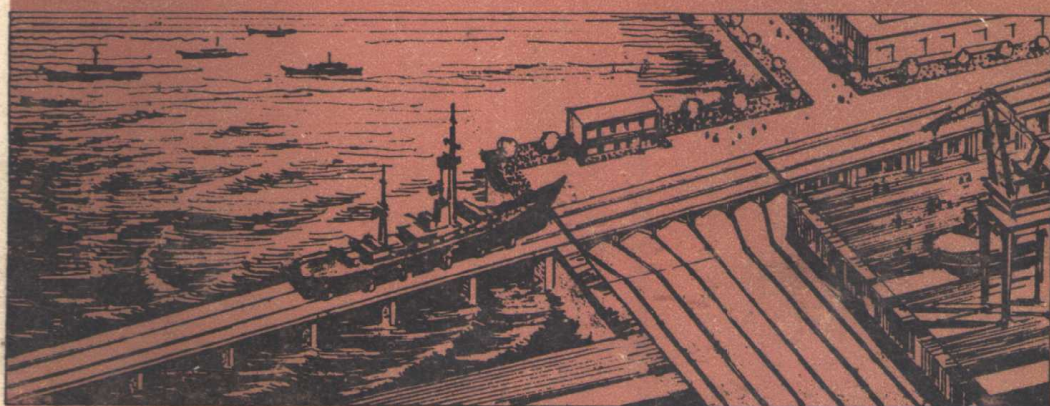


船 台 滑 道 设 计 用 书

弹性地基梁及矩形板计算

中国船舶工业总公司第九设计研究院 编



國 防 工 業 出 版 社

弹性地基梁及矩形板计算

(船台滑道设计用书)

中国船舶工业总公司第九设计研究院 编

国防工业出版社

内 容 提 要

本书系“船台滑道设计用书”之一。书中阐述了文克尔假定弹性地基的基本理论,提供了基于该假定的弹性地基梁、正交格形梁、矩形板、桩基矩形板的手算和电算实用计算方法,以及十五个有关文克尔假定的计算系数表、资料、电算程序的附录。

本书可供船厂水工结构和一般土建专业设计人员以及有关院校师生参考。

弹性地基梁及矩形板计算

(船台滑道设计用书)

中国船舶工业总公司第九设计研究院 编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 30¹/₂ 714千字

1983年1月第一版 1983年1月第一次印刷 印数: 0,001—4,100册

统一书号: 15034·2388 定价: 4.05元

前 言

船台滑道设计是港口和修造船厂设计的重要组成部分。为总结建国以来有关这方面的经验,我们决定编写一套船台滑道设计用书,分《船台滑道工艺设计》、《船台滑道结构设计》、《弹性地基梁及矩形板计算》、《弹性地基计算图表及公式》四个单行本出书。本书《弹性地基梁及矩形板计算》与《弹性地基计算图表及公式》先行出版,其余两册将陆续编写付印。

弹性地基梁板是船台滑道工程的主要常用结构型式,其计算方法是工程界的重大课题。当前通用的主要计算理论有文克尔(E. Winkler)假定,弹性半无限体假定以及直线反力假定三种。文克尔假定是一个比较老的理论,假定本身也存在一些缺点,引起国内外科技界不同意见,但由于在工程实践中较实用,故现在仍被日本和欧美国家广泛采用。我们在船台滑道弹性地基梁板设计中,习用文克尔假定,因此本书全部内容都基于该假定。实践证明这个假定对船台滑道一类工程是可用的。

本书包括五章和十五个附录。第一章介绍文克尔假定的概念、适用条件及该假定中的基床系数的选用方法;第二章至第五章分别介绍在实际工作中计算弹性地基梁、正交格形梁、矩形板、桩基矩形板的手算和电算方法;每个方法后面都附有例题,为了便于比较,每章的例题尽量采用同一计算资料。附录中有五个适用于船台滑道工程的电算程序及十份资料和系数表。各章内容均立足于实用,理论性问题一般不多作论述,主要是把我们现用的计算方法及有关资料汇编成册,便于查用,并作一些分析比较。书中公式除文克尔假定的基本理论公式列出详细推导过程外,其他公式的推导基本从略,仅列出结果。

本册编写过程中,中国科学院力学研究所田千里同志对全稿提出了修改意见;中国船舶工业总公司勘测公司熊大阅同志、华东水利学院力学系、清华大学水利系、哈尔滨建筑工程学院、天津大学水利系、大连工学院港工教研室、交通部水运规划设计院及第一航务工程局设计研究院等单位分别对提纲或初稿都提过宝贵建议;上海师范大学数学系协助解决电算问题,在此一并致谢。

由于技术水平有限,更限于人力和时间,没有广泛收集国内外资料,书中难免存在错误和缺点,敬请读者批评指正。

本书审校、编写人员名单:

