

公路工程参考资料

第九輯

人民交通出版社

公路工程参考資料

(第九輯)

人民交通出版社

本輯着重介紹苏联近年來在柔性路面方面的科学研究新成就及各家的論点。

本輯內容包括：H. H. 伊万諾夫主編的“柔性路面計算和試驗新方法”；A. M. 克利威斯基的“柔性路面計算新方案”；M. B. 科尔宋斯基的“論工作在彈性階段的路面極限状态的标准”；A. K. 比魯利亚等合著的“簡易式路面強度研究”等等。

本輯可供道路科学工作者、有关院校师生、道路工程技術人員参考。

公 路 工 程 参 考 資 料

(第九輯)

*

人 民 交 通 出 版 社 出 版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六号

新华书店北京发行所发行 全国新华书店經售

人 民 交 通 出 版 社 印 刷 厂 印 刷

*

1962年12月北京第一版 1962年12月北京第一次印刷

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印張：7 $\frac{1}{2}$ 張 插頁2

全書：172,000 字 印數：1—1,000册

統一書号：15044·1463

定价(10)：1.10元

目 录

柔性路面計算和試驗新方法	H. H. 伊万諾夫主編	3
一、反复短时加荷时柔性路面的計算		3
二、柔性路面試驗新方法		14
三、用短时荷重試驗路面		23
四、用汽車車輪試驗路面		34
参考文献		42
柔性路面計算新方案	技术科学副博士 A. M. 克利威斯基	44
一、柔性路面現代計算方法的簡要特点		44
二、重复加载时土壤变形的基本規律		54
三、高級路面結構設計原則		68
四、結論		95
附录 I		105
附录 II		118
参考文献		121
論工作在彈性阶段的柔性路面極限状态的标准	技术科学副博士 M. B. 科尔宋斯基	126
参考文献		139
路面設計的若干問題	全苏道路設計院总工程师 И. П. 莫罗茲	141
反复荷重作用下土壤極限状态的實驗室研究	技术科学副博士 A. M. 克利威斯基	147

参考文献	196
簡易式路面結構強度研究.....A.K.比魯利亞	
C.П. 果洛伐年科及C.И.米霍威奇	198
参考文献	229
論測定土壤形變模量用試件的制備方法	
..... A.M. 克利威斯基和H.A. 普札科夫	230

柔性路面計算和試驗新方法

H. H. 伊万諾夫主編

一、反复短时加荷时柔性路面的計算

約 20 年前由全苏道路科学研究所擬訂的柔性路面計算方法，在苏联被設計和养护管理机构广泛应用着。这个方法在实践中很好地証明了是有效的，并采用在正式的須知中。如所周知，这个方法是以下列前提为基础的〔2、4〕。

1. 在路面上作用着某一計算車輪荷重，所有其他較重的和較輕的汽車都換算为这种車輪荷重；荷重是以单位压力 P 和輪胎接触面积直径 D 表征的。

2. 荷重很長時間作用着，同时又是反复的。行車荷重作用的反复性和动力性用下列系数表征

$$K = 0.5 + 0.65 \lg N$$

式中： N ——昼夜交通量。

对南方地区，由于冬季和春季沒有含水量的显著降低，采用下式較好

$$K = 0.5 + 0.4 \lg N \times 72t$$

式中： t ——面层使用年数。

3. 路面的极限状态由极限容許相对形变确定：

$$\lambda = \frac{l}{D}$$

式中: λ ——絕對形变;

λ ——与面层类型和结构有关, 变化在0.03到0.06的范围内。

4. 各层的刚性 (而在一定形变时以及它們的强度), 用形变模量 E 表征。形变模量是在荷重逐渐緩慢增加达到計算相对形变 λ 时确定的。对上面各层 λ 等于0.03~0.06 (相应于汽車荷重乘上系数 K), 对下面各层和土, 由于传达荷重面积的直径一层一层增加, 采用 λ 等于0.01~0.02。面积的尺寸增加提高形变模量值, 因为 $P-\lambda$ 是曲綫关系。

5. 形变和作用应力之間的关系采用为直綫关系, 即按照弹性理論的公式。

6. 对多层路面目前还没有可靠的公式, 当計算层数超过3层的多层路面时, 不得不逐层进行計算。在这种情况下, 考虑到传达荷重压力面积直径随深度的增加, 与布辛氏的单层介体比較, 在多层介体的形变公式中必須引入修正。在任何情况下, 不可能把这看作是路面材料性质与直綫变形体性质的偏离, 或存在应力集中。

