

87.307

RJC

公路工程参考资料

第七輯

人民交通出版社

本輯發表的四篇文章均選譯自蘇聯《路面強度的研究》一書。這四篇文章介紹了柔性路面計算問題的現狀、路面使用情況的調查、路面及土壤強度的試驗和研究情況以及柔性路面新計算方案的設想等，可供我國道路工程技術人員、有關專業師生及其他科學工作者研究參考。

公 路 工 程 參 考 資 料

(第 七 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號

新華書店北京發行所發行 全國新華書店經售

人 民 交 通 出 版 社 印 刷 廠 印 刷

*

1962年9月北京第一版 1962年9月北京第一次印刷

開本：787×1092 1/32 印張：5 1/2 張插頁1

全書：127,000字 印數：1—1,000冊

統一書號：15044·1461

定價(10)：0.78元

目 录

柔性路面計算問題的現狀..... H.H. 伊万諾夫 (2)

現有道路上瀝青混凝土路面使用情况的

調查研究..... П.П. 叶烈明 M.Б. 科尔宋斯基

A.M. 克利威斯基 M.Г. 密尔尼可娃

A.A. 那傑日科 (25)

利用移动式試驗車研究路面

及土壤的強度 H.A. 普扎科夫 (94)

柔性路面計算方案的問題 M.Б. 科尔宋斯基

A.M. 克利威斯基 (173)

柔性路面計算問題的現狀

技術科學博士 教授

H. H. 伊方諾夫

從文獻中可以看到，目前幾乎在所有國家都在熱烈討論柔性路面厚度的計算方法。總共有數十種計算方法。不管在所採用的前提方面還是在所得的計算厚度方面，這些方法都是不同的。

盡管理論論據及所採用的計算方案不同，所有這些方法可以分成數類[1, 8, 9, 10, 11及12]①。

確定路面厚度的經驗方法。此方法以不同等級道路上的道路結構之使用經驗為基礎，不作任何理論論證，但是考慮路基土、氣候及水文條件的特性。在許多國家中都有過並且現在還有這類方法，它們的名稱不同，但是，目前正在完全不用或被科學上更有論據的方法所排擠。例如，在1955年美國許多州及組織中，由公路工程總局所提出的名稱叫分組指數、結構的密歇根圖冊等等的許多建議，就是這類實際例子。在許多國家中有路面結構厚度的具體建議值。

根據實驗室中或野外條件下的路基土的承載能力，確定基層及面層（兩者合在一起）厚度的方法。盡管方法本身是不完善的，目前這類方法最普遍，它們以很多不同的方案出現，有時還企圖考慮各別結構層剛性的影響。屬於這一類方法的有：

① 方括號〔 〕中的數字為參考文獻的序數——譯者。

伟大卫国战争前所采用的并纳入1938年公路总局的技术规范中的作者的旧方法〔2〕；外国文献中所公布的许多方法，其中包括很普遍的CBR法；以三轴压缩试验（确定等侧压力或可变侧压力作用下的剪切曲线）为基础的方法；以布辛纳定理为基础的方法；以及以压力通过均匀体或多层体而分布的更简单的假设为基础的方法。所有这些方法中最主要之点是，在某种假定的相对形变或绝对形变下〔13；14〕，确定土及基层各结构层的承载能力。总厚度按照经验曲线或各别公式确定，公式中用经验系数考虑车辆组成，交通量及气候条件的影响〔15，16，17及18〕。

以确定在计算荷重作用下道路结构任何一层中的应力或形变为基础的方法。在这些方法中，都利用弹性理论的一般原理并作某种假设。按照这些方法计算时，是以假定路面完全符合直线变形规律为出发点的，通常不考虑不同荷重反复作用的影响，而且也没有建议容许应力及容许形变的具体数值，毫无疑问，这样就限制了应用上述方法于计算的可能性。属于这一类方法的有：Б.И.柯岡的方法（哈尔科夫公路学院）〔5〕，布尔米斯吉尔的方法〔19〕，以及在美国〔20〕、英国道路试验室〔10〕及法国工程师然夫鲁阿〔21〕所拟定的若干方案。

