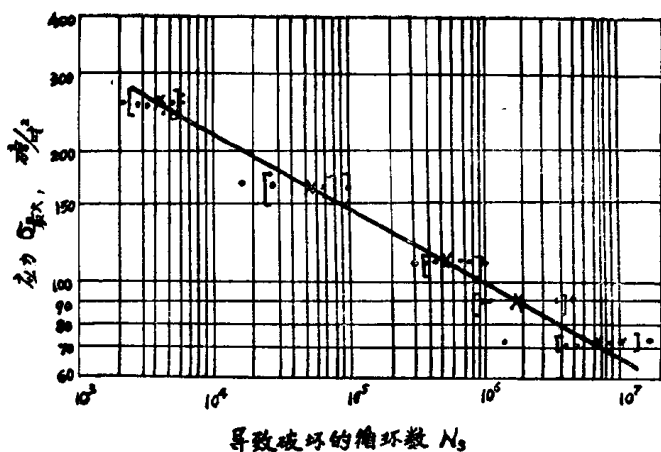


图1-3 F 组试件的疲劳试验结果

试验温度	+ 10℃	速 度	1000转/分
试验机	老式 №2	空隙率范围	4.0~7.4
平均空隙率	5.8	个别结果	.
平均结果	×	95%可靠性范围(平均值)	()

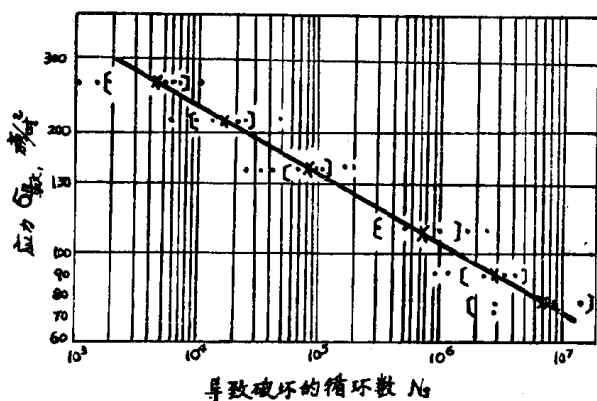


图1-4 G 组试件在 + 10℃时的疲劳试验结果

试验温度	+ 10℃	速 度	1000转/分
试验机	老 1 号	空隙率范围 %	3.9~6.0
平均空隙率 %	4.7	个别结果	.
平均结果	×	对平均值95%的可靠性范围	()

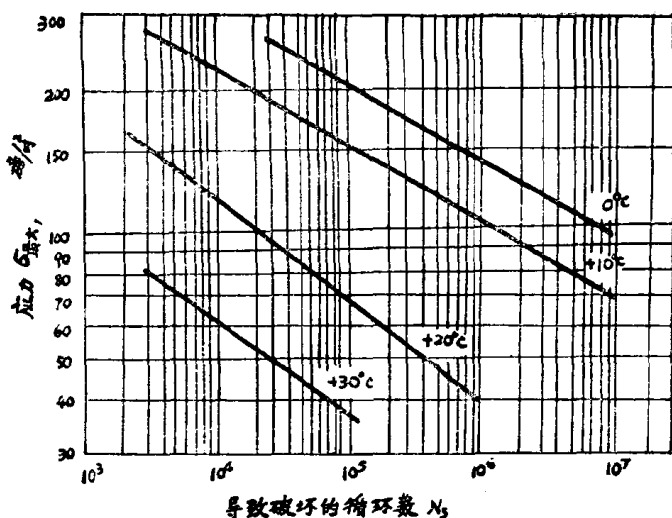


图1-5 基层混合料试件在各种温度时的疲劳试验结果

是高度依赖于温度状况的，在一定应力水平下，较长寿命是与较低温度相联系的。

试验组 H——沥青等级对基层混合料的影响

这种混合料除了采用针入度 $\frac{90}{110}$ 代替 $\frac{40}{50}$ 的沥青以外，

与试验组 G 完全相同。同样地形成通常的 $\log$ 应力- $\log$ 寿命直线关系，但是直线的坡度 ($n=4$) 比 G 组控制混合料在同一条件下试验的为陡。

