

桩基工作特性分析的 神经网络模型

刘兴远 康景文 林文修 著



中国建筑工业出版社

桩基工作特性分析的 神经网络模型

刘兴远 康景文 林文修 著

中国建筑工业出版社

(京) 新登字 035 号

桩基工作特性分析的神经网络模型

著 林文修 康景文 刘兴远

桩基工作特性分析的神经网络模型

刘兴远 康景文 林文修 著

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

北京云浩印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 6 $\frac{1}{8}$ 字数: 162 千字

1999 年 5 月第一版 1999 年 5 月第一次印刷

印数: 1—2,000 册 定价: 10.00 元

ISBN7-112-00092-0

TU·54 (9271)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书分析了目前桩基础工作特性分析的几种方法,给出了桩基础工作特性分析解析解的完整表达式,讨论了桩基础工作特性分析研究中的几个主要问题;论述了多层前向网络的基本理论,重点阐述了多层前向网络应用中的若干问题;为了更好地把握岩土工程理论研究的方向和方法,本书提出了三个基本理论研究的方法论:矛盾统一论、等效模型理论和广义互补原理,在此理论基础上建立了单桩工作特性分析的神经网络模型框架体系。

对于山区而言,嵌岩桩的工作特性分析具有重要的研究和工程价值;为此,根据作者收集的嵌岩桩的试验资料,建立了确定嵌岩桩嵌岩段极限承载力计算的神经网络模型,并提出了用岩体风化系数描述嵌岩桩嵌入不同风化程度岩体对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响;另又提出了用自组织神经网络模型分析各特征参数对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响及特征参数提取的方法及用所建立的嵌岩桩嵌岩段极限承载力计算的神经网络模型分析了各特征参数对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响;并分析和讨论了嵌岩桩理论研究的几个热点问题。为了进一步说明该方法所具有的广泛适用性,又以水平荷载作用下模型桩的试验资料为基础,从三个方面具体化地建立了水平荷载作用下模型桩工作特性分析的神经网络模型。桩基础工作特性的反分析也是桩基础理论研究的一个重要课题,本书首次提出了桩基础工作特性分析的神经网络模型的反分析方法:直接法和间接法,并重点论述了神经网络模型反分析的直接法,且通过对嵌岩桩嵌岩段极限承载力计算的神经网络模型的反分析及仿真实例验证了此方法的正确性和适用性。

群桩工作特性的分析是桩基础理论研究的一个重要课题,本书首次提出用广义网络模型来描述群桩的工作特性。该法可充分考虑群桩的几何量对群桩工作特性的影响,同时又可反映单桩工作特性与群桩基础工作特性的非线性关系,并通过三组试验数据验证了本方法的正确性。最后本书阐述了桩基理论研究未来发展的几个方向。

本书适用于岩土工程和结构工程专业的硕士、博士学习参考之用,同时该书所述方法论同样适用于其它领域的科学研究。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 前 言	1
1.2 桩轴向荷载-沉降计算方法的简评及应用	1
1.2.1 一般性讨论	1
1.2.2 桩土系统共同工作的简化计算模型	3
1.2.3 简化计算模型的讨论	5
1.3 轴向荷载作用下单桩工作特性研究中的若干问题	12
1.3.1 引 言	12
1.3.2 桩基研究过程中的几个问题	12
1.3.3 小 结	20
1.4 本书的工作及安排	21
1.4.1 一种新思路	21
1.4.2 本书工作的几个基本点	21
1.4.3 本书的主要工作及安排	22
第2章 前向神经网络理论及应用	24
2.1 前 言	24
2.2 神经网络模型在岩土工程中的应用背景	25
2.3 BP网络模型的理论与学习算法	26
2.3.1 BP网络模型的基本结构及前向算法	26
2.3.2 BP网络模型的映射能力	28
2.3.3 BP网络模型的学习算法	30
2.3.4 BP网络模型的工程应用	32
2.4 BP网络模型使用中的若干问题	32
2.4.1 神经元作用函数的选择	33
2.4.2 样本的选择	34
2.4.3 收敛条件的选择及计算精度的控制	35
2.4.4 关于隐层节点自适应选择问题	36

