

形变模量及其测定新法

沙 慶 林 著

人民交通出版社

本書介紹了路基土強度的表示方法及影響土強度的因素，有關在荷重作用下材料形變的理論，如何用形變等速增加法測定形變模量的新方法，如何測定路面及路基土的形變模量等。

本書可供公路科學研究工作，工程師及技術員，以及大專學校道路專業的師生工作與學習參考之用。



形變模量及其測定新法

沙慶林 著

*

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

新華書店發行

人民交通出版社印刷廠印刷

*

1959年2月北京第一版

1959年2月北京第一次印刷

開本：787×1092 1/32

印張：3 1/2 張

全書：106000 字

印數：1—2,600冊

統一書號：

15044-1294

定價(10)：0.55 元

目 录

概述.....	3
第一章 路基土强度的表示法及影响土强度的因素.....	6
§1 路基土强度的表示法.....	6
§2 以形变模量表示土的抗形变能力.....	16
§3 土的状态对其抗形变能力的影响.....	22
§4 土的结构对其抗形变能力的影响.....	23
§5 现用的测定土的形变模量的方法.....	24
§6 论承载板的尺寸.....	28
第二章 在荷重作用下材料的形变随时间而发展的理论.....	35
§7 引言.....	35
§8 简单的无松弛现象的物体.....	38
§9 麦克司威尔的松弛现象.....	39
§10 形变发展的直线规律.....	40
§11 形变发展的非直线规律.....	41
第三章 试验方法及准备解决的几个问题.....	44
第四章 试验结果的分析.....	53
§12 理论前提.....	53
§13 公式(28)适用于土及其他的路面建筑材料.....	55
§14 用荷重等速增加法试验后整理资料的方法.....	57
§15 土的徐变.....	67
§16 荷重增加速度对土的形变模量值的影响.....	73
§17 在电气杠杆压力仪上进行的试验.....	89
§18 用沥青稳定土所作的试验.....	90

§19 略論参数: 彈性模量 E_y 、粘滯系数 η 及松弛時間 T	92
第五章 測定形变模量的另一新法——形变等速增加法 ...	94
第六章 对于測定路面材料和路基土的形变模量的意見 ...	99
§20 形变模量的測定法	99
§21 路面容許相对形变的決定	104
§22 路面材料的形变模量	109
§23 路基土的形变模量的測定	111
第七章 結束語	113
附录 用荷重等速增加法測定形变模量的建議	114
参考書	122

概 述

党的八届二次代表大会已为交通运输事业发出了战斗的口号，这就是要在全中国范围内，建立一个以现代工具为主的、四通八达的运输网。由于工农业的大跃进，钢铁产量将要倍增，农产品成倍、几倍、几十倍的增长，汽车所担负的任务是十分繁重的。交通量的急增，对路面结构的要求将会愈来愈高，在目前主要任务是迅速建立地方道路网的同时，建筑高级路面与次高级路面也将会有相应地增加。

在公路建筑的费用中，路基与路面的建筑费用占很大的比重，往往达70~80%（特别是高级公路）。因而，考虑汽车在路面上作用的特性，考虑在各种不同的气候、水文、土壤条件下路基结构的特性，正确地鉴定路面的强度，将愈来愈显得重要。

由个别板体组成的刚性路面，不论下层土的湿度如何，均具有很大的抗弯能力。路基土壤在刚性路面强度中的作用是支持整块板体。在荷重作用下，土的形变对混凝土板厚度的影响较小。刚性路面板的厚度主要与其材料的抗弯强度有关。土的性質（含水量与密实度）的变化对刚性路面厚度的影响较小。

柔性路面的抗弯能力很小，柔性路面的强度，不决定于其材料的抗弯强度，而决定于路面整体破坏时的极限垂直形变。

现代高级公路的路面建筑费用约大于全部建筑费用的60%。因此，合理地设计路面，将会大大降低公路建筑的费用。如何使路面能满足行车的要求，而不具有过多的强度安全系数，如何使路面不过早地破坏、不需加强修补工作，是个很重要的问题。

