路面力学计算

（論文集）

同济大学道路教研組 編

人民交通出版社

路面力学計算

（論文集）

同济大学道路教研組 編

人民交通出版社

本書选編了国外有关柔性路面与剛性路面强度計算的文章，詳尽地敘述了各种路面厚度、路面材料結构和路基强度稳定等的計算方法，并在理論上作了闡明。

此書可供道路工程技术人員及科学研究工作者学習参考。

路面力学計算

（論文集）

同济大学道路教研組 編

*

人民交通出版社出版

（北京安定門外和平里）

北京市書刊出版业营业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3月北京第一版　1962年3月北京第一次印刷

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$　印張：5 $\frac{7}{16}$ 張

全書：141,000字　印数：1—2,150册

統一書号：15044·1421

定价(10)：0.73元

目录

序　言

在社会主义建設总路綫的光輝照耀下，我們道路建設与其他事业一样，在党的领导下也取得了很大的成就。在道路科学研究方面，通过群众运动的方式，无論是生产单位、科研机构以及各学校中，也取得了巨大的成果。这是我們党正确領导科学技术工作的胜利。

科学研究工作的目的完全是为了提高生产，必須使理論联系实际。因此，首先应从实际出发，然后提升为理論，再以理論指导实践。在我們的科研工作中，如果能够遵循这个方向，就能得到应有的成果；反之，必然会走到牛角尖里去而一无所成。

在我們道路方面的科学研究工作中，对于路面設計理論的研究，曾引起道路工作者們的很大兴趣。但是，这种兴趣如能从实际出发，就是正确的；如果单純从理論出发，为理論而理論，这是不正确的。所以进行研究这一課題，最重要的是应該从生产实际出发进行研究。

路面設計的涵义是非常广闊的。把它仅仅局限于路面厚度計算范围內，就会使人感覚空洞，同时很容易形成单純理論的死角。路面設計应当是路面材料結构、路基强度稳定和路面厚度三者的綜合。路面厚度計算的研究，只有在路面結构和路基强度設計的基础上，才有可能。

在大跃进中，道路科研工作取得了很大的成果。在路面方面比較突出的問題是10厘米以下的单一薄层路面的发現。这一問題的提出，不仅在技术方面和經济方面，而且在理論方面，都有很重要的意义。这是路面研究的一个最值得我們注意的問題。从这一实际問題出发，进行路面設計理論的研究，必然会获得巨大的成果。

研究单一薄层路面不仅限于柔性路面，且在刚性路面方面也有一定的意义。西安市城建局1953年在北門外大街曾修建一段水泥混凝土的試驗路面，其中有几段路面的厚度仅有15厘米和10厘米。該路的行車密度每日有数百輛，并且也有很多的載重貨車。到現在为止，在15厘米和10

厘米的水泥混凝土路面中，仍然保持完整而无破坏。无論是柔性的薄层路面或是刚性的薄层路面，以上述这些实际情况来講，用目前現有的設計理論来計算，都得不出这样薄的厚度。这是什么原因呢？这个原因很复杂，它牵涉到路面結构問題、路基强度問題和路面厚度計算理論的問題。不从路面結构和路基强度的实际情况出发去分析研究而只从厚度計算理論去鑽研，是得不出正确結論的。

实践証明：現有的路面設計理論和方法，无論是柔性路面或是刚性路面，都还存在一定的問題和缺点。换句話說，它們与实际情况还有不尽符合的地方，这就应当去找出它的原因并建立新的設計方法和設計理論。

国外对于路面設計理論的研究也很注意，并正在进行这一課題的研究。其中苏联的研究更为突出。

近年来同济大学道路教研組将路面設計理論这一課題作为科研项目之一，并强調路基路面整体設計，作为努力的方向。兹为提供国內所有道路工作者学习参考起見，特搜集和譯出国际間在这方面的研究資料，并由人民交通出版社出版。希望今后能有更多的同志进行这一科研工作，俾收集思广益之效。这就是把这些資料付印的目的。

