

土壤形变模量的测定

论文集

人民交通出版社

土壤形变模量的测定

张世英 王德成 王德成

中国地质大学出版社

本論文集中包括八篇論文，涉及到所有与測定形变模量有关的問題，并闡明了許多新的研究成果。可供道路設計、科学研究人員学习参考。

統一書号：15044-2031-京

土壤形变模量的測定
(論文集)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ
ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ
СБОРНИК СТАТЕЙ
АВТОТРАНСИЗДАТ
МОСКВА-1955

本書根据苏联道路出版社1955年莫斯科俄文版本譯出

人民交通出版社出版
(北京安定門外和平里)
新华書店發行
公私合营慈成印刷工厂印刷

1957年9月北京第一版 1957年9月北京第一次印刷

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印張：2 $\frac{1}{2}$ 張

全書：58,000字 印数：1—1150册

定价(10)：0.33元

(北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六号)

前 言

以 H.H. 伊万諾夫教授为首的科學工作組所建立的柔性路面強度理論和拟定的計算方法，曾广泛应用于公路設計的实际工作中，并載入技術标准和教材中。

这种理論原理自1941年发表后，曾对它作了某些修正，主要是改进荷載重复附加作用的計算图式和計算方法。

关于确定表征路面結構层材料和土壤強度的計算参数值的方法問題，过去研究得很少。試驗測定路面土基形变模量的方法，直到現在还未确定，而在少数研究工作中所采用的方法是不通用的。

从事路面厚度計算的科学研究和設計機構，沒有充分注意到在各种气候和水文、地質条件下土壤形变模量的試驗測定，計算时只依靠缺乏根据的形变模量数值表。

这类情况使得在設計时可能发生錯誤，并对进一步发展和改善路面的計算方法有所妨碍。

显然，應該从其中找出办法，这就是不放弃計算路面厚度的基本方法，和不“根据試驗的資料”来确定它，而在土壤工作的所有情况下經常研究它的強度，并考虑到不利气候条件的重复頻率。

只有在实际地計算利用于結構中的材料的真實性質时，每一工程計算才是可靠的。公路路基土壤和路面材料是各种各样的和非均質的。因此，以試驗測定其性質，对于規定強度的标准特性來說，是必要的。

同时，为了确定材料計算特性所进行的試驗，其所用的材料不應該是貴重的和体积大的。为了在設計机构工作中不发生困难，其数量應該是最少的，而且进行試驗的方法應該保証所获得的数据完全可靠。

关于获得土壤形变模量可靠数据的方法問題，是1954年春以 B.M.莫洛托夫命名的莫斯科公路学院进行專門討論的題目。

領導柔性路面厚度計算方面的工作的机构，都参加了这个討論。

根据會議資料編写的本論文集，总結了关于土壤形变模量試驗測定方法問題的目前情况。在本集中所刊登的論文包括了所有与測定形变模量有关的問題，并闡明了許多新的研究成果，这些研究資料以前是沒有发表过的。

发表的論文主要是为了开展关于进一步发展路面强度理論和計算方法的广泛討論，它已包括了目前确定路基土壤形变模量計算值的方法介紹。

技术科学博士 B.Φ. 巴布可夫教授

罗宏才 譯

目 录

前 言

确定土壤形变模量計算值的方法.....	1
柔性路面基础的形变模量測定.....	13
土壤基础在受压变形时的力学性質.....	18
采用形变模量作为路面与土壤的力学特征的討論.....	26
根据自然条件和道路結構确定土壤形变模量計算值.....	34
水泥混凝土路面的土基形变模量計算值.....	39
确定路基土壤形变模量的方法.....	58
鹽漬土的形变模量.....	69

确定土壤形变模量計算值的方法

技术科学博士 В.Ф. 巴布可夫教授

在計算路面和許多其它工程結構物时，正确規定土壤的强度特性，是有很大大意义的。

結構力学所用的大批仪器設備逐年趋于完善。但由于确定土壤强度計算参数的草率錯誤，常使由采用較完善計算方法而获得的一些精确解答完全消失。

土壤对荷載的抵抗强度常用一般的压模压入曲綫来表示，即用压模上的單位压力(p)与压模陷入土中的深度(l)之間的关系曲綫来表示。

在工程計算的实践中，采用以下土壤强度的参数来表明曲綫的各段：

- 1、承載量即临界荷載 $P_{\text{крит}}$ ，是按照下面情况确定的：
当形变值为已知时 ($l = \text{常数}$)；
当結構物在临界形变时 ($l = l_{\text{крит}}$)；
当土壤应力相当于形变由固結相轉化为剪裂相时 ($\sigma = \sigma_{\text{крит}}$)；