路面，特别是柔性路面的耐久性，在极大程度上取决于对土的强度的正确鉴定。因而，正确鉴定土的强度，在路面设计中具有很重大的意义。

土抵抗形变的能力，常用圆形承载板的压入曲线，即用承载板上的单位压力 P 与其下陷深度 l 间的关系图来表示（图1）。

在工程设计中，常用下列几种参数来表示土的强度：

1. 承載能力，即：
 适合于某一已定形变的 P 值
 ($l = \text{常数}$)；
 适合于某一极限形变的 P 值
 ($l = l_{\text{极限}}$)；
 适合于土的形变从压实阶段
 轉入剪切阶段时的 P 值。

2. 地基系数。
3. 彈性模量。
4. 形变模量。

在計算中，也有用方程式來
 表示荷重——形变的关系曲綫。

如

$$P = Cl^{\mu} \quad (1)$$

式中： C 和 μ 为曲綫的变参数。

目前在各国应用的有 50 种以上計算路面厚度的方法。这些方法，一般都是建筑在由經驗所得的路面厚度与路基土的特性間的关系上。这些方法中，土的特性有用一定形变下（从 0.5 到 12.5 公厘）的承載能力，有用彈性模量，有用相当于小形变值（可看作是直綫关系的）的形变模量，也有用地基系数来表示〔20①〕。

在苏联及在我国所应用的柔性路面設計法中，土的形变模量是最主要的計算参数。形变模量表示路基土壤抵抗形变的能力。形变模量值是根据一段試驗所得的“荷重——形变”曲綫的弦，用公式（7）計算而得的。

所有的柔性路面的計算方法，象建筑力学中所用的方法那样，其前提是：把材料的形变性能看作直綫关系。这些方法沒有考虑土壤的眞实性質：彈性、粘滯性及塑性。此外，正如試驗所表明，除湿度很小的压实土壤外，即使荷重很小，荷重与形变間都不存在直綫关系。

尽管正确地鑑定路基土壤强度的問題，在路面設計中具有很重大的

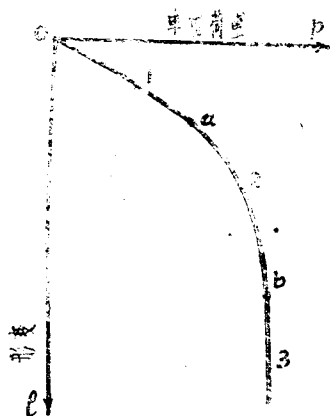


图 1

① 方括号內的数字表示参考書的号数。

意义，但以往却是很少被人研究，仅在最近几年来才给予了較多的注意。因而，直到目前为止，还没有一个为大家所公認的形变模量的試驗方法（測定法）。

由于缺乏普遍适用的測定形变模量的方法，对那些还不能用試驗法來定出形变模量值的公路业务机构，工作上帶來許多困难。正如 A. K. 比魯利亞教授所指出的，无疑地将使在實踐中应用新的路面結構复杂化〔1〕。

路面建築材料的形变模量的計算值，并不是經過数次試驗就能确定的；它需要进行很多次的試驗后才能确定，是相当繁重的、需要很長時間才能完成的一种工作。尤其是測定土的形变模量，工作就更加繁重，要求更多的時間、人力与物力。土的形变模量受很多自然因素的影响，同一地段上的同一种土的强度，在一年中的变化可达数倍之多。由于路基土壤的复杂性及其(含水量及干容重)状态的不均匀性，在實驗室中制备試模并进行測定其形变模量，几乎不能获得与实际相符的形变模量值。作者認為，只有在野外进行实地測定，才能获得土的形变模量的可靠的計算值。