陈　本　端

于上海同济大学，1960年3月

層狀体系中的应力与位移理論及其在机場跑道設計中的应用

美国哥倫比亞大学
土木工程副教授 D. M. 波米斯特著

俞朝庆譯

提　綱

在基础方面，特别是在机場設計和建筑方面，工程师基本上是接触到了層状的土壤層积物。根据数学的彈性理論方法，发展了两層体系中应力与位移的理論。現在提出这項理論是想闡明控制荷重-沉陷关系的各物理因素彼此間存在的若干基本关系，并提供一种設計机場跑道的实用分析方法。这項理論表明了两个重要比率对于"两層体系"的荷重-沉陷特性的控制性影响，这两个重要比率是：1）承載面半徑与加固層（或路面層）厚度之比 $\frac{r}{h_1}$；2）地基模量与路面模量之比 $\frac{E_2}{E_1}$。为了实际設計的目的，曾經把理論結果以数值方式推演出来，并表示为基本影响曲綫，在曲綫上按照这两項基本比率給出沉陷系数 F_w 的数值。沉陷系数是用来作为对于熟知的布辛氏方程式（对于柔性圓承載面中心的表面沉陷）的簡單乘数，或修正因数。机場跑道的实际設計問題包括：选擇适当与經济的路面构选类型，以及运用"两層体系"的影响曲綫来决定所需厚度，俾使对于飞机輪重有充分的支承，并能得到合理的使用年限。

两層体系理論的假定与条件

"两層体系"理論的提出首先是为了更好地去了解眞象的实質而提供出一种基础，并为了闡明存在于控制荷重-沉陷关系的各物理因素間的若干基本关系。其次是想提供一种分析机場跑道設計的实用方法。

布辛氏解决了有集中荷重施于表面时在均匀層积物中的应力与位移問題。解決現在这个問題的科学途徑在于运用数学的彈性理論方法，对于較普遍的“两層体系”情况发展出来一种应力与位移理論。我們相信数学的彈性理論方法是正確的。要做出“两層”問題的一般答案，就需要訂定彈性理論的必要假定，并且要求满足一定的边界条件和連續条件；但是却不需要事先对于地基上的应力分布性質或者对于应力分布性質与位移間的关系作重大的簡化的假定。

必須認識到，所有的理論都是說明理想的材料和理想的情况，而在自然的土壤層积物中却不完全与它們相符的。主要是根据实际作用情况和經驗，也就是根据这种理論足以解說眞象的程度及与眞象的符合程度，来判断这种理論是否实际适用和能用。

图1中所示的“两層体系”包括一層有一定厚度 h_1 的面層或路面層1，这層連續支承在較弱的地基層 2 之上，并把地基層加强了。有一个表面荷重在作用着，这个荷重均匀地分布于半徑为r的柔性承載面內。为了应用彈性理論来解决这个問題，需要作出下列的假定和条件。

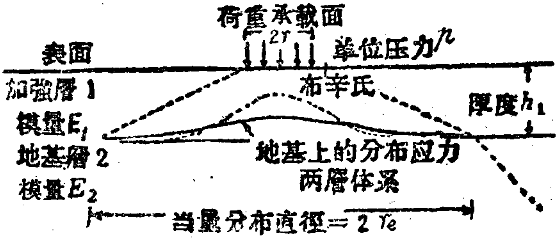

图 1 两層体系

(1)所作的彈性理論上的必要假定是：两層中每層的土壤都是均匀和各向同性的彈性材料，虎克定理在这些材料上是适用的。由于在天然的土壤層积物中，这些假定不是完全能滿足的，根据未縮小的实际荷重試驗結果来演算，应当只得出土壤的平均强度性質，这种性質在准許的沉陷范圍

內是很有代表性的。

(2)假定加强的面層1是沒有重量的，它在水平向的尺度是无限大的。但是它有一定的厚度h_1。假定地基層2在水平向和向下的竪向的尺度都是无限大的。

(3)問題的答案必須滿足一定的必要边界条件，即1層的表面要在荷重面积的范圍以外沒有法向应力和切向应力，而在地基層2的无限深度处，应力和位移必須等于零。

(4)最重要的是“两層”問題的答案必須滿足1与2層接触面处应力及位移的某种基本連續条件。假定两層是連續地接触着的，并且两層象图2所示那样，如同有組合性質的彈性介体那样彼此一起作用着。并且又假定地基在最初对于路面層提供了一个連續而均匀的支承。实际上，这就是良好的建筑实踐中所应当达到的基本情况。根据这种連續性，就要求在接触面处，两層中的法向应力和剪应力，以及竪向位移与水平位移都必須相等。只有接触面处的幅射向水平应力 σ_r 是不連續的。这是因为水平位移u_1和u_2必須相等，而接触面两側的幅射向应力 σ_{r1} 和 σ_{r2} 必須相应地决定于模量 E_1和E_2，所以 σ_{r1} 和 σ_{r2} 就要不同了。

