

# 柔性路面强度的 试验和评定

〔苏联〕

B.K. 阿佩斯京

A.M. 沙 克 著

Ю.М. 亚科夫列夫

沙 庆 林 译



人民交通出版社

一九八一年三月十六日

# 柔性路面强度的 试验和评定

苏联 B.K. 阿佩斯京  
A.M. 沙 克 著  
Ю.М. 亚科夫列夫  
沙 庆 林 译

人 民 交 通 出 版 社

## 内 容 提 要

本书分析了柔性路面强度的试验和评定的现代方法，叙述了用汽车车轮加荷进行路面试验（即普通弯沉仪测定）的问题以及试验结果的加工整理方法，对如何考虑在交通荷载作用下路面弹性模量降低的特点，提出了建议，此外，还探讨了路面加强计算的基本原理以及公路上限制汽车交通等问题。

本书可供公路工程技术人员和科研人员参考，对于公路学院和公路专业的高年级的学生也有参考价值。

### 柔性路面强度的试验和评定

В.К. АПЕСТИН А.М. ШАК Ю.М. ЯКОВЛЕВ  
ИСПЫТАНИЕ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ  
НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД  
ТРАНСПОРТ МОСКВА 1977

---

本书根据苏联运输出版社1977年莫斯科版本译出

沙庆林 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<sub>毫米</sub> 印张：3.875 字数：86千

1981年1月 第1版

1981年1月 第1版 第1次印刷

印数：0001—4,000册 定价：0.62元

## 前 言

在苏联汽车生产的增长要求改善和发展公路网。除新建公路外，改建和大修那些技术指标与增长着的交通条件不相适应的公路，具有越来越大的意义。这些工作的最重要的一环是加强路面。只有在掌握了现有路面强度的可靠资料时，才可能采取在经济上有根据的确定加强层厚度的方案。

在评定路面结构可靠性的设计阶段，正使用中的路面的强度资料也是必需的。众所周知，这些资料的可靠性在很大程度上取决于野外条件下路面的试验方法。

在最近的15~20年期间，在苏联以及其他国家拟订了许多路面强度的试验和评定方法，其中许多方法已被苏联各道路科学研究机构所利用。然而，这些方法中的任何一个目前还没有在生产条件下得到广泛的应用。发生这种情况，首先是由于现有试验方法在刊物上不够普及；其次是目前还缺乏正式推荐的柔性路面计算方法。

从1974年1月1日“柔性路面设计须知”(BCH46-72)开始执行，须知中建议按3个强度标准进行计算——按荷载作用下路面的弹性弯沉，按整体性结构层的抗弯拉强度，以及按土和低粘性材料结构层的抗剪切强度。但是，按后两个标准，由于没有足够深入研究的路面强度的非破坏评定方法，所以BCH46-72须知建议仅按弹性弯沉进行评定，它是在野外条件下最可行的测定方法，也是现行柔性路面强度评定方法的基础。

本书的作者试图分析柔性路面强度的试验和评定的最通行的方法，并根据分析试图证明，在目前条件下使用静止的汽车车轮加荷法并用杠杆式弯沉仪测量垂直形变的合理性。这个方法是在 H.H. 伊万诺夫教授指导下由莫斯科公路学院和公路总局中央科学研究试验室（现在的国立公路科学研究设计院）共同拟订的，并由 BCH46-72 须知推荐使用。

但是，在 BCH46-72 须知中提出的试验和所得资料的简化加工方法，往往不能保证它们有足够的可靠性。

在本专题论文中引用了多项研究成果。这些成果大大发展了用汽车车轮加荷进行柔性路面试验的方法。特别是提出了下列建议：经济上合理的柔性路面试验的数量，将不同时间的试验资料换算成可以对比的形式，以及考虑在交通荷载作用下路面弹性模量降低的特点。所有这些就能更确切地定出路面维修的时间。