但是, 不能不同意这个理論在一定程度上是有条件性的, 因为虽然用了弹性理論的近似公式作为理論的基础, 但这些参数, 如容許形变以及路基土和路面各层的形变模量, 都是在荷重长期作用下和在較高荷重下直到残余形变完全消失时确定的。反复荷重的影响也是在荷重較长期作用下确定的。将不同类型的載重汽車換算成計算汽車 $H-13$ (单位压力 $P=5$ 公斤/厘米², 与車輪接触面等面积圓的直径 $D=34$ 厘米), 不能經常充分地考虑在某些运输矿石、石料等的专用道路上所应用的輪胎

① $E = \frac{E'}{1-\mu^2}$ 式中: E' ——楊氏模数, μ ——泊松系数。

接觸面等面積圓的直徑大的重型汽車的影響。

現在，考慮到在蘇聯和國外所積累的研究工作經驗，可以開始擬訂高級和次高級類型柔性路面的更嚴密的理論，以荷重作用的短時性為基礎，此時路面工作在彈性階段，但是不要忘了應用現行理論的豐富經驗，可以採用以下的原理作為較嚴密方法的基礎。

在多层彈性體系內的應力分布的理論資料

以及根據它們計算出的軸向形變值

眾所周知，已有許多確定雙層彈性體系中應力的方法。知道彈性模量和泊松系數時，根據應力可以計算結構的軸向形變。最近時期在蘇聯以及國外，都開始針對多層結構研究解決類似課題的方法。在蘇聯 Б.И. 柯崗（哈爾科夫公路學院），А.Г. 布拉夫柯和 М.Б. 科爾宋斯基（全蘇道路科學研究院列寧格勒分院）研究這個課題；在法國——席夫魯阿和巴舍烈；在美國——施佛曼等。Б.И. 柯崗對雙層體系提供了類似伯密斯特（美國）的精確解答，並對彈性模量按指數規律逐漸減小的體系提供了精確解答。席夫魯阿和巴舍烈提供了三層體系的解答，但是假定上層是那維式（Навье）薄板（這個解答是近似的，但對對稱荷重是足夠精確的）。А.Г. 布拉夫科和 М.Б. 科爾宋斯基針對三層體系進行着近似計算。施佛曼提供了精確解答，但要求大量計算工作。後三者目前還只對個別局部例子有了解答，因為要求應用計算機器。

許多年前全蘇道路科學研究院擬訂的確定雙層和多層體系中應力和形變的方法是近似的，但同時它很簡單又不要求大量計算。

正如這個方法與 Б.И. 柯崗，伯密斯特和席夫魯阿-巴舍烈

的双层体系的精确方法的比較所表明的, 差别不超过 5 ~ 10%。

下列形变方程式是全苏道路科学研究院方法的基础:

$$l = \int_0^{\infty} \frac{\sigma dz}{E} \quad (1)$$

式中:
$$\sigma = \frac{P}{1 + a \left(\frac{h_{\bullet KB}}{D} \right)^2} \quad (2)$$

$$h_{\bullet KB} = h \sqrt[2.5]{\frac{E_1}{E_0}}$$

試驗表明, 对多层体系 $a=1$, 对双层体系它接近 2。当 $a=2.5$ 时, 方程式 (2) 与布辛氏均质半空間体的精确解答完全吻合。

应当考虑到, 从弹性理論的观点,

$$h_{\bullet KB} = 1.1 h \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_0}} \approx h \sqrt[2.5]{\frac{E_1}{E_0}}$$

即对双层路面 a 应当是接近于 2。

假如针对双层半空間体将方程 (1) 积分, 并对上层厚度采取它的当量厚度,

$$h_{\bullet KB} = hn = h \sqrt[2.5]{\frac{E_1}{E_0}}$$

式中: E_1 和 E_0 ——上层和下面半空間体的弹性模量(在此有条件地采取, $E = \frac{E_y}{1-\mu^2}$, 式中 μ ——泊松系数), 則

$$l = \frac{PD}{E_0 \sqrt{a}} \left[\frac{\pi}{2} - \left(1 - \frac{1}{n^{3.5}} \right) \arctg \frac{h}{D} n \sqrt{a} \right] \quad (3)$$

当 $E_0 = E_1 = E_{\text{ср}}$ 时

$$l = \frac{PD}{\sqrt{a} E_{\text{ср}}} \times \frac{\pi}{2} = \frac{\alpha PD}{E_{\text{ср}}} \quad (4)$$