审 定: 陈达雄、吴国鑫、何根华、宣祥沃。

编 写: 第一章: 梁修、高秀理; 第二章: 赵安仁、高秀理、王志兴; 第三章: 翁志豪、赵安仁; 第四章: 梁修、赵安仁; 第五章: 梁修; 附录一: 赵安仁; 附录二~五: 梁修; 附录六~八: 严之淳; 附录九、十: 赵安仁; 附录十一: 黄溥荣; 附录十二: 严之淳; 附录十三: 黄丽萍、林克伦(以上上海师范大学)、赵安仁、王志兴; 附录十四: 王守根、

IV

蒋国芳（以上上海师范大学）、王志兴；附录十五（根据上海交大程序改编）：王守根、赵安仁。全书最后由梁修、赵安仁整理。

绘 图：肖本敬、丁根娣。

此外，钟百毅、耿鸿川同志各校对了两章文稿，方思久、邹婉珠同志对初稿提出了意见，董萼、徐湘蓉同志协助誊写了部分稿件，都做了不少工作。

目 录

第一章 概论	1	§ 2-5 台阶形变截面弹性地基梁的计算	62
§ 1-1 弹性地基梁板计算理论简介及其在船台滑道工程中的应用	1	一、截面法	62
一、引言	1	二、有限单元法	67
二、地基模拟假定及其计算方法	2	三、实例与讨论	68
三、船台滑道工程弹性地基构件计算草图的选择	6	§ 2-6 轨枕道碴基础的计算	80
§ 1-2 有关基床系数法的几个问题	7	一、计算方法与假定	80
一、采用基床系数法的一些情况	7	二、计算公式与步骤	82
二、有关基床系数法的几项概念	16	三、实例	88
三、刚度的判定及梁、板的区分	21	§ 2-7 弹性地基梁的扭转	90
§ 1-3 基床系数 k 值的选用方法	22	一、基本假定	90
一、影响 k 值的因素	22	二、无限长梁的扭转	91
二、载荷试验法	23	三、有限长梁的扭转	93
三、查表法	30	四、实例	94
四、根据压缩模量 E_s 换算法	30	参考文献	102
五、理论和经验公式法	36	第三章 正交弹性地基格形梁的计算	103
六、实测沉降或沉降计算法	38	§ 3-1 概述	103
参考文献	39	§ 3-2 荷载传递法	104
第二章 弹性地基梁的计算	41	一、荷载多次传递法	104
§ 2-1 概述	41	二、荷载一次分配法	107
§ 2-2 弹性地基梁的基本理论方程式	42	三、节点形状分配系数法	103
§ 2-3 等截面弹性地基梁的计算	44	§ 3-3 有限单元法	112
一、有限长度弹性地基梁的一般解	44	§ 3-4 应力值修正	119
二、无限长梁的计算	48	一、方法一	119
三、半无限长梁的计算	50	二、方法二	120
四、计算步骤和举例	51	§ 3-5 实例及讨论	121
§ 2-4 利用影响线计算弹性地基梁	54	一、例题3-1	121
一、影响线的原理	54	二、例题3-2	132
二、计算步骤及公式	55	三、分析与讨论	135
三、举例	57	参考文献	136
		第四章 弹性地基矩形板的计算	137
		§ 4-1 概述	137
		§ 4-2 弹性地基矩形板的基本理论方程式	139
		一、各同向性板	139

二、正交各向异性板	142	四、有限差分法	229
三、边界条件	143	§ 5-3 实例及讨论	229
§ 4-3 按弹性地基梁近似分析法	144	一、例题	230
一、一般原理	144	二、讨论	239
二、计算要点	150	参考文献	245
三、关于铰的问题	151	附录一 三角函数、双曲线函数、 指数函数	246
§ 4-4 有限差分法	153	附录二 无限长梁的 A_φ 、 B_φ 、 C_φ 、 D_φ 值	263
一、一般原理	153	附录三 克雷洛夫函数的数值	269
二、板的差分法基本方程式	155	附录四 巴斯捷纳克法 短梁的 ρ 值	283
三、四周自由边矩形板的格点 挠度方程式	156	附录五 选用基床系数的参考值和 公式	288
四、内力计算	161	附录六 钢筋混凝土轨枕特征 系数表	298
五、对称荷载与反对称荷载	166	附录七 钢轨应力 σ_s 及轨枕压力 Q_s 计算值	308
六、荷载的替代	173	附录八 道碴垫层厚度计算曲线	406
七、误差的估计	175	附录九 美国混凝土学会建议的 弹性板方法	411
§ 4-5 有限单元法	176	附录十 正交各向异性板结构的 弯扭刚度	412
一、一般原理	176	附录十一 杆件系统有限单元法 程序	416
二、矩形薄板单元的位移模式	177	附录十二 弹性地基梁电算程序	432
三、矩形单元的内力和刚度矩阵	179	附录十三 有限差分法电算程序	444
四、地基刚度矩阵	183	附录十四 各向同性矩形薄板有限 单元法程序	453
五、荷载矩阵和约束处理	185	附录十五 各向异性矩形薄板有限 单元法程序	465
六、总刚度矩阵	190		
七、有限条分法	190		
§ 4-6 举例及讨论	197		
一、例题4-1	197		
二、例题4-2	198		
三、讨论	213		
参考文献	217		
第五章 桩基弹性支承矩形板计算	218		
§ 5-1 概述	218		
§ 5-2 计算方法	220		
一、相当基床系数法	220		
二、无梁薄板近似法	220		
三、有限单元法	228		