在这些以弹性理论规律为基础的方法中，常常在公式中引入形变模量以代替弹性模量，形变模量是考虑总形变确定的，而不单是考虑弹性形变。有企图利用材料的纯粹弹性特征来计算，并从车轮在路上作用的短时性出发（此时所得的形变主要是弹性形变），来建立计算方案〔21〕。对这种建议来讲，必须利用弹性模量，并采取没有疲劳现象时的弹性形变作为容许形变〔22〕。有时认为（胡特与格斯），反复作用的安全系数（根据我们的理解）大于4时，可以把形变当作都是弹性的〔23〕。

用确定弹性波动传播速度的方法，来求得各种不同结构的各层的弹性模量〔24〕。属于本组的这些方法，目前正处于研究阶段，因此，并没有作出具体建议。

我们的试验表明，根据确定形变模量时的卸荷曲线，直接计算弹性模量，所得的结果过小〔7〕。

以面层的极限容许形变而不是以基层的承载能力为基础的计算方法。在这些方法中考虑了，道路结构及路基土与直线形变规律的偏差，并考虑了在一定的场合，它们接近于弹性-粘滞性-塑性体。因此，在弹性理论公式中，必须引入考虑下述因素的附加系数：结构工作的条件，材料的不均匀性，车轴上荷重不同的汽车作用时的过载，以及交通量不同时的过载。所有这些都指出，这种方法已不再是纯粹的理论方法，而在一定程度上变成了经验方法。但是，这个经验方法，是以一定的说明工作条件及所用材料特点的理论前提为基础的，是以试验资料为基础的，是以在试验室条件下以及直接在使用道路上所进行的观测而得的资料为基础的。与前面所列举的方法不同，不是用假定的指数或系数来反映试验或观测的资料，而是用由经验得到的并以一定理论关系为依据的数值指标来反映试验或观测的资料。

目前在苏联所应用的柔性路面计算方法〔3, 25及26〕及某些外国的建议〔1, 9及11〕（诚然，比我们的方法在较小程度上满足于前述的原理），在实质上是属于这一类的。苏联的建议与外国的建议间的主要原则性差别在于，在苏联在计算中采用道路结构使用的最不利时期（在北方是春季，在南方是冬季及春季）中所积累的总形变，而在外国（美国、英国、法国、荷兰及其他国家）则采用由计算汽车所产生的最大一次的形变。

“计算汽车”的概念也是不一样的。在苏联当将形变相

加时，引用計算汽車（目前是 H-13，車輪上的压力为 4550 公斤）的相当数量这一概念，相当数量是由形变相等的条件或反复作用安全系数相等的条件确定的。对車輪上压力为 2275 公斤（参看图 8）的計算汽車，赫微姆（加利福尼亚州）作了类似的建議。但，他不是从最不利的季节出发，而是从面层的总使用期限出发的〔27〕。

有时（莫·道威尔，吉哈斯州）〔15〕采用昼夜中最重汽車車輪压力的平均值作为計算压力（这一数值一年年地增加）。在法国〔9〕，車輪上的計算压力，按照与一年內在 1 米寬行車道上所通过的总吨位数有关的經驗公式确定。在英国〔17 及 32〕，在計算中采用載重 3 吨以上的汽車重量的总和。

根据工程师別利叶〔1, 11 及 28〕的意見，目前在所有国家中，当計算路面时，有拒絕使用路基土上容許压力的傾向。在計算中，正像在苏联所作的那样，开始考虑面层上层及基层上层的容許垂直形变。这样，就在鑑定道路面层强度方面，創立了一条原則上新的途径。

密歇根大学的教授霍烏習尔〔15〕指出，目前在美国各个地方都出現增加路面厚度的傾向，其目的是，保証道路面层有必須的使用期并减少面层上的破坏数量。根据他的意見，这些破坏是結構厚度不足的结果，而結構厚度的不足是由于沒有充分考虑交通量的增长，重型汽車車軸上压力的增加以及重型汽車数量的增长。

苏联也有类似的情况。在苏联，汽車总数中載重汽車的比重更大（占 70~80%，而在美国只有 15~20%），而計算汽車数量的增长，不单是由于交通量增长的结果，而且是由于更重的汽車及公共汽車产量增加的结果。