由公式(3)和(4)，得到有名的 $E_{\text{ср}}$ 与 E_0 或 E_1 通过 h 、 D 和 n 的关系式：

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_1}{n^{2.5} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{n^{3.5}} \right) \arctg \frac{h}{D} n \sqrt{a} \right]} \quad (5)$$

假如 $a = 2.5$ ，则 $l = \frac{PD}{E_{\text{ср}}}$ ，此与弹性半空间体的解答

完全吻合。假如 a 不等于 2.5，则在公式(4)中出现系数

$$\alpha = \frac{\pi}{2\sqrt{a}} \quad (6)$$

这个系数并不表示偏离弹性理论（所谓的集中系数），而只表示分开研究多层半空间体的事实，此时车轮接触面等面积圆的直径从表面开始似乎一层一层逐渐增大。事实上，从计算和试验中已知道，当压入刚性承载板时，形成直径 D_0 （等于 $3D$ ）的挤出截体。容易看出，假如在公式(2)中用平均值为 $1.4D$ 的 D_0 代替直径 D ，则多层结构时的系数 a 应该缩减 50%。

因此，公式(4)中有系数 α 对弹性多层体系也是完全有根据的。在双层体系时系数 α 可以采取等于 1 或更精确些由于引

用 $n = \sqrt[2.5]{\frac{E_1}{E_0}}$ 代替 $\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_0}}$ 时当量模量的某些增大而采取 1.1。

这个数值被莫斯科公路学院研究生梅安今不久前对双层体系中的应力分布所作的试验完全证实了。

我们的和其他人的研究工作表明，短时荷重作用时，多层

路面中应力的实际分布，当基础各层的材料以及特别是路基土不处于塑性或松散状态时，很接近于按照上列諸方法中的任一方法得出的理論資料。当它們处于塑性状态时，这些层的弹性模量应该降低23%~33%，因为实际形变超过理論的形变，以及計算厚度显得低于实际所要求的厚度。

将对若干结构按照席夫魯阿-巴舍烈的三层体系理論与按照全苏道路科学研究院的理論进行理論的計算加以比較，同样针对双层体系将按照伯密斯特与柯崗的理論計算进行比較（表1）。

表 1

路 面 結 构	路 面						相 对 形 变			
	面 層		基 础		土		按照席夫 魯阿和巴 舍烈	按照伯密 斯特	按照全苏 道路科学 研究院	按照全苏 道路科学 研究院系 数 α
	h ,	E ,	h ,	E ,	h ,	E ,				
	厘米	公斤/ 厘米 ²	厘米	公斤/ 厘米 ²	厘米	公斤/ 厘米 ²				
							$\frac{W}{W_0}$	$\frac{w}{w_0}$	$\frac{l}{l_0}$	
I	8.5	2700	17	900	—	100	0.45	—	0.27 α	1.65
II	8.5	3000	17	1800	—	200	0.45	—	0.32 α	1.43
III	0	—	17	1800	—	200	—	0.50	0.46 α	1.09
IV	4.25	3000	30	1900	—	100	0.27	—	0.19 α	1.42
V	0	—	30	1900	—	100	—	0.27	0.23 α	1.17
VI	0	—	17	1000	—	200	—	0.6	0.56 α	1.06
VII	0	—	34	600	—	200	—	0.55	0.50 α	1.1

注：当与B.И.柯崗的表比較时，差別是5~6%。

研究一下席夫魯阿和巴舍烈发表的〔12〕7个具有不同层厚和不同弹性模量比的結構。

按照全苏道路科学研究院的方法，計算遵照須知BCH46-60〔4〕按形变公式进行：

$$l = \frac{\alpha PD}{E_{\bullet KB}} \text{ 及 } l_0 = \frac{PD}{E_0}, \quad \frac{l}{l_0} = \frac{\alpha E_0}{E_{\bullet KB}}$$

式中：\$D\$——車輪接觸面等面积圓的直径，采用34厘米；

\$P\$——計算单位荷重，等于5公斤/厘米²。

按照席夫魯阿-巴舍烈的方法，形变按相应的图表[10,12]計算，在此\$W\$和\$W_0\$为荷重施加在面层表面上和施加在路基土上时路面的形变。

伯密斯特的資料是根据1943年公路研究院学报[14]上的图表列出的。

由所述的一般理論見解以及与試驗資料的比較中看出，当多层結構时公式(4)中的系数\$\alpha\$应该不小于1.5，只为双层(輕型)結構时考虑到由于引用开方根指数2.5代替3略增加了当量模量，这个系数可能采取等于1.1。另一方面，开方根指数2.5考虑着在潮湿时期下面各层較上层有較大塑性的可能性。

