

道路結構設計中 土壤抗剪強度的計算

В.Д. 卡札爾諾夫斯基 著

吳佩瑜 朱照宏 等譯

楊 家 琪 校

人民交通出版社

道路結構設計中 土壤抗剪強度的計算

В.Д. 卡札爾諾夫斯基 著

吳佩瑜 朱照宏 等譯

楊 家 琪 校

人民交通出版社

本書闡述了柔性路面設計中剪應力和土壤抗剪強度的計算、粘性土抗剪強度與含水量和密實度間的關係、設計路面時抗剪強度計算參數的選擇等問題。此外，還介紹了測定抗剪強度最簡單的儀器。

本書由吳佩瑜、朱照宏、楊家琪、朱以敬等同志譯，由楊家琪同志校。

本書可供道路科研工作者、工程技術人員及有關院校師生參考。

道路結構設計中 土壤抗剪強度的計算

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

В. Д. КАЗАРНОВСКИЙ

УЧЕТ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ГРУНТОВ СДВИГУ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА
И ШОССЕЙНЫХ ДОРОГ РСФСР
Москва 1962

本書根據蘇聯汽車運輸與公路部出版社1962年莫斯科俄文版本譯出

吳佩瑜 朱照宏 等譯

楊家琪校

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

1964年2月北京第一版 1964年2月北京第一次印刷

开本：787×1092 1/32 印張：1 1/4

全書：25,000字 印數：1—2,500冊

統一書號：15044·1482

定價(科六)：0.18元

目 录

序 言.....	2
柔性路面设计中剪应力和土壤抗剪强度的计算.....	3
粘性土壤抗剪强度与含水量和密实度的关系.....	14
抗剪强度和压实.....	24
设计路面时土壤抗剪强度计算参数的选择.....	30
测定土壤抗剪强度最简单的仪器.....	33
参考文献.....	37

序 言

抗剪强度参数——粘聚力与内摩擦角是路基土壤以及路面各种结构层組成中任何材料的具有物理根据的强度特性。近年来，由于路面强度理論的进一步发展，因而有必要对土壤的抗剪强度加以研究。

莫斯科公路学院工程地质和土力学教研組研究生B.Д.卡札尔諾夫斯基在本文中叙述了运用土壤的剪切特性来解决道路結構設計中，如路面計算和土壤压实这样的基本問題。

試驗結果是非常有意义的，它揭示了粘性土壤抗剪强度与其含水量和密实度之間的規律性。

本书中所叙述的理論原理和試驗結果如果运用在路基的建築与設計中，将能帮助我们更正确而有理論根据地去解决一系列問題。但是，提出的某些原理仅能在实践中和仅能在施工、設計以及科学研究机构的工作者共同参加下才能得到驗證。

批評、建議和意見請逕寄莫斯科 Д-57 列宁格勒大街64号莫斯科公路学院工程地质教研組。

莫斯科公路学院科研副校長、

技术科学博士B.Ф.巴布柯夫教授

莫斯科公路学院工程地质和土力学

教研組主任、技术科学博士H.H.馬斯洛夫教授

柔性路面設計中剪應力和 土壤抗剪強度的計算

路面的工作階段

近年來，根據蘇聯學者對路面在各種不同條件下工作狀態的研究以及多次觀察結果的分析，可以作出如下的結論：路面結構可以工作於彈性階段（彈性-粘滯性），或是彈塑性階段（彈性-粘滯性-塑性）〔1〕。

路面結構在這一個或那一個階段的工作情況，在本質上是截然不同的。在第一階段，僅在路面新建初期，由於路面結構材料和土壤的補充壓實才可能產生殘余變形。這種變形逐漸減小，如果沉陷不致造成路面破壞，則承載能力就有所增高。在第二階段，殘余變形並非與補充壓實（壓密）有關，而是由於承載面積下某些結構層材料的塑性擠出所造成的。當塑性現象發展到一定的程度時變形不能隨著時間而消失，最後終於導致路面的破壞。

第一階段和第二階段殘余變形成因的原則性區別是：在第一階段補充壓密過程中，殘余變形是由於法向應力（壓應力）的作用所引起的；作為第二階段的殘余變形，則是由於作用在最危險面上的切向應力（剪應力）所引起的。因此，如果在第一階段計算中，須按法向應力導算，則在第二階段工作中還必須計入切向應力。

最近，愈來愈廣泛地有着下列意見：高級和次高級路面應按工作於彈性階段來設計，即在荷載作用下結構中不產生任何殘余剪切變形〔2、5和8〕。因此，必須要會確定從彈性階段到

塑性阶段过渡的边界。順便指出，按現行柔性路面設計方法所决定的形变模量值不能回答下一問題：該結構在荷載作用下将工作于那一阶段。为解决这一問題，就必须簡略地讲到均质体在靜載承載板压入时的現象。

承載板压入均质体时的变化过程

承載板压入土体的大量实验表明，形变与荷載的关系曲线一般具有两段：第一段——直线或凹形线，第二段——弯曲的凸形线，此后承載板就急剧地下沉（图1）。还在1930年，H.M.