土的湿度对其形变模量的影响极大。因此，潮湿季节是路面整体及路基土工作的最不利季节。甚至在此最不利季节內，在野外直接測定土的形变模量，都很难获得土的形变模量的計算值。这是因为所測的这年土的湿度可能不是最大的。因而，必須在各个不同气候区内，对各种不同条件下的路基土壤进行測定；并連續进行几年的測定。在对土壤最不利的季节中，土的状态每天都有变化（尤其在冰冻地区的春融期間），进行測定的那天也还可能不是土的状态最坏的一天，因此，还必須在同一地段进行連續几天的測定。只有用这种方法在野外进行測定，在积累大量資料后，才能定出土的可靠的形变模量計算值。

公路建筑的日益发展及确定土的形变模量的計算值的复杂性，要求有一个能普遍使用的、簡易的形变模量測定法。这种方法在理論上既应考虑土的真實性質，在实际上又应使我們有可能尽快地积累試驗資料，以定出土及其他路面建築材料的形变模量計算值。

本書即为介紹作者研究所得的測定形变模量的新方法。書中介紹的

方法及全部試驗資料，虽仅以土壤为对象，作者認為，在測定其他路面建筑材料及路面整体的形变模量时，也可以采用。

作者的全部研究工作，是在苏联著名学者 H. H. 伊万諾夫教授的直接领导下完成的，在此特向他表示感謝。

第一章 路基土強度的表示法及影响

土的強度的因素

§1 路基土強度的表示法

未受外力作用的土的形变主要是由水引起的。水可能引起土的湿脹或收縮。由粗顆粒組成（粗砂、礫石）的土，湿脹不大，細顆粒組成的土湿脹可能达到很大的程度；土顆粒愈小，湿脹愈大。在干燥季节，則恰恰相反，含有水的土发生收縮，土顆粒愈小，收縮愈大。因而，当气候潮湿和干燥交替时，路基土就受到交替的湿脹与收縮作用。

土的形变会引起路面不均匀的形变，从而使面层产生裂縫。此种現象在冰冻地区更为严重。

土的形变与很多因素有关，例如：气候、水文情况，土的特性与状态，路面厚度等。

在外力作用下，土发生形变。这种形变，是土在应力及湿度变化的影响下，产生一系列的变化过程的结果。加外力于土，引起土顆粒、处于各种状态下的水及土孔隙中的空气的相互移动。可能有下列几种移动的形式〔4、23〕。

1. 土顆粒相互接触处的吸附水膜发生形变。
2. 土顆粒本身发生形变（形变的结果也可能使顆粒破碎）。
3. 土顆粒間的相互移动，由此土顆粒获得較稳定的位置。
4. 水及空气从土孔隙中被挤出，由此土顆粒更相接近。
5. 在土孔隙中的不能被挤出的空气泡的压缩。

这些現象中的每一个現象，在土发生形变的过程中的作用是不一样的。由于土的組成与状态的不同，在土发生形变的过程中，可能这种或

那种移动形式起着主要作用。

当极细颗粒的粘性土发生变形时，粘結水膜厚度的变化起着作用。水膜有粘滯性，愈接近颗粒表面，粘滯性愈大。在外力作用下，两颗粒接近时，可能从两颗粒的接触处，挤出部份水膜。水膜被挤出后即轉成自由水，附在片状的粘土颗粒上，水膜可达到颗粒那样的厚度。因而，水膜被挤出时的颗粒的接近，在土的全部压缩过程中可能起很大的作用。