2.4.5 关于最大值的选择	37
2.4.6 拟合曲线的可信性	37
2.4.7 BP 网络模型的限制问题	38
2.5 应用实例	39
2.6 小 结	40
第 3 章 单桩工作特性分析的神经网络模型体系框架	41
3.1 引 言	41
3.2 本书采用的几种方法论	42
3.2.1 矛盾统一论	43
3.2.2 等效模型	43
3.2.3 广义互补原理	45
3.3 单桩工作特性的神经网络模型	46
3.3.1 人工神经网络模型的结构形式	46
3.3.2 分层传递法 (串联 BP 网络模型)	47
3.3.3 关于 BP 网络模型映射关系的讨论	49
3.3.4 单桩工作特性神经网络模型中的若干问题	51
附录 1: 确定级联式 BP 网络模型权参数的算法	52
附录 2: 多输入、多输出 BP 网络模型权参数的训练程序	54
第 4 章 分层土中桩的竖向工作特性分析的神经网络模型	65
4.1 引 言	65
4.2 分层土中桩的荷载传递规律	65
4.3 分层土中桩单元神经网络子模型建立的一般方法	68
4.4 细粒土中桩段的荷载-沉降曲线计算的神经网络模型	69
4.5 粗粒土层中桩工作特性分析的神经网络模型	72
4.6 桩端土特性分析	75
第 5 章 嵌岩桩竖向工作特性分析	77
5.1 引 言	77
5.2 嵌岩桩竖向工作特性分析的神经网络模型	78
5.2.1 影响嵌岩桩工作特性的主要因素	78
5.2.2 轴向荷载作用下嵌岩桩的工作特性	79
5.2.3 嵌岩桩嵌岩段极限承载力确定的神经网络模型	80
5.2.4 嵌岩桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线的计算	89
5.2.5 小 结	92

5.3 影响嵌岩桩嵌岩段特性的特征量分析	93
5.4 影响嵌岩桩嵌岩段特性的参数分析	102
5.4.1 桩径对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响	102
5.4.2 岩石强度对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响	103
5.4.3 岩体风化程度对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响	103
5.4.4 桩长对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响	104
5.4.5 嵌岩深度对嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响	104
5.4.6 几点初步结论	104
5.5 计算实例	105
5.6 关于嵌岩桩理论发展的几点认识	107
5.6.1 嵌岩桩工作特性研究的基本情况	108
5.6.2 嵌岩桩理论研究的几个问题	109
5.6.3 小 结	111
第6章 水平荷载作用下桩基工作特性分析的神经网络模型研究	113
6.1 前 言	113
6.2 水平荷载作用下单桩工作特性分析的现状	114
6.2.1 水平荷载作用下桩的工作性能	114
6.2.2 水平承载桩的计算方法简述	115
6.2.3 弹性长桩的计算方法综述	115
6.3 水平荷载作用下桩基工作特性分析的神经网络模型研究	118
6.3.1 水平荷载作用下模型桩试验结果简介	119
6.3.2 模型桩桩顶 H_0 — y 曲线关系的神经网络模型	119
6.3.3 计算模型桩桩身各截面弯矩的神经网络模型	124
6.3.4 计算模型桩桩身各截面力学指标的神经网络模型	126
6.4 小 结	130
第7章 桩基工作特性分析的数值方法	132
7.1 引 言	132
7.2 桩基工作特性分析的有限元法	132
7.2.1 非线性有限元分析的增量法	133
7.2.2 有限单元的选取	134
7.2.3 节理单元的选取	134
7.2.4 桩周土的本构关系	136

7.2.5 边界条件	138
7.3 计算实例	138
7.5 小 结	140
第 8 章 影响桩基工作特性的参数反分析	142
8.1 引 言	142
8.2 特征参数反分析的一般方法	142
8.3 特征参数的神经网络模型反分析法	144
8.4 仿真算例	147
8.5 小 结	150
第 9 章 竖向荷载作用下群桩工作特性分析	
的神经网络模型研究	152
9.1 引 言	152
9.2 影响群桩工作特性的几个主要因素分析	152
9.2.1 桩间距的影响	153
9.2.2 承台的影响	153
9.2.3 桩长与承台宽度之比对群桩的影响	153
9.3 群桩工作特性分析的现有方法	154
9.4 群桩工作特性分析的神经网络模型	155
9.4.1 广义网络	155
9.4.2 群桩在工作荷载作用下的沉降值计算	156
9.4.3 承台土反力计算的神经网络模型	157
9.4.4 群桩工作特性分析的神经网络模型	158
9.5 小 结	161
第 10 章 论建筑桩基动态测试的几个理论问题	162
10.1 前 言	162
10.2 人工神经网络在动态测桩中的应用	163
10.3 建筑桩基动态测试的几个理论问题	163
10.3.1 理论模型	163
10.3.2 信号分析	164
10.3.3 思维方式的变革	165
10.3.4 专家系统的建立	166
10.3.5 信号的真实性及精度	167

