

# 匀质地基中桩、土间力传递模拟正、反分析\*

施景勋 林建华 林雪梅 叶国琛

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

**摘要** 把匀质地基中的桩、土之间力传递问题当作两种不同介质相互接触的平面应变问题来研究. 用边界元法来描述桩、土之间力传递的全过程, 并根据桩静载荷试验的  $P-S$  曲线, 反分析地基土体力学参数(压缩模量  $E_s$  和泊松比  $\mu$ ), 反分析采用单纯形法. 计算表明, 这能较好地反映实际工程中桩的工作情况.

**关键词** 桩, 匀质地基, 模拟, 力传递, 反分析

**分类号** TU 470.3

随着我国工程建设的蓬勃发展, 桩基础已成为重要的基础形式. 但桩基设计至今仍沿用经验计算方法, 这种方法未能反映桩、土间相互作用的机理, 且计算中的土力学参数是由室内试验得到, 或由经验确定, 有时与实际存在较大的差异. 为确保建筑物的安全, 不得不加大安全系数. 当前桩的长度和直径越来越大, 异型桩亦大量出现, 因此, 迫切希望有一种桩基设计计算的新方法. 桩基设计计算的新方法必须建立在桩、土之间力传递机理的认识基础上. 50 年代开始, 人们对桩、土共同工作的机理进行有益的实测研究, 由于问题的复杂性, 试验比较分散, 研究亦较缺乏系统性. 近年来, 我们课题组开始进行研究, 本文总结研究第一阶段的成果, 即探讨有效的桩、土间力传递机理的模拟方法, 以及模拟中土体参数应如何确定的问题. 因此, 我们取较简单的匀质地基, 且其桩顶受竖直向下荷载作用的平面应变问题作为研究对象. 用边界元法来描述桩、土之间力传递的全过程, 计算中的土体力学参数采用反分析桩静载试验所得荷载-沉降曲线得到. 算例表明, 这样模拟得到的极限承载力和桩顶沉降量与实测值基本吻合. 桩侧的摩阻力分布曲线与实测近似, 且计算简便. 本文不但对后续工作具有指导意义, 对实际工程中桩的设计和试验研究也具有相当的参考价值.

## 1 接触问题、接触条件和摩擦系数<sup>[1]</sup>

如图 1 所示, 设  $\Omega_1$  为桩域,  $\Omega_2$  为地基域, 在桩顶荷载  $P_0$  和土的测压力作用下共同工作, 这是两种不同介质的接触问题. 由于介质的物性和边界条件均不同, 它们的应力场和位移场亦不同.

桩土的交界面  $S$ . 称接触边界. 在外力系的作用下, 接触边界的力传递变化和位移变化情

\* 本文 1996-02-07 收到; 福建省自然科学基金资助项目

况是我们最关心的问题. 因为如果这些量能求出, 我们就可以把桩、土分别看做单独物体, 求出它们内部的应力场和位移场.

### 1.1 接触条件

如果把位于接触边界上具有相同坐标的桩、土接触点称为“接触点对”, 在外荷作用下设它们所受的面力分量为  $F_{cx}^{(\alpha)}$  和  $F_{cy}^{(\alpha)}$ , 位移分量为  $U_{cx}^{(\alpha)}$  和  $U_{cy}^{(\alpha)}$  ( $\alpha=1,2$ ), 则由库伦摩擦定理可知, “接触点对”可能处于下列两种状态.

(1) 完全接触状态. 此时有  $F_{cx}^{(1)} = -F_{cx}^{(2)}, F_{cy}^{(1)} = -F_{cy}^{(2)}, U_{cx}^{(1)} = U_{cx}^{(2)}, U_{cy}^{(1)} = U_{cy}^{(2)}$ ,

(2) 非完全接触状态. 此时有  $F_{cx}^{(1)} = -F_{cx}^{(2)}, F_{cy}^{(1)} = -F_{cy}^{(2)}, U_{cx}^{(1)} \neq U_{cx}^{(2)}, U_{cy}^{(1)} = U_{cy}^{(2)}, F_{cx}^{(\alpha)} = fF_{cy}^{(\alpha)}$ , 其中  $f$  为滑动摩擦系数.