就一切类型的柔性路面构造而言，似乎都能合理地滿足这种連續条件，并且在所施荷重的范圍內、層状体系应当切实地按照理論情况起着作用。就土壤層积物的本身性質而言，在大面积內，情况必然会有很大的变化。基本問題不在于决定平均的情况，因为很合理地可以認为：最不利的情况很可能出現在某一面积內；而这个面积可能成为跑道、汽車道以及停机坪上的“弱点”。

不想把这种理論应用到水泥混凝土路面的角隅荷重或边緣荷重的情况下。但是，如果地基是連續地与水泥混凝土路面接触着，并且給出了合理的均匀支承（这是良好的建筑实踐所追求的基本目标），而荷重又是施于很大塊板面的中央附近，則水泥混凝土路面和地基作用情况应当切实地与这种理論相符。

(5)为了得出問題的实用答案并为了減少复杂性起見，需要假定两層的泊桑比或者是1/2或者是0。采用了1/2的数値，由于認为这个数值或多或少能代表实际情况。再則，对于土壤的这項性質，以及应当采用什么数

値，現在知道得还很少。

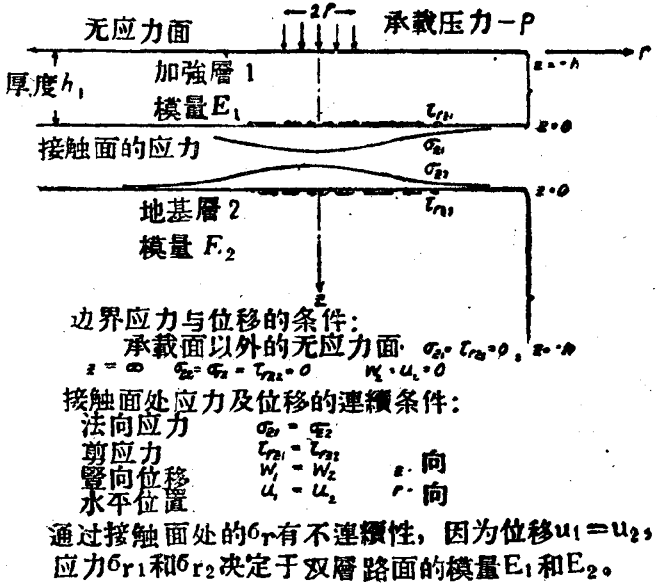

图 2 两層体系的应力与位移的边界条件和連續条件

兩層体系理論

在发展"两層体系"理論时，曾运用了三軸問題中的应力和位移的彈性方程式，这些方程式是劳甫导演出来的，用以滿足彈性理論的平衡与相容方程式（見 A. E. H.劳甫著"数学的彈性理論教程"，1923年，274頁及 S. 鉄木辛柯著"彈性理論"，1934年，309頁，172－4式）。在解決"两層"問題时所取的途徑多少是沿着鉄木辛柯在"彈性理論"44～47頁中所建議的方向。

数学的彈性理論——A. E. H.劳甫及S.鉄木辛柯。

軸向对称的三軸問題中的彈性方程式：

平衡方程式

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}+\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=0\\&\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial r}+\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}+\frac{\tau_{rz}}{r}=0\end{aligned}\right\}\quad\text{(a)}$$

相容方程式

$$\left.\begin{aligned}&\nabla^4=0\\&\nabla^2=\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right]\end{aligned}\right\}\quad\text{(b)}$$

彈性方程式

应力

$$\left.\begin{aligned}&\sigma_z=\frac{\partial}{\partial z}\left[(2-\mu)\nabla^2\phi-\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}\right]\\&\sigma_r=\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\nabla^2\phi-\frac{\partial^2\phi}{\partial r^2}\right]\\&\sigma_\theta=\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\nabla^2\phi-\frac{1}{r}\frac{\partial\phi}{\partial r}\right]\\&\tau_{rz}=\frac{\partial}{\partial r}\left[(1-\mu)\nabla^2\phi-\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}\right]\end{aligned}\right\}\quad\text{(c)}$$