第一章 概 论

§ 1-1 弹性地基梁板计算理论简介及其 在船台滑道工程中的应用

一、引 言

本书所介绍的弹性地基梁板都属于浅基础，即埋置深度小于基础宽度的基础。

在船厂船台滑道工程中，钢筋混凝土弹性地基梁、矩形板、轨枕道碴基础是被广泛采用的基础结构型式。近几年来，由于架空船台建造的需要，钢筋混凝土正交弹性地基格形梁也常被采用。格形梁是介于梁和矩形板之间的一种结构，其单个构件是梁，其整体作用则类似于板。本书主要介绍在设计弹性地基梁、正交格形梁和矩形板时所采用的实用计算方法；对于理论性的问题，限于篇幅和水平，不准备多作论述。

弹性地基梁、板的分析理论，是工程界的一个重要课题，对其研究已有一百多年的历史。国内外有关这个课题的著述颇多，提出了不少理论或假定，但是在工程上能达到实用目的的假定主要有三种，即：反力直线分布假定，基床系数假定，半无限弹性体假定。本书所介绍的各种计算方法均基于基床系数假定，对其余两种假定仅作简略的介绍。

任何结构物都必须建筑在地基上，而结构物的重量则通过基础传给地基。基础的形式有梁、板、正交格形梁和桩等类型，通过基础扩大地基的受荷面积，以减少地基承受的压力。在船台滑道工程中，所谓弹性地基，一般是指天然地基，铺有砂石垫层的地基或者是抛石基床而言；对于桩基，当考虑桩身轴向变位对上部结构内力的影响时，通常是属于弹性支承结构的问题，但是，采用基床系数假定计算上部板时，往往也可获得较好的结果。为此，关于桩基支承矩形板的计算问题，也在本册内加以阐述。

基础按构件刚度的不同，可分为刚性基础和弹性基础两种。刚性基础承受荷载后，基础本身不发生挠曲，或是挠曲小到可以忽略不计，故基础底面在受荷后仍为一平面，在中心荷载作用下，基础底面各点的沉降都是一致的；在偏心荷载作用下，基础底面各点的沉降则按直线规律变化。弹性基础则不然，承受荷载后，基础本身发生挠曲，因而基础底面各点的沉降都不相同。当上部荷载通过基础传给地基，基础底面就受到地基反力的作用。地基反力的总和同上部荷载大小相等，方向相反，两者的合力互相重合在一条直线上。地基反力的分布与地基土壤的物理力学性能、基础底面的形状、基础刚度和荷载情况都有关系，要想用精确的方法计算地基反力的分布是有困难的，因此，必须对基础底面反力的分布或反力与沉降的关系作出模拟假定，以简化计算。地基反力确定了，则基础梁板的内力就不难求得，所以，从某种意义上讲，弹性地基梁板的计算问题，就是确定地基反力的分布问题。当前，求算地基反力的模拟假定主要有三种：即前述的反力直线分布假定、基床系数假定、半无限弹性体假定。

弹性地基上的梁、矩形板，按基础结构的类型和地基工作条件，可以分为四组计算情况：

第一情况 平面应力状态，即位于厚度有限的弹性薄层上的梁，梁的宽度等于薄层的厚度，见图 1-1。

第二情况 平面应变状态。承受均布条形荷载的带形板，沿其横向截取一米宽的板带进行计算，就符合这种状态，见图 1-2。

以上两组情况统称为平面问题。

第三情况 在半无限弹性体上的梁，见图 1-3。

第四情况 在半无限弹性体上的矩形板，见图 1-4。

以上两组情况统称为空间问题。

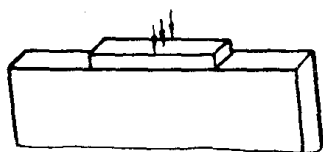


图1-1 平面应力状态

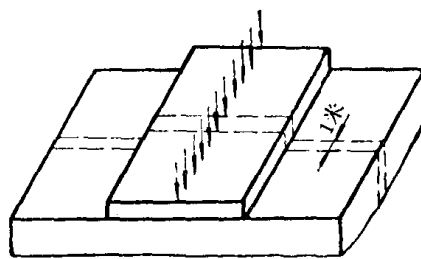


图1-2 平面应变状态

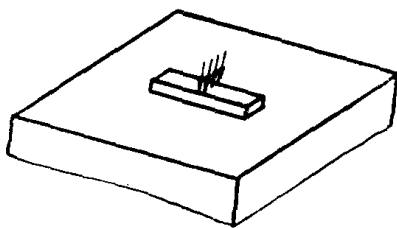


图1-3 空间问题梁

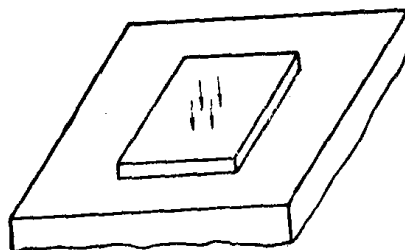


图1-4 空间问题板

以上四组情况，在选择设计计算草图时要用到，尤其对于弹性半无限体假定更为重要，需要根据不同的情况，采用不同的计算方法。对于基床系数假定及反力直线分布假定第一、第二、第三组情况的计算实质上一样，故仅只有梁板之分。