著者对技术科学副博士 П.А. 马尔柯夫在准备本书发表的过程中所提出的重要建议和意见表示感谢。

# 目 录

## 前 言

第 1 章	柔性路面强度的现代评定方法	1
§ 1	极限状态的标准	1
§ 2	路面强度的评定方法	2
§ 3	评定柔性路面强度的各种试验 方法的应用范围	8
第 2 章	柔性路面要求的强度	12
§ 4	允许的和要求的弹性模量	12
§ 5	新设计的路面要求的强度	14
§ 6	确定使用中的路面要求的强度	21
第 3 章	用汽车车轮加荷进行路面野外试 验方法的改进	34
§ 7	现行试验方法的缺点	34
§ 8	在汽车车轮下路面结构可逆形 变的变化规律的计算。进行野外 试验的精度	37
§ 9	确定柔性路面的试验数量	42
§ 10	为可靠地评定路面结构的不均 匀性, 试验路段最小长度的论 证	50
第 4 章	野外试验的组织和实施	53
§ 11	必须进行试验以评定强度的路	

面使用状况.....	53
§ 12 野外试验的准备和实施 .....	55
§ 13 野外试验时汽车荷载的选定 .....	59
§ 14 野外试验及其组织 .....	66
<b>第 5 章 试验结果的加工.....</b>	<b>72</b>
§ 15 将沿线试验的资料换算到路面 结构最薄弱的时间.....	72
§ 16 绘制路面的沿线试验结果图表 .....	74
§ 17 进行野外试验时实际计算交通 量的确定。计算期界限的确定.....	77
<b>第 6 章 保证完整无损和提高柔性路面的     强度.....</b>	<b>84</b>
§ 18 路面强度不足时产生的课题 .....	84
§ 19 加强层的设计和计算 .....	88
§ 20 在路面结构最薄弱的时期, 限 制公路上的汽车交通.....	95
§ 21 路面加强计算的实例 .....	103
<b>附录.....</b>	<b>109</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>112</b>

# 第 1 章 柔性路面强度的 现代评定方法

## §1 极限状态的标准

如在行车多次反复荷载作用下，面层表面在规定期间能保持整体性和足够的平整度，路面就被认为是坚固的。在下列情况下，强度条件遭到破坏：首先，在剪切极限平衡破坏时出现残余形变的情况下，这种剪切极限平衡的破坏可能发生在路基土和路面的低粘性层（砂、砾石等）中；其次，在产生超过强度极限并引起路面整体性层中出现裂缝的拉应力的情况下。极限状态的这些条件与荷载下的弹性弯沉相联系，正如研究所表明的，弯沉值表示柔性路面的强度。因此，目前在苏联使用的柔性路面计算方法〔17〕以 3 个极限状态标准为基础：荷载下路面的弹性弯沉，整体性层的抗弯拉强度以及土和低粘性层的抗剪切强度。

但是，在评定强度时，主要利用弹性弯沉或根据它计算得的弹性模量。这点可用下列情况来解释。在已知荷载下路面的弯沉越大，那末路面所具有的刚性及其分布荷载的能力就越小。在其他条件相同的情况下，在下层产生较大的应力，而且实际剪切应力超过剪切强度极限的可能性较大。在多数情况下，随着弯沉值增加，在整体性层中产生可能超过允许值的拉应力。因此，本身不是强度特性的最大弹性弯沉



与它们<sup>①</sup>紧密相联，并在多数情况下可以用作表征路面实际强度的指标。

在苏联以及在国外，在进行路面试验时，建议把弹性弯沉作为路面极限状态的主要标准〔24〕。这个标准的主要优点是：在野外条件下测定弹性弯沉值是较简易的。

在各别情况下，为了取得更完整的路面强度特性，不仅要适当地具有最大弯沉值的资料，而且还要有面层表面曲率的资料，因为面层的曲率与路面整体性层中的拉应力有联系。不仅在施加荷载的地点，而且在其两侧测量弯沉（垂直形变），就可得到弯沉盆外形的资料。