10.4 小 结	168
第 11 章 基本结论及展望	169
11.1 基本结论	169
11.2 关于桩基础理论研究的几点思考	170
11.2.1 目前的方法	171
11.2.2 问题的焦点	172
11.2.3 思维方式的变革	173
11.2.4 可能的出路	174
11.3 今后工作的展望	176
参考文献	178

第1章 绪 论

1.1 前 言

随着现代社会的发展和城市人口的增加,城市和乡村的可用土地越来越少,城市建筑不得不向空间发展,随之而来的是必须解决高层建筑地基基础的设计问题。目前,高层建筑中地基基础所用费用约占工程整个费用的30%左右,为此正确、合理地解决基础设计问题是工程人员最为关心的问题之一。桩基础是在高层建筑中运用最多的一种深基础形式,桩基础工程特性的好坏直接关系到整个建筑的安全问题,因此,工程技术人员特别关心桩基的受力特性,在设计中必须正确合理地估计桩基础受力与变形特性。在桩基质量得以保证的前提下,桩基承载力的设计一般均趋于保守,这可由大量工程实例来说明。描述桩在轴向荷载作用下的工作特性是桩的轴向荷载-沉降全过程曲线,为此桩轴向荷载-沉降曲线的计算也就成为工程技术人员尤为关心的问题。必须注意的是桩基受力过程是桩-土系统相互作用的过程,桩基受力变形在很大程度上取决于岩土的特性,尽管人们已经注意到了这一点,但在实际计算时却对此点往往重视不够,正是由于岩土特性的复杂性才使桩-土系统表现出多种多样的形态。本章主要简述桩轴向荷载-沉降曲线计算方法,重点说明简化计算模型,并讨论与之相关的一些工程和理论问题。

1.2 桩轴向荷载-沉降计算方法的简评及应用

1.2.1 一般性讨论

桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线是评价桩土共同工作的基本依据, 如何从理论上解决桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线的计算是国内外岩土工程专家、技术人员共同关心的一个问题, 为此国内外有大量的学者以此为题做博士或硕士论文, 但是桩土系统是一个非常复杂的系统, 且是一个非线性力学系统, 其工程设计法仍处于半理论半经验的状态。目前, 计算桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线的方法主要有三类: (1) 弹性理论法; (2) 数值模拟法 (有限元法, 边界元法等等); (3) 简化模型法 (传递函数法, 剪切变形传递法等)。

弹性理论法是建立在集中力作用下的 Mindlin 解基础之上的, 由于弹性理论法不可能解决桩-土系统的非线性问题, 且难以考虑成层土问题, 故该法在使用上受到了较大的限制, 在工程实践中的应用具有一定的局限性。

数值计算方法是随着计算机的发展而迅速发展起来的一种计算方法, 在工程中应用最多的是有限元法, 其它的方法如边界元法、各种耦合方法等等也得到了广泛的应用。在使用数值方法时, 最重要也是理论研究中应用最多的是桩土边界模型 (或称为节理元模型), 许多论文中心工作也正在此处; 但是有限元法在计算时需要进行大量的数据准备工作, 特别是描述土特性的参数选取较为困难, 人为因素较多; 同时此法占用较大的计算机空间, 因此在实际工程设计中还难以得到广泛的应用。

数值计算方法主要用于理论研究, 讨论土特性的各种参数对桩土系统的影响; 另外由于土参数的复杂性和不确定性也使有限元法在应用上受到了一定的限制, 因此人们转而用它进行桩土工作特性的定性分析, 进而提出一些简化计算模型。

由于上述两种方法在应用上的局限性, 从而使人们努力寻找桩土系统共同工作的简化计算模型, 为此简化计算模型得到了很大的发展。本章针对这种情况, 主要讨论简化计算模型的形式及其存在的一些问题, 以期给人们对此问题有一个较全面的认识。

1.2.2 桩土系统共同工作的简化计算模型

为了深入了解和把握桩土系统共同工作的全貌以及简化计算桩在轴向荷载作用下荷载-沉降曲线的计算,人们主要相继提出了两种简化计算模型,它们是传递函数法及剪切变形传递法,下面就两种方法的要点简述如下。