2、基床系数 $K = \frac{p}{l}$ ；

3、形变模量

$$E = \frac{\alpha P D}{l}$$

式中： D ——与傳达荷載面积相当的圓直徑；

α ——系数，視面积的形狀而定。

計算中也采用压入曲綫方程式，压入曲綫是以荷載与形变变化的較大間隔来繪制的，例如：

$$P_1 = C l^\mu$$

式中： C 和 μ 为曲綫的参数。

正如 H. M. 盖尔謝万諾夫教授在30年前所指出：土壤和建筑于其上的結構物共同作用。在設計每种構造物时，应达到这种目的，即構造物基础的土壤在极限形变状态下作用，这种形变从構造物的使用观点看来是被允許的。

这样看来，用較大形变間隔繪成的压入曲綫的解析算式，只在某些情况下才有利，如計算輪迹与計算压缩甚大的泥炭基础上路堤的沉陷等。

現今結構力学中所采用的計算方法是以介質的直綫形变为前提的。因此，当采用这些方法时，常把土壤原有压力和由構造物增加的压力之間的一段荷載压入曲綫当作直綫。

在設計基础时这样做是完全被允許的，因为在这种情况下：

- 1、土壤在相当大的应力 $2 \sim 3$ 公斤/平方公分下作用；
- 2、荷載为恒載（ $P = \text{常数}$ ， $T = \infty$ ），而在建筑物的使用过程中，荷載可能的变化极微；
- 3、压力通过固定的承压面傳遞；
- 4、由于基础很深，土壤作用时溫度和湿度的变化甚小。

因此，根据土壤載重試驗压入曲綫的直綫部分求得的形变模量，就可以足够精确地說明土壤基础的作用条件，并可認為在構造物整个使用期間不致发生变化。

担任設計剛性路面和飞机场的專家，沒有創立自己的計算方法，仍用現有的彈性基础板的理論。

但路面基层土壤的作用与基础基层土壤的作用不同。

路面基层土壤作用的特点如下：

1、土壤中作用的应力较小（在混凝土路面下 $p=0.10\sim 0.25$ 公斤/平方公分，在柔性路面下 $p=1.5\sim 2$ 公斤/平方公分）；

2、荷载放置在较小面积上（即轮迹）通过刚性路面传递到土壤，压力才分布到较大的面积上（图1）；

3、基层土壤受到温度影响和范围较大的含水量变化；

4、路面受到反复和瞬息活载的作用。

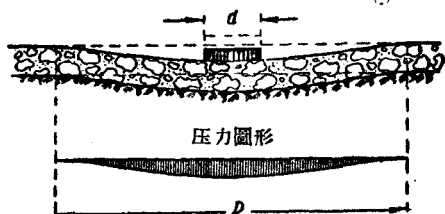


图1 压力通过路面传递到基层土壤：

a —作用于路面的面积直径；

D —压力实际传递到土壤的面积直径

整理土壤的试验结果，并试用压入曲线的直线段来确定变形模量

E 值，得出的测定挠度应力和计算挠度应力完全不相符合。

作者在1939年试验城市混凝土路面，仅将计算公式中的变形模量值改为 $500\sim 600$ 公斤/平方公分，不管土壤受潮如何利害，试验结果与用计算方法求得的挠度值就相符合。目前，我们的结论是：计算时必须考虑土壤变形模量与路面挠度值的关系，因为土壤变形模量的计算值不仅决定于传递压力面积的大小，而且还与形变的大小有关。

自然条件对变形模量数值的影响

对变形模量有影响的是：

1、土壤在颗粒成分、含水量及压实程度上的天然差别，同样土体在深度和面积上的差别；

2、季节差别——在土壤的表面有冰冻层或在某一深度处

有冰冻层（如底冰）；

3、土壤含水量季节性的变化；

4、修建造造物时在人工压实程度上土壤可能有的差别。

因此，在計算时形变模量应该反映出不是均匀土壤基层性質，而是多层土壤基层性質，并且實質上是等代形变模量。

任何土壤的形变模量值，在一年中随着土壤的含水量和压实度而变化（图2）。在設計时，应考虑形变模量数值的可能范围，并确定最坏的情况的数值。

在規定土壤基层的計算含水量时，应考虑許多作用于土壤与路面的气候因素。这許多因素的配合，在不同年份里是不一样的。

如果在气象学和水文学中早已知道平均气候条件只有經過多年觀測才能規定，而公路机构对路基和路面基层的水文状态尚未进行長期的和正规的觀測。H.A. 布扎科夫在列宁格勒公路学院(1934年)