二、地基模拟假定及其计算方法

(一) 反力直线分布假定 (简称反力直线法)

1. 一般原理

这是一种近似的方法，计算简单，假定地基反力是按直线变化规律分布的，其地基反力图在对称荷载时是矩形的，在偏心荷载时是梯形的。这一假定没有考虑基础和地基变形的一致性，不论荷载及其分布情况如何，基础的刚度和土壤的力学性质如何，都可以由材料力学的中心或偏心受压公式计算出地基反力。

如果基础是刚性的，则反力直线法与按基床系数法（见后）求得的结果是一致的。此

外，如地基反力与边载相等，或者是基础刚性很大而压缩土层又很薄时，反力直线法所得结果也与实际接近。

2. 计算方法

根据材料力学偏心受压公式

(1) 梁

$$p = \frac{\Sigma P}{bl} \left(1 \pm \frac{6e}{l} \right) \quad (1-1)$$

式中 ΣP ——基础上的总垂直荷载 (吨);

e ——垂直荷载的合力对基础中心的偏心距 (米);

b ——基础底面的宽度 (米);

l ——基础底面的长度 (米);

p ——基础两端的地基反力 (吨/米²)。

(2) 矩形板

$$p = \frac{\Sigma P}{bl} \left(1 \pm \frac{6e_x}{l} \pm \frac{6e_y}{b} \right) \quad (1-2)$$

式中 p ——板四角点的地基反力 (吨/米²);

e_x 、 e_y ——分别为垂直荷载的合力在长轴 (x 轴) 和短轴 (y 轴) 方向对基础底面形心的偏心距;

其余符号同上。

在求得地基反力分布图后，即可根据结构力学原则求算梁和板的内力。板的内力分析实际上是一个高次静不定问题，为了简化计算，可以把矩形板的两个方向都当作梁来考虑，参照本册第四章第三节的原则计算。

(二) 基床系数假定 (简称基床系数法)

1. 一般原理

1801 年，富斯首先提出每单位长度的基础梁下的总地基反力与地基变形成正比。显然，这一假定只能用于等宽度的基础梁。1867 年，捷克人文克尔 (E. Winkler) 将其发展为地基每单位面积上所受的压力 p 与地基的变形 y 成正比，即 $p = ky$ ，其中 k 称为基床系数，这样就使其适用范围扩大到可用于任何形状的基础梁板。1888 年，柴麦尔曼 (H. Zimmermann) 将这一假定用于铁路轨道设计。上述假定一般称为文克尔假定，或者称为基床系数法。

基床系数法的假定可归纳为两点：

(1) 梁的每一点的挠度与地基的变形相等，且两者之间没有缝隙存在，即梁的挠度曲线与地基变形相一致，在出现负的地基反力时，也不发生分离，这一点在实用上是可行的，因为结构重量对地基施加了一个初始预压力。

(2) 假定地基的变形只与该点受力大小成比例，地基相邻点之间不存在相互作用，而是起着一系列独立弹簧似的作用。因此，地基的变形只发生在基础范围内，而基础以外的地基变形则等于零，这样就不能考虑边载对基础地基反力的影响，图 1-5 为文克尔弹性地基示意图。

基床系数法考虑了基础与地基的弹性性质和两者在受力后保持接触的原则, 这比反力直线法要进一步, 但是, 基床系数法本身也有其不合理的地方:

(1) 该法假定地基变形只发生在基础范围内, 事实上, 地基变形也发生在基础范围以外, 变形的变化不是突变而是渐变 (见图 1-6), 即使受均布荷载作用, 弹性基础各点沉降也不是均匀的, 而是基础中心较大, 荷载区域外沉降也不等于零。如果照基床系数假定, 则均布荷载作用下基础各点沉降应是相同的, 而荷载区域外的地基变形为零。



图1-5 文克尔弹性地基示意图



图1-6 地基的实际变形

(2) 该法假定对同一基础的基床系数是相同的, 事实上土壤不可能在地基反力和沉降之间有任何一定的比值, 基础底面某点的地基反力与该点沉降之间的比例对于基础底面不同点乃是不同的。基床系数不仅与土壤的性质有关, 而且也与荷载面积的大小和形状有关。在单位荷载相同条件下, 基床系数随基础底面积的增加而减小。此外, 如果其他条件相同的话, 基床系数还随着单位荷载的增加而减少。因此, 基床系数对某一种土壤并不是一个常数, 用单一的系数所得的计算结果是较粗略的。