算例表明, 除桩尖处自始至终处于完全接触状态外, 随着桩顶的  $P_0$  逐步增大, 桩测“接触点对”由“完全接触状态”逐渐发展成“非完全接触状态”, 其发展趋势是由桩顶向桩尖依次进行. 当“非完全接触点对”发展到桩底时, 桩尖土已到极限状态, 其相应的  $P_0$  称为桩的极限承载力. 如果土是理想弹塑性材料, 则将发生刺入破坏.

### 1.2 摩擦系数

当出现“非完全接触状态”, 桩、土间将发生滑移. 这种滑移可能是沿接触面进行; 亦可能沿接触面邻近, 且大体平行于最小阻力的土体内部进行. 到底发生在那里, 取决于桩、土接触面的应力状态和土的力学特性. 土处于弹性状态, 即沿桩、土接触面滑移, 其摩擦系数  $f_m$  是常量; 沿土体内部滑移, 土处于极限平衡状态, 其摩擦系数  $f_s$  与该点的应力状态有关, 是一个变量. 为了使计算程序趋于统一, 可根据土的极限平衡理论, 把  $f_s$  转化成当量的沿接触面的摩擦系数  $f_p$ , 即

$$f_p = \frac{(c + \sigma \tan \varphi) \sin \alpha}{(c + \tan \varphi)(\sin \varphi - \cos 2\alpha) + \sigma \cos \varphi}, \quad (1)$$

其中  $c$  和  $\varphi$  是土的粘聚力和内摩擦角;  $\alpha$  是最大主应力  $\sigma_1$  与  $x$  轴的交角;  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 + \cos 2\alpha(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ;  $\sigma_3$  是最小主应力.

## 2 关于正分析

对于与地基域  $\Omega_2$  的这种半无限平面域有关的问题, 用边界元法进行分析计算无疑可以减少计算工作量和得到较高的精度, 当给定桩、土各自的几何参数和力学参数后, 即可得边界元方程, 其矩阵形式为

$$HU = GF, \quad (2)$$

其中  $H$  和  $G$  是几何参数和力学参数的影响矩阵;  $U$  和  $F$  是边界结点的位移和面力列阵. 影响矩阵  $H$  和  $G$  的元素  $H_{ij}$  和  $G_{ij}$  分别为

$$H_{ij} = \sum_{j=1}^N \int_{S_j} P_{ij}^* \varphi_j dS, \quad G_{ij} = \sum_{j=1}^N \int_{S_j} U_{ij}^* \varphi_j dS, \quad (3)$$

其中  $N$  是边界结点数;  $i$  和  $j$  是矩阵的行和列号, 与结点号有关;  $S_j$  是与  $j$  结点对应的单元长

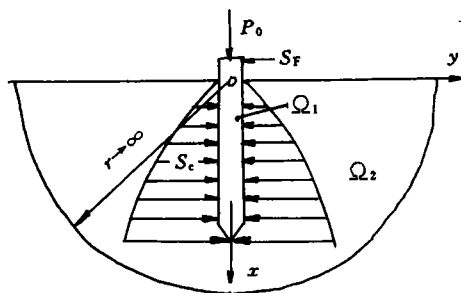


图1 桩、土受力示意图

度;  $\varphi_i$  是插值函数;  $P_{ij}^*$  和  $U_{ij}^*$  是单位作用力作用于  $i$  点时  $j$  点产生的面力和位移列阵. 对于桩域,  $P_{ij}^*$  和  $U_{ij}^*$  可采用众所周知的有限域基本解; 而土域我们采用任意形状弹性地基问题的无穷边界元法<sup>[2]</sup>的结论.

为求接触边界的面力和位移, 分别列出桩和土的边界元求解方程. 当取桩的接触面力  $F_{ej}^{(1)}$  和位移  $U_{ej}^{(1)}$  ( $j=1, 2$ ) 为基本未知量, 并用完全接触条件把两种求解方程联立起来, 可得

$$\begin{bmatrix} H_{ij}^{(2)} & H_{ij}^{(2)} & 0 & -G_{ij}^{(2)} \\ H_{ij}^{(1)} & 0 & H_{ij}^{(1)} & G_{ij}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ej}^{(1)} \\ U_j^{(2)} \\ U_j^{(1)} \\ F_{ej}^{(1)} \end{bmatrix} = P, \quad (4)$$

其中  $U_{ej}^{(1)}$  和  $F_{ej}^{(1)}$  是桩的接触边界的位移和面力;  $U_j^{(1)}$  和  $U_j^{(2)}$  分别是桩和土自由边界的位移;  $P$  是桩顶荷载  $P_0$  和桩侧土的侧压力  $P_Y$  有关的列阵. 式(4)是我们分析的出发点, 下面为其分析计算的步骤.