試驗站所做的极有意义的試驗，及道路科学研究院（1937~1940年）在翻漿地区所作的觀測过早地被中断了，当时的目的是为了在这些觀測資料基础上可以作出路基多年平均水文状态的可靠結論。

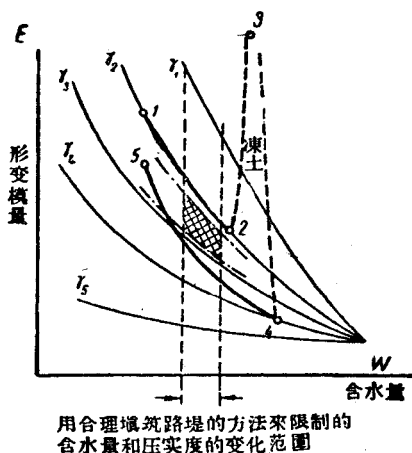


图2 土壤形变模量根据含水量和压实度在全年范围内的变化，曲线上各点适合于：
1—夏季末期；2—土壤开始冻结；
3—最大的冻结；4—松散土壤春季解冻；
5—夏季土壤状态，带有部分松散

关于如何研究路基中发生的作用，Г.Д. 杜別里尔曾在H.A. 布扎科夫著作的序言中指出：土壤与水文的常年調查在养路段中所占的地位，正如工厂實驗室每日的工作在很好的生产机构中所占的地位一样。

土壤形变模量值多年变动的性質，只有在各种气候条件下經過系統地觀測才能予以鉴定（图3）。

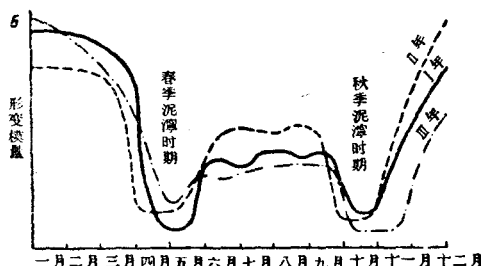


图3 多年間形变模量的变化

在一年中土壤形变模量值变化曲綫的一般特征現已知道了，但是这种特征在試驗上的測定只有技术科学 碩士C.Л.戈洛伐宁科在哈尔科夫汽車公路研究所試驗場所做的一次。

从曲綫分析的結果看出，形变模量的最小值只是在某一段時間內測得的。模量的数值愈小，則相应于該值的含水量重复次数也就愈少。根据这种最小模量值来进行計算，当然能保証道路不遭受行車损坏，但却要化費大量的資金。

显然，根据道路性質、路面类型、路面的工作能力，以及行車密度，在計算路面时，可以采用比多年最小值較高大的形变模量計算值，同时，可以利用运输机构，使行車密度在基层土壤松软时期减少。

如果在計算中根据土壤最小形变模量值，即根据在規定年

限內出現一次的土壤最小形變模量值，則計算年限愈長，路面的造價就愈高。但另一方面運輸費降低了。因為沒有必要再限制行車。

因此，在進行工程造價和運輸費的經濟比較時，可依據技術經濟的計算及關於形變模量重複數值的資料，確定在不同行車密度條件下各級道路的形變模量計算值。

用直接觀測法來確定土壤的計算狀態是一件需要化很長時間與很繁雜的任務。此外，觀測不能把所有情況都包括在內。

較理想的方法是用理論分析路基中水分的聚積過程。根據地區的水文情況，溫度頻率，降雨量頻率等有關的土壤狀態的計算，利用形變模量與土壤含水量、壓實度的試驗關係曲線，求得所需的形變模量計算值。

設計路面的任務須與穩定水文狀態及土壤壓實度的任務相結合，借以保證形變模量值可能的變化範圍受到限制。

縮小土壤含水量的變化範圍是由可靠的路基設計、路線及排水系統設計來保證的。

土壤構架容重的變動用壓實土壤的方法來限制，同時，壓實度應當適合於施工地區的气候條件。

技術科學碩士H.A.布扎科夫的著作，証明了以前流行的關於路堤壓實得愈實愈好的見解是不對的。在使用過程中，由於冬季水分聚積作用而使路堤《松散》的例子表明，科學研究機構要再一次去調查老路堤土壤的密實度，放棄只根據土壤壓縮性的實驗資料來規定壓實標準。