(3) 按基床系数法, 基础两侧边荷载的影响是无法考虑的, 实际上, 边荷载往往对于基础底面地基反力的分布及沉降具有较大的影响。

虽有上述缺点, 但由于计算方法简单, 故在工程实践上该假定并未被淘汰而仍被广泛采用。在水工结构中, 应用它来分析土石坝的斜墙、心墙、承受水平力的桩或板桩、隧洞衬砌和地下厂房等等。在其他领域中, 例如楼面结构、桥面结构、船壳结构上的纵横交叉梁系、高压容器、薄壳结构等等, 虽然型式不同, 但都可归结为文克尔假定类型而用同一数学分析方法处理。关于基床系数法在基础工程的适用范围将在后述。

鉴于文克尔假定中的缺陷, 为了消除该假定中沉降不出现在基础范围外的缺点, 提出过双垫层系数假定^[8], 其中第一个系数与文克尔假定的基床系数无甚区别, 第二个系数则是考虑土壤颗粒间内摩擦力和粘着力的剪力系数, 由于这二个系数较难确定, 因而至今尚未实用。此外有关资料提出过应用具有可变电基反应模量 (刚性系数) 的文克尔模型。这样通过选择一组适当的基床系数分布, 就可以模拟有关土壤的分布性能, 梁板边缘的塑性变形等作用^[4]。文献[34]的作者也建议采用可变的基床系数, 其方法是将基础梁板划分为大小相同的单元, 通过沉降计算和逐次渐近法求得各单元对应的 k 值。近年来国内有人提出用三弹簧来改进文克尔弹性地基, 除原有垂直弹簧外, 另增一水平弹簧和一垂直弹簧, 用以模拟荷载的侧向传递。

当梁为刚性时, 用基床系数法与用反力直线法计算所得的结果是一致的, 因为这时基础底面各点的沉降按直线规律变化。基础为刚性的条件是基础截面本身的刚度 $E_b J$ 值 (E_b 为基础材料的弹性模量, J 为基础截面的惯性矩) 甚大, 或者是地基非常软弱, 故反力按直线分布是基床系数法的极限情况。

2. 计算方法

(1) 梁及平面问题板

a. 初参数法：此法为弹性地基梁的通解，适用于任何梁端边界条件，任何荷载情况，可解决较为复杂的问题。由于初参数法的通用性，在本书第二章中将其原理作较详细的介绍。初参数法的解法较多，其中以克雷洛夫法（А. Н. Крылов）最为简单适用。

b. 变截面法：此法适用于阶梯形变截面梁的计算，有巴斯捷纳克法（П. Л. Пастернак），后藤裕法（M. Hetenyi）等，对这种方法都将在本书第二章中介绍。

除以上两种方法外，还有链杆法、有限差分法、有限单元法等，前者为弹性理论的热莫契金法（Б. Н. Жемочкин）在文克尔假定中的应用，后两者则必须借助电子计算机进行。本书附录十一、十二中附有计算弹性地基梁的电算程序。

（2）正交格形梁

正交格形梁的计算理论依据仍是基床系数法，其原理是根据纵横相交的梁在交叉点处挠度相等的原则，求出荷载在纵横方向的分配系数，再按一般弹性地基梁方法计算纵横梁的内力。本书要介绍的计算方法有两种：

a. 近似法：可分为多次传递法，一次分配法，形状系数法等，详见本书第三章第二节。

b. 矩阵分析法：此法即有限单元法在格形梁计算中的应用，必须借助电子计算机进行，详见本书第三章第三节，电算程序见附录十一。

（3）板

本书介绍的计算方法分两类：

a. 按弹性地基板的计算方法：主要有有限差分法，有限单元法，都需要利用电子计算机进行计算，详见本书第四章，电算程序见附录十三、附录十四和附录十五。

b. 将板简化为梁的计算方法：本书第四章中介绍了两种按文克尔假定计算弹性地基板的简化方法。

（4）桩基弹性支承板

所介绍的计算方法有相当基床系数法，无梁薄板近似法，有限单元法，有限差分法等四种，见本书第五章。

（三）半无限弹性体假定（简称弹性理论法）

1. 一般原理

该法依据弹性理论来求解弹性地基梁板。假定地基为一均质的半无限直线变形体，利用弹性理论中的布西内斯克（Boussinesq）公式（即点荷载引起的弹性半无限体地表变形公式）及富拉曼（Flament）公式（即线荷载引起的地表变形公式），根据基础挠度和地基变形相等的原则，来求解地基反力。这个方法比前两种方法在理论上更为合理，它考虑到地基相邻荷载对选用的计算点的地基反力影响，因此可以考虑边荷载的影响；但是这种假定也存在问题，首先土体的应力和应变关系并非是非线性的，尤其当应力超过地基弹性平衡状态时，靠近基础边缘部分的土壤会进入塑性状态；其次土体也不是理想的均质弹性体，而是各向异性的弹塑性体，地基土壤的变形模量 E_0 和泊松比 μ_0 是空间位置坐标 x 、 y 、 z ，荷载强度 p 以及土壤固结时间 t 等的函数。即使是同一性质的土壤，地基内的变形模量也会随深度而增加。许多试验与实测资料证明，按半无限弹性体假定求算地基变形时，要比实测值为大。且按弹性理论所得地基反力分布图形一般呈马鞍形，地基反力一般都集