(1) 当给定一个  $P_0$  后, 用高斯列主元消去法解式(4), 得接触边界桩的各结点面力  $F_{ej}^{(1)}$  和位移  $U_{ej}^{(1)}$ .

(2) 计算桩侧“完全接触状态”的摩擦系数  $f = F_{ex}^{(1)} / F_{ey}^{(1)}$ ; 如果  $f < f_m$  (或  $f_p$ ), 说明该“接触点对”出现相对位移, 式(4)必须进行改造.

(3) 将式(4)出现“非完全接触状态”点的对应方程, 根据  $F_{ex}^{(o)} = f_m F_{ey}^{(o)}$  (或  $f_p F_{ey}^{(o)}$ ), 把该点的切向面力的影响系数  $G_{ix}^{(o)}$  乘以  $f_m$  (或  $f_p$ ) 加到该点的法向面力的影响系数  $G_{iy}^{(o)}$  上, 同时把该点土的切向位移的影响系数  $H_{ix}^{(o)}$  移到  $G_{ix}^{(o)}$  原来的位置上, 表示允许产生相对位移, 此时方程中的切向面力  $F_{ex}^{(o)}$  已由切向移  $U_{ix}^{(o)}$  代替.

(4) 进行上述改造后, 再一次利用高斯列主元消去法, 解经过改造后的未知量. 由于桩、土间的相对位移是微小的, 这种计算可不重新划分单元.

(5) 再次检查桩侧的其他“接触点对”是否出现新的滑动点, 如果出现新的滑动点, 必须重复上述步骤.

(6) 如果没再出现滑动点, 则检查桩尖土是否处于极限平衡状态. 如果已达极限平衡状态, 即可停止计算; 如果未达极限平衡状态, 输出成果并继续加大桩顶荷载, 重复上述步骤.

计算表明, 这种算法收敛速度快, 且不管桩顶荷载是多少, 桩侧摩阻力和桩尖反力之和总是与桩顶荷载平衡. 算例表明, 桩侧土压力对桩侧摩阻力的贡献只是一半左右. 尤其在桩顶附近, 其贡献更小, 但桩侧土压力的分布却对桩侧摩阻力分布曲线的形状影响很大, 今后应重视桩侧土压力分布的实测研究.

### 3 关于反分析<sup>[3]</sup>

在正分析时, 如果采用实验室或经验的土力学参数, 由于与现场存在着差异, 计算所得的桩顶沉降量往往与实测值存在出入. 为了取得符合实际的土力学参数, 我们认为利用目前业已存在的大量的桩基静载试验所得荷载~沉降曲线, 采用反分析的办法, 求出相当于桩的原位试验的土体力学参数, 较具有实用价值的.

在正分析的基础上, 加进反分析计算程序. 反分析时, 定义实测位移值  $S$  与计算位移值  $S^*$

差值的误差函数为  $Z$ , 则  $Z$  值为

$$Z = \sqrt{(S - S^*)^2}, \quad (5)$$

$S$  由桩静载试验的荷载—沉降曲线求得, 对于某一荷载,  $S$  是已知量,  $S^*$  则随正分析时选取的土层的压缩模量  $E_{si}$  和泊松比  $\mu_i$  的不同而变化, 故  $Z$  是  $E_{si}$  和  $\mu_i$  的函数. 反分析是求目标函数极小值相应的  $E_{si}$  和  $\mu_i$  的问题.

由于式(5)是一个复杂的非线性函数, 难以写成显式, 我们采用单纯形法进行优化设计. 单纯形法是在  $n$  维空间里对  $n+1$  个单纯形顶点的函数值进行比较, 去掉最坏的点, 代之以新的单纯形构成的新点, 依此循环逐步逼近极小值. 算例表明, 用反分析所得的力学参数, 再回代入正分析, 所得的桩顶沉降量与实测值基本吻合.