在本文中沒有可能闡述所有的，甚至是最普遍的計算方

法，这样做显然也没有实际意义。因此，仅限于阐述某些在苏联还了解得不够的最典型的方法。

第1类方法不值得深为关切，因而不予研究。在第2类方法中，应该讨论一下CBR的方案（美国），福克斯的方法（英国），应用三轴压缩试验及土的承载能力的诸方案。

CBR法，在苏联文献及苏联的翻译文献中，已不止一次地阐述过了〔3,8,9,10,12,17,18及27〕。确定CBR指标的方案，涉及润湿试样的方法，有时还涉及压实试样的方法（当用结构破坏的土时），涉及承载板周围有无附加荷重，涉及进行压入试验时承载板压入的速度（通常1.25毫米/分钟）。确定CBR指标的方法是以将承载板压入一定深度（2.5毫米）时的土的承载能力为基础的。因为，通常所用的承载板的直径为5厘米，则相对的压入形变等于0.05。在苏联所应用的形变模量值^①与CBR指标（如采取同一相对形变下的压入值）之间的比例关系等于14（按照CBR法，碎石的承载能力取作100，而其形变模量等于1400）^②。但是，这种换算在一定程度上是有条件性的，因为确定形变模量的方法与确定CBR指标的方法不相同。

第1，CBR指标是在实验室中尺寸较受限制的试样上确定的——在直径为15厘米，高为12.5厘米（图1）的刚性筒

① 外国与苏联不同，确定形变模量时引入波桑系数， $E = \frac{PD}{l}(1-\mu^2)$ ，式中

P —形变 l 时的单位荷重。通常采用 μ 的数值等于0.5，此时， $E_0 = 0.75$

$\frac{P}{\lambda}$ ，在苏联采用的是 $E_0 = \frac{P}{\lambda} = \frac{E}{1-\mu^2}$ 。

② 在外国的文献中，这一比值有时变动于10~30之间，因为形变模量是在不同的相对形变下（而不是在0.05时）确定的〔21及29〕。

中。这样，就无条件地稍許提高了获得的結果。大的形变速度也稍許增大了形变模量值，虽然，最近的研究表明，对大部分材料及土来講，这种增大沒有超出确定精度（即試驗精度——譯者）的范围〔7〕；这是由于下述原因决定的，即，当形变速度增加时，土的粘滯性就降低。

第2，正如外国（其中包括美国）在实验室中及道路上的試驗所表明的，压实試样的方法及試样飽水的时间（通常是4昼

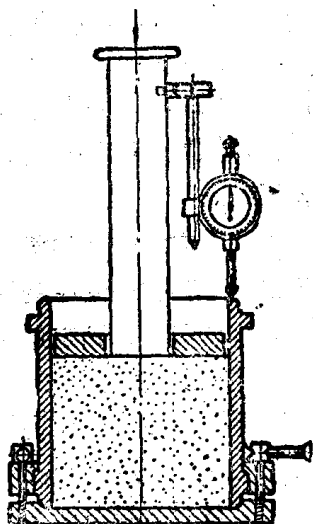


图1 确定CBR指标用的仪器

夜），对 CBR 指标的影响甚大：对于輕質（即粘性小的——譯者）土壤，CBR 指标降低〔30,31〕，而对粘性很大的土壤，CBR 指标則增大。大概这也就說明了，为什么甚至在美国，都有許多 CBR 法的修改，因而，也就不可能将所得的結果进行比较。例如，在法国〔22〕認為，CBR 法所表示的，不是土的力学性質，而仅是将土归入某种分类組的符号；并且建議，用

30%的准确度（如压入承載板时那样）按公式 $\frac{4250}{FI}$ 确定 CBR

指标，式中 F ——土的液限， I ——土的塑性指数。因此，在法国就不再考虑土的压实度及其潤湿程度，在英国則坚决反对这种做法〔9,10,12及17〕。

从上面所講的可以看到，确定 CBR 指标及确定形变模量之間的差別是，在第一种情况下，压入承載板只进行到相对形变0.05，而在第二种情况下，則进行到与面层极限形变相应的

形变（对柔性路面是0.01，对刚性路面是0.001）。CBR 指标中最严重的偏差，是由任意采用潤湿实验室試样的时间——4 昼夜所引起的；如将实验室中确定的結果与在路面下土基上进行压入試驗的結果相比，則 CBR 指标間的偏差达 5 倍甚至更多〔30〕。