位移

$$\left.\begin{aligned}&w=\frac{1+\mu}{E}\left[(1-2\mu)\nabla^2\phi+\frac{\partial^2\phi}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\phi}{\partial r}\right]\\&u=-\frac{1+\mu}{E}\left[\frac{\partial^2\phi}{\partial r\partial z}\right]^{❶}\end{aligned}\right\}\quad\text{(d)}$$

把应变分数$\frac{\partial w}{\partial z}$和$\frac{\partial w}{\partial r}$配得适合。

兩層体系理論

方程式(c)里的应力函数ϕ要能适合于相容方程式(b)，并且包括貝塞尔函数，这样才能适合于∇^2的微分步驟。假定泊桑比等于1/2，于是得到下列的应力方程式和位移方程式。

应力函数

$$\phi=J_0(mr)\left[Ae^{mz}-Be^{-mz}+Cze^{mz}-Dze^{-mz}\right]\quad\text{(e)}$$

表層 1 的方程式

$$\sigma_{z1}=-mJ_0(mr)[A_1m^2e^{+mz}+B_1m^2e^{-mz}+C_1m^2ze^{+mz}+D_1m^2ze^{-mz}]$$

❶ 原文为此处 $u=-\frac{1+\mu}{E}\left[\frac{\partial^2\phi}{\partial r^2}\right]$，疑誤——譯者。

$$\sigma_{r1}=\left[mJ_0(mr)-\frac{J_1(mr)}{r}\right]\left[A_1m^2e^{mz}+B_1m^2e^{-mz}\right.$$
$$\left.+C_1me^{mz}+C_1m^2ze^{mz}-D_1me^{-mz}+D_1m^2ze^{-mz}\right]$$
$$+mJ_0(mr)\ [C_1me^{mz}-D_1me^{-mz}]❶$$
$$\tau_{rz}=mJ_1(mr)\ [A_1m^2e^{mz}-B_1m^2e^{-mz}+C_1me^{mz}$$
$$+C_1m^2ze^{mz}+D_1me^{-mz}-D_1m^2ze^{-mz}] \qquad \text{(f)}$$
$$w_1=\frac{3}{2E_1}mJ_0(mr)\ \left[A_1me^{mz}-B_1me^{-mz}+C_1mze^{mz}\right.$$
$$\left.-D_1mze^{-mz}\right]$$
$$u_1=\frac{3}{2E_1}\ mJ_1(mr)[A_1me^{mz}+B_1me^{-mz}+C_1e^{mz}$$
$$+C_1mze^{mz}-D_1e^{-mz}+D_1mze^{-mz}] \qquad \text{(g)}$$

地基層2的方程式

得到一組相似的方程式，其系数为A_2、B_2、C_2和D_2，模量为E_2。

兩層体系。应力方程式和位移方程式。

演算方程式(f)和(g)里的常数时，要使它們适合于表面荷重的分布为$\sigma_z=-mJ_0(mr)$时的“两層体系”的边界条件与連續条件。这些方程式里都包括一个强度性質系数 $N=\left[\frac{E_1-E_2}{E_1+E_2}\right]$。

在接触面处　1 層　$z=0$

$$\sigma_{z1}=-mJ_0(mr)[1-N]\left[\frac{(1+mh)e^{mh}-N(1-mh)e^{-mh}}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right] \quad \text{(h)}$$
$$\sigma_{r1}=-mJ_0(mr)$$
$$\left[\frac{(1-mh)e^{mh}-N(1+3mh)e^{mh}-N(1-3mh)e^{-mh}+N^2(1+mh)e^{-mh}}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right]-$$
$$-\frac{J_1(mr)}{r}[1+N]\left[\frac{mhe^{mh}-Nmhe^{-mh}}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right] \quad \text{(i)}$$
$$w_1=-\frac{3}{2E_1}\ J_0(mr)[1+N]\left[\frac{(1+mh)e^{mh}-N(1-mh)e^{-mh}}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right] \text{(j)}$$