因此，在野外试验时，可以建议将荷载作用轴上的弹性弯沉或按其计算的弹性模量作为柔性路面强度的主要标准，弹性模量是目前最有论证的参数。在荷载下的弯沉盆的曲率半径，可以看作是处于研究阶段的补充标准。

## §2 路面强度的评定方法

在施加一定荷载的过程中，测定表征路面强度的指标。为了取得可靠的资料，荷载值应该接近计算汽车的后轮荷载〔7,24,38〕（参看§13）。荷载可以是长期的静荷载和短时的动荷载。在不同的试验方法中，静荷载通过刚性承载板、柔性承载板或直接由计算汽车的车轮传达到路面上。

借助移动式或悬挂式压力机，用承载板进行静力加荷〔7,17,24,31,38〕。悬挂式压力机（图1-1）包括：带有压力表的液压千斤顶或机械千斤顶3，圆形且通常是刚性的承载板5以及用来测量承载板沉陷的百分表2。百分表靠夹钳紧固在梁1上。在加荷过程中，梁的支座6应放在路面弯沉盆

① 指剪切应力和拉应力——译注。

范围之外。在加荷期间，千斤顶通过支承梁4顶在汽车车架上。沿承载板直径在与圆心等距离处安放两个百分表，在测量承载板在荷载下的沉陷时，就可以消除承载板倾斜的误差。承载板的面积应该接近重型载重卡车车轮印迹的面积。在这种情况下，承载板的直径是0.3~0.35米。

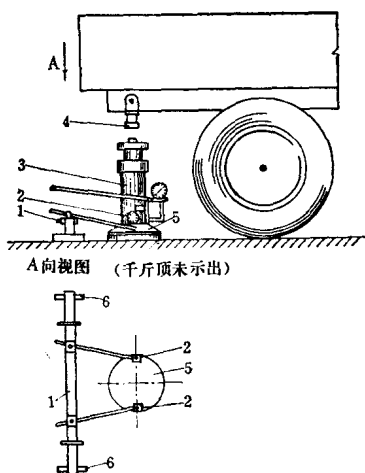


图1-1 悬挂式压力机草图

在试验过程中，向承载板施加逐级增加的荷载。总共加荷3~4次，每级荷载后都要卸荷。采用的最大荷载应等于或略大于计算荷载。对每一级荷载，当形变增长速度（加荷时）或消减速度（卸荷时）等于或小于0.02毫米/分时，记录垂直形变。

根据所得资料绘制路面结构弹性形变值与承载板下单位压力的关系图。这个关系通常表现为接近于直线关系。

根据关系图查出与计算单位压力 $P$ 相应的可逆形变 $l$ 的值，并按下式计算路面结构的弹性模量：

$$E = \frac{PD(1 - \mu^2)}{l} \quad (1.1)$$

式中： $\mu$ ——考虑材料侧向膨胀受限制的泊松系数，对于路面，平均采用0.3；

$D$ ——承载板的直径。

具备柔性承载板，可使加荷条件稍为接近汽车车轮的作

用，但是这种承载板的制作较为复杂。

用承载板作静力试验需要比较笨重的设备。此外，这个方法的效率低（1个工作日3~5个试验）。因为它要求一定的时间用来保证刚性承载板与所试验的表面接触良好，尤其是在分层测定的情况下要求的时间就更多。因为两者贴合的程度大大地影响着试验的结果。

用计算汽车的车轮进行静力加荷，一般都同时使用杠杆式弯沉仪〔7,17,24,31,38〕。有时，为了测量弹性弯沉，利用高精度的（精密的）水平仪〔36,38〕以及特制的光学弯沉仪〔38〕。这两种仪器都要求在汽车后车轮的成双对轮间安置专门的发光标志，这就会使生产率降低一些。

在试验过程中，杠杆式弯沉仪的安置应与汽车纵轴平行（图1-2），并使测杆支在车轮荷载作用轴上成双对轮间的面层表面上，即在后桥轴的下面。弯沉仪的测杆和支座装有预防其陷进面层的轴承，这就大大地降低了由于陷进造成读数分散的可能性<sup>①</sup>。根据操作者的指挥，汽车驶出5~10米