试验组 J——沥青用量的影响

在此组试验中，采用 G 组混合料作为控制混合料，结合料重量对混合料总重量的百分数变化于 4.1~12.5% 之间；粗集料用量保持为 60% 不变，其结果示于图 1-6。从图中可以看出，在沥青用量大约为 7.7% 时，寿命达到高峰值。英国标准 594 号对这类混合料规定了结合料的最高用量范围为 5.6~6.6%。因此可以看出，甚至在这个狭窄的范围以外，

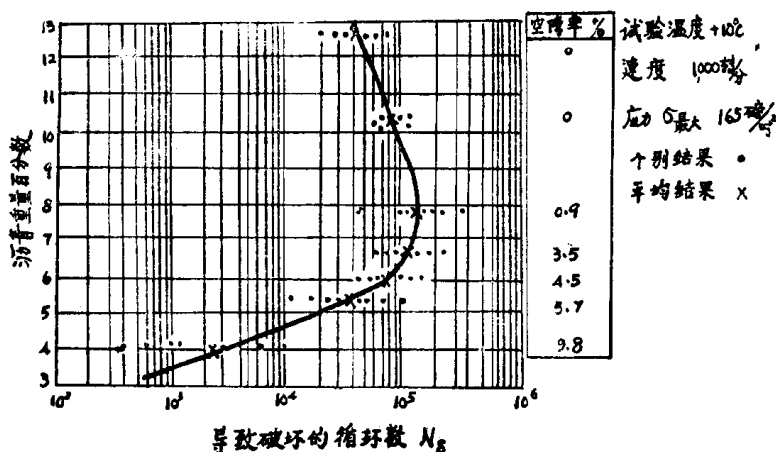


图1-6 沥青用量对疲劳寿命的影响 (试验组J)

增加沥青用量对疲劳寿命具有重大的改善。此外，还可看出，最佳疲劳寿命条件是与空隙率很低的混合料相适应的。

试验组 K——石灰石填充料的影响

再用不含填充料的 G 组混合料作为控制混合料，加入不同数量的填充料，其中粗集料用量 60% 和沥青用量 6% 保持不变，参看图 1-7。从图中能看出寿命峰值出现在填充料约为混合料总重量的 9% 处。填充料用量高 (13% 及以上)

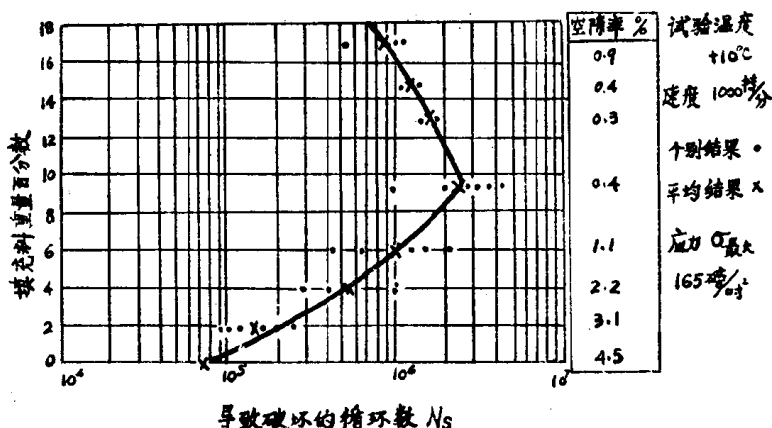


图1-7 填充料用量对疲劳寿命的影响 (试验组K)

的试件的破坏似乎是由于较大石粒上的沥青剥落所引起。这说明在这些情况中，对所用填充料的数量来说，沥青用量是不够的。当填充料用量较低（少于9%）时，增加填充料可以使寿命比控制混合料 G 组大为增长。在最佳填充料用量（9%）时的平均疲劳寿命比控制混合料 G 超过三十余倍。