在1層表面处　$z=-h$

$$\sigma_{z1}=-mJ_0\ (mr)\ [1] \qquad \text{(k)}$$

❶ 原文括号內为 $C_1me^{mz}+D_1me^{-mz}$ 疑有誤——譯者。

$$\sigma_{r1}=-mJ_0(mr)\left[\frac{e^{2mh}-2N(1-2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right]+$$

$$+\frac{J_1(mr)}{r}\left[\frac{2Nm^2h^2}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right] \qquad (l)$$

$$w_1=-\frac{3}{2E_1}J_0(mr)\left[\frac{e^{2mh}+4Nmh-N^2e^{-2mh}}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right] \qquad (m)$$

曾做过下列的复核，来校驗这些方程式形式的正確性：

(1)如果E_1与E_2相等，即層积物是通体均匀的，則強度系数N等于零，則方程式(h)至(m)可簡化成大家熟知的形式，并可以从这些簡化的方程式很容易地导演出布辛氏方程式。

(2)如果E_2是无限大的，也就是在1層的底部有一个粗糙的岩石面，則強度系数N等于負一(−1)，則岩石面处的法向应力方程式(h)就和首先由皮游特給出的("物理"杂誌，1935年12月号，367頁，"荷重土壤中应力分布的某些不連續性的影响")，以后又由皮开物更完备地給出的(道路研究所年报第18卷，1938年，第二册，35頁，G.皮开特"有某种剛性边界的荷重土壤中的应力分布")方程式相同。并且在岩石面处，σ_z 等于 σ_r
$w=O$

兩層体系。位移方程式的推演。

只对1層表面处的沉陷方程式(m)做了完全的数值演算，因为認为这項是在机場問題中有最直接与最实用的重要性的。把按系数"m"表示的荷重函数做出貝塞尔函数的扩張(与富勒的扩展方式相似)，就得出在一个假定荷重〔假定荷重的分布为 $\sigma_z=-PmJ_0(mr)$❶，即等于在1層表面上有一个集中荷重P〕下的1層表面的沉陷方程式：

$$w_1=\frac{1.5P}{2\pi E_1}\int_0^\infty\left[\frac{e^{2mh}+4Nmh-N^2e^{-2mh}}{e^{2mh}-2N(1+2m^2h^2)+N^2e^{-2mh}}\right]J_0(mr)dm \qquad (n)$$

用一个有限項数的級数〔其积分形式如大家熟知的方程式(o)〕来代替上列的积分一項，就把这个方程式順利地演算出来了。为了保証方程式的演算达到所需的精確度，在每一情况下，都运用以方程式中的分母来除分子而得到的无限級数中的充分多的項数。用了适当的方法（类似于反复法)演算出方程式中当量有限級数的系数C_1至C_{10}等等，俾使有限級

❶ 原文为 $\sigma_z=-pmJ_0(mr)$ 疑有誤——譯者。

数的数值与积分项的数值相差少于1%〔在积分项至少为方程式(n)的积分总数的99%时的各$\alpha=mh$值范圍內〕。这些系数是强度比值$\frac{E_2}{E_1}$的函数。这些系数是就这項比值为1/12至1/10000的实用范圍內的12个数值，而演算的后一项比值代表水泥混凝土。

积分形式：

$$\int_0^{\infty} e^{-a\alpha} J_0\left(\frac{r}{h}\alpha\right) d\alpha=\left[a^2+\left(\frac{r}{h}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\int_0^{\infty} \alpha^n e^{-a\alpha} J_0\left(\frac{r}{h}\alpha\right) d\alpha=(-1)^n \frac{d^n}{d\alpha^n}\left[a^2+\left(\frac{r}{h}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{(o)}$$

当量沉陷方程式：

$$\begin{aligned} w_1=\frac{1.5P}{2\pi E_2}\int_0^{\infty}\Big[&\frac{1-N}{1+N}+C_1(1+2\alpha+2\alpha^2)e^{-2\alpha}+\\ &+C_2(1+4\alpha+8\alpha^2+8\alpha^3\cdots\cdots)e^{-4\alpha}+\\ &+C_3(1+6\alpha+18\alpha^2+32\alpha^3\cdots\cdots)e^{-6\alpha}+\\ &+C_4(1+8\alpha+32\alpha^2\cdots\cdots)e^{-8\alpha}+\\ &+\cdots\cdots+C_{10}(1+24\alpha\cdots)e^{-24\alpha}\Big]\cdot J_0\left[\frac{r}{h}\alpha\right]\frac{d\alpha}{h} \end{aligned} \quad \text{(p)}$$