土壤形變模量實驗室的確定方法

實驗室確定路面基層土壤形變模量，常會遇到許多方法上的困難。

已知的方法有以下几种：

- 1、实验室的荷载试验；
- 2、野外的荷载试验；
- 3、换算结构物的试验结果；
- 4、根据路面在使用过程的损坏资料进行换算。

不能不考虑到，由于试验计算方法的复杂，而使影响形变模量值的额外因素增加了。在这种情况下，试验员掌握的资料数量大致是相同的，但未知数增多了。这一部分的数值（例如路面各层材料的形变模量）在换算时不得不从表中找得；这样就降低了所得结果的可靠性。

当利用有关结构物作用的资料时，土壤强度的特征与计算方法的关系开始表明出来。

各研究机构所应用的确定的土壤形变模量的方法有着许多共同的特点。

野外试验荷载法在土木工程中早已采用。但此法应用于道路研究的实践中，必须考虑到路面工作的许多特点：土壤承受路面的重量，土壤相对形变值较小（形变模量应在这种数值时确定），沿线试验地点的分散性。

为了进行试验，使用便于携带的、活动的仪器设备。此项设备由两辆汽车或拖车组成，汽车或拖车之间借梁或构架来连结。压模是用水压千斤顶来施压的，水压千斤顶附有能自动保持固定压力的装置（当加压力于压模时）。

在安装压模时，应当设法改善压模与地面的接触。测定形变要采用高度精密的仪器，这种仪器须防止日晒、雨淋及风吹。

试验荷载法有下列四种缺点：

- 1、测定形变模量，压模直径是25~30公分（外缘是75公

分)。实际傳遞压力的复盖物面积要大得多。因此，試驗的結果只能直接用于均匀的土壤。对于类型較广的分层土壤，須經修正；

2、用剛性压模进行試驗。由于压模邊緣的应力集中，在压模下的应力分布与在路面下的应力分布不同。按照傳遞压力的性質，路面接近于柔性压模；

3、在計算的（临界的）含水量和相应的压实度的情况下，一般不能进行試驗。勘测人員普通都是在夏季工作的，那时土壤处于干燥状态。

用人工加湿土壤是很困难的，而且一般不能得到良好的結果。使土壤含水量接近于临界含水量只有經過長期降雨才能达到。当大量的水分同时滲入土壤时（浸湿法），不能达到均匀湿潤的目的，因为土壤会膨胀和空气填充着土壤孔隙。

由于春季土壤的結構有許多特点，在夏季就不能观测到春季土壤的那种含水量和相应于春季融雪时期的土壤状态。并因冬季水分聚积作用形成的冰块在春季解冻的結果，春季土壤的水流滲透行程較長，孔隙較大；

4、进行試驗需要很長的时间。每次試驗一般要化費一整天工夫。

由于上述情况，以及用荷載法試驗的累贅，所以直到現在，这种方法在公路勘测中尚未获得广泛的采用，而且在書籍中常常会看到对它不好的评价。

其实，路面造价很高，組織填土路基土壤的直接試驗来确定形变模量，是完全合算的。

利用下面的方法来加快这些試驗是可以做到的，即把土壤的静荷載試驗改变为測量土壤对压模强逼压入的抵抗力。压模附有保持固定速度和自动記載《荷載——形变》曲綫的設備。

这种放置荷载的特点比较符合于汽车对路面作用的实际情况。强逼压入压模的相当设备，安装在越野性能良好的汽车或拖拉机上，这样就能保证作出必要数量的试验而不致于减低勘测队的工作进度。