外力除去后，粘結水膜部份地恢复到原来的厚度，重又把颗粒推开。

在松散土的变形中，土颗粒及结构集粒的相互移动具有决定性的意义。这种土的特点是每个土颗粒的位置不稳定。

在压实饱水的土时，相互移动的土颗粒应挤出充满于土颗粒孔隙间的水。这种变形发生得较慢。因为挤出水速度决定于水沿着土粒间微小孔隙移动的速度。

上述各种变形中的一部份是弹性变形，而另一部份是塑性变形。后者在外力除去后不能恢复。

下列几种变形是塑性变形：

1. 土颗粒的相互移动；
2. 土颗粒及结构集粒的破碎；
3. 由于从土中挤出空气与水而产生的变形。

下列几种变形是弹性变形：

1. 在外力除去后，部份被挤出的水回至原位，原来由此部份水的被挤出所引起的土体的压缩；
2. 气泡的压缩；
3. 土颗粒本身的弹性变形；
4. 粘結水膜的变形。

在很多资本主义国家中，设计柔性路面厚度时，主要用承载能力来表示土的强度。承载能力是在一已定的变形值下决定的（承载板的下陷值与其直径的比值为0.05）。

承载能力是用 C.B.R (美国加利福尼亚州的承载能力比) 法试验求出。C.B.R 法的实质如下：对路堤用结构破坏的土样，对路堑及与地面

同高之处，取原状土样（土样制在直径与高都为15公分的圆筒中）。在实验室中，将土样连续加湿4晝夜（按毛细水上升的原理），然后用直径为5公分的承载板，以1.25公厘/分鐘的速度进行压入試驗。共压入2.5公厘，所以每次試驗的时间为2分鐘〔16、20〕。

C.B.R 法有某些根本性的缺点，如：

1. 此法沒有考虑到在各个不同的气候区域中，土湿度增加的不同情况，土样在4晝夜中受水的作用，以及其結果对某种土所得的湿度大（粉砂土），而对另一种土所得的湿度小（粘土）。因而，对于粘土試驗得出的C.B.R 值可能較高，而对于粉砂土則較低。实际上，路基土的状态与試驗时土的状态（4晝夜加湿試驗后所得的状态）是大不相同的。

2. 用此法所求得的C.B.R 值很不稳定，即平行試驗間的差別很大。这种差別对无粘性的土更大。在英国把这一缺点認為是C.B.R 法最根本的缺点。

3. 此法沒有考虑面层的区别。C.B.R 值被看作与面层无关，被認為是常数，即相当于承载板相对沉陷量0.05时的比值。从§2中的分析，可以看出，在这个方法中，基础土具有較大的强度安全系数。当上层为高級路面时，强度安全系数更大，这就过多地增加了路面的厚度。

在这些国家中，也有用压入承载板法在野外测定土的承载能力的。

板上的荷重借油压机（俗名千斤頂）之助，分6~8級逐漸增加。試驗土基时，所用承载板的直径为60~70公分。每次荷重在板上一直作用到板的下陷量不超过0.02公厘/分鐘为止。实践証明，用此法，每次試驗要化数小时之久。

因而，在法国、英国、意大利等資本主义国家中，認為：由于公路里程极大，直接用承载板进行試驗，或間接用C.B.R 法进行試驗，都不大合适。用这些方法时，如要获得可靠的C.B.R 值，必須进行大量試驗，需要很多时间与資金。

在某些資本主义国家（如西德、瑞典等）中用彈性模量表示土的强度。彈性模量系根据所测得的彈性形变用下式求出：

$$l_y = \frac{\alpha P D}{E_y} \quad (2)$$

式中:

l_y ——彈性形變, 公分;

E_y ——彈性模量, 公斤/平方公分;

P ——承載板上的單位荷重, 公斤/平方公分;

D ——承載板直徑, 公分;

α ——系數。

對於具有彈性-粘滯性-塑性的材料(如土及其他路面材料), 彈性模量並不是常數, 他與荷重作用的時間有關。因而, 有所謂瞬時彈性模量(或真實彈性模量)與長期彈性模量(或有條件的彈性模量)之分。前者之值大於後者。