兩層体系。基本的沉陷方程式。

然后运用方程式(o)的积分形式，把方程式(p)逐项积分出来，此时只留下系数C_1至C_{10}为未确定的系数。于是，在两層体系表面上施以集中荷重P时的表面沉陷方程式成为：

$$\begin{aligned} w_1=\frac{1.5P}{2\pi E_2}\Big[&\left[\frac{1-N}{1+N}\cdot\frac{1}{r}\right]+\\ &+C_1\left[\frac{1}{2h[1+(r/2h)^2]^{1/2}}+\frac{1}{2h[1+(r/2h)^2]^{3/2}}-\right.\\ &\left.-\frac{1}{2^2h[1+(r/2h)^2]^{3/2}}+\frac{3}{2^2h[1+(r/2h)^2]^{5/2}}\right]+\\ &+C_2\left[\frac{1}{4h[1+(r/4h)^2]^{1/2}}+\frac{1}{4h[1+(r/4h)^2]^{3/2}}-\right.\\ &-\frac{2}{4^2h[1+(r/4h)^2]^{3/2}}+ \end{aligned}$$

$$+\frac{6}{4^2h[1+(r/4h)^2]^{5/2}}-\frac{15}{4^3h[1+(r/4h)^2]^{5/2}}+$$

$$+\frac{30}{4^3h[1+(r/4h)^2]^{7/2}}\Bigg]+\cdots$$

$$+C_{10}\left[\frac{1}{24h[1+(r/24h)^2]^{1/2}}+\frac{1}{24h[1+(r/24h)^2]^{3/2}}\right]\Bigg] \quad (q)$$

就圓面积內的均布荷重($P=2\pi\int_0^r p\cdot rdr$)来对方程式 (q) 进行积分，于是得出两層体系圓承載面中心的基本沉陷方程式。

基本沉陷方程式：

$$w_c=\frac{1.5pr}{E_2}\Bigg[\left[\frac{1-N}{1+N}\right]+C_1\left[\frac{0.5r/h}{[1+(r/2h)^2]^{1/2}}+\right.$$

$$\left.+\frac{0.25r/h}{[1+(r/2h)^2]^{3/2}}\right]+C_2\left[\frac{0.25\ r/h}{[1+(r/4h)^2]^{1/2}}+\right.$$

$$\left.+\frac{0.125r/h}{[1+(r/4h)^2]^{3/2}}+\frac{0.0937r/h}{[1+(r/4h)^2]^{5/2}}\right]+$$

$$+C_3\left[\frac{0.167r/h}{[1+(r/6h)^2]^{1/2}}+\cdots\right]+\cdots$$

$$+C_9\left[\frac{0.050r/h}{[1+(r/20h)^2]^{1/2}}+C_{10}\left[\frac{0.042r/h}{[1+(r/24h)^2]^{1/2}}\right]\right]\Bigg] \quad (r)$$

$$w_c=\frac{1.5pr}{E_2}\cdot F_w\left[\frac{r}{h_1},\frac{E_2}{E_1}\right]=\frac{1.5pr}{E_2}F_w \quad (s)$$

重要的是要指出：基本沉陷方程式 (s) 簡化到了最簡單的形式——在布辛氏方程式中附有一个乘数或修正系数F_w，这就是函数 $F_w[r/h_1, E_2/E_1]$。

因为方程式(r)太繁复了，并且在通常的計算中不可能加以运用，所以就按照基本比值E_2/E_1的12种数值和实用范圍內的基本比值r/h_1自 0 至20的各数值，并运用制好的函数r/h表把C_1至C_{10}的数值代入，而把这个方程式的数值演算出来。把方程式(p)計算到充分多的項次，并且在我們的計算中都算到充分多的位数，我們相信数值演算的整体精確度能很好地保持在2％的誤差以內。

兩層体系的荷重沉陷关系

“两層体系”理論揭露了两个重要比值对于体系的荷重沉陷特性上的

控制性影响，这两个重要比值是：1)承載面半徑与加強層(或路面層)1的厚度之比值r/h_1；2)地基模量与加强層1的模量之比值E_2/E_1。为了实际設計起見，把"两層体系"理論的結果以基本影响曲綫表示于图3与图4上，图中給出相当于实用范圍內的两个比值各数值的沉陷系数F_w值。按照方程式(2)，沉陷系数F_w是用来作为大家熟知的用于均匀層积物的布辛氏方程式之簡單乘数或修正因数，这項方程式給出有均布荷重p、半徑为r的承載面中心的表面沉陷值。