盖尔謝万諾夫就根据类似的曲线图的分析采用了变形三阶段的概念：压实阶段——第一段，剪切阶段——第二段和臌出阶段。与此相应，在承載板压入曲线上可以指出两个特征点： A 点——代

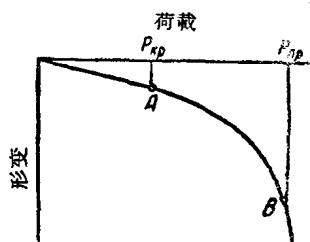


图1 靜載承載板作用下的形变与荷載的关系

表自压实阶段到剪切阶段的过渡点， B 点——表示自剪切阶段到臌出阶段的过渡点。在此情况下，每一点都相应于某一个一定的应力值——第一点为 P_{kp} ，第二点为 P_{np} 。

确定这些临界应力对正确設計任何結構物都极为重要。例如，如果要求結構物的基础工作于压实阶段的范围内，則由結構物传递到土上的应力不应超过 P_{kp} 。在任何情况下，实有应力不应超过 P_{np} ，否則将产生土基稳定性的彻底破坏。

在各个具体情况下的临界荷載值可以根据多次試加荷載試驗（承載板压入試驗）确定。但是，由于这些試驗的工作量极大并且有其他一系列的困难，因而促使許多学者試拟各种可以根据某些很易确定的土壤特性来算出极限荷載的理論方法。

到目前为止，已提出很多公式，其中有概略的、有半經驗的、也有很精确的（盖尔謝万諾夫、杰尔察吉、伊万諾夫、別烈尙采夫、索科罗夫斯基等），从这些公式中可以計算出土壤的极限承载能力值 p_{np} 。由于在这些公式的結論中，都认为土壤稳定性的破坏图式是剪切，所以在这些公式中都列有抗剪切指标——內摩阻角 φ 和粘聚力 c 。因此，为决定 p_{np} 值，不再采用多次試加荷載法，而代之以实驗室測定 φ 和 c 值，然后按公式算出所需数值。

但是，有时必須限定土基工作于第一阶段（压实阶段）的范围内。此时，算出 p_{np} 值，仍不能解决問題，因为在一般情况下不能从 p_{np} 值算出 p_{kp} 值。

根据弹性理論对承载板作用下土体内应力状态变化的分析，并同时采用摩尔强度理論，有可能获得这个問題的近似理論解。对柔性承载板情况下的研究指出，从某一个荷載值 p 开始，在靠近承载板边缘的土內形成所謂破坏区域。这些区域的特征是，在其中每一点上作用在最危險截面上的剪应力都是大于（在边界綫上为等于）土的抗剪强度。H. П. 普寿烈夫斯基和后来的 O. 佛辽里赫对柔性承载板的情况，求得了解算还未出現破坏区域的临界荷載的公式：

$$p_{kp} = \frac{\pi \left(\gamma h + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi} \right)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma h \quad (1)$$

式中： γ ——土的容重；

h ——承载板沉入深度（ γh ——超載）；

c ——粘聚力；

φ ——內摩阻角。

求得，土壤在承载板下的任何一点都未超越抗剪强度时的荷载之后，公式(1)就能在理論上确定出从压实阶段过渡到剪切阶段的轉折点。为保証土基工作于第一阶段的范围内，則实有荷载不应超过按 H.П. 普寿烈夫斯基公式計算而得的 p_{kp} 值。

将靜載試驗的結果与重复荷载試驗結果相比拟，可以得到結論，不論在那种荷载情况下，只要当作用荷载超过一定数值时，就会产生土体工作阶段的变换。同时，在重复荷载下的弹性形变阶段按其性质相似于靜載作用下的压实阶段，而弹-塑性形变阶段則相应于剪切阶段。还須說明的是，那些属于靜載作用下的理論原則对于重复荷载作用下可以适用到何种程度。