在西德及瑞典用壓入承載板法測定彈性模量。但他們所用的方法不同, 在西德先在直徑為75公分的承載板上作用8噸的靜荷重, 荷重除去後, 作第二次試驗。第二次試驗時, 荷重分2~4次增加到6噸。此時所得的荷重-形變曲線被認為是直線關係, 即沒有產生塑性形變。此直線的斜率稱為地基系數 K , 彈性模量:

$$E_y = 0.75 K \cdot D \quad (3)$$

在瑞典是進行10次“加荷-卸荷”重複試驗後, 根據回復(彈性)形變計算彈性模量。也有在進行一次“加荷-卸荷”試驗後, 根據回復形變計算彈性模量。用這些方法所求得的是長期彈性模量, 都是有條件的。如果對濕度不大及密實度很大的土, 可用這些方法試驗, 則對過份潮濕的土, 這些方法將不大合適。因為土在承載板自身重量作用下, 荷重雖除去, 彈性形變並不能完全回復。

在日本用垂落鋼球法求彈性模量。用此法求得的為瞬時彈性模量。

可用形變模量表示土的抵抗形變的能力。形變模量是根據總的形變值決定, 不需把彈性與塑性形變分開。

在荷重-形變曲線圖上, 在前段接近直線的曲線範圍內, 荷重與形變的比例系數叫做土的地基系數:

$$K = \frac{P}{l} \quad (4)$$

K 值在美國及其他國家通常是用壓入承載板法決定的。標準承載板

的直徑認為是75公分。利用地基系数代表土的抗形变能力，并認為它是常数，就是承認荷重作用于土时，存在着应力与形变間的直綫关系；也就是說，在此，虎克定律起着作用。

理論与实验証明，形变值不单与土的性质有关，而且与受压的土的体积有关。因而，如在土表面上的单位压力相等，而传达压力的面积大小不同，則所产生的形变也将不同。由此可知，利用地基系数来表示土的抗形变能力是不恰当的。

在表示土的抗形变能力时，为要消除傳压面积的影响，不用形变的绝对值 l ，而用其相对值 $\lambda = \frac{l}{D}$ 。实验証明，受压土的体积与傳压面积的直徑成比例，在此，用比值

$$E = \frac{\gamma P D}{l} = \frac{\gamma P}{\lambda} \quad (5)$$

表示土的抗形变能力。此比值即所謂的形变模量。

公式 (5) 可由下述理由得出。

公式 (5) 是从彈性理論的原理导演出来的。从公式本身的结构来看，它与彈性模量的公式 (2) 相似。区别仅在于在公式 (2) 中的形变为彈性形变，而在公式 (5) 中的形变为总的形变，即彈性形变与塑性形变之和。

苏联公路科学研究所的实验証明，当荷重通过刚性承载板作用在路面上时，在多层路面中及在土中应力分布的情况可用雅庫宁公式表示 [15]。在图 2、3 及 4 上的諸点都是在各种不同情况下所測得的点。图上的虚曲綫是根据布辛納公式計算而得，图上的实曲綫是根据雅庫宁的经验公式 (6) 計算而得。从图上可明显地看出，雅庫宁公式較布辛納公式更好地表示出应力在多层路面中的分布情况。