中在梁端和板的边缘处，这是按此理论所算得的梁板正弯矩过大的主要原因。为了使假定更加符合地基的实际情况，于是出现了变形模量随深度增加的地基假定，有限压缩层地基假定，后者已有可以实用的计算方法。据一些文献指出，构筑物的沉降的80~90%产生于不太深的地基厚度中，当近似地确定有限压缩层厚度时，可以采取等于基础宽度的0.5~0.75倍，或者深度取为地基附加应力等于土壤自重应力的50%的地方（自重从基础底面算起）。

一般说来，半无限弹性体假定，适用于粘土地基，或土的压缩层厚度 H 与基础长度 l 之比 $\frac{H}{l} \geq 1.5$ 的地基。

2. 计算方法

根据弹性半无限体假定提出的梁或板的近似解法有：多项式法、链杆法、能量法以及国内学者提出的方法，详见参考文献〔1〕、〔5〕、〔6〕、〔7〕、〔8〕、〔9〕、〔10〕。尤其是文献〔5〕已经列出了大量计算图表，可供设计参考，因此本书对这方面的计算方法就不再介绍了。近年来，由于电算技术的发展，已可用有限单元法、有限差分法来计算弹性半无限体上的梁板。

根据有限压缩层地基假定计算弹性地基梁的方法（见文献〔11〕、〔12〕、〔13〕），是一个颇有推广前途的方法。

实际的测试及研究表明，基床系数法和弹性理论法代表着土体受力的两种极端状态，地基在外荷载作用下的变形既不是仅限于基础范围内，也不是如弹性理论那样变形延伸很远，而是影响有限。

三、船台滑道工程弹性地基构件计算草图的选择

船台滑道工程弹性地基构件计算简图的选择，应该根据每一构件的具体情况而定，取决于受力条件、外形尺寸、边界条件、地基支承情况、构件刚度等，要想详细地规定是有困难的。根据基床系数法，弹性地基构件的计算简图，大体可以分以下四类，现列出以供参考。

（一）按照弹性地基梁计算

属于这一类的构件有滑道条形基础梁，各式滑道过渡段条形基础梁，承受均布条形荷载的等截面和变截面船台板（截取一米宽板带计算），吊车道条形基础梁，轨枕式移船轨道及吊车道，承受局部荷重符合于梁条件的板，整体式防汛闸门底板等。

（二）按照弹性地基板计算

属于这一类的构件有承受局部荷载的板，正块的移船轨道板，纵向油脂滑道的舰浮段船台板等。

（三）按照弹性地基格形梁计算

属于这一类的构件有架空船台的格形基础梁，安放于抛石基床上的滑道井字架，有横向连系梁的各式滑道条形基础梁或过渡段基础梁。

（四）作为刚性基础板梁计算

属于这一类的构件有钢筋混凝土轨枕、自动转向小车基础、摇架基础、挡土墙底板等。

§ 1-2 有关基床系数法的几个问题

一、采用基床系数法的一些情况

当前弹性地基梁板的计算方法主要有基床系数法和弹性理论法两种，已如前述。尽管基床系数法从理论上来讲缺点比弹性理论法为多，但是无论国内国外，这两种方法仍是在同时使用着，前者在西方国家和日本盛行，而后者在苏联和德国的书籍中较多提及。在国内，对这两种方法也是同时采用，有的科技学术单位倾向于前者，有的主张用后者，甚至同一单位的不同部门采用了不同的方法。据了解，目前国内各港工设计单位，在设计船台滑道、船坞等工程时，仍多采用基床系数法。

按基床系数法计算的构件内力一般要比按弹性理论法计算的为小，以整个梁或板承受均布荷载的最简单情况为例，在采用前一种方法时，结构均匀沉降而不出现弯矩，在采用后一方法时，梁板受弯而产生正弯矩（梁板底部受拉）。当几个集中荷载作用于梁或板上时，基床系数法得出的弯矩图如图 1-7 的实线 I 所示，弯矩曲线在基线上下波动，在荷载作用点的弯矩是正的，在两荷载间是负的，两种弯矩的平均绝对值大致相等。如

采用弹性理论法，则所得的荷载作用点的弯矩要比基床系数法大，同时各荷载间的弯矩仍保持为正值或少许是负值，如图 1-7 虚线 II 所示。在五十年代曾用弹性理论法设计的五千吨级船台板厚度为 90 厘米，钢筋含量约 93 公斤/米³，而目前上海一些万吨级船台板，按基床系数法计算厚度仅 50~60 厘米，钢筋含量约 80 公斤/米³。正如参考文献〔5〕的作者所指出：“对于新理论的计算考虑得不够周密，常常会发现所得的结果使结构物厚度比当时按基床系数假说所算出来的同一类型结构物的厚度为大。”