采用 H.П. 普寿烈夫斯基的原則作为当重复 荷载作用时由弹性阶段过渡到弹塑性阶段的标准

只有在某一点超越了抗剪强度的时候，才有可能过渡到具有塑性变形的阶段。不論在靜載作用下，或是在重复荷载作用下，这一情况是与抗剪强度和实有剪应力的对比值有关。从理論上來說，在靜載时从压实阶段到剪切阶段的过渡发生于当荷载大于按 H.П. 普寿烈夫斯基公式計算而得的 p_{kp} 时，因此值得驗核普寿烈夫斯基公式对重复荷载下弹性阶段过渡到弹塑性阶段的条件究竟适用到什么程度。为此，我們对 A.M. 克里威斯基的試驗結果进行了分析 [9和10]。

图 2 所示为 A.M. 克里威斯基对粉质亚粘土类土所作試驗的結果。对各种不同密实度和含水量的土壤用直径为 4~5 厘米的承载板在各种不同大小的重复荷载作用下做了試驗。在此图中也繪出了临界荷载曲綫，临界荷载是按 H.П. 普寿烈夫斯基公式对各种不同含水量根据該种土壤內摩阻角和粘聚力与含水

量之間的关系計算而得的。

从图中可以看到，当含水量約在液限的0.75时，按普寿烈夫斯基公式計算而得的临界荷載，与在重复作用下产生破坏的荷載极为相近。当含水量更大时，在重复荷載作用下的破坏值較公式(1)計算而得的数值略小。

图3中所示为我們对亚粘土所作的若干試驗的結果。施加荷載采用手工操作，加载的情况是：荷載一个循环的作用时间为1秒，取下和放上荷載之間的时间間隔时间为1秒。試驗时所用承載板的直径为2.5厘米。

所得結果指出，按公式(1)計算而得的荷載与这样的荷載极为相近，即当超过这个荷載时，在重复荷載作用下残余形变的累积速度便急剧地增长。从这里可以作出結論，在該情况中按普寿烈夫斯基公式所作的計算可以足够精确地获得极限应力值，当超过这个数值时，土壤开始工作于塑性变形阶段，而这种塑性变形最后导致土壤的破坏。

应当說明，在我們的或是在克里威斯基所作的試驗中，当荷載小于按普寿烈夫斯基公式的計算值时，也发生一定的残余形变累积。这是由于試驗时采用了刚性承載板，在这方面，按普寿烈夫斯基的計算具有一定程度的假定性。

关于公式(1)对所定目的的适用性的最后結論只有在經過

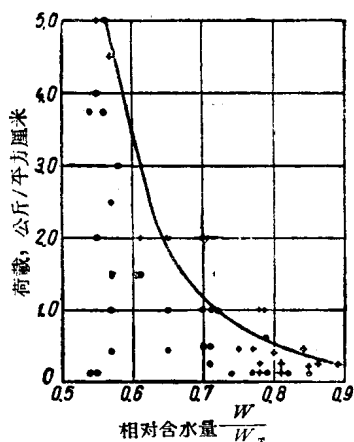


图2 在多次重复荷載作用下土壤的試驗結果(按A.M.克里威斯基数据)