$$\sigma_z = \frac{P}{1 + a \left(\frac{Z_0}{D} \right)^2} \quad (6)$$

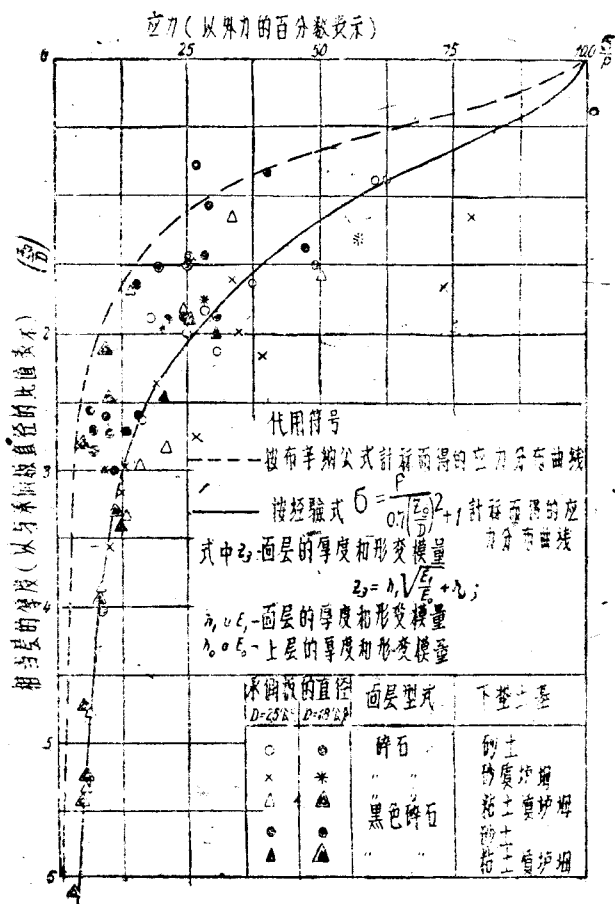


图2 应力的相对值与离表面的相当距离间的关系, 当 $m=2$

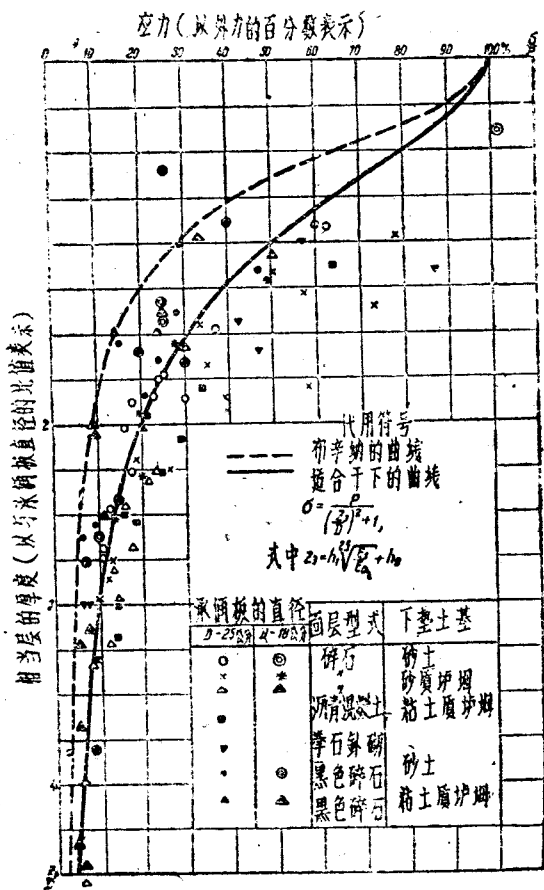


图3 应力的相对值与离表面的相当距离间的关系, 当 $m=2.5$

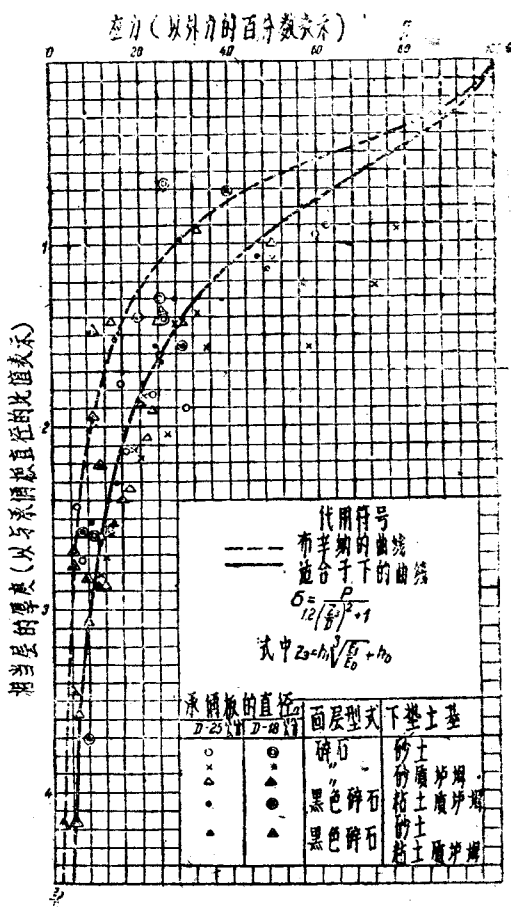


图4 应力的相对值与离表面的相当距离间的关系, 当 $m=3$

式中: Z_0 ——决定应力施力点的相当深度, 公分。

a ——与在承载板下应力集中的情况有关的系数。因此, 其值也与材料的性质、均匀性及密实度等有关。 a 值由试验确定。根据苏联的资料, 其值如表 1 所示。

表 1

材料性质	a	$\gamma = \frac{\pi}{2\sqrt{a}}$
弹性的各向同性的物体	2.5	1
多層路面	0.7~1.2 (平均为 1.0)	1.9~1.43 (平均为 $\frac{\pi}{2}$)
土 (随土的粘性及含水量而变)	1.5~2.0	1.1~1.3

其他的符号与前相同。

对均匀的同一材料, $Z_0 = Z$ 。此时公式 (6) 变为:

$$\sigma_z = \frac{P}{1 + a \left(\frac{Z}{D} \right)^2} \quad (6a)$$

今设在土面下 Z 深度处, 取一极薄的土层 dZ 。当土面上受到某一单位荷重 P 后, 在 Z 处发生应力 σ_z , 使 dZ 厚的土层发生变形 dl 。此应力 σ_z 与应变 dl/dZ 之比值用 E 表示并称其为形变模量。

$$E = \frac{\sigma_z}{\frac{dl}{dZ}}$$

由此得

$$dl = \frac{\sigma_z dZ}{E}$$

$$l = \frac{1}{E} \int_0^{\infty} \sigma_z dZ$$

以式(6a)代入上式,得