关于转换勘测阶段测定的形变模量值为相应于土壤最不利状态的形变模量值的问题，应当用野外试验和实验室试验相结合的办法来解决。

为此，应根据实验室对土壤未破坏结构试样的试验结果，来绘制曲线，该曲线用来表明不同含水量的形变模量值对土壤计算状态的形变模量值的比例关系。

根据这一曲线来确定在野外试验所得的形变模量的修正系数。

为了有可能作出修正，应当用小形压模使实验室试验土壤的原则更加精确。这种方法早已用来鉴定土壤的抵抗力（确定《土壤承载能力》），今后需进一步加以发展和改进。

对于试验荷载法所有的许多缺点来说，一般的缺点是试验结果的灵敏性过高。压模与地面接触的情况影响到压力曲线的开始段。压模尺寸减小，土壤结构的影响增大，造成平行测定的数据相差很大。由于荷载减小，就增加了内部压力损失的相对值（压力由压模中的摩擦所产生的）。因此，就有必要采用高度精密的测量仪器。

试验结构物计算形变模量法（倒算法），是根据测定的路面形变或路面应力，用理论公式来换算土壤形变模量。

此法从试验专门预制的试验板转变为应用在使用期限内积聚的关于在行车作用下路面形变的统计资料。后一种方法在全苏道路科学院的工作中采用得特别多。

倒算法的优点是考虑了路面和基层土壤共同作用的特点，

允許考慮和抵消土壤形變模量精確數值中的計算理論的缺陷。

倒算法的缺點如下：

1、為了使路面發生形變，需要強大的試驗設備。例如在試驗混凝土板時（該板預計通過MA3—525重型汽車），需要重達100噸的平衡機；

2、求得的土壤特征是決定於具體的計算理論。並不能推廣到其它的計算情況；

3、我們利用的試驗資料，實質上是求得的板的基層下層的形變模量計算值，同時，由於撓度值的不同，形變模量的實際數值在基層各點上是不相同的（圖4）。這種情況要求適當

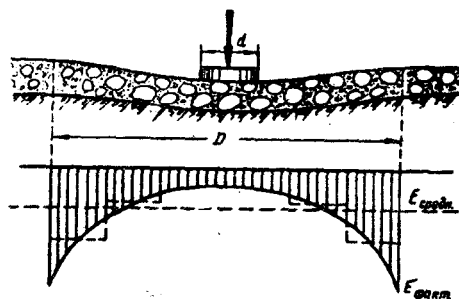


圖4 土壤在路面基層各點的形變模量

地考慮彈性基礎上板的理論。要使全部計算容易，用B.H.熱莫奇金的方法可以實現。

談到規定基層土壤形變模量計算值時，不要忘記，路面是為活荷載使用的。

車輛在路面上長時間停留是與運輸過程的技術要求相違背的。這種情況在航空方面顯得特別突出，因為飛機停放在跑道中央一般是不允許的。這也說明了公路的情況，汽車和載貨車停留在路中是交通規則所嚴禁的。

活荷載在土壤中造成应力场，作用于土壤的时间过程，較靜荷載时为求得形变完全数值所需要的时间为短。因此，土壤在短时间的荷載作用下，好象显示出較大的抵抗形变的强度。这种情况在計算中可考虑《动力形变模量》理論。

$$E_{\text{дин}} = \frac{apD}{l_{\text{дин}}} \geq \frac{apD}{\Delta_{\text{полн}}}$$

式中： $l_{\text{дин}}$ ——在短时间的荷載作用下的路面挠度；

$\Delta_{\text{полн}}$ ——長时间靜荷載作用下的路面挠度。

动力形变模量值是介于靜荷載形变模量值与彈性模量值之間，并可能超过后者，彈性模量是按照除去压模时的彈性恢复曲綫来确定的。如所周知，压模去掉后，土壤在長时期內逐漸升高。

在改进和发展實驗室測定形变模量方法的同时，应该提出进一步发展土壤抗荷强度的理論。

我們將土壤形变模量看成是土壤强度的基本特性来考虑的，这种特性与其它的土壤性質无关。但是，土壤形变模量實質上是土壤一些較普通的性質的綜合指标，这些性質都与由外力作用于土壤的应力场有关：压縮性，抗剪力及土壤內聚力。土壤的压縮性由《压縮曲綫》表示，抗剪力由摩擦力表示。

在形变模量所有的研究中，过多地注意了土壤抵抗荷載作用强度的外部現象——压模的沉陷，而不注意揭露土中內部形变的結構，由于这种結構，增加了土体的强度。

把这种內部形变的結構与土中产生的內部抵抗力联系起来，利用不同含水量时的土壤計算特性的图解（內聚力 c ，容重 γ ，內摩擦角 φ 及压縮曲綫参数），通过計算就可以确定土壤的形变模量。

縱向平衡法因沒有考虑到土壤的压实作用，因此，不能直