- 在重复荷載作用下土壤強化;
- + 在重复荷載作用下土壤破坏;
- 按H.П.普寿烈夫斯基公式計算而得的临界荷載綫

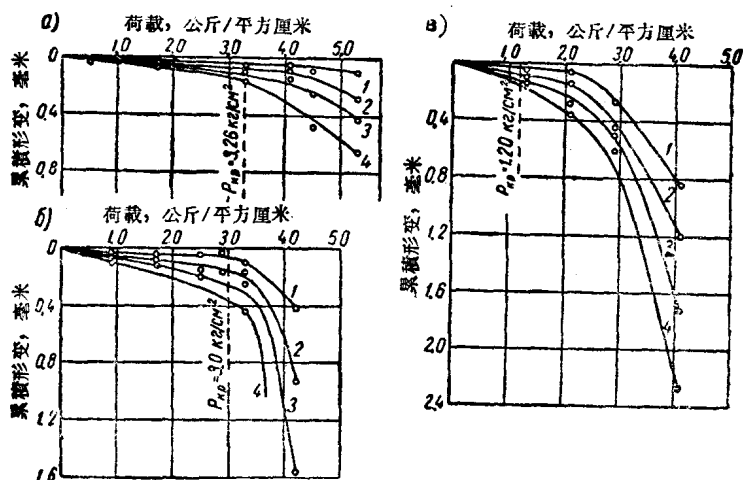


图3 在重复荷载下的变形累积

a) $W=10\%$ $\gamma_c=1.48$ 克/立方厘米 $\varphi_w=35^\circ$, $c_w=0.33$ 克/平方厘米
 按普寿烈夫斯基公式计算所得之临界荷载 $p_{kp}=3.26$ 公斤/平方厘米;
 b) $W=15\%$ $\gamma_c=1.52$ 克/立方厘米 $\varphi_w=29^\circ$, $c_w=0.38$ 公斤/平方厘米
 $p_{kp}=3.0$ 公斤/平方厘米; 3) $W=21.5\%$ $\gamma_c=1.55$ 克/立方厘米 $\varphi_w=11^\circ$, $c_w=0.23$ 公斤/平方厘米
 $p_{kp}=1.20$ 公斤/平方厘米
 1-20次循环荷载; 2-50次循环荷载; 3-100次循环荷载; 4-200次循环荷载

对各种不同类型的土壤在不同道路气候区各种不同状态时进行广泛的野外试验后才能确定。但是, 所得结果足以作出初步结论, H. П. 普寿烈夫斯基的原理可以用来确定重复荷载时从弹性阶段过渡到弹塑性变形阶段的界限。下面将拟出如何使用普寿烈夫斯基的公式来计算在弹性阶段下工作的路面的方法。

在弹性阶段工作时柔性路面的计算

根据以上所述, 可以建议柔性路面的计算方法如下。

首先研究单层路面。设定:

E_r ——土壤的弹性模量（承载板压入时的模量，即

$$E_r = \frac{E_r^0}{1 - \mu^2} ;$$

E_n ——路面的弹性模量；

h_n ——路面厚度；

D ——传递荷载的承载板直径（即计算车轮轮迹等面积圆的直径）。

荷载自直径为 D 的承载板经过路面传递到土基上，此时土基表面传递荷载的面积由于应力分布的关系将大于承载板的面积。为简化起见，设土基表面的应力沿传载面积均匀分布（图4），而它的数值相等于承载板中心下土基表面上的垂直应力值。如果已知土壤和路面的弹性模量、路面厚度、承载板直径

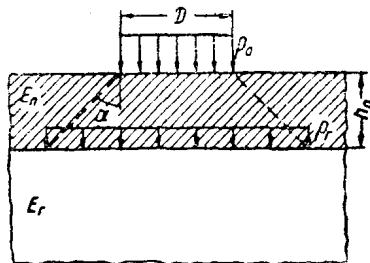


图4 计算图式

和板上荷载，则可以采用各种不同方法计算出土基上的应力 p_r 值。为此，可以采用例如在葡萄牙路面计算中采用的根据福克斯的解所拟定的近似方法[18]。也可以采用M.Б. 科尔宋斯基的解[7]或是采用弹性半空间体在柔性承载板中心处应力分布的一般公式（布辛氏），其中将坐标值 z 代以

$$z_{\text{BK}} = h_n \sqrt[3]{\frac{E_n}{E_r}} \quad (2)$$

即采用Г.И. 波克罗夫斯基当量层换算的方法。最后，也可能采用Р.М. 腊普波尔特[14]考虑到层间接触面摩擦阻力的解。不

管采用那一种公式，都可最后写成为下列形式：

$$p_r = p_0 K \quad (3)$$

式中： $K = f\left(\frac{h}{D}, \frac{E_n}{E_r}\right)$ ；

p_r ——土壤表面的压力；

p_0 ——承载板上的压力。

对该种土壤在尚未出现破坏区（塑变区）的这种状态的极限荷载可以按H.П.普寿烈夫斯基的公式计算。此时路面可作为超重计入，在公式(1)内可代入相应的符号，获得临界荷载的计算公式如下：

$$p_{r, \text{кр}} = \frac{\pi \left(\gamma_n h_n + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi} \right)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma_n h_n \quad (4)$$