因此，对短时加荷的計算可以按照較精确但較笨重的公式进行，又可以按照全苏道路科学研究院的公式进行，并在公式中用弹性模量代替形变模量，并用弹性形变代替残余形变。

弹性模量和弹性形变应该在加荷時間与路上汽車作用時間相应的条件下确定，即加荷時間为百分之几秒，且不大于0.1秒。

在拟訂出确定层数不少于三的多层体系(面层和两层基础，不算路基土)中的应力和形变理論之前，可以利用双层半空間体的理論，逐步放弃上层或者在已經选好結構的場合由下而上进行，并将以下各层合并为整体。

但是，正如前面所指出的，此时应该考虑必須引用，对多层性的附加系数\$a\$。在逐层評定弹性模量时，可以足够精确地利用公式(5)以及发表在1961年須知[4]中的根据公式(5)繪

制的 $a=1$ 时的諾謨图。

計算必須根据面层或基础上层的表現为相对形式的极限容許短时垂直形变（絕對形变除以与双輪接触面等面积圓的直径 D ）进行，此形变实质上是可逆的。同时应该采用考虑面层由于反复荷重而疲劳的形变。

許多試驗和理論計算都表明了，容許的可逆形变由于弯沉盆（路面在車輪作用下产生的盆形弯沉或形变又称凹形盆——譯注）尺寸的增加而增大，同时随路面厚度的增加及相邻层弹性模量比的增加而增大，即与下值有关，

$$\frac{h_{\text{KB}}}{D} = \frac{h}{D} \sqrt[2.5]{\frac{E_1}{E_0}} \quad (7)$$

但是，对于上层最危險的是裂縫，容許可逆形变通常不超过 0.6 毫米，在这种情况下必須采用相对垂直形变 λ 的最小值。

應該采用一次荷重时的极限形变乘一疲劳系数作为容許可逆形变，許多試驗表明，根据形变此系数不小于 0.3。我們宁願利用間接方法，在不同的交通組成和交通密度（它們在道路使用的很多年間在春季沒有引起明显的破坏）的条件下观察面层的形变。

根据我們的观察查明了，对于中等交通量（每昼夜 1,000 ~ 2,000 輛汽車，其中 4 ~ 5 % 是較重的載重卡車）的道路，在重型卡車 MA3 的車輪下在春季的弹性形变不应当超过 1 毫米，在交通量較大时不应超过 0.75 ~ 0.8 毫米。

在用冲击仪通过彈簧測定形变并考虑作用時間时，极限形变不應該超过 0.8 毫米以及对較大交通量的道路不超过 0.6 毫米。因此，在重交通量的情况下，計算相对形变應該是 0.00225 ~ 0.0025，而在中等交通量的情况下應該是 0.003。当相对形

变超过所列数值时，不能保证结构不形成裂缝。

国外（匈牙利、波兰、捷克斯洛伐克、法国、西德）把类似的极限形变看作是容许的。只有在试验方法（刚性的和柔性的承载板）和荷重维持（即作用）时间方面有差别。

在匈牙利进行的试验，对较轻交通量的道路容许相对形变达0.005，以及对较重交通量的道路达0.0025。在法国许多试验表明，地沥青混凝土面层在车轮下的容许形变为0.003~0.0035。正在寻找获得 λ 可以增高到0.006甚至更高些的沥青的方法。

根据美国道路工作者西部协会的试验，建议在冷天在车轮下的 λ 采用0.00225。在西德用刚性承载板时，认为容许形变不应超过0.5毫米。

下层承载能力的极限，几乎经常在很大的形变时出现。

根据以上所述，路面整体要求的弹性模量将是

$$E_{\tau p} = \frac{\alpha P}{\lambda} \quad (8)$$

$$E_{\tau p} = \frac{E_y}{1 - \mu^2}$$

式中： P ——计算汽车①的单位压力；

α ——前面已经指出，对多层结构等于1.5；

μ ——泊松系数。

为了使公式(8)具有习惯的形式，可以将它改造成下式：

$$E_{\tau p} = \frac{P}{\lambda_1} \quad (9)$$

① 应该采取那种交通强度能引起最大疲劳现象的汽车，作为计算汽车。

式中 $\lambda_1 = \frac{\lambda}{1.5}$ ，即对重交通量相对形变减低到0.0017，而对中等交通量减低到0.002。

前面已经指出，交通量在此是用采取不会发生疲劳现象的最大容许形变来考虑的，减低形变1.5倍是为没有考虑逐层计算结构时 D 的增大而引起的。

对于交通量不大的次等道路，可以把 λ 提高到0.003~0.004。

路面各别结构层和路基土的弹性模量应该在计算相对形变时确定。

用直径30~35厘米的刚性承载板测定土或路面结构的弹性模量很方便，承载板传递的荷重与车轮下最大压力 Q 相适应，其作用时间 T 等于0.02~0.1秒。测定形变 l 后，容易得到