1.2.2.1 传递函数法

该法根据桩—土系统的静载荷试验,实测桩在轴向荷载作用下桩轴线上各点的应变、位移及桩底反力,反算桩的侧摩阻力的分布及轴向荷载分布;而后假设桩侧摩阻力 $q(u)$ 的分布规律和桩底反力 $p(u)$ 的分布规律,且对实验数据进行曲线拟合,从而给出桩侧摩阻力和桩底反力与桩轴线相应位置上的位移间的联系,其实质是将土简化为一系列弹簧,组成桩弹簧系统的一维简化计算模型,如图 1.1 所示。

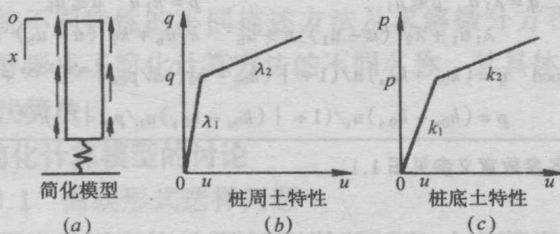


图 1.1 桩弹簧系统的一维简化计算模型

由桩轴线上任一点的平衡条件可建立如下的微分方程:

$$EA \frac{d^2 u}{dx^2} - q(u) = 0 \quad (1.1)$$

E —混凝土的弹性模量; A —桩横截面面积; u —桩在深度 x 处的位移; $q(u)$ —桩侧摩阻力的分布规律(传递函数)。

另外根据实测资料假定桩底土可用一个非线性弹簧来代替,即假定桩底土反力 $p(u)$ 为:

$$p = f(u) \quad (1.2)$$

边界条件为:

$$EAdu/dx \big|_{x=l} = -p \quad (1.3)$$

由方程 (1.1)、(1.2) 和 (1.3) 求桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线。

在求解微分方程 (1.1) 时, 由于 $q(u)$ 假设的不同及在求解方程 (1.1)、(1.2) 时其方法上的差异, 人们给出了不同的名称, 但其问题的本质就是荷载传递法。

$q(u)$ 的几种不同形式见表 1.1。

几种不同形式传递函数

表 1.1

名称来源	桩侧传递函数	桩底传递函数
佐腾悟法	$q = q_0 u / u_1$	$p = p_0 u / u_b$
Vijayargiya	$q = q_0 (2 \sqrt{u/u_1} - u/u_1)$	$p = p_0 (u/u_b)^{1/3}$
陈竹昌法	$q = q_0 (u/u_1)^{1/2}$	$p = p_0 (u/u_b)^{1/2}$
徐和等法	$q = q_0 / (0.65 + 0.35 u_1 / u)$	$p = p_0 / (0.6 + 0.4 u_b / u)$
双折线法	$q = \lambda_1 u \quad u \leq u_1$ $\lambda_1 u_1 + \lambda_2 (u - u_1) \quad u > u_1$	$p = k_1 u \quad u \leq u_b$ $k_1 u_b + k_2 (u - u_b) \quad u > u_b$
Ramberg—Osgood	$q = (k_{0u} - k_{0s}) u / (1 + (k_{0u} - k_{0s}) u / p_{0s} ^{ms})^{1/ms} + k_{0s} u$ $p = (k_{0u} - k_{0s}) u_t / (1 + (k_{0u} - k_{0s}) u_t / p_{0s} ^{ms})^{1/ms} + k_{ts} u_t$	

注: 表中各参数意义参见图 1.1。

表 1.1 中所列仅是各种传递函数中的一部分, 因为 $q(u)$ 和 $p(u)$ 是根据实测数据来进行拟合的, 故此其本质上是一致的, 仅形式不同而已。对此点的理解可参阅第三章中的一致性原理。