式中： h_n ——路面厚度；

γ_n ——路面材料的容重；

φ 和 c ——土壤的摩阻角和粘聚力的计算值。

公式(4)也可写成为如下的形式：

$$p_{r, \text{кр}} = \gamma_n h_n M_h + c M_0 \quad (5)$$

系数 M_h 和 M_0 是内摩阻角的函数，可从图5中求得。

根据上述假设，为保证整个结构工作于弹性阶段，必须使作用在土基表面的应力不超过按普寿烈夫斯基公式计算而得的极限值。换句话说，按公式(3)计算而得的应力 p_r 不应超过按公式(5)计算而得的应力，或者处于 $p_r = p_{r, \text{кр}}$ 的范围内。此时，如将公式(3)和公式(5)的右边部分等同起来，并从所得方程式中解得 h_n ，则在已知 p_0 、 D 、 E_r 、 E_n 、 γ_n 、 φ 和 c 值的情

況下，就可以求得保證結構工作于彈性階段時必須具有的路面厚度。但是可惜，求解 h_n 的方程式只能用逐步近似法解出。因此為便于實踐使用，最好作出相應的諾謨圖。諾謨圖6所示的是根據P. M. 腊普波爾特的解繪制的。利用這張諾謨圖以及圖5中所示的曲線，就可以進行必要的計算。

計算舉例：已知： $\frac{E_n}{E_r} = 4$

$\varphi = 20^\circ$ $c = 0.2$ 公斤/平方厘米

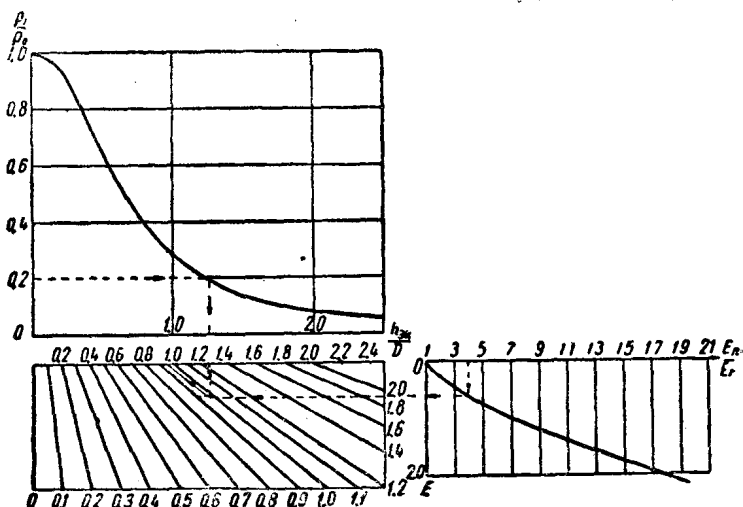


圖6 路面計算用諾謨圖

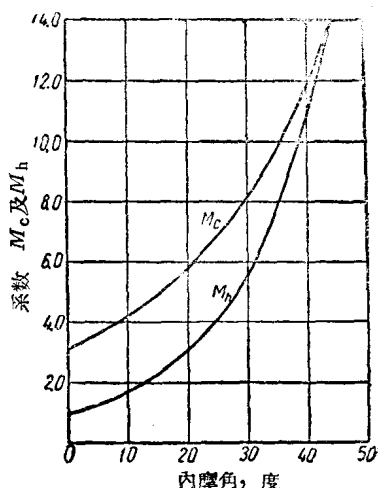


圖5 根據內摩阻角值求算係數 M_h 和 M_c 的图表

$\gamma_n = 2.0 \text{ 克/立方厘米} = 0.002 \text{ 公斤/立方厘米}$ $p_0 = 6.0 \text{ 公斤/平方厘米}$
求出保証結構工作于弹性阶段的必要路面厚度 h_n 。

1. 按图 5, 当 $\varphi = 20^\circ$, 可求得 $M_c = 5.8$ 。作为第一次估算 (不計入超重), 求得:

$$p_{kp} = cM_c = 0.2 \times 5.8 = 1.16 \text{ 公斤/平方厘米}$$

2. 求得比值: $\frac{p_{kp}}{p_0} = \frac{1.16}{6.0} = 0.194$

3. 已知 $\frac{p_{kp}}{p_0}$ 和 $\frac{E_n}{E_r}$ 值, 按图 6 的諾謨图, 可以求出 $h/D = 0.95$

(求算的方法見图中)。

4. 当 $D = 35$ 厘米时按已得的 h/D 值可算得 $h_n = 33$ 厘米。

5. 由于在計算中未計入超重 (由路面重量引起的压力), 所得路面厚度略偏大。为获得精确結果, 須取定比按初步計算所得值略小的路面厚度, 然后按公式 (5) 求得 p_{kp} , 再按图 6 中求出在所設路面厚度时土基表面的应力。計算反复进行一直到在路面某一种厚度 h_n 的情况下, p_{kp} 与土基表面应力值 p_r 相等为止。与这种情况相适应的路面厚度即为所需值。