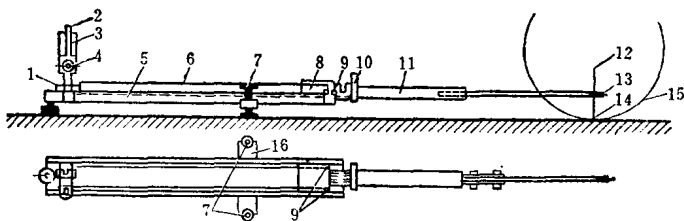


图1-2 杠杆式弯沉仪草图

1-杠杆后臂的塞栓；2-百分表的支柱；3-百分表；4-百分表的支持器；5-支承框架；6-杠杆的后臂；7-升降螺杆；8-接头；9-支承螺杆；10-系紧螺栓；11-杠杆的前臂；12-测杆；13-支持螺丝；14-轴承；15-汽车后轮(虚线)；16-可拆式支座

① 当弯沉仪的测杆和支架有可能陷进面层时，测得的弯沉值较分散——译注。

的距离，此时测杆处在路面弯沉盆范围之外。汽车驶离前后百分表的读数之差为可逆弯沉<sup>①</sup>值。

用汽车车轮加荷，用杠杆式弯沉仪测量弹性弯沉的静力方法，1天可以进行80~100个测量，试验技术比用承载板静力加荷简单，且是真实的汽车施加荷载。路面静力加荷方法的共同缺点—力作用的长期性—与行驶着的汽车的真实作用条件不相符，行驶着的汽车荷载是短时作用的。

评定强度的动力方法在较大程度上与真实条件相符。在动力方法中，荷载施加的时间接近于行驶中的汽车车轮加荷的延续时间，或可与之相比较。用一次短时荷载或有限反复的短时荷载以及用多次荷载和振动荷载的试验均属于路面的动力试验法。利用动力加荷装置或行驶着的汽车进行一次或有限反复的短时荷载试验。

在苏联、德意志民主共和国、匈牙利、捷克斯洛伐克、法国以及某些其他国家采用各种不同结构的动力加荷装置〔23、24、38、39、46〕。这些装置的作用原理（参看图1-3）是

由落下重锤3（沿1根或几根导杆4滑动）而造成动力。重锤由固定高度落到弹性减振装置2上，减振装置可以是钢制弹簧，也可以是用特种橡胶以及本身性质随时间变化不大的其他弹性材料做成的衬垫。力作用的时间取决于减振器的刚性和落锤的重量。通常此时间位于0.015~0.05秒的范围内，它与行驶着的汽车荷载在面层上每一点的作用时间相符合。

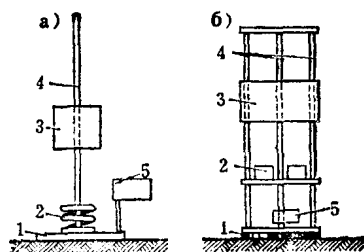


图1-3 带有导杆的动力加荷装置草图  
a—带有1根导杆；b—带有3根导杆

① 我国通称回弹弯沉——译注。

短时的力通过减振器传到面积与计算汽车车轮印迹相等的承载板 1 上。承载板通常是直径 0.30~0.35 米的圆盘形（参看图 1-3a）。有时它做成与汽车后轮双对轮印迹形状相符的两个椭圆（参看图 1-3b）。在个别场合，为了更接近汽车车轮，用橡胶制造这些椭圆。采用各种测振仪 5、形变传感器、地震仪等作为短时荷载作用下路面形变的记录设备。