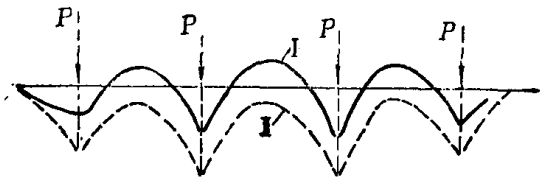


图1-7 集中荷载下的弯矩图

如采用弹性理论法，则所得的荷载作用点的弯矩要比基床系数法大，同时各荷载间的弯矩仍保持为正值或少许是负值，如图 1-7 虚线 II 所示。在五十年代曾用弹性理论法设计的五千吨级船台板厚度为 90 厘米，钢筋含量约 93 公斤/米³，而目前上海一些万吨级船台板，按基床系数法计算厚度仅 50~60 厘米，钢筋含量约 80 公斤/米³。正如参考文献〔5〕的作者所指出：“对于新理论的计算考虑得不够周密，常常会发现所得的结果使结构物厚度比当时按基床系数假说所算出来的同一类型结构物的厚度为大。”

基床系数法在基础工程中的适用条件还是一个不太明确的问题，有关文献的说法不尽一致，迄无定论。太沙基认为作为一种近似方法，基床系数法可用以计算任何土壤的地基反力和桩基反力^{〔14〕}。后藤裕根据福泼尔（A. Föppl）的试验也认为基床系数法对大多数土壤适用^{〔2〕}，但是有些学者则认为基床系数法只有一定的适用范围。现针对船台滑道工程的情况结合一些资料，谈谈对基床系数法适用条件的几点认识，以下所谈的是指整个基础采用单一的基床系数的条件●。

1. 从结构型式的受力条件看，轨枕道碴基础最适合文克尔假定。从火车经过钢轨时可以看到，轨枕似如弹簧般地下沉，在火车离去后，又恢复原状，这类结构在船台滑道工程中是大量的，通过对某工程进行实测，也证明钢轨变形后的应力曲线和理论计算是相似的，见图 1-8。

● 以下的条件是基于下列前提阐述的：

- （1）假定地基在荷载加上的初期，如同弹性半无限体一样地受力。
- （2）地基反力或基础内力是以地基变形停止时的情况为准。

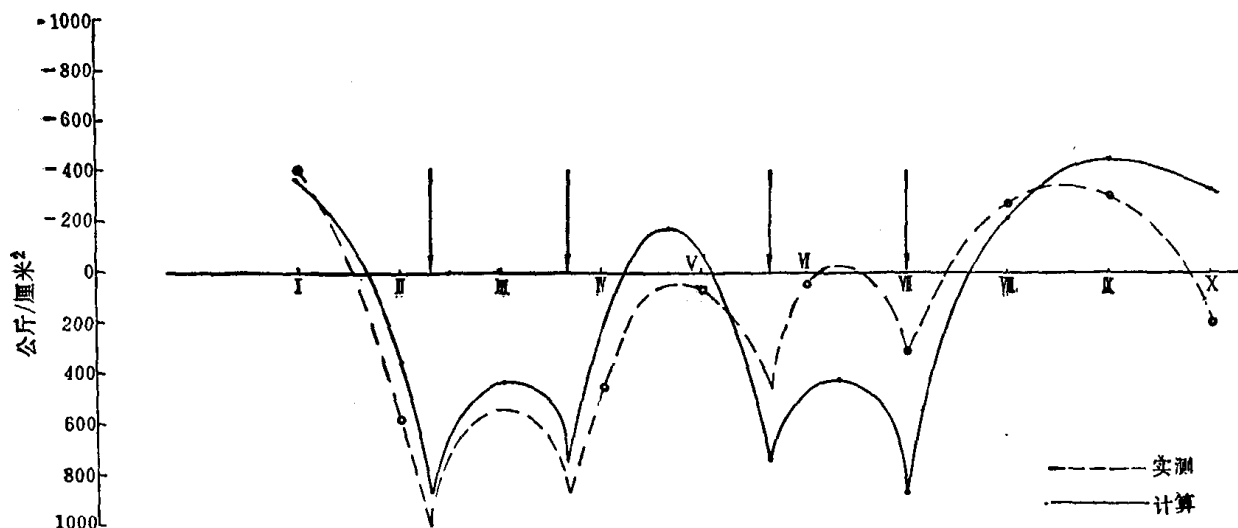


图1-8 某工程实测钢轨应力曲线

桩在受力后产生轴向变位，其作用与弹簧相似（桩的一部分变位在卸荷后是不能恢复的），当桩距在一定范围内，其作用与轨枕结构类似，用基床系数法计算了几例的桩基梁板，其桩基反力及梁板弯矩与桩基有限单元法的结果大体接近。文献〔5〕、〔14〕曾提出可用基床系数法计算桩基，可能就是因为桩的作用似弹簧。

2. 基床系数法究竟在什么土壤上适用，要看其受荷载后，基础底面地基反力的分布图形如何与地基的变形情况如何。对基础结构内力起决定作用的，是基础底面的反力图形。基床系数法对某种土壤是否适用，要看在同一荷载作用下，实测地基反力图形与计算地基反力图形是否相似，如相似就适用，不然就不适用。水应是最理想的文克尔地基，船浮于水上，船底任何一点的浮力与吃水深度成正比，即基床系数 $k = 1 \text{ 吨/米}^3$ 。