1.2.2.2 剪切变形传递法

剪切变形传递法的力学模型是由 Randolph, M.F 和 Worth.C.P 提出的, 此模型的几个假设中主要的一个假设是: 土的位移场可用受剪切作用的同心圆模型表示, 且剪应力随径向距离 r 的增大而减小, 同时有:

$$\tau_r = \tau_0 r_0$$

τ_r 为距离 r 处的剪切应力, τ_0 为桩土界面上的剪应力, r_0

为桩的半径。

由此假设可以推出桩表面位移 u 与桩土表面剪切应力的关系为:

$$u = \tau r_0 / G_i \ln((r_m / r_0 - \psi) / (1 - \psi)) \quad (\text{参见文献}[13]) \quad (1.4)$$

r_m 为剪切应力可以忽略不计的影响区, 且为 $2.5LP(1 - v_s)$, L 为桩长, P 为桩深度为 $L/2$ 与桩端剪变模量之比。 $\psi = \tau R_i \tau_{\max}$ 为剪应力—应变拟合常数; $\tau_{\max}$ 为破坏时剪应力, G_i 为初始剪变模量, 且 $G_i = E_i / 2(1 - v_s)$, v_s 为泊松比, E_i 为初始弹性模量。

桩端反力与桩端位移的关系与传递函数法相似, 桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线的简化计算模型的实质是将桩周土与桩底土简化为一系列的等效弹簧, 其力学系统为一桩弹簧系统, 对弹簧系统不同特性的不同描述方法及求解微分方程 (1.1) 方法上的差异形成了简化计算方法的不同名称, 其具体数值计算一般均为迭代算法。

1.2.3 简化计算模型的讨论

1.2.3.1 曲线形式选择问题

对于桩身质量完整且无缺陷的桩而言, 一般情况下, 桩身总是处弹性工作阶段, 故桩的竖向极限承载力主要是由土的特性决定的, 求解方程 (1.1) 的关键问题就是桩土表面侧摩阻力的表示方法, 为此不同学者提出了不同形式的 $q(u)$ 曲线形式, 如双曲线、双折线等等 (参见表 1.1), 所有不同的曲线形式在有关的参考文献中均可找到, 应该注意到 $q(u)$ 曲线的本质也只不过是不同形式的拟合曲线对试验数据进行拟合而已, 只要达到预先给定的精度, 任何形式的拟合曲线一般均是可以接受的; 由此可见荷载传递函数法从本质上讲是一种经验方法, 而不是一种严格的理论方法, 即不能从理论上直接给出 $q(u)$ 曲线的表达式, 事实上 $q(u)$ 曲线不仅与土的自身特性有关, 还和桩的埋

置深度，桩径等多种因素有关，例如同是粘土或亚粘土埋深不同，则 $q(u)$ 曲线的取法也不相同，具体实例参见文献 [11]。

由此可见如何选择合适的 $q(u)$ 曲线形式就是人们主要关心的一个问题，目前尚无一个统一的方法来选择 $q(u)$ 曲线形式，这也是必然的，因为它只能依靠大量的试验数据及相关的经验来选择，区域性经验不能一般化地简单地进行推广。一定要注意到这一点，否则照抄照搬的结果必然是错误的。前面已经说过桩径、桩长、埋置深度及岩土物理力学性能均会影响 $q(u)$ 曲线的形式，况且混凝土桩自身的力学性能及各种施工因素的影响人们并不完全清楚。

在缺乏实际的桩轴线各点应变、位移测量数据时，而仅知道地质勘察资料和桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线，能否估计出 $q(u)$ 曲线的表达式呢？这也是人们关心的一个问题，实际上剪切应变传递法提供了一条可能的途径，方程 (1.4) 实际上是 $q(u)$ 曲线的隐含表达形式，不过此时 $u = f(\tau)$ ($\tau = q$)，不能直接表示成 $\tau = f^{-1}(u)$ 的形式，为此可以根据地质勘察结果，从理论上做出 $u = f(\tau)$ 曲线，而后用拟合曲线方式转化为 $\tau = f^{-1}(u)$ 的形式，再用 $\tau = f^{-1}(u)$ 形式推算桩基在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线结果，调整 $\tau = f^{-1}(u)$ 的参数使理论计算结果和实测结果相一致；由此在缺乏实测数据情况，有望得到 $q(u)$ 曲线的具体表达形式（这里不展开具体讨论）。

1.2.3.2 双线性模型

为了深入研究和理解桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线特性在文献 [16] 中假设桩周土为均质土，且可用双折线方式表示 $q(u)$ 曲线（参见图 1.1）同时假设桩端土也为双折线模型，由此用方法 1 推导了桩在轴向荷载作用下的荷载-沉降曲线的一种递推式解析解，这对于我们理解桩的竖向极限承载力及动测桩基承载力是非常有帮助的。