可按式确定路面试验时的动力  $Q_n$  值，在多数情况下，它具有足够的精度。

$$Q_n = P \sqrt{\frac{2H}{\delta}} \quad (1.2)$$

式中： $P$ ——落锤的重量，公斤；

$H$ ——锤的下落高度，厘米；

$\delta$ ——表征弹簧刚性的参数，等于弹簧在静力  $P$  作用下的压缩，厘米。

还有一些确定  $Q_n$  的更精确的公式。

重锤落下时产生的能量损失可用下式计算：

$$Q_{nn} = \frac{Q_n}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{l'}{l}} \right) \quad (1.3)$$

式中： $Q_{nn}$ ——考虑能量损失后的动力，公斤；

$l$  和  $l'$ ——相应于重锤第 1 次打击和跳起后，第 2 次打击所量得的路面垂直形变，厘米。

同静弹性模量一样，按照公式(1.1)计算动弹性模量的值。但是，动弹性模量经常大于静弹性模量。这可解释为，路面结构层材料和路基土在荷载作用下如同粘弹性体。

用行驶着的汽车车轮进行试验与作用在路面上的真实条件相符。这时可能有两个方法——或汽车仅是试验荷载，全部量测仪器埋在路面里，或汽车造成荷载且本身带有量测仪器。第 1 种试方法仅在试验路段及试验场上进行研究时采

用，对于大量的现有公路的调查，它并不适用。

采用第2种方法时〔23,24〕，在造成计算荷载并以不超过5公里/小时速度行驶的汽车上，悬挂两个特制的弯沉仪4（图1-4）。在每次试验开始时不用停站汽车，弯沉仪就会自动下落到面层上。汽车以后轮3驶向相应的弯沉仪测头，并记录增长着的弯沉直到其最大值。

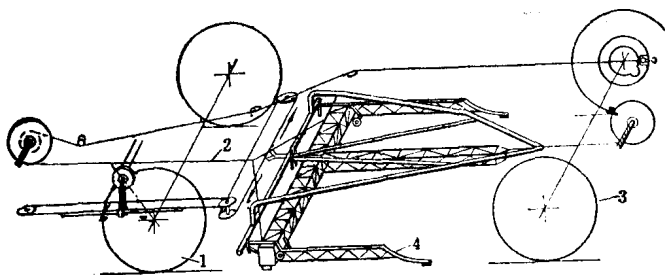


图1-4 用行驶着的汽车车轮进行路面试验的移动式装置草图

然后，通过由传动和牵引系统2与行驶着的汽车前轮1和后轮3相联系的专门装置，将弯沉仪向前移动，试验就这样反复地进行。

用反复作用的动力加荷装置以及用多次驶过的车轮装置对路面进行的试验，属于多次荷载试验。

在苏联（莫斯科公路学院）制成了反复作用的动力加荷装置。此装置所产生的短时力，与用1次或有限多次荷载进行试验的动力加荷装置所产生的短时力相同。重锤的升起和降落，是由自动工作的机械绞盘来保证的。这种装置实际上可以进行无限次数的加荷直到路面破坏为止。它是一种评定现有道路（包括任何试验路段）工作能力的不贵的仪器。使用这种仪器就不需修筑昂贵的试验场，并用汽车或其他试验荷载在上通行大量次数。用轻型载重汽车就能将此仪器从一处运往另一处。

用多次驶过的车轮或小车进行试验的固定型装置，在苏联和某些其他国家得到了应用。它用于环形和直线形的小型试验道（土槽）和试验场〔23, 24〕；但对现有公路的试验，它们是不适用的。

在国外得到某些应用的多次驶过车轮的移动式装置，实际上与反复作用的动力加荷装置具有相同的功用。它们的特点是，用汽车车轮代替刚性承载板将荷载传达到路面上，车轮在装置的框架所限定的路段范围内循环地运转。试验时框架停留在一个地点。荷载值和车轮的转速可以改变。有专门的装置可使活动荷载沿面层宽度移动，以便符合本公路上真实汽车通过的横向分布规律。这种装置的重量很大（达80吨），价格很高。