图 1-9 所示是文献〔15〕所载不同刚度的圆板模型试验结果，试验是在不同土壤和不同荷载作用下进行的。尽管试验是针对圆板，且原著说明是在缺少试验条件，对一切观察过程缺少足够考虑中进行的，但仍有一定参考价值。图 1-10 为三个实测地基反力参考图。图 1-10(a) 为位于砂和粘土地基上的均布荷载小型弹性基础；图 1-10(b) 为一集中荷载基础。

基础分类		1. 理想土壤	2. 岩石	3. 粘性土壤（粘土）		4. 颗粒土壤（沙）	
刚度	负 荷	$p = ky$		表面应力下有孔隙水	孔隙水应力消除	(a) 疏松的	(b) 坚实的
刚性	中心荷载						
弹性	均布荷载						
弹性	中心荷载		带 边的通过计算求得 带 边的通过试验求得 无边的是估计的				
弹性	边缘集中荷载						
柔性	均布荷载						

图1-9 不同刚度圆板下的地基反力图形

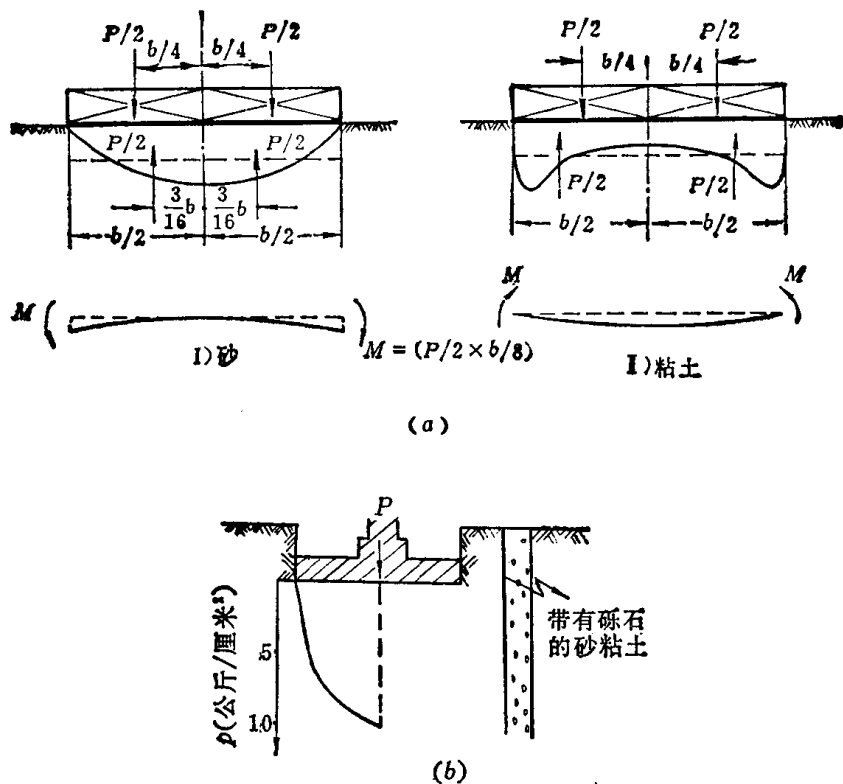


图1-10 弹性基础地基反力图

(a) 砂和粘土地基上的小型弹性基础地基反力和变形图；(b) 某基础下实测地基反力图。

由以上各图可见：

(1) 粘土上基础的地基反力与砂基上的不同，在同一荷载作用下，前者的地基反力较易集中于基础边缘，而后者基础边缘的地基反力则小。但是两者地基反力图形之间的差异随基础刚度的减小而减少（关于这个问题将在后面阐述）。

(2) 粘土地基与砂基两者之中，砂基应更适用基床系数法。例如图 1-9 中砂基上的集中荷载板及图 1-10(b) 的地基反力图形均为抛物线形，这与按基床系数法所得地基反力图形是相似的；而粘土的地基反力则比较接近于弹性理论法的相应图形。但是这并不意味着粘土地基就不能采用基床系数法，这是因为在船台滑道工程的基础梁板下面一般都铺有砂石垫层，其作用是：a. 分布荷载，改善地基受力条件；b. 满足必要的基础砌置深度；c. 避免基础边缘地基反力集中以致基础内力增加。这样，基床系数法对粘土地基似亦可适用。

上面介绍的是基床系数法与地基反力图形的关系，下面简略介绍一下基床系数法与地基变形的关系。

六十年代以来，在弹性地基的研究领域中，各向异性弹性体及非匀质的弹性体问题引起了广泛的兴趣。吉布森 (Gibson)⁽⁸⁷⁾ 研究了不可压缩的非匀质的弹性体问题，即土的物理力学性质随深度成线性变化而在水平面上则是各向同性的土体。他假设地基土的泊松比 $\mu_0 = 0.5$ (不可压缩土) 及地基弹性模量 $E(z) = E(0) + mz$ (z 为深度， m 为弹性模量比例系数)，通过理论推导，得出均布荷载圆形板产生的地基变形曲线，见图 1-11。