这个方法的下半部分，即涉及确定道路結構整体的厚度及其中各別結構层的厚度的这一部分，遭到了数量最多的改变。在某些情况下，确定总厚度的公式或曲綫帶有純粹的經驗性，从道路狀況的观测資料与現有路面厚度的比較中，簡單地得出这些公式与曲綫。在另一些場合，根据某种簡化了的、关于压力在多层路面中的分布的建議，确定結構的总厚度〔2 及 18〕，有时还针对气候条件、車輛組成及交通量作些修正；而有时将厚度与道路使用若干年后的面层狀況相比，针对不同結構层的刚性作些修正。

由图 2 可以看到，有时得出的路面厚度間的差別甚大。在維尔吉尼亚州，除图 2 上所引的曲綫外，还针对車輪上的不同荷重，建議路面的最小厚度（表 1），并按土的三个指标进行比較：按 CBR，按承載能力，按地基系数（表 2）。

在弗吉尼亚州的建議中，注意了基层的 CBR 指标。这个指标非常重要，因为当基层的刚性小时，在面层中，特别是在瀝青混凝土面层中，不可避免地要产生裂縫〔22〕。根据我們的計算〔4〕，所建議的基层指标尚不够，應該再增加半倍。在赫尤斯与奥格尔斯皮的書〔8〕中，基层 CBR 指标的最小值采用 80 是較為可靠的。

作为对过去苏联書籍中所闡述过的确定路面厚度方法〔8，9，10〕的补充，我們再引述目前在美国的一些公路部門中所采用的某些典型方法。密苏里州的戴維斯和崇恩建議根据图 3 的

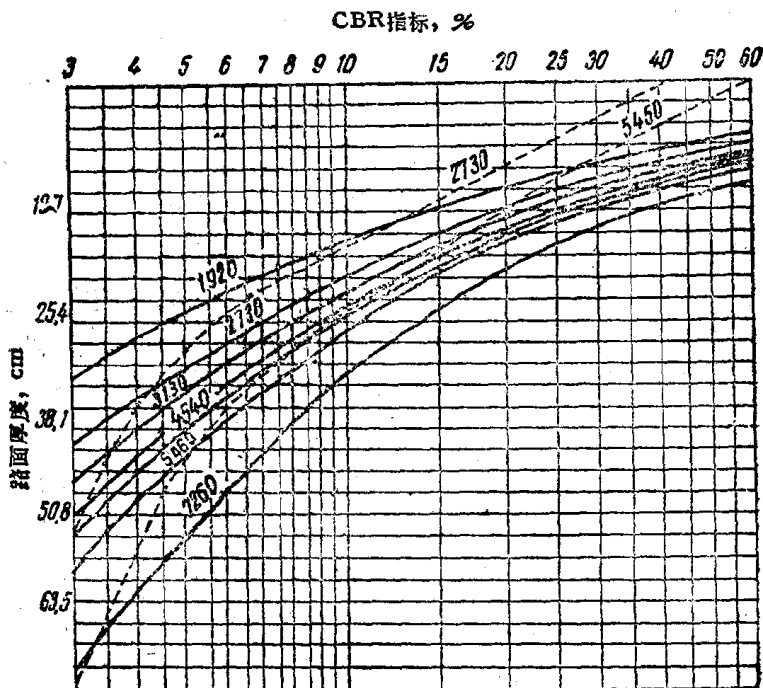


图2 根据 CBR 法确定路面厚度用的曲线
 实线-美国军事-工程师团所用的曲线； 虚线-弗吉尼亚州推荐的曲线[10]；
 曲线上的数字表示车轮上的压力，单位是公斤

车轮上的荷重不同 表1 比较土的三个指标 表2
 时，路面的最小厚度

车轮上的 压力, 公斤	基层的最小 CBR 指标, %	路面 (基层及 面层) 的最小 厚度, 厘米	CBR 指 标, %	地基系数, 公斤/厘米 ³	承载能力, 公斤/厘米 ²
			3	2.8	0.35
≤4100	45	15	10	5.6	1.4
5460	55	18	20	6.9	2.1
6800	60	20	50	12.3	3.5
9100	65	23	70	16.6	4.2
11350	70	23	90	19.4	6.0

曲线确定路面厚度。图3上横坐标的上面标有民用公路局的土分类并标有 CBR 指标,而横坐标的下面,则标有土的分組指数。土的分組指数是根据某种尺寸顆粒的数量,或根据用普洛克托尔法所定出的土的液限、塑性指数及其单位重的指标确定的。在这种场合, CBR 指标也仅用于进行土的分类;而引入压实度就表明,路面厚度不仅与土的特性有关,而且在一定程度上也与土的压实度有关。路上的交通量用4根曲线表示。此处还没有考虑車軸上的不同压力对路面厚度影响的不同。计算是根据分組指数及重型汽車的数量进行的。在某些情况下,并考虑压实度。在计算中,不将路面分成基层与面层。