## 4 算例

福州某工地 64 号桩, 该桩是锤击沉管灌注桩, 其桩长 19.8 m, 设计的单桩承载力是 250 kN, 试桩得到极限承载力为 350 kN, 相应的桩顶位移是 25.34 mm.

在分析时, 用工程勘察报告中的场地土层参数资料(表 1 中的初始值), 按分层地基的厚度进行加权平均, 作为匀质地基正分析的土力学初始参数, 并引进实测桩顶的荷载—沉降曲线进行反分析, 所得的土体参数为表 1 中的分析值.

表 1 土体参数初始值和优化后的值

土 层	$E_s/\text{MPa}$		$\mu$	
	初始值	分析值	初始值	分析值
粘 土	3.0	3.90	0.3	0.25
淤 泥(I)	1.4	2.01	0.4	0.35
淤泥混粗砾砂	5.5	6.41	0.35	0.30
含粗砂砂质粘土	6.0	6.91	0.33	0.28

由分析值回代再进行正分析, 得桩侧摩阻力分布曲线如图 2, 与实测形状很相似. 计算所

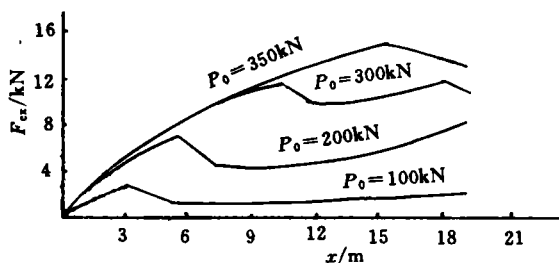


图 2 桩侧摩阻力分布曲线

得的极限荷载 350 kN 与实测值吻合, 桩顶荷载  $P_0$ , 桩侧摩阻力  $F_{sx}$  和桩端反力  $P_b$  列于表 2. 从表 2 可以看出, 桩端反力  $P_b$  并不是随桩顶荷载  $P_0$  的增大而成比例增大, 而是随着桩顶荷载的增大, 其增大比例逐步增加. 桩顶位移的实测值  $S$  与反分析后的计算值  $S^*$  列于表 3. 可以看出, 它们亦基本吻合.

表 2 桩顶荷载、桩侧摩阻力和桩端反力表

$P_0/\text{kN}$	$F_{sx}/\text{kN}$	$P_b/\text{kN}$	$P_b/P_0/(\%)$
100	92.87	7.13	7.68
200	184.85	15.15	8.20
300	224.30	75.70	33.7
350	258.60	101.40	39.2

表 3 桩顶位移实测值和反分析算值

$P_0/\text{kN}$	$S/\text{mm}$	$S^*/\text{mm}$
100	2.36	2.07
200	5.52	5.61
300	14.86	14.53
350	25.34	25.17

5 结束语

本文叙述了匀质地基桩、土之间力传递模拟的正、反分析的思路和步骤,并用一个算例说明这种方法的可行性.除为今后研究分层地基的桩、土力传递模拟问题、受水平荷载桩问题以及群桩问题打下基础外,该方法也有一定的应用价值.

参 考 文 献

- 1 施景勋,叶国琛.匀质地基中桩、土间力传递的边界元模拟.岩土工程学报,1994,16(6):64~72
- 2 林建华,施景勋.任意形状弹性地基问题的无穷边界元法.岩土工程学报,1993,15(6):44~52
- 3 林雪梅,施景勋.利用桩静载试验反分析地基土体参数.工程力学(增刊),1995,1 445~1 450

Positive and Inverse Analysis of the Simulation of Force Transmission between Pile and Soil in Homogeneous Base

Shi Jingxun Lin Jianhua Lin Xuemei Ye Guoshen

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** The force transmission between pile and soil in homogeneous base is studied as plane strain occurred by mutual contact of two different media. The whole process of force transmission between pile and soil is described by boudary element method. An inverse analysis is conducted on the parameters of soil mechanics of the base, compressed modulus  $E_s$  and Poisson's ratiou, according to  $P\sim S$  curve of pile dead load test. The inverse analysis is conducted by adopting simplex method. As demonstrated by the calculation, the working condition of pile in practical engineering can be well reflected.

**Keywords** pile, homogeneous base, simulation, force transmission, inverse analysis