布辛氏沉陷方程式。泊桑比μ等于1/2。

柔性承載面(a) $w=\frac{2(1-\mu^2)}{E}pr=1.5\frac{pr}{E}$

剛性承載面(b) $w=\frac{\pi(1-\mu^2)}{2E}pr=1.18\frac{pr}{E}$ (1)

两層体系沉陷方程式。泊桑比μ等于1/2

柔性承載面(a) $w=1.5\frac{pr}{E_2}F_w$

剛性承載面(b) (假定系数1.18)

$$w=1.18\frac{pr}{E_2}F_w \tag{2}$$

必須着重地指出，"两層体系"理論中所用模量E的單位是应力/应变(磅/平方吋被吋/吋除)，这是和彈性理論中的通常觀念和記号相符的。

自方程式(1)和(2)得知，地基表面的承載面当量应变等于沉陷值被承載面的特性长度所除：

$$\text{应变}=\frac{p}{E}=\frac{w}{1.5r}\text{或}=\frac{w}{1.5rF_w},$$

$$\text{模量}E=\frac{p}{w/(1.5r)}\text{或}=\frac{p}{w/(1.5rF_w)} \tag{3}$$

这点在实际上說：就表面荷重所引起的应力沉陷关系而言，土柱的当量高度等于承載面半徑1.5倍(或$1.5F_w$倍)，而在无側限压力試驗中则为試样半徑的4倍。必須注意，这样確定的模量是一个稳定数值，它和承載面的大小，以及两層沉陷系数F_w是无关的。

証明"两層体系"沉陷方程式(2)形式正确性的試驗是：在极限情况

下，这个方程式必須簡化成布辛氏方程式(1)。当 r/h_1 接近于零时，也就是 h_1 很大时，層积物变成全由 1 層組成的均匀層，并且沉陷系数 F_w 的数值变成 E_2/E_1 值；图3指出，影响曲綫在豎軸綫 r/h_1 上交点的数值等于零。于是，沉陷方程式(2)变成

$$w=\frac{1.5pr}{E_2}\times\frac{E_2}{E_1}=\frac{1.5pr}{E_1}。$$

在另一个极限上，r/h_1 接近于无限大，也就是 r 很大，或者 h_1 很小，则層积物变成为由地基層 2 整个构成的均匀体，而沒有路面了。如图 3 所示，沉陷系数 F_w 就变为1，并且方程式(2)变成方程式(1)。在基本比率为其他数值时，沉陷系数的数值可由基本影响曲綫确定之。

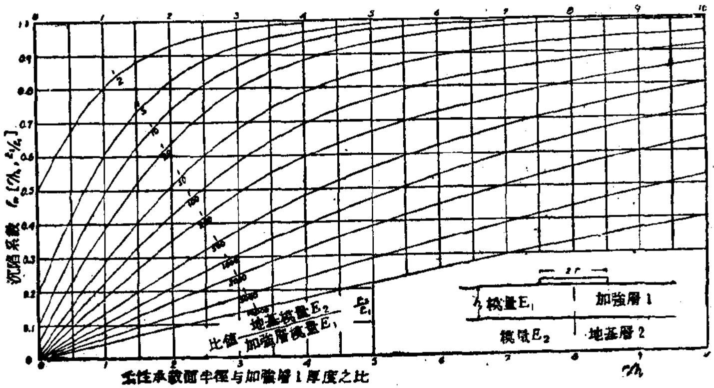

图 3　两層土壤体系的荷重—沉陷特性。沉陷系数 $F_w\left[r/h_1, E_2/E_1\right]$ 的影响曲綫和基本关系。柔性承載面中心的沉陷为 $w_c=1.5\ \frac{p\cdot r}{E_2}\ F_w\left[r/h_1, E_2/E_1\right]$[1]

双層体系的荷重沉陷特性

在机場跑道設計中，基本問題是决定路面層在对于某种地基的加強和約束方面的有效程度。設計的标准基本上必須是把各种路面層的沉陷限制到很小的数值，保証能防止粗料基層的有害性压縮和地基的形变，这

[1] 原文在式中的 p 为 P，疑誤——譯者。