试验组 M——砂填充料的影响

在观察到疲劳寿命因采用石灰石填充料而大为增长以后，重复做这种研究，改用砂填充料来代替。结果再次出现寿命高峰值，但这次的填充料最佳用量为6%；这种最佳混合料的平均寿命为十倍于不含填充料的控制混合料 G 的寿命。这再一次说明最佳疲劳寿命的条件是与低孔隙率条件相关联的，而在控制混合料中加入砂填充料的影响是增加所采用的试验条件下混合料的寿命。

(b) 连续级配混合料

试验组 L——使用针入度 $\frac{90}{110}$ 的沥青的地沥青混凝土基层混合料

这种混合料是以马歇尔程序设计的美国方法为根据，并具有下列“马歇尔性质”：

稳定度 1670 磅（约 750 公斤），流动度 0.12 吋，整个混合料空隙率 4.3%，被沥青填充的集料空隙 7.1%。在相同条件下与 G 组混合料相比的疲劳结果示于图 1-8；L 组得出的寿命稍低而线形则较陡（ $n=4.0$ ）。但是应当记住，L 组混合料使用针入度 $\frac{90}{110}$ 的沥青，而英国标准的混合料当采用针

入度 $\frac{90}{110}$ 代替针入度 $\frac{40}{50}$ 的结合料时，也得到同样的疲劳寿

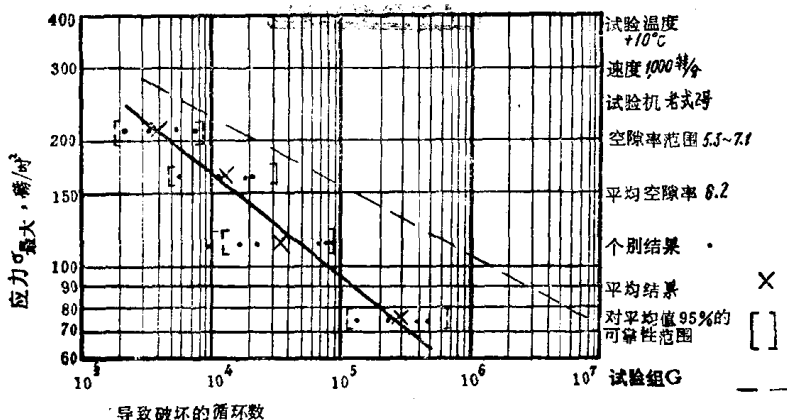


图1-8 L 组试件的疲劳试验结果

命结果，参看试验组 C 和 H。

试验组 R——采用针入度 $\frac{90}{110}$ 沥青的密实沥青碎石

这种混合料同 S 混合料一样，符合 M.O.T 说明书中的密实沥青碎石基层。其疲劳结果示如图 1-9，形成 $\log$ 应力 - $\log$ 寿命的直线关系，直线的坡度为 4.1，比符合英国标准

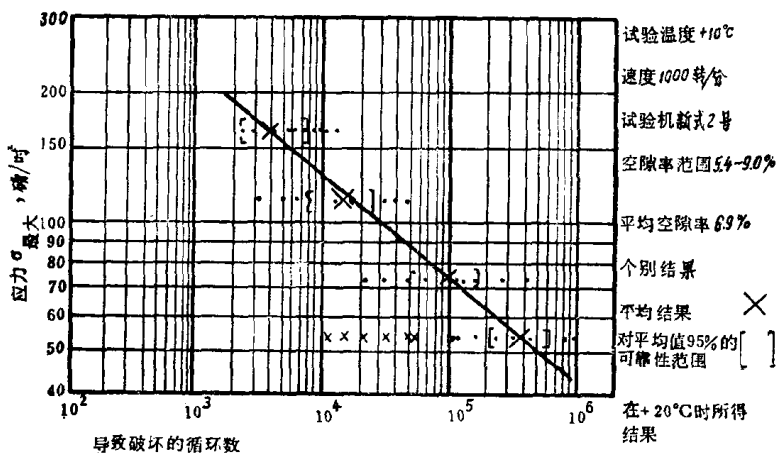


图1-9 R 组试件的疲劳试验结果