尽管密苏里州处于有利的气候条件下(冰冻深度变化在

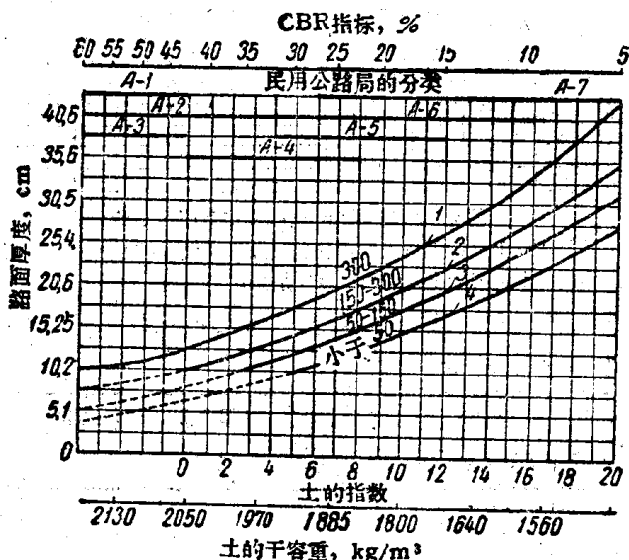


图3 在密苏里州(美国),确定柔性路面厚度用的曲线;曲线上的数字表示一昼夜中公共汽車与載重汽車的数量

- 1-很重交通量; 2-重交通量;
- 3-中等交通量; 4-輕交通量

13~50厘米之間)，即使野外研究証实可用較薄的結構，也不建議 2 等公路的基层薄于20厘米，面层薄于 4 厘米。

在英国[17及 32]，按照 CBR 法計算时，目前根据双向通过汽車的数量，采用 6 根曲綫。根据这些曲綫，既确定路面的总厚度，也确定路面中各层的厚度。如果只根据下面一层的 CBR 指标（图 4）来确定各层的厚度，当然，在原則上是不正确的。

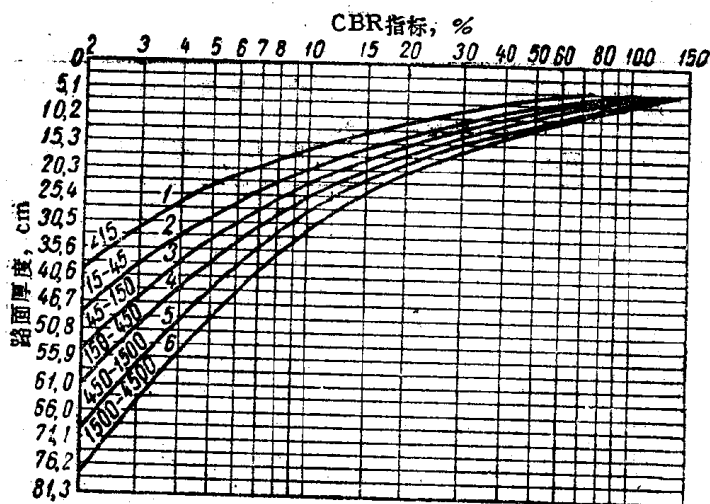


图 4 在英国按照 CBR 法 确定柔性路面厚度时用的曲綫（曲綫上的数字表示一昼夜內汽車的数量）

1-極輕交通量，每昼夜0~100噸；2-很輕，100~400噸；3-輕，400~1500噸；4-中等，1500~4000噸；5-中重，4000~12000噸；6-重，12000~36000噸（很重交通量一大于36000噸）

在怀俄明州(奥林格尔)[15]，用20年內換算（車輪上的計算压力为2275公斤）后的汽車数量檢驗路面的厚度。在此，并建議相应的行車道的寬度及路面的最小厚度（表3）。曾确定，在这个州，从1951年到1971年期間，車輪压力为2275公斤