然而桩周土与桩底土的特性是非常复杂的，文献 [16] 中仅给出了一种硬化模型，还不能说明桩—土体系的各种变化情况，

对于桩周土和桩底土至少还有下列三种情况需要进行考虑，这三种情况如图 1.2 所示，这对于我们对在桩—土系统共同工作中出现的各种复杂情况的理解是非常有利的。

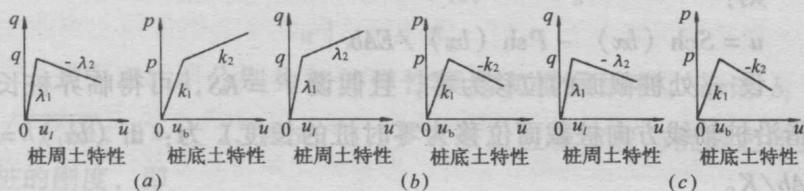


图 1.2 桩周土、桩底土特性的不同状况

在这三种不同情况下，桩—土系统特性的分析结果，在下面给出；但桩土系统总是非常复杂的，在上述任一情况下均需 9 个参数来描述桩土系统的性质，可见其复杂程度。

实际上桩周土多数情况下是分层的，而且各层土的特性可能有二种模型：一种是硬化模型，另一种是软化模型。各层土至少需三个参数来描述，可见分层土中桩基承载力及变形是这四种情况下的某一种组合方式的结果，对此人们是很难预料的。由此也可见，桩—土系统的特性变化之大是不难想象的。

另外需要指出的是，上面的讨论及文献 [16] 介绍的双折线简化模型实际上是对短桩和中长桩计算而言的；对长桩和超长桩其计算结果可能就是不正确的；实际上不能简单地假设桩底土刚度为零来确定微分方程 (1.1) 的解为纯摩擦桩的解，这一点我们可以这样来理解或许会更简单些，假设桩为无限长桩，微分方程 (1.1) 中桩周土也假设为线性模型，由此可得微分方程 (1.1) 的通解为：

$$u = c_1 \exp(bx) + c_2 \exp(-bx) \quad (b = \sqrt{\lambda_1/EA})$$

桩顶边界条件是：

$$u|_{x=0} = S \quad (\text{桩顶位移})$$

$$EA \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=0} = P \quad (\text{桩顶荷载})$$

可推导出:

$$c_1 = (S - P/EAb)/2;$$

$$c_2 = (S + P/EAb)/2;$$

则:

$$u = Sch(bx) - Psh(bx)/EAb$$

设 x_l 处桩截面的位移为零, 且假设 $P = KS$, 可得临界桩长(指沿桩轴线方向桩截面位移为零时桩的长度)为: $th(bx_l) = EAb/K$ 。

可见临界桩长是由桩周土及桩的特性决定的, 不同桩径和强度的混凝土桩, 临界桩长也是变化的; 若桩长超过临界桩长, 则文献[16]中的解无效。

1.2.3.3 桩荷载-沉降曲线计算的解析法

桩周土桩与底土特性是复杂的, 文献[16]中仅给出了一种硬化模型的解析算法。它还不能说明桩—土体系的各种变化情况, 对于桩周土和桩底土至少还有三种情况需要进行推导, 这三种情况如图 1.2 所示, 为此这里就图 1.2 (a) 所示的桩周土为软化模型的情况给出桩的荷载-沉降曲线计算的解析算法; 另外两种情况与此相似。

所用桩体和土的力学模型如图 1.1 (a) 所示, 其中假设桩体为匀质等截面弹性杆件, 桩周和桩底土的作用分别用双折线荷载传递函数来近似表达。图中 λ_1 和 $-\lambda_2$ 分别是桩周土弹性极限位移前、后所对应的抗剪刚度系数(参见图 1.2 (a)), 而 k_1 和 k_2 分别表示桩底土弹性极限位移前、对应的抗压刚度(参见图 1.2 (a))。在匀质地基中, 当桩顶受到轴向荷载作用时, 桩体各截面的轴力和沉降将随深度的增加而减小; 同时随桩顶荷载的增大, 桩周土将由浅向深逐渐进入塑性软化阶段直至破坏。

1.2.3.3.1 桩周土全部处于弹性阶段

为便于说明, 用 P 、 S 代表桩顶荷载和沉降, 而用 P_B 和 S_B 代表桩底所受反力和沉降, 其中后两者是下文公式推导过程中的