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{1}{E} \int_0^{\infty} \frac{PdZ}{1+a\left(\frac{Z}{D}\right)^2} = \frac{P}{E} \int_0^{\infty} \frac{dZ}{1+a\frac{Z^2}{D^2}} \\
 &= \frac{PD}{E\sqrt{a}} \int_0^{\infty} \frac{d\left(\frac{\sqrt{a}}{D}Z\right)}{1+\left(\frac{\sqrt{a}}{D}Z\right)^2} = \frac{PD}{E\sqrt{a}} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{Z\sqrt{a}}{D} \right) \right]_0^{\infty} = \frac{\pi}{2\sqrt{a}} \frac{PD}{E}
 \end{aligned}$$

由此式得

$$E = \frac{\pi}{2\sqrt{a}} \frac{PD}{l} = \frac{\gamma PD}{l} = \frac{\gamma P}{\lambda}$$

由于 a 是变数, γ 值也将是变化的。对几种不同性质的材料与 a 值相适应的 γ 值也列于表1中。

因此, γ 值不论对多层路面或土来讲,都是随实际情况的不同而变化的。苏联的经验证明,对粘土垆母 γ 值接近于1。

在实际应用中,为了便利起见,同时考虑到一定的强度安全系数,在现用的柔性路面设计法中,当测定均匀的土及均匀的其他路面材料的形变模量时,采取 γ 值等于1,即形变模量按(7)式计算[24]。

$$E = \frac{P}{\lambda} \quad (7)$$

而在决定路面的相当形变模量时,采用(8)式计算。

$$E_0 = \frac{\pi}{2} \frac{P}{\lambda} \quad (8)$$

В.Д.叶尔莫柯微奇在1952~1953年测定了应力在双层路面及三层路面中的分布情况。测定应力时,作用在路面上的荷重为静荷重。他所用的路面材料是塑性较大的碎石——土混合料、沥青稳定土和经过沥青处理的碎石——土混合料[13]。

叶尔莫柯微奇的研究表明,当路面上(承载板上)的单位荷重不超