在本例中, 計入超重, 并不太多地改变原来計算所得的厚度值 (相差仅在 1 厘米范围内), 所以路面厚度可以采用为 33 厘米。

按上述方法計算而得的路面厚度能保証土基工作于弹性阶段的范围内。当路面层本身材料有足够的强度时, 則整个結構将工作于弹性阶段。但是, 这样还不能說明路面在荷載作用下就不会破坏了, 因为不管是由于塑性剪切或是由于过大的弹性形变, 只要是超过了容許相对垂直形变, 路面即会破坏 [6]。不論在塑性工作阶段, 或是在弹性工作阶段, 都可能发生路面的破坏。按上述計算方法仅可能求得保証結構物工作于弹性阶段的最小路面厚度, 而仍不能避免按容許弹性形变作必要的計算。后面这种計算可以采用現行柔性路面計算方法并引入相应

的修正，正如H.H.伊万諾夫教授所建議的〔5〕，或是可以按A.K.比魯利亞教授所建議的方法进行〔2〕。

因此，工作于弹性阶段的結構計算应包括两个步驟：（1）按保證結構物工作于弹性阶段的容許应力进行計算；（2）按保證弯沉值不超过容許值的容許弹性形变进行計算。全部計算可按上述的先后次序进行，但也可以首先确定容許形变，然后驗算应力。

以上所述都仅属于单层的路面。在现阶段对多层路面进行計算时，可以使用多层换算为单层的已定方法〔6〕。必須指出，这种方法仅是工程上用的解法并不要求特别的严格性，但可用来解决实际問題。

为保證整个路面工作于弹性阶段的范围内，則不仅須保證垫层土，而还須保證路面中任一結構层都具有足够的抗剪强度。对計算任何結構組成部分，都可利用上述的計算方案。但是，如果在計算作用在土基中的剪切应力时，有可能通过确定某一种路面的厚度，降低作用的剪切应力值，則減少作用在土基中的应力的可能性受到限制，因为路面厚度仅可能在不大的范围内变化。至于作用在路面本身內的应力，則它們仅与車輛类型有关，因此按剪应力計算土基和路面的目的应当是确定对这些結構层材料抗剪强度的要求。例如，設土基表面上传递有应力 $p_{\text{очн}} = 5$ 公斤/平方厘米。如果基层材料的內摩阻角为 40° ，不考虑路面超重，則按公式（5）可以求出基层材料必須具备的使它不致产生剪切形变的必要粘聚力为：

$$c_{\text{тп}} = \frac{p_{\text{очн}}}{M_c}$$

当 $\varphi = 40^\circ$ ， $M_c = 11.9$ （見图5），則这里 $c_{\text{тп}} = \frac{5.0}{11.9} =$

0.42公斤/平方厘米。

必須指出，計算而得的 c_{rp} 应不等于材料粘聚力的全部，而仅是可以引入計算的一部分，即《計算的粘聚力》。此外，在計算面层时，不仅应考虑豎向力，还須計入水平力。

因此，采用剪应力的計算，可以对路面任一結構层的材料提出具体的和有理論根据的要求。

就以上所述而論，須要进行广泛的实验以找出各种筑路材料、首先是土壤的抗剪强度的規律性已极为清楚。

粘性土壤抗剪强度与含水量和密实度的关系

考虑有关路基土壤抗剪强度的問題时，必須首先指出，在这种情况下，照例是和人工压实的土壤（这些土壤的孔隙中除水以外还含有某些数量的空气）有关，也就是和飽水系数小于1的土壤有关。

土壤抗剪强度并不是一个新問題。从庫伦开始，很多研究者都致力于解决这个問題。K.杰尔察吉、M.赫伏尔斯列夫、季傑曼和其他外国学者制訂了确定土壤抗剪特性的各种方法。苏联学者Ф.П.薩瓦連斯基、H.M.盖尔謝万諾夫、H.H.依万諾夫 H.H.馬斯洛夫、A.A.尼企波罗威奇和其他学者对解决这个問題都作出了重大的貢獻。然而这些研究通常是适用于二相土，也就是适用于完全飽水的土壤进行的，而試驗方法是根据利用天然地层土壤作为工程結構物地基时的工作条件制訂的。由此可見，这些研究成果对不完全飽水、人工压实的路基土不能机械地搬用。例如，按H.H.馬斯洛夫的意見，假如飽