的載重汽車的相當數量，將增長到4000萬輛，而從1946年到1966年期間，曾確定只有1500萬輛。10年（從1941年到1951年）內在州際公路上，載重汽車的數量在許多場合都增加了1倍或更多些。在1951年到1971年期間，載重汽車數量採取平均增加2倍，而在州內最重要的公路上——增加1.5倍。在土質不好的低地，根據 CBR 曲線確定路面的厚度，此時厚度常超過最小厚度約1倍。

怀俄明州公路的通过能力

表 3

20年內換算后的 汽車數量 (一個方向), 百萬輛	基層下面的 寬度, 米	面層寬度, 米	最小厚度, 厘米		路面總的最小 厚度, 厘米
			面 層	基 層	
0~0.25	7.9	6.1	3.8	7.6	11.4
0.25~1	8.5	6.7	3.8	7.6	12.7
1~3	9.1	7.3	3.8	7.6	14.0
3~5	12.2	8.6	5.1	10.2	15.3
5~7	12.2	8.5	5.1	10.2	16.5
7~9	12.2	8.5	5.1	10.2	17.8
9~11	12.2	8.5	5.1	10.2	19.0
11~14	12.8	8.5	6.3	10.2	20.0
14~17	12.8	8.5	6.3	10.2	21.6
17~21	12.8	8.5	6.3	10.2	23.0
21~26	12.8	8.5	6.3	10.2	24.0
26~32	14.6	8.5	6.3	12.7	28.0
32~40	14.6	8.5	6.3	12.7	29.0
40~50	14.6	8.5	6.3	12.7	30.0

用所謂的三軸壓縮試驗，在實驗室中確定土及道路材料的性質，並以此為基礎的方法，在國外得到了廣泛的應用。

第1法。組成可變的側壓力，在壓縮試件時，利用莫爾圓可以根據兩個主應力差的一半計算剪應力。我們引用吉哈斯州

馬克多維爾的資料[15]作为例子，在此，土或其他材料的强度由剪切試驗确定，并将所得的面层与汽車車輪下可能的剪切力比較。根据計算数值与道路結構使用期的比較，确定安全系数。

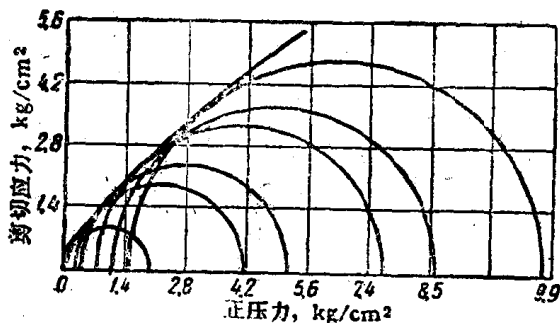


图5 某种路基土的莫尔图

剪切的特性，更确切些——极限平衡时的摩擦角及粘結力通常是用沿着莫尔圓作一根近似直綫的切綫的方法确定。莫尔圓是根据試样上不同的正压力及側压力繪制的（图5）。

为了說明各种不同土的特性，可以繪制剪切曲綫（图6）。

图7上的曲綫是針對着車輪上的不同压力繪出的，車輪上的压力采用一昼夜中10个最重車輪的平均压力。利用这些曲綫可以計算路面的厚度，也可以計算路面中各个結構层的厚度。

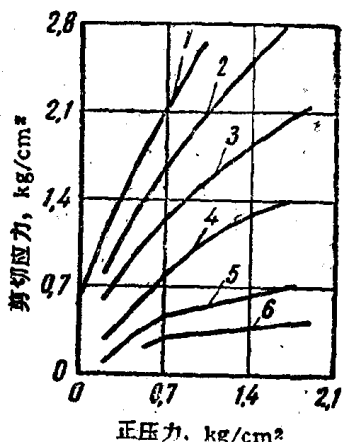


图6 用剪切曲綫進行土的分类

- 1-好土（用作1等基層）；
- 2-較好土（用作2等基層）；
- 3-作基層的下層（3等）；
- 4-較次的及坏的下墊土（4等）；
- 5-軟土（5等）；
- 6-極軟土（6等）