$$E_y = \frac{Q}{Dl} \quad (10)$$

各别层的弹性模量需要由计算确定，假如顺序分层测定弹性模量，利用公式(10)时不需引用系数 α 或增大了的 D 。

为了保证荷重作用时间（参看本文第四节），建议将重物（即重锤） P 由高度 H 抛到（实际上为自由下落—译注）能保证必须加荷时间的弹簧上。

例如，在静荷重 $P=50$ 公斤作用下弹簧形变 $\delta=0.4$ 毫米时，荷重作用时间 $T=0.02$ 秒。

在这种情况下，当将重物由高度 $H=2$ 米抛下时，冲击力 $Q=5,000$ 公斤。

可以利用普通的压入承载板法测定相对形变，进行多次加荷和卸荷，但必须考虑松弛现象。同时，由于荷重作用时间较长，得出的形变 l 可能较抛重物时的形变大20~25%。

同样可以根据汽車車輪下的弯沉值来确定弹性模量（参看本文第四节）。在这种場合

$$E_y = \frac{4Q}{\pi D l} \quad (11)$$

許多野外試驗的整理結果表明，当相对形变为 0.003 时，长期弹性模量 E_y 与形变模量 E_x 的比值在多数場合接近于 3~4。

因为，根据公式(8)和(9)要求的长期弹性模量也較要求的形变模量大約高 2~3 倍，按照弹性阶段的計算結果将接近于按照形变模量的計算結果，注意到近似地

$$\frac{E_{\text{эKB}}}{E_1} = \frac{E_0}{E_1} + A \frac{h}{D}$$

式中：A——系数，变化在 0.20~0.30 的范围內。

由根据公式(5)繪制的諾謨图中也可得出这一点，在图中

$$\frac{h}{D} = \phi \left(\frac{E_0}{E_1}; \frac{E_{\text{эKB}}}{E_1} \right)$$

上层 $\frac{E_y}{E_x}$ 的比值約等于 4~5，它的影响在短时荷重时将

略大，看来这点不應該遭到异議。

測定弹性模量用的压力机比測定形变模量用的可能輕很多（5~6 吨），或者甚至可以直接用汽車車輪或冲击裝置替代它。

測定弹性模量要簡單得很多并快很多，因为沒有必要像測定形变模量时那样把荷重維持到形变不再增加。

在加荷時間、极限形变、将实际的汽車数量換算到計算汽車的方法諸方面的条件性在新方法中不再存在。

在春季可以檢驗所建结构的实际形变。以后还将找出某种

最大計算含水量時的形變與試驗期間含水量時的形變間的關係。到那時候將可能在任何季節試驗和驗收道路結構。在波蘭、匈牙利和捷克斯洛伐克已經有類似的意圖，在這些國家擬訂了所量得的形變的修正表，修正值與路基土和季節有關。

二、柔性路面試驗新方法

用荷重試驗路面的現有方法

按照現行全蘇道路科學研究院的方法〔4〕，在承載板上的荷重應該直增加到承載板的相對沉陷對高級面層等於0.035為止。這樣，假如路面形變模量等於500公斤/厘米²，則在承載板上的荷重為10噸時才能達到承載板的相對沉陷為0.035。當形變模量為700~1,000公斤/厘米²時，承載板上的荷重相應的應為14噸和20噸。因而，測定形變模量的裝置，應該預定在承載板上造成不小於20噸的荷重。假如利用汽車或掛車作為承載板的支承，則車和重物的總重應該比承載板上要求的荷重大50~100%。只有全蘇道路科學研究院有這種巨大的裝置。

按照全蘇道路科學研究院的方法測定形變模量時，要花費很多時間在保證承載板完全緊貼在面層表面上以及維持每級荷重到沉陷完全消失。結果，測定形變模量的延續時間為2~4小時。

全蘇道路科學研究院方法的這些特點阻礙着它的应用，並要求尋找沒有上列缺點的路面強度評定新方法。

國外用載荷方式試驗路面時，用不同的方法進行。例如，在瑞典〔8〕試驗按照有些類似全蘇道路科學研究院方法的方法進行，但承載板上的荷重只增加到6噸（在最重汽車車輪上的荷重）。