用频率5~75赫芝的各种振动发生器产生的振动荷载进行路面试验〔23, 24〕。振动发生器主要是用来评定各结构层结构的均匀性以及确定面层中是否有裂缝（包括细小的裂缝）。在法国、德意志联邦共和国和其他国家，振动发生器（振动器，脉冲器）得到了某些推广。在这种情况下，弹性波的传播速度用作衡量路面质量的指标，根据此速度的大小计算弹性模量和泊松系数。有轻型振动器和重型振动器。轻型振动器发生能量小的振动，用来评定面层的质量；而重型振动器则用来做基层的试验。用振动荷载的试验不能得到路面强度足够完整的资料。这些试验结果难于用作计算路面的参数。

### §3 评定柔性路面强度的各种试验

#### 方法的应用范围

因为荷载下的弹性弯沉是评定柔性路面强度时的主要标

准，所以在苏联主要采用测量弯沉值的试验方法。

各种试验的推算价格  $C$  是比较各种不同方法时评定路面强度的主要指标。

$$C = \frac{\Pi}{T \Delta H} + \frac{P}{\Delta H} + \frac{M + 3O}{H} \quad (1.4)$$

式中： $\Pi$ ——弯沉仪和其他试验设备的费用，卢布；  
 $T$ ——设备的使用年数；  
 $\Delta$ ——1年中适宜进行试验的平均天数；  
 $H$ ——1天的平均试验数量；  
 $P$ ——设备维修和调整的每年平均费用，卢布；  
 $M$ ——运送设备和进行试验的汽车的平均台班费用，卢布；  
 $O$ ——试验操作人员的数量；  
 $3$ ——试验人员的平均日工资，卢布。

三个在苏联最通用的试验方法的起始指标和平均费用列于表1-1中。这些起始指标是根据莫斯科公路学院和俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国公路部国立公路科学研究设计院的经验得出的。根据下列原则确定1年的工作天数：用现行方法评定路面强度仅在路面最薄弱的时期进行，对每一个工程此时间不超过一个月。考虑到在几个最薄弱时期的开始时间不同的工程中利用设备的可能性，试验期限可能延长到2~2.5个月，即大约50个工作日。1天的试验次数以及动力加荷装置的弯沉仪和其他设备的费用适合于莫斯科公路学院制做的最新式样的拖挂装置。在计算各种试验的费用时，并未包括揭开路面、取样、必需的分析、野外试验和室内分析结果的加工、研究现有交通量和确定远景交通量、以及拟订现有路面加强方案等等的费用。每次试验的这些费用，对于任何方法都可认为是一样的。



按照弯沉测量的精度，表1-1中所列出的各种方法都很接近。通过承载板的静力加荷的价格比其他两种方法的试验价格高出14倍，用汽车车轮进行静力加荷的价格实际上与动力加荷的价格相等。

试验方法的分析表明，用刚性承载板时静力加荷只能建

表1-1

公式 1.4 <sup>①</sup> 中的指标	试 验 方 法		
	用承载板的 静力加荷	用停着的汽车车轮加荷， 用杠杆式弯沉仪测量形变	用动力加 荷装置
П	70	45	1000
Т	5	5	5
Д	50	50	50
И	5	80	70
Р	10	10	20
М	20	20	10
О	2	2	2
З	6	6	6
С	6.5	0.4	0.4

① 原书误印成公式1.1，应改成公式1.4——译注。

议用于研究的目的，以及用于为了确定路面结构层材料静弹性模量的分层试验〔17, 31〕。

汽车车轮加荷方法主要是用来确定路面结构的整体弹性模量。对于分层试验有粘结性的基层（用结合料处治的材料或土），此方法很少使用，因为必须将上层揭去相当大的面积（5~10平方米），以便布置汽车荷载（承载板试验时揭去面积1~1.5平方米）。不建议用汽车车轮试验砂层和路基土，因为双轮间的材料颠簸会导致所量得的弯沉值不真实。在路面表面上以及分层的动力试验方法，在很大程度上与路面的真实工作条件相适应，因此是有较大前途的。