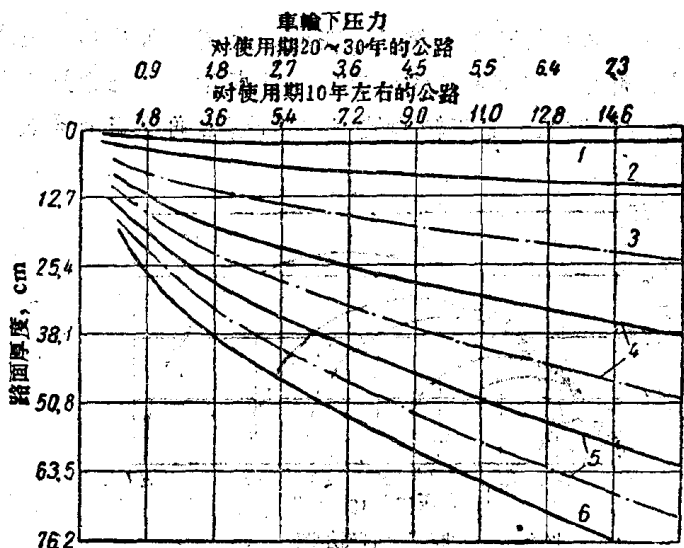


图7 确定路面各層厚度的图解（曲綫数字与图6者相同）

應該指出格里斯〔23〕及阿尔姆斯脫隆克〔17〕所持观点的錯誤性，他們認為，在任何材料上都可以确定路面的厚度，而不管該材料层本身的厚度。如果应用我們的理論，就可以明显地看出这点。为了将各种不同双輪車輪下的压力，換算成压力是2275公斤的双輪車輪的相当数量（根据赫微姆），可以用图8的綫图。

第2法。保持側压力不变，与道路結構中的側压力相似。可以引述康泽斯基的方法〔15及27〕作为例子。这个方法形式地考虑了道路結構可能遇到的各种可变条件。

路面厚度根据略予改变的巴尔密尔及巴尔别尔的公式（美国）〔33〕^①确定：

① 尽管它有缺点，此公式还是比后来端尔恩巴尔及阿尔維的公式为好〔18〕。

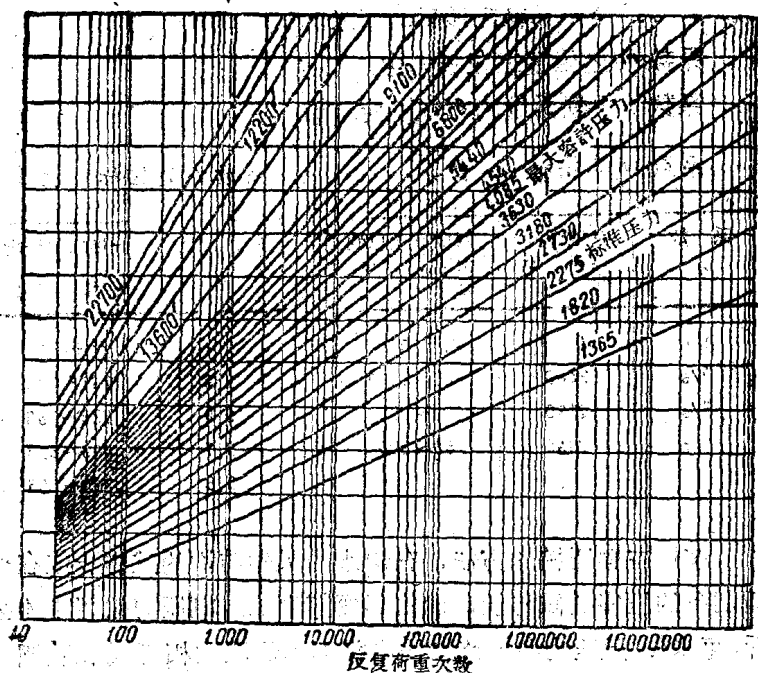


图3. 把各种汽车车轮压力换算成双轮车轴的相当数量的赫兹曲线图
(曲线上的数字表示车轮下的压力, 以公斤计)

$$T = \sqrt{\left(\frac{3pmn}{2\pi cS}\right)^2 - (6.45a)^2} \sqrt[3]{\frac{C}{C_p}}$$

式中: T ——单层路面的厚度, 厘米;

C_p ——面层的形变模量 (公斤/厘米²), 由三轴压缩试验确定;

C ——基础土的形变模量, 由三轴压缩试验确定;

p ——车轮下的计算压力 (通常是4100公斤);

m ——表示交通量的没有单位的系数;

n ——与雨量有关的没有单位的系数;

a ——轮胎接触面积相当圆的半径, 厘米;